

# 基于队列博弈的认知无线电网络信 道定价与选择优化\*

黄丽湾 邹君妮

(上海大学通信与信息工程学院 上海 200072)

**摘要:** 针对基于排队论的授权用户和认知用户频谱租赁问题,引入了异构认知用户概念,建立了一个双寡头垄断市场模型,提出了在 M/M/1 排队模式下的两种异构用户共享式的接入机制,并构建了非合作博弈和合作博弈的两种价格博弈模型,理论分析了多类型用户的频谱选择问题,联合定价机制和信道选择优化两方面,实现了频谱出售方的收益最大化和认知用户的代价最小化。认知用户选择模型最终达到了 Wardrop 均衡,利用凸优化和拉格朗日对偶理论对合作博弈下的优化模型进行了求解,并通过仿真对比了两种博弈模型下优化定价及获得收益的情况。

**关键词:** 异构认知用户;非合作;合作;Wardrop 均衡;拉格朗日对偶

**中图分类号:** TN929.5    **文献标识码:** A    **国家标准学科分类代码:** 510.5015

## Queueing-based spectrum pricing and selection in cognitive radio networks

Huang Liwan Zou Junni

(School of Communication and Information Engineering, Shanghai University, Shanghai 200072, China)

**Abstract:** The issue of spectrum leasing between primary and secondary users combining queueing theory have been studied in cognitive radio. The paper formulate a duopoly model based on sharing access mechanism of M/M/1 queueing model. Considering both pricing and heterogeneous secondary users access selection problem, we analyze the spectrum selection strategy for maximizing the revenue of POs and minimizing the cost of users, and the optimal pricing based on non-cooperative competition and cooperative game is structured. A unique Wardrop equilibrium is reached by heterogeneous secondary users for this spectrum selection. The convex optimization and the Lagrange dual approach is proposed to solve the optimization of cooperative game. The revenue and pricing strategy for both non-cooperative competition and cooperative game are compared via numerical simulations.

**Keywords:** heterogeneous secondary users; non-cooperative; cooperative; Wardrop equilibrium; Lagrange dual

## 1 引言

随着无线通信技术的发展,频谱资源稀缺问题日益突出,在有限频谱资源下提高授权频谱段的利用率迫在眉睫。认知无线电是解决频谱利用率不足有效的技术,该技术允许未授权用户(认知用户)和授权用户进行频谱共享<sup>[1]</sup>,从而大大解决了频谱稀缺问题。动态频谱分配(DSA)技术<sup>[2-3]</sup>是认知无线电技术的核心技术之一,它允许认知用户在不干扰授权用户的情况下接入信道。针对 DSA 技术现有的研究热点在于认知用户接入频谱的方式<sup>[4]</sup>,功率控制问题<sup>[5]</sup>,频谱提供商如何合理定价进行频谱租赁<sup>[6]</sup>等等。

目前已有研究者利用定价机制对频谱租赁问题展开了研究, Yang 等人<sup>[7]</sup>提出了授权用户出售频谱给多个认知用

户,而认知用户通过衡量出售的价格和频谱质量来选择合适的授权用户的模型。Simeone 等人<sup>[8]</sup>考虑了授权用户向认知用户出售频谱,而同时认知用户作为中继协作授权用户传输数据的情况。这些研究往往侧重于一个认知用户接入一个信道,而忽略了多个用户接入同个信道造成延迟的情况。文献<sup>[9]</sup>构造了分别基于机会接入和专门接入方式下两个频谱提供商间价格竞争的模型,并分析了认知用户在 M/G/1 排队机制下的延迟情况。Jagannathan 等人<sup>[10]</sup>通过比较购买专门信道和免费等待授权用户信道的代价,来分析认知用户的最优选择。基于上述文献,本文结合排队论,提出两个频谱提供商通过定价方式来优化收益的市场模型。

另一方面,在现实场景中认知用户对于延迟的敏感程

收稿日期:2016-10

\* 基金项目:国家自然科学基金(61472234,61271211)资助项目

度不一相同,因此异构认知用户的频谱接入研究方案也相继被提出。例如,文献[11]中考虑了优先队列的存在情况,提出了基于 M/G/1 排队方式下主频谱提供商和次级提供商之间竞争用户的模型。Elias 等人<sup>[12]</sup>讨论了认知用户在两种定价方式(同时出价和顺序出价)下选择进入延迟小但价格高的队列还是延迟大但价格低的队列的情况。目前的文献对异构认知用户的概念侧重于对延迟敏感程度不同的类型用户,而本文结合了用户对价格敏感的情况,并把延迟的敏感程度及价格的敏感程度通过延迟和价格的敏感系数进行表示,引入了一个特殊的异构认知用户的概念。但不同于文献[13]讨论在四种异构用户对 WLAN 服务提供商的选择情况,本文考虑两种异构认知用户以共享接入同一频谱的方式,权衡频谱价格和队列延迟参数,着重探讨在两种博弈下的频谱选择情况。

值得注意的是,目前对频谱租赁问题考虑多的是频谱提供商相互竞争同构多认知用户,或者多个同构认知用户竞争一个频谱提供商。只考虑频谱提供商间的非合作博弈可能与实际的频谱租赁市场不符,达不到频谱提供商的共赢局面;而只考虑同构认知用户或仅延迟敏感异构认知用户选择频谱的情况往往显得单一。本文针对认知用户对价格和延迟的敏感不同,进而引入了两种特殊的异构认知用户类型,并提出了基于 M/M/1 排队模型的共享式接入方式,建立了一个基于频谱租赁的双寡头垄断市场模型,在联合考虑定价机制和信道选择两方面后,定义频谱提供商的收益函数和认知用户的效用函数,以此作为优化的目标。并构建了非合作博弈和合作博弈的两种价格博弈模型,提出了认知用户频谱选择完成后达到了一种特殊的 Wardrop 均衡,实现了频谱出售方的收益最大化和认知用户的代价的最小化。随后,在合作博弈模型中,利用凸优化和拉格朗日对偶算法解决了此优化问题。

## 2 系统模型和问题阐述

### 2.1 市场模型

本文研究一个多个认知用户进行频谱购买的双头垄断市场模型,该市场模型由两个频谱提供商(PO)作为信道的出售方,多个有频谱需求的认知用户(SU)作为信道的买方。假设每个 PO 只出售自己的一个可用信道,同时不同的 PO 出售的信道是相同的,诸如它们有相同的带宽和载波频率。频谱提供商  $i \in \{1,2\}$  为认知用户提供信道服务,并以价格  $p_i$  将信道专门出售给认知用户;认知用户观察并分析之后选择合适的 PO 进行数据传输。

### 2.2 队列模型

本文用排队论来分析由于多个认知用户竞争单个信道带来的延迟问题。如图 1 所示,考虑了两种不同类型的认知用户  $j \in \{1,2\}$ ,这两种类型的认知用户对延迟和价格具有不同的敏感程度。用  $\alpha_j$  和  $\gamma_j$  分别来表示延迟敏感系数和价格敏感系数<sup>[13]</sup>(其中  $j \in \{1,2\}$ )。

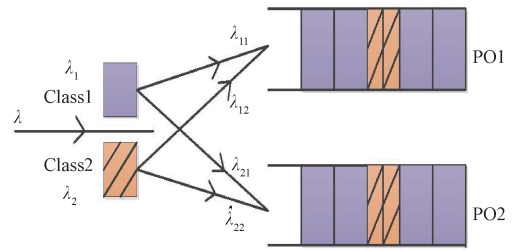


图 1 异构多认知用户队列模型

假设类型  $j$  的认知用户的平均到达率为  $\lambda_j$ ,服务时间服从泊松分布(其中  $\sum \lambda_j = \lambda$ )。无论哪个类型的认知用户到达系统,它需要权衡 PO 的出价情况和选择该 PO 的队列延迟情况来决定选择购买哪个 PO 的频谱。这里考虑一种异构认知用户共享式接入模型,即 PO 对选择它的任一类型的认知用户提供相同的服务,不分优先级;选择同一 PO 的任一类型的认知用户服从先到先接入的排队规则。假定每个 PO 的平均服务时间为  $\mu_i$ ,类型  $j$  的认知用户选择  $PO_i$  的平均到达率为  $\lambda_{ij}$ ,因此选择  $PO_i$  的认知用户的平均到达率为  $\bar{\lambda}_i (\bar{\lambda}_i = \frac{\lambda_{i1} + \lambda_{i2}}{2})$ 。

鉴于每个认知用户都是理性的,独立根据价格和延迟情况选择频谱提供商,这里首先我们用 M/M/1 排队模型来分析队列延迟,即平均排队时间。选择同一 PO 的认知用户的平均排队时间是相等的,用  $T_i(\bar{\lambda}_i)$  表示。基于 Pollaczek-Khinchin 理论,可得:

$$T_i(\bar{\lambda}_i) = \frac{1}{\mu_i - \bar{\lambda}_i} \tag{1}$$

## 3 信道选择和 Wardrop 均衡

### 3.1 认知用户效用函数

每个认知用户接入信道完成服务后都会获得一定的数据传输收益  $R$ ,这是它的收入。认知用户的支出由延迟成本和支付的价格成本组成,这是它的代价。因此选择  $PO_i$ ,类型为  $j$  的认知用户的效用函数定义为传输收益减去支出,表示如下:

$$U_{ij} = R - \alpha_j T_i(\bar{\lambda}_i) - \gamma_j p_i \tag{2}$$

### 3.2 频谱提供商收益

对于每个频谱提供商  $i$  在给认知用户提供信道接入服务之后都会取得一定的收益,这收益是来源于信道的出售。因此,把频谱提供商获得的收益定义为:

$$\pi_i = (\lambda_{i1} + \lambda_{i2}) p_i = 2 \bar{\lambda}_i p_i \tag{3}$$

### 3.3 Wardrop 均衡条件

对异构认知用户排队选择频谱的行为进行分析,如果其中一个频谱提供商提高信道租赁的价格  $p_i$ ,则认知用户更倾向于选择出价低的 PO;而如果选择其中一个频谱提供商的用户过多导致排队等待的延迟更大,则认知用户更倾向于选择延迟小的 PO。综合判断,假设每个认知用户都是

理性的,在进行信道选择之前,它们会权衡价格和延迟情况,即评估自己的效用函数然后选择合适的 PO。当完成信道选择后,没有一个认知用户通过改变自己的行为来增加自己的效用或降低自己的代价,我们说此选择达到了 Wardrop 均衡。

定义 1:对于给定的价格  $(p_1, p_2)$ , 达到 Wardrop 均衡时,认知用户的均衡到达率满足条件:

$$\begin{aligned} \lambda_{ij}(R - \alpha_j T_i(\bar{\lambda}_i) - \gamma_j p_i) &= 0 \\ R - \alpha_j T_i(\bar{\lambda}_i) - \gamma_j p_i &\geq 0 \end{aligned} \quad (4)$$

推论 1 在达到 Wardrop 均衡时,异构多认知用户排队选择模型满足两个均衡条件。

1) 同一类型的认知用户选择不同的频谱提供商所需要的代价是相同的:

$$\begin{aligned} C_{11} = C_{21} \Leftrightarrow \alpha_1 T_1(\bar{\lambda}_1) + \gamma_1 p_1 &= \alpha_1 T_2(\bar{\lambda}_2) + \gamma_1 p_2 C_{12} = \\ C_{22} \Leftrightarrow \alpha_2 T_1(\bar{\lambda}_1) + \gamma_2 p_1 &= \alpha_2 T_2(\bar{\lambda}_2) + \gamma_2 p_2 \end{aligned} \quad (5)$$

2) 认知用户选择频谱提供商 1 的平均代价等于选择频谱提供商 2 的平均代价:

$$\frac{1}{\lambda_1} \sum_j \lambda_{1j} C_{1j} = \frac{1}{\lambda_2} \sum_j \lambda_{2j} C_{2j}, \forall j \in \{1, 2\} \quad (6)$$

## 4 双寡头垄断市场

### 4.1 非合作博弈模型

当两个频谱提供商 PO1 和 PO2 互相竞争出价来最大化自身的收益,建立此类价格竞争为非合作博弈模型。在这非合作博弈模型中,各个 PO 都是自私的只追求自身收益,并假设各个 PO 知道另一 PO 的收益函数。当每个 PO 都不能通过改变其出价策略而获得更好的收益,我们称此博弈模型达到了纳什均衡状态。接下来讨论各个 PO 的均衡策略,即最优价格问题。给定 PO2 的信道单价  $p_2$ , PO1 为最大化自身收益:

$$\begin{aligned} \max_{p_1 \geq 0, \lambda_1} \sum_j \lambda_{1j} p_1 &= 2 \bar{\lambda}_1 p_1 \\ \text{Subject to:} \\ 1) \alpha_1 T_1(\bar{\lambda}_1) + \gamma_1 p_1 &= \alpha_1 T_2(\bar{\lambda}_2) + \gamma_1 p_2, \\ 2) \alpha_2 T_1(\bar{\lambda}_1) + \gamma_2 p_1 &= \alpha_2 T_2(\bar{\lambda}_2) + \gamma_2 p_2, \\ 3) \bar{\lambda}_1 + \bar{\lambda}_2 &= \lambda/2, \\ 4) 0 \leq \bar{\lambda}_1 \leq \mu_1, 0 \leq \bar{\lambda}_2 \leq \mu_2 \end{aligned} \quad (7)$$

由约束条件可知,两个认知用户类型的敏感系数需要符合  $\alpha_1/\gamma_1 = \alpha_2/\gamma_2$ 。利用约束条件将上述问题表述成:

$$\begin{aligned} \max_{\bar{\lambda}_1} 2 \bar{\lambda}_1 (p_2 + \frac{\alpha_1}{\gamma_1} (T_2(\bar{\lambda}_2) - T_1(\bar{\lambda}_1))) \\ \text{s. t. } \bar{\lambda}_1 + \bar{\lambda}_2 &= \lambda/2, \\ 0 \leq \bar{\lambda}_1 \leq \mu_1, 0 \leq \bar{\lambda}_2 \leq \mu_2 \end{aligned} \quad (8)$$

同理,可以得到在给定 PO1 的信道单价  $p_1$  时, PO2 的优化问题为:

$$\max_{\bar{\lambda}_2} 2 \bar{\lambda}_2 (p_1 + \frac{\alpha_1}{\gamma_1} (T_1(\bar{\lambda}_1) - T_2(\bar{\lambda}_2)))$$

$$\begin{aligned} \text{s. t. } \bar{\lambda}_1 + \bar{\lambda}_2 &= \lambda/2, \\ 0 \leq \bar{\lambda}_1 \leq \mu_1, 0 \leq \bar{\lambda}_2 \leq \mu_2 \end{aligned} \quad (9)$$

可以通过对上述目标函数就  $\bar{\lambda}_1$  和  $\bar{\lambda}_2$  求解一阶导数分别得到信道单价  $p_1$ 、 $p_2$  关于  $\bar{\lambda}_1$  和  $\bar{\lambda}_2$  的函数。结合式(5)可知  $p_1 - p_2 = \frac{\alpha_1}{\gamma_1} (T_2(\bar{\lambda}_2) - T_1(\bar{\lambda}_1))$ , 然后利用条件  $\lambda_1 + \lambda_2 = \lambda/2$  由此可得到关于  $\bar{\lambda}_1$  的表达式:

$$g(\bar{\lambda}_1) = (2\bar{\lambda}_1 - \frac{\lambda}{2})(T'_1(\bar{\lambda}_1) + T'_2(\frac{\lambda}{2} - \bar{\lambda}_1)) - T_2(\lambda/2 - \bar{\lambda}_1) + T_1(\bar{\lambda}_1) = 0 \quad (10)$$

根据求根公式可以得到均衡到达率  $\bar{\lambda}_1^*$  和  $\bar{\lambda}_2^* = \frac{\lambda}{2} - \bar{\lambda}_1^*$ 。

定义 2 在式(7)给出的非合作博弈模型中,该博弈过程存在纳什均衡且唯一。

证明:把对非合作博弈中最优价格的求解转化为如式(10)对认知用户到达率的求解,因此我们只要证明式(10)中  $\bar{\lambda}_1$  值存在就可以证明该博弈过程存在纳什均衡。我们验证可得求解  $g(\bar{\lambda}_1)$  的一阶微分方程可以得到驻点,并且  $\partial^2 g(\bar{\lambda}_1)/\partial^2 \bar{\lambda}_1 < 0$ 。最后利用 Wardrop 均衡的第 2 个条件可以得到类型 1 的认知用户选择 PO1 的均衡时的平均到达率  $\lambda_{11}^* = \frac{2 \bar{\lambda}_1^* \lambda_1}{\lambda}$ 。

### 4.2 合作博弈模型

通常,两个提供商之间的恶性竞争会导致出价不高和整体收益收缩,因此两个频谱提供商会改变定价方式。当 PO 之间以合作的方式来参与定价,把它称为合作博弈模型。在合作博弈中,两个频谱提供商作为博弈参与者需要达成有约束的协议。合作的目的是使博弈双方的收益都有所增加,或者至少是一方的收益增加,而另一方的收益不受损害,因而整个社会的收益有所增加<sup>[14]</sup>。这里建立一个以合作互利方式出价的双寡头市场,并阐述在合作模型下频谱提供商的收益情况和认知用户的选择策略。

利用 Wardrop 均衡条件(4),可以知道  $p_1 = \frac{R - \alpha_1 T_1(\bar{\lambda}_1)}{\gamma_1}$  和  $p_2 = \frac{R - \alpha_2 T_2(\bar{\lambda}_2)}{\gamma_2}$ 。因此 PO1 和 PO2 的收益函数分别可以表示为  $\pi_1(\bar{\lambda}_1) = 2 \bar{\lambda}_1 p_1 = 2 \bar{\lambda}_1 \frac{R - \alpha_1 T_1(\bar{\lambda}_1)}{\gamma_1}$  和  $\pi_2(\bar{\lambda}_2) = 2 \bar{\lambda}_2 p_2 = 2 \bar{\lambda}_2 \frac{R - \alpha_2 T_2(\bar{\lambda}_2)}{\gamma_2}$ 。

基于博弈双方达成的协议,通过求解双方的收益优化问题来确定认知用户的最优选择策略<sup>[9]</sup>:

$$\max_{\bar{\lambda}_1, \bar{\lambda}_2} [\pi_1(\bar{\lambda}_1) - z_1]^{\omega_1} [\pi_2(\bar{\lambda}_2) - z_2]^{\omega_2}$$

这里  $z_1$  和  $z_2$  为博弈者的保留效用,即当未能达成协议下的所得;  $\omega_1$  和  $\omega_2$  表示博弈双方谈判力量参数。

用求对数方法把上述优化问题的表达式表述成:

$$\begin{aligned} \max_{\bar{\lambda}_1, \bar{\lambda}_2} \omega_1 \ln[\pi_1(\bar{\lambda}_1) - z_1] + \omega_2 \ln[\pi_2(\bar{\lambda}_2) - z_2] \text{ Subject to:} \\ 1) \bar{\lambda}_1 + \bar{\lambda}_2 &= \lambda/2, \\ 2) 0 \leq \bar{\lambda}_1 \leq \mu_1, 0 \leq \bar{\lambda}_2 \leq \mu_2 \end{aligned} \quad (11)$$

式中:  $\pi_1(\bar{\lambda}_1)$  和  $\pi_2(\bar{\lambda}_2)$  分别是关于  $\bar{\lambda}_1$  和  $\bar{\lambda}_2$  的凹函数,  $\ln[\pi_i(\bar{\lambda}_i) - z_i]$  为一个严格的凹函数, 可以用凸优化理论来求解此优化问题, 释放相应的约束条件, 得到的拉格朗日函数可表示为:

$$L(\bar{\lambda}_1, \bar{\lambda}_2, \nu) = \omega_1 \ln[\pi_1(\bar{\lambda}_1) - z_1] + \omega_2 \ln[\pi_2(\bar{\lambda}_2) - z_2] + \nu(\bar{\lambda}_1 + \bar{\lambda}_2 - \frac{\lambda}{2}) = [\omega_1 \ln(\pi_1(\bar{\lambda}_1) - z_1) + \nu \bar{\lambda}_1] + [\omega_2 \ln(\pi_2(\bar{\lambda}_2) - z_2) + \nu \bar{\lambda}_2] - \nu \frac{\lambda}{2} \quad (12)$$

式中:  $\nu$  表示拉格朗日乘子。

如前述,  $\ln[\pi_i(\bar{\lambda}_i) - z_i]$  为一个严格的凹函数, 所以在凸约束集上存在唯一的最优解  $\bar{\lambda}_i^*$  满足 Karush-Kuhn-Tucker 条件:

$$\frac{\partial L(\bar{\lambda}_i, \nu)}{\partial \bar{\lambda}_i} = 0 \text{ 和 } \bar{\lambda}_1 + \bar{\lambda}_2 = \frac{\lambda}{2}.$$

用拉格朗日对偶法来求解此类问题, 它的对偶函数为  $D(\nu)$ , 求解问题转化为:

$$\min_{\nu \geq 0} D(\nu) = [\omega_1 \log(\pi_1(\bar{\lambda}_1^*) - z_1) + \nu \bar{\lambda}_1^*] + [\omega_2 \log(\pi_2(\bar{\lambda}_2^*) - z_2) + \nu \bar{\lambda}_2^*] - \nu \lambda / 2 \quad (13)$$

$$D(\nu) = \max L(\bar{\lambda}_1, \bar{\lambda}_2, \nu)$$

拉格朗日对偶函数可以分解为分布式子问题:

$$\max_{\bar{\lambda}_i} \omega_i \log(\pi_i(\bar{\lambda}_i) - z_i) + \nu \bar{\lambda}_i \quad (14)$$

因为式(14)的解是唯一的, 因此可以利用梯度迭代的方法, 并选择适当的迭代步长对拉格朗日乘子进行更新:

$$\nu(k+1) = [\nu(k) - \xi(\nu(k))(\frac{\partial L}{\partial \nu}(\nu(k)))]^+ \quad (15)$$

式中:  $k$  是迭代索引,  $\xi$  是迭代过程中的步长,  $[\cdot]^+$  表示到非负象限的投影<sup>[15]</sup>。

当  $k$  趋于无穷时, 对偶变量  $\nu(k+1)$  将收敛到最优值  $\nu^*$ 。因为式(13)的对偶间隙是 0, 式(14)的解是唯一的, 所以原始变量  $\bar{\lambda}_i^*(\nu(k))$  也将收敛到最优值  $\bar{\lambda}_i^*$ 。最后最优价格  $(p_1^*, p_2^*) = (\frac{R - \alpha_1 T_1(\bar{\lambda}_1^*)}{\gamma_1}, \frac{R - \alpha_2 T_2(\bar{\lambda}_2^*)}{\gamma_2})$ 。

综上所述, 基于合作博弈的异构多认知用户频谱选择算法可以描述如下

基于合作博弈的异构多认知用户信道选择算法

1) 参数: 每个 PO 可以评估自己的收益函数  $\pi_i(\bar{\lambda}_i)$ ; 不同类型的认知用户的到达率  $\lambda_1, \lambda_2$

2) 初始化: 当  $k = 0$  时, 给拉格朗日乘子分配合理的初值  $\nu(0) \geq 0$ 。

3) 步骤 1: 每个 PO 通过式(14)计算最优值  $\bar{\lambda}_i^*$ , 并反馈出去;

4) 步骤 2: 每个 PO 根据第  $k$  次迭代得到的  $\bar{\lambda}_i^*$  和自身的  $\nu(k)$  更新通过式(15)得到  $\nu(k+1)$ ;

5) 步骤 3: 令  $k = k+1$  然后返回步骤 1 重复上述步骤直到满足条件。

## 5 数值计算与仿真结果

为了通过数值对文中提出的异构认知用户的频谱选择

在非合作博弈和合作博弈模型下的优化问题进行研究, 从认知用户的总到达率和频谱提供商的服务率变化来分析达到均衡条件时 PO 的出价和收益以及认知用户的选择情况。首先我们分析了在非合作博弈模型下, 各频谱提供商 PO 提供的服务率对认知用户的延迟和到达率的影响情况。这里取  $\alpha_1 = 1.5, \gamma_1 = 0.5, \alpha_2 = 1, \gamma_2 = 1/3, \lambda_1, \lambda_2 = 2$ , 并固定 PO2 提供的服务率的取值。服务率的取值不同, 认知用户的选择也会不同。由表 1 可见 ( $\mu_2 = 5$ ), 当其中一个频谱提供商提供的服务率较大时, 认知用户更倾向选择此 PO。这可能由于服务率越大, PO 提供信道给认知用户传输数据的时间也越多, 这在竞争中更具优势。值得注意的是, 由于服务率不同导致认知用户。

表 1 服务率  $\mu_i$  对认知用户频谱选择的影响

服务率 $\mu_1$	到达率 $(\lambda_{11}, \lambda_{21})$	延迟 $(T_1, T_2)$	价格 $(p_1, p_2)$
3	(0.689 8, 1.310 2)	(0.432 9, 0.271 0)	(0.179 9, 0.341 7)
4	(0.835 4, 1.164 6)	(0.316 0, 0.260 7)	(0.140 2, 0.195 5)
5	(1.000 0, 1.000 0)	(0.250 0, 0.250 0)	(0.125 0, 0.125 0)
6	(1.325 3, 0.674 7)	(0.176 2, 0.231 2)	(0.112 0, 0.057 0)
7	(1.477 2, 0.522 8)	(0.153 3, 0.233 4)	(0.108 4, 0.038 4)

选择不同 PO 的信道的延迟也会不同, 并且通常延迟比较低的, 认知用户往往以支付更多的价格作为代价。

在本文建立的模型中, 引入了两种类型的异构认知用户, 并且将用户的类型的不同以延迟和价格的敏感系数进行区分, 这里讨论敏感系数的取值对 PO 出价的影响。取  $\mu_1 = 6, \mu_2 = 5$ 。由图 2 可知, PO 的出价策略会随着延迟和价格的敏感系数不同而随着改变, 并且与  $\alpha_i/\gamma_i$  的比值有一定的定量关系。从上述对模型的数学化分析来看,  $\alpha_i$  和  $\gamma_i$  的取值不影响认知用户的排队延迟, 但  $\alpha_i/\gamma_i$  的比值对价格的确定有很大的影响。由于两个类型的认知用户都是以共享式的方式接入信道的, 所以选择同个 PO 的延迟一样; 但造成的代价函数不一而影响 PO 的随后, 考虑迭代步长对算法效果的影响, 这里分别选取了  $\xi$  等于 1.5、1.0、1.0、0.05 四种不同步长值。从图 3 中, 可以发现, 步长取值过小将直接影响到目标函数值的收敛速率, 当迭代进行 40 次以后, 步长为 0.05 的曲线才缓慢进入收敛最佳值; 当迭代次数为 25 以后, 步长为 0.1 的曲线才有收敛的趋势。而步长为 1.5 时, 函数值振荡幅度太大, 在接近最优值时由于较大的扰动而不能收敛到最优值。合适的步长对于算法的迭代有很大的影响, 步长过大不能收敛到最优值, 步长过小收敛速率太慢, 这里, 当选用步长为 1 时, 可以看到, 函数值在小幅扰动又快速的收敛到了最优值。

本文研究不同的总到达率对进行频谱选择认知用户的延迟的影响情况, 从图 4 可以看到, 随着迭代步数的增加最终都达到了收敛。并且随着总到达率的增大, 选择 PO1 的

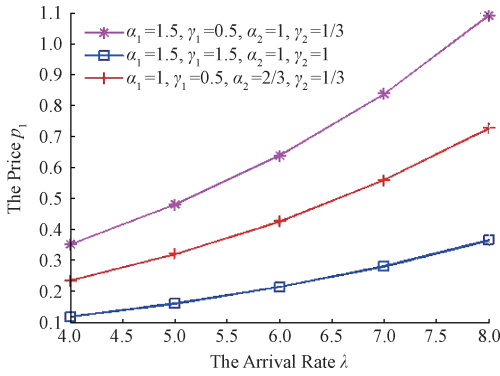


图 2 延迟和价格敏感系数的取值对价格的关系(非合作博弈)

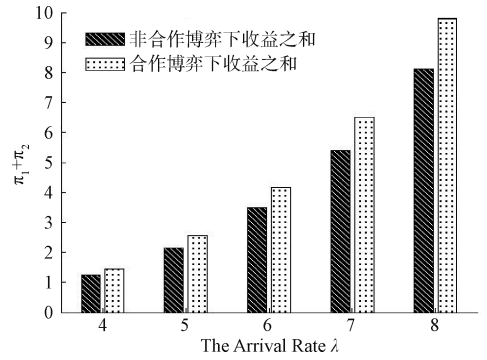


图 5 比较 POs 在非合作博弈和合作博弈下的收益情况

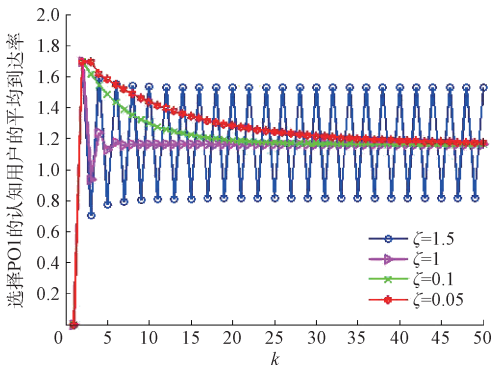


图 3 不同步长对选择 PO1 的认知用户平均到达率收敛情况的影响

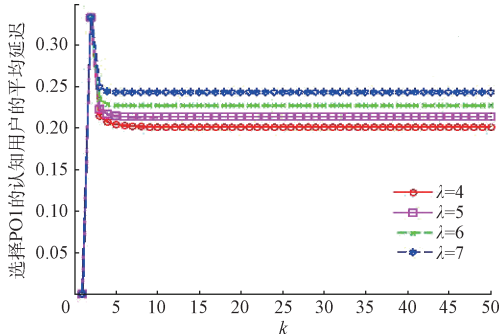


图 4 不同总到达率对选择 PO1 的认知用户平均延迟的影响

认知用户的平均延迟也随之增加。总到达率的增加意味着到达系统进行信道选择的认知用户数量的增多,那么势必会造成选择各个 PO 的用户会增多,而造成了延迟的增大。

本文考虑了频谱提供商在非合作博弈和合作博弈下的收益情况,如图 5 所示,可以很明显的观察到,较之采用非合作博弈模型,频谱提供商在合作博弈下获得的收益更大。非合作博弈下,PO 进行对策往往只基于自身的收益最大化,并不能导致所有 PO 的整体收益最大化。从提高整体收益方面出发,合作博弈占有很大的优势。

## 6 结 论

本文基于认知无线电频谱出售特点,结合排队理论和定价机制,通过建立双头垄断市场模型实现了异构认知用户的最优信道选择,达成了频谱提供商收益和认知用户成本的最优化。比较了在非合作博弈和合作博弈下频谱提供商的收益情况,利用对偶分解方法求解合作博弈下各个 PO 收益的优化问题。仿真实验结果也表明,本文提出的信道选择模型最终达到了 Wardrop 均衡,频谱提供商以合作的方式博弈更能帮助它们取得更大的收益。

## 参 考 文 献

- [1] 褚御芝,郑宝玉. 认知无线网络中基于最佳中继选择的协作传输策略[J]. 仪器仪表学报, 2011, 32(3): 520-526.
- [2] 谢先斌,李新山. 基于频谱感知的认知无线网络容量研究[J]. 电子测量与仪器学报, 2010, 24(1): 61-65.
- [3] 江玉春,毛明禾. 基于 WLC 算法的频谱感知性能分析[J]. 国外电子测量技术, 2014, 33(7): 25-28.
- [4] BERG K, USITALO M A, WIJTING C. Spectrum access models and auction mechanisms [C]. IEEE International Symposium on Dynamic Spectrum Access Networks, 2012: 97-104.
- [5] SAINATH B, MEHTA N B. Interference-constrained optimal power-adaptive amplify-and-forward relaying and selection for underlay cognitive radios [J]. IEEE Transactions on Communication, 2014, 62(8): 2709-2720.
- [6] TAN S S, ZEIDLER J, RAO B. Opportunistic spectrum access for cognitive radio networks with multiple secondary users [J]. IEEE Transactions on Wireless Communication, 2013, 12(12): 6214-6227.
- [7] YANG L, KIM H, ZHANG J, et al. Pricing-based decentralized spectrum access control in cognitive radio networks [J]. IEEE/ACM Transactions on Networking, 2013, 21(2): 522-535. (下转第 163 页)