

无线网络中基于图型演化博弈的动态频谱接入机制

李方伟, 袁迎慧, 朱江

(重庆邮电大学 移动通信技术重庆市重点实验室, 重庆 400065)

摘要: 无线网络中, 为了实现用户高效的数据传输, 针对用户的有限理性特性, 提出了一种基于图型演化博弈的动态频谱接入机制, 而图型博弈可以较好地反映用户之间真实的博弈关系。同时设计了一种动态频谱接入算法和与之对应的动态方程以降低博弈的复杂度, 而且能以较快的速度收敛到 Nash 均衡并获得较高的系统吞吐量和效用。理论证明该动态方程具有全局逐步稳定性, 当用户发生局部的理性偏移时依然能够保证较快收敛和较小性能偏离。仿真对比验证了该机制的上述优势。

关键词: 动态频谱接入机制; 图型演化博弈; 动态方程; Nash 均衡

中图分类号: TN929.5

文献标识码: A

Dynamic spectrum access mechanism based on graphical evolutionary game in radio networks

LI Fang-wei, YUAN Ying-hui, ZHU Jiang

(Chongqing Key Laboratory of Mobile Communications Technology, Chongqing University of Posts and Telecommunications, Chongqing 400065, China)

Abstract: In order to realize efficient data transmission for users in radio networks, a dynamic spectrum access mechanism based on graphical evolutionary game was proposed for the bounded rationality characteristic of users, while graphical game can better reflect the actual game relationship among users. Meanwhile, a dynamic spectrum access algorithm and corresponding dynamic equation were designed for the mechanism to reduce the complexity of the game, and could converge to Nash equilibrium with faster speed and obtain higher system throughput and utility. Theoretical analysis showed that the dynamic equation was globally asymptotically stable, which illustrated that when user deviated because of bounded rationality and it was still able to guarantee faster converge and fewer performance deviation. Simulation comparison verifies the superiority above.

Key words: dynamic spectrum access mechanism; graphical evolutionary game; dynamic equation; Nash equilibrium

1 引言

频谱资源的有限以及用户通信需求的快速增长, 使频谱资源的高效利用变得极为重要^[1]。近年来, 针对分布式无线网络, 基于博弈论的频谱接入机制成为了研究的热点^[2]。此类研究中, 可根据网络中参与博弈用户的理性特点, 将用户分

为完全理性和有限理性 2 类。用户的完全理性要求用户具有在存在交互作用的博弈环境中完美的判断和预测能力^[3]。在此条件下, 用户立刻选择理性策略使自己的收益最大化。此类研究包括: 基于博弈价格模型进行频谱接入控制^[4,5]; Xu 等在文献[6]提出了 2 种局部相互作用博弈使机会频谱接入的全局最佳; 使用部分可观测的马尔科夫

收稿日期: 2014-09-10; 修回日期: 2015-04-20

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(61102062); 教育部科学技术研究重点基金资助项目(212145); 重庆市教委科学技术研究基金资助项目(KJ120530); 重庆市科委自然科学基金资助项目(cstc2011jjA40025)

Foundation Items: The National Natural Science Foundation of China(61102062); The Key Project of Chinese Ministry of Education(212145); The Science and Technology Research Project of Chongqing Education Commission(KJ120530); The Natural Science Foundation of Chongqing Science Commission(cstc2011jjA40025)

过程和博弈论最大化网络吞吐量和最小化网络冲突^[7]。在实际网络中,用户的完全理性假设过于严格。由于参与博弈用户的认识能力不是完美的,获取的环境信息无法保持始终无差错,这就导致所选择的策略偏离理性策略,不能时刻遵循效用最大化的原则。当用户有限理性时,可用演化博弈对系统建模^[8,9],用户在策略演化过程中可通过模仿、学习不断修改和改进策略,直到达到 Nash 均衡。此类研究包括:联合考虑频谱感知和接入^[10],将感知和接入的过程抽象为一个演化博弈;运用演化博弈进行动态频谱选择^[11]。

基于演化博弈的相关研究均假设网络中的所有用户相互间都构成博弈关系。在实际情况下,由于网络中用户规模大,可借助图型博弈描述网络中各用户的真实博弈关系^[12,13],并降低博弈模型的维度和复杂度。然而,目前图型博弈都是针对完全理性的用户,还缺乏对有限理性用户的研究。因此,针对无线网络中多个有限理性用户共享多个信道实现高效数据传输的问题,将实际网络简化为图型结构,提出了一种基于图型演化博弈的动态频谱接入机制。针对图型演化博弈,设计出一种新的动态频谱接入简化算法和与之对应的动态方程来合理地分散数据流于各个信道。进一步,证明了新动态方程的解最终会收敛到图型演化博弈的一个纯策略 Nash 均衡。仿真结果表明:本文提出的算法能够实现较高的用户平均传输速率和效用,较高的系统吞吐量;算法收敛的过程是全局逐步稳定的,当用户发生局部的理性偏移时,依然能够保证较好的性能,而且由于在图型博弈框架下,理性偏移只会影响用户的邻居,而不会扩散到全网。

2 系统模型

考虑一无线网络模型,假设有 N 个用户同时接入 M 个可利用的频域信道进行数据流的分散传输。定义用户集合 $\mathcal{N} \triangleq \{1, \dots, N\}$, 信道集合 $\mathcal{M} \triangleq \{1, \dots, M\}$, $M < N$ 。无线环境下,同一信道对不同用户的信道质量是不同的,不同信道对同一用户的质量也是不一样的。对于同一用户的同一信道,信道质量是时变的,但其均值可以认为是时不变的。因此,对于信道 j ,定义用户 i 获得的最大平均传输速率为 $b_{i,j}$,即信道 j 唯一分配给用户 i 时可获得的平均传输速率。 N 个用户以时分的方式获得传输

机会,从而形成时域、频域的二维资源共享。用户接入信道的模型如图 1 所示。

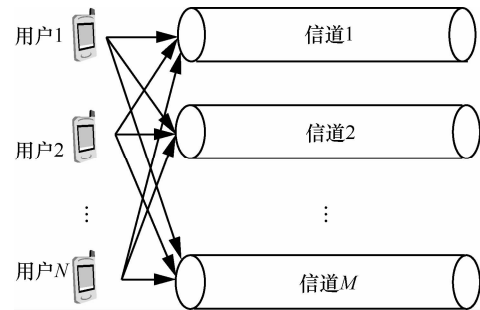


图 1 用户接入信道的模型

由此可见,在信道 j 上,用户 i 实际获得的平均传输速率为 $b_{i,j}t_{i,j}$,其中, $t_{i,j}$ 为用户 i 在信道 j 上获得的传输时间比率,且满足 $\sum_{i \in \mathcal{N}} t_{i,j} = 1$ 。在以时间为传输资源的系统中,可以通过调整接入概率和时隙,来实现传输时间比率的分配^[14]。该文中假设每个用户传输的数据流属于弹性业务^[15],用户以“尽力而为”的方式进行数据流传输,并且都期望获得尽可能高的传输速率。那么用户 i 的效用函数可表示为^[15]

$$U(B_i) = a_i + e_i(B_i + c_i)^{d_i} \quad (1)$$

其中, $B_i = \sum_{j \in \mathcal{M}} b_{i,j}t_{i,j}$ 为用户 i 的总平均传输速率, a_i 为用户 i 的最大效用值, a_i 、 c_i 、 d_i 、 e_i 为均匀分布的变量且 $e_i < 0, d_i < 0$ 。效用函数表明用户实际获得的平均传输速率与其满意度之间的关系,是衡量用户弹性业务的一种性能指标^[15]。可见,用户的效用会随着其所获得的实际传输速率增加而增大,直到逼近某一常数 U_i^{\max} 。

定义 1 用户的平均期望传输速率值 Num_i , 且 $\frac{U(Num_i)}{U_i^{\max}} = 95\%$ 。

图 2 给出了用户的效用与平均传输速率的关系。由图 2 可知,用户平均传输速率增长时效用的增长率是降低的,即所谓边际效益递减。因此在系统设计中考虑代价,没有必要以最大化效用为目标。定义用户的平均期望传输速率值 Num_i ,只要满足传输速率为 Num_i ,用户 i 就可获得达到 U_i^{\max} 95% 的效用。为此,频谱接入机制就是将每个用户的平均期望传输速率值分配到各个信道,并在每个信道占用不同的时间比率,从而尽量使每个用户平均传输速率更高,所获得的效用更大。

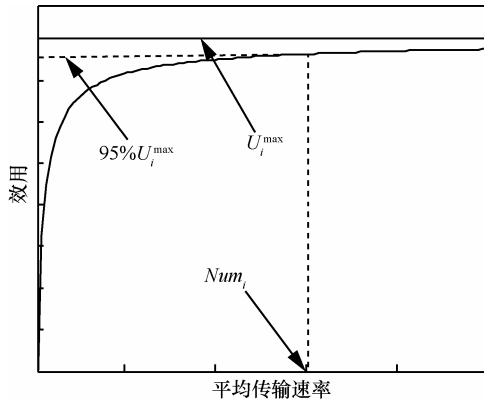


图 2 用户的效用与平均传输速率的关系

3 基于图型演化博弈的动态频谱接入机制

3.1 图型演化博弈模型

无线网络中，不失一般性，假设用户之间的实际相互作用如图 3 所示，虚线圆圈表示用户的干扰范围。将其映射为基于图型博弈的结构来表示用户间的真正内在结构，如图 4 所示。在图型结构中，图的顶点表示用户，边表示用户间有相互作用。在本文的网络模型中，有多个用户竞争使用多个信道，如果这 2 个用户的地理位置相近，就可以构成冲突关系，也就是说，如果它们同时使用相同信道，就会彼此干扰，这样就构成邻居关系，在图中用一条线相连^[12,13]，如图 4 中用户 4 与用户 5。

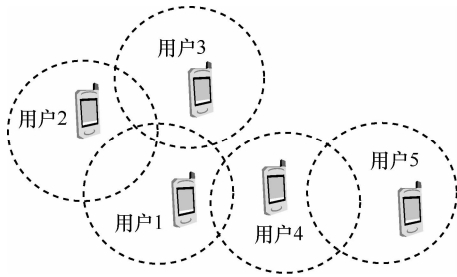


图 3 实际网络拓扑

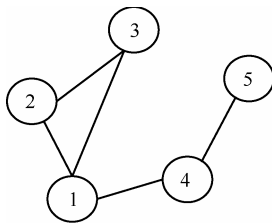


图 4 基于图型博弈的结构

定义 2 用户的社区。用户 i 以及与 i 有边连接的用户构成的集合为用户 i 的社区，用 J_i 表示。

定义 3 用户的邻居。与 i 有边连接的用户构成的集合为用户 i 的邻居，用 J_{-i} 表示。

定义 4 用户的度。 D_i 表示用户 i 的度，即用户的邻居个数。

结合以上图的定义，定义一个图型演化博弈 $\mathcal{G} \triangleq \{\mathcal{N}, \mathbf{X}, \mathbf{R}\}$ 。其中， \mathcal{N} 是博弈参与者集合，由 N 个用户组成； \mathbf{X} 是 $N \times M$ 维的行为矩阵，其元素 $x_{i,j}$ 表示用户 i 在信道 j 上的速率分配比率； \mathbf{R} 是 $N \times M$ 维的收益函数矩阵，其元素 $r_{i,j}$ 表示用户 i 在信道 j 上获得的收益，即用户在该信道上获得的实际传输速率，其表达式如下

$$r_{i,j}(x_{i,j}, x_{J_{-i},j}) = b_{i,j} t_{i,j}, \forall i \in \mathcal{N}, j \in \mathcal{M} \quad (2)$$

其中，满足条件 $\sum_{j=1}^M x_{i,j} = 1, x_{i,j} \geq 0$ ，且 $x_{i,j}$ 与 $t_{i,j}$ 的关系为

$$t_{i,j} = \frac{\left(x_{i,j} \frac{Num_i}{b_{i,j}} \right)}{\sum_{h \in J_i} \left(x_{h,j} \frac{Num_h}{b_{h,j}} \right)} \quad (3)$$

由此可见，用户的收益只受到其邻居用户的影响。用户 i 的目的就是通过合理地分配 Num_i 在各个信道上的比率 $x_{i,j} (\forall j \in \mathcal{M})$ ，来最大化自己在信道上的收益 $r_{i,j}(x_{i,j}, x_{J_{-i},j})$ 。后文将通过基于动态方程的动态频谱接入算法求解图型演化博弈 \mathcal{G} 的 Nash 均衡，且通过证明可知，达到 Nash 均衡以后，用户在每个信道上收益相等^[8-11]。因此，用户 i 最大化在每个信道上收益，则在所有信道的收益之和 B_i 最大，那么用户 i 的优化目标可表示为

$$\max_{x_{i,j}} B_i = \max_{x_{i,j}} \sum_{j \in \mathcal{M}} r_{i,j}(x_{i,j}, x_{J_{-i},j}) \quad (4)$$

即单个用户目的是使自己的总收益最大化。由式(1)可知，用户的效用是随其总收益单调增加，因此，最大化总收益就是最大化其效用。

值得注意的是，图型演化博弈 \mathcal{G} 是一次博弈。对于用户 i 而言，当完成了与邻居用户的博弈过程后得到 Nash 均衡策略，然后根据该策略确定 Num_i 在各个信道上的比率，实现数据传输。

3.2 基于动态方程的动态频谱接入算法

为了求解 \mathcal{G} 的 Nash 均衡解，提出一种基于动态方程的动态频谱接入算法。其主要思想是：用户比较当前所选信道收益与其他信道收益差值，以特定的概率选择可获最高收益的信道，并增加所选信道的速率分配比率，直到用户在各个信道上分配的

速率比率不变, 此时算法收敛, 得到的策略即 Nash 均衡策略。该算法在每次迭代时更新一次信道上的速率分配比率, 在第 n 次迭代, 对于用户 i , 其动态频谱接入算法流程如图 5 所示。

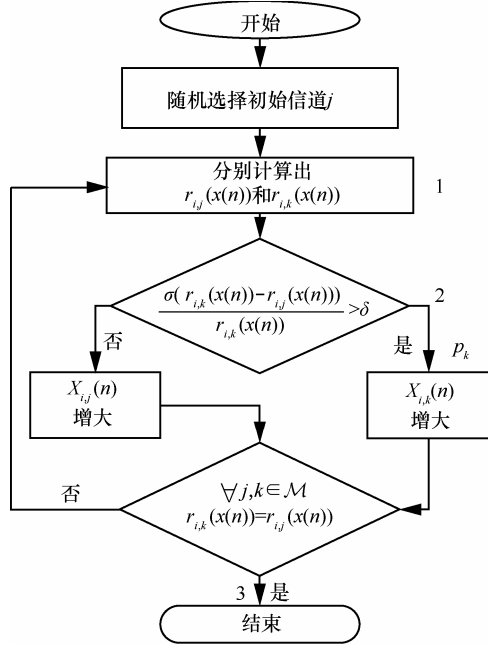


图 5 动态频谱接入算法流程

1) 将第 n 次迭代时用户 i 在信道 j 上获得的收益 $r_{i,j}(x_{i,j}(n), x_{-i,j}(n))$ 简写为 $r_{i,j}(x(n))$ 。用户 i 通过公共控制信道获得其邻居用户的速率分配情况, 并计算出 $r_{i,k}(x(n))$ 和 $r_{i,j}(x(n))$, 其中, $k = \arg \max_{l \neq j, l \in \mathcal{M}} r_{i,l}(x(n))$ 。

2) 定义 σ 为控制因子, 是大于 0 的常数, 用于控制算法的收敛速度, δ 是区间 $[0,1]$ 上的常数。若

$$\frac{\sigma(r_{i,k}(x(n)) - r_{i,j}(x(n)))}{r_{i,k}(x(n))} > \delta \quad (5)$$

则用户 i 以概率 p_k 在信道 k 上增加速率分配比率, 增量为 $\frac{\sigma(r_{i,k}(x(n)) - r_{i,j}(x(n)))}{r_{i,j}(x(n))}$, 即 $x_{i,k}(n)$ 增大。其中

$$p_k = \frac{r_{i,k}(x(n)) - r_{i,j}(x(n))}{\sum_{j \in \mathcal{M}} (r_{i,k}(x(n)) - r_{i,j}(x(n)))} \quad (6)$$

否则, 继续在当前信道 j 上增加速率分配比率, 增量为 $\frac{\sigma(r_{i,j}(x(n)) - r_{i,k}(x(n)))}{r_{i,k}(x(n))}$, 即 $x_{i,j}(n)$ 增大。

3) 上述过程直到满足 $\forall j, k \in \mathcal{M}, r_{i,j}(x(n)) =$

$r_{i,k}(x(n))$, 算法收敛。

定理 1 用户 i 的上述动态频谱接入算法遵循如下动态方程的演化过程

$$\Delta x_{i,j}(n) \triangleq \sigma \frac{r_{i,j}(x(n)) - r_{i,k}(x(n))}{r_{i,k}(x(n))}, \quad \forall i \in \mathcal{N}, j \in \mathcal{M} \quad (7)$$

其中, $k \neq j, k \in \mathcal{M}$ 。

证明 根据任意 2 个收益大小只存在 3 种逻辑关系, 即小于、等于、大于, 将 M 个信道划分为 3 个完全互不重叠的子信道集

$$\begin{aligned} M_1 &= \{j \in M \mid r_{i,j}(x(n)) < r_{i,k}(x(n))\} \\ M_2 &= \{j \in M \mid r_{i,j}(x(n)) = r_{i,k}(x(n))\} \\ M_3 &= \{j \in M \mid r_{i,j}(x(n)) > r_{i,k}(x(n))\} \end{aligned} \quad (8)$$

对于信道 $j \in M_1$, 用户 i 在此信道上获得的收益小于在其他信道上的收益, 如 $r_{i,j}(x(n)) < r_{i,k}(x(n))$, 则用户 i 在信道 j 上继续发送数据的概率 $p_j = 0$, 而以概率 p_k 转而去报酬更高的 k 信道发送。因此用户选择信道的动态行为可表示为

$$\begin{aligned} \Delta x_{i,j}(n) &\triangleq -\sigma \frac{r_{i,k}(x(n)) - r_{i,j}(x(n))}{r_{i,k}(x(n))} \\ &= \sigma \frac{(r_{i,j}(x(n)) - r_{i,k}(x(n)))}{r_{i,k}(x(n))} \end{aligned} \quad (9)$$

对于信道 $j \in M_2$, 有 $r_{i,j}(x(n)) = r_{i,k}(x(n))$, $p_j = 0$ 。因此 $\Delta x_{i,j}(n) = 0$, 满足上述得出的动态方程。

对于信道 $j \in M_3$, 有 $r_{i,j}(x(n)) > r_{i,k}(x(n))$ 。则用户 i 继续选择在此信道上发送数据。由于此时 $p_j > 0$, 来自其他信道 $l \in M_1$ 的一些用户会在此信道上发送。用 Θ 表示 $l \in M_1$ 信道上的用户增加的速率比率, 有

$$\begin{aligned} \Theta &= \sum_{l \in M_1} (x_l(n) - x_l(n+1)) \\ &= \frac{\sum_{l \in M_1} \sigma (r_{i,k}(x(n)) - r_{i,l}(x(n)))}{r_{i,k}(x(n))} \\ &= \frac{\sigma \sum_{l \in M_1} (r_{i,k}(x(n)) - r_{i,l}(x(n)))}{r_{i,k}(x(n))} \end{aligned} \quad (10)$$

由于对于 $l \in M_2$, 有 $r_{i,k}(x(n)) = r_{i,l}(x(n))$ 和 $\sum_{l \in M_2} (r_{i,k}(x(n)) - r_{i,l}(x(n))) = 0$ 。

得到

$$\sum_{i \in M_1} (r_{i,k}(x(n)) - r_{i,l}(x(n))) = \sum_{l \in M_3} (r_{i,l}(x(n)) - r_{i,k}(x(n)))$$

然后 $j \in M_3$ 信道上增加的速率比率为

$$\begin{aligned} \Delta x_{i,j}(n) &\triangleq p_j \Theta \\ &= \frac{r_{i,j}(x(n)) - r_{i,k}(x(n))}{\sum_{l \in M_3} (r_{i,l}(x(n)) - r_{i,k}(x(n)))} \\ &= \frac{\sigma \sum_{l \in M_3} (r_{i,l}(x(n)) - r_{i,k}(x(n)))}{r_{i,k}(x(n))} \\ &= \frac{\sigma (r_{i,j}(x(n)) - r_{i,k}(x(n)))}{r_{i,k}(x(n))}, \forall j \in M_3 \end{aligned} \quad (11)$$

证毕。

由此可见, 动态频谱接入算法收敛时, 动态方程达到稳定状态, 即满足 $\forall i \in \mathcal{N}, j \in \mathcal{M}$, $\Delta x_{i,j}(n) = 0$, 也就是 $r_{i,j}(x^*) = r_{i,k}(x^*)$, 称 x^* 为稳定点。当 \mathbf{X} 根据动态方程进行迭代, 最终其各个元素皆收敛到稳定点。

一般而言, 达到 Nash 均衡以后用户在每个信道上收益相等, 与动态方程达到稳定时用户在每个信道上的收益相等是对应的。因此, 演化博弈的 Nash 均衡都借助一个通用的动态方程求解^[8-11]。把这种通用的动态方程叫做原始动态方程, 本文提出的上述动态方程与之相比, 无需计算所有邻居用户的平均收益, 减少了计算量和信息传输量, 当用户数与信道数较多时其优势更为明显。而且仿真表明, 基于该动态方程, 矩阵 \mathbf{X} 的收敛速度更快。

3.3 Nash 均衡点与稳定点的一致性分析

定理 2 图型演化博弈 \mathcal{G} 为潜在博弈。

证明 构建一个潜在函数为

$$\Phi(x_i, x_{J_i}) = \sum_{i \in \mathcal{N}} B_i(x_i, x_{J_i}) \quad (12)$$

其中, $B_i = \sum_{j \in \mathcal{M}} r_{i,j}(x_i, x_{J_i,j})$ 。

现在假设任意用户 i 做一个单方面的策略改变, 即从 $x_{i,j} \rightarrow \tilde{x}_{i,j}$, 则引起其总收益函数的变化量为

$$\begin{aligned} &B_i(\tilde{x}_i, x_{J_i}) - B_i(x_i, x_{J_i}) \\ &= \sum_{j \in \mathcal{M}} \left(\frac{(\tilde{x}_{i,j} \text{Num}_i)}{\sum_{h \in J_i} (\tilde{x}_{h,j} \text{Num}_h / b_{h,j})} - \frac{(x_{i,j} \text{Num}_i)}{\sum_{h \in J_i} (x_{h,j} \text{Num}_h / b_{h,j})} \right) \end{aligned} \quad (13)$$

其中, $\tilde{x}_{h,j}$ 为用户 i 单方面策略改变后, 它所在的社区用户的速率分配比率。

潜在函数的变化量为

$$\begin{aligned} &\Phi(\tilde{x}_i, x_{J_i}) - \Phi(x_i, x_{J_i}) \\ &= \sum_{j \in \mathcal{M}} \left(\frac{(\tilde{x}_{i,j} \text{Num}_i)}{\sum_{h \in J_i} (\tilde{x}_{h,j} \text{Num}_h / b_{h,j})} - \frac{(x_{i,j} \text{Num}_i)}{\sum_{h \in J_i} (x_{h,j} \text{Num}_h / b_{h,j})} \right) + \\ &\quad \sum_{m \in \{\mathcal{N} \setminus J_i\}} \sum_{j \in \mathcal{M}} \left(\frac{(x_{m,j} \text{Num}_m)}{\sum_{g \in J_m} (\tilde{x}_{g,j} \text{Num}_g / b_{g,j})} - \frac{(x_{m,j} \text{Num}_m)}{\sum_{g \in J_m} (x_{g,j} \text{Num}_g / b_{g,j})} \right) \end{aligned} \quad (14)$$

其中, $\mathcal{N} \setminus J_i$ 代表从 \mathcal{N} 中除去 J_i 。

因为图型博弈中, 用户的行为只影响它的邻居用户的收益, 则有

$$\sum_{m \in \{\mathcal{N} \setminus J_i\}} \sum_{j \in \mathcal{M}} \left(\frac{(x_{m,j} \text{Num}_m)}{\sum_{g \in J_m} (\tilde{x}_{g,j} \text{Num}_g / b_{g,j})} - \frac{(x_{m,j} \text{Num}_m)}{\sum_{g \in J_m} (x_{g,j} \text{Num}_g / b_{g,j})} \right) = 0, \quad \forall m \in \{\mathcal{N} \setminus J_i\} \quad (15)$$

联合式(13)~式(15), 有

$$\Phi(\tilde{x}_i, x_{J_i}) - \Phi(x_i, x_{J_i}) = B_i(\tilde{x}_i, x_{J_i}) - B_i(x_i, x_{J_i}) \quad (16)$$

由式(16)可得, 此博弈是潜在博弈。

证毕。

根据潜在博弈性质可知, 该博弈一定存在一个纯策略 Nash 均衡^[16]。

定理 3 动态方程(7)的解是全局逐步稳定的。

证明 根据文献[17], 使用 Lyapunov 函数 $V(x(n)) = L^* - L(x(n))$ 去证明全局逐步稳定性, 其中, $L(x(n)) = \sum_{j=1}^M \int_{-\infty}^{x_{i,j}(n)} r_{i,j}(y) dy$, 由于 L^* 在 $x(n)$ 取 x^* 时是 $L(x(n))$ 的唯一全局最大值, 有 $\forall x(n) \neq x^*, V(x(n)) > 0, V(x^*) = 0$ 。 $V(x(n))$ 对 n 的差分为

$$\begin{aligned} \tilde{V}(x(n)) &= -\sum_{j=1}^M r_{i,j}(x(n)) \Delta x_{i,j}(n) \\ &= -\sum_{j=1}^M r_{i,j}(x(n)) \sigma \frac{r_{i,j}(x(n)) - r_{i,k}(x(n))}{r_{i,k}(x(n))} \\ &= -\frac{\sigma}{M} \left(M \sum_{j=1}^M \left(\frac{(r_{i,j}(x(n)))^2}{r_{i,k}(x(n))} \right) \right) - \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} & \sum_{j=1}^M (r_{i,j}(x(n))) \sum_{k=1}^M (r_{i,k}(x(n))) / r_{i,k}(x(n)) \\ &= -\frac{\sigma}{M} \sum_{j=1}^M \sum_{k=1}^M \left(\frac{(r_{i,j}(x(n)) - r_{i,k}(x(n)))^2}{r_{i,k}(x(n))} \right) \end{aligned} \quad (17)$$

因此, 得到 $\forall x(n) \neq x^*, \tilde{V}(x(n)) < 0, \tilde{V}(x^*) = 0$ 。
证毕。

由定理 2 和定理 3 可知, \mathbf{X} 根据动态频谱接入算法进行更新时, 会收敛到图型演化博弈 \mathcal{G} 的一个纯策略 Nash 均衡, 即所谓的动态方程(7)的演化稳定点与 \mathcal{G} 的 Nash 均衡点具有一致性^[18]。

4 仿真分析与性能比较

以图 4 为基础构建仿真模型, 其中, $N = 5, M = 3$ 。不失一般性, 假设对于任意用户 i , 其效用函数的参数取值区间为: $a_i \in [5 \ 5.3], c_i \in [0 \ 0.01], d_i \in [-0.7 \ -0.69], e_i \in [-4 \ -3.8]$ ^[15]。无线信道为频率选择性衰落信道。信道增益包括路径损耗和频率选择性衰落。其中, 路径损耗为 $L_{i,j} = 20 \log d_i + 20 \log f_j - 28$, d_i 是用户 i 收发端之间的距离, f_j 是信道 j 的中心频率。频率选择性衰落的建模和参数的选择和文献[19]一致。假设各个用户的发射功率一致, 由于不同用户收发对之间的距离不同, 且每个信道的中心频率不同, 则不同用户在不同信道获得的最大平均传输速率不同。仿真得到用户 i 获得的最大平均传输速率 $b_{i,j} \in [300 \ 480]$ bit/s, $\sigma = 100$ 。

4.1 计算复杂度比较

由于该文所提机制的特点是基于所提新的动态方程以及图型演化博弈, 因此选取原始动态方程下图型演化博弈(简称 ODEGEG)、原始动态方程下非图型演化博弈^[8-11](简称 ODENGEG) 2 种接入机制作为对比的对象。它们的计算复杂度比较结果如表 1 所示, 其中, D_i 为用户 i 的度。可见, 所提机制的各项运算都具有较低的复杂度。其原因在于, 一方面所提机制基于图型演化博弈, 用户求解 Nash 均衡时只需考虑其邻居的参数; 另一方面, 所提机制无需计算所有邻居用户的平均收益, 减少了计算量。

表 1 各算法计算复杂度比较

算法	加减运算	乘除运算	比较运算
所提机制	$8M$	ND_i	$M - 1$
ODEGEG	$13M$	NMD_i	M
ODENGEG	$20M$	N^2M	M

4.2 用户收益演化的分析与比较

从用户总收益和用户在各个信道上的收益 2 个方面进行分析和比较。从 5 个用户中选取用户 1 和用户 5 为分析对象。由定义 3 知, $J_{-1} = \{2, 3, 4\}$ 和 $J_{-5} = \{4\}$ 。由于有限理性的特性, 用户可能在选择策略时犯错而不能严格地与动态方程的演化迭代过程相一致。因此, 仿真中假设用户 1 在 $n = 40$ 时发生理性偏移以此来验证所提机制的性能。当然, 这里的 $n = 40$ 和用户 1 是任意假设的, 可以假设偏移发生在任何迭代时刻的任何用户上。

图 6 和图 7 分别给出 3 种机制下用户 1、用户 5 总收益(即实际可获得的总平均传输速率 $B_1、B_5$) 的演化过程。可见, 该文所提机制和 ODEGEG 都能收敛到较好的结果, 这是因为 2 种机制都是基于图型博弈, 能够反映出用户间真实的竞争关系, 一般情况下邻居用户数小于总用户数, 用户可以用更积极的策略去竞争频谱。同时可以看到, 相比其他 2 种机制, 该所提机制的收敛速度较快。而且当 $n = 40$, 用户 1 发生局部的理性偏移时(即由于差错等原因, 用户的行为没有严格按照动态方程的演化过程迭代), 依然能够保证较快收敛速度和较小的性能偏移。这是因为所提机制无需计算所有邻居用户的平均收益, 平均收益本身就是逐步收敛的量, 而且易受到理性偏移的影响, 所提机制的收敛和偏移回归就不以平均收益收敛和偏移回归为前提, 因此其收敛速度更快, 偏移量较小。而用户 5 不是用户 1 的邻居, 则在 $n = 40$, 所提机制和 ODEGEG 不发生性能偏移。由此可见, 在图型博弈下, 用户的理性偏移只会影响其邻居, 而不会扩散到整个网络。

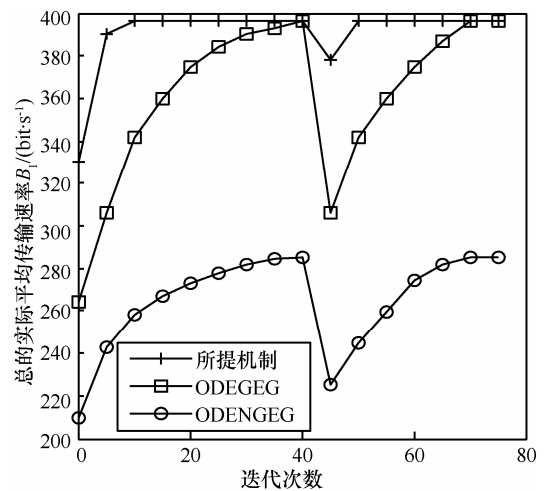


图 6 用户 1 总收益的演化

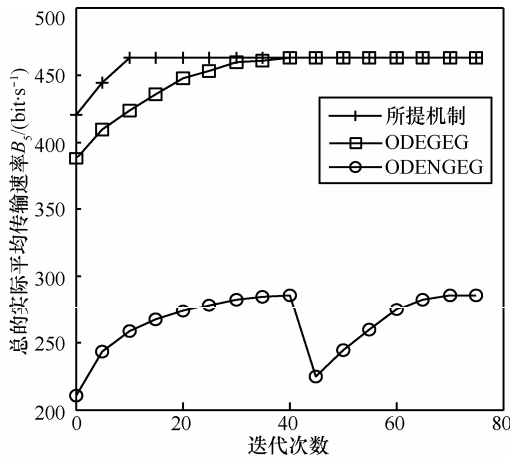


图 7 用户 5 总收益的演化

图 8 和图 9 分别显示了基于所提机制，用户 1、用户 5 在 3 个信道上的收益演化过程。可见，用户在各信道上的收益最终将收敛到同一个值，即达到 Nash 均衡以后，用户在每个信道上收益相等^[8-11]。这和前文的证明结论一致。

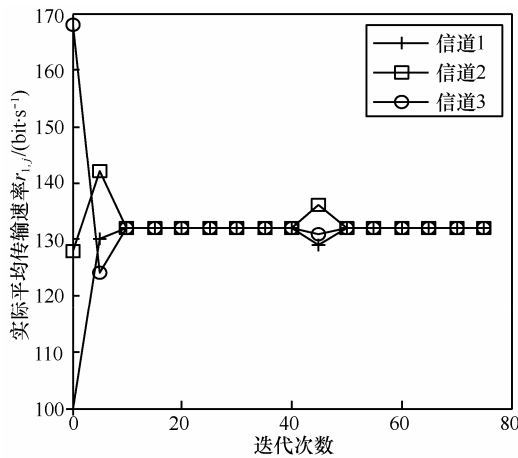


图 8 用户 1 在 3 个信道上收益的演化

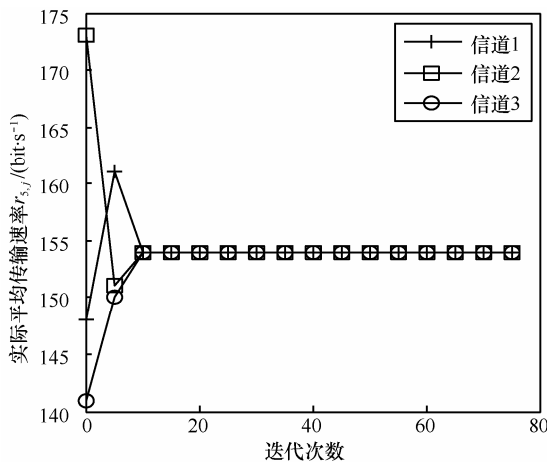


图 9 用户 5 在 3 个信道上收益的演化

4.3 用户在信道上速率分配比率演化的分析

图 10 和图 11 分别显示了基于所提机制，用户 1 和用户 5 各自的传输速率分配比率在 3 个信道上的演化情况。分配比率取决于最大平均传输速率为 $b_{i,j}$ 。仿真中有 $b_{1,1} > b_{1,2} > b_{1,3}$ ， $b_{5,3} > b_{5,1} > b_{5,2}$ ，因此，用户 5 在信道 3 上的速率分配比率最大，信道 2 最少，用户 1 在信道 1 上的速率分配比率最大，信道 3 上最少。

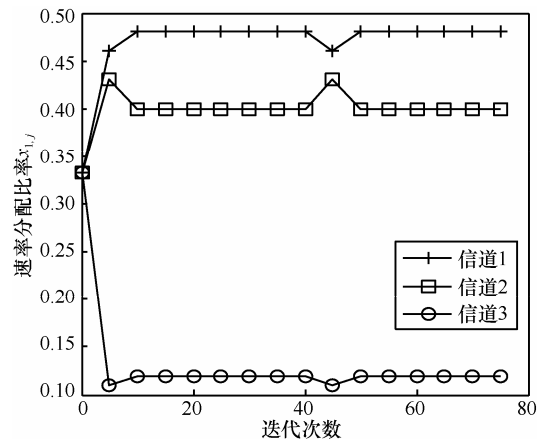


图 10 用户 1 在 3 个信道上速率分配比率演化

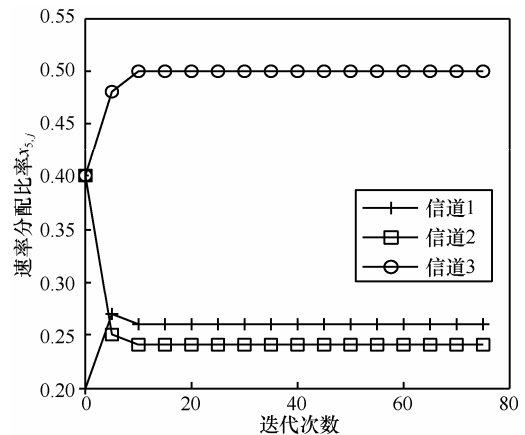


图 11 用户 5 在 3 个信道上速率分配比率演化

由此可见，用户更倾向于在较好的信道上分配更多的速率分配比率。由前文可知，用户在各信道上的收益（即实际获得的平均传输速率）最终将收敛到同一个值，也就意味着信道质量好，用户在该信道上占用的传输时间短。在时域、频域二维资源共享架构下，用户倾向于选择较好的信道能够提高资源使用效率。

4.4 用户总平均传输速率和效用的比较

图 12 和图 13 分别显示了 5 个用户最终获得的总平均传输速率 B_i 和效用 $U(B_i)$ 。所提机制与 ODEGEG 有更好的性能。因为它们都是基于图型博

弈，能够反映出用户间真实的竞争关系，用户可以用更积极的策略去竞争频谱。所提机制与 ODEGEG 的 B_i 与 $U(B_i)$ 虽然性能相同，但如前所述，所提机制的收敛速度快，复杂度小，且受理性偏移影响小。而且还可以看到，采用所提机制与 ODEGEG，当用户的邻居少（如用户 5），其获得的总平均传输速率较高，反之较低（如用户 1）。这是因为邻居少意味着资源使用的自由度更大，也就意味着这 2 种基于图型博弈的机制更能反映网络的真实状况，资源使用效率更高。

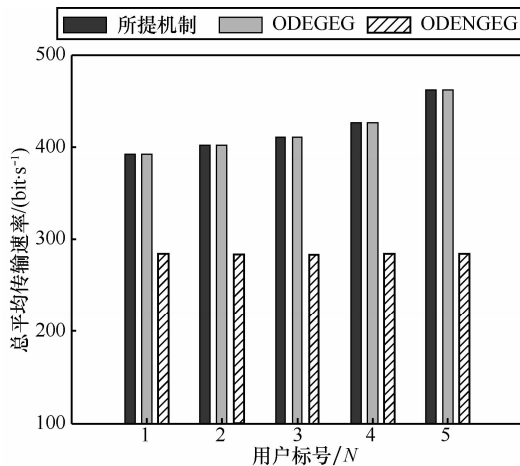


图 12 用户的总平均传输速率

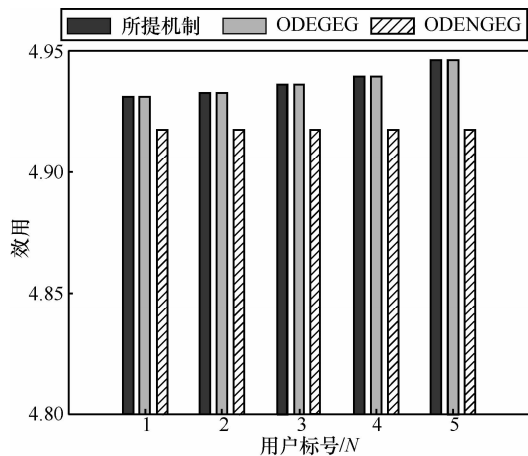


图 13 用户的效用

4.5 系统总吞吐量的比较

系统总吞吐量即所有用户实际获得的总平均传输速率之和。为了比较 3 种机制下系统的总吞吐量，用穷举法得出的系统总吞吐量作为上界。

定义 5 穷举法。网络中有一个中心节点负责收集所有信道对每个用户的收益值，然后穷举出所有可能的接入策略进行性能比较，最后选取使系统

吞吐量最大化的策略作为最优策略。

图 14 显示了系统总吞吐量的演化过程，其中穷举法得到的总吞吐量作为性能上界。穷举法虽然性能最好，但不适合分布式且用户具有竞争关系的网络，而且其计算复杂度和信息交换量都很大。相比 ODEGEG 和 ODENGEG，所提机制能够以最快速度逼近性能上界，其原因和前文分析的一致。

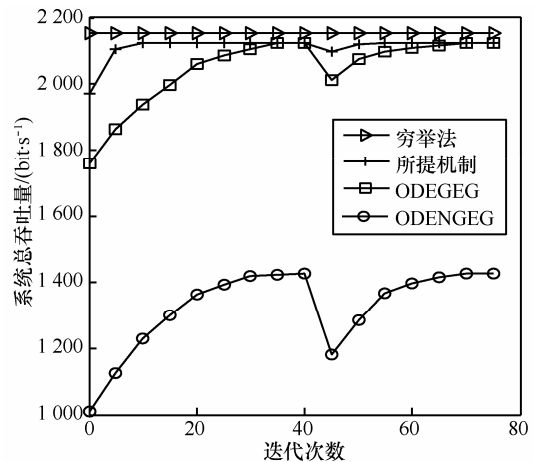


图 14 系统总吞吐量的演化

5 结束语

本文提出了一种基于图型演化博弈的动态频谱接入机制，来解决无线网络中多个有限理性用户共享多信道实现高效数据流分散传输的问题。首先用图型博弈描述用户间真正的博弈关系，以此降低博弈的复杂度。然后设计了一种简化的动态频谱接入算法，以及具有全局逐步稳定性动态方程来描述用户速率分配比率的演化过程。证明了该算法能够收敛到图型演化博弈 \mathcal{G} 的一个纯策略 Nash 均衡。仿真分析证实，所提机制具有较低的复杂度，较高的用户平均传输速率和效用，较高的系统吞吐量。当用户发生局部的理性偏移时，依然能够保证较快收敛速度和较小的性能偏移。而且用户的理性偏移只会影响其邻居，而不会扩散到整个网络。

参考文献:

- [1] FENG D Q, JIANG C Z, LIM G, *et al.* A survey of energy-efficient wireless communications[J]. IEEE Communications Surveys & Tutorials, 2013, 15(1): 167-178.
- [2] HAN Z, NIYATO D, SAAD W, *et al.* Game Theory in Wireless and Communication Networks[M]. Cambridge University Press, 2012: 55-251.
- [3] 谢识予. 有限理性条件下的进化博弈理论[J]. 上海财经大学学报, 2001, 3(5): 3-9.

- XIE S Y. Evolutionary game theory under the condition of bounded ration[J]. Journal of Shanghai University of Finance and Economics, 2001, 3(5): 3-9.
- [4] YANG L, KIM H, ZHANG J S, *et al.* Pricing-based decentralized spectrum access control in cognitive radio networks[J]. IEEE/ACM Transactions on Networking (TON), 2013, 21(2): 522-535.
- [5] 黄丽亚, 刘臣, 王锁萍. 改进的认知无线电频谱共享博弈模型[J]. 通信学报, 2010, 31(2):136-140.
HUANG L Y, LIU C, WANG S P. Improved spectrum sharing model in cognitive radios based on game theory[J]. Journal on Communications. 2010, 31(2): 136-140.
- [6] XU Y H, WANG J L, WU Q H, *et al.* Opportunistic spectrum access in cognitive radio networks: global optimization using local interaction games[J]. IEEE Journal of Selected Topics in Signal Processing, 2012, 6(2): 180-194.
- [7] FANG H, XU L, HUANG C. Dynamic opportunistic spectrum access of multi-channel multi-radio based on game theory in wireless cognitive network[A]. 2013 IEEE Ninth International Conference on Mobile Ad-hoc and Sensor Networks (MSN)[C]. Dalian, China, 2013.127-132.
- [8] WEIBULL J W. Evolutionary game theory[M]. MIT Press, 1997.
- [9] SANDHOLM W H. Evolutionary game theory[A]. Computational Complexity: Theory, Techniques, and Applications[C]. 2012.1000-1029.
- [10] JIANG C X, CHEN Y, GAO Y, *et al.* Joint spectrum sensing and access evolutionary game in cognitive radio networks[J]. IEEE Transactions on Wireless Communication, 2013, 12(5): 1-14.
- [11] ZHAO S S, ZHU Q, ZHU H B. Evolutionary game theoretical approach to dynamic spectrum sharing[J]. Journal of Computational Information Systems, 2012, 8(10): 4225-4232.
- [12] XU Y H, WU Q H, WANG J L, *et al.* Opportunistic spectrum access using partially overlapping channels: graphical game and uncoupled learning[J]. IEEE Transactions on Communications, 2013, 61(9): 1-13.
- [13] LI H S, HAN Z. Competitive spectrum access in cognitive radio networks: graphical game and learning[A]. 2010 IEEE Wireless Communications and Networking Conference (WCNC)[C]. Sydney, NSW, 2010.1-6.
- [14] XU Y H, WU Q H, WANG J L, *et al.* Social welfare maximization for SRSNs using bio-inspired community cooperation mechanism[J]. Chinese Science Bulletin, 2012, 57(1): 125-131.
- [15] SHENKER S. Fundamental design issues for the future Internet[J]. IEEE Journal on Selected Areas in Communications, 1995, 13(7): 1176-1188.
- [16] SANDHOLM W H. Potential games with continuous player sets[J]. Journal of Economic Theory, 2001, 97(1): 81-108.
- [17] NARENDRA K S, ANNASWAMY A M. Stable Adaptive Systems[M]. Courier Dover Publications, 2012.
- [18] BARTH D, BOUMEZ O, BOUSSATO O, *et al.* A dynamic approach for load balancing[A]. Proceedings of the Fourth International ICST Conference on Performance Evaluation Methodologies and Tools[C]. Pisa, Italy, 2009.60.
- [19] WU D P, NEGI R. Effective capacity channel model for frequency-selective fading channels [J]. Wireless Networks, 2006, 13(3): 299-310.

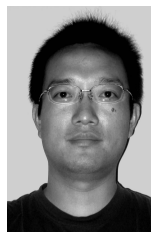
作者简介:



李方伟(1960-), 男, 重庆人, 重庆邮电大学教授、博士生导师, 主要研究方向为移动通信理论与技术、信息安全技术等。



袁迎慧(1989-), 女, 山西大同人, 重庆邮电大学硕士生, 主要研究方向为移动通信技术、认知无线电。



朱江(1977-), 男, 湖北荆州人, 重庆邮电大学副教授, 主要研究方向为认知无线电。