

# 两种标准联合的认知无线电频谱分配算法

谢玉鹏<sup>1,2</sup>, 谭学治<sup>1</sup>, 马琳<sup>1</sup>, 蒋梦雄<sup>1</sup>, 吴海燕<sup>3</sup>, 刘鑫<sup>1</sup>

(1. 哈尔滨工业大学 电子与信息工程学院, 150080 哈尔滨; 2. 黑龙江科技大学 电子与信息工程学院, 150022 哈尔滨;  
3. 国家开发银行, 150090 哈尔滨)

**摘要:** 为了提高认知无线电系统频谱分配的公平性, 本文提出了采用两种协作式标准计算子图的认知无线电系统的频谱分配算法. 首先对一些子图采用 CMSB 标准, 频谱分配完之后, 对其他一些子图采用 CMPF 标准. 系统仿真结果表明, 系统公平性相比于原来的改进的算法有了明显的提高, 同时本文算法的瓶颈认知用户信道容量得到了较大程度的改善.

**关键词:** 认知无线电; 频谱分配; 公平性;

**中图分类号:** TN929.5      **文献标志码:** A      **文章编号:** 0367-6234(2013)05-0030-05

## Spectrum allocation algorithm of combining two standards on cognitive radio system

XIE Yupeng<sup>1,2</sup>, TAN Xuezhi<sup>1</sup>, MA Lin<sup>1</sup>, JIANG Mengxiong<sup>1</sup>, WU Haiyan<sup>3</sup>, LIU Xin<sup>1</sup>

(1. School of Electronics and Information Engineering, Harbin Institute of Technology, 150080 Harbin, China;

2. School of Electronics and Information Engineering, Heilongjiang University of Science and Technology, 150022 Harbin, China;

3. China Development Bank, 150090 Harbin, China)

**Abstract:** To improve the system fairness of Spectrum Allocation on cognitive radio system, this paper presents a spectrum allocation algorithm of combining two standards on cognitive radio system. Firstly, some subgraphs allocate spectrum by using the Collaborative Max Sum Bandwidth (CMSB) standard, after finishing spectrum allocation, then other subgraphs adopt Collaborative Max Proportional Fair (CMPF) standards. Compared with the previous improved parallel algorithm, the simulation shows that the system fairness has been improved obviously, at the same time, the channel capacities of bottleneck cognitive users have been improved greatly.

**Key words:** cognitive radio; spectrum allocation; fairness

颜色敏感图论算法 (Color Sensitive Graph Coloring, CSGC)<sup>[1-4]</sup> 以最优化系统的公平性和信道容量为分配目标, 其思想是根据标准对使用的频谱 (本文频谱指信道) 来标号, 将标号大的频谱相继分给认知用户, 直到认知用户的频谱列表为

空. 并行算法<sup>[5-7]</sup> 的思想是将初始化的拓扑图分成几个子图, 这些子图在频谱分配时因没有考虑到其他子图的情况, 因而彼此之间无法知道已分配频谱的情况, 从而导致公平性稍差. 如果频谱在分配时能和其他子图交换已经分配的信息, 那么公平性将能得到提高. 为了实现这一想法, 有人提出了改进的并行算法<sup>[8-10]</sup>, 这种算法的思想是: 初始化频谱拓扑图, 该拓扑图被分成  $M$  ( $M$  表示可以分配的频谱数) 个子图, 针对每个子图分别按照标准计算各认知用户使用频谱的标号, 并寻找使用频谱标号最大值的认知用户, 把相应的信道分配给该认知用户, 直到认知用户的频谱列表

**收稿日期:** 2012-05-21.

**基金项目:** 国家自然科学基金委员会与中国民用航空局联合资助项目 (61071104); 国家科技重大专项 "宽带多媒体集群系统技术验证 (中速模式)" (2011ZX03004-004); 黑龙江省教育厅项目 (12511475).

**作者简介:** 谢玉鹏 (1979—) 男, 博士研究生;  
谭学治 (1957—) 男, 教授, 博士生导师.

**通信作者:** 谭学治, tanxz1957@hit.edu.cn.

为空.

前面介绍的算法中使用了协作式和非协作式不同的标准,其中协作式频谱分配标准的性能比非协作式标准好<sup>[11]</sup>. 协作式标准有最大化总带宽(CMSB)标准和协作式最大化比例公平标准(CMPF).

原来改进的并行算法,每次计算标号的方法只使用一个标准,这种情况下一个认知用户可能得到许多频谱,导致不公平,针对这种情况本文提出了一种采用两种协作式标准计算子图的认知无线电系统中频谱分配算法,相对以前的算法,本算法在计算子图标号时用两种协作式的标准:首先对一些子图采用CMSB标准来计算各个认知用户使用频谱的标号,分配完之后,另外一些子图采用CMPF标准来计算各个认知用户使用频谱的标号,通过这种方法可以使公平性得到改善.

## 1 图论模型的数学描述

图论模型常用下面的几个矩阵来描述.

**定义1** 空闲频谱矩阵  $\mathbf{L} = \{l_{n,m} \mid l_{n,m} \in \{0,1\}\}_{N \times M}$ ,  $N$  表征认知用户的个数,  $M$  表征频谱的个数,  $l_{n,m} = 1$  表示认知用户  $n$  能使用频谱  $m$ ,  $l_{n,m} = 0$  表示认知用户  $n$  不能使用频谱  $m$ .

**定义2** 效益矩阵  $\mathbf{B} = \{b_{n,m}\}_{N \times M}$ ,  $b_{n,m}$  表征认知用户  $n$  使用频谱  $m$  的传输速率,将矩阵  $\mathbf{L}$  与矩阵  $\mathbf{B}$  相结合,可得出有效频谱的效益  $\mathbf{L}_B = \{l_{n,m} \cdot b_{n,m}\}_{N \times M}$ .

**定义3** 干扰矩阵  $\mathbf{C} = \{c_{n,k} \mid c_{n,k} \in \{0,1\}\}_{N \times N}$ ,  $c_{n,k} = 1$  表征认知用户  $n$  和认知用户  $k$  不能使用同一频谱,否则会有干扰,当  $n = k$  时,  $c_{n,k} = 0$ .

**定义4** 没有干扰的频谱分配矩阵  $\mathbf{A} = \{a_{n,m} \mid a_{n,m} \in \{0,1\}\}_{N \times M}$ ,  $a_{n,m} = 1$  表征频谱  $m$  分配给认知用户  $n$ .  $a_{n,m} = 0$  表征频谱  $m$  没有分配给认知用户  $n$ .  $\mathbf{A}$  满足如下条件:

$$a_{n,m} \cdot a_{k,m} = 0 \text{ if } c_{n,k} = 1, \forall n, k < N, m < M. \quad (1)$$

**定义5** CMSB 标准<sup>[2-3]</sup>:

$$S_{\text{label}_{n,m}} = \frac{b_{n,m}}{D_{n,m} + 1}, \quad n \in V_m. \quad (2)$$

其中  $D_{n,m}$  表征与认知用户  $n$  相邻且可用频谱列表中使用有频谱  $m$  的认知用户数量. 这个标准的目的是尽量提高系统的信道容量,当一个认知用户  $n$  使用频谱  $m$  时,与这个认知用户相邻的  $D_{n,m}$  个认知用户不能得到频谱  $m$ .

**定义6** CMPF 标准<sup>[3-4]</sup>:

$$S_{\text{label}_{n,m}} = \frac{b_{n,m}}{(D_{n,m} + 1) \cdot \sum_{k=0}^{M-1} a_{n,k} \cdot b_{n,k}}, \quad n \in V_m. \quad (3)$$

其中  $a_{n,k}$  为  $\mathbf{A}$  中的元素,表征在满足式(1)的情况下认知用户  $n$  能否使用频谱  $k$ . 这个标准的目的是:有相邻的认知用户干扰的条件下,使系统的公平性最大.

其中式(2)CMSB标准中,认知用户的  $S_{\text{label}_{n,m}}$  值和已分配的频谱信息没有关系,也就是说拓扑图变化了,分配矩阵  $\mathbf{A}$  不用变化. 式(3)CMPF标准中,认知用户的  $S_{\text{label}_{n,m}}$  值和已经分配的频谱的信息有关,拓扑图变化了,分配矩阵  $\mathbf{A}$  也相应的发生变化.

## 2 本文算法模型

假设在一定的区域内生成拓扑图,当认知用户  $n$  在授权用户  $m$  的工作范围内,不能使用授权用户  $m$  的信道,即  $l_{n,m} = 0$ ; 当两个认知用户在一定距离内不能使用相容的信道,即  $c_{n,k} = 1$ . 本文算法的模型采用式(2)和式(3)两种标准相结合. 式(2)和式(3)中的  $b_{n,m}$  定义为信道容量(本文信道和频谱意义相同),  $b_{n,m}$  表征认知用户  $n$  使用频谱  $m$  的传输速率,根据香农定理可知<sup>[9,11]</sup>:

$$b_{n,m} = B_m \cdot \log_2 \left( 1 + K \cdot \frac{p_{n,m} \cdot |H_{n,m}|^2}{B_m \cdot N_0} \right). \quad (4)$$

式(4)表示认知用户  $n$  使用频谱  $m$  的传输速率,其中  $B_m$  为信道  $m$  的带宽,假设所有信道的带宽都相同,这里用  $B$  代替;  $p_{n,m}$  为认知用户  $n$  在信道  $m$  上的传输功率;  $|H_{n,m}|^2$  为认知用户  $n$  在信道  $m$  上的增益,假设每个认知用户在各个信道的增益相同,即  $|H_{n,m}|^2 = |H_m|^2, \forall n; N_0 = \sigma_0^2 / (f_s / 2)$ ,  $N_0$  为噪声功率谱密度,  $f_s$  为采样点频率,  $\sigma_0^2$  为噪声功率.  $K$  表征为 M-QAM 调制方式和香农容量的信噪比关系,如果是瑞利信道的话,  $K$  的表达式为<sup>[9,11]</sup>

$$K = - \frac{1.5}{\ln(5 \cdot R_{\text{BER}})}. \quad (5)$$

其中  $R_{\text{BER}}$  为误码率.

本文的分配算法步骤如下:

- 1) 初始化系统的认知用户和授权用户的拓扑图;
- 2) 将初始化的系统拓扑图分成为  $M$  个子图(根据步骤1)初始化得到的空闲矩阵,信道数从1到  $M$  变化时的对应  $M$  个子图);

3) 将  $M \times p$  个(如果  $M \times p$  不是整数,取小于  $M \times p$  的整数)子图根据 CMSB 标准得到每个认知用户的标号值,把标号值最大的分配给该认知用户;

4) 直到这些子图里的认知用户的频谱列表为空;

5) 如果认知用户的频谱列表不为空,转 3), 否则转 6);

6) 把  $M(1-p)$  个(如果  $M(1-p)$  不是整数,取小于  $M(1-p)$  的整数)子图根据 CMPF 标准得到每个认知用户的标号值,把标号值最大的分配给该认知用户;

7) 直到这些子图里的认知用户的频谱列表为空;

8) 如果认知用户的频谱列表不为空,转 6), 否则转 9);

9) 分配结束.

上面步骤中的  $p$  表示计算频谱标号时,用 CMSB 标准的子图数占总子图数  $M$  的比例.

### 3 本文算法的三个目标:

1) 协作式最大化瓶颈认知用户信道容量(最大瓶颈认知用户的意思是指使信道容量最低的认知用户,信道容量最大化)表示为

$$u_{\text{user}} = \max_A \min_{n \in N'} \sum_{m=1}^M a_{n,m} b_{n,m}. \quad (6)$$

其中  $N'$  为认知用户的集合.

2) 协作式最大化系统公平(防止大量的信道分给个别认知用户)表示为

$$f = \left( \prod_{n=0}^{N-1} \sum_{m=0}^{M-1} a_{n,m} b_{n,m} \right)^{\frac{1}{N}}. \quad (7)$$

3) 协作式通信开销. 首先定义时间单位  $t$  为拓扑图在相邻两次变化时的时间间隔,本文算法的通信开销是算法的迭代次数乘以时间单位.

### 4 本文算法的仿真实验

下面通过仿真对本文算法和以前改进的并行算法进行比较和验证,假设本文初始化的授权用户之间的信道是彼此正交的,带宽都取  $B = 30$  kHz,认知用户的接收端的误码率  $R_{\text{BER}} = 10^{-5}$ . 认知用户的发射传输功率的取值为  $[0.01, 0.1]$  W 当中的随机值,为了使得到的结果具有一般性,对每一方面的比较都进行了 1 000 次验证.

首先分析  $p$  值对系统公平性的影响,其中  $p$  表示计算频谱标号时,用 CMSB 标准的子图数占总子图数  $M$  的比例,这里的公平性满足式(7),下面针对认知用户数为 9,信道数分别为 9 和 18

两种情况分析  $p$  的取值,不失一般性. 每种情况进行 1 000 次仿真,如图 1.

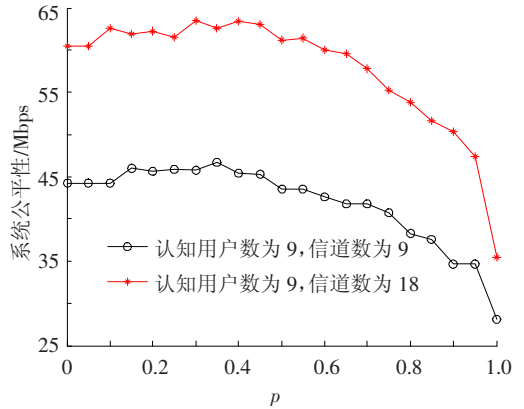


图 1 系统公平性随着  $p$  的变化情况

从图 1 可看到,  $p$  在 0 ~ 1 之间存在一个值,使系统公平性最大,在认知用户数固定,信道数为 18 时的系统公平性明显好于信道数为 9 时的. 其中信道数为 18 时,在  $p = 0.30$  的情况下公平性有最大值. 同理分析取不同的  $p$  值对系统公平性的影响,在频谱分配过程中,经过实验得到不同的认知用户数目,不同的频谱数目,最优的比例因子  $P$  值也不同,实验结果如表 1 所示.  $N$  表示认知用户数,  $M$  表示频谱数.

图 2 表征信道数为 9 时,CSGC 算法、原改进算法和本算法的瓶颈认知用户效益随着认知用户数变化的仿真比较,认知用户数从 6 到 18,不失一般性. 这里最大瓶颈认知用户效益的意思是指使信道容量最低的认知用户,信道容量最大化,从图 2 可以看出,CSGC 算法、原改进算法和本算法的瓶颈认知用户的信道容量随着认知用户数的增大,效益减少,CSGC 算法的瓶颈认知用户效益最好,本算法的瓶颈认知用户效益好于原改进并行算法. 随着认知用户的增加,竞争也会加剧,使瓶颈认知用户效用下降.

图 3 表征信道数为 9 时,CSGC 算法、原改进算法和本算法的认知用户系统公平性随着认知用户数变化的仿真比较,认知用户数从 6 到 18,不失一般性. 这里的系统公平性是指式(7),CSGC 算法、原改进算法和本算法的系统公平性随着认知用户数的增大,系统公平性减少,CSGC 算法的系统公平性最好,本算法的系统公平性好于原改进并行算法. 随着认知用户的增加,竞争也会加剧,使系统的公平性下降.

图 4 表征信道数为 9 时,CSGC 算法、原改进算法和本算法的通信时间随着认知用户数变化的仿真比较,认知用户数从 6 到 18,不失一般性. 本文算法的通信开销是原改进并行算法的 2 倍,

因为本文算法将所有信道分为两部分先后进行分配,导致其复杂度是原来的改进的并行算法的2

倍,CSGC 算法远远大于本文的算法,因为 CSGC 算法每次只分配一个信道,所以时间开销过大。

表1 不同的认知用户数、不同的频谱数所对应最优的比例因子  $P$  值

N	M												
	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18
6	0.35	0.30	0.25	0.25	0.30	0.30	0.20	0.40	0.15	0.20	0.45	0.30	0.45
7	0.35	0.15	0.30	0.30	0.30	0.20	0.25	0.35	0.30	0.30	0.25	0.30	0.35
8	0.20	0.30	0.15	0.45	0.20	0.30	0.25	0.25	0.15	0.20	0.25	0.30	0.35
9	0.35	0.30	0.15	0.35	0.20	0.20	0.25	0.25	0.15	0.30	0.15	0.30	0.30
10	0.20	0.15	0.25	0.25	0.30	0.20	0.25	0.25	0.30	0.35	0.35	0.30	0.30
11	0.20	0.15	0.25	0.15	0.10	0.20	0.25	0.10	0.35	0.30	0.25	0.30	0.35
12	0.20	0.15	0.15	0.25	0.10	0.20	0.25	0.25	0.15	0.30	0.20	0.30	0.35
13	0.15	0.15	0.15	0.15	0.10	0.10	0.25	0.20	0.15	0.30	0.25	0.20	0.35
14	0.15	0.15	0.15	0.25	0.20	0.20	0.25	0.25	0.15	0.20	0.15	0.15	0.25
15	0.10	0.15	0.15	0.20	0.10	0.20	0.25	0.30	0.25	0.20	0.20	0.30	0.30
16	0.20	0.15	0.15	0.15	0.10	0.10	0.25	0.10	0.15	0.35	0.25	0.30	0.35
17	0.20	0.15	0.15	0.15	0.15	0.20	0.25	0.10	0.15	0.15	0.25	0.30	0.30
18	0.15	0.15	0.15	0.10	0.10	0.10	0.25	0.10	0.15	0.20	0.20	0.30	0.25

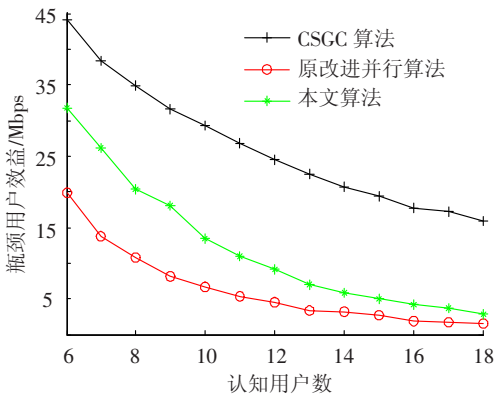


图2 最大化瓶颈认知用户效益比较结果

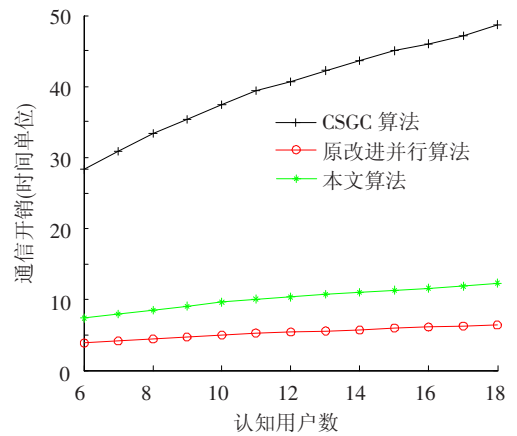


图4 通信时间随认知用户数的变化

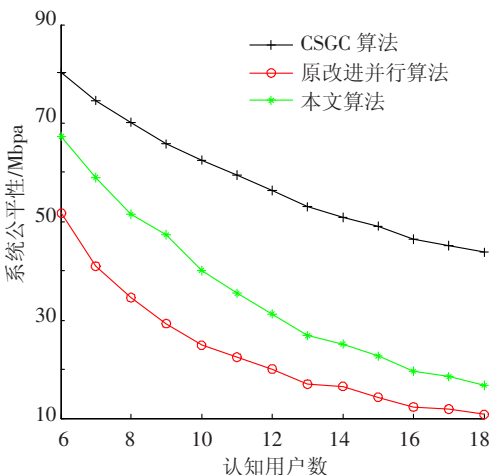


图3 认知用户系统公平性随认知用户数的变化

## 5 结论

本文采用 CMSB 和 CMPF 两种不同的标准计算子图的频谱分配算法,首先一部分信道运用 CMSB 标准分配,这些信道分配完之后对剩余的信道运用 CMPF 标准分配,通过对 CSGC 算法,原改进并行算法和本文算法这三种算法的仿真验证得知,其中 CSGC 算法是一个经典算法,它以最优优化系统的公平性和信道容量为分配目标的,本文算法的瓶颈认知用户信道容量和系统公平性远远好于原改进的并行算法.但本文算法的系统公平性和瓶颈认知用户效用与 CSGC 算法有一定的差距,本文算法的目的是防止许多的信道分配给个别的认知用户,提高瓶颈认知用户信道容量,提高

了系统的公平性,且本文算法的时间开销远远好于 CSGC 算法.

## 参考文献

- [1] WANG Wei, LIU Xin. List-coloring based channel allocation for open-spectrum wireless networks [C]// The 62nd IEEE Vehicular Technology Conference. Piscataway:IEEE, 2005: 690 – 694.
- [2] PENG Chunyi, ZHENG Haitao, ZHAO B Y. Utilization and fairness in spectrum assignment for opportunistic spectrum access [J]. Mobile Networks and Applications, 2006, 11(4): 555 – 576.
- [3] FAN Lu. Spectrum allocation algorithm based on graph theory in cognitive radio networks [D]. Harbin: Harbin Institute of Technology, 2009: 23 – 46.
- [4] LI Y B, YANG R, GAO Z G. Graph-based criteria for spectrum-aware clustering in cognitive radio networks [J]. Ad Hoc Networks, 2012, 2(10): 75 – 94.
- [5] CHEN S, HUANG Y, KAMESH N. A factor graph based dynamic spectrum allocation approach for cognitive network [C]// 2011 IEEE Wireless Communications and Networking Conference, WCNC 2011. Cancun: [s. n.], 2011: 850 – 855.
- [6] ZHAO Zhijin, PENG Zhen, ZHENG Shilian, *et al.* Cognitive radio spectrum allocation using evolutionary algorithms [J]. IEEE Transactions on Wireless Communications, 2009, 8(9): 4421 – 4425.
- [7] LIAO C L, CHEN J. Parallel spectrum allocation algorithm on cognitive radio[R]. Journal of Electronics & Information, 2007, 29(7): 1608 – 1611.
- [8] LIU Y T. Research on spectrum allocation algorithms in cognitive radio networks based on game theory [D]. Harbin: Harbin Institute of Technology, 2010: 20 – 50.
- [9] JIANG M X. Spectrum allocation based on graph theory in cognitive radio networks [D]. Harbin: Harbin Institute of Technology, 2010: 15 – 36.
- [10] LIU Yutao, JIANG Mengxiong, TAN Xuezhi. Time overhead and fairness in spectrum allocation for cognitive radio [C]//2011 6th International ICST Conference on Communications and Networking in China. Harbin: [s. n.], 2011: 34 – 38.
- [11] ZHENG Haitao, PENG Chunyi. Collaboration and fairness in opportunistic spectrum access [C]//IEEE International Conference on Communications. Piscataway:IEEE, 2005: 3132 – 3136.

(编辑 张宏)