

# 非正交多址接入系统下行链路簇内 用户数最大化研究

冯郑慧<sup>1</sup>, 李莉<sup>1\*</sup>, 林振<sup>1</sup>, 彭张节<sup>1,2</sup>

(1. 上海师范大学 信息与机电工程学院, 上海 200234;

2. 东南大学 信息与工程学院 移动通信国家重点实验室, 江苏 南京 211189)

**摘要:** 针对非正交多址接入系统(NOMA)下行链路, 基于系统吞吐量最大化原则, 对簇内用户发射功率进行了最优分配, 发现簇内用户数过多会导致簇内吞吐量下降, 提出了给定吞吐量最小限值条件下簇内用户数最大值的估计方案. 仿真结果显示: 当给定吞吐量的最小限值为  $10 \text{ Mbit} \cdot \text{s}^{-1}$  时, 簇中所能包含的最大用户数为4.

**关键词:** 非正交多址接入(NOMA); 功率分配; 用户配对

**中图分类号:** TN 929.5    **文献标志码:** A    **文章编号:** 1000-5137(2019)01-0013-07

## Research on maximum number of users in downlink cluster of non-orthogonal multiple access system

FENG Zhenghui<sup>1</sup>, LI Li<sup>1\*</sup>, LIN Zhen<sup>1</sup>, PENG Zhangjie<sup>1,2</sup>

(1. College of Information, Mechanical and Electrical Engineering, Shanghai Normal University, Shanghai 200234, China;

2. National Mobile Communication Research Laboratory, School of Information Science and Engineering, Southeast University, Nanjing 211189, Jiangsu, China)

**Abstract:** For the downlink of non-orthogonal multiple access system, by use of the principle of system throughput maximization, the transmission power of intra-cluster users was allocated optimally. However it was discovered that the intra-cluster throughput declined with the excessive number of intra-cluster users. An estimation scheme of the maximum number of intra-cluster users under the given minimum throughput limit was proposed. Simulation results showed that the maximum number of users that could be included in a cluster was 4 when the minimum limit for a given throughput was subjected to  $10 \text{ Mbit} \cdot \text{s}^{-1}$ .

**Key words:** non-orthogonal multiple access(NOMA); power allocation; user pairing

**收稿日期:** 2018-10-09

**基金项目:** 国家自然科学基金青年科学基金(61701307)

**作者简介:** 冯郑慧(1996—), 女, 硕士研究生, 主要从事无线通信方面的研究. E-mail: huifzsh@163.com

\* **通信作者:** 李莉(1962—), 女, 教授, 主要从事自适应信号处理与无线通信方面的研究. E-mail: lilyxuan@shun.edu.cn

**引用格式:** 冯郑慧, 李莉, 林振, 等. 非正交多址接入系统下行链路簇内用户数最大化研究 [J]. 上海师范大学学报(自然科学版), 2019, 48(1): 13-19.

**Citation format:** FENG Z H, LI L, LIN Z, et al. Research on maximum number of users in downlink cluster of non-orthogonal multiple access system [J]. Journal of Shanghai Normal University (Natural Sciences), 2019, 48(1): 13-19.

## 0 引言

在5G系统的候选关键技术中,非正交多址接入(NOMA)技术因其高频谱效率而被人们广泛关注. NOMA系统的子信道传输采用正交频分复用(OFDM)技术,子信道之间互不干扰,但多个用户可以共享同一频段内的若干子信道. NOMA系统在发送端采用非正交发送方式,主动引入干扰信息,在接收端通过串行干扰删除(SIC)接收机实现正确解调. SIC接收机可根据用户信号功率大小不同,按照一定的顺序消除干扰,达到区分用户的目的.

ISLAM等<sup>[1]</sup>对NOMA的基本概念和应用场景进行了介绍. SHAHAB等<sup>[2]</sup>为使系统吞吐量和误码率达到均衡,在两用户场景下,提出了基于二分搜索方案的阈值功率改进分配方案. ALI等<sup>[3]</sup>研究了在多用户场景下,根据用户经历的信道状况的不同,对用户进行分簇,基于此分析了上下行链路的功率分配问题. WANG等<sup>[4]</sup>结合OFDM技术,将两用户场景拓展到多输入多输出场景,但计算复杂度有待降低. SHAHAB等<sup>[5]</sup>在传统用户配对的基础上,提出了混合用户配对方案和统一信道增益差配对(UCGD)方案,有效解决了由于用户配对造成的吞吐量差异等问题. 曹雍等<sup>[6]</sup>为提高边缘小区用户公平性问题,提出了一种新的功率分配策略:根据比例公平方法,在保证每个用户最低数据传输速率的情况下,最大化复用公平性最差的用户的比例公平因子. 张德坤等<sup>[7]</sup>介绍了NOMA系统下行链路接收端的干扰消除算法,并将检测算法和SIC算法相结合,有效去除了用户间干扰.

上述研究都假设NOMA系统单个簇中的用户数固定,且均没有分析同一频段中的单个用户簇所能包含的用户数. 随着未来用户数的上升,从提高频谱效率的角度出发,如何在保证吞吐量的前提下最大化单簇中的用户数,逐渐成为需要进一步研究的问题. 本文作者对NOMA系统下行链路中的用户进行分簇,基于系统吞吐量最大化的原则,对用户发射功率进行了最优分配;基于最优功率分配方案,在给定吞吐量最小限值条件下,保证吞吐量最大的同时,研究了NOMA系统同一频段中单簇内最大用户数的优化问题.

## 1 系统模型

设NOMA系统下行链路的一个用户簇中包含 $K$ 个用户,用户共享 $\omega$ 个信道带宽为 $B$ 的子信道. 基站端根据用户通信链路的增益进行簇内用户间的功率分配,随后叠加簇内用户的发射信号. 接收机通过SIC算法检测出各用户信号.

根据SIC技术原理,簇内用户 $k$ 接收端的吞吐量<sup>[3]</sup>

$$C_k = \omega B \log_2 \left( 1 + \frac{P_k \gamma_k}{\omega + \sum_{j=1}^{k-1} P_j \gamma_k} \right), j = 1, 2, \dots, k, \forall k = 1, 2, \dots, K, \quad (1)$$

其中, $P_k$ 是簇内用户 $k$ 的发送功率, $h_k$ 为用户 $k$ 对应通信的增益, $\gamma_k = \frac{|h_k|^2}{n_0 B}$ 为用户归一化链路增益, $n_0$ 为噪声功率谱密度. 对数函数分母中的求和项表示未被SIC接收机删除的用户 $k$ 的干扰信号.

图1为NOMA系统下行链路簇中用户数 $K$ 为3的情形. 不失一般地,设用户对应通信链路的增益从大到小依次为 $|h_1|^2, |h_2|^2, |h_3|^2$ ;  $x_1, x_2, x_3$ 分别代表基站向用户1,2,3发送的信号; $w_1, w_2, w_3$ 分别表示信道中的加性高斯白噪声; $y_1, y_2, y_3$ 分别表示用户端各用户接收到的叠加信号;⊗和⊖分别表示两

条输入信号的“乘”和“减”运算. 根据功率域 NOMA 的复用准则可知, 用户的分配功率为  $P_1, P_2, P_3$ , 结合 SIC 算法, 用户 1 可以将用户 2 和用户 3 的信号从接收信号中去除. 由于分配功率的大小不同, 用户 2 只能去除用户 3 的信号, 而无法消除用户 1 的信号对其产生的干扰. 同理, 用户 3 无法消除其他用户带来的任何干扰.

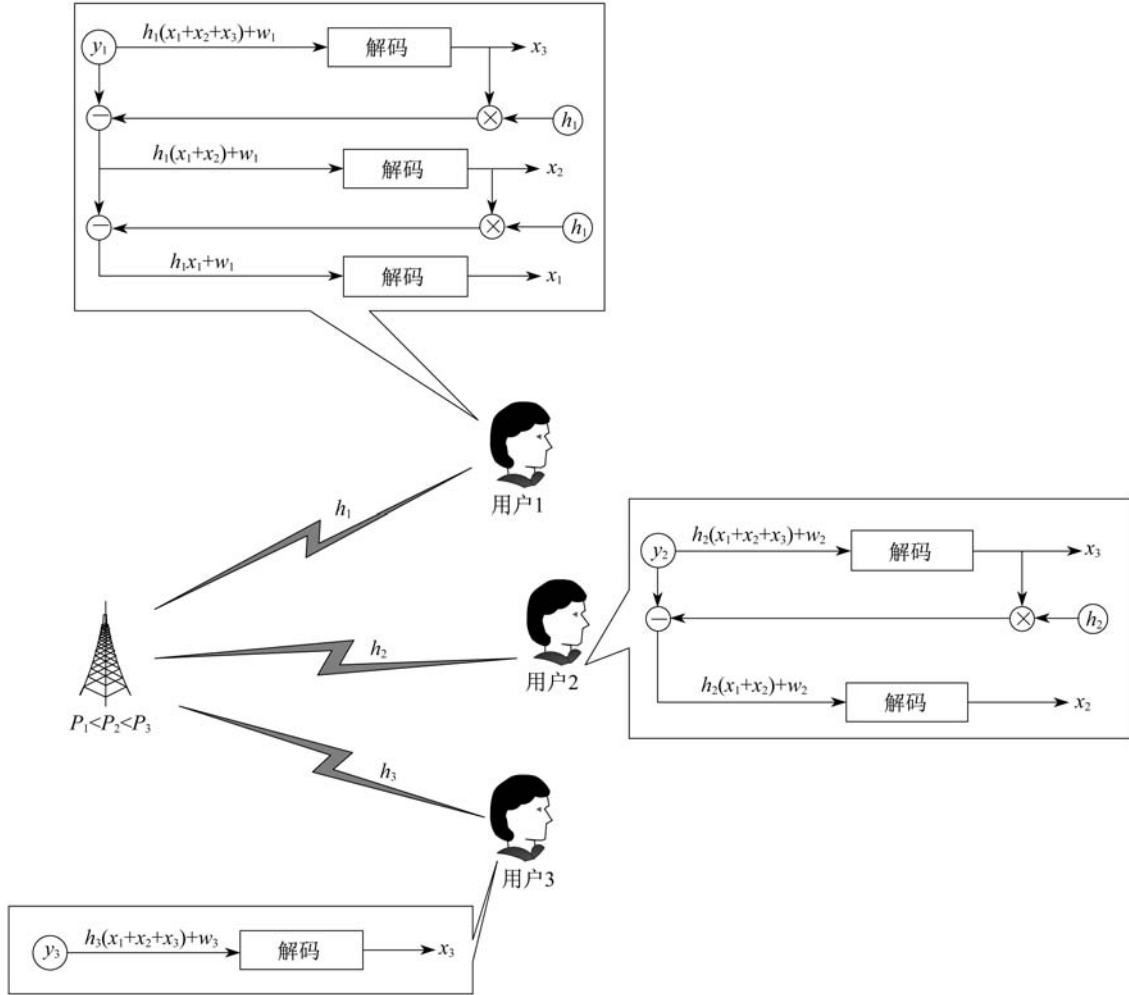


图 1 NOMA 系统下行链路接收端进行串行干扰删除的用户簇

## 2 下行链路功率分配

设 NOMA 系统中请求接入的用户数  $M$  远大于系统可用的子信道数  $T$ , 一般将共享同一频段内子信道的用户称为一个用户簇. 采用下列分簇方案.

### 2.1 用户分簇

具体步骤为: 基站将用户按照各自链路的增益由大到小的顺序进行排序, 并以此作为用户的序号, 依次为每条子信道分配用户, 将共享同一条子信道的用户定义为一组, 则每组包含  $T$  个用户. 为平衡各用户簇之间的吞吐量差异, 从每组中选择 1 个用户, 共同构成一个用户簇, 同一组中的用户均与其他组的用户形成新的用户簇, 故最终形成  $T$  个用户簇, 每个簇中包括  $K$  个用户, 第  $t$  个用户簇  $\beta_t$  中包涵的用户序号集合为:

1) 当  $K$  为偶数时,

$$\beta_t = \{t, t+T, t+2T, \dots, t+(n+1)T, M - [t+(n-1)T] + 1, \\ M - [t+(n-2)T] + 1, \dots, M - t + 1\}, t = 1, 2, \dots, T, \quad (2)$$

其中  $n = K/2$ .

2) 当  $K$  为奇数时,

$$\beta_t = \{t, t+T, t+2T, \dots, t+(n+1)T, M - [t+(n-2)T] + 1, \\ M - [t+(n-3)T] + 1, \dots, M - t + 1\}, t = 1, 2, \dots, T, \quad (3)$$

其中  $n = (K+1)/2$ .

## 2.2 簇内用户间的最佳功率分配

基于式(1), 考虑一个包括  $K$  个用户的 NOMA 系统用户簇, 用户的归一化链路增益表示为  $\gamma_k$  ( $k = 1, 2, \dots, K$ ).  $R_k$  代表各用户的最小传输速率, 且  $R_k < 0$ . 假设  $P_k$  是最终分配给用户的发射功率, 则功率分配问题可以表示为:

$$\max_{P_k} \omega B \sum_{k=1}^K \log_2 \left( 1 + \frac{P_k \gamma_k}{\omega + \sum_{j=1}^{k-1} P_j \gamma_j} \right), \quad (4)$$

$$\text{s. t.} \quad \sum_{k=1}^K P_k \leq P_t, \quad (5)$$

$$\omega B \log_2 \left( 1 + \frac{P_k \gamma_k}{\omega + \sum_{j=1}^{k-1} P_j \gamma_j} \right) \geq R_k, \forall k = 1, 2, \dots, K, \quad (6)$$

$$P_k \gamma_{k-1} - \sum_{j=1}^{k-1} P_j \gamma_{k-1} \geq P_{\text{tol}}, \forall k = 2, 3, \dots, K, \quad (7)$$

其中,  $P_t$  代表每个 NOMA 系统用户簇的总发射功率,  $P_{\text{tol}}$  为区分待解码信号和其余未解码信号的最小功率差. 式(5)是 NOMA 系统用户簇总发射功率的约束, 式(6)是最小传输速率约束, 式(7)表示的是在接收端正确地执行串行干扰删除需要满足的条件.

根据式(4)~(7), 构造拉格朗日优化目标函数如下:

$$L(P, \mu, \nu, \lambda) = \omega B \sum_{k=1}^K \log_2 \left( 1 + \frac{P_k \gamma_k}{\omega + \sum_{j=1}^{k-1} P_j \gamma_j} \right) + \mu \left( P_t - \sum_{k=1}^K P_k \right) \\ + \sum_{k=1}^K \nu_k \left[ P_k \gamma_k - \left( P \omega + \sum_{j=1}^{k-1} P_j \gamma_j \right) \times (\varphi_k - 1) \right] \\ + \sum_{k=2}^K \lambda_k \left( P_k \gamma_{k-1} - \sum_{j=1}^{k-1} P_j \gamma_{k-1} - P_{\text{tol}} \right), P_k \geq 0, \mu \geq 0, \nu_k \geq 0, \lambda_k \geq 0, \quad (8)$$

其中, 记  $\nu = \{\nu_1, \nu_2, \dots, \nu_K\}$ ,  $\lambda = \{\lambda_2, \lambda_3, \dots, \lambda_K\}$  为拉格朗日系数组合, 且  $\varphi_k = 2^{R_k/\omega B}$ . 将式(8)分别对  $P_i, \mu, \nu_i, \lambda_i$  ( $i = 1, 2, \dots, 2^{K-1}$ ) 求导, 可得 Karush-Kuhn-Tucher (KKT) 条件:

设当簇内用户数为  $K$  时, 满足 KKT 条件的拉格朗日系数组合为  $S_{K,i}$ . 考虑拉格朗日系数的所有组合情况, 再结合约束条件, 可以得出 NOMA 系统用户簇的最佳功率分配结果. 表 1 给出了当簇内用户数为 2, 3 时的功率分配和系数组合结果, 以及簇内用户数为 4 时的部分结果.

表 1 NOMA 系统下行链路簇内用户数不同时的最佳用户发射功率

用户簇中的用户数	最佳功率分配	满足 KKT 条件的拉格朗日系数组合
2	$P_1 = \frac{P_t}{2} - \frac{P_{\text{tol}}}{2\gamma_1},$ $P_2 = \frac{P_t}{2} + \frac{P_{\text{tol}}}{2\gamma_1}$	$S_{2,1} = \{\mu, \lambda_2\}$
	$P_1 = \frac{P_t}{\varphi_2} - \frac{\omega(\varphi_2 - 1)}{\varphi_2\gamma_2},$ $P_2 = \frac{P_t(\varphi_2 - 1)}{\varphi_2} + \frac{\omega(\varphi_2 - 1)}{\varphi_2\gamma_2}$	$S_{2,2} = \{\mu, \nu_2\}$
3	$P_1 = \frac{P_t}{4} - \frac{P_{\text{tol}}}{2\gamma_1} - \frac{P_{\text{tol}}}{4\gamma_2},$ $P_2 = \frac{P_t}{4} + \frac{P_{\text{tol}}}{2\gamma_1} - \frac{P_{\text{tol}}}{4\gamma_2},$ $P_3 = \frac{P_t}{2} + \frac{P_{\text{tol}}}{2\gamma_2}$	$S_{3,1} = \{\mu, \lambda_2, \lambda_3\}$
	$P_1 = \frac{P_t}{\varphi_2\varphi_3} - \frac{\omega(\varphi_2 - 1)}{\varphi_2\gamma_2} - \frac{\omega(\varphi_3 - 1)}{\varphi_2\varphi_3\gamma_3},$ $P_2 = \frac{P_t(\varphi_2 - 1)}{\varphi_2\varphi_3} + \frac{\omega(\varphi_2 - 1)}{\varphi_2\gamma_2} - \frac{\omega(\varphi_2 - 1)(\varphi_3 - 1)}{\varphi_2\varphi_3\gamma_3},$ $P_3 = \frac{P_t(\varphi_3 - 1)}{\varphi_3} + \frac{\omega(\varphi_3 - 1)}{\varphi_3\gamma_3}$	$S_{3,2} = \{\mu, \nu_2, \nu_3\}$
3	$P_1 = \frac{P_t}{2\varphi_3} - \frac{P_{\text{tol}}}{2\gamma_1} - \frac{\omega(\varphi_3 - 1)}{2\varphi_3\gamma_3},$ $P_2 = \frac{P_t}{2\varphi_3} + \frac{P_{\text{tol}}}{2\gamma_1} - \frac{\omega(\varphi_3 - 1)}{2\varphi_3\gamma_3},$ $P_3 = \frac{P(\varphi_3 - 1)_t}{\varphi_3} + \frac{\omega(\varphi_3 - 1)}{\varphi_3\gamma_3}$	$S_{3,3} = \{\mu, \lambda_2, \nu_3\}$
	$P_1 = \frac{P_t}{2\varphi_2} - \frac{\omega(\varphi_2 - 1)}{\varphi_2\gamma_2} - \frac{P_{\text{tol}}}{2\varphi_2\gamma_2},$ $P_2 = \frac{P_t(\varphi_2 - 1)}{2\varphi_2} + \frac{\omega(\varphi_2 - 1)}{\varphi_2\gamma_2} - \frac{P_{\text{tol}}(\varphi_2 - 1)}{2\varphi_2\gamma_2},$ $P_3 = \frac{P_t}{2} + \frac{P_{\text{tol}}}{2\gamma_2}$	$S_{3,4} = \{\mu, \nu_2, \lambda_3\}$
4	$P_1 = \frac{P_t}{8} - \frac{P_{\text{tol}}}{2\gamma_1} - \frac{P_{\text{tol}}}{4\gamma_2} - \frac{P_{\text{tol}}}{8\gamma_3},$ $P_2 = \frac{P_t}{8} + \frac{P_{\text{tol}}}{2\gamma_1} - \frac{P_{\text{tol}}}{4\gamma_2} - \frac{P_{\text{tol}}}{8\gamma_3},$ $P_3 = \frac{P_t}{4} + \frac{P_{\text{tol}}}{2\gamma_2} - \frac{P_{\text{tol}}}{4\gamma_3},$ $P_4 = \frac{P_t}{2} + \frac{P_{\text{tol}}}{2\gamma_3}$	$S_{4,1} = \{\mu, \lambda_2, \lambda_3, \lambda_4\}$

### 3 同一频段内单个簇中用户数最大化问题

簇内用户数增多会导致用户间干扰增强, 系统吞吐量下降. 取上节中满足 KKT 条件的拉格朗日系

数组组合  $S_{K,1} = \{\mu, \lambda_2, \lambda_3, \dots, \lambda_K\}$ , 簇内用户数为  $K$  时, 功率分配结果如下:

$$P_1 = \frac{P_t}{2^{K-1}} - \frac{P_{\text{tol}}}{2\gamma_1} - \dots - \frac{P_{\text{tol}}}{2^{K-1}\gamma_{K-1}},$$

$$P_k = \frac{P_t}{2^{K-k+1}} + \frac{P_{\text{tol}}}{2\gamma_{k-1}} - \frac{P_{\text{tol}}}{2^2\gamma_k} - \frac{P_{\text{tol}}}{2^3\gamma_{k+1}} - \dots - \frac{P_{\text{tol}}}{2^{K-k+1}\gamma_{K-1}}, k = 2, 3, \dots, K.$$
(9)

簇内总吞吐量

$$C_{\text{sum}} = \sum_{i=1}^K C_{i,k}.$$
(10)

根据系统吞吐量最小限值  $C_{\text{th}}$ , 构造簇内用户数最大的优化问题如下:

$$\begin{aligned} & \max_K C_{\text{sum}}, \\ & \text{s. t. } C_{\text{sum}} \geq C_{\text{th}}. \end{aligned}$$
(11)

## 4 实验结果及分析

### 4.1 参数设置

假设簇内用户数为  $K$ , 共享子信道个数  $\omega$  为 5, 每个子信道带宽  $B$  为 180 kHz. 假设前  $K-1$  个用户的归一化链路增益是由大到小间隔为 5 dB, 当第  $K$  个用户的归一化链路增益最大值不超过第  $K-1$  个用户时, 研究单用户簇总吞吐量性能. NOMA 系统用户簇的发射总功率  $P_t$  为 23 dBm, SIC 接收机处的检测阈值  $P_{\text{tol}}$  为 10 dBm. 参考目前关于 5G 数据传输速率最高可达  $100 \text{ Mbit} \cdot \text{s}^{-1}$  的标准, 不失一般地, 设系统吞吐量最小限值为  $10 \text{ Mbit} \cdot \text{s}^{-1}$ .

### 4.2 仿真结果分析

图 2 给出了 NOMA 系统下行链路单用户簇中用户数从 2 增加到 8 时, 单个用户簇的总吞吐量变化.

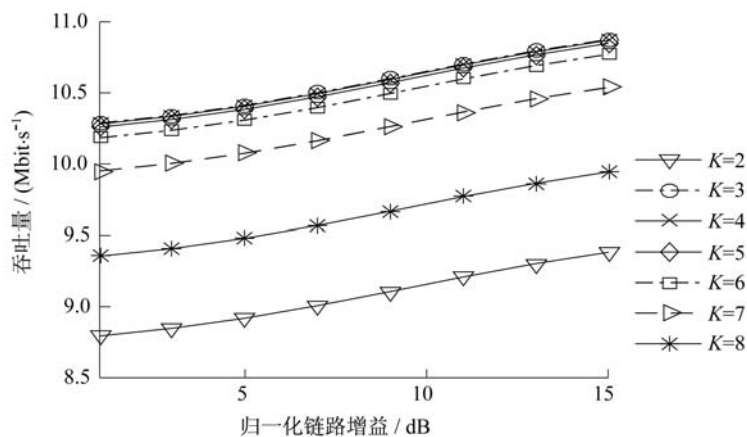


图 2 单个用户簇内用户数不同时系统总吞吐量变化

由图 2 可知, 在给定的仿真参数下, 单用户簇的吞吐量随归一化链路增益的增高而增大. 簇内用户数为 2 时, 单簇吞吐量最小; 单簇用户数由 3 增加到 4 时, 单簇吞吐量增加; 簇内用户数从 5 增加到 8 时, 单用户簇吞吐量依次降低. 在给定吞吐量最小限值为  $10 \text{ Mbit} \cdot \text{s}^{-1}$  的条件下, 当簇内用户数为 4 时, 单用户簇的吞吐量达到最大值.

## 5 结 论

介绍了 NOMA 系统下行链路的用户分簇和功率分配技术,研究了单簇用户数最大化问题.以单用户簇吞吐量最大值为目标函数,同时用吞吐量最小限值对其进行约束,得到单簇内用户数最大的优化模型.仿真结果表明:在给定吞吐量限值下,单用户簇内的用户数存在最大值.NOMA 系统单用户簇中用户数上限的解析表达还有待进一步研究.

## 参考文献:

- [ 1 ] ISLAM S M R, AVAZOV N, DOBRE O A. Power-domain non-orthogonal multiple access (NOMA) in 5G systems: potentials and challenges [J]. IEEE Communications Surveys and Tutorials, 2017, 19(2): 721 – 742.
- [ 2 ] SHAHAB M B, KADER M F, SHIN S Y. On the power allocation of non-orthogonal multiple access for 5G wireless networks [C]//2016 International Conference on Open Source Systems and Technologies. Lahore: IEEE, 2016: 89 – 94.
- [ 3 ] 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.
- [ 4 ] WANG C L, CHEN J Y. Power allocation for a downlink non-orthogonal multiple access system [J]. IEEE Wireless Communications Letters, 2016, 5(5): 532 – 535.
- [ 5 ] 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.
- [ 6 ] 曹雍, 杨振, 冯友宏. 新的 NOMA 功率分配策略 [J]. 通信学报, 2017, 38(10): 157 – 165.  
CAO Y, YANG Z, FENG Y H. New NOMA power allocation strategy [J]. Journal on Communications, 2017, 38(10): 157 – 165.
- [ 7 ] 张德坤. 非正交多址系统功率分配及干扰消除算法研究 [D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2015.  
ZHANG D K. Research on power allocation and interference cancellation algorithms for nonorthogonal multiple access systems [D]. Harbin: Harbin Institute of Technology, 2015.

(责任编辑:包震宇,顾浩然)