

# 一种认知无线网络中的协作用户快速频谱感知优化算法

范波勇<sup>1</sup> 张敏<sup>2</sup> 周井泉<sup>3</sup>

<sup>1</sup>(长沙民政职业技术学院软件学院 湖南 长沙 410004)

<sup>2</sup>(湖南邮电职业技术学院 湖南 长沙 410015)

<sup>3</sup>(南京邮电大学电子与光学工程学院 江苏 南京 210003)

**摘要** 认知无线电是一种智能技术,它可以根据周围无线环境的改变而自动快速调整频谱参数。在认知无线电中需要采用频谱感知技术来快速探测频谱空穴。分析了一种基于能量检测法进行频谱感知的优化算法,该算法起到了优化代价函数的目的。在此基础上提出一种复杂网络结构下快速频谱感知的方法,该算法在满足给定临界代价函数的情况下,减少了所需的协作认知用户数,改善了漏检率性能。

**关键词** 认知无线电 协作频谱感知 代价函数 漏检率

中图分类号 TP3 TN92

文献标志码 A

DOI:10.3969/j.issn.1000-386x.2022.07.018

## A FAST SPECTRUM SENSING OPTIMIZATION ALGORITHM FOR COOPERATIVE USERS IN COGNITIVE RADIO NETWORKS

Fan Boyong<sup>1</sup> Zhang Min<sup>2</sup> Zhou Jingquan<sup>3</sup>

<sup>1</sup>(School of Software, Changsha Social Work College, Changsha 410004, Hunan, China)

<sup>2</sup>(Hunan Post and Telecommunication College, Changsha 410015, Hunan, China)

<sup>3</sup>(School of Electronic and Optical Engineering, Nanjing University of Posts and Telecommunications, Nanjing 210003, Jiangsu, China)

**Abstract** Cognitive radio is an intelligent technology which has the ability to rapidly and autonomously adapt spectrum parameters according to the changing environments and conditions. In cognitive radio, spectrum sensing technology need to be used to quickly detect spectrum holes. We analyzed a kind of optimization rule based on energy detection for spectrum sensing, which optimized the cost function. On the basis of that, we proposed a fast spectrum sensing algorithm for a complex network. Under the condition of satisfying the given cost function, the algorithm reduced the number of cooperative cognitive users and improved the performance of missed detection rate.

**Keywords** Cognitive radio Cooperative spectrum sensing Cost function Missing detection rate

## 0 引言

为了加快 5G 移动通信网络商用,《国家无线电管理规划(2016-2020 年)》指出将重耕频谱资源,为 5G 系统储备 500 MHz 以上的频谱资源。国际无线电通信全会 R15 将 5G 正式定名为 IMT-2020,意味着国际电联规定现有 IMT 系统使用的所有中低频段都可以被 5G 系统所采用,扩展 5G 网络的覆盖性能。另外,新推出的《国家信息化发展战略纲要》明确将频率作为国

家信息化发展的重要基础设施,指出要做好资源配置和科学规划,提升频谱资源利用率<sup>[1]</sup>。

近期,国家无线电监测中心发布《450 MHz-5 GHz 关注频段频谱资源评估报告》,给出了北京等城市部分无线电频谱占用情况,统计得出 5 GHz 以下所关注频段大部分的使用率远远小于 10%,说明 5 GHz 以下已分配无线频谱资源利用率低、使用效率低<sup>[2]</sup>。

由此可见,5G 需要采用认知无线电技术来提高频谱利用率<sup>[3]</sup>。认知无线电技术可使次用户(Secundary User, SU)机会接入主用户(Primary User, PU)的授权

频谱,允许次用户租用主用户未使用的频谱资源,或者允许次用户与主用户共享频谱资源<sup>[4-6]</sup>。认知无线电系统能够自动对周围无线环境进行感知,从而对系统传输参数进行动态调整。认知用户通过频谱检测,一方面发现现有的频谱空穴,并利用这些空穴进行通信。另一方面当有主用户恢复通信的时候,及时退出空穴而不影响主用户的通信。但是,由于多径和阴影效应的存在,单个用户的感知能力十分有限。相形之下,协作频谱感知技术可以大大提高频谱感知的能力<sup>[7-9]</sup>。

协作频谱感知技术在提高系统的检测率的同时,会提高计算复杂度和延长检测时间。最经典的融合检测准则有 OR 准则、AND 准则和 K/N 准则。OR 准则通过对认知用户发送给接收器的本地判决结果做或运算作为最终的判决结果,即一个认知用户判断主用户存在则接收器就判定 PU 信号存在。OR 准则能够提高检测率,减小对 PU 的干扰,同时提高虚警率,降低频谱空穴识别能力,降低频谱利用率。AND 准则通过对认知用户发送给接收器的本地判决结果做与运算作为最终的判决结果。即所有认知用户都判断 PU 存在的情况下接收器才会判断 PU 存在。AND 准则能够降低虚警率,提高频谱空穴发现能力,提高频谱利用率,同时降低检测概率,增加对 PU 的干扰。而 K/N 准则是一个折中的检测准则,系统中有  $N$  个认知用户,只要有  $K(1 \leq K \leq N)$  个认知用户的本地感知判断 PU 存在,那么接收器就会判断 PU 存在。与 OR 准则相比,K/N 准则虚警率要低;与 AND 准则相比,K/N 准则检测率要高<sup>[10]</sup>。

通过与经典融合检测准则的比较,本文提出采用能量检测法进行协作频谱感知的优化方法,在保证不影响主用户通信的前提下,使得总的代价函数最优。在此基础上,提出复杂认知网络,在满足代价函数边界条件下,快速寻找所需的最少协作认知用户数的方法<sup>[11]</sup>。

## 1 系统模型

频谱感知的本质是一个二元假设问题,可以如下描述: $H_0$ 为主用户不在通信, $H_1$ 为主用户正在通信。

考虑如图 1 的模型:认知网络是由  $K$  个认知用户(SU)和一个接收器组成的。接收器起到基站的作用,协调所有的认知用户以及整个认知无线网络。假定  $K$  个认知用户独立地进行本地频谱感知。感知采用能量检测法,即在固定带宽  $W$  和时间间隔  $T$  内测量无线信道频谱所携带的能量,以决定是否在主用户(PU)。由文献[6]可知对于第  $i$  个认知用户,在 AWGN 信道

下能量检测法的平均虚警概率和平均漏检概率可以表示为:

$$P_{f,i} = \text{Prob}\{E_i > \lambda_i | H_0\} = \frac{\Gamma\left(u, \frac{\lambda_i}{2}\right)}{\Gamma(u)} \quad (1)$$

$$P_{d,i} = \text{Prob}\{E_i > \lambda_i | H_1\} = Q(\sqrt{2\gamma_i}, \sqrt{\lambda_i}) \quad (2)$$

$$P_{m,i} = 1 - P_{d,i} \quad (3)$$

式中: $P_{f,i}$ 为第  $i$  个认知用户的虚警概率; $P_{d,i}$ 为第  $i$  个认知用户的检测概率,采用  $Q$  函数计算出它的期望值; $P_{m,i}$ 为第  $i$  个认知用户的漏检概率; $E_i$ 是第  $i$  个认知用户所携带的能量; $\gamma_i$ 为第  $i$  个认知用户的信噪比; $\lambda_i$ 为第  $i$  个认知用户的检测门限值; $u$ 为能量检测中带宽  $W$  和时间间隔  $T$  的乘积。

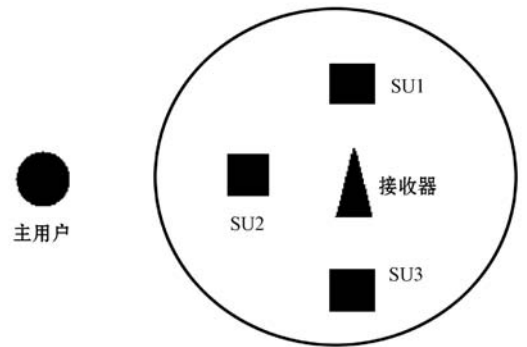


图 1 频谱感知网络结构

协作频谱感知中,各个认知用户将本地的判决结果以 1 bit 形式传给接收器,设定门限用户数  $n$ ,当报告  $H_1$  的用户数超过  $n$ ,则接收器判断主用户存在,否则就判断主用户不存在。在此基础上作一定的假设:比起主用户到认知用户的距离,认知用户间的距离相对较小,所以假定各个认知用户具有相同的路径损耗,而且假定各个认知用户具有相同的门限  $\lambda$ <sup>[12]</sup>。这样  $P_{f,i}$  和  $P_{m,i}$  将与  $i$  无关,可以简化为  $P_f$  和  $P_m$ 。因此总的虚警概率和漏检概率可以简化为:

$$Q_f = \text{Prob}\{H_1 | H_0\} = \sum_{l=n}^K \binom{K}{l} P_f^l (1 - P_f)^{K-l} \quad (4)$$

$$Q_m = \text{Prob}\{H_0 | H_1\} = 1 - \sum_{l=n}^K \binom{K}{l} P_m^{K-l} (1 - P_m)^l \quad (5)$$

## 2 协作频谱感知优化算法设计

在实际通信中,认知用户总的虚警率  $Q_f$  表示信道中没有主用户 PU 的干扰信号时,次用户检测器却检测到干扰信号的概率, $Q_f$  衡量的是认知用户 SU 对频谱空洞的利用率,其值越大利用率越低。漏检率  $Q_m$  表示信道中有 PU 的干扰信号时,次用户检测器却检测不到干扰信号的概率<sup>[13]</sup>。 $Q_m$  衡量的是 SU 对 PU 的干扰

程度,其值越大,PU 受到 SU 的干扰越大。引入代价函数为:

$$F(n) = aQ_f + bQ_m \quad (6)$$

式中: $a$ 、 $b$  表示在虚警和漏检情况下的代价值。在给定认知用户数和信噪比的条件下, $F(n)$  可以表示为:

$$F(n) = aQ_f + bQ_m = b + \sum_{l=n}^K \binom{K}{l} [aP_f^l(1 - P_f)^{K-l} - bP_m^{K-l}(1 - P_m)^l] \quad (7)$$

所以:

$$F(n+1) - F(n) = \binom{K}{n} [b(1 - P_m)^n P_m^{K-n} - aP_f^n(1 - P_f)^{K-n}] \quad (8)$$

令  $F(n+1) - F(n) = 0$  可以得出:

$$\ln \frac{b}{a} + K \ln \frac{P_m}{1 - P_f} = n \left( \ln \frac{P_f}{1 - P_f} + \ln \frac{P_m}{1 - P_f} \right) \quad (9)$$

令  $\alpha = \ln \frac{P_m}{1 - P_f}$ ,  $\beta = \ln \frac{P_f}{1 - P_f}$ ,  $\rho = \ln \frac{b}{a}$ , 将式(9)

化简并取整得:

$$n \approx \left\lceil \frac{\rho + K\alpha}{\beta + \alpha} \right\rceil \quad (10)$$

在  $P_f + P_m < 1$  的情况下,当  $n > \left\lceil \frac{\rho + K\alpha}{\beta + \alpha} \right\rceil$  时, $F(n)$

单调增,当  $n < \left\lceil \frac{\rho + K\alpha}{\beta + \alpha} \right\rceil$  时, $F(n)$  单调减,所以  $n =$

$\left\lceil \frac{\rho + K\alpha}{\beta + \alpha} \right\rceil$  可以被认为是一个极小值。当加入限定条件

$Q_m \leq \varepsilon$  时,一般存在某个临界值  $n_0$ ,使得当  $n \leq n_0$  时,

$Q_m \leq \varepsilon$ ,使得当  $n > n_0$  时, $Q_m > \varepsilon$ 。由于  $Q_m$  是  $n$  的增函

数,所以当  $n_0 \geq \left\lceil \frac{\rho + K\alpha}{\beta + \alpha} \right\rceil$  时, $n = \left\lceil \frac{\rho + K\alpha}{\beta + \alpha} \right\rceil$  满足  $Q_m \leq \varepsilon$ ,

则无须调整。若  $n_0 < \left\lceil \frac{\rho + K\alpha}{\beta + \alpha} \right\rceil$  时, $n = \left\lceil \frac{\rho + K\alpha}{\beta + \alpha} \right\rceil$  不满足

$Q_m \leq \varepsilon$ ,则需要通过减小  $n$  直到  $n_0$  为止。

综上所述,我们可以得到结论 1:给定认知用户数和信噪比,在满足  $Q_m \leq \varepsilon$  的情况下, $aQ_f + bQ_m$  取得最

优的条件是  $n = \min\left(K, \left\lceil \frac{\rho + K\alpha}{\beta + \alpha} \right\rceil, n_0\right)$ 。

根据上述的结论,可以引申到在给定  $aQ_f + bQ_m \leq \theta$  和  $Q_m \leq \varepsilon$  的情况下如何寻找最小的协作认知用户数

$K_{\min}$ 。在这里根据结论,  $n = \min\left(K_{\min}, \left\lceil \frac{\rho + K_{\min}\alpha}{\beta + \alpha} \right\rceil, n_0\right)$ ,

如果能找到某个  $K'$  使得  $K_{\min} = K'$  时,  $aQ_f + bQ_m \leq \theta$ ; 当  $K_{\min} = K' - 1$  时  $aQ_f + bQ_m \leq \theta$ 。这样就找到了满足

$aQ_f + bQ_m \leq \theta$  的最小协作认知用户数  $K_{\min}$ 。又根据结论 1,保证了满足  $Q_m \leq \varepsilon$ 。所以通过上述方法可以快速找到满足  $aQ_f + bQ_m \leq \theta$  和  $Q_m \leq \varepsilon$  的最小协作认知

用户,而不需要所有用户都作为协作认知用户,这样就简化了协作频谱感知。

### 3 仿真结果

仿真条件为假定认知网络中存在 8 个认知用户,信噪比定  $SNR = 10$  dB,代价值  $a = 2$ 、 $b = 1$ 。这时  $F(n)$  化简为  $F(n) = 2Q_f + Q_m$ 。然后根据上述情况,对漏检率性能的改善和最优化准则下代价函数的性能进行了仿真。

图 2 为协作频谱感知中不限制漏检率和限制漏检率的情况对比。通过限制漏检率,协作频谱感知时漏检率性能得到大大改善,基本维持在 0.01 以下,将主用户 PU 的正常通信的干扰降到最小。

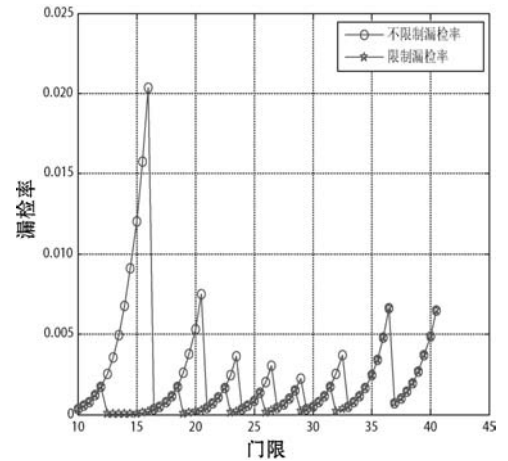


图 2  $K = 8$ , 信噪比  $SNR = 10$  dB 情况下加入限制后的漏检率性能

图 3 说明了所提最优准则在代价函数的代价值  $a = 2$ 、 $b = 1$  情况下,相比于 OR 准则和 AND 准则的漏检率情况。根据前文讨论的定义,将 OR 准则设定门限用户数  $n = 1$ ,将 AND 准则设定门限用户数  $n = K$ 。为了讨论方便,这里不考虑  $K/N$  准则的情况。从图 3 可以看出,所提最优准则的代价函数值相比 OR 准则和 AND 准则大大降低,优化效果明显。由此可见,所提最优算法可以使协作频谱感知的风险最小化,降低算法复杂度,提高频谱感知真正预测时的效果。

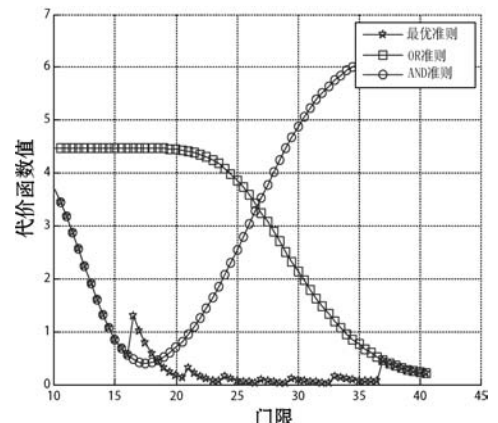


图 3  $K = 8$ , 信噪比  $SNR = 10$  dB 情况下代价函数  $2Q_f + Q_m$  仿真

从图2、图3中可以发现,所提最优准则的图形呈锯齿状,这是由于在式(10)中  $n \approx \left\lceil \frac{\rho + K\alpha}{\beta + \alpha} \right\rceil$ ,即认知用户数门限取值是离散的。

## 4 结 语

认知无线电是5G网络关键技术之一。本文分析采用能量检测法进行协作频谱感知的优化方法,分析一种在不影响主用户通信的前提下,最优化代价函数的算法。并将这种算法引申开来,提出在保证主用户PU正常通信和满足代价函数边界条件下,寻找最小协作认知用户数的算法。通过仿真发现这种算法既保证了主用户的正常通信,又减少了所需的协作认知用户数,改善了漏检率性能,通过最优化,代价函数值大大降低,优化效果明显。

## 参 考 文 献

- [1] 李芃芃,郑娜,仇沛川,等. 全球5G频谱研究概述及启迪[J]. 电讯技术,2017,57(6):734-740.
  - [2] 闫玉芝,李有明,周桂莉,等. 基于加权一致优化的宽带分布式协作压缩频谱感知算法[J]. 电信科学,2016,32(11):71-76.
  - [3] 张键,朱琦. OFDM认知无线电系统中的自适应资源分配新算法[J]. 系统仿真学报,2012,24(12):2535-2539.
  - [4] Sharma S K, Lagunas E, Chatzinotas S, et al. Application of compressive sensing in cognitive radio communications: A survey[J]. IEEE Communications Surveys & Tutorials,2016,18(3):1838-1860.
  - [5] Chen L, Zhao N, Chen Y F, et al. Over-the-air computation for cooperative wideband spectrum sensing and performance analysis[J]. IEEE Transactions on Vehicular Technology, 2018,67(11):10603-10614.
  - [6] Sharma G, Sharma R. Cluster-based distributed cooperative spectrum sensing over Nakagami fading using diversity reception[J]. IET Networks,2019,8(3):211-217.
  - [7] Sharma G, Sharma R. Energy efficient collaborative spectrum sensing with clustering of secondary users in cognitive radio networks[J]. IET Communications, 2019, 13(8): 1101-1109.
  - [8] Abdelmosen A, Wala H. Advances on spectrum sensing for cognitive radio networks: Theory and applications[J]. IEEE Communications Surveys & Tutorials, 2017,19(2):1277-1304.
  - [9] Qin Z J, Gao Y, Plumbley M D. Wideband spectrum sensing on real-time signals at sub-Nyquist sampling rates in single and cooperative multiple nodes[J]. IEEE Transactions on Signal Processing, 2016, 64(12):3106-3117.
  - [10] 顾晓伟. 认知无线电中频谱感知技术的研究[D]. 镇江: 江苏科技大学,2019.
  - [11] Ma Y, Gao Y, Liang Y C, et al. Reliable and efficient sub-Nyquist wideband spectrum sensing in cooperative cognitive radio networks[J]. IEEE Journal on Selected Areas in Communications,2016,34(10):2750-2762.
  - [12] Alexander L P, Jamime V M. Cooperative wideband spectrum sensing based on sub-Nyquist sparse fast Fourier transform[J]. IEEE Transactions on Circuits and Systems II: Express Briefs,2016,63(1):39-43.
  - [13] 闫盛楠,刘洛辛. 基于支撑集融合的分布式协作压缩频谱检测方法[J]. 系统工程与电子技术,2020,42(2):466-472.
- ~~~~~
- (上接第100页)
- [10] 于燕平,林涛. 基于分形特征提取的电能质量数据挖掘[J]. 计算机应用与软件,2016,33(11):24-27,65.
  - [11] Burges C J. A tutorial on support vector machines for pattern recognition[J]. Data Mining and Knowledge Discovery, 1998, 2(2): 121-167.
  - [12] Yong D D, Bhowmik S, Magnago F. An effective power quality classifier using wavelet transform and support vector machine[J]. Expert Systems with Applications, 2015, 42(15/16):6075-6081.
  - [13] Aydiner E, Tuncer T, Dogan S. A Tunable-Q wavelet transform and quadruple symmetric pattern based EEG signal classification method[J]. Medical Hypotheses, 2020, 134(1):16-22.
  - [14] Transmission and Distribution Committee of the IEEE Power & Energy Society. IEEE recommended practice for monitoring electric power quality: IEEE Std. 1159—2009[S]. New York: The Institute of Electrical and Electronics Engineers, Inc, 2009.
  - [15] 王晓龙,唐贵基,周福成. 自适应可调品质因子小波变换在轴承早期故障诊断中的应用[J]. 航空动力学报,2017,32(10):2467-2475.
  - [16] 张涛,张明辉,李清伟,等. 基于粒子群-支持向量机的时间序列分类诊断模型[J]. 同济大学学报(自然科学版), 2016,44(9):1450-1457.
  - [17] 范小龙,谢维成,蒋文波,等. 一种平稳小波变换改进阈值函数的电能质量扰动信号去噪方法[J]. 电工技术学报, 2016,31(14):219-226.
  - [18] Martin V R, Rene J T, Roque A O, et al. Detection and classification of single and combined power quality disturbances using neural networks[J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2014, 61(5): 2473-2482.