

一种基于信噪比(SNR)比较的感知节点数目优化算法^{*1}

徐 帅, 龙 华, 刘增力, 邵玉斌

(昆明理工大学 信息工程与自动化学院, 云南 昆明 650051)

摘要:协作频谱感知虽然可提高系统的感知性能,但随着感知节点数目的增加,系统资源的占用越来越多,系统传输效率下降.分析了协作频谱感知方法的感知性能,得到协作频谱感知的感知性能与感知节点数目和接收信噪比之间的关系,提出了一种新的次级用户节点的选择方法,该方法有效保证了所选择节点的感知性能,仿真验证了该算法的有效性和可靠性.

关键词:认知无线电;频谱感知;协作;节点数目;信噪比

中图分类号:TN 92 **文献标识码:**A **文章编号:**0258-7971(2011)02-0158-06

无线频谱作为一种有限的资源,随着无线业务的飞速发展,变得越来越缺乏;与此同时,大部分的授权频谱的利用率却非常低.为了解决频谱资源的稀缺性和频谱利用的不公平,Mitola提出了认知无线电的概念^[1].在无线电系统中,次级用户可以在不对主用户造成干扰的前提下使用主用户的频谱,从而提高频谱资源利用效率.

要利用主用户的频谱资源,对频谱资源的准确感知是个重要的前提,因此频谱感知成为认知无线电中的一个重要的研究方向.一般而言,单节点的感知性能并不是很好,尤其是在深度衰落的情况下,为进一步提高感知结果的可靠性,近年提出了协作频谱感知技术^[2].但另一方面,随着协作的次级用户数目的增加,协作过程将占用越多的系统带宽资源,信息融合所需的时间越长,复杂度也越高.同时,在协作频谱感知过程中,所有节点均参与协作,得到的性能不一定是最好的.

文献[3~6]给出的几种不同的协作频谱检测方案,但均没有考虑不同CR节点的可靠性差异,而是假定所有认知用户具有相同的信噪比(SNR)和相同的检测概率,但这种情况是不切实际的.不同的次级用户有不同的信噪比,而不同认知节点的SNR不同导致各节点本地检测结果的可靠性不

同,这将对协作检测的融合性能产生很大影响.

在协作频谱感知技术中,不同的文献提出了不同的节点选择算法,Yunfei Chen在文献[7]中最先提出了在认知网络中选择最优数目的感知用户,但他仅仅给出了一个目标函数,并没有求出求解过程,求解过程需要利用穷举法得到;文献[8]给出了一种通过信噪比比较选择合适的次级用户的算法,但该算法要首先设置一个固定的阈值,阈值要按照预先确定的规则并结合仿真比较才能获得,如先设定初始阈值为SNR差值的平均值,再通过仿真比较调整,最终确定一个适合的阈值,但该方法在实际的网络中难以得到.文献[9~11]也给出不同的次级用户选择的算法.

本文首先分析了认知节点不同的SNR对协作检测的影响,根据在现实网络环境中信噪比的不同,提出了一种基于融合中心进行SNR比较的感知节点数目优化算法.即各次级用户传送该节点的SNR到融合中心,融合中心根据SNR的不同,通过比较来选取合适的感知节点进行判决融合.本文节点选择的主要目的是用较少的感知节点数来达到感知性能指标.仿真结果证明,这种方法能有效提高频谱检测的性能,并减少了参与判决融合的节点数量.

* 收稿日期:2010-07-20

基金项目:国家自然科学基金资助项目(60872157);云南省科技计划资助项目(2009CA027).

作者简介:徐 帅(1986-),男,湖南人,硕士生,主要从事无线通信与个人通信技术研究.

通讯作者:邵玉斌(1970-),男,云南人,教授,主要从事无线通信与个人通信技术研究.

1 认知节点的 SNR 对协作检测的影响分析

1.1 本地频谱感知 在本地频谱感知中,每个认知用户各自感知、决策主用户的工作状态.在能量检测的情况下,检测的基本假设模型是:

$$y(t) = \begin{cases} n(t), & H_0 \\ hx(t) + n(t), & H_1 \end{cases} \quad (1)$$

$y(t)$ 是认知用户接收到的信号, $x(t)$ 是主用户发射的信号, $n(t)$ 是加性高斯白噪声, h 是信道的增益. H_0 假设表示没有主用户出现, H_1 假设表示主用户出现.

当认知用户在 AWGN 信道环境下时,信道增益 h 是确定值,所以对第 i 个主用户的检测概率 $P_{d,i}$ 、虚警概率 $P_{f,i}$ 和漏检概率 $P_{m,i}$ 分别为^[12]:

$$P_{d,i} = P((Y > \lambda_i | H_1)) = Q_m(\sqrt{2\gamma_i}, \sqrt{\lambda_i}),$$

$$P_{f,i} = P(Y > \lambda_i | H_0) = \frac{\Gamma(m, \lambda_i/2)}{\Gamma(m)}, \quad (2)$$

$$P_{m,i} = 1 - P_{d,i}.$$

其中, λ_i 是能量检测的门限; γ_i 是信噪比; m 为时间带宽积,即 $m = TW$, T 为时间, W 为传输信号的带宽. $\Gamma(\cdot, \cdot)$ 和 $\Gamma(\cdot)$ 分别是完整和不完整 Gamma 函数; $Q_m(\cdot)$ 是广义 Marcum Q 函数, Gamma 函数和 Marcum Q 函数分别为:

$$\Gamma(\alpha) = \int_0^{\infty} e^{-t} t^{\alpha-1} dt,$$

$$\Gamma(\alpha, \beta) = \int_{\beta}^{\infty} e^{-t} t^{\alpha-1} dt, \quad (3)$$

$$Q_m(\alpha, \beta) = \frac{1}{\alpha^{m-1}} \int_{\beta}^{\infty} x^m \exp\left[-\frac{t^2 + \alpha^2}{2}\right] I_{m-1}(\alpha x) dx.$$

其中 $I_m(x)$ 为第 1 类贝塞尔函数.

公式(2)表明,当认知用户在衰落环境时,因为 $P_{f,i}$ 是独立于信噪比的,所以 $P_{f,i}$ 不变;而本地次级用户的检测性能与该用户的信噪比有关.

1.2 协作频谱感知 为了有效地提高感知性能和频谱利用率,本文采用集中式协作频谱感知,即认知网络中存在多个普通的认知用户和作为中心控制器的认知基站.每个认知用户独立地进行感知频谱,然后再把判决结果发送给基站.基站根据所有认知用户的判决信息,最终决定该频谱是否存在授权用户,并广播该判决结果.

假设网络中有 N 个独立同分布的认知用户.

如图 1 所示,在实际的无线网络中,由于次级用户的位置是随机分布的,离主用户发射端距离不一样,以及障碍物的影响,故信号传输经历的衰落和阴影的影响也不相同,并且在空闲频谱检测的初始阶段不能做到理想功率控制,这些都导致各认知节点的 SNR 不相同.不同认知节点 SNR 的不同导致各节点本地检测结果的可靠性不一样,这将对协作检测的融合性能产生很大影响.本文提出了一种基于融合中心进行 SNR 比较的协作频谱检测感知节点数目优化算法,减少感知节点数量来达到感知性能指标.

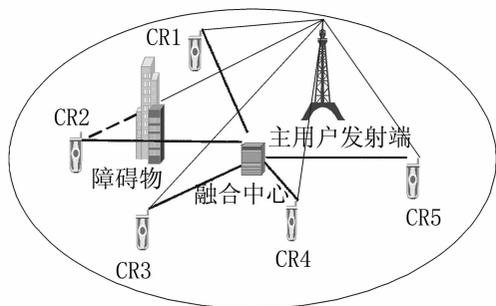


图 1 实际情况的认知无线网络环境

Fig. 1 The practical context of CR networks

目前在融合中心普遍采用 2 种规则,OR 规则和 AND 规则^[13].AND 规则表示所有认知用户都检测到主用户处于工作状态,最终判决主用户处于工作状态,OR 规则表示只要有一个用户检测到主用户处于工作状态,那么就可以最终判定主用户处于工作状态.由于本文只涉及频谱感知算法的改进,和具体的判决融合准则无关,因此本文采用最常用的逻辑 OR 准则作为数据融合算法,在进行仿真分析也将该算法作为比较对象.

在不同的信噪比情况下,若选择 K 个次级用户参与协作,在 OR 规则情况下,其相应的检测概率 P_d 、虚警概率 P_f 和漏检概率 P_m 可以表示为:

$$P_d = 1 - \prod_{i=1}^K (1 - P_{d,i}),$$

$$P_f = 1 - \prod_{i=1}^K (1 - P_{f,i}). \quad (4)$$

$$P_m = \prod_{i=1}^K P_{m,i}.$$

设主用户忙碌的概率为 $P(H_1)$,主用户空闲的概率为 $P(H_0)$,所以系统的错误检测概率 P_e 为:

$$P_e = P_f P(H_0) + P_m P(H_1). \quad (5)$$

当 $K = N$ 时,所有次级用户均参与协作,此时即为传统的协作方式.

2 基于 SNR 比较的节点选择算法

因为不同 SNR 对次级用户检测的可靠性不一样.为了改善检测性能,应将次级用户的 SNR 考虑进去.因此,根据这种情况,在融合中心选取可靠性高的 CR 节点进行协作频谱感知.其主要问题是在融合中心如何选择合适的 CR 节点.

为此,假设每个 CR 节点都具有 SNR 估计功能,SNR 估计是无线通信中的一种通用技术,目前已有很多方法可以采用.与一般协作频谱检测不同的是除了发送本地的判决结果外,每个 CR 节点还需要发送 SNR 信息到融合中心.

在信息融合中心,节点选择算法的流程图如图 2 所示.

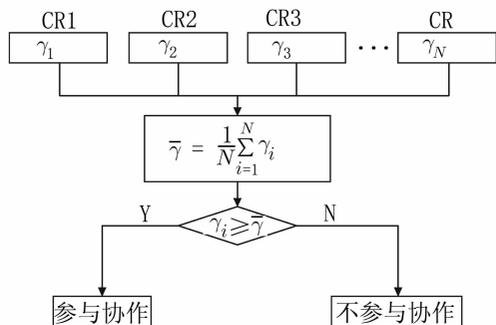


图 2 节点选择算法流程图

Fig. 2 Flowchart about selecting CR node

首先,每个 CR 节点将本地的判决结果和信噪比 γ_i 同时发送到协作频谱检测的融合中心,在融合中心对所有节点的信噪比求均值 $\bar{\gamma}$,然后把每个节点的信噪比与平均信噪比相比较,选择信噪比大于等于平均值的节点参与协作,而小于平均值的节点则不参与协作.

针对具体的环境,为提高该算法的实用性,对求出的平均信噪比 $\bar{\gamma}$,可以设置一个动态调整因子 $\omega (\omega > 0)$.取信噪比门限 $\gamma = \omega \bar{\gamma}$,则此时的节点选择模式为:

$$I(\gamma_i) = \begin{cases} 0, & \gamma_i < \gamma, \\ 1, & \gamma_i \geq \gamma. \end{cases} \quad (6)$$

其中, $I(\gamma_i) = 0$ 表示该节点不参与协作; $I(\gamma_i) = 1$ 表示该节点参与协作.

通过设置调整因子,可以使信噪比在平均信噪

比一定范围内的节点参与或不参与协作,提高系统对环境的适应性.在该动态调整算法中,当调整因子逐渐增大时,选择的次级用户的 SNR 逐渐加大,参与协作的次级用户数逐渐减少;当调整因子逐渐减小时,所参与的次级用户数逐渐增加,当小到一定程度时,所有的次级用户均参与协作,此时即为传统的协作方法.

3 数值结果

3.1 仿真模型和参数 无线电波在自由空间内传输,其信号功率会随着传播距离的增加而减小,这会对数据速率以及系统的性能带来不利的影响.最简单的大尺度路径损耗的模型可以表示为:

$$L = \frac{\bar{p}_r}{p_t} = K \frac{1}{d^\gamma}, \quad (7)$$

其中: p_t 表示本地平均发射信号功率, \bar{p}_r 表示接收功率, d 为发射机与接收机之间的距离.对于典型环境来说,路径损耗指数 γ 一般在 $2 \sim 4$ 选择,由此可以得到平均的信噪比(SNR)为:

$$\text{SNR} = \frac{\bar{p}_r}{p_t} = K \frac{p_r}{d^\gamma N_0 B}, \quad (8)$$

其中 N_0 是单边噪声功率密度, B 是信号带宽, K 是独立于距离、功率和带宽的常数.

假设在一定区域范围内(如半径为 1 km 的圆形区域内),随机均匀分布有 15 个次级用户.若某一时刻次级用户在该区域内的位置分布如图 3 所示.在不考虑障碍物的影响下,由公式(8),若取路径损耗指数 $\gamma = 4$,可知次级用户的信噪比与融合中心之间的距离的 4 次方成反比.不同次级用户与融合中心的距离不同,所以信噪比也不一样,根据本文提出的算法,信噪比大于门限值的次级用户将参与协作,所以在一定范围内的次级用户参与协作,而在该区域之外的次级用户则不参与协作,如图 4 所示,信噪比大于平均值的次级用户将参与协作,此时参与协作的次级用户为 6 个.当设置不同的调节因子时,信噪比选择门限的变化情况和次级用户的选择情况如图 5、6 所示,在图 5 中,调节因子设为 0.9,此时参与协作的次级用户为 11 个,在图 6 中,调节因子设为 1.2,参与协作的次级用户为 5 个.由图可以看出,当调节因子小于 1 时,门限值减小,所选择的次级用户数增加.当调节因子大于 1 时,门限值减小,所选择的次级用户数减少,当小到一定值时,次级用户均参与协作,此时即传统

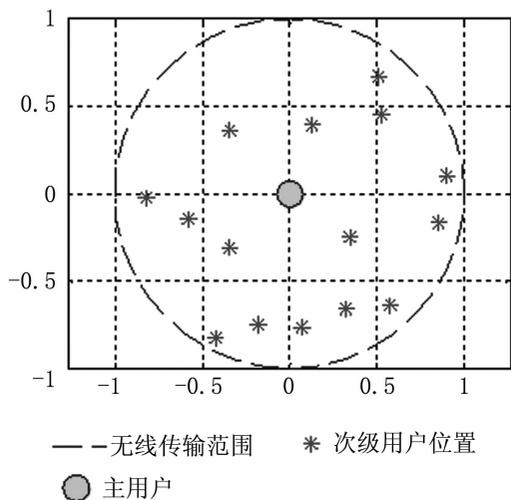


图3 某时刻次级用户位置分布

Fig. 3 Location distribution of secondary users

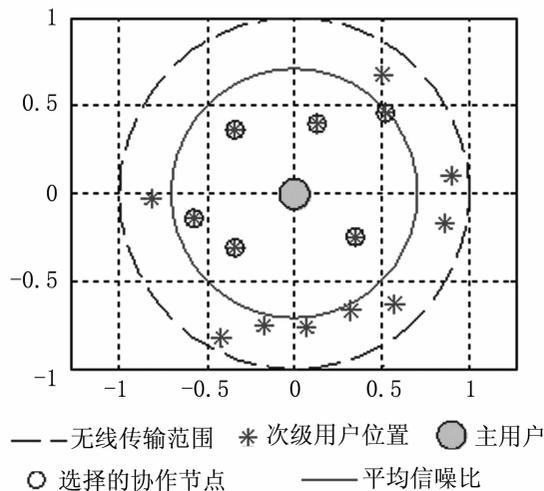


图4 基于信噪比比较的次级用户选择情况

Fig. 4 Selecting CR node based on SNR comparison

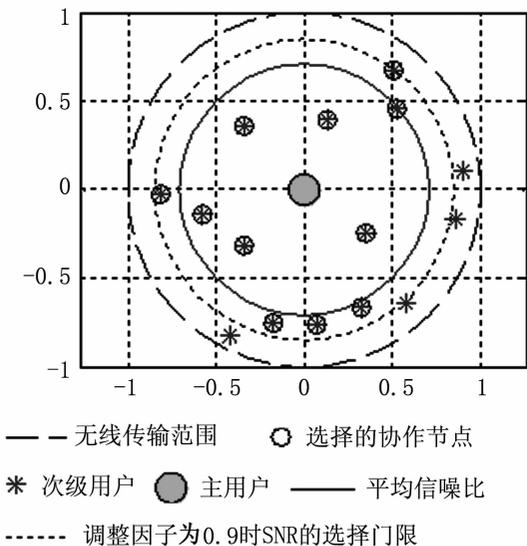


图5 调节因子 ω 为 0.9 时次用户的选择情况

Fig. 5 Selecting CR node with $\omega = 0.9$

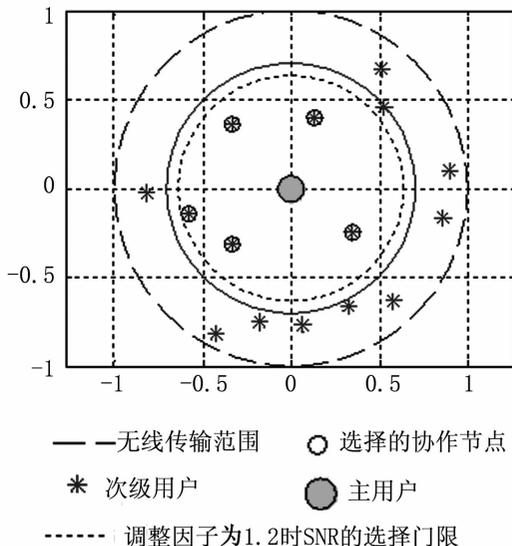


图6 调节因子 ω 为 1.2 时次用户的选择情况

Fig. 6 Selecting CR node with $\omega = 1.2$

的协作频谱感知方法.

3.2 仿真结果分析 由公式(2)可知,次级用户的信噪比不同,导致各节点的本地检测结果可靠性不一样.若时间带宽积 m 设为 5, $P(H_0) = P(H_1) = 0.5$,信噪比与检测错误概率的关系如图7所示.由图可知,在相同的检测门限条件下,信噪比越高,节点的错误概率就越低,信噪比越低,节点的错误概率就越高.

在不同信噪比的情况下,采用本文提出的节点选择算法,同样取 $P(H_0) = P(H_1) = 0.5$,次级用户

数 $N = 15$,信噪比在区间 1 ~ 15 dB 内服从均匀分布,得到该算法下的错误概率如图8所示,从图上可知,在 OR 规则合并条件下,当检测门限低于约 23 dB 时,本文提出的次级用户选择算法与随机选择相同数目的次级用户算法的错误检测概率基本相同,但都低于所有次级用户均参与协作时的错误检测概率.当检测门限高于 23 dB 时,本文提出的次级用户选择算法与所有次级用户均参与协作时的错误检测概率基本相同,但均低于随机选择算法.由此可见,该算法能在整个门限范围内均有较

低的错误检测概率,从而能提高整个认知网络的检测性能。

若采用动态调整算法来进一步优化节点,即设置一个调整因子 ω ,若 ω 分别取0.9和1.2时,在不同门限情况下的检测概率如图9、10所示。

由图9、10可以看出,调整因子越小,曲线就靠

得越近,调整因子越大,曲线就越分开.当调整因子逐渐减小时,所选择参与协作的次级用户数逐渐增加,当调整因子小到一定值时,3条曲线重合,此时所有次级用户均参与协作;当调整因子逐渐增大时,所选择参与协作的次级用户数逐渐减少。

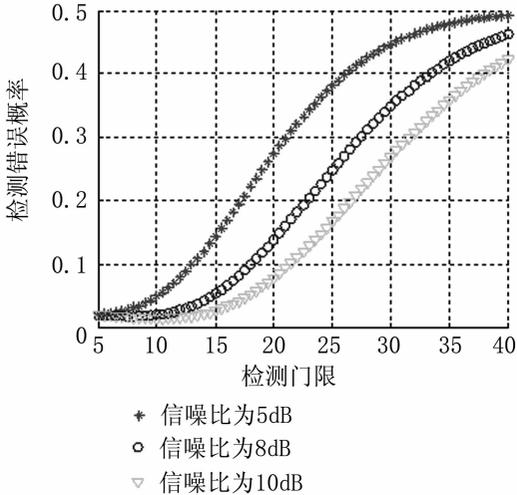


图7 信噪比对本地检测和协作检测结果的影响

Fig. 7 Comparison for local detection probability and cooperative detection probability under different SNR

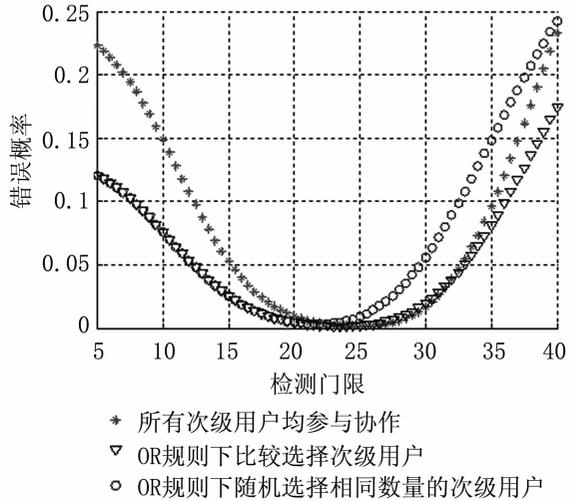


图8 检测错误概率比较

Fig. 8 Comparison for probabilities of error detection

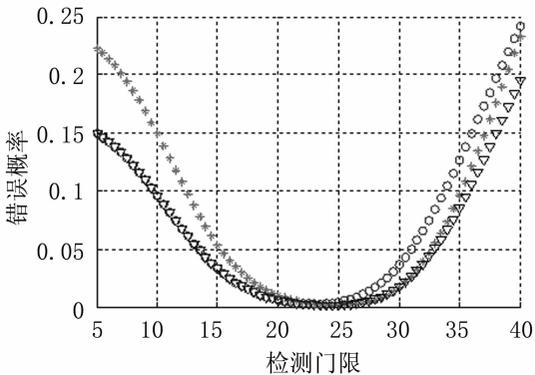


图9 调整因子 $\omega=0.9$ 时检测错误概率的比较

Fig. 9 Comparison for probabilities of error detection with $\omega=0.9$

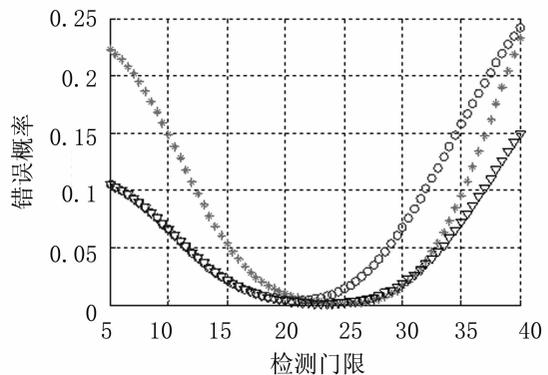


图10 调整因子为1.2时检测错误概率的比较

Fig. 10 Comparison for probabilities of error detection with $\omega=1.2$

4 结论

协作频谱感知是认知无线电中的一个关键技术.本文提出的算法主要是针对不同信噪比情况下

优化次级用户数量的问题,该方法能降低融合中心的错误检测概率,同时通过减少参与判决融合的节点数量,可以降低融合中心的复杂度.当次级用户的信噪比相同时,此时就为传统的协作方法,即所

有的次级用户均参与协作. 仿真结果表明:提出的方法与传统的方法比较,能有效地降低错误检测概率,通过选择信噪比好的节点参与协作,能够达到较好的检测性能,设置调整因子,能进一步提高该算法的实用性.

参考文献:

- [1] MITOLA J, MAGUIRE G Q. Cognitive radio: Making software radios more personal[J]. IEEE Personal Communications, 1999, 6(4): 13-18.
- [2] GANESAN G, LI Y. Cooperative spectrum sensing in cognitive radio network[C]. DySPAN, 2005: 137-143.
- [3] GHASEMI A, SOUSA E S. Collaborative spectrum sensing for opportunistic access in fading environments [C]//Proceedings of the First IEEE International Symposium on New Frontiers in Dynamic Spectrum Access Networks (DySPAN 2005). IEEE, 2005: 131-136.
- [4] Gigantean, LI Y. Cooperative spectrum sensing in cognitive radio networks[C]//Proceedings of the First IEEE International Symposium on New Frontiers in Dynamic Spectrum Access Networks (DySPAN). IEEE, 2005: 137-143.
- [5] PEH E, LIANG Ying-chang. Optimization for cooperative sensing in cognitive radio networks [C]//Proceedings of the IEEE Wireless Communications and Networking Conference(WCNC). IEEE, 2007: 27-32.
- [6] YUCEK T, ARSLAN H. Spectrum characterization for opportunistic cognitive radio systems[C]//Proceedings of the IEEE Military Communications Conference(MILCOM). IEEE, 2006: 1-6.
- [7] CHEN Yun-fei. Optimum number of secondary users in collaborative spectrum sensing considering resources usage efficiency [J]. IEEE Communications Letters, 2008, 12(12): 877-879.
- [8] YI Zheng. Cooperative spectrum sensing based on SNR comparison in fusion center for cognitive radio [C]//International Conference on Advanced Computer Control. IEEE, 2008: 211-216.
- [9] WEI Zhang. Optimization of cooperative spectrum sensing with energy detection in cognitive radio networks [J]. IEEE Transactions on Wireless Communications, 2009, 8(12): 5761-5766.
- [10] CHEN Yun-fei. Analysis of secondary user selection in collaborative spectrum sensing [C]//Communications and Networking in China, 2009. ChinaCOM 2009. Fourth International Conference. 2009: 1-5.
- [11] SUN Yan-zan. Selection of sensing nodes in cognitive radio system based on correlation of sensing information [C]//Wireless Communications, Networking and Mobile Computing, 2008. WiCOM '08. 4th International Conference. 2008: 1-6.
- [12] HUKOWITZ H. Energy detection of unknown deterministic signals [J]. Proceedings of IEEE, 1967, 55: 523-531.
- [13] YUE Wang. Optimization of parameters for spectrum sensing in cognitive radio [C]//Wireless Communications, Networking and Mobile Computing, 2009. WiCom 09. 5th International Conference. 2009: 1-4.

Optimum number algorithm of secondary users based on SNR comparison

XU Shuai, LONG Hua, LIU Zeng-li, SHAO Yu-bin

(Automation and Information Engineering, Kunming University of Science and Technology, Kunming 650051, China)

Abstract: Although cooperative spectrum sensing can greatly improve sensing performance, transmission efficiency will decrease with the number of sensing nodes increasing, which will consume more system resources. The performance of cooperative spectrum sensing is investigated, and the relationship among the performance, node number and average signal-to-noise ratio is derived. A method for selecting a set of sensing nodes is proposed, which can guarantee the sensing performance of the selected node. Simulation results show the validity and reliability of the proposed algorithm.

Key words: cognitive radio; spectrum sensing; cooperative; nodes number; signal-to-noise ratio