

# 一种改进的并行频谱分配算法

李 雷, 郭建新, 高维廷

(空军工程大学信息与导航学院, 西安, 710077)

**摘要** 针对现有动态频谱分配算法时间开销过大, 用户公平性无法满足的问题, 提出了一种基于用户公平性的并行频谱分配算法。该算法在基于图着色理论 CSGC 的动态频谱分配模型的基础上, 引入 HE 社会模型计算出用于改进分配算法的公平系数, 进而利用该系数对并行频谱分配算法进行公平性修正, 最终使得动态频谱分配算法的时间开销和公平性同时得到满足, 同时还详细讨论了公平系数设计对算法的影响。仿真结果表明: 当用户数量固定, 用户效益的波动与已有算法相比趋于平稳, 用户的公平性得到满足; 同时随着频带数的不断增加, 算法的时间开销维持在一个较低的水平基本保持不变。

**关键词** 图着色; 时间开销; 并行算法; 公平性;

**DOI** 10.3969/j.issn.1009-3516.2017.02.008

**中图分类号** TN92 **文献标志码** A **文章编号** 1009-3516(2017)02-0043-06

## An Improved Parallel Algorithm for Spectrum Allocation

LI Lei, GUO Jianxin, GAO Weiting

(Information and Navigation College, Air Force Engineering University, Xi'an 710077, China)

**Abstract:** Aimed at the problems that the time cost is excessive and very hard to meet the needs of user equity by using the existing dynamic spectrum allocation algorithm, a parallel spectrum allocation algorithm based on user equity is proposed. On the basis of mathematic model of CSGC (Color Sensitive Graph Coloring) dynamic allocation theory, HE (Homo Egualis) social model is introduced to calculate the equity parameter for proposed algorithm, and then the equity of parallel allocation can be modified by using this parameter to ensure the allocation algorithm fairly, and can satisfy the time cost as well. Meanwhile, the influence on algorithm caused by equity parameter design is also discussed. The simulation result show that when number of user is fixed, the fluctuation of user benefit will be smooth and steady, the equity will also be satisfied. With the increasing number of frequency band, the time cost of the algorithm will stay at a low level.

**Key words:** graph coloring; time cost; parallel algorithm; fairness

在频谱分配算法中避免干扰和最大化无线频谱利用率是无线通信的 2 个主要技术需求, 但由于两者相互制约无法同时满足, 因此需对算法进行折中平衡。首先, 频谱分配问题本质是避免干扰, 所以无

线通信系统分配频谱方法主要基于固定频谱分配方法, 即将频谱划分为不同的频谱块, 在块与块之间隔离一个相对固定的频段作为保护频段, 再将这些分配给具有授权的运营商, 在运营商授权期满后才能分配

**收稿日期:** 2016-07-09

**基金项目:** 国家自然科学基金(61401499; 61571364)

**作者简介:** 李 雷(1991—), 男, 四川南充人, 硕士生, 主要从事认知无线电研究。E-mail: lilei\_0910@163.com

**引用格式:** 李雷, 郭建新, 高维廷. 一种改进的并行频谱分配算法[J]. 空军工程大学学报(自然科学版), 2017, 18(2): 43-48. LI Lei, GUO Jianxin, GAO Weiting. An Improved Parallel Algorithm for Spectrum Allocation [J]. Journal of Air Force Engineering University (Natural Science Edition), 2017, 18(2): 43-48.

给其他用户使用<sup>[1]</sup>。虽然该分配方式可简化频谱管理,但被授权的频段利用率通常十分低下,而且频谱资源的客观不可再生属性,使得可用频谱资源十分稀缺,已成为无线通信技术发展的瓶颈。认知无线电(Cognitive Radio)动态频谱分配是开放式的,即非授权用户(Secondary User, SU)通过感知外部无线环境智能调节参数,在授权用户(Primary User, PU)未使用授权频段时,机会性接入授权频段,同时不干扰PU正常通信,提高频谱资源利用率<sup>[2-6]</sup>。

文献[7]提出一种基于图着色(Color Sensitive Graph Coloring, CSGC)理论的频谱分配算法,其目的是平衡SU间干扰和系统效益关系。但该算法的分配所需时间随用户数量增加而增加,不适用于实时变化的无线频谱环境,同时用户的信道效益不均衡,无法有效保证用户间公平性。文献[8]提出的并行分配算法虽可有效减少频谱分配所需时间并满足系统效益,但无法有效实现频谱公平分配。文献[9]提出的改进算法保证了用户的公平性,但是算法的收敛速度不高,时间开销大。

本文基于用户频谱效益生成与频谱分配相关的权重对并行分配算法进行修正,提出了一种基于用户公平性的并行频谱分配算法,在最大程度缩短分配时间的同时,可实现频谱公平分配。

## 1 模型构建

### 1.1 认知无线电的网络模型

如图1所示CR网络模型中, X, Y, Z代表3个信道,用①~⑤表示5个认知用户,用I~IV表示4个PU<sup>[10]</sup>。但实际无线环境中,认知用户的移动和退出与接入呈现随机性,信道是时变的。CR拓扑结构可根据动态的频谱感知周期性的更新数据库来获得新的拓扑结构,假定一个周期内的拓扑结构不会发生改变<sup>[11]</sup>。

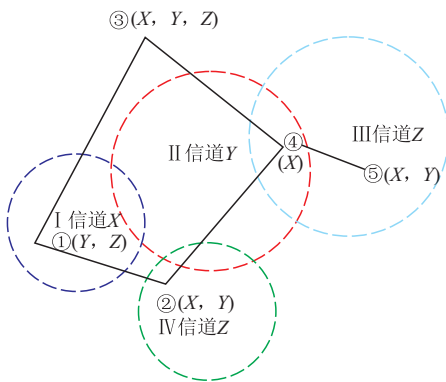


图1 Cognitive radio 网络拓扑结构

Fig. 1 Network topology structure of cognitive radio

### 1.2 动态频谱分配模型的数学描述

CR频谱分配体制中可将认知用户信道分配等效为图1中的顶点着色问题。其中顶点表示SU,颜色代表频率或信道,顶点间连线代表认知用户间存在干扰,即两顶点间不能同时使用相同信道<sup>[3]</sup>。假设N个认知用户存在于一个拥有M个正交子信道的无线网络中。认知用户通过感知得到周围无线环境信息,则建立可用矩阵,干扰矩阵,效益矩阵和分配矩阵如下<sup>[12]</sup>:

#### 1) 可用矩阵 $L$

$$L = \{l_{n,m} \mid l_{n,m} \in \{0,1\}\}_{N \times M}$$

当 $l_{n,m}=1$ 时,信道 $m$ 可被用户 $n$ 使用;反之则不能被用户 $n$ 使用。

#### 2) 效益矩阵 $B$

$$B = \{b_{n,m}\}_{N \times M}$$

$b_{n,m}$ 表示认知用户 $n$ 使用信道 $m$ 所带来的频谱利用率、吞吐量等效益。将矩阵 $L$ 与矩阵 $B$ 点乘,可得有效频谱效益如下:

$$L = \{l_{n,m} b_{n,m}\}_{N \times M}$$

#### 3) 干扰矩阵 $C$

$$C = \{c_{n,k,m} \mid c_{n,k,m} \in \{0,1\}\}_{N \times K \times M}$$

该集合表示用户 $n$ 与用户 $k$ 同时使用信道 $m$ 时的干扰情况:当 $c_{n,k,m}=1$ 时两用户产生干扰;当 $c_{n,k,m}=0$ 时两用户不产生干扰;当 $c_{n,n,m}=0$ 时,该信道对用户不可用。

#### 4) 无干扰的频谱分配矩阵 $A$

$$A = \{a_{n,m} \mid a_{n,m} \in \{0,1\}\}_{N \times M}$$

当 $a_{n,m}=1$ 时信道 $m$ 被分配给用户 $n$ ,反之信道 $m$ 未分配给用户 $n$ 。矩阵 $A$ 满足 $a_{n,m} a_{k,m} = 0$ ,  $c_{n,k,m} = 1, \forall n, k < N, m < M$ <sup>[14]</sup>。

## 2 分配算法

### 2.1 公平系数

很多决策和战略制定者都不会以自我感觉为准,而是通过理性的分析得出相应的结论。为了得到本文所需的公平系数,本文引入了(Homo Egalis, HE) HE社会模型<sup>[15]</sup>。HE模型可等效为 $n$ 个玩家博弈的过程,其中第 $i$ 个用户的效用函数表示为<sup>[16]</sup>:

$$u_i = x_i - \frac{\alpha_i}{n-1} \sum_{x_j > x_i} (x_j - x_i) - \frac{\beta_i}{n-1} \sum_{x_j < x_i} (x_i - x_j) \quad (1)$$

$\mathbf{x} = (x_1, \dots, x_n)$ 表示的是每个玩家所要支付的额度,其中参数 $\alpha_i, \beta_i$ 满足 $0 \leq \beta_i \leq \alpha_i \leq 1$ 。该式反映的是HE模型中,当比别人做的好时,自己就有比较弱的愿望与别人保持平衡;当比别人做的差时,自己就有强烈的愿望与别人达到平衡。根据这个规律我们可

以提炼出相应的参数即公平系数,将该参数用于模型中,从而达到提高系统公平性的这一目的。

## 2.2 公平系数的求解

本文基于每个认知用户效益均衡的研究目的,在求解公平系数  $\omega_i$  过程中需考虑各用户的平均网络效益。平均网络效益是以相关的时间作为参考的:

$$\text{平均网络效益} = \sum \frac{\text{用户 } i \text{ 的网络效益}}{\text{接入时间}}$$

该模型中,用户的收益是研究关注重点。现实中,付出与收获通常在大概率条件下呈正比关系。因此每个认知用户由于付出不同,所以他们有不同的优先级。由于高效益网络具有高优先级,低效益网络优先级较,则:

$$\frac{\text{网络效益}_i}{\theta_i} \approx \frac{\text{网络效益}_j}{\theta_j}$$

式中:  $\theta_i, \theta_j$  分别表示的是用户  $i$  和用户  $j$  的优先级。

定义  $x_i = \frac{\text{网络效益}_i}{\theta_i}$  为用户  $i$  的网络效益即节点  $i$  的平均积累效益,则可基于 HE 模型对不公平的抑制特性,可保证频谱接入的公平性。具体的措施是对每个用户的效益前加一个权重即  $\omega_i b_{i,j}$ , 其中  $\omega_i$  的计算公式是:

$$\omega_i = \max(0, \min(a, \omega_i + \frac{\alpha_i}{n-1} \sum_{x_j \geq x_i} (\frac{x_j - x_i}{x_j}) - \frac{\beta_i}{n-1} \sum_{x_j < x_i} (\frac{x_i - x_j}{x_i}))), j \neq i \quad (2)$$

在式(2)中  $\alpha_i, \beta_i$  是 2 个非常重要的控制参数。当  $\alpha_i \geq \beta_i$  时,系统的性能均能保持基本一致。反之,整个系统的性能将会有所下降<sup>[15]</sup>。在运算的过程中,  $\omega_i$  会周期性更新,那么改进后的效益函数(Wight-Max Sum Bandwidth)就为:

$$\max \sum_{i=0}^{I-1} \sum_{j=0}^{J-1} a_{i,j} (\omega_i b_{i,j}) \quad (3)$$

式中:  $\omega_i b_{i,j}$  表示用户  $i$  使用频带  $j$  时所带来的效益权重;  $\omega_i$  即为认知用户公平系数。

## 2.3 分配算法及步骤

文献[8]提出来的并行频谱分配算法极大的减少算法的时间开销,但是用户公平性的表现较差,为了改进这种算法,把公平系数引入到该算法中,利用该系数来修正不同频段下不同用户的收益,这样保证在提高算法的同时,系统的公平性也能得到满足。

文献[7]中 CSGC 的图  $G$  是一个有重复边的复合图,通过矩阵的相关算法可以把图  $G$  分解为简单图  $G_0, G_1, \dots, G_{M-1}$  然后同时对这些简单图进行着色,由于可同时对这些简单的图进行着色,算法时间

将大大减少。

定义  $r(m, n)$  为在某循环阶段认知用户  $n$  使用信道  $m$  所带来的目标效益;根据文献[17]给出的分配准则——协作的最大总带宽准则(Collaborative Max Sum Bandwidth, CMSB),该准则下:

$$r(m, n) = \frac{b_{n,m}}{D_{n,m} + 1} \quad (4)$$

式中:  $D_{n,m}$  表示在频带  $m$  下与用户  $n$  产生相互干扰的认知用户的个数,在拓扑图中可表现为与顶点  $m$  相连的顶点的个数。将与顶点  $n$  相连的其他顶点放在一个集合内生成一个干扰用户集合:  $Nbr(n, m) = \{k \mid c_{n,k,m} = 1, 0 \leq k \leq N-1, k \neq n\}$  其中该集合中元素的个数即是  $D_{n,m}$  的值。

在分配时需计算用户  $n$  在频带  $m$  的收益  $r(m, n)$ , 在频带  $m$  下收益最大的用户  $n^*$  可使用该频带。在引入加权系数后,加权的用户在频带下的收益为:

$$\bar{r}(m, n) = \frac{\omega_i b_{n,m}}{D_{n,m} + 1} \quad (5)$$

此时计算在频带  $m$  下使得  $\bar{r}(m, n)$  最大的  $n^*$  即可。其算法的流程图为:

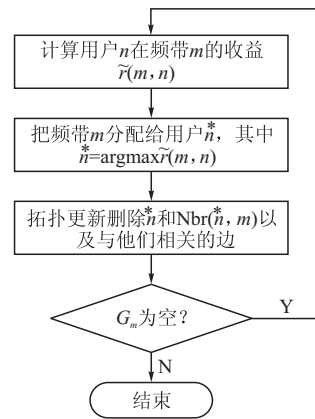


图 2 改进的并行频谱分配算法

Fig. 2 Improved spectrum allocation algorithm

并行算法可同时对  $M$  个子图进行图着色,在频带正交情况下频带间不产生干扰,一个子图的颜色分配不影响其他子图颜色分配,且分配相互独立<sup>[18]</sup>。并行算法可得到与 CSGC 相同的分配矩阵  $\mathbf{A}$ , 由于  $M$  个子图分配的结果是最优矩阵  $\mathbf{A}$  中的一个列向量,所以子图  $G_m$  的循环次数为  $\|a_m\|_1$ , 假设每次分配循环时间开销为  $T$ , 那么整个子图分配完成所消耗时间为  $\|a_m\|_1 T$ , 其中  $\|a_m\|_1$  为  $\mathbf{A}$  的向量范数,表示复用频带  $m$  的用户数<sup>[19]</sup>。又因为算法同时进行,所以完成整个系统频谱分配所需时间是  $T \text{Max} \left\| a_m \right\|_1 \left[ 20 \right]$ 。

### 3 仿真与结果分析

文献[7]给出并行算法具体步骤,文献[8]将一定时间内,用户使用频带次数进行比较。由于CSGC将信道量化为效益权重,所以本文采用累计效益权重进行算法评估。表1是本文仿真的具体参数。仿真是对CSGC下的CMSB,加权重的CMSB(Weight-Collabor-ative Max Sum Bandwidth, W-CMSB)以及加权重的并行算法(Weight-Parallel-Collaborative Max Sum Bandwidth, W-P-CMSB)进行的。

表1 仿真参数设置

Tab. 1 Simulation parameter setting

主用户数	5
频带数	[1,30]取值
主用户保护范围	30
$\omega_i$ 初始化	1
认知用户的优先级 $\theta_i$	1
每个用户接入时间间隔/ms	[2,5]
循环执行时间/ms	1
次用户数	[5,20]
效益矩阵随机取值于	[50,100]
次用户保护范围	40
$\alpha_i$	0.5
$\beta$	0.1
每个用户的接入时间/ms	[2,5]
权重 $\omega_i$ 更新时间/ms	4

由图3可得,当用户数量为10时计算各用户效益,采用CMSB算法用户效益波动较大,用户效益不均衡,即用户的公平性较差。而W-CMSB算法和W-P-CMSB算法用户效益的波动比CMSB算法的波动小,用户效益相对均衡,所以其公平性也就越好。相比而言W-CMSB和W-P-CMSB很难达到CMSB算法用户效益。

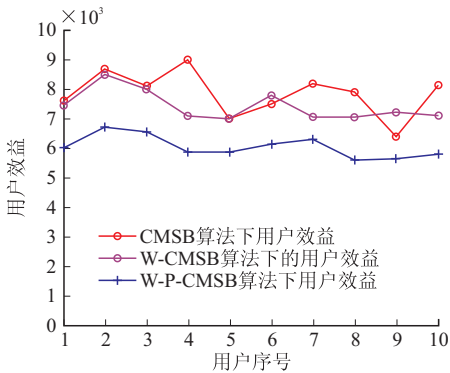


图3 3种算法用户效益比较

Fig. 3 The comparison of three algorithms for user benefits

由图4可得,仿真运行一定时间,算法总效益随用户数增加均相应增加,CMSB算法的总效益比W-CMSB算法的总效益高,而W-P-CMSB算法的累计总效益相比与前两者的累积总效益就要低的多。这是因为并行算法的在相同的条件下很难达到CSGC算法的效益。

由图5可得,CSGC中CMSB算法和W-CMSB算法的时间开销随着频带数增加近似呈线性变换,加权重并行算法时间开销不受频带数影响,近似呈一条水平直线,改进算法的最大循环为:

$$\text{Max}_{0 \leq j \leq M-1} \|a_j\|_1 = \text{Max}_{0 \leq j \leq M-1} \sum_{i=0}^{N-1} a_{i,j} \leq \sum_{i=0}^{N-1} 1 = N \quad (7)$$

所以随频带数增加,改进算法时间开销明显小于CMSB算法和W-CMSB算法。

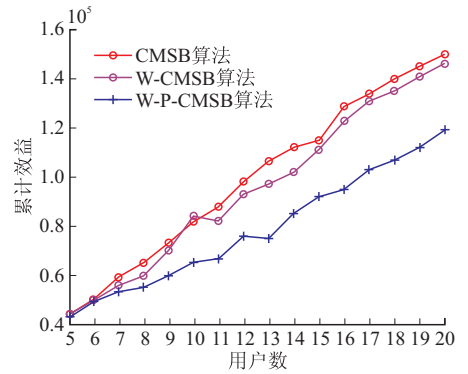


图4 3种算法网络总效益的变化趋势

Fig. 4 The change trend of network total benefits under the three algorithms

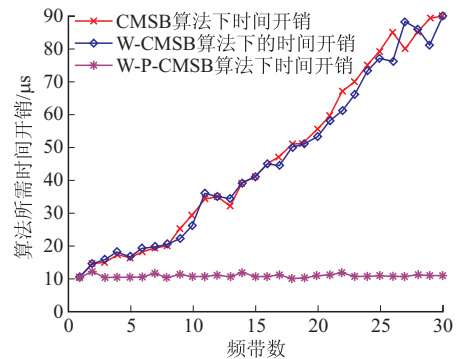
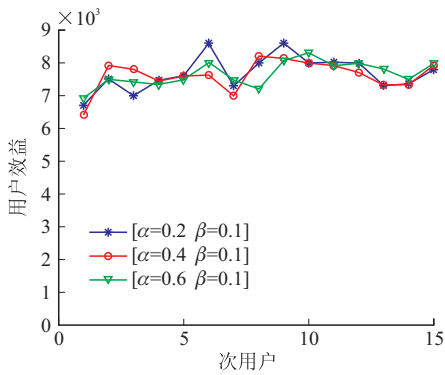
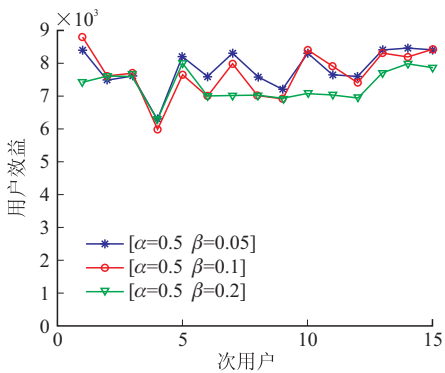


图5 3种算法的时间开销比

Fig. 5 Time cost comparison of the three algorithms

本文针对公平系数中的参数 $\alpha$ 和 $\beta$ 的变化进行分析。当 $\beta$ 保持不变时,随着 $\alpha$ 的增大,用户效益变得更加的均衡,见图6。

同样,观察在参数 $\alpha$ 不变时, $\beta$ 逐渐增大,用户的效益变化。图7所示随着 $\beta$ 的增大用户的效益也是越来越均衡,但是,用户的效益有明显的下降。所以合理的选择 $\alpha$ 和 $\beta$ 的值,可使系统的性能最佳。

图 6 不同  $\alpha$  下用户的效益变化Fig. 6 Changes in the efficiency of users under different  $\alpha$ 图 7 不同  $\beta$  下用户的效益变化Fig. 7 Changes in the efficiency of users under different  $\beta$ 

## 4 结语

本文针对颜色敏感的 CSGC 算法随着信道数的增加,算法的开销急剧增加,导致算法无法有效匹配快速变化无线电环境的客观问题。在进行频谱分配时尽可能缩短分配的周期,提高相同检测技术下的分配可靠性。在减少分配周期的前提下,本文基于用户的公平性需求,引入了公平系数,解决了在频谱分配过程中分配不均的问题,使得用户的公平性得到改善。实验结果表明,虽然改进算法的效益有所降低,但改进算法的公平性以及算法时间开销都有显著改善,可在有效地减少分配时间的同时提高频谱分配公平性。

### 参考文献 (References):

[1] Federal Communications Commission, Spectrum Policy Task Force [EB/OL]. <http://www.fcc.gov/sptf/>

[2] GE Y, SUN J, SHAO S X, et al. An Improved Spectrum Allocation Algorithm based on Proportion Fairness in Cognitive Radio Networks [C]//IEEE International Conference on Communication Technology (ICCT). 2010:742-745.

[3] 徐宏飞,杨健,刘得胜. 认知无线电与未来电磁频谱管理[J]. 中国无线电 2015,6(3):49-53.  
XU H F, YANG J, LIU D S. Cognitive Radio and Electromagnetic Spectrum Management [J]. China Radio, 2015, 6(3): 49-53. (in Chinese)

[4] 王坤,董淑福,刘杰. 基于用户需求和等待时间的改进型频谱分配算法[J]. 科学技术与工程, 2012, 12(22):5528-5532.  
WANG K, DONG S F, LIU J. Improved Spectrum Allocation Algorithm Based on USER Demands and Waiting Time[J]. Science Technology and Engineering, 2012, 12(22): 5528-5532. (in Chinese)

[5] 张北伟,朱云龙,胡琨元. 认知无线电中频谱分配方法研究[J]. 哈尔滨工程大学学报, 2012, 33(10):1304-1309.  
ZHANG B W, ZHU Y L, HU K Y. Spectrum Allocation Methods Research of Cognitive Radio[J]. Journal of Harbin Engineering University, 2012, 33(10): 1304-1309. (in Chinese)

[6] XENG Y, CHANDRAMOULI R, MANGOLD S. Dynamic Spectrum Access in Open Spectrum Wireless Network[J]. IEEE, Journal on Selected Areas Communications, 2006, 24(3):626-637.

[7] ARSLAN H. Cognitive Radio, Software Defined Radio, and Adaptive Wireless Systems [M]. [S. l.]: Springer, 2007.

[8] 廖楚林,陈劼,唐有喜,等. 认知无线电中的并行频谱分配算法[J]. 电子与信息学报, 2007, 29(7):1608-1611.  
LIAO C L, CHEN J, TANG Y X, et al. Parallel Algorithm of Spectrum Allocation in Cognitive Radio [J]. Journal of Electronics and Information Technology, 2007, 29(7): 1608-1611. (in Chinese)

[9] 史明,黄友锐,石艳琼,等. 一种改进的颜色敏感图论着色算法[J]. 计算机工程, 2012, 38(1):19-23.  
SHI M, HUANG Y R, SHI Y Q, et al. Modified Color Sensitive Graph Coloring Algorithm [J]. Computer Engineering, 2012, 38(1): 19-23. (in Chinese)

[10] ZHENG H T, PENG C Y. Collaboration and Fairness in Opportunistic Spectrum Access [C]//Proc of 2005 IEEE International Conference on Communications. [S. l.]: IEEE Press, 2005:31-32.

[11] WANG F, KRUNZ M, CUI S. Pricebased Spectrum Management in Cognitive Radio Network [J]. IEEE Journal of Selected Topics in Signal Processing, 2009, 2(1):74-87.

[12] 贾杰,王闯,张朝阳,等. 认知无线网络中基于图着色的动态频谱分配[J]. 东北大学学报(自然科学版), 2012, 33(3):336-339.  
JIA J, WANG C, ZHANG Z Y, et al. Dynamic Spectrum Assignment Based on Graph Coloring in

- Cognitive Radio Network[J]. Journal of Northeastern University (Natural Science), 2012, 33(3): 336-339. (in Chinese)
- [13] PENG C Y, ZHENG H T. Utilization and Fairness in Spectrum Assignment for Opportunistic Spectrum Access[J]. ACM Mobile Networks and Applications, 2006, 11(4): 555-576.
- [14] 张玉兵, 薛伟, 林发杰. 基于用户间公平性的改进型频谱分配算法[J]. 计算机与数字工程, 2013, 41(7): 1062-1064.  
ZHANG Y B, XUE W, LIN F J. Improved Spectrum Allocation Algorithm Based on Channel Quantity [J]. Computer and Digital Engineering, 2013, 41(7): 1062-1064. (in Chinese)
- [15] SHIN K G. Joint Spectrum Allocation and Power Control for Multihop Cognitive Radio Networks[J]. IEEE Trans Mobile Computing, 2011, 10(7): 1042-1055.
- [16] KASEBEKAR G, SARKAR S. Spectrum Auction Framework for Access Allocation in Cognitive Radio Network[J]. IEEE/ACM Trans Netw. 2010, 18(6): 1841-1854.
- [17] 陈劼, 李少谦, 廖楚林. 认知无线网络中基于需求的频谱资源分配算法研究[J]. 计算机应用, 2008, 28(9): 2188-2191.  
CHEN J, LI S Q, LIAO C L. Research on Demand Based Spectrum Resource Allocation Algorithm in Cognitive Radio Network [J]. Computer Application, 2008, 28(9): 2188-2191. (in Chinese)
- [18] 席志红, 晋野, 李娅. 认知无线电的频谱分配算法[J]. 应用科技, 2010, 37(2): 9-11.  
XI Z H, JIN Y, LI Y. Spectrum Allocation Algorithm in Cognitive Radio [J]. Applied Science and Technology, 2010, 37(2): 9-11. (in Chinese)
- [19] 张婧怡, 向新, 孙晔, 等. 无线通信系统频谱分配策略优化研究[J]. 计算机仿真, 2015, 32(10): 224-228.  
ZHANG J Y, XIANG X, SUN Y, et al. Spectrum Assignment Strategy Based on Improved Ant Colony Algorithm [J]. Computer Simulation, 2015, 32(10): 224-228. (in Chinese)
- [20] 席志红, 王晓光. 基于干扰温度模型的认知无线动态功率分配算法[J]. 应用科技, 2010, 37(6): 13-15.  
XI Z H, WANG X G. A Cognitive Radio Power Allocation Algorithm Based on the Interference Temperature Model [J]. Applied Science and Technology, 2010, 37(6): 13-15. (in Chinese)
- [21] 林苒晴, 陈跃斌, 谭元, 等. 基于认知无线网络中用户需求的频谱分配算法[J]. 太赫兹科学与电子信息学报, 2013, 11(3): 402-406.  
LIN R Q, CHEN Y B, TAN Y, et al. Spectrum Allocation Algorithm Based on User Requirement in Cognitive Radio Network [J]. Journal of Terahertz Science and Electronic Information Technology, 2013, 11(3): 402-406. (in Chinese)

(编辑: 徐楠楠)