

超密集网络中子信道和功率分配研究

谭博文 王 纲 姚 稳

(重庆邮电大学通信与信息工程学院 重庆 400065)

摘 要 超密集网络中,严重的小区间干扰制约了终端用户的数据速率,针对该问题,提出一种基于簇优先级的资源分配方案。该方案分为 3 个步骤:首先,采用基于图论的染色算法为毫微微接入点(Femtocell Access Points, FAPs)分簇;然后,以簇内每个毫微微用户(Femtocell User Equipments, FUEs)的待发送数据量、排队等待时延以及受干扰强度等作为优先级,计算每个簇的优先级,高优先级的簇可最先获得信道增益好的子信道;最后,利用卡罗需-库恩-塔克(Karush-Kuhn-Tucker, KKT)条件和注水算法为 FUEs 分配功率。仿真实验表明该方案能够有效地减小 Femtocell 间的干扰,并能够极大地满足用户的需求,同时提升系统的吞吐量和频谱效率。

关键词 超密集网络,毫微微小区,分簇,资源分配

中图分类号 TN929.5 文献标识码 A

Study of Sub-channel and Power Allocation in Ultra-dense Networks

TAN Bo-wen WANG Gang YAO Wen

(Department of Communication and Information Engineering, Chongqing University of Posts and Telecommunications, Chongqing 400065, China)

Abstract In ultra-dense network, the serious inter-cell interference has restricted the data rate of users. In view of this problem, a new priority-based clustering resource allocation scheme was proposed in this paper. The scheme is divided into three steps. In the first step, it uses graph-based coloring algorithm for femtocell access points (FAPs). In the second step, it uses number of data to be transmitted, the queuing delay and the interference intensity of each femtocell user equipment (FUEs) in the cluster as the priority, and then calculates the priority of each cluster, for examples, clusters with high priority can receive sub-channel of good channel gain first. At last, it allocates power for FUEs by Karush-Kuhn-Tucker (KKT) and Water-Filling fashion. Simulation results show that the proposed scheme can effectively reduce the interference between femtocell, and can greatly satisfy the needs of users, while improving the throughput and spectrum efficiency.

Keywords Ultra-dense network, Femtocell, Clustering, Resource allocation

1 引言

超密集网络(Ultra Dense Network, UDN)是新一代移动通信系统(5G)中的关键技术之一,UDN 通过大量部署低功率节点(比如 Femtocells)来改善系统容量和无缝覆盖^[1]。超密集网络中存在宏基站(Macrocell Base Station, MBS)之间的同层干扰、MBS 与 Femtocells 之间的跨层干扰以及 Femtocells 之间的同层干扰^[2],其中,Femtocells 之间的干扰尤为严重。为了满足用户的需求,提升系统的整体性能成为亟待解决的问题。因此,在超密集网络中寻求有效的小区间干扰管理机制、资源分配方案显得尤为重要^[3]。

现阶段,国内外学者针对以上问题进行了大量的研究探索^[4-12]。文献[4]以管理超密集网络中资源分配为目的,提出一种基于非合作博弈理论的多维资源分配算法,该算法分为传输节点联合和信道与功率分配两部分,算法中的可行域及离散变量松弛方法能够以较低的复杂度最大化地优化多维资源分配问题。文献[5]使用博弈论提出一种基于负载信息的分簇算法,并设计出一种基于该分簇算法的小区间资源调度

方案(TS-JCS)。文献[6]在回传资源限制的情况下最大化用户的权重总量速率,首先采用 L1-norm 优化方法将非凹回传限制转化为可以解决的模型,然后基于连续参数优化方法重新计算二阶限制的目标函数,最后基于特殊需求形成一个迭代算法。文献[7]提出一种基于染色分簇的资源分配(Graph-based Clustering Resource Allocation, GCRA)方案,该方案基于完全染色算法将所有的基站划分到相互独立的簇中,然后通过为不同的簇分配相互正交的频带资源来解决干扰的问题。文献[8]提出一种最差子载波避免(Worst Subcarrier Avoiding, WSA)算法,目的是防止给终端用户分配了信道增益较差的子载波同时提升系统容量。基于自组织规则和真实场景资源分配的限制,文献[9]提出两种新型的资源分配算法,分别是自主分配和协调分配,并且仿真证明该算法在用户损耗和网络吞吐量上较现有的资源分配算法均有较好的提升。文献[10]提出一种基于染色的新型集中式资源分割方案(Graph-Based Dynamic Frequency Reuse, GB-DFR),该方案在平衡了小区间干扰与频谱资源的复用的基础上,能够更好地适用于随机部署的无线网络系统。文献[11]在超密集部署

本文受国家科技重大专项基金(2016ZX03002010-003)资助。

谭博文(1993-),男,硕士生,主要研究方向为超密集网络资源分配,E-mail:296159082@qq.com(通信作者)。

的 Femtocell 网络中,提出一种以用户为中心的基于图论的频率分配算法(Graph based Frequency Allocation, GFA),该算法的目的在于增加频率复用率和网络的吞吐量。文献[12]基于提升超密集网中的频谱效率和协调小区间干扰,提出一种基于染色分簇的资源分配算法(Coloring-based Cluster Resource Allocation, CCRA),该算法分为两步:1)考虑到保证簇内用户的干扰在可接受的范围内,首先为每一个簇分配资源;2)根据干扰环境的不同将资源分配给各个用户,但是该算法中基于图论的染色算法并没有具体给出。

本文考虑了超密集网络中的 Femtocells 之间的干扰问题,提出一种改进的基于染色分簇的资源分配方案(Improved Coloring-based Cluster Resource Allocation, ICCRA)。该方案主要分为3部分:1)根据小区间的干扰关系构建干扰拓扑图,并根据基于图论的染色算法将小区间分成若干个不相交的簇,其中染相同颜色的小区间分到同一簇内,同簇内复用相同的频谱资源;2)根据簇内每个用户待发送的数据量、排队等待时延以及受干扰强度,计算每一个簇的优先级,并将增益好的子信道优先分配给优先级高的用户;3)基于最大功率和最低速率的公平性准则,以最大化系统吞吐量为目标,为用户进行优化功率的分配。

2 系统模型

本文考虑到超密集网络下的 FAPs 之间的资源分配问题,假设系统有一个 MBS,有 X 个 FAPs,简单起见,每个 FAP 接入 1 个 FUE, FUEs 集合为 ΦU , FAPs 集合为 ΦF ,每个 FUE 选择最近的 FAP 接入。FAPs 与 FUEs 在宏小区覆盖范围内随机分布,假定所有的 FAP 都是封闭接入的。

第 j 个 FAP 服务的 FUE i 在子信道 k 上的信干噪比 $\gamma_{j,i}^k$ 为:

$$\gamma_{j,i}^k = \frac{p_{j,i}^k g_{j,i}^k}{\sum_{n \neq j, n \in \Phi F} p_{n,i}^k g_{n,i}^k + \sigma^2} \quad (1)$$

其中, $p_{j,i}^k$ 是 FAP j 在信道 k 上的发射功率, $g_{j,i}^k$ 是 FAP j 到 FUE i 的信道增益, σ^2 为噪声功率。子信道 k 上的增益干噪比 $H_{j,i}^k$ 为:

$$H_{j,i}^k = \frac{g_{j,i}^k}{\sum_{n \neq j, n \in \Phi F} p_{n,i}^k g_{n,i}^k + \sigma^2} \quad (2)$$

因此,假设系统带宽为 B , FUE i 在子信道 k 上的传输速率可以表示为:

$$R_{j,i}^k = B \log_2(1 + \gamma_{j,i}^k) = B \log_2(1 + p_{j,i}^k \cdot H_{j,i}^k) \quad (3)$$

则系统总传输速率为:

$$R = \sum_{j,i,k} B \log_2(1 + p_{j,i}^k \cdot H_{j,i}^k) \quad (4)$$

3 FAPs 分簇

3.1 构建干扰拓扑图

首先,根据各小区之间彼此干扰的关系,构建一个无向干扰拓扑图 $G=(V,E)$,其中 $V=\{1,2,\dots,v\}$ 表示干扰拓扑图的各个顶点的集合,顶点 $ID=\{1,2,\dots,v\}$,具体的组成是宏小区范围内所有的 Femtocells; E 表示干扰拓扑图的边集,代表不同的 Femtocells 之间的干扰关系。假设系统中相互重叠的区域存在小区间干扰,那么得到简化的干扰拓扑如图 1 所示。

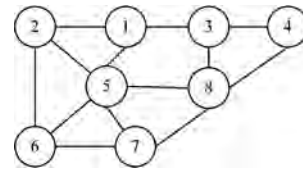


图 1 简化的干扰拓扑图

3.2 染色分簇算法

染色分簇算法的具体步骤如下。

Step 1 初始化:每个顶点计算各自的度 D (顶点边的数目),并将所有的度 D 按照从大到小的顺序依次排列,存储于 $List_D$ 中,建立已用颜色列表 $List_C$;

Step 2 前往 $List_D$ 中最大值对应的顶点(有多个最大值,首先选择 ID 最小的顶点),从调色板中选取一种颜色为其染色,并删除该顶点所在 $List_D$ 中的值;

Step 3 前往此时 $List_D$ 中最大值对应的顶点,将其与其有邻居关系的顶点进行对比,从调色板或 $List_C$ 中选取不同的颜色进行染色;

Step 4 重复 Step3,直至所有顶点染色完毕,根据染色的情况进行分簇,将染相同颜色的顶点分到相同的簇内。

染色完毕后进行分簇操作,染相同颜色的顶点分在相同的簇:簇 1 为 $\{1,6,8\}$;簇 2 为 $\{2,4,7\}$;簇 3 为 $\{3,5\}$ 。

4 FAPs 资源分配

4.1 FAPs 子信道分配

子信道分配的目的在于为不同簇分配正交的子信道,然后同簇内的 FAPs 可以复用相同的子信道。本文提出一种基于簇优先级的子信道分配算法,首先假设每个 FAP 都有一个缓冲队列 $Array_data$,该缓冲队列存放的是每个 FUE 待发送的数据。考虑到用户的公平性问题并且不失一般性,定义影响到资源优先级的因素包括:1) FUEs 待发送的数据量;2) FUEs 排队等待时延;3) FUEs 受其他 FAPs 干扰的强度。一般来说, FUEs 待发送的数据量多、FUEs 的等待时延大或 FUEs 受到干扰的强度较大时, FUEs 收到的资源的优先级要求越高。

1) 假设 FUE i 预备待发送数据量为 D_i' , $Array_data$ 中能缓存的最大数据量为 $D_{i,max}$,那么实际待发送数据量 D_i 为:

$$D_i = \min\{D_i', D_{i,max}\} \quad (5)$$

2) 假设 FUE i 发起资源请求的时刻为 $T_{i,req}$,收到无线资源的时刻为 $T_{i,rec}$,那么 FUE i 在 $Array_data$ 中的等待时延 T_i 为:

$$T_i = T_{i,rec} - T_{i,req} \quad (6)$$

3) 由系统模型知, FAP j 的发射功率为 p_j , FAP j 到 FUE i 的信道增益为 $g_{j,i}$,那么 FAP j 对 FUE i 的干扰 I_i 为:

$$I_i = p_j g_{j,i} \quad (7)$$

综上,假设 $i, i' \in \Phi U$,则可以将 FUE i 收到的资源的优先级 $PR_{FUE}(i)$ 定义为:

$$PR_{FUE}(i) = \frac{D_i \cdot T_i \cdot I_i}{\sum D_{i'} \cdot \sum T_{i'} \cdot \sum I_{i'}} \quad (8)$$

假设系统中有 K 个子信道,根据第 3 节的染色分簇结果,假设共分 C 个簇,其中每个簇中存在的 FUEs 的个数为 $N_c, N_c = \{N_1, N_2, \dots, N_c\}$,第 c 个簇中的 FUEs 集合为 $\Phi U_c'$, FAPs 的集合为 $\Phi F_c'$,并且 $\Phi U_c' \subseteq \Phi U, \Phi F_c' \subseteq \Phi F$ 。

现根据每个簇的大小,以分配资源的公平性为原则,将信道按比例分配给簇,那么簇 $a = \{1, 2, \dots, C\}$ 所得子信道个数 K_a 为:

$$K_a = K \frac{N_a}{\sum_{a=1}^C N_a} \quad (9)$$

由以上分析,假设 $i'' \in \Phi U_c'$, 可以将系统中某一个簇的优先级 $PR_{clu}(i)$ 表示为:

$$PR_{clu}(i) = \frac{\sum_{i''=1}^{N_c} D_{i''} \cdot \sum_{i''=1}^{N_c} T_{i''} \cdot \sum_{i''=1}^{N_c} I_{i''}}{\sum D_{i''} \cdot \sum T_{i''} \cdot \sum I_{i''}} \quad (10)$$

下面给出具体基于簇优先级的子信道分配算法的步骤。

Step 1 计算每个 FUE 的 D_i, T_i, I_i , 优先级 $PR_{FUE}(i)$ 以及每个簇获得的子信道个数 K_a 。

Step 2 根据 Step 1 中的数据结果,计算每个簇的优先级 $PR_{clu}(i)$, 并将计算的 $PR_{clu}(i)$ 按大小降序存储于 $List_PR$ 中。

Step 3 首先根据每个簇内的所有 FUEs 对不同子信道的增益,计算该簇中 FUEs 在各子信道的增益平均值,重新规划增益矩阵;然后以簇为单位将平均增益按照从大到小的顺序排列,使得子信道序号重新组成一个 $M \times N$ 的矩阵 H_{seq} 。

Step 4 根据 $List_PR$ 中存储的簇优先级,首先为优先级第一的簇分配增益最佳的子信道,在矩阵 H_{seq} 第一行从左至右开始选取 N_a 个子信道;然后为优先级次之的簇分配子信道,在矩阵 H_{seq} 第二行从左至右开始选取 N_a 个子信道(此时应除去 Step 3 已选定的子信道),以此类推,直至每个簇都分配到足够的正交子信道。

假设系统分簇个数为 3,子信道数为 8,且簇 1 需要 3 个子信道,簇 2 需要 3 个子信道,簇 3 需要 2 个子信道,另外簇优先级由高到低依次为簇 2,簇 3,簇 1,则调整后的增益矩阵如表 1 所列。

表 1 增益矩阵

信道	1	2	3	4	5	6	7	8
簇 2	0.97	0.75	0.88	0.91	1.14	1.02	0.81	0.60
簇 3	1.03	1.01	0.78	0.82	0.59	0.61	0.99	0.63
簇 1	0.54	0.63	0.96	1.07	1.02	0.77	0.78	0.88

可以得到矩阵 H_{seq} 为:

$$H_{seq} = \begin{bmatrix} 5 & 6 & 1 & 4 & 3 & 7 & 2 & 8 \\ 1 & 2 & 7 & 4 & 3 & 8 & 6 & 5 \\ 4 & 5 & 3 & 8 & 7 & 6 & 2 & 1 \end{bmatrix}$$

首先为优先级最高的簇 2 分配子信道,在矩阵 H_{seq} 的第一行首先选取簇 2 所需的 3 个子信道,序号为 $\{5, 6, 1\}$;然后为优先级次之的簇 3 分配子信道,在 H_{seq} 的第二行选取其所需的 3 个子信道,但是此时已为簇 2 分配了子信道 $\{1\}$,因此选取序号为 $\{2, 7, 4\}$ 的子信道;最后为优先级最低的簇 1 分配子信道,在 H_{seq} 的最后一行选取 2 个子信道,此时为簇 1 分配了 $\{5\}$,为簇 2 分配了 $\{4\}$,所以按顺序为簇 3 分配子信道的序号为 $\{3, 8\}$ 。由此可以发现,根据簇的优先级大小,高优先级的簇优先获得信道增益好的子信道,而低优先级的簇在最后才分得子信道。

4.2 FAPs 功率分配

由 4.1 节得出子信道分配结果之后,可以将资源的分配转换成 FUEs 的功率分配问题。本文的目标就是 FAPs 在满

足最大功率和最低速率的限制条件下,使得 FUEs 的总传输速率最大,可以描述为:

$$\max \sum_{a=1}^C \sum_{j \in \Phi U_c'} \sum_{k=1}^K \Delta f \log_2(1 + p_{j,i}^k H_{j,i}^k) \quad (11)$$

$$\text{Subject to: } \sum_{k=1}^K p_{j,i}^k \leq p_{j,\max}, \forall j \in \Phi F_c' \quad (12)$$

$$\sum_{k=1}^K \Delta f \log_2(1 + p_{j,i}^k H_{j,i}^k) \geq R_{j,\min}, \forall j \in \Phi F_c' \quad (13)$$

$$p_{j,i}^k g_{j,i}^k \leq I_{th}, \forall j \in \Phi F_c' \quad (14)$$

其中,FUE i 在子信道分配时就已经确定, $p_{j,\max}$ 是 FAP j 的总功率限制, $R_{j,\min}$ 是 FAP j 的最小速率要求, I_{th} 是簇内用户 u 受到来自于其他 FAPs 的干扰门限值。

根据上述目标函数和约束条件,可以使用注水算法为 FUEs 分配功率。由于目标函数是关于 $p_{j,i}^k$ 连续可分的问题,因此每一个局部最优解都满足 KKT 条件^[13],设拉格朗日乘子为 α, β, δ ,由 KKT 条件可知:

$$L(p, \alpha, \beta, \delta) = \sum_{a=1}^C \sum_{j \in \Phi U_c'} \sum_{k=1}^K \Delta f \log_2(1 + p_{j,i}^k H_{j,i}^k) - \alpha \left(\sum_{k=1}^K p_{j,i}^k - p_{j,\max} \right) - \beta \left(R_{j,\min} - \sum_{k=1}^K \Delta f \log_2(1 + p_{j,i}^k H_{j,i}^k) \right) - \delta (p_{j,i}^k g_{j,i}^k - I_{th}) \quad (15)$$

计算偏导数 $\frac{\partial L(p, \alpha, \beta, \delta)}{\partial p_{j,i}^k} = 0$, 可以得出功率分配的最优解为:

$$p_{j,i}^k = \left[\frac{\Delta f \cdot (1 + \beta)}{(\alpha + \delta \cdot g_{j,i}^k) \ln 2} - \frac{1}{H_{j,i}^k} \right]^+ = [U + V]^+ \quad (16)$$

其中, $[x]^+ = \max\{x, 0\}$ 。

5 仿真

本文采用的是 3GPP 标准规范中的城市部署场景^[14],但为了简便起见,本文的仿真场景中有一个 MBS 和 X 个 FAPs。本文通过仿真分析了所提算法的多种性能,包括平均 FUE 的吞吐量和频谱效率,以及公平度。具体的仿真参数^[12]设置如表 2 所列。

表 2 仿真参数

参数	参数值
子信道数	50
系统带宽/MHz	10
载波频段/GHz	2
MBS 覆盖半径/m	500
MBS 最大发射功率/dBm	46
FAP 最大发射功率/dBm	20
FAP 个数	10
高斯白噪声 (dBm/Hz)	-174
业务模型	Full buffer

本文选择了 3 种资源分配方案与所提方案进行性能分析,分别是 CCRA 算法、UGFA 算法和 GB-DFR 算法。CCRA 算法以小区间的干扰大小作为优先级,优先级较高的小区优先获得资源块;UGFA 算法以用户为中心,然后在超密集部署的 Femtocells 网络的每一个簇中分配频谱资源;GB-DFR 算法用图论中的顶点代表基站,然后根据顺序染色算法为用户分配资源块。

图 2 中显示了平均 FUE 吞吐量的累积概率密度函数 CDF。在 UGFA 和 CCRA 算法中,干扰拓扑图中的顶点代表用户,这样就有可能造成相互干扰的小区之间复用了相同的频谱资源,从而使用户遭受更严重的干扰,平均用户的吞吐

量不高。但 CCRA 算法中以干扰强度作为优先级,首先为干扰较强的用户提供资源块,高效地增加了平均用户的吞吐量。GB-DFR 算法优先照顾到了小区边缘用户的吞吐量,但对整体用户的平均吞吐量有所影响。ICCRA 算法以簇的优先级为准则,优选信道增益好的子信道分配给优先级高的簇,并且以 FUEs 的总传输速率最大为目标,优化用户功率分配,在保证系统中用户需求的同时,也提升了平均用户的吞吐量。

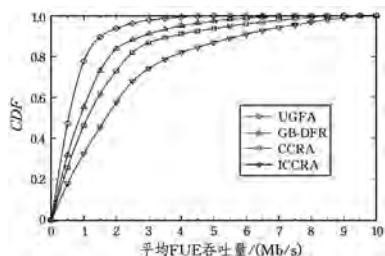


图2 平均 FUE 的吞吐量

图3展示了4种算法下平均 FUE 频谱效率的 CDF。GB-DFR 算法中没有干扰的相邻基站,使用的也是正交频谱资源,这样会造成大量的频谱资源的浪费,因此该算法的平均用户的频谱利用率最低。UGFA 算法为每个簇分配相同数量的资源,假设某一个簇内的用户相对较少,那么必然也会造成频谱资源的浪费。ICCRA 算法相比 CCRA 算法,在资源分配时能够根据簇内所需的资源数量按需进行分配,相对节省了频谱资源,同时也提升了平均用户的频谱资源利用率。

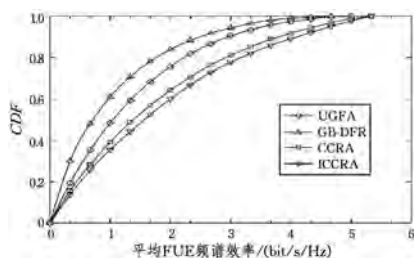


图3 平均 FUE 频谱效率

FUEs 间的 Jains 公平性指数如图4所示。随着 Femtocells 密度的增加,ICCRA 算法的公平度^[14]明显高于其他算法,这是因为 ICCRA 算法以用户待发送的数据量、排队等待时延和所遭受的干扰强度为优先级,计算出系统内每一个簇的优先级;然后以簇为单位进行子信道的分配;最后基于最大功率和最低速率的公平性准则进行功率分配,并动态调整子信道的功率,进一步提升 FUEs 间的公平性。CCRA 和 UGFA 算法仅仅考虑了小区间干扰强度,GB-DFR 未涉及对边缘小区用户传输速率的考虑。

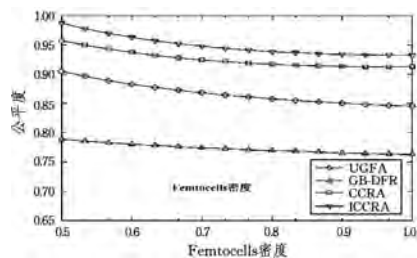


图4 FUEs 间的公平度

结束语 本文就超密集网络中 Femtocells 间的同层干扰及资源分配问题进行了讨论,并针对该问题提出了一种改进的基于分簇资源的分配算法,其中包括染色分簇算法、子信道

分配算法以及最优解功率分配算法。该算法理论上弥补了文献[12]中染色算法的不足,增添了最优功率的分配,并能够最大化地提升频谱效率。实际上,其又同时兼顾了用户的需求,提升了用户间的公平性,适用于实际场景。仿真实验表明,本文算法在公平度、平均用户的吞吐量和频谱效率上相对得到了一定程度的提升,尤其是在用户公平度方面效果最佳。

参考文献

- [1] WANG C X, HAIDER F, GAO X Q, et al. Cellular architecture and key technologies for 5G wireless communication networks [J]. IEEE Communication Magazine, 2014, 52(2): 122-130.
- [2] HAO P, YAN X, RUYUE Y N, et al. Ultra dense Network: Challenges, Enabling Technologies and New Trends [J]. China Communications, 2016, 13(2): 30-40.
- [3] KAMEL M, HAMOUDA W, YOUSSEF A. Ultra-dense Networks: A Survey [J]. IEEE Communications Surveys & Tutorials, 2016, 18(4): 2522-2545.
- [4] WANG Z, ZHU X R, BAO X, et al. A Novel Resource Allocation Method in Ultra-dense Network Based on Noncooperation Game Theory [J]. China Communications, 2016, 13(10): 169-180.
- [5] LIU L, GARCIA V, TIAN L, et al. Joint clustering and inter-cell resource allocation for CoMP in ultra dense cellular networks [C] // International Conference on Communications, IEEE, 2015: 2560-2564.
- [6] HUA C, LUO Y, LIU H. Wireless Backhaul Resource Allocation and User-centric Clustering in Ultra-dense Wireless Networks [J]. IET Communications, 2016, 10(15): 1858-1864.
- [7] ZHANG Q, ZHU X, WU L, et al. A coloring-based resource allocation for OFDMA femtocell networks [C] // Wireless Communications and Networking Conference. IEEE, 2013: 673-678.
- [8] LIU T, YANG C, YANG L L. A low-complexity subcarrier-power allocation scheme for frequency-division multiple-access systems [J]. IEEE Transactions on Wireless Communications, 2010, 9(5): 1564-1570.
- [9] LOPEZ-PEREZ D, CHU X, VASILAKOS A V, et al. Power Minimization Based Resource Allocation for Interference Mitigation in OFDMA Femtocell Networks [J]. IEEE Journal on Selected Areas in Communications, 2014, 32(2): 333-344.
- [10] UYGUNGELLEN S, AUER G, BHARUCHA Z. Graph-Based Dynamic Frequency Reuse in Femtocell Networks [C] // 73rd Vehicular Technology Conference (VTC Spring). IEEE, 2011: 1-6.
- [11] LUAN Z R. User-Oriented Graph Based Frequency Allocation Algorithm for Densely Deployed Femtocell Network [J]. China Communications, 2013, 10(12): 57-65.
- [12] ZHAO C D, XU X F, GAO Z B, et al. A Coloring-based Cluster Resource Allocation for Ultra Dense Network [C] // International Conference on Signal Processing, Communications and Computing (ICSPCC). IEEE, 2016: 1-5.
- [13] 解可新, 韩健, 林友联. 最优化方法 [M]. 天津: 天津大学出版社, 1997: 125-135.
- [14] 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.