

7-2-2020

Evolutionary Game-based Spectrum Sharing Scheme in Cognitive Radio Network

Huanhuan He

1. School of Computer Science and Engineering, Northeastern University, Shenyang 110004, China;;

Xingwei Wang

1. School of Computer Science and Engineering, Northeastern University, Shenyang 110004, China;;2. College of Software, Northeastern University, Shenyang 110004, China;;

Huang Min

3. School of Information Science and Engineering, Northeastern University, Shenyang 110004, China;

Follow this and additional works at: <https://dc-china-simulation.researchcommons.org/journal>



Part of the [Artificial Intelligence and Robotics Commons](#), [Computer Engineering Commons](#), [Numerical Analysis and Scientific Computing Commons](#), [Operations Research](#), [Systems Engineering and Industrial Engineering Commons](#), and the [Systems Science Commons](#)

This Paper is brought to you for free and open access by Journal of System Simulation. It has been accepted for inclusion in Journal of System Simulation by an authorized editor of Journal of System Simulation.

Evolutionary Game-based Spectrum Sharing Scheme in Cognitive Radio Network

Abstract

Abstract: In order to solve the waste of resources caused by the static spectrum allocation policy, cognitive radio technology can be used to dynamically and efficiently manage spectrum, and spectrum sharing becomes the key issue. To make secondary users to share spectrum fairly, *an evolutionary game-based spectrum sharing scheme in cognitive radio network was proposed*. Because cognitive radio network was dynamic and heterogeneous, the wireless channel was unreliable and affected by environment easily, *the knowledge of fuzzy mathematics was introduced to characterize the parameters related to the secondary user satisfaction degree, and the Gas Brownian Motion Optimization algorithm was used to solve the problem of spectrum access of secondary users. The fairness of spectrum sharing was considered in utility function, and the dynamic equilibrium was solved according to replicator dynamic model*. Simulation results show that secondary users can get high utilities under the proposed scheme.

Keywords

cognitive radio network, evolutionary game, spectrum sharing, Gas Brownian Motion Optimization algorithm, replicator dynamic model

Recommended Citation

He Huanhuan, Wang Xingwei, Huang Min. Evolutionary Game-based Spectrum Sharing Scheme in Cognitive Radio Network[J]. Journal of System Simulation, 2016, 28(3): 756-763.

认知无线网络的一种演化博弈频谱共享机制

贺欢欢¹, 王兴伟^{1,2}, 黄敏³

(1. 东北大学计算机科学与工程学院, 沈阳 110004; 2. 东北大学软件学院, 沈阳 110004; 3. 东北大学信息科学与工程学院, 沈阳 110004)

摘要: 为解决静态频谱分配策略导致资源浪费问题, 采用认知无线电技术动态管理频谱, 其中频谱共享是关键。为了使认知用户能够公平共享频谱, 提出了一种认知无线网络中的基于演化博弈的频谱共享机制。由于认知无线网络具有动态、异构的特点, 且无线信道不可靠、易受环境影响, 因此采用模糊数学知识刻画与认知用户满意度相关的参数, 利用气体布朗运动优化算法解决认知用户的频谱接入问题, 利用演化博弈对认知用户之间的频谱共享建模。效用函数充分考虑频谱共享公平, 按照模仿者动态模型求解动态均衡。仿真结果表明, 该机制中认知用户能够获得更高效用。

关键词: 认知无线网络; 演化博弈; 频谱共享; 气体布朗运动优化算法; 模仿者动态模型

中图分类号: TP393

文献标识码: A

文章编号: 1004-731X (2016) 03-0756-08

Evolutionary Game-based Spectrum Sharing Scheme in Cognitive Radio Network

He Huanhuan¹, Wang Xingwei^{1,2}, Huang Min³

(1. School of Computer Science and Engineering, Northeastern University, Shenyang 110004, China; 2. College of Software, Northeastern University, Shenyang 110004, China; 3. School of Information Science and Engineering, Northeastern University, Shenyang 110004, China)

Abstract: In order to solve the waste of resources caused by the static spectrum allocation policy, cognitive radio technology can be used to dynamically and efficiently manage spectrum, and spectrum sharing becomes the key issue. To make secondary users to share spectrum fairly, an evolutionary game-based spectrum sharing scheme in cognitive radio network was proposed. Because cognitive radio network was dynamic and heterogeneous, the wireless channel was unreliable and affected by environment easily, the knowledge of fuzzy mathematics was introduced to characterize the parameters related to the secondary user satisfaction degree, and the Gas Brownian Motion Optimization algorithm was used to solve the problem of spectrum access of secondary users. The fairness of spectrum sharing was considered in utility function, and the dynamic equilibrium was solved according to replicator dynamic model. Simulation results show that secondary users can get high utilities under the proposed scheme.

Keywords: cognitive radio network; evolutionary game; spectrum sharing; Gas Brownian Motion Optimization algorithm; replicator dynamic model

引言

随着无线通信技术的迅速发展, 无线设备的普

及和新业务的不断增长, 频谱利用率低等问题变得日益严重, 因此无线通信系统在推动经济和社会发展时受到了频谱资源约束的问题, 固定可用的频谱资源无法满足用户的通信要求^[1]。引起频谱资源紧缺的主要原因是灵活的固定频谱分配策略, 从而浪费了大量频谱资源。在这种背景下, 认知无线电技术已经成为解决上述频谱利用率低的关键技术之一^[2], 这种技术不需要增加新频段, 能够利用空



收稿日期: 2014-09-16 修回日期: 2014-10-24;
基金项目: 国家自然科学基金(61572123); 国家杰出青年科学基金(61225012, 71325002); 高等学校博士学科点专项科研基金优先发展领域资助课题(20120042130003); 辽宁省百千万人才工程项目(2013921068); 教育部—中国移动科研基金(MCM20130391);
作者简介: 贺欢欢(1991-), 女, 河南郑州, 硕士生, 研究方向为移动社交网络, 认知无线网络。

<http://www.china-simulation.com>

闲的频谱,并向认知用户开放。认知用户可以在对主用户没有引起任何干扰的前提下机会式地使用这些频谱,从而提高性能。在动态频谱管理中,频谱共享是主要研究问题之一。由于多个认知用户同时尝试接入可用的频谱资源,所以认知无线网络应该能够采取分配和接入策略,以避免多个认知用户在使用这部分频谱上发生冲突。

认知无线电技术是认知无线网络的关键实现技术,具有以机会式共享频谱的能力。认知能力和可重构性是认知无线电的 2 个主要特征^[3-4]。认知无线电技术能够给经济、社会带来很大作用,引起了国内外研究热潮。IEEE 802 委员会成立了 IEEE 802.22 工作小组,该小组致力于制定无线区域网的标准,主要研究通过认知无线电技术,把分配给电视广播的频段作为无线宽带接入的共享频段。美国加州大学伯克利分校的 2 个研究小组^[5]:一个小组是无线研究中心,主要研究认知无线网络物理层的设计与实现;另一个是无线基础组,主要研究认知无线网络中实现物理层的一些限制问题。美国维吉利亚理工大学的两个研究小组^[6]:移动和便携无线电研究小组,主要利用博弈论研究资源管理问题;无线通信中心,利用智能优化算法研究认知模型。

对于频谱管理,国内外专家研究了博弈论在动态频谱管理中的应用。文献[7]讨论了非合作博弈,经济博弈,合作博弈以及随机博弈在认知无线网络中的应用。文献[8]提出使用用户效用的转移函数来减轻认知用户的欺诈行为多种机制。文献[9]考虑了多个主用户和认知用户交易频谱的问题。文献[10]提出了一种促进多频谱共享的策略。文献[11]通过建立认知用户同时接入多个主用户没有使用的频谱、把拥塞程度考虑到目标函数中的干扰感知频谱接入博弈模型,从而研究了非合作频谱接入博弈。

为了使认知用户能够根据认知用户满意度和无线信道质量公平地进行频谱共享,本文设计了一种基于演化博弈的频谱共享机制。该机制采用模糊数学知识刻画与认知用户满意度相关的参数。利用

演化博弈对认知用户之间的频谱共享建模,效用函数充分考虑频谱共享公平,根据模仿者动态模型求解动态均衡,最后给出了该机制的详细实现步骤。基于 VC++ 平台仿真实现了动态频谱管理机制,并进行性能评价,结果表明,该机制可行且有效。

1 问题描述

1.1 网络模型

假设认知用户经过分布式协作频谱感知形成了 Y 个稳定的群组, $N^{(y)}$ 表示群组 Y 中的认知用户总数。按照本文提出的演化博弈频谱共享机制, Y 个群组中的所有认知用户都能够公平地进行频谱共享,得到频谱使用权。

1.2 认知用户满意度

认知用户满意度即在频谱共享时,认知用户对主用户为其提供的服务进行的一种评价。本文采用 QoS 满意度来衡量认知用户满意度。根据 ITU E.800^[12], QoS 属性分为非功能属性和功能属性。本文考虑的非功能属性是频带预期的空闲时间、选择同一主用户的认知用户总数和主用户的信誉;功能属性是带宽、延迟、延迟抖动和出错率。

1.2.1 非功能属性的 QoS 满意度

综合评判有 3 个要素:因素集、判断集和单因素判断。先给出 3 个要素的描述,然后求出 QoS 满意度。

认知用户 i 对主用户 j 的评价因素集 $U_j^i = \{u_{j1}^i, u_{j2}^i, u_{j3}^i\}$, 其元素分别表示频带 jr 预期的空闲时间、选择该主用户的认知用户总数、主用户的信誉。

认知用户 i 对主用户 j 的判断集 $V_j^i = \{v_{j1}^i, v_{j2}^i, v_{j3}^i, v_{j4}^i\}$, 其元素分别表示很欢迎、比较欢迎、不太欢迎、不欢迎。

认知用户 i 对主用户 j 的单因素判断:即对单个因素 u_{jk}^i ($k=1,2,3$) 的评价,得到判断集 V_j^i 上的模糊集 $(r_{jk1}^i, r_{jk2}^i, r_{jk3}^i, r_{jk4}^i)$ 。

r_{j1}^i, r_{j2}^i 和 r_{j3}^i 组成了评判矩阵 R_j^i (其中, $\sum_{k=1}^4 r_{jk}^i = 1$):

$$R_j^i = \begin{bmatrix} r_{j11}^i, r_{j12}^i, r_{j13}^i, r_{j14}^i \\ r_{j21}^i, r_{j22}^i, r_{j23}^i, r_{j24}^i \\ r_{j31}^i, r_{j32}^i, r_{j33}^i, r_{j34}^i \end{bmatrix} \quad (1)$$

权重集合 $A_j^i = (a_{j1}^i, a_{j2}^i, a_{j3}^i)$ 由于各评价因素的地位不一定相等, 需要对各因素加权。

根据评判矩阵 R_j^i 和权重集 A_j^i , 得出认知用户 i 对主用户 j 的综合评判值为 B_j^i , 如式(2)所示

$$B_j^i = A_j^i \circ R_j^i = (\phi_{j1}^i, \phi_{j2}^i, \phi_{j3}^i, \phi_{j4}^i) \quad (2)$$

根据最大隶属度原则, 把 $\max \phi_{jl}^i (l=1, 2, 3, 4)$ 对应的值作为最终的评判值 Sa_{ij}^{nf} :

$$Sa_{ij}^{nf} = \max \phi_{jl}^i \quad (3)$$

1.2.2 功能属性的 QoS 满意度

根据 F 模式识别原则, 建立 F 集隶属函数, 从而确定带宽、延迟、延迟抖动和出错率的等级, 然后根据上述的等级计算出功能属性的 QoS 满意度。

若认知用户 j 从主用户 t 能够获得 ATS_k 类型应用的 QoS $\langle bw_{ij}^k, dl_{ij}^k, jt_{ij}^k, er_{ij}^k \rangle$, 则带宽隶属函数计算如下, 而延迟隶属函数、延迟抖动隶属函数和出错率隶属函数的计算采用类似方法。

将 b_{ij}^k 分为 3 个级别: 小、中、大, 分别对应 3 个模糊集 $b_{ij1}^k(x)$, $b_{ij2}^k(x)$ 和 $b_{ij3}^k(x)$ 。用 b_{ij}^k 和 B_k^L 之差作为 b_{ij}^k 的替代变量。令 $\Delta B = B_k^H - B_k^L$, $B_1 = 0.1\Delta B$, $B_2 = 0.2\Delta B$, $B_3 = 0.3\Delta B$, $B_4 = 0.4\Delta B$, $B_5 = 0.5\Delta B$, $B_6 = 0.6\Delta B$, $B_7 = 0.7\Delta B$, $B_8 = 0.8\Delta B$, $B_9 = 0.9\Delta B$, $B_{10} = \Delta B$ 。带宽隶属函数如式(4)~(6), 如图 1 所示。

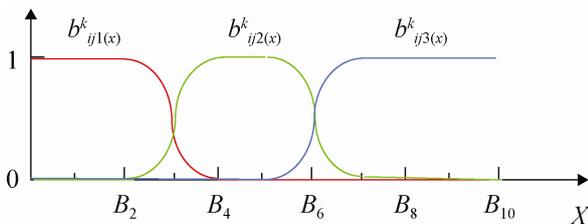


图 1 带宽隶属函数

$$b_{ij1}^k(x) = \begin{cases} 0, x < 0 \\ 1, 0 \leq x < B_2 \\ 1 - 2(x - B_2 / B_3 - B_1)^\alpha, B_2 \leq x < B_3 \\ 2(x - B_4 / B_4 - B_2)^\alpha, B_3 \leq x < B_4 \\ 0, B_4 > x \end{cases} \quad (4)$$

$$b_{ij2}^k(x) = \begin{cases} 0, 0 < x \leq B_2 \\ 2(\frac{x - B_2}{B_3 - B_1})^\alpha, B_2 < x \leq B_3 \\ 1 - 2(\frac{x - B_4}{B_4 - B_2})^\alpha, B_3 < x \leq B_4 \\ 1, B_4 < x \leq B_5 \\ 1 - 2(\frac{x - B_5}{B_6 - B_4})^\alpha, B_5 < x \leq B_6 \\ 2(\frac{x - B_7}{B_7 - B_5})^\alpha, B_6 < x \leq B_7 \\ 0, B_7 < x \end{cases} \quad (5)$$

$$b_{ij3}^k(x) = \begin{cases} 0, x < B_5 \\ 2(\frac{x - B_5}{B_6 - B_4})^\alpha, B_5 \leq x < B_6 \\ 1 - 2(\frac{x - B_7}{B_7 - B_5})^\alpha, B_6 \leq x < B_7 \\ 0, B_7 \leq x \end{cases} \quad (6)$$

根据带宽隶属函数的值, 将带宽划分为 3 个区间: 小带宽区间 bw_1 为 $[0, B_3]$, 中带宽区间 bw_2 为 $[B_3, B_6]$, 高带宽区间 bw_3 为 $[B_6, B_{10}]$ 。

根据最大隶属度原则找出带宽所对应的区间, 从而确定带宽所属等级 $S_1 = bw_1$ 。

延迟隶属函数, 延迟抖动隶属函数, 出错率隶属函数采用相同方法求出, 得到所属等级。根据表 1 所示的评分方法评分。

表 1 功能属性的 QoS 评分表

带宽	延迟	延迟抖动	出错率	分数
大	小	小	小	3
中	中	中	中	2
小	大	大	大	1

功能属性的 QoS 满意度 Sa_{ij}^f , 如式(7)。

计算认知用户满意度 Sa_{ij} , 如式(8)。

$$Sa_{ij}^f = \sum_{l=1}^4 \omega_l S_l \quad (7)$$

其中: $w_l (l=1,2,3,4)$ 为权重系数, $w_l > 0$ 且 $w_1 + w_2 + w_3 + w_4 = 1$ 。

$$\begin{aligned} Sa_{ij} &= \lambda Sa_{ij}^{nf} + (1-\lambda) Sa_{ij}^f \\ \text{s.t. } 0 &\leq \lambda \leq 1 \end{aligned} \quad (8)$$

1.3 认知用户的频谱接入成本

在认知用户与主用户进行频谱交易的过程中, 主用户随时间周期根据选择自身认知用户的数量对频谱大小和频谱价格进行调整。主用户向认知用户出售频谱的价格, 在数值上与该认知用户购买该主用户频谱的所需成本相等, 即主用户的出售价格决定认知用户的购买成本。

把主用户之间竞争出售频谱资源建模为非合作博弈, 参与者是所有主用户, 策略即主用户向认知用户提供的频谱大小 b_j 和相应的频谱价格 p_j , 则效用函数可定义为式(9)。

$$N_{pj}(\vec{b}(t), \vec{p}(t)) = \Phi(B_j(t) - b_j(t)) + p_j(t) \sum_{y \in A_j} n_j^{(y)*}(t)(\vec{b}(t), \vec{p}(t)) \quad (9)$$

用对数效用函数计算 $\Phi(B_j(t) - b_j(t))$ 如式(10)。

$$f(x) = \eta_1 \log(\eta_2 k_j (B_j(t) - b_j(t))) + p_j(t) \sum_{a_j} n_j^{(a)*}(t)(\vec{b}(t), \vec{p}(t)) \quad (10)$$

对于非合作博弈而言, 当其他参与者策略保持不变时, 纳什均衡解可根据每个参与者的最优反应函数来获得^[13], 即在给定其他用户的策略时, 通过取效用函数的最大值来获取最优反应, 如式(11)。

$$B(b_j(t), p_j(t)) = \arg \max_{b_j(t), p_j(t)} f(x) \quad (11)$$

其中 $\vec{b}(t) = [b_1(t), \dots, b_i(t), \dots, b_M(t)]$ 为主用户提供的频带向量, $\vec{p}(t) = [p_1(t), \dots, p_i(t), \dots, p_M(t)]$ 为主用户提供的价格向量, $d_{ij}^k(x)$ 为 $(\vec{b}(t), \vec{p}(t))$ 的函数: 从

主用户 D_k^L 购买频带的认知用户数量。 $\vec{b}_{-j}(t)$ $\vec{p}_{-j}(t)$ 为除主用户 j 外的所有主用户的频谱大小和价格向量。

为了求出纳什均衡时主用户提供的频谱大小 $b_j(t)$ 和价格 $p_j(t)$, 主用户 j 要获取其他主用户的收益情况; 此外还需知道在该主用户策略下, 不同群组中选择该主用户的总数 $n_j^{(a)*}(\vec{b}(t), \vec{p}(t))$ 。但是, 在实际的无线电认知网路中, 很难获取这些信息, 从而很难获取最优解。于是通过气体布朗运动优化算法^[14]求解。

使用气体布朗运动优化算法描述主用户之间竞争出售频谱的问题, 首先描述两者之间的对应关系。把主用户当成气体分子、系统中认知用户重新选择主用户的数量 N 当成温度 T 、价格 p_j 当成速度 V 、利润评价度 r_j 当成质量 S_2 、该主用户可用的频谱 b_j 当成位置 X 。

气体布朗运动优化算法的详细步骤如下所述:

步骤 1: 初始化 N 、最大迭代次数 MaxNum、算法执行次数 Num、圆映射系数 x 和 y , p_j , b_j 。

步骤 2: 分别按式(12)和(13)计算频谱价格和可用频谱大小, 其中 χ 为价格调整系数。

$$p_j(t+1) = p_j(t) + \chi \sqrt{3kNr_j(t)} \quad (12)$$

$$b_j(t+1) = b_j(t) + \alpha p_j(t) \quad (13)$$

步骤 3: 计算该主用户的利润 $f(x)$, 如果大于目前的最大值 $f(x_0)$, 则用 $f(x)$ 替换 $f(x_0)$, 并记下 p_j 和 b_j 。

步骤 4: 更新可用频谱大小(紊动)。利用圆映射(混沌序列产生器)表示紊动, 具体表达如式(14)。

$$b_j(t+1) = b_j(t) + x - \left(\frac{y}{2\pi}\right) \sin(2\pi b_j(t)) \bmod(1) \quad (14)$$

步骤 5: 更新利润评价度。

$$r_i(t) = [\text{fit}_i(t) - \text{worst}(t)] / [\text{best}(t) - \text{worst}(t)]$$

$$\text{s.t. } \text{worst}(t) = \min_{i \in \{1, \dots, N\}} \text{fit}_i(t) \quad (15)$$

$$\text{best}(t) = \max_{i \in \{1, \dots, N\}} \text{fit}_i(t)$$

步骤 6: 按式(16)更新向该主用户购买频谱的

认知用户数, Num=Num + 1。

$$N = N - \left(\frac{1}{\text{mean}_{i \in \{1, 2, \dots, N\}}(\text{fit}_i(t))} \right) \quad (16)$$

步骤 7: 当 $N = 0$ 或 $\text{Num} \geq \text{MaxNum}$, 输出 p_i 和 b_i ; 否则, 重复执行步骤 2~6。

1.4 效用函数

在认知用户进行频谱共享时, 考虑到频谱共享公平, 认知用户租借主用户可用频谱的能力跟自身的利润与成本之比成比例关系。效用函数如下:

$$\zeta_j^{(y)}(t) = Sa^y \frac{H(b_j(t)) - \varphi(b_j(t))}{\varphi(b_j(t))} = Sa^y \frac{\mu_1 \log(\mu_2 \frac{k_j b_j(t)}{\sum_{y \in A_j(t)} n_j^{(y)}(t)}) - c_j(t)}{c_j(t)} \quad (17)$$

其中: $\zeta_j^{(y)}(t)$ 为 t 时刻, 群组 y 中选择主用户 j 的认知用户获得的效用; $n_j^{(y)}(t)$ 为 t 时刻, 群组 y 中选择主用户 j 的认知用户数; $A_j(t)$ 为 t 时刻, 选择主用户 j 的群组集合; $c_j(t)$ 为 t 时刻, 每一个认知用户接入主用户 j 的接入成本, k_j 为认知用户对主用户 j 的频谱利用率。

对于高斯信道下的 k_j , 可以通过式(18)计算:

$$k_j = \log 2(1 + K\gamma_j) \quad (18)$$

其中: $K = 1.5 / (\ln 0.2 / \text{BER}^{\text{tar}})$; BER^{tar} 表示认知用户的目标比特错误概率。

若认知用户改变了频谱选择策略, 则称认知用户进行了演化; 认知用户的博弈均衡解就是演化稳定均衡策略, 即: 群组中选择不同策略的认知用户的数量不再发生变化。

1.5 模仿者动态方程

认知用户之间的频谱共享过程是一个动态过程, 可以利用模仿者动态来描述该过程。在动态演化博弈过程中, 群组内具有好策略的认知用户会被其他认知用户通过不断学习来重复。认知用户策略随着时间变化的过程可以用一组微分方程来表示, 也称为模仿者动态方程。模仿者动态方程能够描绘

出群组内认知用户购买频谱策略时的动态轨迹。

设 $n_j^{(y)}(t)$ 为 t 时刻群组 y 中选择主用户 j 的认知用户数, 则群组 y 中的认知用户总数如式(19)。

$$N^{(y)} = \sum_{j=1}^M n_j^{(y)}(t) \quad (19)$$

群组 y 中的认知用户从主用户 j 购买频谱的比例 $x_j^{(y)}(t)$ 如式(20)。

$$x_j^{(y)}(t) = n_j^{(y)}(t) / N^{(y)} \quad (20)$$

群组 y 的状态可用向量 $\vec{X}^{(y)}(t)$ 如式(21)。

$$\vec{X}^{(y)}(t) = [x_1^y(t), L, x_i^y(t), L, x_M^y(t)] \quad (21)$$

s.t. $x_j^y(t) \in [0, 1], \sum_{j=1}^M x_j(t) = 1$

根据以上的表述, 模仿者动态方程如式(22)。

$$\frac{\partial x_j^{(y)}(t)}{\partial t} = \delta x_j^{(y)}(t) (\zeta_j^{(y)}(t) - \bar{\zeta}^{(y)}(t)) = \delta x_j^{(y)}(t) \left(Sa^y \frac{\mu_1 \log(\mu_2 \frac{k_j b_j(t)}{\sum_{y \in A_j(t)} n_j^{(y)}(t)}) - c_j(t)}{c_j(t)} - \sum_{j=1}^M x_j^y(t) \frac{\mu_1 \log(\mu_2 \frac{k_j b_j(t)}{\sum_{y \in A_j(t)} n_j^{(y)}(t)}) - c_j(t)}{c_j(t)} \right) \quad (22)$$

其中: δ 为认知用户选择频谱的变化速度; $\bar{\zeta}^{(y)}(t)$ 是群组 y 内的平均效用。

演化均衡解定义为复制者动态曲线上稳定不动的点。当群组中的认知用户随时间周期地进行演化, 它将会收敛于演化均衡解。在这个演化均衡上, 没有一个认知用户愿意改变选择策略, 因为它的效用等于它所属群组的平均效用。演化均衡解可通过求解式(23)得出。

$$\frac{\partial x_j^{(y)}(t)}{\partial t} = 0 \quad (23)$$

2 算法设计

群组演化共享机制的主要思想: 认知用户首先要对主用户进行 QoS 满意度计算; 获取目前选择

主用户能够提供的频谱大小以及价格信息; 认知用户按效用函数计算自身效用; 比较自身效用与所在群组的平均效用, 若低于平均效用, 则认知用户改变当前策略, 也就是认知用户进行演化; 认知用户按照模仿者动态模型进行演化, 直到群组内的所有认知用户都达到演化均衡。

群组演化共享机制的具体步骤如下所述:

步骤 1: 初始化主用户总数 M 、群组数量 y 、群组中认知用户总数 $N^{(y)}$ 、主用户空闲带宽等参数。

步骤 2: 所有认知用户分别随机选择一个主用户, 获得了一定的可用频谱和该频谱的价格。

步骤 3: 所有认知用户根据自己的策略, 按照效用公式计算自己的效用 $\zeta_j^{(a,s)}$, 并将计算出的效用发送给联盟头结点。

步骤 4: 联盟头结点按照式(24)计算群组平均效用, 然后将平均效用广播给所有认知用户。

$$\bar{\zeta}^{(y)}(t) = \frac{\sum_{j=1}^M \sum_s x_j^{(y)}(t) g_m^{(y)}(t) \zeta_j^{(y,s)}(t)}{N^{(y)}(t)} \quad (24)$$

步骤 5: 如果所有认知用户的效用都等于群组平均效用, 转步骤 7; 否则, 效用低于群组平均效用的认知用户向其他认知用户学习, 并复制它们的策略。

步骤 6: 效用低于群组平均效用的认知用户进一步演化, 即以概率 $(\bar{\zeta}^{(a)}(t) - \zeta_i^{(a,s)}(t)) / \bar{\zeta}^{(a)}(t)$ 向其他主用户(这些主用户需要满足以下条件: $\zeta_j^{(a,s)}(t) > \zeta_j^{(a,s)}(t) j \neq j'$), 转步骤 3。

步骤 7: 群组已达到演化均衡, 输出 $x_j^{(y,s)}$, 演化结束。

演化均衡能够确保群组内的每一个认知用户都获得相等的效用: $\pi_i^{(a,s)}(t) = \bar{\pi}^{(a)}(t)$, 这样就满足了频谱共享公平。

3 仿真实现与性能评价

演化博弈频谱共享机制用 C/C++ 语言^[15]与 MATLAB 语言^[16]混合编写实现, 在 Windows 7 平台下调试运行。

3.1 基于演化博弈的频谱共享机制参数设置

为了完成频谱共享机制仿真, 设置如下参数。每个主用户最大可用的频谱带宽 $B = 20$ MHz, 目标误码率 BER 为 10^{-4} ; 主接收机和认知接收机的平均信噪比设为 $\alpha_1 = \alpha_2 = 7.5$ dB; 每一个认知用户的效用函数中的 $u_1 = 2$, $u_2 = 50$, 每一个主用户的效用函数中的 $\eta_1 = 5$, $\eta_2 = 100$; 对于每一个认知用户来说, 改变频谱选择的速度为 $\delta_i = 10$; 初始提供的频谱大小和价格分别是: $b_i(0) = 8$ MHz 和 $p_i(0) = 3$; 调整频谱价格的系数 $\chi_j = 10$ 。

计算认知用户满意度时, 认知用户对主用户的评判集按表 2 设置。

表 2 评判集取值

等级	很欢迎	比较欢迎	不太欢迎	不欢迎
取值	1	0.7	0.3	0

3.2 基于演化博弈的频谱共享机制性能评价

把本文提出的演化博弈频谱共享机制作为机制 1、文献[17]提出的一种基于拍卖的动态在线频谱共享机制作为机制 2。取两个群组进行分析, 且 2 个群组内的认知用户数 $N^{(1)} = N^{(2)} = 9$ 。对机制 1 和 2 进行仿真对比。

(1) 频谱价格和频谱大小

数值上, 把认知用户接入成本等同于主用户出售频谱的频谱价格。为了讨论认知用户选择主用户过程中, 认知用户数量对频谱价格和频谱大小的影响。假设群组 2 中的认知用户数不变, 群组 1 中的认知用户从 1 增加到 9。认知用户数量对频谱价格的影响如图 2, 对频谱大小的影响如图 3。

从图 2 可以看出, 随着群组 1 中的认知用户数量增加, 两个主用户的频谱价格也不断上升, 而且主用户 2 的上升速度大于主用户 1 的。这是因为越来越多的认知用户选择主用户, 主用户为了获得更大的效用, 从而提高频谱价格; 群组 1 中对主用户 2 的满意度大于主用户 1 的认知用户占大部分, 而且刚开始的时候, 主用户 1 的频谱价格比主用户 2 的频谱价格高, 所以认知用户为了获得更大的效

用,更多的认知用户会倾向于选择主用户2,从而导致主用户2的频谱价格上升速度比主用户1快。

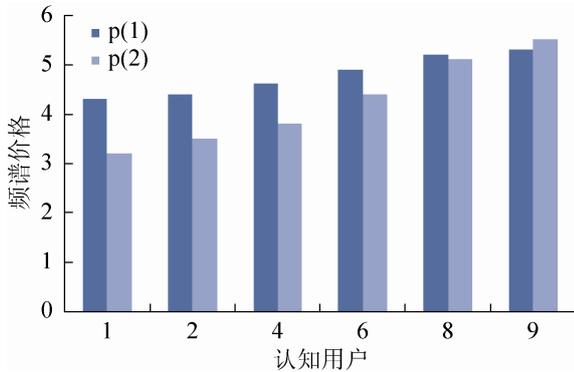


图2 认知用户对频谱价格的影响

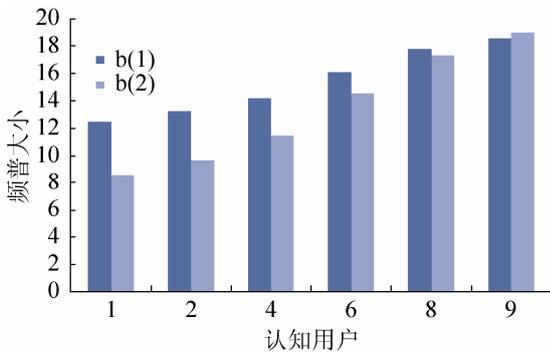


图3 认知用户对频谱大小的影响

从图3可以看出,随着群组1中的认知用户数量增加,两个主用户的频谱大小也不断上升,而且主用户2的上升速度大于主用户1的。这是因为随着认知用户增加,主用户拥有越来越多的买者,为了获取更大的效用,在可用频谱范围内,主用户应该增大提供的频谱大小,也就是保证一定的信道质量,从而能够吸引住认知用户。群组1中对主用户2的满意度大于主用户1的认知用户占大部分,而且刚开始的时候,主用户1的频谱价格比主用户2的频谱价格高,所以认知用户为了获得更大的效用,更多的认知用户会倾向于选择主用户2,从而导致主用户2的频谱价格上升速度比1快。

(2) 演化效用

演化均衡之后,所有认知用户的平均效用称为演化效用。除了认知用户数量之外,在两个主用户

提供的频谱大小都是15 MHz,认知用户数分别为2, 4, 8, 12, 16, 18的情况下,对比机制1和机制2的演化效用如图4。

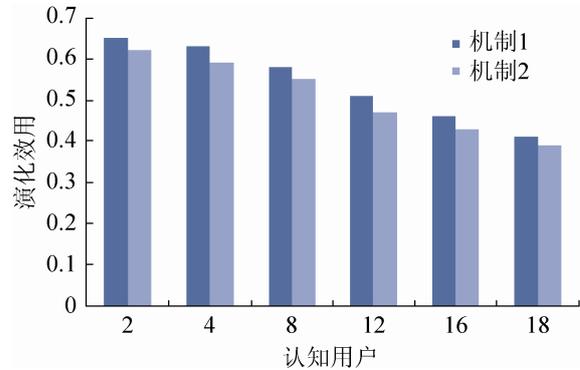


图4 演化效用随认知用户数量变化的情况

从图4看出,随着认知用户数量增加,机制1机制2演化效用不断下降,但机制1用高于机制2。这是因为,随着认知用户数量增加,越来越多的认知用户竞争使用频谱资源,但是频谱资源是有限的,因此每个认知用户获得的效用会下降。由于机制1用演化博弈建模,以群组内每个认知用户的效用等于群组平均效用作为演化均衡解,而机制2追求个体效用最大化,因此机制1性能比机制2好。

4 结论

本文引入博弈论相关知识,设计并仿真实现了一种演化博弈频谱共享机制。通过气体布朗运动智能优化算法,解决了主用户之间的频谱价格竞争问题。通过演化博弈,根据认知用户满意度与接入成本、无线信道情况来构造效用函数,再根据模仿者动态方程,使群组内的认知用户通过学习不断演化,直到达到演化均衡,从而能够公平有效地共享频谱。

参考文献:

- [1] Reed J H. Spectrum Access Technologies: The Past, the Present, and the Future [J]. Proceedings of the IEEE (S0018-9219), 2012, 100: 1676-1684.
- [2] Beibei Wang, K J Ray Liu. Advances in Cognitive Radio

- Networks: A Survey [J]. IEEE Journal Of Selected Topics In Signal Processing (S1932-4553), 2011, 5(1): 5-23.
- [3] 谢小民, 王兴伟, 温占考, 等. 一种面向认知网络的 QoS路由协议[J]. 计算机学报, 2013, 36(9): 1807-1815.
- [4] 曲大鹏, 王兴伟, 黄敏. 移动对等网络中的感知蚁群路由算法 [J]. 计算机学报, 2013, 36(7): 1456-1464.
- [5] 加州大学伯克利分校. 无线研究中心与无线基础组 [EB/OL]. (2013-10-01) [2014-09-16]. <http://bwrc.eecs.berkeley.edu/>.
- [6] 维吉利亚理工大学. 移动和便携无线电研究小组与无线通信中心 [EB/OL]. (2013-11-05) [2014-09-16]. <http://www.mprg.org/>.
- [7] Beibei Wang, Yongle Wu, K J Ray Liu. Game theory for cognitive radio networks: An overview [J]. Computer Networks (S1389-1286), 2010, 54(14): 2537-2561.
- [8] Y Wu, B Wang, K Liu, et al. Repeated open spectrum sharing game with cheat-proof strategies [J]. IEEE Transactions on Wireless Communications (S1536-1276), 2009, 8(4): 1922-1933.
- [9] Niyato D, Hossain E, Zhu Han. Dynamics of Multiple-Seller and Multiple-Buyer Spectrum Trading in Cognitive Radio Networks: A Game-Theoretic Modeling Approach [J]. IEEE Transactions on Mobile Computing (S1536-1233), 2009, 8(8): 1009-1022.
- [10] Peha J M. Sharing Spectrum Through Spectrum Policy Reform and Cognitive Radio [J]. IEEE Proceedings (S0018-9219), 2009, 97(4): 708-719.
- [11] Jocelyne Elias, Fabio Martignon, Antonio Capone, et al. Non-cooperative spectrum access in cognitive radio networks: A game theoretical model [J]. Computer Networks (S1389-1286), 2011, 55(17): 3832-3846.
- [12] ITU-T Rec. E.800. Terms and definitions related to quality of service and network performance including dependability [S]. 2008.
- [13] 范如国. 博弈论 [M]. 武汉: 武汉大学出版社, 2011.
- [14] Marjan Abdechiri, Mohammad Reza Meybodi, Helena Bahrami. Gases Brownian Motion Optimization: an Algorithm for Optimization [J]. Applied Soft Computing (S1568-4946), 2013, 13(5): 2932-2946.
- [15] 普拉达. C++ Primer Plus [M]. 北京: 人民邮电出版社, 2012.
- [16] 刘维. 精通MATLAB与C/C++混合程序设计 [M]. 北京: 北京航空航天大学出版社, 2008.
- [17] Shabnam Sodagari, Alireza Attar, Sven G Bil'en. On a Truthful Mechanism for Expiring Spectrum Sharing in Cognitive Radio Networks [J]. IEEE Journal on Selected Areas in Communications (S0733-8716), 2011, 29(4): 856-865.

(上接第 755 页)

- [10] Nabil Naas, Burak Kantarci, Hussein T. Mouftah. Greening the Multi-Granular Optical Transport Network Design under the Optical Reach Constraint [C]// 2012 IEEE Symposium on Computers and Communications. Cappadocia, Turkey. USA: IEEE, 2012: 177-182.
- [11] Palash Dey, Arkadeep Kundu, Mrinal K Naskar, et al. Dynamic multipath bandwidth provisioning with jitter, throughput, SLA constraints in MPLS over WDM Network [C]// International Conference on Distributed Computing and Networking, Kolkata, India. Germany: Springer, 2010: 376-391.
- [12] Wang Xingwei, Hou Weigang, Guo Lei, et al. Energy saving and cost reduction in multi-granularity green optical networks [J]. Computer Networks (S1389-1286), 2011, 55(3): 676-688.
- [13] 谢希仁. 计算机网络 [M]. 5 版. 北京: 电子工业出版社, 2008.
- [14] 雷光炜, 张金宏, 王兴伟, 等. 一种多粒度传送网中的能量感知自适应疏导机制 [J]. 中国科技论文(电子信息卷), 2014, 9(4): 393-399.
- [15] Ming Xia, Massimo Tornatore, Yi Zhang. Greening the optical backbone network a Traffic engineering approach [C]// 2010 IEEE International Conference on Communications. Cape Town, South Africa. USA: IEEE, 2010: 1-5.