

文章编号:1009-3087(2013)02-0117-05

认知无线电系统的一种联合频谱分配算法

谢玉鹏^{1,2},谭学治¹,马琳¹,刘鑫¹,刘玉涛¹,吴海燕³

(1. 哈尔滨工业大学 电子与信息工程学院,黑龙江 哈尔滨 150080;2. 黑龙江科技学院 电气与信息工程学院,黑龙江 哈尔滨 150027;
3. 国家开发银行 黑龙江分行,黑龙江 哈尔滨 150090)

摘要:在认知无线电系统中,博弈论算法从频谱共享池中获取频谱困难。为了提高自身传输速率,同时使频谱可以充分利用,采用图论算法快速地初次分配频谱,联合博弈论方法优化信道。仿真结果表明:在传输功率的约束下,联合频谱分配算法提高了自身的效用(速率),能够充分利用频谱资源,合理分配功率,仿真验证了图论和博弈论联合的算法是有效的。

关键词:图论;博弈论;认知无线电

中图分类号:TN929.5

文献标志码:A

A Joint Spectrum Allocation Algorithm in Cognitive Radio System

XIE Yu-peng^{1,2}, TAN Xue-zhi¹, MA Lin¹, LIU Yu-tao¹, WU Hai-yan³

(1. School of Electronics and Info. Eng., Harbin Inst. of Technol., Harbin 150080, China;

2. School of Electrical and Info. Eng., Heilongjiang Inst. of Sci. and Technol., Harbin 150027, China;

3. Heilongjiang Branch, China Development Bank, Harbin 150027, China)

Abstract: In order to improve transmission rate, and make full use of spectrum resources, the graph theory algorithm was applied firstly to allocate rapidly spectrums (channels), and then the channels were optimized by game theory algorithm. Simulation results showed that the spectrum resources could be fully utilized. Under power transmission constraints, the utility (rate) of cognitive users is improved by using joint spectrum allocation algorithm, and the power is distributed reasonably. The simulation verified that joint algorithm based on graph theory and game theory is effective.

Key words: graph theory; game theory; cognitive radio

认知无线网络中,认知无线电用户能使用的频谱与授权用户工作状态、工作的范围有关,可用图论模型^[1-2]分析频谱分配的问题。同样,博弈论也是频谱资源的一种新的方法。文献[3]给出了认知无线电系统的博弈论模型,博弈论^[4]可以分析认知用户之间的频谱分配,且可以用效用函数严格表征用户的频谱效用或收益^[5-6]。图论相关理论^[7-8]的分配算法通常均假设认知用户获得相同频谱的效用,这是不符合实际频谱效用的。原来单一博弈论算法^[9]的思想是:在“随机竞争接入”情况下,认知用户不能使用处于工作状态的授权用户的频谱,计算

各个信道上的发射功率,当在各个信道上的发射总功率大于自己的总功率时,重新计算在各个信道的发射功率,当没有大于自己的总功率时,判断是否在各个信道的功率总和是否达到自己的总功率最大值,如果没有达到,重新分配自己在各个信道上的功率值,直到在各个信道分配的功率总和达到接近自己的上限值,使认知用户的传输速率最大。

假设认知无线电系统中认知用户不能干扰授权用户,“随机竞争接入”可以使用空闲的信道,单一博弈理论从频谱共享池中获取频谱非常困难,为了提高频谱效用,作者提出了基于图论和博弈论相联合的思想来分配频谱。

在初次分配中,可以采用图论的理论来分析问题,消除认知用户之间的干扰,找到没有干扰的认知用户,对共享情况下的频谱进行分析,用“图”表示认知无线电系统的拓扑结构,其中各个认知用户用节点表示,彼此邻接的2个认知用户不能使用相同

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)

作者简介:谢玉鹏(1979—),男,博士.研究方向:认知无线电.

E-mail: xyp1668@163.com

的频谱,可以使用认知用户连接的线来表示。但由于从初始的频谱共享池中获取频谱,运算复杂度高,从实际应用的角度,认知无线网络中可以运用图论模型在一定程度上快速地初次分配频谱,可以提高认知用户的公平性,为再次分配打下良好的基础。再次分配中,对于初次分配的结果,然后运用认知用户之间的博弈思想,来完成频谱的再分配。

1 相关定义

定义1(子图) 一个子图 G_m 是一个二元组 $G_m = (V_m, E_m)$, 其中 V_m 称为顶点集合, E_m 是一不同结点连接的边的集合。

定义2(顶点独立集) 设 S_1 是图 G 的顶点的子集。如果 S_1 中任意2个顶点都不邻接,则称 S_1 是 G 的一个点独立集,简称独立集。特别,若不存在 $|S_1'| \geq |S_1|$ 的独立集 S_1' ,则称 S_1 为 G 的最大独立集。文中节点表示认知用户。

2 初次频谱分配模型和步骤

图1表示认知无线电系统中随机仿真得到拓扑图,图1中有3个授权用户正在工作,6个授权用户没有工作,有4个认知用户,不失一般性,其中相互连接的2个认知用户不能使用相同的频谱资源,没有直接相连的认知用户没有干扰,可以使用相同的频谱资源。

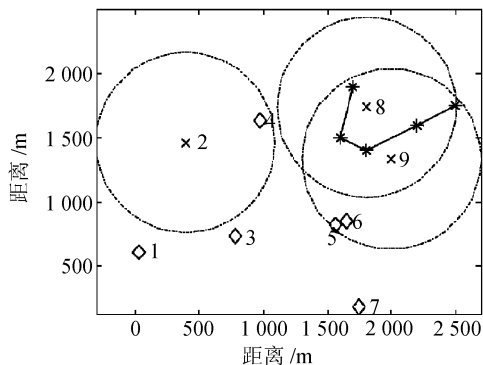


图1 认知无线电系统拓扑图

Fig.1 Cognitive radio system topology

图1中:“×”代表授权用户在工作,这时认知用户不使用的授权用户的功率覆盖范围内的频谱;“◇”表示授权用户没有工作(空闲),表明认知用户可以使用这些的频谱;“*”代表认知用户,假设授权用户和认知用户在同一个基站范围内;虚线圆表示正在工作的授权用户的功率达到的范围,认知用户不可以使用授权用户范围里的频谱;直线表明彼此相互邻接的2个认知用户不能同时使用相同

的频谱(认知用户间干扰)。

初次分配算法步骤为:

第1步:拓扑图分解为 M (授权用户数) 个子图。

第2步:计算每一个子图的标签:

$$label_m = \max_{n \in V_m} \frac{b_{n,m}}{(D_{n,m} + 1) \cdot \sum_{k=0}^{M-1} a_{n,k} \cdot b_{n,k}} \quad (1)$$

其中, $D_{n,m}$ 表征与认知用户 n 相邻,而且可用频谱列表中使用了有频谱 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 。

第3步:找到最大的标签所对应的子图,对这个子图上的每个顶点进行加权,其权值为:

$$w_n = \frac{b_{n,m}}{\sum_{k=0}^{M-1} a_{n,k} \cdot b_{n,k}}, n \in V_m \quad (2)$$

第4步:利用递归法求出该子图的全部极大独立集,并求出所有极大独立集的权值之和,选择权值之和最大的极大独立集作为该子图上的分配结果。

第5步:更新拓扑图,去掉分配完成的子图,删除颜色列表为空的顶点。

第6步:执行第2步,直到拓扑图为空。

通过快速的初次分配得到认知用户可以使用授权用户的哪些频谱,而且提高公平性;并得到哪些认知用户使用频谱产生干扰,哪些认知用户可以共同使用相同的频谱,而且为后面的再次分配打下基础。

3 再次分配的假设及分配步骤

在认知无线电系统中,再次频谱分配关系到不同认知用户频谱策略相互博弈,这里把频谱的分配看作是信道的分配,假设在一个多用户非合作的无线电系统中,根据作者提出的图论的初次分配,对于给定的有限数目频谱空穴,在功率限制的条件下,见式(3),认知用户之间相互博弈,在状态好的空闲信道上采用功率分配策略,使每个认知用户的传输速率最大^[9]。

再次分配频谱的效用函数 U_i (传输速率)为:

$$U_i = \sum_{k=1}^M R_{ik}(p_{ik}, p_{jk}) = \sum_{k=1}^M a \ln \left(1 + \alpha \frac{p_{ik} |G_{ik}|^2}{\sum_{j \neq i, j \in N} p_{jk} |G_{jk}|^2 + \sigma^2} \right), \quad (3)$$

s. t $\sum_{k=1}^M p_{ik} \leq P_i$

式中: U_i 为效用函数; R_{ik} 为认知用户在信道 k 上的传输速率; $a = \frac{W}{M}$, W 为频谱总带宽, M 表示信道总数(授权用户数); $p_{ik} > 0$, 认知用户 i 初次分配得到信道 k , 即认知用户 i 在信道 k 上传输功率; $p_{ik} = 0$, 认知用户 i 初次分配没有得到信道 k , 即其它认知用户在信道 k 上传输功率; $|G_{ik}|^2$ 表示认知用户 i 在信道 k 上的信道增益; $|G_{jik}|^2$ 表示认知用户 j 的发射机到用户 i 的接收机在信道 k 上的信道增益; σ^2 为噪声功率; P_i 为认知用户 i 的总传输功率; α 表示 x -QAM 调制方式和香农容量的信噪比关系, 可以表达为:

$$\alpha = \frac{1.5}{-\ln(5BER)} \quad (4)$$

为了获得最优的效用, 在满足自身功率限制的条件下, 认知用户在信道状况较好的频谱上传输信息。如果式(3)中约束情况的频谱分配集合存在, 最优化问题能够表达为:

$$\max_{\mathbf{p}_i} U_i = R_i$$

为了简化式(3), 记:

$$h_{ik} = \alpha \frac{|G_{ik}|^2}{\sum_{j \neq i, j \in N} p_{jk} |G_{jik}|^2 + \sigma^2} \quad (5)$$

根据式(3)~(5)和 Karush-Kuhn-Tucker (KKT)^[10]能够得到拉格朗日函数:

$$F_i(\mathbf{p}_i, \lambda_i) = \sum_{k=1}^M a \ln(1 + p_{ik} h_{ik}) + \lambda_i (P_i - \sum_{k=1}^M p_{ik}) \quad (6)$$

式中, \mathbf{p}_i 为认知用户 i 的功率分配向量, $\mathbf{p}_i = [p_1^i, p_2^i, \dots, p_M^i]$; λ_i 为拉格朗日因子。

将函数 $F_i(\mathbf{p}_i, \lambda_i)$ 对 p_{ik} ($k \in M$) 求导, 取

$$\frac{\partial F_i(\mathbf{p}_i, \lambda_i)}{\partial p_{ik}} = 0 \quad (7)$$

对于认知用户来 i 说, 根据式(7)能够知道其功率分配:

$$p_{ik} = \max(0, \nu_i - (h_{ik})^{-1}) \quad (8)$$

其中, $\nu_i = \frac{a}{\lambda_i \ln 2}$ 。

认知用户的效用达到最优时, 就有 $\sum_{k=1}^M p_{ik} = P_i$, 由式(6)、(8)可知, 功率 \mathbf{p}_i 为注水线 ν_i 的函数, 式(3)的限制条件能够表达为:

$$f(\nu_i) = \sum_{k=1}^M p_{ik} - P_i = \sum_{k=1}^M \max\{0, \nu_i - (h_{ik})^{-1}\} - P_i \quad (9)$$

其中, f 为变量 ν_i 的单调递增函数。

根据式(9)求得该阶段时认知用户的功率分配情况, 然后得到下面的功率迭代函数:

$$p_{ik}(t+1) = \max(0, \nu_i(t+1) - \frac{\sum_{j \neq i, j \in N} p_{jk} |G_{jik}|^2 + \sigma^2}{\alpha |G_{i,i}|^2}) \quad (10)$$

通过式(10)可知, 前一阶段的博弈结果会影响下一阶段的结果, 每个认知用户的策略空间都是独立的。

具体步骤如下:

第1步: 根据图论初次分配的结果初始化;

第2步: 求出 $\{(h_{ik})^{-1}\}$ 的值, 然后升序排列;

第3步: 根据第2步的值, 设置初值, 求出式(9)值;

第4步: 如果式(9)的值为正值, 重新置 $\{(h_{ik})^{-1}\}$ 的值, 转到第2步;

第5步: 如果式(9)的值不是正值, 令式(9)中 $f(\nu_i) = 0$;

第6步: 根据式(10)和(3)求出功率和速率的值;

第7步: 分配结束。

根据式(10)知道, 每个认知用户都保持着自私性和理智性, 它们会根据式(10)选择传输功率, 进而使效用最大。

4 实验验证与结论

仿真参数设置如下: 假设授权用户工作在 1 GHz 左右的频段上, 频谱总带宽为 18 MHz, 可用频谱 $M=9$; 不失一般性, 5 个认知用户的总发射功率均为 20 mW, 误码率 10^{-4} ; 每条频谱上的噪声功率均为 $\sigma^2 = 10^{-11}$ W。

在图1的基础上经过图论方法初次分配结果见图2。图2中, “*”旁的 1(2,4,6) 表示认知用户 1 使用信道 2、4、6, 其它同理。认知用户 3、4、5 之间没有干扰, 可以共享相同的信道是 1、3、5、7, 认知用户 1 和 2 共享另外的频谱资源, 使用的信道有 2、4、6, 直线连接邻接的认知用户有干扰。由于考虑的是机会主义竞争下, 在这里, 首先分析认知用户 1、2 之间博弈。

图3表明认知用户 1、2 在各信道上的功率分配情况。由图3能够看出, 联合算法使认知用户经过博弈之后, 由于经过初次分配, 信道 1、3、5 和 7 没有分配给认知用户 1 和 2, 所以认知用户 1 和 2 没有在信道 1、3、5 和 7 上分配功率。为了使传输速率最

大,认知用户 1、2 在信道状态好的信道上分配了合适的功率。虽然认知用户 1 和 2 可以接入空闲频谱,但受到自身功率容限的影响,联合算法比单一博弈算法在其使用的信道上分配更多的功率。

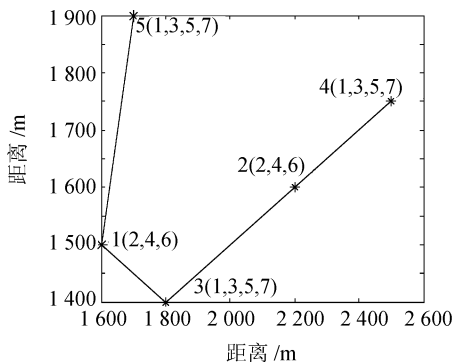


图 2 图论初次频谱分配

Fig. 2 Initial spectrum allocation

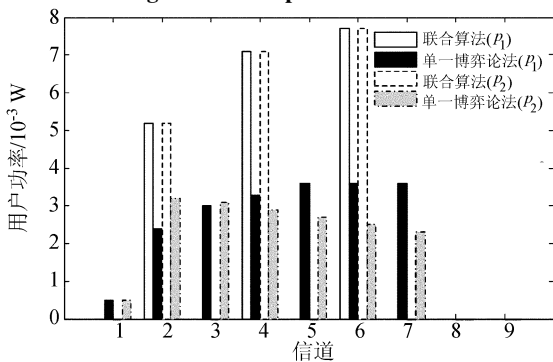


图 3 认知用户 1、2 在各信道功率分配

Fig. 3 Power distribution of cognitive user 1 and 2

图 4 表明认知用户 1、2 的传输速率(效用)随着迭代次数变化情况。由图 4 可知,如果迭代次数大于 2 时,这 2 个认知用户的传输速率达到稳定,联合算法的总效用是 11 008.1 bps,单一博弈论算法的总效用是 6 075.2 bps,联合算法的总效用大于单一博弈论算法的总效用。因为经过初次分配后,这 2 个认知用户相互博弈,有针对性地在此状态好的信道上传输数据。

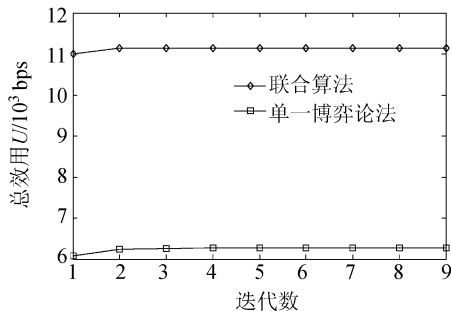


图 4 认知用户 1、2 的传输速率(效用)和迭代次数关系
Fig. 4 Relationship between transmission rate (utility) of cognitive user 1, 2 and iteration time

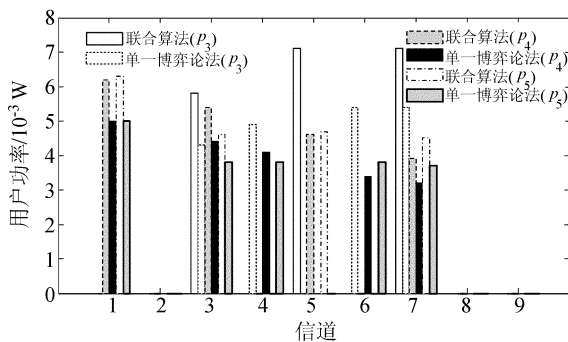


图 5 认知用户 3、4、5 在各信道功率分配

Fig. 5 Power distribution of cognitive user 3, 4 and 5

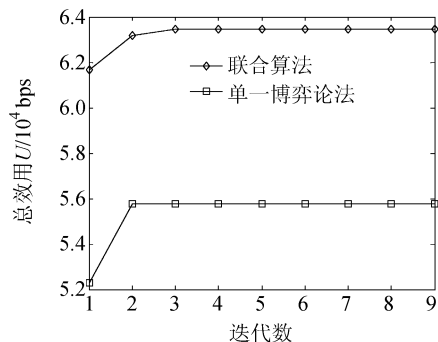


图 6 认知用户 4、5、6 的传输速率(效用)和迭代次数关系
Fig. 6 Relationship between transmission rate (utility) of cognitive user 4, 5, 6 and iteration time

5 结论

在“随机竞争接入”频谱的情况下,如果授权用

户正在工作,那么认知用户不能接入授权用户的频谱;如果授权用户没有工作,那么认知用户可以接入授权用户的频谱。图论算法非常直观、容易理解,可以运用图论来快速地分配频谱,完成频谱的初次分配,消除认知用户之间的干扰,为后面的再次分配打下基础。然后认知用户之间通过博弈算法,优化使用的频谱,在状态好的空闲信道上采用功率分配策略。仿真得出频谱的资源可以充分利用,当传输功率受到限制时,相比于单一博弈论算法,联合算法中的认知用户可以合理分配功率,大大提高自身的效用(速率)。下一步研究方向是:认知用户使用授权用户工作的频谱,但不能超过授权用户干扰容限的情况。

参考文献:

- [1] Zheng Haitao, Peng Chunyi. Collaboration and fairness in opportunistic spectrum access [C]. 2005 IEEE International Conference on Communications (ICC 2005), Korea, 2005, 5:3132 - 3136.
- [2] Jia Jie, Wang Chuang, Zhang Zhaoyang, 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. [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.]
- [3] Huang J W, Krishnamurthy V. Game theoretic issues in cognitive radio systems [J]. Journal of Communications, 2009, 4(10): 790 - 802.
- [4] Wu Yonglei, Wang Beibei, Liu K J R, et al. Repeated open spectrum sharing game with cheat-proof strategies [J]. IEEE Transactions on Wireless Communications, 2009, 8(4): 1922 - 1933.
- [5] Cao Yu, Li Yibing, Fang Y E. Improved fair spectrum allocation algorithms based on graph coloring theory in cognitive radio networks [J]. Journal of Computational Information Systems, 2011, 7(13): 4694 - 4701.
- [6] Jocelyne E, Fabio M, Antonio C, et al. Non-cooperative spectrum access in cognitive radio networks: A game theoretical model [J]. Computer Networks, 2011, 55(17): 3832 - 3846.
- [7] Bai B, Chen W, Cao Z. Low-complexity hierarchical spectrum sharing scheme in cognitive radio networks [J]. IEEE Communications Letters, 2009, 13(10): 770 - 772.
- [8] Wang Peng, Zhong Xiaofeng, Xiao Limin. Optimal power allocation in OFDM-based on cognitive radio systems [J]. Journal of Tsinghua University: Science and Technology, 2009, 49(8): 1144 - 1147. [王鹏, 钟晓峰, 肖立民, 等. 基于 OFDM 的认知无线电系统中最优功率分配 [J]. 清华大学学报: 自然科学版, 2009, 49(8): 1144 - 1147]
- [9] Liu Yutao. Research on spectrum allocation algorithms based on game theory in cognitive radio networks [D]. Harbin: Harbin Institute of Technology, 2010: 21 - 73. [刘玉涛. 认知无线电中基于博弈相关理论的频谱分配算法研究 [D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2010: 21 - 73.]
- [10] Tsiaflakis P, Diehl M, Moonen M. Distributed spectrum management algorithms for multiuser DSL networks [J]. IEEE Transactions on Signal Processing, 2008, 56(10): 4825 - 4843.

(编辑 赵 婧)