

基于Stackelberg和议价博弈的Femtocell网络功率控制

叶成荫^{1,2}, 梁 炜^{1†}, 郑 萌¹

(1. 中国科学院 沈阳自动化研究所, 沈阳 110016;
2. 辽宁石油化工大学 计算机与通信工程学院, 辽宁 抚顺 113001)

摘要: 针对Femtocell网络中存在的干扰问题,提出一种基于Stackelberg博弈和议价博弈的功率控制策略. 首先,给出既可以使Femtocell网络系统容量最大化,又可以体现效用公平的效用函数;然后,在保证宏小区用户效用最大化的条件下,考虑到Femtocell家庭用户的收益,给出Stackelberg博弈模型;接着,考虑到Femtocell家庭用户之间的效用公平和最小服务质量要求,给出基于议价博弈的Kalai-Smorodinsky议价解,并证明议价解的存在性和唯一性. 使用拉格朗日乘法给出宏小区的最优价格,保证宏小区的效用最大化. 仿真结果表明,该策略在满足宏蜂窝网络效用最大化的情况下,不但能够满足Femtocell家庭用户最小服务质量需求和公平性,而且Femtocell网络的收益也能得到较好的保证.

关键词: Stackelberg博弈; 议价博弈; Femtocell网络; 功率控制; 效用公平; Kalai-Smorodinsky议价解
中图分类号: TN911 **文献标志码:** A

Power control based on Stackelberg and bargaining game in Femtocell network

YE Cheng-yin^{1,2}, LIANG Wei^{1†}, ZHENG Meng¹

(1. Shenyang Institute of Automation, Chinese Academy of Sciences, Shenyang 110016, China; 2. School of Computer and Communication Engineering, Liaoning Shihua University, Fushun 113001, China)

Abstract: For the interference problem in the Femtocell network, a power control strategy is proposed based on the Stackelberg game and bargaining game theories. Firstly, a utility function is given to maximize system capacity and utility fairness. Then, under the condition of maximizing the utility of the Macrocell users, considering the revenue of the Femtocell users, a stackelberg model is proposed. After that, considering the utility fairness and minimum quality of service requirement between Femtocell users, the Kalai-Smorodinsky bargaining solution based on the bargaining game is given, and the existence and uniqueness of bargaining solutions are proved. The Lagrangian multiplier method is used to give the optimal price of the Macrocell, which ensures the utility of the Macrocell users. The simulation results show that the strategy can meet the minimum quality of service requirements of Femtocell users and ensure the fairness between the Femtocell users. Besides, the benefits of the Femtocell network can also be guaranteed.

Keywords: Stackelberg game; bargaining game; Femtocell network; power control; utility fairness; Kalai-Smorodinsky bargaining solution

0 引言

随着经济的发展,建筑物变得越来越密集,导致宏蜂窝网络的室内覆盖问题愈加严重. Femtocell技术因其能够拓展蜂窝网络覆盖,增强网络容量,得到了快速发展. 由于频谱稀缺,Femtocell双层网络一般采用共享授权频谱方式^[1],但是产生的跨层和同层干扰也严重限制了网络性能. 因此,设计有效的干扰抑制策略成为Femtocell网络研究的热点.

文献[2]通过对宏基站受到的干扰进行定价,研

究了宏基站与Femtocell网络之间的Stackelberg博弈功率分配策略. 文献[3]考虑了成本约束的情况,从Stackelberg博弈的角度给出了用户选择算法和功率调整算法以实现跨层干扰控制. 文献[4]针对下行功率控制问题,采用Stackelberg博弈方法,提出了信道选择策略和功率控制策略. 文献[5]基于Stackelberg博弈给出了一致定价和非一致定价方案,保证了宏基站和Femtocell的效用最大化和QoS要求. 文献[6]通过引入Femtocell之间的干扰因子,提出了一种基于

收稿日期: 2017-12-28; 修回日期: 2018-07-29.

基金项目: 国家重点研发计划项目(2016YFF0202701); 国家自然科学基金项目(71661147005, 61673371).

责任编委: 吕金虎.

†通讯作者. E-mail: weiliang@sia.cn.

自适应干扰控制的功率控制算法,改善了 Femtocell 效益. 这些策略一般是以最大化 Femtocell 网络效用或 Femtocell 网络和 Macrocell 网络整体效用,利用 Femtocell 用户之间的相互竞争进行功率控制,忽略了 Femtocell 用户之间的公平性. 在非合作博弈中,由于家庭用户自私地选择传输功率来最大化家庭用户的效用,不能很好地保证家庭用户之间的公平性^[7]. 合作博弈能在效率与公平性之间获得最佳的折中. 文献 [8] 基于议价合作博弈提出了基于效用公平的功率控制算法,没有考虑提高 Macrocell 网络的效用. 因此,研究在最大化 Femtocell 网络效用和 Macrocell 网络效用的前提下,保证 Femtocell 用户间的效用公平和最小服务质量要求的功率控制策略是一个具有挑战性的问题.

针对 Femtocell 双层网络的上行功率控制问题,在兼顾最大化宏小区网络收益的情况下,考虑到 Femtocell 家庭用户之间的公平性和最小服务质量要求,提出了基于 Stackelberg 和议价博弈的功率控制方案. 首先,通过干扰定价将 Femtocell 双层网络的跨层干扰和同层干扰的上行功率控制问题转化为 Stackelberg 博弈问题. 考虑到 Femtocell 家庭用户之间的公平性和最小服务质量要求,给出了基于议价博弈的 Kalai-Smorodinsky 议价解,证明了议价解的存在性和唯一性,使用拉格朗日乘子法给出了宏小区的最优价格,保证了宏小区的效用最大化,并提出一种基于二分查找算法的分布式功率控制方案. 最后,通过仿真结果验证了所提出方案的有效性.

1 系统模型

1.1 网络模型

为了弥补宏蜂窝网络覆盖的不足,可以对 Femtocell 进行密集部署. 考虑由一个宏小区和多个 Femtocell 构成的双层网络系统,如图 1 所示.

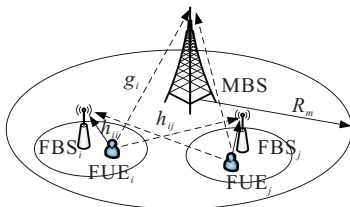


图 1 Femtocell 双层网络

宏小区中宏基站 (Macrocell base station, MBS) 的覆盖半径为 R_m . 在 Femtocell 网络中,每个家庭基站 (Femtocell base station, FBS) 服务多个家庭用户 (Femtocell user equipment, FUE). 为了方便研究,假设每个 FBS 在每个信令时隙内至多有一个 FUE 等待调度,信道增益仅考虑路径损耗和平坦瑞利衰

落的情况. 将 FUE_i 与 FBS_i 间的链路信道功率增益为 h_{ii} , FUE_i 与 FBS_j 间的链路信道功率增益为 h_{ij} , FUE_i 与 MBS 间的链路信道功率增益为 g_i , FBS_i 的背景噪声是均值为 0 方差为 σ_i^2 的高斯随机变量,为了简化分析,假设 $\sigma_i^2 = \sigma^2$,家庭用户 FUE_i 的传输功率为 p_i ,则 FBS_i 接收的信干噪比 (Signal to interference plus noise ratio, SINR) 表示为

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

1.2 Stackelberg 博弈建模

由于 MBS 掌握全局信息,令 MBS 充当领导者, FUE 充当跟随者. 考虑到 MBS 所能承受的干扰不能超过给定的干扰容限,将 MBS 能容忍的干扰限制看作是一种可利用的干扰资源,按照一定的价格出售给 FUE,从中获得最大的收益. FUE 根据干扰价格更新传输功率,最大化整个网络效用,最后达到 Stackelberg 博弈均衡.

Femtocell 网络的优化问题可以表示为

$$\max_{p=(p_1, p_2, \dots, p_N)} \sum_{i=1}^N U_i(p_1, p_2, \dots, p_N). \quad (2)$$

$$\text{s.t.} \quad \sum_{i=1}^N p_i \leq p_{\max}; \quad (3)$$

$$\gamma_i \geq \gamma_{\min}, \quad i = 1, 2, \dots, N. \quad (4)$$

其中: $p = (p_1, p_2, \dots, p_N)$ 为 FUE 的功率分配向量, $U_i(p_1, p_2, \dots, p_N)$ 为 FUE_i 的效用函数, p_{\max} 为最大传输功率, γ_{\min} 为最小 SINR.

宏小区网络的目标是从出售给家庭 FUE 的干扰份额中获得最大的收益,优化目标表示为

$$\max_{\lambda} U_{\text{MBS}}(\lambda); \quad (5)$$

$$\text{s.t.} \quad \sum_{i=1}^N p_i g_i \leq I_{\text{th}}. \quad (6)$$

其中: I_{th} 为干扰容限; U_{MBS} 为 MBS 的效用函数,有

$$U_{\text{MBS}} = \sum_{i=1}^N \lambda p_i g_i; \quad (7)$$

λ 为干扰价格.

注 1 式 (3) 表示所有 FUE 的传输功率总和小于 p_{\max} , 式 (4) 表示 FUE_i 的 QoS 保证最小为 γ_{\min} , 式 (6) 保护宏小区用户不至于受到 FUE 的过度干扰.

2 Femtocell 网络的 K-S 议价博弈

2.1 基于议价博弈的效用函数设计

由于 Femtocell 网络是多家庭用户网络,采用广义纳什议价博弈^[9]既能体现 Femtocell 网络的公平性,

又能使功率控制实现全局最优.

广义纳什议价博弈的均衡解,即纳什议价解 $p^* = (p_1^*, p_2^*, \dots, p_N^*)$ 可通过最大化纳什积获得,即

$$p^* = \arg \max_{U_i \in S, U_i \geq U_{i,\min}} \prod_{i=1}^N (U_i(p) - U_{i,\min}). \quad (8)$$

为了实现系统最小 QoS 保证以及 FUE 间的公平性,效用函数 U_i 可以定义为

$$U_i = \ln(\gamma_i - \gamma_{\min}). \quad (9)$$

效用函数 (9) 不仅能够反映 Femtocell 网络的系统容量,而且可以体现纳什公平,能够满足 FUE 的公平性^[10]. $U_{i,\min}$ 是 FUE_{*i*} 的最小效用,定义为

$$U_{i,\min} = \ln \lambda p_i g_i. \quad (10)$$

式 (10) 通过定价机制可以对 MBS 进行干扰保护.

由式 (8)~(10) 可以将 Femtocell 网络的优化问题转化为如下纳什议价合作博弈功率控制问题:

$$\max_{p=(p_1, p_2, \dots, p_N)} \sum_{i=1}^N \ln(\gamma_i - \gamma_{\min} - \lambda p_i g_i). \quad (11)$$

$$\text{s.t.} \sum_{i=1}^N p_i \leq p_{\max}; \quad (12)$$

$$\gamma_i \leq \gamma_{\min}, i = 1, 2, \dots, N. \quad (13)$$

2.2 K-S 议价解

K-S 议价解^[7] 是纳什议价合作博弈的一个具有帕累托优化的解,更能体现 FUE 间的公平性. 为了证明 Femtocell 优化问题 K-S 议价解的存在,需要证明可行效用集 S 是非空、闭、凸、有界集合.

由式 (10)~(12) 可以得到该可行效用集为

$$S = \left\{ (U_1, U_2, \dots, U_N) \mid \sum_{i=1}^N \frac{I_i e^{U_i}}{h_{ii} - \lambda g_i I_i} \leq \tilde{p}_{\max} \right\}. \quad (14)$$

其中

$$I_i = \sum_{j=1, j \neq i}^N p_j h_{ij} + \sigma^2, \tilde{p}_{\max} = p_{\max} - \sum_{i=1}^N \frac{\gamma_{\min}}{h_{ii} - \lambda g_i I_i}.$$

由式 (14) 可知,可行效用集 S 为非空、闭、有界集合,下面证明可行效用集 S 为凸集.

定义 1 (凸集)^[11] 令 $U^{(1)}$ 和 $U^{(2)}$ 为集合内任意两点,若存在任意 $\theta \in [0, 1]$,点 $\theta U^{(1)} + (1 - \theta)U^{(2)}$ 也属于该集合,则该集合为凸集.

定理 1 可行效用集 S 为凸集.

证明 若可行效用集 S 为凸集,则根据凸集的定义,需要证明下式成立:

$$\sum_{i=1}^N \frac{I_i e^{\theta U_i^{(1)} + (1-\theta)U_i^{(2)}}}{h_{ii} - \lambda g_i I_i} \leq \tilde{p}_{\max},$$

$$U^{(1)}, U^{(2)} \in S, \theta \in [0, 1]. \quad (15)$$

令

$$\phi(\theta) = \sum_{i=1}^N \phi_i(\theta), \phi_i(\theta) = \frac{I_i e^{\theta U_i^{(1)} + (1-\theta)U_i^{(2)}}}{h_{ii} - \lambda g_i I_i},$$

$\phi_i(\theta)$ 关于 θ 的二阶导数为

$$\frac{d^2 \phi_i(\theta)}{d\theta^2} = \frac{I_i e^{\theta U_i^{(1)} + (1-\theta)U_i^{(2)}}}{h_{ii} - \lambda g_i I_i} (U_i^{(1)} - U_i^{(2)})^2. \quad (16)$$

由 $U_i \leq U_{i,\min}$ 可知

$$\gamma_i - \gamma_{\min} \geq \lambda p_i g_i. \quad (17)$$

当 $\gamma_{\min} \neq 0$ 时,由式 (17) 可以得到

$$\gamma_i > \lambda p_i g_i. \quad (18)$$

由式 (1) 可知 $\gamma_i = p_i h_{ii} / I_i$,代入式 (18),可以得到

$$h_{ii} - \lambda g_i I_i > 0. \quad (19)$$

由式 (19) 可以得到 $d^2 \phi_i(\theta) / d\theta^2 \geq 0$,于是 $\phi(\theta) \geq 0$. 所以 $\phi(\theta)$ 为凸函数, S 为凸集, Femtocell 网络的优化问题存在 K-S 议价解. □

K-S 议价解要求用户的效用与最大效用成比例,是可行效用集 S 与如下线性集合 L 的交集:

$$L = \left\{ U \mid \frac{U_1}{\alpha_1 U_{1,\max}} = \frac{U_2}{\alpha_2 U_{2,\max}} = \dots = \frac{U_n}{\alpha_n U_{n,\max}} \right\}. \quad (20)$$

其中: $\sum_{i=1}^N \alpha_i = 1, \alpha_i > 0$. α_i 为归一化公平因子,反映了 FUE 对于公平性的态度. $U_{i,\max}$ 为 FUE 的最大效用,由 FUE 的 QoS 要求事先确定. 于是,问题转化为求解满足下式的标量 β :

$$U_i = \beta \alpha_i U_{i,\max}, i = 1, 2, \dots, N. \quad (21)$$

将式 (21) 代入 (14), 得到 β 的最优表示

$$\beta^* = \arg \max_{\beta} \left\{ \sum_{i=1}^N \frac{I_i e^{\beta \alpha_i U_{i,\max}}}{h_{ii} - \lambda g_i I_i} \leq \tilde{p}_{\max} \right\}. \quad (22)$$

在得到最优参数 β^* 后,由式 (11) 可以得到

$$e^{U_i(\beta^*)} = \frac{p_i h_{ii}}{I_i} - \gamma_{\min} - \lambda p_i g_i. \quad (23)$$

因此,由式 (13) 可以获得 Femtocell 网络各个家庭用户的最优传输功率为

$$p_i^* = \frac{I_i (e^{\beta^* \alpha_i U_{i,\max}} + \gamma_{\min})}{h_{ii} - \lambda g_i I_i}. \quad (24)$$

p^* 不仅能够保证 Femtocell 网络 FUE 之间的公平性,还是 K-S 议价博弈的帕累托最优解.

定理 2 p^* 是纳什议价合作博弈功率控制的帕累托最优解.

证明 证明过程分为两步,首先证明 p^* 满足纳什议价合作博弈功率控制问题中式 (12) 和 (13) 的约

束限制. 由式(22)可知, p^* 满足式(12)最大功率的约束限制. 由式(8)最大化纳什积定义可知 $U_i \geq U_{i,\min}$, 当最小期望收益 $U_{i,\min} = 0$ 时, 根据式(9)可以得到 $\ln(\gamma_i - \gamma_{\min}) \geq 0$, 即 $\gamma_i \geq \gamma_{\min} + 1$, 所以满足式(13)的约束限制.

然后, 证明当 $p = p^*$ 时, 可以满足目标函数(11), 使效用和达到最大. 将式(24)代入(11)得到

$$\sum_{i=1}^N U_i = \beta \sum_{i=1}^N \alpha_i U_{i,\max}. \quad (25)$$

α_i 和 $U_{i,\max}$ 是由 FUE 事先确定的议价因子和最大效用. 当 $\beta = \beta^*$ 时, $\sum_{i=1}^N U_i$ 最大, 于是 p^* 是纳什议价合作博弈功率控制的帕累托最优解. \square

2.3 宏小区网络的效用

宏基站为了最大化自己的效用, 通过对价格 λ 的调整向 FUE 收取费用, 同时还需要满足干扰限制约束条件. 将式(24)代入(5)~(7)可以得到

$$\max_{\lambda} \sum_{i=1}^N \frac{\lambda g_i I_i (e^{\beta^* \alpha_i U_{i,\max}} + \gamma_{\min})}{h_{ii} - \lambda g_i I_i}; \quad (26)$$

$$\text{s.t.} \sum_{i=1}^N \frac{g_i I_i (e^{\beta^* \alpha_i U_{i,\max}} + \gamma_{\min})}{h_{ii} - \lambda g_i I_i} \leq I_{th}. \quad (27)$$

根据 KKT 条件^[11], 可以得到

$$\sum_{i=1}^N \frac{h_{ii} g_i I_i (e^{\beta^* \alpha_i U_{i,\max}} + \gamma_{\min})}{(h_{ii} - \lambda^* g_i I_i)^2} - \eta \sum_{i=1}^N \frac{(g_i I_i) (e^{\beta^* \alpha_i U_{i,\max}} + \gamma_{\min})}{(h_{ii} - \lambda^* g_i I_i)^2} = 0, \quad (28)$$

$$\eta \left(\sum_{i=1}^N \frac{g_i I_i (e^{\beta^* \alpha_i U_{i,\max}} + \gamma_{\min})}{h_{ii} - \lambda^* g_i I_i} - I_{th} \right) = 0, \quad \eta \geq 0.$$

由式(28)第2式可知, 如果 $\eta = 0$, 则式(28)第1式不存在. 所以由 $\eta \neq 0$ 可得

$$\sum_{i=1}^N \frac{g_i I_i (e^{\beta^* \alpha_i U_{i,\max}} + \gamma_{\min})}{h_{ii} - \lambda^* g_i I_i} - I_{th} = 0. \quad (29)$$

由式(29)可得到最优价格为

$$\lambda^* = \frac{I_{th} \sum_{i=1}^N h_{ii} - \sum_{i=1}^N g_i I_i (e^{\beta^* \alpha_i U_{i,\max}} + \gamma_{\min})}{I_{th} \sum_{i=1}^N g_i I_i}. \quad (30)$$

结合最优价格与二分查找算法, 可以得到如下功率控制算法.

Step 1: 初始化 MBS 价格 λ , 将其广播给 FUE. FUE 初始化传输功率 p , 设置 β 的下界 $l = \beta_{\min}$, 上界 $u = \beta_{\max}$ 以及一个很小的精确度参数 $\varepsilon > 0$.

Step 2: 基于信道信息计算式(14)中的 \tilde{p}_{\max} , 当

$u - l > \varepsilon$ 时, 进行如下操作:

$$1) \text{ 计算 } \beta = \frac{l + u}{2}, \rho = \sum_{i=1}^N \frac{I_i e^{\beta \alpha_i U_{i,\max}}}{h_{ii} - \lambda g_i I_i};$$

2) 如果 $\rho \leq \tilde{p}_{\max}$ 成立, 则 $l = \beta$, 否则 $u = \beta$.

Step 3: 令 $\beta^* = \beta$, 由式(24)计算 p^* , 并将 β^* 发送给宏基站.

Step 4: 宏基站根据式(30)计算最优价格 λ^* . 当 $\sum_{i=1}^N \frac{g_i I_i (e^{\beta^* \alpha_i U_{i,\max}} + \gamma_{\min})}{h_{ii} - \lambda g_i I_i} \leq I_{th}$ 时, 宏基站增加 $\Delta \lambda$ 价格, 并将价格广播给 FUE, 然后转至 Step 2.

3 仿真研究

图2和图3仿真参数选择如下^[2]: 信道功率增益分别为 $h_{11} = 1, h_{22} = 1, h_{33} = 1, h_{44} = 1, g_1 = 0.001, g_2 = 0.01, g_3 = 0.1, g_4 = 1$, 背景噪声方差为 $\sigma^2 = 1$. 图4的仿真场景为10个FBS随机分布在以MBS为中心、半径为100m的区域内, 信道功率增益由 d^α 产生, d 和 α 分别为距离和路径衰减指数, 这里令 $\alpha = -2$. 本文所提算法的参数选择如下: FUE 的最大传输功率为 1 W, $\gamma_{\min} = 10 \text{ dB}$, $\Delta \lambda = 0.001$, 初始传输功率为 $p = 0$.

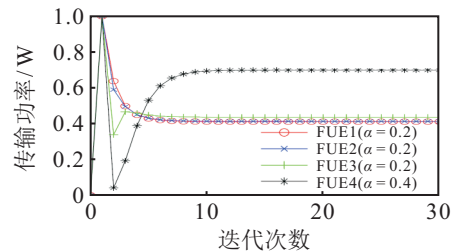


图2 传输功率的收敛性能

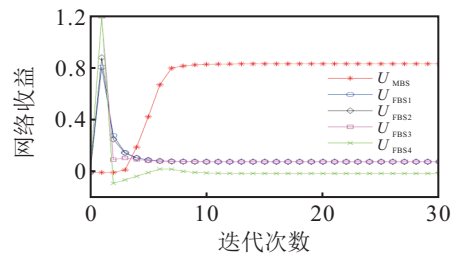


图3 网络收益

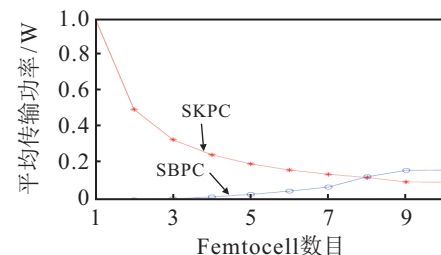


图4 FUE平均传输功率

图2为各FUE传输功率的收敛情况. FUE的公平因子分别为 $\alpha_1 = 0.2, \alpha_2 = 0.2, \alpha_3 = 0.2, \alpha_4 = 0.4$. 各FUE的传输功率在经过短暂的调整即可稳定到固

定值并保持不变. 此外, 虽然FUE₄距离宏基站较近, 受到了较大干扰, 但是由于FUE₄的公平因子所占份额较大, 使得FUE₄的功率得到了加强, 从而增强了抗干扰能力.

图3为宏蜂窝网络(MBS)和各Femtocell网络(FBS)的收益变化情况, 其中各FUE的公平因子 α_i 相等. 各网络在经过有限步激烈博弈后即可达到均衡状态. 宏蜂窝网络通过向各Femtocell网络定价并收取相应的干扰份额, 获得较大的收益. 各Femtocell网络在保证最小SINR需求、兼顾公平以及向宏蜂窝网络支出相应的成本的情况下, 也获得了收益均衡.

图4对本文提出的算法(SKPC)和经典基准功率控制算法^[12](SBPC)关于FUE的平均传输功率进行了比较. 经典基准功率控制算法如下:

$$p_i(t+1) = p_i(t) \frac{\gamma_{\text{target}}}{\gamma_i(t)}, \quad i = 1, 2, \dots, N, \quad (31)$$

其中 γ_{target} 为目标SINR, 设为10 dB. 当Femtocell数目较少时, SKPC算法对宏基站造成的干扰较小, FUE为了最大化效用导致传输功率较大, 而SBPC算法由于受到的干扰小传输功率较低. 随着小区数目的增多, SKPC算法为了保证用户的公平性, 传输功率逐渐减小, 而SBPC算法受到的干扰逐渐增加, 为了达到目标SINR, 传输功率也随之增大.

图5为SKPC算法和SBPC算法的平均SINR变化情况. 随着Femtocell数目的增多, SKPC算法为了保证FUE间的公平降低了SINR, 而SBPC算法需要增大功率才能保证获得目标SINR.

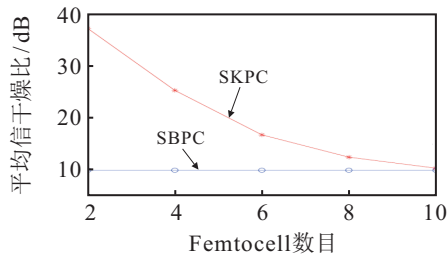


图5 FUE平均信噪比

4 结论

针对Femtocell双层网络中存在跨层和同层干扰问题, 本文提出了基于Stackerlberg和议价博弈的功率控制方案. 通过对跨层和同层干扰进行定价, 将Femtocell网络的上行功率控制问题转化为Stackelberg博弈问题. 为了保证FUE之间的公平性和最小QoS要求, 提出了K-S议价解, 证明了议价解的存在性和唯一性. 为了兼顾宏小区的效用最大化, 给出基于拉格朗日乘子法的宏小区的最优价格. 仿真结果表明, 所提出的分布式功率控制方案在保证宏小区用户最大收益的前提下, 不仅能满足FUE的最小

信噪比需求和FUE之间的公平性, 而且能有效地提高小区网络的收益.

参考文献(References)

- [1] Jo H S, Mun C, Moon J, et al. Interference mitigation using uplink power control for two-tier femtocell networks[J]. IEEE Trans on Wireless Communications, 2009, 8(9): 4906-4910.
- [2] 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 Communications, 2012, 30(3): 538-549.
- [3] Liu Z X, Li L, Ma K, et al. Distributed power control based on non-cooperative game in two-tier femtocell network[J]. Control and Decision, 2014, 29(4): 639-644.
- [4] Han S, Li X, Liu Z, et al. Distributed hierarchical game-based algorithm for downlink power allocation in OFDMA Femtocell networks[J]. Computer Networks, 2016, 94(C): 176-188.
- [5] Liu Z, Li S, Hao L, et al. Power control based on the stackelberg game in two-tier femtocell networks[J]. Physical Communication, 2017, 23(1): 1-11.
- [6] Zheng C Q, Pan P S. Power control algorithm in two-tier Femtocell networks based on game theory[J]. J of Nanjing University of Posts and Telecommunications: Natural Science, 2013, 33(6): 83-87.
- [7] Park H, Vand S M. Bargaining strategies for networked multimedia resource management [J]. IEEE Trans on Signal Processing, 2007, 55(6): 3496-3511.
- [8] Ma W M, Zheng W, Zhang H J, et al. Utility-based fairness power controlscheme in OFDMA femtocell networks[J]. J of Electronics & Information Technology, 2012, 34(9): 2287-2292.
- [9] Muhoo A. Bargaining theory with applications[M]. Cambridge: Cambridge University Press, 1999: 22-23.
- [10] Yang C G, Li J D, Tian Z. Optimal power control for cognitive radio networks under coupled interference constraints: A cooperative game-theoretic perspective[J]. IEEE Trans on Vehicular Technology, 2010, 59(4): 1696-1706.
- [11] Boyd S, Vandenberghe L. Convex optimization[M]. New York: Cambridge University Press, 2004: 257.
- [12] Koskie S, Gajic Z. A nash game algorithm for SIR-based power control in 3G wireless CDMA networks[J]. IEEE Trans on Networking, 2005, 13(5): 1017-1026.

作者简介

叶成荫(1977—), 男, 副教授, 博士, 从事通信网络系统的优化与控制等研究, E-mail: chengyinye@foxmail.com;
梁炜(1974—), 女, 研究员, 博士生导师, 从事无线传感器网络、工业无线网络等研究, E-mail: weiliang@sia.cn;
郑萌(1983—), 男, 副研究员, 博士, 从事无线自组织和传感器网络、工业无线网络等研究, E-mail: zhengmeng_6@sia.cn.

(责任编辑: 郑晓蕾)