

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^① 孙长印^① 刘 欣^② 谢永斌^①

^①(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)

^②(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^① JIANG Jing^① SUN Changyin^① LIU Xin^② XIE Yongbin^①

^①(Shaanxi Key Laboratory of Information Communication Network and Security,

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

^②(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^[6-8]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(Ultra-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^[12]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 C_i 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_i ,包括 L 个BS。 U 代表全部用户的集合, U_j 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_i 服务下的信道矢量可表示为

$$\mathbf{H}_{i,C_i} = [g_{i,m_1}, g_{i,m_2}, \dots, g_{i,m_L}] \quad (1)$$

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

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

其中, $\mathbf{x}_i$ 代表虚拟小区 C_i 内所有基站发送给用户

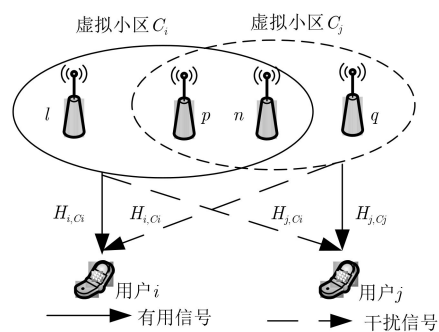


图1 以用户为中心的可重叠虚拟小区

i 的信号所构成的矢量,且具有同等功率 P_{tx} ; $\mathbf{n}_i$ 代表加性高斯白噪声矢量,且 $\mathbf{n}_i \sim \text{CN}(\mathbf{0}, \sigma_n^2 \mathbf{I})$; $\mathbf{x}_i$, $\mathbf{y}_i$ 和 $\mathbf{n}_i$ 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 $\mathbf{W}_i$ 代表在 U_i 中用户的预编码矩阵,可以表示为

$$\mathbf{W}_i = \frac{1}{\sqrt{c_i}} \overline{\mathbf{W}}_i = \frac{1}{\sqrt{c_i}} \mathbf{H}_{i,C_i}^H (\mathbf{H}_{i,C_i} \mathbf{H}_{i,C_i}^H)^{-1} \quad (3)$$

其中, $\mathbf{H}_{i,C_i}^H$ 代表矩阵 $\mathbf{H}_{i,C_i}$ 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

$$c_i = \max_j \left(\overline{\mathbf{W}}_i \overline{\mathbf{W}}_i^H \right) [j, j] \cdot \frac{1}{|C_i|} \quad (4)$$

其中, $\mathbf{X}[j, j]$ 指矩阵 $\mathbf{X}$ 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

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

其中, P_{tx} 和 σ_n^2 分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

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

其中, $\mathbf{h}_e^{[d]}$ 是 $1 \times |V_c|$ 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。 $\mathbf{w}_{c,d}$ 代表在虚拟小区 c 中预编码矩阵 $\mathbf{W}_c$ 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 $\mathbf{P}_{\text{opt}}$,用 $\{V_1, V_2, \dots, V_M\}$ 表示

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

$$\text{s.t.} \quad |V_m| \leq K, \quad m=1, 2, \dots, M \quad (8)$$

$$V_1 \cup V_2 \cup \dots \cup V_M = U \quad (9)$$

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

式(7)中, ω_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 $\mathbf{P}_{\text{opt}}$ 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	参数	意义
C	全部虚拟小区的集合	$\mathbf{W}_i$	U_i 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 j 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
$\mathbf{H}_{i,C_i}$	用户 i 在虚拟小区 C_i 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_k 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
$\mathbf{x}_i$	虚拟小区 C_i 内所有基站发送给用户 i 的信号所构成的矢量	$\mathbf{h}_e^{[d]}$	簇 g 中用户 e 和虚拟小区 c 中每一个基站信道增益
$\mathbf{y}_i$	用户 i 的接收信号矢量	U_c^g	用户集合 U_c 中簇 g 对应的用户集合
$\mathbf{n}_i$	加性高斯白噪声矢量	$\mathbf{w}_{c,d}$	虚拟小区 c 中预编码矩阵 $\mathbf{W}_c$ 的第 d 列
P_{tx}	基站的功率	ω_k	用户 k 的和速率权重
σ_n^2	噪声的功率		

避免增益,选取的信道方向为不同用户之间的信道矢量角度。

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

$$\begin{aligned} \text{Wab}(i, j) = & \left(1 + \alpha \frac{|\mathbf{H}_{i,C_i} \mathbf{H}_{i,C_j}^H|}{\|\mathbf{H}_{i,C_i}\|_F \|\mathbf{H}_{i,C_j}\|_F} \right) \\ & \cdot \left(1 + \beta \frac{|\mathbf{H}_{i,C_i} \mathbf{H}_{j,C_i}^H|}{\|\mathbf{H}_{i,C_i}\|_F \|\mathbf{H}_{j,C_i}\|_F} \right) \cdot \|\mathbf{H}_{i,C_i}\|_F \\ & + \left(1 + \alpha \frac{|\mathbf{H}_{j,C_i} \mathbf{H}_{j,C_j}^H|}{\|\mathbf{H}_{j,C_i}\|_F \|\mathbf{H}_{j,C_j}\|_F} \right) \\ & \cdot \left(1 + \beta \frac{|\mathbf{H}_{i,C_j} \mathbf{H}_{j,C_j}^H|}{\|\mathbf{H}_{i,C_j}\|_F \|\mathbf{H}_{j,C_j}\|_F} \right) \cdot \|\mathbf{H}_{j,C_j}\|_F \end{aligned} \quad (11)$$

其中, α 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,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

$$\cos(\mathbf{H}_{i,C_i}, \mathbf{H}_{j,C_i}) = \frac{|\mathbf{H}_{i,C_i} \mathbf{H}_{j,C_i}^H|}{\|\mathbf{H}_{i,C_i}\|_F \|\mathbf{H}_{j,C_i}\|_F} \quad (12)$$

(2) 在不同虚拟小区下,余弦值的计算为

$$\cos(\mathbf{H}_{i,C_i}, \mathbf{H}_{i,C_j}) = \frac{|\mathbf{H}_{i,C_i} \mathbf{H}_{i,C_j}^H|}{\|\mathbf{H}_{i,C_i}\|_F \|\mathbf{H}_{i,C_j}\|_F} \quad (13)$$

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 $\mathbf{H}_i = [h_{1,a} h_{1,b}; h_{2,a} h_{2,b}]$, $\mathbf{H}_i$ 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)

$$\mathbf{W}_i = \frac{1}{\sqrt{c_i}} \cdot \frac{1}{(h_{1,a} h_{2,b} - h_{1,b} h_{2,a})} \cdot \begin{bmatrix} h_{2,b} & -h_{1,b} \\ -h_{2,a} & h_{1,a} \end{bmatrix} \quad (14)$$

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_i 可以写为

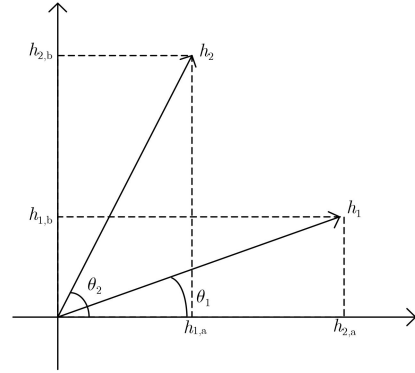


图2 信道矢量关系图

$$\begin{aligned} c_i = & \max_j (\overline{\mathbf{W}}_i \overline{\mathbf{W}}_j^H) [j, j] \\ = & \max \left\{ \frac{|h_{1,b}|^2 + |h_{2,b}|^2}{|h_{1,a} h_{2,b} - h_{1,b} h_{2,a}|^2}, \right. \\ & \left. \frac{|h_{1,a}|^2 + |h_{2,a}|^2}{|h_{1,a} h_{2,b} - h_{1,b} h_{2,a}|^2} \right\} \end{aligned} \quad (15)$$

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

$$\begin{aligned} \Delta \text{SINR} = & \text{SINR}_i - \text{SINR}_a \\ = & \frac{p_{\text{tx}}}{\sigma_n^2} \cdot \frac{1}{c_i} - \frac{|h_{1,a}|^2 p_{\text{tx}}}{|h_{1,b}|^2 p_{\text{tx}} + \sigma_n^2} \\ = & \frac{p_{\text{tx}}}{\sigma_n^2} \cdot \frac{|\mathbf{h}_1 \cdot \mathbf{w}_1|^2}{|h_{1,b}|^2 + |h_{2,b}|^2} - \frac{|h_{1,a}|^2 p_{\text{tx}}}{|h_{1,b}|^2 p_{\text{tx}} + \sigma_n^2} \\ = & \frac{p_{\text{tx}}}{\sigma_n^2} \cdot \frac{\|\mathbf{h}_1\|^2 \|\mathbf{h}_2\|^2}{|h_{1,b}|^2 + |h_{2,b}|^2} \sin^2 \langle \mathbf{h}_1, \mathbf{h}_2 \rangle \\ & - \frac{|h_{1,a}|^2 p_{\text{tx}}}{|h_{1,b}|^2 p_{\text{tx}} + \sigma_n^2} \end{aligned} \quad (16)$$

其中, SINR_i 和 SINR_a 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 $|h_{1,k}|^2 p_{\text{tx}} \gg \sigma_n^2$ 。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

$$\Delta \text{SINR} = \frac{p_{\text{tx}}}{\sigma_n^2} \cdot \frac{\|\mathbf{h}_1\|^2 \|\mathbf{h}_2\|^2}{|h_{1,b}|^2 + |h_{2,b}|^2} \sin^2 \langle \mathbf{h}_1, \mathbf{h}_2 \rangle - 1 \quad (17)$$

从式(17)可以得到用户1的SINR的提高与协作信道 $\mathbf{h}_2$ 的强度、用户功率分割因子、信道 $\mathbf{h}_1$ 和 $\mathbf{h}_2$ 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_1 和 V_2

表 2 干扰增量降低分簇算法

算法：干扰增量降低分簇算法
输入：两两用户间的权重矩阵 W_{ab} , 用户数 N , 用户集合 U ;
输出：用户分簇集合 V_1, V_2 ;
(1) 将用户随机的分成同样大小的两组, 记为 V_1, V_2 , 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 ΔP_m 和 ΔP_n ;
(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 ΔN_m 和 ΔN_n ;
(8) end;
(9) $\Delta m = \Delta P_m - \Delta N_m$, 为用户 m 的干扰增量;
(10) $\Delta n = \Delta P_n - \Delta N_n$, 为用户 n 的干扰增量;
(11) if ($\Delta m > 0$ 且 $\Delta n < 0$)或($\Delta m > 0$ 且 $\Delta n > 0$ 且 $\Delta m > \Delta n$);
(12) 将用户 m 从原来组交换到另一组; 转至(2)。
(13) end;
(14) if ($\Delta m < 0$ 且 $\Delta n > 0$)或($\Delta m > 0$ 且 $\Delta n > 0$ 且 $\Delta m < \Delta n$);
(15) 将用户 n 从原来组交换到另一组; 转至(2)。
(16) end;
(17) if $\Delta m > 0$ 且 $\Delta n > 0$ 且 $\Delta m = \Delta n$;
(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 $\Delta m < 0$ 且 $\Delta n < 0$;
(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^x 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。

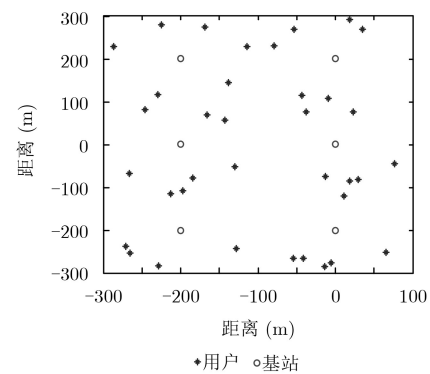


图 3 6 小区、36 用户的随机分布图

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。

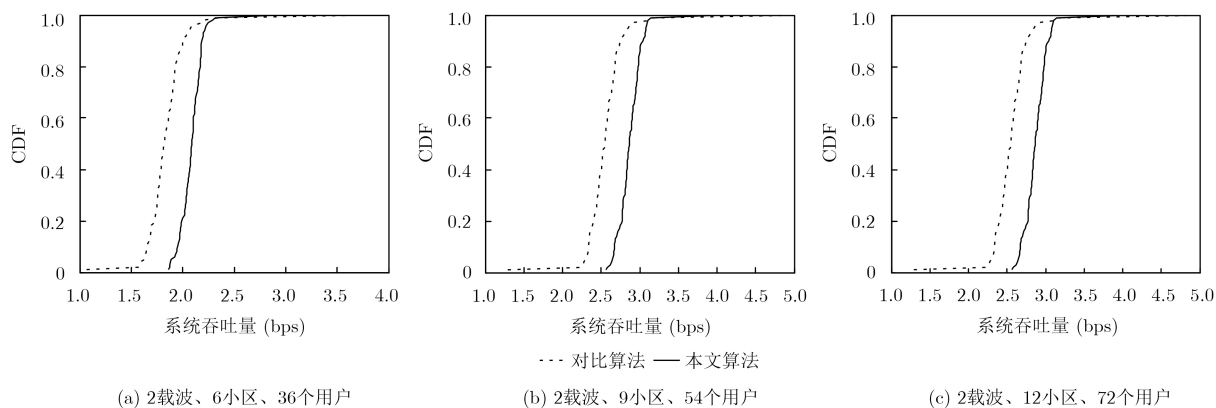


图4 系统吞吐量与CDF关系图

表4 干扰增量降低(IIR)算法与参考算法仿真结果对比

小区及用户分簇算法改善程度	6个小区36个用户			9个小区54个用户			12个小区72个用户		
	K-mean/ $\times 10^8$ (bps)	IIR/ $\times 10^8$ (bps)	提升 (%)	K-mean/ $\times 10^8$ (bps)	IIR/ $\times 10^8$ (bps)	提升 (%)	K-mean/ $\times 10^8$ (bps)	IIR/ $\times 10^8$ (bps)	提升 (%)
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 $2 \times (N-2)$ 次,可分配完所有的用户。因此,参考算法的比较次数为 $2 \times (N-2)$ 。

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 Δm , Δn 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 Δm , Δn ,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 $2 \times (N-2)$ 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。

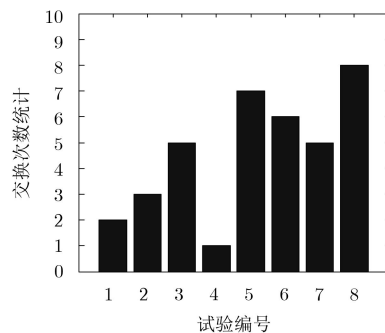


图5 本算法计算复杂度衡量

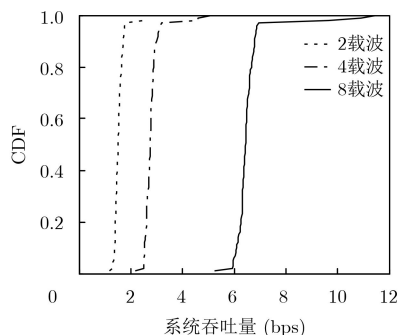


图6 不同载波数下,系统吞吐量与CDF关系图

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。

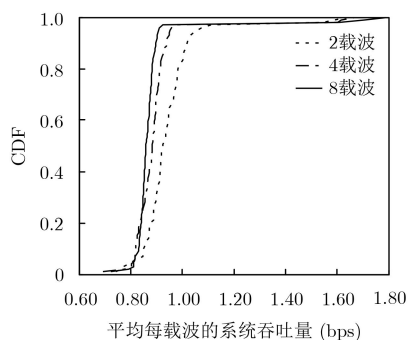


图7 不同载波数,平均每载波系统吞吐量与CDF关系图

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 $k \times (N-2)$ 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 交换次数	序号									
	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^x (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. 超密集小蜂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 coordination-based 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 cluster-based 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 logic-based 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](https://doi.org/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](https://doi.org/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]. [硕士学位论文], 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](https://doi.org/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](https://doi.org/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](https://doi.org/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](https://doi.org/10.1109/ICCChina.2014.7008373).
- [16] HUANG Junwei, ZHOU Pengguang, LUO Kai, *et al.* Two-stage resource allocation scheme for three-tier ultra-dense network[J]. *China Communications*, 2017, 14(10): 118–129. doi: [10.1109/CC.2017.8107637](https://doi.org/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](https://doi.org/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.