

Femtocell 双层网络中基于博弈论的功率控制研究

周姝姝, 徐 扬

(南京邮电大学 通信与信息系统, 江苏 南京 210003)

摘 要:在频谱资源共享条件下, Femtocell 网络和 Macrocell 网络构成的双层网络间必然存在干扰。文中研究了功率控制在干扰抑制方面的作用, 使用非合作博弈模型描述系统, 对基于 Stackelberg 博弈的功率控制方法中的纳什均衡解进行分析证明, 并在此基础上结合一种优化 Femtocell 性能的链路保护方法, 进一步减少未满足信干噪比(Signal to Interference and Noise Ratio, SINR)要求的 Femtocell 用户设备(Femtocell User Equipment, FUE)数量。仿真结果表明, 改进算法能达到预期效果并有效提高了系统性能。

关键词: Femtocell; 功率控制; 非合作博弈; 信干噪比

中图分类号: TP31

文献标识码: A

文章编号: 1673-629X(2015)11-0168-04

doi: 10.3969/j.issn.1673-629X.2015.11.033

Study on Power Control in Two-tie Femtocell Networks Based on Theory Game

ZHOU Shu-shu, XU Yang

(College of Communication & Information Engineering, Nanjing University of Posts and
Telecommunications, Nanjing 210003, China)

Abstract: There must exist interference in the two-tie networks of Femtocell and Macrocell when they share the spectrum resource. In this paper, emphasize the study on the effect of power control to interference suppression by using non-cooperative game pattern to describe the system. Based on the analysis of the Nash equilibrium in Stackelberg game, a link protection method which optimizes Femtocell performance is combined to decrease the number of FUE not meeting the SINR requirements. Simulation results show that the modified algorithm can achieve the desired results and effectively improve the system performance.

Key words: Femtocell; power control; non-cooperative game; SINR

0 引 言

根据数据统计, 90% 的数据业务以及超过 60% 的语音通话都发生在室内^[1], 所以提高室内覆盖及业务质量显得尤为重要。而在第三代合作伙伴项目的长期演进计划中(3GPP LTE), 被称为家庭基站(HeNB 或 HBS)的 Femtocell 网络的提出, 可以作为宏小区的一种补充来为短距离用户提供可靠的服务, 以减小宏小区的通信负担, 从而提高网络覆盖率及容量。HBS 是一种范围小、发射功率低、体积小的微型基站, 且由用户部署和管理, 即插即用, 十分方便。但在 Macrocell 作为主层覆盖, Femtocell 作为第二层网络覆盖在主层之上的双层网络中, 它们两者同时工作, 所以当它们共享频谱资源时, 必然存在干扰问题。这种干扰包括两

者之间的跨层干扰和 Femtocell 之间的同层干扰, 过多的干扰会降低系统性能, 只有减小干扰, Femtocell 才能更广泛更有效地得到应用, 因此如何抑制这些干扰变得越来越重要。资源分配和功率控制是目前比较常用的方法, 文献[2-4]是利用资源分配方法来达到抑制干扰目的的, 但功率控制更常用, 它不仅能有效抑制双层网络中的干扰, 提升双层网络的性能, 而且能提高网络的能量利用率^[5]。国内外的学者专家也已经对功率控制进行了很多研究。文献[6]基于宏蜂窝基站(Macrocell Base Station, MBS)接收信号来配置 Femtocell 蜂窝基站(Femtocell Base Station, FBS)的发射功率; 文献[7]是关于在频谱共享的认知无线网络(Cognitive Radio Networks, CRNs)中利用限制干扰功

收稿日期: 2015-01-09

修回日期: 2015-04-16

网络出版时间: 2015-11-04

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(61271234)

作者简介: 周姝姝(1990-), 女, 研究生, 研究方向为无线数据与移动计算。

网络出版地址: <http://www.cnki.net/kcms/detail/61.1450.TP.20151104.0952.058.html>

率的最优化集中功率分配策略来保护基本用户;文献[8-10]是通过博弈论的方式来进行功率控制达到抑制干扰的目的。其中,文献[8]提出一种分布式功率控制方法;文献[9]研究定价机制的功率分配策略;文献[10]提出 CDMA 系统上行链路的功率控制算法。

考虑到传统的集中式功率控制方案需要巨大的信令开销,它们不再适用于 Macrocell 和 Femtocell 组成的双层网络,所以文中采用非合作博弈模型来描述系统,分析证明 Stackelberg 博弈功率控制方法中的纳什均衡解,并在此基础上与一种优化 Femtocell 性能的链路保护方法相结合,使得未满足 SINR 要求的 FUE 的数量减少。

1 系统模型

鉴于传统的博弈模型中,大多是将 Macrocell 作为主导者(leader),Femtocell 作为追随者(follower),没有通过 Stackelberg 博弈采取控制措施来提高总体的网络性能,所以这里考虑的是一个网络控制单元和 Femtocells 之间的博弈:网络功率控制器(Network Power Controller, NPC)作为主导者,和它连接的 Femtocells 作为追随者。如图 1,假设 N 个共信道的 FBS 随机分布在 OFDM Macrocell 网络的范围内,各个 FBS 和 MBS 属于同一个网络运营商,且各 FBS 通过有线宽带网络连接到运营商的骨干网络。这种网络结构由 Cisco 提出^[11]。

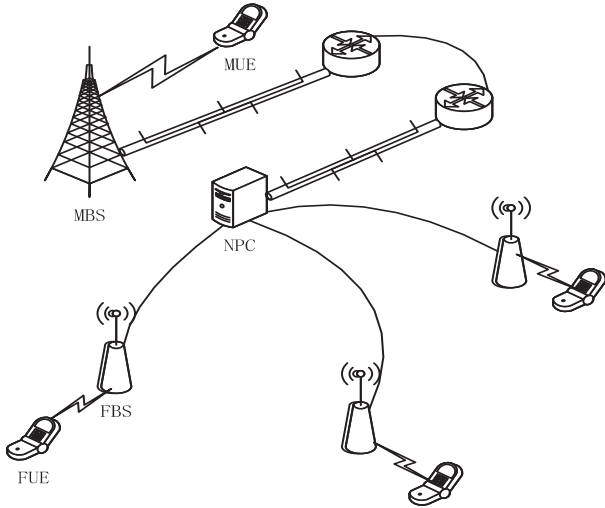


图 1 双层异构网络结构图

图 2 描述的是下行链路的传输模式。

为方便起见,假设每个时隙 Femtocell 或 Macrocell 中都只有一个用户终端,图中与 FUE 对应的就是 Macrocell 用户设备(Macrocell User Equipment, MUE),则 FBS_i 的用户表示为 $FUE_i (i = 1, 2, \dots, N)$, $i = 0$ 时代表的就是 MBS 和 MUE 之间的连接。在这种结构下, FUE_i 的接收 SINR 可以表示为:

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

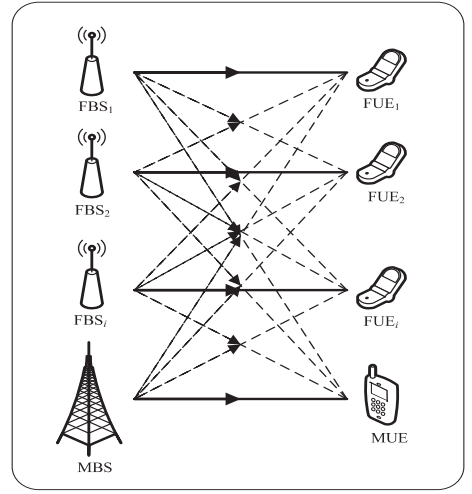


图 2 双层网络下行传输模式

其中, g_{ij} 表示 FBS_j 到 FUE_i 信道的功率增益,这是在假设信道都是独立同分布时得到的。同时由于室内 FUE 移动有限,所有信道是慢衰落,所以功率增益在一个时隙内保持不变。而 n_i 可以分成两部分:

$$n_i = p_0 g_{i0} + n, \forall i \in \{1, 2, \dots, N\} \quad (2)$$

其中, p_0 表示 MBS 的发射功率; g_{i0} 表示从 MBS 到 FUE_i 的跨层干扰信道的功率增益; n 表示在接收端均值为 0、方差为 σ^2 的加性高斯白噪声(Additive White Gaussian Noise, AWGN)。

由香浓公式可得 FBS_i 的传输速率为:

$$R_i(p_i) = w_i \log_2(1 + \gamma_i) \quad (3)$$

其中, w_i 表示 FBS_i 分配到的带宽。

2 效用函数及博弈论分析

2.1 效用函数

在 Stackelberg 博弈中,通常都是主导者先做出行动,跟随者观察到主导者的动作再行动,而且过程中还有进一步的约束:主导者知道追随者会观察它的选择,还知道追随者不能在将来采取非 Stackelberg follower 行动^[12]。这里 NPC 在每个时隙为 FBS 的功率消耗广播一个最新的价格,基于这个价格,每个 FBS 试图分布式地最大化它自己的效用函数。 FBS_i 的效用函数可以表示为:

$$\max_{p_i} U_i(p_i, \mathbf{p}_{-i}^*, \lambda) = R_i(p_i, \mathbf{p}_{-i}^*) - \lambda p_i \quad (4)$$

$$\text{s. t. } 0 \leq p_i \leq p_{\max}$$

其中, λ 表示 NPC 公布的价格; $\mathbf{p}_{-i}^* = \{p_1^*, p_2^*, \dots, p_{i-1}^*, p_{i+1}^*, \dots, p_N^*\}$ 表示除了 FBS_i 之外的 FBS 在均衡点处的功率向量; p_{\max} 表示 FBS_i 的最大发射功率,这里假设是一个很大的值。 FBS_i 的功率可以由注水法得到:

$$p_i^* = \left(\frac{w_i}{\lambda} - \sum_{\substack{j \geq 1 \\ j \neq i}}^N \frac{p_j^* g_{ij} + n_i}{g_{ii}} \right)^+ \quad (5)$$

其中, 右上标的+号表示大于等于 0 的数, 值得注意的是, 这里 p_i^* 是关于 λ 的函数。

另一方面, NPC 要设法降低各个 FBS 的发射功率, 但同时要保证每个 FBS 的速率高于最低 QoS 速率 R_{\min} , 而且 FBS 对 MUE 的干扰要低于 Macrocell 网络的最大承受值 Q 。所以 NPC 的效用函数可这样表示:

$$\max_{\lambda} U_N(\lambda) = - \sum_{i>1}^N p_i^*(\lambda) \quad (6)$$

$$\text{s. t.} \quad \sum_i p_i^*(\lambda) g_{0i} \leq Q$$

$$R_i(p_i^*(\lambda)) \geq R_{\min}, i = 1, 2, \dots, N, \lambda > 0$$

其中, g_{0i} 表示 FBS_{*i*} 到 MUE 信道的功率增益。

2.2 博弈论分析

式(4)和式(6)组成了由 NPC 充当主导者、 N 个 FBS 充当追随者的 Stackelberg 博弈。各个 FBS 的目的都是使自己的效用函数达到最大值, 它们是以非合作方式进行博弈, 博弈的“稳定”结果是达到纳什均衡; 没有一个决策者可以通过单独改变策略来优化其效用函数。即当 $\lambda > 0$ 时, 若 $(\lambda^E, \mathbf{p}^E)$ 是均衡点, 则 $U_N(\lambda^E, \mathbf{p}^E) \geq U_N(\lambda, \mathbf{p}^*)$ 。

下面的分析证明过程在理想的干扰模型下^[13]进行, 这种模型假设在多小区网络中, 不管小区的几何位置在哪里, 任意两个小区的信道增益都相等。在 Femtocell 网络中使用这种模型是合理的。首先, 因为 FBS_{*i*} 的覆盖范围比较小, 所以从 FBS 到它服务的 FUE 的路径损耗很小; 其次, 那些干扰的 FBS 发出的信号在建筑物间传送时有穿墙损耗。这两点使得信道功率增益

$g_{ii} \gg g_{ij}, i \neq j$, 且 $\sum_{\substack{j \geq 1 \\ j \neq i}}^N g_{ij} < g_{ii}$ 。因此, 与 g_{ii} 相比, $g_{ij}, i \neq j$ 之间的差别可以忽略, 可用一个常数 g 来代替, 它通过计算路径损耗和穿墙损耗得到。分析证明如下:

从式(5)可以看出, 当给定一个大于 0 的 λ 时, p_i^* 可以很快地算出来, 但是如果这个价格 λ 定得过低, 每个 FBS 都会以较高的功率发射, 总的干扰就会超过 Q , 如果定得过高, 一些 FBS 就可能满足不了其 FUE 的 QoS 要求 (高于 R_{\min}), 那么它们就要退出此次博弈。为了避免这样的情况, 每个 FBS 都必须有一个 λ 的上界和下界:

$$\lambda_i^U = 2^{-\frac{R_{\min}}{w_i}} \frac{g_{ii} w_i}{\sum_{\substack{j \geq 1 \\ j \neq i}}^N p_j^*(\lambda) g_{ij} + n_i} \quad (7)$$

$$\lambda_i^L = \frac{\sum_{i=1}^N \frac{w_i g_{0i} g_{ii}}{g_{ii} - g}}{Q + \sum_{i=1}^N \frac{w_i g_{0i} n_i}{g_{ii} - g}} \approx \frac{\sum_{i=1}^N w_i g_{0i}}{Q + \sum_{i=1}^N \frac{w_i g_{0i} n_i}{g_{ii}}} \quad (8)$$

定理 1: 在由 N 个 FBS 组成的系统中, 对于给定的 λ , 若满足以下条件, 那么就能在所有 FBS 参与博弈的前提下达到唯一的纳什均衡点:

$$(1) \quad \sum_{\substack{j \geq 1 \\ j \neq i}}^N g_{ij} < g_{ii}, i = 1, 2, \dots, N$$

$$(2) \quad \lambda^L \leq \lambda \leq \lambda^U$$

其中

$$\lambda^U = \min_{1 \leq i \leq N} \lambda_i^U, \lambda^L = \lambda_i^L \quad (9)$$

最优功率可以算得:

$$\mathbf{p}^* = \mathbf{G}^{-1} \mathbf{z} \quad (10)$$

\mathbf{G} 和 \mathbf{z} 由下面的式子给出:

$$\mathbf{G} = \begin{bmatrix} g_{11} & g_{12} & \cdots & g_{1N} \\ g_{21} & g_{22} & \cdots & g_{2N} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ g_{N1} & g_{N2} & \cdots & g_{NN} \end{bmatrix} \quad (11)$$

$$\mathbf{z} = \frac{w_i g_{ii}}{\lambda} - n_i, i = 1, 2, \dots, N \quad (12)$$

而前面分析理想的干扰模型下, 可用常数 g 来代替 $g_{ij}, i \neq j$, 所以

$$\mathbf{G}^{-1} \approx \text{diag}\left(\frac{1}{g_{ii} - g}\right) \quad (13)$$

则 \mathbf{p}^* 可以进一步表示为:

$$p_i^* = \frac{w_i g_{ii}}{g_{ii} - g} \left(\frac{1}{\lambda} - \frac{n_i}{g_{ii}} \right) \quad (14)$$

所以

$$U_N(\lambda) = - \sum_{i>1}^N p_i^*(\lambda) = - \sum_{i=1}^N \frac{w_i g_{ii}}{g_{ii} - g} \left(\frac{1}{\lambda} - \frac{n_i}{g_{ii}} \right) \quad (15)$$

要使 $U_N(\lambda)$ 最大, 只要使 $\sum_{i>1}^N p_i^*(\lambda)$ 最小即可, 也就是使 p_i^* 最小, 由于

$$\frac{\partial p_i^*}{\partial \lambda} = - \frac{w_i g_{ii}}{\lambda^2 (g_{ii} - g)} < 0 \quad (16)$$

这代表 p_i^* 是关于 λ 的递减函数, 所以 λ 的最大值就是要求的值。问题转化为:

$$\max_{\lambda} \lambda \quad (17)$$

$$\text{s. t.} \quad \lambda^L < \lambda \leq \lambda^U$$

所以结论就是 λ 的最优取值 λ^* 由式(9)给出; $(\lambda^*, \mathbf{p}(\lambda^*))$ 就是唯一的纳什均衡点 $(\lambda^E, \mathbf{p}^E)$ 。

3 链路保护方法

上述博弈达到均衡后, 并不一定是最理想的状态, 如果某些 FBS 到达其服务的 FUE 时, SINR 值低于最低的通信要求, 那么这些信号非但没有意义, 还会给周围的用户造成更多的干扰。考虑到这个问题, 可以通过调节价格 λ 来减少未满足 SINR 要求的 FUE 数量。

由上述分析可知,功率 p_i 是关于 λ 的递减函数,所以 λ 的降低必然引起发射功率 p_i 的提高:

(1)通过之前的算法获得均衡后 NPC 发布的最优价格和各个 FBS 的最优发射功率;

(2)FBS 判断其服务的 FUE 是否到达 SINR 阈值 γ_{thre} ,查找到所有未达到要求的 FUE(假设有 M 个)并向 NPC 汇报;

(3)NPC 收到后,将这些用户按 SINR 值从小到大排序即 $\gamma_i \leq \gamma_M \leq \gamma_{\text{thre}}, i = 1, 2, \cdots, M - 1$,之后广播和阈值相差最小的 γ_M ;

(4)FBS 判断广播的 SINR 值是否为自己 FUE 的 SINR 值,如果是则价格按 $\lambda_M = \lambda_M * \frac{\gamma_M}{\gamma_{\text{thre}}}$ 的方式下降,从而提高该 FBS 的发射功率,若满足式(6),则可以继续降低价格直到 $\gamma_M \geq \gamma_{\text{thre}}$;

(5)此时若仍然满足式(6),则可以降低与 γ_{M-1} 对应的价格,直至不再满足式(6)。

4 仿真与结果分析

根据以上分析,文中主要研究的是加入链路保护方法前后的对比。仿真场景描述如下:MBS 位于半径 1 000 m 的小区中心, N 个 FBS 随机分布于该范围内,还是如前文所述,假设每个时隙 Femtocell 或 Macrocell 中都只有一个用户终端,取方差 $\sigma^2 = 1$,为方便起见,其余的仿真参数参考文献[14]。

图 3 为加入链路保护方法前后,未达到 SINR 最低要求的用户数量的百分比随 FBS 数量 N 的变化情况。

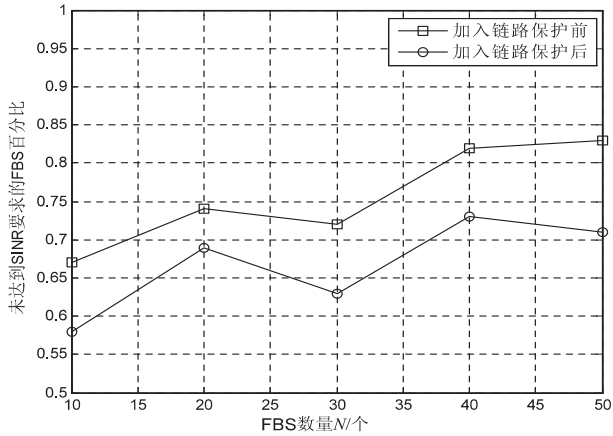


图 3 未达到 SINR 要求的 FBS 百分比

从图中易得:加入链路保护方法之后,低于 SINR 最低要求的用户数量进一步减少,因此能正常通行的用户数量更多,而且这种方法在 FBS 数量增加时对原有算法的优化更加明显。

图 4 为加入链路保护方法前后,FBS 数量 N 分别为 20 和 40 时功率效率随 Q 值的变化情况。

可以看出三点:

(1)随着干扰最大承受值 Q 的变大,功率效率呈现逐渐下降之势;

(2)比较两图可得当 FBS 数量 N 增大,功率效率会减小,这种减小是因为 N 的增大引起 FBS 之间的干扰变大;

(3)加入链路保护方法之后,功率效率会有所提高。

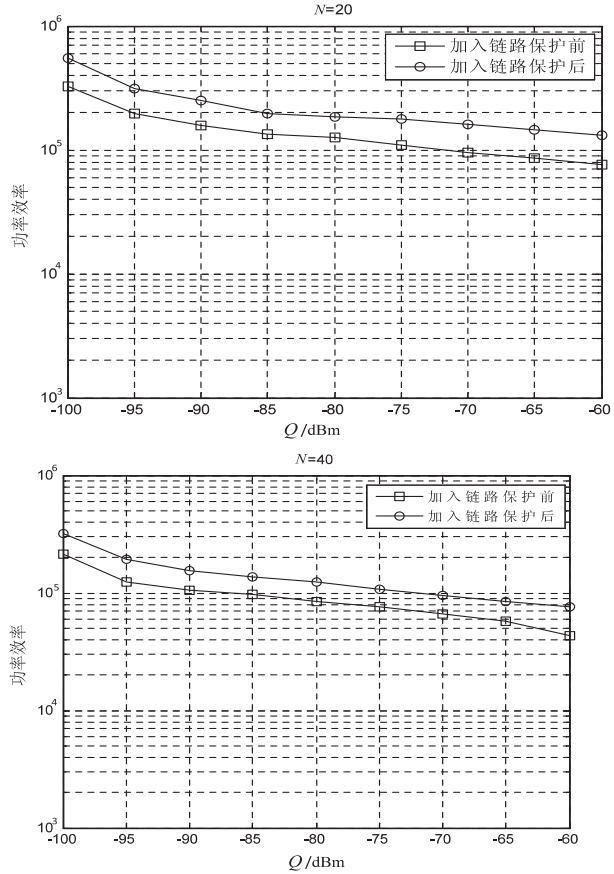


图 4 不同 N 值下的功率效率

5 结束语

文中针对 Femtocell 和 Macrocell 的双层网络中基于博弈论的功率控制进行了研究。首先使用非合作博弈模型来描述系统,分析证明 Stackelberg 博弈的纳什均衡解;然后在此基础上,结合一种优化 Femtocell 性能的链路保护方法,使得低于通信要求最低 SINR 值的用户数量减少,并提高系统性能;最后的仿真结果验证了该方案能达到预期的效果。

参考文献:

[1] Zhang Jie, de la Roche G. Femtocells: technologies and deployment[M]. [s. l.]: A John Wiley and Sons, Ltd, 2010.
[2] 陆相成,张莉,柏云. Femtocell 网络中基于保证公平性的频谱资源分配算法[J]. 计算机与现代化, 2014(9): 15-19.

仿真用时情况,仿真用时结果如表 1 所示。

表 1 仿真用时 s

步数(万步)	文献[1]算法	文中算法
10	2 327	2 240
15	3 485	3 357
20	4 643	4 474
25	5 802	5 592
30	6 970	6 708
35	8 143	7 833
40	9 316	8 956
45	10 484	10 077
50	11 654	11 198

根据仿真结果可知,将通信故障检测和恢复由在耦合器端实现改为在执行机端实现可以节约通信故障检测的时间,提高仿真计算速度。在执行机端进行的通信故障检测和恢复可以根据工况的运行特点,有针对性地选择进行故障检测的时间间隔,提高了单个工况在仿真过程中进行通信故障检测和恢复的灵活性。

4 结束语

该设计在执行机端实现了执行机与耦合器之间通信故障的检测和恢复,减少了耦合器进行通信故障检测和恢复的资源开销,并且在保证了耦合分布式仿真系统通信稳定性和可靠性的同时,增加了执行机和耦合器之间进行通信故障检测和恢复的灵活性。

参考文献:

[1] 杨岩岩,黄海于. 分布式仿真系统耦合器通信故障的检测

(上接第 171 页)

[3] 陆 婧. 基于 Femtocell 双层网络高能效的频谱分配技术研究[D]. 北京:北京邮电大学,2013.

[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.

[5] 苏 涛. 基于 Femtocell 双层网络的能量高效的功率优化技术研究[D]. 北京:北京邮电大学,2013.

[6] Claussen H, Ho L, Samuel L. Self-optimization of coverage for Femtocell deployments[C]//Proceedings of wireless telecommunications symposium. [s. l.]:[s. n.],2008:278-285.

[7] Kang X, Liang Y C, Nallanathan A, et al. Optimal power allocation for fading channels in cognitive radio networks:ergodic capacity and outage capacity[J]. IEEE Trans on Wireless Communication,2009,8(2):940-950.

[8] 刘志新,李 亮,马 锴,等. 基于非合作博弈的 femtocell 双层网络分布式功率控制[J]. 控制与决策,2014,29(4):

与恢复[J]. 计算机技术与发展,2013,23(10):204-207.

[2] 张卫华. 高速列车耦合大系统动力学理论与实践[M]. 北京:科学出版社,2013:144-151.

[3] 万春阳,黄海于. 分布式仿真系统的数据监控软件的实现[J]. 计算机技术与发展,2013,23(9):14-17.

[4] 向 鹏,黄海于. 耦合分布式仿真中任务调度的研究为实现[J]. 计算机技术与发展,2013,23(12):78-81.

[5] D' Angelo G, Marzolla M. New trends in parallel and distributed simulation:from many-cores to cloud computing[J]. Simulation Modelling Practice and Theory,2014,49:320-335.

[6] 郭奇胜,徐享忠. 计算机仿真[M]. 北京:国防工业出版社,2011:208-243.

[7] Fujimoto R M. Parallel and distributed simulation[C]//Proceedings of the 1999 winter simulation conference. [s. l.]:ACM,1999:122-131.

[8] Fujimoto R M. Parallel simulation:parallel and distributed simulation systems[C]//Proceedings of the 2001 Winter simulation conference. [s. l.]:IEEE Computer Society,2001:147-157.

[9] Fujimoto R M. Distributed simulation systems[C]//Proceedings of the 2003 Winter simulation conference. [s. l.]:IEEE,2003:124-134.

[10] 张 宇,黄海于. 耦合分布式系统多线程任务管理算法[J]. 成都大学学报:自然科学版,2012,31(3):251-253.

[11] 尹丽萍,毛 征,尹志新,等. 分布式半实物仿真平台的网络设计[J]. 系统仿真学报,2008,20(24):6862-6865.

[12] 孙海民. 精通 Windows Sockets 网络开发:基于 Visual C++实现[M]. 北京:人民邮电出版社,2008.

[13] 唐文超. Visual C++网络编程[M]. 北京:清华大学出版社,2013.

[14] 杨岩岩. 分布式耦合仿真系统故障的分析与研究[D]. 成都:西南交通大学,2013.

639-644.

[9] Kang X, Zhang R, Motani M. Price-based resource allocation for spectrum-sharing Femtocell networks: a stackelberg game approach[J]. IEEE Journal on Selected Areas in Communications,2012,30(3):538-549.

[10] 贾明华. CDMA 系统上行链路中基于博弈论的功率控制算法[D]. 合肥:安徽大学,2005.

[11] Cisco. Cisco Femtocell solution[EB/OL]. 2010. <http://www.cisco.com/>.

[12] 郑成铨. Femtocell 双层网络中上行链路功率控制方法的研究[D]. 南京:南京邮电大学,2013.


[13] Kiani S G, Gesbert D. Optimal and distributed scheduling for multicell capacity maximization[J]. IEEE Trans on Wireless Communications,2008,7(1):288-297.

[14] Li Peng, Zhu Yu. Power control of Femtocell networks based on Stackelberg game[C]//Proc of IEEE international conference. [s. l.]:IEEE,2012:535-540.

FemtoCell双层网络中基于博弈论的功率控制研究

作者：[周姝姝](#)，[徐扬](#)，[ZHOU Shu-shu](#)，[XU Yang](#)

作者单位：[南京邮电大学 通信与信息系统, 江苏 南京, 210003](#)

刊名：[计算机技术与发展](#)

英文刊名：[Computer Technology and Development](#)

年，卷(期)：2015, 25(11)

引用本文格式：[周姝姝](#). [徐扬](#). [ZHOU Shu-shu](#). [XU Yang](#) [FemtoCell双层网络中基于博弈论的功率控制研究](#)[期刊论文]

-[计算机技术与发展](#) 2015(11)