

OFDMA 毫微微小区双层网络中基于分组的资源分配

张海波^{*①②} 穆立雄^① 陈善学^① 彭焦阳^①

^①(重庆邮电大学重庆市移动通信重点实验室 重庆 400065)

^②(北卡罗来纳州立大学电子与计算机工程系 美国北卡罗来纳州 27695)

摘要: 毫微微小区(Femtocell)网络能够增强室内覆盖,提高系统容量,但是在频谱共享的正交频分多址(OFDMA)毫微微小区网络中,毫微微小区之间的同层干扰以及毫微微小区与宏小区(Macrocell)之间的跨层干扰严重限制了系统的性能。针对这两种干扰,该文提出一种基于分组的资源分配算法。该算法包括两部分:一部分是宏基站先利用改进的匈牙利算法为宏小区用户分配信道,再用注水算法分配功率,保证宏小区用户的正常传输;另一部分是在避免干扰宏小区用户的基础上,先采用模拟退火算法对毫微微小区进行分组,再进行信道和功率分配,满足毫微微小区用户的数据速率需求,最大化频谱效率。仿真结果表明,该算法有效地抑制了这两种干扰,既能保证用户的数据速率需求,又能有效提升网络频谱效率。

关键词: 无线通信;毫微微小区网络;资源分配;分组;正交频分多址

中图分类号: TN929.5

文献标识码: A

文章编号: 1009-5896(2016)02-0262-07

DOI: 10.11999/JEIT150699

A Cluster-based Resource Allocation in a Two-tier OFDMA Femtocell Networks

ZHANG Haibo^{*①②} MU Lixiong^① CHEN Shanxue^① PENG Jiaoyang^①

^①(Chongqing Key Laboratory of Mobile Communications Technology, Chongqing University of Posts and Telecommunications, Chongqing 400065, China)

^②(Department of Electrical and Computer Engineering, North Carolina State University, Raleigh, NC 27695, USA)

Abstract: Femtocell is a promising technology to enhance indoor coverage and system capacity. However, the co-tier and cross-tier interference impair greatly the network performance for spectrum-sharing OFDMA femtocell networks. To mitigate the co-tier/cross-tier interference, a cluster-based resource allocation algorithm is proposed. The proposed algorithm consists of two parts: In the first part, an improved Hungarian algorithm is first adopted to assign sub-channels to the Macro Users Equipments (MUEs). Then the averagely assigned power is reallocated in linear water-filling fashion in order to ensure the transmission of MUEs. In the other part, Simulated Annealing algorithm is first used to cluster femtocells into disjoint groups. Then under the condition of avoiding causing interference to MUEs, femtocells perform sub-channel and power allocation according to the rate requirements of Femtocell User Equipments (FUEs) to maximize spectrum efficiency. Simulation results show that the proposed algorithm not only guarantees the data rate requirements of users, but also improves the spectrum efficiency.

Key words: Wireless communication; Femtocell networks; Resource allocation; Cluster; OFDMA

1 引言

毫微微小区就是短距离、低功率、低成本的家庭小区,由用户部署通过DSL或光纤连接到核心网,

并且工作在授权频带。毫微微小区不仅可以为用户提供更好的室内体验,还能够卸载宏小区网络流量,增加网络覆盖^[1]。然而,毫微微小区在带来诸多优势的同时也带来了许多干扰问题。由于宏小区与毫微微小区之间缺乏协同,当它们使用相同的信道时,可能会带来严重的跨层干扰。同时,当毫微微小区使用相同的信道时,可能会产生严重的同层干扰。随着毫微微小区部署密度的提高,这两种干扰更加严重。

针对这一问题,一些文献提出了减小跨层干扰和同层干扰的资源分配方案^[2-13]。文献[2]提出了一

收稿日期: 2015-06-08; 改回日期: 2015-10-19; 网络出版: 2015-12-04

*通信作者: 张海波 wdqyzl@gmail.com

基金项目: 国家青年自然科学基金(61301122), 重庆市科委项目(cstc2014jcyjA40052), 重庆市教委项目(KJ1400405)

Foundation Items: The National Natural Science Foundation of China (61301122), The Research Plan of Chongqing (cstc2014jcyjA40052), The Research Program of Chongqing Municipal Education Commission (KJ1400405)

种基于斯坦伯格博弈的资源分配策略。文献[3]提出了一种子信道和功率联合分配算法。文献[4]提出一种分布式的自组织资源分配方案,该方案在保证用户服务质量的基础上,最小化总的发射功率。文献[5]研究了双层毫微微小区网络中的资源分配问题,旨在宏小区总速率约束条件下,最大化毫微微小区总的吞吐量。文献[6]将毫微微小区网络中的资源分配问题模型化,在宏小区用户干扰约束下,保证毫微微小区的公平性。文献[7]提出了一种基于效用公平的功率控制策略。文献[8]研究了正交频分多址(OFDMA)系统中一种面向多业务应用的自适应资源分配算法。

在现有的研究中,集中式的资源分配方案随着毫微微小区数量的增加,计算复杂度急剧增加,使得集中式的方案,难以在毫微微小区密集部署的场景中应用^[9]。因此,本文提出了基于分组的资源分配方案^[10-13]。分组方法包括组内正交分组和组间正交分组。组内正交分组方法将干扰严重的毫微微小区分在相同组,相同组中的毫微微小区使用不同的子信道,不同组可以复用子信道。相反,组间正交分组方法是将没有干扰或干扰很小的毫微微小区分在相同组,相同组中的毫微微小区可以复用子信道,不同组分配正交的子信道。组内正交分组方法是从每个毫微微小区自身出发进行分组,难以找到全局较优的分组方案^[10]。文献[11]提出了一种着色分组方法,利用图论中的着色原理对毫微微小区进行分组。文献[12]通过限制每组中毫微微小区的最大数目,进而保证 FUEs 的服务质量(QoS)。另外,上述文献研究共享频谱方式下的干扰抑制技术时,只考虑了毫微微小区之间的同层干扰。考虑到宏小区用户的重要性,双层毫微微小区网络中应优先保证宏小区用户(MUEs)的传输^[13]。本文综合考虑了双层毫微微小区网络中的跨层干扰和同层干扰。

本文讨论了 OFDMA 双层毫微微小区网络中的资源分配问题,提出了基于分组的资源分配算法。本文所提算法分为两个部分。第 1 部分是宏基站根据宏小区用户的信道条件,采用改进的匈牙利算法为宏用户分配子信道,再采用线性注水算法分配功率;第 2 部分,分为 3 个步骤:首先,根据毫微微小区间的干扰情况建立干扰表;然后,利用模拟退火算法对毫微微小区进行分组;最后,在避免对 MUEs 造成干扰的条件下,根据毫微微小区用户的速率需求进行子信道和功率分配。

2 系统模型和问题规划

2.1 系统模型

考虑由一个宏小区和 F 个毫微微小区构成的基于 OFDMA 的双层毫微微小区网络的下行传输系统。宏小区中心有一个宏基站。每个毫微微小区中有一个毫微微基站(FBS)。假设宏基站和毫微微基站使用相同的频带。整个可用频带分为 K 个资源块(RB),RB 为分配给用户的最小资源单元,对应一个子信道。假定子信道是缓慢时变的,并且服从瑞利多径衰落分布。MUEs 均匀地分布在宏小区的覆盖范围内。FBSs 工作在封闭模式,只允许授权用户接入,MUEs 只能接入宏基站。系统模型,如图 1。

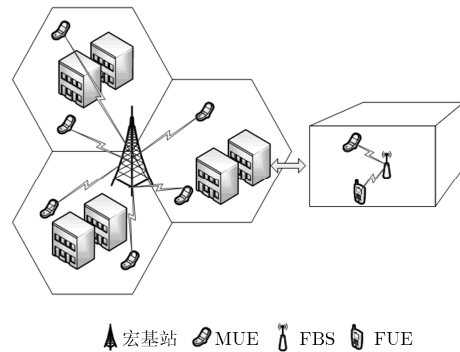


图 1 系统模型

在初始阶段,假定每个 FBS 可以使用全部 RB。每个 FBS 通过用户的测量报告可以得到相邻 FBSs 的参考信号接受功率。 w_{ij} 表示 FBS_{*i*} 所有服务的用户接收到的 FBS_{*j*} 参考信号功率的平均值。同理, w_{ji} 表示 FBS_{*j*} 所有服务的用户接收到的 FBS_{*i*} 参考信号功率的平均值。本文用两者中的较大值,表示 FBS_{*i*} 与 FBS_{*j*} 的干扰,即 $w_{ij} = w_{ji} = \max(w_{ij}, w_{ji})$ 。由所有 w_{ij} 可以建立一张反映所有 FBSs 间干扰情况的干扰系数矩阵 \mathbf{W} 。根据干扰系数矩阵 \mathbf{W} ,可以确定每个 FBS 潜在的干扰对象。具体方式如式(1):

$$w_{ii} - w_{ij} \leq I_{th} \quad (1)$$

其中, w_{ii} 表示 FBS_{*i*} 所有服务的用户接收到的 FBS_{*i*} 参考信号功率的平均值。 I_{th} 为设定的 FBSs 间的干扰阈值。如果满足式(1),那么 FBS_{*i*} 和 FBS_{*j*} 互为潜在的干扰对象。根据式(1),可以得到潜在的干扰矩阵 \mathbf{E} 。 \mathbf{E} 是一个 F 行 F 列的 0 1 矩阵,如果第 i 行第 j 列的元素为 1,表示 FBS_{*i*} 和 FBS_{*j*} 互为潜在的干扰对象。

无向的权重关系图 $G = [T, \mathbf{E}, \mathbf{W}]$ 可以描述毫微微小区网络的拓扑结构。 $T = \{t_1, t_2, \dots, t_F\}$ 是顶点集合,即 FBSs 的集合。 \mathbf{W} 和 \mathbf{E} 分别为干扰系数矩阵和潜在的干扰矩阵。

2.2 问题规划

所提算法分为两个部分:第1部分,根据 MUEs 的信道条件和速率需求为每个 MUE 分配子信道和功率;第2部分,在保证 MUEs 正常传输的前提下,为 FUEs 分配子信道和功率。

2.2.1 MUEs 子信道和功率分配 假定宏基站在每个子信道上的发射功率是相等的。MUE m 在子信道 k 上的信干噪比(SINR)为

$$\gamma_{m,k}^M = \frac{p_k^M \text{PL}_{k,m}^M}{\sum_{j \in \phi} p_{j,k}^F \text{PL}_{j,k,m}^F + \sigma^2} \quad (2)$$

其中, p_k^M 和 $p_{j,k}^F$ 分别为宏基站和 FBS $_j$ 在子信道 k 上的发射功率。 $\delta = \{1, 2, \dots, K\}$ 表示子信道的集合, $k \in \delta$ 。 $\varphi = \{1, 2, \dots, M\}$ 表示 MUEs 集合, $m \in \varphi$ 。对于给定的子信道 k , $\text{PL}_{k,m}^M$ 和 $\text{PL}_{j,k,m}^F$ 分别为宏基站和 FBS $_j$ 到 MUE m 的信道增益。 $\phi = \{1, 2, \dots, F\}$ 表示 FBSs 的范围。 σ^2 为噪声功率。为保证 MUEs 的正常传输,每个 MUE 在所分配到的子信道上需满足一定的干扰约束。例如, MUE m 在分配到的子信道 k 上需要满足式(3):

$$\sum_{j \in \phi} N_{j,k} p_{j,k}^F \text{PL}_{j,k,m}^F \leq I_{m,k}^M \quad (3)$$

其中, $I_{m,k}^M$ 表示 MUE m 在子信道 k 上的干扰容限, $N_{j,k} \in \{0, 1\}$ 。

MUEs 的子信道分配问题是在满足 MUEs 数据速率需求的条件下,最大化系统容量。结合式(2), MUEs 的子信道分配问题规划如式(4)~式(7):

$$\max \sum_{m=1}^M \sum_{k=1}^K \Gamma_{m,k} B \log_2 (1 + \gamma_{m,k}^M) \quad (4)$$

$$\text{s.t.} \sum_{k=1}^K \Gamma_{m,k} B \log_2 (1 + \gamma_{m,k}^M) \geq R_m \quad (5)$$

$$\sum_{m=1}^M \Gamma_{m,k} \leq 1 \quad (6)$$

$$\Gamma_{m,k} \in \{0, 1\} \quad (7)$$

其中, B 为子信道的带宽, R_m 为 MUE m 的数据速率需求。 $\Gamma_{m,k}$ 指示子信道 k 的分配情况。

MUEs 的子信道分配完成后,再使用注水算法对平均分配的功率重新分配,以进一步提升系统容量。MUEs 的功率分配可按式(8),式(9)规划:

$$\max B \sum_{k=1}^K \log_2 (1 + p_k^M g_k) \quad (8)$$

$$\text{s.t.} \sum_{k=1}^K p_k \leq P_{\text{tot}} \quad (9)$$

其中, $g_k = \text{PL}_{k,m}^M / (\sum_{j \in \phi} p_{j,k}^F \text{PL}_{j,k,m}^F + \sigma^2)$ 是子信道 k 上的增益干扰比, m 在子信道分配时已确定。 p_k^M 为子信道 k 上的功率。 P_{tot} 为总的发射功率。

2.2.2 FUEs 子信道和功率分配 FBSs 高密度随机部署的场景中,子信道和功率分配问题是一个难以解决的混合整数非线性规划问题(NP 难问题)。为了解决这个问题,我们将其分解为两个子问题,包括 FBSs 分组问题,以及子信道和功率分配问题。

子问题 1 FBSs 分组:附录 1 中证明了当 FUEs 的平均信干噪比低于一定值时,分组可以提高系统容量。本文利用图论中的着色原理进行分组,将图 $G = [T, \mathbf{E}, \mathbf{W}]$ 中的 F 个 FBSs 分到 L 个组 $\chi = \{1, 2, \dots, L\}$,使得相同组中的 FBSs 间的干扰总和最小,以此得到最优的分组方案。规划如式(10)~式(14):

$$\min \sum_{i=1}^F \sum_{j=1, j \neq i}^F \sum_{l=1}^L w_{ij} v_{il} v_{jl} \quad (10)$$

$$\text{s.t.} \bigcup_{l=1}^L C_l = T \quad (11)$$

$$C_l \cap C_g = \Phi \quad (l, g \in \chi) \quad (12)$$

$$e_{h,v} = 0 \quad (h, v \in C_l) \quad (13)$$

$$v_{il} \in \{0, 1\} \quad (14)$$

其中, w_{ij} 和 $e_{h,v}$ 分别为干扰系数矩阵 \mathbf{W} 和潜在干扰矩阵 \mathbf{E} 中的元素。 C_l 表示第 l 组中 FBSs 的集合。 $\mathbf{V} = (v_{il})_{F \times L}$ 是着色矩阵, $v_{il}=1$ 表示 FBS $_i$ 着第 l 种颜色,同样也表示 FBS $_i$ 分到第 l 组。当 $v_{il}=0$ 时, FBS $_i$ 不分到第 l 组。式(12)要求每个 FBS 不能分在多组。式(13)表明相互间干扰的 FBSs 不能分在同一组。

子问题 2 子信道和功率分配:这个优化目标是为不同组分配正交的子信道并调整子信道上的功率,在满足各个 FUEs 的速率需求的基础上,最大化频谱效率。规划如式(15)~式(17):

$$\max \sum_{k=1}^K \sum_{l=1}^L \sum_{j \in C_l} \sum_{n \in D_j} B \log_2 (1 + \gamma_{j,k,n}^F) \lambda_{k,l} \quad (15)$$

$$\text{s.t.} \sum_{l=1}^L \lambda_{k,l} = 1, \quad k \in \{1, 2, \dots, K\} \quad (16)$$

$$\sum_{k=1}^K B \log_2 (1 + \gamma_{j,k,n}^F) \lambda_{k,l} \geq R_{j,n}^F \quad (17)$$

其中

$$\gamma_{j,k,n}^F = \frac{p_{j,k}^F \text{PL}_{j,k,n}^F}{\sum_{i \in C_l, i \neq j} p_{i,k}^F \text{PL}_{i,k,n}^F + p_k^M \text{PL}_{k,n}^M + \sigma^2}$$

是 FBS $_j$ 到其服务的 FUE n 在子信道 k 上的信干噪比。 D_j 为 FBS $_j$ 服务的 FUEs 集合。 $R_{j,n}^F$ 为 FBS $_j$ 服务的 FUE n 的数据速率需求。如果 $\lambda_{k,l}$ 为 1,子信道 k 分配给组 C_l ,否则 $\lambda_{k,l}$ 为 0。式(16)表明所有子信道都必须选择一组进行分配。式(17)为 FUEs 数据速率需求约束。为减少对 MUEs 的干扰,这个分配问题还需要满足式(3)。

3 基于分组的子信道和功率分配

3.1 MUEs 子信道分配和功率分配

从式(4)可以看出,这个分配问题实际上是给定的 M 个 MUEs 和 K 个子信道的指派问题。本文提出了改进的匈牙利算法,改进的思想是:将标准匈牙利算法^[14]的一次求解过程变为动态地迭代求解过程。第 1 次的迭代求解问题如式(18),式(19):

$$\max \sum_{m=1}^M \sum_{k=1}^K \Gamma_{m,k} B \log_2(1 + \gamma_{m,k}^M) \quad (18)$$

$$\sum_{k=1}^K \Gamma_{m,k} = 1, \quad \Gamma_{m,k} \in \{0,1\} \quad (19)$$

其中, M 为 MUEs 总数, K 为子信道总数。式(18)为第 1 次迭代求解的优化目标。由于每个子信道上的带宽是相等的,根据式(18)可以得到第 1 次迭代所需的效益矩阵 $\mathbf{c}_{K \times M} = \log_2(1 + \gamma_{m,k}^M)$ 。本文所提改进的匈牙利算法的具体过程如下:

(1)根据所有需要分配子信道的 MUEs 的信道增益,构建第 1 次迭代所需的效益矩阵 $\mathbf{c}_{K \times M}$;

(2)若 $K \leq M$, 添加 $M - K$ 个虚拟子信道,将效益矩阵变为 $M \times M$ 阶的方阵。若 $K > M$, 添加 $K - M$ 个虚拟 MUEs, 将效益矩阵变为 $K \times K$ 阶的方阵;

(3)用标准匈牙利算法计算出子信道分配方案;

(4)如果满足终止条件,则结束程序。否则,查看每个 MUE 是否满足速率需求,更新需要分配子信道的 MUEs 以及待分配的子信道。根据更新后的情况,构建新的效益矩阵,然后转至(2)。终止条件为所有 MUEs 满足数据速率需求或没有待分配的子信道。

根据 MUEs 功率分配的优化目标和约束条件,采用注水算法分配功率。由拉格朗日乘法得到

$$L(p, u) = B \sum_{k=1}^K \log_2(1 + p_k^M g_k) - u \left(\sum_{k=1}^K p_k^M - P_{\text{tot}} \right) \quad (20)$$

其中, u 是拉格朗日乘子,为常数。计算偏导 $\partial L(p, u) / \partial p_k^M = 0$ 可以得到 K 个等式,根据这些等式得

$$p_k^M = [\eta - 1/g_k]^+ \quad (21)$$

其中, $[\varphi]^+ = \max\{0, \varphi\}$ 。 $\eta = B / (u \ln 2)$ 为注水线。

3.2 FUEs 子信道和功率分配

3.2.1 FBSs 分组 FBSs 分组问题与图论中的 Max K-Cut 问题模型相同。本文采用启发式的模拟退火算法来解决这个分组问题。具体过程如下:

(1)初始化:初始温度 T_{em} (充分大),初始解状态 \mathbf{S} (算法迭代的起点),每个 T_{em} 值的迭代次数 L , 每组中的最大 FBS 数 M , 初始解 \mathbf{S} 是所有 FBS 都在第 1 组。

(2)产生新解 \mathbf{S}' , 即随机选择一组中某个 FBS 放到另外符合约束条件的一组。若一组的 FBS 数目达到 M 则这一组只能更换或减少 FBS。

(3)计算增量 $\Delta t' = C(\mathbf{S}') - C(\mathbf{S})$, 其中 $C(\mathbf{S})$ 为式(10)。

(4)若 $\Delta t' < 0$ 则接受 \mathbf{S}' 作为新的当前解,否则以概率 $\exp(-\Delta t' / T_{\text{em}})$ 接受 \mathbf{S}' 作为新的当前解。

(5)如果满足终止条件则输出当前解作为最优解,结束程序。否则 T_{em} 减小,然后转至(2)。如果连续若干个新解都没有被接受,则程序终止。

3.2.2 FBSs 子信道和功率分配 FBSs 的子信道和功率分配分为两个子问题。

子问题 1 子信道分配: 假定每个子信道上的功率平均分配。首先,根据每组中 FUEs 的平均速率需求确定每组需要分配的子信道数目。然后,计算各个子信道在不同组中获得的吞吐量,依次将子信道分配给获得吞吐量最大的组。每组分得的子信道数目满足需求后,不再参与分配,直至满足所有组的子信道数目需求。每组中的 FBSs 只能使用本组分配到的子信道,从而消除组间干扰。为保证 MUEs 的正常传输,如果 FBS 对某个 MUE 的干扰超过一定值,它就不能使用这个 MUE 正在使用的子信道。这样就确定了每个 FBS 所能使用的子信道。最后,每个 FBS 根据它服务的各个 FUE 的数据速率需求和信道条件,采用改进的匈牙利算法为它们分配子信道。

子问题 2 功率分配: 考虑到 FBSs 的高密度随机部署的特点和 FBSs 有限的计算处理能力,本文设计了一种对 FBS 处理能力要求较低的分布式功率控制方法。设定更低的干扰阈值,计算同一组中 FBSs 间的干扰,若 FBS_j 对其它 FBSs 不造成干扰则 $n_j = 0$, 否则 $n_j = 1$ 。功率分配按式(22)进行。

$$p_j(t+1) = \begin{cases} p_j(t) - \Delta p, & n_j = 1, \\ \frac{p_j(t) - \Delta p}{p_j(t)} \text{ SINR}_j > I_{\text{min},j} \\ p_j(t) + \Delta p, & n_j = 0, \\ \frac{p_j(t) + \Delta p}{p_j(t)} \text{ SINR}_j < I_{\text{max},j} \\ p_j(t), & \text{其它} \end{cases} \quad (22)$$

其中, $I_{\text{min},j}$ 和 $I_{\text{max},j}$ 分别为 FBS_j 的最小和最大信噪比需求。 SINR_j 为 FBS_j 的平均 SINR。 $p_j(t)$ 为 FBS_j 在第 1 次迭代时的发射功率。 Δp 为发射功率的调整粒度。FBSs 有最大发射功率 p_{max} 限制, FBSs 的发射功率需要满足式(23)。

$$p_j(t+1) = \min(p_j(t+1), p_{\max}) \quad (23)$$

功率按照式(22), 式(23)调整之后, 若仍有 MUEs 的 SINR 需求没有得到满足。将对同一个 MUE 造成干扰的 FBSs, 按照干扰大小进行排序。依次降低干扰最大的 FBSs 的发射功率, 每次降低 Δp , 直至 MUE 满足最低信干噪比需求。

4 仿真结果

3GPP 标准规定的城市部署场景^[15]中有 7 个宏小区, 宏基站在小区的**中心, 每一个小区分为 3 个扇区。为了简化仿真, 本文仿真中考虑只有一个宏小区的场景, 包括一个宏基站和 F 个毫微微小区, 如图 1。信道模型主要考虑穿墙损耗、阴影衰落、天线增益等, 具体参数见表 1。本文分析了所提算法的多项性能, 包括 MUEs 中断概率、MUEs 平均吞吐量、FBSs 频谱效率、FUEs 间的公平性。比较的算法包括组内正交分组算法^[10], 未分组的 RRA 算法^[11]、基于着色的分组算法 GCRA^[11]和 HCMA 算法^[12]。

图 2 显示了 MUEs 在不同室内比例下的中断概率。在仿真中, 设置 -6 dB 为阈值, 如果 SINR 低于阈值就认为 MUE 发生中断。本文算法通过子信道和功率分配降低了 FBSs 对 MUEs 的干扰, 使得

表 1 仿真参数

最大发射功率(宏基站/FBS)	46 dBm/20 dBm
用户数目	10MUE/扇区, 1-4FUEs/FBS
天线增益(宏基站/FBS)	14 dBi/5 dBi
阴影衰落标准差(室内/室外)	8 dB/4 dB
系统带宽	10 MHz
RBs 数目	50
穿透损耗(外墙/内墙)	20 dB/5 dB

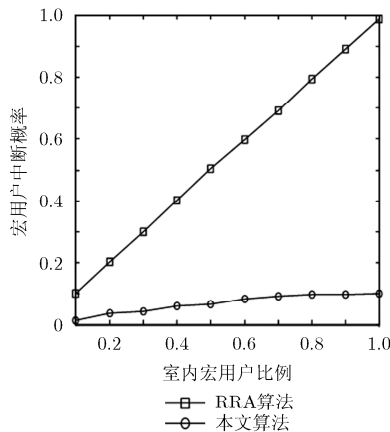


图 2 MUEs 中断概率

MUEs 能够满足最低 SINR 需求。从图中可以看出, 随着 MUEs 在室内的比例增加, RRA 算法得到的 MUEs 中断概率一直增加到接近 100%, 但是本文算法得到的 MUEs 中断概率一直在 10% 以下。因此, 本文算法能很好地消除 FBSs 对 MUEs 的干扰, 满足 MUEs 的正常传输。

图 3 描述了室内 MUEs 在 FBSs 不同部署密度下的平均吞吐量。在不考虑 FBSs 对 MUEs 干扰的场景中, 比较改进的匈牙利算法、RRA 算法和最大载干比算法的性能。最大载干比算法得到的 MUEs 平均吞吐量是理论上可以获得的最大值。但是, 这种算法完全不考虑 MUEs 间的公平性, 使得信道质量差的 MUEs 分配不到信道。改进的匈牙利算法考虑了 MUEs 的公平性, 找到了较匹配的子信道分配方案, 尽管吞吐量有所下降, 但更能满足 MUEs 的正常传输。本文算法 1 是在改进的匈牙利算法的基础上, 使用注水算法调整子信道上的功率。可以看出, 功率分配能进一步提升系统性能。本文算法 2 是采用本文所提干扰管理方案, 得到的性能曲线。可以看出, 本文所提算法能有效地抑制 FBSs 对 MUEs 的干扰。

图 4 描述了 FBSs 不同部署密度下的 FBSs 频谱效率。本文算法 1 是本文所提分组算法。本文算法 2 在算法 1 的基础上进行功率调整。对比其它算法, 本文算法 1 从全局出发动态地分组, 更能消除 FBSs 间的干扰, 提高 FUEs 的 SINR, 进而提高频谱效率。组内正交分组由于各个组中的 FBSs 数目不均衡, 频带不能得到充分利用, 使得频谱效率较低。可以看出, 本文算法 2 优于本文算法 1。因为功率分配可以进一步减少干扰, 提高 FUEs 的 SINR。

图 5 描述了 FUEs 间的公平性^[16]。从图中可以

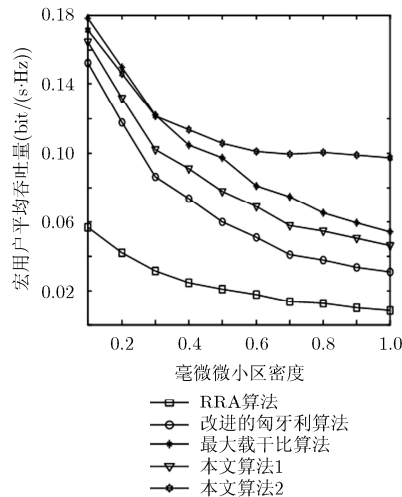


图 3 MUEs 的平均吞吐量

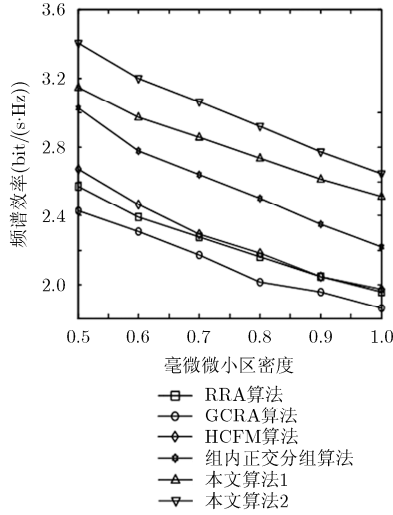


图 4 FBSs 频谱效率

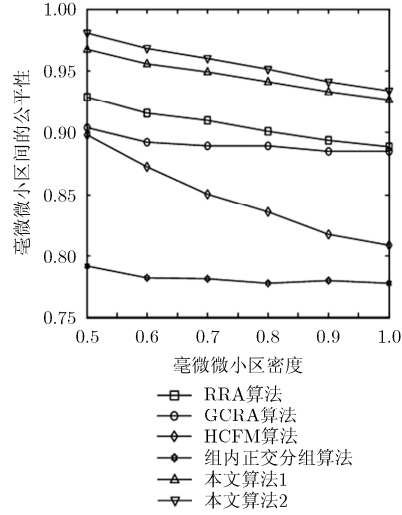


图 5 FUEs 间的公平性

看出，本文算法 1 得到的 FUEs 公平性明显高于其它算法。未分组算法 RRA 随着 FBSs 部署密度的提高，FUEs 会受到严重的干扰导致更低的 SINR。其它组间正交分组算法没有考虑 FUEs 间的公平性，分得的各个组中的 FBSs 数目差距较大，导致不同组中的 FUEs 受到的干扰差别较大。本文算法 2 在算法 1 的基础上进行功率调整，降低 SINR 过高的子信道上的功率，尽量提高 SINR 低的子信道上的功率。这样更能满足 FUEs 间的公平性。

5 结束语

本文讨论了 OFDMA 双层毫微微小区网络中的资源分配问题，在保证宏小区用户和毫微微小区用户正常传输的前提下，最大化频谱效率。本文采用基于分组的算法简化此分配问题，并最小化毫微微小区用户间的干扰。仿真结果表明在保证宏小区用户正常传输的前提下，本文算法不仅能够有效地提高毫微微小区网络的频谱效率，还能够保证用户之间的公平性。这两项指标的提高表明用户满意度必然提高。

附录 1

假定 FUE 的接受功率为 p ，干扰为 I ，带宽为 1。噪声功率相对于干扰 I 很小可以忽略。假定 FBS 分为 L 组，每组可用的子信道数目是未分组的 $1/K$ 。由于分组的方式是将相互间干扰小的 FBS 分在同一组，同时每组中的 FBS 只有未分组的 $1/K$ ，很显然分组后的干扰 $I' < I/K$ 。未分组的系统容量为 $C = \log_2(1 + p/I)$ ，分组的系统容量为 $C' = (1/K) \cdot \log_2(1 + p/I')$ 。令 $I' = f(K)I$ ，可以得出 $f(K) < 1/K$ 。

$$C' - C = \frac{\log_2(1 + p/I') - K \log_2(1 + p/I)}{K}$$

$$= \frac{\log_2(1 + p/f(K)I/I) - \log_2(1 + p/I)^K}{K}$$

令 $p/I = \gamma$ ，

$$1 + p/f(K)I - (1 + p/I)^K$$

$$= 1 + \gamma/f(K) - (1 + \gamma)^K$$

$$= 1 + (1/f(K))\gamma - (1 + C_K^1\gamma + \dots + C_K^K\gamma^K)$$

$$= (1/f(K) - K)\gamma - C_K^2\gamma^2 - C_K^K\gamma^K$$

令 $\varphi(\gamma) = (1/f(K) - K)\gamma - C_K^2\gamma^2 - C_K^K\gamma^K$ ，对 $\varphi(\gamma)$ 进行求导： $\phi(\gamma) = \varphi'(\gamma) = 1/f(K) - K - \sum_{i=2}^K i C_K^i \gamma^{i-1}$ 。

由于 $\phi(0) = 1/f(K) - K > 0$ 并且 $\phi(+\infty) = -\infty < 0$ ，很明显可以看出 $\phi(\gamma)$ 随着 γ 增大而逐渐降低，又因为 $\phi(\gamma)$ 是一个连续函数，一定存在一个值 γ_0 满足 $\phi(\gamma_0) = 0 (\gamma_0 > 0)$ 。可以推出 $\varphi(\gamma)$ 先增后减，又因为 $\varphi(0) = 0$ 且 $\varphi(+\infty) = -\infty$ ，必然存在一个值 γ^* 满足 $\phi(\gamma^*) = 0$ 。这样就可以推出当 $\gamma < \gamma^*$ 时， $C' - C > 0$ ，即分组比未分组的系统容量大。

参考文献

- [1] BHUSHAN N, LI J Y, MALLADI D, *et al.* Network densification: The dominant theme for wireless evolution into 5G[J]. *IEEE Communications Magazine*, 2014, 52(2): 82-89.
- [2] LIU Z X, HAO L L, XIA Y Q, *et al.* Price bargaining based on the stackelberg game in two-tier orthogonal frequency division multiple access femtocell networks[J]. *IET Communications*, 2015, 9(1): 133-145.
- [3] ABDELNASSER A, HOSSAIN E, and KIM D I. Tier-aware resource allocation in OFDMA macrocell-small cell networks [J]. *IEEE Transactions on Communications*, 2015, 63(3): 695-710.
- [4] LOPEZ-PEREZ D, CHU X, VASILAKOS A, *et al.* Power minimization based resource allocation for interference mitigation in OFDMA femtocell networks[J]. *IEEE Journal*

- Selected Areas in Communications*, 2014, 32(2): 333–344.
- [5] NGO D T, KHAKUREL S, and LE-NGOC T. Joint subchannel assignment and power allocation for OFDMA femtocell networks[J]. *IEEE Transactions on Wireless Communications*, 2014, 13(1): 342–355.
- [6] HA V N and LE L B. Fair resource allocation for OFDMA femtocell networks with macrocell protection[J]. *IEEE Transactions on Vehicular Technology*, 2014, 63(3): 1388–1401.
- [7] 马文敏, 郑伟, 张海君. OFDMA 毫微微小区网络中基于效用公平的功率控制策略[J]. *电子与信息学报*, 2012, 34(10): 2287–2292. doi: 10.3724/SP.J.1146.2012.00542.
- MA W M, ZHEN W, and ZHANG H J. Utility-based fairness power control scheme in OFDMA femtocell networks[J]. *Journal of Electronics & Information Technology*, 2012, 34(10): 2287–2292. doi: 10.3724/SP.J.1146.2012.00542.
- [8] 朱晓荣, 罗小琴, 朱洪波. 正交频分多址系统中一种面向多业务应用的自适应资源分配算法[J]. *电子与信息学报*, 2015, 37(6): 1298–1303. doi: 10.11999/JEIT141158.
- ZHU X R, LUO X Q, and ZHU H B. Adaptive resource allocation scheduling algorithm for multi-service application in OFDMA system[J]. *Journal of Electronics & Information Technology*, 2015, 37(6): 1298–1303. doi: 10.11999/JEIT141158.
- [9] ABDELNASSER A, HOSSAIN E, and KIM D I. Clustering and resource allocation for dense femtocells in a two-tier cellular OFDMA network[J]. *IEEE Transactions on Wireless Communications*, 2014, 13(3): 1628–1641.
- [10] ABBAS H, RAMI L, and NADJIB A. Cluster-based resource management in OFDMA femtocell networks with QoS guarantees[J]. *IEEE Transactions on Vehicular Technology*, 2014, 63(5): 2378–2391.
- [11] ZHANG Q, ZHU X N, WU L J, *et al.* A coloring-based resource allocation for OFDMA femtocell networks[C]. 2013 IEEE Wireless Communications and Networking Conference, Shanghai, 2013: 673–678.
- [12] LIU S J and TIAN H. Clustering based interference management for QoS guarantees in OFDMA femtocell[C]. 2013 IEEE Wireless Communications and Networking Conference, Shanghai, 2013: 649–654.
- [13] KANG X, ZHANG R, and MOTANI M. Price-based resource allocation for spectrum-sharing femtocell network: a stackelberg game approach[J]. *IEEE Journal on Selected Areas in Communications*, 2012, 30(3): 538–549.
- [14] 陈宝林. 最优化理论与算法[M]. 第2版, 北京: 清华大学出版社, 2005: 444–450.
- CHEN B L. Optimization Theory and Algorithms[M]. Release 2, Beijing: Tsinghua University Press, 2005: 444–450.
- [15] 3GPP TSG RAN1-2010. Evolved Universal Terrestrial Radio Access (E-UTRA); Further advancements for E-UTRA physical layer aspects[R]. 2010.
- [16] BAE Chisung and CHO Dongho. Fairness-aware adaptive resource allocation scheme in multihop OFDMA systems[J]. *IEEE Communications Letters*, 2007, 11(2): 134–136.
- 张海波: 男, 1979年生, 博士后, 副教授, 研究方向为未来宽带无线移动通信网络中的资源分配与优化.
- 穆立雄: 男, 1989年生, 硕士生, 研究方向为无线资源管理、跨层优化.
- 陈善学: 男, 1966年生, 教授, 研究方向为现代通信技术.