

# 面向用户体验的多小区混合非正交多址接入网络资源分配方法

邵鸿翔<sup>①</sup> 孙有铭<sup>\*②③</sup> 蔡佳昊<sup>③</sup>

<sup>①</sup>(洛阳理工学院 洛阳 471023)

<sup>②</sup>(中国人民解放军61062部队 北京 100089)

<sup>③</sup>(陆军工程大学 南京 210007)

**摘要:** 该文研究了多小区混合非正交多址接入(MC-hybrid NOMA)网络的资源分配。为满足异构用户的服务体验,以最大化全网综合平均意见评分(MOS)累加和为目标,考虑基站选择、信道接入和功率资源分配的联合优化问题,该文提出一种用户、基站和信道3方的2阶段转移匹配算法,并根据用户MOS进行子信道功率优化。仿真结果表明所提多小区混合NOMA网络资源分配方案能有效提升全网用户服务体验和公平性。

**关键词:** 混合非正交多址接入; 体验质量; 资源分配; 匹配博弈

中图分类号: TN929.5

文献标识码: A

文章编号: 1009-5896(2021)04-1129-08

DOI: 10.11999/JEIT200032

## QoE-based Resource Allocation for Multi-cell Hybrid NOMA Networks

SHAO Hongxiang<sup>①</sup> SUN Youming<sup>\*②③</sup> CAI Jihao<sup>③</sup>

<sup>①</sup>(Luoyang Institute of Science and Technology, Luoyang 471023, China)

<sup>②</sup>(PLA No.61062 Troop, Beijing 100089, China)

<sup>③</sup>(College of Communications Engineering, PLA University of Science and Technology, Nanjing 210007, China)

**Abstract:** Resource allocation in Multi-Cell hybrid Non-Orthogonal Multiple Access-orthogonal multiple access (MC-hybrid NOMA) networks is studied in this paper. To satisfy the Quality of Experience (QoE) of different service types of users, an algorithm joint user-BS association, sub-channel assignment and power allocation is proposed to maximize the sum Mean Opinion Scores (MOSs) of users in the networks. A low-complexity two-step approach based on matching game theory and developed power allocation strategy based on QoE proportional fairness are proposed. Simulation results demonstrate that the proposed algorithm can effectively improve the system performance and fairness.

**Key words:** Hybrid NOMA; Quality of Experience (QoE); Resource allocation; Matching game

### 1 引言

由于无线通信流量的爆炸性增长,未来无线系统将面临巨大挑战,需要更高频谱效率、更大连通性和更低传输延迟,仅依靠传统正交共享资源的接入方式难以有效应对上述挑战<sup>[1]</sup>。相比传统正交多址接入(Orthogonal Multiple Access, OMA)系统,作为5G候选方案的非正交多址(Non-Orthogonal

Multiple Access, NOMA)技术允许多个用户通过功率域或码域复用共享同一载波资源,实现频谱效率和用户速率的双重提升,以满足大规模连接和宽带服务的需求<sup>[2]</sup>。

目前,面向NOMA的无线资源优化的研究不断加深<sup>[3-6]</sup>。文献<sup>[3]</sup>构建势能博弈模型解决NOMA网络信道优化和用户分簇问题。文献<sup>[4]</sup>利用斯坦伯格博弈模型研究NOMA异构网络中面向最大化全网和速率的宏/小蜂窝功率分配问题。文献<sup>[5]</sup>利用随机/凸优化方法研究NOMA蜂窝车联网中基于能效的动态资源分配问题。文献<sup>[6]</sup>联合考虑信道分配和功率控制,通过寻找最大独立集实现NOMA网络单条上行链路速率和最大。然而,以上研究都只考虑NOMA模式下单基站或单信道接入的情况。由于NOMA技术需在接收端应用连续干扰消除(Successive Interference Cancellation, SIC)技术解

收稿日期: 2020-01-09; 改回日期: 2020-06-29; 网络出版: 2020-07-22

\*通信作者: 孙有铭 sunyouming10@163.com

基金项目: 国家自然科学基金(61901518), 河南省科技攻关项目(192102210249), 河南省高等学校重点项目(19B510007)

Foundation Items: The National Natural Science Foundation of China (61901518), The Science and Technology Breakthrough Project of Henan Science and Technology Department (192102210249), The Key Projects of Colleges and Universities in Henan Province (19B510007)

码,具有较高的处理复杂度。并且,在用户信道条件差异较小时,NOMA相对于OMA的性能增益并不明显。因此,根据信道条件和用户需求,设计混合NOMA资源分配方案更具现实意义。文献[7]研究了混合NOMA接入的用户分簇和功率分配问题。文献[8]考虑上行链路在混合NOMA网络中用户资源块匹配和功率优化,实现网络能效最大化。

当前NOMA网络资源分配研究集中在物理层和MAC层优化,大多以用户接入速率作为优化目标,较少考虑用户业务差异性对服务体验质量(Quality of Experience, QoE)的影响。由于人类对变化有敏感延迟,在相同QoE条件下,用户可以容忍一定程度的接入速率波动。对系统而言,盲目地追求个体用户速率最大化并非总是好的策略。当前,QoE已逐渐成为5G无线通信系统的重要指标<sup>[9,10]</sup>,而针对NOMA网络的用户QoE优化仍处于起步阶段。文献[10]阐述了QoE优化在NOMA系统设计的关键挑战,并给出一个网络调度的通用架构。文献[11]构建了基于内容受欢迎程度和能源成本等因素的QoE模型研究上行NOMA网络中的功率分配。文献[12]以最大化用户速率映射的连续QoE函数为目标,研究了多小区NOMA网络中的资源分配问题。然而,上述研究未考虑用户在混合NOMA网络中根据不同业务QoE需求接入非等配额信道的情况。

本文研究面向用户QoE的多小区多载波混合NOMA网络中资源优化,采用平均主观评分(Mean Opinion Score, MOS)对QoE进行建模,建立面向系统级QoE的优化模型,提出一种具有较低复杂度的2阶段转移匹配算法,实现了基站关联、信道选择和功率分配的组合优化,并从理论上证明所提算法的收敛性。

## 2 系统模型与问题描述

### 2.1 系统模型

考虑一个下行多小区多载波混合NOMA网络,小蜂窝基站集合表示为 $SBS = \{SBS_1, SBS_2, \dots, SBS_n\}$ ,用户集合为 $UE = \{UE_1, UE_2, \dots, UE_k\}$ ,子信道集合为 $SC = \{SC_1, SC_2, \dots, SC_m\}$ 。设每个基站的发射功率为 $P_n$ ,接入带宽为 $W$ ,被 $m$ 个子信道均分,则子信道带宽为 $W/m$ 。每个用户只能被1个基站服务,单个基站能接入多个用户。根据NOMA协议,每个子信道可接入多个用户。利用频谱聚合技术,每个用户允许接入同一基站的多条信道。基站间通过空中接口交换链路的信道状态信息(Channel State Information, CSI)。图1给出一个3小区混合NOMA网络实例,每个小蜂窝有3个子信道可供选择,并

服务不等数量的异构业务用户,如表1:(1)基站3使用OMA接入方式,3个用户分别接入正交的3个信道;基站2使用混合接入,用户4和用户5在子信道2中使用NOMA方式,由于宽带业务需要,用户5同时接入子信道3;(2)子信道接入状态矩阵中不同基站在同行有其它1存在,代表存在子信道干扰;(3)同一基站在同行存在1代表基站内有NOMA干扰。

### 2.2 信号模型

基站 $n$ 在子信道 $m$ 发送的叠加编码信号为

$$X_n^m = \sum_{k=1}^{|\mathbf{UE}_n^m|} \eta_{n,k} \cdot \varphi_{m,k} \cdot \sqrt{p_{n,k}^m} \cdot x_{n,k}^m \quad (1)$$

其中, $\eta_{n,k}$ 和 $\varphi_{m,k}$ 是用0/1表示的接入状态指示,分别代表(基站-用户)和(子信道-用户)的匹配关系,当表示接入时置1,否则置0; $|\cdot|$ 表示集合的基数,式(1)中 $|\mathbf{UE}_n^m|$ 表示接入基站 $n$ 中子信道 $m$ 的用户数,后续 $|SBS|$ , $|\mathbf{UE}|$ , $|SC|$ 分别表示相关基站、用户和子信道的数量。 $x_{n,k}^m$ 和 $p_{n,k}^m$ 分别表示基站 $n$ 在信道 $m$ 上对用户 $k$ 的传输信息和分配功率。用户 $k$ 在单个信道上传输,可能受到同一基站和相邻基站的同信道干扰。所以, $n$ 基站中 $k$ 用户在信道 $m$ 上接收的信号 $y_{n,k}^m$ 可表示为基站 $n$ 的传输信号、其它基站的干扰以及噪声3部分

$$y_{n,k}^m = \alpha_{n,k}^m X_n^m + \sum_{s=1, s \neq n}^{|SBS|} \alpha_{s,k}^m \sum_{k=1}^{|\mathbf{UE}_s^m|} \eta_{s,k} \cdot \varphi_{m,k} \cdot \sqrt{p_{s,k}^m} \cdot x_{s,k}^m + \sigma^2 \quad (2)$$

其中, $\alpha_{n,k}^m$ 表示在子信道 $m$ 基站 $n$ 到用户 $k$ 的信道参数, $\sigma^2$ 为加性高斯白噪声的方差。

现定义等效信道增益

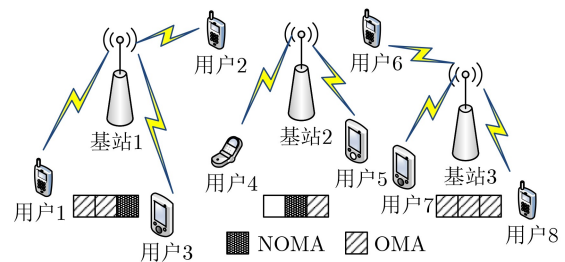


图1 混合NOMA网络接入模型及实例

表1 3小区混合NOMA网络实例(与图1情况对应)

	基站1			基站2			基站3	
	用户1	用户2	用户3	用户4	用户5	用户6	用户7	用户8
子信道1	1	0	1	0	0	1	0	0
子信道2	0	0	1	1	1	0	0	1
子信道3	0	1	0	0	1	0	1	0

$$g_{n,k}^m = \frac{\eta_{n,k} \cdot \varphi_{m,k} \cdot h_{n,k}^m}{\sum_{s=1, s \neq n}^{|\text{SBS}|} (\alpha_{s,k}^m)^2 \cdot p_{s,k}^m + \sigma^2} \quad (3)$$

其中,  $h_{n,k}^m = |\alpha_{n,k}^m|^2$  表示信道增益系数。假设多个用户接入同一基站的不同信道(用户集合用  $\Pi$  表示), 排序集合内用户的等效信道增益, 不失一般性可表示为  $g_{n,\Pi(1)}^m \leq g_{n,\Pi(2)}^m \leq \dots \leq g_{n,(\Pi)}^m$ 。同一信道内

其中,  $r_{n,k}^m = \frac{\eta_{n,k} \cdot \varphi_{m,k} \cdot h_{n,k}^m \cdot p_{n,k}^m}{\sum_{s \in \text{SBS}, s \neq n} \varphi_{m,k} \cdot h_{s,k}^m \cdot p_{s,k}^m + \sum_{k' \neq k, k' \in \{\text{SBS}_n, \text{SC}_m\}} h_{n,k'}^m \cdot p_{n,k'}^m + \sigma^2}$  表示用户  $k$  接入基站  $n$  在信道  $m$  上的信干噪比,  $\text{SC}_k$  表示用户  $k$  接入的子信道集合,  $k'$  表示与用户  $k$  接入同一基站和信道的 NOMA 用户。

### 2.3 问题描述

本文采用广泛使用的 MOS 作为用户 QoE 的度量指标。国际电信联盟将 QoE 划分为“差、次、中、良、优”5 个等级, 分别对应 MOS 评分中 1~5 分。MOS 通过大量人为打分统计, 根据实时速率建立诸如网页浏览、文件下载和视频播放等不同业务的服务体验评分。参考文献[13], 本文将吞吐量与 MOS 评分的映射关系表示为一种带有边界的对数函数, 用户  $k$  接入基站  $n$  时的 MOS 表示为

$$\text{MOS}_{n,k}(R_{n,k}) = \begin{cases} 5, & a \log_2(R_{n,k}/b) \geq 4.5 \\ 4, & 3.5 \leq a \log_2(R_{n,k}/b) < 4.5 \\ 3, & 2.5 \leq a \log_2(R_{n,k}/b) < 3.5 \\ 2, & 1.5 \leq a \log_2(R_{n,k}/b) < 2.5 \\ 1, & a \log_2(R_{n,k}/b) < 1.5 \end{cases} \quad (5)$$

其中,  $a = 3.5/\log_2(\theta^4/\theta^1)$ ,  $b = \theta^1(\theta^1/\theta^4)^{1/3.5}$ ,  $0 \leq \theta^1 < \theta^4$  与业务类型相关,  $\theta$  代表平均用户吞吐速率,  $\{\theta^1, \theta^4\}$  由相关业务类型通过用户体验的打分数据统计得到, 分别对应该业务所需用户平均吞吐速率的下限值和满足流畅传输需要的推荐值, 如图 2 所示。

综上, 多小区多载波混合 NOMA 网络的系统 QoE 优化可表示为社会福利函数  $\text{WF}(\mu)$  的最大化问题

$$\left. \begin{aligned} \text{P1: } \max \text{WF}(\mu) &= \max \sum_{n \in N} \sum_{m \in M} U_{n,k}^m(\mu) \\ &= \max \sum_{n \in N} \sum_{k \in \text{UE}} \text{MOS}(R_{n,k}) \\ \text{s.t. } \text{C1 } &\eta_{n,k}, \varphi_{m,k} \in \{0, 1\}, n \leq |\text{SBS}|, \\ &k \leq |\text{UE}|, m \leq |\text{SC}| \\ \text{C2 } &\sum_{\mu(k) \in N} \eta_{\mu(k),k} = 1, k \leq |\text{UE}| \\ \text{C3 } &\sum_{\mu(n,k) \in \text{SC}} \varphi_{m,k} \leq |\text{SC}| \\ \text{C4 } &\sum_{m \in |\text{SC}|} \sum_{k \in |\text{UE}|} p_{m,k} = p_n, p_{m,k} \geq 0 \end{aligned} \right\} \quad (6)$$

NOMA 用户将对等效信道增益排在它前面的用户信号依次执行 SIC, 即拥有较强等效信道增益的用户 UE $_{n,\Pi(k)}^m$  依次解码其他  $(k-1)$  个用户的信息并重构删除后, 解码出自身信息。用户可根据业务需求同时接入多个信道, 则基站  $n$  中用户  $k$  的总速率等于所有接入信道的速率和, 可表示为

$$R_{n,k} = \sum_{m=1}^{|\text{SC}_k|} R_{n,k}^m = \sum_{m=1}^{|\text{SC}_k|} W/m \times \log_2(1 + r_{n,k}^m) \quad (4)$$

其中, C1 表示接入状态约束; C2 表示 1 个用户最多只能接入 1 个基站; C3 为用户接入信道数的约束; C4 为功率约束。本文允许用户根据实际业务需求, 灵活匹配接入的基站、信道数和接入模式, 涉及混合整数优化的背包问题, 基站-用户-信道 3 维匹配是 NP 难问题, 不存在多项式复杂度算法来寻找最优解[14]。

### 3 匹配博弈模型

为有效求解式(6)所提问题 P1, 可将其分解为 3 个子问题, 分别是基站和用户匹配、用户子信道匹配和子信道上用户的功率分配, 进而获得原问题的次优解。参考大学入学宿舍安排模型[15], 本文提出一种基于匹配博弈的优化方案, 涉及多对 1 用户-基站、多对多用户-信道关联 2 阶段转移匹配  $\mu$ 。由于 2 次匹配涉及理论相同, 为简化证明, 将 SBS 和 SC 统一定义为服务方  $N$ , 用户为  $K$ , 分析所提算法的稳定性。

**定义 1** 设匹配  $\mu$  是一组匹配对, 其中  $\mu \in K \otimes N$ , 并满足  $|\mu(k)| = q_k, |\mu(n)| = q_n, K \otimes N$  代表匹配成员的集合,  $q$  代表可匹配的配额。匹配关系可表示为  $\mu(k) = \{k \in K : (k, n) \in \mu\}, \mu(n) = \{n \in N : (n, k) \in \mu\}$ 。

**定义 2** 匹配  $\mu$  中的成员满足个体理性, 不存在用户不接受服务或者服务方拒绝接入用户的情况, 则称匹配  $\mu$  是无阻碍的 (unblocked)。

**定义 3** 对于用户-服务方匹配对  $(k, \mu(k))$ , 若

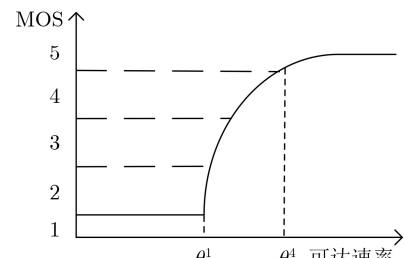


图 2 平均意见得分的一般模型

存在用户 $k$ 有 $\mu(k) \neq n$ 且 $n \succ_k \mu(k)$  ( $\succ$ 代表偏好关系); 或对于用户—服务方匹配对 $(\mu(n), n)$ , 若存在 $n$ 有 $\mu(n) \neq k$ , 且 $k \succ_n \mu(n)$ , 则称匹配是有阻碍的(blocked)。

**定义4** 对于给定的匹配结果 $\mu$ , 任何个体成员或任何匹配对都不存在阻碍, 则称匹配结果 $\mu$ 是稳定的。

从以上定义可知稳定匹配的结果是双边满意的。对于任意用户 $k$ 和任意两个服务方 $n, n' \in N, n \neq n'$ , 可能存在的2种匹配结果, 分别表示为 $n = \mu(k), n' = \mu'(k) \in K \otimes N$ 。用户根据接入不同服务方的MOS水平来建立自身偏好, 用户偏向选择获得更高效用 $U$ 的服务方或接入策略, 存在式(7)关系

$$\begin{aligned} n \succ_k n' &\Leftrightarrow U_k(n) > U_k(n') \\ &\Leftrightarrow \text{MOS}_n^k(R_{k,n}) > \text{MOS}_{n'}^k(R_{k,n'}) \quad (7) \end{aligned}$$

类似地, 服务方更偏好选择满意度更高的用户, 存在式(8)关系

$$\begin{aligned} k \succ_n k' &\Leftrightarrow U_n(k) > U_n(k') \\ &\Leftrightarrow \text{MOS}_n^k(R_{k,n}) > \text{MOS}_n^{k'}(R_{k',n}) \quad (8) \end{aligned}$$

从式(7)、式(8)可看出, 参加匹配集合成员的配对结果都与其所获效用 $U$ 相关。根据式(4)、式(5), 用户效用都与接入同一服务方的用户相关, 偏好列表会根据当前基站或信道内接入其它用户的情况变化而改变。

**定义5** 转移匹配 $T_{n'/(k',n')}^{(k,n)} = T_{(k',n')}^{(k,n)}$ 或 $T_{n'}^{(k,n)}$ , 其中, 转移形式1:  $T_{n'}^{(k,n)} = \{[\mu \setminus (k, n)] \cup [k, n']\}$ , 表示用户 $k$ 从原服务方 $n$ 转移至新服务方 $n'$ ; 转移形式2:  $T_{(k',n')}^{(k,n)} = \{[\mu \setminus ((k, n), (k', n'))] \cup [(k, n'), (k', n)]\}$ , 表示从属服务方 $n$ 的用户 $k$ 和从属服务方 $n'$ 的用户 $k'$ 调换所接入的服务方。

**定义6** 若转移匹配 $\mu$ 满足双边稳定, 则不存在以下任何转移情况: (1) $\forall i \in \{K, N\}, U_i(T_{n'/(k',n')}^{(k,n)}) \geq U_i(\mu)$ ; (2) $\exists i \in \{K, N\}, U_i(T_{n'/(k',n')}^{(k,n)}) > U_i(\mu)$ 。

由定义6可知, 稳定匹配就是不存在参与者可以通过定义5中的转移提高效率。另外, 转移行为必须取得双方同意, 及各方效用都提高方可进行, 避免了相同匹配结果间的循环。

**引理1** 任何转移匹配 $T_{n'/(k',n')}^{(k,n)}$ , 当满足以下2个条件时, 一定存在 $\text{WF}(T_{n'/(k',n')}^{(k,n)}) > \text{WF}(\mu)$ 。

(1)  $\forall i \in K, U_i(T_{n'/(k',n')}^{(k,n)}) \geq U_i(\mu)$ ; (2)  $\exists i \in \{k, k' \in K\}, U_i(T_{n'/(k',n')}^{(k,n)}) > U_i(\mu)$ 。

**证明** 根据势能博弈(Potential Game)理论<sup>[4]</sup>定义社会福利函数 $\text{WF}(\mu)$ 。下面针对2种转移形式分情况讨论。在 $T_{(k',n')}^{(k,n)}$ 情况时, 计算转移前后 $\text{WF}(\mu)$ 变化差值。

$$\left. \begin{aligned} &\text{WF}(T_{(k',n')}^{(k,n)}) - \text{WF}(\mu) \\ &= \sum_{i/k' \in n'} U_i(T_{(k',n')}^{(k,n)}) - \sum_{i/k' \in n'} U_i(\mu) \\ &\quad + \sum_{i/k \in n} U_i(T_{(k',n')}^{(k,n)}) - \sum_{i/k \in n} U_i(\mu) \\ &\quad + U_{k'}(n) + U_k(n') - U_k(n) - U_{k'}(n') \end{aligned} \right\} \quad (9)$$

其中,  $\text{WF}(\mu) = \sum_{i \in n'} U_i(\mu) + \sum_{i \in n} U_i(\mu) + \sum_{i \in N/n', n} U_i(\mu)$ 表示转移前的社会福利值,  $\text{WF}(T_{(k',n')}^{(k,n)}) = \sum_{i/k' \in n'} U_i(T_{(k',n')}^{(k,n)}) + \sum_{i/k \in n} U_i(T_{(k',n')}^{(k,n)}) + U_k(n') + U_{k'}(n) + \sum_{i \in N/n', n} U_i(\mu)$ 是转移后的社会福利值。由于只有服务方 $n, n' (n \neq n', \in N)$ 在转移时受到影响, 所以其他服务方 $\sum_{i \in N/n', n} U_i(\mu)$ 不变。

根据引理1的条件(1)可得

$$\begin{aligned} &\sum_{i/k' \in n'} U_i(T_{(k',n')}^{(k,n)}) - \sum_{i/k' \in n'} U_i(\mu) \\ &\quad + \sum_{i/k \in n} U_i(T_{(k',n')}^{(k,n)}) - \sum_{i/k \in n} U_i(\mu) \geq 0 \quad (10) \end{aligned}$$

根据引理1的条件(2)可得

$$\begin{aligned} &U_{k'+k}(T_{(k',n')}^{(k,n)}) - U_{k'+k}(\mu) \\ &= U_{k'}(n) + U_k(n') - U_k(n) - U_{k'}(n') > 0 \quad (11) \end{aligned}$$

由不等式(10), 式(11)可得

$$\text{WF}(T_{(k',n')}^{(k,n)}) - \text{WF}(\mu) > 0 \quad (12)$$

类似地, 在 $T_{n'}^{(k,n)}$ 条件时, 转移发生后社会福利值为

$$\begin{aligned} \text{WF}(T_{n'}^{(k,n)}) &= \sum_{i/k \in n'} U_i(T_{n'}^{(k,n)}) + \sum_{i/k \in n} U_i(T_{n'}^{(k,n)}) \\ &\quad + U_k(n') + \sum_{i \in N/n', n} U_i(\mu) \quad (13) \end{aligned}$$

根据引理1的条件(1)、条件(2)可得

$$\begin{aligned} &\sum_{i/k \in n'} U_i(T_{n'}^{(k,n)}) - \sum_{i/k \in n'} U_i(\mu) \\ &\quad + \sum_{i/k \in n} U_i(T_{n'}^{(k,n)}) - \sum_{i/k \in n} U_i(\mu) > 0 \quad (14) \end{aligned}$$

$$U_k(T_{n'}^{(k,n)}) - U_k(\mu) = U_k(n) - U_k(n') > 0 \quad (15)$$

由不等式(14)、式(15)可得

$$\begin{aligned} \text{WF}(T_{n'}^{(k,n)}) - \text{WF}(\mu) &= \sum_{i/k \in n'} U_i(T_{n'}^{(k,n)}) - \sum_{i/k \in n'} U_i(\mu) \\ &\quad + \sum_{i/k \in n} U_i(T_{n'}^{(k,n)}) - \sum_{i/k \in n} U_i(\mu) \\ &\quad + U_k(n) - U_k(n') > 0 \quad (16) \end{aligned}$$

由式(12)和式(16)可看出, 任意用户发生转

移，其效用的变化是非负且单调递增的，与其社会福利函数 $W(\mu)$ 的变化一致。作为一种有限集合的匹配，其最优解一定是双边稳定解。引理1得证。

**定理1** 所有的局部极大 $WF(\mu)$ 是双边稳定匹配。

**证明** 使用反证法，假设 $\mu$ 不是双边稳定的。由引理1可知，任何转移发生都是双边接受的，全局收益 $WF(\mu)$ 会严格增加。但这与假设 $WF(\mu)$ 是局部极大值相矛盾。因此， $\mu$ 是双边稳定。定理1得证。另外，从势能博弈理论角度分析，由式(12)和式(16)看到，任何匹配结果导致的用户效用变化与势能函数的变化是一致的。因此，所提转移匹配方式类似序贯势能博弈(Ordinal potential game)，一定存在至少一个纳什均衡点<sup>[9]</sup>，并且所有转移匹配的稳定点是势能函数的局部极值点。 证毕

## 4 算法实现

### 4.1 用户基站关联匹配

不考虑子信道分配，各基站带宽为 $W$ ，发射功率为 $P_n$ ，计算接入基站相应速率及MOS，使用轮询迭代实现第1步基站-用户的粗颗粒匹配。具体步骤如表2所示。

### 4.2 用户与子信道匹配

根据基站用户分配的结果，用户可同时接入该基站的多条信道。根据2维指标，及接入信道策略MOS得分和信道数建立偏好列表。选出MOS得分最高的信道选项中占用信道数最少的作为策略向基站发出申请(如有多项满足则随机选择一项)。子信

道功率按各基站功率均分得到为 $P_n/m$ ，子信道带宽为 $W/m$ 。使用嵌套迭代匹配算法实现第2步用户子信道的细颗粒匹配，如表3所示。

### 4.3 子信道功率优化

基于基站-用户关联和子信道匹配结果，进行用户子信道功率分配，具体分两步：(1) 先分配独占子信道的用户 $k$ ，功率为 $P_n/m$ ，并计算该用户 $MOS_k$ 得分，其余用户 $MOS=0$ ；(2) 再分配共享子信道的NOMA用户，基站根据类比例公平原则分配该用户的功率，按照 $f_k = 5 - MOS_k$ 得分的比例分配功率，

$$p_{n,k} = \frac{p_n}{m} \cdot \frac{f_k^\eta}{\sum_{j \neq k} f_j^\eta}, \quad k, j \in SBS_n, k, j \in SC_m \quad (17)$$

其中， $\eta(0 \leq \eta \leq 1)$ 为衰退因子。应注意，分配功率大小的排列需与其等效信道增益的升序相一致，如不满足则按照信道增益比例分配，此时 $f_k = g_{n,k}^m, \eta(-1 \leq \eta \leq 0)$ 。

## 5 仿真分析

为验证本文所提方案性能，考虑在一个 $60 \text{ m} \times 60 \text{ m}$ 的方形区域内随机布设3个小基站，可接入3条子信道，信道带宽设置为1.0 MHz。小基站到用户的传输路径损耗为 $18.7 \times \lg(d[m]) + 46.8 + 20 \times \lg(2.7/5) \text{ dB}$ ，小蜂窝传输功率为20 dBm，覆盖半径为20 m，热噪声功率密度为 $-174 \text{ dBm/Hz}$ <sup>[9]</sup>。用户存在3种应用，分别是视频会议、高清视频通话和一般视频通话。根据Skype公司公布的速率要

表2 (用户,基站)-子信道关联算法

算法1: 多对1转移匹配算法
步骤1 用户的初始接入:
(1) 每个用户发现所有在服务范围的可接入基站。随机接入最强信号的基站，并报告位置和业务类型;
(2) 每个基站根据实际接入情况计算网络效用 $U_n(\mu)$ 。相邻的基站组成联盟，彼此交换信息。
步骤2 转移匹配过程:
重复迭代(可采用轮询模式，当来自不同联盟的交换匹配轮询发生碰撞时，先到先得)
基站申请: 选择基站SBS $n$ ，存在2种转移方式。当存在 $U_n \left( T_{n'/(k,n')}^{(k_n)} \right) > U_n(\mu)$ ，选择相应方式发出申请。
联盟基站判断: SBS $n'$ 面对SBS $n$ 调换申请，对应存在2种调整方式。
If SBS $n$ 申请UE $k$ 接入新基站SBS $n'$
如果 $U_{n'}(T_{n'}^k) - U_{n'}(\mu) > 0$ ，则SBS $n'$ 同意UE $k$ 的接入申请，及 $\{\mu(n')\} \leftarrow \{\mu(n')\} \cup k$ ， $\eta_{n,k} = 1$ ， $U_{n'}(T_{n'}^k) \rightarrow U_{n'}(\mu)$ ；否则SBS $n'$ 拒绝SBS $n$ 发送转移申请；
Else if SBS $n$ 中的用户 $k$ 与SBS $n'$ 中的用户 $k'$ 相互调换所接入基站
如果 $U_{n'} \left( T_{n'}^{(k_n)} \right) - U_{n'}(\mu) > 0$ ，则SBS $n'$ 同意SBS $n$ 发送转移申请，及 $\{\mu(n')\} \leftarrow \{\mu(n')/k'\} \cup k$ ， $\{\mu(n)\} \leftarrow \{\mu(n)/k\} \cup k'$ ， $\eta_{n,k'} = 1, \eta_{n,k} = 0, \eta_{n',k} = 1, \eta_{n',k'} = 0$ ， $U_{n'}(T_{n'}^k) \rightarrow U_{n'}(\mu)$ ；否则SBS $n'$ 拒绝SBS $n$ 发送的转移申请；
End (以上为1次循环的过程)
Until不存在 $i \in \{k, k' \in K\}$ ， $U_n(T) > U_n(\mu)$ 或达到最大迭代数，则迭代循环结束。

表3 用户-基站关联算法

算法2: 多对多转移匹配算法

步骤1 用户的初始信道选择:  
 根据用户业务, 每个基站内用户分别初始化随机选择接入信道, 一般低速视频业务偏向申请单信道, 高清视频业务偏向申请多信道。每个基站内用户可选信道数为 $m$ , 则可能接入的排列组合有 $C_m^1 + C_m^2 + \dots + C_m^m$ 种, 根据信道接入QoE得分建立2维偏好列表和相应的信道接入列表 $\mu_k(m)$ 。基站 $n$ 计算所有接入用户的MOS得分累加和 $U_n(\mu) = \text{MOS}_n(\mu_m(k))$ 。

步骤2 转移匹配过程(各基站分别执行该算法):  
 重复迭代: 基站 $n$ 内各用户更新信道安排情况、相应QoE得分、信道接入的偏好列表;  
 用户申请: 各基站随机挑选1位用户 $k$ 。该用户嵌套计算各种信道选择下的MOS得分, 并建立偏好列表, 向MOS得分最高且信道占用最少的子信道策略发出申请, 建立新申请信道相应的分配列表 $T_m^k$ 。  
 基站判断: 面对UE  $k$ 调整接入信道的申请, 基站判决是否接受申请。  
 If  $\text{MOS}_n(T_m^k) > U_n(\mu)$ , 则SBS  $n$ 同意UE  $k$ 新的信道接入申请, 更新MOS得分累加和 $\text{MOS}_n(T_m^k) \rightarrow U_n(\mu)$ , 更新信道接入列表 $T_m^k$ 。  
 else SBS  $n$ 不同意UE  $k$ 新的信道接入申请, 不更新 $\text{MOS}_n(\mu_m(k))$ ,  $(\mu_m(k))$ 。  
 End (完成1次信道匹配迭代)  
 Until不存在 $i \in \{k, k' \in K\}$ ,  $U_n(T) > U_n(\mu)$ 或达到最大迭代数, 则循环结束。

求<sup>[16]</sup>, 3种应用的最小速率和推荐速率如表4所示, 表4中最低速率和推荐速率分别代表MOS打分中的1分和4分, 及式(5)中的 $\{\theta^1, \theta^4\}$ 。基于这两个值, 可以得出相应速率的具体QoE转化函数。

图3展示了随机生成10个用户时全网MOS和与全网速率和的迭代收敛情况。在用户-基站和用户-信道2阶段匹配过程中, 基于MOS的用户满意度累加和都优于传统基于速率优化的接入方式。面向吞吐量的优化方案由于没有关注不同用户对服务质量

需求的差异性, 比如对于MOS等于5的用户, 再提高吞吐是没有意义的。所以, 仅盲目追求个体用户吞吐最大化, 无法最大限度地提高系统级全网用户体验。

表4 业务类型和QoS速率要求

应用类型	最小速率	推荐速率
视频会议	512 kbps	2 Mbps
高清视频通话	1.2 Mbps	1.5 Mbps
一般视频通话	128 kbps	500 kbps

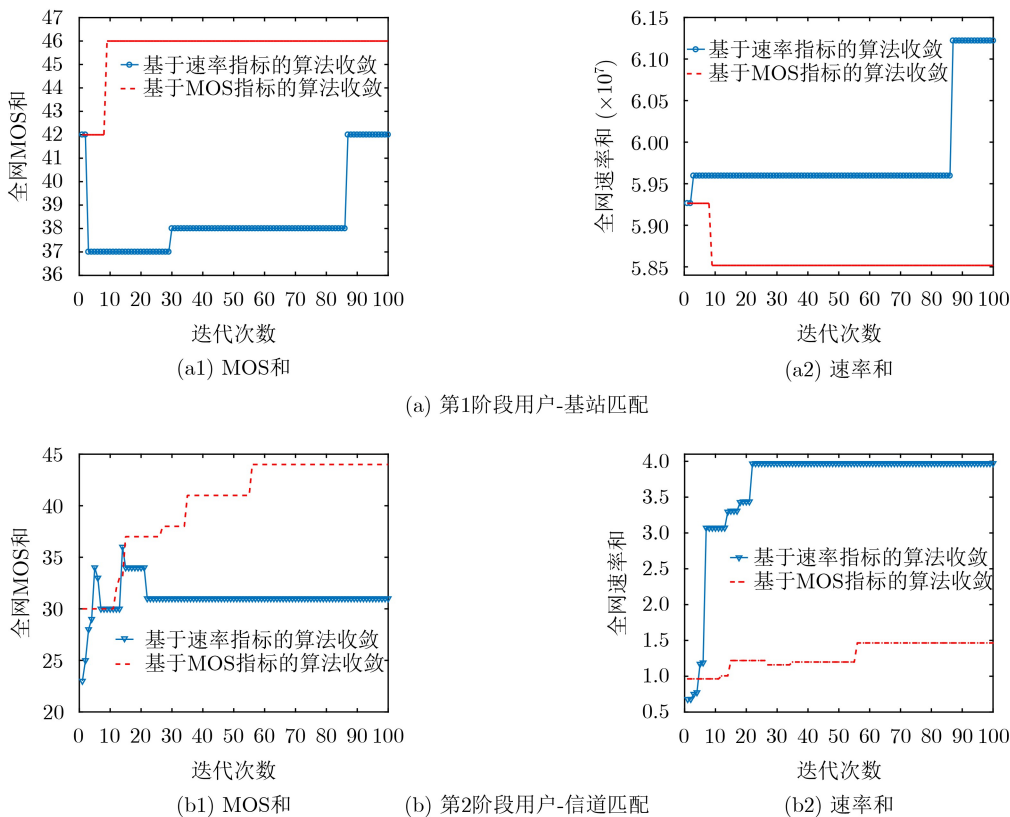


图3 2阶段匹配算法的收敛情况

图4展示了随机生成10个用户时不同接入方式在全网MOS和与最大传输功率的关系对比，所提混合NOMA接入方案的MOS和优于固定信道NOMA接入(每个用户固定接入2个信道)和OMA方案。在采用相同所提4.1节和4.2节的匹配策略下，由于是在MOS比例和信道增益比例方式中取最优，所提功率分配结果优于基于信道增益的传统子信道NOMA功率分配策略。各接入方式获得的全网用户体验MOS和随着小微基站发射功率提高而增加。但是，功率提高的同时相互干扰也在加大，曲线增加趋势越发平缓。

图5展示了不同网络规模下，不同接入方式的全网用户满意度。仿真通过随机生成不同数量固定比例的用户，独立运行100次平均得到。从图中可看出，随着接入用户数量的提高，全网MOS和都有提升，NOMA方式明显优于OMA方式。在小规模网络(接入用户数 ≤ 6时)，各NOMA方式皆达到最优。但OMA模式中每个用户只能接入一个正交信道，会出现高吞吐要求的用户业务无法得到满足的情况。随着接入用户数量的增加，网络负载加重，用户间干扰加剧，4种方式的全网MOS和增

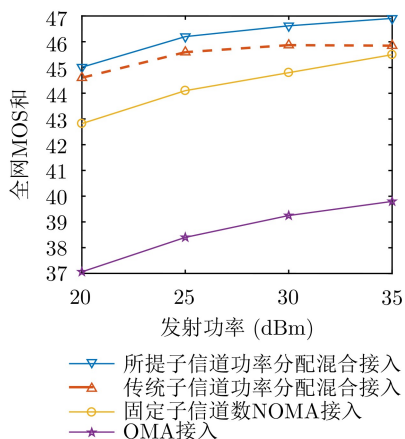


图4 不同发射功率下的算法比较

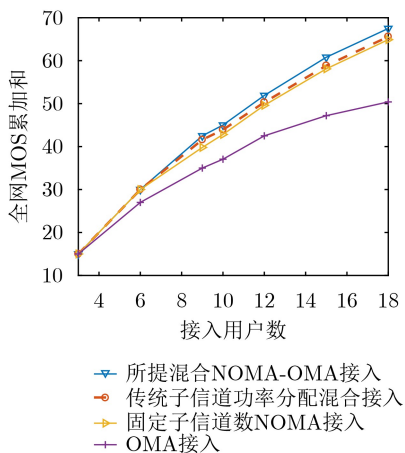


图5 不同网络规模下的算法比较

速降低。然而，所提混合NOMA接入方式由于可根据具体业务需求进行灵活分配，取得更高的全网MOS和。

图6采用Jains公平指数(Jains Fairness Index, JFI)<sup>[17]</sup>比较不同接入方案下的用户公平性。JFI是一种常用资源分配公平指标，定义为

$$J_{QoE}(\mu) = \frac{\left(\sum_{k \in K} \text{MOS}(\mu)\right)^2}{M \sum_{k \in K} [\text{MOS}(\mu)]^2} \quad (18)$$

图6中可见，基于QoE所得到的用户公平性在各种接入方式中均优于基于QoS的接入标准。随着服务用户数量的增加，所提基于QoE的混合NOMA方式表现出更好的健壮性。

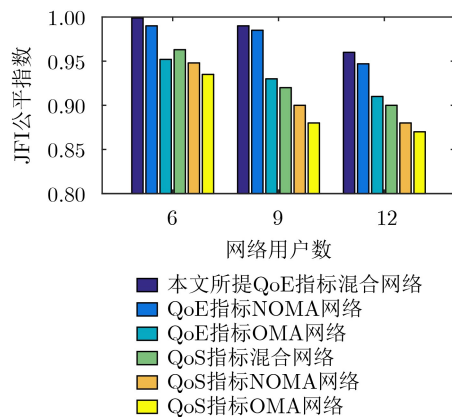


图6 不同资源分配方案的公平性比较

## 6 结论

本文以用户QoE优化为目标，研究多小区多载波混合NOMA网络中的资源分配问题，基于匹配博弈理论，提出了一种3方2阶段转移匹配算法并分析其收敛性，实现用户-基站的粗颗粒匹配和用户-子信道的细颗粒匹配。最后，基于用户MOS值进一步优化子信道的功率分配。在满足多样化业务需求的情况下，提高系统整体用户体验。仿真表明，相比OMA网络和固定接入NOMA网络中面向速率的优化方案，所提混合NOMA网络接入能获得全网用户QoE和公平性的进一步提高。

## 参考文献

[1] DING Zhiguo, LIU Yuanwei, CHOI J, *et al.* Application of non-orthogonal multiple access in LTE and 5G networks[J]. *IEEE Communications Magazine*, 2017, 55(2): 185–191. doi: 10.1109/MCOM.2017.1500657CM.

[2] SONG Lingyang, LI Yonghui, DING Zhiguo, *et al.* Resource management in non-orthogonal multiple access networks for

- 5G and beyond[J]. *IEEE Network*, 2017, 31(4): 8–14. doi: [10.1109/MNET.2017.1600287](https://doi.org/10.1109/MNET.2017.1600287).
- [3] WANG Xianling, ZHANG Haijun, TIAN Yue, *et al.* Locally cooperative interference mitigation for small cell networks with non-orthogonal multiple access: A potential game approach[C]. 2018 IEEE International Conference on Communications, Kansas City, USA, 2018: 1–6. doi: [10.1109/ICC.2018.8422825](https://doi.org/10.1109/ICC.2018.8422825).
- [4] SONG Zhengyu, NI Qiang, and SUN Xin. Distributed power allocation for nonorthogonal multiple access heterogeneous networks[J]. *IEEE Communications Letters*, 2018, 22(3): 622–625. doi: [10.1109/LCOMM.2017.2789282](https://doi.org/10.1109/LCOMM.2017.2789282).
- [5] 唐伦, 肖娇, 赵国繁, 等. 基于能效的NOMA蜂窝车联网动态资源分配算法[J]. *电子与信息学报*, 2020, 42(2): 526–533. doi: [10.11999/JEIT190006](https://doi.org/10.11999/JEIT190006).
- TANG Lun, XIAO Jiao, ZHAO Guofan, *et al.* Energy Efficiency Based Dynamic Resource Allocation Algorithm for Cellular Vehicular Based on Non-Orthogonal Multiple Access[J]. *Journal of Electronics & Information Technology*, 2020, 42(2): 526–533. doi: [10.11999/JEIT190006](https://doi.org/10.11999/JEIT190006).
- [6] ZHAI Daosen and DU Jianbo. Spectrum efficient resource management for multi-carrier-based NOMA networks: A graph-based method[J]. *IEEE Wireless Communications Letters*, 2018, 7(3): 388–391. doi: [10.1109/LWC.2017.2779485](https://doi.org/10.1109/LWC.2017.2779485).
- [7] SHI Jia, YU Wenjuan, NI Qiang, *et al.* Energy efficient resource allocation in hybrid non-orthogonal multiple access systems[J]. *IEEE Transactions on Communications*, 2019, 67(5): 3496–3511. doi: [10.1109/TCOMM.2019.2893304](https://doi.org/10.1109/TCOMM.2019.2893304).
- [8] ZENG Ming, YADAV A, DOBRE O A, *et al.* Vincent Poor. Energy-efficient joint user-RB association and power allocation for uplink hybrid NOMA-OMA[J]. *IEEE Internet of Things Journal*, 2019, 6(3): 5119–5131. doi: [10.1109/JIOT.2019.2896946](https://doi.org/10.1109/JIOT.2019.2896946).
- [9] SHAO Hongxiang, ZHAO Hangsheng, SUN Youming, *et al.* QoE-aware downlink user-cell association in small cell networks: A transfer-matching game theoretic solution with peer effects[J]. *IEEE Access*, 2016, 4: 10029–10041. doi: [10.1109/access.2016.2628382](https://doi.org/10.1109/access.2016.2628382).
- [10] WANG Wei, LIU Yuanwei, LUO Zhiqing, *et al.* Toward cross-layer design for non-orthogonal multiple access: A quality-of-experience perspective[J]. *IEEE Wireless Communications*, 2018, 25(2): 118–124. doi: [10.1109/MWC.2018.1700081](https://doi.org/10.1109/MWC.2018.1700081).
- [11] HE Shuan and WANG Wei. Multimedia upstreaming Cournot game in non-orthogonal multiple access internet of things[J]. *IEEE Transactions on Network Science and Engineering*, 2020, 7(1): 398–408. doi: [10.1109/TNSE.2019.2897483](https://doi.org/10.1109/TNSE.2019.2897483).
- [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. doi: [10.1109/TWC.2018.2855130](https://doi.org/10.1109/TWC.2018.2855130).
- [13] SAUL A and AUER G. Multiuser resource allocation maximizing the perceived quality[J]. *EURASIP Journal on Wireless Communications and Networking*, 2009, 2009: 6. doi: [10.1155/2009/341689](https://doi.org/10.1155/2009/341689).
- [14] NG C and HIRSCHBERG D S. Three-dimensional stable matching problems[J]. *SIAM Journal on Discrete Mathematics*, 1991, 4(2): 245–252. doi: [10.1137/0404023](https://doi.org/10.1137/0404023).
- [15] BODINE-BARON E, LEE C, CHONG A, *et al.* Peer effects and stability in matching markets[C]. The 4th International Symposium on Algorithmic Game Theory, Amalfi, Italy, 2011: 117–129. doi: [10.1007/978-3-642-24829-0\\_12](https://doi.org/10.1007/978-3-642-24829-0_12).
- [16] How much bandwidth does Skype need?[EB/OL]. <https://support.skype.com>, 2014.
- [17] JAIN R, CHIU D, and HAWKINS W. A quantitative measure of fairness and discrimination for resource allocation in shared computer system[R]. DEC-TR-301, 1984.
- 邵鸿翔: 男, 1983年生, 博士, 讲师, 研究方向为异构无线网络资源分配、博弈论、电磁频谱管理。
- 孙有铭: 男, 1988年生, 博士, 工程师, 研究方向为空地一体异构网络资源分配、博弈学习和电磁频谱管理。
- 蔡皓昊: 男, 1997年生, 硕士生, 研究方向为博弈学习理论和无线通信系统中的资源优化。

责任编辑: 马秀强