



## 基于匹配理论的NOMA异构网络资源分配算法

龙 恩<sup>1</sup>, 李 伟<sup>1</sup>, 鲁江丽<sup>1</sup>, 蒋明均<sup>1</sup>, 隆 泉<sup>2</sup>

(1. 重庆邮电大学 通信与信息工程学院, 重庆 400065; 2. 中国移动通信集团设计院有限公司浙江分公司, 杭州 310012)

**摘 要:** 在非正交多址接入异构网络中, 通过联合资源分配和用户调度可达到用户调度数与系统吞吐量之间的平衡。提出一种基于匹配理论的用户-子信道双边匹配算法(USTSMA)。在满足用户最小数据速率需求和已知完美信道状态信息的条件下, 将用户和子信道认为是追求自身最大收益的两个独立集合, 通过迭代的方式实现用户和子信道之间的稳定匹配。在此基础上, 利用注水算法解决用户的功率分配问题。仿真结果表明, USTSMA在系统总吞吐量、用户调度数等方面性能优于S-MGA和GA两种用户分组算法以及正交频分多址接入方案, 并且逼近最优上界。

**关键词:** 非正交多址接入; 异构网络; 用户调度; 功率分配; 匹配理论

开放科学(资源服务)标志码(OSID):



**中文引用格式:** 龙恩, 李伟, 鲁江丽, 等. 基于匹配理论的NOMA异构网络资源分配算法[J]. 计算机工程, 2021, 47(1): 165-171.

**英文引用格式:** LONG Ken, LI Wei, LU Jiangli, et al. Resource allocation algorithm for NOMA heterogeneous network based on matching theory[J]. Computer Engineering, 2021, 47(1): 165-171.

## Resource Allocation Algorithm for NOMA Heterogeneous Network Based on Matching Theory

LONG Ken<sup>1</sup>, LI Wei<sup>1</sup>, LU Jiangli<sup>1</sup>, JIANG Mingjun<sup>1</sup>, LONG Quan<sup>2</sup>

(1. School of Communication and Information Engineering, Chongqing University of Posts and Telecommunications, Chongqing 400065, China; 2. Zhejiang Branch of China Mobile Group Design Institute Co., Ltd., Hangzhou 310012, China)

**[Abstract]** In Non-Orthogonal Multiple Access (NOMA) heterogeneous network, the balance between the number of scheduled users and the system throughput can be achieved by joint resource allocation and user scheduling. Therefore, this paper proposes a User-Subchannel Two-Side Matching Algorithm (USTSMA) based on the matching theory. Under the condition of satisfying the user's minimum data rate requirement and knowing perfect Channel State Information (CSI), the user and subchannel are considered as two independent sets to pursue their own maximum profit, and the stable matching between users and subchannels is obtained by iteration. On this basis, the water injection algorithm is used for user power allocation. Simulation results show that USTSMA can approach the upper bound in terms of total system throughput and number of user scheduling, and is superior to Orthogonal Frequency Division Multiple Access, OFDMA (OFDMA) scheme and two user grouping algorithms, S-MGA and GA.

**[Key words]** Non-Orthogonal Multiple Access (NOMA); heterogeneous network; user scheduling; power allocation; matching theory

**DOI:** 10.19678/j.issn.1000-3428.0056719

### 0 概述

随着各种无线终端产品的大规模接入, 以正交频分多址接入 (Orthogonal Frequency Division Multiple Access, OFDMA) 为代表的4G无线通信技术将无法应对5G无线通信系统中面临的海量连接和高吞吐

量两个主要挑战<sup>[1-2]</sup>, 因为在OFDMA系统中, 子载波间是正交的且频谱资源没有得到充分利用。作为5G多址接入技术备选方案之一的非正交多址接入 (Non-Orthogonal Multiple Access, NOMA), 由于其在同一频率资源块上具有复用多个不同功率电平用户的能力, 因此可以使整个通信系统的频谱效率和吞吐

**基金项目:** 重庆市基础研究与前沿探索专项 (cstc2018jcyjAX0302)。

**作者简介:** 龙 恩 (1978—), 男, 讲师、硕士, 主研方向为通信协议、5G多址接入技术; 李 伟、鲁江丽、蒋明均, 硕士研究生; 隆 泉, 工程师。

**收稿日期:** 2019-11-26 **修回日期:** 2020-01-12 **E-mail:** 17784456912@163.com

量得到进一步提升<sup>[3-4]</sup>。

当网络中存在多个具有不同信道状态的无线终端时,如何对复用在特定时间和频率资源上的用户进行资源分配,从而使整个系统的总吞吐量达到最大化,仍然是一个开放性的问题。在整个资源分配过程中,用户和子信道的合理分组可以在提升系统吞吐量的同时有效协调用户间的公平性。文献[5]将用户-子信道匹配问题建模为非合作博弈过程,通过用户和子信道之间的双向选择,提出基于超模博弈的用户分组算法(Super-Modular Game Algorithm, S-MGA),使系统性能和用户间的公平性得到了有效提升。文献[6]根据不同的信道条件对用户进行配对,提出一种基于信道增益的用户分组算法,证明了NOMA系统在吞吐量方面比OMA系统能够得到更大的性能提升。文献[7]利用已知的信道状态信息对用户的信道增益进行排序,提出一种基于二进制交错原理的用户分组算法,在改善用户间公平性的同时提高了系统吞吐量。文献[8]根据同一子信道上叠加用户的限制条件和信道增益的差异,提出一种以最大化几何平均用户吞吐量的多用户分组算法,使系统吞吐量和几何平均用户吞吐量得到了有效提升。文献[9]根据用户等效信道增益的调度优先级,提出一种基于自适应比例公平(Adaptive Proportional Fair, APF)的用户分组算法。该算法不仅可以达到理想的匹配效果,而且能够提高用户之间的公平性。文献[10]研究NOMA异构网络下的资源分配问题,考虑到小区内和小区间的干扰,通过固定发射功率,提出一种基于拉格朗日对偶分析的分布式算法来解决用户分组问题。该算法性能优于传统的遗传算法(Genetic Algorithm, GA)。除上述文献外,关于用户分组的理论研究在文献[11-13]中也有所涉及。目前关于NOMA用户分组方面的研究主要集中在单小区,而关于NOMA异构网络用户分组的研究较少。此外,现有研究较少对每个子信道的叠加用户数、系统吞吐量、用户最小传输速率和算法复杂度进行综合考虑。

本文将子信道分配和功率分配建模为非凸优化问题,以使系统吞吐量达到最大,对两者进行解耦,并表明子信道分配是一个多元匹配过程,其中用户和子信道是两组需要匹配的元素。利用匹配理论<sup>[14]</sup>构建一个自适应且低复杂度的框架,解决具有组合性质的资源分配问题<sup>[15-16]</sup>。在此基础上,将子信道分配问题表述为具有外部性的多对多双边匹配问题,同时考虑小区内和小区间的同信道干扰以及匹配玩家之间偏好的相互依赖性,提出用户-子信道双边匹配算法(User-Subchannel Two-Sided Matching Algorithm, USTMSMA),通过少量迭代形成稳定匹配。

## 1 网络模型与优化问题描述

### 1.1 网络模型

本文考虑下行链路两层NOMA异构网络,如

图1所示。整个异构网络由一个宏基站(MBS)和若干个微基站(PBS)构成。其中,MBS和PBS分别位于宏小区和微小区的中心,对于异构网络中基站(BS)的索引可以用参数 $t$ 表示( $t \in \{1, 2, \dots, T\}$ )。 $t=1$ 时表示MBS,其余情况则表示PBS。假设BS与终端用户的天线数为1且每个用户在同一时间和频段内只接入到一个BS,每个BS将信号发送到由 $\tilde{N} = \{1, 2, \dots, N\}$ 表示的一组移动用户,每组内对于用户的索引用 $j$ 表示。整个系统将可用带宽划分为一组由 $\tilde{K} = \{1, 2, \dots, K\}$ 表示的子信道集合,对于异构网络中基站 $t$ 上第 $k$ 个子信道的索引,用 $SC_k^{(t)}$ 表示。

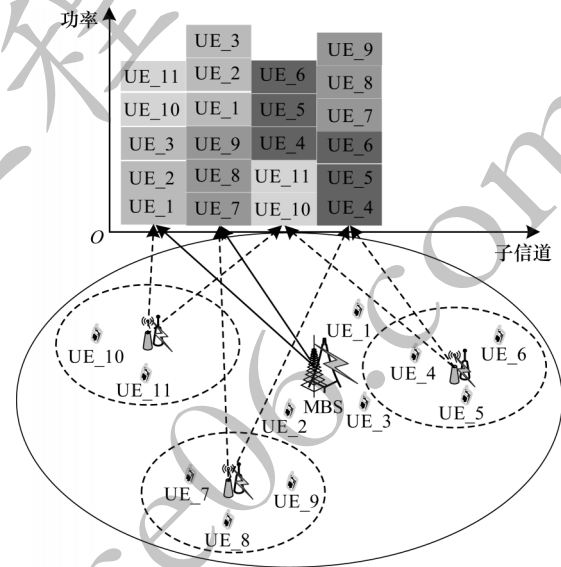


图1 异构网络模型

Fig.1 Model of HetNets

本文假设BS对于信道状态信息(Channel State Information, CSI)是已知的,基于每个子信道的CSI,BS将非正交子信道的子集分配给用户并为他们分配不同的功率。根据NOMA协议<sup>[17]</sup>,一个子信道可以分配给多个用户且一个用户可以通过多个子信道从BS接收。在基站 $t$ 的子信道 $k$ 上分配给用户 $N_j \in \tilde{N}$ 的功率由 $P_{k,j}^{(t)}$ 表示,满足 $\sum_{j \in \tilde{N}} P_{k,j}^{(t)} \leq P_k^{(t)}$ 和 $P_k^{(t)} = P^{(t)}/K$ ,其中, $P^{(t)}$ 是基站 $t$ 的总发射功率。本文考虑的是块衰落信道,信道在一个时隙内保持不变,但是每个子信道之间是独立变化的。用户 $N_j$ 在基站 $t$ 上子信道 $SC_k^{(t)}$ 的信道系数表示为 $h_{k,j}^{(t)} = g_{k,j}^{(t)}/D(d_j^{(t)})$ ,其中, $g_{k,j}^{(t)}$ 表示瑞利信道增益, $d_j^{(t)}$ 与 $D(\cdot)$ 分别表示用户 $N_j$ 与基站 $t$ 的距离和路径损耗函数, $\tilde{S}_k^{(t)}$ 表示子信道 $SC_k^{(t)}$ 上的用户集合, $x_{k,i}^{(t)}$ 表示基站 $t$ 在子信道 $SC_k^{(t)}$ 上向用户 $N_j$ 发送的信号。因此,用户 $N_j$ 通过 $SC_k^{(t)}$ 接收的信号为:

$$y_j^{(t)} = h_{k,j}^{(t)} \sqrt{P_{k,j}^{(t)}} x_{k,j}^{(t)} + I_1 + I_2 + n_j \quad (1)$$

其中, $I_1 = h_{k,j}^{(t)} \sum_{i \in \tilde{S}_k^{(t)} \setminus j} \sqrt{P_{k,i}^{(t)}} x_{k,i}^{(t)}$ ,表示基站 $t$ 在子信道 $SC_k^{(t)}$

上其他用户对用户  $N_j$  的干扰,  $I_2 = \sum_{i' \in \tilde{S}_k^{(i)}} h_{k,i'}^{(i')} \sqrt{P_{k,i'}^{(i')}} x_{k,i'}^{(i')}$ ,

表示同层基站  $t'$  在子信道  $SC_k^{(i)}$  上对用户  $N_j$  的干扰,  $n_j$  表示用户  $N_j$  的加性高斯白噪声 (Additive White Gaussian Noise, AWGN),  $n_j \sim CN(0, \sigma_{k,j}^2)$ 。

为解调目标信号, 每个用户  $N_j$  采用串行干扰消除 (Successive Interference Cancellation, SIC) 技术<sup>[18]</sup>。用户  $N_j$  的接收端可以消除来自子信道  $SC_k^{(i)}$  上其他用户  $N_i$  的干扰, 满足  $|h_{k,i}^{(i)}|^2 / \sigma_{k,i}^2 < |h_{k,j}^{(i)}|^2 / \sigma_{k,j}^2$ 。用户  $N_j$  将信道增益大于其自身信道增益的用户信号视为噪声, 然后从接收信号  $y_j^{(i)}$  中解码  $x_{k,j}^{(i)}$ 。因此, 用户  $N_j$  的速率可以表示为:

$$R_j = \sum_{k \in \tilde{K}} \text{lb} \left( 1 + \frac{P_{k,j}^{(i)} |h_{k,j}^{(i)}|^2}{\sigma_{k,j}^2 + I_1' + I_2'} \right) \quad (2)$$

其中,  $I_1'$  为用户  $N_j$  在子信道  $SC_k^{(i)}$  上经 SIC 后受到的其他用户的干扰,  $I_2'$  为同层基站  $t'$  在子信道  $SC_k^{(i)}$  上对用户  $N_j$  的干扰,  $I_1'$  和  $I_2'$  分别表示为:

$$I_1' = \sum_{i \in \left\{ \tilde{S}_k^{(i)} \mid |h_{k,i}^{(i)}|^2 / \sigma_{k,i}^2 > |h_{k,j}^{(i)}|^2 / \sigma_{k,j}^2 \right\}} P_{k,i}^{(i)} |h_{k,i}^{(i)}|^2 \quad (3)$$

$$I_2' = \sum_{i' \in \tilde{S}_k^{(i)}} P_{k,i'}^{(i')} |h_{k,i'}^{(i')}|^2 \quad (4)$$

因此, 子信道  $SC_k^{(i)}$  上的总速率可以表示为:

$$R_{SC_k^{(i)}} = \sum_{j \in \tilde{S}_k^{(i)}} \text{lb} \left( 1 + \frac{P_{k,j}^{(i)} |h_{k,j}^{(i)}|^2}{\sigma_{k,j}^2 + I_1' + I_2'} \right) \quad (5)$$

由于用户在接收端执行 SIC 技术的过程较为复杂, 并且随着同一子信道上用户数量的增加, SIC 实现的复杂度也会增加, 因此考虑到解码的复杂性, 本文假设最多有  $\mu$  个用户可以共享同一个子信道, 即  $|\tilde{S}_k^{(i)}| \leq \mu$ 。当给定适当的  $\mu$  值时, 可以将接收端的解码复杂度降低到适当的水平。此外, 由于频谱资源的稀缺, 本文还假设每个子信道至少分配  $l$  个用户以保证调度用户的数量。

## 1.2 问题描述

为更好地描述用户集与子信道集的匹配过程, 本文引入二进制元素  $\gamma_{k,j}$  表示子信道  $SC_k^{(i)}$  是否被分配给用户  $N_j$ 。整个系统的性能可以由所有用户的总和速率来评估, 因此优化目标是通过设置变量  $\{\gamma_{k,j}, P_{k,j}^{(i)}\}$  和改变调度用户的数量来最大化系统的总和速率, 则优化问题表述为:

$$\max_{\{\gamma_{k,j}, P_{k,j}^{(i)}\}} \sum_{t \in T} \sum_{k \in \tilde{K}} \sum_{j \in \tilde{N}} \text{lb} \left( 1 + \frac{P_{k,j}^{(i)} |h_{k,j}^{(i)}|^2}{\sigma_{k,j}^2 + I_1' + I_2'} \right) \quad (6)$$

$$\text{s.t. C1. } \gamma_{k,j} \in \{0, 1\}, \forall k \in \tilde{K}, \forall j \in \tilde{N}$$

$$\text{C2. } l \leq \sum_{j \in \tilde{N}} \gamma_{k,j} \leq \mu, \forall k \in \tilde{K}$$

$$\text{C3. } \sum_{j \in \tilde{N}} P_{k,j}^{(i)} \leq P_k^{(i)} = P^{(i)} / K, \forall k \in \tilde{K}$$

$$\text{C4. } P_{k,j}^{(i)} \geq 0, \forall k \in \tilde{K}, \forall j \in \tilde{N}$$

$$\text{C5. } R_j \geq R_{\min}$$

在上式中: 约束条件 C1 和 C2 确保每个子信道只能分配给最多  $\mu$  个用户和最少  $l$  个用户; 由于 BS 的发射功率有限, 功率变量必须满足约束条件 C3 和 C4; 约束条件 C5 则保证用户的最低数据速率。

由于 C1 中二进制变量的约束以及目标函数中存在于干扰项, 优化问题为非凸优化问题且在异构网络中通过传统的集中式方法来解决复杂度过高, 因此本文将该问题分解为子信道分配和功率分配问题。为便于将子信道分配给用户以建立彼此之间的匹配关系, 利用匹配理论将用户集和子信道集视为两个不相交且自私的理性玩家集合, 并期望用户与子信道之间彼此匹配以使其自身的利益 (相应的总和速率) 达到最大化。

## 2 优化问题求解

考虑到优化目标的计算复杂度, 本文首先将功率分配和子信道分配分离, 然后得到次优解。假设 BS 的发射功率被平均分配给共享相同子信道的用户, 则可以利用匹配理论将该优化问题表示为多对多双边匹配问题。在此基础上, 利用注水算法<sup>[19]</sup>将 BS 的发射功率分配给每个子信道上的调度用户。

### 2.1 基础知识

为更好地展示用户与子信道之间的匹配过程, 将用户集  $\tilde{N}$  和子信道集  $\tilde{K}$  看作 2 个不相交且自私的理性玩家集合, 目的是最大化他们自身的利益。如果子信道  $SC_k^{(i)}$  被分配给用户  $N_j$ , 则称用户  $N_j$  与子信道  $SC_k^{(i)}$  彼此匹配并形成一对匹配对。为描述每个玩家的竞争行为和决策过程, 本文假设每个玩家对另一个集合上的玩家有偏好, 并且每个玩家的偏好取决于可实现的数据速率, 则用户和子信道的偏好列表集合表示为:

$$L_{\tilde{N}}^{(i)} = \{L(N_1), L(N_2), \dots, L(N_J)\} \quad (7)$$

$$L_{\tilde{K}}^{(i)} = \{L(SC_1^{(i)}), L(SC_2^{(i)}), \dots, L(SC_K^{(i)})\} \quad (8)$$

其中,  $L(N_j)$  和  $L(SC_k^{(i)})$  分别是用户  $N_j$  和子信道  $SC_k^{(i)}$  的偏好列表。每个子信道至少被分配给  $l$  个用户且其对该组用户不同子集的偏好可以表示为:

$$\psi \succ_{SC_k^{(i)}} \psi', \psi \subseteq \tilde{N}, \psi' \subseteq \tilde{N} \Leftrightarrow R_{SC_k^{(i)}}(\psi) > R_{SC_k^{(i)}}(\psi') \quad (9)$$

式 (9) 表示相对于用户子集  $\psi'$ , 子信道  $SC_k^{(i)}$  更偏好于子集  $\psi$  中的用户, 因为子集  $\psi$  可以提供比子集  $\psi'$  更高的速率。此外, 每个用户可以占用一个或多个子信道, 这些子信道的优先关系可以表示为:



$$SC_k^{(i)} \succ_{N_j} SC_{k'}^{(i)} \Leftrightarrow |h_{k,j}^{(i)}|^2 / \sigma_{k,j}^2 > |h_{k',j}^{(i)}|^2 / \sigma_{k',j}^2 \quad (10)$$

式(10)表示相对于子信道  $SC_k^{(i)}$ , 用户  $N_j$  更偏好于子信道  $SC_{k'}^{(i)}$ , 因为子信道  $SC_k^{(i)}$  可以提供更高的信道增益。

匹配算法和稳定性取决于偏好列表的不同特征及其相应的属性。在本文场景中, 用户和子信道的偏好具有传递性和可替换性。传递性是指: 如果  $\psi \succ_{SC_k^{(i)}} \psi'$  和  $\psi' \succ_{SC_{k'}^{(i)}} \psi''$ , 则  $\psi \succ_{SC_{k'}^{(i)}} \psi''$ 。可替代性是指: 假设给定一个用户  $N_j, N_j \in \tilde{N} \cup \tilde{K}$ , 其偏好子信道集合  $\tilde{K}'$  属于用户  $N_j$  与成员  $k$  和  $k'$  的相反集合, 如果  $k \in \tilde{K}'$ , 那么  $k \in \tilde{K} \setminus \{k'\}$ 。因此, 用户和子信道集合的偏好具有可替代性。

根据上述偏好列表的概念, 可以将用户-子信道的优化问题表示为多对多双边匹配问题。

**定义 1** 用户集  $\tilde{N} = \{1, 2, \dots, N\}$  与子信道集  $\tilde{K} = \{1, 2, \dots, K\}$  为两个不相交的集合, 多对多双边匹配  $M$  表示从集合  $\tilde{N}$  到集合  $\tilde{K}$  的所有映射子集的集合且  $N_j \in \tilde{N}$  和  $SC_k^{(i)} \in \tilde{K}$ , 匹配  $M$  需要满足如下条件: 1)  $M(N_j) \subseteq \tilde{K}$ ; 2)  $M(SC_k^{(i)}) \subseteq \tilde{N}$ ; 3)  $l \leq |SC_k^{(i)}| \leq \mu$ ; 4)  $N_j \in M(SC_k^{(i)}) \Leftrightarrow SC_k^{(i)} \in M(N_j)$ 。其中, 条件 1 表示用户  $N_j$  与子信道集  $\tilde{K}$  的子集匹配, 条件 2 表示子信道  $SC_k^{(i)}$  与用户集  $\tilde{N}$  的子集匹配。此外, 考虑到接收端用户调度的数量和解码的复杂性, 本文将子信道  $SC_k^{(i)}$  的容量范围设置为  $l < SC_k^{(i)} < \mu$ 。

通过上述分析可以发现, 本文定义的匹配问题相对于传统的双边匹配问题更复杂, 这主要是因为用户集与子信道集的子集可以在彼此之间进行任意匹配且每个子集中包含的元素可能较多, 所以会导致匹配组合的数量较大。此外, 叠加在相同子信道上的用户彼此之间存在依赖关系以及同一子信道上用户之间的功率分配, 也会增加匹配问题的复杂度。为解决用户-子信道双边匹配和功率分配问题, 下文将提出相应的匹配算法和功率分配算法。

## 2.2 算法设计

### 2.2.1 用户-子信道双边匹配算法

本文通过改进传统双边匹配算法, 提出一种低复杂度匹配算法 USTSMA, 主要设计思想为: 如果用户想要与某个子信道进行匹配, 则其向该子信道提出接入请求且每个子信道有权接受或拒绝这些请求, 当所有用户都提出一次接入请求后, 即一轮接入请求执行完毕。

在描述 USTSMA 算法之前, 本文通过引入封闭对的概念以解释子信道如何选择不同用户的接入请求。

**定义 2** 已知匹配  $M$  和一组匹配对  $(N_j, SC_k^{(i)})$  且满足  $N_j \notin M(SC_k^{(i)})$ ,  $SC_k^{(i)} \notin M(N_j)$ 。如果  $(N_j, SC_k^{(i)})$  满足以下 2 个条件, 则  $(N_j, SC_k^{(i)})$  为封闭对: 1)  $\psi \succ_{SC_k^{(i)}} M(SC_k^{(i)}), \psi \subseteq$

$\{N_j\} \cup M(SC_k^{(i)}), N_j \in \psi$ ; 2)  $SC_k^{(i)} \succ_{N_j} M(SC_k^{(i)}), SC_k^{(i)} \in M(N_j)$ 。

通过定义 2 可以描述每个子信道在面对不同用户的接入请求时做决策的行为。由于子信道  $SC_k^{(i)}$  的决策过程是消除潜在封闭对的过程, 并且每个子信道  $SC_k^{(i)}$  选择用户的目的是最大化自身的传输速率, 因此当子信道  $SC_k^{(i)}$  每次与  $N_j$  形成封闭对时, 其将保持  $N_j$  的接入请求并拒绝其他用户。

本文针对式(6)优化问题提出的 USTSMA 算法主要包括两个阶段, 即初始化阶段和匹配阶段。在初始化过程中, 每个子信道和用户根据已知的信道状态信息设置偏好列表。在匹配过程中, 每个用户向自己偏好列表中没有拒绝过他的最优子信道发出接入请求, 并且该子信道可以提供比  $R_{\min}$  更高的数据速率。如果该子信道的当前容量小于  $l$ , 则子信道保留这些接入请求; 如果该子信道的当前容量大于  $l$ , 则子信道只选择少于  $(\mu+1)$  个用户提出的接入请求且拒绝其他用户的接入请求; 如果没有用户提出新的接入请求时, 则匹配终止。USTSMA 具体描述如下:

#### 算法 USTSMA

##### 初始化阶段:

- 1) 构建子信道的所有列表  $\{SC_{\text{match}}^{(i)}\}$  并记录用户与子信道的当前匹配情况。
- 2) 分别设置所有子信道集和用户集的偏好列表  $\{L(SC_k^{(i)})\}$  和  $\{L(N_j)\}$ 。

##### 匹配阶段:

- 1) 遍历每一个基站  $t$ 。
- 2) 对于每个用户  $N_j$ , 在其偏好列表  $\{L(N_j)\}$  中选择最合适的子信道发出接入请求, 该子信道满足  $SC_k^{(i)} = \underset{k \in L(N_j)}{\operatorname{argmax}} \left( |h_{k,j}^{(i)}|^2 / \sigma_{k,j}^2 \right)$  且  $R_j \geq R_{\min}$ 。
- 3) 如果  $|SC_{\text{match}}^{(i)}(k)| < l$ , 则  $SC_k^{(i)}$  将用户  $N_j$  加入其匹配列表  $SC_{\text{match}}^{(i)}(k)$  中。
- 4) 如果  $l \leq |SC_{\text{match}}^{(i)}(k)| < \mu$ :
  - (1) 当满足  $SC_{\text{match}}^{(i)}(k) \cup \{N_j\} \succ_{SC_k^{(i)}} SC_{\text{match}}^{(i)}(k)$  时,  $SC_k^{(i)}$  保留  $N_j$  的连接请求且  $N_j$  将  $SC_k^{(i)}$  从其偏好列表中移除。
  - (2)  $SC_k^{(i)}$  更新  $SC_{\text{match}}^{(i)}(k)$ 。
- 5) 如果  $|SC_{\text{match}}^{(i)}(k)| \geq \mu$ :
  - (1) 从  $SC_k^{(i)}$  中选出  $\mu$  个用户构成的集合  $S_\mu$ , 其满足  $S_\mu \succ_{SC_k^{(i)}} S', S' \subset SC_{\text{match}}^{(i)}(k) \cup \{N_j\}$ 。
  - (2)  $SC_k^{(i)}$  更新匹配列表  $SC_{\text{match}}^{(i)}(k) = S_\mu$  并拒绝其他用户的接入请求。
  - (3) 被拒绝的用户将子信道  $SC_k^{(i)}$  从其偏好列表中移除。
- 6) 如果没有用户对子信道提出新的接入请求, 则算法终止; 如果有新的接入请求, 则跳转第 2) 步。

### 2.2.2 注水功率分配算法

如果给定子信道分配,则可以利用注水功率分配算法实现用户间的功率分配。为降低由SIC技术引起的功率分配的复杂度,本文设置适当的 $I'_1$ 和 $I'_2$ 。注水解决方案公式表示如下:

$$P_{k,j}^{(i)} = \left[ \lambda_k - \frac{1}{|h_{k,j}^{(i)}|^2 / (\sigma_{k,j}^2 + I'_1 + I'_2)} \right]^+ \quad (11)$$

$$\lambda_k = \frac{1}{|\text{SC}_k^{(i)}|} \left( P_k^{(i)} + \sum_{i \in \text{SC}_k^{(i)}} \frac{1}{|h_{k,i}^{(i)}|^2 / (\sigma_{k,i}^2 + I'_1 + I'_2)} \right) \quad (12)$$

其中, $\lambda_k$ 为子信道 $\text{SC}_k^{(i)}$ 上用户 $N_j$ 的注水水位。

### 2.3 稳定性、收敛性与复杂度分析

本节主要对USTSMA的稳定性、收敛性和复杂度进行分析,并通过定义稳定性的概念证明该算法可以实现收敛的稳定匹配。

**定义3** 如果匹配 $M$ 中不存在不封闭的匹配对,则匹配 $M$ 定义为成对稳定匹配。

**引理1** 如果USTSMA收敛于一个匹配 $M$ ,则 $M$ 为成对稳定匹配。

**证明** 假设 $M$ 中存在一个匹配对 $(N_j, \text{SC}_k^{(i)})$ ,其满足 $\psi \succ_{\text{SC}_k^{(i)}} M(\text{SC}_k^{(i)})$ ,  $\psi \subseteq \{N_j\} \cup M(\text{SC}_k^{(i)})$ ,  $N_j \in \psi$ ,  $\text{SC}_k^{(i)} \succ_{N_j} \text{SC}_{k'}^{(i)}$ ,  $\text{SC}_{k'}^{(i)} \in M(N_j)$ 。由USTSMA可知, $N_j$ 向偏好列表中的最优子信道 $\text{SC}_k^{(i)}$ 提出请求并在第 $\tau$ 次迭代中被拒绝,表示 $\text{SC}_{\text{match},\tau}^{(i)}(k) \succ_{\text{SC}_k^{(i)}} \{N_j\} \cup \text{SC}_{\text{match},\tau}^{(i)}(k)$ 。若 $\text{SC}_{\text{match},\text{final}}^{(i)}(k) \succ_{\text{SC}_k^{(i)}} \text{SC}_{\text{match},\tau}^{(i)}(k)$ 给定,根据偏好列表的传递性, $N_j \notin \text{SC}_{\text{match},\text{final}}^{(i)}(k)$ ,则与假设矛盾。因为 $(N_j, \text{SC}_k^{(i)})$ 是任意的且匹配 $M$ 不会被任何匹配对所封闭,所以匹配 $M$ 为成对稳定匹配。

**定理1** USTSMA可以经过有限次数的迭代收敛实现成对稳定的匹配。

**证明** 因为在每轮匹配过程中,每个用户 $N_j \in \bar{N}$ 向其偏好列表中的最优子信道提出接入请求且该子信道在之前配对过程中并未拒绝,所以随着迭代次数的增加,每个用户 $N_j$ 的选择集将会变小。由于网络中有 $K$ 个子信道,因此每个用户 $N_j$ 向子信道提出的请求次数和迭代总数均不超过 $K$ 。综上,USTSMA收敛到最终匹配 $M$ ,该匹配也为成对稳定的匹配。

**定理2** 最优穷举搜索复杂度为 $O(TK2^N)$ ,USTSMA复杂度为 $O(TNK^2)$ 。

**证明** 为进行最优穷举搜索,BS在每个子信道上搜索所有可能的候选用户集,选择最偏好的用户集并在每个子信道执行功率分配。由于候选用户集的数量为 $2^N - 1$ 并且整个异构网络中有 $T$ 个BS和 $K$ 个子信道,因此最优穷举搜索的复杂度为 $O(TK2^N)$ 。

对于USTSMA,其复杂度主要取决于排序过程和匹配过程。在排序过程中,每个用户都获得其 $K$ 个子信道的偏好列表,则复杂度为 $O(NK)$ ,而在匹配过程中,每个用户将提议最多 $K$ 次,因此,最终算法复杂度为 $O(TNK^2)$ 。

### 3 仿真分析

本节通过仿真评估USTSMA的性能并将其与文献[5,10]方案、OFDMA方案和最优上界进行对比。在文献[5,10]方案中,主要选取S-MGA和GA两种用户分组算法且每个子信道的叠加用户数设为2。在OFDMA方案中,为满足正交频分复用准则并使系统吞吐量达到最大,本文将每个子信道只分配给一个用户且用户分得该子信道的总功率。对于最优上界,本文将 $\mu$ 设为 $N$ 以保证子信道可以被所有用户共享。在此基础上,利用最优穷举搜索算法将所有用户的子集与子信道进行匹配,并结合注水功率分配算法对其进行功率分配,以达到系统总吞吐量的最大化。具体的仿真参数设置如表1所示。

表1 系统仿真参数

参数	取值
宏基站半径 $R/\text{m}$	500
微基站半径 $r/\text{m}$	150
宏基站发射功率/ $\text{dBm}$	46
微基站发射功率/ $\text{dBm}$	30
宏基站路径损失/ $\text{km}$	$128.1 + 37.61 \lg d$
微基站路径损失/ $\text{km}$	$140.7 + 36.71 \lg d$
方差 $\sigma_{k,j}^2/\text{dBm}$	-90
复用用户最小值 $l$	2

图2展示了子信道数一定时( $K=10$ )系统总和数据速率与总用户数之间的变化关系。整个异构网络包括1个MBS和1个PBS。通过仿真分析可以发现,随着用户数 $N$ 的增加,系统总和数据速率也随之增加且变化趋势先快后慢,然后逐渐趋于平稳,这是因为当系统的子信道数一定时( $K=10$ ),BS倾向于将子信道分配给信道增益更高的用户。为具体分析每个子信道上最大叠加用户数 $\mu$ 与系统总和数据速率的变化关系,本文分别选取 $\mu$ 的值为2、3、4。从图2中可以看出,当 $\mu=4$ 时,USTSMA的性能优于 $\mu$ 取2和3的情况。随着系统用户数的增加,USTSMA的性能逐渐优于GA和S-MGA。这是因为GA和S-MGA的系统总和数据速率随着用户数的增加而降低。一方面,GA的效率取决于种群大小<sup>[18]</sup>;另一方面,虽然S-MGA可以很好地解决单小区内用户分组问题,但NOMA异构网络存在小区间干扰,这导致其性能随着小区数和用户数的增加而降低。此

外还可以看出,USTSMA性能明显优于OFDMA方案且逼近最优上界。

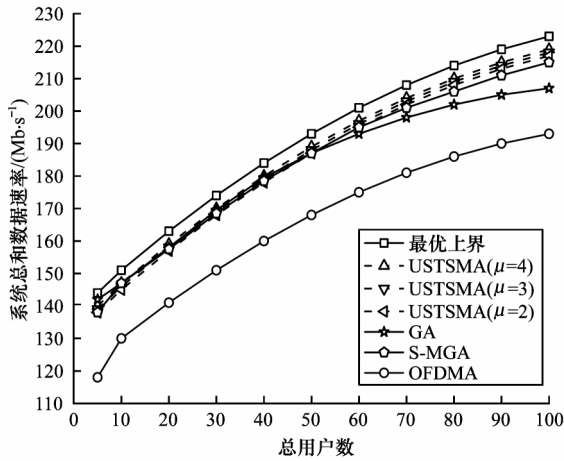


图2 系统总和数据速率与总用户数的关系

Fig.2 Relationship between sum rate of system and total number of users

图3展示了子信道数一定时( $K=10$ )系统调度用户数与总用户数在一个时隙内的变化关系。可以看出:当用户数 $N$ 小于子信道数 $K$ 时,无论是NOMA方案还是OFDMA方案,系统内的子信道资源可以被所有用户使用;当用户数 $N$ 大于子信道数 $K$ 时,由于OFDMA方案中用户之间的正交性(每个子信道只能分配给一个用户),导致整个系统的用户调度数将逐渐稳定在某个固定值,即用户调度数逐渐逼近子信道数;对于NOMA方案,用户调度数将随着系统内总用户数量的增加而增加,并逐渐稳定到某个定值且该值小于 $K\mu$ 。此外还可以看出,随着同一子信道上叠加用户数 $\mu$ 的增加,系统的用户调度数也随之增加,这是因为 $\mu$ 增大将导致同一子信道上允许接入更多用户。

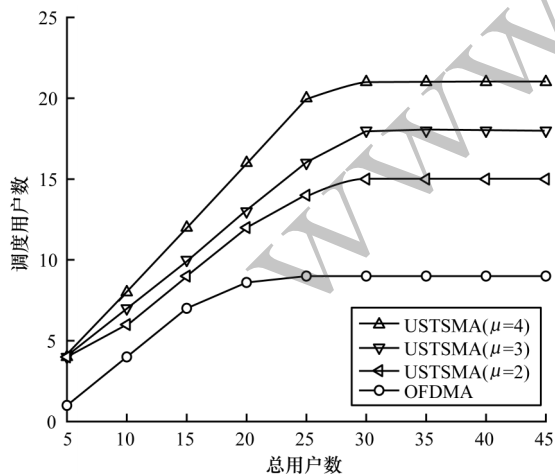


图3 调度用户数与总用户数的关系

Fig.3 Relationship between number of scheduling users and total number of users

图4展示了子信道数一定时( $K=10$ )系统中调度用户的平均数据速率与总用户数的变化关系。可以看出,调度用户平均数据速率的变化趋势为先降低后升高,然后逐渐趋于平稳,但NOMA方案的总体性能优于OFDMA方案,主要原因为:当用户数较小时,由于子信道数一定,因此调度用户的平均数据速率将随用户数的增加而降低;当用户数较大时,根据图3用户调度数与总用户数的变化关系可知,随着用户数量的增加,系统的用户调度数将逐渐达到一个稳定值,但多用户的分集增益将导致系统总和数据速率不断增加,因此,每个调度用户的平均数据速率也随之增加。此外,在NOMA方案中,调度用户的平均数据速率与每个子信道上最大叠加用户数 $\mu$ 呈反比关系,即 $\mu$ 越大调度用户的平均数据速率越小,这是因为具有较低信道增益的用户可以共享同一个子信道。

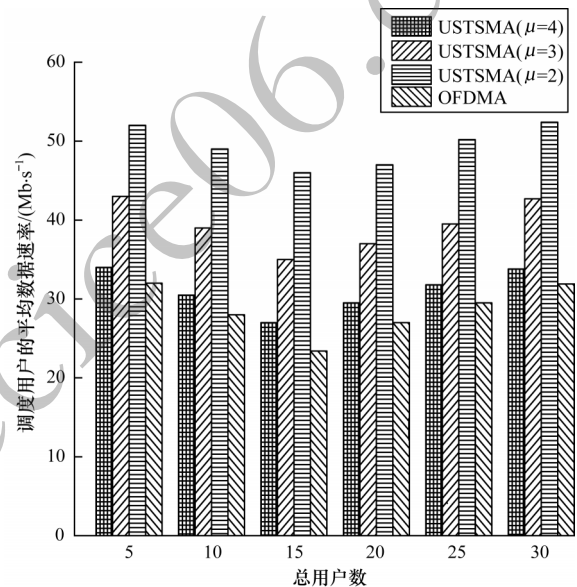


图4 调度用户的平均数据速率与总用户数的关系

Fig.4 Relationship between average data rate of scheduling users and total number of users

图5展示了用户数一定时( $N=20$ )系统的总和数据速率与子信道数的变化关系。可以看出,本文方案的性能总体优于OFDMA方案,同时其性能优于GA和S-MGA并逼近最优上界,这是因为在本文方案中,系统总和数据速率随着子信道数和同一子信道叠加用户数的增加而增加,但对于OFDMA方案,由于每个用户占用一个子信道,因此当子信道数大于总用户数时,系统总和数据速率将保持不变。



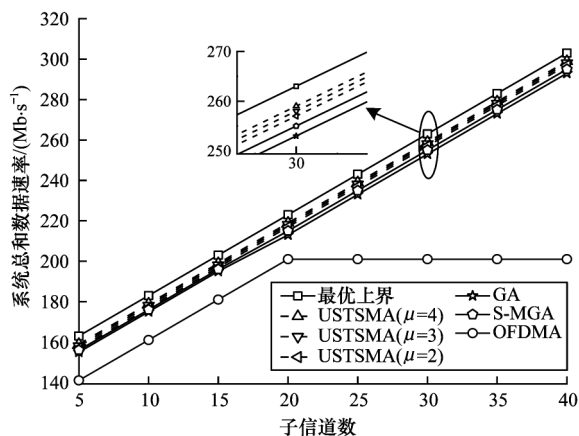


图5 系统总和速率与子信道数的关系

Fig.5 Relationship between sum rate of system and total number of subchannels

#### 4 结束语

针对 NOMA 异构网络的资源分配问题, 本文通过联合子信道分配和功率分配达到用户调度数与系统吞吐量之间的平衡。将用户-子信道分配建模为多对多双边匹配问题并提出 USTSMA 算法, 该算法接近性能最优并且复杂度较低, 能够使用户和子信道之间形成稳定匹配。仿真结果表明, 本文方案下的 NOMA 异构网络在系统总吞吐量、用户调度数等方面均优于 OFDMA 方案, USTSMA 性能较 S-MGA 和 GA 两种用户分组算法也有显著提高。本文的前提假设是用户-基站之间的关联已知, 下一步将通过引入用户关联对本文方案进行优化。

#### 参考文献

- [1] ANDREWS J G, BUZZI S, CHOI W, et al. What will 5G be? [J]. IEEE Journal on Selected Areas in Communications, 2014, 32(6): 1065-1082.
- [2] AGIWAL M, ROY A, SAXENA N. Next generation 5G wireless networks: a comprehensive survey [J]. IEEE Communications Surveys & Tutorials, 2016, 18(3): 1617-1655.
- [3] DING Z, LEI X, KARAGIANNIDIS G K, et al. A survey on non-orthogonal multiple access for 5G networks: research challenges and future trends [J]. IEEE Journal on Selected Areas in Communications, 2017, 35(10): 2181-2195.
- [4] DAI Linglong, WANG Bichai, YUAN Yifei, et al. Non-orthogonal multiple access for 5G: solutions, challenges, opportunities, and future research trends [J]. IEEE Communications Magazine, 2015, 53(9): 74-81.
- [5] LIU Gongliang, WANG Ruisong, ZHANG Haijun, et al. Super-modular game-based user scheduling and power allocation for energy-efficient NOMA network [J]. IEEE Transactions on Wireless Communications, 2018, 17(6): 3877-3888.
- [6] DING Z, FAN P, POOR H V. Impact of user pairing on 5G non-orthogonal multiple-access downlink transmissions [J].

IEEE Transactions on Vehicular Technology, 2016, 65(8): 6010-6023.

- [7] ZHANG Han, ZHANG Dekun, MENG Weixiao, et al. User pairing algorithm with SIC in non-orthogonal multiple access system [C]//Proceedings of 2016 IEEE International Conference on Communications. Washington D.C., USA: IEEE Press, 2016: 1-6.
- [8] WU Guangfu, DENG Tianyin, SU Kairong, et al. Multi-user grouping optimization algorithm based on non-orthogonal multiple access systems [J]. Journal of Electronics & Information Technology, 2018, 40(9): 2080-2087. (in Chinese)  
吴广富, 邓天垠, 苏开荣, 等. 基于非正交多址接入系统的多用户分组优化算法 [J]. 电子与信息学报, 2018, 40(9): 2080-2087.
- [9] LONG Ken, WANG Pengyu, LI Wei, et al. Spectrum resource and power allocation with adaptive proportional fair user pairing for noma systems [J]. IEEE Access, 2019, 7: 80043-80057.
- [10] XU B, CHEN Y, CARRION J R, et al. Resource allocation in energy-cooperation enabled two-tier NOMA HetNets toward green 5G [J]. IEEE Journal on Selected Areas in Communications, 2017, 35(12): 2758-2770.
- [11] WEI Z, NG D W K, YUAN J, et al. Optimal resource allocation for power-efficient MC-NOMA with imperfect channel state information [J]. IEEE Transactions on Communications, 2017, 65(9): 3944-3961.
- [12] CUI Jingjing, LIU Yuanwei, DING Zhiguo, et al. QoE-based resource allocation for multi-cell NOMA networks [J]. IEEE Transactions on Wireless Communications, 2018, 17(9): 6160-6176.
- [13] FANG Fang, CHENG Julian, DING Zhiguo. Joint energy efficient subchannel and power optimization for a downlink NOMA heterogeneous network [J]. IEEE Transactions on Vehicular Technology, 2019, 68(2): 1351-1364.
- [14] KAMECKE U, ROTH A E, SOTOMAYOR M A O. Two sided matching: a study in game-theoretic modeling and analysis [J]. Economica, 1992, 59(236): 487.
- [15] BAYAT S, LOUIE R H Y, HAN Z, et al. Distributed user association and femtocell allocation in heterogeneous wireless networks [J]. IEEE Transactions on Communications, 2014, 62(8): 3027-3043.
- [16] DI B, BAYAT S, SONG L, et al. Radio resource allocation for full-duplex OFDMA networks using matching theory [C]//Proceedings of 2014 IEEE Conference on Computer Communications Workshops. Washington D.C., USA: IEEE Press, 2014: 197-198.
- [17] SAITO Y, KISHIYAMA Y, BENJEBBOUR A, et al. Non-Orthogonal Multiple Access (NOMA) for cellular future radio access [C]//Proceedings of the 77th Vehicular Technology Conference. Washington D.C., USA: IEEE Press, 2013: 1-5.
- [18] YASUDA K, HU L, YIN Y. A grouping genetic algorithm for the multi-objective cell formation problem [J]. International Journal of Production Research, 2005, 43(4): 829-853.
- [19] YU W, RHEE W, BOYD S, et al. Iterative water-filling for Gaussian vector multiple-access channels [J]. IEEE Transactions on Information Theory, 2004, 50(1): 145-152.

编辑 金胡考