

doi:10.14132/j.cnki.1673-5439.2020.02.012

# 大规模 MIMO NOMA 系统中联合功率分配的用户配对

张 伟<sup>1,2</sup>, 傅友华<sup>1,2</sup>

(1. 南京邮电大学 电子与光学工程学院, 江苏 南京 210023  
2. 南京邮电大学 射频集成与微组装技术国家地方联合工程实验室, 江苏 南京 210023)

**摘要:**文中探讨了大规模 MIMO 非正交多址(NOMA)网络中的用户配对问题。在上行链路,基站根据大尺度衰落系数来完成用户配对,配对的两个用户共享同一个导频,在下行链路,配对的两个用户采用 NOMA 的形式发送数据。由于用户配对固有地与功率分配交织,故根据用户的服务质量(QoS)要求,优化边缘用户(EU)和中心用户(CU)之间的用户配对和功率分配,旨在最大化系统的吞吐量,这是混合整数规划问题。为了解决这个非凸问题,首先利用交替优化的方法获得最优功率分配矩阵,进而计算出速率矩阵;然后基于匈牙利算法提出最佳用户匹配方案,且考虑到匈牙利算法用户之间的竞争问题,提出一种低复杂度的用户配对算法。仿真结果表明,在大规模 MIMO NOMA 系统中,提出的用户配对的 NOMA 的性能明显优于正交多址(OMA),并优于采用随机用户配对的 NOMA 的性能。

**关键词:**大规模 MIMO;非正交多址(NOMA);用户配对;功率分配

**中图分类号:** TN929.5    **文献标志码:** A    **文章编号:** 1673-5439(2020)02-0072-09

## User Pairing for Joint Power Allocation in Massive MIMO NOMA Systems

ZHANG Wei<sup>1,2</sup>, FU Youhua<sup>1,2</sup>

(1. College of Electronic and Optical Engineering, Nanjing University of Posts and Telecommunications, Nanjing 210023, China  
2. National and Local Joint Engineering Laboratory of Radio Frequency Integration and Microassembly Technology, Nanjing University of Posts and Telecommunications, Nanjing 210023, China)

**Abstract:** A user pairing problem in the massive MIMO non-orthogonal multiple access (NOMA) network is discussed. The base station performs user pairing according to the large-scale fading coefficient. The two users paired in the uplink share the same pilot, and the two users in the same group send data in the form of NOMA in the downlink. The purpose of optimizing user pairing and power allocation between the edge user (EU) and the central user (CU) is to maximize system throughput. To solve this problem, the optimal power allocation matrix is obtained by the alternating optimization method, and then the rate matrix is calculated. Then, the best user matching scheme is proposed based on Hungarian algorithm. Considering the competition among users in the Hungarian algorithm, a low complexity user pairing algorithm is proposed. Simulation results show that in the massive MIMO NOMA system, the user pairing scheme has better performance in the NOMA system than the orthogonal multiple access (OMA) system and random user pairing in the NOMA system.

**Keywords:** massive MIMO; non-orthogonal multiple access (NOMA); user pairing; power allocation

收稿日期: 2019-08-13    本刊网址: <http://nyzr.njupt.edu.cn>

基金项目: 国家自然科学基金(61771257)资助项目

作者简介: 张伟,男,硕士研究生;傅友华(通信作者),女,副教授,博士, [fuyh@njupt.edu.cn](mailto:fuyh@njupt.edu.cn)

引用本文: 张伟,傅友华. 大规模 MIMO NOMA 系统中联合功率分配的用户配对[J]. 南京邮电大学学报(自然科学版), 2020, 40(2): 72-80.

与现代网络相比,5G 网络面临的一个重要挑战是提高频谱效率,提高频谱效率的关键技术之一是大规模 MIMO<sup>[1-2]</sup>,指的是基站(BS)具有大量天线,利用大空间复用增益实现高吞吐量,以及大阵列增益提高覆盖范围。另一项关键技术是非正交多址(NOMA)<sup>[3-4]</sup>,NOMA 的关键思想是在同一时间/频率资源上为多个用户服务,从而提高小区的频谱效率。NOMA 的典型方法是在发送信号之前,使用不同的发送功率对用户进行分组并叠加其数据信号<sup>[5-6]</sup>,这种方法被称为功率域 NOMA。

最近已有文献将 NOMA 应用到大规模 MIMO 系统中,充分利用大规模 MIMO 的大阵列增益以及 NOMA 共享资源的优势,进一步提高系统性能。文献[7]考虑 MIMO 技术在 NOMA 系统中的应用,作者认为 NOMA 仅在基站天线数小于用户天线总数时有用,提出了一种 MIMO-NOMA 预编码和检测矩阵设计方案,并针对具有一组固定功率分配系数的情况分析了性能。但最新的研究文献[8]提出了一种大规模 MIMO 系统中使用基于共享导频的 NOMA 方案,结果表明,当基站天线数远大于小区用户数时,在用户可获得下行链路信道状态信息的情况下,使用 NOMA 可以增加大规模 MIMO 系统的吞吐量。文献[9]分析了信道老化对共享导频的大规模 MIMO-NOMA 系统可实现速率的影响,得出在缓慢变化的信道中,使用 NOMA 方案优于 OMA 的结论。文献[8-9]说明某些情况下在大规模 MIMO 中应用 NOMA 是有意义的,但他们都没有给出具体的用户配对方法以及功率分配策略。

在 NOMA 系统中,合理地进行用户配对<sup>[10-12]</sup>与功率分配<sup>[13-15]</sup>以及二者的结合<sup>[16-17]</sup>可以有效提高系统吞吐量。文献[10]采用匹配理论来解决 NOMA 网络中的用户配对问题,通过使用玩家的个人信息和他们的偏好来解决两个不同集合中的玩家匹配组合问题。文献[11]中研究了最佳用户配对,考虑了所有 NOMA 用户的最小速率约束,推导出最佳配对的数学表达式。文献[12]研究了两种情况下的用户配对,即具有固定功率分配的 NOMA 和认知无线电的 NOMA,但没有给出明确的用户配对策略。文献[13]提出了一种低复杂度的功率分配算法,通过结合比例公平调度器来最大化系统吞吐量。文献[14]研究了下行链路单输入单输出 NOMA 系统中的功率分配问题,证明了最佳解码顺序是让每个用户首先解码具有较差信道增益用户的信号。文献[15]研究了两个用户之间的最佳功率分配,在最

小用户速率要求的约束下最大化网络容量,衍生出两种封闭形式的功率分配解决方案。文献[16]提出了认知无线电 NOMA 网络中功率分配的概念,研究了一种在 NOMA 系统中基于用户配对的功率分配的有效方法。文献[17]提出两步资源调度算法,该算法首先将用户分组成簇,然后基于 Karush-Kuhn-Tucker(KKT)条件确定最优功率控制。

文献[10-17]关于用户配对的研究都假设 BS 可以获得完全的信道状态信息(CSI)。文献[8]研究了大规模 MIMO 与 NOMA 的结合,在上行链路发送导频进行信道估计,但它假设中心用户的大尺度衰落系数远大于边缘用户的大尺度衰落系数,故不需要考虑用户配对。而在本文所考虑的大规模 MIMO NOMA 系统中,在上行链路中,基站根据大尺度衰落系数来完成用户配对,配对的两个用户向基站发送同一个导频,基站进行信道估计,估计出两用户到基站间信道的线性组合;在下行链路中,BS 使用估计的 CSI 对所有用户进行波束成形操作,配对的两个用户共享同一个波束,基站以 NOMA 的形式向用户发送数据。由于用户配对与功率分配天然地交织在一起,所以本文研究大规模 MIMO NOMA 系统中的用户配对以及用户对之间最佳功率控制问题,对所有用户都有最低速率限制,以保证用户的服务质量。首先,用交替优化算法求出 NOMA 用户对的最佳功率控制,然后基于匈牙利算法提出最佳用户匹配方案,且考虑到匈牙利算法用户之间的竞争问题,提出一种低复杂度的用户配对算法。数值结果表明,在大规模 MIMO NOMA 系统中,与 OMA 以及用户随机配对相比,所提算法可以有效地提高系统吞吐量,同时确保了每个用户的服务质量(QoS)要求。

## 1 系统模型

### 1.1 信道模型

系统模型如图 1 所示,考虑单小区大规模 MIMO NOMA 系统,基站(BS)具有  $M$  根天线,小区内 有  $2K$  个单天线用户。在这些用户中, $K$  个用户位于小区边缘,称为边缘用户(EU),而其他  $K$  个用户位于小区中心,称为中心用户(CU)。假设时分双工(TDD)操作,在上行链路中用户发送导频,然后 BS 进行信道估计,利用信道互易性,上行链路的信道估计结果可用于执行下行链路多用户波束成形。这些操作必须在相同的信道相干间隔(CI)内完成,其中在一个相干间隔内信道几乎是恒定的。

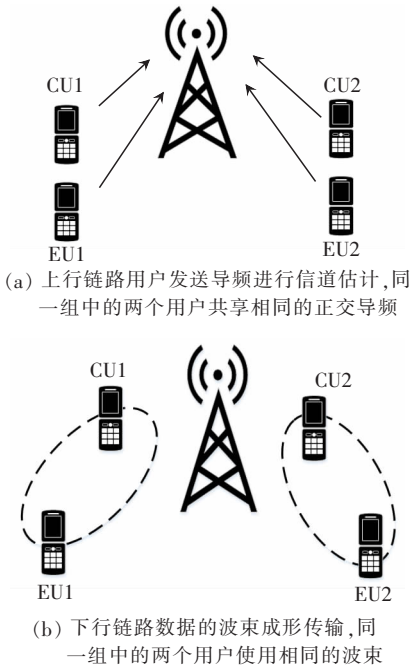


图 1 导频发送和波束成形阶段

将每个用户的小尺度衰落建模为独立的瑞利衰落。第  $k$  个边缘用户  $EU_k$  的小尺度衰落为

$$\mathbf{h}_k \sim CN(\mathbf{0}, \mathbf{I}_M), k=1, 2, \dots, K \quad (1)$$

相应的大尺度衰落系数为  $\beta_k^h, k=1, 2, \dots, K$ , 边缘用户  $EU_k$  的实际信道为  $\sqrt{\beta_k^h} \mathbf{h}_k$ 。第  $k$  个中心用户  $CU_k$  的小尺度衰落为

$$\mathbf{g}_k \sim CN(\mathbf{0}, \mathbf{I}_M), k=1, 2, \dots, K \quad (2)$$

相应的大尺度衰落系数为  $\beta_k^g, k=1, 2, \dots, K$ , 中心用户  $CU_k$  的实际信道为  $\sqrt{\beta_k^g} \mathbf{g}_k$ 。

假设 BS 知道大尺度衰落系数  $\beta_k^h$  和  $\beta_k^g$ , 且  $\beta_k^h < \beta_k^g$ , 然而小尺度衰落是先验未知的, 并且从一个 CI 到另一个 CI 是变化的。为了估计 BS 处的小尺度衰落, 在传统 TDD 大规模 MIMO 中, 小区中的用户在上行链路发送正交导频, 然而可用的正交导频序列的数量受 CI 的大小限制, 这限制了可以同时调度的用户数量。类似于文献[8], 考虑小区用户数  $2K$  大于可用正交导频序列数的情况, 为了便于讨论和分析, 假设只有  $K$  个正交导频序列可用, BS 将相同的导频分配给一个组中的两个用户, 其中一个在小区边缘, 一个在小区中心。由于两个用户使用相同的导频并具有相同的小尺度衰落统计数据, BS 无法区分他们的信道响应, 但是, BS 可以通过导频传输估计出两个用户信道的线性组合, 再使用估计的信道线性组合进行下行链路的波束成形操作。同时利用非正交多址 (NOMA) 的概念, 使用叠加编码对不同

用户的符号进行叠加, EU 通过将用户间干扰视为噪声来执行解码, 而 CU 首先执行 SIC 删除其他用户的数据, 然后解码自己的数据。

导频矩阵为  $\Phi \in C^{K \times K}$  包含  $K$  个正交导频序列, 满足  $\Phi \Phi^H = \mathbf{I}_K$ 。上行链路中, 基站接收到的导频信号  $\mathbf{Y}_u \in C^{M \times K}$  为

$$\mathbf{Y}_u = \sqrt{p_u} \mathbf{H} \mathbf{D}_h \mathbf{A}_h \Phi + \sqrt{p_u} \mathbf{G} \mathbf{D}_g \mathbf{A}_g \Phi + \mathbf{N}_u \quad (3)$$

其中,  $p_u$  是上行导频传输功率,  $\mathbf{H} = [\mathbf{h}_1, \mathbf{h}_2, \dots, \mathbf{h}_K] \in C^{M \times K}$  代表 EU 的小尺度衰落矩阵,  $\mathbf{D}_h = \text{diag}[\sqrt{\beta_1^h}, \sqrt{\beta_2^h}, \dots, \sqrt{\beta_K^h}]$  代表 EU 的大尺度衰落对角阵,  $\mathbf{A}_h = \text{diag}[\sqrt{\alpha_1^h}, \sqrt{\alpha_2^h}, \dots, \sqrt{\alpha_K^h}]$  代表 EU 的导频功率控制系数对角阵, 且  $0 < \alpha_k^h \leq 1$ ;  $\mathbf{G} = [\mathbf{g}_1, \mathbf{g}_2, \dots, \mathbf{g}_K] \in C^{M \times K}$  代表 CU 的小尺度衰落矩阵,  $\mathbf{D}_g = \text{diag}[\sqrt{\beta_1^g}, \sqrt{\beta_2^g}, \dots, \sqrt{\beta_K^g}]$  代表 CU 的大尺度衰落对角阵,  $\mathbf{A}_g = \text{diag}[\sqrt{\alpha_1^g}, \sqrt{\alpha_2^g}, \dots, \sqrt{\alpha_K^g}]$  代表 CU 的导频功率控制系数对角阵且  $0 < \alpha_k^g \leq 1$ ;  $\mathbf{N}_u \in C^{M \times K}$  是导频传输阶段的加性高斯白噪声, 其元素独立同分布服从  $CN(0, 1)$ 。

在不失一般性的情况下, 假设小区边缘的第  $k$  个用户  $EU_k$  与小区中心的第  $k$  个用户  $CU_k$  配对形成第  $k$  组, 并且它们使用相同的导频序列。

## 1.2 上行链路 (UL) 信道估计

基站 BS 首先通过右乘  $\Phi^H$  来处理所接收的导频信号, 并获得处理后的信号

$$\mathbf{y}_{u,k} = [\mathbf{Y}_u \Phi^H]_k = \sqrt{p_u} \alpha_k^h \beta_k^h \mathbf{h}_k + \sqrt{p_u} \alpha_k^g \beta_k^g \mathbf{g}_k + \mathbf{n}_{u,k}, k=1, 2, \dots, K \quad (4)$$

其中,  $\mathbf{n}_{u,k} = [\mathbf{N}_u \Phi^H]_k \sim CN(0, \mathbf{I}_M)$ ,  $[\cdot]_k$  代表矩阵的第  $k$  列。

对于边缘用户  $EU_k, \mathbf{h}_k$  的 MMSE 信道估计<sup>[18]</sup> 为

$$\hat{\mathbf{h}}_k = \frac{\sqrt{p_u} \alpha_k^h \beta_k^h}{p_u \alpha_k^h \beta_k^h + p_u \alpha_k^g \beta_k^g + 1} \mathbf{y}_{u,k}, k=1, 2, \dots, K \quad (5)$$

对于中心用户  $CU_k, \mathbf{g}_k$  的 MMSE 估计为

$$\hat{\mathbf{g}}_k = \frac{\sqrt{p_u} \alpha_k^g \beta_k^g}{p_u \alpha_k^h \beta_k^h + p_u \alpha_k^g \beta_k^g + 1} \mathbf{y}_{u,k}, k=1, 2, \dots, K \quad (6)$$

观察到  $\hat{\mathbf{h}}_k$  和  $\hat{\mathbf{g}}_k$  是平行的, 因此 BS 不能区分共享相同导频的用户的信道方向, 利用一种替代方式, 考虑上行链路用户  $EU_k$  与  $CU_k$  信道的线性组合  $\mathbf{w}_k$

$$\mathbf{w}_k = \sqrt{\alpha_k^h \beta_k^h} \mathbf{h}_k + \sqrt{\alpha_k^g \beta_k^g} \mathbf{g}_k, k=1, 2, \dots, K \quad (7)$$

对第  $k$  组用户的信道  $\mathbf{w}_k$  的 MMSE 估计

$$\hat{\mathbf{w}}_k = \frac{\sqrt{p_u} \alpha_k^h \beta_k^h + \sqrt{p_u} \alpha_k^g \beta_k^g}{p_u \alpha_k^h \beta_k^h + p_u \alpha_k^g \beta_k^g + 1} \mathbf{y}_{u,k}, k=1, 2, \dots, K \quad (8)$$

### 1.3 下行链路(DL)信号模型

用  $p_d$  表示 DL 信号传输功率,边缘用户  $EU_k$  接收到的信号为

$$y_k^{EU} = \sqrt{\beta_k^h} \mathbf{h}_k^T \mathbf{a}_k \sqrt{p_d \gamma_{k,h}} s_{k,h} + \sqrt{\beta_k^h} \mathbf{h}_k^T \mathbf{b}_k \sqrt{p_d \gamma_{k,g}} s_{k,g} + I_{k,h} + n_{k,h} \quad (9)$$

其中,  $I_{k,h} = \sqrt{\beta_k^h} \sum_{j=1, j \neq k}^K \mathbf{h}_k^T \mathbf{a}_j \sqrt{p_d \gamma_{j,h}} s_{j,h} + \sqrt{\beta_k^h} \sum_{j=1, j \neq k}^K \mathbf{h}_k^T \mathbf{b}_j \sqrt{p_d \gamma_{j,g}} s_{j,g}$  代表来自其它组的干扰。

类似地,中心用户  $CU_k$  接收到的下行链路信号为

$$y_k^{CU} = \sqrt{\beta_k^g} \mathbf{g}_k^T \mathbf{a}_k \sqrt{p_d \gamma_{k,h}} s_{k,h} + \sqrt{\beta_k^g} \mathbf{g}_k^T \mathbf{b}_k \sqrt{p_d \gamma_{k,g}} s_{k,g} + I_{k,g} + n_{k,g} \quad (10)$$

其中,  $I_{k,g} = \sqrt{\beta_k^g} \sum_{j=1, j \neq k}^K \mathbf{g}_k^T \mathbf{a}_j \sqrt{p_d \gamma_{j,h}} s_{j,h} + \sqrt{\beta_k^g} \sum_{j=1, j \neq k}^K \mathbf{g}_k^T \mathbf{b}_j \sqrt{p_d \gamma_{j,g}} s_{j,g}$  代表来自其它组的干扰。

第  $k$  个 NOMA 组中的传输符号是  $\sqrt{\gamma_{k,h}} s_{k,h} + \sqrt{\gamma_{k,g}} s_{k,g}$ ,  $s_{k,h}$  与  $s_{k,g}$  分别为边缘用户  $EU_k$  与中心用户  $CU_k$  的数据符号且其均值为 0, 方差为 1;  $\gamma_{k,h}$  与  $\gamma_{k,g}$  分别为边缘用户  $EU_k$  与中心用户  $CU_k$  功率分配系数,且  $\sum_{k=1}^K (\gamma_{k,h} + \gamma_{k,g}) = 1$ 。假设组与组之间等功率分配,则  $\gamma_{k,h} + \gamma_{k,g} = 1/K$ ;  $n_{k,h}$  与  $n_{k,g}$  是独立同分布服从  $CN(0, 1)$  的加性高斯白噪声;  $\mathbf{a}_k$  与  $\mathbf{b}_k$  分别代表边缘用户和中心用户的 MRT 波束矢量。

由于 BS 仅知道同一 NOMA 组中用户的信道的线性组合,BS 将信道线性组合的估计  $\hat{\mathbf{w}}_k$  视为边缘用户  $EU_k$  和中心用户  $CU_k$  的真实信道,因为这是可用的最佳估计。假设 BS 使用估计的 CSI 来对所有用户进行波束成形,在这种情况下,得到归一化的最大比率传输 (MRT) 波束成形向量为

$$\mathbf{a}_k = \mathbf{b}_k = \frac{\hat{\mathbf{w}}_k^*}{\sqrt{E[\|\hat{\mathbf{w}}_k\|^2]}} = \frac{\mathbf{y}_{u,k}^*}{\sqrt{(p_u \alpha_k^h \beta_k^h + p_u \alpha_k^g \beta_k^g + 1)M}} \quad (11)$$

假设信道统计信息已知,在这种情况下,用户使用长期统计信息作为信道增益并对信号进行解码,即他们将有效信道增益的统计平均值作为真实信道使用。利用信道统计信息将边缘用户  $EU_k$  的接收信号写为

$$y_k^{EU} = E[\sqrt{\beta_k^h} \mathbf{h}_k^T \mathbf{a}_k \sqrt{p_d \gamma_{k,h}}] s_{k,h} + z_{k,h} \quad (12)$$

其中有效噪声项

$$z_{k,h} = (\sqrt{\beta_k^h} \mathbf{h}_k^T \mathbf{a}_k \sqrt{p_d \gamma_{k,h}} - E[\sqrt{\beta_k^h} \mathbf{h}_k^T \mathbf{a}_k \sqrt{p_d \gamma_{k,h}}]) s_{k,h} +$$

$$\sqrt{\beta_k^h} \mathbf{h}_k^T \mathbf{b}_k \sqrt{p_d \gamma_{k,g}} s_{k,g} + I_{k,h} + n_{k,h} \quad (13)$$

可以验证  $z_{k,h}$  与信号项  $s_{k,h}$  不相关。因此,  $y_k^{EU}$  可以被视为由确定性已知增益的等效标量信道和加性不相关噪声组成。利用在最坏情况下加性高斯噪声是不相关噪声的事实<sup>[2]</sup>,第  $k$  个边缘用户  $EU_k$  可以实现以下遍历速率

$$R_k^{EU} = \left(1 - \frac{K}{T}\right) \log_2 \left(1 + \frac{p_d \lambda_k^h \beta_k^h \gamma_{k,h} M}{p_d \lambda_k^h \beta_k^h \gamma_{k,g} M + p_d \beta_k^h + 1}\right) \quad (14)$$

其中,  $T$  为信道相干间隔 (CI) 的大小,

$$\lambda_k^h = \frac{p_u \alpha_k^h \beta_k^h}{p_u \alpha_k^h \beta_k^h + p_u \alpha_k^g \beta_k^g + 1} \quad (15)$$

定义

$$\lambda_k^g = \frac{p_u \alpha_k^g \beta_k^g}{p_u \alpha_k^h \beta_k^h + p_u \alpha_k^g \beta_k^g + 1} \quad (16)$$

中心用户  $CU_k$  能够执行干扰消除 (SIC) 的条件为:符号  $s_{k,h}$  在  $CU_k$  处的有效 SINR 不小于符号  $s_{k,h}$  在  $EU_k$  处的有效 SINR,即

$$\frac{p_d \lambda_k^g \beta_k^g \gamma_{k,h} M}{p_d \lambda_k^g \beta_k^g \gamma_{k,g} M + p_d \beta_k^g + 1} \geq \frac{p_d \lambda_k^h \beta_k^h \gamma_{k,h} M}{p_d \lambda_k^h \beta_k^h \gamma_{k,g} M + p_d \beta_k^h + 1} \quad (17)$$

式 (17) 的成立需满足  $\lambda_k^h \leq \lambda_k^g$ , 即  $\alpha_k^h \beta_k^h \leq \alpha_k^g \beta_k^g$ 。这里先假设此条件满足,因为此条件将作为约束在下一节讨论。执行 SIC 后中心用户  $CU_k$  新的接收信号为

$$\bar{y}_k^{CU} = y_k^{CU} - E[\sqrt{\beta_k^g} \mathbf{g}_k^T \mathbf{a}_k] \sqrt{p_d \gamma_{k,h}} s_{k,h} = E[\sqrt{\beta_k^g} \mathbf{g}_k^T \mathbf{b}_k] \sqrt{p_d \gamma_{k,g}} s_{k,g} + z_{k,g} \quad (18)$$

有效噪声项  $z_{k,g}$  为

$$z_{k,g} = (\sqrt{\beta_k^g} \mathbf{g}_k^T \mathbf{a}_k - E[\sqrt{\beta_k^g} \mathbf{g}_k^T \mathbf{a}_k]) \sqrt{p_d \gamma_{k,h}} s_{k,h} + (\sqrt{\beta_k^g} \mathbf{g}_k^T \mathbf{b}_k - E[\sqrt{\beta_k^g} \mathbf{g}_k^T \mathbf{b}_k]) \sqrt{p_d \gamma_{k,g}} s_{k,g} + I_{k,g} + n_{k,g} \quad (19)$$

第  $k$  个中心用户  $CU_k$  可以实现以下遍历速率

$$R_k^{CU} = \left(1 - \frac{K}{T}\right) \log_2 \left(1 + \frac{p_d \lambda_k^g \beta_k^g \gamma_{k,g} M}{p_d \beta_k^g + 1}\right) \quad (20)$$

## 2 用户配对与功率分配

### 2.1 优化问题的公式化

在传统 NOMA 系统中,利用信道完全信息进行用户配对,而在大规模 MIMO NOMA 系统中,基站可以基于大尺度衰落系数  $\beta$  来完成用户配对,配对的两个用户在上行链路发送共享导频进行信道估计,基站估计出两用户到基站间信道的线性组合,然后,下行链路 BS 以 NOMA 的形式向用户发送数据。在所考虑的大规模 MIMO NOMA 系统中,大尺度衰落系数  $\beta$  经过排序  $0 < \beta_1^h < \dots < \beta_K^h < \beta_1^g < \dots < \beta_K^g$ , BS

将大尺度衰落系数  $\beta$  的排名信息广播到所有  $EU$  和  $CU$ 。

定义一个  $K \times K$  匹配矩阵  $U$ , 当  $EU_i$  与  $CU_j$  匹配时, 它们对应的匹配矩阵  $U$  的第  $i$  行第  $j$  列元素为  $u_{i,j} = 1$ , 否则为  $u_{i,j} = 0$ 。还定义了 3 个  $K \times K$  功率分配矩阵  $P_1, P_2, P_3, P_1$  的第  $i$  行第  $j$  列元素  $\alpha_{h,i,j} = \alpha_i^h$  代表上行链路 EU 的导频功率控制系数;  $P_2$  的第  $i$  行第  $j$  列元素  $\alpha_{g,i,j} = \alpha_i^g$  代表上行链路 CU 的导频功率控制系数;  $P_3$  的第  $i$  行第  $j$  列元素  $\gamma_{h,i,j} = \gamma_{k,h}$  代表下行链路 EU 的传输数据功率分配系数, 本文假设下行链路传输数据时组与组之间等功率分配, 则  $\gamma_{k,h} + \gamma_{k,g} = 1/K, \gamma_{k,g}$  被  $1/K - \gamma_{h,i,j}$  替代。特别地, 当给定用户的服务质量 (QoS) 要求时, 最大化系统吞吐量的目标函数被表述为

$$\begin{aligned} & \{U^{\text{opt}}, P_1^{\text{opt}}, P_2^{\text{opt}}, P_3^{\text{opt}}\} = \\ & \arg \max_{U, P_1, P_2, P_3} \sum_{i=1}^K \sum_{j=1}^K W(\alpha_{h,i,j}, \alpha_{g,i,j}, \gamma_{h,i,j}) u_{i,j} \\ \text{s. t. } & \textcircled{1} R_i^{EU}(\alpha_{h,i,j}, \alpha_{g,i,j}, \gamma_{h,i,j}) \geq R_{i,\text{OMA}}^{EU}, \forall i, j \\ & \textcircled{2} R_j^{CU}(\alpha_{h,i,j}, \alpha_{g,i,j}, \gamma_{h,i,j}) \geq R_{j,\text{OMA}}^{CU}, \forall i, j \\ & \textcircled{3} \alpha_{h,i,j} \beta_i^h \leq \alpha_{g,i,j} \beta_j^g, \forall i, j \\ & \textcircled{4} 0 < \alpha_{h,i,j} < 1, 0 < \alpha_{g,i,j} < 1, \forall i, j \\ & \textcircled{5} 0 < \gamma_{h,i,j} \leq 1/K, \forall i, j \\ & \textcircled{6} \sum_{i=1}^K u_{i,j} \leq 1, \forall j \\ & \textcircled{7} \sum_{j=1}^K u_{i,j} \leq 1, \forall i \\ & \textcircled{8} u_{i,j} \in \{0, 1\}, \forall i, j \end{aligned} \quad (21)$$

式(21)中条件①和②可以确保 EU 和 CU 的最低速率要求, 条件③确保 CU 可以执行 SIC, 条件④指定上行链路 EU 与 CU 导频功率控制系数的范围, 条件⑤指定下行链路 EU 数据传输功率分配系数的范围, 条件⑥和⑦确保每个 EU (或 CU) 仅匹配一个 CU (或 EU), 条件⑧表明相应的匹配矩阵元素是 1 或 0。权重  $W(\alpha_{h,i,j}, \alpha_{g,i,j}, \gamma_{h,i,j})$  代表  $EU_i$  与  $CU_j$  的速率之和

$$\begin{aligned} W(\alpha_{h,i,j}, \alpha_{g,i,j}, \gamma_{h,i,j}) &= R_i^{EU}(\alpha_{h,i,j}, \alpha_{g,i,j}, \gamma_{h,i,j}) + \\ R_j^{CU}(\alpha_{h,i,j}, \alpha_{g,i,j}, \gamma_{h,i,j}) &= \left(1 - \frac{K}{T}\right) \log_2 \left[ \left(1 + \frac{p_d \lambda_i^h \beta_i^h \gamma_{h,i,j} M}{p_d \lambda_i^h \beta_i^h (1/K - \gamma_{h,i,j}) M + p_d \beta_i^h + 1}\right) \times \right. \\ & \left. \left(1 + \frac{p_d \lambda_j^g \beta_j^g (1/K - \gamma_{h,i,j}) M}{p_d \beta_j^g + 1}\right) \right] \end{aligned} \quad (22)$$

其中

$$\lambda_i^h = \frac{p_u \alpha_{h,i,j} \beta_i^h}{p_u \alpha_{h,i,j} \beta_i^h + p_u \alpha_{g,i,j} \beta_j^g + 1} \quad (23)$$

$$\lambda_j^g = \frac{p_u \alpha_{g,i,j} \beta_j^g}{p_u \alpha_{h,i,j} \beta_i^h + p_u \alpha_{g,i,j} \beta_j^g + 1} \quad (24)$$

相比于 OMA 传输,  $EU_i$  与  $CU_j$  执行 NOMA 时需要确保自身可以获得更高的速率, 满足 QoS 要求。在 OMA 系统<sup>[8]</sup>中,  $EU_i$  可获得速率为

$$R_{i,\text{OMA}}^{EU} = \frac{1}{2} \left(1 - \frac{K}{T}\right) \log_2 \left(1 + \frac{p_d \lambda_{i,\text{OMA}}^h \beta_i^h M/K}{p_d \beta_i^h + 1}\right) \quad (25)$$

其中

$$\lambda_{i,\text{OMA}}^h = \frac{p_u \beta_i^h}{p_u \beta_i^h + 1} \quad (26)$$

$CU_j$  可获得速率为

$$R_{j,\text{OMA}}^{CU} = \frac{1}{2} \left(1 - \frac{K}{T}\right) \log_2 \left(1 + \frac{p_d \lambda_{j,\text{OMA}}^g \beta_j^g M/K}{p_d \beta_j^g + 1}\right) \quad (27)$$

其中

$$\lambda_{j,\text{OMA}}^g = \frac{p_u \beta_j^g}{p_u \beta_j^g + 1} \quad (28)$$

式(25)与式(27)中的  $\frac{1}{2}$  是因为传统的 OMA 导致的多路复用损失<sup>[7]</sup>。注意, 目标函数是三个连续变量  $\alpha_{h,i,j}, \alpha_{g,i,j}, \gamma_{h,i,j}$  和一个二元变量  $u_{i,j}$  的函数, 属于混合整数规划问题, 为了解决这个非凸问题, 可以对目标函数进行去耦操作, 分两步解决这个优化问题, 分别求出最优功率分配矩阵  $P_1, P_2, P_3$  和最优匹配矩阵  $U$ 。

## 2.2 功率分配

假设有一个匹配对  $(EU_i, CU_j)$ , 匹配仅在式(21)中条件①~③满足时有效。在式(21)条件①~⑤下可以找到每对  $(EU_i, CU_j)$  的最佳值  $\alpha_{h,i,j}^{\text{opt}}, \alpha_{g,i,j}^{\text{opt}}, \gamma_{h,i,j}^{\text{opt}}$  及其对应的权重  $W(\alpha_{h,i,j}^{\text{opt}}, \alpha_{g,i,j}^{\text{opt}}, \gamma_{h,i,j}^{\text{opt}})$ 。注意, 所有  $W(\alpha_{h,i,j}, \alpha_{g,i,j}, \gamma_{h,i,j})$  取决于变量  $\alpha_{h,i,j}, \alpha_{g,i,j}, \gamma_{h,i,j}$ , 最大化  $W(\alpha_{h,i,j}, \alpha_{g,i,j}, \gamma_{h,i,j})$  导致整个目标函数的最大。对于一个特定的匹配对  $(EU_i, CU_j)$ , 其对应的匹配矩阵元素为  $u_{i,j}$ 。那么  $\alpha_{h,i,j}, \alpha_{g,i,j}, \gamma_{h,i,j}$  的最优值可以表示为:

$$\begin{aligned} & (\alpha_{h,i,j}^{\text{opt}}, \alpha_{g,i,j}^{\text{opt}}, \gamma_{h,i,j}^{\text{opt}}) = \\ & \arg \max_{\alpha_{h,i,j}, \alpha_{g,i,j}, \gamma_{h,i,j}} W(\alpha_{h,i,j}, \alpha_{g,i,j}, \gamma_{h,i,j}) u_{i,j} \end{aligned} \quad (29)$$

其中,  $u_{i,j}$  满足式(21)中⑥, ⑦和⑧的匹配约束。接下来介绍求三个连续变量  $\alpha_{h,i,j}, \alpha_{g,i,j}, \gamma_{h,i,j}$  最优值的方法。

### 2.2.1 下行链路数据传输功率分配系数 $\gamma_{h,i,j}$ 的最优值

假设  $\alpha_{h,i,j}, \alpha_{g,i,j}$  已知, 根据式(21)中的条件①,  $\gamma_{h,i,j}$  的下限为

$$\gamma_{h,i,j}^{\min} = \left(1 - \sqrt{\frac{A_1}{A_1 + A_0 \lambda_{i,OMA}^h}}\right) \left(\frac{1}{K} + \frac{A_1}{A_0 \lambda_{i,OMA}^h K}\right) \quad (30)$$

其中,  $A_0 = p_d \beta_i^h M/K$ ,  $A_1 = p_d \beta_i^h + 1$ 。

而且,根据式(21)中的条件②,  $\gamma_{h,i,j}$  的上限为

$$\gamma_{h,i,j}^{\max} = \frac{A_2 - K(\sqrt{1 + A_3/K} - 1)}{A_2 K} \quad (31)$$

其中,  $A_2 = \frac{p_d \lambda_j^g \beta_j^g M}{p_d \beta_j^g + 1}$ ,  $A_3 = \frac{p_d \lambda_{j,OMA}^g \beta_j^g M}{p_d \beta_j^g + 1}$ 。

对式(22)中的  $\gamma_{h,i,j}$  求导得到

$$\frac{d(W(\gamma_{h,i,j}))}{d(\gamma_{h,i,j})} = \left(1 - \frac{K}{T}\right) \frac{1}{\ln 2} \frac{B_0 + B_1}{B_2 B_3} \quad (32)$$

其中,分子  $B_0 = p_d^2 \beta_i^g \beta_i^h M(\lambda_i^h - \lambda_j^g)$ ,  $B_1 = p_d M(\lambda_i^h \beta_i^h - \lambda_j^g \beta_j^g)$ ;分母  $B_2 = p_d \lambda_i^h \beta_i^h M(1/K - \gamma_{h,i,j}) + p_d \beta_i^h + 1$ ,  $B_3 = p_d \lambda_j^g \beta_j^g M(1/K - \gamma_{h,i,j}) + p_d \beta_j^g + 1$ 。

由式(21)的约束③知  $\lambda_i^h < \lambda_j^g$ , 又因为  $\beta_i^h < \beta_j^g$ , 故  $\lambda_i^h \beta_i^h < \lambda_j^g \beta_j^g$ , 说明式(22)关于  $\gamma_{h,i,j}$  是单调减函数。故  $\gamma_{h,i,j}$  的最优值  $\gamma_{h,i,j}^{\text{opt}}$  为

$$\gamma_{h,i,j}^{\text{opt}} = \left(1 - \sqrt{\frac{A_1}{A_1 + A_0 \lambda_{i,OMA}^h}}\right) \left(\frac{1}{K} + \frac{A_1}{A_0 \lambda_{i,OMA}^h K}\right) \quad (33)$$

### 2.2.2 上行链路功率控制系数 $\alpha_{h,i,j}$ 与 $\alpha_{g,i,j}$ 的最优值

假设  $\alpha_{g,i,j}, \gamma_{h,i,j}$  已知,此时只有一个变量  $\alpha_{h,i,j}$  需要优化,采用 Matlab 自带的 fmincon 优化函数对  $\alpha_{h,i,j}^{\text{opt}}$  进行求解,此函数可解带有约束条件的优化问题。同理,当  $\alpha_{h,i,j}, \gamma_{h,i,j}$  已知时,同样可以用 fmincon 优化函数求出  $\alpha_{g,i,j}^{\text{opt}}$ 。

### 2.2.3 交替优化 $\alpha_{h,i,j}, \alpha_{g,i,j}, \gamma_{h,i,j}$

在 2.2.1 与 2.2.2 节中介绍了单独求解  $\alpha_{h,i,j}, \alpha_{g,i,j}, \gamma_{h,i,j}$  最优值的方法。联合求解三个变量  $\alpha_{h,i,j}, \alpha_{g,i,j}, \gamma_{h,i,j}$  的最优值,采用交替优化算法 (Alternating Optimization Algorithm, AOA),具体步骤见算法 1。

#### 算法 1 交替优化算法 (AOA)

输入:三个变量的初始值  $\alpha_{h,i,j}(0), \alpha_{g,i,j}(0), \gamma_{h,i,j}(0)$ , 循环停止的阈值  $\varepsilon$ , 最大迭代次数  $t_{\max}$ , 大尺度衰落系数  $\beta_k, k = 1, 2, \dots, 2K$ ;

01: 对  $\beta_k$  进行升序排列,前  $K$  个用户作为边缘用户,用集合  $EU_h = \{\beta_1^h, \beta_2^h, \dots, \beta_K^h\}$  表示;后  $K$  个用户作为中心用户,用集合  $CU_g = \{\beta_1^g, \beta_2^g, \dots, \beta_K^g\}$  表示;

02: for  $i = 1 : K$

03: for  $J = 1 : K$

04: 获得  $\beta_i^h, \beta_j^g$ ;

05: 迭代计数器  $t = 1$ ;

06: condition =  $|\alpha_{h,i,j}(t) - \alpha_{h,i,j}(t-1)| > \varepsilon \parallel$

$|\alpha_{g,i,j}(t) - \alpha_{g,i,j}(t-1)| > \varepsilon \parallel \parallel \gamma_{h,i,j}(t) - \gamma_{h,i,j}(t-1)| > \varepsilon$

07: while condition do

08: 通过 fmincon 函数计算  $\alpha_{h,i,j}(t+1)$

09: 通过 fmincon 函数计算  $\alpha_{g,i,j}(t+1)$

10: 通过式(33)计算  $\gamma_{h,i,j}(t+1)$ ;

11:  $t = t + 1$ ;

12: if  $t$  达到  $t_{\max}$

13: break;

14: end if

15: end while

16: end for

17: end for

输出:最优功率分配矩阵  $\mathbf{P}_1^{\text{opt}}, \mathbf{P}_2^{\text{opt}}, \mathbf{P}_3^{\text{opt}}$ 。

## 2.3 低复杂度的用户配对算法

获得  $\alpha_{h,i,j}, \alpha_{g,i,j}, \gamma_{h,i,j}$  的最优值  $\alpha_{h,i,j}^{\text{opt}}, \alpha_{g,i,j}^{\text{opt}}, \gamma_{h,i,j}^{\text{opt}}$  后,式(21)可以重写为:

$$\begin{aligned} \{ \mathbf{U}^{\text{opt}} \} = \arg \max_{\mathbf{U}} \sum_{i=1}^K \sum_{j=1}^K u_{i,j} W(\alpha_{h,i,j}^{\text{opt}}, \alpha_{g,i,j}^{\text{opt}}, \gamma_{h,i,j}^{\text{opt}}) \\ \text{s. t. } \quad \textcircled{6} \sum_{i=1}^K u_{i,j} \leq 1, \forall j \\ \quad \quad \textcircled{7} \sum_{j=1}^K u_{i,j} \leq 1, \forall i \\ \quad \quad \textcircled{8} u_{i,j} \in \{0, 1\}, \forall i, j \end{aligned} \quad (34)$$

式(34)中权重  $W(\alpha_{h,i,j}^{\text{opt}}, \alpha_{g,i,j}^{\text{opt}}, \gamma_{h,i,j}^{\text{opt}})$  可以根据  $R_i^{EU}(\alpha_{h,i,j}^{\text{opt}}, \alpha_{g,i,j}^{\text{opt}}, \gamma_{h,i,j}^{\text{opt}}), R_{i,OMA}^{EU}, R_j^{CU}(\alpha_{g,i,j}^{\text{opt}}, \gamma_{h,i,j}^{\text{opt}}), R_{j,OMA}^{CU}$  来解决,这4项可以基于已知的信道条件来计算。权重  $W(\alpha_{g,i,j}^{\text{opt}}, \gamma_{h,i,j}^{\text{opt}})$  仅取决于变量  $\alpha_{g,i,j}^{\text{opt}}, \gamma_{h,i,j}^{\text{opt}}$ , 式(34)的最优目标是  $u_{i,j} W(\alpha_{g,i,j}^{\text{opt}}, \gamma_{h,i,j}^{\text{opt}})$ , 它是式(21)的具体实例,式(21)中的  $W(\alpha_{h,i,j}, \alpha_{g,i,j}, \gamma_{h,i,j})$  由式(34)的  $W(\alpha_{g,i,j}^{\text{opt}}, \gamma_{h,i,j}^{\text{opt}})$  代替。因此,式(34)的解决方案是式(21)的可行解,相当于找到最佳匹配对。

关于式(34)的求解,可以采用经典的匈牙利匹配算法 (Hungarian Match Algorithm, HMA)<sup>[19]</sup>: 构造一个速率矩阵  $\mathbf{\Gamma}_{K \times K}$ , 矩阵里的每个元素是由式(22)计算出的权重  $W(\alpha_{h,i,j}, \alpha_{g,i,j}, \gamma_{h,i,j})$  构成,功率分配系数  $\alpha_{h,i,j}, \alpha_{g,i,j}, \gamma_{h,i,j}$  的最优值  $\alpha_{h,i,j}^{\text{opt}}, \alpha_{g,i,j}^{\text{opt}}, \gamma_{h,i,j}^{\text{opt}}$  由算法 1 (AOA) 得到。因此,式(34)中剩下唯一的变量  $u_{i,j}$ ,  $u_{i,j}$  可以通过匈牙利算法获得最优解,其复杂度为  $O(K^3)$ 。

考虑到匈牙利算法在执行过程中用户之间存在竞争,为了避免竞争,本文在匈牙利算法的基础上提出一种低复杂度的匹配算法 (Proposed Match Algorithm, PMA), 该算法的核心思想为: 首先让第一个边缘用户 ( $EU_1$ ) 在所有的 CU 中找到一个能为自身提供最大和速率的中心用户; 然后, 第二个边缘用户 ( $EU_2$ ) 在为自身寻找最优匹配时可能会和  $EU_1$  产生

冲突,为了避免  $EU_2$  与  $EU_1$  竞争同一个 CU, 让在剩余的 CU 中找一个最优匹配; 以此类推, 直到最后一个 EU 找到相应匹配。具体过程见算法 2。

### 算法 2 低复杂度的匹配算法(PMA)

输入: 根据  $P_1^{opt}, P_2^{opt}, P_3^{opt}$  计算速率矩阵  $\Gamma_{K \times K}$ ;

设置矩阵行号  $l=1$ ;

repeat

从  $\Gamma_{K \times K}$  的第  $l$  行找到最大值, 记录其列号  $k$ ;

令  $u_{l,k}=1$ , 即第  $l$  个 EU 与第  $k$  个 CU 配对;

然后将第  $k$  列的所有元素删除;

$l=l+1$ ;

until  $l=K$

输出: 匹配矩阵  $U$

执行 PMA 时, 第一个 EU 需要在  $K$  个 CU 中找到一个最优的, 操作次数为  $K$ ; 第二个 EU 要在剩余的  $K-1$  个 CU 中查找, 操作次数为  $K-1$ ; 第三个 EU……; 总的操作次数为  $K+(K-1)+\dots+2+1=K(K+1)/2$ , 因此算法的复杂度为  $O(K^2)$ 。

## 3 仿真分析

在本节中, 分析了在不同算法下小区用户数、基站天线数以及下行数据传输功率对系统和速率的影响。和文献 [20] 一样, 大尺度衰落系数  $\beta = (r/r_{\min})^{-\alpha}\tau$  与路径损耗和阴影衰落相关, 其中  $r$  代表用户到基站的距离,  $r_{\min} = 100$  m 代表用户距离基站的最短距离,  $\alpha = 3.8$  表示路径损耗指数,  $\tau$  代表阴影衰落的正态随机变量, 服从均值为 0、标准差为  $\eta = 8$  dB 的高斯分布。上行导频发射功率  $p_u = 10$  dB, 小区半径 500 m, 信道相干间隔  $T = 200$ , 阈值  $\varepsilon = 10^{-3}$ 。

图 2 表示小区用户数对系统和速率的影响。基站天线数  $M = 128$ , 下行数据传输功率  $p_d = 20$  dB。为方便比较, 本文提供一个基准, 即文献 [10] 的随机匹配算法 (Random Match Algorithm, RMA), 具体而言: 在获得速率矩阵之后, 每个边缘用户 EU 随机但不重复地选取一个中心用户 CU 进行匹配。从图 2 可以看出, 在大规模 MIMO NOMA 系统中, 匈牙利匹配算法 HMA 实现了最高的系统和速率, 而 RMA 实现了最低的系统速率。本文所提算法 PMA 可实现略低于 HMA 的系统速率, 且复杂度大大降低。此外, 如图 2 所示, 无论使用何种用户配对算法, NOMA 总能实现比 OMA 更高的和速率, 这是因为大规模 MIMO NOMA 系统中的中心用户 CU 可以利用干扰消除技术增加可实现速率, 导致整体系统吞吐量的提高。

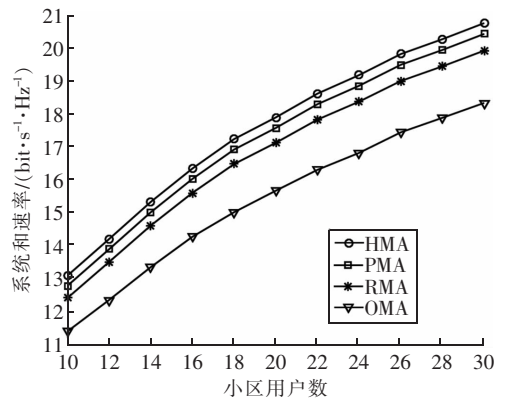


图 2 系统和速率与小区用户数的关系图

图 3 表示基站天线数对系统和速率的影响。小区用户数  $2K = 20$ , 下行数据传输功率  $p_d = 20$  dB。由图 3 观察到, 本文提出的低复杂度算法 PMA 与最优匹配算法 HMA 在系统和速率上差距很小, 且相比于 RMA 性能是有所提升的。在大规模 MIMO NOMA 系统中, 三种算法之间的差异几乎是稳定的, 但可以观察到最差 RMA 依然可以实现高于 OMA 的系统速率。从图 3 中还可以看出随着天线数量的增加, NOMA 与 OMA 之间的差异在逐渐增加, 原因在于信道状态信息 (CSI) 对于 NOMA 来说是非常重要的, 并且当天线数  $M$  较小时, 信道估计质量较差, 导致较低的速率, 当天线数  $M$  增加时, 阵列增益的提高导致信噪比增加, 因此来自 NOMA 的增益更加显著。

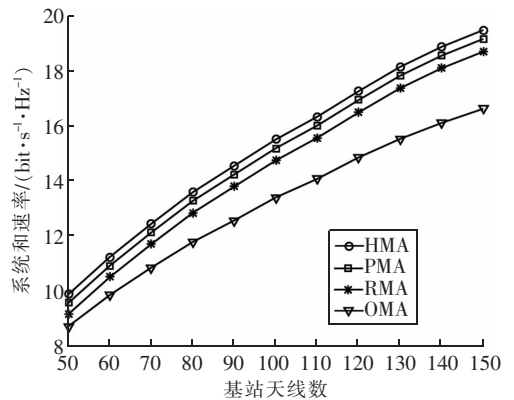


图 3 系统和速率与基站天线数的关系图

图 4 表示下行链路数据传输功率对系统和速率的影响。基站天线数  $M = 128$ , 小区用户数  $2K = 30$ 。从图 4 可以看出, 在大规模 MIMO NOMA 系统中, 随着数据传输功率  $p_d$  的增大, 系统和速率先增加后持平, 大约在  $p_d = 32$  dB 时系统和速率达到最大, 这是因为当  $p_d$  特别大时, 信干噪比趋于稳定值, 导致速率不再上升。本文所提匹配算法 PMA 依然可以实现略低于匈牙利最优匹配算法 HMA 与高于 RMA

的系统速率。观察图 4 还可看出,当  $p_d$  不是特别大时, NOMA 与 OMA 相比,可实现的总吞吐量差距较大,随着  $p_d$  的增大,这种差距慢慢减小。

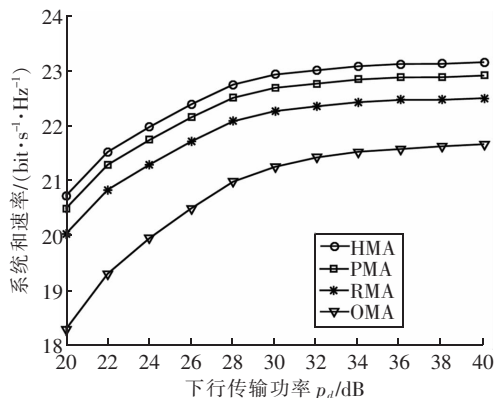


图 4 系统和速率与下行数据传输功率的关系图

图 5 表示迭代次数对用户速率之和的影响。基站天线数  $M=128$ , 小区用户数  $2K=2$ ,  $p_d=10$  dB。本文在求用户对之间的功率分配时采用的是交替优化变量的方法。从图 5 可以看出,在迭代次数超过 3 次之后,用户对之间的和速率将趋于稳定,说明 AOA 算法是收敛的。

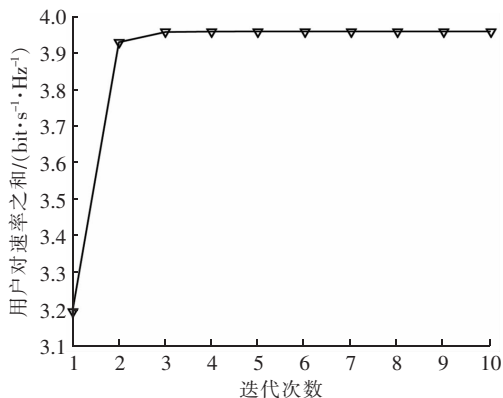


图 5 用户对速率之和与迭代次数的关系图

## 4 结束语

本文研究了大规模 MIMO NOMA 系统中的用户配对问题,提出一种联合功率分配的用户配对算法。基站依据大尺度衰落系数解决用户配对问题,需要优化的目标函数是一个混合整数规划问题,无法直接求解,需要先进行解耦操作,在用户服务质量 (QoS) 以及中心用户可以执行干扰消除 (SIC) 的约束条件下,采用交替优化的形式对上行的导频功率系数以及下行的数据功率系数进行优化操作,得到速率矩阵;然后采用匈牙利最优匹配算法进行用户配对,且考虑到匈牙利算法在执行过程中用户之间存在不断竞争的问题,于是提出一种低复杂度的用

户配对算法,与匈牙利算法复杂度低的情况相比性能有显著优势。仿真结果表明,在大规模 MIMO NOMA 系统中,所提匹配算法 (PMA) 的性能明显优于 OMA,而且优于采用随机配对算法 (RMA) 的 NOMA 的性能。

## 参考文献:

- [1] MARZETTA T L. Noncooperative cellular wireless with unlimited numbers of base station antennas[J]. IEEE Transactions on Wireless Communications, 2010, 9(11): 3590 - 3600.
- [2] NGO H Q, ASHIKHMIN A, YANG H, et al. Cell-free massive MIMO versus small cells[J]. IEEE Transactions on Wireless Communications, 2017, 16(3): 1834 - 1850.
- [3] SAITO Y, KISHIYAMA Y, BENJEBBOUR A, et al. Non-orthogonal multiple access (NOMA) for cellular future radio access[C] // IEEE 77th Vehicular Technology Conference (VTC). 2013: 1 - 5.
- [4] XIAO Z Y, ZHU L P, CHOI J, et al. Joint power allocation and beamforming for non-orthogonal multiple access (NOMA) in 5G millimeter wave communications[J]. IEEE Transactions on Wireless Communications, 2018, 17(5): 2961 - 2974.
- [5] COVER T. Broadcast channels[J]. IEEE Transactions on Information Theory, 1972, 18(1): 2 - 14.
- [6] CHOI J. On power and rate allocation for coded uplink NOMA in a multicarrier system[J]. IEEE Transactions on Communications, 2018, 66(6): 2762 - 2772.
- [7] DING Z G, ADACHI F, POOR H V. The application of MIMO to non-orthogonal multiple access[J]. IEEE Transactions on Wireless Communications, 2016, 15(1): 537 - 552.
- [8] CHENG H V, BJORNSSON E, LARSSON E G. Performance analysis of NOMA in training-based multiuser MIMO systems[J]. IEEE Transactions on Wireless Communications, 2018, 17(1): 372 - 385.
- [9] CHOPRA R, MURTHY C R, SURAWEEERA H A, et al. Analysis of nonorthogonal training in massive MIMO under channel aging with SIC receivers[J]. IEEE Signal Processing Letters, 2019, 26(2): 282 - 286.
- [10] LIANG W, DING Z G, LI Y H, et al. User pairing for downlink non-orthogonal multiple access networks using matching algorithm[J]. IEEE Transactions on Communications, 2017, 65(12): 5319 - 5332.
- [11] ZHU L P, ZHANG J, XIAO Z Y, et al. Optimal user pairing for downlink non-orthogonal multiple access (NOMA)[J]. IEEE Wireless Communications Letters, 2019, 8(2): 328 - 331.
- [12] DING Z G, FAN P Z, POOR H V. Impact of user pairing on 5G nonorthogonal multiple-access downlink transmiss-



- sions [ J ]. IEEE Transactions on Vehicular Technology, 2016, 65(8) : 6010 – 6023.
- [ 13 ] HOJEIJ M R, ABDEL NOUR C, FARAH J, et al. Water-filling-based proportional fairness scheduler for downlink non-orthogonal multiple access [ J ]. IEEE Wireless Communications Letters, 2017, 6(2) : 230 – 233.
- [ 14 ] YANG Z H, XU W, PAN C H, et al. On the optimality of power allocation for NOMA downlinks with individual QoS constraints [ J ]. IEEE Communications Letters, 2017, 21(7) : 1649 – 1652.
- [ 15 ] WANG C L, CHEN J Y, CHEN Y J. Power allocation for a downlink non-orthogonal multiple access system [ J ]. IEEE Wireless Communications Letters, 2016, 5(5) : 532 – 535.
- [ 16 ] DING Z G, SCHOBBER R, POOR H V. A general MIMO framework for NOMA downlink and uplink transmission based on signal alignment [ J ]. IEEE Transactions on Wireless Communications, 2016, 15(6) : 4438 – 4454.
- [ 17 ] ALI M S, TABASSUM H, HOSSAIN E. Dynamic user clustering and power allocation for uplink and downlink non-orthogonal multiple access (NOMA) systems [ J ]. IEEE Access, 2016, 4 : 6325 – 6343.
- [ 18 ] SENGUPTA S K, KAY S M. Fundamentals of statistical signal processing: estimation theory [ J ]. Technometrics, 1995, 37(4) : 465.
- [ 19 ] KUHN H W. The Hungarian method for the assignment problem [ J ]. Naval Research Logistics Quarterly, 1955, 2(1/2) : 83 – 97.
- [ 20 ] NGO H Q, SURAWEEERA H A, MATTHAIYOU M, et al. Multipair full-duplex relaying with massive arrays and linear processing [ J ]. IEEE Journal on Selected Areas in Communications, 2014, 32(9) : 1721 – 1737.