

## JT-CoMP 场景中以用户为中心的半动态分簇方法

田心记,张浩天

(河南理工大学 物理与电子信息学院,河南 焦作 454000)

**摘 要:**为消减超密集网络中小小区间的干扰,提出多点协作联合传输场景中一种以用户为中心的半动态分簇方法。对网络内的所有小基站进行不重叠分簇,将簇内的小基站及位于簇外但与该簇存在较大干扰的小基站作为用户的备选服务基站,采用迫零预编码消除备选服务基站中的非服务基站对用户的干扰,用户从备选服务基站中选出若干待选服务基站,簇头以最大化簇内用户吞吐量之和为目标从待选服务基站中为用户选择服务基站簇。同时给出一种次优的为用户选择服务基站簇的方法以降低复杂度。仿真结果表明,与相同场景中的已有方案相比,该方法明显提高系统吞吐量。

**关键词:**超密集网络;多点协作;联合传输;半动态分簇;吞吐量

**中文引用格式:**田心记,张浩天. JT-CoMP 场景中以用户为中心的半动态分簇方法[J]. 计算机工程,2019,45(6):134-139,145.

**英文引用格式:**TIAN Xinji, ZHANG Haotian. User-centric semi-dynamic clustering method for JT-CoMP scenarios[J]. Computer Engineering,2019,45(6):134-139,145.

### User-centric Semi-dynamic Clustering Method for JT-CoMP Scenarios

TIAN Xinji, ZHANG Haotian

(School of Physics and Electronic Information Engineering, Henan Polytechnic University, Jiaozuo, Henan 454000, China)

**[Abstract]** In order to decrease the interference between small cells in Ultra Dense Network(UDN), this paper propose a user-centric semi-dynamic clustering method for Coordinated Multiple Point (CoMP) Joint Transmission (JT) scenarios. It divides small stations into non-overlapping clusters, and takes the small stations in the cluster and the small stations located outside the cluster but having large interference with the cluster as the optional service stations of the user. Zero-forcing precoding is used to eliminate interference to users from non-serving base stations in the optional service stations. Users select a number of candidate service stations from the optional service stations service and selected the cluster heads, with the goal of maximizing the sum of throughput of each user select the station clusters for users from the optional service stations. At the meanwhile a suboptimal method for selecting service station clusters for users is given to reduce the complexity. Simulation results show that compared with the existing scheme in the same scenario the proposed scheme improves the system throughput.

**[Key words]** Ultra Dense Network (UDN); Coordinated Multiple Point (CoMP); Joint Transmission (JT); semi-dynamic clustering; throughput

**DOI:**10.19678/j.issn.1000-3428.0050608

## 0 概述

超密集网络(Ultra Dense Network, UDN)是第五代移动通信的关键技术之一<sup>[1]</sup>。UDN中存在严重的同频干扰,是UDN技术发展的一大障碍<sup>[2]</sup>。基于联合传输(Joint Transmission, JT)的多点协作(Coordinated Multiple Point, CoMP)技术在协作基站间共享用户数据和信道状态信息(Channel State Information, CSI),将干扰链路转化为有用链路能有

效减少干扰<sup>[3-4]</sup>。因此,有学者提出把JT-CoMP技术应用于UDN中,以消减小小区间的干扰。然而, JT-CoMP技术要求小基站间共享用户数据和CSI,需要较高的回程开销。为减少回程开销,需要构建只包含几个或十几个小基站的协作簇,仅簇内的小基站进行协作传输<sup>[5]</sup>。

CoMP分簇方法分为3类:静态分簇,半动态分簇和动态分簇。动态分簇根据CSI和用户位置的变化,周期性地分簇,能够获得更高的协作增益,

**基金项目:**河南省科技攻关项目“基于MIMO技术的超密集网络分层干扰消除技术研究”(172102210023);河南省高校基本科研业务费专项资金“基于完美空时分组码的干扰消除方法研究”(NSFRF140126)。

**作者简介:**田心记(1983—),女,副教授、博士,主研方向为超密集网络、干扰消除;张浩天,硕士研究生。

**收稿日期:**2018-03-05 **修回日期:**2018-05-08 **E-mail:**tian215216@sohu.com

但是这类分簇复杂度较高<sup>[6]</sup>。动态分簇分为 3 类:以网络为中心的动态分簇,以用户为中心的动态分簇和混合分簇<sup>[7]</sup>。在以网络为中心的动态分簇中,首先对小基站进行分簇,然后在用户所处的簇内为该用户选择合适的服务基站,这种分簇方法的复杂度相对较低,但是簇边缘用户会受到严重的簇间干扰<sup>[8]</sup>。以用户为中心的动态分簇根据 CSI 在所有的小基站中为用户选择合适的服务基站簇,这种方法能获得较优的性能,但是复杂度最高<sup>[9]</sup>。混合分簇是以网络为中心的动态分簇和以用户为中心的动态分簇的结合,在复杂度和协作增益之间取得折衷<sup>[10]</sup>。

文献[11]提出一种能最优化网络能量效率的分簇算法,并给出波束赋形向量的设计方法,利用加权最小均方误差理论和群稀疏理论将该问题转化为易处理的形式。然而,该方法可能会降低部分用户的服务质量。文献[12]以回程链路容量作为约束条件,以最大化系统吞吐量作为目标,提出一种以用户为中心的半动态分簇方法,提高了系统吞吐量。然而,文献[11]采用迭代的方法找出每个用户的 CoMP 服务基站簇,迭代次数与小基站数量的平方成正比,复杂度较高。文献[13]提出一种低复杂度的动态分簇方法,以最大化每个基站的吞吐量为目标,采用迭代的方法找出每个基站服务的用户。该方法的复杂度显著低于文献[12]。然而,该方法在计算吞吐量时没有考虑到干扰,系统性能有待提升。

为了消减 UDN 中小小区间的干扰,本文提出一种以用户为中心的半动态分簇方法。对网络内的小基站进行不重叠分簇,将每个簇内的小基站以及簇外但与该簇干扰较大的小基站作为该簇内用户的备选服务基站,推导每个簇内预编码矩阵的设计方法,最大化每个簇内用户的总吞吐量。为降低复杂度,给出一种次优的为用户选择服务基站簇的方法。

## 1 系统模型

考虑包含  $J$  个小基站和  $I$  个用户的 UDN,每个小基站配置  $N_T$  根天线,每个用户配置 1 根天线,小基站和用户都随机分布在该网络内。每个小基站通过回程链路与中心控制器相连,所有的小基站都采用相同的频段。对于每个用户,在同一时刻有多个小基站采用联合传输的方式为它服务,这些小基站组成了该用户的 JT-CoMP 服务基站簇。此处考虑重叠的分簇,即同一小基站可以同时为多个用户服务。该文的目的是为每个用户找到合适的 JT-CoMP 服务基站簇。

中心控制器为每个用户选择 JT-CoMP 服务基站簇,若网络中的小基站较多,则中心控制器的计算量较大<sup>[13]</sup>。为避免该问题,在本文方案中,中心控制器将小基站分簇并选出每个簇的簇头,将每个簇

内的小基站以及簇外但与该簇存在较大干扰的小基站当作该簇内用户的备选服务基站,由簇头负责为本簇内的用户选择 JT-CoMP 服务基站簇,这样能减少中心控制器的计算量。

中心控制器首先采用文献[14]或文献[15]的方法建立干扰图,如图 1 所示。其中,圆圈代表小基站,圆圈内的数字代表小基站的序号,小基站之间的边代表距离或干扰,若 2 个小基站之间的距离较远或干扰较小,则在干扰图中 2 个小基站对应的节点之间没有边。然后,采用 K-means 方法或其他分簇方法对小基站进行不重叠的分簇并选出簇头,即每个小基站只能位于其中的一个簇中,如图 1 所示,在图 1 中有 3 个簇。假定将  $J$  个小基站分为  $K$  个簇,用  $Q_k$  表示第  $k$  个簇, $k=1,2,\dots,K$ 。 $Q_k$  内的小基站是  $Q_k$  内用户的备选服务基站。

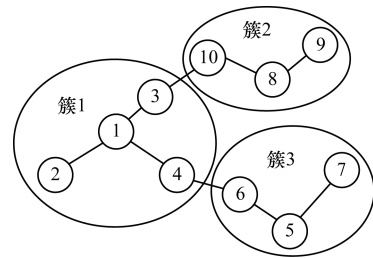


图 1 干扰及分簇示意图

在干扰图中,若  $Q_k$  之外的小基站与  $Q_k$  之内的小基站之间存在边,则  $Q_k$  之外的这些小基站可能会对  $Q_k$  边界的用户产生较大的干扰,如图 1 所示,小基站 6 和小基站 10 对  $Q_1$  内部分边界用户造成较大干扰,为此,需要将这些小基站加入到  $Q_k$  内用户的备选服务基站。用  $Q$  表示该网络中所有的小基站组成的集合,用  $e_Q Q_k$  表示  $Q_k$  在  $Q$  中的相对补集,在  $e_Q Q_k$  中找出与  $Q_k$  中的小基站相连的小基站,将这些小基站放在集合  $P_k$  中, $k=1,2,\dots,K$ 。 $Q_k$  内用户的备选服务基站包括  $Q_k$  内的小基站和  $P_k$  内的小基站。

假定  $Q_k$  内有  $J_k$  个小基站和  $I_k$  个用户, $k=1,2,\dots,K$ , $\sum_{k=1}^K J_k = J$ ,  $\sum_{k=1}^K I_k = I$ ,  $P_k$  内包含  $T_k$  个小基站,则  $Q_k$  和  $P_k$  内的  $J_k + T_k$  个小基站是  $Q_k$  内  $I_k$  个用户的备选服务基站, $k=1,2,\dots,K$ 。由于每个用户的备选服务基站是 UDN 中的部分基站并且是预先确定的,因此本文所提的分簇方法是半动态的。

文献[13]没有将小基站分簇,中心控制器以最大化单个小基站的吞吐量为目标为每个用户选择服务基站,忽略了其他小基站带来的干扰。在本文方案中,由簇头为本簇内用户选择服务基站,降低了簇头的计算复杂度。此外, $Q_k$  和  $P_k$  内的小基站与  $Q_k$  内用户的信道质量相对较高,而  $Q_k$  和  $P_k$  外的小基站与  $Q_k$  内用户的信道质量相对较差,第 3 节和第 4 节的分簇中考虑到了  $Q_k$  和  $P_k$  内的小

基站对  $Q_k$  内用户的干扰,比文献[13]更加贴近实际的场景。

## 2 预编码矩阵

用  $S^k$  表示  $Q_k$  和  $P_k$  内的小基站与  $Q_k$  内用户之间的传输状态矩阵,  $S^k$  的阶数为  $I_k \times (J_k + T_k)$ ,  $k=1,2,\dots,K$ 。用  $s_{i,j}^k$  表示  $S^k$  的第  $i$  行第  $j$  列的元素,  $s_{i,j}^k$  的取值为 0 或 1,  $i=1,2,\dots,I_k$ ,  $j=1,2,\dots,J_k + T_k$ 。若  $s_{i,j}^k=1$ , 则  $Q_k$  和  $P_k$  内的第  $j$  个小基站为  $Q_k$  内的第  $i$  个用户服务, 否则  $Q_k$  和  $P_k$  内的第  $j$  个小基站不为  $Q_k$  内的第  $i$  个用户服务。

考虑下行传输,用  $y_i^k$  表示  $Q_k$  内第  $i$  个用户的接收信号,  $y_i^k$  可以表示为:

$$y_i^k = \sum_{j=1}^{J_k+T_k} \mathbf{h}_{i,j}^k \mathbf{w}_{m,j}^k s_{i,j}^k x_i^k + \sum_{j=1}^{J_k+T_k} \sum_{\substack{m=1 \\ m \neq i}}^{I_k} \mathbf{h}_{i,j}^k \mathbf{w}_{m,j}^k s_{m,j}^k x_m^k + \sum_{\substack{n=1 \\ n \neq 2}}^K \sum_{j=1}^{J_n+T_n} \sum_{m=1}^{I_n} \mathbf{h}_{i,j}^k \mathbf{w}_{m,j}^n s_{m,j}^n x_m^n + n_i^k \quad (1)$$

其中,  $i=1,2,\dots,I_k$ ,  $j=1,2,\dots,J_k + T_k$ ,  $k=1,2,\dots,K$ ,  $x_i^k$  是  $Q_k$  内第  $i$  个用户的期望接收调制符号,  $\mathbf{h}_{i,j}^k$  表示  $Q_k$  和  $P_k$  内第  $j$  个小基站到  $Q_k$  内第  $i$  个用户的信道矩阵, 阶数为  $1 \times N_T$ ,  $\mathbf{w}_{m,j}^k$  是  $Q_k$  和  $P_k$  内第  $j$  个小基站对发送给  $Q_k$  内第  $i$  个用户的信号的预编码向量, 阶数为  $N_T \times 1$ , 是  $Q_k$  内第  $i$  个用户的期望接收调制符号,  $n_i^k$  是  $Q_k$  内第  $i$  个用户接收到的噪声,  $n_i^k$  服从均值为零方差为  $\sigma^2$  的高斯分布。

在式(1)中,等式右边的第1项是期望接收信号,第2项是  $Q_k$  和  $P_k$  内的小基站发送的信号对  $Q_k$  内第  $i$  个用户造成的干扰,第3项是簇间干扰。  $Q_k$  和  $P_k$  外的小基站与  $Q_k$  内用户的距离较远,对  $Q_k$  内用户的干扰相对较小,即式(1)等式右边的第3项较小,无法消除这项干扰。  $Q_k$  和  $P_k$  内的小基站与  $Q_k$  内用户的距离较近,对  $Q_k$  内用户的干扰较大,即式(1)等式右边的第2项较大,本文给出一种消除这项干扰的方法。令:

$$\mathbf{H} = \begin{bmatrix} \mathbf{h}_{1,1}^k s_{1,1}^k & \mathbf{h}_{1,2}^k s_{1,2}^k & \cdots & \mathbf{h}_{1,J_k+T_k}^k s_{1,J_k+T_k}^k \\ \mathbf{h}_{2,1}^k s_{2,1}^k & \mathbf{h}_{2,2}^k s_{2,2}^k & \cdots & \mathbf{h}_{2,J_k+T_k}^k s_{2,J_k+T_k}^k \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ \mathbf{h}_{I_k,1}^k s_{I_k,1}^k & \mathbf{h}_{I_k,2}^k s_{I_k,2}^k & \cdots & \mathbf{h}_{I_k,J_k+T_k}^k s_{I_k,J_k+T_k}^k \end{bmatrix} \quad (2)$$

$$\mathbf{W} = \begin{bmatrix} \mathbf{w}_{1,1}^k & \mathbf{w}_{2,1}^k & \cdots & \mathbf{w}_{I_k,1}^k \\ \mathbf{w}_{1,2}^k & \mathbf{w}_{2,2}^k & \cdots & \mathbf{w}_{I_k,2}^k \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ \mathbf{w}_{1,J_k+T_k}^k & \mathbf{w}_{2,J_k+T_k}^k & \cdots & \mathbf{w}_{I_k,J_k+T_k}^k \end{bmatrix} \quad (3)$$

其中,  $\mathbf{H}$  的阶数为  $I_k \times N_T (J_k + T_k)$ ,  $\mathbf{W}$  的阶数为  $N_T (J_k + T_k) \times I_k$ , 则式(1)可表示为:

$$y_i^k = \mathbf{H}(i, :) \mathbf{W} \begin{bmatrix} x_1^k & x_2^k & \cdots & x_{I_k}^k \end{bmatrix}^T + \sum_{\substack{n=1 \\ n \neq 2}}^K \sum_{j=1}^{J_n+T_n} \sum_{m=1}^{I_n} \mathbf{h}_{i,j}^k \mathbf{w}_{m,j}^n s_{m,j}^n x_m^n + n_i^k \quad (4)$$

其中,  $\mathbf{H}(i, :) = [\mathbf{h}_{i,1}^k s_{i,1}^k \quad \mathbf{h}_{i,2}^k s_{i,2}^k \quad \cdots \quad \mathbf{h}_{i,J_k+T_k}^k s_{i,J_k+T_k}^k]$ 。结合式(2)和式(4),将  $Q_k$  内所有用户的接收信号表示成向量形式:

$$\mathbf{y} = \begin{bmatrix} y_1^k \\ y_2^k \\ \vdots \\ y_{I_k}^k \end{bmatrix} = \mathbf{H} \mathbf{W} \begin{bmatrix} x_1^k \\ x_2^k \\ \vdots \\ x_{I_k}^k \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \sum_{n=2}^K \sum_{j=1}^{J_n+T_n} \sum_{m=1}^{I_n} \mathbf{h}_{1,j}^k \mathbf{w}_{m,j}^n s_{m,j}^n x_m^n + n_1^k \\ \sum_{\substack{n=1 \\ n \neq 2}}^K \sum_{j=1}^{J_n+T_n} \sum_{m=1}^{I_n} \mathbf{h}_{2,j}^k \mathbf{w}_{m,j}^n s_{m,j}^n x_m^n + n_2^k \\ \vdots \\ \sum_{n=1}^{K-1} \sum_{j=1}^{J_n+T_n} \sum_{m=1}^{I_n} \mathbf{h}_{I_k,j}^k \mathbf{w}_{m,j}^n s_{m,j}^n x_m^n + n_{I_k}^k \end{bmatrix} \quad (5)$$

其中,  $\mathbf{y}$  是  $Q_k$  内所有用户的接收信号组成的向量, 其阶数为  $I_k \times 1$ ,  $[x_1^k \quad x_2^k \quad \cdots \quad x_{I_k}^k]^T$  是  $y$  内所有用户的期望接收信号组成的向量。为了消除  $Q_k$  和  $P_k$  内的小基站发送的信号对  $Q_k$  内第  $i$  个用户造成的干扰,即为了消除  $x_i^k$  之间的干扰,令  $i=1,2,\dots,I_k$ , 此处采用迫零预编码,限定  $I_k \leq (J_k + T_k) N_T$ ,  $\mathbf{W}$  的表达式为:

$$\mathbf{W} = \mathbf{H}^H (\mathbf{H} \mathbf{H}^H)^{-1} \quad (6)$$

其中,  $(\cdot)^H$  表示矩阵的共轭转置,  $(\cdot)^{-1}$  表示矩阵的逆。

将式(6)带入式(5)可得:

$$\begin{bmatrix} y_1^k \\ y_2^k \\ \vdots \\ y_{I_k}^k \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} x_1^k \\ x_2^k \\ \vdots \\ x_{I_k}^k \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \sum_{n=2}^K \sum_{j=1}^{J_n+T_n} \sum_{m=1}^{I_n} \mathbf{h}_{1,j}^k \mathbf{w}_{m,j}^n s_{m,j}^n x_m^n + n_1^k \\ \sum_{\substack{n=1 \\ n \neq 2}}^K \sum_{j=1}^{J_n+T_n} \sum_{m=1}^{I_n} \mathbf{h}_{2,j}^k \mathbf{w}_{m,j}^n s_{m,j}^n x_m^n + n_2^k \\ \vdots \\ \sum_{n=1}^{K-1} \sum_{j=1}^{J_n+T_n} \sum_{m=1}^{I_n} \mathbf{h}_{I_k,j}^k \mathbf{w}_{m,j}^n s_{m,j}^n x_m^n + n_{I_k}^k \end{bmatrix} \quad (7)$$

由式(7)可进一步得出:

$$y_i^k = x_i^k + \sum_{\substack{n=1 \\ n \neq 2}}^K \sum_{j=1}^{J_n+T_n} \sum_{m=1}^{I_n} \mathbf{h}_{i,j}^k \mathbf{w}_{m,j}^n s_{m,j}^n x_m^n + n_i^k \quad (8)$$

由式(8)可看出,  $y_i^k$  包含希望接收的信号、簇间干扰和噪声,迫零预编码使得该簇内用户的期望接收信号正交传输,消除了簇内所有用户期望接收信号之间的干扰。

本节给出了预编码矩阵的设计方法,  $\mathbf{w}_{i,j}^k$  由式(3)和式(6)得到。该预编码能消除  $Q_k$  和  $P_k$  内的小基站发送的信号对  $Q_k$  内第  $i$  个用户造成的干扰,即消除了式(1)等式右边的第2项。

### 3 半动态分簇方法

传输状态矩阵  $S^k$  决定了  $Q_k$  和  $P_k$  内的某个小基站是否是  $Q_k$  内用户  $i$  的 CoMP 服务基站,  $k=1,2,\dots,K, i=1,2,\dots,I_k$ , 找出用户  $i$  的 JT-CoMP 服务基站簇就等价于找到传输状态矩阵  $S^k$  的第  $i$  行中所有为 1 的元素, 因此, 以用户为中心的半动态分簇本质上是决定元素  $s_{i,j}^k$  的取值。为用户选择 JT-CoMP 服务基站簇的目标是最大化系统的总吞吐量, 即  $K$  个簇的吞吐量之和最大, 传输状态矩阵  $S^k$  需要满足:

$$\begin{aligned} \{S^k, k=1,2,\dots,K\} &= \operatorname{argmax} \sum_{k=1}^K \sum_{i=1}^{I_k} B \ln(1+r_i^k) \\ \text{s. t. C1: } &s_{i,j}^k = \{0,1\} \\ \text{C2: } &\|w_{m,j}^k s_{m,j}^k x_m^k\|_2^2 \leq p, \forall k, m, n \end{aligned} \quad (9)$$

其中,  $B$  表示系统带宽,  $\|\cdot\|_2$  表示 2-范数, C1 表示传输状态矩阵的元素的取值只能是 0 和 1, C2 表示每个小基站的发送功率不超过  $p$ ,  $r_i^k$  是  $Q_k$  内第  $i$  个用户接收到的信号的信干噪比 (Signal to Interference plus Noise Ratio, SINR), 其表达式为:

$$r_i^k = \frac{\| \sum_{j=1}^{J_k+T_k} h_{i,j}^k w_{i,j}^k s_{i,j}^k x_i^k \|_2^2}{\| \sum_{n=1}^K \sum_{j=1}^{J_n+T_n} \sum_{m=1}^{I_n} h_{i,j}^n w_{m,j}^n s_{m,j}^n x_m^n \|_2^2 + \sigma^2} \quad (10)$$

在本文方案中, 若每个簇的簇头按式 (9) 以最大化整个网络的吞吐量为目标为每个用户选择 JT-CoMP 服务基站簇, 则需要簇头之间相互共享用户与基站之间的传输状态矩阵和 CSI, 这会增加小基站之间链路的负担, 因此, 此处考虑每个簇的簇头以最大化簇内所有用户吞吐量之和为目标为该簇内每个用户选择 JT-CoMP 服务基站簇, 从而将分簇分散到  $K$  个簇头中, 这样能减少中心控制器的计算量, 并且每个簇内小基站的数量有限, 用户的备选服务基站数量并不多, 簇头有能力为本簇内用户选择 JT-CoMP 服务基站簇。

每个簇头为本簇内用户选择服务基站的目标是使得本簇内用户的吞吐量之和达到最大。计算吞吐量要运用到 SINR, 这需要已知全局 CSI。为减少小基站之间的交互, 此处忽略簇间干扰, 用簇内 SINR 代替式 (10) 所示的 SINR。由于采用了迫零预编码, 消除了簇内干扰, 簇内 SINR 等于簇内信噪比 (Signal to Noise Ratio, SNR), 用  $r_i^{k, \text{intra}}$  表示  $Q_k$  内第  $i$  个用户的簇内 SNR, 其表达式为:

$$r_i^{k, \text{intra}} = \frac{\| \sum_{j=1}^{J_k+T_k} h_{i,j}^k w_{i,j}^k s_{i,j}^k x_i^k \|_2^2}{\sigma^2} \quad (11)$$

传输状态矩阵需要满足:

$$\begin{aligned} \{S^k\} &= \operatorname{argmax} \sum_{i=1}^{I_k} B \ln(1+r_i^{k, \text{intra}}) \\ \text{s. t. C1: } &s_{i,j}^k = \{0,1\} \\ \text{C2: } &\|w_{m,j}^k s_{m,j}^k x_m^k\|_2^2 \leq p, \forall m, n \end{aligned} \quad (12)$$

由于无法用解析式给出式 (12) 的解, 因此只能通过遍历该簇内所有用户所有可能的 JT-CoMP 服务基站簇求解式 (12)。

$Q_k$  的簇头在为簇内用户选择服务基站时, 需要已知  $J_k + T_k$  个备选小基站到簇内所有用户的 CSI, 因此  $J_k + T_k - 1$  个小基站都要将自身到簇内所有用户的 CSI 发送给簇头, 簇头计算该簇内所有用户的 JT-CoMP 服务基站簇对应的簇内吞吐量, 从中选出最大的吞吐量对应的传输状态矩阵, 该过程需要迭代  $\prod_{i=1}^{I_k} \sum_{m=1}^{J_k+T_k} \binom{J_k+T_k}{m}$  次。

若  $Q_k$  和  $P_k$  内的某个小基站与  $Q_k$  内用户  $i$  的距离较远或衰落较大, 在该小基站不可能成为用户  $i$  的服务基站的情况下, 仍然向簇头发送该小基站到用户  $i$  的 CSI, 并且簇头仍然考虑将该小基站当做用户  $i$  的服务基站进行多次迭代, 这样就以较大的代价换取较小的增益, 因此没有必要将  $Q_k$  和  $P_k$  内所有小基站当做用户  $i$  的待选服务基站, 只需要选择与用户  $i$  之间信道质量较好的小基站作为待选服务基站即可, 这样不但能减少小基站之间数据的交互, 还能减少簇头的迭代次数。

基于以上分析, 为用户选择 JT-CoMP 服务基站簇的方法包含以下 5 个步骤:

**步骤 1**  $Q_k$  和  $P_k$  中的小基站发送参考信号到  $Q_k$  内第  $i$  个用户, 该用户测量  $Q_k$  和  $P_k$  中的小基站到它的瞬时接收信号功率,  $i=1,2,\dots,I_k$ 。

**步骤 2**  $Q_k$  内第  $i$  个用户将多个瞬时接收信号功率与预先设置的功率门限相比较, 选出大于功率门限的若干个接收信号对应的小基站, 并且按功率从大到小的顺序将它们对应的小基站依次放在集合  $U_{ki}$  中,  $U_{ki} = \{BS_{ki,1}, BS_{ki,2}, \dots, BS_{ki,n_{ki}}\}$ , 其中,  $U_{ki}$  中的元素代表小基站,  $n_{ki}$  是  $U_{ki}$  中元素的总数。

**步骤 3**  $Q_k$  内第  $i$  个用户将集合  $U_{ki}$  发送给小基站  $BS_{ki,1}$ , 小基站  $BS_{ki,1}$  将集合  $U_{ki}$  发送给该簇的簇头。

**步骤 4** 簇头为用户  $i$  选择集合  $U_{ki}$  中的第一个小基站  $BS_{ki,1}$  作为它的主服务基站。

**步骤 5** 簇头遍历本簇内所有用户所有可能的 JT-CoMP 服务基站簇, 在每次遍历过程中计算出簇内吞吐量, 选出最大吞吐量对应的传输状态矩阵  $S^k$ 。

在步骤 2 中,  $Q_k$  内用户  $i$  选出了  $n_{ki}$  个待选服务基站, 步骤 4 从待选服务基站中为用户选出了一个主服务

基站,因此用户  $i$  共有  $\sum_{m=1}^{n_{ki}-1} \binom{n_{ki}-1}{m}$  种可能的服务基站簇, $I_k$  个用户共有  $\prod_{i=1}^{I_k} \sum_{m=1}^{n_{ki}-1} \binom{n_{ki}-1}{m}$  种可能的服务基站簇,簇头在步骤 5 中需要迭代  $\prod_{i=1}^{I_k} \sum_{m=1}^{n_{ki}-1} \binom{n_{ki}-1}{m}$  次,迭代的次数仍然较多。

在本文方案中,每个用户的备选服务基站是 UDN 中的部分基站并且是预先确定的,簇头根据小基站与用户间的 CSI 为每个用户选择服务基站簇,因此,该分簇方法是半动态以用户为中心的。

#### 4 次优分簇方法

本节以  $Q_1$  为例给出一种低复杂度的次优的为用户选择 JT-CoMP 服务基站簇的方法。该方法首先采用第 3 节中步骤 1 ~ 步骤 3 相同的方法得到  $U_{i1} = \{BS_{i1,1}, BS_{i1,2}, \dots, BS_{i1,n_{ki}}\}$ , 并且选择小基站  $BS_{i1,1}$  作为  $Q_1$  内第  $i$  个用户的主服务基站,  $i = 1, 2, \dots, I_1$ , 簇头计算此时该簇内的所有用户的吞吐量之和并且赋值给  $R_1$ 。然后,簇头根据簇内的吞吐量,按照  $i$  的取值以从小到大的顺序决定是否将  $BS_{i1,2}$  引入到  $Q_1$  内第  $i$  个用户的服务基站簇。其次,簇头采用相同的方法决定是否是将  $U_{i1}$  中的其他小基站引入到用户的服务基站簇。

结合以上分析,本文所提次优算法描述如下:

初始化:每个簇的簇头为簇内每个用户构建待选服务基站簇  $U_{ki}$ , 每个用户选择集合  $U_{ki}$  中的第一个元素作为主服务基站,计算此时第  $k$  个簇的吞吐量记为  $R_k$ 。

初始化之后,采用如下迭代的方法为每个用户选择服务基站簇:

```

for m = 2 to max{|Uk1|, |Uk2|, ..., |Uki|} do
  for i = 1 to Ik do
    if |Uki| < m
      没有可选的服务基站,用户 i 的服务基站簇不变
    else
      将小基站 BSki,m 加入到用户 i 的服务基站簇,计算此时簇内吞吐量 R
      if R > Rk
        Rk = R;
      else
        在用户 i 的服务基站簇中删除小基站 BSki,m
      end if
    end if
  end for
end for
end for

```

在本文的次优方法中,第  $k$  个簇共需要迭代  $\sum_{i=1}^{I_k} (n_{ki}-1)$  次, $K$  个簇需要迭代  $\sum_{k=1}^K \sum_{i=1}^{I_k} (n_{ki}-1)$  次。文献[13]提出的次优方法中,中心控制器共需要迭代  $\sum_{j=1}^J \sum_{k=0}^{\lfloor \frac{N_T}{N_R} - 1 \rfloor} \binom{K_{\text{sub}}^j}{k}$  次, $K_{\text{sub}}^j$  是第  $j$  个小基站待选服务用户的数量, $\lfloor \cdot \rfloor$  表示向下取整。本文所提方案的迭代次数远小于最优方案的迭代次数,也小于文献[13]方案的迭代次数。

#### 5 性能比较及仿真结果分析

下文通过仿真来评估本文所提算法的性能,并与文献[13]次优算法进行对比,小基站和用户随机均匀地分布在  $500 \text{ m} \times 500 \text{ m}$  的范围内,共 20 个小基站,小基站覆盖半径为 25 m,假定信道相互独立,信道小尺度衰落服从标准正态分布,路径损耗为  $30.6 + 36.71\text{lg}(d)$ ,  $d$  表示小基站与用户之间的距离,单位为 m。根据用户的位置和 CSI 动态为用户构建 JT-CoMP 服务基站簇,采用轮询调度算法,小小区的频率复用因子为 1,仿真参数如表 1 所示。

表 1 仿真参数

参数名称	参数设置
载波频率/GHz	2
小基站天线数量	8
用户天线数量	1
小基站数量	20
小基站功率/dBm	23
小基站覆盖半径/m	25
路径损耗	$30.6 + 36.71\text{lg}(d)$
噪声功率谱密度/(dBm · Hz <sup>-1</sup> )	-174
系统带宽/MHz	20

图 2 比较了 3 种方案的系统吞吐量,其中最优方案为第 3 节提出方案。从图 2 可以看出,本文最优方案和次优方案的吞吐量均高于文献[13]的次优方案。当用户数为 40 时,最优方案和次优方案的系统吞吐量分别提高了 0.52 Gb/s 和 0.39 Gb/s。这是因为文献[13]的次优方案在计算吞吐量时忽略了小基站间的干扰,虽然本文方案使用了簇内 SNR,然而该方案采用了迫零预编码,消除了簇内小基站间的干扰,簇内 SNR 等于簇内 SINR,计算结果与实际情况更加吻合。从图 2 还可以看出,当用户数增加到 50 以上时,系统吞吐量将不再增加,这是因为用户数量的持续增加会导致严重的同信道干扰,影响系统的吞吐量。

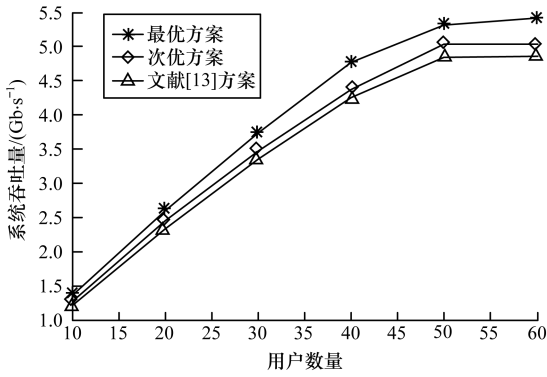


图 2 3 种方案的系统吞吐量结果比较

图 3 比较了 3 种方案的频谱效率的累积分布函数(Cumulative Distribution Function, CDF)。从图 3 可以看出,40 个用户时的频谱效率的 CDF 曲线低于 20 个用户时的频谱效率的 CDF 曲线,因为用户的增多会增大簇间干扰,降低用户接收信号的 SINR。从图 3 还可以看出,在用户数量相同的前提下,本文最优方案的频谱效率高于次优方案,次优方案的频谱效率略高于文献[13]方案,这是因为本文方案考虑到簇内用户间的干扰,而文献[13]忽略了簇内的干扰。

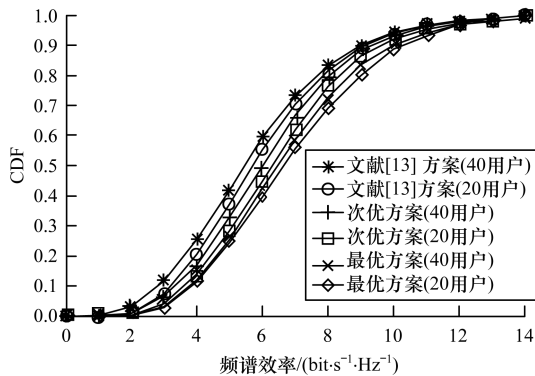


图 3 不同方案频谱效率的 CDF

图 4 比较了当用户数量为 20 个时,在不同信噪比情况下 3 种方案的用户平均频谱效率。

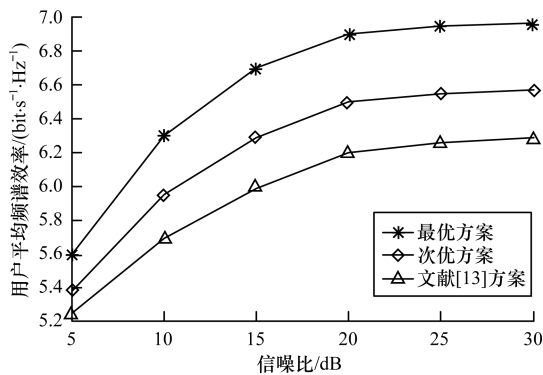


图 4 用户平均频谱效率与信噪比

当信噪比较低时,3 种方案的用户平均频谱效率比较接近,随着信噪比增大,最优方案明显优于次优方案,次优方案明显优于文献[13]方案,例如,当信噪比为 25 dB 时,最优方案和次优方案的用户平均频谱效率的值分别为 6.95 (bit · s<sup>-1</sup> · Hz<sup>-1</sup>) 和 6.55 (bit · s<sup>-1</sup> · Hz<sup>-1</sup>),而文献[13]次优方案的用户平均频谱效率的值为 6.26 (bit · s<sup>-1</sup> · Hz<sup>-1</sup>)。

### 6 结束语

本文提出一种以用户为中心的半动态分簇方法。对小基站进行分簇,然后簇头采用迭代的方法为每个用户选择服务基站簇。为降低计算复杂度,给出一种次优的为用户选择服务基站簇的分簇方法。实验结果表明,与相同场景中的已有方案相比,该方法次优方案的复杂度较低,且提升了系统容量。由于本文方案只适用于下行链路,在上行链路中为用户选择 CoMP 服务基站簇的方法将是下一步研究的主要内容。

### 参考文献

- [ 1 ] JUNG NICKEL V, MANOLAKIS K, ZIRWAS W, et al. The role of small cells, coordinated multi-point, and massive MIMO in 5G [ J ]. IEEE Communications Magazine, 2014, 52( 5 ): 44-51.
- [ 2 ] OSSEIRIA A, BOCCARDI F, BRAUN V, et al. Scenarios for 5G mobile and wireless communications: the vision of the METIS project [ J ]. IEEE Communications Magazine, 2014, 52( 5 ): 26-35.
- [ 3 ] WANG Zejun, LI Hongjia, HU Dan, et al. Optimal joint transmission and harvested energy scheduling for renewable energy harvesting enabled cellular network under coordinated multi-point transmission [ J ]. EURASIP Journal on Wireless Communications and Networking, 2015( 1 ): 97-109.
- [ 4 ] KIS S Y, CHO C H. Call blocking probability and effective throughput for call admission control of CoMP joint transmission [ J ]. IEEE Transactions on Vehicular Technology, 2017( 99 ): 1-7.
- [ 5 ] BASSOY S, FAROOQ H, IMRAN M A, et al. Coordinated multi-point clustering schemes: a survey [ J ]. IEEE Communications Surveys and Tutorials, 2017( 99 ): 748-749.
- [ 6 ] 张喆. 面向多小区协作接收的动态分簇算法研究 [ D ]. 郑州: 郑州大学, 2017.
- [ 7 ] ZHANG Haijun, LIU Hui, JIANG Chunxiao, et al. A practical semi dynamic clustering scheme using affinity propagation in cooperative picocells [ J ]. IEEE Transactions on Vehicular Technology, 2015, 64( 9 ): 4372-4377.
- [ 8 ] BASSOY S, JABER M, IMRAN M A, et al. Load aware self-organising user-centric dynamic CoMP clustering for 5G networks [ J ]. IEEE Access, 2016( 4 ): 2895-2906.

(下转第 145 页)

## 参考文献

- [1] MUCHA P J, RICHARDSON T, MACON K, et al. Community structure in time-dependent, multiscale, and multiplex networks [J]. *Science*, 2009, 328 (5980): 876-878.
- [2] LIU Guangming, WANG Huixin, CHU Hongwei, et al. Functional diversity of topological modules in human protein-protein interaction networks [J]. *Scientific Reports*, 2017, 7(1): 1-8.
- [3] 曹佳, 辛娟娟, 王耘. 药对网络中社团的网络特征数值分析[J]. *中国中药杂志*, 2015, 40(11): 2199-2205.
- [4] GIRVAN M, NEWMAN M E. Community structure in social and biological networks [J]. *Proceedings of National Academy of Sciences of the United States of America*, 2002, 99(12): 7821-7826.
- [5] BLONDEL V D, GUILLAUME J L, LAMBIOTTE R, et al. Fast unfolding of community hierarchies in large networks[EB/OL]. [2018-02-15]. <https://arxiv.org/abs/0803.0476v1>.
- [6] PONS P, LATAPY M. Computing communities in large networks using random walks [C]//*Proceedings of International Symposium on Computer and Information Sciences*. Berlin, Germany: Springer, 2005: 284-293.
- [7] NEWMAN M E J. Finding community structure in networks using the eigenvectors of matrices[EB/OL]. [2018-02-15]. <https://arxiv.org/abs/physics/0605087>.
- [8] CAI Deng, SHAO Zheng, HE Xiaofei, et al. Community mining from multirelational networks[C]//*Proceedings of European Conference on Principles of Data Mining and Knowledge Discovery*. Washington D. C., USA: IEEE Computer Society, 2005: 445-452.
- [9] BODEN B, ESTER M, SEIDL T. Density-based subspace clustering in heterogeneous networks [C]//*Proceedings of Joint European Conference on Machine Learning and Knowledge Discovery in Databases*. Berlin, Germany: Springer, 2014: 149-164.
- [10] ZHANG Fengli, LI Jun, LI Feng, et al. Community detection based on links and node features in social networks[C]//*Proceedings of International Conference on Multimedia Modeling*. Berlin, Germany: Springer, 2015: 418-429.
- [11] ZHOU Yang, CHENG Hong. Clustering large attributed graphs: an efficient incremental approach [C]//*Proceedings of IEEE International Conference on Data Mining*. Washington D. C., USA: IEEE Computer Society, 2010: 689-698.
- [12] WANG Xin, SONG Jianglong, LU Kai, et al. Community detection in attributed networks based on heterogeneous vertex interactions [J]. *Applied Intelligence*, 2017, 47(4): 1-12.
- [13] ARANGANAYAGI S, THANGAVEL K. Clustering categorical data using silhouette coefficient as a relocating measure[C]//*Proceedings of International Conference on Computational Intelligence and Multimedia Applications*. Washington D. C., USA: IEEE Computer Society, 2007: 13-17.
- [14] ZACHARY W W. An information flow model for conflict and fission in small groups [J]. *Journal of Anthropological Research*, 1977, 33(4): 452-473.
- [15] LUSSEAU D, SCHNEIDER K, BOISSEAU O J, et al. The bottlenose dolphin community of doubtful sound features a large proportion of long-lasting associations [J]. *Behavioral Ecology and Sociobiology*, 2003, 54(4): 396-405.
- [16] KREBS V. A network of books about recent us politics sold by the online bookseller amazon. com [EB/OL]. [2018-02-15]. <http://www.orgnet.com>.
- [17] LANCICHINETTI A, FORTUNATO S, RADICCHI F. Benchmark graphs for testing community detection algorithms [J]. *Physical Review E: Statistical Nonlinear and Soft Matter Physics*, 2008, 78(2): 5-10.
- [18] SHEN Huawei, CHENG Xueqi, CAI Kai, et al. Detect overlapping and hierarchical community structure in networks [J]. *Physica A: Statistical Mechanics and Its Applications*, 2009, 388(8): 1706-1712.
- [19] RONHOVDE P, NUSSINOV Z. Local resolution-limit-free Potts model for community detection [J]. *Physical Review E: Statistical Nonlinear and Soft Matter Physics*, 2010, 81(2): 4-11.

编辑 陆燕菲

(上接第139页)

- [9] LIN Kaite, SHEN Weiliang, CHEN Ming, et al. User-centric network MIMO with dynamic clustering [J]. *IEEE/ACM Transactions on Networking*, 2017(99): 1-14.
- [10] KARAVOLOS M, TARSIS V I, SKOUTAS D N, et al. A dynamic hybrid clustering scheme for LTE-A networks employing CoMP-DPS [C]//*Proceedings of International Workshop on Computer Aided Modeling and Design of Communication Links and Networks*. Barcelona, Spain: [s. n.], 2017: 1-5.
- [11] JIAO Ruxuan, WEN Xiangming, LU Zhaoming, et al. Dynamic user-centric clustering algorithm based on energy efficiency in Cloud-RAN [C]//*Proceedings of International Conference on Telecommunications*. Limassol, Cyprus: [s. n.], 2017: 1-7.
- [12] LIU Dong, HAN Shengqian, YANG Chenyang, et al. Semi-dynamic user-specific clustering for downlink cloud radio access network [J]. *IEEE Transactions on Vehicular Technology*, 2016, 65(4): 2063-2077.
- [13] KANGH Su, KIM D K. User-centric overlapped clustering based on anchor-based precoding in cellular networks [J]. *IEEE Communications Letters*, 2016, 20(3): 542-545.
- [14] YANG Jing, DRAPER S C, NOWAK R. Learning the interference graph of a wireless network [J]. *IEEE Transactions on Signal and Information Processing over Networks*, 2012(99): 1-14.
- [15] ZHU Xiaopeng, ZENG Jie, SU Xin, et al. On the virtual cell transmission in ultra dense networks [J]. *Entropy*, 2016, 18(10): 374.

编辑 索书志