# 超密集组网下一种基于干扰增量降低的分簇算法

 梁彦霞\*1
 姜
 静<sup>①</sup>
 孙长印<sup>①</sup>
 刘
 欣<sup>②</sup>
 谢永斌<sup>①</sup>

 <sup>①</sup>(西安邮电大学 陕西省信息通信网络及安全重点实验室
 西安
 710121)

 <sup>②</sup>(西安欧亚学院信息工程学院
 西安
 710065)

**摘 要:**超密集网络(UDNs)拉近了终端与节点间的距离,使得网络频谱效率大幅度提高,扩展了系统容量,但 是小区边缘用户的性能严重下降。合理规划的虚拟小区(VC)只能降低中等规模UDNs的干扰,而重叠基站下的用 户的干扰需要协作用户簇的方法来解决。该文提出了一种干扰增量降低(IIR)的用户分簇算法,通过在簇间不断交 换带来最大干扰的用户,最小化簇内的干扰和,最终最大化系统和速率。该算法在不提高K均值算法的复杂度的 同时,不需要指定簇首,避免陷入局部最优。仿真结果表明,网络密集部署时,有效提高系统和速率,尤其是边 缘用户的吞吐量。 关键词:超密集网络;虚拟小区(VC);分簇;和速率;小区边缘用户

中图分类号: TN929.53 文献标识码: A 文章编号: 1009-5896(2020)02-0495-08

**DOI**: 10.11999/JEIT181144

# A Cluster Algorithm Based on Interference Increment Reduction in Ultra-Dense Network

LIANG Yanxia<sup>(1)</sup> JIANG Jing<sup>(1)</sup> SUN Changyin<sup>(1)</sup> LIU Xin<sup>(2)</sup> XIE Yongbin<sup>(1)</sup>

<sup>(1)</sup>(Shaanxi Key Laboratory of Information Communication Network and Security,

Xi'an University of Posts and Telecommunications, Xi'an 710121, China)

<sup>(2)</sup>(School of Information Engineering, Xi'an Eurasia University, Xi'an 710065, China)

Abstract: Ultra-Dense Networks (UDNs) shorten the distance between terminals and nodes, which improve greatly the spectral efficiency and expand the system capacity. But the performance of cell edge users is seriously degraded. Reasonable planning of Virtual Cell (VC) can only reduce the interference of moderate scale UDNs, while the interference of users under overlapped base stations in a virtual cell needs to be solved by cooperative user clusters. A user clustering algorithm with Interference Increment Reduction (IIR) is proposed, which minimizes the sum of intra-cluster interference and ultimately maximizes system sum rate by continuously switching users with maximum interference between clusters. Compared with K-means algorithm, this algorithm, no need of specifying cluster heads, avoids local optimum without increasement of the computation complexity. The simulation results show that the system sum rate, especially the throughput of edge users, can be effectively improved when the network is densely deployed.

Key words: Ultra-Dense Network (UDN); Virtual Cell (VC); Cluster; Sum rate; Cell-edge users

1 引言

超密集部署网络[1-5]可以应对未来海量移动数

据的爆炸式增长。密集化的微基站部署提高了频谱 复用率、用户体验速率和单位面积的网络容量,但 同时带来了异构网中同层和跨层干扰的问题。系统 性能,尤其是小区边缘用户性能严重下降。虚拟小 区(Virtual Cell, VC)技术<sup>[6-8]</sup>可以创造无边界网 络,从而解决这个问题。

以用户为中心的VC技术可以通过多小区协调 传输技术减小干扰,但也只是针对中等规模的超密 集网络(Untra-Dense Network, UDN)有效。对于 高密度部署的UDN,用户从其周围的基站接收到 的信号强度几乎相同,因此,用户在干扰其它用户 的同时也在被干扰。这种情况下,通过简单的协作

收稿日期: 2018-12-12; 改回日期: 2019-04-23; 网络出版: 2019-04-28 \*通信作者: 梁彦霞 530332718@qq.com

基金项目:国家自然科学基金(6187012068,61501371),陕西省创 新团队项目(2017KCT-30-02),陕西省科技厅国际科技合作与交流 项目(2017KW-011)

Foundation Items: The National Natural Science Foundation of China (6187012068, 61501371), The Innovation Team Project of Shaanxi Province (2017KCT-30-02), The Shaanxi Science and Technology Department International Cooperation and Exchanges Project (2017KW-011)

或干扰消除和资源分配策略,性能增益非常有限, 需要联合优化或智能优化。然而,由于多维资源和 策略的强耦合性,联合优化多维资源分配和优化策 略是非常复杂的。为了降低资源分配的复杂度,最 小化信息交互,用户分簇就成为VC架构中的一项 重要技术。尽管有大量文献研究传统网络中的用户 分簇,但是基于VC的用户在重叠的基站中的分簇 鲜有研究。

目前,基于异构多层网络可重叠的VC用户分 簇算法[9-17],已在业内得到广泛研究。文献[9]是对 多点协作(Coordinated Multi-Point, CoMP)聚类技 术的综述。文中指出,未来的聚类算法需要在复杂 度和聚类增益之间进行权衡,要能够提高谱效率, 甚至可以完成负载均衡,提高能量效率和实现回程 优化。文献[10]研究了一种动态分簇算法,每一次 只调度不相互重叠的协作簇,最大化了系统吞吐 量,但其频谱利用率不高。文献[11]提出了一种用 于休眠的分簇算法,以提高系统的能量效率。该算 法被称为基于协同因子的利益树动态分簇, 其将基 站群转化为带权连通图,将分簇转化为利益树生成 问题。然而由于该算法未能考虑簇间干扰对系统性 能的影响,系统性能未达到最优。在基于锚节点的 预编码方案<sup>[12]</sup>中,提出以用户为中心可重叠基站的 分簇方案与混合模式下的CoMP方案相结合,相对 于传统静态的不可重叠虚拟小区分簇方案, 该方案 在平均用户和小区边缘用户的吞吐量增益方面得到 了提高,但是受发射机和接收机的天线数目限制。 文献[13]提出在非正交多址接入(Non-Orthogonal Multiple Access, NOMA)中,用户利用不同信道增 益之间的差异和相关性进行分簇。然而,该方案的 多输入多输出-非正交多址接入(Multi-Input Multi-Output-NOMA, MIMO-NOMA)系统模型适用于 单小区场景,由于计算复杂度非常高而无法直接应 用于UDN。为提高用户部署的实际谱效率, 文献[14] 提出了一种基于密度结合噪声的用户分簇方法,分 簇后的用户独立地进行信号处理,从而降低了算法 的复杂性。但是该算法缺乏对任意异构用户密度分 布的检测,导致不同程度的密度差异出现不同的分 簇结果。文献[15]提出了一种基于分簇的无线资源 管理方案。该方案中采用K均值算法来获得对毫微 微蜂窝的分簇,簇头由最大最小距离算法来确定。 文献[16]针对3层超密集组网,提出了一种两阶段的 资源分配方案,在第2阶段利用K均值算法对毫微 微蜂窝进行分簇以完成干扰管理。该文中修订了 K均值算法,引入余弦角方法来改善簇头的选取。 文献[17]提出了一种具有QoS保证的基于分簇的资 源分配方案。该方案中,依据分布密度,采用K均 值算法对毫微微蜂窝分簇,可满足不同动态拓扑下的动态分簇。为避免簇头在不同组中的重复问题, 引入了距离阈值。文献[15-17]的算法都通过改善簇 头的选取来避免K均值算法陷入局部最优,但是都 不可避免要对簇头进行设计。

本文提出了一种基于干扰增量降低(IIR)的用 户分簇算法。主要创新点如下:

(1)本算法相对于K均值算法,不需要设计簇 头,因此避免了陷入局部最优;

(2)本算法考虑用户之间的相互干扰,以保证 簇内干扰和最小为原则,计算复杂度更低,相对于 迭代算法,本算法只需交换几次用户即可达到稳 定,根据仿真结果,最多交换的次数不超过20次;

(3)本算法是超密集组网下的用户分簇,提高 了系统和速率,特别是边缘用户的和速率。

# 2 系统模型

5G超密集网络场景下,对下行链路多用户VC 作如下假设:每个基站(Base Station, BS)或用户有 1根发射天线或接收天线,BS可属于不同的重叠虚 拟小区,每个BS也可以同时调度多个用户。针对确 定的用户,L个基站形成1个虚拟小区为其服务。如 图1所示,用户i的服务小区Ci 由BS{l, n, p}组成。

C表示全部虚拟小区的集合,其中为用户*i*服务的虚拟小区标识为*C<sub>i</sub>*,包括*L*个BS。*U*代表全部用户的集合,*U<sub>j</sub>*代表第*j*个虚拟小区所服务的所有用户的集合。用户*i*在虚拟小区*C<sub>i</sub>*服务下的信道矢量可表示为

$$\boldsymbol{H}_{i,C_{i}} = [g_{i,m_{1}}, g_{i,m_{2}}, \cdots, g_{i,m_{L}}]$$
(1)

其中,  $g_{i,m_k}$ 代表基站 $m_k$ 和用户i之间的信道增益, 其中 $m_k \in C_i, k=1, 2, \dots, L$ 。

在上述假设的前提下,用户*i*的接收信号矢量 可表示为

$$\boldsymbol{y}_i = \boldsymbol{H}_{i,C_i} \boldsymbol{W}_i \boldsymbol{x}_i + \sum_{j \in U, j \neq i} \boldsymbol{H}_{i,C_j} \boldsymbol{W}_j \boldsymbol{x}_j + \boldsymbol{n}_i$$
 (2)

其中, x<sub>i</sub>代表虚拟小区C<sub>i</sub>内所有基站发送给用户



图 1 以用户为中心的可重叠虚拟小区

a +

*i*的信号所构成的矢量,且具有同等功率 $P_{tx}$ ; $n_i$ 代表加性高斯白噪声矢量,且 $n_i \sim CN(\boldsymbol{0}, \sigma_n^2 \boldsymbol{I})$ ; $\boldsymbol{x}_i$ ,  $\boldsymbol{y}_i 和 n_i$ 的大小均为 $|U_i| \times 1$ 。

设BS在虚拟小区中采用协作传输,采用基于 迫零算法的预编码以消除虚拟小区内部用户间的干 扰,则 *W*<sub>i</sub>代表在*U*<sub>i</sub>中用户的预编码矩阵,可以表 示为

$$\boldsymbol{W}_{i} = \frac{1}{\sqrt{c_{i}}} \,\overline{\boldsymbol{W}_{i}} = \frac{1}{\sqrt{c_{i}}} \,\boldsymbol{H}_{i,C_{i}}^{\mathrm{H}} \left(\boldsymbol{H}_{i,C_{i}} \boldsymbol{H}_{i,C_{i}}^{\mathrm{H}}\right)^{-1} \quad (3)$$

其中, $H_{i,c_i}^{\mathrm{H}}$ 代表矩阵 $H_{i,c_i}$ 的共轭转置, $c_i$ 代表预编码矩阵的功率约束条件,根据文献[13]可知

$$c_{i} = \max_{j} \left( \overline{\boldsymbol{W}_{i}} \, \overline{\boldsymbol{W}_{i}}^{\mathrm{H}} \right) [j, j] \cdot \frac{1}{|C_{i}|} \tag{4}$$

其中, **X**[*j*,*j*]指矩阵**X**中第[*j*,*j*]个元素, |Y|指集 合**Y**中的元素个数。

虚拟小区内的干扰已经采用迫零预编码消除。 用 $V_g$ 表示在第g个簇中的用户集合,V表示用户分 簇集合。为了计算簇内用户的可达速率,不失一般 性,假定虚拟小区i中的用户u和用户e在同一个簇 g中。在式(1)中第g个簇的用户e可达速率 $R_e^{[g]}$ (bps/Hz)可以被表述为

$$R_e^{[g]} = \log_2\left(1 + \frac{P_{\text{tx}}}{c_i\left(\sigma_n^2 + Z_e^{[g]}\right)}\right) \tag{5}$$

其中,  $P_{tx} \pi \sigma_n^2 \beta$ 别代表基站功率和噪声的功率, 下标n表示噪声,  $Z_e^{[g]}$ 代表在第g个簇中的用户e的虚 拟小区间干扰,表示为

$$Z_e^{[g]} = \sum_{c \in C \setminus \{i\}} \sum_{d \in U_c^g} \left| \boldsymbol{h}_e^{[c]} \boldsymbol{w}_{c,d} \right|^2 \cdot P_{\text{tx}}$$
(6)

其中,  $h_e^{[c]}$ 是1× $|V_c|$ 信道矢量, 代表在簇g中的用 户e和虚拟小区c中每一个基站的信道增益。 $U_c^g$ 代 表在用户集合 $U_c$ 中簇g对应的用户集合。 $w_{c,d}$ 代表 在虚拟小区c中预编码矩阵 $W_c$ 的第d列。

为了最大化含有M个正交资源的系统加权和速率,定义用户分簇的优化问题 $P_{opt}$ ,用 $\{V_1, V_2, \dots, V_M\}$ 表示

$$\max_{V_1, V_2, \cdots, V_M} \left( \sum_{m=1}^M \sum_{k \in V_m} \omega_k R_k^{[m]} \right)$$
(7)

$$|V_m| \le K, \quad m=1, 2, \cdots, M \tag{8}$$

$$V_1 \cup V_2 \cup \dots \cup V_M = U \tag{9}$$

 $V_m \cap V_n = \emptyset, m = 1, 2, \dots, M; n = 1, 2, \dots, N; m \neq n(10)$ 

式(7)中, $\omega_k$ 代表用户k的和速率权重,式 (8)表示每个簇的最大用户数为K,式(9)和式 (10)表示一个用户只能分配到一个簇中。这里,将 簇的个数确定为可分配的正交资源数目,正好解决 了如何确定簇数的问题。用可能形成的分簇数目来 表示复杂度,随着网络中用户数的增加,分簇数目 呈指数增长,导致优化问题 $P_{opt}$ 的求解变的更加复 杂。因此,本文提出一种复杂度较低的启发式用户 分簇算法,来实现和速率最大化目标。各参数的含 意汇总如表1所示。

# 3 用户分簇算法

# 3.1 干扰权值的设计

超密集组网下的用户在受到其他用户干扰的同时,又对其他用户产生干扰。为了最大化加权和速率,将干扰造成的影响最小化,同时结合虚拟小区重叠的特点,权值设计考虑多个资源维度如功率和空间维度高度耦合,而系统性能取决于多维资源的联合优化。为此,权值信息包含信道幅度和信道方向,反映了潜在的用户分簇带来的协作传输和干扰

表 1 参数含意对照表

参数	意义		意义
C	全部虚拟小区的集合	$oldsymbol{W}_i$	U <sub>i</sub> 中用户的预编码矩阵
$C_i$	为用户i服务的虚拟小区	$c_i$	预编码矩阵的功率约束条件
U	全部用户的集合	V	用户分簇集合
$U_j$	第扩个虚拟小区所服务的所有用户的集合	$V_g$	第g个簇中的用户集合
$\boldsymbol{H}_{i,C_i}$	用户i在虚拟小区Ci服务下的信道矢量	$R_e^{[g]}$	第g个簇的用户e的可达速率
$g_{i,m_k}$	基站m <sub>k</sub> 和用户i之间的信道增益	$Z_e^{[g]}$	在第g个簇中的用户e的虚拟小区间干扰
$oldsymbol{x}_i$	虚拟小区Ci内所有基站发送给用户i的信号所构成的矢量	$oldsymbol{h}_{e}^{[c]}$	簇g中用户e和虚拟小区c中每一个基站的信道增益
$oldsymbol{y}_i$	用户i的接收信号矢量	$U_c^g$	用户集合U <sub>c</sub> 中簇g对应的用户集合
$oldsymbol{n}_i$	加性高斯白噪声矢量	$oldsymbol{w}_{c,d}$	虚拟小区 $c$ 中预编码矩阵 $W_c$ 的第 $d$ 列
$P_{tx}$	基站的功率	$\omega_k$	用户k的和速率权重
$\sigma_{\rm n}^2$	噪声的功率		

根据以上分析,将用户i和j作为簇中的候选用 户, $H_{i,C_i}$ , $H_{j,C_i}$ 分别是用户i和用户j在虚拟小区  $C_i$ 的复合信道矢量, $H_{i,C_j}$ , $H_{j,C_j}$ 分别是用户i和用 户j在虚拟小区 $C_j$ 的复合信道矢量。定义虚拟小区  $C_i$ 和 $C_i$ 中用户i和用户j的权重Wab如式(11)

$$Wab(i, j) = \left(1 + \alpha \frac{\left|\boldsymbol{H}_{i, C_{i}} \boldsymbol{H}_{i, C_{j}}^{\mathrm{H}}\right|}{\left\|\boldsymbol{H}_{i, C_{i}}\right\|_{\mathrm{F}}\left\|\boldsymbol{H}_{i, C_{j}}\right\|_{\mathrm{F}}}\right)$$
$$\cdot \left(1 + \beta \frac{\left|\boldsymbol{H}_{i, C_{i}} \boldsymbol{H}_{j, C_{i}}\right|}{\left\|\boldsymbol{H}_{i, C_{i}}\right\|_{\mathrm{F}}\left\|\boldsymbol{H}_{j, C_{i}}\right\|_{\mathrm{F}}}\right) \cdot \left\|\boldsymbol{H}_{i, C_{i}}\right\|_{\mathrm{F}}$$
$$+ \left(1 + \alpha \frac{\left|\boldsymbol{H}_{j, C_{i}} \boldsymbol{H}_{j, C_{j}}\right|}{\left\|\boldsymbol{H}_{j, C_{i}}\right\|_{\mathrm{F}}\left\|\boldsymbol{H}_{j, C_{j}}\right\|_{\mathrm{F}}}\right)$$
$$\cdot \left(1 + \beta \frac{\left|\boldsymbol{H}_{i, C_{j}} \boldsymbol{H}_{j, C_{j}}\right|}{\left\|\boldsymbol{H}_{i, C_{j}}\right\|_{\mathrm{F}}\left\|\boldsymbol{H}_{j, C_{j}}\right\|_{\mathrm{F}}}\right) \cdot \left\|\boldsymbol{H}_{j, C_{j}}\right\|_{\mathrm{F}}}$$
(11)

其中,  $\alpha$ 和β是调整功率和空间维度的系数,也用 于平衡干扰复杂的环境下用户之间的协作传输策 略。 $\|\cdot\|_F$ 表示矩阵的F范数,这里F为2。

虚拟小区内用户*i*和用户*j*之间的信道越接近正 交化,得到的信道增益越多。这种操作模式的权重 设计体现在下述分量:

(1) 在同一个虚拟小区下,余弦值的计算为

$$\cos(\boldsymbol{H}_{i,C_{i}},\boldsymbol{H}_{j,C_{i}}) = \frac{|\boldsymbol{H}_{i,C_{i}}\boldsymbol{H}_{j,C_{i}}|}{\|\boldsymbol{H}_{i,C_{i}}\|_{\mathrm{F}} \|\boldsymbol{H}_{j,C_{i}}\|_{\mathrm{F}}} \qquad (12)$$

(2) 在不同虚拟小区下,余弦值的计算为

$$\cos(\boldsymbol{H}_{i,C_i},\boldsymbol{H}_{i,C_j}) = \frac{|\boldsymbol{H}_{i,C_i}\boldsymbol{H}_{i,C_j}^{\mathrm{H}}|}{\|\boldsymbol{H}_{i,C_i}\|_{\mathrm{F}} \|\boldsymbol{H}_{i,C_j}\|_{\mathrm{F}}}$$
(13)

为了说明上述权重设计的合理性,下面采用一种VC系统进行分析,其分析结果可推广到一般系统。假定系统模型中基站a和b构成虚拟小区*i*。虚拟小区*i*下的复合信道矩阵为*H<sub>i</sub>* = [*h*<sub>1,a</sub>*h*<sub>1,b</sub>;*h*<sub>2,a</sub>*h*<sub>2,b</sub>], *H<sub>i</sub>*中的参数1和2代表基站a和b中被调度的用户编号,具体见图2所示。

根据式(3),虚拟小区*i*的预编码矩阵可表示如式(14)

$$\boldsymbol{W}_{i} = \frac{1}{\sqrt{c_{i}}} \cdot \frac{1}{(h_{1,\mathrm{a}}h_{2,\mathrm{b}} - h_{1,\mathrm{b}}h_{2,\mathrm{a}})} \cdot \begin{bmatrix} h_{2,\mathrm{b}} & -h_{1,\mathrm{b}} \\ -h_{2,\mathrm{a}} & h_{1,\mathrm{a}} \end{bmatrix}$$
(14)

将每一个用户的功率分割因子运用到预编码矩 阵上,参数c;可以写为





$$c_{i} = \max_{j} \left( \overline{W}_{i} \overline{W}_{i}^{\mathrm{H}} \right) [j, j]$$
  
= 
$$\max \left\{ \frac{|h_{1,\mathrm{b}}|^{2} + |h_{2,\mathrm{b}}|^{2}}{|h_{1,\mathrm{a}}h_{2,\mathrm{b}} - h_{1,\mathrm{b}}h_{2,\mathrm{a}}|^{2}}, \frac{|h_{1,\mathrm{a}}|^{2} + |h_{2,\mathrm{a}}|^{2}}{|h_{1,\mathrm{a}}h_{2,\mathrm{b}} - h_{1,\mathrm{b}}h_{2,\mathrm{a}}|^{2}} \right\}$$
(15)

不失一般性,选取式(15)中的第1项,分簇后 用户1的SINR计算为

$$\Delta \text{SINR} = \text{SINR}_{i} - \text{SINR}_{a}$$

$$= \frac{p_{\text{tx}}}{\sigma_{n}^{2}} \cdot \frac{1}{c_{i}} - \frac{|h_{1,a}|^{2} p_{\text{tx}}}{|h_{1,b}|^{2} p_{\text{tx}} + \sigma_{n}^{2}}$$

$$= \frac{p_{\text{tx}}}{\sigma_{n}^{2}} \cdot \frac{|\boldsymbol{h}_{1} \cdot \boldsymbol{w}_{1}|^{2}}{|h_{1,b}|^{2} + |h_{2,b}|^{2}} - \frac{|h_{1,a}|^{2} p_{\text{tx}}}{|h_{1,b}|^{2} p_{\text{tx}} + \sigma_{n}^{2}}$$

$$= \frac{p_{\text{tx}}}{\sigma_{n}^{2}} \cdot \frac{\|\boldsymbol{h}_{1}\|^{2} \|\boldsymbol{h}_{2}\|^{2}}{|h_{1,b}|^{2} + |h_{2,b}|^{2}} \sin^{2} \langle \boldsymbol{h}_{1}, \boldsymbol{h}_{2} \rangle$$

$$- \frac{|h_{1,a}|^{2} p_{\text{tx}}}{|h_{1,b}|^{2} p_{\text{tx}} + \sigma_{n}^{2}}$$
(16)

其中,SINR<sub>i</sub>和SINR<sub>a</sub>分别代表用户1在用户1和用 户2分簇后得到的SINR及单独由基站a提供服务下 的SINR。考虑到UDN是干扰受限系统,噪声可以 被忽略,即干扰信号需要满足 $|h_{1,k}|^2 p_{tx} \gg \sigma_n^2$ 。当 用户i处在可重叠的虚拟小区边缘时,信道强度满 足 $|h_{1,a}| \approx |h_{1,b}|$ ,所以式(16)可以写为

$$\Delta \text{SINR} = \frac{p_{\text{tx}}}{\sigma_{\text{n}}^2} \cdot \frac{\|\boldsymbol{h}_1\|^2 \|\boldsymbol{h}_2\|^2}{|\boldsymbol{h}_{1,\text{b}}|^2 + |\boldsymbol{h}_{2,\text{b}}|^2} \sin^2 \langle \boldsymbol{h}_1, \boldsymbol{h}_2 \rangle - 1 \ (17)$$

从式(17)可以得到用户1的SINR的提高与协作 信道*h*2的强度、用户功率分割因子、信道*h*1和*h*2 的正交性紧密相关。由此可以证明式(11)权重设计 是合理的,并且能够给用户带来SINR增益。为了突 出信道正交性的影响,权值中采用余弦项代替式(17) 中的正弦项。该系统模型不仅适用于上述两个用户 分簇的情况,对于多个用户分簇的场景同样适合。

## 3.2 干扰增量降低分簇算法

传统的K均值算法中,按一定的方法选定每个 簇的初始值,然后将其他的元素按照用户间干扰最 小的原则划拨到相应的簇中。这种算法依赖于初始 值的选择,如果初始值选择不当,分簇的效果就大 打折扣。本文所提以用户为中心的干扰增量降低 (Interference Increment Reduction, IIR)的分簇算法, 并不需要设定初始值,克服了K均值算法的缺点。

本算法以簇内用户的干扰和最小为原则,先将 用户随机分为两组,再找出同组内最大干扰值所对 应的两个用户。计算这两个用户单独交换到另一组 的干扰增加量,以及在原来组内的减少量,若干扰 和减少量大于增加量,即说明该用户在另一组中干 扰较少,则将该用户交换到另一组中。一直重复进 行比较和交换,直到没有用户再需要进行交换,则 算法结束。这时用户所在的簇也就是干扰和最小的 簇,达到了降低干扰的目的。

分为两簇的算法简要描述如表2所示。 如果要分成更多的簇,则可以将生成V<sub>1</sub>和V<sub>2</sub>

表 2 干扰增量降低分簇算法

工业场星收低八级管计

白汁

异心: 十九垍里吽瓜刀族异心							
输入:两两用户间的权重矩阵Wab,用户数N,用户集合U;							
输出:用户分簇集合V <sub>1</sub> , V <sub>2</sub> ;							
(1) 将用户随机的分成同样大小的两组,记为V <sub>1</sub> , V <sub>2</sub> , 且							
$ V_1  =  V_2  = N/2;$							
(2) 找到 $V_1$ 和 $V_2$ 中具有最大干扰的用户,记为用户 $m$ 和 $n$ ;							
(3) for: (m和n所在分组的剩余用户);							
(4) 计算当前用户分别与m和n的干扰和,记为△Pm和△Pn;							
(5) end;							
(6) for: (非m和n所在分组的剩余用户);							
(7) 计算所有用户分别与m和n的干扰和,记为△Nm和△Nn;							
(8) end;							
(9) $\triangle m = \triangle Pm - \triangle Nm$ ,为用户 $m$ 的干扰增量;							
(10) $\triangle n = \triangle Pn - \triangle Nn$ ,为用户 $n$ 的干扰增量;							
(11) if $( \triangle m > 0 \blacksquare \triangle n < 0 ) $ $  a ( \triangle m > 0 \blacksquare \triangle n > 0 \blacksquare \triangle m > \triangle n ) $ ;							
(12) 将用户m从原来组交换到另一组;转至(2)。							
(13) end;							
(14) if $( \triangle m < 0 \blacksquare \triangle n > 0 ) $ $\emptyset ( \triangle m > 0 \blacksquare \triangle n > 0 \blacksquare \triangle m < \triangle n );$							
(15) 将用户n从原来组交换到另一组;转至(2)。							
(16) end;							
(17) if $\Delta m > 0 \blacksquare \Delta n > 0 \blacksquare \Delta m = \Delta n;$							
(18) 将用户m和n同时从原来组交换到另一组;转至(2)。							
(19) end;							
(20) if $\bigtriangleup m < 0 \boxplus \bigtriangleup n < 0;$							
(21) 算法结束,得到更新后的 $V_1$ 和 $V_2$ 。							
(22) end;							

分别看作初始用户组,重复执行该算法,即可分为 4簇。如此循环,可以得到2<sup>x</sup>个簇,其中x为整数。

# 4 性能评估分析

#### 4.1 仿真场景和参数设置

通过仿真来评估本文所提算法性能,假设有 C(C=6,9,12)个小区,每个小区覆盖内随机分布 6个用户。为了考察算法的性能,尽量将用户分布 在小区边缘。本文提出的分簇算法把用户分成不同 的簇,同一簇内的用户共享系统带宽。假设可分配 的子载波个数为l(l=2,4,8)。将簇的个数选取为子 载波的个数,在分配资源时更简单,也避免了确定 簇数的问题。6小区、36用户的随机分布如图3所示。



图 36 小区、36 用户的随机分布图

上述干扰增量降低分簇算法与K均值分簇算法 进行对比,采用MATLAB作为仿真工具比较性 能。仿真参数如表3所示。

表 3 仿真参数

参数	数值	
载波带宽(MHz)	10	
AP基站路径损耗(dB)	$140.7{+}36.7{\lg}d$	
载波数量(个)	2/4/8	
阴影衰落(dB)	8	
AP基站发射功率(dBm)	20	
接收端天线数目(个)	1	
发送端天线数目(个)	2	
用户总数(个)	36,54,72	

#### 4.2 2载波分簇性能

为了确保仿真结果的公平性,仿真参数不变, 只通过改变用户个数来进行多次实验结果的对比, 分别取用户总数为36,54和72,仿真结果如图4 所示。

仿真结果可以看出,与参考的K均值算法相 比,本文提出的干扰增量降低分簇算法在用户数目 不同时系统吞吐量性能均有所改善,尤其对于小区 边缘用户和速率(对应CDF(累积概率密度)曲线 5%的位置)和平均用户和速率(对应CDF曲线50%的 位置)。同样对于中心用户(对应CDF曲线85%~90%的位置)而言,也有一定程度的改善。以具体数值进行说明,如表4所示。



表 4 干扰增量降低(IIR)算法与参考算法仿真结果对比

	6个小区36个用户			9个小	区54个用户		12个小区72个用户		
小区及用户分簇算法改善程度	K-mean/	IIR/	提升	K-mean/	IIR/	提升	K-mean/	IIR/	提升
	$ imes 10^8 (\mathrm{bps})$	$\times 10^8 (\rm bps)$	(%)	$ imes 10^8 (\mathrm{bps})$	$ imes 10^8 (\mathrm{bps})$	(%)	$ imes 10^8 (\mathrm{bps})$	$ imes 10^8 (\mathrm{bps})$	(%)
边缘用户吞吐量	1.67	1.82	8.98	2.43	2.91	19.75	3.05	3.54	16.07
系统平均吞吐量	1.90	2.10	10.53	2.71	3.12	15.13	3.36	3.73	11.01

从表4数据可以看出,干扰增量降低分簇算法 较参考算法,边缘用户的性能得到了改善,系统平 均吞吐量比参考算法增加,且边缘用户的改善程度 更大;在实验数据中,针对9小区54用户的场景 下,得到性能提升的幅度最大。

# 4.3 2载波分簇算法的计算复杂度

在K均值算法中,做出如下假设:总数为N个 用户,若分为两簇,需要计算N个用户两两之间的 干扰权值,并找到最大的干扰权值对应的两个用户 作为簇首,剩余N-2个用户分别与两个簇首进行比 较,需要比较2×(N-2)次,可分配完所有的用户。 因此,参考算法的比较次数为2×(N-2)。

而本算法的计算复杂度,与分簇完成时发生用 户交换的次数相关。若△m,△n至少有一个大于0 才需要将用户进行比较交换,否则算法结束。因此 可以统计用户的交换次数来说明本算法的计算复杂 度。以6小区、36个用户为例,经过多次实验,测 试出多组用户交换次数的数据,结果如图5所示。

设用户交换次数为k,判定是否交换前需要计 算 $\Delta m$ , $\Delta n$ ,其计算量为N-2次,因此本算法的比 较次数为 $k \times (N$ -2)。从图5可以看出,k具有一定的 随机性,平均值为4.625,最大值为8。相对于K均 值算法2×(N-2)的比较次数,复杂度略有提高。但 两种算法的复杂度均为O(N),等级是一样的。

#### 4.4 多载波分簇性能及计算复杂度

对于多个载波的情形,以9小区,56用户为 例,也做了相应仿真,并与2载波的结果进行了对 比,如图6和图7所示。



图 5 本算法计算复杂度衡量



图 6 不同载波数下,系统吞吐量与CDF关系图

从图6中可以看出,对于小区边缘用户和速率 (对应CDF曲线5%的位置),平均用户(对应CDF曲 线50%的位置)以及中心用户(对应CDF曲线85%~ 90%的位置)来说,载波数越多,系统吞吐量性能 改善程度越大。这是因为载波数越多,对于同样多 的用户来说,可使用的资源就越多,吞吐量性能就 越好。

图7是不同载波数的情况下,平均每载波的系 统吞吐量性能曲线。不同载波数的情况下,对于小 区边缘用户和速率(对应CDF曲线5%的位置)改善 程度相同,而对于平均用户和中心用户而言,则载 波数越少,改善程度越大。



图 7 不同载波数,平均每载波系统吞吐量与CDF关系图

表5展示了不同载波数情况下的交换次数。4载 波和8载波情形下,交换次数增多,这是由于多次 调用IIR算法所致。并且,在2簇分成4簇和4簇分成 8簇的过程中,由于进入算法的初始用户组中用户 数个数减少了,即N变小了,故计算复杂度k×(N-2) 并没有增加更多。

表 5 多个载波下的计算复杂度衡量

不同载波		序号								
交换次数	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
2	2	9	0	1	0	4	1	0	3	0
4	3	7	8	9	7	2	3	14	3	7
8	10	3	4	5	10	7	9	17	3	4

综上所述,经过数据分析,相对于K均值分簇 算法,本算法提升了系统吞吐量,特别是提高了边 缘用户的和速率。随着簇数的增加,由于可分配资 源的增多,系统性能得到改善,但是平均到单位载 波上,分的簇数越少,改善程度越大。并且,本算 法的计算量相对于K均值算法没有明显提高,并没 有为超密集网络带来更多信号处理的计算复杂度和 能量消耗。

# 5 结束语

本文提出了一种以用户为中心的干扰增量降低 (IIR)的协作簇选择算法。通过与迫零算法相结 合,兼顾了簇内和簇间干扰的协调。本算法考虑到 超密集组网的复杂性特征,使得各个用户动态选择 最优协作簇的同时,使各用户的传输速率及系统性 能均得到了提升,特别是提高了边缘用户吞吐量。 同时,本算法的计算复杂度较低,且不需设定簇首。 目前本算法只能解决将用户分为2<sup>*x*</sup>(*x*为正整数)个 簇的情形。针对更多类型的簇数,需要修订算法, 在所有的簇之间进行用户的重新安排和协调。

## 参考文献

[1] 朱晓荣,朱蔚然. 超密集小峰窝网中基于干扰协调的小区分簇
 和功率分配算法[J]. 电子与信息学报, 2016, 38(5): 1173–1178.
 doi: 10.11999/JEIT150756.

ZHU Xiaorong and ZHU Weiran. Interference coordinationbased cell clustering and power allocation algorithm in dense small cell networks[J]. *Journal of Electronics & Information Technology*, 2016, 38(5): 1173–1178. doi: 10.11999/JEIT150756.

- [2] LIANG Liang, WANG Wen, JIA Yunjian, et al. A clusterbased energy-efficient resource management scheme for ultra-dense networks[J]. IEEE Access, 2016, 4: 6823–6832. doi: 10.1109/ACCESS.2016.2614517.
- [3] AL-RUBAYE S, AL-DULAIMI A, COSMAS J, et al. Call admission control for non-standalone 5G ultra-dense networks[J]. *IEEE Communications Letters*, 2018, 22(5): 1058–1061. doi: 10.1109/LCOMM.2018.2813360.
- [4] GE Xiaohu, TU Song, MAO Guoqiang, et al. 5G ultra-dense cellular networks[J]. IEEE Wireless Communications, 2016, 23(1): 72–79. doi: 10.1109/MWC.2016.7422408.
- [5] YANG Bin, MAO Guoqiang, DING Ming, et al. Dense small cell networks: From noise-limited to dense interference-limited[J]. *IEEE Transactions on Vehicular Technology*, 2018, 67(5): 4262–4277. doi: 10.1109/TVT. 2018.2794452.
- [6] PATEROMICHELAKIS E, SHARIAT M, QUDDUS A, et al. Dynamic clustering framework for multi-cell scheduling in dense small cell networks[J]. *IEEE Communications Letters*, 2013, 17(9): 1802–1805. doi: 10.1109/LCOMM.2013. 072313.131248.
- [7] 王莹,刘宝玲,沈晓冬,等.分布式虚拟群小区中的接入控制[J]. 电子与信息学报,2006,28(11):2090-2093.
  WANG Ying, LIU Baoling, SHEN Xiaodong, et al. Admission control in distributed virtual group cell systems[J]. Journal of Electronics & Information Technology, 2006, 28(11): 2090-2093.
- [8] LIU Qian, CHUAI Gang, GAO Weidong, et al. Fuzzy logicbased virtual cell design in ultra-dense networks[J].

EURASIP Journal on Wireless Communications and Networking, 2018, 2018: 87. doi: 10.1186/s13638-018-1093-6.

- [9] BASSOY S, FAROOQ H, IMRAN M A, et al. Coordinated multi-point clustering schemes: A survey[J]. IEEE Communications Surveys & Tutorials, 2017, 19(2): 743–764. doi: 10.1109/COMST.2017.2662212.
- [10] KINOSHITA K, SHIBATA S, KAWANO K, et al. A CoMP clustering method in consideration of spectrum sharing for fairness improvement[C]. The 9th International Congress on Ultra Modern Telecommunications and Control Systems and Workshops, Munich, Germany, 2017: 137–142.
- [11] 刘娇. 面向5G超密集网络基站协同节能关键技术研究[D]. [硕 士论文], 北京交通大学, 2018.
  LIU Jiao. Research on energy-saving technology of base station in 5G ultra dense network[D]. [Master dissertation], Beijing Jiaotong University, 2018.
- [12] KANG H S and KIM D K. User-centric overlapped clustering based on anchor-based precoding in cellular networks[J]. *IEEE Communications Letters*, 2016, 20(3): 542–545. doi: 10.1109/LCOMM.2016.2515085.
- [13] ALI M, HOSSAIN E, and KIM D I. Non-orthogonal multiple access (NOMA) for downlink multiuser MIMO systems: User clustering, beamforming, and power allocation[J]. *IEEE Access*, 2017, 5: 565–577. doi: 10.1109/ ACCESS.2016.2646183.
- [14] KURRAS M, FAHSE S, and THIELE L. Density based user clustering for wireless massive connectivity enabling

Internet of Things[C]. 2015 IEEE Globecom Workshops, San Diego, USA, 2015: 1–6. doi: 10.1109/GLOCOMW. 2015.7413990.

- [15] WEI Rong, WANG Ying, and ZHANG Yuan. A two-stage cluster-based resource management scheme in ultra-dense networks[C]. 2014 IEEE/CIC International Conference on Communications in China, Shanghai, China, 2014: 738–742. doi: 10.1109/ICCChina.2014.7008373.
- [16] HUANG Junwei, ZHOU Pengguang, LUO Kai, el al. Twostage resource allocation scheme for three-tier ultra-dense network[J]. *China Communications*, 2017, 14(10): 118–129. doi: 10.1109/CC.2017.8107637.
- [17] LI Wenchao and ZHANG Jing. Cluster-based resource allocation scheme with QoS guarantee in ultra-dense networks[J]. *IET Communications*, 2018, 12(7): 861–867. doi: 10.1049/iet-com.2017.1331.
- 梁彦霞:女,1981年生,博士,副教授,研究方向为超密集无线网 络,多点协作传输,无线资源管理.
- 姜 静: 女,1974年生,博士,教授,研究方向为无线通信,大规 模MIMO.
- 孙长印:男,1963年生,博士,副研究员,研究方向为超密集网络,无线资源管理,无线干扰管理.
- 刘 欣: 男,1977年生,硕士,工程师,研究方向为移动通信,量 子通信.
- 谢永斌: 男,1965年生,博士,教授,研究方向为无线网络架构, 无线标准.