

doi:10.3969/j.issn.1001-893x.2017.01.002

引用格式:于中华,刘占军,沈悦,等.非正交多址技术中利用对称矩阵的用户分组[J].电讯技术,2017,57(1):9-13.[YU Zhonghua, LIU Zhanjun, SHEN Yue, et al. User clustering based on symmetric matrix in non-orthogonal multiple access technology[J]. Telecommunication Engineering, 2017, 57(1):9-13.]

## 非正交多址技术中利用对称矩阵的用户分组\*

于中华\*\*,刘占军,沈悦,陈前斌

(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:**现有非正交多址接入技术中,用户分组算法的实现首先对信道相似度门限值进行判断,选出候选成组用户;进而对候选成组用户的信道增益差进行比较,选出最优的成组用户。然而,上述分步求解算法中信道相似度门限值的设置存在一定的随机性,导致候选成组用户的选取不准确,从而影响分组结果,限制系统性能的提升。针对上述问题,提出利用对称矩阵的用户分组算法,对用户信道相似度进行非线性变换,而后将用户信道相似度和增益差线性求和构建成新的信道信息矩阵,进一步利用该矩阵的对称性进行求解。仿真分析表明该方法分组结果比设置门限的传统方法更优,在不同用户数目时系统容量均得到提升。在传统方法门限值为 0.95 时,所提算法系统容量在用户数为 16 时提升了 13.4 Mb/s。

**关键词:**非正交多址接入;用户分组;对称矩阵;系统性能

**中图分类号:**TN914.53 **文献标志码:**A **文章编号:**1001-893X(2017)01-0009-05

## User Clustering Based on Symmetric Matrix in Non-orthogonal Multiple Access Technology

YU Zhonghua, LIU Zhanjun, SHEN Yue, CHEN Qianbin

(Chongqing Key Laboratory of Mobile Communications Technology, Chongqing University of Posts and Telecommunications, Chongqing 400065, China)

**Abstract:** In the non-orthogonal multiple access (NOMA) technology, the existing user clustering algorithm is achieved by judging the threshold value of channel similarity to get the candidate users firstly, and then the optimal grouping users are selected by comparing the channel gain-difference of the candidate grouping users. However, the threshold setting of channel similarity has a certain randomness which leads to inaccuracy of the selection of candidate grouping users in the above multi-stage algorithm, and further affects the results of user clustering and improvement of system performance. In order to solve above problem, a user clustering algorithm using symmetric matrix in NOMA technology is proposed, wherein a nonlinear transformation of channel similarity is performed, and then a new matrix which denotes channel state information of user channel similarity and user channel gain-difference is constructed. Furthermore, all the solutions of user clustering groups can be obtained by utilizing symmetry characteristic of matrix. Simulation results show that the proposed algorithm is better than the traditional algorithm by setting threshold value, and the system capacity is enhanced when the number of users is changed. When the threshold is 0.95 in traditional algorithm, the system capacity is improved about 13.4 Mb/s when the time of the number of users is 16 by using the proposed algorithm.

**Key words:** non-orthogonal multiple access (NOMA); user clustering; symmetric matrix; sum capacity

\* 收稿日期:2016-05-18;修回日期:2016-07-29 Received date:2016-05-18;Revised date:2016-07-29

基金项目:国家高技术研究发展计划(863计划)项目(2014AA01A701)

\*\* 通信作者:405116486@qq.com Corresponding author:405116486@qq.com

## 1 引言

非正交多址接入 (Non-orthogonal Multiple Access, NOMA) 是指在无线接入网络中将相同的频谱资源分配给不同的用户, 并给用户分配不同功率, 进而在接收端通过串行干扰消除 (Successive Interference Cancellation, SIC) 机制进行解调, 实现频谱资源在功率域的复用, 增加系统容量<sup>[1-3]</sup>。然而, 在 NOMA 中需要对使用相同频谱资源和不同功率的用户进行分组<sup>[4-6]</sup>, 从而在接收端实现正确解调, 而不同分组的系统干扰有所不同。因此, 不同用户分组算法将对系统性能的提升造成不同的影响。

目前, 已经有文献针对 NOMA 中的用户分组技术进行相关研究。文献[7-8]提出应用于 NOMA 中的基于信道增益的用户分组算法, 其所提算法将高信道增益用户与低信道增益用户分为一组。然而, 上述分组算法并未考虑用户信道之间的相似度, 不同分组间的用户存在较大干扰, 影响系统容量的提升。文献[9]提出分为两步完成的用户分组算法, 该算法首先设置用户信道相似度门限值, 将满足用户信道相似度门限值的用户选为候选成组用户; 然后对候选成组用户进行信道增益差的计算, 并将增益差大的用户分为一组。该算法虽然考虑用户信道相似度和用户信道增益差, 但是需要通过分步求解实现, 并且该算法中信道相似度门限值的设置通过仿真得到, 具有一定的随机性, 因而造成基于相似度门限值的候选成组用户的选取存在波动, 影响分组结果及限制系统性能的提升。

针对上述问题, 本文提出一种利用对称矩阵的用户分组方法, 对用户信道相似度进行非线性变换, 构建新的用户信道信息矩阵, 并进一步利用对称矩阵得到所有用户分组的优化解, 最后通过 Matlab 仿真验证了所提算法的有效性。

## 2 系统模型

下行波束赋形与 NOMA 相结合系统中基站发射天线数为  $N$ , 用户数为  $K$ ,  $K \geq 2N$ , 每个用户采用单天线接收。系统中波束赋形矢量数为  $N$ , 为便于分析, 假设每个波束支持用户数为 2, 显然需要将同一波束支持的两个用户分为一组, 两者接收到的信号分别表示为  $y_1$  和  $y_2$ , 公式为

$$y_i = \mathbf{h}_i \sum_{m=1}^N \mathbf{w}_m x_m + \mathbf{n}_i \quad (1)$$

式中:  $i=1, 2$ ;  $x_m = \sqrt{\beta_1} x_1 + \sqrt{\beta_2} x_2$  表示用户发射信号,  $x_1$  和  $x_2$  分别是两个用户的信号,  $\beta_1$  和  $\beta_2$  是功率分配因子, 且  $\beta_1 + \beta_2 = 1$ ;  $\mathbf{h}_i$  表示第  $i$  ( $i=1, 2$ ) 个用户的信道状态矢量;  $\mathbf{w}_m$  表示第  $m$  ( $m=1, 2, \dots, N$ ) 个用户组的波束赋形矢量;  $\mathbf{n}_i$  为加性噪声矢量。而  $\mathbf{w}_m$  满足

$$\frac{\mathbf{h}_i}{|\mathbf{h}_i|} \mathbf{w}_m = \begin{cases} 0, & i \neq m \\ 1, & i = m \end{cases} \quad (2)$$

第  $i$  组用户中, 高信道增益用户产生该组波束赋形权向量满足式(2), 不受组间用户干扰, 同时经过 SIC 避免部分低信道增益用户的干扰。假设消除的组内干扰系数为  $\eta$ , 高信道增益用户 1 信干噪比

$$SINR_1 = \frac{\beta_1 |\mathbf{h}_1 \mathbf{w}_m x_1|^2}{\sigma^2 + (1-\eta)\beta_2 |\mathbf{h}_1 \mathbf{w}_m x_2|^2}; \quad (3)$$

而第  $i$  组用户中低信道增益用户不使用 SIC, 并且其所在组的  $\mathbf{w}_m$  由高信道增益用户产生, 不满足式(2), 会受到组间干扰, 因此, 根据文献[11], 低信道增益用户 2 信干噪比为

$$SINR_2 = \frac{\beta_2 |\mathbf{h}_2 \mathbf{w}_m x_2|^2}{\beta_1 |\mathbf{h}_2 \mathbf{w}_m x_1|^2 + |\mathbf{h}_2 \sum_{m=1, m \neq i}^N \mathbf{w}_m x_m|^2 + \sigma^2} \quad (4)$$

用户信道相似度定义为

$$\gamma_{ij} = \frac{|\mathbf{h}_i \cdot \mathbf{h}_j|}{|\mathbf{h}_i| |\mathbf{h}_j|}, \quad (5)$$

则用户信道相似度矩阵为

$$\mathbf{X} = \begin{bmatrix} \gamma_{11} & \gamma_{12} & \cdots & \gamma_{1K} \\ \gamma_{21} & \gamma_{22} & \cdots & \gamma_{2K} \\ \vdots & \vdots & & \vdots \\ \gamma_{K1} & \gamma_{K2} & \cdots & \gamma_{KK} \end{bmatrix},$$

并且在该矩阵中有

$$\gamma_{ij} = \frac{|\mathbf{h}_i \cdot \mathbf{h}_j|}{|\mathbf{h}_i| |\mathbf{h}_j|} = \frac{|\mathbf{h}_j \cdot \mathbf{h}_i|}{|\mathbf{h}_j| |\mathbf{h}_i|} = \gamma_{ji}$$

成立, 即该矩阵是对称矩阵。

用户信道增益差定义为

$$\lambda_{ij} = ||\mathbf{h}_i| - |\mathbf{h}_j||, \quad (6)$$

则用户信道增益差矩阵为

$$\mathbf{Y} = \begin{bmatrix} \lambda_{11} & \lambda_{12} & \cdots & \lambda_{1K} \\ \lambda_{21} & \lambda_{22} & \cdots & \lambda_{2K} \\ \vdots & \vdots & & \vdots \\ \lambda_{K1} & \lambda_{K2} & \cdots & \lambda_{KK} \end{bmatrix},$$

在矩阵  $\mathbf{Y}$  中有  $\lambda_{ij} = ||\mathbf{h}_i| - |\mathbf{h}_j|| = ||\mathbf{h}_j| - |\mathbf{h}_i|| = \lambda_{ji}$  成立, 因此, 矩阵  $\mathbf{Y}$  为对称矩阵。

其中,用户相似度变化幅度远大于用户增益差变化幅度,若直接线性处理会造成增益差因素的影响被忽略。为避免该影响,采用  $f(\gamma_{ij}) = 1 - \gamma_{ij}^3$  对相似度矩阵进行非线性变化,使变化后矩阵  $X_1$  中元素便于用户分组处理。由于  $\gamma_{ij}^3$  在整个定义域单调递增,并且在  $\gamma_{ij} \in (0, \infty)$  上为单调递增函数;同时,由于对信道信息矩阵的处理过程中需选取某行最小值,故而选用  $f(\gamma_{ij}) = 1 - \gamma_{ij}^3$ , 可得到  $(0, \infty)$  的递减函数以简化用户分组中对矩阵的处理。

因分组算法中选出最小元素,需对用户增益差矩阵进行  $P-Y$  处理。其中,  $P$  为  $K \times K$  的矩阵,矩阵中元素均为 1,处理后矩阵为  $Y_1$ 。

### 3 利用对称矩阵的用户分组算法及性能分析

#### 3.1 利用对称矩阵的用户分组算法

利用信道状态信息矩阵具有对称性,设计用户分组机制,其具体步骤如下:

**Step 1** 基站接收用户信道状态衰减  $\alpha$ , 并估计用户信道状态的反馈信息,形成用户信道状态集合  $\{h_1, h_2, h_3, \dots, h_k\}$ 。

**Step 2** 将用户信道状态集合  $\{h_1, h_2, h_3, \dots, h_k\}$  代入公式(5),计算出用户信道相似度,存入相似度矩阵  $X$ 。

**Step 3** 将用户信道状态集合  $\{h_1, h_2, h_3, \dots, h_k\}$  代入公式(6),计算出用户信道增益差,存入相似度矩阵  $Y$ 。

**Step 4** 对矩阵  $X$  中元素进行非线性变换  $f(\gamma_{ij}) = 1 - \gamma_{ij}^3$ , 变换后的矩阵为  $X_1$ , 对矩阵  $Y$  进行  $P-Y$  变换,得到矩阵  $Y_1$ , 令  $C = \frac{1}{2}(X_1 + Y_1)$ , 其中  $C$  表示信道状态信息矩阵。

**Step 5** 在矩阵  $C$  第  $i=1, i \in \{1, 2, \dots, K\}$  行中找出最小元素,并记为  $c_{ij}$  ( $j$  为最小元素对应的列),判断对称元素  $c_{ji}$  是否为第  $j$  行中最小元素,如果是,执行 Step 6; 如果不是,  $i=i+1$ , 重复 Step 5。

**Step 6** 判断  $\alpha_i$  和  $\alpha_j$  大小。若  $\alpha_i > \alpha_j$ , 则以  $\{i, j\}$  形式进行分组; 若  $\alpha_i < \alpha_j$ , 则以  $\{j, i\}$  形式分组。更新矩阵,去掉原矩阵中第  $i$  行  $j$  列,以及  $j$  行和  $i$  列全部元素,将用户组计数加 1,并判断是否达到所需用户组数,如果是,则分组结束,并等待下一分组周期; 如果不是,返回 Step 5。

NOMA 用户分组流程如图 1 所示。

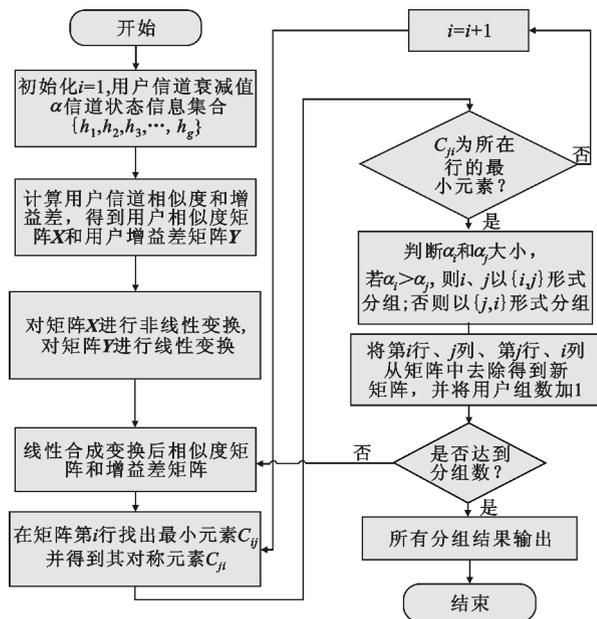


图 1 用户分组算法流程图

Fig. 1 Flow chart of user clustering algorithm

#### 3.2 算法性能分析

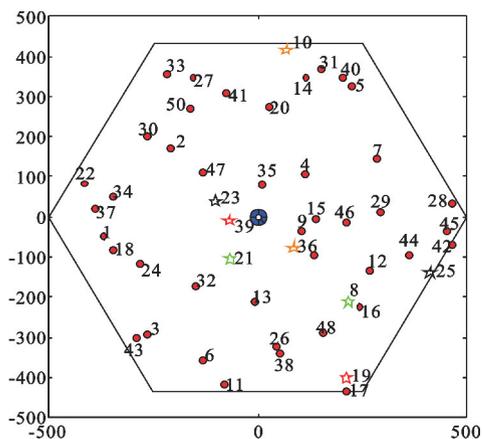
根据公式(2),成组用户中的低信道增益用户只有与强信道增益用户具有较高信道相似度时,才能保证组间用户干扰  $h_2 \sum_{m=1, m \neq i}^N w_m x_m$  分量尽量小,从而增加低信道增益用户的信干噪比,进而增加系统容量。

此外, NOMA 成组用户应满足信道增益差尽量大以便较好地地进行 SIC 消除组内干扰,降低  $\beta_1 |h_2 w_m x_i|^2$  分量。设置门限的分组算法可能会导致将相似度没有达到门限但是整体性能较优的用户被剔除,从而影响总体系统性能。本文算法避免设置相似度门限,综合用户信道相似度和用户信道增益差进行分组,选出某些相似度稍差但增益差较高的用户组,降低干扰,从而提高系统容量。

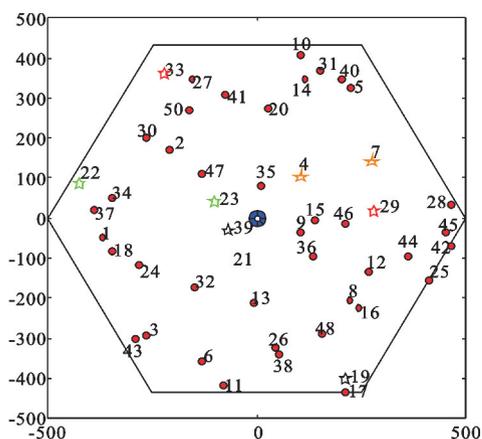
### 4 仿真分析

为验证本文算法系统性能,采用文献[9]中的仿真验证方式,在 Matlab 上搭建平台进行仿真分析。仿真场景设置为单小区单个基站,移动终端在网络中位置为随机均匀分布。仿真中小区半径为 500 m,用户随机均匀分布在小区中,系统带宽为 4.32 MHz。基站发射功率为 43 dBm,接收端噪声功率谱密度为  $-169$  dBm/Hz,路径损耗模型为  $128.1 + 37.6 \lg(r)$  dB,其中  $r$  (单位 km) 为基站到用户之间的距离<sup>[10-11]</sup>。仿真中对比算法为文献[9]中所用用户分组算法。

图 2 为小区中用户分组拓扑示意图,用户个数为 50,图 2(a)和图 2(b)分别为对比算法与本文算法用户分组拓扑示意图,用户分组结果表示为  $\{i, j\}$  形式,即用户  $i$  和用户  $j$  分为一组使用 NOMA。若所需用户分组为 4 组时,采用文献[9]中用户分组方法,将用户信道相似度门限设置为  $\rho=0.95$  所得用户分组结果如表 1 所示。



(a) 文献[9]分组拓扑示意图



(b) 本文算法用户分组拓扑示意图

图 2 用户分组拓扑示意图

Fig. 2 The topology of user clustering

表 1 用户分组结果表

Tab. 1 The results of user clustering

算法	分组结果
文献[9]	$\{39, 19\}, \{36, 10\}, \{23, 25\}, \{21, 8\}$
本文	$\{29, 33\}, \{4, 7\}, \{39, 19\}, \{23, 22\}$

文献[9]算法先选出满足  $\rho=0.95$  门限的用户集合,再从该集合中选出信道增益差较大的用户组,选出  $\{39, 19\}, \{36, 10\}, \{23, 25\}, \{21, 8\}$  虽然满足算法设定中的限制条件,但是因为相似度门限的设置,使得某些信道增益差很大的用户组因不满足相似度门限而被淘汰,比如本文算法选出的用户组  $\{29, 33\}, \{4, 7\}, \{23, 22\}$ 。本文算法的第三组用户与文献[9]算法中的第一组用户相同,而第一组、第

二组和第四组用户综合考虑用户信道相似度和用户信道增益差后被选定,综合考虑这两个因素可以选出文献[9]算法门限值不合理而淘汰的用户,进一步降低用户干扰,因此,本文算法提高了系统容量。

图 3 为本文算法与对比算法用户数与总容量关系图,其中  $N=2$ 。考虑到用户信道相似度门限值过大的情况下几乎没有符合条件的用户组可选,而过小会造成该门限值起不到作用,从而失去仿真分析的意义,因此对比算法用户信道相似度门限值分别为  $\rho=0.95, \rho=0.85, \rho=0.75$ 。随着  $\rho$  取值增大,对比算法系统容量增加,但本文算法的系统总容量高于对比算法中用户信道相似度门限的 3 种不同取值下的容量,在对比算法用户信道相似度门限  $\rho=0.75$  时,本文算法的系统容量在用户数为 64 时较对比算法系统容量增加 38.6 Mb/s;在  $\rho=0.85$  时,本文算法系统容量在用户数为 32 时较对比算法增加 17.2 Mb/s;在  $\rho=0.95$  时,本文算法系统容量在用户数为 16 时较对比算法系统容量增加 13.4 Mb/s。因为对比算法用户分组结果与用户信道相似度设定值有关,不同  $\rho$  取值会影响用户分组结果,对干扰值造成影响,进而对系统性能造成影响,而本文算法利用对称矩阵综合考虑用户信道相似度和用户信道增益差获得用户分组结果,避免了设置相似度门限对用户分组结果造成的影响,因此可以获得更高的系统性能。

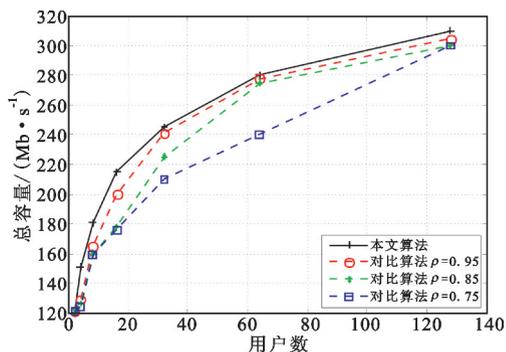


图 3 本文算法与对比算法用户数 vs. 总容量关系

Fig. 3 The sum capacity of proposed algorithm and comparison algorithm vs. the number of users

图 4 所示为采用本文算法、本文对比算法、穷举算法以及随机算法所获得的系统容量,其中  $N=2$ 。随机算法随机选择小区中两个用户分为一组,复杂度较低,但是不能得到较好的容量,因为随机分组造成较大干扰,造成系统容量的下降,因此随机算法系统容量在该仿真场景中均低于 50 Mb/s。穷举算法可以最大化总容量,但是在进行用户分组中需要穷举所有用户分组结果,具有较高的复杂度,系统容量

随着用户数目增加而增加。本文算法具有和穷举算法相近的总容量,在用户数目为 64 时,本文算法系统容量达到 280.2 Mb/s,十分接近穷举算法在用户数为 64 时的系统容量 285.1 Mb/s,但是复杂度低于穷举算法。

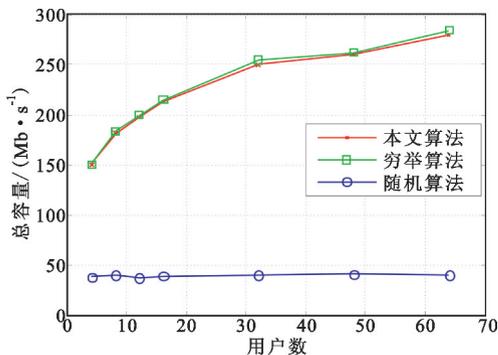


图 4 不同分组算法用户数 vs. 总容量关系图

Fig. 4 Sum capacity for different selection schemes vs. number of users

## 5 结束语

NOMA 作为一种非正交多址接入方式,由于能够提高系统频谱效率及系统容量,已成为未来 5 G 的候选技术之一,而不同的用户分组方法会对 NOMA 的性能产生较大影响。因此,针对现有用户分组技术中用户分组算法的实现需要分步求解,候选成组用户的选取结果受到相似度门限设置的影响,从而导致用户分组结果不准确的问题,本文提出了一种利用对称矩阵的用户分组算法。该算法避免设置用户相似度门限对分组结果带来的随机性,通过对用户信道相似度进行非线性变换,与信道增益差构建新的用户信道信息矩阵,利用该矩阵的对称性得到所有用户分组优化解。仿真结果表明,本文算法相比于对比算法用户信道相似度门限为  $\rho = 0.75$ 、 $\rho = 0.85$ 、 $\rho = 0.95$  时,系统总容量均获得提升,而且本文算法系统容量接近于穷举算法系统容量,但复杂度却低于穷举算法。本文所提用户分组算法对于应用于 NOMA 的技术提供了参考,然而,本文研究的是应用于 NOMA 的用户分组算法,对于成组用户的功率分配问题还需要进一步讨论。

## 参考文献:

- [1] DING Z, 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.
- [2] SATIO Y, KISHIYAMA Y, BENJEBBOUR A, et al. Non-orthogonal multiple access (NOMA) for cellular future

radio access [C] // Proceedings of 2013 IEEE Vehicular Technology Conference (VTC Spring). Dresden, Germany: IEEE, 2013: 1–5.

- [3] SATIO Y, BENJEBBOUR A, KISHIYAMA Y, et al. System-level performance evaluation of downlink non-orthogonal multiple access (NOMA) [C] // Proceedings of 2013 IEEE Personal Indoor and Mobile Radion Communications (PIMRC). London: IEEE, 2013: 611–615.
- [4] OSADA H, INAMORI M, SAMADA Y. Non-orthogonal access scheme over multiple channels with iterative interference cancellation and fractional sampling in OFDM receiver [C] // Proceedings of 2012 IEEE Vehicular Technology Conference (VTC Spring). Yokohama, Japan: IEEE, 2012: 1–5.
- [5] TIMOTHEOU S, KRIKIDIS I. Fairness for non-orthogonal multiple access in 5G systems [J]. IEEE Signal Processing Letters, 2015, 22(10): 1647–1651.
- [6] DING Z, ADACHI F, POOR H V. Performance of MIMO-NOMA downlink transmissions [C] // Proceedings of 2015 IEEE Global Communications Conference (GLOBECOM). San Diego, CA: IEEE, 2015: 1–6.
- [7] CHEN S, PENG K, JIN H. A suboptimal scheme for uplink NOMA in 5G systems [C] // Proceedings of 2015 International Wireless Communications and Mobile Computing Conference (IWCMC). Croatia, Dubrovnik: IEEE, 2015: 1429–1434.
- [8] LIU S, ZHANG C, LYU G M. User selection and power schedule for downlink non-orthogonal multiple access (NOMA) system [C] // Proceedings of 2015 Communication Workshop (ICCW). London: IEEE, 2015: 2561–2565.
- [9] KIM B. Non-orthogonal multiple access in a downlink multiuser beamforming system [C] // Proceedings of 2013 Military Communications Conference. San Diego, CA: IEEE, 2013: 1278–1283.
- [10] TOMIDA S, HIGUCHI K. Non-orthogonal access with SIC in cellular downlink for user fairness enhancement [C] // Proceedings of 2011 Intelligent Signal Processing and Communications Systems (ISPACS). Chiang Mai, Thailand: IEEE, 2011: 1–6.
- [11] TAKEDA T, HIGUCHI K. Enhanced user fairness using non-orthogonal access with SIC in cellular uplink [C] // Proceedings of 2011 Vehicular Technology Conference (VTC Fall). San Francisco, CA: IEEE, 2011: 1–5.

## 作者简介:



于中华(1990—),女,黑龙江人,2014年毕业于重庆邮电大学获工学学士学位,现为硕士研究生,主要研究方向为无线通信;  
Email: 405116486@qq.com

刘占军(1975—),男,河北人,2004年毕业于重庆邮电大学获硕士学位,现为副教授,主要研究方向为无线通信;  
Email: liuzj@cqupt.edu.cn

沈悦(1992—),女,重庆人,2014年毕业于重庆邮电大学获工学学士学位,现为硕士研究生,主要研究方向为无线通信;

陈前斌(1967—),男,四川人,2002年毕业于电子科技大学获博士学位,现为重庆邮电大学教授,主要研究方向为通信网理论与技术。