

# 基于双边匹配模型的上行链路 NOMA 用户配对方案

曹可为<sup>1</sup>, 杨震<sup>1,2</sup>

(1. 南京邮电大学通信与信息工程学院, 南京 210003; 2. 南京邮电大学通信与网络技术国家地方联合工程研究中心, 南京 210003)

**摘要:** 针对上行链路非正交多址接入 (Non-orthogonal multiple access, NOMA) 中的用户配对问题, 提出了一种基于双边匹配模型的上行链路 NOMA 用户配对方案, 与现有的 NOMA 用户配对方案不同, 本方案根据用户信道增益采取预分组, 避免了信道增益差距巨大的用户配对, 同时避免信道增益差距微小的用户配对, 以提高系统整体性能; 考虑信道增益过小的用户在现实场景中无法通信, 设置一个信道增益门限值作为能否通信的判决条件, 分组后采用信道增益差值作为偏好度进行组间两两配对。仿真结果表明, 相较于现有的传统 NOMA 配对方案和经典的正交多址接入 (Orthogonal multiple access, OMA) 网络, 本文所提方案有效地提高了系统的遍历和速率; 在信道增益门限值发生变化时, 本文所提方案依然优于其他方案。

**关键词:** 非正交多址接入; 上行链路; 用户配对; 双边匹配; 和速率

**中图分类号:** TN929.5      **文献标志码:** A

## User Pairing Scheme for Uplink NOMA Based on Bilateral Matching Model

CAO Kewei<sup>1</sup>, YANG Zhen<sup>1,2</sup>

(1. College of Communication & Information Engineering, Nanjing University of Posts and Telecommunications, Nanjing 210003, China; 2. National Local Joint Engineering Research Center for Communications and Network Technology, Nanjing University of Posts and Telecommunications, Nanjing 210003, China)

**Abstract:** For the problem of user pairing in uplink non-orthogonal multiple access (NOMA), this paper proposes a NOMA user pairing scheme based on bilateral matching model. Different from the existing NOMA user pairing scheme, this scheme adopts pre-grouping according to the user channel gain, so as to avoid the user pairing with large channel gain gap. At the same time, users with small channel gain difference can be avoided to improve the overall performance of the system. Considering that users with too small channel gain cannot communicate in the real scene, a threshold value of channel gain is set as the decision condition of whether the communication can be achieved. After grouping, the channel gain difference is used as the preference degree for pairwise pairing between groups. The simulation results show that compared with the traditional NOMA pairing scheme and the classical orthogonal multiple access (OMA) network, the proposed scheme can effectively improve the traversal and speed of the system. The proposed scheme is still superior to other schemes when the threshold value of channel gain changes.

**Key words:** non-orthogonal multiple access (NOMA); uplink; user pairing; bilateral matching; sum rate

## 引 言

随着无线通信的快速发展,宝贵的频谱资源越来越稀缺,如何有效提高频谱利用率至关重要。与正交多址(OMA)系统相比,在5G网络的候选方案中,非正交多址(NOMA)可以通过在同一频带复用更多用户来进一步提高频谱效率。OMA在不同的频率、时间和代码下为用户提供不同的信道条件,与OMA不同的是,NOMA允许共享相同的频谱资源。NOMA凭借着良好的频谱利用率、更高的系统吞吐量和较低的延迟赢得了青睐。目前多数NOMA方案是利用用户信道增益差异,通过功率控制进行多址接入的,当用户的信道增益之间存在显著差异时,它们最好是成对的<sup>[1-2]</sup>。然而,在现实情况下,即小区中有大量用户的情况下,在匹配过程中,某些用户对信道增益差异会减小,使得该对的吞吐量降低,导致整体系统容量下降。因此,这些用户将由OMA服务,并且将不能受益于NOMA多路复用提供的优势。

文献[1]中将两个用户(用户配对)分配给一个资源块。结果显示,将信道条件最不同的一组用户中的这两个用户配对,使用固定功率分配技术产生的性能增益最高。在文献[2]中,研究了两个用户的下行链路NOMA,该文是通过研究一个聚类来解决的技术,其中选择两个聚类的用户使得强用户的SINR高于阈值 $T_1$ ,而弱用户的SINR低于阈值 $T_2$ ,其中 $T_2 < T_1$ 。这两个用户的信干噪比 $T_1$ 与 $T_2$ 之间确保了一定的最小信道差异。

在文献[3]中,作者提出了一种配对方案,该方案对于所有对具有相对均匀的间隙增益,以便于中间小区用户的匹配和最大化NOMA无线电容量。在文献[4]中,作者提出了一种用户配对方案,该方案利用NOMA组中用户之间的信道增益差异,并将它们分组到一个或多个组中,以提高系统的总吞吐量。在文献[5]中,作者引入了基于用户间的信道增益差异的用户配对算法,并设置了NOMA对之间的差异最小范围。结果表明,在这个距离范围内,NOMA群体之间的无线通信容量分布得到了更好的控制。

为了确保上述关于用户分组的理论研究所预测的性能增益,已经进行了一些实际研究。在文献[6]中,单调优化被用来解决由此产生的非凸优化问题。其中获得了联合子载波分配、用户分组和功率分配的最优解。在文献[7]中,还研究了多载波非正交多址系统的资源分配算法设计。结果表明,与传统的多载波正交多址相比,所提出的资源分配算法获得了显著的系统吞吐量改善。在文献[8]中,考虑了一个联合用户配对和功率分配问题,以优化每个用户的最小速率约束下的可达和速率(ASR),这是一个混合整数规划问题。在文献[9]中,作者提出了在容量等于或大于OMA系统的条件下,两个NOMA配对用户的公平功率分配方案。

事实上,在传统的配对方案中,有一种情况是不可避免的:信道增益巨大与信道增益较小的用户在配对后,因为小用户信道增益过小,导致解码时无法解出,无法进行通信,从而导致与之配对的大用户无法采用NOMA进行通信(因为采用连续干扰抵消SIC技术时,首先解出强用户信号,然后再解出弱用户信号),转而使用OMA进行通信,影响了系统和速率的提升,损失了一定的通信速率。此情况在之前的文献中较少提及,本文所提出的方案将针对这种情况进行充分讨论,寻求解决方案。

本文方案旨在通过设置用户信道增益的差值为偏好度来进行配对。假设用户在小区内统一部署,目标是通过预分组避免信道增益差距巨大的用户配对,同时避免信道增益差距微小的用户配对,以提高系统整体性能。因此,将小区的用户分成两组,同时考虑信道增益过小的用户在现实场景中无法通

信, 设置一个信道增益门限值作为能否通信的判决条件, 分组后采用信道增益差值作为偏好度进行组间两两配对。

最后, 将本文 NOMA 配对方案与传统的配对方案和 OMA 方案进行比较, 并从数据速率的角度证明本文配对方案的有效性。与上述文献相比, 本文方案的新颖之处在于, 除了避免了信道增益差距接近的用户配对后对性能的提升较小, 同时考虑了部分信道增益过小的用户与信道增益较大的用户配对时, 信道增益过小的用户无法通信的同时, 导致信道增益较大的用户只能采用 OMA 进行通信, 以尽可能避免后者的数据速率下降。

## 1 系统模型

假设具有一个基站的单小区上行链路 NOMA 网络, 包含一个基站和  $N$  个用户, 系统模型如图 1 所示。基站和每个用户均装备一根天线, 基站和用户间的信道条件为莱斯信道, 假设有  $N$  个用户随机均匀分布在距离基站  $0 \sim 500$  m 之间的位置内:  $U_N = \{1, 2, 3, \dots, N\}$ ;  $|h_N|^2$  表示第  $N$  个用户的信道增益, 全部用户信道增益按降序排列, 即

$$|h_1|^2 > \dots > |h_{\frac{N}{4}}|^2 > |h_{\frac{N}{4}+1}|^2 > \dots > |h_{\frac{N}{2}}|^2 > |h_{\frac{N}{2}+1}|^2 > \dots > |h_{\frac{3N}{4}}|^2 > |h_{\frac{3N}{4}+1}|^2 > \dots > |h_N|^2 \quad (1)$$

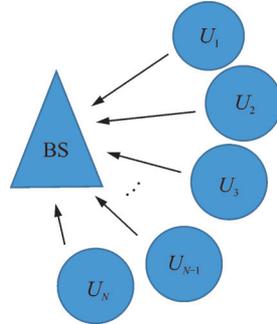


图1 多用户上行链路 NOMA 模型

Fig.1 Multiuser uplink NOMA model

假设组 1 的用户  $a$  与组 2 的用户  $b$  配对 ( $|h_a|^2 > |h_b|^2$ ); 每个用户在相同的带宽上同时发送信号, 两用户发射功率都为  $P$ 。因此, 从基站接收到的用户对  $(U_a, U_b)$  的混叠信号为  $Y = h_a \sqrt{P} s_a + h_b \sqrt{P} s_b + n$ 。其中,  $P$  为发射功率,  $s$  为发射信号,  $n$  为加性高斯白噪声。

接收端即基站使用 SIC 技术对用户按照信号功率降序的顺序来迭代解码。假设各用户的发射功率相同, 那么基站处各用户的信号功率大小关系为  $P_a > P_b$ 。基站将其他用户的信号当作干扰, 先从混叠信号中解码用户  $a$  的信号, 然后重构用户  $b$  的信号, 并在混叠信号中减去用户  $a$  的信号; 最后从剩余信号中解码出用户  $b$  的信号。由香农定理可知各用户的可达速率为

$$R_a = w \log_2 \left( 1 + \frac{P |h_a|^2}{P |h_b|^2 + \sigma^2} \right) \quad (2)$$

$$R_b = w \log_2 \left( 1 + \frac{P |h_b|^2}{\sigma^2} \right) \quad (3)$$

所以每个形成的用户对的可达速率为

$$R_{\text{pair}} = R_a + R_b \quad (4)$$

$N$ 个用户形成的 $N/2$ 个用户对的和速率为

$$R_{\text{sum}} = \sum_{i=1}^{N/2} R_{\text{pair}_i} \quad (5)$$

## 2 配对方案

在传统的NOMA系统中,根据信道增益递减而排序的用户在匹配之前被分为两组。这些配对形成如下:  $(U_1, U_N), (U_2, U_{N-1}), \dots, \left(U_{\frac{N}{2}-1}, U_{\frac{N}{2}+2}\right), \left(U_{\frac{N}{2}}, U_{\frac{N}{2}+1}\right)$ ,该方法可能存在两个问题:(1)存在许多用户时,会形成使信道增益差距巨大的用户对,其中的弱用户,在上行时因为终端能量有限,所以发射功率受限,解码时可能会导致小用户解不出来,而NOMA的第二步即SIC就会失败,导致强用户也无法解码;(2)同时,也可能存在有一部分信道增益差距接近的用户,它们的相互干扰可能较大,系统性能提升很小。

为解决以上问题,在第一步中把全部用户分为两个用户组,如图2所示。在组间进行两两配对,组1包含信道增益最高的四分之一用户和信道增益最低的四分之一用户,即

$$G_1 = \left\{ U_1, U_2, \dots, U_{\frac{N}{4}-1}, U_{\frac{N}{4}}, U_{\frac{3N}{4}+1}, U_{\frac{3N}{4}+2}, \dots, U_{N-1}, U_N \right\}, \text{组2包含 } G_2 = \left\{ U_{\frac{N}{4}+1}, U_{\frac{N}{4}+2}, U_{\frac{N}{4}+3}, U_{\frac{N}{4}+4}, \dots, U_{\frac{3N}{4}-3}, U_{\frac{3N}{4}-2}, U_{\frac{3N}{4}-1}, U_{\frac{3N}{4}} \right\}.$$

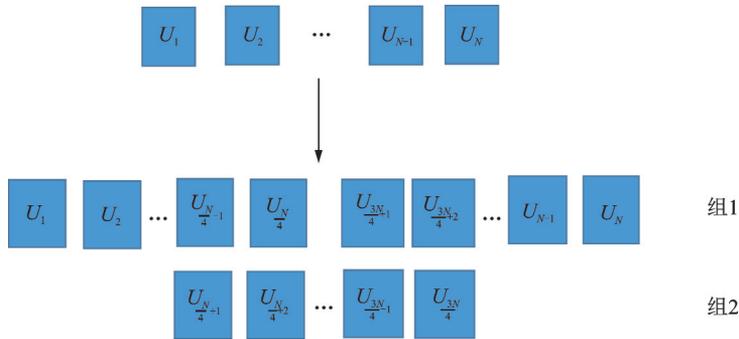


图2 根据用户信道增益进行分组

Fig.2 Grouping according to user channel gain

上行链路NOMA解码过程中,信道增益过小的用户,因为本身存在着加性高斯白噪声,会导致该用户对无法采用NOMA进行通信,假设存在一个基站接收功率的阈值  $P_{\text{max}} |h_{\text{threshold}}|^2$ ,当  $P_{\text{max}} |h_k|^2 < P_{\text{max}} |h_{\text{threshold}}|^2$  时,用户  $k$  无法通信;用户  $k$  所配对的另一用户无法采用NOMA通信,转为采用OMA进行通信,从而避免了强用户也通信失败。

对于已经完成预分组的两组用户,利用双边匹配模型,基于两组用户之间的偏好关系进行配对。在传统的NOMA配对方案中,为了使得系统和速率最大,信道增益低于门限值的小用户会匹配到一个信道增益较大的大用户;但是此时由于小用户无法通信,大用户只能采用OMA通信,会导致整体系统的和速率下降。所以对于这种用户,在配对时为了避免系统和速率下降的问题,需要将

它们与信道增益较小的用户配对而不是与最小的无法解码的用户配对,以减小对系统和速率的损耗。对于信道增益大于门限值的用户,在配对时优先与信道增益差距较大的用户配对。另一方面,用户对服务质量是有要求的,换言之,用户对配对也有偏好要求,双边匹配理论<sup>[10]</sup>是由大卫·盖尔和劳埃德·沙普利引入之后,开启了关于双边市场匹配问题的先河,是迄今博弈论应用最广泛的领域之一。双边匹配理论是依据用户之间的偏好程度来进行配对,使得每个用户都能与自己理想的用户进行配对。

首先计算两组用户之间的偏好关系,对于组1中第 $k$ 个用户、组2中全部用户,与第 $k$ 用户信道增益差值最大的用户偏好度最高,差值最小的用户偏好度最低;但当该用户 $P_{\max}|h_k|^2 < P_{\max}|h_{\text{threshold}}|^2$ 时,如果它与信道增益差值较大的用户配对,会使系统整体性能下降,此时信道增益差值最小的用户偏好度最高,差值最大的用户偏好度最低。

用户偏好度具体算法实现步骤如下:

For  $k=1:N/2$

If  $|h_k|^2 \geq |h_{\text{threshold}}|^2$

For  $z=1:N/2$

组1中第 $k$ 个用户与组2中第 $z$ 个用户的信道增益差值 $=|h_k|^2 - |h_z|^2$ ;

End

差值最大,偏好度设置为1,差值

第二大,偏好度设置为2,

依次类推;

Else

For  $z=1:N/2$

组1中第 $k$ 个用户与组2中第 $z$ 个用户的信道增益差值 $=|h_k|^2 - |h_z|^2$ ;

End

差值最小,偏好度设置为1,差值第二小,偏好度设置为2,

依次类推;

End

End

基于上文已完成的用户高低分离式分组和组1、组2偏好度计算全部完成以后,运用双边匹配理论,完成用户的实际匹配,具体实现步骤如下:

第一轮,每个组1用户都向自己名单上排在首位的组2用户发出配对邀请。此时,一个组2用户可能面对的情况有3种:没有人跟它发出配对邀请、只有一个用户跟它发出配对邀请、不只一个用户跟它发出配对邀请。在第一种情况下,这个组2用户什么都不做,继续等待即可;在第二种情况下,组2用户接受那个人的发出配对邀请,答应暂时和它配对;在第三种情况下,组2用户从所有追求者中选择自己最喜欢的那一位,答应和它暂时配对,并拒绝其他所有的追求者。

第一轮结束后,有些组1用户已经有配对用户而有些组1用户仍然是未配对。在第二轮发出配对邀请行动中,每个未配对组1用户都会从所有还没拒绝过自己的组2用户中选出自己最喜欢的那一个,并向它发出配对邀请,不管它现在是否是未配对。和第一轮一样,每个被发出配对邀请的组2用户需要从发出配对邀请者中选择最喜欢的组1用户,并拒绝其他追求者。注意,如果这个组2用户当

前已经有配对用户了,当它遇到了更好的追求者时,它将拒绝现在配对的用户,转而与自己更喜欢的用户配对。

在以后的每一轮中,未配对的组1用户会继续追求列表中的下一个组2用户;组2用户则从包括现配对用户在内的所有追求者中选择最好的一个,并拒绝其他用户。这样一轮一轮地进行下去,直到某个时刻所有用户都不再未配对,那么下一轮将不会有任何新的配对过程,每个用户的配对用户也都将固定下来,整个过程自动结束,此时的搭配就一定是稳定的。

具体算法实现步骤如下:

While 仍有组1用户未配对

For  $i=1:N/2$

If 第  $i$  个组1用户未配对

向没有拒绝过自己的组2用户中最喜欢的那一个发送配对邀请;

End

End

For  $i=1:N/2$

If 第  $i$  个组2用户收到了配对邀请

If 第  $i$  个组2用户只收到一个

配对邀请

与发送配对邀请的组1用户配对;

Else

从向该组2用户发送配对邀请的组1用户中选择最喜欢的一个配对;

拒绝其他所有向该组2用户发送配对邀请的组1用户;

Else

Continue;

End

End

若组1用户已全部配对,则终止计算;

End

### 3 仿真实现

假设在上行链路中,基站和每个用户均装备一根天线,基站和用户间的信道条件为莱斯信道,有  $m$  个用户随机均匀分布在距离基站  $0\sim 500$  m 之间的位置,不考虑选择子频带。首先初始化各用户的信道信息,设置仿真参数:带宽  $W=1$  MHz,噪声的功率谱密度  $N_0=-154$  dBm/Hz,大尺度衰落的信道衰落指数  $\alpha=2.4$ ,每个用户对基站的发射功率为  $P=0.2$  W,接收功率门限值  $P_{\max}|h_{\text{threshold}}|^2$  中的参数  $|h_{\text{threshold}}|^2=1\times 10^{-7}$ 。

假设  $m=64$ ,随机生成64个距离表示用户的分布位置。

为了处理的方便性,假设用户按照信道条件降序排列,并指定用户名,如表1所示。预分组之后,64个用户分成两个用户组,分别为组1(表2)和组2(表3)。

针对上述数据,完成两组用户之间的偏好度计算,依照双边匹配理论,完成用户配对,配对结果见表4。

表1 用户位置初始化

Table 1 User location initialization

用户序号	1	2	3	4	5	6	7	8
距离/m	485	482	480	480	480	479	479	475
用户序号	9	10	11	12	13	14	15	16
距离/m	467	458	445	425	412	400	398	396
用户序号	17	18	19	20	21	22	23	24
距离/m	383	379	377	376	372	355	353	350
用户序号	25	26	27	28	29	30	31	32
距离/m	347	340	339	328	328	328	323	293
用户序号	33	34	35	36	37	38	39	40
距离/m	274	273	253	249	245	243	223	219
用户序号	41	42	43	44	45	46	47	48
距离/m	211	196	191	170	159	139	138	138
用户序号	49	50	51	52	53	54	55	56
距离/m	128	112	93	86	81	79	75	71
用户序号	57	58	59	60	61	62	63	64
距离/m	69	59	49	49	23	18	17	16

表2 组1用户

Table 2 Group 1 users

用户序号	1	2	3	4	5	6	7	8
距离/m	485	482	480	480	480	479	479	475
用户序号	9	10	11	12	13	14	15	16
距离/m	467	458	445	425	412	400	398	396
用户序号	49	50	51	52	53	54	55	56
距离/m	128	112	93	86	81	79	75	71
用户序号	57	58	59	60	61	62	63	64
距离/m	69	59	49	49	23	18	17	16

表3 组2用户

Table 3 Group 2 users

用户序号	17	18	19	20	21	22	23	24
距离/m	383	379	377	376	372	355	353	350
用户序号	25	26	27	28	29	30	31	32
距离/m	347	340	339	328	328	328	323	293
用户序号	33	34	35	36	37	38	39	40
距离/m	274	273	253	249	245	243	223	219
用户序号	41	42	43	44	45	46	47	48
距离/m	211	196	191	170	159	139	138	138

表4 配对结果  
Table 4 Pairing results

用户 1	用户 2	用户 3	用户 4
用户 32	用户 31	用户 30	用户 29
用户 5	用户 6	用户 7	用户 8
用户 28	用户 27	用户 26	用户 25
用户 9	用户 10	用户 11	用户 12
用户 24	用户 23	用户 22	用户 21
用户 13	用户 14	用户 15	用户 16
用户 20	用户 19	用户 18	用户 17
用户 49	用户 50	用户 51	用户 52
用户 33	用户 34	用户 35	用户 36
用户 53	用户 54	用户 55	用户 56
用户 37	用户 38	用户 39	用户 40
用户 57	用户 58	用户 59	用户 60
用户 41	用户 42	用户 43	用户 44
用户 61	用户 62	用户 63	用户 64
用户 45	用户 46	用户 48	用户 47

本次仿真是随着用户数增加,系统和速率的比较。针对系统内用户,都要进行预分组、完成偏好度计算,按照双边匹配理论,完成用户配对,最后和几种传统的用户配对方案和传统的正交多址接入技术方案进行仿真比较。对比方案包括传统的高高配对和高低配对,以及采取本文预分组方案后进行的高高配对和高低配对以及传统的正交多址接入技术方案。仿真结果如图3所示。

由图3可以看出,在接收功率门限值参数 $|h_{\text{threshold}}|^2 = 1 \times 10^{-7}$ 的条件下,系统和速率随着用户总对数的变化关系,本方法性能一直高于普通高低配对、普通高高配对,和按照本方案分组情况下的高低配对和高高配对以及OMA。本方案优于其他传统方案原因在于,在传统的高低配对中,每个用户为了获得更大的可达速率,会在匹配时与自己信道增益差距最大的用户配对,但是因为上行链路NOMA在解码时小用户由于信道增益过小,导致基站接收到的功率小于可以正常采用NOMA通信的门限值,从而导致小用户本身无法正常通信,同时与小用户配对的大用户只能采用OMA通信,导致系统和速率下降;本方案在配对时,一是将信道增益最大与最小的一半用户分在组1中,避免了信道增益最大与最小的用户配对,二是在设置偏好程度时,对于基站接收功率小于门限值的用户不再是最偏好信道增益差距最大的用户,而是改为设置信道增益差距最小的用户为偏好程度最高的用户,从而使得在最后的配对结果中,每个小于门限值的用户所配对的用户并不是信道增益较大的用户,有效地减小了这部分用户因为小用户无法通信,自身采用OMA通信导致的系统和速率的下降。

图3仅给出了在接收功率门限值参数 $|h_{\text{threshold}}|^2 = 1 \times 10^{-7}$ 的条件下,系统和速率随着用户总对数的变化关系,为了验证本方案的全面性,将接收功率门限值进行改变,仿真结果如图4所示。

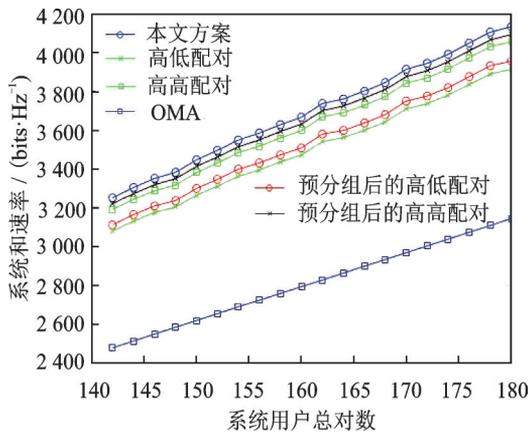


图3  $|h_{\text{threshold}}|^2 = 1 \times 10^{-7}$  时系统和速率随着系统用户总对数的变化

Fig.3 Change of system and rate with the total logarithm of system users when  $|h_{\text{threshold}}|^2 = 1 \times 10^{-7}$

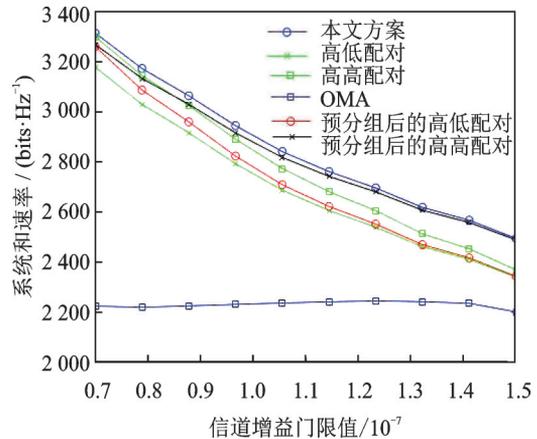


图4 200用户情况下,系统和速率随着门限值的变化

Fig.4 System and rate change with threshold under condition of 200 users

由图4可以看出,在小区内有200个用户的场景下,随着信道增益门限值的增大,系统和速率都有所下降,即系统和速率随着信道增益门限值的增大而下降。究其原因,信道门限值增大时,信道增益小于门限值的小用户无法通信,该类用户增多,同时会影响部分信道条件较好的通信,对系统整体的和速率产生了影响。其中本方案的和速率依然优于其余方案,系统和速率下降程度最小,也就是说随着信道增益门限值的增大,本方案性能依然能保持优于其他方案。本方案性能优于其他方案的原因在于,在信道增益门限值增大的情况下,所有用户中小于门限值的用户数量也将会增加,即无法采用NOMA通信转而不通信的小用户数量增加,同时因与小用户配对而采用OMA进行通信的用户数量也增加了,所以必然导致全部方案的和速率随着门限值的增大而下降;本方案在配对过程中,针对小于门限值用户的偏好程度设置采用信道增益差值最小的用户最高,即小于门限值的用户优先与信道增益条件差的用户配对,传统方案则是会与信道增益条件相较较好的用户配对,从而导致系统和速率的下降更为明显,所以本方案的速率下降程度最小。

#### 4 结束语

本文提出一种基于双边匹配模型的上行链路非正交多址接入配对方法,实现用户依据信道增益作为偏好度进行配对。与传统方案相比,该方法避免了信道增益差距巨大的用户对,因为解码时会导致小用户解不出来;同时有一部分信道增益差距接近的用户性能提升很小。仿真结果表明,相较于传统方案,该方案的系统和速率得到显著提升。

本方案的局限性在于需要知道用户信道增益信息,因此,基站与用户握手时,获知比较精确的用户定位是关键,当用户高速移动时,定位信息的及时更新也就比较重要。

#### 参考文献:

- [1] 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.
- [2] ZHANG H, SUN H, HU R Q. Downlink and uplink non-orthogonal multiple access in a dense wireless network[J]. IEEE Journal on Selected Areas in Communications, 2017, 35(12): 2771-2784.

- [3] SHAHAB M B, IRFAN M, KADER M F, et al. User pairing schemes for capacity maximization in non-orthogonal multiple access systems[J]. *Wireless Communications and Mobile Computing*, 2016, 16(17): 2884-2894.
- [4] 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.
- [5] ISLAM S M R, ZENG M, DOBRE O A, et al. Resource allocation for downlink NOMA systems: Key techniques and open issues[J]. *IEEE Wireless Communications*, 2018, 25(2): 40-47.
- [6] SUN Y, NG D W K, DING Z, et al. Optimal joint power and subcarrier allocation for full-duplex multicarrier non-orthogonal multiple access systems[J]. *IEEE Transactions on Communications*, 2017, 65(3): 1077-1091.
- [7] SUN Y, NG D W K, DING Z, et al. Optimal joint power and subcarrier allocation for MC-NOMA systems[C]//*Proceedings of 2016 IEEE Global Communications Conference (GLOBECOM)*. [S.l.]: IEEE, 2016: 1-6.
- [8] ZHU L, ZHANG J, XIAO Z, et al. Optimal user pairing for downlink non-orthogonal multiple access (NOMA)[J]. *IEEE Wireless Communications Letters*, 2019, 8(2): 328-331.
- [9] OVIEDO J A, SADIQPOUR H R. A new NOMA approach for fair power allocation[C]//*Proceedings of 2016 IEEE Conference on Computer Communications Workshops (INFOCOM WKSHPS)*. [S.l.]: IEEE, 2016: 843-847.
- [10] GALE D, SHAPLEY L S. College admissions and the stability of marriage[J]. *The American Mathematical Monthly*, 1962, 69(1): 9-15.

## 作者简介:



曹可为(1996-),男,硕士研究生,研究方向:非正交多址接入,E-mail:1019010431@njupt.edu.cn。



杨震(1961-),通信作者,男,教授,博士生导师,研究方向:语音处理与现代语音通信、无线通信中的通信与信号处理技术,E-mail: yangz@njupt.edu.cn。

(编辑:夏道家)