

文章编号:1007-5321(2018)03-0069-06

DOI:10.13190/j.jbupt.2017-217

超密集网络中混合接入方式下基于分组的资源分配

张海波¹, 李 虎¹, 陈善学¹, 邹 剑²

(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. 中国联合网络通信有限公司 常德市分公司, 湖南 常德 415000)

摘要: 针对混合接入方式下的超密集异构网络中存在的干扰及频谱资源分配问题,提出了一种基于分组的资源分配方案. 根据 Small cell 间的干扰采用模拟退火算法对 Small cell 进行分组;运用基于最小信干噪比最大化的信道分配方案对分组后的网络进行信道分配. 给出了混合接入方式下用户的资源使用方式. 仿真结果表明,该方案可以有效地抑制干扰,提高系统性能.

关 键 词: 超密集网络; 干扰管理; 资源分配; 分组

中图分类号: TN929.53

文献标志码: A

A Cluster-Based Resource Allocation Under Hybrid Access Mode in Ultra-Dense Network

ZHANG Hai-bo¹, LI Hu¹, CHEN Shan-xue¹, ZOU Jian²

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

2. China United Network Communications Corp Changde Branch, Hunan Changde 415000, China)

Abstract: For the problem of interference and spectrum resource allocation in ultra-dense heterogeneous network under the hybrid access mode, a cluster-based resource allocation scheme was proposed. The scheme consists of two parts: the first part is to use simulated annealing algorithm to divide small cells into different clusters according to the interference between them; the other part is to use the minimum signal to interference plus noise ratio maximization algorithm to allocate sub-channels to the clustered network, and gives the user's resource usage mode under hybrid access mode. Simulations show that the proposed scheme can effectively suppress the interference and improve system performance.

Key words: ultra-dense network; interference management; resource allocation; cluster

超密集异构网络(UDN, ultra dense heterogeneous network)是近年来研究的热点之一,它有效地解决了用户密集分布情况下信号覆盖的问题,但是这也造成了更多的网络干扰. 由于与宏蜂窝(Macro-cell)共用相同的频谱资源,当它们使用相同的信道时,可能带来严重的共信道干扰^[1]. 同时,共信道干扰与 Small cell 的接入方式有很大的关系. 在封闭

接入方式下, Small cell 只允许授权的小小区用户(SUE, small cell user)接入,非授权的用户不能接入. 在开放接入方式下,如果 Small cell 有足够的资源,运营商允许所有的用户可以任意地接入该 Small cell. 但是,这种接入方式会极大降低 Small cell 内授权 SUE 的性能^[2]. 在混合接入方式下, Small cell 允许非授权用户接入,且能够使用授权用户没有使

收稿日期: 2017-11-01

基金项目: 国家自然科学基金项目(61771084,61601071);长江学者和创新团队发展计划基金项目(IRT16R72)

作者简介: 张海波(1979—),男,副教授,硕士生导师, E-mail: zhanghb@cqupt.edu.cn.

用的资源,保证了授权用户的通信质量,同时也提升了频谱利用率。

针对超密集网络中的资源分配问题许多学者做了大量研究. Wang 等^[3]提出了一种在闭合模式中基于联合功率控制算法及保证中断概率的信道分配算法,虽然在一定程度上保证了中断概率,但是由于算法较为复杂,因此系统容量较低. Zhang 等^[4]和 Guo 等^[5]将认知无线电技术应用到 Small cell 中,对 UDN 进行优化,系统容量有一定的提升. 但是,由于认知无线电技术实现复杂度较高等原因,无法应用到现实场景中. Wei 等^[6]采用分支定界算法对双层网络进行优化,最小化总发射功率,但是计算复杂度高的问题依然没有得到解决. Zhang 等^[7]研究了正交频分多址 (OFDMA, orthogonal frequency division multiple access) 超密集网络中混合接入方式下的资源分配策略,提出了带权重的比例公平调度算法. Zhang 等^[8]在 Small cell 混合接入方式下提出了一个新的频谱分配算法,Macrocell 可以分配一部分信道激励 Small cell 为宏蜂窝用户 (MUE, macrocell user) 服务。

在小小区基站 (SBS, small cell base station) 高密度部署的场景中,上述文献中的方法计算复杂度都比较高. 为了解决这个问题,Zhang 等^[9]基于图论中的着色原理提出了一种着色分组方法. Lin 等^[10]提出的分组方法通过限制每组中 Small cell 的最大数目,进而保证 SUE 的服务质量 (QoS, quality of service). Hatoum 等^[11]先进行分组,然后在每组中选出一个组头,最后由这些组头负责相应组中的资源分配. 笔者在混合接入方式下,分析讨论了 OFDMA 超密集双层网络的频谱资源分配问题,提出一种新的基于分组的资源分配方案,将 UDN 中的资源分配问题转化为分组和子信道分配问题,在控制干扰的同时最大化系统总的吞吐量。

1 系统模型

超密集网络混合接入模式场景模型中存在一个宏基站 (MBS, macrocell base station), 在 MBS 的覆盖范围内有 F 个 Small cell 同时处于运行状态,宏基站布置如图 1 所示. 为使得宏基站对其覆盖区域无死角覆盖,采用蜂窝网的配置模式. MBS 的覆盖范围较大,其主要服务对象为宏小区内存在的大量 MUE. SBS 的发射功率相对于 MBS 是极小的,其主要服务对象为其各自覆盖范围内的 2 ~ 8 个授权

SUE. 将频谱资源分割为 K 个小的资源块,将每个资源块作为一个子信道使用. 在分组及信道分配过程中 MBS/SBS 在所有信道上的功率采用均分策略. SBS 通过宽带连接到 Small cell 网关,再接入到核心网中. Small cell 网关通过信道反馈机制得到各个 SBS 之间的信道状态信息。

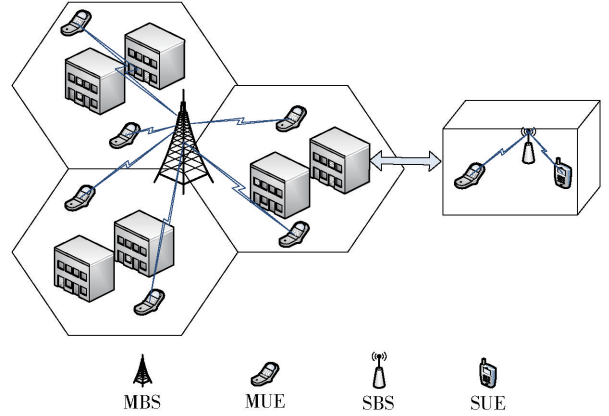


图 1 系统模型

MUE m 在子信道 k 上的信干噪比 (SINR, signal to interference plus noise ratio) 为

$$\gamma_{m,k}^M = \frac{p_k^M h_{k,m}^M}{\sum_{j \in \phi} p_{j,k}^F h_{j,k,m}^F + \sigma^2} \quad (1)$$

其中: p_k^M 和 $p_{j,k}^F$ 分别为 MBS 和 SBS $_j$ 在子信道 k 上的发射功率; $\delta = \{1, 2, \dots, K\}$ 为所有的子信道的集合, $k \in \delta$; $\varphi = \{1, 2, \dots, M\}$ 为所有的 MUE 的集合, $m \in \varphi$; $h_{k,m}^M$ 和 $h_{j,k,m}^F$ 分别为 MBS 和 SBS $_j$ 到 MUE m 在子信道 k 上的信道增益; σ^2 为噪声功率; $\phi = \{1, 2, \dots, F\}$ 为 SBS 的集合。

SUE n 在子信道 k 上的 SINR 为

$$\gamma_{j,k,n}^F = \frac{p_{j,k}^F h_{j,k,n}^F}{\sum_{i \in \phi, i \neq j} p_{i,k}^F h_{i,k,n}^F + p_k^M h_{k,n}^M + \sigma^2} \quad (2)$$

首先,构造基于图论的有向图 $G = [T, E, W]$. $T = \{t_1, t_2, \dots, t_F\}$ 为干扰图中所有的 SBS 顶点集合. E 为顶点间的边的集合,这里的 E 是 F 行 F 列的矩阵,其中的元素为 0 或者 1,若数值为 1,则代表这 2 个顶点间若共用信道会产生干扰. p_{ij} 是 SBS $_j$ 发送到 SBS $_i$ 内用户的信号的平均功率. 同理, p_{ii} 为 SBS $_i$ 发送给自身授权用户的信号的平均功率. 根据 Small cell 网关反馈的用户数据测量报告,可以将边的权重看作用户受到邻近 SBS 发送给它的信号的平均功率和自身授权 SBS 发送给它的信号的平均功率的比值中比较大者. 由此可得

$$w_{ij} = w_{ji} = \max(p_{ij}/p_{ii}, p_{ji}/p_{jj}) \quad (3)$$

由式(3)得到 SBS 之间的干扰系数矩阵 \mathbf{W} . 再根据 \mathbf{W} 判断 2 个 SBS 之间是否存在干扰,由此获得 \mathbf{E} . \mathbf{E} 内的元素判定规则为

$$e_{i,j} = \begin{cases} 1, & w_{ij} \geq I_{th} \\ 0, & w_{ij} < I_{th} \end{cases} \quad (4)$$

其中 I_{th} 为 SBS 相互之间的干扰阈值. 若小于 I_{th} , 就表示 2 个 SBS 之间干扰较小, 可以将这 2 个 SBS 分配到一组内; 若大于 I_{th} , 就表示 2 个 SBS 之间干扰较大, 不适合分配到同一组中.

为了更加直观地展示资源分配方案, 绘制了资源分配流程图, 如图 2 所示.

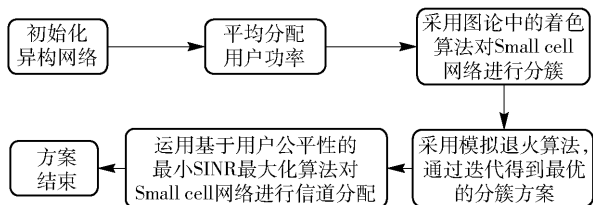


图2 资源分配流程简略框图

2 基于分组的信道分配算法

在子信道数目一定的情况下, 如果将更多的子信道分配给 SBS, 则可能会导致很多 SBS 共用相同的子信道, 从而导致系统内的干扰强烈. 而若给每个 SBS 分配极少的子信道, 则又会导致频谱利用率降低. 城市中 Small cell 用户密集分布, 如何对这些用户进行信道分配是一个 NP-hard 问题. 这里, 考虑将信道分配问题转化为分组和子信道分配问题.

2.1 SBS 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 2 类斯特林数 (Stirling number), 对于有 F 个 SBS 的 UDN, 则其可能的分组方式就有^[12]

$$\sum_{i=1}^F \frac{1}{i!} \sum_{j=0}^i (-1)^{i-j} \binom{i}{j} j^F \approx O(F^F) \quad (5)$$

因此, 穷举法显然是不符合实际的, 笔者采用图着色原理对 SBS 进行分组. 首先根据 $\mathbf{G} = [\mathbf{T}, \mathbf{E}, \mathbf{W}]$ 把 F 个 SBS 分配成 L 组, 表示为 $\chi = \{1, 2, \dots, L\}$. 将相互间干扰较小的 SBS 分配到同一组, 相互间干扰较大的 SBS 则分配到不同的组中, 即分组后子信道分配的方式为组间正交、组内复用, 如式(6) ~ 式(10)所示.

$$\min \sum_{i=1}^F \sum_{j=1, j \neq i}^F \sum_{l=1}^L w_{ij} v_{il} v_{jl} \quad (6)$$

$$\text{s. t. } \bigcup_{l=1}^L C_l = T \quad (7)$$

$$C_l \cap C_g = \Phi(l, g \in \chi) \quad (8)$$

$$e_{h,v} = 0 \quad (h, v \in C_l) \quad (9)$$

$$v_{il} \in \{0, 1\} \quad (10)$$

其中: w_{ij} 和 $e_{h,v}$ 分别为基站间干扰矩阵 \mathbf{W} 及潜在干扰矩阵 \mathbf{E} 中的元素; C_l 代表第 l 组; $\mathbf{V} = (v_{il})_{F \times L}$ 是分组矩阵, 当 $v_{il} = 1$ 时 SBS _{i} 分到第 l 组; 当 $v_{il} = 0$ 时 SBS _{i} 不分配到第 l 组, 表示一个 SBS 只能分配到一个组内. 式(9)即分组依据.

为了更快更优地完成分组, 将模拟退火算法应用到分组中, 具体流程如算法 1 所示.

算法 1 分组算法

- 1 设定起始温度 Tem 及迭代次数 L ;
- 2 设定原始解 S ;
- 3 设定每组 SBS 最大个数 M ;
- 4 for 1: L
- 5 do 在满足约束条件的情况下
- 6 将任意一组中的一个 SBS 转移到其他组
- 7 根据效用函数计算当前解 S'
- 8 计算变化值 $\Delta t' = C(S') - C(S)$
- 9 若 $\Delta t' < 0$, 将 S' 作为新解; 若 $\Delta t' \geq 0$, 以概率 $\exp(-\Delta t'/\text{Tem})$ 将 S' 作为新解
- end for
- 10 判断是否达到终止条件, 达到则终止算法, 未达到则减小 Tem 继续迭代. 终止条件为: 若连续几个新的 S' 均不被算法接受则终止算法.

2.2 子信道分配

在完成分组后, 下一步就对 SBS 分配子信道. 在子信道分配前, 首先需要确定不同簇内部 SBS 可复用子信道的数目. 其目的是, 在满足用户需求的前提下, 最大化系统吞吐量, 如式(11) ~ 式(13)所示.

$$\max \sum_{k=1}^K \sum_{l=1}^L \sum_{j \in C_l} \sum_{n \in D_j} \text{Blb}(1 + \gamma_{j,k,n}^F) \lambda_{k,l} \quad (11)$$

$$\text{s. t. } \sum_{l=1}^L \lambda_{k,l} = 1, k \in \{1, 2, \dots, K\} \quad (12)$$

$$\sum_{k=1}^K \text{Blb}(1 + \gamma_{j,k,n}^F) \lambda_{k,l} \geq R_{j,n}^F \quad (13)$$

其中: D_j 为 SBS _{j} 内的用户集合; $R_{j,n}^F$ 为 SBS _{j} 中用户的最低速率需求; $\lambda_{k,l}$ 为指针变量, 其取值为 0 或 1, $\lambda_{k,l} = 1$ 表示将子信道 k 分配给 C_l ; 反之, 则不分配给 C_l . 式(12)表示没有空闲子信道, 即子信道会被完全分配. 式(13)则是最低速率限制.

最优的子信道分配方案可以采用轮询法获得,但是由于轮询法的复杂度较高,所以采用启发式的最小 SINR 最大化方案对超密集网络进行子信道分配,算法步骤如下:

1) 测算每组的速率需求 $R_l, R_l = \sum_{j \in C_l} \sum_{n \in D_j} R_{j,n}^F / |C_l|$. $|C_l|$ 是第 l 组中 SBS 的个数.

2) 统计需要分配到每组内的子信道数目 N_l , $N_l = KR_l / \sum_{l=1}^L R_l$.

3) 按顺序计算每个子信道在每组中的 SINR. 例如,子信道 k 在第 l 组的 SINR 为 $\gamma_{C_l}^k = \min_{j \in C_l} \{\gamma_{j,k,n}^F\}, k \in \delta$.

4) 判断子信道 k SINR 最大的组,若该组子信道数目没有达到最大值,就把子信道 k 纳入该组.

5) 重复 3)、4) 直至所有子信道被分配到组中.

在完成子信道分配后,每组组内 SBS 只能使用分配给该组的子信道,避免了不同组之间的干扰.超密集网络混合接入方式下,不但要确保授权用户的通信质量,同时也要保证非授权用户能够用到足够的资源.将频谱资源根据比例分为 2 部分,一部分授权用户优先接入;另一部分非授权用户优先接入,这个比例可以根据实时网络环境动态调整,本节的重点不在于研究这个比例值,因此设定比例为 1:3. 在完成频谱比例分配后,对授权用户进行信道分配,分配步骤如下.

1) 查看授权用户对应的 SBS 的授权频谱是否存在空闲频段,如果有空闲频段,直接将授权频谱的空闲频段中与授权用户信道条件最好的信道分配给授权用户,进入 5); 如果没有空闲频段,进行下一步操作.

2) 查看 MBS 是否存在空闲频段,如果有空闲频段,选择 MBS 的空闲频段中与该用户信道条件最好的信道,将其分配给授权用户,进入 5); 如果没有空闲频段,进行下一步操作.

3) 查看授权用户对应 SBS 的非授权频谱是否存在空闲频段,如果有空闲频段,选择非授权频谱中空闲频段里面与该授权用户信道条件最好的信道,将其分配给授权用户,进入 5); 如果没有空闲频段,进行下一步操作.

4) 无法连接,进入排队模式,存在可用资源时分配给队列中最前列的用户. 分配到信道后进行下一步操作.

5) 查看该用户的通信速率,判断其是否满足最低速率需求,如果满足,结束算法;如果不满足,跳转到 1).

授权用户是优先级别最高的用户,需要尽量保证它的通信质量,而非授权用户则优先级较低,无法使用授权用户的频谱,因此非授权用户的信道分配过程为 3) ~ 5). 授权用户及非授权用户在检测频段是否空闲的时候,如果空闲频段分配给用户通信质量很差,仍然视为无空闲频段.

3 算法复杂度分析

采用模拟退火算法对 SBS 进行分组,效用函数的复杂度是 $O(FL)$,算法的迭代次数为 L ,模拟退火算法的复杂度为 $O(FL^2)$. 对比穷举法的最优分组方式,它的复杂度为 $O(F^F)$,所提算法明显降低了算法复杂度. 采用启发式的最小 SINR 最大化方案进行子信道分配,算法复杂度为 $O(KL)$. 对比轮询法,它的复杂度为 $O(L^m)$, m 是迭代次数,可以看到轮询算法的复杂度会随着迭代次数呈几何增长,而所提算法降低了复杂度的同时提高了系统性能.

4 仿真结果及分析

超密集网络拓扑模型采用 3GPP 提出的双带模型结构^[13]. 根据 3GPP case 1 的仿真场景,设计了 Small cell 双层网络下行链路仿真的基本参数,如表 1 所示. 笔者认真分析了有关提出算法的多个性能,包括 MUE 的平均吞吐量、SUE 的平均 SINR、用户间公平性及满意度. 比较的算法包括组内正交分组算法^[11]、基于 Hopfield 网络的分组(CRA, cluster-based resource allocation)算法^[14]和基于分组的启发式干扰最小化(HCFM, heuristic cluster-based femto-femto interference minimized)算法^[10]. 所提算法 1 和所提算法 2 分别为封闭模式和混合模式下的信道分配算法.

图 3 所示为不同算法在 SBS 布置密度变化的情况下宏用户的平均吞吐量走势. 由图可知,当 Small cell 布置密度加大时,MUE 平均吞吐量伴随着 Small cell 密度的加大而逐步降低. 原因在于,随着 Small cell 布置密度增大,MUE 遭受到更加严重的 Small cell 跨层干扰,因此其通信质量也随之降低. 所提算法 2 相较于其他算法,MUE 吞吐量处于较高的水准,这是由于 MUE 作为 Small cell 非授权用户可以

表 1 仿真参数	
参数	取值
MBS/SBS 的最大发送功率/dBm	46/20
MBS 覆盖范围/与建筑距离/m	500/100
载波频率/GHz	2.0
可用子信道数目	48
子信道带宽/kHz	180
每个 SBS 的用户数	2~8
MBS/SBS 的天线增益/dBi	14/5
外墙损耗/dB	20
地板损耗/dB	18.3
高斯噪声功率/(dBm·Hz ⁻¹)	-174
室内/室外的阴影衰落差/dB	8/4
系统带宽/MHz	10
外墙/内墙穿透损耗/dB	20/5
最小速率需求/(bit·s ⁻¹)	100

在遭受严重干扰时将网络切换到邻近的通信质量较好的 SBS 上,这样有效地保证了 MUE 的通信质量.

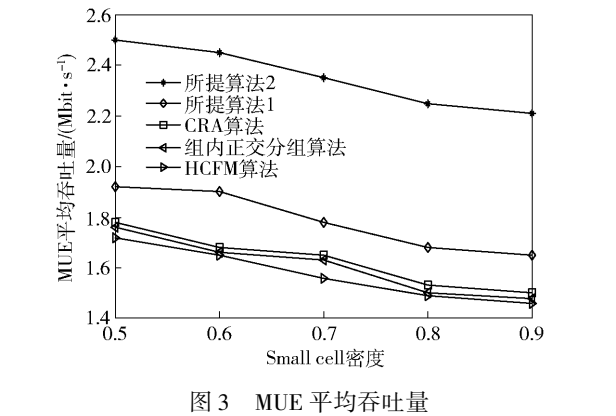
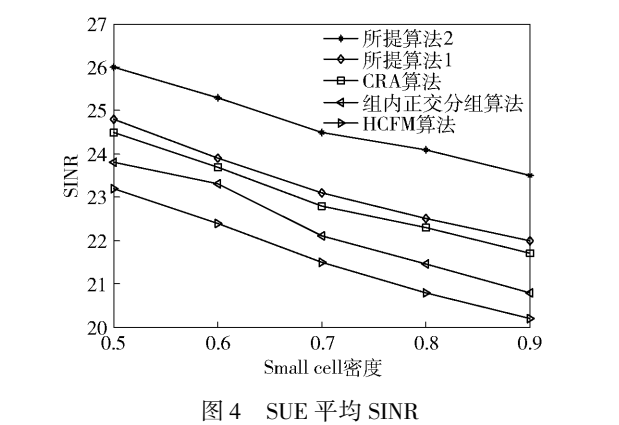


图 3 MUE 平均吞吐量

图 4 所示为 SUE 在不同 Small cell 部署密度情况下的平均 SINR. 相比于其他算法,所提资源分配机制将模拟退火算法运用到分组中,更加高效地解决了分组问题,有效地抑制了 Small cell 同层干扰. 同时,所采用的信道分配算法在满足用户最小速率需求的情况下最大化吞吐量,有效地预防了资源浪费,提升了用户通信质量. 在混合接入模式下,由于所提算法 2 中采用了更灵活的频谱分配方式,有效地提升了频谱利用率,使跨层干扰得到了更大程度的抑制,因此 SUE 的 SINR 处于更高的水平.

图 5 所示为不同算法下的用户公平性. 可以看出,所提算法 2 的用户公平性最高. 由于所提资源分配机制更加高效地抑制了超密集网络同层干扰,



同时也使用户间受到的干扰程度相差较小,使得用户公平性较高. 所提算法 2 采用了混合接入方式,更大程度地抑制了跨层干扰,使得 MUE 的通信质量有较大提高,因此公平性获得了更大程度提升. 其他对比算法并没有过多考虑用户公平性,并且其他分组方案中每组内 SBS 的数目相差较大,从而导致不同组内用户数目差别也很大,最终导致不同组的用户公平性相差较大,用户公平性降低.

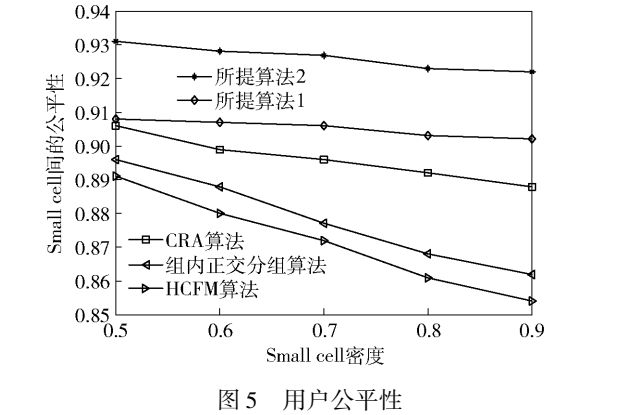


图 5 用户公平性

图 6 所示为用户在采用不同算法情况下的满意度. 对比其他算法,所提 2 种算法的用户满意度更高. 这是因为所提算法有效地抑制了干扰,更加高

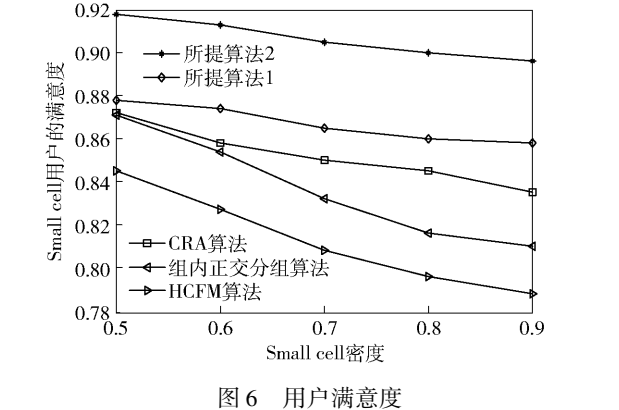


图 6 用户满意度

效地利用了频谱资源,从而得到了更高的满意度.并且,对比算法中每组的 SBS 数量相差较大,导致不同组获得的子信道数目相差较大,造成一些用户不能分配到足够的信道,通信质量较差,用户满意度较低.所提算法 1 每组内 SBS 数目较为一致,能够分配到的信道也就相差不大,从而用户获得较高的满意度.所提算法 2 在所提算法 1 的基础上进一步采用了混合接入模式,更好地利用了频谱资源,用户通信质量进一步提升,所以满意度较高.

5 结束语

讨论了 UDN 在混合接入方式下的资源分配问题,提出了新的资源分配算法.首先根据 Small cell 间的干扰图对 Small cell 进行分组,然后进行信道分配,消除相邻 Small cell 之间的频谱冲突,并且定义了混合接入方式下非授权用户接入网络的方式,给出了授权用户的资源使用方式及优先级别,在保证授权用户 QoS 性能的同时提升非授权用户的性能.并且仿真实验从多方面证明了所提出的算法能够很好地提高系统性能.

参考文献:

- [1] Ying L L, Loo J, Chuah T C, et al. Fair resource allocation with interference mitigation and resource reuse for LTE/LTE-A femtocell networks[J]. IEEE Transactions on Vehicular Technology, 2016, 65(10): 8203–8217.
- [2] Kim J, Jeon W S, Dong G J. Base-station sleep management in open-access femtocell networks[J]. IEEE Transactions on Vehicular Technology, 2016, 65(5): 3786–3791.
- [3] Wang Haining, Ding Zhi. Power control and resource allocation for outage balancing in femtocell networks[J]. IEEE Transactions on Wireless Communications, 2015, 14(4): 2043–2057.
- [4] Zhang Haijun, Jiang Chunxiao, Mao Xiaotao, et al. Interference-limited resource optimization in cognitive femtocells with fairness and imperfect spectrum sensing[J]. IEEE Transactions on Vehicular Technology, 2016, 65(3): 1761–1771.

- [5] Guo Limei, Wu H C, Wu Yiyan, et al. Optimal total-downlink-transmitting-power and subchannel allocation for green cellular networks[C]//IEEE International Conference on Communications. [S.l.]: IEEE, 2015: 1471–1476.
- [6] Wei Zongheng, Hu Binjie, Li Xiaohuan, et al. Downlink partial spectrum sharing scheme in cognitive LTE-A heterogeneous networks[C]//IEEE International Conference on Signal Processing, Communications and Computing. [S.l.]: IEEE, 2015: 1–6.
- [7] Zhang Bao, Qiu Ling. Resource allocation in hybrid access OFDMA femtocell networks[J]. Journal of Electronics & Information Technology, 2011, 33(11): 2569–2574.
- [8] Zhang Lei, Jiang Tao, Luo Kai. Dynamic spectrum allocation for the downlink of OFDMA-based hybrid-access cognitive femtocell networks[J]. IEEE Transactions on Vehicular Technology, 2016, 65(3): 1772–1781.
- [9] Zhang Qian, Zhu Xinning, Wu Leijia, et al. A coloring-based resource allocation for OFDMA femtocell networks[C]//Wireless Communications and Networking Conference. [S.l.]: IEEE, 2013: 673–678.
- [10] Lin Shangjing, Tian Hui. Clustering based interference management for QoS guarantees in OFDMA femtocell[C]//Wireless Communications and Networking Conference. [S.l.]: IEEE, 2013: 649–654.
- [11] 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.
- [12] Abramowitz M. Handbook of mathematical functions with formulas, graphs, and mathematical tables[M]. New York: Dover Publications, 1974.
- [13] 3GPP TSG RAN1—2010. Evolved universal terrestrial radio access (E-UTRA); Further advancements for E-UTRA physical layer aspects[S]. [S.l.]: 3GPP Press, 2010.
- [14] Zhang Haibo, Mu Lixiong, Chen Shanxue, et al. A cluster-based resource allocation scheme for OFDMA small cell networks[J]. Journal of Computational Information Systems, 2015, 11(21): 7915–7923.