

一种认知无线电系统中联合的频谱分配新算法

谢玉鹏^{1,2}, 谭学治¹, 马琳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, 150080 哈尔滨; 2. 黑龙江科技大学 电气与信息工程学院, 150022 哈尔滨;
3. 国家开发银行, 150090 哈尔滨)

摘要: 本文从认知无线电系统实际应用出发, 首先应用图论算法快速的预分配频谱, 同时为再次分配提供了公平性, 然后用博弈论思想对初次分配的信道优化, 完成认知用户之间的频谱再次分配. 最后仿真表明频谱的资源可以充分利用, 在传输功率的约束下, 每个认知用户提高自身的速率, 合理地分配功率, 证明了本文图论和博弈论联合的算法的有效性.

关键词: 图论; 博弈论; 初次频谱分配; 再分配; 认知无线电

中图分类号: TN929.5 **文献标志码:** A **文章编号:** 0367-6234(2013)07-0035-07

A new algorithm for joint spectrum allocation in cognitive radio system

XIE Yupeng^{1,2}, TAN Xuezhi¹, MA Lin¹, LIU Yutao¹, WU Haiyan³

(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 Harin, China)

Abstract: Considering practical application in cognitive radio system, a graph theory algorithm is applied firstly to rapidly allocate spectrums (channels), which provides distribution fairness, and then the game theory algorithm is used to optimize first distribution spectrums (channels) and complete spectrum redistribution between cognitive users. Finally, simulation results show that the spectrum resources can be fully utilized, and under power transmission constraints, each cognitive user optimizes its own utility (rate) and distributes reasonably power. The simulation verifies that joint algorithm based on graph theory algorithm and game theory algorithm is effective.

Key words: graph theory; game theory; first spectrum distribution; second distribution; cognitive radio

认知无线电系统中有两种常用的频谱分配模型: 图论着色模型^[1-3]和博弈论模型^[4-7]. 图论着色模型的典型算法有列表着色的贪婪算法^[8]和列表着色的公平算法^[9]; 博弈算法可以用效用函数严格的表征用户的频谱效用或收益. 基于图论的分配算法一般均假设用户获得频谱的收益相

同, 这和实际的频谱效用有一定的出入, 因此本文提出了图论和博弈论联合的新算法. 只用博弈理论的频谱分配算法虽然考虑了用户的频谱效用和相应的收益, 但要从频谱共享池中得到想要的频谱, 计算复杂度高. 只用博弈论算法^[7]的思想是: 在“随机竞争接入”情况下, 认知用户在不使用处于工作状态的授权用户的频谱情况下, 计算各个信道上的发射功率. 如果各个信道上的发射总功率大于自己的总功率, 重新计算各个信道的发射功率, 若没有大于自己的总功率, 则分别判断各个信道的功率是否接近自己的总功率, 如果均没有接近, 重新分配自己的功率, 直到各个信道分配的功率接近自己的总功率, 使传输速率最大.

在认知用户可以使用授权用户的空闲频谱

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)”资助项目(2011ZX03004-004); 黑龙江省教育厅资助项目(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.

时,如果认知用户对授权用户没有干扰,在预分配时,采用图论来分析问题,认知无线电系统的拓扑结构用图描述,图中如果认知用户之间有线连接,那么认知用户之间就会有干扰,就不能使用相同的频谱,可以直观的看到哪些认知用户之间没有干扰,从实际应用的角度,由于从初始的频谱共享池中获取频谱,运算复杂度高,本文提出了联合的频谱分配新算法,首先运用图论模型在一定程度上快速的初次分配频谱,提高认知用户的公平性,利用预分配的结果,认知用户之间通过博弈思想,优化使用的信道,可以合理的分配功率,提高传输速率,完成信道的再分配。

1 定义说明

定义1 图 G 是一个二元组 (V, E) ,这里 $V = \{v_1, v_2, \dots, v_n\}$ 表示顶点的集合; E 表示边的集合,这些边是由不同结点连接而成的。

定义2 独立集.假设图 G 的顶点子集 S_1 中任意两个顶点都不邻接,则称 S_1 是 G 的一个独立集.假设 $|S'_1| \leq |S_1|$,则称 S_1 为 G 的最大独立集.图中的节点代表认知用户。

定义3 邻接矩阵.设 $G = (V, E)$ 是一简单图,构造矩阵 $L = \{l_{ij}\}_{n \times n}$,其中:

$$l_{ij} = \begin{cases} 1, & (v_i, v_j) \in E; \\ 0, & (v_i, v_j) \notin E. \end{cases}$$

则称 L 为图 G 的邻接矩阵。

定义4 图的连通块划分.图的连通性表明了认知用户与认知用户之间、以及授权用户和认知用户之间的干扰关系,先求出邻接矩阵 L ,令 $M = L + I$,其中 I 为单位阵,求取 M^2, M^3 等元素的值,直到 $M^n = M^{n+1}$ 为止,则特征矩阵为 $S = M^n$.然后计算判决矩阵 S ,矩阵 S 每一行中的非零值对应的节点在一个连通块划分里。

2 频谱预分配过程

认知无线电系统中的授权用户和认知用户构成的拓扑图如图1所示,其中“◇”和“×”代表授权用户。“×”代表授权用户在工作,此时认知用户不使用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,表明认知用户可以使用这些频谱.假设授权用户和认知用户在同一个基站范围内.图1中两个虚线组成的圆表示正在工作的授权用户的功率达到的范围,而认知用户不能使用授权用户范围里的频谱;“*”代表认知用户;虚的直线表示彼此相互邻接的两个认知用户不能同时使用相同的频谱.图1所示的

仿真拓扑图不失一般性,图中有2个授权用户正在工作,7个授权用户没有工作,3个认知用户中相互连接的两个认知用户不能使用相同的频谱资源,没有连接的两个认知用户间不存在干扰,可以使用相同的频谱资源。

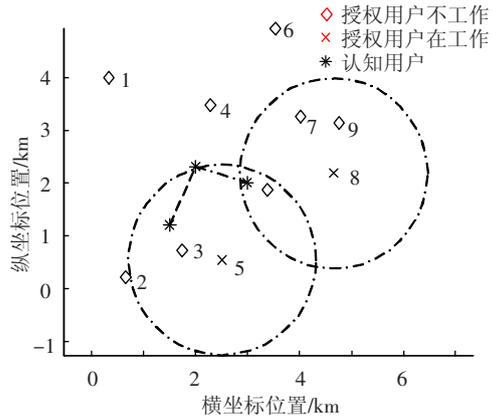


图1 认知无线电系统拓扑图

初次分配算法步骤为:

- 1) 初始化拓扑图,得到认知无线电系统中认知用户和授权用户位置及工作情况;
- 2) 得到第1)步拓扑图中连通分支中的极大独立集;
- 3) 选择第2)步中的一个极大独立集;
- 4) 逐一为极大独立集中的每个节点分配频谱,具体过程为:(1) 获取该极大独立集中的每个节点的信息,包括节点坐标矩阵、可用频谱列表等;(2) 求出相同的频谱,并按频谱出现的次数由低到高排列,寻找频谱出现次数最少的频谱 j ,将能够使用该频谱 j 的节点的集合称为节点集合 A ;(3) 将频谱 j 分配给节点集合 A 中的每一个节点,即将频谱 j 从节点集合 A 中的每一个节点的可用频谱列表中移除,并将它添加到每一节点的正在使用的频谱列表中;同时,将 j 从集合 A 中所有节点的邻接节点的可用频谱列表中删除;(4) 从该极大独立集中删除集合 A 中的所有节点;(5) 查找该极大独立集中是否仍然存在可分配的频谱,如果存在,返回执行步骤(2),继续分配频谱,如果不存在,则完成该极大独立集的频谱分配。
- 5) 判断该连通分支中的所有极大独立集是否都完成频谱分配,如果判断结果为否,则选择该连通分支中的另一个未分配频谱的极大独立集,并返回执行第4)步;如果判断结果为是,则执行第6)步;
- 6) 首先搜索该连通分支中是否有未分配到频谱的节点,如果有,则为所有未分配到频谱的节

点分配频谱;如果没有,则继续搜索该连通分支中每个节点的可用频谱列表,判断其是否有未分配的可用频谱,如果有,返回步骤4),继续对该连通分支中的极大独立集分配频谱,如果没有,则完成该连通分支的频谱分配,执行步骤7);

7)判断所有连通分支是否都已经完成频谱分配,如果判断结果为否,则选择另一个未分配频谱的连通分支,然后返回执行步骤3);如果判断结果为是,则完成频谱分配。

由快速的初次分配可知认知用户可以使用授权用户的哪些频谱,而且提高了公平性.图论算法能使人很直观的了解,经过分配之后可以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,为后面的再次分配打下基础。

3 再次分配步骤

在认知无线通信系统中,再次频谱分配就是认知用户根据预分配得到的结果,采取不用的频谱策略进行博弈,本文频谱分配就是信道分配,运用博弈论可为信道分配建立一个模型,博弈论模型一般可以表示为 $G = \{N, \{S_i\}_{i \in N}, \{U_i\}_{i \in N}\}$,其中3个参数的含义如下: N 为博弈模型中的局中人的集合,本文对应的是参与的认知用户集合; S_i 为博弈局中人 i 采取的方案,本文对应的是认知用户使用频谱所分配的功率方案; U_i 为博弈局中人 i 的效用,它是局中人 i 的策略 s_i 与其他用户策略 s_{-i} 的函数,本文对应的是认知用户的数据传输速率。

该模型中的局中人各自独立决策,各个局中人的决策相互影响,通过博弈的结果来分析算法是否存在收敛点,且这个收敛点对于任何用户都不会偏移,也就是纳什均衡.假设在一个多用户非合作的无线电系统中,本文经过图论的初次分配,对于给定的有限数目频谱空穴,在功率限制的条件下,认知用户之间相互博弈再次分配,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^[10-11]。

本文的频谱和功率分配的系统效用,即效用函数 U_i (传输速率)为

$$U_i = \sum_{k=1}^M R_i^k(p_i^k, p_j^k) = \sum_{k=1}^M a \log_2 \left(1 + \alpha \frac{p_i^k |G_i^k|^2}{\sum_{j \neq i, j \in N} p_j^k |G_{ji}^k|^2 + \sigma^2} \right) \quad (1)$$

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

其中 p_i^k 为认知用户 i 在信道 k 上的传输功率,

$p_i^k > 0$ 表示认知用户初次分配得到的信道 k , $p_i^k = 0$ 表示认知用户初次分配没有得到的信道 k ; U_i 为效用函数; R_i^k 为认知用户 i 在信道 k 上的传输速率; $a = W/M$, W 为频谱总带宽, M 为信道总数; p_j^k 为其他认知用户在信道 k 上的传输功率; $|G_i^k|^2$ 为认知用户 i 在信道 k 上的信道增益; $|G_{ji}^k|^2$ 为认知用户 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^[7]

$$\alpha = \frac{1.5}{-\ln(5 R_{\text{BER}})}$$

其中 R_{BER} 为误码率.如果是瑞利信道的话, α 可表达式为^[7]

$$\alpha \approx \frac{1.5}{0.2/R_{\text{BER}} - 1}$$

算法目的是为了在满足自身功率限制的情况下,使认知用户在信道情况较好的频谱上获得最优的传输信息.如果存在式(1)中约束情况下的频谱分配集合,最优化问题可表达为

$$\max_{P_i} U_i = R_i.$$

简化公式(1),可以把 h_i^k 记为

$$h_i^k = \alpha \frac{|G_i^k|^2}{\sum_{j \neq i, j \in N} p_j^k |G_{ji}^k|^2 + \sigma^2} \quad (2)$$

根据式(1)、式(2)和 Karush-Kuhn-Tucker (KKT)^[12-13],得到拉格朗日函数为

$$F_i(\mathbf{p}_i, \lambda_i) = \sum_{k=1}^M a \log_2(1 + p_i^k h_i^k) + \lambda_i (P_i - \sum_{k=1}^M p_i^k).$$

其中 \mathbf{p}_i 为认知用户 i 的功率分配向量,且 $\mathbf{p}_i = [p_i^1 \ p_i^2 \ \dots \ p_i^M]$; λ_i 为拉格朗日因子。

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

$$\frac{\partial F_i(\mathbf{p}_i, \lambda_i)}{\partial p_i^k} = 0.$$

认知用户 i 在信道 k 上分配的功率值为

$$p_i^k = \max(0, \nu_i - (h_i^k)^{-1}). \quad (3)$$

这里 $\nu_i = a/(\lambda_i \ln 2)$ 。

当认知用户的效用最优时, $\sum_{k=1}^M p_i^k = P_i$,由式

(3)可知,功率 p_i 为注水线 ν_i 的函数,式(1)的限制条件可表达为

$$f(\nu_i) = \sum_{k=1}^M p_i^k - P_i = \sum_{k=1}^M \max\{0, \nu_i - (h_i^k)^{-1}\} - P_i. \quad (4)$$

这里 f 是变量 ν_i 的单调递增函数.

下面来分析算法的有效性. 假设认知用户实际使用的频谱数是 m , 对频谱按照 $\{(h_i^k)^{-1}\}$ 升序排列, 则

$$\nu_i - (h_i^k)^{-1} \begin{cases} > 0, & 1 \leq k \leq m; \\ \leq 0, & m < k \leq M. \end{cases} \Leftrightarrow (h_i^m)^{-1} < \mu \leq (h_i^{m+1})^{-1}. \quad (5)$$

当 $k = M$ 时, $(h_i^{M+1})^{-1} \rightarrow +\infty$. 由于 $f((h_i^{M+1})^{-1}) > 0$ 且函数 f 单调递增, 因此, 算法的目标为寻找合适的 $k (0 < k \leq M)$, 使得 $f((h_i^k)^{-1}) < 0$. 由此可知, 存在最优的 ν_i 符合公式(5), 这样可以根据公式(3) 求出认知用户在各个频谱上的功率分配的值, 从而最大化系统总效用 U_i .

根据式(4)求得该阶段认知用户的功率分配情况, 得到如下的功率迭代函数:

$$p_i^m(t+1) = \max(0, \nu_i(t+1) - \frac{\sum_{j \neq i, j \in N} p_j^k |G_{ji}^k|^2 + \sigma^2}{\alpha |G_{i,i}|^2}). \quad (6)$$

联合算法的具体步骤如下:

- 1) 根据图论初次分配的结果, 为再次分配初始化;
- 2) 计算 $\{(h_i^k)^{-1}\}$ 的值, 求出的值按照升序排列;
- 3) 依据第2)步的值, 设置初值, 计算出式(9)的值;
- 4) 若式(4)的值为正数, 重新置 $\{(h_i^k)^{-1}\}$ 的值, 跳转到步骤2);
- 5) 若式(4)的值为负数或者是零, 令式(4)中 $f(\nu_i) = 0$;
- 6) 依据式(4)和式(3), 得到在各个信道上的功率和传输速率.
- 7) 结束频谱分配.

根据分析得到: 每个认知用户后一阶段的博弈得到的结果会受到前一阶段影响, 根据式(6)合理分配功率, 从而最大传输速率.

4 实验验证

本文首先得到图论初次频谱分配结果. 图2是在图1的基础上经过本文的图论初次分配得到的连通分支. 其中认知用户1和认知用户3没有干扰, 认知用户1和认知用户3共享相同的频谱资源, 使用的频谱有: 1、2、3、6、9; 认知用户2对认知用户1和3有干扰, 认知用户2使用的频谱是4、5、7、8. 由于本文考虑的是在机会主义竞争下,

因此认知用户1和认知用户3之间博弈使用相同的频谱, 而认知用户2使用不同于用户1和用户3的频谱资源, 认知用户2与认知用户1和3之间没有博弈.

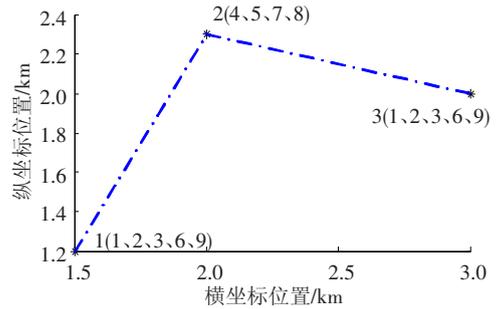
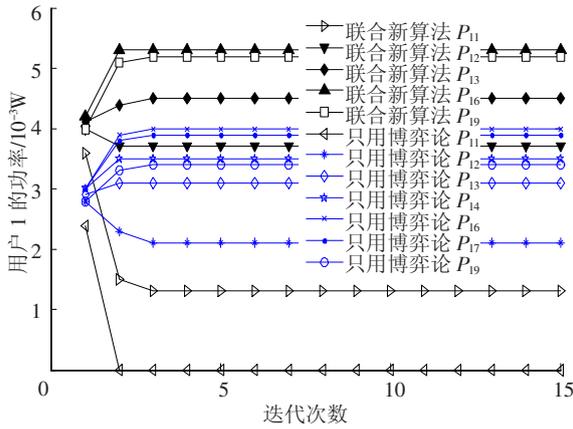


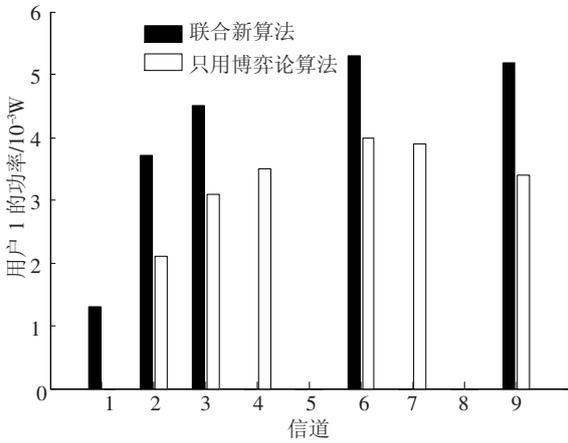
图2 在图1的基础上得到的连通分支

假设授权用户工作在1 GHz左右的频段上, 其可用频谱 $M = 9$, $a = 20$ kHz, 不失一般性, 认知用户1和3的总发射功率是20 mW, 误码率 $R_{BER} = 10^{-4}$. 每条频谱上的噪声功率均为 $\sigma^2 = 10^{-11}$ W. 通过图2的初次分配可知第4、5、7、8条频谱被认知用户2使用, 认知用户1和3使用1、2、3、6、9频谱.

图3(a)表明认知用户1在使用频谱上的功率分配结果随迭代次数的变化. 其中联合新算法 P_{11} 表示认知用户1用本文算法在频谱1上的发射功率; 联合新算法 P_{13} 表示认知用户1用本文算法在信道3上的发射功率; 只用博弈论算法 P_{11} 表示认知用户1只用博弈论算法在信道1上的发射功率; 只用博弈论算法 P_{12} 表示认知用户1只用博弈论算法在信道2上的发射功率, 其他也同样解释. 由图3(a)能够看出, 因为通过初次分配的4、5、7、8频谱被占用, 认知用户1在这4个频谱上没有分配功率. 由图(a)可知, 联合新算法中认知用户1在频谱1、2、3、6、9上与认知用户3博弈后, 为了使自己的传输速率最大, 在使用的信道上分配了合适的功率, 迭代3次后, 功率达到稳定, 结果表示本文算法的收敛速度和博弈论算法一样快. 只用博弈论算法中认知用户1不能使用5、8频谱, 因为这两个频谱授权用户正在使用, 认知用户1和认知用户3使用频谱1、2、3、4、6、7和9, 经过与认知用户1和认知用户3博弈后, 在使用的信道上分配了合适的功率. 对于认知用户1来说信道1状态不好, 没有在信道1上分配功率, 从图3(b)可以看出, 在自身功率容限的条件下, 本文联合新算法比只用博弈论算法在其使用的信道上分配功率多.



(a) 认知用户1功率分配随迭代次数的变化

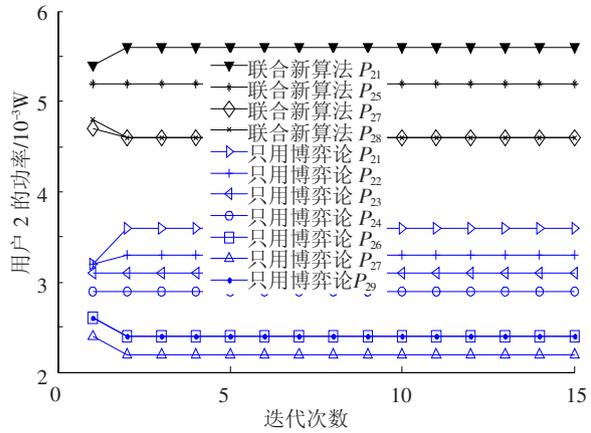


(b) 认知用户1在各信道上的功率分配P

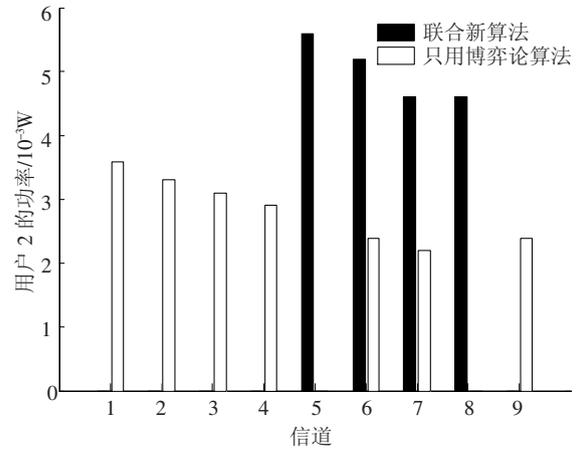
图3 认知用户1在各信道上的功率分配和迭代次数情况

图4(a)表明认知用户2在使用频谱上的功率分配结果随迭代次数的变化. 其中联合新算法 P_{21} 表示认知用户2用本文算法在频谱1上的发射功率;联合新算法 P_{25} 表示认知用户2用本文算法在频谱5上的发射功率;只用博弈论算法 P_{21} 表示认知用户2只用博弈论算法在频谱1上的发射功率;只用博弈论算法 P_{22} 表示认知用户2只用博弈论算法在频谱2上的发射功率,其他也同样解释. 由图4(a)能够看出,因为通过初次分配的2、3、4、6、9频谱被认知用户1和3使用,认知用户2在这5个频谱上没有分配功率. 联合新算法中认知用户2在频谱1、5、7、8上,没有经过与认知用户1和3博弈,便在使用了的信道上分配了合适的功率,经过2次迭代,功率达到稳定,结果表明本文算法的收敛速度和只用博弈论算法一样快. 只用博弈论算法中认知用户2不能使用5、8频谱,因为这两个频谱授权用户正在使用,认知用户2使用频谱1、2、3、4、6、7和9,在使用的信道上分配了合适的功率. 从图4(b)可以看出,在自身功

率容限的条件下,本文联合新算法比只用博弈论算法在其使用的信道上分配功率多.



(a) 认知用户2功率分配随迭代次数的变化

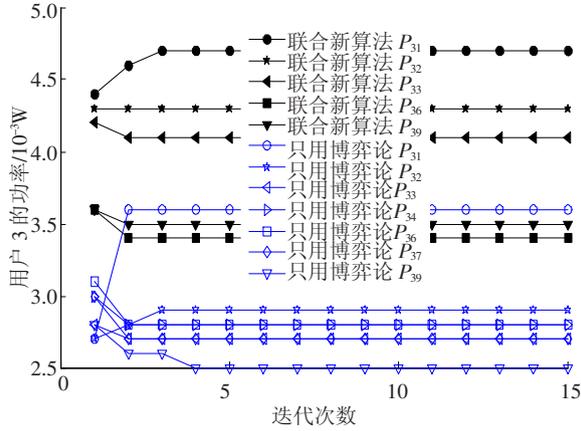


(b) 认知用户2在各信道上的功率分配

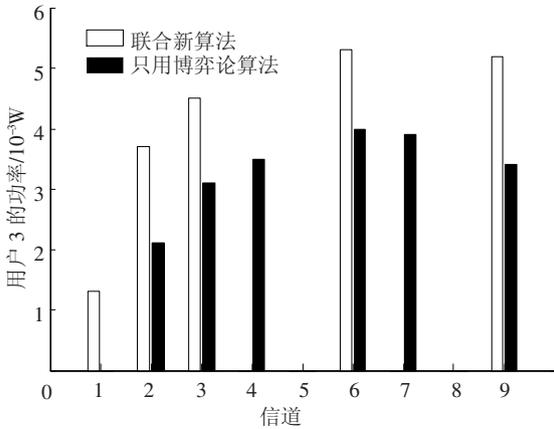
图4 认知用户2在各信道上的功率分配和迭代次数情况

图5(a)表明认知用户3在使用频谱上的功率分配结果随迭代次数的变化. 其中联合新算法 P_{31} 表示认知用户3用本文算法在频谱1上的发射功率;联合新算法 P_{32} 表示认知用户3用本文算法在频谱2上的发射功率;只用博弈论算法 P_{31} 表示认知用户3只用博弈论算法在频谱1上的发射功率;只用博弈论算法 P_{32} 表示认知用户3只用博弈论算法在频谱2上的发射功率,其他也同样解释. 由图5(a)能够看出,通过初次分配的4、5、7、8频谱分配给了认知用户2,认知用户3在这4个频谱上没有分配功率. 联合新算法中认知用户3在频谱1、2、3、6和9上经过与认知用户1博弈后,为了使自己的传输速率最大,在使用的信道上分配了合适的功率,经过3次迭代,各个频谱上的功率达到稳定. 只用博弈论算法中认知用户3不能使用5、8信道,因为这两个频谱授权用户正在使用,认知用户1、2、3之间博弈,使用频谱1、2、

3、4、6、7 和 9, 经过与认知用户 1 和认知用户 3 博弈后, 在使用的信道上分配了合适的功率. 只用博弈论算法中, 对于认知用户 3 来说信道 1 状态不好, 没有在信道 1 上分配功率, 从图 5 (b) 可以看出, 在自身功率容限的条件下, 本文联合新算法比只用博弈论算法在其使用的信道上分配功率多.



(a) 认知用户 3 功率分配和迭代次数关系



(b) 认知用户 3 在各信道的功率分配

图 5 认知用户 3 在各信道的功率分配和迭代次数情况

图 6 表明认知用户 1、2 和 3 的传输速率随迭代次数变化情况, 图中 R_1 表示认知用户 1 的效用, 同理 R_2 表示认知用户 2 的效用, R_3 表示认知用户 3 的效用. 由图可知, 迭代次数大于 2 时, 这 3 个认知用户传输速率达到稳定, 因为认知用户 1 收发端间的距离较大, 所以认知用户 1 的传输速率略小. 认知用户 2 收发端距离较小, 所以认知用户 2 整体传输速率略大, 认知用户 1 使用联合新算法尝试在信道 1 上面发射一定的功率, 但由于频谱 1 对于认知用户 1 来说, 信道状况不好, 影响了认知用户 1 的传输速率. 认知用户 1 只用博弈论算法, 没有在信道 1 上发射功率, 所以没有影响

认知用户 1 传输速率. 认知用户 2 使用联合新算法比只用博弈论算法效用(速率)大, 认知用户 3 使用联合新算法比只用博弈论算法效用(速率)大, 联合新算法的总效用大于只用博弈论算法的总效用.

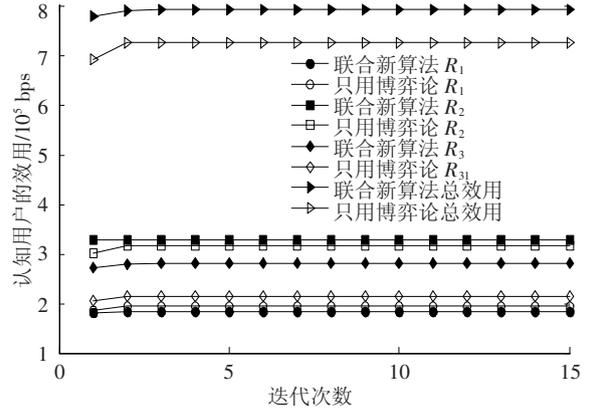


图 6 认知用户传输速率(效用)和迭代次数关系

5 结论

经过理论分析和仿真验证, 在“随机竞争接入”频谱的情况下, 认知用户不能使用处于工作状态的用户频谱, 在信道初次分配中, 可以采用图论的理论来分析问题, 仿真的结果直观, 很容易让人理解, 在一定程度上快速的分配信道, 能够消除认知用户彼此间的干扰, 为后面的再次分配打下基础, 再次信道分配中, 认知用户之间通过注水算法博弈, 优化使用的信道, 完成信道的再分配. 本文提出了联合的频谱分配新算法, 仿真证明可以充分利用频谱的资源, 在一定的传输功率下, 认知用户为了优化自身的效用(速率), 可以合理的分配功率. 仿真表明了本文联合新算法的有效性. 本文所提算法的缺陷是初次分配算法保证了公平性的同时, 有可能把某个适合认知用户传输的信道分配给了其他认知用户. 下一步的工作将取更多的认知用户进行仿真.

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. Piscataway: IEEE Inc., 2005, 5: 3132 - 3136.

[2] ZHAO Jun, ZHENG Haitao, YANG Guanghua. Distributed coordination in dynamic spectrum allocation networks [C]//2005 1st IEEE International Symposium on New Frontiers in Dynamic Spectrum

- Access Networks, DySPAN 2005. Piscataway: IEEE, 2005: 259 - 268.
- [3] FAN Lu. Spectrum allocation algorithm based on graph theory in cognitive radio networks [D]. Harbin: Harbin Institute of Technology, 2009: 23 - 46.
- [4] HUANG J W, KRISHNAMURTHY V. Game theoretic issues in cognitive radio systems [J]. Journal of Communications, 2009, 4(10): 790 - 802.
- [5] LI Tianming, JAYAWEERA S K. A novel primary-secondary user power control game for cognitive radios with linear receivers [C]//2008 IEEE Military Communications Conference, MILCOM 2008. Piscataway: IEEE Inc., 2008: 1 - 7.
- [6] WU Yongle, WANG Beibei, LIU K J R, *et al.* Repeated open spectrum sharing game with cheat-roof strategies [J]. IEEE Transactions on Wireless Communications, 2009, 8(4): 1922 - 1933.
- [7] LIU Yutao. Research on spectrum allocation algorithms in cognitive radio networks based on game theory [D]. Harbin: Harbin Institute of Technology, 2010: 21 - 73.
- [8] WANG Wei, LIU Xin. List-coloring based channel allocation for open-spectrum wireless networks [C]// the 62nd IEEE Vehicular Technology Conference (VTC). Piscataway: IEEE, 2005: 690 - 694.
- [9] BAI Bo, CHEN Wei, CAO Zhigang. Low-complexity hierarchical spectrum sharing scheme in cognitive radio networks [J]. IEEE Communications Letters, 2009, 13(10): 770 - 772.
- [10] 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.
- [11] CHUNG S T, GOLDSMITH A. Degrees of freedom in adaptive modulation: a unified view [J]. IEEE Transactions on Communications, 2001, 49(9): 1561 - 1571.
- [12] 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.
- [13] HUANG J, BERRY R A, HONIG M L. Distributed interference compensation for wireless networks [J]. IEEE Journal on Selected Areas in Communications, 2006, 24(5): 1074 - 1084.

(编辑 张宏)