



超密集网基于干扰公平及多维协作的虚拟小区生成算法

赵晓宁, 孙长印, 梁彦霞

(西安邮电大学通信与信息工程学院, 陕西 西安 710121)

摘要: 在超密集网络场景中, 小区密度持续增加使得干扰关系更加复杂, 重叠虚拟小区结构使得资源分配深度耦合, 导致虚拟小区选择成为影响系统性能的因素之一。为此, 针对虚拟小区边权重设计, 采用联合资源分配前置化思想, 提出一种综合了干扰公平功率分配、MU-MIMO 配对及协作传输诸增益因素的权重方案。针对虚拟小区成簇, 基于提出的权重设计准则, 通过最大权重成对小区成簇算法实现虚拟小区可重叠成簇。仿真结果表明, 提出的虚拟小区生成算法可在低计算复杂度的前提下保证系统性能的改善。

关键词: 超密集网络; 虚拟小区; 边权重; 重叠; 成簇

中图分类号: TN929

文献标识码: A

doi: 10.11959/j.issn.1000-0801.2017228

Virtual cell forming algorithm based on interference fair and multi-dimensional cooperation for ultra-dense network

ZHAO Xiaoning, SUN Changyin, LIANG Yanxia

Institute of Communication Engineering, Xi'an University of Posts and Telecommunications, Xi'an 710121, China

Abstract: Virtual cell is identified as one of factors affecting the system performance in ultra-dense network where the interference is complex with the increasing density of cells and the resource allocation strategies of different dimensions were coupled in overlapped virtual cells. Therefore, aiming at designing the edge weight of virtual cells, an algorithm considering the resource allocation in advance was proposed by taking interference fair power allocation, MU-MIMO operation and cooperative transmission into account simultaneously. Based on the proposed scheme of weight, the overlapped virtual cells could be formed by the proposed clustering algorithm named pairwise maximum weights. The simulation results demonstrate that the proposed algorithm can improve the sum-rate performance of the network effectively at a low complexity.

Key words: ultra-dense network, virtual cell, edge weight, overlapped, clustering

1 引言

为支持更高的数据流量, 超密集组网已经成为 5G 移动网络的一项关键技术。该技术的基本思想是在热点区域及数据业务量大的区域密集分布

低功率接入点以形成微小区, 从而为用户提供良好的接入服务^[1]。然而, 在这一场景下, 随着小区间距变小, 相邻小区的覆盖范围相互重叠, 导致一个用户可能同时接收到来自多个小区的信号, 其中包含了其他小区对该用户的干扰。因此,

这种网络环境下复杂的用户间干扰以及频繁的小区切换是需要解决的关键问题, 尤其针对位于小区边缘的用户。

以用户为中心的虚拟小区技术打破了传统的以小区为中心的网络架构, 可以动态地为用户选择最恰当的服务小区。此外, 相互重叠的虚拟小区可以很好地消除小区的边缘效应, 改善边缘用户的性能^[2]。目前, 关于虚拟小区的成簇算法已经在业内得到了广泛研究。例如, 基于协作多点传输技术, 参考文献[3]通过选择满足设定阈值的小区成簇, 从而达到最大化接收端传输速率的目标。参考文献[4]提出一种改善系统能效的虚拟小区成簇算法, 该算法以满足用户服务要求为前提, 寻找能量消耗最少的小区簇结果。而参考文献[5]同时考虑系统能效和谱效, 提出一种两者折中的算法。参考文献[6]提出一种基于人工蚁群的染色分簇算法以改善用户频谱效率及吞吐量。基于用户的移动方向与速度考虑, 参考文献[7]给出一种旨在减少切换次数与失败率的小区簇算法。考虑到系统和速率是反映系统性能的一个重要参数, 参考文献[8,9]以此为目标函数, 提出了多种小区簇的算法。然而, 上述算法形成的虚拟小区大多是非重叠的, 导致系统中依然存在位于虚拟小区边缘的用户, 对系统性能造成影响。

本文以最大化系统和速率为目标, 首先设计小区权重计算方案, 其次, 在该方案基础上提出一种虚拟小区成簇算法。权重计算方案充分考虑超密集网络的特点, 如干扰环境复杂, 此时每个用户都受到其他用户的干扰, 同时又对其他用户产生干扰; 其次, 当一个低功率接入点同时属于不同的虚拟小区时, 其资源分配是相互耦合的。在此背景特点下, 传统的权重设计由于只作单一因素考虑, 势必不能得到良好的效果。基于上述的分析, 本文提出一种综合考虑多维因素的小区权重设计方案, 为提高系统和速率并改善边缘用户的性能, 将干扰公平功率

分配、MU-MIMO 配对、协作增益 3 个因素同时考虑在小区的权重设计过程中, 体现了后续资源分配前置化的处理思想。

2 系统模型

考虑 5G 系统超密集网络的下行传输, 其中整个系统共包括 N 个低功率接入点 (access point, AP), 每个 AP 可同时调度多个用户。假设每个 AP 或用户有一根发送天线或接收天线; V 表示系统中全部 AP 的集合; 每个虚拟小区均包括 L 个 AP, 其中第 i 个虚拟小区所属的 AP 集合记为 V_i , 其调度的用户集为 U_i ; 每个虚拟小区中的 AP 共享调度用户数据, 协作地为用户提供服务, 系统模型如图 1 所示。

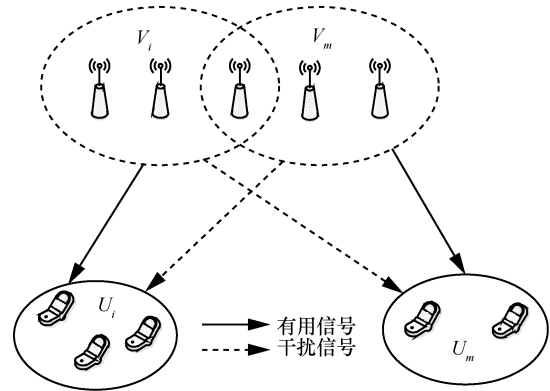


图 1 系统模型

假设虚拟小区 i 中 AP 与其调度的用户间的信道可以表示为:

$$\mathbf{H}_i = [h_{j,k}], \quad j \in U_i, \quad k \in V_i \quad (1)$$

其中, $h_{j,k}$ 表示用户 j 与 AP k 间的信道增益。假设虚拟小区预编码算法采用 ZF (zero-forcing, 迫零) 算法以消除虚拟小区内部的用户间干扰^[10]。根据参考文献[8], 虚拟小区 i 的 ZF 预编码矩阵 $\mathbf{W}_i$ 可以写为:

$$\mathbf{W}_i = \frac{1}{\sqrt{c_i}} \overline{\mathbf{W}}_i = \frac{1}{\sqrt{c_i}} \mathbf{H}_i^H (\mathbf{H}_i \mathbf{H}_i^H)^{-1} \quad (2)$$

其中, $\mathbf{X}^H$ 为 $\mathbf{X}$ 的共轭转置; c_i 为预编码矩阵的功率约束条件, 根据参考文献[8]可以得到:



$$c_i = \sum_{j \in V_i} \left(\overline{\mathbf{W}_i} \overline{\mathbf{W}_i}^H \right) [j, j] \cdot \frac{1}{|V_i|} \quad (3)$$

其中, $\mathbf{X}[j, j]$ 表示矩阵 $\mathbf{X}$ 的第 $[j, j]$ 元素, $|Y|$ 表示集合 Y 中元素的个数。

假设 $\mathbf{x}_i$ 为 U_i 中用户的传输信号, 其传输功率均为 P_t , 则接收信号 $\mathbf{y}_i$ 表示为:

$$\mathbf{y}_i = \mathbf{H}_i \mathbf{W}_i \mathbf{x}_i + \mathbf{n}_i \quad (4)$$

其中, $\mathbf{n}_i$ 为服从 $CN(\mathbf{0}, \sigma_n^2 \mathbf{I})$ 分布的加性高斯白噪声。

根据式 (4), 可以得到用户 j 在虚拟小区 i 中的可达速率, 为:

$$R_j^{[i]} = B \log \left(1 + \frac{P_t}{c_i (\sigma_n^2 + \eta_j^{[i]})} \right) \quad (5)$$

其中, B 为系统传输带宽, $\eta_j^{[i]}$ 为虚拟小区 i 中的用户 j 受到其他虚拟小区的干扰, 可表示为:

$$\eta_j^{[i]} = \sum_{m \in S \setminus \{i\}} \sum_{n \in U_m} \left| \mathbf{h}_j^{[m]} \mathbf{w}_{m,n} \right|^2 \cdot P_t \quad (6)$$

其中, S 为系统中全部虚拟小区的集合, $\mathbf{h}_j^{[m]}$ 为用户 j 与虚拟小区 m 中 AP 间的信道增益, $\mathbf{w}_{m,n}$ 为虚拟小区 m 对其调度用户集 U_m 中用户 n 的预编码矢量。

本文考虑相互重叠的虚拟小区生成。以系统和速率为效用函数, 则该问题可以表述为下述优化问题:

$$\max \sum_{i \in S} \sum_{j \in U_i} R_j^{[i]} \quad (7)$$

约束条件为:

$$|V_i| = L \quad (8)$$

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

$$V_i \cap V_q \neq \emptyset, i \neq q \quad (10)$$

约束 (8) ~ 约束 (10) 中, 约束 (8) 确保每个虚拟小区中 AP 的数目是相同的, 约束 (9) 是为了保证系统中的每一个 AP 均被分配到虚拟小区中,

而约束 (10) 体现了不同虚拟小区间的相互重叠。

上述优化问题的求解复杂度随着系统内 AP 数目的增加而呈指数级上升, 当网络规模增加到一定程度, 计算处理速度将落后于系统参数的变化, 如信道信息。为此, 提出一种低复杂度的启发式算法来解决上述优化问题。

3 算法方案

3.1 基于多维度协作的小区权重设计方案

考虑到超密集网络干扰的复杂性以及重叠虚拟小区资源维度的强耦合属性, 本文从多维度协作的角度考虑小区间权重设计方案, 使得能够在虚拟小区成簇的阶段提前考虑后续功率分配及调度过程中出现的资源分配问题。基于这一目标, 小区间的权重计算同时考虑功率分配、MU-MIMO 配对及协作传输增益多个因素。

假设虚拟小区 i 和 j 合并成一个新的虚拟小区, $\forall m \in V_i, n \in V_j, a \in U_i, b \in U_j$, 设用户 a 和 b 在新的虚拟小区中的信道分别为 $\mathbf{h}_a = [\mathbf{h}_{a,m} \ \mathbf{h}_{a,n}]$ 和 $\mathbf{h}_b = [\mathbf{h}_{b,m} \ \mathbf{h}_{b,n}]$, 则定义 AP m 、AP n 之间的权值为:

$$e_{m,n} = \sum_{a \in U_i} \sum_{b \in U_j} \|\mathbf{h}_b\| \cdot \frac{\|\mathbf{h}_a\|}{\sqrt{\|\mathbf{h}_a\|^2 + \|\mathbf{h}_b\|^2}} \cdot \frac{1}{\cos \langle \mathbf{h}_a, \mathbf{h}_b \rangle} \quad (11)$$

其中, $\|\mathbf{X}\|$ 表示 $\mathbf{X}$ 的 F-范数。式 (11) 中包含的设计因素可分为 3 部分做详细分析: 当 AP m 、AP n 属于同一虚拟小区而进行协作传输时, $\|\mathbf{h}_b\|$ 表征的是协作信道能够带来的协作增益, 这是因为协作增益与协作用户的信道强度紧密相关; 对于可重叠的虚拟小区, 某一 AP 将同时属于不同的虚拟小区, 此类 AP 的功率需分配给不同虚拟小区的用户, 式 (11) 中 $\|\mathbf{h}_a\| / \sqrt{\|\mathbf{h}_a\|^2 + \|\mathbf{h}_b\|^2}$ 反映的是一种信道相关的功率分配比例, 根据参考文献[11], 该比例体现了一种干扰公平的分配方案; 从 MU-MIMO 的角度来看, 当被以 MU-MIMO

用户对形式调度的用户间信道趋于正交化时, 可以提供更高的频率利用率, 因此利用 $1/\cos\langle \mathbf{h}_a, \mathbf{h}_b \rangle$ 体现潜在的 MU-MIMO 预编码增益。

根据式 (11), 虚拟小区 i 、 j 间的权重可以表示为:

$$e_{i,j} = \sum_{m \in V_i} \sum_{n \in V_j} e_{m,n} \quad (12)$$

根据式 (12) 可以计算任意两个虚拟小区间的权重。本文中, 虚拟小区间的边权重被认为是无向的, 即满足 $e_{i,j} = e_{j,i} = \max(e_{i,j}, e_{j,i})$ 。若对于系统中所有的 $j' \neq j$ 均满足 $e_{i,j} > e_{i,j'}$, 则将虚拟小区 i 、 j 合并为一个新的虚拟小区。

小区间的权重设计对于虚拟小区的形成至关重要, 此处给出一个简单的模型来证明本文所提出的权重设计方案的合理性, 简单模型如图 2 所示, 由 AP m 、AP n 组成了虚拟小区 i 。假设 AP m 及 AP n 的调度用户分别为用户 1 和用户 2, 则虚拟小区 i 与用户 1、2 的信道可以表示为:

$$\mathbf{H}_i = \begin{bmatrix} \mathbf{h}_1 \\ \mathbf{h}_2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} h_{1,m} & h_{1,n} \\ h_{2,m} & h_{2,n} \end{bmatrix} \quad (13)$$

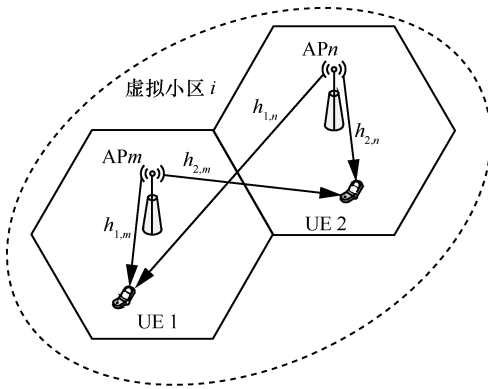


图2 给定的网络模型

根据式 (2) 可以得出该虚拟小区 i 的预编码矩阵 $\mathbf{W}_i$ 为:

$$\mathbf{W}_i = \frac{1}{\sqrt{c_i}} \overline{\mathbf{W}}_i = \frac{1}{\sqrt{c_i}} \mathbf{H}_i^H (\mathbf{H}_i \mathbf{H}_i^H)^{-1} = P [\mathbf{w}_1 \quad \mathbf{w}_2] \quad (14)$$

其中, $P = 1/\sqrt{c_i} (h_{1,m} h_{2,n} - h_{1,n} h_{2,m})$, $\mathbf{w}_1 = [h_{2,n} \quad -h_{2,m}]^T$, $\mathbf{w}_2 = [-h_{1,n} \quad h_{1,m}]^T$ 。

由式 (3) 得到的功率约束因子 c_i 为:

$$c_i = \frac{|h_{1,n}|^2 + |h_{2,n}|^2 + |h_{1,m}|^2 + |h_{2,m}|^2}{|V_i| \cdot |h_{1,m} h_{2,n} - h_{1,n} h_{2,m}|^2} \quad (15)$$

考虑到 ZF 预编码算法可以很好地消除虚拟小区内部的干扰, 故合并后的虚拟小区 i 给用户 1 带来的信干噪比增益可以计算如下:

$$\begin{aligned} \Delta \text{SINR} &= \text{SINR}_i - \text{SINR}_m \\ &= \frac{P_t |V_i| \cdot \|\mathbf{h}_1\|^2 \|\mathbf{h}_2\|^2 \sin^2 \langle \mathbf{h}_1, \mathbf{h}_2 \rangle}{\sigma_n^2 (\|\mathbf{h}_1\|^2 + \|\mathbf{h}_2\|^2)} - \frac{|h_{1,m}|^2 P_t}{|h_{1,n}|^2 P_t + \sigma_n^2} \end{aligned} \quad (16)$$

其中, SINR_i 和 SINR_m 分别表示用户 1 在虚拟小区 i 中的 SINR 及单独由 AP m 提供服务时的 SINR。

此处不失一般性, 假设用户 1 位于小区边缘, 可以近似地认为 $|h_{1,m}| \approx |h_{1,n}|$, 因此式 (16) 可以化简为:

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

观察式 (17), 可以直观地发现用户 1 的 SINR 增益与协作信道 $\|\mathbf{h}_2\|$ 的强度、为用户 1 分配的功率比例及信道 $\mathbf{h}_1$ 与 $\mathbf{h}_2$ 间的正交性有着紧密的联系。因此可以证明本文提出的小区间权重 $e_{i,j}$ 的设计是能够带来合并增益的。为了突出信道正交性的影响因素, 权值中用余弦倒数代替了式 (17) 的正弦项。

3.2 虚拟小区分簇算法

基于小区间的权重计算式 $e_{i,j}$, 本文给出一种分簇算法 PMW (pairwise maximum weight, 最大权重成对), 该算法能够将系统中的所有 AP 分为可重叠的多个虚拟小区。此外, 为了确保形成的虚拟小区相互重叠, 在使用该成簇算法之前, 需要将系统中所有 AP 复制 L 次, 复制 AP 与其他



原始 AP 间的权重与对应的原始 AP 间的权重相同,而复制 AP 与对应原始 AP 之间的权重设为零,这是为了确保不会将它们分配在同一虚拟小区中。PMW 算法流程如图 3 所示,具体伪代码如下所示。

算法 1 PMW 算法

输入:系统中 AP 的数目 N ,虚拟小区尺寸 L ,
系统中 AP 与用户间的信道

输出:虚拟小区形成结果

将所有 AP 节点复制 L 次,现可认为系统中有
 $L \times N$ 个 AP

初始化:对所有的虚拟小区 $i \leq L \times N$, 存在
 $w_i = 0$; $t = 0$

for $i, j = 1: L \times N - t$ do

if $|V_i| + |V_j| \leq L \ \&\& \ V_i \cap V_j = \emptyset$ do

通过式 (12) 计算虚拟小区 i 和虚拟小
区 j 之间的权重 $e_{i,j}$

$$e_{i,j} = e_{i,j} + w_i + w_j$$

else

$$e_{i,j} = 0$$

end if

生成权重矩阵 $R = (e_{i,j})$

if $R \neq 0$ do

查找 $e_{m,n} = \arg \max R$

更新 $V_m = V_m \cup V_n$, $U_m = U_m \cup U_n$,

$$w_m = e_{m,n}, \quad t = t + 1$$

删除关于虚拟小区 n 及相关参数

else

break

end if

end for

根据上述的算法流程,可以得出 PMW 算法至多经过 $L \times N$ 次循环即可确定最优的虚拟小区成簇结果,每次循环的搜索次数不超过 $(L \times N)^2$,总体的计算量不超过 $(L \times N)^3$ 。

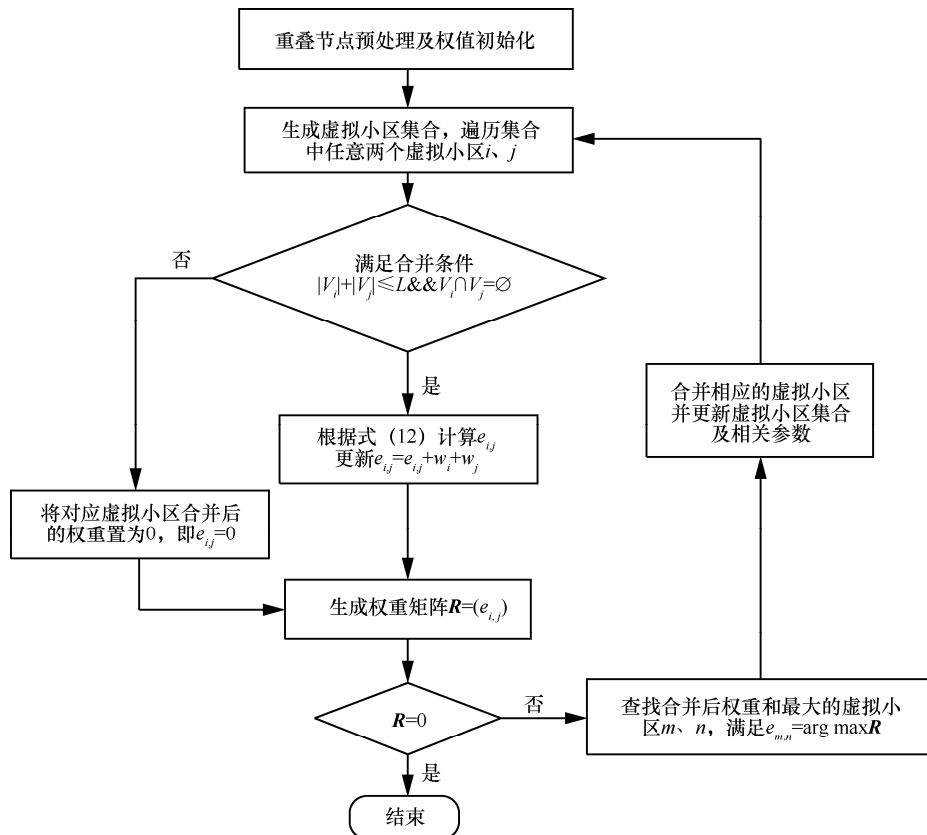


图3 PMW 算法流程

4 仿真分析

为了评估本文的权重设计方案及基于该权重的虚拟小区成簇算法的性能,采用 MATLAB 为仿真工具进行系统级仿真,并以参考文献[8]提出的权重方案及小区成簇算法以及基于距离的可重叠成簇算法作为参考算法进行比较。其中参考文献[8]的权重设计方案为 $f_2(e_{i,j})$, 该方案较其中的 $f_1(e_{i,j})$ 的性能更好,详见文献描述。基于距离的可重叠成簇算法是根据用户与 AP 间的距离,选择距离用户最近的若干 AP 形成该用户的虚拟服务小区。

仿真采用的信道模型为 3GPP 标准组织提出的 SCM (spatial channel model, 空间信道模型) 中的城市微小区信道模型。本文给出两种网络场景,分别包含 15 个 AP、200 个用户;18 个 AP、200 个用户。本文假设网络中 AP 以“田”字型结构排列,其间隔为 200 m。

在系统级仿真中,首先由相应的虚拟小区成簇算法形成虚拟小区,而后进行虚拟小区选择及多小区调度,最后对调度用户进行波束成形及功率分配。在调度过程中以和速率为度量参数,采用基于比例公平的贪婪调度算法;虚拟小区采用利己利他的波束成形算法;对于同时属于不同虚拟小区的 AP,首先根据用户瞬时信道强度进行功率分割,其次采用注水算法进行功率控制。为了更好地验证本文提出的算法对于边缘用户性能的改善,将大部分用户随机抛撒在小区的边缘区域。具体仿真假设见表 1。

表 1 仿真参数基本假设

参数	数值
载波带宽/MHz	10
载波数量/个	2
AP 基站路径损耗/dB	$140.7+36.7\lg d$
阴影衰落/dB	8
AP 基站发射功率/dBm	20
发送端天线数目/个	2
接收端天线数目/个	1

为了确保仿真结果的公平性,在系统级仿真的过程中,除 3 种虚拟小区成簇算法不同外,调度、波束成形、功率分割与功率控制算法均采用同一算法。

图 4 和图 5 分别给出两种网络参数下系统和速率的 CDF (cumulative distribution function, 累计分布函数) 曲线。由图 4 和图 5 可知,就系统平均和速率(对应 CDF 曲线 50% 的位置)和边缘用户和速率(对应 CDF 曲线 5% 的位置)而言,本文提出的虚拟小区成簇算法较之基于距离的成簇算法及参考文献[8]给出的成簇算法均有提升,具体的对应的数据见表 2。

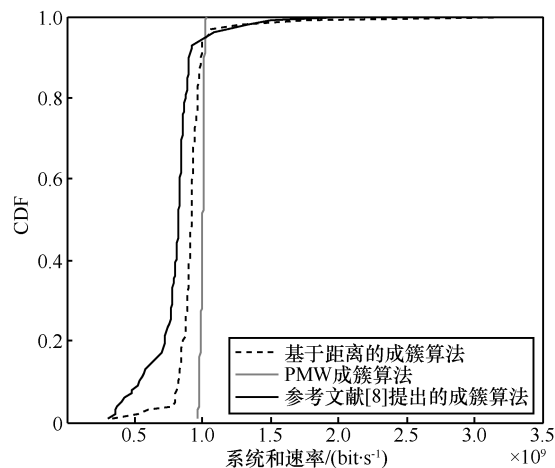


图 4 15 个 AP、200 个用户的系统和速率结果比较曲线

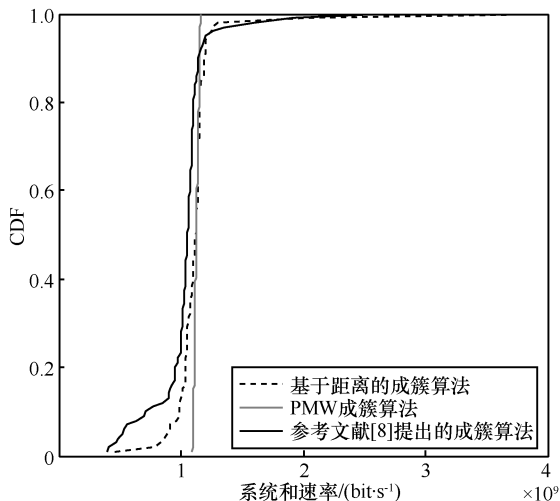


图 5 18 个 AP、200 个用户的系统和速率结果比较曲线



表 2 本文算法与参考算法仿真结果对比

成簇方法	15 个 AP			18 个 AP		
	参考文献[8] 提出的成簇算法	基于距离的 成簇算法	PMW 成簇 算法	参考文献[8] 提出的成簇算法	基于距离的 成簇算法	PMW 成簇 算法
边缘用户和速率/(bit·s ⁻¹)	0.41×10^9	0.79×10^9	0.91×10^9	0.52×10^9	0.88×10^9	1.10×10^9
系统平均和速率/(bit·s ⁻¹)	0.82×10^9	0.92×10^9	1.00×10^9	1.05×10^9	1.12×10^9	1.13×10^9

由表 2 可以看出,边缘用户的性能得到了明显改善,而且可重叠的成簇算法性能优于不可重叠的算法,这是因为可重叠的虚拟小区算法能够尽量使用户位于虚拟小区中心,消除了小区的边缘效应,用户受到小区间干扰减小。此外,由于本文提出的算法在虚拟小区成簇的阶段已经提前考虑了后续的资源分配及潜在的 MU-MIMO 配对,因此被调度的用户更容易因为信道趋于正交,而被以 MU-MIMO 用户对的形式传输信号,同时由于虚拟小区内 AP 间的相互协作,使得原来的干扰信号转变为有用信号,从而为虚拟小区带来增益。

5 结束语

本文通过分析超密集网络下复杂的干扰环境及重叠虚拟小区资源维度的强耦合属性,基于此提出一种虚拟小区边权重设计准则。由于该准则从多个方面考虑小区间权重的设计,可以将后续的调度、功率分配等资源分配提前考虑在虚拟小区形成的过程中,这种后续操作前置化的处理方法能够带来显著的协作增益。基于这种虚拟小区边权重设计准则,本文同时提出了一种能够实现虚拟小区可重叠成簇的成簇算法,该算法通过迭代选择最佳的虚拟小区进行合并。仿真结果表明,就边缘用户性能及系统和速率而言,本文提出的算法较基于距离的可重叠成簇算法及动态不可重叠算法有明显增益。

本文提出的算法将后续的调度、功率分配等资源分配提前考虑,从而在虚拟小区形成过程中

产生协作增益,然而本文在仿真过程中采用的调度算法是基于比例公平的贪婪调度算法,该调度算法并不能全面地体现本文提出的虚拟小区形成算法带来的协作增益。在下一步的工作中,将就本文的虚拟小区形成算法提出相应的用户调度算法,从而进一步改善系统性能。

参考文献:

- [1] KAMEL M, HAMOUDA W, YOUSSEF A. Ultra-dense network: a survey[J]. IEEE Communications Surveys & Tutorials, 2016, 18(4): 2522-2545.
- [2] ZARIFI K., BALIGH H, MA J, et al. Radio access virtualization: cell follows user[C]//2014 IEEE 25th Annual International Symposium on Personal, Indoor, and Mobile Radio Communications (PIMRC), September 2-5, 2014, Washington, DC, USA. New Jersey: IEEE Press, 2014: 1381-1385.
- [3] 韩东升, 丁莎莎, 余萍. 一种基于阈值的无线异构网络基站分簇方法[J]. 电信科学, 2015, 31(4): 92-97.
HAN D S, DING S S, YU P. A clustering method based on the threshold in wireless heterogeneous network[J]. Telecommunications Science, 2015, 31(4): 92-97.
- [4] LEI L, YUAN D, HO C K, et al. Optimal cell clustering and activation for energy saving in load-coupled wireless networks[J]. IEEE Transactions on Wireless Communications, 2015, 14(11): 6150-6163.
- [5] YANG Z H, ZHANG H T, HAO P, et al. Backhaul-aware adaptive TP selection for virtual cell in ultra-dense networks[C]//2016 IEEE 27th Annual International Symposium on Personal, Indoor, and Mobile Radio Communications (PIMRC), September 4-8, 2016, Valencia, Spain. New Jersey: IEEE Press, 2016: 1-6.
- [6] 周朋光, 黄俊伟, 张仁迟, 等. 超密集网中一种基于人工蜂群的节能分簇算法[J]. 电信科学, 2017, 33(2): 90-97.
ZHOU P G, HUANG J F, ZHANG R C, et al. An energy saving clustering algorithm based on artificial bee colony in ultra dense network[J]. Telecommunications Science, 2017, 33(2): 90-97.

- [7] MENG N, ZHANG H T, LU H T. Virtual cell-based mobility enhancement and performance evaluation in ultra-dense networks[C]//2016 IEEE Wireless Communications and Networking Conference, April 3-6, 2016, Doha, Qatar. New Jersey: IEEE Press, 2016: 1-6.
- [8] MOON J M, CHO D H. Inter-cluster interference management based on cell-clustering in network MIMO systems[C]//2011 IEEE 73rd Vehicular Technology Conference (VTC Spring), May 15-18, 2011, Yokohama, Japan. New Jersey: IEEE Press, 2011: 1-6.
- [9] GONG J, ZHOU S, MIU Z S, et al. Joint scheduling and dynamic clustering in downlink cellular networks[C]//2011 IEEE Global Telecommunications Conference (GLOBECOM 2011), December 5-9, 2011, Kathmandu, Nepal. New Jersey: IEEE Press, 2011: 1-5.
- [10] IKUNO J C, WRULICH M, RUPP M. System level simulation of LTE networks[C]//2010 IEEE 71st Vehicular Technology Conference (VTC 2010-Spring), May 16-19, 2010, Taipei, China. New Jersey: IEEE Press, 2010: 1-5.
- [11] ZAKHOUR R, GESBERT D. Distributed multicell-MISO precoding using the layered virtual SINR framework [J]. IEEE Transactions on Wireless Communications, 2010, 9(8): 2444-2448.

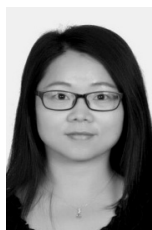
[作者简介]



赵晓宁（1991-），女，西安邮电大学通信与信息工程学院硕士生，主要研究方向为宽带无线通信。



孙长印（1963-），男，博士，西安邮电大学通信与信息工程学院副教授，主要研究方向为移动通信系统及关键技术。



梁彦霞（1981-），女，博士，西安邮电大学通信与信息工程学院副教授，主要研究方向为无线干扰管理及无线资源分配。