

## 基于权值分簇的多门限联合频谱检测算法

彭军伟<sup>1,2</sup>, 韩志韧<sup>2</sup>, 彭开志<sup>2</sup>

(1. 哈尔滨工程大学 信息与通信工程学院, 哈尔滨 150001; 2. 武汉船舶通信研究所, 武汉 430205)

**摘要:** 联合频谱检测算法在检测授权用户频谱时, 认知用户数量的增加会使有限的控制信道带宽成为制约算法实际应用的瓶颈。针对该问题, 提出一种多门限联合频谱检测算法。在建立频谱检测模型的基础上, 根据应用偏重要求的不同对认知用户进行权值分簇, 从而避免控制信道阻塞。理论分析和 Matlab 仿真结果表明, 在瑞利信道下, 该算法可有效减小网络时延, 提高系统检测概率。

**关键词:** 认知无线网络; 频谱检测; 能量检测; 权值分簇; 多门限能量检测

**中文引用格式:** 彭军伟, 韩志韧, 彭开志. 基于权值分簇的多门限联合频谱检测算法[J]. 计算机工程, 2018, 44(6): 29-33.

**英文引用格式:** PENG Junwei, HAN Zhiren, PENG Kaizhi. Multi-threshold cooperative spectrum detection algorithm based on weight clustering[J]. Computer Engineering, 2018, 44(6): 29-33.

## Multi-threshold Cooperative Spectrum Detection Algorithm Based on Weight Clustering

PENG Junwei<sup>1,2</sup>, HAN Zhiren<sup>2</sup>, PENG Kaizhi<sup>2</sup>

(1. College of Information and Communication Engineering, Harbin Engineering University, Harbin 150001, China;  
2. Wuhan Maritime Communication Research Institute, Wuhan 430205, China)

**[Abstract]** Cooperative spectrum sensing algorithm requires a control channel when detecting the spectrum of primary user. However, the limitation of control channel bandwidth is the bottleneck of application of cooperative spectrum sensing when the number of cognitive users becomes very large. In order to solve this problem, this paper proposes a multi-threshold cooperative spectrum detection algorithm. Based on the establishment of a spectrum detection model, cognitive users are clustered with different application weight requirements to avoid congestion in the control channel. Results of theoretical analysis and simulation on the Matlab platform show that, the proposed algorithm can reduce the network delay and improve the detection probability of the system in Rayleigh channels.

**[Key words]** Cognitive Radio Network (CRN); spectrum detection; energy detection; weight clustering; multi-threshold energy detection

DOI: 10.19678/j.issn.1000-3428.0047129

### 0 概述

电磁频谱空间认知能力对未来频谱共享、无线电秩序管理以及电磁频谱战具有重要意义<sup>[1]</sup>。频谱检测作为认知无线电物理层的一个关键技术, 是认知无线电系统能够正常工作的前提, 其主要任务包括: 检测所处无线电环境的频谱占用情况, 以确定目前可用的数据传输信道; 感知授权用户到达情况, 以保证授权用户、认知用户的通信效能。因此, 研究快速、准确、高灵敏度的频谱检测算法成为当前认知无线电研究领域的重要方向。

单节点频谱检测会因信道衰落、隐藏终端等问

题难以保证检测结果的准确性, 从而与授权系统信号发生干扰, 导致传输失败的概率增加。为提高频谱检测的准确性, 文献[2-5]对联合频谱检测算法进行研究。例如, 文献[4]提出一种基于盲稀疏度匹配跟踪的协同频谱检测算法。但联合频谱检测算法需要一个控制信道, 当认知用户数量增加时, 有限的控制信道带宽将成为制约其实际应用的瓶颈。为克服控制信道的阻塞, 提高检测概率, 多种方法被提出: 文献[6]研究对节点历史上报信息准确率的评估方法, 从而进行参与协作终端的选择; 文献[7]把压缩感知应用到分布式协作感知中, 认知用户传向融合中心的数据精简为压缩信号, 减少了控制信道的数据传

基金项目: 国家部委基金。

作者简介: 彭军伟(1987—), 男, 博士研究生, 主研方向为认知无线网络; 韩志韧, 研究员、博士生导师; 彭开志, 高级工程师、博士。

收稿日期: 2017-05-10 修回日期: 2017-06-16 E-mail: pengjunwei@hrbeu.edu.cn

输;文献[8]则从博弈论角度解决了分布式联合频谱检测中存在的控制信道阻塞问题。

在协作频谱检测中,反馈信道不理想会造成检测性能降低,而采用分簇思想的协作频谱检测算法<sup>[9-10]</sup>则可以通过选用反馈信道条件好的认知用户实现簇与融合中心之间的信息传输,降低传输开销,提高认知系统检测性能。文献[11]考虑非理想信道的影响,提出了一种多簇联合频谱感知算法,根据距离最近原则选取簇头,融合中心采用“或准则”集中判决。文献[12]在分簇方法中引入了多跳的思想,解决了传输过程中能量损耗问题,但该算法增大了网络时延,降低了频谱检测实时性。文献[13]则提出一种并行融合的方法,取得了频谱利用率和系统复杂度之间的平衡。

本文在文献[13]方法的基础上,通过建立频谱检测模型,提出一种权值分簇的多门限联合频谱检测算法。根据4种权值因子设置簇头节点,采用基于归一化的多门限能量检测方法,简化分布式节点间检测数据的传递流程,从而降低网络复杂度,提高系统传输性能。

## 1 频谱检测模型

频谱检测以二元信号检测理论作为基础,目标是在2个假设中做出判断,如式(1)所示<sup>[2,11]</sup>。

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

其中, $x(n)$ 为认知用户接收到的实际信号, $s(n)$ 为授权用户发射的信号, $u(n)$ 为随机噪声信号, $h(n)$ 为信道的增益(忽略延时),当信道为非理想信道时, $h(n)$ 和 $s(n)$ 之间将是卷积而不是乘积, $H_0$ 表示检测频谱中没有授权用户信号, $H_1$ 表示检测频谱中有授权用户信号。

## 2 权值分簇多门限联合频谱检测

本文算法的检测流程包括权值分簇阶段和认知用户联合频谱检测阶段。

在权值分簇阶段,散布于各位置的用户节点首先启动权值分簇机制,优选出簇头节点。在此基础上,采用基于节点平均连接度的Ad Hoc准则<sup>[14-15]</sup>构建分布节点的网络簇。

在认知用户联合频谱检测阶段,各簇节点在上层协议指定的时间内对授权用户使用多门限能量检测机制,将检测结果通过传输信道发送到簇头节点,簇头经过处理后,将该簇检测结果上传至认知融合中心,最终由认知融合中心判定授权用户是否存在。若最终检测到不存在授权用户信号,则认知节点间

启动业务传输流程。

在业务传输完毕、超过定时检测需求、检测结果存在授权用户信号3种情况下,算法都将执行簇头启动更新机制步骤。当簇头更新条件不满足时,认知节点将重新对授权用户进行联合检测;否则,将回归到权值分簇阶段,重新对网络进行分簇处理,从而保证系统开销与检测参数之间的均衡。本文算法业务流程如图1所示。

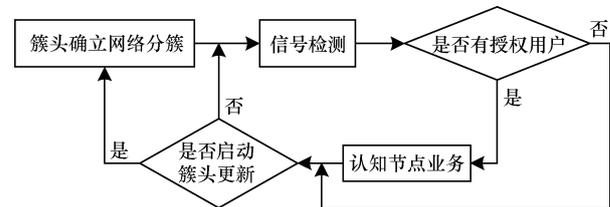


图1 本文算法业务流程

### 2.1 权值分簇

与传统簇头选择机制仅考虑单一因素不同,本文以均衡系统开销与检测性能为目标着重考虑了4种因素,并将4种因素设定成一个整体 $W_1 + W_2 + W_3 + W_4 = 1$ ,各参量相应权值因子 $W_1 \sim W_4$ 。根据实际应用需求,确定为各自参量在整体中所占比重,其中考虑的4种因素:用户节点的传输信道信噪比 $SNR$ ,用户节点的连接度 $N_j$ ,各用户节点与其所有邻居节点的距离之和 $D_{nj}$ ,各用户节点与用户基站节点间距离 $D_{hj}$ 。

为充分考虑多因素影响,并根据应用偏重要求,设置簇头节点的择取依据如式(2)所示。

$$W_c = W_1 SNR + W_2 |N_j - \delta| + W_3 (D_{nj}/N_j) + W_4 (D_{hj}/R) \quad (2)$$

其中, $W_1 SNR$ 表示信噪比因素影响程度, $W_2 |N_j - \delta|$ 表示用户节点连接度影响程度, $W_3 (D_{nj}/N_j)$ 为用户节点与其所有邻居节点的距离之和的影响程度, $W_4 (D_{hj}/R)$ 为用户节点与用户基站节点间距离影响结果, $\delta$ 为簇头能够处理的理想节点数, $R$ 为簇覆盖范围的直径。对式(2)求得的各用户节点综合权值 $W_c$ 进行升序排序,根据设定的簇数目 $n$ ,将式(2)中排序靠前的 $n$ 个用户节点作为簇头。

### 2.2 认知用户联合频谱检测

在实际环境中,采样数据有限时,能量检测方法极易受噪声的影响,从而使信号功率谱估计不准确,其影响主要有以下2个方面:1)有可能将噪声频谱判断为信号;2)信号带宽估计的准确性不高。所以,如何减轻噪声的影响对能量检测算法显得尤为重要。为充分利用能量检测方法简单、检测时间短的优点,降低噪声对检测结果影响,本文提出一种多门限能量检测方法,其流程如图2所示。

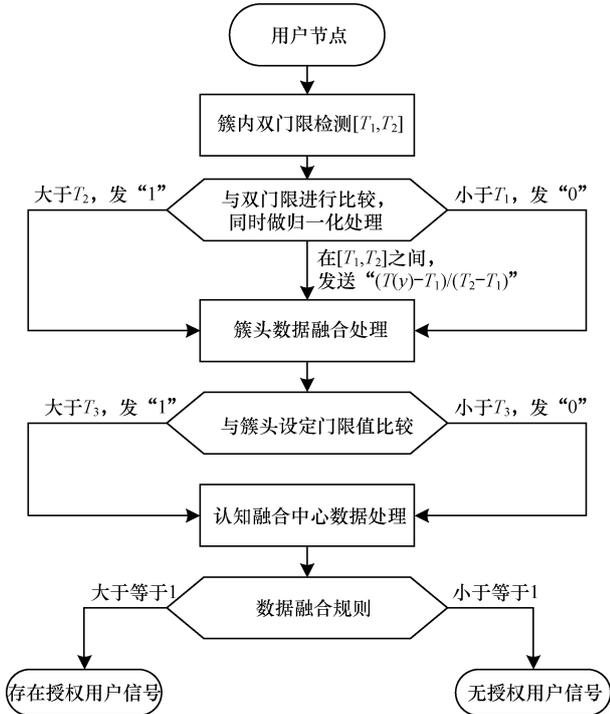


图 2 多门限能量检测方法流程

具体步骤如下:

**步骤 1** 对环境噪声进行能量检测估计,确定簇内节点的能量检测上下门限值  $T_1$ 、 $T_2$ 。

**步骤 2** 各用户节点根据式(3)计算检测统计量  $T(y)$ 。

$$T(y) = \frac{1}{N} \sum_{n=1}^N |y(n)|^2 \quad (3)$$

其中,  $y(n)$  为第  $n$  个采样信号,  $N = 2TW$  为采样个数,  $T$ 、 $W$  分别是采样时间和带宽。当  $T(y) > T_2$  时, 传送 1, 进入步骤 3; 当  $T(y) < T_1$  时, 传送 0, 进入步骤 3; 当  $T_1 < T(y) < T_2$  时, 采用归一化方式, 将归一化的值  $(T(y) - T_1)/(T_2 - T_1)$  传送给簇头节点, 如图 3 所示。

$$P_{dd,m,i} = 1 - \sigma_{1,i} - P_{dd,d,i} = 1 - \sigma_{1,i} - \left( P_{dd,f,i} + \frac{1}{2} e^{\frac{1}{2M\gamma}} e^{-\frac{2}{\sqrt{2M\gamma}} \text{erfc}^{-1}(2P_{dd,f,i})} \times \text{erfc} \left( \frac{1}{\sqrt{2M\gamma}} - \text{erfc}^{-1}(2P_{dd,f,i}) \right) \right) \quad (4)$$

设  $N_i$  表示第  $i$  簇内认知用户数量, 假定簇头收到  $a$  个本地判决和  $N_i - a$  个归一化检测数据值, 簇头对归一化检测数据值和本地判决采用 EGC 规则进行数据融合。根据文献[18], 通过计算得到基

$$Q_{dd,m,j} = \sum_{a=0}^{N_i-1} \binom{N_i}{a} \prod_{i=1}^a P_{dd,m,i} \prod_{i=a+1}^{N_i} \sigma_{1,i} \left( 1 - Q \left( \frac{\lambda_s - 2M(N_i - a)(\gamma + 1)}{\sqrt{4M(N_i - a)(2\gamma + 1)}} \right) \right) + \prod_{i=1}^{N_i} P_{dd,m,i} \quad (5)$$

$$Q_{dd,f,j} = \sum_{a=0}^{N_i-1} \binom{N_i}{a} \prod_{i=1}^a (1 - \sigma_{0,i} - P_{dd,f,i}) \prod_{i=a+1}^{N_i} \sigma_{0,i} \left( 1 - Q \left( \frac{\lambda_s - 2M(N_i - a)}{\sqrt{2M(N_i - a)}} \right) \right) \quad (6)$$

### 3.2 簇间联合频谱检测算法性能

在实际应用中, 虽然通过簇头选择机制, 簇头与认知融合节点之间的传输信道是最好的, 但由于无线信道的动态特性可能导致传输信道对信号产生衰

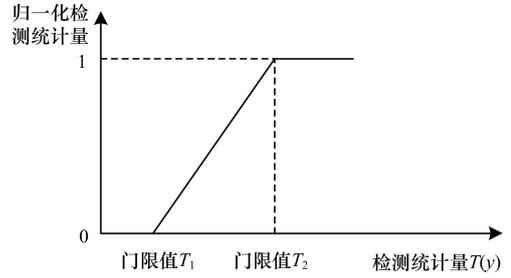


图 3 簇内双门限检测数据归一化曲线

**步骤 3** 簇头节点在将簇内所有节点所传的检测统计量接收完毕后, 为在保护授权用户与频谱利用率方面达到平衡, 簇头节点对收到的数据进行求均值, 再将所求得到的均值  $T_c(y)$  与门限  $T_3$  进行比较。若  $T_c(y) > T_3$ , 簇头将 1 传递到认知用户中心融合节点; 否则簇头将 0 传递到认知用户中心融合节点。

**步骤 4** 认知用户融合节点根据收到的簇头节点数据, 采用数据融合<sup>[16]</sup>的  $k$  秩规则<sup>[17]</sup>对该频段内的授权用户信号有无进行检测。当融合结果大于 1 时, 判决授权用户存在, 否则判决授权用户不存在。

**步骤 5** 认知用户融合节点将检测结果回传给各簇头, 簇头再将收到的判决信息下发到各簇内节点。簇内节点根据收到的判决信息, 执行业务流程的相应操作。

## 3 算法性能分析

### 3.1 簇内双门限频谱检测算法性能

为简化分析, 假定两参量  $\sigma_{0,i}$  和  $\sigma_{1,i}$  分别表示第  $i$  个认知用户在  $H_0$  和  $H_1$  假设下落入区间  $(\lambda_1, \lambda_2)$  的概率。当授权用户信号经历瑞利信道后, 其检测概率  $P_{dd,d,i}$  类似于传统能量检测中的检测概率<sup>[3]</sup>, 只是其检测门限变成  $\lambda_2$ , 其漏检概率为:

于双门限的能量检测算法的漏检概率  $Q_{dd,m,j}$  和虚警概率  $Q_{dd,f,j}$ , 分别如式(5)和式(6)所示。其中,  $\lambda_s$  是簇头根据一定的虚警概率求出的簇头能量检测门限值。

落和屏蔽, 将会造成联合频谱检测的性能降低。若将  $P'_{f,i}$  表示第  $i$  个簇头发送  $H_0$  时, 认知融合节点收到判决结果为  $H_1$  的概率,  $P'_{m,i}$  表示第  $i$  个簇头发送  $H_1$  时, 认知融合节点收到判决结果为  $H_0$  的概率,

$P_{e,i}$ 表示第*i*个簇头与认知融合节点之间的传输误码率,当各簇头与认知融合节点之间的传输信道是独立同分布时,即 $P_{e,i} = P_e = P'_{f,i} = P'_{m,i}$ , $K$ 表示所分的簇个数,则算法的系统整体漏检概率 $Q_{cl,m}$ 、虚警概率 $Q_{cl,f}$ 和误警门限 $Q_f$ 分别为:

$$Q_{cl,f} = 1 - \prod_{j=1}^K ((1 - Q_{dd,f,j})(1 - P_c) + Q_{dd,f,j}P_c) \quad (7)$$

$$Q_{cl,m} = \prod_{i=1}^K (Q_{dd,m,i}(1 - P_c) + (1 - Q_{dd,m,i})P_c) \quad (8)$$

$$Q_f = 1 - \prod_{i=1}^k (1 - P_c) \quad (9)$$

比较式(7)、式(9)可知,与传统方法相比,联合检测用户数的增加将导致误警门限 $Q_f$ 变高。OR规则出发点是保护授权用户的通信效能最大为目标,因此,认知用户在OR规则下的虚警门限将最大。由上述分析可知,本文算法利用权值分簇思想,在保证检测概率同时,能够有效缓解联合频谱检测带来的虚警门限增加的问题。下文将通过仿真实验对此结论加以验证。

## 4 仿真与结果分析

仿真实验通过 Matlab 来评估权值分簇多门限联合频谱检测算法的性能,主要包括检测灵敏度和接收性能。为简化起见,假定相同簇内,所有认知用户与簇头之间的信道为理想信道,各簇头与认知融合节点之间的传输信道是独立同分布的。其他相关仿真参数如下: $M=200, K=2, \sigma_{0,i} = \sigma_{1,i} = 0.1, N_{i,1} = 4, N_{i,2} = 6$ ,检测信道信噪比 $\gamma_d \in (-15, 5)$  dB,传输信道信噪比 $\gamma_c \in (-15, 5)$  dB。

### 4.1 检测灵敏度

检测灵敏度定义为认知用户能够检测到授权用户信道所需的最低信噪比。在一定的检测概率和虚警概率条件下,检测灵敏度通过所需的采样点个数表征。高的检测灵敏度意味着可以在较低的信噪比条件下,检测出微弱的授权用户信号。对此项指标的仿真结果如图4所示。其中:传统算法1为AWGN信道下的本地检测算法;传统算法2为瑞利衰落信道下的本地单节点检测算法。可以看出,在一定的检测概率和虚警概率下,检测灵敏度可通过增加采样值得到提高,但采样值的增加将导致认知用户处理数据量增大,检测时间增长,系统有效传输时间降低。因此,通过增加采用值来提高系统的检测灵敏度是不可取的。此外,从图4也发现,可以通过联合频谱检测的方法来提高系统的检测灵敏度。显然,在固定采样值的情况下,相比传统的频谱检测算法,权值分级的多门限联合频谱检测算法提高了检测灵敏度,在检测性能和检测时延之间取得了较好的平衡。

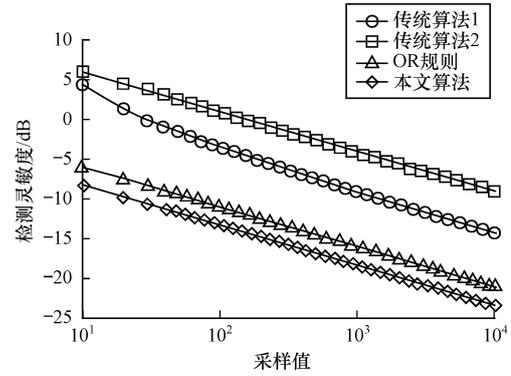


图4 检测灵敏度与采样值之间的关系

### 4.2 接收性能

图5为瑞利衰落信道上,平均信噪比为10 dB,不同簇个数的认知用户联合频谱检测特性曲线。由图5可知,对于一定的误警概率,随着 $K$ 值的增大,漏检概率将明显减小。

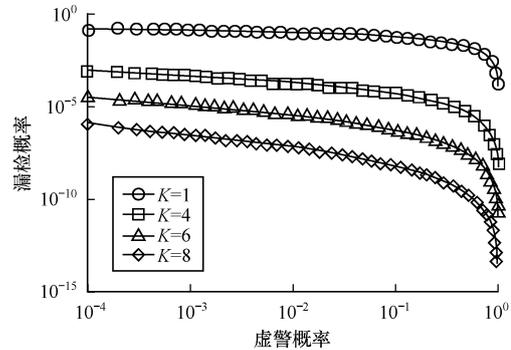


图5 瑞利信道下不同簇个数的ROC曲线

图6为认知用户与认知融合节点间的传输信道有衰落或遮蔽时的联合频谱检测的性能曲线,其中每条曲线都被一条垂直线分隔,这条垂直线称为误警门限,表示为 $\overline{Q_f}$ 。这说明,由于边界条件,联合频谱检测的误警概率不能变得充分小,当认知用户数增加时,误警门限变高。因此,图6曲线起始点是不同的。可以看出,当认知用户数量增加时,对于任何给定的误警概率,漏检概率将减小。

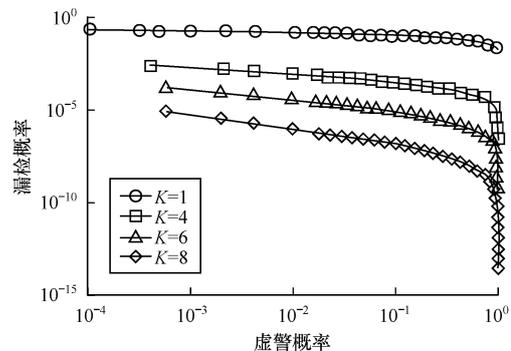


图6 传输信道存在误码时的联合频谱检测性能曲线

图7为权值分簇的多门限联合频谱检测算法接收性能曲线。假定每个用户虚警概率相同,由式(9)

可知,联合检测用户数的增加将导致误警门限  $Q_f$  变高,因此,图7对比曲线起始点是不同的。可以看出,本文算法的漏检概率明显低于传统频谱检测算法。当虚警概率为  $10^{-1}$  时,瑞利信道下本地单节点检测算法的漏检概率达到  $2.5 \times 10^{-1}$ ,即使在白噪声信道下其漏检概率也约为  $6 \times 10^{-3}$ ,而本文算法的漏检概率在瑞利信道下能够达到  $10^{-6}$ 。图7同样显示了本文算法虚警概率边界线( $10^{-3}$ )远远低于OR规则( $10^{-2}$ ),验证了在OR规则下的虚警门限大的特点。因此,与传统联合频谱检测算法相比,本文算法能够获得更高的频谱利用率。

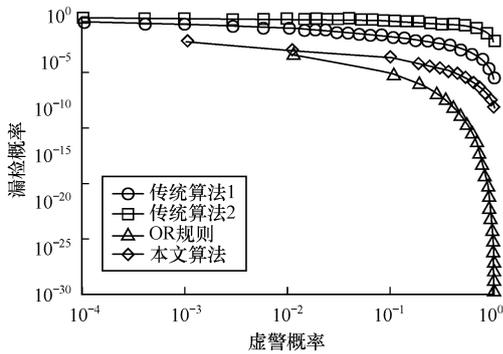


图7 频谱检测接收性能曲线

## 5 结束语

本文根据新兴无线通信对频谱检测的需求,提出一种权值分簇的多门限联合频谱检测算法。该算法综合利用权值分簇机制,降低了簇头数据融合的负担,减少了网络时延,提高了信道状态检测的准确性,同时在充分利用能量检测法实现简单、检测速度快优点的基础上,减少了联合频谱检测中各节点间的数据交互,突破了联合频谱检测中控制信道带宽有限的实际应用瓶颈。理论分析与仿真结果表明,与传统频谱检测算法相比,本文算法在保证通信切换开销不变的情况下,可使检测性能得到进一步提升。在本文中,簇内各节点所采用的能量检测算法虽然实现简单,但容易受信噪噪声和干扰的影响,因此,下一步将研究簇内节点利用信号特征进行频谱检测的问题。

## 参考文献

[1] 吴启晖,任敬. 电磁频谱空间认知新范式: 频谱态势[J]. 南京航空航天大学学报, 2016, 48(5): 625-632.  
 [2] CABRIC D, MISHRA S M, BRODERSEN R W. Implementation issues in spectrum sensing for cognitive radios [C]// Proceedings of IEEE Conference on Signals, Systems, and Computers. Washington D. C., USA: IEEE Press, 2004: 772-776.  
 [3] ARSHAD K, IMRAN M A, MOESSNER K. Collaborative spectrum sensing optimisation algorithms for cognitive radio networks [J]. International Journal of Digital Multimedia Broadcasting, 2010, 2010.

[4] 陈晓芳,朱翠涛. 基于盲稀疏度匹配追踪协同频谱检测[J]. 计算机工程, 2012, 38(15): 81-83.  
 [5] YUCEK T, ARSLAN H. A survey of spectrum sensing algorithms for cognitive radio applications [J]. IEEE Communications Surveys and Tutorials, 2009, 11(1): 116-130.  
 [6] 胡峰,郑紫微,金涛. 基于认知用户移动性的协作频谱感知研究[J]. 计算机工程, 2015, 41(4): 77-80.  
 [7] 苏一栋,达新宇. 基于分布式压缩感知的宽带协作频谱感知[J]. 中南大学学报(自然科学版), 2015, 46(6): 2104-2108.  
 [8] MONEMIAN M, MAHDAVI M. Analysis of a new energy-based sensor selection method for cooperative spectrum sensing in cognitive radio networks [J]. IEEE Sensors Journal, 2014, 14(9): 3021-3032.  
 [9] 程晖,肖除病,朱星宇,等. 一种基于分簇式双门限合作频谱检测算法[J]. 仪表技术与传感器, 2013(3): 81-84.  
 [10] 梁兴燕. 认知无线电中基于分簇的合作频谱检测算法研究[D]. 济南: 山东大学, 2013.  
 [11] 刘鑫,谭学治,马琳. 认知无线电多簇联合频谱感知算法[J]. 哈尔滨工业大学学报, 2013, 45(1): 50-54.  
 [12] KOZAL A S B, MERABTI M, BOUHAFFS F. Energy-efficient multi-hop clustering scheme for cooperative spectrum sensing in cognitive radio networks [C]// Proceedings of Consumer Communications and Networking Conference. Washington D. C., USA: IEEE Press, 2015: 139-145.  
 [13] SONG Jingqun, FENG Zhiyong, FAN Dian, et al. Optimal parameters for cooperative spectrum sensing in cognitive radio systems [C]// Proceedings of IEEE Wireless Communications and Networking Conference. Washington D. C., USA: IEEE Press, 2010: 1-5.  
 [14] LIN Y E, HSIEH H Y. Evolution of cooperation: a case with interference-aware cooperative spectrum sensing in cognitive radio networks [M]// KRISHNAMURTHY V, ZHAO Qing, HUANG Minyi. Game Theory for Networks. Berlin, Germany: Springer, 2011: 530-545.  
 [15] 杨卫东. 基于节点平均连接度的 Ad Hoc 网络分簇算法[J]. 计算机工程与应用, 2009, 45(25): 111-114.  
 [16] SASIREKHA G V K, BAPAT J. Adaptive model based on proactive spectrum sensing for emergency cognitive ad hoc networks [C]// Proceedings of International ICST Conference on Cognitive Radio Oriented Wireless Networks and Communications. [S. l.]: ICST, 2012: 89-94.  
 [17] ZHANG H, WU H C, LU L. Analysis and algorithm for robust adaptive cooperative spectrum sensing [J]. IEEE Transactions on Wireless Communications, 2014, 13(2): 618-629.  
 [18] ZHU Jiang, XU Zhengguang, WANG Furong, et al. Double threshold energy detection of cooperative spectrum sensing in cognitive radio [C]// Proceedings of the 3rd IEEE International Conference on Cognitive Radio Oriented Wireless Networks and Communications. Washington D. C., USA: IEEE Press, 2008: 1-5.