



一种基于融合规则的自适应分簇协作频谱感知算法

邱恭安, 封 森

(南通大学电子信息学院 南通 226019)

摘 要:为适应无线信道的动态性,提出了一种基于融合规则的自适应分簇协作频谱感知算法。首先,根据融合中心应用的融合规则推导分簇协作时能满足系统检测性能的信道门限值。然后,由簇首检测当前信道状态,当信道条件好于分簇门限值时,仅簇首进行本地检测,并上传检测结果至数据融合中心,实现分簇协作;否则,由本簇节点进行全节点协作检测,并分别上传检测结果至数据融合中心,或选择退出协作检测,仅接收融合中心的判决信息。最终,由数据融合中心进行融合计算,并做出系统全局判决。仿真结果显示,采用 OR 融合方法时,所提算法能极大地提高控制信道资源效率;采用 AND 融合方法时,算法能将系统有效工作区间扩大 30% 左右,且能选择信道状态好的簇进行协作频谱检测。

关键词:融合规则;自适应分簇;协作频谱感知;认知无线电

doi: 10.11959/j.issn.1000-0801.2015119

A Fusion Rule-Based Adaptive Clustering Cooperative Spectrum Sensing Algorithm

Qiu Gongan, Feng Sen

(School of Electronic and Information, Nantong University, Nantong 226019, China)

Abstract: A fusion rule-based adaptive clustering cooperative spectrum sensing algorithm was proposed for meeting the dynamic wireless channel. Firstly, according to the integration rules of the fusion center, the SNR thresholds of clustering cooperative spectrum sensing model was deduced to satisfy the basic requirements of cognitive radio system. Then, the cluster heads detect the current channel state. They perform the cluster spectrum detection when the instantaneous SNR are better than their SNR thresholds. And they transmit the results to the fusion center for achieving cluster collaboration. Otherwise, all of the CR nodes would perform the spectrum detection in the cluster and send their results to the fusion center respectively. Or they would not participate to detect the spectrum holes and only receive the decision from the fusion center. Finally, the global decision will be made in the fusion center through fusing the detection results of the cooperative nodes. The simulation results show that the proposed algorithm can greatly improve the reports channel resources efficiency under the OR rule, while under the AND rule, the algorithm can expand the spectrum sensing system work range of about 30%, and can select the cluster nodes with high SNR to participate in cooperative spectrum sensing algorithm.

Key words: fusion rule, adaptive clustering, cooperative spectrum sensing, cognitive radio

收稿日期:2015-01-08;修回日期:2015-05-08

基金项目:国家自然科学基金资助项目(No.61371112, No.61371113),南通大学研究生科技创新计划基金资助项目(No.YKC13008)

Foundation Items: The National Natural Science Foundation of China(No.61371112, No.61371113), The Nantong University Graduate Technology Innovation Programme Fund(No.YKC13008)

论文引用格式:邱恭安, 封森. 一种基于融合规则的自适应分簇协作频谱感知算法. 电信科学, 2015119

Qiu G A, Feng S. A fusion rule-based adaptive clustering cooperative spectrum sensing algorithm. Telecommunications Science, 2015119

1 引言

认知无线电(cognitive radio, CR)网络中,协作频谱感知(cooperative spectrum sensing, CSS)通过同频段中多个认知用户节点间的协作检测提高频谱感知性能,克服了多径衰落、阴影效应和隐藏终端问题。协作频谱感知模型主要有全节点数据融合协作模型、中继协作模型和分簇协作模型。其中,分簇协作频谱感知仅由簇首与融合中心节点建立连接,能够节省控制信道资源、减小融合中心计算负担、降低簇节点能耗与簇动态性^[1]。

分簇协作频谱感知算法包括CR节点分簇建立、簇首推举、本地频谱检测和分簇协作决策4个部分^[2]。分簇建立算法主要有基于着色理论的分簇、基于位置信息的分簇、基于确定性/随机性的分簇、基于负载均衡的响应式分簇、基于能量的分簇以及基于最大节点数的分簇等算法,其目标是在系统检测性能和计算复杂度间求最优化^[3]。簇首推举算法主要有最小能量消耗型的功率感知算法、最大范围的高连通算法、基于簇大小和簇首稳定性等要素加权的簇首推举算法,不同的应用范畴需要的算法不同^[4]。簇首节点的本地频谱检测算法主要有能量检测算法、匹配滤波器检测算法和循环平稳特征值检测算法。分簇协作是对所有感知节点上传的检测结果进行融合计算,并做出全局判决,包括硬判决融合算法和软判决融合算法。硬判决融合算法主要有AND算法、OR算法和K/M算法;软判决融合算法主要有基于证据理论融合算法、基于贝叶斯最小似然估计算法和纽曼—皮尔逊估计算法,融合中心需要根据信道条件和系统效率选择最佳融合算法^[5]。但是,在信道条件变化或感知节点移动的情况下,固定分簇协作频谱感知算法性能会因实际感知参数的变化而发生波动,特别是当感知节点接收信噪比快速恶化时,系统检测性能会急剧下降^[6]。因此,在满足全局系统检测性能要求的前提下,簇首节点需要应用自适应策略跟随感知参数变化,保证既定的系统检测性能限。当信道条件好于可接受感知参数门限值时,采用分簇协作模式,否则启用分簇全节点协作检测模式,或者本簇退出协作检测,仅接收系统全局判决信息,实现自适应分簇协作频谱感知,最大化减小控制信道资源的占用、降低系统计算复杂度。

2 相关工作

分簇协作频谱感知算法主要包括提高性能增益算法

(performance gain oriented scheme)、减少负载算法(overhead reduction oriented scheme)和基于性能指标联合算法(combined metrics based scheme),其目标是实现频谱检测性能和额外开销之间的联合优化。

Sun C H等^[7]提出利用感知用户选择分集提高协作频谱感知性能,通过选择信道增益最大的感知节点作为簇首,由簇首进行协作频谱检测,有效克服了衰落信道感知节点带来的性能下降。Liang X Y等^[8]提出基于信道条件进行动态分簇以提高协作频谱感知系统性能,通过选择具有最小误比特率的感知用户作为簇首进行频谱检测,利用空间分集和时间分集增益提高系统检测性能。Peng K Z等^[9]提出在簇首进行本地能量检测时,基于信道条件使用多门限频谱检测,根据不同门限范围决定是否上传检测结果以控制信道拥塞。ElSaleh A A等^[10]研究了分簇协作频谱感知算法中检测可靠性和资源消耗间的关系,当大量认知节点参与协作时能在一定程度上提高系统检测准确性,但同时增大了虚警概率,需要消耗更多的控制信道资源,因此,在保证系统要求检测性能限的前提下,尽量减少协作节点数目是有效的协作方式。Reisi N等^[11]研究了相关对数正太分布阴影衰落信道下的认知节点协作,通过对不同质量报告信道检测结果的加权,实现系统综合检测性能的提高。Wu Q H等^[12]基于一致性理论研究了大量认知节点下的分布式融合协作频谱感知算法,通过邻居节点间的信息交换实现局部一致性,然后选择性能好的认知节点进行协作,并进行分布式的融合判决以减小全部认知节点协作时生成的过量信道开销和计算复杂度。

目前,分簇协作频谱感知算法的研究主要针对固定信道状态提出了各种理论上的最优感知算法,但实际中无线信道具有动态性,因此,研究与信道状态动态自适应的协作频谱感知算法,以综合实现满足系统检测性能、扩展系统检测区间、减小信道开销,具有实用化意义。

3 基于融合规则的自适应分簇协作频谱感知算法

自适应分簇协作频谱感知算法(adaptive clustering cooperative spectrum sensing algorithm, ACCSSA)是根据簇首节点接收信噪比状态和/或簇首节点的剩余能量对传统分簇协作频谱感知算法的优化。在基于融合规则的自适应分簇协作频谱感知算法中,簇首节点首先判断其接收信噪比是否大于分簇门限值,如果大于该值,则仅由簇首进行



本地检测,并上传检测结果至数据融合中心,否则启用本簇全节点协作模式,即本簇内所有 CR 节点均参与频谱状态检测,并分别上传检测结果至数据融合中心,或者本簇退出协作检测,仅接收系统全局判决信息。数据融合中心对本周期内接收到的检测结果进行融合处理,做出全局频谱状态判决,并将最终判决结果发送给簇首,由簇首在簇内进行广播。设认知无线网络节点由主用户(primary user, PU)节点、次用户(second user, SU)节点和融合中心(fusion center, FC)节点构成,则分簇协作频谱感知模型如图1所示。

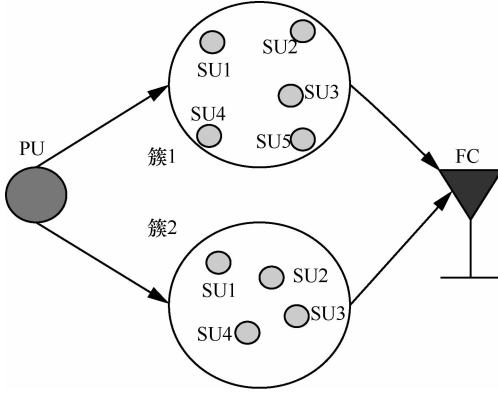


图1 分簇协作频谱感知模型

3.1 分簇门限设置

对于认知无线网络中的频谱感知算法,当系统虚警概率不大于0.1,且检测概率不小于0.9时,算法处于有效工作区域,则在既定信道模型中,全局虚警概率和检测概率取临界值,可推导出分簇簇首的平均信噪比,即自适应分簇门限值。

在瑞利衰落信道中,单节点基于能量检测算法,系统本地检测的检测概率 $P_{d, Ray}$ 和虚警概率 $P_{f, Ray}$ 分别为^[13]:

$$P_{d, Ray} = e^{-\frac{\lambda}{2}} \sum_{i=0}^{u-2} \frac{(\frac{\lambda}{2})^i}{i!} + \left(\frac{1+\gamma}{\gamma} \right)^{u-1} \times \left[e^{-\frac{\lambda}{2+2\gamma}} - e^{-\frac{\lambda}{2}} \sum_{i=0}^{u-2} \frac{(\frac{\lambda\gamma}{2+2\gamma})^i}{i!} \right] \quad (1)$$

$$P_{f, Ray} = \frac{\Gamma(u, \lambda)}{\Gamma(u)} \quad (2)$$

其中, λ 为能量检测门限值, γ 为本地检测的认知节点信噪比, u 为时间带宽积, Γ 为 Gamma 函数。

(1) OR 融合规则下的分簇门限

若融合中心采用 OR 融合规则,令全局虚警概率 $Q_f=0.1$,全局检测概率 $Q_d=0.9$,假设系统中所有次用户总共分

成 n 个簇,则由 OR 融合规则求得的每个簇首节点平均检测概率 $\bar{P}_{d, OR}$ 、平均虚警概率 $\bar{P}_{f, OR}$ 分别为:

$$\bar{P}_{f, OR} = 1 - \sqrt[n]{1 - Q_f} \quad (3)$$

$$\bar{P}_{d, OR} = 1 - \sqrt[n]{1 - Q_d} \quad (4)$$

当给定时间带宽积 u 时,由式(2)和式(3)可得本地能量检测门限值 λ_{OR} 为:

$$\lambda_{OR} = g_{OR}(\bar{P}_{f, OR}) \quad (5)$$

此时由式(6):

$$P_{d, Ray} = e^{-\frac{\lambda}{2}} \sum_{i=0}^{u-2} \frac{(\frac{\lambda}{2})^i}{i!} + \left(\frac{1+\gamma}{\gamma} \right)^{u-1} \times \left[e^{-\frac{\lambda}{2+2\gamma}} - e^{-\frac{\lambda}{2}} \sum_{i=0}^{u-2} \frac{(\frac{\lambda\gamma}{2+2\gamma})^i}{i!} \right] = \bar{P}_{d, OR} \quad (6)$$

可求得系统分簇门限值 γ_{OR} 为:

$$\gamma_{OR} = f_{OR}(\lambda_{OR}, u, \bar{P}_{d, OR}) \quad (7)$$

即 OR 融合规则下分簇协作能达到系统检测性能限时的最小信噪比。

(2) AND 融合规则下的分簇门限

同样假设系统中所有次用户总共分成 n 个簇,当融合中心采用 AND 融合规则时,令分簇协作模式中全局虚警概率 $Q_f=0.1$,全局检测概率 $Q_d=0.9$,则由 AND 融合规则求得的每个簇首节点平均检测概率 $\bar{P}_{d, AND}$ 、平均虚警概率 $\bar{P}_{f, AND}$ 分别为:

$$\bar{P}_{f, AND} = \sqrt[n]{Q_f} \quad (8)$$

$$\bar{P}_{d, AND} = \sqrt[n]{Q_d} \quad (9)$$

当给定时间带宽积 u 时,由式(2)和式(8)可得本地能量检测门限值 λ_{AND} 为:

$$\lambda_{AND} = g_{AND}(\bar{P}_{f, AND}) \quad (10)$$

此时由式(11):

$$P_{d, Ray} = e^{-\frac{\lambda}{2}} \sum_{i=0}^{u-2} \frac{(\frac{\lambda}{2})^i}{i!} + \left(\frac{1+\gamma}{\gamma} \right)^{u-1} \times \left[e^{-\frac{\lambda}{2+2\gamma}} - e^{-\frac{\lambda}{2}} \sum_{i=0}^{u-2} \frac{(\frac{\lambda\gamma}{2+2\gamma})^i}{i!} \right] = \bar{P}_{d, AND} \quad (11)$$

可求得系统分簇门限值 γ_{AND} 为:

$$\gamma_{\text{AND}} = f_{\text{AND}}(\lambda_{\text{AND}}, u, \bar{P}_{\text{d,AND}}) \quad (12)$$

即 AND 融合规则下分簇协作能达到系统检测性能限时的最小信噪比。

(3) AND 融合规则下全节点检测门限

当融合中心采用 AND 规则时, 满足系统检测性能的全节点协作频谱检测门限与参与协作的节点数相关。设参与协作的全部节点数为 m , 全局虚警概率 $Q_f=0.1$, 全局检测概率 $Q_d=0.9$, 则由 AND 融合规则求得的每个簇首平均检测概率 $\bar{P}'_{\text{d,AND}}$ 、平均虚警概率 $\bar{P}'_{\text{f,AND}}$ 分别为:

$$\bar{P}'_{\text{f,AND}} = \sqrt[m]{Q_f} \quad (13)$$

$$\bar{P}'_{\text{d,AND}} = \sqrt[m]{Q_d} \quad (14)$$

当给定时间带宽积 u 时, 由式(2)和式(13)可得本地能量检测门限值 λ'_{AND} 为:

$$\lambda'_{\text{AND}} = g'_{\text{AND}}(\bar{P}'_{\text{f,AND}}) \quad (15)$$

此时由式(16):

$$P_{\text{d,Ray}} = e^{-\frac{\lambda}{2}} \sum_{i=0}^{u-2} \frac{(\frac{\lambda}{2})^i}{i!} + \left(\frac{1+\gamma'}{\gamma'} \right)^{u-1} \times \left[e^{-\frac{\lambda}{2+2\gamma'}} - e^{-\frac{\lambda}{2}} \sum_{i=0}^{u-2} \frac{(\frac{\lambda}{2+2\gamma'})^i}{i!} \right] = \bar{P}'_{\text{d,AND}} \quad (16)$$

可求得系统门限值 γ'_{AND} 为:

$$\gamma'_{\text{AND}} = f'_{\text{AND}}(\lambda'_{\text{AND}}, u, \bar{P}'_{\text{d,AND}}) \quad (17)$$

即 AND 融合规则下全节点协作能达到系统检测性能限时的最小信噪比。

若将簇首节点分簇协作门限值 γ 设为分簇门限值, 则当簇首 $\text{SNR} \geq \gamma$ 时, 系统采用分簇协作模式, 否则启用本簇全节点协作模式, 或本簇退出协作频谱检测, 仅接收全局判决信息。

3.2 基于融合规则的自适应分簇协作

首先做如下假设:

- 所有次用户已知控制信道的实时信道状态信息(即信噪比);
- 由于每个簇内节点距离很近, 因此同一簇内任意两个节点之间的信道状态可以认为是完美的;

· 簇的划分以及簇首的推举已经在上层完成。

基于划分的簇, 簇内节点采用能量检测算法对主用户进行本地频谱检测。能量检测首先通过带通滤波器对感知用户接收到的信号滤除噪声, 并对其进行平方运算, 随后在一定的时间内进行积分, 得到接收信号总能量的判决统计量, 并与判决门限值进行比较来判断主用户信号存在与否。因此, 能量检测算法可以转化为如下二元假设检验:

$$x(t) = \begin{cases} n(t), & H_0 \\ h(t) \cdot s(t) + n(t), & H_1 \end{cases} \quad (18)$$

其中, $x(t)$ 为认知用户接收到的信号, $s(t)$ 为主用户发射的信号, $h(t)$ 为主用户信号的信道增益, $n(t)$ 为噪声信号, H_0 和 H_1 分别表示主用户存在和不存在。

基于融合规则的自适应分簇协作频谱感知算法流程为: 簇首节点根据数据融合中心融合规则设置分簇门限值, 当对主用户频谱进行检测时, 首先判断接收信噪比是否大于某一分簇门限值, 如果大于该门限值, 则仅簇首进行本地频谱检测, 并上传检测结果至融合中心; 否则, 全簇节点进行本地频谱检测并分别上传检测结果至融合中心, 或者本簇退出协作频谱检测。最后, 融合中心判决全局检测结果, 并回传给簇首, 由簇首在本簇内广播全局判决, 系统流程如图 2 所示。

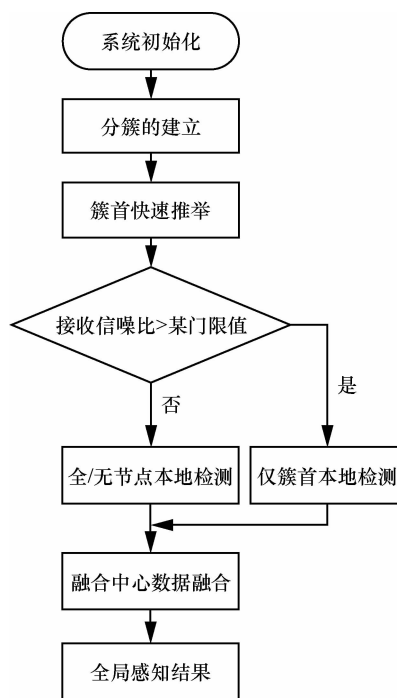


图 2 基于融合规则的自适应分簇协作频谱感知流程



3.3 时间复杂度分析

由图 2 可知,所提出的基于融合规则的自适应分簇协作频谱感知算法的流程主要包括:分簇建立、簇首推举、门限设置、簇首门限值比较、本地检测和数据融合。若系统次用户节点总数为 M ,簇内平均节点数为 N ,一个周期内,按最小划分建立分簇^[2],各分簇并行运算基于最小生成树簇首推举算法,总时间复杂度为 $O(M+N\log N)^{[14]}$;一个周期内,系统需进行一次门限设置、 M/N 次簇首门限值比较、一次数据融合,总时间复杂度为 $O(M/N)$,因此,系统总时间复杂度为 $O(M+N\log N)+O(M/N)=O(M+N\log N)$ 。

4 仿真与性能分析

在瑞利衰落信道下,基于 MATLAB 仿真平台对不同融合规则下所推导的分簇门限值以及不同信噪比条件下系统自适应分簇算法的全局虚警概率和全局检测概率进行了仿真。采用如图 1 所示仿真模型,时间带宽积为 5,随机生成 25 个认知节点,并划分为 5 个节点簇,按最小生成树原理推举簇首。簇首根据信道变化条件自适应选择分簇协作、全节点协作模式或关闭检测模式进入寂静状态。

令全局虚警概率 $Q_f=0.1$,全局检测概率 $Q_d=0.9$,则由 OR 融合规则求得的每个簇首节点平均检测概率 $\bar{P}_d$ 、平均虚警概率 $\bar{P}_f$ 分别为:

$$\bar{P}_{f,OR} = 1 - \sqrt[5]{1 - Q_f} = 0.021 \quad (19)$$

$$\bar{P}_{d,OR} = 1 - \sqrt[5]{1 - Q_d} = 0.37 \quad (20)$$

若取时间带宽积 $u=5$,由式(2)和式(19)可得本地能量检测门限值 $\lambda_{OR}=13.6$;由式(5)可求得此时系统门限值 $\gamma_{OR}=1.3$ dB。

同理可得,在 AND 融合规则下分簇协作门限值与全节点协作门限值分别为 $\gamma_{AND}=6.2$ dB 和 $\gamma_{AND}=11$ dB。

当融合中心采用 OR 融合规则,簇首信噪比大于门限值时,设簇内节点信噪比分别为 $[-2,0,1,1,2]$ dB、 $[-4,-1,0,1,3]$ dB、 $[-3,-2,-1,2,4]$ dB、 $[-3,-1,0,1,2]$ dB 和 $[-5,-3,0,2,5]$ dB;当簇首信噪比小于门限值时,设簇内节点信噪比分别为 $[-5,-2,-1,0,1]$ dB、 $[-4,-3,-2,-1,0]$ dB、 $[-6,-2,-1,0,1]$ dB、 $[-4,-3,-1,0,0]$ dB 和 $[-7,-3,-2,-2,-1]$ dB。簇首为本簇内接收信噪比最大节点,则簇首协作和全节点协作下的频谱感知性能分别如图 3 和图 4 所示。

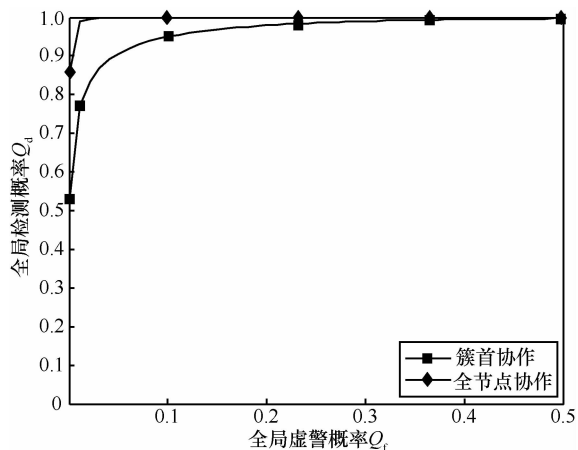


图 3 $SNR \geq \gamma_{OR}$

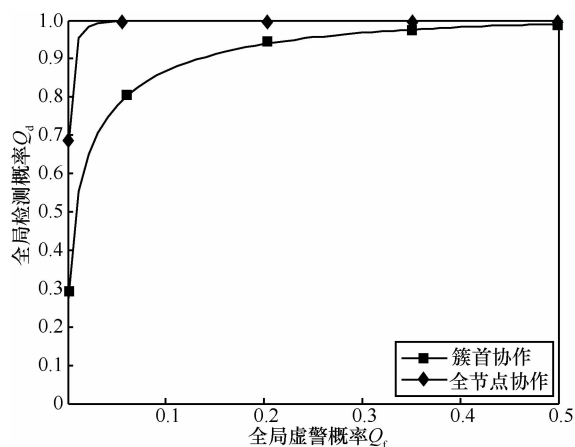


图 4 $SNR \leq \gamma_{OR}$

由图 3 可知,当簇首信噪比大于门限值时,簇首信噪比分别为 2 dB、3 dB、4 dB、2 dB 和 5 dB,两种协作模式下的系统检测性能均能达到系统性能临界要求,但全节点协作模式中,控制信道效率为簇首协作模式的 20%,且随簇内节点数量的增加逐渐降低。而簇内成员节点能量消耗增加 4 倍,且随簇内节点数量的增加而增大。当簇首信噪比小于门限值时,如图 4 所示,簇首节点信噪比分别为 1 dB、0 dB、1 dB、0 dB 和 -1 dB,全节点协作频谱感知算法的系统检测指标仍能达到系统性能临界要求,而簇首协作下的系统检测指标已不能满足系统有效工作区临界要求,此时需以能量和信道资源的消耗换取系统检测性能的提高,即采用全节点协作模式频谱检测。

当系统采用 AND 融合规则,簇节点信噪比大于全节点协作门限值时,设簇内节点信噪比分别为 $[11, 11.6, 12, 12.4, 13.6]$ dB、 $[11.2, 12, 12.6, 13, 14]$ dB、 $[11.4, 12.4, 13, 13.6, 14]$ dB、 $[11.6, 12.4, 12.6, 13, 13.5]$ dB 和 $[12, 12.4, 12.5, 13, 15]$ dB。当簇节点信噪比大于簇首协作门限值且小于全节点协作

门限值时,设簇内节点信噪比分别为[6.5,8,8.5,10,10.5] dB、[6.4,7,7.6,8,8.5] dB、[7,7.4,8,8.6,10] dB、[7.3,7.8,8.6,9,10.5] dB和[6.7,7.2,8,9,10] dB。簇首为本簇内接收信噪比最大节点,则簇首协作和全节点协作下的频谱感知性能分别如图5和图6所示。

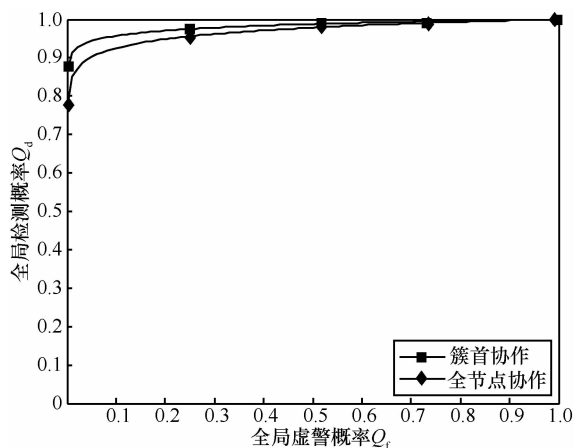


图5 $SNR \geq \gamma'_{AND}$

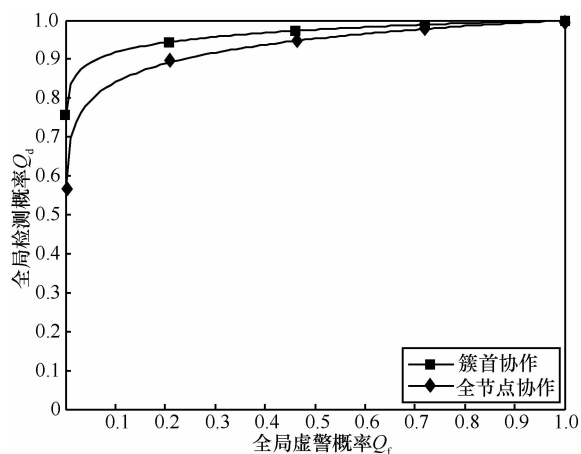


图6 $\gamma_{AND} \leq SNR \leq \gamma'_{AND}$

由图5可知,当簇首信噪比大于全节点门限值时,簇首信噪比分别为13.6 dB、14 dB、14 dB、13.5 dB和15 dB,簇首协作和全节点协作模式的检测性能均能达到系统临界要求,但分簇协作模式系统检测性能优于全节点协作模式,且其工作区间较全节点协作模式扩展了约30%。由图6可知,当簇首信噪比处于分簇门限值和全节点协作门限值之间时,簇首信噪比分别为10.5 dB、8.5 dB、10.5 dB、10.5 dB和10 dB,簇首协作模式检测性能能够达到系统临界要求,而全节点协作模式因部分节点信道条件差而降低了整体检测概率,导致全局检测概率不能满足系统临界要求,此时系统切换到分簇模式进行主用户频谱检测,不仅

能节省控制信道资源,还能提高系统检测性能。

假设簇内所有节点都参与本地检测并向簇首传递检测结果,归一化簇内信道使用率为1,每个次用户节点进行本地频谱检测时,归一化能耗为1。所提算法与传统分簇协作频谱检测算法的簇内信道使用率和能耗对比分别如图7和图8所示。

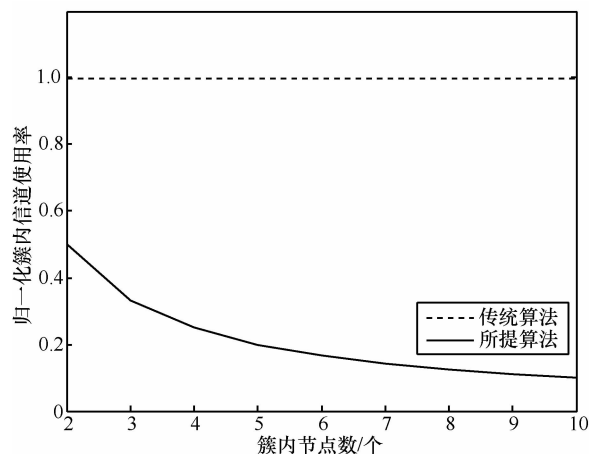


图7 OR规则簇首大于门限值和AND规则时簇内信道使用率

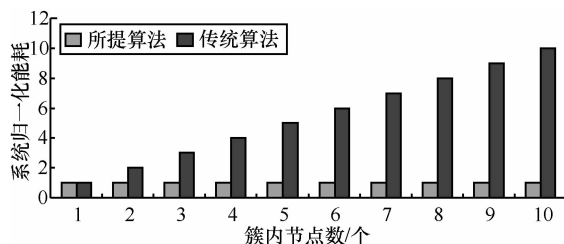


图8 OR规则簇首大于门限值和AND规则时系统能耗对比

由图7可知,当系统采用OR规则且簇首信噪比大于门限值以及系统采用AND规则时,所提算法归一化簇内信道使用率明显低于传统分簇协作算法,且随着簇内节点数的增加优势更加明显。由图8可知,当系统采用OR规则且簇首信噪比大于门限值以及系统采用AND规则时,随着簇内节点数的增加,所提算法簇内本地检测能耗不变,而传统分簇协作频谱检测算法能耗明显增大。此时,所提算法能够在满足系统检测性能要求的同时,最小化簇内信道使用率和系统本地检测能耗。

5 结束语

自适应分簇协作通过在既定融合规则下推导出分簇协作满足系统检测性能限的信道条件门限值,由簇首实时检测信道状态,并使用分簇协作、全局协作或退出协作模



式进行协作频谱检测。假设时间带宽积为 5, 随机生成 25 个认知节点, 并划分为 5 个节点簇。采用宽融合 OR 规则时, 分簇协作信道条件门限值为 1.3 dB, 当簇首接收信噪比大于该门限值时, 应用分簇协作进行频谱检测, 极大地减少了信道资源占用, 同时减少了认知节点对主用户的干扰; 采用严融合 AND 规则时, 分簇协作信道条件门限值为 6.2 dB, 全节点协作信道条件门限值为 11 dB, 因此, 当簇首接收信噪比大于分簇协作门限值且小于全节点协作门限值时, 仍然能够实现系统检测系统要求的频谱感知。当认知节点接收信噪比大于全节点协作门限值时, 相较于全节点协作模式, 分簇协作模式系统检测性能更优且可将系统有效工作区间扩大约 30%。当系统采用 OR 规则且簇首信噪比大于门限值以及系统采用 AND 规则时, 所提出的算法能够在满足系统检测性能要求的同时最小化簇内信道使用率和系统本地检测能耗。可见, 无论融合中心采用何种融合方法, 自适应分簇协作频谱感知算法都能在满足系统检测性能要求的前提下, 提高系统综合性能。

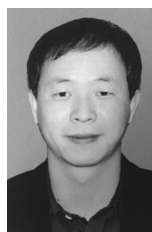
参考文献

- 1 Chien W B, Yang C K, Huang Y H. Energy-saving cooperative spectrum sensing processor for cognitive radio system. *IEEE Transactions on Circuits and Systems*, 2011, 58(4): 711~723
- 2 胡昱, 徐明, 刘丽霞等. 无线认知网络中一种团划分的频谱感知算法. *软件学报*, 2011, 22(2): 298~312
Hu G, Xu M, Liu L X, *et al.* Spectrum sensing algorithm based on clique partition for wireless cognitive networks. *Journal of Software*, 2011, 22(2): 298~312
- 3 Sharma P, Abrol V. Optimized cluster head selection & rotation for cooperative spectrum sensing in cognitive radio networks. *Proceedings of International Conference on Wireless and Optical Communications Networks*, Bhopal, India, 2013: 1~5
- 4 张晓格, 张士兵, 邱恭安. 基于第 N 佳中继选择的协作频谱感知检测概率分析. *通信学报*, 2011, 32(11): 176~182
Zhang X G, Zhang S B, Qiu G A. Detection probability analysis of cooperative spectrum sensing with the Nth best relay selection. *Journal on Communications*, 2011, 32(11): 176~182
- 5 夏文芳, 王殊, 龚世民等. 协作频谱感知中快速自适应门限策略. *电子与信息学报*, 2010, 32(6): 1406~1411
Xia W F, Wang S, Gong S M, *et al.* Fast adaptive threshold for cooperative spectrum sensing. *Journal of Electronics & Information Technology*, 2010, 32(6): 1406~1411
- 6 Wang L, Wang J L, Ding G R, *et al.* A survey of cluster-based cooperative spectrum sensing in cognitive radio networks. *Proceedings of Cross Strait Quad-Regional Radio Science and Wireless Technology Conference*, Harbin, China, 2011: 247~251
- 7 Sun C H, Zhang W, Ben K. Cluster-based cooperative spectrum sensing in cognitive radio systems. *Proceedings of International Conference on Communications*, Glasgow, England, 2007: 2511~2515
- 8 Liang X Y, Bai Z Q, Wang L, *et al.* Dynamically clustering based cooperative spectrum sensing with STBC scheme. *Proceedings of International Conference on Ubiquitous and Future Networks*, Phuket, Thailand, 2012: 227~231
- 9 Peng K, Tu L. Weighted-clustering cooperative spectrum sensing algorithm. *Proceedings of International Symposium on Wireless and Pervasive Computing*, Dalian, China, 2012: 1~5
- 10 El-Saleh A A, Ismail M, Ali M A M, *et al.* Reliability-resources tradeoffs in cluster-based cooperative spectrum sensing. *Proceedings of Asia-Pacific Conference on Communications*, Sabah, Malaysia, 2011: 360~365
- 11 Reisi N, Ahmadian M, Jamali V, *et al.* Cluster-based cooperative spectrum sensing over correlated log-normal channels with noise uncertainty in cognitive radio networks. *IET Communications*, 2012, 6(16): 2725~2733
- 12 Wu Q H, Ding G R, Wang J L, *et al.* Consensus-based decentralized clustering for cooperative spectrum sensing in cognitive radio networks. *Chinese Science Bulletin*, 2012, 57(28): 3677~3683
- 13 Digham F F, Alouini M S, Simon M K. On the energy detection of unknown signals over fading channels. *IEEE Transactions on Communications*, 2007, 55(1): 21~24
- 14 邱恭安, 封森. 基于最小生成树的分簇协作频谱感知改进算法. *电讯技术*, 2014, 5(54): 564~568
Qiu G A, Feng S. An improved clustering cooperative spectrum sensing algorithm based on minimum spanning tree. *Telecommunication Engineering*, 2014, 5(54): 564~568

[作者简介]



邱恭安, 男, 博士, 南通大学电子信息学院副教授, 主要研究方向为认知车载网络理论与技术。



封森, 男, 南通大学电子信息学院硕士生, 主要研究方向为认知无线网络。