

一种基于 IEEE802.22 标准 TSS 策略的跨层时隙调度方案

孙 君 朱洪波

(南京邮电大学江苏省无线重点实验室 南京 210003)

摘 要: 该文首次将跨层设计思想引入 IEEE802.22 标准草案里关于感知时隙调度方案的设计中。为达到提高系统整体性能的目的, 采用跨层设计思想, 对目前 IEEE802.22 草案中关于 TSS(Two-Stage Sensing)方案中的参数作了进一步研究和定义。从两方面提出一种新的关于 MAC 层感知时隙调度的方案。一方面, 基于物理层的无线衰落信道二阶统计特性定义了快速感知时隙的调度频率; 另一方面, 以最大化非授权用户传输吞吐量为目标, 得到细微感知的最佳持续时间。结果证明该文提出的方案使 MAC 层的 TSS 方案更加明确、有效并能适应不同传输环境变化的目的。

关键词: 无线通信; 感知时隙调度; 快速感知时间; 细微感知时间; 跨层设计; 两段式感知

中图分类号: TN92

文献标识码: A

文章编号: 1009-5896(2010)03-0629-04

DOI: 10.3724/SP.J.1146.2009.00612

One Cross-layer Scheduling Scheme Based on the TSS in IEEE802.22 Standard

Sun Jun Zhu Hong-bo

(Wireless Key Laboratory of Jiangsu Province, Nanjing University of Posts and Telecommunications, Nanjing 210003, China)

Abstract: In this paper, one sensing-slots scheduling scheme is proposed by using cross-layer design based on IEEE802.22 draft standard. In order to improve the whole system performance, the parameters of TSS scheme in current IEEE802.22 draft are further studied and modified by using cross-layer design. A new sensing-slots scheduling scheme on the MAC layer is proposed from two aspects. First, on the basis of the second-order statistic properties of wireless fading channels on the physical layer, the scheduling frequency of fast sensing timeslot is defined. Then, in order to maximize the transmission throughput for secondary users, the duration of fine sensing stage is optimized. It is proven that the scheme proposed in this paper makes the TSS scheme more explicit, effective and be able to adapt to varying transmission environments.

Key words: Wireless communication; Sensing-slots scheduling; Fast sensing time; Fine sensing time; Cross-layer design; Two-Stage Sensing(TSS)

1 引言

IEEE802.22^[1-3] 是首个利用认知无线电(CR)^[4-6] 技术, 试图实现在不影响频段原有授权使用者的情况下, 利用频段空闲(例如, TV 频段等)进行无线通讯, 尽最大可能地利用频谱资源进行通讯的标准。是继 802.16 之后一个极有前途的系统。IEEE802.22 在设计初期便将干扰(无线系统的共存性)作为系统设计考虑的重要因素。其协议设备一定要具有实时检测信道活动, 以及在最短的时间内协调整个网络的设备停止使用该信道的能力。这需要

物理层和 MAC 层的共同配合, 是协议的最大挑战。

对应于 802.22 系统的具体应用环境, 系统提出了感知技术的两个关键参数, 即信道检测时间(CDT)和授权用户感知门限(IDT)。对应 VHF/UHF 频段内的两类授权用户, 信道检测时间定义为不大于 2 s。对于 200 kHz 无线麦克风, 授权用户感知门限为 -107 dBm; 而对应 6 MHz 的电视服务, 授权用户感知门限为 -116 dBm。

信道检测时间是指在 WRAN 系统正常工作时, 用来检测在当前 TV 信道内是否有感知门限之上的用户存在所花费的最大时间, 在检测概率大于 90% 的情况下, 这个时间约为 500 ms~2 s。当联合多个用户预定设备(CPE)共同感知时, 可以缩短感知时间, 也可以保证较高的感知正确率。

在 IEEE 802.22 系统中, 为了实现对授权用户保护, 提出工作信道内和工作信道外感知机制。工作信道内感知, 基站(BS)分配静默期^[7]。在静默期内,

2009-04-24 收到, 2009-09-28 改回

国家 973 计划项目(2007CB310600), 博士后科学基金(20080441067), 博士后特别资助(200902528)江苏省博士后科研资助(0802017B), 国家 863 计划重点项目(2009AA011300)和国家科技重大专项课题(2009ZX03003-002, 2009ZX03007-004)资助课题

通信作者: 孙君 freyjajune@163.com

BS 和 CPE 都不发送数据, 感知小区内授权用户信号。工作信道内采用两段式感知(TSS)机制^[1-3], 如图1所示。

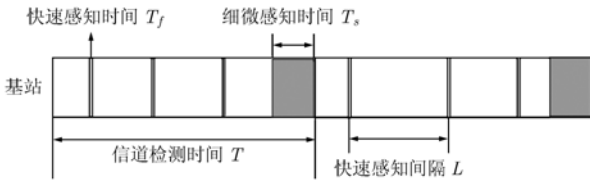


图1 TSS 机制框图

在快速感知阶段, 通常采用单一的感知方法(如能量检测、导频信号能量检测), 迅速感知是否存在授权用户, 这个过程通常在微秒级。如果快速感知阶段发现授权用户存在, 在细微感知阶段进一步获取已捕获的授权用户的详细信息。这个过程通常在毫秒级, 如检测 ATSC 信号的同步字段需要 24 ms。工作信道外感知, CPE 利用独立的感知天线, 可以同时感知工作信道外的用户情况。

由此可以看到, BS 分配静默期的持续时间和频率无论对授权用户还是非授权用户的传输性能都是会产生影响的。静默期越长, 频率越高, 认知节点的检测概率越高, 此时能更好地保护授权用户。同时, 这会影响用户业务数据传输的吞吐量, 并且由此带来的时间延迟也会对用户 QoS 产生影响。因此, 对用户而言, 尤其是正在使用空闲信道的非授权用户, 希望有一个合理的静默期的持续时间和频率, 能够在一定检测概率下最小化虚警概率, 使得非授权用户能有更多的机会传输更多的业务数据。为此, 需要对 TSS 机制中的主要参数, 细微感知时间 T_s 和快速感知间隔 L 进行优化和定义。这在目前的 IEEE802.22 标准草案中是没有出现的。

本文根据物理层和 MAC 层跨层设计思想对以上问题进行探讨, 试图找到可行的解决方案。本文结构如下, 第 2 节对快速感知间隔进行了定义; 第 3 节对细微感知时间进行了优化; 第 4 节在以上参数基础上, 提出新的 MAC 层感知时隙调度方案; 最后是结果分析及结论。

2 快速感知间隔定义

从非授权用户角度考虑, 在物理层由于受到深衰落信道的影响, 为保证无差错传输, 需要使传输的中断概率低于某一给定值 ε , 即

$$P_{\text{out}} = P_r \left\{ \frac{1}{2} \lg(1 + \gamma_s) < R \right\} \leq \varepsilon \quad (1)$$

要保证非授权用户以大于 R 的吞吐量进行业务传输, 必须保证非授权用户的信道信号噪声比(CSNR)

大于等于式(1)中所要求的 γ_s 。零中断概率条件下, 非授权用户 CSNR 的中断门限由式(1)可得

$$\gamma_s = e^{2R} - 1 \quad (2)$$

此外, 在此定义非授权用户使用空闲频带的频带可用 CSNR 门限 γ_{th} 为 IDT 门限。因此, 非授权用户接入可用频带并且保证其最大传输吞吐量的 CSNR 应该满足 $\gamma_s \leq \gamma < \gamma_{\text{th}}$ 。根据信道平均衰落持续时间的物理含义^[8], 本文把快速感知间隔 L 定义为 CSNR 在区间 $[\gamma_s, \gamma_{\text{th}})$ 的平均衰落持续时间, 即

$$L = \frac{p(\gamma_s \leq \gamma < \gamma_{\text{th}})}{N_2 - N_1} \quad (3)$$

其中 $p(\gamma_s \leq \gamma < \gamma_{\text{th}})$ 表示 γ 落在区间 $[\gamma_s, \gamma_{\text{th}})$ 内的概率。 $N_j, j = 1, 2$ 表示衰落信道的电平交叉率, 瑞利衰落信道条件下的表达式为 $N_j = \sqrt{\frac{2\pi\gamma_j}{\bar{\gamma}}} f_D e^{-\gamma_j/\bar{\gamma}}$, f_D 为衰落信道的最大多普勒频率。瑞利衰落信道条件下, 式(3)化简为

$$L = \frac{e^{-\gamma_2/\bar{\gamma}} - e^{-\gamma_1/\bar{\gamma}}}{\sqrt{2\pi} f_D \left[\sqrt{\frac{\gamma_2}{\bar{\gamma}}} e^{-\gamma_2/\bar{\gamma}} - \sqrt{\frac{\gamma_1}{\bar{\gamma}}} e^{-\gamma_1/\bar{\gamma}} \right]} \quad (4)$$

3 细微感知时间优化

细微感知时间 T_s 的确定要兼顾用户特别是非授权用户在该频带上的可达到吞吐量以及对授权用户检测时所要求达到的检测概率。在此, 我们仍从非授权用户角度考虑。假设非授权用户在授权用户没有出现时的传输吞吐量为 C_0 , 根据文献[9], 非授权用户在授权用户没有出现并且没有虚警概率的条件下, 可达到的吞吐量 R 的表达式为

$$R = \frac{T - T_s}{T} (1 - P_f) C_0 \quad (5)$$

因为在一个 T 内, 快速检测时间所占比例很小, 即假设一个 T 内有 l 个快速检测 T_f , 那么有 $T - lT_f \approx T$, 因此, 式(5)中不考虑快速检测时间的影响。虚警概率 P_f ^[10] 与检测授权用户时所要求达到的给定检测概率 \bar{P}_d 有关, 即

$$P_f = \frac{1}{2} \text{Erfc} \left(\frac{1}{\sqrt{2}} \frac{\gamma_d - 2m}{\sqrt{4m}} \right) \quad (6)$$

$$\gamma_d = 2 \text{Erfc}^{-1}(2\bar{P}_d) \sqrt{2m(2\bar{\gamma} + 1)} + 2m(\bar{\gamma} + 1) \quad (7)$$

其中, $\text{Erfc}(\cdot)$ 表示互补误差函数, γ_d 是授权用户的检测门限, $\bar{\gamma}$ 是衰落信道的平均 CSNR。参数 m 是时间带宽积, 如果能量检测的带通滤波器带宽为 W , 观察时间为 T , 则 $m = TW$, 根据文献^[10], 如果采样频率与主用户的带宽相同, 即 $f_s = W$, 则在观察时间 T_s 内有 $m = T_s f_s$ 。式(7)是对式(8)^[10]求逆得到的。

$$P_d = \frac{1}{2} \text{Erfc} \left(\frac{1}{\sqrt{2}} \frac{\gamma_d - 2m(\bar{\gamma} + 1)}{\sqrt{4m(2\bar{\gamma} + 1)}} \right) \quad (8)$$

式(8)是非衰落信道下检测概率表达式,在衰落信道,如瑞利衰落信道条件下, P_d 的公式非常复杂^[10],不可能通过对函数求逆得到 γ_d 的闭合表达式。为此,我们从概率平均角度求衰落信道条件下的授权用户检测门限,即

$$\bar{\gamma}_d = \int_{\gamma} \gamma_d f_{\gamma}(\gamma) d\gamma \quad (9)$$

其中 $f_{\gamma}(\gamma)$ 表示衰落信道 CSNR 的概率密度函数。在瑞利的衰落情况下,式(9)表示为

$$\begin{aligned} \bar{\gamma}_d &= \int_{\gamma} \gamma_d f_{\gamma}(\gamma) d\gamma \\ &= \int_0^{\infty} [2 \operatorname{Erfc}^{-1}(2\bar{P}_d) \sqrt{2m(2\gamma+1)} + 2m(\gamma+1)] \\ &\quad \cdot \frac{1}{\gamma} e^{-\gamma/\bar{\gamma}} d\gamma \\ &= 4\sqrt{m\bar{\gamma}} \operatorname{Erfc}^{-1}(2\bar{P}_d) e^{1/2\bar{\gamma}} \Gamma\left(\frac{3}{2}, \frac{1}{2\bar{\gamma}}\right) \\ &\quad + 2m\bar{\gamma} e^{1/\bar{\gamma}} \Gamma\left(2, \frac{1}{\bar{\gamma}}\right) \end{aligned} \quad (10)$$

其中 $\Gamma(a, z) = \int_z^{\infty} t^{a-1} e^{-t} dt$ 。式(10)为瑞利衰落信道条件下检测门限与目标检测概率的关系表达式。为此,根据式(5),式(6)和式(10),有以下公式

$$\left. \begin{aligned} \max \quad & R = \frac{T - T_s}{T} (1 - P_f) C_0 \\ \text{s.t.} \quad & P_d \geq \bar{P}_d \end{aligned} \right\} \quad (11)$$

通过对式(11)求解,得到不同信道条件下的最优细微检测时间 T_{sopt}

4 MAC 层感知时隙调度

根据以上参数的定义,参照图 1,基于 IEEE802.22 标准 TSS 策略的跨层时隙调度方案如下。在 IEEE 802.22 系统中,假设非授权用户已占用空闲的授权用户信道,并适时地进行工作信道内感知,以一个 T 为单位,在非授权用户传输数据的过程中,BS 首先以式(3)定义的时间间隔调度快速感知时隙,并根据快速感知的结果决定下一个感知时隙的调度,即是否需要进行细微感知。如果快速感知阶段发现授权用户存在,在下一个感知时隙进入持续时间为 T_{sopt} 的细微感知阶段,进一步获取已捕获的授权用户的详细信息。否则,下一个感知时隙仍为快速感知时隙。因为在感知阶段需要占用非授权用户的传输时间,因此,根据以上参数定义的感知时隙会尽可能少地减少非授权用户损失。同时,根据功率控制使感知和传输同步进行的方案也在研究中。此外,该方案是以信道条件已知为前提的,根据不同的信道条件,决定时隙调度中各个参数。需要将不同信道条件下的参数值事先制成表格,以

备选择。

5 仿真分析

根据文献[11]和 IEEE802.22WRAN 标准,目标检测概率 $\bar{P}_d = 0.9$,信道检测时间 $T=200$ ms。授权用户假设为 QPSK 调制信号,信号带宽为 6 MHz。

表 1 给出了快速感知在瑞利衰落信道不同的平均 CSNR 下的平均间隔数值,衰落信道的最大多普勒频率为 10 Hz。可以看出,随着物理层信道条件的变化,MAC 层对感知时隙的调度也需要有相应的调整。当信道条件改善时,快速感知的平均间隔增加,即对快速感知时隙的调度频率减少,相反,信道条件差时,快速感知的平均间隔减少,即对快速感知时隙的调度频率增加。例如,在信道的平均 CSNR 为 5 dB 时,快速感知调度的平均间隔时间为 25.94 ms。

表 1 快速感知在不同平均 CSNR 下得到的平均间隔

平均 CSNR (dB)	1	3	5	10	15
平均间隔 L (ms)	16.33	23.26	25.94	29.83	33.74

当非授权用户接收端接收到授权用户的 CSNR 为-15 dB 时,图 2 给出细微检测时间 T_s 与非授权用户可达到吞吐量的关系曲线图。实线所示是文献[11]给出的非衰落信道条件下给出的结果。交叉点标注的线是根据本文式(9)得到的衰落信道条件下检测时间 T_s 与非授权用户可达到吞吐量的关系曲线。从图中可以看出衰落信道条件下,非授权用户可达到的吞吐量比非衰落信道条件要低,但是两种信道条件下要达到目标检测概率并且保证非授权用户最大吞吐量所需要的最优细微检测时间是一致的,即都需要定义同样的 T_{sopt} 完成对授权用户的检测。

当非授权用户接收端接收到授权用户的 CSNR 为-10 dB 时,图 3 给出细微检测时间 T_s 与非授权用户可达到吞吐量的关系曲线图。十字线所示是文献[11]给出的非衰落信道条件下给出的结果。星号线是根据本文式(9)得到的衰落信道条件下检测时间 T_s 与非授权用户可达到吞吐量结果。与图 2 比较,当非授权用户接收端接收到授权用户的 CSNR 增加时,衰落信道和非衰落信道条件下的细微检测时间的差别减少,例如图 3 中两条曲线几乎重合。但是,随着非授权用户接收端接收到授权用户 CSNR 的增加,细微检测的最优持续时间也急剧缩短,如图 3 所示,最优检测持续时间为 0.4 ms 左右,比图 2 中的 3 ms 左右缩短近 10 倍。

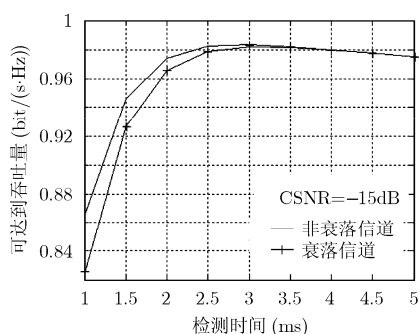


图 2 归一化的非授权用户可达到吞吐量

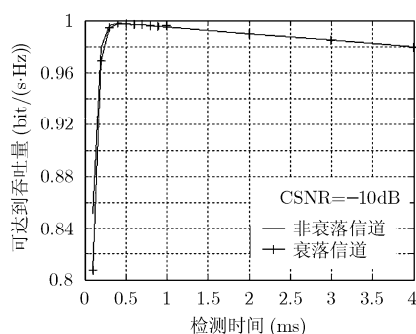


图 3 归一化的非授权用户可达到吞吐量

6 结论

本文主要探讨了 IEEE802.22 草案中关于 TSS (Two-Stage Sensing) 机制中的时隙调度参数, 从物理层和 MAC 跨层设计角度, 对相关参数进行了定义和优化, 并以此建立新的时隙调度方案, 得到结论如下:

(1) MAC 层快速检测的次数或对快速检测时隙进行调度的频率应该是随物理层信道条件变化而变的。当信道条件好时, 快速检测的频率低, 反之, 则高, 这样的策略可以保证系统传输的有效性, 提高频带利用率, 减少传输中断次数。

(2) 从非授权用户可达到传输吞吐量角度, 得到了 TSS 中细微检测的最佳持续时间, 该时间与非授权用户接收端接收到授权用户的信道信号噪声比有密切关系, 并与信道环境密切相关。此外, 当 CSNR 增加时, 非授权用户可达到传输吞吐量受信道环境的影响减弱; 并且细微检测的最佳持续时间急剧缩短。对细微检测最佳持续时间的调整, 不仅可以使 MAC 层调度自适应信道环境变化, 而且可以保证非授权用户的最佳可达到传输吞吐量。

此外, 本文的方案依赖于对信道条件判断的准确程度, 当对信道条件判断不准确或物理层感知出现误差时, 对系统性能的影响还有待进一步研究。

参考文献

- [1] Stevenson C, Chouinard G, and Lei Zhong-ding. IEEE 802.22: The first cognitive radio wireless regional area network standard [J]. *IEEE Communications Magazine*, 2009, 47(1): 130-138.
- [2] Liang Ying-chang, Hoang Anh-tuan, and Chen Hsiao-hwa. Cognitive radio on TV bands: A new approach to provide wireless connectivity for rural areas [J]. *IEEE Wireless Communications*, 2008, 15(3): 16-22.
- [3] Sherman M, Mody A N, and Martinez R. IEEE standards supporting cognitive radio and networks, dynamic spectrum

- access, and coexistence [J]. *IEEE Communications Magazine*, 2008, 46(7): 72-79.
- [4] Yucek T and Arslan H. A survey of spectrum sensing algorithms for cognitive radio applications [J]. *IEEE Communications Surveys & Tutorials*, 2009, 11(1): 116-130.
- [5] Niyato D and Hossain E. Cognitive radio for next-generation wireless networks: an approach to opportunistic channel selection in IEEE 802.11-based wireless mesh [J]. *IEEE Wireless Communications*, 2009, 16(1): 46-54.
- [6] Gueguen L and Sayrac B. Sensing in cognitive radio channels: A theoretical perspective [J]. *IEEE Transactions on Wireless Communications*, 2009, 8(3): 1194-1198.
- [7] Cordeiro C and Challapali K. Cognitive PHY and MAC layers for dynamic spectrum access and sharing of TV bands [J]. *ACM International Conference Proceeding Series*, 2006, 222(3): 25-32.
- [8] Goldsmith A. *Wireless Communications*, The Edinburgh Building, Shaftsbury Road, Cambridge, Cambridge University Press [M], 2005, Chapter 9.
- [9] Liang Y Ch, Zeng Y H, and Peh E. Sensing-throughput tradeoff for cognitive radio networks [C]. *IEEE International Conference on Communications ICC'07, Glasgow, Scotland*, 2007: 5330-5334.
- [10] Ghasemi A and Sousa S. Spectrum sensing in cognitive radio networks: the cooperation-processing tradeoff [J]. *Wireless Communications & Mobile Computing*, DOI: 10.1002/wcm, 2007, 7: 1049-1060.
- [11] Liang Y C, Zeng Y H, and Peh E. Sensing-throughput tradeoff for cognitive radio networks [C]. *IEEE International Conference on Communications ICC '07, Glasgow, Scotland*, 2007: 5330-5334.

孙 君: 女, 1980 年生, 博士后, 研究方向为异构网络融合、频谱理论、动态频谱管理、频谱感知、信道估计、系统性能分析和优化等。

朱洪波: 男, 1956 年生, 教授, 博士生导师, 长期从事通信工程、无线通信、电磁兼容、移动通信、宽带无线技术等教学和科研工作。