

基于非合作博弈的 femtocell 双层网络分布式功率控制

刘志新¹, 李亮¹, 马锴¹, 关新平^{1,2}

(1. 燕山大学 电气工程学院, 河北 秦皇岛 066004; 2. 上海交通大学 电子信息与电气工程学院, 上海 200240)

摘要: 研究在频谱共享条件下家庭基站双层网络的分布式功率控制策略. 将宏基站所能承受的干扰限度视为家庭基站的分配资源, 家庭基站以竞价形式对其“购买”, 从而构成宏基站与家庭基站以及家庭基站用户之间的博弈模型. 分析了该博弈过程中纳什均衡解的存在性和唯一性, 并给出了在非合作模式下指导家庭基站用户进行理性竞争的分布式功率调整算法. 最后, 通过仿真实验验证了所提出算法的有效性.

关键词: 家庭基站; 非合作博弈; 分布式功率控制; 价格

中图分类号: TN911

文献标志码: A

Distributed power control based on non-cooperative game in two-tier femtocell network

LIU Zhi-xin¹, LI Liang¹, MA Kai¹, GUAN Xin-ping^{1,2}

(1. Institute of Electrical Engineering, Yanshan University, Qinhuangdao 066004, China; 2. School of Electronic, Information and Electrical Engineering, Shanghai Jiaotong University, Shanghai 200240, China. Correspondent: LIU Zhi-xin, E-mail: lzxauto@ysu.edu.cn)

Abstract: The distributed power control strategy is investigated, which works in the spectrum-sharing femtocell two-tier network. The aggregate interference threshold, which the macrocell can tolerate, is regarded as the allocated resource. The femtocell users compete with each other and purchase it. So the Stackelberg game model of the macrocell and femtocell is built, and the non-cooperative game model of femtocell users is established. Then the existence and uniqueness of Nash equilibrium in the non-cooperative game are analyzed. The distributed power adjustment algorithm is given to guide the femtocell users to compete with each other rationally in non-cooperative pattern. The simulation examples are presented to verify the effectiveness of the proposed algorithm.

Key words: femtocell; non-cooperative game; distributed power control; price

0 引言

随着无线通信技术和无线业务的拓宽, 如何更有效地利用频谱资源引起了人们广泛的关注. 研究表明, 70%的数据服务和 50%的语音服务都发生在室内^[1], 如何提高室内覆盖率, 更有效地把数据服务与语音服务结合起来已成为当前无线通信领域的热点问题之一. 为了解决该问题, femtocell 技术应运而生.

femtocell 又称家庭基站, 是安装在室内的无线接入点, 具有短距离、低成本和低功耗等优点, 为用户提供较好的室内语音和数据接收服务. femtocell 与蜂窝网络之间是通过诸如 DSL、电缆调制解调器和 RF 回

程信道的宽带网络进行连接的, 但在实际应用过程中, 却不可避免地存在干扰问题. 这种干扰不仅包括 femtocell 之间的同层干扰, 还包括 femtocell 与 macrocell 之间的跨层干扰, 后者是影响网络性能的主要因素^[1].

针对这一问题, 相关文献已经提出了一些减小跨层干扰的方法. 文献 [2-5] 分别提出了宏蜂窝波束子集选择策略、频谱分裂的概念、加权比例公平调度算法, 以及基于效应的分布式 SINR 自适应调整算法以减小跨层干扰; 文献 [6] 提出了一种最优资源分配算法以减小干扰, 但该方法集中控制算法, 其复杂性和信息交换要求高, 应用中难以实施; 文献 [7] 提出了

收稿日期: 2012-11-19; 修回日期: 2013-01-05.

基金项目: 国家 973 计划项目 (2010CB731800); 国家自然科学基金项目 (61104033, 61172095, 61174127); 河北省自然科学基金项目 (F2012203109, F2012203126).

作者简介: 刘志新(1976—), 男, 教授, 博士, 从事无线网络节能优化、网络资源优化分配等研究; 李亮(1986—), 男, 硕士生, 从事无线网络资源优化分配等研究.

在两层 femtocell 网络中通过使用博弈论的方法实现分布式功率控制以减小干扰; 文献 [8] 研究了在频谱共享的两层网络中, 基于定价机制的功率分配策略. 另外, 还有一些关于认知无线电的文献通过改变功率来减小跨层干扰. 如文献 [9] 提出在认知无线电中, 采用非合作博弈的方法调整功率, 通过次优化的方法得到最优功率, 其目的是通过最大化各自效用来减小两层干扰, 但对于纳什均衡点的存在性和唯一性缺乏证明; 文献 [10] 提出在新型的合作认知无线电模型下, 以认知用户作为中继, 授权用户与认知用户根据各自的传输速率和收益来最大化各自效应, 从而实现干扰管理.

尽管上述文献对于 femtocell 的干扰问题已经提出了一些解决方法, 但大部分都集中在功率控制, 即将功率控制在某一个可接受的范围之内, 却没有考虑到当干扰减小后, 伴随产生诸如吞吐量、用户效用等服务质量的变化. 另外, 由于家庭基站安装的位置和数量的随机性, 使得集中式控制方案的实现较为困难. 因此, 本文研究了可兼顾功率调整和网络服务质量性能的分布式干扰管理方案.

本文研究了一个宏基站服务于多个家庭基站的 femtocell 双层网络结构, 提出了基于非合作博弈的分布式功率控制方案, 对构成博弈的条件进行分析, 证明了非合作博弈纳什均衡点的存在性和唯一性, 从而得到家庭基站用户在非合作博弈条件下唯一的均衡点. 本文提出两个算法, 即用户选择算法和功率调整算法. 通过用户选择算法选择符合条件的家庭基站用户; 通过功率调整算法调整宏基站的定价参数, 对家庭基站用户进行适当的奖惩和激励, 从而控制功率, 实现跨层干扰控制. 仿真结果表明, 该算法在保证快速收敛的同时, 可有效提高系统的吞吐量, 保证宏基站用户的服务质量.

1 系统模型

本文考虑的是 femtocell 双层网络结构模型. 假定该系统由一个宏蜂窝网络和若干 femtocell 网络组成, 其中宏基站位于中心, 服务一个半径为 R 的区域. 为了表示方便, 这里仅给出两个家庭基站网络. 在此区域中, 家庭基站与宏蜂窝使用相同的频谱, 每个家庭基站服务 4~6 个无线用户. 另外, 假设在任何给定的频谱段内, 每个家庭基站在每个信令时隙内至多有一个可调度的用户. 在本文中, 主要研究的是在某一共享频谱带上家庭基站网络的上行链路的传输, 其网络架构如图 1 所示.

在图 1 中, 宏蜂窝用 MBS 表示, 家庭基站网络由家庭基站和家庭基站用户组成, 其中家庭基站用 FBS 表示, 家庭基站用户用 FUE 表示. FUE 表示在第 i

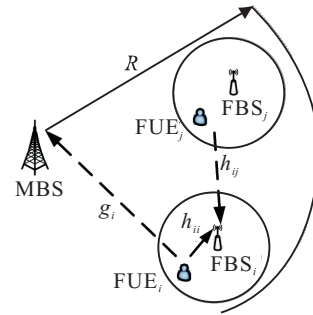


图 1 网络结构示意图

个 FBS 服务下可调度的家庭基站用户. 假定所有涉及到的信道都是成块衰落的, 即信道在某个传输块是常数, 但是变换到另一个传输块就发生变化. 假定用户 i 与 FBS _{i} 间的链路信道功率增益为 h_{ii} , 用户 i 与 FBS _{j} 间的链路信道功率增益为 h_{ij} , 用户 i 与 MBS 间的链路信道功率增益为 g_i . 另外, 假定所有的信道功率增益都是独立同分布的随机变量, 并且其概率密度函数是连续的. 假定 FBS 与 MBS 之间的加性噪声是独立的循环对称高斯随机变量, 并且其均值为 0, 方差为 σ^2 .

2 功率控制策略

根据图 1 所示的网络模型, 假定家庭基站用户之间的信息交换行为是随机且自私的. 考虑到宏基站所能承受的干扰不能超过给定阈值, 因此将宏基站可容忍的干扰限制视为一种家庭用户可利用的干扰资源, 充当领导者, 家庭基站用户充当追随者. 首先, 领导者发布一个价格, 追随者根据这个价格互相争夺宏基站提供的资源, 目的是使各自的效用达到最大化; 然后, 将该响应反馈到领导者那里, 领导者根据该反馈调整价格, 目的是使其收益达到最大化; 从而, 宏基站与家庭基站间以及家庭基站用户间就构成了博弈. 本文主要研究的是家庭基站用户间的非合作博弈.

2.1 效用函数

对于 femtocell 用户而言, 由图 1 可知, 如果将用户 i 的传输功率表示为 P_i , 则 FBS _{i} 接收的信噪比可表示为

$$\gamma_i = \frac{p_i h_{ii}}{\sum_{j \neq i} p_j h_{ij} + \sigma^2}, \quad \forall i \in \{1, 2, \dots, N\}, \quad (1)$$

其中 σ^2 表示在该通信环境条件下的高斯噪声. 用户的效用函数可表示为

$$U_i(p_i, \mathbf{p}_{-i}, \lambda) = \mu_i \log(1 + \gamma_i) - \lambda g_i p_i. \quad (2)$$

其中: μ_i 表示用户 i 单位传输速率的增益; λ 表示 MBS 发布的干扰价格; \mathbf{p}_{-i} 表示除用户 i 之外的所有用户功率的分配向量, 可表示为 $\mathbf{p}_{-i} = [p_1, p_2, \dots, p_{i-1}, p_{i+1}, \dots, p_N]^T$. 式 (2) 为家庭用户的净收益, 等式右端的第 1 项可理解为用户的收益, 第 2 项为获得该收

益所付出的成本. 为了表示方便, 令 $c_i = \lambda g_i p_i$, $x_i = \lambda g_i$, 则式(1)和(2)可表示为

$$\gamma_i = \frac{c_i/x_i h_{ii}}{\sum_{j \neq i} \frac{c_j}{x_j h_{ij}} + \sigma^2}, \forall i \in \{1, 2, \dots, N\}; \quad (3)$$

$$U_i(c_i, \mathbf{c}_{-i}) = \mu_i \log(1 + \gamma_i) - c_i. \quad (4)$$

式(4)可看成是成本与收益之间的关系, 即当成本变高时, 收益减小; 成本减小时, 收益变高. 换言之, 家庭基站用户的目的是使用最小的成本获取最大的收益, 因此需要在成本与吞吐量之间实现一个折衷. 于是, femtocell 用户的目标函数可表示为

$$\begin{aligned} \max \quad & U_i(c_i, \mathbf{c}_{-i}, \lambda), \\ \text{s.t.} \quad & 0 \leq c_i \leq c_{\max}. \end{aligned} \quad (5)$$

对于宏基站来说, 其目标是从卖给家庭基站用户的干扰配额中获得最大的收益, 用经济学的观点表示就是完全获取买家付出的成本. 因此, 宏基站效用函数的数学表达式为 $U_{\text{MBS}} = \sum_{i=1}^N c_i$, 其目标是最大化自己的总效用. 另外, 假定 MBS 能承受的最大干扰功率限制为 Q , 则该限制条件可表示为 $\sum_{i=1}^N \frac{c_i}{\lambda} \leq Q$, 故宏基站的优化模型可表示为

$$\begin{aligned} \max \quad & U_{\text{MBS}}, \\ \text{s.t.} \quad & \sum_{i=1}^N \frac{c_i}{\lambda} \leq Q. \end{aligned} \quad (6)$$

式(5)优化的变量为 c_i , 式(6)优化的变量为 λ .

2.2 博弈论分析

由于各家庭基站用户是自私的, 其目的都是使各自的效用达到最大. 它们以非合作的方式进行博弈, 博弈的理想结果是获得纳什均衡点. 在纳什均衡点, 竞争者在保持当前策略的情况下, 任意竞争者不可能通过单方面改变自己的策略来提高自己的效用, 即为博弈平衡态. 其博弈模型可表示为 $G = [s, \{c_i\}, U_i(\cdot)]$. 其中: s 表示在宏基站服务下的博弈者集合, c_i 表示第 i 个策略, $U_i(\cdot)$ 表示用户 i 的效用函数. 特别地, 策略集合 $C = \{c_i\}_{i \in s} : 0 \leq c_i \leq c_{\max}$, 其目的是最大化效用函数 $U_i(c_i, \mathbf{c}_{-i})$.

下面分析纳什均衡的存在性和惟一性. 为了证明此非合作博弈纳什均衡点的存在性, 首先给出以下定义和命题.

定义 1 支付向量 $c = \{c_i, c_{i+1}, \dots, c_k\}$ 是 $G = [s, \{c_i\}, U_i(\cdot)]$ 的一个纳什均衡, 若对于任何 $i \in s$, 都有 $u_i(c_i^*, \mathbf{c}_{-i}) \geq u_i(c_i, \mathbf{c}_{-i})$, 则 c_i^* 即为该非合作博弈的纳什均衡点, 其中 \mathbf{c}_{-i} 为其他博弈者支付选择的结果.

定义 2 如果对于所有的 $i \in s$, 一个纳什均衡

点存在于博弈 $G = [s, \{c_i\}, U_i(\cdot)]$ 中, 则必须满足:

- 1) c_i 为欧氏空间中非空的、凸面的, 且紧凑的子集;
- 2) $U_i(c)$ 为关于 c 的连续函数, 也为关于 c_i 的凹函数.

定理 1 (存在性) 在 $G = [s, \{c_i\}, U_i(\cdot)]$ 中纳什均衡点是存在的.

证明 由于策略空间被定义成 $C = \{c_i\}_{i \in s} : 0 \leq c_i \leq c_{\max}$, 导致它在欧氏空间中是非空的、凸面的, 且紧凑的子集. 在效应函数 $U_i(c_i, \mathbf{c}_{-i}) \mu_i \log(1 + \gamma_i) - c_i$ 中, $U_i(c)$ 是关于 c 的连续函数, 则分别取 $U_i(c)$ 对于 c 的一阶和二阶导数, 可得

$$\frac{\partial U_i}{\partial c_i} = \frac{\mu_i (h_{ii}/x_i)}{\sum_{j \neq i} \frac{c_j}{x_j} h_{ij} + \sigma^2 + \frac{c_i}{x_i} h_{ij}} - 1, \quad (7)$$

$$\frac{\partial^2 U_i}{\partial c_i^2} = \frac{-\mu_i (h_{ii}^2/x_i^2)}{\left(\sum_{j \neq i} \frac{c_j}{x_j} h_{ij} + \sigma^2 + \frac{c_i}{x_i} h_{ij}\right)^2} < 0. \quad (8)$$

U_i 对于 c_i 的二阶导数小于 0, 因此 $U_i(c)$ 是关于 c_i 的凹面函数. 综上所述可知, 该非合作博弈存在纳什均衡点. \square

定理 2 (惟一性) 该博弈存在惟一的纳什均衡点.

证明 由定理 1 可知, 存在一个纳什均衡点, 这里用 $\mathbf{c} = \mathbf{r}(c)$ 来表示, 其中 $\mathbf{r}(c) = r_1(c), r_2(c), \dots, r_k(c)$, $r_i(c)$ 为博弈者 i 的最优响应函数, 同时考虑其他博弈者 $r_i(c) = r_i(\mathbf{c}_{-i})$ 的支付选择. 该博弈惟一性证明的关键是证明最优响应 $\mathbf{r}(c)$ 是标准函数, 因为当某一个函数是标准函数时, 它存在惟一解.

首先给出标准函数须满足的条件: 1) 正定性: 即 $r(c) > 0$; 2) 单调性: 如果 $c \geq c'$, 则 $r(c) > r(c')$; 3) 可扩展性: 对于任何 $a > 1$, $ar(c) > r(ac)$.

令 U_i 对于 c_i 的一阶导数为 0, 则可以得到在不同限制条件下方程的解, 即

$$r_i(c) = \begin{cases} 0, & \sum_{j \neq i} \frac{c_j}{x_j} h_{ij} \geq t_1; \\ \left(\sum_{j \neq i} \frac{c_j}{x_j} + \sigma^2\right) x_i, & t_2 < \sum_{j \neq i} \frac{c_j}{x_j} h_{ij} < t_1; \\ \mu_i - \frac{\mu_i h_{ii}}{h_{ii}}, & \\ c_{\max}, & \sum_{j \neq i} \frac{c_j}{x_j} h_{ij} \leq t_2. \end{cases} \quad (9)$$

其中

$$t_1 = \frac{\mu_i h_{ii}}{x_i} - \sigma^2, \quad t_2 = \frac{(\mu_i - c_{\max}) h_{ii}}{x_i} - \sigma^2.$$

现在考虑式(9)中的第 2 种情况, 即

$$\frac{(\mu_i - c_{\max}) h_{ii}}{x_i} - \sigma^2 < \sum_{j \neq i} \frac{c_j}{x_j} h_{ij} < \frac{\mu_i h_{ii}}{x_i} - \sigma^2$$

时, 验证 $r_i(c)$ 为标准函数.

首先证明 $r_i(c)$ 的正定性. 给定如下限制条件:

$$\sum_{j \neq i} \frac{c_j}{x_j} h_{ij} < \frac{\mu_i h_{ii}}{x_i} - \sigma^2,$$

有

$$r_i(c) = c_i^* = \frac{\left(\sum_{j \neq i} \frac{c_j}{x_j} + \sigma^2 \right) x_i}{\mu_i - \frac{\mu_i h_{ii}}{x_i} - \sigma^2} > \mu_i - \frac{\mu_i h_{ii}}{x_i} = 0,$$

故最优响应函数始终是正定的.

至于单调性, 由 $c \geq c'$, 易得到 $r(c) - r(c') < 0$, 故该函数是单调递减的, 满足单调性.

对于可扩展性, 可得

$$ar(c) - r(ac) = (a-1) \left(\mu_i - \frac{\sigma^2 x_i}{h_{ii}} \right) \cdot \frac{\left(\sum_{j \neq i} \frac{c_j}{x_j} + \sigma^2 \right) x_i}{h_{ii}}$$

因为 $a > 1$, $\mu_i > \frac{\sigma^2 x_i}{h_{ii}}$, 所以 $ar(c) - r(ac) > 0$, 于是可扩展性得证.

综上所述, 由于最优响应 $r_i(c)$ 满足正定性、单调性和可扩展性, 该函数是标准函数. 因此, 该非合作博弈存在唯一的纳什均衡点. \square

当 $i = 1, 2, \dots, k$ 时, 上述问题由 k 个等式组成, 则通过计算可以得到该纳什均衡最优解

$$c_i^* = \frac{\mu_i}{k} - \frac{\sigma^2 x_i}{h_{ii} k}, \quad (10)$$

于是得到最优功率

$$p_i^* = \frac{\mu_i}{\lambda^* g_i k} - \frac{\sigma^2}{h_{ii} k}. \quad (11)$$

此时的限制条件变为

$$\frac{(\mu_i - c_{\max}) h_{ii}}{\lambda^* g_i} - \sigma^2 < \sum_{j \neq i} \frac{\left(\frac{\mu_j}{k} - \frac{\sigma^2 x_j}{h_{jj} k} \right) h_{ij}}{\lambda^* g_j} < \frac{\mu_i h_{ii}}{\lambda^* g_i} - \sigma^2.$$

注 1 为了更有效地选择家庭基站用户, 提高网络的服务质量, 在这里设置用户选择算法. 首先根据式 (10) 计算家庭基站的最优响应 c_i . 如果其值小于 0, 则剔除该家庭基站用户; 如果其值大于家庭基站允许的最大阈值 c_{\max} , 则令 $c_i = c_{\max}$, 此时家庭基站输出为 c_{\max} ; 如果它满足 $0 < c_i < c_{\max}$, 则可以得到最优解 $c_i = c_i^*$.

注 2 本文仅讨论式 (9) 中的第 2 种情况, 第 1 和第 3 种情况 (即边界情况) 无需再作讨论. 因为当 $\sum_{j \neq i} \frac{c_j}{x_j} h_{ij} \geq \frac{\mu_i h_{ii}}{x_i} - \sigma^2$ 时, $c_i^* = 0$, 而 $\lambda \neq 0$, 所以 $p_i^* = 0$, 此时该家庭基站用户不参与博弈, 故不需要考虑. 当

$$\frac{(\mu_i - c_{\max}) h_{ii}}{x_i} - \sigma^2 \leq \sum_{j \neq i} \frac{c_j}{x_j} h_{ij}$$

时, 有 $c_i^* = c_{\max}$, 但此时家庭基站用户对宏基站会产生很强的干扰, 调整的最终结果仍为第 2 种情况.

2.3 宏蜂窝基站效用

根据上面博弈论分析的结果, 宏基站的目的是利用从家庭基站用户那里收取的干扰配额, 最大化自己的效用. 将式 (10) 代入 (6) 可得

$$\begin{aligned} \max \sum_{i=1}^N c_i &= \max \sum_{i=1}^N \left(\frac{\mu_i}{k} - \frac{\sigma^2 x_i}{h_{ii} k} \right), \\ \text{s.t. } \sum_{i=1}^N \frac{\left(\frac{\mu_i}{k} - \frac{\sigma^2 x_i}{h_{ii} k} \right)}{\lambda} &\leq Q. \end{aligned} \quad (12)$$

由于 $x_i = \lambda g_i$, c_i^* 是凸函数, 很明显可以看出该问题是凸优化问题, 其最优解必须满足 KKT 条件. 通过 KKT 条件, 可获得其最优解.

由 KKT 条件可写出其拉格朗日函数

$$\begin{aligned} L(\eta, \lambda) &= \sum_{i=1}^N \left(\frac{\mu_i}{k} - \frac{\sigma^2 x_i}{h_{ii} k} \right) - \eta \left(\sum_{i=1}^N \frac{\left(\frac{\mu_i}{k} - \frac{\sigma^2 x_i}{h_{ii} k} \right)}{\lambda} - Q \right), \end{aligned} \quad (13)$$

同时满足

$$\sum_{i=1}^N \frac{\left(\frac{\mu_i}{k} - \frac{\sigma^2 x_i}{h_{ii} k} \right)}{\lambda} = Q.$$

将式 (13) 对 λ 求导可得到该凸优化问题的最优解

$$\lambda^* = \frac{\sum_{i=1}^N \mu_i}{kQ + \sum_{i=1}^N \frac{\sigma^2 g_i}{h_{ii}}}. \quad (14)$$

结合最优价格与家庭基站用户代价, 可得出如下功率控制算法.

Step 1: 宏基站根据式 (14) 计算最优解 λ^* , 然后将其广播给家庭基站用户.

Step 2: 每个家庭基站首先进行计算, 找到符合条件的最优响应, 获得最优解 c_i^* , 并以该最优解进行工作.

Step 3: 宏基站测量接收总的干扰, 并根据干扰调整价格, 当 $\sum_{i=1}^N \frac{c_i}{\lambda} > Q$ 时, 宏基站增加 $\Delta\lambda$ 价格, 并将价格广播给家庭基站用户, 然后跳到 Step 2; 当 $\sum_{i=1}^N \frac{c_i}{\lambda} < Q$ 时, 宏基站减小 $\Delta\lambda$ 价格, 并将价格广播给家庭基站用户, 然后跳到 Step 2.

Step 4: 重复上述过程, 直至 $\left| \sum_{i=1}^N \frac{c_i}{\lambda} - Q \right| \leq \varepsilon$.

3 仿真研究

考虑家庭基站用户的总效用随干扰功率限制的变化, 干扰价格随干扰功率限制的变化, 干扰价格随迭代次数的变化以及宏基站的总收入随干扰功率限制的变化, 网络的场景描述如下: 宏基站位于区域中心, 服务于若干个家庭基站, 而且每个家庭基站服务至多一个可调度的家庭基站用户. 本文仿真中选择4个家庭基站, 设噪声的方差 $\sigma^2 = 1$, 支付因数 μ_i 对于 $\forall i$ 都相等且都为1. 信道功率增益的选择参考文献 [8], 分别选为 $h_{11} = 1, h_{22} = 1, h_{33} = 1, h_{44} = 1, g_1 = 0.001, g_2 = 0.01, g_3 = 0.1, g_4 = 1$, 干扰价格的变化量取 $\Delta\lambda = 0.01$.

3.1 家庭基站用户的总效用随干扰功率限制的变化

首先考察允许的干扰限制对家庭基站用户效用的影响, 仿真结果如图2所示.

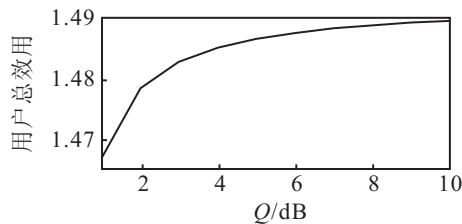


图2 家庭基站用户的总效用随干扰功率限制的变化

由图2可见, 随着干扰功率限制 Q 的增加, 家庭基站用户的总效用随之增加, 对应的吞吐量随之增大, 呈现出先快后慢的变化趋势. 当干扰功率限制 Q 足够大时, 其总效用有趋于饱和的态势. 这说明当允许的干扰功率限制 Q 足够大时, 家庭基站对宏基站的影响不大.

3.2 干扰价格随干扰限制的变化

干扰价格与干扰限制阈值的关系如图3所示. 由图3可见, 随着用户数量的增加, 干扰价格也随之增加, 其目的是通过增加价格来惩罚家庭基站用户, 增加宏基站的收入, 从而达到干扰在一定限制条件下使宏基站收入最大化的目的. 这种变化趋势与式 (14) 所表示的特征相吻合. 另外, 随着干扰功率限制 Q 的增加, 干扰价格逐渐减小, 最后趋向于一个平衡, 当干扰功率上限足够大时, 不管用户数量的多少, 其干扰价格都趋向于某一个值.

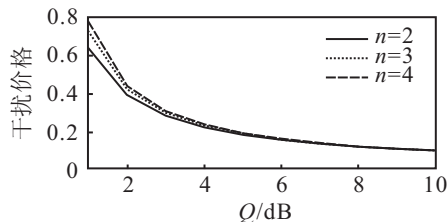


图3 干扰价格随干扰限制的变化

3.3 干扰价格随着迭代次数的变化

算法的收敛速度如图4所示. 由图4可见, 随着迭代次数的增加, 干扰价格的变化逐渐趋向于平稳, 说明该迭代具有较好的收敛性. 此外, 干扰功率限制 Q 越大, 其需要迭代的次数越少, 收敛性能越好; 反之, 其迭代收敛特性要差一些. 另外还可以看出, 随着干扰功率限制 Q 的增加, 其达到平衡时干扰价格也会相应地减小. 这是因为当资源充足时, 如果希望短时间内消耗掉这些资源, 则必须降低其价格. 当资源相对稀少时, 希望通过多次决策确定价格. 目的是使其效用最大, 结果价格也相对高些. 这与经济学中的薄利多销和物以稀为贵有相似之处.

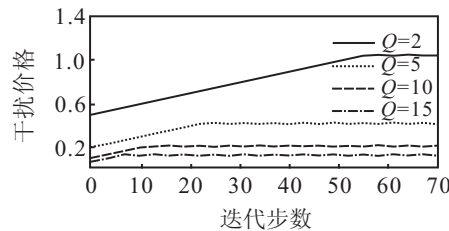


图4 收敛性

3.4 宏基站的收益随干扰功率限制的变化

宏基站的收益曲线如图5所示. 由图5可知, 随着干扰功率限制 Q 的增加, 宏基站的收入也在增加. 当干扰功率限制较小时, 宏基站的收入增加较快; 当干扰功率限制较大时, 宏基站的收入增加幅度变慢, 甚至趋于稳定; 而且随着用户数量的增加, 宏基站的收入也在不断增加. 这是因为, 随着干扰功率限制的提高, 更多的用户会接入到宏基站, 尽管宏基站的收入提高了, 但干扰量却变大了, 甚至有可能出现拥塞, 因此其变化趋势也变慢.

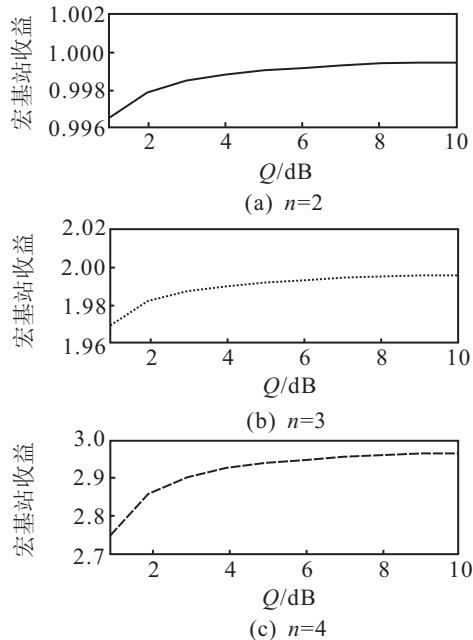


图5 宏基站的收入随干扰限制的变化

3.5 家庭基站速率和宏基站的总效用随家庭基站用户数量的变化

本文采用动态定价机制,利用价格杠杆指导用户理性竞争,最终达到综合效用最优的目的.图6和图7给出了在采用本文价格机制和统一定价两种情况下,家庭基站速率和宏基站的总效用分别随家庭基站用户数量的变化曲线.由图6可以看出,在一定的干扰限制条件下,随着家庭基站用户的增加,家庭基站的速率逐渐变小,最后趋于均衡;而且,在家庭基站用户数量一定的情况下,根据本文算法进行定价时的家庭基站速率比统一定价时的家庭基站的速率要高.由图7可以看出,在一定的干扰限制条件下,随着家庭基站用户数量的增加,宏基站的总效用逐渐增大,而且呈现出先快后慢的趋势.另外还可以看出,根据本文算法进行定价的宏基站总效用要高于统一定价时宏基站的总效用.这是因为,宏基站与家庭基站用户处于一个博弈的过程.随着博弈的进行,价格也在动态变化,其变化的目的是使宏基站效用最大化,家庭基站效用最大化.而统一定价,只是干扰价格变化的某一个状态,虽然也能使宏基站效用达到最大,但总是低于根据本文算法机制进行定价的情况,这也体现了用博弈进行功率控制的优点.

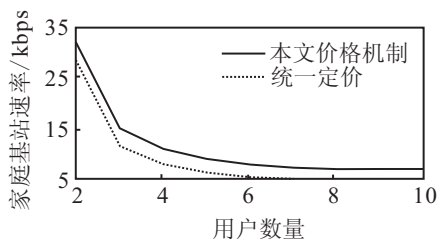


图6 家庭基站速率随用户数量的变化

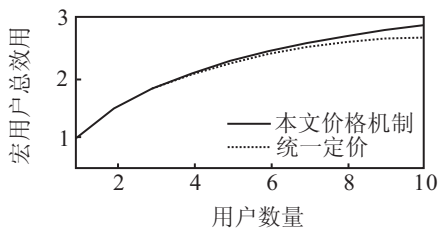


图7 宏用户的总效用随家庭基站用户数量的变化

4 结 论

本文针对 femtocell 双层网络结构中跨层干扰难以实现有效控制的问题,研究了基于非合作博弈的分布式功率控制.首先构建博弈模型,对博弈的条件进行验证;然后,对该博弈条件下纳什均衡点的存在性和唯一性进行了证明.另外,所提出的分布式功率调整控制算法不仅实现了博弈双方的效用最大化,保证了网络的服务质量,而且具有较好的收敛性,有效地实现了跨层干扰的控制.尽管本文方法对解决跨层干

扰有一定的作用,但却没有考虑在下行链路的情况下宏基站对家庭基站用户的跨层干扰,这也是下一步要进行的工作.

参考文献(References)

- [1] Chandrasekhar V, Andrews J G, Gatherer A. Femtocell networks: A survey[J]. IEEE Communications Magazine, 2008, 46(9): 59-67.
- [2] Park S, Seo W, Kim Y, et al. Beam subset selection strategy for interference reduction in two-tier femtocell networks[J]. IEEE Trans on Wireless Communication, 2010, 9(11): 3440-3449.
- [3] Karlsson R S. Radio resource sharing and capacity of some multiple access methods in hierarchical cell structures[C]. IEEE 50th Vehicular Technology Conf. Amsterdam, 1999, 5: 2825-2829.
- [4] 张宝, 邱玲. OFDMA femtocell 网络中混合接入方式下的资源分配策略[J]. 电子与信息学报, 2011, 33(11): 2569-2574.
(Zhang B, Qiu L. Resource allocation in hybrid access OFDMA femtocell networks[J]. J of Electronics Information Technology, 2011, 33(11): 2569-2574.)
- [5] Chandrasekhar V, Andrews J G, Muharemovic T, et al. Power control in two-tier femtocell networks[J]. IEEE Trans on Wireless Communication, 2009, 8(8): 4316-4328.
- [6] 张建敏, 张朝阳, 黄爱苹. 基于 OFDM 的双层 femtocell 网络中子信道、速率和功率的最优分配[J]. 中国科学技术大学学报, 2009, 39(10): 1034-1038.
(Zhang J M, Zhang C Y, Huang A P. Optimal subchannel, rate and power allocation for OFDM-based two-tier femtocell networks[J]. J of University of Science and Technology of China, 2009, 39(10): 1034-1038.)
- [7] Kang X, Liang Y C, Garg H K. WCA: Distributed power control for spectrum-sharing Femtocell networks using stackelberg game[C]. 2011 IEEE Int Conf. Singapore, 2011: 1-5.
- [8] Kang X, Zhang R, Motani M. Price-based resource allocation for spectrum-sharing femtocell networks: A stackelberg game approach[J]. IEEE J on Selected Areas in Communication, 2012, 30(3): 538-549.
- [9] Yu H, Gao L, Li Z, et al. Pricing for uplink power control in cognitive radio networks[J]. IEEE Trans Vehicular Technology, 2010, 59(4): 1769-1778.
- [10] Zhang J, Zhang Q. Stackelberg game for utility-based cooperative cognitive radio networks[C]. Proc of the 10th ACM Int Symposium on Mobile ad Hoc Networking and Computing. New Orleans, 2009: 23-32.

(责任编辑: 滕 蓉)