

Femtocell 网络中基于分簇的资源分配机制

张海波^{1,2}, 邹剑¹, 刘开健¹, 陈善学¹

(1. 重庆邮电大学移动通信技术重庆市重点实验室, 重庆 400065; 2. 北卡罗来纳州立大学电子与计算机工程系, 美国 罗利 27695)

摘 要: 针对 Macro-Femto 网络中 Femtocell 与 Macrocell 之间的干扰问题, 提出了一种基于分簇的资源分配机制。该机制结合图论及凸优化理论对毫微微节点分簇; 随后采用基于速率公平的子信道分配算法对毫微微用户和宏用户分别进行子信道分配; 利用分布式功率分配算法对完成信道分配的系统进行功率分配。仿真结果表明, 该机制有效地抑制了 Macro-Femto 网络中存在的跨层干扰及同层干扰, 提升了平均速率, 同时满足了用户的速率公平性需求, 使用户获得更高的满意度。

关键词: 资源分配; 凸优化; 分簇; 功率分配; 毫微微小区

中图分类号: TN929.5

文献标识码: A

Cluster-based resource allocation mechanism for Femtocell network

ZHANG Hai-bo^{1,2}, ZOU Jian¹, LIU Kai-jian¹, CHEN Shan-xue¹

(1. Chongqing Key Lab 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 27695, USA)

Abstract: A based-cluster resource allocation mechanism was proposed for suppressing interference between Femtocell and Macrocell in Macro-Femto network. The mechanism included three parts, FBS was put in disjoint clusters by graph theory and convex optimization, then a sub-channel allocation algorithm was adopted to assign sub-channel to the FUE and MUE based on fairness of rate. In the end, power allocation was performed by using distributed algorithm. Simulation results show that the proposed mechanism effectively suppresses cross-tier and co-tier interference in the Macro-Femto network, improves the average rate, meanwhile satisfies the requirements of fairness of rate, which makes users more satisfied.

Key words: resource allocation, convex optimization, cluster, power allocation, Femtocell

1 引言

近年来, 随着智能终端、多媒体技术的迅速发展, 宏蜂窝网络 (Macrocell) 中的用户数在不断增加。然而, 宏基站 (MBS, macro base station) 的覆盖范围较广, 并不能保证覆盖范围内宏用户 (MUE, macrocell user equipment) 都具有较好的通信性能。

尤其是在室内, 有研究表明, 约 $\frac{2}{3}$ 的电话通信和

70% 以上的数据业务传输都发生在室内^[1]。为了满足用户的高质量、高速率通信需求, 高效率、低能耗和小范围覆盖的毫微微小区 (Femtocell) 技术应运而生。但是, 将 Femtocell 部署到 Macrocell 也给原本的网络带来了一系列新的干扰问题。由于 Femtocell 与 Macrocell 同频组网, 毫微微用户 (FUE, Femtocell user equipment) 通信必然受到 MBS 的干扰, MUE 通信同样受到 FBS 的干扰, 也就是双层网络的跨层干扰; 同时, 毫微微基站也会对相邻毫

收稿日期: 2016-05-05; 修回日期: 2016-12-05

基金项目: 国家自然科学基金资助项目 (No.61301122, No.61102062, No.61271260); 重庆市基础与前沿基金资助项目 (No.cstc2014jcyjA40052); 长江学者和创新团队发展计划基金资助项目 (No.IRT16R72)

Foundation Items: The National Natural Science Foundation of China (No.61301122, No.61102062, No. 61271260), The Natural Science Foundation Project of Chongqing (NSF of Chongqing) (No.cstc2014jcyjA40052), Program for Changjiang Scholars and Innovative Research Team in University (No.IRT16R72)

微微基站的用户造成强烈的干扰,也就是双层网络的同层干扰。如何抑制乃至消除这些干扰是一个公开讨论的问题。如何利用有限的频谱资源使系统获得更高的传输效率是业内一直研究的重点之一。

本文采用 FBS 与 MBS 共用频谱的方式,更大程度节约了频谱资源,同时提升系统的传输效率。文献[2]为长期演进(LTE, long term evolution)单层网络提出了一种基于用户分布的分组算法。文献[3]提出了一种 LTE 网络中次优的多项式时间快速信道分配算法。文献[4]提出了一种认知无线毫微微网络联合资源分配策略,考虑频谱感知的时间和能量消耗,在满足目标性能的同时最大化网络吞吐量。文献[5]研究了在分布式和集中式算法下最大化毫微微网络最小总频谱效率的方法。文献[6]提出了一种次优的资源分配算法,同时采用图论着色算法实现用户之间的公平性。文献[7]提出了一种结合图论和干扰对齐的联合资源优化算法。文献[8]设定干扰阈值以保证宏用户服务质量(QoS, quality of service),提出了基于时延限制的同信道资源分配算法。文献[9]在保证用户 QoS 需求的前提下研究了正交频分多址(OFDMA, orthogonal frequency division multiple access) Femtocell 网络中的联合资源分配和接入控制问题。文献[10]将频谱分割为 3~4 个部分,然后对分段频谱内的用户进行资源分配,该方法虽然有效地消除了跨层干扰,但是造成了较大频谱的浪费,系统并没有达到最优状态。上述文献虽然一定程度上提升了系统性能,但是并没有考虑速率公平的问题。

当前,集中式的资源分配方案在毫微微密集分布情况下的计算复杂度呈几何状态提升,难以应用到未来毫微微小区密集部署的场景中。由此,本文提出基于分组的资源分配机制^[8-12]。分组方案分为组内复用及组间复用 2 种。组间复用的分组方案下组内分配正交子信道,反之,组内复用的分组方案下组间分配正交子信道。其中,对于组内复用的分组方案,随着毫微微小区的增加,该方案必须采取增加新分组或增加组内毫微微小区数量的措施,而增加新分组则会造成频谱被进一步划分为更小的频段,分到每个毫微微小区的频谱会进一步缩小,这会造成毫微微用户通信质量降低,若增加组内用户毫微微小区数量,则会造成组内用户增多,而组内复用子信道,随着用户增多,也会存在较大的干扰,同样影响通信质量^[11]。组间复用的分组方案下

将相互间干扰大的分到同一组,不同的组之间没有干扰,因此组内分配正交子信道,而组间则复用整个频谱,随着毫微微小区的增多,组间复用分组方案可以增加新的分组,既保证了毫微微用户的通信质量,也避免了频谱的浪费。

文献[11]提出了一种基于启发式聚类的信道分配算法(HCFM),该算法将毫微微密集分布的问题映射到图论的 K -Cut 问题中进行数学建模,算法限制了同组内 FBS 的数量,由此保证用户满意度,该算法有效地抑制双层网络中的同层干扰,但是并没有考虑双层网络的跨层干扰,因此,宏基站对 FBS 的干扰依然较大,这大大降低了毫微微用户的通信质量。文献[12]提出一种基于即时搜索(ASA, anytime search algorithm)的毫微微分组方案,该方案首先对参数进行了调整,然后对毫微微用户进行分组,但由于该分组方案只是将部分的 FBS 布置作为参考,所以很难得到最优的分组方案。同时上述文献考虑的主要是 Femtocell 之间的干扰问题,而没有考虑如何通过算法抑制宏用户与毫微微用户之间的跨层干扰,导致宏用户通信质量较差。

针对上述问题,本文综合考虑同层干扰及跨层干扰,结合凸优化理论及速率公平性问题提出了基于组内正交分组的资源分配方案。该方案包括以下 3 个部分。第 1 部分是对 FBS 进行分组。为了更好地利用频谱,本文运用图论中无向图设计理论和凸优化理论,同时采用组间复用、组内正交的频谱复用方式得到 FBS 之间最优的分组方案。相较于前述分组方案,该分组方案不但找到了全局最优解,且更适应于毫微微小区密集部署的场景。随着 Macro-Femto 网络场景的变化,无向图动态地转变,形成新的分组方案,因此本文算法具有自适应性。第 2 部分是对用户进行信道分配。本文为了减少 MUE 和 FUE 受到的干扰,分别对 MUE 和 FUE 进行了子信道分配。本文算法在满足最大总数据速率的情况下进一步考虑了用户公平性问题,提出了一种基于用户速率公平性的信道分配算法。在该算法中限制用户最低传输速率,因此,用户满意度及用户平均速率都达到了较高的水平。第 3 部分是对 FBS 进行功率分配。本文提出了一种分布式算法,降低了功率调整的复杂度,进一步提升系统性能。

2 系统模型

本文的系统模型如图 1 所示,该系统是由 1 个

宏小区和 F 个毫微微小区同频组网构成的下行双层异构网络模型。宏小区的中心有 1 个 MBS, 每个毫微微小区的中心布置 1 个 FBS, FBS 布置在室内。MBS 为高功率基站, 覆盖范围为 500~1 000 m, FBS 发射功率较低, 覆盖范围 20~50 m。整个频带 (即整个信道) 可分为 K 个子信道, 本文将子信道作为分配给用户的最小单位。假定子信道是缓慢时变的, 且服从瑞利分布。为了完全模拟现实环境, 信号穿过墙壁会受到较大的穿墙损耗, 且信号选择不同的子信道会得到不同的信道选择性衰落 (频率选择性衰落)。FBS 通过宽带接入毫微微网关, 再通过毫微微网关接入到核心网络中, 毫微微网关可以看作一个虚拟的宏基站, 它可以通过 S_1 接口收集到 FBS 之间传输的平均信道增益 (不能收集瞬时信道增益)。 M 个 MUE 随机分布在整个区域内。每个 Femtocell 有 2~4 个授权用户, FUE 随机分布在室内。

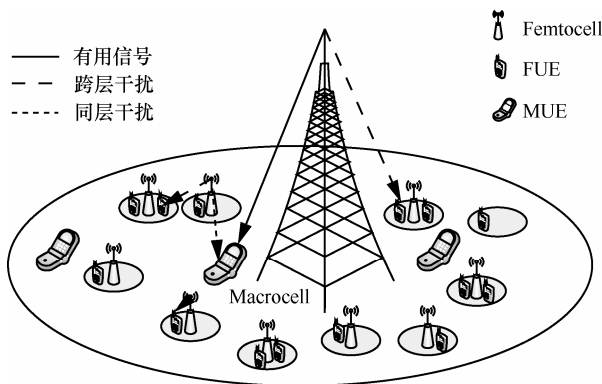


图 1 系统模型

该系统中用户信干噪比为

$$S_{m,k}^M = \frac{p^M g_{m,k}^M}{\sum_{i=1}^F p_i^f g_{i,m,k}^f + \sigma^2} \quad (1)$$

$$S_{n,j,k}^f = \frac{p_j^f g_{n,j,k}^f}{\sum_{i=1, i \neq j}^F p_i^f g_{i,j,n,k}^f + p^M g_{m,j,n,k}^M + \sigma^2} \quad (2)$$

其中, $S_{m,k}^M$ 和 $S_{n,j,k}^f$ 分别为宏用户 m 和 FBS $_j$ 中的第 n 个用户在子信道 k 上的信干噪比, p^M 和 p_j^f 分别为 MBS 和 FBS $_j$ 的发射功率, $g_{i,m,k}^f$ 为 FBS $_i$ 到宏用户 m 在子信道 k 上的信道增益, $g_{m,k}^M$ 是 MBS 到宏用户 m 的信道增益, $g_{n,j,k}^f$ 是 FBS $_j$ 到它自己的第 n 个用户在子信道 k 上的信道增益, $g_{i,j,n,k}^f$ 和 $g_{m,j,n,k}^M$

分别是 FBS $_i$ 和 MBS 到 FBS $_j$ 的第 n 个用户在子信道 k 上的信道增益, σ^2 为噪声。

图 2 为本文所提资源分配方案。

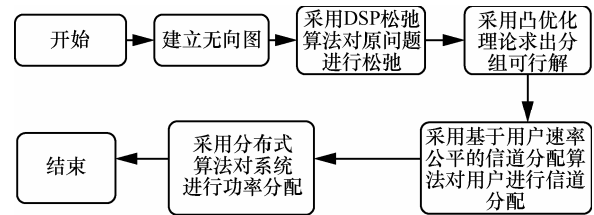


图 2 资源分配方案

3 信道分配

由于在毫微微基站密集随机分布的城市中, 信道分配问题是一个混合整数非线性规划问题 (NP 难题), 这是很难解决的。因此, 本文将这个问题分为 2 个子问题, 也就是分组问题和信道分配问题。要求解信道分配问题, 首先要解决分组问题。

3.1 FBS 分组

最优的聚类方式可以通过穷举法进行求解, 但是根据第二类斯特林数 (Stirling number), 对于有 F 个毫微微基站的毫微微网络, 则其可能的分组方式数量为^[13]

$$\sum_{i=1}^F \frac{1}{i!} \sum_{j=0}^i (-1)^{i-j} \binom{i}{j} j^F \approx O(F^F) \quad (3)$$

由式(3)可知, 穷举搜索最优分组是不可行的。下面对分组的子问题进行详细描述。

根据系统模型, 考虑分组的可行性。本文将相互之间距离较近的 FBS 分为一组, 也就是将相互之间干扰较大的 FBS 分到同一组, 干扰小的 FBS 分到不同组, 使组内 FBS 之间的干扰总和最大。分组之后组内信道正交, 组间信道复用, 可以很大程度地抑制干扰, 提升系统总数据速率。

每组 FBS 选择一个分配者 (簇头) 用以分配该组的资源, 根据 Femtocell 之间的“嗅探”机制, 本文得到 FBS 之间的路损, 也就是潜在干扰。

首先, 建立无向图 $G=(V, E)$ 。 V 表示顶点的集合, E 表示各顶点之间的边, 每条边 $(i, j) \in E$ (其中, i, j 为不同的 FBS) 有 2 个非负的权值 $\phi_{i,j}^+$ 和 $\phi_{i,j}^-$, $\phi_{i,j}^+$ 越大, 则表示 2 个 FBS 间潜在干扰越大, 也就是说, $\phi_{i,j}^+$ 与信道增益成正比, 而信道增益与路径损耗成反比。所以, 本文设定 $\phi_{i,j}^+ = \frac{1}{PL}$, PL 为路

损, 为方便计算, 令 $[W]_{i,j} = \varphi_{i,j}^+$, W 为 F 维向量。随着同一组内用户的增多, 组内信道复用率降低, 用户总的速率也同时降低, 所以设定 $\varphi_{i,j}^-$ 为 FBS_{*i*} 与 FBS_{*j*} 不在同一组的惩罚因子。所有 FBS 之间的惩罚因子是相同的, 即 $\varphi_{i,j}^- = \varphi^f$ 。 φ^f 的取值范围为 $\min \varphi_{i,j}^+ + \Delta \leq \varphi^f \leq \max \varphi_{i,j}^+ - \Delta, \Delta > 0, 1 \leq i < j \leq F$ 。 φ^f 设定过大, 则所有的 FBS 全部分配到一个组内, 而 φ^f 过小则每个 FBS 单独分为一组, 为了 φ^f 取值的合理性, 本文设定 $\varphi^f = \varphi_{i,j}^+ + \Delta, 1 \leq i < j \leq F, f = F^2 - \frac{F}{2}$ 。本文通过轮询法求得最优的 φ^f 值。

综上所述, 本文提出问题 1。

$$\text{问题 1} \quad \max \sum_{i \in F} \sum_{j \in F} \varphi_{i,j}^+ x_{i,j} + \varphi^f (1 - x_{i,j})$$

$$C_1 : x_{i,i} = 1, \forall i \in F$$

$$C_2 : x_{i,j} = x_{j,i}, \forall i, j \in F$$

$$C_3 : x_{i,j} + x_{j,k} - x_{i,k} \leq 1, \forall i, j, k \in F, j \neq i, k$$

$$C_4 : \sum_{j \in F} x_{i,j} \leq B, \forall i \in F$$

$$C_5 : x_{i,j} \in \{0, 1\}, \forall i, j \in F \quad (4)$$

其中, C_1 表示 FBS_{*i*} 与它自身同组; C_2 表示其具有对称性, 若 FBS_{*i*} 与 FBS_{*j*} 同组, 则 FBS_{*j*} 与 FBS_{*i*} 同组; C_3 表示传递性, 若 FBS_{*i*} 与 FBS_{*j*} 同组, 且 FBS_{*i*} 与 FBS_{*k*} 同组, 则 FBS_{*i*} 与 FBS_{*k*} 必然同组; C_4 表示在一组内最多只能有 B 个毫微微基站; C_5 表示 $x_{i,j}$ 的值为一个二元决策变量, 非 0 即 1。

问题 1 依然是一个 NP 难题, 为了解决这个问题, 本文基于凸优化理论提出了一种结合凸优化与半正定规划 (SDP, semi-definite programming) 关联分组算法来求解最优的分组。SDP 算法给原始问题加入一个半正定约束, 将离散问题转化为连续问题。SDP 算法的优点在于尽管对原始问题进行了松弛, 但是在误差允许的范围内, 本文为原始问题找到了最优解。将经过 SDP 松弛的原始问题转化为问题 2。

$$\text{问题 2} \quad \max \sum_{i \in F} \sum_{j \in F} \varphi_{i,j}^+ x_{i,j} + \varphi^f (1 - x_{i,j})$$

$$C_1 : x_{i,i} = 1, \forall i \in F$$

$$C_2 : x_{i,j} = x_{j,i}, \forall i, j \in F$$

$$C_3 : x_{i,j} + x_{j,k} - x_{i,k} \leq 1, \forall i, j, k \in F, j \neq i, k$$

$$C_4 : \sum_{j \in F} x_{i,j} \leq B, \forall i \in F$$

$$C_5 : x_{i,j} \geq 0, \forall i, j \in F$$

$$C_6 : X = (x_{i,j}) \succeq 0 \quad (5)$$

其中, C_5 和 C_6 是通过 SDP 松弛之后原问题的半正定约束。由 C_2 、 C_5 、 C_6 可知 X 是 $F \times F$ 维半正定对称矩阵。由此, X 可以转化为: $X = Y^T Y = A C^2 (A C^2)^T$, 其中, $Y = [y_1, y_2, \dots, y_F]$ (y_i 是 F 维列向量) 且满足 $[X]_{i,j} = y_i \cdot y_j$ ($i, j \in [1, 2, \dots, F]$), A 是 X 的特征向量组成的矩阵, C 是对角线元素为 A 特征值的对角矩阵。为了解决这个问题, 本文利用凸优化理论进行求解。

采用凸优化理论解决问题 2, 得到 X 。在问题 1 中, X 中的元素存在上界, 因此, 本文采用随机舍入 (RR, randomized rounding) 算法对问题 2 得到的解 X 中的元素 $x_{i,j}$ 进行取整处理。首先, 随机生成 L 个单位随机向量 $h_i^T = (h_{i1}, h_{i2}, \dots, h_{iF}), i \in [1, 2, \dots, L]$, 其中, $2^L \geq F$ 。 h_i 中的元素均服从均值为 1、方差为 0 的正态分布。这 L 个随机向量就形成了 2^L 个随机数 s_1, s_2, \dots, s_{2^L} 。FBS 与这 2^L 个随机数的对应关系如下

$$s_1 = \{i \in F : h_1 \cdot y_i \geq 0, \dots, h_{L-1} \cdot y_i \geq 0, h_L \cdot y_i \geq 0\}$$

$$s_2 = \{i \in F : h_1 \cdot y_i \geq 0, \dots, h_{L-1} \cdot y_i \geq 0, h_L \cdot y_i \geq 0\}$$

$$s_3 = \{i \in F : h_1 \cdot y_i \geq 0, \dots, h_{L-1} \cdot y_i \geq 0, h_L \cdot y_i \geq 0\}$$

⋮

$$s_{2^L} = \{i \in F : h_1 \cdot y_i \geq 0, \dots, h_{L-1} \cdot y_i \geq 0, h_L \cdot y_i \geq 0\} \quad (6)$$

将 FBS 划分为若干个组, 用 U_1 和 U_2 分别表示问题 1 和执行 RR 算法后问题 2 的目标函数值, 给定一个基于 L 大小的常数 $\beta (\beta < 1)$, 可知 $U_2 \geq \beta U_1$ ^[14]。解决问题 2 之后使用 RR 算法得到一个问题的可行解, 求出问题 1 的目标函数, 此时 U_2 是 U_1 的 β 倍, 随着该过程独立重复进行, U_2 会越来越接近 U_1 。设定一个适当的 t 值, 使算法进行足够的迭代, 寻找到其最优解, 本算法的复杂度主要体现在这一步。

分组算法详细描述如下。

算法 1 本文分组算法

输入: W 及 φ^f ;

输出: 在特定 φ^f 下的分组;

1) 使用凸优化理论解决问题 2, 得到 X ;

- 2) 将 X 改写为 $X = Y^T Y, Y = [y_1, y_2, \dots, y_F]$;
- 3) for 1:t
- 4) do 生成 L 个随机向量 $h_1, h_2, \dots, h_L (2^L \geq F)$;
- 5) 根据式(6)将所有 FBS 映射到不同的随机数组中;
- 6) 将上述过程转化为问题 1 的可行解 X_{int} ;
- 7) 根据 X_{int} 计算出问题 1 的目标函数值 U_1 ;
- 8) end for
- 9) 选取最大的目标函数值, 将对应的 X_{int} 作为问题 1 的解, 按照 X_{int} 配置分组。

下面对本文算法的复杂度进行分析。

计算分组算法的复杂度之前, 本文首先计算分组算法第 1)步解决问题 2 的复杂度。

一个标准的 SDP 问题被描述如下。

$$\begin{aligned} \max Tr(CX) &= \sum_{i=1}^p \sum_{j=1}^p c_{i,j} x_{i,j} \\ 1) Tr(A_i X) &\triangleright_i b_i, \forall i = 1, \dots, r \\ 2) X &\succeq 0 \end{aligned} \quad (7)$$

其中, $C, X, A_i \in S_+^{pp}$, $b_i \in R$ 。“ \triangleright_i ”随着 i 的变化而变化为“ \geq ”、“ \leq ”或“ $=$ ”。由式(5)得问题 2 复杂度最高的情况是^[15]

$$O(\max\{r, p\}^4 p^{\frac{1}{2}} \text{lb} \frac{1}{e}) \quad (8)$$

其中, $e > 0$ 表示解的精确数。

由问题 2 可知 $X \in S_+^{EF}$ 。由此 $p = F$, 从 C_1 获得 F 个等式约束条件, 从 C_2 获得 $\frac{F(F-1)(F-2)}{2!}$ 个不等式约束条件, 从 C_3 获得 F 个不等式约束条件, 从 C_4 获得 $\frac{F(F+1)}{2}$ 个不等式约束条件。因此, 限制条件 r 的数目量级为 $O(F^3)$, 因此, 解决问题 2 的复杂度为 $O((F^3)^4 F^{\frac{1}{2}} \text{lb} \frac{1}{e})$ 。这是解决问题 2 复杂度最高的情况, 并没有考虑矩阵 A_i 大幅减少复杂度和加速解答过程^[16]。

算法 1 的步骤 2)对 X 进行特征分解, 其复杂度为 $O(F^3)$ ^[17]。步骤 3)~步骤 8)的复杂度为 $O(t)$ 。因此, 选取一个合适的 t 值后, 算法 1 的复杂度主要源自步骤 1)。

3.2 FBS 信道分配

在获得分组集群后, 毫微微网将分组结果通过有线回程线路反馈给 FBS, FBS 被分为 c 组。在每一组中选出一个 FBS 作为分配者, 它负责第 i 组的子信道分配及后面将要进行的功率分配 ($i = \{1, 2, \dots, c\}$)。

首先统计每组中的 FBS 数, 记为 $\rho = (\rho_1, \rho_2, \dots, \rho_i, \dots, \rho_c)$, 计每组中的 FBS 集合为 $\Phi_i = \{1, 2, \dots, j, \dots, \rho_i\}$ 。在进行功率分配之前, 所有 FBS 的发射功率为平均分配。为方便研究, 本文假定每个 FBS 的授权用户数目均为 4, 首先将子信道分配给 FBS, FBS 再将子信道分配给其授权用户。在对 FBS 进行子信道分配时, 取其服务的 4 个用户的信道增益均值作为该 FBS 的信道增益。本文在各个 FBS 的速率需求得到满足的情况下最大化系统总的的数据速率, 则第 i 组的分配者将要解决的最优化问题规划如下。

$$\begin{aligned} \max & \sum_{j \in \Phi_i} \sum_{k=1}^K \Gamma_{i,j}^k \Delta f \text{lb}(1 + S_{j,k}^{f,i}) \\ C_1 : & \sum_{k=1}^K \Gamma_{i,j}^k \Delta f \text{lb}(1 + S_{j,k}^{f,i}) \geq r_{j,k}^{f,i} \\ C_2 : & \sum_{k=1}^K \Gamma_{i,j}^k p_{i,j}^k \leq p_{\max}, \forall j \\ C_3 : & \Gamma_{i,j}^k p_{i,j}^k g_{m,i,j}^k \leq \zeta_{m,i,j}^k, \forall k, j \\ C_4 : & \Gamma_{i,j}^k p_{i,j}^k g_{q,i,j}^k \leq \zeta_{q,i,j}^k, \forall k, j \in \Phi_i, q \notin \Phi_i \\ C_5 : & \sum_{j \in \Phi_i} \Gamma_{i,j}^k = 1, \forall k \end{aligned} \quad (9)$$

其中, $\Gamma_{i,j}^k$ 为指针变量, 若第 k 条子信道分配给第 i 组的第 j 个 FBS, 则 $\Gamma_{i,j}^k = 1$, 反之 $\Gamma_{i,j}^k = 0$; Δf 为子信道带宽; $r_{j,k}^{f,i}$ 表示第 i 组的第 j 个 FBS 在第 k 条子信道上的速率需求; $p_{i,j}^k$ 为第 i 组的第 j 个 FBS 在第 k 条子信道上的发射功率; p_{\max} 为 FBS _{i} 的最大发射功率; $g_{m,i,j}^k$ 和 $g_{q,i,j}^k$ 分别为宏基站和不在第 i 组的节点 q 对第 i 组的第 j 个 FBS 在第 k 条子信道上的信道增益; $\zeta_{m,i,j}^k$ 和 $\zeta_{q,i,j}^k$ 分别表示宏基站和不在第 i 组的节点 q 对第 i 组的第 j 个 FBS 在第 k 条子信道上的干扰门限; C_1 和 C_2 分别为最低速率限制和最大功率限制; C_3 和 C_4 分别为宏基站和相邻 FBS 的最大干扰限制; C_5 表示在同一组内子信道 k 只能被分配给一个 FBS。

由式(2)可知第 i 组的第 j 个 FBS 在第 k 条子信

道的信干噪比为

$$S_{j,k}^{f,i} = \frac{p_j^{f,i} g_{j,k}^{f,i}}{\sum_{q \neq j, q \in c_i} p_q^{f,i} g_{q,j,k}^{f,i} + p^M g_{j,k}^{M,i} + \sigma^2}, j \in c_i \quad (10)$$

其中, $p_j^{f,i}$ 表示第 i 组的第 j 个 FBS 的发射功率; $g_{j,k}^{f,i}$ 表示第 i 组的第 j 个 FBS 在第 k 条子信道的信道增益; $g_{q,j,k}^{f,i}$ 和 $g_{j,k}^{M,i}$ 分别表示第 i 组的第 q 个 FBS 和 MBS 到第 i 组的第 j 个 FBS 在第 k 条子信道的信道增益。

为了使用户得到更好的体验, 本文考虑用户公平性, 信道分配问题加入公平性后是 NP 难题, 难以求得最优解。所以研究热点是将该问题转化为求解其次优解, 次优解的求法有 3 种: 1) 分布法; 2) 凸优化法; 3) 启发式法。由于凸优化法的求解复杂度较高, 影响系统运行效率, 启发式算法需要较大的迭代次数, 所以本文采用分布法。

基于分布法的特点, 当前主要采用 maxmin 公平性算法对系统进行信道分配。但是 maxmin 公平性算法没有考虑到信道的差异性, 当组内有一个节点的信道质量较差时, 为了满足所有 FBS 的公平性, 系统会将大部分子信道分配给信道质量差的 FBS。虽然满足了用户的吞吐量公平性, 但是系统总的吞吐量大幅度降低, 这是得不偿失的。本文提出了一种公平性算法, 在每次迭代中调节所有 FBS 的权重参数, 根据已获得的吞吐量对 FBS 分配子信道, 这样既满足了用户的公平性, 使用户得到更好的体验, 又防止了资源的浪费。

第 i 组的第 j 个 FBS 可在第 k 条子信道获得的吞吐量为

$$r_{j,k}^{f,i} = \Delta f(1 + S_{j,k}^{f,i}) \quad (11)$$

第 i 组的第 j 个 FBS 获得的初始速率 $R'_{i,j}(t) = 0$ 。第 i 组的第 j 个 FBS 在第 k 条子信道的

权重因子为 $\eta_{j,k}^i = \frac{r_{j,k}^{f,i}(t)}{R'_{i,j}(t)} + 1$, 选取在第 k 条子信道

上权重最大的节点 j^* , 将子信道 k 分配给 j^* , 更新第 i 组内所有 FBS 已获得的吞吐量, 其表达式为

$$R'_{i,j}(t+1) = \begin{cases} R'_{i,j}(t) + r_{j,k}^{f,i}(t), & j = j^* \\ R'_{i,j}(t), & j \neq j^* \end{cases} \quad (12)$$

其中, $t = \{0, 1, 2, \dots\}$ 为迭代次数。

待分配子信道集合为 $\Lambda = \{1, 2, \dots, k, \dots, K\}$, 第 i 组的第 j 个 FBS 获得的初始速率 $R'_{i,j}(t) = 0$, 第 i 组的第 j 个 FBS 的初始占用子信道数目为 $\mu_{i,j}(t) = 0$, 每次迭代后更新 $\mu_{i,j}(t+1) = \begin{cases} \mu_{i,j}(t) + 1, & j = j^* \\ \mu_{i,j}(t), & j \neq j^* \end{cases}$ 。为了让第 i 组内的所有 FBS 均获得足够的子信道, 当 $\mu_{i,j}(t) \geq 6$ 时则表示 FBS _{j} 的子信道数已饱和, 删除 FBS _{j} 。

第 i 组子信道分配算法如下。

算法 2 第 i 组子信道分配算法

- 1) 初始化 $\Phi_i, \Lambda, \mu_{i,j}(t) = 0, R'_{i,j}(t) = 0$;
- 2) 输入信道增益矩阵 PL , 计算出每个 FBS 在第 k 条子信道的权重 $\eta_{i,j,k}, j \in \{1, 2, \dots, \rho_i\}$;
- 3) 计算 $j^* = \arg \max_j (\eta_{j,k}^i)$;
- 4) 选择最大的 $\eta_{j,k}^i$, 分配第 k 条子信道给 FBS _{j^*} ;
- 5) $u_{i,j^*}(t+1) = u_{i,j^*}(t) + 1$, 如果 $u_{i,j^*}(t+1) \geq 6$, 清除节点 FBS _{j^*} , 更新 Φ_i ;
- 6) 清除 k , 更新 Λ ;
- 7) 更新 $R'_{i,j}(t)$;
- 8) 更新 $\eta_{j,k}^i$;
- 9) 如果 Λ 为空集, 结束算法, 否则转到步骤 3)。

3.3 MBS 信道分配

对于 MBS, 本文对其用户进行信道分配, 计宏用户的集合为 $X = \{1, 2, \dots, m, \dots, M\}$, 由式(1)可得第 m 个宏用户在第 k 条子信道上可获得的吞吐量为

$$r_{m,k}^M = \Delta f(1 + S_{m,k}^M) \quad (13)$$

与 FBS 子信道分配相同, 本文在 FUE 的速率需求得到满足的情况下宏用户总的速率, 则问题规划如下所示。

$$\begin{aligned} \max & \sum_{m=1}^M \sum_{k=1}^K \Gamma_m^k \Delta f(1 + S_{m,k}^M) \\ C_1: & \sum_{k=1}^K \Gamma_m^k = 1 \end{aligned} \quad (14)$$

其中, Γ_m^k 为指针变量, 若第 k 条子信道分配给用户 m 则 $\Gamma_m^k = 1$, 反之 $\Gamma_m^k = 0$, C_1 表示子信道 k 只能被分配给一个 MUE。

同样考虑用户公平性问题。第 m 个宏用户的初始吞吐量 $R'_m(t) = 0$ 。第 m 个宏用户在第 k 条子信道上的权重因子为 $\eta_{m,k} = \frac{r_{m,k}^M(t)}{R'_m(t)} + 1$ ，选取在第 k 条子信道上权重最大的用户 m^* ，将子信道 k 分配给 m^* ，更新所有宏用户已获得的吞吐量，其表达式为

$$R'_m(t+1) = \begin{cases} R'_m(t) + r_{m,k}^M(t), & m = m^* \\ R'_m(t), & m \neq m^* \end{cases} \quad (15)$$

其中， $t = \{0, 1, 2, \dots\}$ 为迭代次数。

待分配子信道集合为 $\Xi = \{1, 2, \dots, k, \dots, K\}$ ，第 m 个宏用户在第 k 条子信道上获得的初始速率 $R'_{i,j}(t) = 0$ 。由于宏用户不涉及对信道的二次分配，所以这里不对宏用户信道数目进行限制。

对于宏用户，子信道分配算法如下。

算法 3 宏用户子信道分配算法

- 1) 初始化 $\Lambda, R'_{i,j}(t) = 0$;
- 2) 输入宏用户信道增益矩阵 PL ，计算出每个 MUE 在第 k 条子信道的权重 $\eta_{m,k}, m \in \{1, 2, \dots, M\}$;
- 3) 计算 $m^* = \arg \max_m (\eta_{m,k})$;
- 4) 选择最大的 $\eta_{m,k}$ ，分配第 k 条子信道给节点 m^* ;
- 6) 清除 k ，更新 Λ ;
- 7) 更新 $R'_{i,j}(t)$;
- 8) 更新 $\eta_{j,k}^i$;
- 9) 如果 Λ 为空集，结束算法，否则转到步骤 3)。

4 功率分配

本文对信道分配后的系统中的 FBS 进行功率分配，进一步提升系统性能。

由于 FBS 在城市中密集、随机分布，且现行 FBS 的处理能力较弱，本文提出一种分布式的功率控制算法。由于进行功率分配之前所有 FBS 的发射功率相同，则 $t = 0$ 时，有

$$P_1 = P_2 = \dots = P_i = \dots = P_{k-1} = P_k \quad (16)$$

设定一个较低的 FBS 之间的干扰阈值 I^{tar} ，同时计算组内 FBS 间的干扰。本文提出的分布式功率分配算法如下所示。

$$P_i(t+1) = \mu P_i(t) \quad (17)$$

$$\mu = \begin{cases} 1 - \xi, & k_i(t) = 1, \frac{P_i(t+1)}{P_i(t)} R_i > R_{\min,i}, i \in [1, 2, \dots, k] \\ 1 + \xi, & k_i(t) = 0, \frac{P_i(t+1)}{P_i(t)} R_i < R_{\max,i}, i \in [1, 2, \dots, k] \\ 1, & \text{其他} \end{cases}$$

$$P_i(t) \leq P_{\max} \quad (18)$$

其中， μ 为功率变化系数， $P_i(t)$ 为 FBS _{i} 在 t 时刻的发射功率。 $k_i(t)$ 为 FBS _{i} 在 t 时刻对同组内其他 FBS 的干扰强弱指针，若 $k_i(t) = 1$ ，则在 t 时刻 FBS _{i} 对同组内其他 FBS 造成的干扰大于 I^{tar} ，反之，则在 t 时刻 FBS _{i} 对同组内其他 FBS 造成的干扰小于 I^{tar} 。 $R_{\min,i}$ 和 $R_{\max,i}$ 为 FBS _{i} 的最小和最大速率需求； R_i 为 FBS _{i} 的平均速率。 ξ 为每次迭代之后发射功率的调整因子。若 $P_i(t) > P_{\max}$ ，则令 $P_i(t) = P_{\max}$ ，且算法结束。

5 仿真结果及分析

本文将 Femtocell 双层网络模拟为 3GPP 标准规定的城市部署场景^[18]，仿真场景中存在一个 MBS 和 F 个 Femtocell。在系统仿真时具体所用参数如表 1 所示，信道增益主要考虑路径损耗、穿墙损耗、阴影衰落和天线增益。本文分析了所提算法对系统性能的影响，分别从 Femtocell 用户平均干扰、Femtocell 平均速率、Femtocell 用户公平性、Femtocell 用户满意度和宏用户吞吐量 5 个方面对系统性能进行分析。本文算法 1 是本文所提分组算法，对比的算法包括未分组算法、HCFM 算法^[11]、ASA 算法^[12]。

表 1 仿真参数

参数	参数值
载波频率	2.0 GHz
可用信道数 $ c $	4
子信道带宽 Δf	180 kHz
每个毫微微基站用户 k_f	2~4
毫微微基站与用户距离	仿真时随机设置用户初始位置
宏基站覆盖半径/与建筑中心位置	500 m/100 m
毫微微基站与用户阴影衰落	4 dB
外墙损耗	20 dB
地板损耗	18.3 dB
高斯噪声功率	-174 dBm/Hz
宏基站发射功率	20 W
毫微微基站发射功率	30 mW
最小速率 R_f	100 bit/s

从图 3 可以看出, 在采用文献[11]中信道分配算法的情况下, 本文提出的分组算法 1 和文献[11]的分组算法(HCFM)及文献[12]的分组算法(ASA)相比, 用户的平均干扰更低, 受干扰的毫微微基站数目更少。未分组下的干扰最强烈, 由于缺少了分组环节造成 FBS 间的干扰较大, 从而使系统性能降低, 干扰较大。HCFM 分组算法及 ASA 均采用组内复用组间正交的分组方案。HCFM 在分组前将每个 FBS 均视为一个组, 再根据组内干扰门限将不同的组合并到一个组中, 这种算法存在较大的随机性, 不能找到最优的分组方案, 因此其用户平均干扰是较大的。ASA 分组方案采用局部随机搜索分组方案, 该方案亦存在较大的随机性, 因此与 HCFM 一样, 均不能寻找到最优的分组方案, 这就造成了毫微微用户相互干扰较大。由图 3 可以看出, 本文提出的分组算法与 HCFM 分组算法及 ASA 分组算法相比, 可以有效地降低用户干扰, 增强用户体验。本文提出的分组和信道分配算法(本文算法 2)相较于本文算法 1, 用户的平均干扰是极低的, 说明在相同的分组方案下, 本文所提信道分配算法明显优于 HCFM 信道分配方案。另外, 在使用本文提出的分组算法和信道分配算法的基础上, 进一步将本文提出的功率分配算法(表示为本文算法 3)和本文算法 2 做对比, 再次降低了用户间干扰。

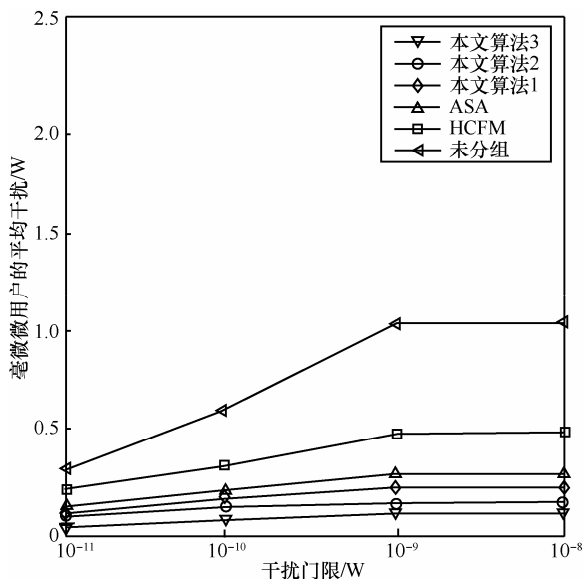


图 3 毫微微用户平均干扰

图 4 为毫微微用户平均速率, 由本文所提分组算法 1 进行分组后, 与 HCFM 分组算法、ASA 分组算法及未分组的情况进行对比, 为了保证对比的

公正, 均采用文献[11]的信道分配算法。本文干扰门限为 $\zeta_k^n = 10^{-11}$ 。由图 3 和图 4 可知, HCFM 分组方案存在的平均干扰较大, 这也影响了毫微微用户平均速率。ASA 分组方案虽然平均干扰较 HCFM 较小, 但是该方案中宏用户与毫微微用户使用正交子信道, 这就造成了严重的频谱浪费, 获得了更低的速率。在相同的信道分配算法下, 本文所提分组算法 1 与 HCFM 分组算法及 ASA 分组算法对比, 其平均用户速率更高, 本文分组算法从全局出发, 找到最优的分组方案, 使毫微微用户间的平均干扰达到更低的水平, 进而提升了毫微微用户速率。未分组方法平均速率最低。同时, 由图 4 可以看出, 毫微微用户的平均速率随着毫微微基站数目的增多而降低。这是因为节点数目越多, 则用户收到邻节点干扰越大, 从而导致用户速率降低。

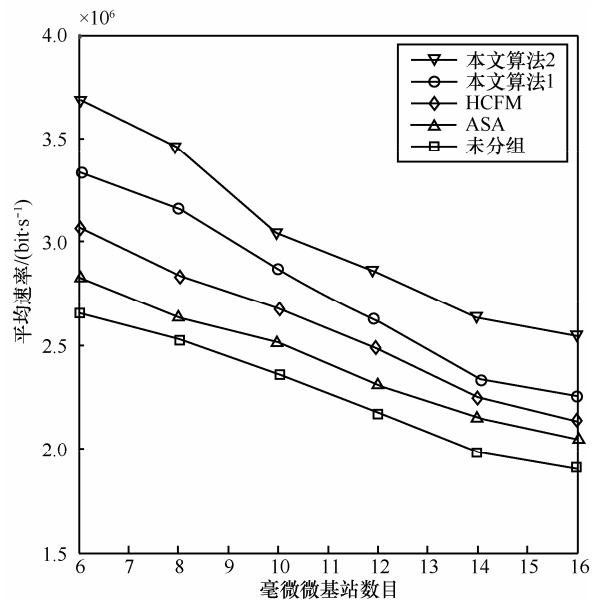


图 4 毫微微用户平均速率

本文公平性度量标准采用杰恩公平性指数

$$\text{(Jain's fairness index)}^{[19]}, \text{ 即 } FA = \frac{\left(\sum_{u=1}^U r_u\right)^2}{U \sum_{u=1}^U r_u},$$

其中, r_u 为毫微微用户 u 的吞吐量, U 为毫微微用户数量, 本文每个 FBS 的授权用户数目为 4, 则 $U = 4F$ 。如图 5 所示, 在使用文献[11]的信道分配方法下, 本文的分组方法(即本文算法 1)和其他方案相比, 随着干扰门限的增大, 用户速率公平性始终高于 HCFM 分组方案及 ASA 分组方案, 更进

一步说明本文的分组方法优于 HCFM 及 ASA 的分组方案。另外,从图 5 中看出,本文的分组和信道分配方法与文献[11]中的分组和信道分配方法相比,仍然有高的速率公平性。本文算法 2 为本文所提分组算法及信道分配算法相结合的算法,本文信道分配方案综合考虑了用户速率公平性及用户吞吐量的问题,相较于文献[11]未考虑用户速率公平性的信道分配方案,毫微微用户速率公平性更高。随着干扰门限的增大,速率公平性的趋势是提高的,这是因为干扰门限增大,用户间的干扰数增多,可分的有效信道数减少。从图 5 中还看到,同等条件下,干扰门限越大,用户间速率公平性越高。

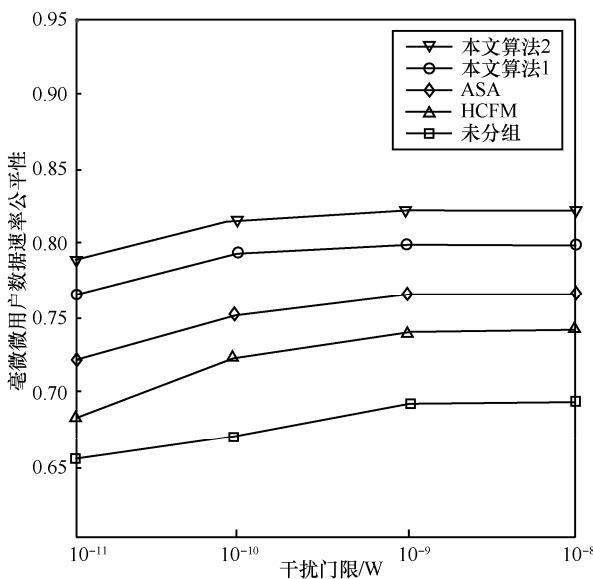


图 5 毫微微用户数据速率公平性

图 6 所示为 FUE 满意度,在 Femtocell 密度增大的情况下,对比其他算法,只有本文所提算法能使 FUE 的满意度保持在一个较高水平。与 HCFM 算法、ASA 算法及未分组算法相比,本文所提分组算法(本文算法 1)较高地提升了用户满意度。结合图 6 可以看出,在本文算法 1 的基础上加入本文所提信道分配方案(本文算法 2)能够更大提升用户满意度。同样地,在本文算法 2 的基础上进一步采用本文所提功率分配算法(本文算法 3)可以再次提升用户满意度。

图 7 展示了不同算法在不同 FBS 部署密度下室内 MUE 的平均吞吐量。在本文毫微微密集分布场景中,本文算法 1 为对毫微微进行分组。由图 7 可以看出,本文分组方法与 HCFM 和 ASA 分组算法相比,由于每次分组均寻找到最优的分组方案,所

以对宏用户的干扰最小,因此宏用户吞吐量较高。本文算法 2 在本文算法 1 的基础上采用了子信道分配算法。未分组算法的吞吐量最低,因为其受到 FBS 的干扰最大。本文算法 2 对宏用户进行合理的信道分配,有效地降低了 FBS 对 MUE 的干扰,从而显著提升了系统性能。

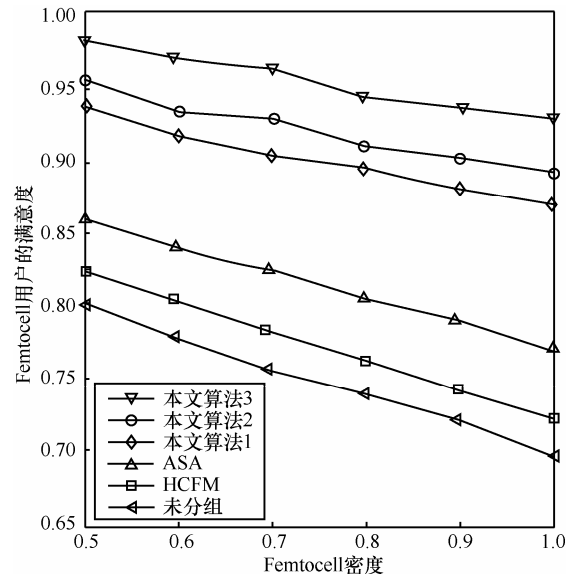


图 6 毫微微用户满意度

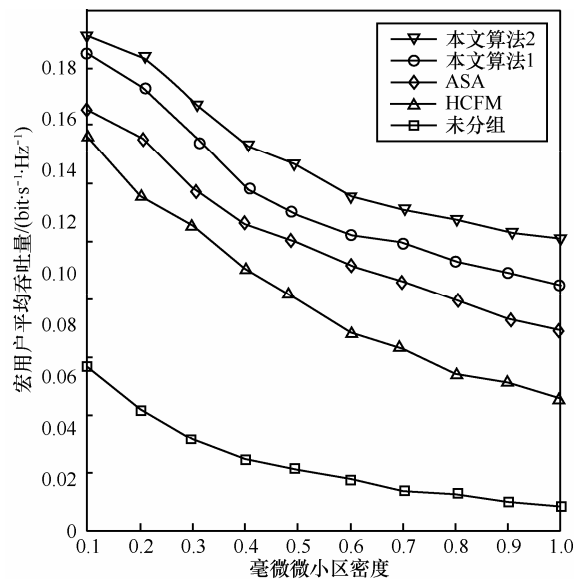


图 7 宏用户平均吞吐量

6 结束语

本文讨论了 Femtocell 网络中的干扰协调问题。提出了一种基于分簇的资源分配机制,该机制包括分组算法、信道分配算法和功率分配算法。该机制

有效地抑制了 Femtocell 网络中的同层干扰及跨层干扰问题,同时提升了平均速率、满足了用户速率公平需求,进而使用户获得更高的满意度。

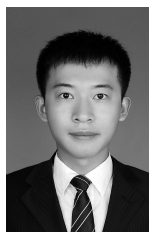
参考文献:

- [1] 周雄, 冯穗力, 丁跃华, 等. Femtocell 网络中博弈式频率复用算法[J]. 通信学报, 2015, 36(2): 137-143.
- ZHOU X, FENG S L, DING Y H, et al. Game-theoretical frequency reuse algorithm in Femtocell network[J]. Journal on Communications, 2015, 36(2): 137-143.
- [2] GUIDOLIN F, BADIA L, ZORZI M. A distributed clustering algorithm for coordinated multipoint in LTE networks[J]. IEEE Wireless Communication Letters, 2014, 3(5): 517-520.
- [3] AUDHYA G K, SINHA K, MANDAL K, et al. A new approach to fast near-optimal channel assignment in cellular mobile networks[J]. IEEE Transactions on Mobile Computing, 2013, 12(9): 1814-1827.
- [4] LEE W, KANG J, KANG J. Joint resource allocation for throughput enhancement in cognitive radio Femtocell networks[J]. IEEE Wireless Communication Letters, 2015, 4:1.
- [5] CHEN D, JIANG T, ZHANG Z. Frequency partitioning methods to mitigate cross-tier interference in two-tier Femtocell networks[J]. IEEE Transactions on Vehicular Technology, 2015, 64(5): 1793-1805.
- [6] ELSHERIF A R, CHEN W P, ITO A, et al. Adaptive resource allocation for interference management in small cell networks[J]. IEEE Transactions on Communications, 2015, 63: 1.
- [7] MENG Y, LI J, LI H, et al. A transformed conflict graph based resource allocation scheme combining interference alignment in OFDMA Femtocell networks[J]. IEEE Transactions on Vehicular Technology, 2015, 64(10): 4728-4737.
- [8] ZHANG H, JIANG C, BEAULIEU N C, et al. Resource allocation in spectrum-sharing OFDMA Femtocells with heterogeneous services[J]. IEEE Transactions on Communications, 2014, 62(7): 2366-2377.
- [9] HATOUM A, LANGAR R, AITSAADI N, et al. Cluster-based resource management in OFDMA Femtocell networks with QoS guarantees[J]. IEEE Transactions on Vehicular Technology, 2014, 63(5): 2378-2391.
- [10] HA V N, LONG B L. Fair resource allocation for OFDMA Femtocell networks with Macrocell protection[J]. IEEE Transactions on Vehicular Technology, 2014, 63(3): 1388-1401.
- [11] LIU S J, TIAN H. Clustering based interference management for QoS guarantees in OFDMA Femtocell[C]//2013 IEEE Wireless Communications and Networking Conference(WCNC). 2013: 649-654.
- [12] HSIEH H Y, WEI S E, CHIEN C P. Optimizing small cell deployment in arbitrary wireless networks with minimum service rate constraints[J]. IEEE Transactions on Mobile Computing, 2014, 13(8): 1801-1815.
- [13] ABRAMOWITZ M. Handbook of mathematical functions with formulas, graphs, and mathematical tables[M]. Dover Publications, 1974.
- [14] WILLIAMSON D P, SHMOYS D B. The design of approximation algorithms[M]. Cambridge University Press, 2011.
- [15] LUO Z Q, MA W K, SO M C, et al. Semidefinite relaxation of quadratic optimization problems[J]. IEEE Signal Processing Magazine, 2010, 27(3): 20-34.
- [16] JOS F S. Implementation of interior point methods for mixed semidefinite and second order cone optimization problems[J]. Optimization Methods & Software, 2002, 17(6): 1105-1154.
- [17] GÄRTNER B, MATOUSEK J. Approximation algorithms and semidefinite programming[J]. Springer Berlin Heidelberg, 2012,7(3): 291-309.
- [18] 3GPP TSG RAN1-2010.Evolved universal terrestrial radio access (E-UTRA); Further advancements for E-UTRA physical layer aspects[R]. 2010.
- [19] 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 (WCNC). 2013: 673-678.

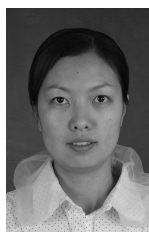
作者简介:



张海波(1979-),男,重庆人,博士,重庆邮电大学副教授、硕士生导师,主要研究方向为无线资源管理。



邹剑(1990-),男,重庆人,重庆邮电大学硕士生,主要研究方向为无线资源管理。



刘开健(1981-),女,重庆人,重庆邮电大学讲师,主要研究方向为无线资源分配与优化。



陈善学(1966-),男,安徽合肥人,博士,重庆邮电大学教授、硕士生导师,主要研究方向为通信网络优化。