

基于非正交多址接入系统的多用户分组优化算法

吴广富 邓天垠* 苏开荣 李云

(重庆邮电大学移动通信技术重庆市重点实验室 重庆 400065)

摘要: 用户分组算法作为非正交多址接入(NOMA)的关键部分,对系统吞吐量和用户公平性具有重要影响。当用户数量和可用的资源增加时,用户分组的最佳调度将变得不可行,该文提出一种子带间多用户分组优化算法。该算法首先根据用户信道增益差异和子带复用用户数限制条件进行多用户初始分组处理,减小用户搜索空间,然后逐步完成初始分组用户间的优化组合,以几何平均用户吞吐量最大为用户分组准则,进一步提升小区边缘用户的吞吐量。仿真结果表明,所提算法与传统的用户分组算法相比,系统总吞吐量和几何平均用户吞吐量性能提升均超过3%。

关键词: 5G移动通信; 非正交多址接入; 比例公平调度; 多用户分组

中图分类号: TN929.5

文献标识码: A

文章编号: 1009-5896(2018)09-2080-08

DOI: [10.11999/JEIT171220](https://doi.org/10.11999/JEIT171220)

Multi-user Grouping Optimization Algorithm Based on Non-orthogonal Multiple Access Systems

WU Guangfu DENG Tianyin SU Kairong LI Yun

(Chongqing Key Lab of Mobile Communication Technology, The Chongqing University of Posts and Telecommunications, Chongqing 400065, China)

Abstract: As a key part in Non-Orthogonal Multiple Access (NOMA), user grouping is of particular importance for non-orthogonal multiple access system to improve throughput performance and user fairness. When the number of users and the available resources is increased, the optimal scheduling of user grouping will be infeasible, so a multi-user grouping optimization algorithm for different sub-bands is proposed. According to the user channel gain difference and the restrictions of the multiplexed user number in the same subband, the proposed algorithm firstly performs the process of the initial multi-user grouping to reduce the user's search space. Then, the optimized combination of the initial grouping users is gradually completed, and the maximum geometric mean user throughput is used as user grouping criterion, which can further enhance the cell-edge user throughput. Simulation results show that the system total throughput and geometric mean user throughput performance of the proposed algorithm can be improved by more than 3% compared with the traditional user grouping algorithms.

Key words: 5G mobile communication; Non-Orthogonal Multiple Access (NOMA); Proportional fairness scheduling; Multi-user grouping

收稿日期: 2017-12-22; 改回日期: 2018-05-15; 网络出版: 2018-07-12

*通信作者: 邓天垠 dtianyin@163.com

基金项目: 科技新星培育工程(KJXX2017019), 重庆市教委科学技术研究项目(KJ1704096), 2016年博士研究生高端人才培养项目(BYJS2016009), 国家自然科学基金(61701059, 61671096), 重庆市基础科学与前沿技术研究项目(cstc2017jcyjBX0005), 东南大学移动通信国家重点实验室开放研究基金(2015D07)

Foundation Items: The Science and Technology Nova Breeding Project (KJXX2017019), The Science and Technology Research Program of Chongqing Municipal Education Commission (KJ1704096), The Doctoral Student Training Program (BYJS2016009), The National Natural Science Foundation of China (61701059, 61671096), Chongqing Research Program of Basic Science and Frontier Technology (cstc2017jcyjBX0005), The Open Research Fund of National Mobile Communications Research Laboratory Southeast University (2015D07)

1 引言

随着物联网技术的飞速发展,智能终端的大规模商用,5G(5th-Generation)移动通信技术面临着巨大挑战。多址接入技术在每一代移动通信系统中都发挥着关键作用,5G移动通信系统也迫切希望通过多址接入技术来增加系统的复用用户数,并提升系统容量和频谱效率^[1]。传统的频分多址接入(Frequency Division Multiple Access, FDMA)、时分多址接入(Time Division Multiple Access, TDMA)、码分多址接入(Code Division Multiple Access, CDMA)、正交频分多址接入(Orthogonal Frequency Division Multiple Access, OFDMA)等技术已被广泛应用于移动通信系统。传统的多址接入技术主要是基于正交的,并且没有充分考虑码字域和功率域特征。在5G典型非正交多址接入(Non-Orthogonal Multiple Access, NOMA)系统中,多用户共享时间、频率资源,主要通过功率域拓展多用户接入能力,从而进一步提升系统吞吐量^[2,3]。

当一个小区中存在多个不同信道状态的用户时,如何对叠加在特定时间、频率资源上的用户进行分组,使得系统总吞吐量最大化,这是一个急需解决的问题。多用户分组算法作为多用户调度的重要环节,通过把小区内的用户进行分组,然后对已分组的用户进行资源分配(如时间、频率和功率等),从而进一步提升系统总吞吐量性能和用户间的公平性。文献[4]提出首尾两用户配对算法,该算法首先对每个用户按等效传输功率升序进行排列,然后对所有用户依次按头尾组合。文献[5]提出一种按照信道增益间隔大小划分用户组合的算法,该算法充分利用信道状态信息,根据二进制交错原理完成用户分组。文献[6]提出一种简化用户分组和功率分配过程的算法,该算法协同完成用户分组和功率分配过程,按照用户信道功率大小,对用户持续进行折半划分,最终使每一组包含两个用户。文献[7]预定义了用户匹配准则,即按照信道增益降序排列的用户,如果用户匹配能实现最优调度,那么低信道增益用户的加权因子比高信道增益用户的加权因子更大,利用预定义匹配准则限制用户分组数目,从而降低计算复杂度。文献[8,9]考虑了小区中心用户与小区边缘用户之间的公平性问题,其中文献[8]通过瞬时信道状态信息计算最大最小(Max-Min)用户可实现速率,通过平均信道状态信息计算最小最大(Min-Max)用户中断概率。文献[9]基于比例公平调度(Proportional Fair Scheduling, PFS)策略,通过求解最大PFS指标调整小区中心用户与边缘用户之间的公平性。以上研究仅仅考虑

两个用户组合情况,没有综合考虑复用用户数、系统吞吐量、用户公平性和算法复杂度。

本文提出的多用户分组优化算法首先将用户按照信道增益降序排列,并将排序后的用户进行初始分组,然后依次完成初始分组间用户的组合。用户分组过程中,前一组用户具有更高优先匹配权,前一组用户完成匹配后,后一组剩余用户再进行反向匹配;反向匹配时,前一组用户或用户组最多能被选用一次。整个匹配过程中,以几何平均用户吞吐量最大为准则,不满足分组准则的用户组合不再参与下次分组,从而减少了可能的用户组合数,最终降低了用户分组优化算法的计算复杂度。仿真结果表明,与传统的用户分组算法相比,本文提出的多用户分组优化算法具有更优的系统吞吐量性能和更好的用户公平性。

2 系统模型

采用OFDMA技术的NOMA系统模型如图1所示。假设小区内基站和终端用户的天线数为 $N_t = N_r = 1$ 。每个小区的用户数为 K ,总带宽 B 划分为 W 个子带,每个子带的带宽为 B/W ^[10,11]。

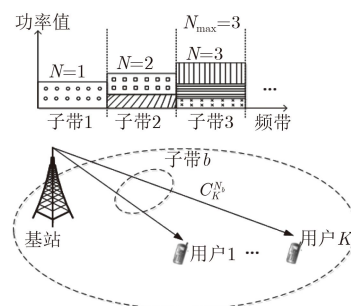


图1 下行NOMA的系统模型

在NOMA下行链路模型中,假设单个子带允许复用 N 个用户, N 必须满足 $N \leq N_{\max}$, $N_{\max}$ 为子带允许复用的最大用户数。不失一般性,用户按照信道增益降序排列, N 个排序后的用户集合可表示为 $U = \{u_1, u_2, \dots, u_N\}$ 。发送端复用后的发送信号,经过无线信道,接收端 u_n 接收的信号可表示为

$$y_n = h_n \sum_{k=1}^N x_k \sqrt{P_k} + I_n + n_n \quad (1)$$

其中, h_n 表示基站到用户 n 的信道响应系数, x_k 表示用户 k 的传输符号,满足 $E(x_k^2) = 1$, P_k 表示分配给用户 k 的传输功率, $P_k = \beta_k P_{BS}/W$, β_k 表示用户 k 的功率分配系数, I_n 表示小区间干扰, n_n 表示高斯白噪声。为了进一步分析接收信号的构成,式(1)可表示为

$$y_n = \underbrace{h_n x_n \sqrt{P_n}}_{\text{目标信号}} + \underbrace{h_n \sum_{k=n+1}^N x_k \sqrt{P_k}}_{\text{小区边缘用户信号}} + \underbrace{h_n \sum_{k=1}^{n-1} x_k \sqrt{P_k}}_{\text{小区内干扰}} + \underbrace{I_n}_{\text{小区间干扰}} + n_n \quad (2)$$

从式(2)可知, u_n 的接收信号由目标信号、小区边缘用户信号(可通过SIC消除)、小区内干扰(小区中心用户信号)和小区间干扰及噪声组成。在NOMA系统中, 为了提升用户间的公平性, 小区边缘用户将获得较大的传输功率, 从而对目标信号的检测造成较强干扰; 小区中心用户信号获得相对小的传输功率, 对目标信号造成较弱干扰。目标信号承载着 u_n 的信息, 可以先通过串行干扰消除(Successive Interference Cancellation, SIC)技术消除强干扰信号, 再通过信号检测技术获得目标信号。小区间的其余干扰信号, 可以通过小区间干扰随机化、干扰删除或协调回避技术来消除。

在接收端, u_n 的信号经过SIC处理后的信干噪比(Signal to Interference plus Noise Ratio, SINR)为

$$\text{SINR}_n^P = \frac{\beta_n}{\sum_{k=1}^{n-1} \beta_k + \frac{1}{\text{SINR}_n}} \quad (3)$$

其中, SINR_n 表示基站将所有传输功率分配给用户时的信干噪比, $\text{SINR}_n = |h_n|^2 P_{\text{BS}} / [W(P_I + P_N)]$, 其中 P_I , P_N 分别表示小区间干扰信号功率与噪声功率^[2]。

将式(3)代入香农公式, 可得 u_n 的吞吐量为

$$R_n = \frac{B}{W} \lg \left(1 + \frac{\beta_n}{\sum_{k=1}^{n-1} \beta_k + \frac{1}{\text{SINR}_n}} \right) \quad (4)$$

单个子带 b 上复用用户的总吞吐量可表示为

$$R_{\text{total}} = \frac{B}{W} \sum_{n=1}^N \lg \left(1 + \frac{\beta_n}{\sum_{k=1}^{n-1} \beta_k + \frac{1}{\text{SINR}_n}} \right) \quad (5)$$

从式(5)可以看出, 子带 b 的总吞吐量与复用用户的信道响应系数和功率分配系数有关, 所以多用户分组策略以及用户功率分配算法对系统性能起着决定性作用^[13]。NOMA系统中, 单独的功率分配

策略很难实现系统最佳吞吐量性能, 为了进一步提升系统吞吐量性能和复用用户间的公平性, 本文提出一种基于NOMA系统的多用户分组优化算法。

3 用户调度与多用户分组优化

3.1 用户调度策略

比例公平调度同时考虑用户的信道质量信息和历史吞吐量, 能够在系统吞吐量性能和服务公平性之间取得良好的折中。在NOMA系统中, 当所有子带进行调度后, 用户 n 的平均吞吐量可表示为

$$T_n(t+1) = (1 - t_c^{-1}) T_n(t) + t_c^{-1} \left(\sum_{b=1}^W R_b(n; t) / W \right) \quad (6)$$

其中, t_c 为平均时间窗口, $T_n(t)$ 为用户 n 在时间 t 内的平均吞吐量, $R_b(n; t)$ 为子带 b 上的用户 n 在时间 t 时的瞬时吞吐量, 当用户 n 未占用子带 b 时, $R_b(n; t) = 0$ 。

为实现子带 b 的最佳用户调度, 取对数平均吞吐量作为调度目标函数 J :

$$J = \sum_{n \in S} \lg(T_n(t+1)) \quad (7)$$

当 J 取最优值时, 此时的候选用户组合即为最佳的用户组合 S^* :

$$\begin{aligned} S^* &= \arg \max_{S \in Q} \sum_{n \in S} \lg \left(1 + \frac{R_b(n|S; t)}{(t_c - 1) T_n(t)} \right) \\ &= \arg \max_{S \in Q} \prod_{n \in S} \left(1 + \frac{R_b(n|S; t)}{(t_c - 1) T_n(t)} \right) \end{aligned} \quad (8)$$

其中, S^* 为最佳候选用户组合, S 为当前正在调度的候选用户组合, Q 表示所有可能的候选用户组合集, 所有可能的候选用户组合集和数可表示为 $|Q| = \sum_{n=1}^N C_K^N$, K 和 N 分别表示小区总用户数和单个子带允许复用的用户数。

当 t_c 远大于1时, 比例公平调度指标表示为 $S^* = \arg \max_{S \in Q} f(S)$, 其中 $f(S)$ 近似于

$$f(S) \triangleq \sum_{n \in S} T_n^{-1}(t) R_b(n|S; t) \quad (9)$$

3.2 NOMA下行链路多用户分组算法

NOMA下行链路通信过程中, 小区内的每个用户向基站反馈各自的信道状态信息(Channel State Information, CSI), 基站根据用户反馈信息将 K 个用户按照信道增益大小降序排列, 排序后的候选用户集可表示为 $U = \{u_1, u_2, \dots, u_K\}$, 且满足 $|h_1| > |h_2| > \dots > |h_K|$ 。基站将频带资源 B 划分为 W 个子带, 假设子带 b 允许复用的用户数为 N_b ,

$b \in \{1, 2, \dots, W\}$ 。为进一步提升系统性能, 针对子带内复用用户的组合问题, 采用本文所述的多用户分组优化算法完成小区内所有用户的分组, 能实现用户组合的公平调度。

所述多用户分组算法的流程图如图2所示, 具体实现过程为:

步骤 1 选择子带 b , 确定子带复用用户数 N_b : 子带复用用户数 N_b 与信令开销和接收复杂度密切相关, N_b 越大, 额外的信令开销就越大, 接收复杂度就越高。综合考虑性能、复杂度和系统开销因素, 子带复用用户数通常取值为 $N_b = [2, 3, 4]$;

步骤 2 将 K 个用户进行初始分组: 当 K 能被 N_b 整除时, 将 K 个用户平均分成 N_b 组, 每一个组合用户数为 K/N_b , 每一个用户组合情况为

$$\left. \begin{aligned} G_1 &= [u_1, u_2, \dots, u_{K/N_b}] \\ G_2 &= [u_{K/N_b+1}, u_{K/N_b+2}, \dots, u_{2K/N_b}] \\ &\vdots \\ G_{N_b} &= [u_{(K-K/N_b)+1}, u_{(K-K/N_b)+2}, \dots, u_K] \end{aligned} \right\} \quad (10)$$

当 K 不能被 N_b 整除时, 将 K 个用户分成 N_b 组, 前 $N_b - (K \bmod N_b)$ 个组合的用户数为 $\lfloor K/N_b \rfloor$, 后 $(K \bmod N_b)$ 个组合的用户数为 $\lfloor K/N_b \rfloor + 1$, 其中, $\bmod$ 表示取余符号, $\lfloor \bullet \rfloor$ 表示向下取整。每一个用户组合情况为

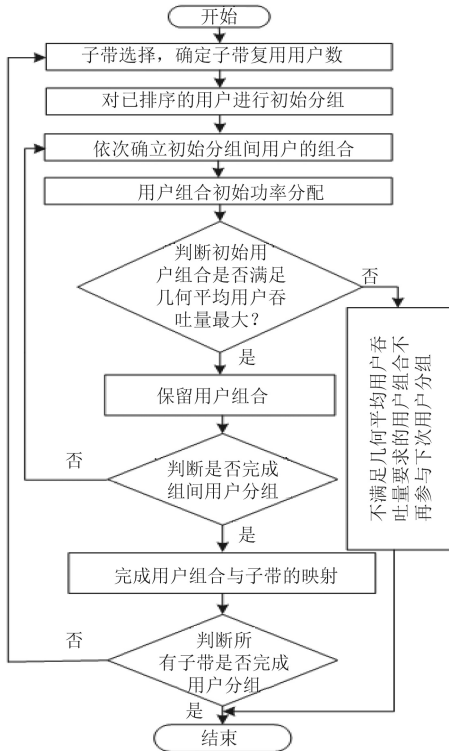


图2 多用户分组算法流程图

$$\left. \begin{aligned} G_1 &= [u_1, u_2, \dots, u_{\lfloor K/N_b \rfloor}] \\ G_2 &= [u_{\lfloor K/N_b \rfloor+1}, u_{\lfloor K/N_b \rfloor+2}, \dots, u_{2\lfloor K/N_b \rfloor}] \\ &\vdots \\ G_{N_b} &= [u_{K-\lfloor K/N_b \rfloor}, u_{K-\lfloor K/N_b \rfloor+1}, \dots, u_K] \end{aligned} \right\} \quad (11)$$

步骤 3 依次确定相邻初始分组间用户组合情况, 并对所有可能的用户组合进行初始功率分配:

为了确保用户匹配过程的准确性和低复杂度, 采用分数阶功率分配算法^[14]对候选用户组合进行初始功率分配, 用户 n 的传输功率可通过式(12)获得:

$$p_n = \frac{P}{\sum_{j \in S, S \subseteq \Omega_k} (g_j / (I_j + n_j))^{-\alpha_{\text{fpc}}} \left(\frac{g_n}{I_n + n_n} \right)^{-\alpha_{\text{fpc}}}} \quad (12)$$

其中, g_n 表示第 n 个用户的等效信道增益, I_n 和 n_n 分别表示第 n 个用户的小区间干扰和加性高斯白噪声, α_{fpc} 为分数阶功率分配的衰减因子, P 为初始功率分配所需的功率, S 表示当前调度的用户组合, Ω_k 表示前 k 个初始分组进行用户组合后所有可能的用户组合集;

步骤 4 确定前两组初始分组的候选用户组合集 Ω_2^* : 对于当前正在匹配的两组初始分组, 首先完成前一组中所有用户与后一组中用户的匹配, 选出满足几何平均用户吞吐量最大的用户组合作为候选用户组, 然后判断候选用户组是否完全包含后一组的用户, 若后一组中仍有用户未完成分组, 则考虑后一组中剩余用户与前一组所有用户的匹配情况, 依次选出满足几何平均用户吞吐量最大的用户组合作为候选用户组。组合过程中, 后一组的同一用户被选中的次数不能超过两次, 对于后一组剩余用户的匹配, 前一组的用户或用户组只能被唯一地选取。其中几何平均用户吞吐量目标函数为

$$\left. \begin{aligned} \Omega_k^* &= \arg \max_{\{\Omega_k\}} \left\{ \sqrt[k]{\prod_{u=1}^k R_u} \right\} \\ R_u &= \frac{B}{W} \lg \left(1 + \frac{g_u p_u}{\sum_{n=1}^{u-1} g_n p_n + I_u + n_u} \right) \end{aligned} \right\} \quad (13)$$

其中, R_u 表示组合集 Ω_k 中某个用户组合的第 u 个用户的吞吐量。 g_u 是第 u 个用户对应的等效信道增益, p_u 为第 u 个用户的初始传输功率值, I_u 和 n_u 分别表示第 u 个用户的小区间干扰和信道加性高斯白噪声;

步骤 5 将步骤4所得的候选用户组合作为下一次用户分组的基组合, 采用与步骤4相同的分组

原理,完成基组合与第3组初始分组的用户组合,从而确定前3组初始分组的候选用户组合 Ω_3^* ;

步骤 6 按照步骤3~步骤5的原理,循环操作,直到前 N_b 个初始分组都完成用户组合;

步骤 7 步骤6最终所得的候选用户组合 $\Omega_{N_b}^*$ 即为子带 b 进行用户调度时所有可能的用户组合,在用户调度过程中,调度器计算 $\Omega_{N_b}^*$ 中每一个用户组合的加权吞吐量和,选出满足加权吞吐量和最大的一组用户组合作为当前的调度结果,调度准则如式(14):

$$\{S^*, b\} = \arg \max_{S \subseteq \Omega_{N_b}^*, b} \sum_{n \in S} T_n^{-1}(t) R_b(n|S; t) \quad (14)$$

步骤 8 判断所有子带是否完成用户分组,否则反复执行步骤1~步骤7,直到所有子带完成用户分组为止。

3.3 算法复杂度分析

假设小区总的用户数为 K ,子带 b 的复用用户数为 N_b ,子带总数为 W ,全搜索用户分组算法会考虑 N_b 个复用用户组合的所有情况,在同一子带固定复用用户数的情况下,其复杂度可表示为 $O_1 = C_K^{N_b}$ 。信道增益间隔用户分组算法^[4,15]首先根据标准信道增益与噪声功率的比值将用户分类,此过程复杂度为 $K \lg K$,然后对已分类的用户按照信道增益间隔进行分簇处理,最终所有可能的用户组合数为 K/N_b 。所提多用户分组优化算法,在考虑前两组初始分组的用户组合时,所有可能的用户组合数为 $(K/N_b)^2$,循环相同的操作时,所有可能的用户数呈等比数列的形式递增,等比数列的公比为2,整个分组过程中考虑到的所有可能分组组合总数为 $O_2 = (K/N_b)^2 (2^{N_b-1} - 1)$ 。所述多用户分组算法,考虑前两组初始分组的用户组合时,最终保留的用户组合数不超过 $2K/N_b$,当所有初始分组的用户组合完成后,最终调度时可能的候选用户组合数小于 $(K/N_b) \cdot 2^{N_b-1}$ 。当小区用户数为60,子带复用用户数为2到6时,以调度用户组合数表示计算复杂度。表1给出了计算复杂度数字对比,其中信道增益间隔用户分组算法的复杂度由用户分类步骤和分簇过程决定,括号中的数字表示用户分类步骤的复杂度,通过计算复杂度分析可知,所提多用户

分组算法的复杂度远低于全搜索用户分组算法的复杂度,与信道增益间隔用户分组算法相比,复杂度略高,但是所提算法通过仿真分析可知,系统总吞吐量和几何平均用户吞吐量性能均更优,可广泛应用在实际系统中。

4 仿真结果

4.1 仿真参数

在NOMA下行链路中,本文选取总吞吐量和几何平均用户吞吐量两个指标,对所述的多用户分组优化算法进行MATLAB仿真验证。其中,几何平均用户吞吐量能够很好地反映用户间的公平性^[16]。小区布局为六边形网络19蜂窝模型,站点间距设置为0.5 km,载波频率为2 GHz,系统带宽为10 MHz,子带带宽为1 MHz,载波间隔设置为15 kHz,FFT点数为1024,符号周期为66.67 μ s+CP:4.69 μ s,基站和终端用户的天线数为 $N_t = N_r = 1$,噪声密度为-170 dBm/Hz,最大多普勒频移设置为5.55 Hz,信道估计状态为理想条件。

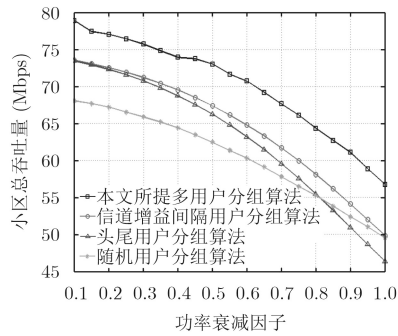
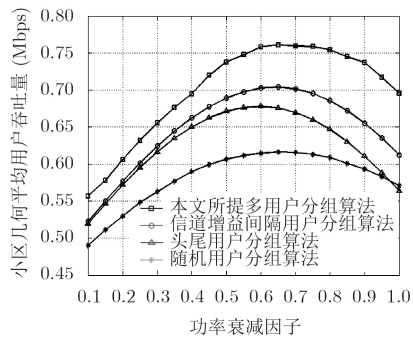
4.2 仿真分析

图3展示了子带复用用户数为3时功率衰减因子与总吞吐量的关系。仿真结果表明,小区总吞吐量随着功率衰减因子的增加而降低,这是因为功率衰减因子增加时,低信道增益用户将获得更多的传输功率,高信道增益用户将获得相对少的传输功率。同时,所提多用户分组优化算法的小区总吞吐量性能明显优于传统的用户分组算法,如信道增益间隔用户分组算法^[5,15]、头尾用户分组算法^[4]和随机用户分组算法^[5]。当功率衰减因子大于0.8时,头尾用户分组算法将信道增益最好的用户和信道增益最差的用户依次组合在一起,信道增益差的用户在功率衰减因子较大的情况下获得较多的传输功率,而信道增益最好的用户获得极少的传输功率,造成高信道增益用户损耗的吞吐量大于低信道增益用户获得的吞吐量,从而导致头尾用户分组算法的吞吐量性能比随机用户分组算法的吞吐量性能更差。

图4展示了子带复用用户数为3时功率衰减因子与几何平均用户吞吐量的关系,仿真结果表明,小区几何平均用户吞吐量随着功率衰减因子的增加先增加后降低,这是因为小区几何平均用户吞吐量反

表 1 所提算法与传统的用户分组算法复杂度比较

复用用户数 N_b	2	3	4	5	6
全搜索用户分组	1.77×10^3	3.42×10^4	4.88×10^5	5.46×10^6	5.01×10^7
信道增益间隔用户分组	30(354)	20(354)	15(354)	12(354)	10(354)
所提多用户分组	60	80	120	192	320

图3 功率衰减因子与总吞吐量的关系($N=3$)图4 功率衰减因子与几何平均用户吞吐量的关系($N=3$)

映了系统总吞吐量性能和用户公平性的折中情况，随着功率衰减因子的增加，低信道增益用户将获得越来越多的传输功率。低信道增益用户的传输功率增加时（功率衰减因子在0.1到0.6范围内），用户间公平性的提升比系统总吞吐量性能的下降更显著，从而导致几何平均用户吞吐量性能逐渐增加，当衰减因子大于0.6以后，用户间公平性的提升比系统总吞吐量性能的下降更缓慢，从而导致几何平均用户吞吐量性能逐渐降低。同时，所提多用户分组优化算法的小区几何平均用户吞吐量性能明显优于传统的用户分组算法。本文所述多用户分组算法首先对用户进行预分组处理，这样能够保证复用用户间存在信道增益差；在分组优化过程中采用分数阶功率分配方法来预分配功率，保证用户组合筛选更加准确；分组过程中选取几何平均用户吞吐量最大的用户组合作为最终用户组合，保证系统具有较好的吞吐量性能，同时还能提升用户间的公平性。仿真分析可知，为了实现系统吞吐量性能和用户公平性的较好折中，功率衰减因子优选为0.6。

图5和图6分别展示了子带复用用户数为2和3时小区用户数与小区总吞吐量的关系，仿真结果表明，小区总吞吐量随着小区用户数的增加而增加。所提多用户分组优化算法与信道增益间隔用户分组算法相比，小区总吞吐量性能提升超过4%；所提多用户分组优化算法与头尾用户分组算法相比，小区总吞吐量性能提升超过8%。所提多用户分组优

化算法在用户分组过程中采用分数阶功率分配方法预分配功率，不仅保证用户组合筛选更加准确，而且保证小区具有较好的总吞吐量性能。

图7和图8分别展示了子带复用用户数为2和3时小区用户数与几何平均用户吞吐量的关系，仿真结果表明，几何平均用户吞吐量随着小区用户数的增加而降低。所提多用户分组优化算法与信道增益间隔用户分组算法相比，几何平均用户吞吐量性能提升超过3%；所提多用户分组优化算法与头尾用户分组算法相比，几何平均用户吞吐量性能的提升超过10%。所提多用户分组优化算法在用户分组过程中以几何平均用户吞吐量最大为目标，子带调度过程以加权吞吐量和最大为准则，能够最大程度保证复用用户间具有更好的公平性。

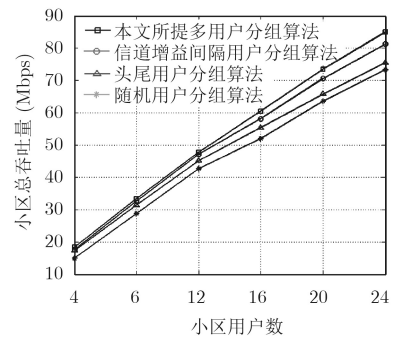
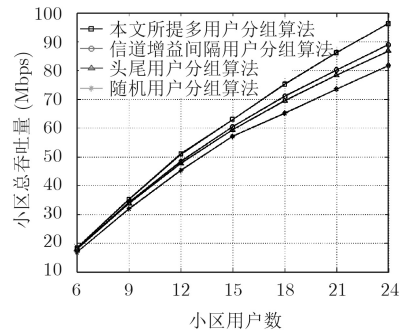
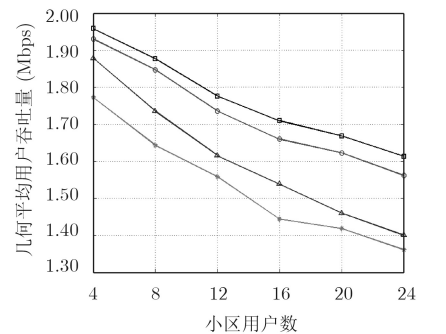
图5 小区用户数与总吞吐量的关系($N=2$)图6 小区用户数与总吞吐量的关系($N=3$)图7 小区用户数与几何平均用户吞吐量的关系($N=2$)

图9和图10分别展示了理想状态和非理想状态下小区用户数与小区总吞吐量和几何平均用户吞吐量的关系。实际系统中,当信道估计状态为非理想状态时,接收端会造成错误传播现象^[13],从而降低系统性能增益。所提多用户分组算法保证相同组合中用户间存在一定的信道增益差,信道估计在非理想状态下对接收端信号的检测影响不大。仿真结果表明,非理想状态下系统的总吞吐量性能和几何平均用户吞吐量性能损耗均不超过1%。

5 结束语

基于5G非正交多址接入系统,本文提出了多用户分组优化算法,它充分利用每个用户的信道状

态信息进行排序,并对排序后的用户进行初始分组,然后依次完成初始分组间用户的优化组合,最后根据加权吞吐量和最大准则完成最终候选用户与子带的映射。优化组合过程中依次将不满足几何平均用户吞吐量指标的用户组合舍去,不仅可以保证系统具有可以接受的复杂度,而且能保证复用用户间具有更好的公平性。所提的多用户分组优化算法,考虑了大于2个复用用户的分组情况,因此提高了系统吞吐量,在未来移动通信系统中具有广阔的应用前景。

参考文献

- [1] ALI M S, HOSSAIN E, and DONG I K. Non-orthogonal multiple access (NOMA) for downlink multi-user MIMO systems: User clustering, beamforming, and power allocation[J]. *IEEE Access*, 2016, 5(1): 565–577. doi: [10.1109/ACCESS.2016.2646183](https://doi.org/10.1109/ACCESS.2016.2646183).
- [2] ISLAM S M R, AVAZOV N, DOBRE O A, *et al.* Power-domain non-orthogonal multiple access (NOMA) in 5G systems: Potentials and challenges[J]. *IEEE Communications Surveys & Tutorials*, 2017, 19(2): 721–742. doi: [10.1109/COMST.2016.2621116](https://doi.org/10.1109/COMST.2016.2621116).
- [3] HIGUCHI K and BENJEBBOUR A. Non-Orthogonal Multiple Access (NOMA) with successive interference cancellation for future radio access[J]. *IEICE Transactions on Communications*, 2015, 98(3): 403–414. doi: [10.1587/transcom.E98.B.403](https://doi.org/10.1587/transcom.E98.B.403).
- [4] CHEN Shuang, PENG Kewu, and JIN Huangping. A suboptimal scheme for uplink NOMA in 5G systems[C]. *IEEE Wireless Communications and Mobile Computing Conference*. Dubrovnik, Croatia, 2015: 1429–1434. doi: [10.1109/IWCMC.2015.7289292](https://doi.org/10.1109/IWCMC.2015.7289292).
- [5] ZHANG Han, ZHANG Dekun, MENG Weixiao, *et al.* User pairing algorithm with SIC in non-orthogonal multiple access system[C]. *IEEE International Conference on Communications*. Kuala Lumpur, Malaysia, 2016: 1–6. doi: [10.1109/ICC.2016.7511620](https://doi.org/10.1109/ICC.2016.7511620).
- [6] AL-ABBASI Z Q and SO D K C. User-pairing based non-orthogonal multiple access (NOMA) system[C]. *Vehicular Technology Conference*. Nanjing, China, 2016: 1–5. doi: [10.1109/VTCSpring.2016.7504524](https://doi.org/10.1109/VTCSpring.2016.7504524).
- [7] MEI Jie, YAO Lei, LONG Hang, *et al.* Joint user pairing and power allocation for downlink non-orthogonal multiple access systems[C]. *IEEE International Conference on Communications*. Kuala Lumpur, Malaysia, 2016: 1–6. doi: [10.1109/ICC.2016.7510914](https://doi.org/10.1109/ICC.2016.7510914).
- [8] TIMOTHEOU S and SKRIKIDI I. Fairness for non-orthogonal multiple access in 5G systems[J]. *IEEE Signal Processing Letters*, 2015, 22(10): 1647–1651. doi: [10.1109/](https://doi.org/10.1109/)

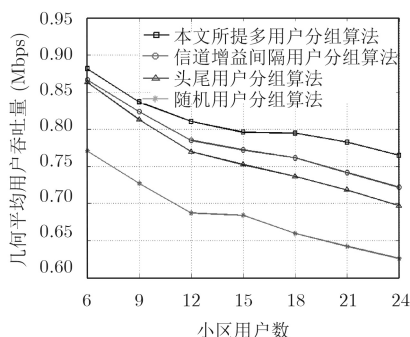


图8 小区用户数与几何平均用户吞吐量的关系($N=3$)

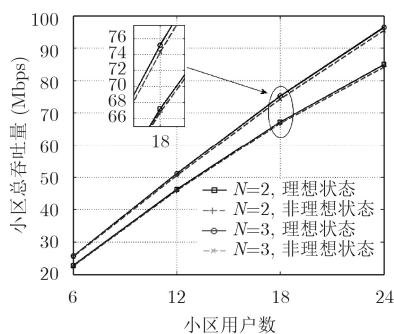


图9 小区用户数与总吞吐量的关系(理想状态vs非理想状态)

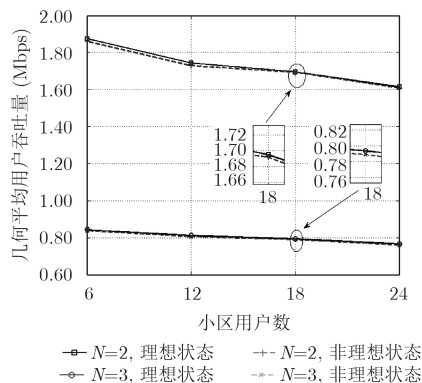


图10 小区用户数与几何平均用户吞吐量的关系(理想状态vs非理想状态)

- LSP.2015.2417119.
- [9] CHEN Xiaohang, BENJEBBOUR A, LI Anxin, *et al.* Multi-user proportional fair scheduling for uplink non-orthogonal multiple access (NOMA)[C]. Vehicular Technology Conference. Seoul, South Korea, 2015: 1–5. doi: [10.1109/VTCSpring.2014.7022998](https://doi.org/10.1109/VTCSpring.2014.7022998).
- [10] LI Xunan, LI Chong, and JIN Ye. Dynamic resource allocation for transmit power minimization in OFDM-based NOMA systems[J]. *IEEE Communications Letters*, 2016, 20(12): 2558–2561. doi: [10.1109/LCOMM.2016.2612688](https://doi.org/10.1109/LCOMM.2016.2612688).
- [11] CAI Wenbo, CHEN Chen, BAI Lin, *et al.* Subcarrier and power allocation scheme for downlink OFDM-NOMA systems[J]. *IET Signal Processing*, 2017, 11(1): 51–58. doi: [10.1049/iet-spr.2016.0188](https://doi.org/10.1049/iet-spr.2016.0188).
- [12] LI Anxin, HARADA A, and KAYAMA H. A novel low computational complexity power assignment method for non-orthogonal multiple access systems[J]. *IEICE Transactions on Fundamentals of Electronics, Communications and Computer Sciences*, 2014, 97(1): 57–68. doi: [10.1587/transfun.E97.A.57](https://doi.org/10.1587/transfun.E97.A.57).
- [13] 李钊, 戴晓琴, 陈柯宇, 等. 非正交多址接入下行链路用户匹配与功率优化算法[J]. 电子与信息学报, 2017, 39(8): 1804–1811. doi: [10.11999/JEIT161197](https://doi.org/10.11999/JEIT161197).
- LI Zhao, DAI Xiaoqin, CHEN Keyu, *et al.* User matching and power optimization algorithm for downlink NOMA[J]. *Journal of Electronics & Information Technology*, 2017, 39(8): 1804–1811. doi: [10.11999/JEIT161197](https://doi.org/10.11999/JEIT161197).
- [14] OTO N, KISHIYAMA Y, and HIGUCHI K. Performance of non-orthogonal access with SIC in cellular downlink using proportional fair-based resource allocation[C]. International Symposium on Wireless Communication Systems (ISWCS), Paris, 2012: 476–480. doi: [10.1109/ISWCS.2012.6328413](https://doi.org/10.1109/ISWCS.2012.6328413).
- [15] ALI M S, TABASSUM H, and HOSSAIN E. Dynamic user clustering and power allocation for uplink and downlink non-orthogonal multiple access (NOMA) systems[J]. *IEEE Access*, 2017, 4(1): 6325–6343. doi: [10.1109/ACCESS.2016.2604821](https://doi.org/10.1109/ACCESS.2016.2604821).
- [16] LI Anxin, BENJEBBOUR A, CHEN Xiaohang, *et al.* Investigation on hybrid automatic repeat request (HARQ) design for NOMA with SU-MIMO[C]. IEEE, International Symposium on Personal, Indoor, and Mobile Radio Communications. Hong Kong, China, 2015: 590–594. doi: [10.1109/PIMRC.2015.7343368](https://doi.org/10.1109/PIMRC.2015.7343368).
- 吴广富：男，1980年生，博士生，工程师，研究方向为卫星移动通信基带算法、卫星通信侦察和干扰、5G物理层关键技术等。
- 邓天垠：男，1992年生，硕士生，研究方向为5G无线通信技术。
- 苏开荣：男，1962年生，教授，主要从事现代通信网、信息技术应用领域研究与开发。
- 李 云：男，1974年生，博士，教授，主要从事无线移动通信理论与技术的研究工作。