

公平性驱动的 RSMA-SDMA 预编码设计

孙彦景^{1,2,3,4}, 程枫陟¹, 周家思¹, 李松^{1,3}

(1. 中国矿业大学信息与控制工程学院, 江苏 徐州 221116; 2. 徐州智能安全与应急协同工程研究中心, 江苏 徐州 221008;
3. 中国矿业大学人工智能研究院, 江苏 徐州 221008; 4. 中国矿业大学信息化建设与管理处, 江苏 徐州 221008)

摘要: 针对在发射功率受限时系统最小用户速率与系统公平性问题, 提出了一种联合速率分拆多址接入(RSMA)和空分多址接入(SDMA)的用户接入方式选择传输策略, 并建模了最大化系统公平性预编码设计问题。为解决建模所形成的离散非凸优化问题, 将其分解为求解外层用户接入方式选择与内层最优预编码设计 2 个非凸子问题。针对预编码设计优化, 利用二次变换的多比率分式规划将预编码设计问题转化为双层轮换问题, 对用户接入方式逐次优化, 得到了外层用户接入方式选择最优解的闭式表达式; 以凸优化解决内层预编码设计问题, 逐次优化用户接入方式选择传输策略, 提出基于分式优化的预编码设计算法, 利用二次变换的多比率分式规划设计最优预编码向量, 求解功率受限下最大化最小用户速率。仿真结果表明, 相比于 RSMA、SDMA 等传输策略, 公平性驱动的 RSMA-SDMA 预编码设计提升了系统最小用户速率, 保障了系统公平性。

关键词: RSMA-SDMA; 预编码设计; 系统公平性; 双层轮换

中图分类号: TN929.53

文献标志码: A

DOI: 10.11959/j.issn.1000-436x.2022085

Design of fairness-driven RSMA-SDMA precoding

SUN Yanjing^{1,2,3,4}, CHENG Fengzhi¹, ZHOU Jiasi¹, LI Song^{1,3}

1. School of Information and Control Engineering, China University of Mining and Technology, Xuzhou 221116, China

2. Xuzhou Intelligent Safety and Emergency Collaborative Engineering Research Center, Xuzhou 221008, China

3. Artificial Intelligence Joint Laboratory, China University of Mining and Technology, Xuzhou 221008, China

4. Information Construction and Management Office, China University of Mining and Technology, Xuzhou 221008, China

Abstract: In view of the minimum user rate and system fairness when the transmit power was limited, a user access mode selection transmission strategy by joint rate-splitting multiple access (RSMA) and space division multiple access (SDMA) was proposed. The precoding design problem of maximizing system fairness was modeled. In order to solve the discrete non-convex optimization problem formed, it was decomposed into two non-convex sub-problems, such as the user access mode selection and the inner optimal precoding design. For the precoding design, a quadratic transform of multidimensional and complex FP was used to transform the precoding design into double rotation, and the closed-form expression of the optimal solution for the outer user access mode selection was obtained. Convex optimization was used to solve the inner precoding design problem, and successively optimize the user access mode selection. An algorithm based on fractional optimization was proposed for the problem, and the optimal precoding vector was designed using the quadratic transform of multidimensional and complex FP to maximize the minimum user rate under power constraints. The simulation results prove that compared with RSMA, SDMA and other transmission strategies, the fairness-driven RSMA-SDMA precoding design improves the minimum user rate of the system and guarantees the system fairness.

Keywords: RSMA-SDMA, precoding design, system fairness, double rotation

收稿日期: 2021-12-13; 修回日期: 2022-03-28

通信作者: 程枫陟, ts19060105p31@cumt.edu.cn

基金项目: 国家自然科学基金资助项目 (No.62071472); 中央高校基本科研业务费专项资金资助项目 (No.2020ZDPY0304)

Foundation Items: The National Natural Science Foundation of China (No.62071472), The Fundamental Research Funds for the Central Universities (No.2020ZDPY0304)

0 引言

随着物联网、车联网、扩展现实等新型移动多媒体应用迅速发展,移动网络用户对有限功率下频谱效率、系统公平性等方面提出了更高的要求,这激发了通信领域关于多址接入方式的研究^[1]。相比非正交多址接入(NOMA, non-orthogonal multiple access)与空分多址接入(SDMA, space division multiple access),速率分拆多址接入(RSMA, rate-splitting multiple access)^[2]技术结合了NOMA的串行干扰消除(SIC, successive interference cancellation)技术的信道容量大与SDMA的预编码器和解码器简单的优势。文献[3]的研究表明,RSMA在功率约束下频谱效率和能量效率上明显优于NOMA和SDMA。

Han等^[4]在1981年利用速率分拆传输策略原型针对两用户干扰信道研究了可达速率区域,得到了最好的速率区域。文献[1]将RSMA扩展到多用户传输。RSMA使用线性预编码将用户信息拆分为公共部分和私有部分,并将公共部分叠加于私有部分之上传输。接收用户使用SIC对公共部分信息与私有部分信息按顺序进行解码,通过组合公共、私有两部分信息得到完整信息。RSMA灵活的干扰管理能力使其得到了广泛关注。文献[5-11]针对RSMA在不同场景下的性能进行了研究。文献[5-6]从信息论的角度研究了RSMA在多输入单输出(MISO, multiple input and single output)信道下的自由度,并证明RSMA相对其他多址接入传输方式可以取得更高的自由度。受RSMA自由度启发,最近有许多工作研究了RSMA的系统性能。文献[1]在MISO信道下,研究了完美信道和非完美信道的信道容量,证实了在功率受限场景下RSMA在2种信道取得次优信道容量;文献[7]证明RSMA相对SDMA与NOMA可在功率约束下取得更高的频谱与能量效率;文献[8-10]研究了大规模天线阵列^[8-9]、无线携能通信^[10]等场景中RSMA功率受限时的性能优化方法;文献[11]研究了5G场景下大规模机器通信的RSMA频谱性能。以上研究主要涉及多个场景下传统RSMA功率限制下的用户和速率,验证了多用户场景中RSMA的性能,但没有关注RSMA系统最小用户速率、系统公平性与其本身特性的关系。

无线通信系统用户间公平性的评价指标主要

包括最大最小公平、比例公平、 α 公平等^[12]。文献[13]研究了在发射功率约束下通过最大最小公平来保障系统吞吐容量;文献[14]利用最大最小公平的方法提升了最小用户的信干噪比(SINR, signal to interference plus noise ratio);文献[15]将保障用户公平性延伸到最大化最小用户速率,在云无线接入网场景下利用最大化用户公平速率的方法,获得了更好的缓存分配并保障了系统公平性。为了改善RSMA用户信道质量、提升服务效率,文献[16-18]针对最大化最小用户速率问题展开研究。文献[16]利用无人机(UAV, unmanned aerial vehicle)的移动性和内容的流行性策略,结合RSMA提出了缓存辅助策略下最小用户速率的研究;文献[17]将RSMA与雷达联合通信相结合,基于RSMA内在稳健性,使雷达在监听的同时消除多用户带来的干扰,提升最小用户速率;文献[18]利用基站分组缓存的策略减少了RSMA用户的组内干扰,提升了最小用户速率。上述研究仍局限于传统单一RSMA传输,没有利用其公共部分的特点。为了消除公共部分发射功率对和速率的影响,文献[19]研究了限制最大公共发射功率下的最大化用户和速率,其控制公共部分提升用户和速率的方法启发了本文的研究。

在发射功率受限的场景下,由于RSMA把用户信息分为公共信息与私有信息,RSMA系统为了保证所有用户对公共部分的正确解码,公共部分和速率依赖于所有用户中公共部分接收能力最差用户的共享,这导致系统最小用户速率降低。为了实现在发射功率受限时保证系统最小用户速率(用户公平速率),本文提出一种RSMA-SDMA传输策略下的预编码设计,并建模了最大化系统公平性预编码设计问题。为解决建模所形成的离散非凸优化问题,本文采用双层轮换算法,将问题分解为内层的最优预编码设计和外层的用户接入方式选择2个子问题。针对内层预编码设计子问题,提出基于分式优化的预编码设计算法,在已知用户接入方式条件下求解最优预编码向量;针对外层用户接入方式选择子问题,依据内层算法得到的最优预编码向量,计算系统最小用户速率,通过逐次优化最小速率用户接入方式以提升系统最小用户速率。仿真结果表明,相比于参考传输策略,本文的RSMA-SDMA传输策略可显著提高系统最小用户速率,且本文预编码设计提升了系统最小用户速率,保障了系统公平性。

1 系统模型

本文研究的 RSMA-SDMA 系统结构如图 1 所示。考虑单蜂窝系统，包含一个 L 根天线的基站，服务于 K 个单天线用户，用户集合用 \mathcal{K} 表示， $\mathcal{K} = \{1, \dots, k, \dots, K\}, K \geq 2$ ，系统存在于 MISO 下行链路，基站端发射信号矢量为 $\mathbf{x} \in \mathbb{C}^{L \times 1}$ ，用户 k 接收到的信号为

$$y_k = \mathbf{h}_k^H \mathbf{x} + n_k, \forall k \in \mathcal{K} \quad (1)$$

其中， $\mathbf{h}_k \in \mathbb{C}^{L \times 1}$ 为基站与用户 k 之间的信道， n_k 为加性白高斯噪声且服从 $C(0, \sigma^2)$ 分布。

系统中 RSMA 用户集合为 \mathcal{K}_1 ，SDMA 用户集合为 \mathcal{K}_2 ， \mathcal{K}_1 和 \mathcal{K}_2 满足 $\mathcal{K}_1 \cup \mathcal{K}_2 = \mathcal{K}, \mathcal{K}_1 \cap \mathcal{K}_2 = \emptyset$ 。设用户多址接入方式指示变量为 δ_k ， $\delta_k = 1$ 表示用户 k 采用 RSMA 接入方式传输数据，其信息被拆分为公共部分信息和私有部分信息； $\delta_k = 0$ 表示用户 k 采用 SDMA 接入方式传输数据，其信息不再被拆分，类似 RSMA 传输时信息全部编码为私有部分信息。在本文中，SDMA 相当于仅使用 RSMA 私有部分进行传输，用户不需要使用 SIC 消除 RSMA 用户的公共部分信息（下文中，SDMA 将用户信息与 RSMA 私有部分信息一同称为用户私有部分信息）。图 1 中虚线内的部分是否启用与用户 k 使用的多址传输方式有关，即取决于 δ_k ：当 $\delta_k = 1$ 时，用户采用 RSMA 方式传输，此时用户将启用虚线内部分，并将 $\hat{\mathbf{w}}_k^c$ 信息与 $\hat{\mathbf{w}}_k^p$ 信息一起送入消息组合器组合输出 $\hat{\mathbf{w}}_k$ 信息；当 $\delta_k = 0$ 时，用户采

用 SDMA 方式传输，此时用户停用虚线内部分，在消息组合器中，空的 $\hat{\mathbf{w}}_k^c$ 信息与 $\hat{\mathbf{w}}_k^p$ 信息组合输出 $\hat{\mathbf{w}}_k$ 信息。系统用户多址接入方式指示向量为 $\Delta \triangleq \{\delta_1, \delta_2, \dots, \delta_K\}$ 。各用户信息编码为 $\{s^c, s_1^p, s_2^p, \dots, s_{|\mathcal{K}_1|}^p, s_{|\mathcal{K}_1|+1}^p, \dots, s_{|\mathcal{K}_1|+|\mathcal{K}_2|}^p\}$ ，其中 $|\mathcal{K}_1|$ 、 $|\mathcal{K}_2|$ 分别为 RSMA 用户数和 SDMA 用户数， $K = |\mathcal{K}_1| + |\mathcal{K}_2|$ ， s^c 、 s_k^p 分别代表系统中公共部分和用户 k 私有部分的信息。本文所使用的各变量含义如表 1 所示。

设基站对用户的公共部分和私有部分预编码矢量为 \mathbf{w}^c 与 \mathbf{w}_k^p ($\mathbf{w}^c, \mathbf{w}_k^p \in \mathbb{C}^{L \times 1}, k \in \{\mathcal{K}\}$)，基站发射预编码矩阵为 $\mathbf{w} \triangleq \{\mathbf{w}^c, \mathbf{w}_1^p, \mathbf{w}_2^p, \dots, \mathbf{w}_{|\mathcal{K}_1|}^p\}$ ，基站发射信号为

$$\mathbf{x} = \underbrace{\sum_{k \in \mathcal{K}_1} \mathbf{w}_k^p s_k^p + \mathbf{w}^c s^c}_{\mathcal{K}_1 \text{ 部分}} + \underbrace{\sum_{k \in \mathcal{K}_2} \mathbf{w}_k^p s_k^p}_{\mathcal{K}_2 \text{ 部分}} = \sum_{k \in \mathcal{K}} \mathbf{w}_k^p s_k^p + \mathbf{w}^c s^c \quad (2)$$

RSMA 用户信息拆分为公共部分，而 SDMA 用户无公共部分信息，故用户 k 的公共部分的 SINR 为

$$\gamma_k^c = \frac{\delta_k |\mathbf{h}_k^H \mathbf{w}^c|^2}{\sum_{m \in \mathcal{K}} |\mathbf{h}_k^H \mathbf{w}_m^p|^2 + \sigma^2} \quad (3)$$

RSMA 用户在解码其拆分的私有部分信息时，SIC 会将公共部分消除，干扰中只包含非本用户的私有部分；SDMA 用户在解码本用户信息时，干扰中除了非本用户的私有部分，还有非本用户的公共部分。故用户 k 的私有部分 SINR 为

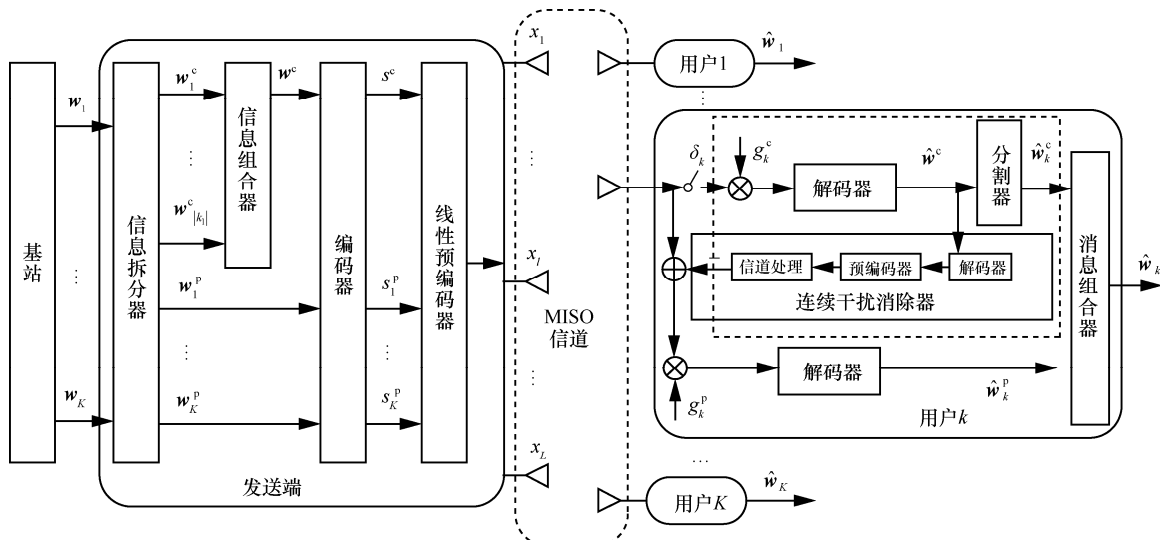


图 1 RSMA-SDMA 系统结构

$$\gamma_k^p = \frac{|\mathbf{h}_k^H \mathbf{w}_k^p|^2}{\sum_{m \in \mathcal{K}, m \neq k} |\mathbf{h}_k^H \mathbf{w}_m^p|^2 + (1 - \delta_k) |\mathbf{h}_k^H \mathbf{w}^c|^2 + \sigma^2} \quad (4)$$

$$P_0 \triangleq \sum_{k \in \mathcal{K}} \|\mathbf{w}_k^p\|_2^2 + \|\mathbf{w}^c\|_2^2 \quad (8)$$

设基站发射的总功率约束为 P_{th} ，总发射功率约束下最大最小用户速率问题可建模为

$$\begin{aligned} & \text{P1: } \max_{\mathbf{w}, \Delta} \min_k R_{k, \text{tot}} \\ & \text{s.t. } \text{C1: } R^c \leq \text{lb}(1 + \gamma_k^c), \forall \{k | \delta_k = 1\} \\ & \text{C2: } \sum_{\{k | \delta_k = 1\}} C_k^c \leq R^c \\ & \text{C3: } C_k^c = 0, \{k | \delta_k = 0\} \\ & \text{C4: } R_k^p \leq \text{lb}(1 + \gamma_k^p) \\ & \text{C5: } \sum_{k \in \mathcal{K}} \|\mathbf{w}_k^p\|_2^2 + \|\mathbf{w}^c\|_2^2 \leq P_{th} \end{aligned} \quad (9)$$

其中，C1 是 RSMA 用户公共和速率约束，C2 与 C3 是 RSMA 用户与 SDMA 用户的公共速率约束，C4 是 RSMA 用户与 SDMA 用户的私有速率约束，C5 是基站总发射预编码功率约束。约束条件中，多址接入方式指示向量 Δ 为非凸离散的，且 C1、C5 为非凸分式，第 2 节中将该问题分解为 2 个子问题：预编码设计和用户接入方式选择。

2 基于双层轮换的用户公平速率优化算法

本节提出用户预编码与多址接入方式优化的双层轮换算法，即内层基于 FP 算法迭代优化预编码设计，外层联合内层预编码设计的公共速率等结果逐次优化用户接入方式。

2.1 基于 FP 的预编码设计

本节将在 RSMA-SDMA 系统各用户接入方式 Δ 确定的前提下，优化预编码矩阵 \mathbf{w} ，以此确定公共速率分配矩阵 \mathbf{C} 和私有部分速率。

根据文献[14]，定义用户公平速率为

$$r = \min_{k \in \mathcal{K}} (R_{k, \text{tot}}) \quad (10)$$

在 Δ 确定时，问题 P1 可转化为

$$\begin{aligned} & \text{P2: } \max_{\mathbf{w}} r \\ & \text{s.t. } \text{C1} \sim \text{C5} \\ & \text{C6: } C_k^c + R_k^p \geq r \end{aligned} \quad (11)$$

通常，在 MISO 下行信道的用户公平速率问题中求解最优发射预编码矩阵时，要保持约束条件为凸函数。优化问题 P1 中 C1 和 C4 中包含的 r_k^c 和 r_k^p 的表达式（式(3)和式(4)）为非凸分式，为了将非凸问题转化为凸问题，典型求解方法为正半

表 1 系统变量

变量	含义
K	系统用户数
L	基站天线数
δ_k	用户多址接入方式指示变量
Δ	系统多址接入方式指示向量
s^c	系统公共部分信息
s_k^p	用户私有部分信息
\mathbf{w}^c	系统公共预编码矢量
\mathbf{w}_k^p	用户私有预编码矢量
\mathbf{w}	系统预编码矩阵
γ_k^c	用户公共部分 SINR
γ_k^p	用户私有部分 SINR
R_k^c	用户公共可达和速率
R_k^p	用户私有速率
\hat{C}_k^c	用户公共可达速率
C_k^c	用户公共速率
\mathbf{C}	系统公共速率分配矩阵
R^c	系统最小公共可达和速率
$R_{k, \text{tot}}$	用户总速率
P_0	系统总发射功率
P_{th}	系统总功率
r	用户公平速率

用户 k 的公共可达和速率与私有速率分别为

$$R_k^c = \text{lb}(1 + \gamma_k^c) \quad (5)$$

$$R_k^p = \text{lb}(1 + \gamma_k^p) \quad (6)$$

设用户 k 的公共可达速率为 \hat{C}_k^c ， \mathcal{K} 集合的用户的公共速率为 $C_k^c = \delta_k \hat{C}_k^c$ ， \mathcal{K}_2 集合的用户因无公共部分信息， $C_k^c = 0$ 。定义系统公共速率分配矩阵为 $\mathbf{C} = \{C_k^c | k \in \mathcal{K}\}$ ，为了 \mathcal{K}_1 中用户都能完整解码用户信息，系统公共和速率不得超过各用户公共可达和速率的最小值 $R^c = \min\{R_k^c\}, \forall \{k | \delta_k = 1\}$ ，即 $\sum_{\{k | \delta_k = 1\}} C_k^c \leq R^c$ 。

系统中集合 \mathcal{K} 的用户 k 总速率为

$$R_{k, \text{tot}} = C_k^c + R_k^p \quad (7)$$

基站总发射功率为

定松弛的 D.C. (SDR-D.C., semidefinite relaxation-difference of two convex function) 规划^[12,20]。但是其计算量大、收敛慢,且在发射接收天线数量增加时无法保证转换后问题与原问题等价,为此本文在求解最优预编码矩阵时引入了分式规划^[21-22],其可以降低计算复杂度,提高收敛速度。由于发射端为多天线,用户数大于2,导致式(3)和式(4)的分子、分母存在线性累加,因此本文采用二次变换的分式规划求解优化问题。

设预编码矩阵 \mathbf{w} 为非空矩阵,依据 FP 算法^[21],当分子满足 $|\mathbf{h}_k^H \mathbf{w}^c|^2 \geq 0$ 、 $|\mathbf{h}_k^H \mathbf{w}_k^p|^2 \geq 0$,且分母满足 $\sum_{m \in \mathcal{K}} |\mathbf{h}_k \mathbf{w}_m^p|^2 + (1 - \delta_k) |\mathbf{h}_k \mathbf{w}^c|^2 + \sigma^2 \geq 0$ 、 $\sum_{m \in \mathcal{K}} |\mathbf{h}_k \mathbf{w}_m^p|^2 + \sigma^2 \geq 0$ 时, P2 问题可等价为

$$\text{P3: } \max_{\mathbf{w}} \quad r$$

$$\begin{aligned} \text{s.t. } \bar{\text{C1}}: & \log \left(1 + 2 \operatorname{Re} \left((y_k^p)^H \mathbf{h}_k \mathbf{w}_k^p \right) - (y_k^p)^H \left(\sigma^2 + \right. \right. \\ & \left. \left. \mathbf{h}_k \left(\sum_{m \in \mathcal{K}, m \neq k} \mathbf{w}_m^p (\mathbf{w}_m^p)^H + (1 - \delta_k) \mathbf{w}^c (\mathbf{w}^c)^H \right) \mathbf{h}_k^H \right) (y_k^p) \right) \geq R_k^p \\ \bar{\text{C4}}: & \log \left(1 + 2 \delta_k \operatorname{Re} \left((y_k^c)^H \mathbf{h}_k \mathbf{w}^c \right) - (y_k^c)^H \left(\sigma^2 + \right. \right. \\ & \left. \left. \left(\sigma^2 + \mathbf{h}_k \left(\sum_{m \in \mathcal{K}} \mathbf{w}_m^p (\mathbf{w}_m^p)^H \right) \mathbf{h}_k^H \right) (y_k^c) \right) \right) \geq R^c, \{k | \delta_k = 1\} \\ & \text{C2, C3, C5, C6} \end{aligned} \quad (12)$$

其中, r 表示 FP 算法下的用户公平速率, y_k^p 、 y_k^c 是凸逼近的迭代辅助变量, $\mathbf{y} = \{y_k^c, y_k^p\}$, 且满足

$$y_k^c = \delta_k \left(\left(\sigma^2 + \mathbf{h}_k \left(\sum_{m \in \mathcal{K}} \mathbf{w}_m^{p*} (\mathbf{w}_m^{p*})^H \right) \mathbf{h}_k^H \right) \right)^{-1} (\mathbf{h}_k \mathbf{w}^{c*}) \quad (13)$$

$$y_k^p = \left(\left(\sigma^2 + \mathbf{h}_k \left(\sum_{m \in \mathcal{K}, m \neq k} \mathbf{w}_m^{p*} (\mathbf{w}_m^{p*})^H + (1 - \delta_k) \mathbf{w}^{c*} (\mathbf{w}^{c*})^H \right) \mathbf{h}_k^H \right) \right)^{-1} (\mathbf{h}_k \mathbf{w}_k^{p*}) \quad (14)$$

其中, \mathbf{w}_m^{p*} 和 \mathbf{w}_m^{c*} 为前一步预编码凸优化值。假设

$$a_k^c = \delta_k \mathbf{h}_k \mathbf{w}^{c*} \quad (15)$$

$$a_k^p = \mathbf{h}_k \mathbf{w}_k^{p*} \quad (16)$$

$$B_k^c = \sigma^2 + \mathbf{h}_k \left(\sum_{m \in \mathcal{K}} \mathbf{w}_m^p (\mathbf{w}_m^p)^H \right) \mathbf{h}_k^H \quad (17)$$

$$B_k^p = \sigma^2 + \mathbf{h}_k$$

$$\left(\sum_{m \in \mathcal{K}, m \neq k} \mathbf{w}_m^p (\mathbf{w}_m^p)^H + (1 - \delta_k) \mathbf{w}^c (\mathbf{w}^c)^H \right) \mathbf{h}_k^H \quad (18)$$

将式(15)~式(18)代入问题 P3, 得到

$$\text{P4: } \max_{\mathbf{w}} \quad r$$

$$\text{s.t. } \tilde{\text{C1}}: \log \left(1 + 2 \operatorname{Re} \left((y_k^p)^H a_k^p \right) - (y_k^p)^H B_k^p (y_k^p) \right) \geq R_k^p$$

$$\tilde{\text{C4}}: \log \left(1 + 2 \operatorname{Re} \left((y_k^c)^H a_k^c \right) - (y_k^c)^H B_k^c (y_k^c) \right) \geq R^c, \{k | \delta_k = 1\}$$

$$\text{C2, C3, C5, C6} \quad (19)$$

将式(15)~式(18)代入式(13)~式(14), 得到

$$y_k^c = (B_k^{c*})^{-1} a_k^{c*} \quad (20)$$

$$y_k^p = (B_k^{p*})^{-1} a_k^{p*} \quad (21)$$

其中, a_k^{c*} 和 B_k^{c*} 为前一步预编码矩阵代入所得。

经过上述转化, 问题 P1 转化为通过迭代寻优的新问题 P4。在求解问题 P4 时, 系统先将确定的 Δ 代入约束条件中, 固定系统用户接入方式。在重复迭代时, 将前一步 $\mathbf{w}^* = \{\mathbf{w}^{c*}, \mathbf{w}_1^{p*}, \mathbf{w}_2^{p*}, \dots, \mathbf{w}_{|\mathcal{K}|}^{p*}\}$ 代入式(20)和式(21)更新变量 \mathbf{y} , 通过凸逼近寻求最优值, 在 r 收敛时迭代停止, 得到最优预编码矩阵和公共速率分配, 其收敛阈值为 η 。通过 C6 得到优化后的用户公平速率, 基于 FP 的预编码优化总结为算法 1。通过算法 1 的步骤 3)~步骤 5), 可在保证约束的前提下进行凸优计算, 其中 r^* 和 \mathbf{w}^* 分别表示迭代过程中当前迭代步的临时用户公平速率和临时系统预编码矩阵。

算法 1 基于 FP 的预编码优化

- 1) 已知 Δ , 初始化 \mathbf{w}, r, r^*
- 2) 重复步骤 3)~步骤 7)
- 3) 通过式(20)、式(21)更新得到 \mathbf{y}^*
- 4) 通过固定的 \mathbf{y}^* 、 \mathbf{w}^* 代入问题 P4, 利用凸逼近得到 \mathbf{w} 和 r
- 5) 当 $r^* - r \leq \eta$ 时 r 收敛, $r = r^*$, 跳至步骤 7)
- 6) 将 $r = r^*$, 跳至步骤 3)
- 7) 以当前 \mathbf{w} 代入问题 P2 得到最优 R_k^c 、 R_k^p 与

$$\min_{k \in \mathcal{K}} R_{k, \text{tot}}$$

根据文献[18,23], FP 算法凸优化问题迭代

复杂度为 $\mathcal{O}(G^{3.5})$ ，由此算法 1 的复杂度为 $\mathcal{O}(\phi(2KL - Lv)^{3.5})$ ，其中， ϕ 表示迭代算法收敛之前的平均迭代次数， ν 表示 SDMA 用户的个数。

2.2 基于双层轮换的多址接入优化

本节依据算法 1 预编码矩阵 \mathbf{w} 优化结果，通过迭代，逐步搜寻干扰用户公平速率的用户 k ，更改多址接入方式 δ_k ，寻找最优的系统用户分配 Δ 。

求解 Δ 时，系统将所有用户接入方式初始化为 RSMA，并逐步优化单个用户的接入方式，在每一步迭代中保持用户公平速率的增加。这种方式避免了贪婪算法全局优化 Δ 导致的计算量过于复杂，变量空间随用户数呈指数上升的问题。

在优化过程利用特殊状态下 RSMA 用户公共部分与私有部分 SINR 可放缩不变的特性：由式(4)可知，当 $\sum_{m \in \mathcal{K}, m \neq k} |\mathbf{h}_k^H \mathbf{w}_m^p|^2 \gg |\mathbf{h}_k^H \mathbf{w}^c|^2$ 时，虽然 RSMA 用户转换为 SDMA 用户会导致私有部分 SINR 的分母内增加公共部分的干扰，但因 $\sum_{m \in \mathcal{K}, m \neq k} |\mathbf{h}_k^H \mathbf{w}_m^p|^2 \gg |\mathbf{h}_k^H \mathbf{w}^c|^2$ ，私有信息 SINR 与前一状态减少可以忽略。依此，本文优化的特殊状况为 1)限制用户速率的为 RSMA 用户；2)公共部分信道状态最差的用户 $C_k^c \neq 0$ 。在优化中由于最小公共可达和速率 R^c 增加，RSMA 用户的公共速率提升，且最小速率用户为 RSMA 用户时，系统解除了上一迭代步最小用户速率的约束，用户公平速率得到优化。

在固定 \mathbf{w} 求解 Δ 时，为了算法在下次迭代用户公平速率的增长，每次进入下一步迭代需要判断以下 4 个条件：1)最小总速率的用户是否为 RSMA 用户；2)限制总速率的用户是否需要 RSMA 公共速率 ($C_k^c \neq 0$)；3)计算得到新波束成形的预编码矩阵后用户公平速率是否大于上一步用户公平速率；4) Δ 是否全为 0。

为了实现研究目标，结合前文对算法设计的考虑，系统设计如算法 2 所示。

算法 2 基于双层轮换的多址接入优化

- 1) 初始化：设置迭代次数 $i = 0$
- 2) 初始化：设置 $\Delta_{(i)} = \{1, 1, \dots, 1\}$ 、 $R_{k,(i)}^c = 0$ 、 $R_{k,(i)}^p = 0$ 、 $r_{(i)} = 0$ 和 $\mathcal{C}_{(i)} = \{C_k^c = 0 \mid k \in \mathcal{K}\}$
- 3) 重复步骤 4)~步骤 11)
- 4) $i = i + 1$

- 5) 将 $\Delta_{(i-1)}$ 代入算法 1，得到 $\hat{\mathbf{w}}$ ，将得到的最优值计入 $\hat{R}_{k,(i)}^c = R_k^c$ 、 $\hat{R}_{k,(i)}^p = R_k^p$ 、 $\hat{r}_{(i)} = r$ 和 $\mathcal{C}_{(i)} = \mathcal{C}$
- 6) 当 $\hat{r}_{(i)} < r_{(i-1)}$ 跳至步骤 12)
- 7) 更新 $\mathbf{w} = \hat{\mathbf{w}}$ 、 $R_{k,(i)}^c = \hat{R}_{k,(i)}^c$ 、 $R_{(i)}^c = \hat{R}_{(i)}^c$ 、 $r_{(i)} = \hat{r}_{(i)}$ 、 $k_{(i)}^{\min} = \arg \min_k \{R_{k,(i)}^c\}$
- 8) 当 $k_{(i)}^{\min} \notin \{k \mid C_{k,(i)} \neq 0\}$ 时跳至步骤 12)
- 9) 当 $\Delta_{(i)}$ 全为 0 时跳至步骤 12)
- 10) $\delta_{k_{(i)}^{\min},(i-1)} = 0$ ，更新 $\Delta_{(i)}$ ， $\mathcal{K}_1 = \mathcal{K}_1 \setminus k_{(i)}^{\min}$ ， $\mathcal{K}_2 = \{k_{(i)}^{\min}\}$
- 11) 跳转至步骤 4)
- 12) 以 $\Delta_{(i)}$ 代入算法 1 得到 \mathbf{w}

在算法的第一轮迭代中，将预设 $\Delta_{(0)}$ 代入算法 1，得到优化的 $\hat{\mathbf{w}}$ ，此时各用户公共部分信息的公共可达和速率与公共和速率分别为 $\hat{R}_{k,(1)}^c$ 与 $\hat{R}_{(1)}^c$ ，用户公平速率为 $\hat{r}_{(1)}$ 。当 $\hat{r}_{(1)} \geq r_{(0)}$ 时，寻找最小的公共可达和速率用户 $k_{(1)}^{\min}$ ， $k_{(1)}^{\min} = \arg \min_k \{R_{k,(1)}^c \mid (k \mid \delta_k = 1)\}$ ，设置 $\delta_{k_{(1)}^{\min}} = 0$ ，非 $k_{(1)}^{\min}$ 用户的 δ 保持不变，将其更新为 $\Delta_{(1)}$ 。将 $\mathbf{w} = \hat{\mathbf{w}}$ 、 $R_{k,(1)}^c = \hat{R}_{k,(1)}^c$ 、 $R_{(1)}^c = \hat{R}_{(1)}^c$ 与 $r_{(1)} = \hat{r}_{(1)}$ ，进入下一次迭代，不符合上述判断条件时跳出迭代，且 $i = 0$ 。

在后续的每轮迭代中迭代次数为 i ，将 $\Delta_{(i-1)}$ 代入算法 1 保证约束进行寻优得到新的 $\hat{\mathbf{w}}$ 。依据 P4，得到了下一步迭代各用户的 $\hat{R}_{k,(i)}^c$ 、 $\hat{R}_{k,(i)}^p$ 和 $\hat{r}_{(i)}$ ，当 $\hat{r}_{(i)} \geq r_{(i-1)}$ ，寻找最小的公共可达和速率用户 $k_{(i)}^{\min}$ ， $k_{(i)}^{\min} = \arg \min_k \{\hat{R}_{k,(i)}^c \mid (k \mid \delta_k = 1)\}$ ，设置 $\delta_{k_{(i)}^{\min}} = 0$ ，保存分配结果为 Δ_i ，更新 $\mathbf{w} = \hat{\mathbf{w}}$ 、 $r_{(i)} = \hat{r}_{(i)}$ ，否则放弃此次迭代优化， Δ 、 \mathbf{w} 保持上次迭代值，跳出迭代。进入新迭代时，算法将新的用户多址接入方式指示向量 $\Delta_{(i-1)}$ 代入第 i 次迭代，由于系统公共和速率更改为第 $i-1$ 次迭代时第二小的用户公共可达和速率，系统公共和速率增加。在算法跳出迭代后，算法 1 在寻优后的 Δ 下计算，获取最优的 Δ 和用户公平速率，算法 2 结束，其他运算与第一轮迭代相同，这里不再赘述。

算法 2 的复杂度为 $\mathcal{O}(\log(K + \phi(2KL - Lv)^{3.5}) - \log(K - I + \phi(2KL - Lv)^{3.5}))$ ，其中， I 表示算法 2 需要迭代的平均次数。

3 仿真结果与分析

本节对 RSMA-SDMA 传输策略下的预编码设计进行了仿真,通过在不同的发射功率、基站天线数、用户数信道环境中,将 RSMA-SDMA 传输策略与 RSMA、NOMA、SDMA 传输策略进行性能对比,图 2~图 4 均采用 FP 算法优化预编码矢量^[22],信道为瑞利信道,信道噪声方差为 σ^2 。

图 2 为 6 个用户在两天线基站下发射功率与用户公平速率关系曲线。随着发射功率阈值增加,4 种传输策略的用户公平速率均随之增加,尽管问题是离散非凸的,RSMA-SDMA 对用户公平速率优化的效果依然优于其他 3 种参考传输策略。RSMA 的公共信息信道提升了系统自由度,但不足以弥补干扰降低私有信息信道传输的影响。仿真数据表明,本文策略有效地解除了信道条件差的用户对公共速率的限制,在预编码设计帮助下,信息通过条件较差的信道时的速率得以提升。本文 RSMA-SDMA 与 RSMA、NOMA 传输策略在解码前都由 SIC 消除了一部分干扰,且相对 RSMA,本文传输策略进一步使公共和速率不受信道条件较差用户的限制,用户公平速率得到提升。

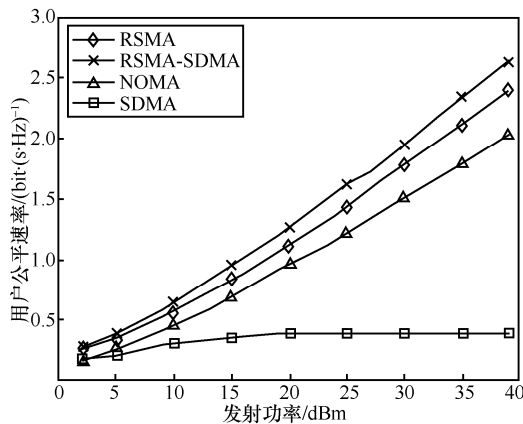


图2 发射功率与用户公平速率关系曲线

图 3 为发射天线数目与用户公平速率之间的关系曲线,其中,用户数为 12,发射总功率 $P_{\text{in}}=25$ dB。图 3 仿真数据表明,4 种传输策略均随着天线数增加而增加,但增加到 4 根天线之后,NOMA 无法在提升系统发射分集增益时改善用户公平速率,这是因为增加的天线数改善了用户公共信息和私有信息可选择性,提升了系统的自由度。此时,RSMA-SDMA 与 RSMA 可选择更优的信道来增大发射功率占比,在增加发射分集增益且不增加发射功率前

提下有效减少多径衰落带来的影响,提升了用户公共速率。另外,SIC 虽在天线数达到阈值后无法改善信干噪比,但结合了 SDMA 的 RSMA 可以在公共信道给予的带宽补充的情况下,与 SDMA 一样同时借助各用户的独立信道传输私有信息,这也使本文传输策略中的 RSMA 实际上增加的发射链路改善了其与用户的信道,让发射能量可以聚焦到状态比较好的信道中,并且 RSMA-SDMA 策略在解除了最差信道用户带来的公共速率的锁定下,提升了预编码设计的可行域,信道条件较差的用户分得速率增加,系统用户公平速率得以增加,相对单独使用 RSMA 可以获得更好的优化效果。

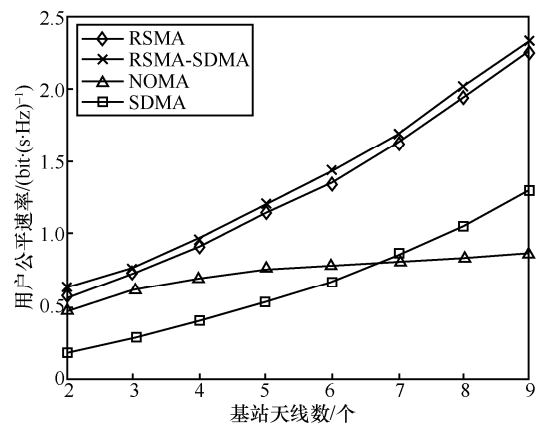


图3 基站天线数与用户公平速率关系曲线

图 4 为在两条基站发射天线下用户数与用户公平速率关系曲线。从图 4 可以看到,相对于 SDMA,RSMA、NOMA、RSMA-SDMA 这 3 种策略由于采用了 SIC,当用户数小于或等于 6 时,都可得到相对较好的速率;当用户数超过 6 时,RSMA-SDMA 与 RSMA 传输策略也相对表现较好,且 RSMA-SDMA 在所有用户数上均表现最优。仿真数据证实,RSMA 与 RSMA-SDMA 都可提升信道自由度,本文算法使公共和速率不受信道条件较差用户的限制,用户公平速率得到提升。

为了验证 RSMA-SDMA 预编码设计使用本文 FP 算法相对于使用 SDR-D.C.算法^[12,20]的优势,本文在相同信道环境与接入向量矩阵(2 个 SDMA 用户、4 个 RSMA 用户)条件下,对比了 2 种算法在发射功率为 20 dBm 与 25 dBm 时的性能,其中,用户数为 6,发射天线数为 2,仿真结果如图 5 所示。结果表明,使用 FP 算法与 SDR-D.C.算法的预编码器均可收敛,但 FP 算法可以更加高效地获得收敛,收敛速度相比 SDR-D.C.算法最少提前 5 步,且 FP

算法的计算复杂度远低于 SDR-D.C.算法, 这使 FP 算法有着更好的能量分配空间。

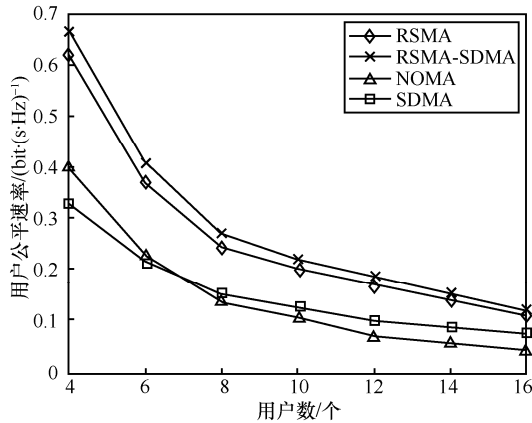


图 4 用户数与用户公平速率关系曲线

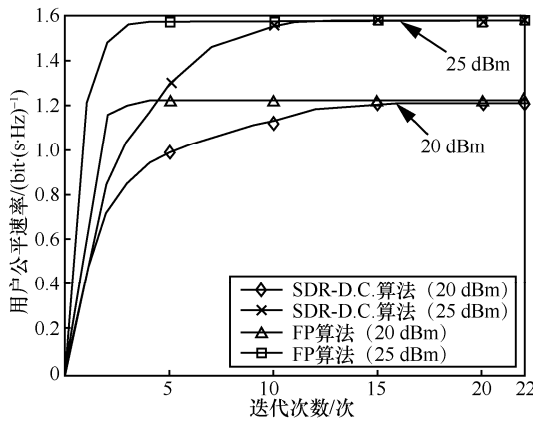


图 5 FP 算法与 SDR-D.C.算法迭代次数对比曲线

为了验证本文 RSMA-SDMA 传输策略的预编码算法优势, 图 6 将使用 FP 算法的 RSMA-SDMA 传输策略、RSMA 传输策略与使用 WMMSE 算法^[1]、SCA 算法^[3,24]的 RSMA 传输策略进行性能对比, 其中, 用户数为 3, 发射天线数为 4。仿真结果表明, 本文算法依然具有性能优势, 且随着功率的增加, RSMA-SDMA 的用户公平速率高于 RSMA, 这验证了本文对公共部分设计的 RSMA-SDMA 传输策略具有性能优势。

4 结束语

本文在发射总功率受限的情况下, 研究了公平性驱动的 RSMA-SDMA 联合用户接入方式选择、预编码优化问题, 以优化最小用户速率来最大化系统公平性。为了消除用户信道差异带来的最小用户速率限制, 本文设计了双层轮换算法问题分解成两层求解: 内层利用 FP 算法解决约束非

凸问题; 外层利用迭代避免了离散变量的非凸性。仿真结果表明, 相比于参考算法, 本文算法可在功率受限下提升用户公平速率性能, 获得比 SDR-D.C.算法更快的收敛速度, 比参考的传输策略和预编码设计算法更好的系统公平性保障。

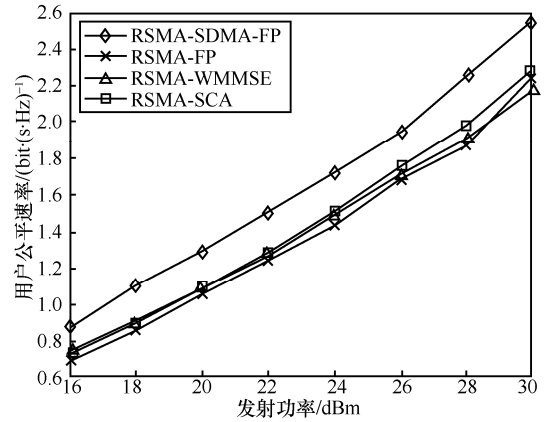


图 6 FP 算法与 WMMSE 算法、SCA 算法用户公平速率对比曲线

参考文献:

- [1] MAO Y J, CLERCKX B, LI V O K. Rate-splitting multiple access for downlink communication systems: bridging, generalizing, and outperforming SDMA and NOMA[J]. EURASIP Journal on Wireless Communications and Networking, 2018, 2018(1): 133.
- [2] 苏鑫. 无线协作传输系统中新型干扰处理技术研究[D]. 北京: 北京邮电大学, 2019.
- [3] SU X. Research on novel interference processing in wireless cooperative transmission system[D]. Beijing: Beijing University of Posts and Telecommunications, 2019.
- [4] MAO Y J, CLERCKX B, ZHANG J, et al. Max-min fairness of K-user cooperative rate-splitting in MISO broadcast channel with user relaying[J]. IEEE Transactions on Wireless Communications, 2020, 19(10): 6362-6376.
- [5] HAN T, KOBAYASHI K. A new achievable rate region for the interference channel[J]. IEEE Transactions on Information Theory, 1981, 27(1): 49-60.
- [6] JOUDEH H, CLERCKX B. Sum-rate maximization for linearly precoded downlink multiuser MISO systems with partial CSIT: a rate-splitting approach[J]. IEEE Transactions on Communications, 2016, 64(11): 4847-4861.
- [7] PIOVANO E, CLERCKX B. Optimal DoF region of the K-user MISO BC with partial CSIT[J]. IEEE Communications Letters, 2017, 21(11): 2368-2371.
- [8] MAO Y J, CLERCKX B, LI V O K. Energy efficiency of rate-splitting multiple access, and performance benefits over SDMA and NOMA[C]//Proceedings of 2018 15th International Symposium on Wireless Communication Systems (ISWCS). Piscataway: IEEE Press, 2018: 1-5.
- [9] DAI M B, CLERCKX B, GESBERT D, et al. A rate splitting strategy for massive MIMO with imperfect CSIT[J]. IEEE Transactions on

- Wireless Communications, 2016, 15(7): 4611-4624.
- [9] PAPAFAIROPOULOS A, CLERCKX B, RATNARAJAH T. Rate-splitting to mitigate residual transceiver hardware impairments in massive MIMO systems[J]. IEEE Transactions on Vehicular Technology, 2017, 66(9): 8196-8211.
- [10] MAO Y J, CLERCKX B, LI V O K. Rate-splitting for multi-user multi-antenna wireless information and power transfer[C]//Proceedings of 2019 IEEE 20th International Workshop on Signal Processing Advances in Wireless Communications. Piscataway: IEEE Press, 2019: 1-5.
- [11] REDDY Y S, CHOPRA G, DUBEY A, et al. Rate-splitting random access mechanism for massive machine type communications in 5G cellular Internet-of-things[C]//Proceedings of 2021 IEEE 32nd Annual International Symposium on Personal, Indoor and Mobile Radio Communications. Piscataway: IEEE Press, 2021: 648-653.
- [12] MO J, WALRAND J. Fair end-to-end window-based congestion control[J]. IEEE/ACM Transactions on networking, 2000, 8(5): 556-567.
- [13] KARIPIDIS E, SIDIROPOULOS N D, LUO Z Q. Quality of service and max-min fair transmit beamforming to multiple cochannel multicast groups[J]. IEEE Transactions on Signal Processing, 2008, 56(3): 1268-1279.
- [14] CHEN D, KUEHN V. Weighted max-min fairness oriented load-balancing and clustering for multicast cache-enabled F-RAN[C]//Proceedings of 2016 9th International Symposium on Turbo Codes and Iterative Information Processing (ISTC). Piscataway: IEEE Press, 2016: 395-399.
- [15] ZHOU J S, SUN Y J, LI S, et al. Max-min fairness driven multicast sparse beamforming for cache-enabled cloud RAN[J]. Computer Communications, 2020, 154: 246-253.
- [16] BASTAMI H, LETAFATI M, MORADIKIA M, et al. On the physical layer security of the cooperative rate-splitting-aided downlink in UAV networks[J]. IEEE Transactions on Information Forensics and Security, 2021, 16: 5018-5033.
- [17] CERNA-LOLI R, DIZDAR O, CLERCKX B. A rate-splitting strategy to enable joint radar sensing and communication with partial CSIT[C]//Proceedings of 2021 IEEE 22nd International Workshop on Signal Processing Advances in Wireless Communications. Piscataway: IEEE Press, 2021: 491-495.
- [18] ZHOU J S, SUN Y J, CHEN R R, et al. Rate splitting multiple access for multigroup multicast beamforming in cache-enabled C-RAN[J]. IEEE Transactions on Vehicular Technology, 2021, 70(12): 12758-12770.
- [19] YANG Z H, CHEN M Z, SAAD W, et al. Optimization of rate allocation and power control for rate splitting multiple access (RSMA)[J]. IEEE Transactions on Communications, 2021, 69(9): 5988-6002.
- [20] 孙彦景, 刘洋, 周家思, 等. 基于非完美信道信息的 MIMO NOMA 系统和速率最大化[J]. 通信学报, 2019, 40(11): 94-100.
SUN Y J, LIU Y, ZHOU J S, et al. Sum-rate maximization in MIMO NOMA system with imperfect CSI[J]. Journal on Communications, 2019, 40(11): 94-100.
- [21] SHEN K M, YU W. Fractional programming for communication systems—part I: power control and beamforming[J]. IEEE Transactions on Signal Processing, 2018, 66(10): 2616-2630.
- [22] AHMAD A A, KAKAR J, DAHROUJ H, et al. Rate splitting and common message decoding for MIMO C-RAN systems[C]//Proceedings of 2019 IEEE 20th International Workshop on Signal Processing Advances in Wireless Communications. Piscataway: IEEE Press, 2019: 1-5.
- [23] ZHOU Y H, YU W. Fronthaul compression and transmit beamforming optimization for multi-antenna uplink C-RAN[J]. IEEE Transactions on Signal Processing, 2016, 64(16): 4138-4151.
- [24] ZHOU J S, SUN Y J, TELLAMBURA C. Physical-layer security for cache-enabled C-RANs via rate splitting[J]. IEEE Communications Letters, 2022, PP(99): 1.

[作者简介]



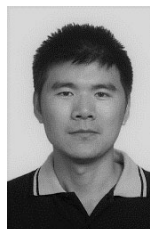
孙彦景 (1977-), 男, 山东滕州人, 博士, 中国矿业大学教授、博士生导师, 主要研究方向为工业物联网、无线通信。



程枫陟 (1996-), 男, 山东济宁人, 中国矿业大学硕士生, 主要研究方向为速率分拆多址技术、涡旋波通信技术。



周家思 (1993-), 男, 安徽淮北人, 中国矿业大学博士生, 主要研究方向为 MIMO 无线通信、速率分拆多址技术。



李松 (1985-), 男, 山东济宁人, 博士, 中国矿业大学副教授, 主要研究方向为 5G/6G 移动通信、智能工业物联网。