

认知无线电 MAC 层多用户协同感知机制优化

王 玲 彭启琮

(电子科技大学 通信与信息工程学院, 四川 成都 611731)

摘 要: 为了有效快速的寻找到频谱空洞并不对主用户造成干扰, 频谱感知是认知无线电系统中具有重要意义的一环。而多用户协作感知可以进一步提高系统性能。本文关注认知无线电 MAC 层两种频谱感知机制主动感知和被动感知机制。在多用户协作的场景下, 分析主用户活跃度对感知性能造成的影响。并提出了一种低复杂度的折衷接入延时和功率消耗的优化策略。通过理论分析和仿真结果可以看出, 主动和被动感知机制下多用户协作感知可以有效的减小信道搜索时间, 优化算法帮助动态地选取感知机制减小系统开销。

关键词: 认知无线电; 感知机制; 协同感知; 信道搜索; 信道监测

中图分类号: TN **文献标识码:** A **文章编号:** 1003-0530(2011)04-0508-06

Optimization of MAC-layer Multi-user Cooperative Spectrum Sensing Mechanism in Cognitive Radio

WANG Ling PENG Qi-cong

(University of Electronic Science and Technology of China, School of Communication and Information Engineering, Sichuan Chengdu 611731)

Abstract: Aimed at efficient and fast searching of spectrum opportunities, while avoiding interference to primary users, spectrum sensing play a significant role in cognitive radio system. Generally, multi-user cooperative sensing can enhance the performance of system. Hence, this paper is focus on the characteristics of two kinds of sensing mechanism such as proactive and reactive sensing policy in a multi-user cooperation situation, and analyzes the sensing performance over the activity level of primary users. We proposed a optimization strategy of making a tradeoff between access delay and sensing overhead. Through the theory analysis and simulation, multi-user cooperative sensing in proactive and reactive mechanisms also reduce the channel searching interval.

Key words: Cognitive radio; sensing mechanism; cooperative sensing; channel searching; channel monitor

1 引言

随着无线通信技术的迅速发展,以往固定分配频谱的方式已经让有限的频谱资源日益紧缺。认知无线电[1]作为一种动态频谱分配方式的出现,提供解决用户需求与频谱资源紧缺之间矛盾的解决方案。认知无线电也因此得到越来越广泛的关注。在认知无线电系统中,认知用户需要准确和迅速地感知周围无线电环境,找出适合通信的频谱空洞,并避免对主用户造成干扰。因此,有效的频谱感知在认知无线电系统中具有重要的意义。频谱感知可以分为两层的感知功能:物理层感知与 MAC 层感知。物理层感知技术主要关注如何有效检测主用户信号及寻求可用的频谱资源;而 MAC 层感知技术目的则在于建立感知机制以提高系统

性能。目前对频谱感知的研究主要集中在物理层频谱感知技术,而对 MAC 层感知机制的建立与优化研究相对较少。

MAC 层协议在文献中被广泛的研究,其中[2]的作者分析和比较了不同多信道 MAC 层协议的性能。传统的 MAC 层协议与认知无线电的 MAC 层协议有许多不同。最重要的一点区别是以往在传统无线网络中固定可分配给用户的信道在认知网络中随着时间空间不停变化[3]。为了准确检测可用的信道,[4; 5; 6; 7]提出物理层多用户合作感知方式解决阴影效应、多径和隐藏终端的问题。但对 MAC 层多用户时序控制,频谱感知机制的研究少有涉及。[8; 9]中研究了 MAC 层频谱感知机制改变对系统性能的提高,但都只考虑了单用户情景,最大化本地数据传输速率或最小化接

入延时。文献[10]提出了一种基于 POMDP (Partially Observable Markov Decision Process) 框架的 MAC 协议。其中运用认知发端和收端的合作,提出了次优的贪婪算法以最大化认知用户每时隙的吞吐量(throughput)。但没有考虑检测机制对接入时延的影响。

认知无线电系统中的 MAC 层感知机制包含两种模式:被动感知(reactive sensing)和主动感知(proactive sensing)。被动模式下,认知用户仅当在有数据传输需求时才检测信道是否为主用户占用。这种模式带来的好处是节约频谱检测消耗的功率,最大化数据传输的功率资源。[11; 12; 13]中默认使用被动感知机制进一步优化系统性能。但在主用户行为变化时,导致重新搜索空闲信道时延增加。因此[14; 15]均提出了主动感知机制周期性的感知频段以最小化搜索可用信道时延。在以上文献中都没有考虑两种感知机制间的权衡。而 Kim 在[16]中提出了一种能量有效(energy-efficient)策略去选择使用那一种感知方式。他也只考虑了检测单一信道的场景。在本文中,将考虑多用户合作感知多个信道的场景,结合主用户行为活跃度对认知用户的影响,提出一种新的 MAC 层感知控制策略,将效用函数(utility function)定义为功率消耗和接入时延的权衡。

本文具体安排如下:第二章对系统模型进行描述;第三章分析被动感知和主动感知机制及相应的性能指标,并提出两种感知机制折衷的系统优化策略;第四章给出仿真结果与分析;第五章总结全文。

2 系统描述

2.1 信道占用模型

频谱感知的目的是检测某一信道是否可用。因此将信道状态定义为 ON/OFF, ON 表示授权用户正占用信道, OFF 表示该信道空闲, 认知用户可使用该信道进行通信。在本文中假设认知用户在 N 个信道中选择接入, 每个用户一次只能接入一个搜索到的空闲信道。第 i 个信道在 t 时刻的状态表示为 $S_i(t)$ ($i=1, 2, \dots, N$)。为简化描述, 分别用 1 和 0 表示状态 ON 和状态 OFF。两种状态在每个信道交替出现, 而 ON/OFF 状态的持续时间是独立的随机变量, 用 T_{ON}^i 和 T_{OFF}^i 表示。一般情况下, 假设 T_{ON}^i 和 T_{OFF}^i 分别服从参数为 λ_{ON}^i 和 λ_{OFF}^i 的指数分布。定义 u_i 表示第 i 个信道授权用户占用率也就是信道繁忙的概率

$$u_i = \frac{E[T_{ON}^i]}{E[T_{ON}^i] + E[T_{OFF}^i]} = \frac{\lambda_{OFF}^i}{\lambda_{ON}^i + \lambda_{OFF}^i} \quad (1)$$

在实际应用中, 上式的参数可以通过极大似然估计等方法得到, 在本文中对这类方法不做更多的讨论。

2.2 认知用户合作感知网络模型

为了降低信道衰落对频谱检测的影响, 通常在物理层采用多用户分集(multi-user diversity)的方式获得增益, 以提高检测性能和频谱利用率。也就是用多个用户同时检测同一信道, 再利用集中式网络中的基站或接入点将单个用户的频谱检测结果进行信息融合判决。网络中 M 个独立同分布的认知用户的频谱检测结果使用 OR 融合准则[17]得到的系统检测概率、虚警概率和漏报概率分别为

$$Q_d = 1 - (1 - P_d)^M \quad (2)$$

$$Q_f = 1 - (1 - P_f)^M \quad (3)$$

$$Q_m = 1 - Q_d \quad (4)$$

其中 P_d 和 P_f 表示单个认知用户频谱检测概率和虚警概率。

上述合作感知方式提高了检测可靠性, 在本文中关注另一衡量检测性能的指标——速度, 即是系统能否快速检测出空闲信道。因此, 本文采用这样的集中式合作感知网络结构, 由 M 个认知用户组成一个组(group)同时检测一个信道, 检测概率符合上述指标, 有 K 个这样的认知用户组同时检测 K 个信道, 寻求适合的空闲信道。由于物理层合作感知不是本文关注重点, 因此为简化描述, 下文中用一个满足检测概率的认知用户替代上述的组。令 $T_{searching}$ 表示搜索空闲信道所用时间, 若不考虑信息交互和计算判决产生的延时, 它是检测时间 $T_{sensing}$ 的倍数。 $T_{sensing}$ 的大小由物理层的频谱检测算法决定。

3 合作频谱感知机制优化

3.1 被动感知

如前所述, 被动感知机制是当认知用户有数据需要传输时才进行检测, 按照一定的规律搜索信道直到检测出空闲信道。定义认知用户两次数据传输请求的间隔时间为 T_{SU} , 它服从参数为 λ_{SU} 的指数分布。[10]中假设系统饱和, 也就是任何时候都有认知用户在请求数据传输。而本文考虑认知网络不那么繁忙的情况, 采用被动感知的频谱检测机制减少不必要的检测开销。信道搜索时间 $T_{searching}$ 是本文中评判频谱检测策略的性能指标, 它与合作搜索的用户数量及搜索策略有关, 则定义为 $T_{searching}(K, p)$, 其中 K 是参与合作感知的用户数, p 是搜索策略。在被动机制下, 由于缺乏信道历史行为信息, 合作的认知用户不能找到最优的顺序去搜索信道, 只能采用随机的顺序, 则搜索时间的期望表示为

$$E\{T_{searching}^{re}(K, p_{random})\} = \sum_{n=1}^{\infty} n T_{sensing} P_n \quad (5)$$

其中 P_n 表示需检测 n 次才搜索到可用空闲信道的概率。根据随机抽取的原理,从未搜索过的信道随机选取 K 个信道分配给认知用户检测,则

$$P_n = (1 - \sum_{\binom{N-(n-1)K}{K}} \frac{1}{\binom{N-(n-1)K}{K}} \prod_{i=1}^K u_{k_i}) * (\sum_{\binom{N-(n-1)K}{K}} \frac{1}{\binom{N-(n-1)K}{K}} \prod_{i=1}^K u_{k_i})^{n-1} \quad (6)$$

其中符号 $\binom{n}{k}$ [18] 表示从 n 个对象中一次抽取 k 个样本的组合数, k_i 表示随机抽取出的 K 个待检测的信道序号。如果 N 个信道独立同分布有相同的信道参数 u_i , 则(5)式可以写为

$$\mathbf{E} \{ T_{searching}^{re}(K, p_{random}) \} = \sum_{n=1}^{\infty} n T_{senssing} u_i^{K(n-1)} (1 - u_i^K) \quad (7)$$

设有 100 个信道, 每个信道的繁忙概率 u_i 相同。假设物理层频谱检测时间 $T_{senssing} = 2\text{ms}$ 。图 1 给出了信道不同繁忙概率下, 认知用户合作数量增加对信道搜索时间造成的影响。可由图 1 看出合作的认知用户越多, 信道搜索时间随之减少, 但减少的速度会放缓, 最后趋于 1 个检测周期。同时, 不同的信道繁忙度对信道搜索时间也有影响, 信道越繁忙, 相应的搜索时间也越长。当 $N \gg K$ 时, 每个信道繁忙度不同, 但 u_i 的均值设置与图 1 一致, 采用式(6)也可以得到相近的结果。

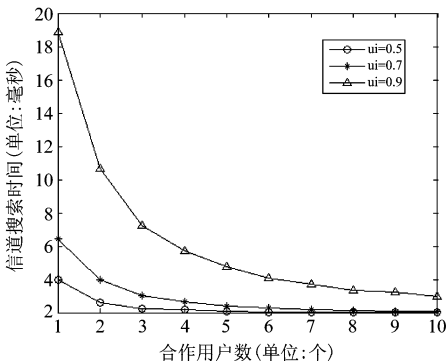


图1 被动感知模式下合作信道搜索时间曲线

一般情况下,除了信道搜索时间这一性能指标外,还需要考虑功率的限制。定义一次信道搜索消耗的功率为

$$P_{searching}^{re} = K * T_{searching}^{re} \quad (8)$$

图 1 的系统消耗功率由图 2 表示。

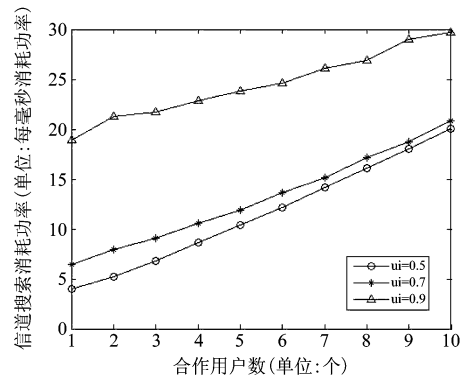


图2 认知用户被动搜索信道消耗功率曲线

由图 2 所示,系统消耗的功率随着合作用户数增加而单调递增。因此,减小信道搜索时间的同时,要考虑系统功率的约束条件

$$\min_{s.t. P_{searching} \leq P_{threshold}} T_{searching}^{re} = \sum_{n=1}^{\infty} n T_{senssing} * (\sum_{\binom{N-(n-1)K}{K}} \frac{1}{\binom{N-(n-1)K}{K}} \prod_{i=1}^K u_{k_i})^{n-1} * (1 - \sum_{\binom{N-(n-1)K}{K}} \frac{1}{\binom{N-(n-1)K}{K}} \prod_{i=1}^K u_{k_i}) \quad (9)$$

其中 $P_{threshold}$ 表示系统功率门限。通过式(9)可以得到使信道搜索时间最小的 K 值。

3.2 主动感知

3.2.1 信道监测

主动感知包括两个阶段:周期性的信道监测阶段和信道搜索阶段如图 3。周期的信道监测是被动感知中没有的,这一过程的目的在于获取信道参数,对主用户行为进行估计,进而预测下一时刻信道状态,但这一阶段会引入检测时间开销和功率消耗。

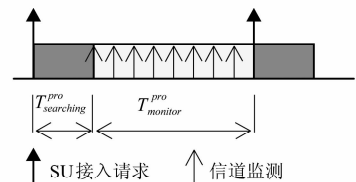


图3 周期信道监测与信道搜索

令 $T_{monitor}^{pro}$ 表示监测时长,则

$$T_{monitor}^{pro} = T_{SU}^{pro} - T_{searching}^{pro} \quad (10)$$

其中随机变量 T_{SU}^{pro} 表示两次认知用户接入请求间的间隔时间。由图 3 也可以看出上一次信道搜索结束以后,开始新一轮的信道监测直到下一个认知接入请求到来。令 T_p^i 为对第 i 个进行信道监测的周期,检测时长同样为 $T_{senssing}$,则向量 $T_p = (T_p^1, T_p^2, \dots, T_p^N)$ 表示 N 个信道分别的监测周期,文献[16]中给出了 T_p 的最优化解

$$T_p^* = \arg \max_{T_p} \left\{ \sum_{i=1}^N \left\{ (1 - u_i) - SSOH^i(T_p) - UOPP^i(T_p) \right\} \right\} \quad (11)$$

$SSOH^i(T_p)$ 和 $UOPP^i(T_p)$ 分别表示监测开销 (sensing overhead) 和未发现的频谱机会 (unexplored opportunity)。则 i 信道上进行的监测次数为

$$N_{monitor}^i = \frac{T_{monitor}^{pro}}{(T_p^i)^*} = \frac{T_{SU} - T_{searching}^{pro}}{(T_p^i)^*} \quad (12)$$

令 $P_{monitor}^i$ 表示用于第 i 信道的信道监测消耗功率, 则

$$P_{monitor}^i = N_{monitor}^i * T_{sensing} \quad (13)$$

将合作的 K 个认知用户监测的 K 个信道功率相加就得到总的信道监测消耗功率

$$P_{monitor}^{pro} = \sum_K N_{monitor}^i * T_{sensing} \quad (14)$$

3.2.2 信道搜索

信道搜索阶段与被动感知的信道搜索相类似, 但主动感知由于有了信道监测提供的各个信道繁忙度估计值 \hat{u}_i , 则可以采用最优的搜索策略—优先搜索空闲概率最大也就是繁忙度最低的信道。假设 N 个信道 $\hat{u}_1 \leq \hat{u}_2 \leq \dots \leq \hat{u}_N$, 则搜索时间期望为

$$E \{ T_{searching}^{pro}(K, p^*) \} = \sum_{n=1}^{\infty} n T_{sensing} \left(\prod_{i=(n-1)K+1}^{nK} \hat{u}_i \right)^{(n-1)} \left(1 - \prod_{i=(n-1)K+1}^{nK} \hat{u}_i \right) \quad (15)$$

对比式(7)和式(15), 当 N 个信道的繁忙度 u_i 均相等时, 两式得到一样的结果。仿真发现 u_i 均值保持不变, 而 u_i 的方差增大时, 主动信道搜索时间逐渐减小, 如图4所示。图4中信道繁忙度 u_i 均值为0.7, 方差分别取0、0.05、0.1和0.15, 方差为0时, 主动信道搜索时间与被动搜索时间性能相同, 当方差增大时, 主动信道搜索机制下的搜索时间减小。

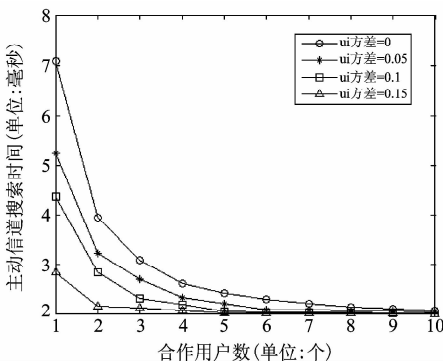


图4 主动感知模式下合作信道搜索时间与 u_i 方差关系曲线

和被动感知一样也可以得到合作信道搜索所消耗的功率

$$P_{searching}^{pro} = K * T_{searching}^{pro} \quad (16)$$

由式(16)可以得到图5的曲线。

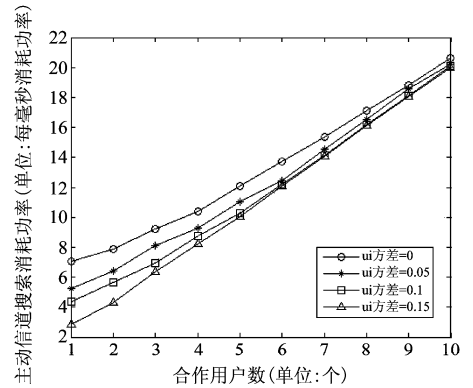


图5 主动感知模式下信道搜索消耗功率曲线

由式(16)和(14)可以得到对于单个用户主动感知功率消耗的总值为

$$P^{pro} = T_{searching}^{pro} + \frac{T_{SU} - T_{searching}^{pro}}{(T_p^i)^*} * T_{sensing} \quad (17)$$

3.3 感知机制优化策略

由上述两节的分析可以看出, 主动感知比被动感知消耗更多的时间用于检测, 但它通过周期获得信道信息帮助更快地搜索出可用信道减小接入延时。另一方面, 被动感知由于缺乏信道繁忙度信息需要更多的时间去搜索空闲信道, 但同时也发现多信道间繁忙度差别很小时, 被动感知的随机搜索与主动感知的最优化算法搜索时间相当。因此, 在不同的信道状态下, 应动态选择更节约开销的感知机制。

[16]中使用能量有效算法进行折衷, 但该算法需要获知每个信道的繁忙度, 进而计算两种感知机制下的系统开销, 比较后选择较优的机制。这就意味着系统需要较多的时间和功耗对每个信道进行检测, 得到繁忙度信息, 当信道数量增多时, 这一开销将随之增加。

本文采用多用户协作方式, 随机选取多个信道, 估计信道繁忙度统计量, 比较相应的系统开销, 动态切换感知模式。由于需要在接入延时与检测开销间做一个折衷, 令代价函数

$$C_{re} = \lambda_1 T_{searching}^{re} + \lambda_2 P^{re} \quad (18)$$

$$C_{pro} = \lambda_1 T_{searching}^{pro} + \lambda_2 (P_{searching}^{pro} + P_{monitor}^{pro}) \quad (19)$$

其中 λ_1 和 λ_2 是权重因子, 分别表示系统对搜索延时和消耗功率要求的松紧度。

设系统中有 N 个信道可供认知用户选择接入, L 个认知用户进行协作感知。每个合作的用户随机不重复地选择一个信道进行感知, 得到该信道繁忙度的估计值 \hat{u}_i 。利用 L 个信道繁忙度估计值, 计算均值 \hat{U}_N 和样本方差 \hat{S}_N^2 , 作为 N 个信道繁忙度期望和方差的估计值

$$\hat{U}_N = \frac{1}{L} \sum_{i=1}^L \hat{u}_i \quad (20)$$

$$\hat{S}_N^2 = \frac{1}{L-1} \sum_{i=1}^L (\hat{u}_{l_i} - \hat{U}_N)^2 \quad (21)$$

其中 l_i 表示随机选择的 L 个信道的序号。将式(7)改写为

$$\begin{aligned} & E \{ T_{searching}^{re}(K, p_{random}) \} \\ &= \sum_{n=1}^{\infty} n T_{senssing} \hat{U}_N^{K(n-1)} (1 - \hat{U}_N^K) \end{aligned} \quad (22)$$

式(15)改写为

$$\begin{aligned} & E \{ T_{searching}^{pro}(K, p^*) \} \\ &= \sum_{n=1}^{\infty} n T_{senssing} U_{N_n}^{K(n-1)} (1 - U_{N_n}^K) \end{aligned} \quad (23)$$

其中 U_{N_n} 由切比雪夫不等式[18]决定

$$P \left\{ |U_{N_n} - \hat{U}_N| \geq \sqrt{\frac{N \hat{S}_N^2}{2nK}} \right\} \leq \frac{2nK}{N} \quad (24)$$

当不等式取等号时,取得临界点值

$$U_{N_n} = \hat{U}_N \pm \sqrt{\frac{N \hat{S}_N^2}{2nK}} \quad (25)$$

再利用式(18)(19)计算得出系统开销,比较被动感知和主动感知机制下的代价函数

$$C_{re} \underset{<}{\overset{\geq}{>}} C_{pro} \quad (26)$$

选择开销较小的机制进行感知。

4 仿真与结果分析

通过对 100 个信道的仿真实验,在本文中假设信道繁忙度服从均值为 μ 方差为 σ^2 的正态分布。分别变化信道繁忙度均值和方差,比较本文的低复杂度策略与实际检测产生的信道搜索延时,得图 6 和图 7。发现通过对少数信道状态的估计,能够得到与实际检测延时一致的结果,但将信道状态检测的开销降低为原有开销的 $\frac{L}{N}$ 。

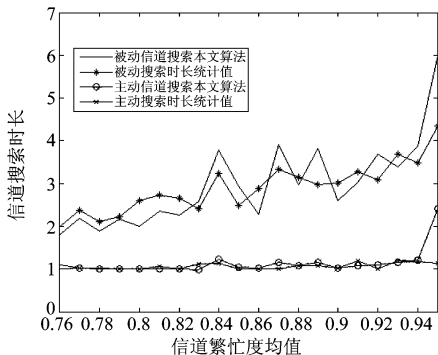


图6 信道繁忙度方差为 0.07, $L=5, K=3$ 情景下信道繁忙度均值与信道搜索时长关系图

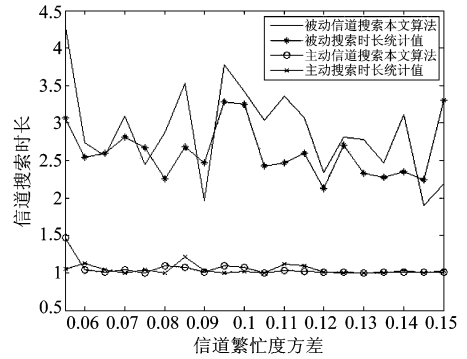


图7 信道繁忙度均值为 0.85, $L=5, K=3$ 情景下信道繁忙度方差与信道搜索时长关系图

5 结论

本文对认知无线网络中频谱感知的两种机制被动感知和主动感知进行了分析。并利用认知多用户合作感知的方式对系统进行优化。感知过程分信道搜索和信道监测两个阶段对性能指标接入延时和功率消耗进行评估。最后提出一种低复杂度的优化算法在主动感知和被动感知机制间进行折衷,选用较优的搜索策略和合作用户数。

参考文献

- [1] J. Mitola III, and G. Q. Maguire Jr, Cognitive radio: making software radios more personal. IEEE Personal Communications. 1999, 6(4):13-18.
- [2] J. Xiang, Y. Zhang, and T. Skeie, Medium access control protocols in cognitive radio networks. Wireless Communications and Mobile Computing. 2010, 10(1):31-49.
- [3] A. Alshamrani, X. Shen, and L.-L. Xie, A cooperative MAC with efficient spectrum sensing algorithm for distributed Opportunistic Spectrum Networks. Journal of Communications. 2009, 4(10):728-740.
- [4] Y. D. Alemseged, C. Sun, H. N. Tran, and H. Harada, Robust spectrum sensing algorithms for cognitive radio application by using distributed sensors. IEICE Transactions on Communications. 2009, E92-B(12):3616-3624.
- [5] J. Duan, and Y. Li, Performance analysis of multiuser cooperative spectrum sensing in various fading channels. Xi-bei Gongye Daxue Xuebao/Journal of Northwestern Polytechnical University. 2010, 28(2):249-253.
- [6] A. A. El-Saleh, M. Ismail, M. A. M. Ali, and A. N. H. Alnuaimy, Capacity optimization for local and cooperative spectrum sensing in cognitive radio networks. Proceedings of World Academy of Science, Engineering and Technology. 2009, 38:69-75.

- [7] M. Gandetto, and C. Regazzoni, Spectrum sensing: A distributed approach for cognitive terminals. *IEEE Journal on Selected Areas in Communications*. 2007,25(3):546-557.
- [8] M. Hamid, A. Mohammed, and Z. Yang, On spectrum sharing and dynamic spectrum allocation: MAC layer spectrum sensing in cognitive radio networks, *IEEE Computer Society*, Shenzhen, China, 2010, pp.183-187.
- [9] L. Yang, L. Cao, and H. Zheng, Proactive channel access in dynamic spectrum networks, *Institute of Electrical and Electronics Engineers Computer Society*, Orlando, FL, United states, 2007, pp.487-491.
- [10] Q. Zhao, and J. Ye, Quickest change detection in multiple on-off processes, *Institute of Electrical and Electronics Engineers Inc.*, Taipei, Taiwan, 2009, pp.3649-3652.
- [11] M. K. Baek, and J. Y. Kim, Effective signal detection using cooperative spectrum sensing in cognitive radio systems, *Institute of Electrical and Electronics Engineers Inc.*, Phoenix Park, Korea, Republic of, 2009, pp.1746-1750.
- [12] H. Chen, J. -A. Yang, and Y. -H. Wu, One method of blinding sensing for cognitive radio. *Xi Tong Gong Cheng Yu Dian Zi Ji Shu/Systems Engineering and Electronics*. 2009,31(6):1311-1313.
- [13] C. Cormio, and K. R. Chowdhury, A survey on MAC protocols for cognitive radio networks. *Ad Hoc Networks*. 2009,7(7):1315-1329.
- [14] C. Guo, T. Peng, and W. -B. Wang, Optimization of cooperative spectrum sensing mechanisms in cognitive radio networks. *Dianzi Yu Xinxu Xuebao/Journal of Electronics and Information Technology*. 2009,31(7):1525-1530.
- [15] G. Zhao, G. Ye Li, and C. Yang, Proactive detection of spectrum opportunities in primary systems with power control. *IEEE Transactions on Wireless Communications*. 2009,8(9):4815-4823.
- [16] H. Kim, and K. G. Shin, Efficient discovery of spectrum opportunities with MAC-layer sensing in cognitive radio networks. *IEEE Transactions on Mobile Computing*. 2008,7(5):533-545.
- [17] A. Ghasemi, and E. S. Sousa, Spectrum sensing in cognitive radio networks: The cooperation-processing tradeoff. *Wireless Communications and Mobile Computing*. 2007,7(9):1049-1060.
- [18] s. M. Ross, *Introduction to Probability and Statistics for Engineers and Scientists*, Wiley & Sons, Inc., 1987.

作者简介



王玲(1983-),女,博士在读,电子科技大学通信与信息工程学院,电子科技大学-美国德州仪器 DSP 技术与培训中心,主要研究方向为认知无线电物理层 MAC 层技术,基于 OFDM 的资源分配等。
E-mail:wangling827@uestc.edu.cn



彭启琮(1946-),男,博导/教授,电子科技大学通信与信息工程学院,电子科技大学-美国德州仪器 DSP 技术与培训中心,主要研究方向为通信与信息系统中的信号处理、高速信号处理与实时信号处理和 DSP 技术等。