

宽带协作通信认知无线电的功率分配

刘 鑫^{1,2}, 贾 敏¹, 向 维³, 李秀华¹, 谭学治¹

(1. 哈尔滨工业大学 通信技术研究, 150080 哈尔滨; 2. 南京航空航天大学 航天学院, 210016 南京;
3. 澳大利亚南昆士兰大学 工程和测量学院, 4350 澳洲 昆士兰)

摘 要: 为了提高宽带认知无线电 (Cognitive Radio, CR) 和主用户 (Primary User, PU) 的传输速率, 提出了 CR 和 PU 之间协作通信的方案以及 CR 的最优子信道功率分配方法. 当检测到 PU 存在时, 该方案允许 CR 使用半个帧传输数据, 使用剩下的半个帧帮助 PU 协作传输. 基于此方案提出的功率分配能够使 CR 在不影响 PU 的同时获得更大的传输速率. 仿真表明: 相比传统的非协作通信, 提出的方案能够使 CR 和 PU 的传输速率同时获得提高.

关键词: 认知无线电; 协作通信; 传输速率; 功率分配; 主用户

中图分类号: TN929.5 文献标志码: A 文章编号: 0367-6234(2013)09-0007-05

Power allocation of wideband cognitive radio based on cooperative communication

LIU Xin^{1,2}, JIA Min¹, XIANG Wei³, LI Xiuhua¹, TAN Xuezhi¹

(1. Communication Research Centre, Harbin Institute of Technology, 150080 Harbin, China;
2. College of Astronautics, Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, 210016 Nanjing, China;
3. Faculty of Engineering and Surveying, University of Southern Queensland, 4350 Toowoomba, Australia)

Abstract: In order to improve the transmission rates of cognitive radio (CR) and primary user (PU), the cooperative communication scheme between CR and PU and the optimal sub-band power allocation are proposed respectively. If the presence of the PU is detected, the scheme allows CR to use half of the frame to transmit data while using the left half to help PU with cooperative transmission. The proposed power allocation based on the scheme can make CR achieve higher rate without influencing PU. Simulation results show that compared with the conventional non-cooperative communication, the proposed scheme can make improvements on the rates of both PU and CR.

Key words: cognitive radio; cooperative communication; transmission rate; power allocation; primary user

认知无线电 (Cognitive Radio, CR) 能够使用已经分配给主用户 (Primary User, PU), 但是暂时未被使用的空闲频谱, 以提高现有频谱资源的利用率. CR 在使用 PU 频谱之前, 需要依靠频谱感知探测 PU 的存在状态^[1]. 传统的方案中, 为了避免干

扰 PU, CR 只有当检测到 PU 不存在时, 才能够使用频谱^[2]. 能量检测由于执行简单并且不需要信号的先验知识, 被广泛地应用于 CR 的频谱感知中, 衡量检测性能的两个重要指标是虚警概率和检测概率^[3]. 协作通信通过产生分集增益可以提高系统的传输性能, 文献[4]指出接收机采用最大速率合并 (Maximal Ratio Combining, MRC) 所有协作中继转发的数据, 可以有效地提高传输速率.

文献[5]提出了采用正交频分复用 (Orthogonal Frequency Division Multiplexing, OFDM) 的 CR 功率分配算法, 通过优化功率减少 CR 对 PU 的干扰, 从而保护 PU 的正常通信. 文献[6]提出了 CR 频谱感知和传输功率的联合优化算法, 通过优化

收稿日期: 2013-12-03.

基金项目: 国家自然科学基金资助项目 (61201143), 教育部春晖计划资助项目 (Z2011156), 哈尔滨工业大学科研创新基金资助项目 (HIT-NSRIF-2010091), 中国博士后科学基金资助项目 (2012M510956), 黑龙江省博士后科学基金资助项目 (LBHZ11128).

作者简介: 刘 鑫 (1984—), 男, 讲师;
谭学治, (1957—), 男, 教授, 博士生导师.

通信作者: 贾 敏, jiamin@hit.edu.cn.

感知门限和功率, CR 的吞吐量可以获得提高. 文献[5]和[6]采用的是传统的非协作通信, 即 CR 和 PU 仅传输自己的数据. 文献[7]提出了基于 CR 间协作通信的功率分配算法, 但是 CR 间的协作会增加对 PU 的干扰, 这违背了 CR 不能干扰 PU 的初衷, 因此还必须考虑 CR 和 PU 间的协作. 文献[5-7]均假设只有当 CR 检测到 PU 不存在时, 才能够使用信道, 因此频谱利用并不充分.

本文提出了一个宽带 CR 和 PU 间协作通信的方案, 允许当 CR 检测到 PU 存在时仍能够使用半个帧传输数据, 同时在剩下的半个帧 CR 帮助 PU 协作传输. 基于该方案, 本文还提出了功率分配优化问题, 通过选择最优的功率, 在保证 PU 的传输速率、PU 受到的干扰、子信道检测概率和 CR 的总功率满足约束的前提下, 最大化 CR 的传输速率.

1 系统方案

1.1 宽带认知无线电

不同于窄带 CR, 宽带 CR 能够同时在多个空闲的子信道上进行数据传输, 因此能够提供更高的传输速率^[8]. 宽带 CR 的结构如图 1 所示, 子信道 3、5、6 和 9 没有被 PU 使用, 因此属于空闲子信道, 能够为 CR 提供频谱接入.

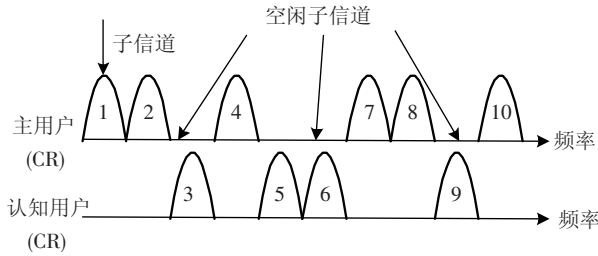


图 1 宽带认知无线电结构

CR 在传输数据之前必须检测子信道是否存在 PU, 如果存在 PU, CR 不能够在该子信道上进行数据传输. CR 通常采用能量检测法检测 PU, 因为能量检测法执行简单并且不需要 PU 信号的相关信息. 如图 2 所示, 能量检测法中, CR 首先采样接收到的 PU 信号, 然后将采样值的幅度平方和能量累加获得能量统计值, 将能量统计值和设定的门限作比较, 如果统计值大于等于门限, 判断 PU 存在, 否则判断 PU 不存在, 即信道空闲可用.

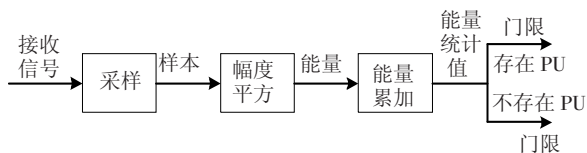


图 2 能量检测原理

假设宽带信道包括 L 个子信道, 能量检测在子信道 i ($1 \leq i \leq L$) 上的虚警概率 P_i^f 和检测概率 P_i^d 分别为^[9]

$$P_i^f = Q\left(\left(\frac{\lambda_i}{\sigma_{n,i}^2} - 1\right)\sqrt{M}\right), \quad (1)$$

$$P_i^d = Q\left(\left(\frac{\lambda_i}{\sigma_{n,i}^2} - \gamma_i - 1\right)\sqrt{\frac{M}{2\gamma_i + 1}}\right). \quad (2)$$

其中 λ_i 、 $\sigma_{n,i}^2$ 和 γ_i 分别为子信道 i 上的检测门限、噪声方差和 PU 信噪比; M 为采样点数. 函数 $Q(x) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \int_x^\infty \exp\left(-\frac{x^2}{2}\right) dx$. 通常要求检测概率 P_i^d 满足约束 $P_i^d \geq \alpha$ (IEEE802.22 要求 $\alpha \geq 0.9$ ^[10]), 因此根据式(2), 对于目标检测概率 α , 检测门限 λ_i 表示为

$$\lambda_i = \left(Q^{-1}(P_i^d) \sqrt{\frac{2\gamma_i + 1}{M}} + \gamma_i + 1\right) \sigma_{n,i}^2. \quad (3)$$

将式(3)代入式(1), 虚警概率由 α 表示为

$$P_i^f = Q\left(Q^{-1}(\alpha) \sqrt{2\gamma_i + 1} + \gamma_i \sqrt{M}\right). \quad (4)$$

1.2 传统方案

传统方案中, CR 只有检测到 PU 不存在时, 才能进行数据传输. 传输分为两种情况: 1) CR 正确检测到 PU 不存在, 子信道传输速率为 c_i^0 ; 2) PU 实际存在, 但是 CR 错误地检测到 PU 不存在, 子信道传输速率为 c_i^1 . c_i^0 和 c_i^1 分别表示为

$$\begin{cases} c_i^0 = \log\left(1 + \frac{p_i h_i^2}{\sigma_{n,i}^2}\right), \\ c_i^1 = \log\left(1 + \frac{p_i h_i^2}{(1 + \gamma_i) \sigma_{n,i}^2}\right). \end{cases}$$

其中 p_i 和 h_i 分别是子信道 i 上 CR 的发射功率以及 CR 发射机和接收机之间的信道增益. 因此传统方案中, CR 在 L 个子信道上的平均传输速率为^[6]

$$c = \sum_{i=1}^L ((1 - P_i^f) c_i^0 + (1 - P_i^d) c_i^1).$$

传统方案中, PU 的数据传输也分为两种情况: 1) CR 检测正确, PU 单独使用信道不会受到干扰, 传输速率为 r_i^0 ; 2) CR 检测错误, PU 和 CR 同时使用信道并互相干扰, 传输速率为 r_i^1 . r_i^0 和 r_i^1 分别表示为

$$\begin{cases} r_i^0 = \log\left(1 + \frac{p_i^s g_i^2}{\sigma_{n,i}^2}\right), \\ r_i^1 = \log\left(1 + \frac{p_i^s g_i^2}{p_i f_i^2 + \sigma_{n,i}^2}\right). \end{cases} \quad (5)$$

其中 p_i^s 、 g_i 和 f_i 分别是子信道 i 上的 PU 功率、PU 收发信机之间的信道增益和 CR 发射机和 PU 接

收机之间的信道增益. PU 在 L 个子信道上的平均传输速率为

$$r = \sum_{i=1}^L (P_i^d r_i^0 + (1 - P_i^d) r_i^1),$$

同时 PU 的标准速率 (CR 永远不会干扰 PU) 为

$$\hat{r} = \sum_{i=1}^L r_i^0. \quad (6)$$

1.3 提出方案

本文提出的方案如下:

1) 当 CR 检测到 PU 存在时, 可以用半个帧传输自己的数据和剩下的半个帧帮助 PU 协作传输数据. 提出的帧结构如图 3 所示.



图3 提出的帧结构

协作通信阶段, CR 作为中继, 将接收到的 PU 发射机信息转发给 PU 接收机, 因此 PU 的传输速率会得到提高. PU 接收端采用 MRC 合并 PU 和 CR 发射机的数据, 速率为

$$r_i^2 = \log \left(1 + \frac{p f_i^2 + p_i^s g_i^2}{\sigma_{n,i}^2} \right). \quad (7)$$

2) 当 CR 检测到 PU 不存在时, 能够用整个帧传输数据, 当 CR 检测到 PU 存在时, 能够用半个帧传输数据, 因此 CR 的平均速率为

$$\begin{aligned} \tilde{c} = & \sum_{i=1}^L ((1 - P_i^f) c_i^0 + (1 - P_i^d) c_i^1) + \\ & \frac{1}{2} \sum_{i=1}^L (P_i^f c_i^0 + P_i^d c_i^1) = \sum_{i=1}^L ((1 - 0.5 P_i^f) c_i^0 + \\ & (1 - 0.5 P_i^d) c_i^1). \end{aligned}$$

PU 传输时, 前半帧会受到 CR 的干扰, 后半帧受到 CR 的协作传输, 因此平均速率为

$$\tilde{r} = \frac{1}{2} \sum_{i=1}^L (r_i^1 + r_i^2). \quad (8)$$

相比非协作通信, 协作通信中认知无线电会对 PU 产生一定的干扰, 但只要干扰满足 PU 的容限, 认知无线电就可以进行数据传输. 而且当 PU 存在于子信道时, 由于 CR 仍然能够传输, 因此 CR 的可用带宽增加了, 吞吐量会有所提高.

2 功率分配优化

功率分配的优化目标是在保证 PU 的传输速率, PU 受到的干扰、子信道检测概率和 CR 的总功率满足约束的前提下, 最大化 CR 的传输速率. 优化问题表述为

$$\begin{cases} \max_{p_1, p_2, \dots, p_L} \tilde{c} \\ \text{s. t. } \tilde{r} \geq \hat{r}, \\ P_i^d \geq \alpha, p_i \geq 0, i = 1, 2, \dots, L, \\ \sum_{i=1}^L p f_i^2 \leq I_{\max}, \sum_{i=1}^L p_i \leq p_{\max}. \end{cases} \quad (9)$$

其中 $I_{\max}$ 为 PU 能够忍受的最大干扰功率. 对于 $\tilde{r} \geq \hat{r}$, 根据式(6)和(8)得

$$\tilde{r} - \hat{r} = \frac{1}{2} \sum_{i=1}^L (r_i^1 + r_i^2 - 2r_i^0).$$

为了便于计算, 使得 $\tilde{r} - \hat{r} \geq 0$ 的简单方法是 $r_i^1 + r_i^2 \geq 2r_i^0, \forall i = 1, 2, \dots, L$. 根据式(5)和(7)可得

$$\left(1 + \frac{p_i^s g_i^2}{p f_i^2 + \sigma_{n,i}^2} \right) \left(1 + \frac{p f_i^2 + p_i^s g_i^2}{\sigma_{n,i}^2} \right) \geq \left(1 + \frac{p_i^s g_i^2}{\sigma_{n,i}^2} \right)^2. \quad (10)$$

根据式(10)和 $p_i \geq 0$, 可以得到 p_i 的约束范围为

$$p_i \geq \xi_i^+, \quad \xi_i = \frac{(p_i^s g_i^2)^2}{\sigma_{n,i}^2 f_i^2} - \frac{\sigma_{n,i}^2}{f_i^2}.$$

其中 ξ_i^+ 表示为 $\max(\xi_i, 0)$. 另外根据式(1), P_i^d 和 P_i^f 均是关于 λ_i 的单调减函数, 因此只有当 P_i^d 和 P_i^f 均达到下边带时, $\tilde{c}$ 有可能取得最大值, 即 $P_i^d = \alpha$. 因此根据式(4), 式(9)进一步改写为

$$\begin{cases} \max_{p_1, p_2, \dots, p_L} \tilde{c} = \sum_{i=1}^L ((1 - 0.5 Q(Q^{-1}(\alpha) \sqrt{2\gamma_i + 1} + \gamma_i \sqrt{M})) \log(1 + \frac{p_i h_i^2}{\sigma_{n,i}^2}) + (1 - \\ 0.5\alpha) \log(1 + \frac{p_i h_i^2}{(1 + \gamma_i) \sigma_{n,i}^2})). \\ \text{s. t. } \sum_{i=1}^L p f_i^2 \leq I_{\max}, \sum_{i=1}^L p_i \leq p_{\max}, \\ p_i \geq \xi_i^+, i = 1, 2, \dots, L. \end{cases} \quad (11)$$

式(11)可以采用拉格朗日乘子算法求解, 令 $\beta_i = 1 - 0.5 Q(Q^{-1}(\alpha) \sqrt{2\gamma_i + 1} + \gamma_i \sqrt{M})$, 拉格朗日函数为

$$\begin{aligned} G(p_1, p_2, \dots, p_L) = & \sum_{i=1}^L \left(\beta_i \log \left(1 + \frac{p_i h_i^2}{\sigma_{n,i}^2} \right) + \right. \\ & \left. (1 - 0.5\alpha) \log \left(1 + \frac{p_i h_i^2}{(1 + \gamma_i) \sigma_{n,i}^2} \right) \right) - \\ & \lambda_1 \left(\sum_{i=1}^L p f_i^2 - I_{\max} \right) - \lambda_2 \left(\sum_{i=1}^L p_i - p_{\max} \right). \end{aligned}$$

式中 λ_1 和 λ_2 均是拉格朗日乘子. p_i 可以由 $\partial G / \partial p_i = 0 (i = 1, 2, \dots, L)$ 求解, 表示为

$$\hat{p}_i = \frac{(1 + \beta_i - 0.5\alpha)^2}{4(\lambda_1 f_i^2 + \lambda_2)^2} + \frac{\gamma_i \sigma_{n,i}^2 (\beta_i + 0.5\alpha - 1)}{2(\lambda_1 f_i^2 + \lambda_2) h_i^2} + \frac{\gamma_i^2 \sigma_{n,i}^{4/2}}{4h_i^4} + \frac{(1 + \beta_i - 0.5\alpha)}{2(\lambda_1 f_i^2 + \lambda_2)} - \frac{(2 + \gamma_i) \sigma_{n,i}^2}{2h_i^2}. \quad (12)$$

通过将式(12) 带入约束条件 $\sum_{i=1}^L p_i f_i^2 = I_{\max}$ 和 $\sum_{i=1}^L p_i = p_{\max}$, 可以求得 λ_1 和 λ_2 . 注意到 $p_i \geq \xi_i^+$, 式(11) 的最优解表示为

$$p_i^* = \max(\hat{p}_i, \xi_i^+).$$

3 仿真分析

仿真中认知无线电采样点数目 $M = 256$, 子信道数 $L = 8$, PU 在每个子信道的功率 $p_i^s = 5$ mW, 每个子信道噪声方差 $\sigma_{n,i}^2 = 10^{-3}$ mW, 信道增益 f_i, g_i 和 h_i 为 $-20 \sim -10$ dB.

图4是总功率 $p_{\max} = 40$ mW 和 80 mW, PU 的平均信噪比为 $-15 \sim -5$ dB 时, 提出的协作通信和传统的非协作通信 CR 速率的比较. 可以看出协作通信要明显好于非协作通信, 当 $p_{\max} = 80$ mW 时, 协作通信的 CR 速率保持在 $15 \text{ bit}/(\text{s} \cdot \text{Hz}^{-1})$ 之上, 而非协作通信只有当信噪比 ≥ -8 dB 时才能达到这个指标. 这是因为提出的协作通信允许 CR 在检测到 PU 存在时仍然能够使用信道进行传输.

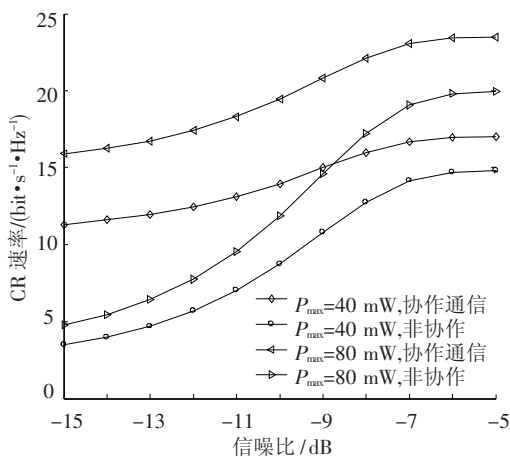


图4 不同总功率下 CR 的速率

图5是当子信道检测概率 $P_i^d = 0.90$ 和 0.95 时, 协作通信和非协作通信 CR 的速率比较. 可以看出, 相比非协作通信, 提出的协作通信仍然能够获得更高的 CR 速率. 当 P_i^d 增加时, CR 的速率反而降低, 这是因为虚警概率 P_i^f 和检测概率 P_i^d 具有相同的单调性, 因此频谱利用率随 P_i^d 的增加而降

低. 这表明: 提高检测概率和增加频谱利用率是矛盾的, 因此实际应用中检测概率下限 α 不宜选择过高.

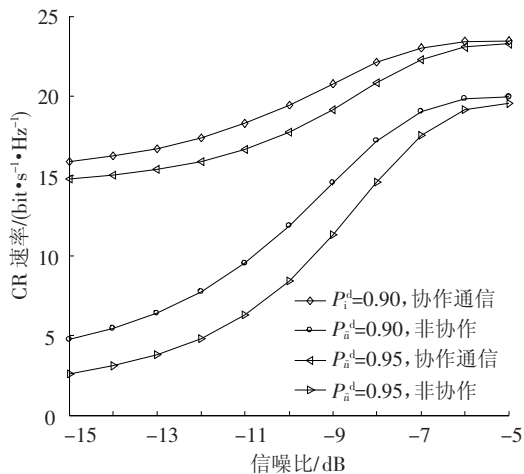


图5 不同检测概率下 CR 的速率

图6是最大干扰 $I_{\max} = 0 \sim 20$ mW 时, 不同方案 PU 速率的比较. 图中的直线表示 PU 的标准速率, 即认知无线电不对 PU 产生任何干扰时的速率. 可以看出, 非协作通信方案中, 随着 $I_{\max}$ 的增加, PU 速率是降低的, 这是因为如果 CR 漏检了 PU, 会使用信道而造成对 PU 的干扰. 而提出的协作通信方案, PU 的速率随着 $I_{\max}$ 的增加是提高的, 这是因为 $I_{\max}$ 增加, CR 可向 PU 传输的功率越高, 因此协作通信产生的收益越大.

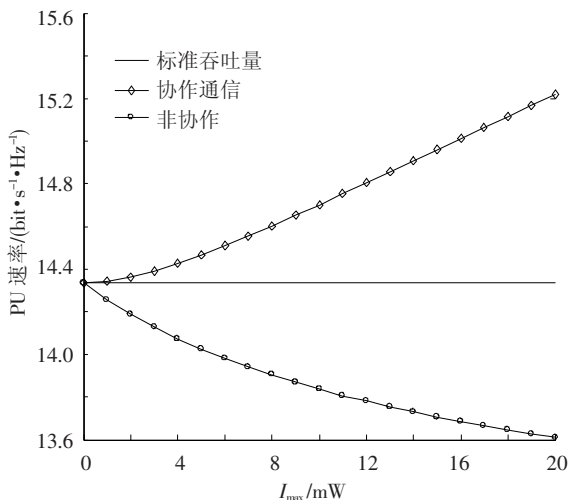


图6 不同方案 PU 速率比较

4 结 论

1) 本文提出了宽带 CR 和 PU 间协作通信的方案及相应的 CR 帧结构, 基于此方案还提出了功率分配优化问题. 该方案允许当检测到 PU 存在时, CR 能够使用半个帧传输数据, 同时用剩下的半个帧帮助 PU 协作通信.

2) 本文给出的最优功率分配, 能够使 CR 在保证 PU 的传输速率和受到的干扰、子信道检测概率和 CR 的总功率满足约束的前提下, 最大化 CR 的传输速率.

3) 仿真表明: 相比非协作通信, 该方案能够使 CR 获得更高的速率, 当总功率为 80 mW 时, CR 速率保持在 $15 \text{ bit}/(\text{s} \cdot \text{Hz}^{-1})$ 之上; 同时, 该方案还能够使 PU 速率获得提高.

参考文献

[1] HAYKIN S. Cognitive radio: brain-empowered wireless communications [J]. IEEE Journal on Selected Areas in Communications, 2005, 23(2): 201 – 220.

[2] HOSSAIN E, NIYATO D, HAN Z. Dynamic spectrum access in cognitive radio networks[M]. Cambridge, U. K: Cambridge University Press, 2009: 15 – 50.

[3] LIU X, TAN X Z. Optimization for weighed cooperative spectrum sensing in cognitive radio network [J]. Applied Computational Electromagnetics Society Journal, 2011, 26(10): 800 – 814.

[4] SHIN H D, SONG J B. MRC analysis of cooperative diversity with fixed-gain relays in Nakagami-m fading channels [J]. IEEE Transactions on Wireless Communications, 2008, 7(6): 2069 – 2074.

[5] KANG X, GARG H, LIANG Y C, *et al.* Optimal power

allocation for OFDM-based cognitive radio with new primary transmission protection criteria [J]. IEEE Transactions on Wireless Communications, 2010, 9(6): 2066 – 2075.

[6] HUANG X, BALTASAR B L. Joint optimization of detection and power allocation for OFDM-based cognitive radios [C]//2010 IEEE Global Telecommunications Conference. Miami: [s. n.], 2010: 1 – 6.

[7] ZHAO C, KWAK K. Joint sensing time and power allocation in cooperatively cognitive networks[J]. IEEE Communications Letters, 2010, 14(2): 163 – 165.

[8] QUAN Z, CUI S, SAYED A H, *et al.* Optimal multiband joint detection for spectrum sensing in cognitive radio networks [J]. IEEE Transactions on Signal Process, 2009, 57(3): 1128 – 1140.

[9] TAN X Z, LIU X, ANGHUWO A A. Optimization algorithm for cooperative detection in cognitive radio [C]//2012 IEEE Wireless Communications and Networking Conference (WCNC). Paris: [s. n.], 2012: 1 – 6.

[10] KIM H, SHIN K G. In-band spectrum sensing in IEEE 802.22 WRANs for incumbent protection [J]. IEEE Transactions on Mobile Computing, 2010, 12(9): 1766 – 1779.

(编辑 张 宏)