

# 认知无线电多簇联合频谱感知算法

刘鑫, 谭学治, 马琳

(哈尔滨工业大学 通信技术研究所, 150080 哈尔滨)

**摘要:** 针对衰落信道下, 认知无线电的联合频谱感知性能会降低, 提出了簇内合作和多簇联合的联合频谱感知算法. 算法中所有认知用户被分成若干个簇, 簇内到融合中心最近的用户为簇头用户, 簇内其他用户将本地感知信息发送给簇头, 并由簇头获得本簇的合作感知结果; 然后簇头将感知结果发送给融合中心, 融合中心采用"或准则"合并各簇的感知结果并给出对授权用户的最后判决. 仿真表明, 当信道完美时, 本文算法和未分簇联合感知算法的感知性能一致, 当信道衰落严重时, 本文算法的性能会有显著提高, 并且分的簇越少, 算法的性能越高.

**关键词:** 认知无线电; 能量检测; 联合频谱感知; 分簇

中图分类号: TN914.3

文献标志码: A

文章编号: 0367-6234(2013)01-0050-05

## Multi-cluster cooperative spectrum sensing in cognitive radio

LIU Xin, TAN Xuezhi, MA Lin

(Communication Research Centre, Harbin Institute of Technology, 150080 Harbin, China)

**Abstract:** Since the performance of cooperative spectrum sensing in cognitive radio (CR) will decrease in the fading channel, a clustering cooperative spectrum sensing algorithm based on the cooperation in cluster and multi-clusters combination is proposed in this paper. In the proposed algorithm, all the CR users are divided into several clusters, and the CR user in each cluster with the shortest distance from the fusion centre is regarded as the cluster head. The cluster head collects the local sensing information from the other CR users in the cluster, obtains the cooperative sensing result of the cluster, and then sends the result to the fusion centre which will combine the results from all the clusters by "OR rule" in order to obtain the final decision on the presence of the primary user. The simulation indicates that when the channels are perfect, the performances of the proposed algorithm and traditional algorithm without clustering are nearly the same, however, when the channels are in deep fading, the performance of the proposed algorithm is improved remarkably, and it can be increased by the decreasing of the number of clusters.

**Key words:** cognitive radio; energy detection; cooperative spectrum sensing; clustering

认知无线电(Cognitive Radio, CR)基于软件无线电,能够灵活的使用频谱并提高频谱资源的利用率<sup>[1]</sup>. 认知无线电通过持续的对外界频谱进行感知,使用已经分配给授权用户、但是暂时未被使用的空闲频谱进行通信. 认知无线电比授权用户的频谱接入权限低,当授权用户重新使用频谱

时,认知无线电需要感知一条新的空闲信道. 因此频谱感知作为认知无线电的核心技术,需要快速准确地探测到授权用户<sup>[2-3]</sup>.

能量检测作为一种不需要信号先验信息的频谱感知方法,被广泛地应用于认知无线电. 但是当认知终端处于阴影效应或者严重的多径衰落时,由于接收到的授权用户信号的能量较低,因此能量检测的性能也会降低<sup>[4]</sup>. 文献[5]提出通过多个认知用户采用联合频谱感知的方法可以提高衰落环境下能量检测的性能. 在联合频谱感知中,各认知用户将本地感知结果发送到融合中心,融合

收稿日期: 2011-11-15.

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(61071104).

作者简介: 刘鑫(1984—),男,博士后;

谭学治(1957—),男,教授,博士生导师.

通信作者: 刘鑫, liuxinstar1984@gmail.com.

中心采用特定的融合准则合并所有的感知信息并对授权用户的存在与否做出最后判决<sup>[6]</sup>. 传统的联合频谱感知假设认知无线电和融合中心之间的信道是理想的,因此融合中心收到的各用户的感知结果是准确的,但实际中,它们之间的信道可能是衰落的,融合中心收到的部分感知信息可能是不准确的,此时融合中心给出的最后判决往往是错误的<sup>[7]</sup>. 文献[8]提出采用分簇合作感知的方法提高衰落信道下的检测性能,但是并没有给出如何对认知用户分簇. 文献[9]提出只用簇头节点进行频谱感知和发送感知信息,但是由于其他认知用户没有参与感知,信道衰落时该算法的性能并没有提高,特别地,当信道完美时,由于参与合作用户数的减少,感知性能反而会降低.

因此本文提出了认知无线电簇内合作的多簇联合频谱感知算法,算法将认知用户分成若干个簇,到融合中心最近的用户为簇头用户,簇内的其它用户将本地的感知结果发送给簇头,由簇头做出本簇的判决并将判决结果发送给融合中心. 信道完美时,本文算法和传统的未分簇联合频谱感知算法具有相同的性能,但是当信道衰落时,本文算法的性能会有显著的提高.

## 1 认知无线电频谱感知

### 1.1 能量检测

能量检测是认知无线电较常用的单用户频谱感知方法,该方法简单易行,并且不需要关于授权用户的任何先验信息. 能量检测通过将接收信号的能量统计值与设定的门限作比较来判断授权用户信号是否存于在其中. 认知无线电的接收信号  $y(t)$  可以看作是二元假设问题,表示为

$$y(t) = \begin{cases} n(t), & H_0; \\ h_s(t) + n(t), & H_1. \end{cases}$$

式中:  $t = 1, 2, \dots, M$ ;  $s(t)$  是能量为  $E_s$  的授权用户信号;  $n(t)$  是高斯白噪声信号,均值为0方差为  $\sigma_n^2$ ;  $h$  是授权用户和认知用户之间的信道增益;  $M$  是对授权用户信号的采样点数;  $H_0$  和  $H_1$  分别表示授权用户未存在和存在两种假设情况.

能量检测通过对授权用户信号的  $M$  个采样点的平方和取均值来获得信号的能量统计值,表示为

$$T(y) = \frac{1}{M} \sum_{t=1}^M |y(t)|^2.$$

当  $M$  足够大时,根据中心极限定理,  $T(y)$  服从高斯分布,并且  $T(y)$  在两种假设情况下的均值和方差分别表示为

$$\begin{cases} E(T(y) | H_0) = \sigma_n^2, \\ \text{var}(T(y) | H_0) = M^{-1} \sigma_n^4, \\ E(T(y) | H_1) = (1 + \gamma) \sigma_n^2, \\ \text{var}(T(y) | H_1) = M^{-1} (1 + 2\gamma) \sigma_n^4. \end{cases} \quad (1)$$

式中  $\gamma = h^2 \sigma_s^2 / \sigma_n^2$  为认知用户的接收信噪比.

认知用户通过将  $T(y)$  与预先设定的门限  $\lambda$  比较来判断授权用户的存在状态,即  $T(y) > \lambda$  判为  $H_1$ , 否则判为  $H_0$ . 根据式(1), 认知无线电采用能量检测的虚警概率和检测概率分别为

$$\begin{cases} P_f = Q\left(\left(\frac{\lambda}{\sigma_n^2} - 1\right)\sqrt{0.5M}\right), \\ P_d = Q\left(\left(\frac{\lambda}{\sigma_n^2} - \gamma - 1\right)\sqrt{M/(4\gamma + 2)}\right). \end{cases} \quad (2)$$

式中函数  $Q(\cdot)$  为正态高斯互补积分函数.

### 1.2 联合频谱感知

当认知用户处于阴影效应或者多径信道衰落时,由于认知用户接收到的授权用户信号的功率比较低,此时能量检测的检测性能也会比较低,这种情况也叫做隐终端问题. 通过多个认知用户采用合作检测的方式,隐终端问题会得到显著改善. 如图1所示,  $CR_1$  可以看做是1个隐终端,  $CR_2$  和  $CR_3$  和授权用户之间的信道状况较好,因此  $CR_2$  和  $CR_3$  可辅助  $CR_1$  进行联合频谱感知. 这3个认知终端首先采用能量检测独立地对授权用户进行频谱感知,然后将本地感知结果0/1(0表示授权用户不存在,1表示授权用户存在)发送给融合中心. 融合中心采用特定的融合准则对授权用户的存在与否做出最后判决,并将判决结果反馈给3个用户. 由于  $CR_2$  和  $CR_3$  的本地检测结果是准确的,融合中心的综合判决结果要比  $CR_1$  单独检测的结果精确度要高<sup>[10]</sup>.

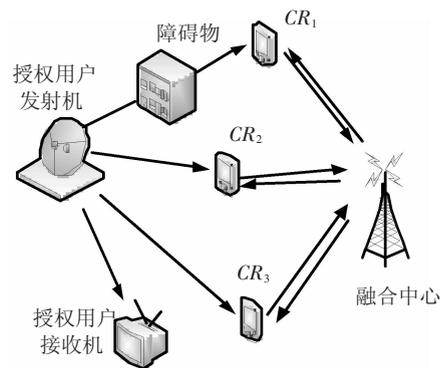


图1 认知无线电联合频谱感知

认知无线电融合中心可采用的融合准则主要为能获得最大检测概率的“或准则”<sup>[11]</sup>, 该准则下

认知无线电的联合频谱感知的虚警概率和检测概率为

$$\begin{cases} Q_f = 1 - \prod_{i=1}^N (1 - P_{f,i}), \\ Q_d = 1 - \prod_{i=1}^N (1 - P_{d,i}). \end{cases}$$

式中  $P_{f,i}$  和  $P_{d,i}$  分别是联合感知中用户  $i$  的虚警概率和检测概率,  $N$  为合作的用户数.

### 1.3 衰落信道下的联合频谱感知

在上面的分析中假设认知用户与融合中心之间的信道状况是理想的,即认知用户发送的感知信息不会出错.但实际中,认知用户和融合中心之间的信道可能是衰落信道,此时认知用户发送的 0 可能被融合中心错译为 1,发送的 1 被错译为 0,这对融合中心的判决结果的影响是非常严重的,可能会导致对授权用户错误的判断.

当认知用户和授权用户之间是衰落信道时,认知无线电的联合频谱感知的虚警概率、检测概率分别为

$$\begin{cases} Q_f = 1 - \prod_{i=1}^N ((1 - P_{f,i})(1 - P_{e,i}) + P_{f,i}P_{e,i}), \\ Q_d = 1 - \prod_{i=1}^N ((1 - P_{d,i})(1 - P_{e,i}) + P_{d,i}P_{e,i}). \end{cases}$$

式中  $P_{e,i}$  是认知用户  $i$  发送信息给融合中心的误码率.

## 2 多簇联合频谱感知算法

当认知用户和融合中心之间是衰落信道时,如图 2 所示,可选择若干个到融合中心信道较好的一些用户作为簇头用户,向融合中心发送本簇内的联合感知结果,这样既保证了信息传送的准确性,又能够节省发送信道的带宽.

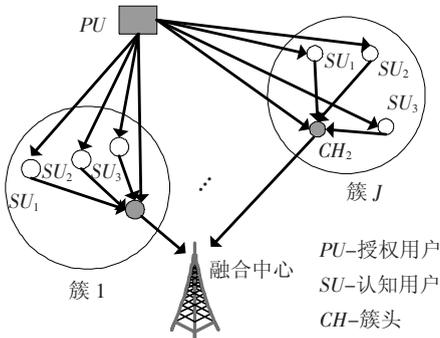


图 2 多簇联合频谱感知模型

### 2.1 分簇算法

为了方便描述算法,本文定义  $|x - y|$  为用户  $x$  和  $y$  之间的欧式距离,并且假设分  $J$  个簇,每个簇内的用户数  $D = N/J$  为整数,分簇算法如下:

**步骤 1** 选取参考点和初始化.

a) 计算所有认知用户到融合中心之间的距离,并选取距离最短的前  $2J$  个认知用户作为备选参考用户.

b) 对于这  $2J$  个认知用户,计算每个用户和其他  $N - 1$  个用户间的距离之和,并找出距离之和最小的前  $J$  个用户  $m_1, m_2, \dots, m_J$  作为参考用户.

c) 初始化  $J$  个簇的用户集合  $C_j = \{m_j\}$ ,簇  $j$  的中心  $\bar{m}_j = m_j$  以及簇内的用户个数  $Num_j = 1$ .

**步骤 2** 聚类.

a) 分别计算其他  $N = N - J$  个用户到  $J$  个簇中心的距离  $d_{ij} = |m_i - \bar{m}_j|$  ( $i = 1, 2, \dots, N; j = 1, 2, \dots, J$ );

b) 对于每个认知用户  $i$ , 搜索  $j^* = \arg \min_j d_{ij}$ , 将用户  $i$  并入簇  $j^*$  中,即  $C_{j^*} = C_{j^*} \cup \{m_i\}$ ,同时更新簇  $j^*$  的中心  $\bar{m}_{j^*}$  和该簇的用户数  $Num_{j^*} = Num_{j^*} + 1$ ;

c) 更新总的用户数  $N = N - 1$ . 如果,簇  $C_{j^*}$  饱和,下次不再进行分配,即  $J = J - 1$ ;

d) 如果  $N > 0$  重复执行步骤 2. 否则所有用户都分配完毕,算法转入步骤 3.

**步骤 3** 选择簇头.

a) 计算每个簇中的所有认知用户到融合中心的距离,找出其中距离最短的用户,记为簇头用户  $h_{\text{head},j}$ .

b) 存储每个簇的用户集合以及簇头编号:  $C_j$  和  $h_{\text{head},j}$  ( $j = 1, 2, \dots, J$ ).

算法每次迭代需要计算  $(N - iJ)J$  个用户间的距离值,其中  $i = 1, 2, \dots, D$ ,因此算法需要计算距离的总次数为  $N^2 - 0.5(D + 1)NJ < N^2$ ,所以当  $N$  不是很大时,算法具有良好的稳定性.

### 2.2 算法感知性能分析

认知无线电多簇联合频谱感知算法的虚警概率和检测概率为

$$\begin{cases} Q_f = 1 - \prod_{j=1}^J [(1 - P_{e,j}) \prod_{i=1}^D (1 - P_{f,j,i}) + P_{e,j} (1 - \prod_{i=1}^D (1 - P_{f,j,i}))], \\ Q_d = 1 - \prod_{j=1}^J [(1 - P_{e,j}) \prod_{i=1}^D (1 - P_{d,j,i}) + P_{e,j} (1 - \prod_{i=1}^D (1 - P_{d,j,i}))]. \end{cases} \quad (3)$$

式中:  $P_{f,j,i}$  和  $P_{d,j,i}$  分别表示簇  $j$  中第  $i$  个用户的虚警概率和检测概率;  $P_{e,j}$  表示簇头用户向融合中心发送感知信息的误码率.

特别地,当认知用户和融合中心的信道状况

理想时,即  $P_{e,j} = 0$ , 根据式(3)可以得到

$$Q_d = 1 - \prod_{j=1}^J \prod_{i=1}^D (1 - P_{d,j,i}) = 1 - \prod_{i=1}^{JD} (1 - P_{d,i}) = 1 - \prod_{i=1}^N (1 - P_{d,i}). \quad (4)$$

式(4)表明:当认知用户和融合中心之间的信道完美时,多簇联合频谱感知算法和传统的未分簇的“或准则”联合频谱感知算法的性能是一致的。

下面分析在瑞利衰落信道下多簇联合频谱感知算法的性能. 假设授权用户和认知用户之间的信道以及认知用户和融合中心之间的信道都是瑞利衰落信道. 根据式(2),  $P_{d,j,i}$  可以由  $P_{f,j,i}$  表示为

$$P_{d,j,i} = Q\left(\frac{Q^{-1}(P_{f,j,i})}{\sqrt{2\gamma_{j,i} + 1}} - \gamma_{j,i} \sqrt{4\gamma_{j,i} + 2}\right). \quad (5)$$

式中  $\gamma_{j,i}$  为簇  $j$  中第  $i$  个用户的接收信噪比. 在瑞利衰落信道下,  $\gamma_{j,i}$  的概率密度函数为<sup>[9]</sup>

$$f(\gamma_{j,i}) = \frac{1}{\bar{\gamma}_j} \exp\left(-\frac{\gamma_{j,i}}{\bar{\gamma}_j}\right). \quad (6)$$

式中  $\bar{\gamma}_j$  为簇  $j$  内用户的平均接收信噪比. 根据式(5)和(6), 在瑞利衰落信道下, 簇  $j$  内的认知用户的平均检测概率表示为

$$P_{d,j,i} = \int_0^{+\infty} P_{d,j,i}(\gamma_{j,i}) f(\gamma_{j,i}) d\gamma_{j,i} = P_{f,j,i} + \exp\left(\frac{1}{2M\bar{\gamma}_j^2} - \frac{2}{\sqrt{2M}\bar{\gamma}_j} Q^{-1}(P_{f,j,i})\right) \cdot Q\left(\frac{1}{\sqrt{2M}\bar{\gamma}_j} - Q^{-1}(P_{f,j,i})\right).$$

当联合频谱感知的虚警概率  $Q_f$  一定时, 簇  $j$  内认知用户  $i$  的虚警概率表示为

$$P_{f,j,i} = 1 - \left(\frac{(1 - Q_f)^{\frac{1}{J}} - P_{e,j}}{1 - 2P_{e,j}}\right)^{\frac{1}{D}}.$$

特别的当  $P_{e,j} = 0$  时,  $P_{f,j,i} = 1 - (1 - Q_f)^{1/N}$ . 簇头将 1 bit 的本簇的判决信息发送给融合中心, 假设簇头采用 BPSK 调制方式发送判决信息, 那么簇头发送信息的误码率为

$$P_{e,j} = Q(\sqrt{2\rho_{j,\max}}). \quad (7)$$

式中  $\rho_{j,\max}$  是  $j$  簇的簇头发送给融合中心的信噪比, 也是该簇最大的发送信噪比. 瑞利衰落信道下,  $\rho_{j,\max}$  的概率密度函数表示为<sup>[8]</sup>

$$f(\rho_{j,\max}) = \frac{D}{\bar{\rho}_j} e^{-\frac{\rho_{j,\max}}{\bar{\rho}_j}} (1 - e^{-\frac{\rho_{j,\max}}{\bar{\rho}_j}})^{D-1}. \quad (8)$$

式中  $\bar{\rho}_j$  为  $j$  簇的平均发送信噪比. 根据式(7)和(8),  $j$  簇的簇头发送感知信息的误码率为

$$P_{e,j} = \int_0^{\infty} Q(\sqrt{2\rho_{j,\max}}) \cdot f(\rho_{j,\max}) d\rho_{j,\max} =$$

$$\sum_{m=0}^{D-1} C_{D-1}^m (-1)^{D-m-1} \frac{D}{2(D-m)} \left(1 - \sqrt{\frac{\bar{\rho}_j}{D-m+\bar{\rho}_j}}\right).$$

### 3 仿真分析

仿真中采样点数  $M = 256$ , 参与合作的认知用户数  $N = 16$ , 噪声方差  $\sigma_n^2 = 1$ , 认知用户和授权用户以及融合中心之间的信道增益服从瑞利分布, 认知用户的平均接收信噪比  $R_{SN} = -5$  dB.

图3是当簇内认知用户数  $D$  不同时, 簇头用户发送感知信息的误码率. 可以看出簇内的用户数越多(分簇数越少), 误码率越低, 这是因为用户数越多, 簇内到融合中心距离较近的用户也越多, 所以选取的簇头用户的性能越好.

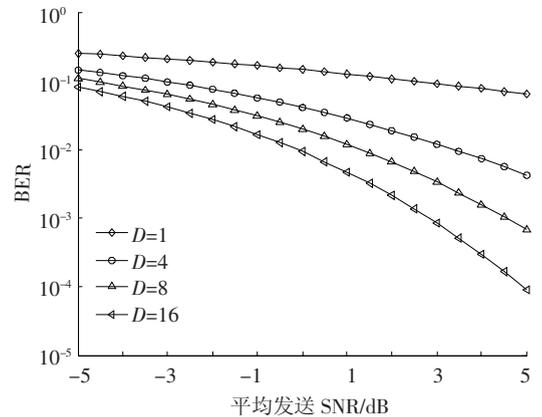


图3 簇内认知用户数不同时簇头发送信息的误码率

图4是当认知用户的平均发送  $R_{SN} = 10$  dB 时, 不同分簇数  $J$ , 联合感知的检测概率随虚警概率的变化. 此时可以近似认为, 认知用户和融合中心的信道状况是完美的, 即  $P_{e,j} \approx 0$ . 从图中可以看出, 此时  $J = 8, 4, 2$  和未分簇 ( $J = 16$ ) 的联合频谱感知算法的检测概率基本相同, 该图进一步表明, 当信道状况理想时, 本文的多簇联合频谱感知算法和传统的未分簇算法具有相近的检测性能.

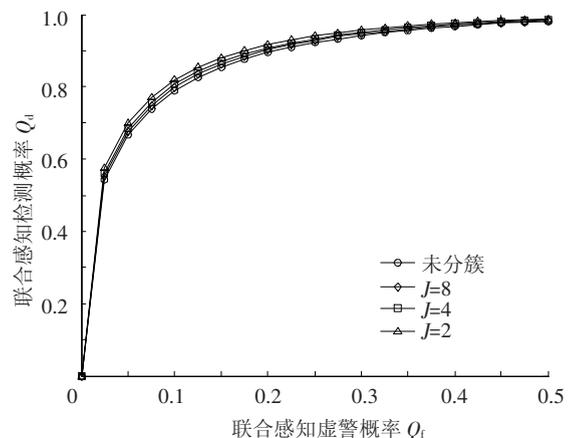


图4 平均发送  $R_{SN} = 10$  dB 时不同分簇下的联合感知的检测概率

图 5 是当簇头用户向融合中心的平均发送  $R_{SN} = -5$  dB 时,不同分簇下的联合感知的检测概率随虚警概率的变化. 此时认知用户和融合中心之间的信道衰落相对严重,从图中可以看出  $J = 2$  的分簇方法相比其他 3 种方法能够获得更高的检测概率. 这是因为分的簇越少,向融合中心传送感知信息的簇头用户也越少,由于这些簇头用户都是到融合中心距离较近的用户,它们传送的误码率相比其他用户要低的多,因此簇头用户越少,融合中心收到错误信息的概率越低. 而未分簇算法,每个认知用户都需要向融合中心传送感知信息,由于很多用户传送的误码率较高,因此融合中心收到错误信息的概率较高,并由此导致联合感知的检测概率也较低. 然而,分簇减少,簇内的用户数会增加,簇头用户处理的信息量也越大,因此增加了簇头用户的合作开销.

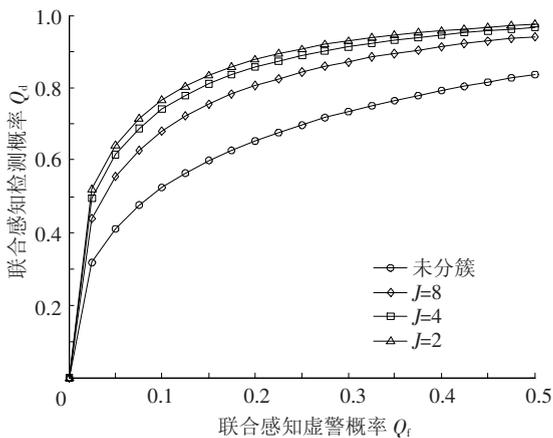


图 5 平均发送  $R_{SN} = -5$  dB 时不同分簇下的联合感知的检测概率

## 4 结 论

本文提出了用于衰落信道下的认知无线电多簇联合频谱感知算法. 算法中每个簇内到融合中心最近的用户作为簇头用户,簇内的其他用户将本地感知信息都发送给本簇簇头,并由簇头用户做出本簇的判决,然后发送给融合中心. 融合中心采用“或准则”融合各簇的感知结果,并对授权用户的存在与否做出最后判决. 本文提出了分簇算法,并对多簇联合感知算法的性能进行了理论分析. 仿真表明,当信道完美时,本文算法和传统的未分簇算法的感知性能基本相同;但是当信道衰落时,本文多簇算法的性能会显著提高,并且分的簇越少,算法的性能越高.

## 参考文献

[1] VALENTA V, FEDRA Z, MARSALEK R, *et al.*

Towards cognitive radio networks: spectrum utilization measurements in suburb environment [C]//2009 IEEE Radio and Wireless Symposium, RWS. San Diego: IEEE CS, 2009: 352 - 355.

[2] YONGHONG Z, YING-CHANG L. Eigenvalue-based spectrum sensing algorithms for cognitive radio [J]. IEEE Transactions on Communications, 2009, 57(6): 1784 - 179.

[3] 张玉, 葛利, 嘉赤伟, 等. 认知无线电系统中的关键技术研究 [J]. 网络与通信, 2010, 26(11): 99 - 101.

[4] HERATH S P, RAJATHEVA N, TELLAMBURA C. Unified approach for energy detection of unknown deterministic signal in cognitive radio over fading channels [C]//IEEE International Conference on Communications Workshops, ICC. San Diego: IEEE CS, 2009: 1 - 5.

[5] ZHU Jia, ZHENG Baoyu. Detection Probability Analysis of Cooperative Spectrum Sensing in Rayleigh Fading Channels [C]//8th IEEE/ACIS International Conference on Computer and Information Science. San Diego: IEEE CS, 2009: 177 - 182.

[6] MA Jun, ZHAO Guodong, LI Ye. Soft combination and detection for cooperative spectrum sensing in cognitive radio networks [J]. IEEE Transactions on Wireless Communications, 2008, 7(11): 4502 - 4507.

[7] OH D C, LEE Y H. Cooperative spectrum sensing with imperfect feedback channel in the cognitive radio systems [J]. International Journal of Communication Systems, 2010, 23(6): 763 - 779.

[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. Piscataway: IEEE Inc, 2007: 2511 - 2515.

[9] GUO Chen, PENG Tao, XU Shaoyi, *et al.* Cooperative spectrum sensing with cluster-based architecture in cognitive radio networks [C]//IEEE 69th Vehicular Technology Conference, VTC. Barcelona: [s. n.], 2009: 1 - 4.

[10] LETAIEF K B, ZHANG Wei. Cooperative communications for cognitive radio networks [J]. Proceedings of the IEEE, 2009, 97(5): 878 - 893.

[11] ZOU Weixia, ZHANG Wenshuo, ZHOU Zheng, *et al.* Chain-based OR-rule cooperative spectrum sensing scheme in cognitive sensing networks [C]//10th International Symposium on Communications and Information Technologies. Tokyo: [s. n.], 2010: 1191 - 1195.

(编辑 张 宏)