

文章编号:1671-6833(2014)04-0092-04

# 基于用户需求和进化博弈的认知无线网络选择

杜 白

(西安电子科技大学 综合业务网国家重点实验室, 陕西 西安 710126)

**摘 要:**研究了在认知无线电环境中联合考虑定价和用户 QoS 需求的网络选择问题,为了让用户选择合适的接入方式从而使整个网络的收益达到最大,使用了进化博弈论对整个网络进行建模,并综合考虑了用户特定的服务质量(QoS)需求,提出了一个基于定价和用户需求的进化博弈方案来决定用户的最佳接入网络.从仿真结果可以看出,提出的算法可以适应认知无线电环境中的网络选择场景的特点,并且可以在更加真实场景中得到更好的性能.

**关键词:**认知无线电; QoS 需求; 进化博弈; 模仿者动态; 网络选择;

**中图分类号:** TN925.93 **文献标志码:** A **doi:**10.3969/j.issn.1671-6833.2014.04.022

## 0 引言

在认知无线网络中,用户分为主用户和次级用户,其中主用户可以得到保证质量的服务,但是次级用户只有在主用户空闲时才能使用网络的资源,服务质量无法得到保证.当用户可以自主选择成为主用户或者次级用户时,网络选择问题就出现了.ABC(Always Best Connected)在异构网络场景中是个很有名的概念,而网络选择是其中一个关键性问题<sup>[1]</sup>.在异构网络选择研究中常用的各种数学建模方法有很多,其中进化博弈论已经是网络选择中一种常用的数学工具<sup>[2-5]</sup>.

龙彦等<sup>[6]</sup>设计了一种基于中继的认知无线电无线资源分配方案,其中综合考虑了中继和功率分配问题,最后使整个网络的效益达到最大. Elias<sup>[7]</sup>等使用进化博弈提出了基于定价的认知无线电中的网络选择算法.但文献<sup>[7]</sup>中网络服务速率的定义为单位时间服务的用户数,这种定义和实际网络中使用的不同,因为实际网络中每个用户需要被服务的数据量都不一样.此外,在这篇文章中作者没有考虑到每个用户自己的带宽需求.在本文中,笔者综合考虑了用户需求和网络收益,并使用更加现实的网络服务速率定义方式来

扩展 Elias 等<sup>[7]</sup>提出的网络选择算法.在考虑用户的带宽需求时,笔者把带宽需求带来的优先级问题转化为服务速率的变化,得到一个易于计算并且更准确的用户时延,从而使其能够在更现实的场景中正常使用,并且能够得到更好的结果.仿真结果证明了本研究提出的新算法可以使网络获得更大的收益,并且更加适应真实的场景.

## 1 进化博弈论

本章先简单介绍一些进化博弈论的基础概念.关于进化博弈论的具体内容可以在文献<sup>[8]</sup>中找到.

进化博弈论  $G$  包含  $K$  群不同的参与者.在进化博弈论中,每个单独参与者的收益非常小,所以这里以群为单位来研究参与者的收益.在本研究中,认知无线电中的用户就是博弈的参与者.用  $\kappa = \{1, 2, K\}$  来表示群的集合,在这里  $K \geq 1$ .第  $K$  个群中的参与者的数量用  $n^k$  来表示.  $S^k = \{1, 2, s^k\}$  是策略集合,其中  $s^k$  是第  $K$  个群中所有能够选择的策略的集合.

用  $x_n^k$  来表示第  $K$  群中的参与者选择策略  $n$  的比例,其中  $n \in S^k$ .为了后面描述方便,用  $x = \{x_1, x_2, \dots, x^k\}$  来表示整个网络中的策略选择情

收稿日期:2014-03-02;修订日期:2014-06-01

**基金项目:**国家自然科学基金资助项目(91338115; 61231008); 国家科技重大专项(2011ZX03005-004, 2011ZX03004-003; 2013ZX03004007-003; 2011ZX03005-003); 陕西省 13115 科技创新工程(2010ZDKG-26); 国家重点实验室基金(ISN1002005, ISN090305)

**通信简介:**杜白(1986-),男,河南郑州人,博士研究生,主要从事自组织网络、无线网络和网络选择研究, E-mail: du198614@163.com.

况,集合中每个  $x^i = \{x_1^i, x_2^i, \dots, x_{s_i}^i\}$ . 群  $K$  中选择策略  $n$  的参与者的边际支付函数可以表示为  $F_n^k(x)$ , 群  $K$  的总支付函数为  $\sum_{n \in S^k} F_n^k(x) x_n^k$ .

现在介绍一个非常重要的概念:模仿者动态(replicator dynamics)<sup>[7-8]</sup>. 它是用来描述同一个群中参与者的行为和其影响的参数. 已知  $x_n^k$ , 模仿者动态可以表示为如下表达式.

$$\dot{x}_n^k = x_n^k (F_n^k(x) - \frac{1}{n^k} \sum_{n \in S^k} F_n^k(x) x_n^k). \quad (1)$$

式中:  $\dot{x}_n^k$  是  $x_n^k$  时间对的微分.

笔者使用 Wardrop 均衡概念来获得最佳的折中点. Wardrop 均衡定义为: 状态  $x$  达到 Wardrop 均衡时, 对于任意的群  $K \in \kappa$ , 所有的被群  $K$  中使用的策略, 对于每个群  $K$  中的参与者来说, 得到的边际支付函数相同.

## 2 系统建模

使用进化博弈论对整个网络进行建模, 并给出相应的网络选择算法. 认知无线的场景如图 1 所示, 其中包含了主用户基站和次级用户基站, 用户在进入网络时根据自己的需求决定付出一定的代价成为主用户, 还是免费成为次级用户.

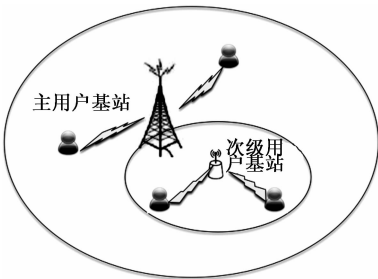


图 1 认知无线网络拓扑图

Fig. 1 Topology of cognitive radio networks

在图 1 的网络场景中, 用户就是参与者, 并且所有的用户属于同一个群, 这就意味着  $K = 1$ . 因此策略集合也就退化成了只有两个策略的集合:  $S = \{s_p, s_s\}$ , 其中  $s_p$  表示用户选择成为主用户, 而  $s_s$  表示用户选择成为次级用户. 在整个网络中选择这两个策略的用户比例  $x_n^k$  也退化成了  $X_p$  和  $X_s$ , 由于是概率分布, 所以  $X_p = 1 - X_s$ .

在这里, 定义支付函数为用户接入网络后的时延和所需支付的代价之和. 为了计算时延, 首先要知道用户的到达速率和网络对于主用户和次级用户的服务速率.

假设用户按泊松过程到达网络, 不同用户的到达间隔相互独立并且具有相同的分布函数, 平

均到达速率为  $\lambda$ . 因此可以得知到达间隔的均值为  $1/\lambda$ . 假设用户到达的时刻每个用户需要传输的数据量已知, 那么数据的平均到达速率为

$$\lambda_d = \lim_{t \rightarrow \infty} \frac{\sum_{alluser} Data}{t}. \quad (2)$$

主用户和次级用户的服务速率分别表示为  $\theta$  和  $\mu$ .

主用户基站设置价格  $p$ , 广播给所有用户, 告知所有用户想成为主用户需要付出的价钱为  $p$ . 而成为次级用户价格为 0. 所以次级用户的支付函数只包含时延. 利用 M|M|1 排队模型可以得到  $F_n(x) = \frac{-1}{\mu - \lambda_d X_s}$ .

但是上面的分析并没有考虑到用户的最小带宽需求, 所以上述的结果是在所有用户有相同的优先级的情况下算出的. 但是如果某个用户的带宽需求高于其它用户, 那么实际网络中, 基站就会给它分配更多的资源, 这就意味着这个用户拥有更高的优先级. 这会影响最终用户的时延. 由于用户的随机出现, 各个用户需求的随机性导致这里准确的时延分析十分困难, 所以笔者考虑用一种近似的方法, 调整上面的时延表达式来得到一个近似的结果.

假设用户的带宽需求  $b$  是随机的, 并且概率密度函数  $f(b)$  已知, 那么可以计算出平均的带宽需求  $\bar{b} = \int f(b) b db$ . 考虑到不同的优先级等价于影响了用户的实际服务速率, 所以本研究考虑调整上述式子中的  $\mu$ . 注意到带宽需求大的用户获得的实际速率高, 但又不会高于网络的服务能力, 基于这个特点, 笔者考虑一个函数满足如下特点:

(1) 如果一个用户带宽需求是  $b_1$ , 那么如果  $b_1 > \bar{b}$ , 那  $g(b_1) > g(\bar{b})$ . 如果  $b_1 < \bar{b}$  那么  $g(b_1) < g(\bar{b})$ ; (2) 当  $b_1$  和  $\bar{b}$  的差距很大时,  $g(b_1)$  和  $g(\bar{b})$  差距不能太大.

基于上述考虑笔者使用  $g = \sqrt{b_1/\bar{b}}$ . 可以算出  $\bar{g} = \int f(b_1) \sqrt{b_1/\bar{b}} db_1$ . 所以原来的支付函数修改为  $F_n(x) = \frac{-1}{\mu \bar{g} - \lambda_d X_s}$ . 因为带宽需求影响了用

户的实际服务速率, 本研究把平均的影响  $\bar{g}$  加到时延的计算当中, 来近似带宽需求的不同对用户在网络中的时延的影响.

使用新的支付函数  $F_n(x)$  代入公式 (1) 可

以得到

$$\dot{X}_s = KX_s \left[ (1 - X_s) \left( \theta^{-1} + p - \frac{1}{\mu g - \lambda_d X_s} \right) \right]. \quad (3)$$

式中:  $K$  是一个常数, 表示一个群中用户改变策略的欲望大小;  $p$  用户成为主用户所需要付给主用户基站的价钱, 由主用户基站决定.

Wardrop 均衡可以在 (2) 的驻点处得到<sup>[8]</sup>, 可以计算出  $\bar{X}_s$  为

$$\bar{X}_s = \frac{\mu g - \frac{1}{\theta^{-1} + p}}{\lambda_d}. \quad (4)$$

网络的总收益  $R$  定义为单位时间内选择成为主用户的所有用户总共支付的价钱:

$$\begin{aligned} R &= pN(1 - \bar{X}_s) = p\lambda T(1 - \bar{X}_s) \\ &= p \left( \lambda_d - \mu g + \frac{1}{\theta^{-1} + p} \right). \end{aligned} \quad (5)$$

在公式 (4) 中  $N$  是网络中的平均用户总数,  $N$  可以由 *little* 定理算出. 由公式 (4), 通过求偏导, 可以得到最大化  $R$  的最优解  $p^*$  为

$$p^* = \sqrt{\frac{\theta^{-1}}{\mu g - \lambda_d}} - \theta^{-1}. \quad (6)$$

3 仿真结果

使用 Matlab 对整个网络进行仿真. 仿真结果说明本研究的算法是稳定且收敛的. 参数设置如下:  $\mu = 60$  Mb/s,  $\theta = 80$  Mb/s,  $\lambda = 10$  user/s,  $k = 1$ . 每个用户需要被服务的数据量为 1 Mb 到 10 Mb 的均匀分布, 带宽需求为 0.5 Mb 到 1 Mb 的均匀分布.

图 2 为次级用户比例, 由图 2 可以看出, 本研究所提出的算法是收敛的, 和价格为 0.1 的情况相比较, 当价格为 0.2 时, 由于价格变高, 更多的用户选择了成为次级用户, 因为成为主用户需要付出更大的代价.

图 3 为网络的收益, 从图 3 可以看出, 价格并不是越高网络的收益就越大. 因为当价格过高之后, 大部分用户都会选择成为次级用户, 一个极端的例子就是价格无穷高, 那么所有的用户都会成为次级用户, 网络的总收益为 0. 这也符合在上一章节中的分析, 需要一个最优的  $p$  来最大化  $R$ . 更重要的是, 从图 3 中可以看出, 考虑了用户的带宽需求可以得到更高的网络收益  $R$ , 这是因为这样建模更加符合实际情况, 所以得到了更好的收益.

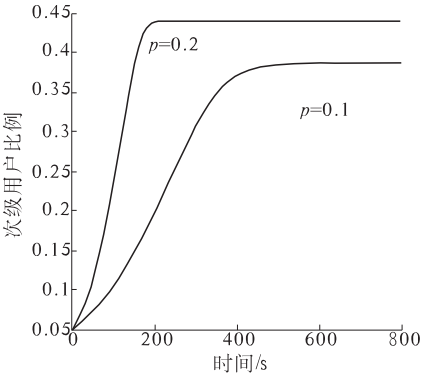


图 2 次级用户比例

Fig. 2 proportion of second users

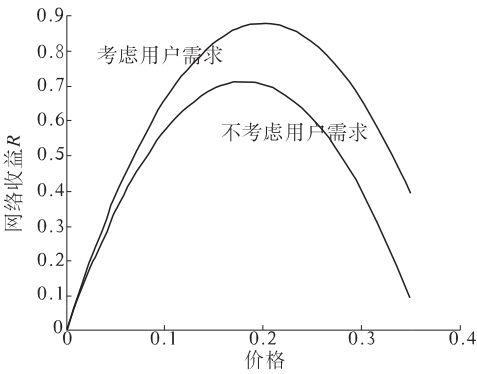


图 3 网络的收益

Fig. 3 network's revenue

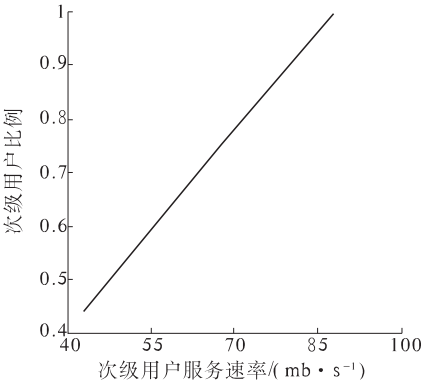


图 4  $X_s$  随服务速率变化的增长情况

Fig. 4 the change of  $X_s$  along with the growth of the service rate

图 4 为  $X_s$  随服务速率变化的增长情况, 显示了当次级用户的服务速率变化是, 最终网络中次级用户的比例的变化情况, 其中次级用户的服务速率从 40 mb/s 增长到 100 mb/s, 从图中可以看出, 当次级用户的服务速率变快时, 越来越多的用户选择成为次级用户, 而当其服务速率超越了主用户的服务速率时, 由于主用户又需要交费, 所以所有的用户全部都选择成为了次级用户.

4 结论

笔者基于对用户 QoS 需求对网络影响的分析,提出了一种更适应实际认知无线电网络的网络选择算法. 算法使用进化博弈论进行系统的建模,最终在用户需求和网络收益这对矛盾的参数之间获得了一个很好的折中点. 仿真结果表明了本研究提出的算法是有效的,并且更加贴近实际网络的情况,可以使网络获得更大的收益. 在下一步工作中,准备更加准确地描述用户需求对网络的影响,希望能够得到一个闭合表达式,来更好地描述整个系统.

参考文献:

[1] GUSTAFSSON E, JONSSON A. Always best connected[J]. Wireless Communications, IEEE, 2003, 10 (1): 49 – 55.

[2] WANG Lu-sheng, KUO Geng-sheng . Mathematical modeling for network selection in heterogeneous wireless networks—a tutorial[J]. Communications Surveys & Tutorials, IEEE, 2013, 15(1): 271 – 292.

[3] NIYATO D, HOSSAIN E. Dynamics of network selection in heterogeneous wireless networks: an Evolution-

ary Game Approach[J]. Vehicular Technology, IEEE Transactions on, 2009, 58(4): 2008 – 2017.

[4] SHSKKOTTAI S, ALTMAN E, KUMAR A. Multihoming of users to access points in WLANs: a population game perspective[J]. Selected Areas in Communications, IEEE Journal on, 2007, 25 (6): 1207 – 1215.

[5] CHEN Lin, IELLAMO S, COUPECHOUX M, et al. An auction framework for spectrum allocation with interference constraint in cognitive radio networks[C]//INFOCOM, 2010 Proceedings IEEE, 2010: 1 – 9.

[6] LONG Yan, LI Hong-yan, YUE Hao, et al. Spectrum utilization maximization in energy limited cooperative cognitive radio networks[C]//IEEE International Conference on Communications (ICC14), Sydney, 2014.

[7] ELIAS J, MARTIGNON F, ALTMAN E. Joint Pricing and Cognitive Radio Network Selection: A game theoretical approach [C]//Modeling and Optimization in Mobile, Ad Hoc and Wireless Networks (WiOpt), 2012 10th International Symposium on. IEEE, 2012: 49 – 53

[8] SANDHOLM W H. Population Games and Evolutionary Dynamics[M]. Massachusetts, MIT press, 2010.

QoS-based Network Selection in Cognitive Radio Networks with Evolutionary Games

DU Bai

(State Key Laboratory of Integrated Services Networks, Xidian University, Xi'an 710126, China)

**Abstract:** This paper addresses the network selection problem in Cognitive Radio Networks(CRNs) based on price and QoS requirements. Evolutionary game is used to model the network selection problem in our paper to choose the best access network for all users to maximize the revenue of the network. Based on our model, our work took some QoS requirements into account and proposed an algorithm based on price and users' Qos requirements. Simulation results show that our algorithm can capture the main factors in network selection in CRNs and obtain a better performance in a more realistic system.

**Key words:** Cognitive Radio Networks(CRNs); QoS requirement; evolutionary game; replicator dynamics; network selection;