

基于频谱空隙利用率的频谱感知时间优化

沈一豪¹, 李莉^{1*}, 裴仁超¹, 罗汉文^{1,2}

(1. 上海师范大学 信息与机电工程学院, 上海 200234;

2. 上海交通大学 电子信息与电气工程学院, 上海 200240)

摘要: 频谱感知是认知无线电中最基础的技术之一, 频谱空隙利用率(USOP)是评价认知用户实际感知性能的重要指标. 分析了影响USOP的因素, 证明了存在最优的感知时间可以使USOP达到最大, 并且在传输速率为100 kb/s, 数据包大小为500 bits, 虚警概率为0.9, 检测概率为0.9的条件下, 得到最优频谱感知时间约为2 ms.

关键词: 认知无线电; 频谱感知; 频谱空隙利用率

中图分类号: TN 929.5 **文献标志码:** A **文章编号:** 1000-5137(2017)01-0028-05

Spectrum sensing time optimization problem based on the USOP

Shen Yihao¹, Li Li^{1*}, Pei Renchao¹, Luo Hanwen^{1,2}

(1. College of Information, Mechanical and Electrical Engineering, Shanghai Normal University, Shanghai 200234, China;

2. School of Electronic and Electrical Engineering, Shanghai Jiao Tong University, Shanghai 200240, China)

Abstract: Spectrum sensing is one of the most basic technology of cognitive radio. Utilization of spectrum opportunity (USOP) is an important index of actual perception performance evaluation of the cognitive users. We analyses several factors that influence USOP, and proves the existence of optimal time perception which maximize USOP. When the transmission rate is 100 kb/s, the packet size is 500 bits, the false-alarm probability is 0.9, and the detection probability is 0.9, the calculated optimal spectrum perception of time is about 2 ms.

Key words: cognitive radio; spectrum sensing; spectrum space utilization

0 引言

认知无线电技术通过使未授权用户伺机使用空闲的授权频段, 改善了未授权频段拥挤而授权频段未能充分利用的问题. 由多个具有认知能力的用户节点组成的网络称为认知无线网络, 认知用户(CR)能自动检测到空闲授权频段并接入使用, 因此频谱感知是认知无线网络的基础.

检测概率和虚警概率是频谱感知的两项重要指标. 检测概率指在频段被占用的情况下正确检测到主用户在工作的概率, 虚警概率指在频段空闲的情况下错误检测到主用户在工作的概率, 前者的值越高

收稿日期: 2016-11-29

基金项目: 国家自然科学基金青年项目(61503251)

作者简介: 沈一豪(1993-), 男, 硕士研究生, 主要从事自适应信号处理与无线通信方面的研究. E-mail: 421540156@qq.com

导师简介: 罗汉文(1949-), 男, 教授, 主要从事无线通信方面的研究. E-mail: hwluo@sjtu.edu.cn

* 通信联系人. E-mail: lilyxuan@shnu.edu.cn

越好,后者的值越低越好.一般情况下,检测概率的值增高,虚警概率的值也会增高,如何在保持较高检测概率的情况下尽可能降低虚警概率是一个值得考虑的问题. Liang 等^[1]提出存在一个最优的感知时间,在限制认知用户检测频谱的虚警概率的情况下,使整个认知无线网络的吞吐量最大化.

在认知用户发送端和接收端之间成功地实现通信,不仅取决于对频谱空隙的正确检测,还和两者之间数据能否准确传输有关. 认知用户频谱感知的表现和主用户(PU)的活动都会影响到频谱空隙利用率(USOP). 另外,频谱空隙利用率还可以作为频谱分配的依据,把空闲频谱优先分配给那些利用率较高的认知用户,李磊等^[2]提出的基于模糊逻辑的频谱分配算法中就用到了频谱利用率.

Ozgerd 等^[3]研究了对空闲频谱正确检测的概率和认知用户之间数据准确传输对频谱空隙利用率的影响,但并没有考虑感知时间的影响. 因为认知无线电用户不可能长时间占用某一个频段,所以通信的时隙很短,把认知用户实现成功通信的时间分为频谱感知和数据传输两个时隙,当认知用户增加频谱感知的时隙,则虚警概率就会降低,这意味着认知用户有更多的机会去接入空闲频段,但同时数据传输的成功率会因为传输时隙的减少而降低. 本文作者证明了存在最优的频谱感知时间,使认知无线网络中的频谱空隙利用率达到最大化.

1 系统模型

1.1 检测模型

通常对于特定的频段,如果经过滤波器后接收到的信号还包含授权用户或者其他认知用户所传输的信号,则该频段被占用;反之,接收到的频段滤波后只有噪声,则认为这个频段未被占用,是一个二元的信号检测模型,因此根据频谱是否被占用,其状态可以归结为:

$$x(n) = \begin{cases} u(n), & n = H_0 \\ s(n) + u(n), & n = H_1 \end{cases}, \quad (1)$$

式中 $s(n)$ 是主用户发射机发出的信号; $x(n)$ 是认知无线电接收到的信号; $u(n)$ 是均值为 0, 方差为 σ_n^2 的加性高斯白噪声; H_0 假设目前在某一确定的频段上没有主用户; H_1 假设目前存在主用户.

频谱空隙(SOP)的检测概率是指在主用户不工作的情况下检测出信道是空闲的概率. 为此,定义主用户空闲的时间为 T_I , 主用户工作的时间为 T_B . T_I 和 T_B 分别服从参数为 α 和 β 的指数分布. 因此,它们的概率密度分布函数各自表示为 $f_I(t) = \frac{1}{\alpha} e^{-\frac{t}{\alpha}}$, $f_B(t) = \frac{1}{\beta} e^{-\frac{t}{\beta}}$, 主用户空闲的概率 $P_{\text{off}} = \frac{\alpha}{\alpha + \beta}$, 主用户工作的概率为 $P_{\text{on}} = \frac{\beta}{\alpha + \beta}$ ^[4].

采用频谱感知当中运用最多的检测方法——能量检测,记感知时间为 τ , 采样频率为 f_s , 则采样点数为 $N = \tau f_s$, 能量检测的检验统计量为:

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

当 N 足够大时,频段被占用情况下的检测概率可以表示为^[5]:

$$P_d(\tau) = \Pr\{X > \lambda \mid H_1\} = P_{\text{on}} Q\left[\frac{\lambda - 2\tau f_s (\sigma_s^2 + \sigma_n^2)}{\sqrt{4\tau f_s (\sigma_s^2 + \sigma_n^2)}}\right], \quad (3)$$

式中 λ 为判决门限, σ_s^2 为信号 $s(\tau)$ 的方差, $Q(\cdot)$ 函数 $Q(\cdot)$ 定义为:

$$Q(x) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \int_x^{\infty} e^{-t^2/2} dt. \quad (4)$$

频段空闲情况下的虚警概率为:

$$P_f(\tau) = \Pr\{X > \lambda \mid H_0\} = P_{\text{off}} Q\left(\frac{\lambda - 2\tau f_s \sigma_n^2}{\sqrt{4\tau f_s \sigma_n^4}}\right). \quad (5)$$

1.2 认知用户感知模型

因为认知无线电用户不可能长时间占用某一个频段,所以通信的时隙很短,把认知用户实现成功通信的时间分为频谱感知时间(τ)和数据传输时间(t)两个时隙.一方面,增加感知时间可以降低频谱检测的虚警概率,提高检测概率,但会造成认知用户之间由于没有足够的数据传输时间而通信失败,从而降低实际的频谱空隙利用率;另一方面,减少感知时间可以增加认知用户的数据传输时间,从而提高通信的成功率,但同时也会提高频谱检测的虚警概率,降低实际的频谱空隙利用率.因此,需要找到最优的频谱感知时间使频谱空隙利用率达到最大.

2 频谱空隙利用率

在认知无线网络中,主用户拥有在任意时间使用授权频段的优先权,认知用户只能主用户之间没有通信的时候才能接入空闲频段.通信链路的建立不仅取决于认知用户之间的物理距离,还和频谱空隙出现的几率有关.因此,对频谱空隙的利用在实际应用中是十分重要的,把这个利用率定义为频谱空隙利用率.

对频谱空隙利用的第一步是需要对空闲频谱进行正确感知,第二步是把数据包没有错误地发送到接收端.所以,频谱空隙利用率受到认知用户频谱感知表现的制约以及网络拓扑结构的影响.假设的网络拓扑结构,如图1所示.

在图1结构中,主用户的通信半径 R 远远大于认知用户的通信半径 r ,以下对 USOP 的影响分析都基于这种网络拓扑结构.其中,是否存在频谱空隙,以及在认知用户发送端和接收端之间对频谱空隙的利用,都取决于主用户的活动、发送端频谱感知的表现和接收端接收的成功率.此外,由于在使用授权频段时主用户必须要处于空闲状态,所以数据包的大小 N_b ,速率 R_b 等对频谱空隙利用率都有重要的影响,数据传输的成功率为^[6]:

$$P_T(\tau) = \Pr\left\{T_1 > \frac{N_b}{R_b} + \tau\right\} = \int_{\frac{N_b}{R_b} + \tau}^{\infty} \frac{1}{\alpha} e^{-\frac{t}{\alpha}} dt = \exp\left[-\frac{1}{\alpha}\left(\frac{N_b}{R_b} + \tau\right)\right]. \quad (6)$$

正确检测到空闲频谱的概率记为 $P_v(\tau) = P_r\{\text{Idle} | H_0\}$, 定义为:

$$P_v(\tau) = P_{\text{off}} - P_f(\tau) = P_{\text{off}} Q\left(\frac{2\tau f_s \sigma_n^2 - \lambda}{\sqrt{4\tau f_s \sigma_n^2}}\right). \quad (7)$$

当认知用户正确检测到空闲频谱,同时数据传输的时候主用户也不在工作,那么就实现了认知用户之间的通信.因此,频谱空隙利用率可以表示为:

$$P_U(\tau) = P_v(\tau) P_T(\tau) = [P_{\text{off}} - P_f(\tau)] P_T(\tau) = P_{\text{off}} Q\left(\frac{2\tau f_s \sigma_n^2 - \lambda}{\sqrt{4\tau f_s \sigma_n^2}}\right) \exp\left[-\frac{1}{\alpha}\left(\frac{N_b}{R_b} + \tau\right)\right]. \quad (8)$$

3 感知时间的优化

虚警概率会随着感知时间的增加而减少,这意味着认知用户有更大的机会去接入空闲的信道,但这也可能导致由于没有足够的时间进行数据传输而通信失败^[7].由(8)式,优化目标可表示为:

$$W = \max P_U(\tau), 0 < \tau < \tau_{\text{max}}, 0 < P_U(\tau) < 1. \quad (9)$$

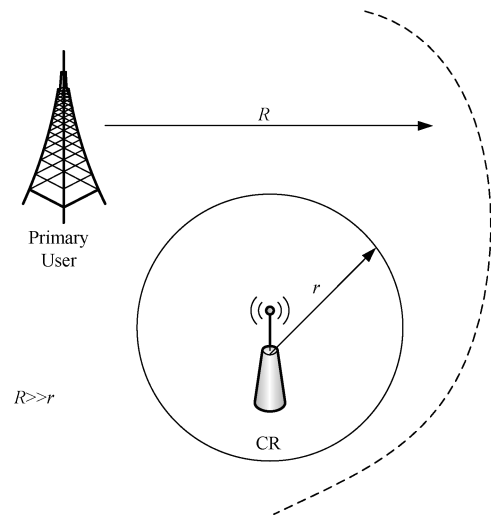


图1 认知无线网络拓扑结构

假设存在一个最优解 τ_{opt} 使认知无线网络中的频谱空隙利用率达到最大.

证明 首先,对 $P_U(\tau)$ 进行求导,得:

$$P'_U(\tau) = P_{\text{off}} \exp\left[-\frac{1}{\alpha}\left(\frac{N_b}{R_b} + \tau\right)\right] \left\{ \frac{1}{\sqrt{2\pi}} B(\tau) \exp\left(-\frac{A^2(\tau)}{2}\right) - \frac{1}{\alpha} Q[A(\tau)] \right\}, \quad (10)$$

$$\text{式中 } A(\tau) = \frac{2\tau f_s \sigma_n^2 - \lambda}{\sqrt{4\tau f_s \sigma_n^2}}, B(\tau) = \frac{1}{2} \tau^{-\frac{1}{2}} \sqrt{f_s} \sigma_n + \frac{\lambda}{4\sqrt{f_s} \sigma_n} \tau^{-\frac{3}{2}}.$$

当感知时间 τ 趋向于无穷大时,由于

$$\lim_{\tau \rightarrow +\infty} \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \exp\left[-\frac{A^2(\tau)}{2}\right] B(\tau) = 0, \lim_{\tau \rightarrow +\infty} \frac{1}{\alpha} Q[A(\tau)] > 0,$$

且 $P_{\text{off}} \exp\left[-\frac{1}{\alpha}\left(\frac{N_b}{R_b} + \tau\right)\right] > 0$, 所以

$$\lim_{\tau \rightarrow +\infty} P'_U(\tau) < 0. \quad (11)$$

另一方面,当 τ 趋向于 0 时,由于

$$\lim_{\tau \rightarrow 0} \frac{1}{\alpha} Q[A(\tau)] > 0, \lim_{\tau \rightarrow 0} \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \exp\left[-\frac{A^2(\tau)}{2}\right] B(\tau) \rightarrow \infty,$$

且 $P_{\text{off}} \exp\left[-\frac{1}{\alpha}\left(\frac{N_b}{R_b} + \tau\right)\right] > 0$, 所以

$$\lim_{\tau \rightarrow 0} P'_U(\tau) > 0. \quad (12)$$

由(11)、(12)式可知,当感知时间 τ 较小时,频谱空隙利用率 $P_U(\tau)$ 会增加;当 τ 趋向于无穷大时, $P_U(\tau)$ 会减小. 因此,在 $[0, +\infty)$ 存在一个使 $P_U(\tau)$ 达到最大的感知时间 τ_{opt} .

4 仿真结果

针对第3节的分析结果进行了仿真,同时还对影响 USOP 的几个因素也进行了仿真分析. 参考[2]和[3],设参数传输速率 $R_b = 100$ kb/s,数据包大小 $N_b = 500$ bits,虚警概率 $P_f = 0.9$,检测概率 $P_d = 0.9$,采样频率 $f_s = 6$ MHz.

图2为感知时间和 USOP 的关系曲线图. 从图2可知,当感知时间增加到 2 ms 时,频谱空隙利用率达到最大,这和上一小节的分析相吻合,即最优感知时间为 2 ms.

图3为不同的数据包大小 N_b 下,虚警概率和频谱空隙利用率的关系曲线图. 从图3可知,一方面,在相同的 N_b 下,频谱空隙利用率随着虚警概率的增大而减小,说明在虚警概率过高的情况下,认知用户对空闲频谱的利用率会很低,这会大大降低整个系统的感知性能;另一方面,在相同的虚警概率下,随着 N_b 从 50 bits 增加到 150 bits,频谱空隙利用率越来越低,因此数据包越大越不利于提高频谱空隙利用率.

图4为不同的传输速率 R_b 下,虚警概率和频谱空隙利用率的关系曲线图. 从图4可知,在 R_b 相同时,频谱空隙利用率随着虚警概率的增大而减小;在虚警概率相同时,不同 R_b 的频谱空隙利用率之间相差不大,说明在一定范围内, R_b 的大小对认知用户的空闲频谱利用率影响较小.

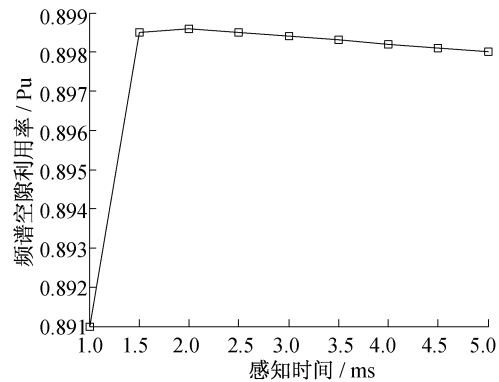
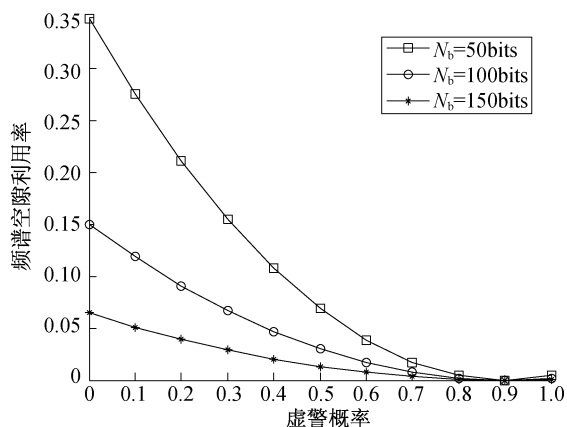
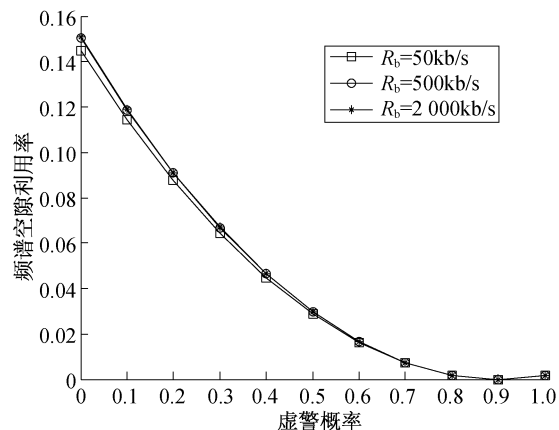


图2 感知时间和 USOP 的关系曲线图

图3 不同 N_b 下虚警概率和频谱空隙利用率的关系曲线图图4 不同 R_b 下虚警概率和频谱空隙利用率的关系曲线图

5 总结

研究分析了影响频谱空隙利用率的因素,证明了存在最优的感知时间使频谱空隙利用率达到最大,并且在传输速率为 100 kb/s,数据包大小为 500 bits,虚警概率为 0.9,检测概率为 0.9 条件下,计算得到最优的频谱感知时间为 2 ms 左右.但本文作者只在一种认知无线网络拓扑结构中,对影响 USOP 的因素进行了分析,没有考虑不同的网络拓扑结构对 USOP 的影响,比如主用户的通信半径并非远大于认知用户的通信半径,甚至小于认知用户通信半径的结构.在不同的网络拓扑结构下,最优的频谱感知时间也会不同,有待进一步研究.

参考文献:

- [1] Liang Y C, Zeng Y H, Peh E C Y, et al. Sensing-Throughput tradeoff for cognitive radio networks [J]. IEEE Transactions on Wireless Communications, 2008, 7(4): 1326 - 1337.
- [2] 李磊, 李莉, 陈小丹, 等. 基于模糊逻辑的频谱分配算法 [J]. 上海师范大学学报(自然科学版), 2014, 43(2): 137 - 142.
Li Lei, Li Li, Chen X D, et al. Spectrum allocation algorithm based on fuzzy logic [J]. Journal of Shanghai Normal University (Natural Sciences), 2014, 43(2): 137 - 142.
- [3] Ozger M, Akan O B. On the utilization of spectrum opportunity in cognitive radio networks [J]. IEEE Communications Letters, 2016, 20(1): 157 - 160.
- [4] Lee W Y, Akyildiz L F. A spectrum decision framework for cognitive radio networks [J]. IEEE Transactions on Mobile Computing, 2010, 10(2): 161 - 174.
- [5] Pradhan H, Kalamkar S S, Banerjee A. Sensing-Throughput tradeoff in cognitive radio with random arrivals and departures of multiple primary users [J]. IEEE Communications Letters, 2015, 19(3): 415 - 418.
- [6] Oto M C, Akan O B. Energy-Efficient packet size optimization for cognitive radio sensor networks [J]. IEEE Transactions on Wireless Communications, 2012, 11(4): 1544 - 1553.
- [7] Chaudhari S, Kosunen M, Mäkinen S, et al. Performance evaluation of cyclostationary-based cooperative sensing using field measurements [J]. IEEE Transactions on Vehicular Technology, 2016, 65(4): 1982 - 1997.

(责任编辑:顾浩然,包震宇)