

协作感知门限自适应优化

孙昊祥¹, 陈长兴^{1*}, 迟文升², 凌云飞¹

1. 空军工程大学基础部, 西安 710051

2. 空军工程大学装备管理与无人机工程学院, 西安 710051

摘要 在频谱感知过程中,采用协作感知的方式对空间内多个节点的感知结果进行融合,可以消除路径阴影和深度衰落情况的影响,有效提高结果的准确性和可靠性。基于加权融合的协作判决准则,为了保证融合结果的检测概率和虚警概率达到标准,需要使每个节点的感知结果均达到相应的标准。因此提出通过对每个感知节点设定合适的感知门限进行优化。首先对各感知节点的分析,可以得到每个节点在检测概率和虚警概率一定的条件下,感知门限与节点权值的关系,其次通过遗传算法对权值的优化实现权值优化——感知门限优化的自适应优化过程。最后通过仿真验证该方法可以高效准确地实现感知门限的自适应优化,从而保证了协作频谱感知的实际性能。

关键词 频谱感知;加权协作感知;感知门限;遗传算法;自适应优化

频谱感知是指在一定的空间范围内感知在不同频段的信道内是否存在主用户信号,由此可以发现当前时间、空间中是否存在未被利用或者未被完全利用的无线电“频谱空洞”^[1]。频谱感知技术是保护授权的主用户不被干扰的重要保证,也是未被授权的次级用户可以充分利用频谱资源完成通信的前提。

频谱感知最常用的手段是能量检测,但能量检测存在虚警率高、判决门限值固定等问题,因此一些相关文献提出基于自适应门限改进的增强型自适应频谱感知算法^[2-3],但是却忽略了单节点感知的准确性易受到较多因素影响,因此协作频谱感知技术被提出(图1)。感知节点2(CR2)接收到的信号受到障碍物影响较大,感知结果的可信度较差,感知节点3、6、8(CR3、CR6、CR8)也受到一定影响,而感知节点1、4(CR1、CR4)则几乎没有受到障碍物的影响,因此协作感知基于空间

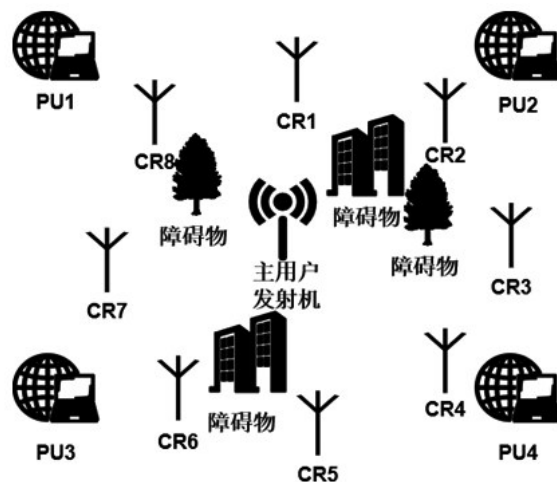


图1 协作频谱感知应用环境

Fig. 1 Application environment diagram of collaborative spectrum sensing

收稿日期:2019-01-27;修回日期:2019-04-22

基金项目:陕西省自然科学基金基础研究计划项目(2017JM6071)

作者简介:孙昊祥,硕士研究生,研究方向为认知无线电频谱感知、频谱管理,电子信箱:593264062@qq.com;陈长兴(通信作者),教授,主要研究方向为信号与处理、现代通信理论、信息系统建模与仿真,电子信箱:xachenchangxing@126.com

引用格式:孙昊祥,陈长兴,迟文升,等.协作感知门限自适应优化[J].科技导报,2019,37(13):76-82;doi:10.3981/j.issn.1000-7857.2019.13.011

内多个节点的感知结果融合消除路径阴影和深度衰落情况的影响,提高感知结果的准确性。但是协作感知的难点在于感知结果的信息融合准则的选取,最开始使用的是“与”准则、“或”准则,后来又有文献提出了基于D-S证据理论的感知准则等方法,褚御芝等人对基于决策融合和数据融合的5种融合准则算法进行了研究并比较了它们的频谱检测性能^[4],本文使用加权融合准则,其优点是实时准确性很高,缺点是随着时间变化,且最优化权值组合需要发生相应的变化,对于权值的动态变化难以实现。

为了实现更好的频谱感知效果,需要实现检测概率和虚警概率的权衡^[5],因此要更准确的寻找最优权值组合。陈凯等^[6]在其工作中提出基于属性改进的加权改进,李玲远等^[7]则是使用信噪比作为加权依据,但由于无线电信号的接收不光受噪声影响,影响权值不准确,Quan等^[8]则是基于检测概率进行加权组合,其结果的准确性易受干扰,虚警概率较大,刘斌等^[9]基于数据融合分析权值组合,然而这一方法对于数据量的要求过大,实现困难,因此Chen等^[10]又提出基于迭代算法寻找最优数据的自适应协同感知融合规则。

黄唐森等^[11]提到认知用户可以根据对环境的监督学习来自适应的调整检测阈值提升低信噪比下的感知性能,而Thilina等^[12]提出了一种基于机器学习技术的认知无线网络协同频谱感知算法以模式分类的方式确定信道是否可用。因此本文将通过频谱分割技术得到的主用户的实时占用情况,与各感知节点的实时感知结果作为训练数据,参照Hei等^[13]的工作应用遗传算法实现对各感知节点结果的融合判决,计算进化过程中的个体适应度,得到各感知节点的感知结果与信道状态的映射关系,即各节点感知结果在决策中所占的权值。当获得各节点权值,便可以得知各感知节点的当前感知性能,从而可以相应的实现感知门限的优化。

1 系统模型

设在一个有着 M 个感知节点的认知无线网络中,在感知信道 i 的主用户占用状态时,各节点检测时间内的采样点数为 $N=ft$,即采样频率为 f ,各节点的检测时间为 τ ,建立感知系统模型如下。

1.1 各感知节点模型

感知节点 j 接收到的无线电信号可以表示为 $x_{ij}(n)$,

如式(1)所示,即感知节点 j 在感知信道 i 时的第 n 次采样的信号。

$$x_{ij}(n) = \begin{cases} s(n), & H_0 \\ u(n) + s(n), & H_1 \end{cases} \quad (1)$$

假设情形 H_0 表示接收到的信号仅存在噪声信号,主用户不存在,假设情形 H_1 表示噪声信号与主用户信号均存在,主用户存在。

设节点 j 的判决统计量 T_j 如式(2)所示:

$$T_j = \frac{1}{N} \sum_{n=1}^N |x_{ij}(n)|^2 \quad (2)$$

参照罗丽平等在其研究中设定的信号环境^[14],设无线电信号 $s(n)$ 为圆对称复高斯(CSCG)噪声信号,主用户信号为复杂相移键控(PSK)调制信号。因此有 $s(n) \sim N(0, \sigma_s^2)$, $u(n) \sim N(0, \sigma_u^2)$ 。因此在主用户不存在的情形 H_0 , $T_j = \frac{1}{N} \sum_{n=1}^N |s(n)|^2$,当 N 取较大值,由根据中心极限定理可得 T_j 的均值 $\mu_0 = \sigma_s^2$,方差 $\sigma_0^2 = \frac{1}{N} (E|s(n)|^4 - \sigma_s^4) = \frac{\sigma_s^4}{N}$ 。

又因为设感知节点 j 接收的信道 i 的信噪比为 γ_{ij} ,因此在主用户存在的情形 H_1 , $T_j = \frac{1}{N} \sum_{n=1}^N |u(n) + s(n)|^2$,其均值 $\mu_1 = (\gamma_{ij} + 1)\sigma_s^2$,方差

$$\sigma_1^2 = \frac{1}{N} (E|u(n)|^4 + E|s(n)|^4 - (\sigma_u^2 - \sigma_s^2)^2) = \frac{(2\gamma_{ij} + 1)\sigma_s^4}{N}。$$

综上所述有

$$T_j \sim \begin{cases} N\left(\sigma_s^2, \frac{\sigma_s^4}{N}\right) & H_0 \\ N\left((\gamma_{ij} + 1)\sigma_s^2, \frac{(2\gamma_{ij} + 1)\sigma_s^4}{N}\right) & H_1 \end{cases} \quad (3)$$

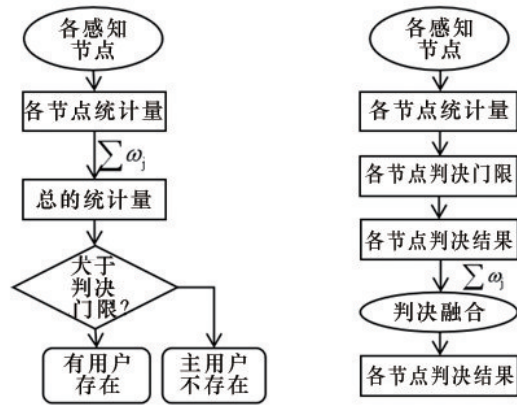
1.2 协作感知模型

如图2(a),在传统的加权协作感知中,通常设每个感知节点的权值为 ω_j ,参照刘祥等^[15]研究方法计算基于能量检测的判决统计量 T 为总的统计量,如式(4)所示,设总的判决门限为 λ ,两者比较进行判决。

$$T = \frac{1}{M} \sum_{j=1}^M \omega_j T_j = \frac{1}{M} \sum_{j=1}^M \omega_j \frac{1}{N} \sum_{n=1}^N |x_{ij}(n)|^2 \quad (4)$$

在本文中采用加权协作感知的方式(图2(b)),各感知节点 j 分别设定自己的感知门限为 λ_j ,在得到各感知节点原本的统计量后,可以得到基于加权协作感知的各节点统计量如式(5)所示。

$$T'_j = \omega_j T_j = \omega_j \frac{1}{N} \sum_{n=1}^N \|x_{ij}(n)\|^2 \quad (5)$$



(a) 传统加权协作感知流程图 (b) 改进的加权协作感知流程图

图2 加权协作感知流程图

Fig. 2 Flowchart of weighted collaborative sensing

然后再将式(5)所示的统计量与各节点感知门限 λ_j 进行比较,获得各节点感知结果,再将各节点感知结果进行加权融合进行判决。

因此,各感知节点的虚警概率和检测概率如式(6)和式(7)所示:

$$P_{fj} = P(T'_j > \lambda_j | H_0) = P\left(T_j > \frac{\lambda_j}{\omega_j} | H_0\right) = Q\left(\sqrt{N} \left(\frac{\lambda_j}{\omega_j \sigma_s^2} - 1\right)\right) \quad (6)$$

$$P_{dj} = P(T'_j > \lambda_j | H_1) = P\left(T_j > \frac{\lambda_j}{\omega_j} | H_1\right) = Q\left(\sqrt{\frac{N}{2\gamma_{ij} + 1}} \left(\frac{\lambda_j}{\omega_j \sigma_s^2} - \gamma_{ij} - 1\right)\right) \quad (7)$$

其中 $Q(\cdot)$ 为标准高斯函数的互补分布函数,又因为

$$Q^{-1}(P_{fj}) = \sqrt{N} \left(\frac{\lambda_j}{\omega_j \sigma_s^2} - 1\right) \quad (8)$$

所以有

$$\lambda_j = \omega_j \sigma_s^2 \left(\frac{Q^{-1}(P_{fj})}{\sqrt{N}} + 1\right) \quad (9)$$

同理由式(7)可得

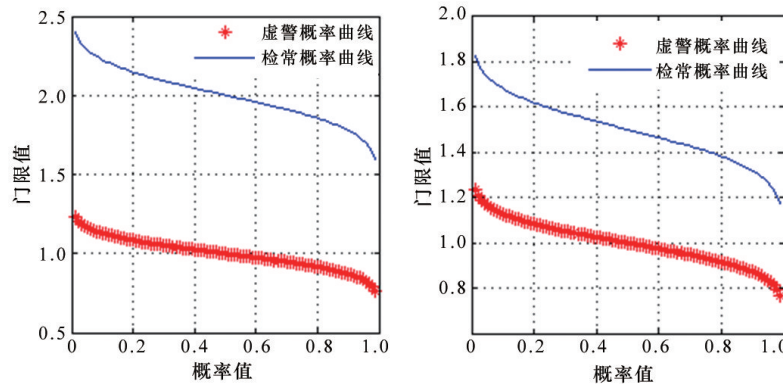
$$\lambda_j = \omega_j \sigma_s^2 \left(\sqrt{\frac{2\gamma_{ij} + 1}{N}} Q^{-1}(P_{dj}) + 1 + \gamma_{ij}\right) \quad (10)$$

由于 $Q^{-1}(\cdot)$ 为减函数,又因为频谱感知中要求虚警概率 P_{fj} 越小越好,检测概率 P_{dj} 越大越好,因此可以得到一个中间点,既尽可能地使虚警概率达到更低,检测概率更高。

图3(a)为信噪比为10 dB时感知门限与虚警概率和检测概率之间的关系曲线,可以看到在检测概率达到足够高的标准值时感知门限为 λ_{jd} ,虚警概率达到足够低的标准值时感知门限为 λ_{jf} ,且 $\lambda_{jd} > \lambda_{jf}$ 。因此为了保证检测概率和虚警概率同时达到标准,感知门限值取 λ_{jd} 和 λ_{jf} 的中间值即可;图3(b)为信噪比为-10 dB时感知门限与虚警概率和检测概率之间的关系曲线,可以看到在检测概率达到足够高的标准值时的感知门限 λ_{jd} 与虚警概率达到足够低的标准值时的感知门限 λ_{jf} 的关系为 $\lambda_{jd} < \lambda_{jf}$ 。又因为频谱感知的主要目的是在不影响主用户使用的前提下尽可能的发现频谱空洞从而提高频谱利用率,因此应主要保证检测概率达到标准,感知门限值取 λ_{jd} 。设信噪比为 γ_{i0} 时 $\lambda_{jd} = \lambda_{jf}$,则感知门限的取值如式(11)所示:

$$\lambda_j = \begin{cases} \frac{\lambda_{jd} + \lambda_{jf}}{2} & \gamma_{ij} \geq \gamma_{i0} \\ \lambda_{jd} & \gamma_{ij} < \gamma_{i0} \end{cases} \quad (11)$$

又因为加权协作感知的融合判决结果的检测概率



(a) 信噪比为10 dB时感知门限与概率值的关系 (b) 信噪比为-10 dB时感知门限与概率值的关系

图3 感知门限与额定概率的关系曲线

Fig. 3 Relationships between sensing threshold and defined probability

$P_{d,\omega}$ 和虚警概率 $P_{f,\omega}$ 如式(12)所示:

$$\begin{cases} P_{d,\omega} = \sum_{j=1}^M \omega_j P_{d_j} \\ P_{f,\omega} = \sum_{j=1}^M \omega_j P_{f_j} \end{cases} \quad (12)$$

因此当限定每个节点的检测概率和虚警概率均达到标准值,则可以保证协作感知全局检测概率和虚警概率均能达到标准,而根据式(9)和式(10),此时各节点感知门限仅与各节点权值 ω_j 有关。

2 基于遗传算法的感知门限优化

在加权协作感知中,为了得到最优权值组合,可以使用遗传算法进行搜索,遗传算法是一种通过模拟达尔文生物进化论的自然选择和遗传学机理的生物进化过程来解决最优化的搜索启发式算法^[16],可以直接对结构对象进行操作,不存在求导和函数连续性的限定,具有内在的隐并行性和更好的全局寻优能力;并且概率化的寻优方法能自动获取和指导优化的搜索空间,自适应地调整搜索方向,不需要确定的规则。

本文根据公式推导,发现了检测概率和虚警概率一定时感知门限和权值的关系如式(9)和式(10)所示,因此为了实现感知门限的准确优化可以建立如图4所示的自适应优化流程。

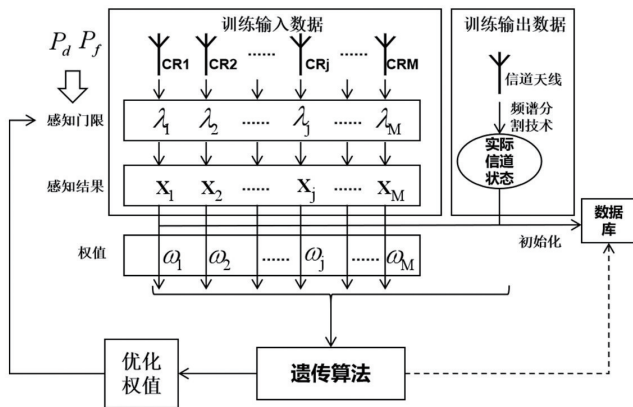


图4 基于遗传算法的感知门限优化流程
Fig. 4 Optimization process of sensing threshold with genetic algorithm

首先,限定频谱感知的检测概率和虚警概率均应达到标准值,初始化感知门限将各感知节点感知到的结果和利用频谱分割技术采集到的实际信道状态作为训练数据,利用遗传算法找到最优的权值组合,其次,根据公式(9)和(10)得到各节点对应权值状态下的 λ_{jd}

和 λ_{jf} ,最后,通过信噪比进行判断,得到每个感知节点当前信噪比条件下的最优门限值。

当感知门限发生变化,感知结果也随之变化,因此训练数据更新,再次利用遗传算法得到最优权值组合,并继而再次优化感知门限,实现感知门限——感知结果——权值组合的循环优化过程,最终感知门限可以趋于稳定的最优值。同时,随着时间的推移,当各节点信噪比发生变化时,该感知系统也可以相应的实现自适应的优化调整。

3 实验仿真与分析

本实验仿真针对常见的社区WIFI信号占用信道情况进行仿真,通过在实验室环境下模拟社区内楼宇间信号遮挡情况进行实验数据采集。当设置感知节点数 M 为10,感知节点单次检测时间内的采样点数 N 为100,限定检测概率为 $P_d \geq 99\%$,虚警概率为 $P_f \leq 10\%$ 时,由式(9)和(10)可以得到使 $\lambda_{jd} = \lambda_{jf}$ 的信噪比 γ_{j0} 为-8.2 dB。

初始化各感知节点在融合判决中的权值相等,均为0.1,因此可以得到相应的初始化感知门限,可以得到相应的感知结果,采集1000次数据用于遗传算法对权值优化的训练。

在仿真实验中,由于系统中共有10个感知节点,因此设置遗传算法的属性个数为10,即每条染色体的长度为10;每个节点采集数据数为1000条,因此设置遗传算法的种群内个体数目为1000;设置最大迭代次数为500次,染色体发生交叉的概率为0.2,发生变异的概率为0.2,将融合结果的准确率作为遗传算法的适应度。最终,通过导入数据进行仿真,可以得到遗传算法寻找最优解的过程中适应度与迭代次数的关系如图5所示。

根据自适应优化结构,利用得到的优化权值组合再次优化感知门限,得到感知结果再次带入遗传算法进行优化,最终得到自适应优化结果为各节点权值的优化曲线(图6),图7则是各节点感知门限值的优化曲线。

由图6和图7可以看到,权值和感知门限均在约27次以后趋于稳定,因此最终可以获得当前环境各节点的最优感知门限值和加权融合的最优权值组合。

随着感知门限值的优化,协作感知的融合判决结果与实际信道状态比较的检测准确率如图8所示,可以看到检测准确率在大约27次后趋于稳定值并符合检测概率的性能标准,与感知门限和权值的优化结果一致。

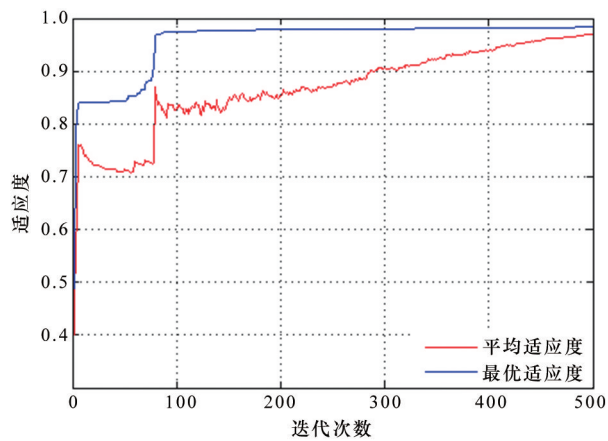


图5 遗传适应度与迭代次数的关系曲线

Fig. 5 Relationships between genetic fitness and number of iterations

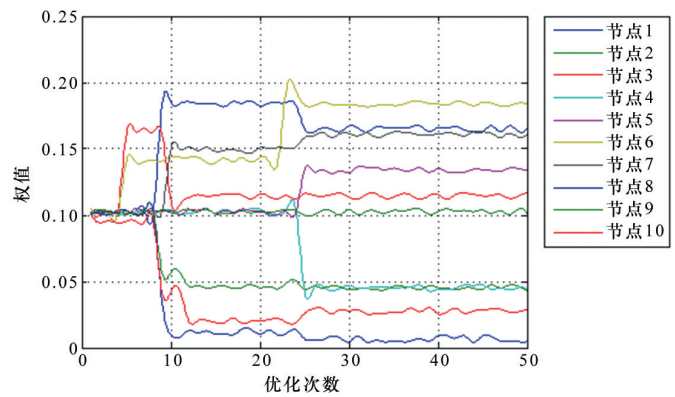


图6 各节点权值的优化曲线

Fig. 6 Optimization curves of weights of each node

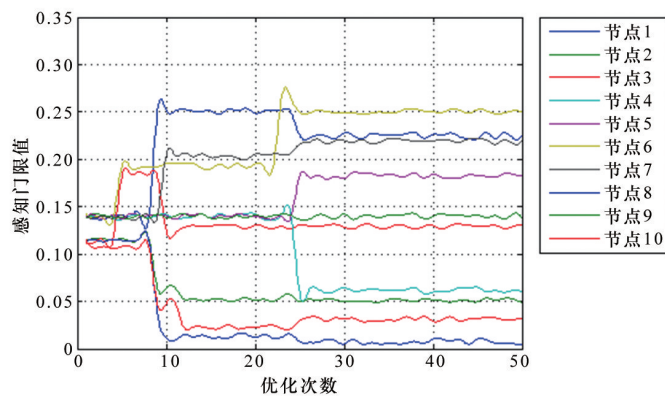


图7 各节点感知门限值的优化曲线

Fig. 7 Optimization curves of sensing thresholds of each node

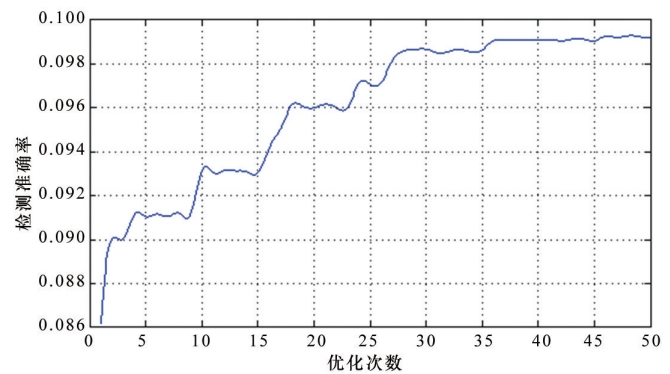


图8 检测准确率的优化曲线

Fig. 8 Optimization curve of detection accuracy

4 结论

对加权协作感知中的各节点感知门限进行优化,通过查找相关文献及公式推导,找到了在限定检测概率和虚警概率且信噪比已知的情况下,感知节点的感知门限和权值之间的关系,又利用遗传算法寻找到最优的权值组合,继而可以再次优化感知门限,实现了感知门限——感知结果——权值组合的自适应优化过

程,保证了在复杂条件下协作感知结果的准确性和可靠性。实验仿真结果充分证明了该优化过程的实际优化效果,优化速度快,且优化结果稳定,对于信噪比随时间的变化适应性强。同时由于本文的优化方式不改变硬件结构,仅在MAC层从感知过程中加入一个自适应优化流程,所以该方法在协作频谱感知的相关应用中有着较高的实用价值。



参考文献(References)

- [1] Haykin S, Thomson D J, Reed J H. Spectrum sensing for cognitive radio[J]. Proceedings of the IEEE, 2009, 97(5): 849-877.
- [2] 孙牧歌, 孙学宏, 张旋, 等. 基于能量检测的增强型自适应门限优化算法[J]. 信息通信, 2017(10): 10-13.
Sun Muge, Sun Xuehong, Zhang Xuan, et al. An enhanced adaptive threshold optimization algorithm based on energy detection[J]. Information & Communication, 2017(10): 10-13.
- [3] 龙颖贤, 张宁, 周峰, 等. 一种基于噪声估计的能量检测自适应门限新算法[J]. 电信科学, 2012, 28(5): 49-53.
Long Yingxian, Zhang Ning, Zhou Feng, et al. A new adaptive threshold algorithm based on noise estimation for energy detection[J]. Telecommunications Science, 2012, 28(5): 49-53.
- [4] 褚御芝, 郑宝玉, 季薇. 协同频谱感知中的融合策略[J]. 南京邮电大学学报(自然科学版), 2010, 30(3): 39-45.
Chu Yuzhi, Zheng Baoyu, Ji Wei. Data fusion schemes based on cooperative spectrum sensing[J]. Journal of Nanjing University of Posts and Telecommunications(Natural Science), 2010, 30(3): 39-45.
- [5] Liang Y C, Zeng Y, Peh E C Y, et al. Sensing-throughput tradeoff for cognitive radio networks[J]. IEEE Transactions on Wireless Communications, 2008, 7(4): 1326-1337.
- [6] 陈凯, 黄英来, 高文韬, 等. 一种基于属性加权补集的朴素贝叶斯文本分类算法[J]. 哈尔滨理工大学学报, 2018(4): 69-74.
Chen Kai, Huang Yinglai, Gao Wentao, et al. An improved naive bayesian text classification algorithm based on weighted features and its complementary set[J]. Journal of Harbin University of Science and Technology, 2018(4): 69-74.
- [7] 李玲远, 杨爽. 基于信噪比加权的协作频谱感知技术[J]. 华中师范大学学报(自科版), 2010, 44(4): 577-579.
Li Lingyuan, Yang Shuang. SNR-based weighted cooperative spectrum sensing in cognitive radio[J]. Journal of Huazhong Normal University(Natural Sciences), 2010, 44(4): 577-579.
- [8] Quan Z, Cui S, Sayed A H. An optimal strategy for cooperative spectrum sensing in cognitive radio networks[C]//IEEE GLOBECOM 2007- IEEE Global Telecommunications Conference. IEEE, 2007: 2947-2951.
- [9] 刘斌, 杨俊安. 基于数据融合的加权合作频谱感知技术[J]. 电子技术应用, 2008, 34(12): 118-121.
Liu Bin, Yang Junan. Weighted cooperative spectrum sensing technology based on data fusion[J]. Application of electronic technique, 2008, 34(12): 118-121.
- [10] Chen L, Wang J, Li S. An adaptive cooperative spectrum sensing scheme based on the optimal data fusion rule[C]//International Symposium on Wireless Communication Systems. Trondheim, Norway: IEEE, 2007: 582-586.
- [11] 黄堂森, 王结太. 基于监督学习的自适应协作频谱感知算法

- [J]. 光电子·激光, 2016(9): 1010–1016.
- Huang Tangsen, Wang Jietai. An adaptive cooperative spectrum sensing algorithm based on supervised learning[J]. Journal of Optoelectronics·Laser, 2016(9): 1010–1016.
- [12] Thilina K M, Choi K W, Saquib N, et al. Machine learning techniques for cooperative spectrum sensing in cognitive radio networks[J]. IEEE Journal on Selected Areas in Communications, 2013, 31(11): 2209–2221.
- [13] Hei Y, Li W, Li M, et al. Optimization of multiuser MIMO cooperative spectrum sensing in cognitive radio networks[J]. Cognitive Computation, 2015, 7(3): 359–368.
- [14] 罗丽平, 李学易, 秦家银. 认知 MIMO 系统频谱检测与吞吐量折中[J]. 中山大学学报(自然科学版), 2012, 51(2): 6–11.
Luo Liping, Li Xueyi, Qin Jiayin. Spectrum sensing and throughput tradeoff for cognitive MIMO system[J]. Acta Scientiarum Naturalium Universitatis Sunyatseni, 2012, 51(2): 6–11.
- [15] 刘祥. 基于信噪比阈值的协作频谱感知算法的研究[D]. 合肥: 安徽大学, 2014.
Liu Xiang. Research on cooperative spectrum sensing algorithm based on SNR threshold[D]. Hefei: Anhui University, 2014.
- [16] 周明, 孙树栋. 遗传算法原理及应用[M]. 北京: 国防工业出版社, 1999.
Zhou Ming, Sun Shudong. Principle and application of genetic algorithms[M]. Beijing: National Defense Industry Press, 1999.

Adaptive optimization of collaborative sensing threshold using genetic algorithm

SUN Haoxiang¹, CHEN Changxing^{1*}, CHI Wensheng², LING Yunfei¹

1. Basic Department, Air Force Engineering University, Xi'an 710051, China

2. Equipment Management and UAV Engineering College, Air Force Engineering University, Xi'an 710051, China

Abstract In the spectrum sensing process, cooperative sensing method is to fuse the sensing results of multiple nodes in space to eliminate the influence of path shadow and deep fading and effectively improve accuracy and reliability of results. In order to ensure that the detection probability and the false alarm probability of the fusion result reach the standard, the cooperative decision criterion based on weighted fusion needs to make the perceptual result of each node reach the corresponding standard. Therefore, this paper proposes a method to set an appropriate perceptual threshold for each perceptual node to achieve optimization. Firstly, the analysis of each sensory node can obtain the relationship between the threshold and node weight under the condition of fixed detection probability and false alarm probability. Secondly, using the genetic algorithm, the weight is optimized to realize the weight optimization, the adaptive optimization process of perceptual threshold optimization. Finally, simulation results show that the proposed method can efficiently and accurately realize adaptive optimization of sensing threshold, thus ensuring the actual performance of cooperative spectrum sensing.

Keywords spectrum sensing; weighted cooperative sensing; sensing threshold; genetic algorithm; adaptive optimization ●



(编辑 徐丽娇)