文章编号:1001-506X(2013)01-0173-06 网址:www.sys-ele.com

认知无线网络空闲频谱共享的竞争与合作定价

汤海冰,胡志刚
(中南大学信息科学与工程学院,湖南 长沙 410083)

摘 要:在频谱贸易中,价格是一个关键问题。针对认知无线网络中多个主用户的空闲频谱最优定价问题,在竞争模型下,基于非合作博弈论提出了竞争价格模型求解算法,并证明了该算法收敛到唯一的纳什均衡;在合作模型下,通过求解原问题的对偶问题,提出了合作价格模型求解算法,并证明了该算法在步长足够小时收敛到全局最优解。仿真结果表明,同已有的几个算法相比,所提的两个算法速度更快,取得的总收益相对更好,且均能较快地靠近最优解。

关键词:频谱贸易;空闲频谱;竞争;合作;定价

中图分类号:TN 92 **文献标志码**:A **DOI**:10.3969/j.issn.1001-506X.2013.01.29

Competitive and cooperative pricing for idle spectrum sharing in cognitive radio networks

TANG Hai-bing, HU Zhi-gang
(*School of Information Science and Engineering, Central South University, Changsha 410083, China*)

Abstract: In spectrum trading, pricing is a key issue. Aiming at pricing for idle spectrums in a cognitive radio network with multiple primary users, a competitive pricing solution algorithm based on the non-cooperative game theory in the competitive pricing is proposed, and the algorithm converges to a unique Nash equilibrium is proved. In the cooperative pricing, a cooperative pricing solution algorithm by solving the dual problem of the original problem is proposed and the algorithm converge to the global optimal solution is proved if the step-length is small enough. Simulation results show that the two proposed algorithms show better time efficiency and can obtain relatively better total revenues, and moreover the revenue values are very close to the optimal solution.

Keywords: spectrum trading; idle spectrum; competition; cooperation; pricing

0 引 言

认知无线电技术通过动态频谱访问从根本上改善了频谱利用率,但存在一个重要的难题——频谱共享问题[1]。从用户有两种方式动态访问主用户的频谱——非协作和协作方式。在非协作访问方式中,从用户需周期性的检测主用户的频谱占用,伺机接入空闲频谱,并在主用户到达时,及时退出,不影响主用户的使用;在协作访问方式中,主用户主动告知从用户其频谱状态信息,通过出租频谱与从用户共享。本文研究协作访问方式中的频谱共享问题。

频谱共享方法可分为3类:第一类是将主从用户对信道的占用建模成马尔可夫链。文献[2]推导了该模式下的暴力终止概率、阻塞概率及系统吞吐量,使用信道预订的方法来降低暴力终止概率、阻塞概率,进行频谱共享。最大化主用户的收益。文献[3]基于部分可观测马尔可夫理论提出了频谱感知、感知策略和访问策略的联合设计与隔离方案。第二类是基于信道拍卖的方法。文献[4]研究了超帧结构下,主用户到达服从泊松分布,保证干扰低于一定概率的情况下(意味着收益损失),主用户共享出一部分频谱(意味着产生收益),最大化主用户收益时频谱拍买策略。文献[5]基于二价拍卖、从用户间干扰关系提出了一个多赢的拍卖算法,开发了一个有效的拍卖机制来抑制从用户谎报、串谋竞标价格及从用户间干扰关系以获得更大收益的行为。但在多信道环境下,该拍卖算法复杂度为指数级。通过半定规划松驰获得了多信道环境下拍卖算法的多项式时间内的近似最优解。文献[6]通过定义信道访问收益、竞标成本、感知成本、访问成本、竞标历史等,提出了一个收益-成本比型效用函数,通过比较竞标效用期望与流标效用期望,决定是否竞标访问权的单信道重复拍卖模型,进而提出一个贝叶斯非参数学习的多信道拍卖方案:利用观测到的历

收稿日期:2012-06-20; **修回日期**:2012-10-30。
基金项目:国家自然科学基金(60970038)资助课题

史数据，基于 Dirichlet Process 来更新后验分布，估计效用期望。第 3 类是基于博弈论的频谱共享方法。文献[7]推导了驱动纳什均衡趋向帕累托最优时，最优的用户相关的线性价格函数。基本思想是在博弈中，由于参与者的自私性，往往导致纳什均衡并非帕累托最优，所以在参与者的效用中加入一个线性的惩罚函数，使参与者以这样一种“合作”的方式驱动纳什均衡趋向帕累托最优边界，并据此提出了一个基于价格的从用户信道/功率分配的迭代注水算法。文献[8]研究了认知无线电网络中多个主服务提供商竞争时，共享频谱的定价问题，从服务提供商(类以从基站)分别向主服务提供商提供最佳的需求带宽，使其效用最大化。主服务提供商通过非合作博弈竞争最大化自身利润，收敛到纳什均衡，并研究了动态博弈的分布式实现及其稳定性。文献[9]进一步研究了市场均衡、竞争及协作 3 种价格模型下的最优定价方案及相应的分布式实现。由于协作定价方案对收益进行全局优化，所以主服务提供商总收益是 3 种价格模型中最高的，但由于按从服务提供商(从用户)对主服务提供商(主用户)频谱的最佳请求来定价，从用户可能会过度占用主用户频谱，甚至会出现从用户频谱请求超过主用户频谱大小的情况，导致主用户服务质量(quality of service, QoS)得不到保障。这是不合理的。文献[10]虽然也考虑了这种情况，但其仅考虑一个主用户提供商的情况，且没有考虑次用户间请求带宽对次用户收益的影响。文献[11]考虑了两个从用户在地理上相距够远，那么单个频段就可以同时被他们使用的频谱定价问题，有一定新意，但其算法复杂度偏高，导致其可行性较低。

本文研究从用户的请求频谱不超过主用户的空闲频谱量，多个主用户竞争与合作时的频谱共享定价问题。空闲频谱由主用户根据自身频谱使用情况动态设定。显然同文献[8-9]相比，本文的研究更有实际意义，且本文的求解模型也更复杂(属带约束的优化问题)，其求解算法也可作为该模型的一个通用求解算法。

1 系统模型及问题描述

1.1 网络模型

本文考虑具有多个主服务提供商(主用户)的认知无线网络，如图 1 所示。主服务提供商出售自己空闲频谱给从服务提供商。从用户通过自适应调制在分配的频段上发送数据，其频谱需求依赖于发送速率和主服务商的价格。

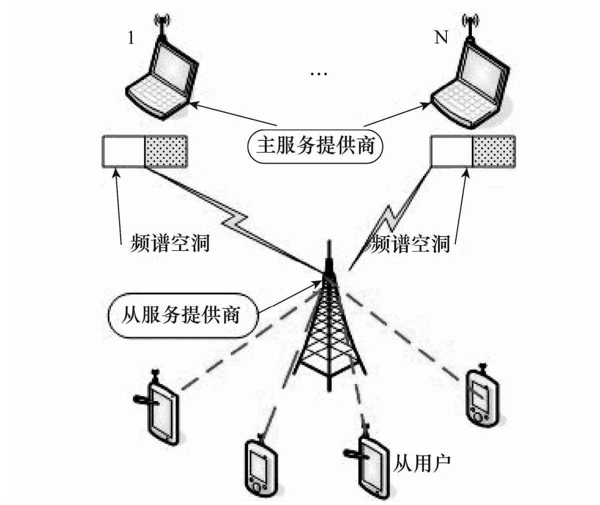

图 1 频谱共享网络模型

1.2 系统模型

1.2.1 无线发送模型

当从用户采用自适应调制时，发送速率能根据信道质量动态调整，其频谱效率可表示为[8]

$$k = \log_2(1 + K\gamma) \tag{1}$$

式中，$K = 1.5/\ln(0.2/BER^{tar})$；$\gamma$ 表示接收端处信噪比；BER^{tar} 为目标位错率。

1.2.2 从服务提供商的效用函数

为量化从服务提供商满足其相应频谱需求时获得的收益，本文采用经济学中通用二次效用函数[8-9]

$$U(\boldsymbol{b}) = \sum_{i=1}^{N} b_i k_i^{(s)} - \frac{1}{2}\Big(\sum_{i=1}^{N} b_i^2 + 2v\sum_{i\neq j} b_i b_j\Big) - \sum_{i=1}^{N} p_i b_i \tag{2}$$

式中，$\boldsymbol{b} = [b_1, b_2, \cdots, b_N]$，表示从服务提供商对主用户 1 到 N 的请求带宽向量；p_i 表示主用户 i 对其共享频段的出售价格；$k_i^{(s)}$ 表示使用主用户 i 的空闲频谱的从用户所得的频谱效率；$v \in [0,1]$表示频谱切换因子。使用式(2)作为从用户提供商效用函数是因为该函数是凹的，能表示用户满意度与发送速率的关系[8]。这种凹效用函数，在量化用户的满意度，即对分配带宽“尽力而为”方面，被广泛使用。该函数求导后，对某个主用户 i 能产生对其频谱需求的线性函数，这有利于运用线性系统理论进行稳定性分析。该函数能综合频谱数量及频谱切换因子的影响。

对式(2)中 b_i 求导，可得从服务提供商对主用户 i 的最佳频谱需求为

$$\frac{\partial U}{\partial b_i} = k_i^{(s)} - b_i - v\sum_{i\neq j} b_j - p_i = 0 \tag{3}$$

所以

$$p_i = k_i^{(s)} - b_i - v\sum_{i\neq j} b_j \tag{4}$$

因为 $p_i \geqslant 0$，有

$$b_i \leqslant k_i^{(s)} - v\sum_{i\neq j} b_j \tag{5}$$

设主用户 i 的频谱空洞为 B_i，根据前述有

$$0 \leqslant b_i \leqslant B_i \tag{6}$$

1.2.3 主用户效用函数

对某个主用户 i，从用户共享其频谱空洞，不会造成主用户 i 的损失，因而代价函数为 0，所以主用户 i 的效用函数为

$$R_i(\boldsymbol{b}) = p_i b_i = \Big(k_i^{(s)} - b_i - v\sum_{i\neq j} b_j\Big) b_i \tag{7}$$

1.3　问题描述

本文研究从用户的请求频谱不超过主用户空闲频谱量,多个主用户竞争与合作时频谱的最优定价问题。竞争模型适用于每个主用户都最大化自己收益时的情况,而合作模型适用于所有主用户的收益和最大化的场景。竞争价格模型下,频谱共享问题可描述为

$$\arg\min_{\boldsymbol{b}} \left(-R_i(\boldsymbol{b})\right)$$
$$\text{s.t.}\quad \forall i \in [1,N],\text{式(5) 和式(6) 成立} \tag{8}$$

合作价格模型下,所有主用户收益和最大化时,频谱共享问题可描述为

$$\arg\min_{\boldsymbol{b}} \left(\sum_{i=1}^{N} -R_i(\boldsymbol{b})\right)$$
$$\text{s.t.}\quad \forall i \in [1,N],\text{式(5) 和式(6) 成立} \tag{9}$$

2　竞争价格模型求解

给向量 $\boldsymbol{b}$ 赋初值,每个主用户 i 求解式(8),迭代设置最佳带宽 b_i,这可以视为一个重复非合作博弈问题。记为

$$\boldsymbol{b}(t) = [b_1(t), b_2(t), \cdots, b_N(t)]$$

$\boldsymbol{b}_{-i}(t)=\boldsymbol{b}(t)-\{b_i(t)\}$,即 $\boldsymbol{b}(t)$ 中去掉元素 $b_i(t)$ 后的向量。给定 $\boldsymbol{b}(0)$ 后,第$(t+1)$轮求解式(8),主用户 i 的最佳共享带宽为

$$b_i(t+1) = \begin{cases} \varepsilon, & k_i^{(s)} - v\sum_{i\neq j} b_j(t) \leqslant 0 \\ \left(k_i^{(s)} - v\sum_{i\neq j} b_j(t)\right)\Big/2, & 0 \leqslant k_i^{(s)} - v\sum_{i\neq j} b_j(t) \leqslant B_i \\ B_i, & k_i^{(s)} - v\sum_{i\neq j} b_j(t) \geqslant B_i \end{cases} \tag{10}$$

式中,$k_i^{(s)} - v\sum_{i\neq j} b_j < 0$ 意味着主用户 i 没有符合约束要求的共享方案,所以不参与共享,可令 $b_i=0$。在这里设为 ε,ε 定义为非常小的接近于零的常数,目的是为了保证算法的收敛性。

2.1　纳什均衡的存在性与唯一性

推论 1　迭代求解式(8)的博弈中,至少存在一个纳什均衡。

证明　对每个主用户 i 的策略空间定义在区间$[0,B_i]$上,策略空间 b_i 为欧几里得空间上非空、闭的有界凸集。根据式(7),很明显,$\boldsymbol{b}_{-i}(t)$已知时效用函数 $R_i(\boldsymbol{b})$是凹的。根据文献[7],凹博弈至少存在一个纳什均衡。　　证毕

推论 2　迭代求解式(8)的博弈中,纳什均衡是唯一的。

证明　根据推论 1,至少存在一个纳什均衡 $\boldsymbol{b}$,设函数 $\boldsymbol{b}=\boldsymbol{f}(\boldsymbol{b})$,$b_i$ 由式(10)决定。根据文献[12],证明纳什均衡唯一性的关键是证明 $\boldsymbol{f}(\boldsymbol{b})$是一个标准函数,即 $\boldsymbol{f}(\boldsymbol{b})$满足正性、单调性及可扩展性。

正性:根据式(10),$\boldsymbol{f}(\boldsymbol{b})>0$。

单调性:对主用户 i,设 $\boldsymbol{b}'\geqslant\boldsymbol{b}$,则

$$\boldsymbol{f}(\boldsymbol{b}') - \boldsymbol{f}(\boldsymbol{b}) =$$
$$\begin{cases} \varepsilon-\varepsilon, & k_i^{(s)} - v\sum_{i\neq j} b'_j \leqslant 0,\ k_i^{(s)} - v\sum_{i\neq j} b_j \leqslant 0 \\ \varepsilon - \dfrac{\left(k_i^{(s)} - v\sum_{i\neq j} b_j\right)}{2}, & \begin{cases} k_i^{(s)} - v\sum_{i\neq j} b'_j \leqslant 0 \\ 0 \leqslant k_i^{(s)} - v\sum_{i\neq j} b_j \leqslant B_i \end{cases} \\ \dfrac{\left(k_i^{(s)} - v\sum_{i\neq j} b'_j\right)}{2} - \dfrac{\left(k_i^{(s)} - v\sum_{i\neq j} b_j\right)}{2}, & \begin{cases} 0 \leqslant k_i^{(s)} - v\sum_{i\neq j} b'_j \leqslant B_i \\ 0 \leqslant k_i^{(s)} - v\sum_{i\neq j} b_j \leqslant B_i \end{cases} \\ \dfrac{\left(k_i^{(s)} - v\sum_{i\neq j} b'_j\right)}{2} - B_i, & \begin{cases} 0 \leqslant k_i^{(s)} - v\sum_{i\neq j} b'_j \leqslant B_i \\ k_i^{(s)} - v\sum_{i\neq j} b_j \geqslant B_i \end{cases} \\ B_i - B_i, & \begin{cases} k_i^{(s)} - v\sum_{i\neq j} b'_j \geqslant B_i \\ k_i^{(s)} - v\sum_{i\neq j} b_j \geqslant B_i \end{cases} \end{cases}$$

所以 $\boldsymbol{f}(\boldsymbol{b}')-\boldsymbol{f}(\boldsymbol{b})\leqslant 0$,$\boldsymbol{f}(\boldsymbol{b})$单调递减。

可扩展性:类似单调性的证明,对 $\forall\alpha>1$,可证 $\alpha\boldsymbol{f}(\boldsymbol{b})-\boldsymbol{f}(\alpha\boldsymbol{b})>0$ 满足可扩展性。

这表明 $\boldsymbol{f}(\boldsymbol{b})$是一个标准函数,根据文献[12],其不动点是唯一的,所以纳什均衡也是唯一的。　　证毕

2.2　竞争价格模型求解算法

步骤 1　对向量 $\boldsymbol{b}$ 赋较小的满足约束的初值,迭代轮数 $t=0$,精度 $\delta>0$。

步骤 2　$t=t+1$;根据式(10)计算 $b_i(t+1)$。

步骤 3　对 $\forall i$ 如果所有 $b_i(t+1)-b_i(t)\leqslant\delta$,算法停机;否则,转到步骤 2。

需要指出的是本算法和下文的合作价格模型求解算法(第 3.4 节)得出的都是最佳共享带宽,根据式(4)即可求得最优定价。

推论 3　竞争价格模型算法收敛到纳什均衡点。

证明　因为 $\boldsymbol{f}(\boldsymbol{b})$是一个标准函数,所以竞争价格模型算法收敛到唯一的不动点,即纳什均衡点。　　证毕

3　合作价格模型求解

问题式(9)是一个标准的带约束的最优化问题,但由于约束过多时,求解复杂度太高,所以并不适合根据 KKT (Karush-Kuhn-Tucker) 条件或内点法[13]等求解。文献[14]对类似优化问题,利用拉格朗日函数,求得含拉格朗日乘子的最优解,用次梯度法来迭代更新最优解,但仿真发现其效果并不理想。本文首先证明了问题式(9)的目标函数为凸函数,强对偶定理成立,通过求解对偶问题得到原问题的最优解。

3.1　目标函数的凸性

推论 4　问题式(9)中目标函数为凸函数。

证明　令 $R=\sum_{i=1}^{N}-R_i(\boldsymbol{b})=-\sum_{i=1}^{N}\left(k_i^{(s)}-b_i-v\sum_{i\neq j}b_j\right)b_i$,

则 $v\sum_{i=1}^{n}b_i\sum_{i\neq j}b_j$ 中含 b_jb_i 项为 $(vb_ib_j+vb_jb_i)$，即 $2vb_ib_j$；含 b_ib_i 的项为 b_i^2，所以其 Hessian 阵可表示为

$$\boldsymbol{H}=\begin{pmatrix}2&2v&\cdots&2v&2v\\2v&2&\cdots&2v&2v\\\vdots&\vdots&\ddots&\vdots&\vdots\\2v&2v&\cdots&2&2v\\2v&2v&\cdots&2v&2\end{pmatrix}_{N\times N}\tag{11}$$

任取其 n 阶主子式，提取公因子 2 后，作初等变换：

第 2 行至第 n 行均加到第 1 行；

提取第一行中公因式 $(1+(N-1)v)$；

第 1 行乘以 $-v$ 分别加到第 2 行到第 n 行；

初等变化后，其方阵记为

$$\boldsymbol{H}_n=\begin{pmatrix}1&1&\cdots&1&1\\0&1-v&\cdots&0&0\\\vdots&\vdots&\ddots&\vdots&\vdots\\0&0&\cdots&1-v&0\\0&0&\cdots&0&1-v\end{pmatrix}_{n\times n}\tag{12}$$

对 $v\in[0,1]$，显然有 $\det(\boldsymbol{H}_n)>0$。根据霍尔维茨定理，$\boldsymbol{H}$ 正定，所以目标函数为凸函数。　证毕

3.2 对偶问题

暂不考虑式(6)约束，式(9)的拉格朗日函数为

$$L(\boldsymbol{b},\boldsymbol{\lambda})=-\sum_{i=1}^{N}R_i(\boldsymbol{b})+\sum_{i=1}^{N}\lambda_i(b_i+v\sum_{i\neq j}b_j-k_i^{(s)})\tag{13}$$

式(9)拉格朗日对偶函数为

$$D(\lambda)=\begin{cases}\min\limits_{b} L(\boldsymbol{b},\boldsymbol{\lambda})\\ \text{s. t. 式(6)}\end{cases}\tag{14}$$

相应的对偶问题为

$$\begin{cases}\max\limits_{\lambda} D(\boldsymbol{\lambda})\\ \boldsymbol{\lambda}\geqslant 0\end{cases}\tag{15}$$

3.3 对偶变量与原始变量的更新

首先求解对偶问题式(15)，给定初值 $\boldsymbol{\lambda}$ 后，按梯度法更新变量 $\boldsymbol{\lambda}$。

$$\lambda_i(t+1)=\max\left(\lambda_i(t)+s\frac{\partial D}{\partial\lambda_i}(t),0\right)\tag{16}$$

$$\frac{\partial D}{\partial\lambda_i}(t)=b_i(t)+v\sum_{i\neq j}b_j(t)-k_i^{(s)}\tag{17}$$

式中，s 表示步长。

同样，对于式(14)的求解，也可通过梯度法来进行。

$$b_i(t+1)=\min\left(B_i,\max\left(b_i(t)-d\frac{\partial L}{\partial b_i}(t),0\right)\right)\tag{18}$$

式中，d 表示步长。根据式(13)，得

$$\frac{\partial L}{\partial b_i}(t)=2b_i(t)-k_i^{(s)}+2v\sum_{i\neq j}b_j(t))+\lambda_i(t)\tag{19}$$

3.4 合作价格模型求解算法

步骤 1　初始化 $\boldsymbol{\lambda}(0)$，$\boldsymbol{b}(0)$，$t=0$，精度 δ。

步骤 2　主用户根据式(16)更新 $\boldsymbol{\lambda}(t+1)$。

步骤 3　主用户根据式(18)更新 $\boldsymbol{b}(t+1)$。

步骤 4　如果总收益 $R(t+1)-R(t)<\delta$ 为真，算法停机；否则 $t=t+1$，转到步骤 2。

推论 5　合作价格模型求解算法在更新步长 s、d 足够小时，以误差 δ 收敛到全局最优解。

证明　由推论 4，目标函数为凸函数，且约束为线性约束，所以强对偶定理成立，对偶间隙为零。根据文献[15]，当步长足够小时，用梯度算法求解目标函数一定收敛，所以当 s，d 足够小时，本算法以误差 δ 收敛到全局最优解。

证毕

4 实验分析

本文利用 Matlab 仿真竞争价格模型求解算法及合作价格模型求解算法，并与文献[9]中算法及 Rosen 梯度投影法[13]、内点法[15]进行比较。基本实验仿真参数设置为目标误码率 $BER^{tar}=10^{-4}$，主用户空闲共享频谱上限、信道信噪比等随机生成，$v=0.3$，步长 $s=d=0.05$。

图 2 中星线描述了 7 个主用户，竞争价格模型求解算法设定 60 次迭代过程中主用户的共享频谱值。可以看到迭代约 33 次后，7 个主用户的共享频谱值基本都为一条与坐标轴平行的直线。方形线这表明本文竞争价格模型求解算法收敛到纳什均衡点。表示相同 B_i、信道质量等条件下竞争价格模型求解算法的迭代过程，在约 31 次迭代后终止。可以看到，终止时的 $\boldsymbol{b}$ 值在后面的迭代过程中(60 次迭代)，基本不变，几乎就是纳什均衡值，这也表明了本文竞争价格模型求解算法的有效性。

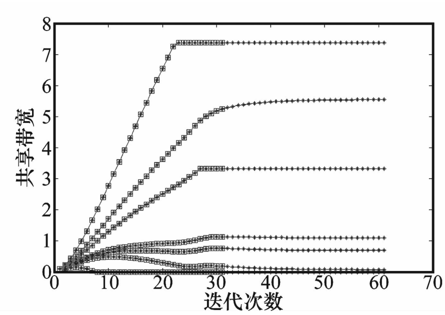

图 2　竞争价格模型求解算法收敛情况

图 3 分别将竞争、合作定价模型下，本文算法与根据文献[9]（用其求解思想，后称文献[9]中算法）得到的算法进行对比。可以看出，竞争与合作时，本文算法与文献[9]中算法得到收益基本没有差别，收益曲线后端部分近似水平也反映了算法的收敛性，且合作时主用户总收益大于竞争时的总收益。但本文竞争价格模型求解算法迭代次数要优于文献[9]中对应算法。然而，本文合作价格模型求解算法迭代次数(35 次)明显多于文献[9]中对应算法迭代次数(22 次)，但实验中发现，本文合作价格模型求解算法执行时间远小于文献[9]中算法。

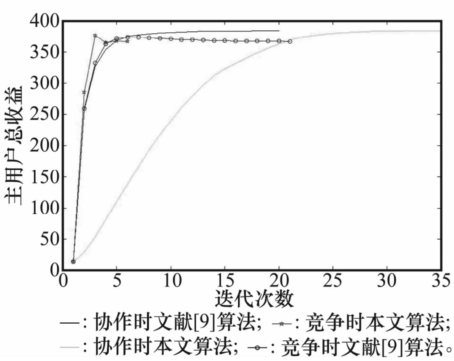

图 3　算法比较

为便于描述原因，这里简要描述文献[9]中算法的求解原理。文献[9]中算法也可近似表述为梯度法求解。其迭代公式为

$$b_i(t+1) = b_i(t) + \alpha * Grad_{b_i}[t] \tag{20}$$

式中，$Grad_{b_i}[t]$表示第[t]轮迭代时，收益函数在 b_i 的梯度。竞争价格模型时

$$Grad_{b_i}[t] \approx \frac{R_i(\boldsymbol{b}_{-i}, b_i+\xi) - R_i(\boldsymbol{b}_{-i}, b_i-\xi)}{2\xi}[t] \tag{21}$$

协作价格模型时

$$Grad_{b_i}[t] \approx \frac{\sum_{j=1}^{N} R_j(\boldsymbol{b}_{-i}, b_i+\xi) - \sum_{j=1}^{N} R_j(\boldsymbol{b}_{-i}, b_i-\xi)}{2\xi}[t] \tag{22}$$

可以看出，每轮迭代中，本文算法与文献[9]中算法的最大差别在于梯度的计算。根据式(18)和式(19)，本文合作价格模型求解算法中，主用户 i 更新 $b_i(t+1)$时，只需按式(16)和(17)进行一次拉格朗日乘子更新。而从式(22)可以看出，文献[9]中算法约需 $2N$ 次乘法(计算两次总收益)及 $2N$ 次加法(算出分子)。即每轮 $b_i(t+1)$更新时，文献[9]中算法至少是本文的 $4N$ 倍。所以即使其迭代次数比本文算法少一些(迭代次数不少于本文算法 1/2)，但其时间复杂度还是远高于本文算法，特别是在 N 较大时。

图 4 描述了本文合作价格模型求解算法中迭代次数与主用户数的关系。一般而言，主用户数增多，合作价格模型求解算法的迭代次数随之增大，但增加并不明显，这也反映了本文求解算法的稳定性，而且算法的执行时间增加不明显。

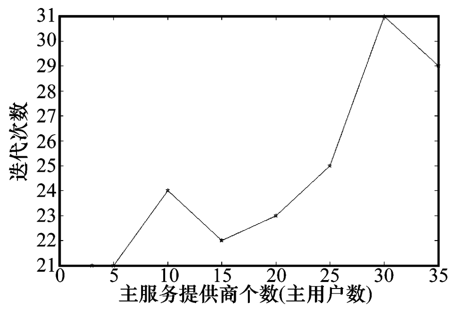

图 4　主用户数与迭代次数

图 5 比较了 3 个主用户和 5 个主用户时，本文合作价格模型求解算法、文献[9]中算法、Rosen 梯度投影法及内点法的主用户总收益。可以看出，3 个主用户时，4 种方法结果相差不大，但在 5 个主用户时，可以看出本文及文献[9]中算法明显优于 Rosen 梯度投影法与内点法。而且实验中发现，在 4 种算法中，本文算法的执行时间是最优的，部分原因是求解梯度时，本文可通过式(16)和式(17)一步得到，其余算法就相对复杂[13,15]。对于更多用户的情况，根据图 3 的时间复杂度分析及图 4 的分析指出：本文算法的执行时间增加不明显，可由实验推出本文算法得出的收益及执行时间都是最优的。

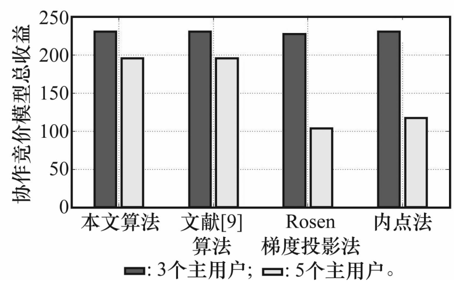

图 5　4 种算法比较

5　结　论

本文研究了认知无线网络中多个主用户的空闲频谱最优定价问题，在竞争模型下，基于非合作博弈论提出了竞争价格模型求解算法，并证明了该算法收敛到唯一的纳什均衡。在合作模型下，首先证明了目标函数的凸性，强对偶定理成立，通过求解对偶问题，提出了合作价格模型求解算法，并证明了该算法在步长足够小时收敛到全局最优解。实验分析表明，由于计算梯度时运算量的减小，提出的两个算法均能较快收敛到最优解。

参考文献：

[1] Tadrous J, Sultan A, Nafie M. Admission and power control for spectrum sharing cognitive radio networks[J]. *IEEE Trans. on Wireless communications*, 2011, 10(6):1945 - 1955

[2] Zhu X R, Shen L F, Tak-shing P Y. Analysis of cognitive radio spectrum access with optimal channel reservation[J]. *IEEE Communications Letters*, 2007, 11(4): 304 - 306.

[3] Chen Y X, Zhao Q, Ananthram S. Joint design and separation principle for opportunistic spectrum access in the presence of sensing errors[J]. *IEEE Trans. on Information Theory*, 2008, 54(5):2053 - 2071.

[4] Chang H B, Kwang C C. Auction-based spectrum management of cognitive radio networks[J]. *IEEE Trans. on Vehicular Technology*, 2010, 59(4):1923 - 1935.

[5] Wu Y L, Wang B B, Ray K J. A scalable collusion-resistant

multi-winner cognitive spectrum auction game[J]. *IEEE Trans. on Communications*, 2009, 57(12):3805 - 3816.

[6] Zhu H, Zheng R, Vincent P H. Repeated auctions with Bayesian nonparametric learning for spectrum access in cognitive radio networks[J]. *IEEE Trans. on Wireless Communications*, 2011, 10(3):890 - 900.

[7] Wang F, Marwan K. Price-based spectrum management in cognitive radio networks[J]. *IEEE Journal of Selected Topics in Signal Processing*, 2008, 2(1):74 - 87.

[8] Dusit N, Ekram H. Competitive pricing for spectrum sharing in cognitive radio networks: dynamic game, inefficiency of Nash equilibrium, and collusion[J]. *IEEE Journal on Selected Areas in Communications*, 2008, 26(1):192 - 202.

[9] Dusit N, Ekram H. Market-equilibrium, competitive, and cooperative pricing for spectrum sharing in cognitive radio networks: analysis and comparison[J]. *IEEE Trans. on Wireless Communications*, 2008, 7(11):4273 - 4283.

[10] 罗丽平,邱焕新,张广驰. 具有约束条件的认知无线电网络最优频谱价格函数[J]. 电子学报,2011,39(3):562 - 566.(Luo L P, Qiu H X, Zhang G C. Optimal pricing function with spectrum constraint in cognitive radio networks[J]. *Journal of Electronics*, 2011,39(3):562 - 566.)

[11] Chen L, Iellamo S, Coupechoux M. An auction framework for spectrum allocation with interference constraint in cognitive radio networks[C]// *Proc. of the IEEE Conference on Computer Communications*, 2010:1 - 9.

[12] Yates R D. A framework for uplink power control in cellular radio systems[J]. *IEEE Journal on Selected Area in Communications*, 1995, 13(9):1341 - 1347

[13] Boyd S, Vandenberghe L. *Convex optimization*[M]. UK: Cambridge University Press, 2004.

[14] MA Y, Dong I K, Wu Z Q. Optimization of OFDMA-Based cellular cognitive radio networks[J]. *IEEE Trans. on Communications*, 2010, 58(8):2265 - 2276.

[15] Bertsekas D P. *Nonlinear programming*[M]. Nashus: Athena Scientific, 1999.

作者简介:

汤海冰(1978 -),男,讲师,博士研究生,主要研究方向为认知无线电。

E-mail:thinkdot@sina.com

胡志刚(1963 -),男,教授,博士研究生导师,博士,主要研究方向为网络通信。

E-mail:zghu@csu.edu.cn