

基于 GSIC 的无小区大规模 MIMO-NOMA 系统下行可达速率分析

刘成成, 邵其心, 刘 镠, 宋荣方

(南京邮电大学通信与信息工程学院, 南京 210003)

摘要: 探索了无小区大规模多输入多输出 (Multiple-input multiple-output, MIMO) 系统与非正交多址接入 (Non-orthogonal multiple access, NOMA) 的融合方案, 将基于群体串行干扰删除 (Group successive interference cancellation, GSIC) 的 NOMA 技术应用于无小区大规模 MIMO 系统下行链路, 并提出根据用户等效路径损耗对用户进行群体划分的方法, 推导得出基于 GSIC 的无小区大规模 MIMO-NOMA 系统下行链路用户可达速率表达式。仿真结果表明, 相比于传统的串行干扰删除 (Successive interference cancellation, SIC)-NOMA 系统, 基于 GSIC 的无小区大规模 MIMO-NOMA 系统在可达速率方面具有明显优势。

关键词: 无小区大规模多输入多输出; 非正交多址; 群体串行干扰删除; 等效路径损耗; 可达速率

中图分类号: TN929.5

文献标志码: A

Achievable Rate Analysis for GSIC-Based Cell-Free Massive MIMO-NOMA Downlink Systems

LIU Chengcheng, TAI Qixin, LIU Liu, SONG Rongfang

(College of Telecommunication & Information Engineering, Nanjing University of Posts and Telecommunications, Nanjing 210003, China)

Abstract: The paper investigates the integration scheme of cell-free massive multiple-input multiple-output (MIMO) and non-orthogonal multiple access (NOMA). NOMA based on group successive interference cancellation (GSIC) method is applied to the downlink cell-free massive MIMO systems. Furthermore, a novel grouping method according to user's equivalent path loss is developed and the expression of per user's achievable rate is derived. The simulation results show that the performance of downlink cell-free massive MIMO-NOMA systems based on GSIC is better than that of the cell-free massive MIMO-NOMA systems based on successive interference cancellation (SIC) in terms of achievable rate.

Key words: cell-free massive multiple-input multiple-output (MIMO); non-orthogonal multiple access (NOMA); group successive interference cancellation (GSIC); equivalent path loss; achievable rate

引 言

随着人们对通信服务需求的不断增长,巨流量和大连接已成为超五代(B5G)和第六代(6G)通讯网络^[1-2]的重要特征。由于毫米波频段拥有大量未充分使用的频谱资源,可以有效缓解频谱资源短缺,因而受到学术界的广泛关注^[3]。与此同时,相比于正交多址(Orthogonal multiple access, OMA)技术,非正交多址(Non-orthogonal multiple access, NOMA)具有更高的频谱效率、灵活支持更大的连接数,可以满足未来B5G/6G通信对巨流量、大连接的需求^[4-7]。NOMA主要可分为码域NOMA和功率域NOMA,本文主要研究功率域NOMA。功率域NOMA在功率域上叠加传输多个用户信号,接收端根据信号强弱顺序对占用相同时频空资源的用户信号进行串行干扰删除(Successive interference cancellation, SIC)。为了降低误差传播,NOMA采用用户分簇的方法以减少SIC次数。对SIC技术展开深入研究,将传统的SIC扩展到群体串行干扰删除^[8-11](Group successive interference cancellation, GSIC)。与SIC不同,GSIC把一群用户作为一个整体,通过对群体用户信号进行排序,顺序地对群体用户信号进行解调和干扰删除^[8]。在使用NOMA技术的多输入多输出(Multiple-input multiple-output, MIMO)系统中,传统基于用户分簇的方案在簇内采用NOMA,簇间采用空分多址(Space division multiple access, SDMA)。而基于GSIC的方案,群体内采用SDMA,群体间采用NOMA。基于GSIC思想,文献[9]研究了NOMA与MIMO结合的方案,并提出一种功率最小化的预编码新方法。文献[10-11]提出了基于GSIC的智能反射面辅助的MIMO-NOMA融合新框架,通过设计收发器和优化反射信号相位使系统的总发射功率最小化,智能反射面具有低成本、高能效的特点^[12]。文献[9-11]均表明,GSIC-NOMA与MIMO的结合可以有效降低系统功率消耗。文献[13]将GSIC应用于信道估计阶段,在多小区大规模MIMO-NOMA系统中提出了一种新颖的半盲信道估计方法。仿真结果表明,GSIC的应用可以有效降低导频污染。

无小区大规模MIMO取消了蜂窝网中小区这一概念,所有接入点(Access point, AP)随机均匀地分布在系统中。与蜂窝网通信相比,无小区大规模MIMO系统可实现巨大的宏分集和更高的覆盖范围。在无小区大规模MIMO中,中央处理器(Central processing unit, CPU)旨在通过高速、无误码的光纤网络连接到系统中的AP,每个AP只需要进行简单的信号处理,把复杂、繁琐的操作通过光纤网络传给CPU进行联合处理。文献[14-15]指出,无小区系统相比蜂窝网具有更高的系统吞吐量,在抵抗阴影衰落方面具有明显优势。无小区大规模MIMO与NOMA作为新一代移动通信中的关键技术,两者的结合是6G通信研究中的热点话题之一。文献[16]首次把NOMA应用于无小区大规模MIMO系统下行链路,表明NOMA可同时服务的用户数量明显大于OMA。文献[17-20]对NOMA辅助的无小区大规模MIMO系统中的用户分簇方法和功率分配方案展开进一步研究。为了避免具有相似信道条件的用户在使用相同导频时会存在严重的导频污染,文献[18-19]根据用户信道的相似度对用户进行分簇,把信道相关性较弱的用户放在一簇。然而,基于分簇的无小区大规模MIMO-NOMA存在功率效率不高的问题^[9]。

本文将GSIC应用于无小区大规模MIMO-NOMA系统下行链路。与集中式的大规模MIMO-NOMA系统不同,在无小区大规模MIMO系统中,由于每个用户到不同AP有不同的路径损耗,本文提出等效路径损耗的概念,对用户进行群体划分,将处在相同或相近等效路径损耗等高线上的用户作为一个群体。本文推导出用户可达速率的闭合表达式,此表达式考虑了使用GSIC后未解调群体对当前解调群体的干扰,不完美的GSIC导致的误差传播和群体内部其他用户信号干扰。仿真结果表明,相比于传统的SIC-NOMA系统,基于GSIC的无小区大规模MIMO-NOMA系统在可达速率方面具有明显优势。

1 系统模型

本文考虑NOMA辅助的无小区大规模MIMO下行链路, M 个单天线AP在同一时频资源块对空间上随机分布的 $N \times K$ 个单天线用户进行服务,用户分为 N 个群体,每个群体有 K 个用户组成。每个AP通过高速无错的光纤网络连接到CPU^[14]。第 m 个AP与第 n 个群体中的第 k 用户间的信道 h_{mnk} 可建模为

$$h_{mnk} = \beta_{mnk}^{1/2} \tilde{h}_{mnk} \quad (1)$$

式中: β_{mnk} 为大尺度功率增益,考虑了路径损耗与阴影衰落,其数值变化非常缓慢; \tilde{h}_{mnk} 反映了小尺度衰落,服从均值为0,方差为1的高斯分布。

1.1 群体划分方案

本节提出基于等效路径损耗划分群体方案,将处在相近或相同等效路径损耗等高线上的用户归为一个群体,并将一个群体中的所有用户看作一个整体。 $\beta_u = [\beta_{1,u}, \beta_{2,u}, \dots, \beta_{M,u}]$ 为用户 u 与系统中所有AP的大尺度功率增益集合,用户 u 的等效路径损耗 λ_u 可表示为

$$\lambda_u = \frac{1}{\beta_{1,u}, \beta_{2,u}, \dots, \beta_{M,u}} \quad (2)$$

根据式(2),系统中随机部署的3个AP的等效路径损耗等高线示意图如图1所示。根据系统中所有用户的大尺度功率增益集合计算用户各自的等效路径损耗 λ ,再对用户的等效路径损耗进行排序。把等效路径损耗最小的 K 个用户归为第1个群体,再把等效路径损耗次小的 K 个用户归为第2个群体,以此类推,给系统中用户划分群体。

在功率域NOMA中,更高的功率被分配给具有较低信道增益用户的群体,根据上述分群体方法,群体 N 的用户具有较高的路径损耗(较低的信道增益)需要分配较高的功率,即 $P_1 \leq P_2 \leq \dots \leq P_n \leq \dots \leq P_N, P_n$ 为分配给群体 n 中所有用户的总功率。

1.2 信道状态信息获取

在信道状态信息(Channel state information, CSI)获取阶段,AP根据所接收到的导频信号来估计系统上行信道增益。本文默认系统采用时分双工(Time division duplexing, TDD),根据TDD系统的互易性可得到系统下行信道增益。为了节省系统信道估计阶段的导频开销,每个群体内的用户使用相互正交的导频,群体与群体之间复用相同的导频。导频长度为 $\tau, \tau \geq K$ 。在每个群体中,使用导频 ϕ_k 的用户标识为用户 k 。用户 j 和用户 l 使用的导频序列分别为 ϕ_j 和 $\phi_l, j \neq l$,可得 $\phi_j \phi_j = 1, \phi_j \phi_l = 0$ 。系统中的用户发送导频信号,第 m 个AP所接收到的导频信号可表示为

$$\mathbf{y}_m^p = \sqrt{\tau p_p} \sum_{n=1}^N \sum_{k=1}^K h_{mnk} \phi_k + \mathbf{n}_m \quad (3)$$

式中: p_p 为导频的发射功率, $\mathbf{n}_m \in \mathbb{C}^{K \times 1}$ 为均值为0、协方差矩阵为 \mathbf{I}_τ 的加性高斯白噪声(Additive white Gaussian noise, AWGN)向量。

为获得信道估计值 \hat{h}_{mnk} ,接收点 m 所接收到的信号乘上导频的共轭转置 ϕ_k^H ,结果为

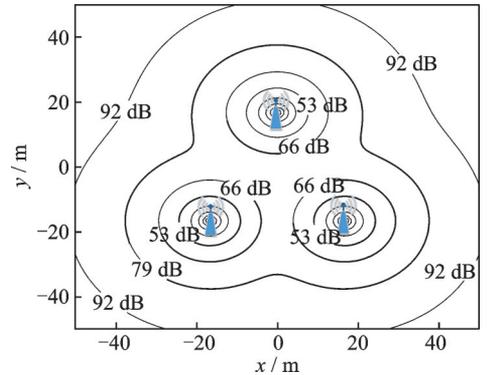


图1 无小区系统等效路径损耗

Fig.1 Illustration of equivalent path loss for a cell-free system

$$\tilde{y}_{mk}^p = \boldsymbol{\phi}_k^H \mathbf{y}_m^p = \sqrt{\tau p_p} \sum_{n=1}^N h_{mnk} + \boldsymbol{\phi}_k^H \mathbf{n}_m \quad (4)$$

在式(4)的基础上,接收点 m 对信道 h_{mnk} 进行线性最小均方误差 (Linear minimum mean square error, LMMSE) 估计, h_{mnk} 估计值 \hat{h}_{mnk} 为

$$\hat{h}_{mnk} = \frac{E[\tilde{y}_{mk}^{p*} h_{mnk}]}{E[|\tilde{y}_{mk}^p|^2]} \tilde{y}_{mk}^p = \frac{\sqrt{\tau p_p} \beta_{mnk}}{1 + \tau p_p \sum_{n'=1}^N \beta_{mn'k}} \tilde{y}_{mk}^p \quad (5)$$

式中: \tilde{y}_{mk}^p 服从高斯分布, \tilde{y}_{mk}^p 的共轭表示为 \tilde{y}_{mk}^{p*} , 估计值 \hat{h}_{mnk} 可以改写为

$$\hat{h}_{mnk} = \sqrt{u_{mnk} v_{mnk}} \quad (6)$$

式中: $v_{mnk} \sim CN(0, 1)$, u_{mnk} 为

$$u_{mnk} = E\left[|\hat{h}_{mnk}|^2\right] = \frac{\tau p_p \beta_{mnk}^2}{1 + \tau p_p \sum_{n'=1}^N \beta_{mn'k}} \quad (7)$$

此外,信道估计误差可以表示为

$$e_{mnk} = h_{mnk} - \hat{h}_{mnk} \quad (8)$$

因为, e_{mnk} 和 \hat{h}_{mnk} 统计独立, 所以 $E[|e_{mnk}|^2] = \beta_{mnk} - u_{mnk}$ 。

1.3 下行链路信号传输

在下行链路传输阶段,系统中所有 AP 同时为用户提供服务。与上行链路导频传输不同,为了减少来自其他信号的干扰,AP 在信号传输之前,利用 LMMSE 估计的 CSI 执行预编码操作,第 m 个 AP 向系统中复用相同导频的用户发送的数字信号可表示为

$$x_k = \sum_{n=1}^N \sqrt{P_{nk}} x_{nk} \quad (9)$$

式中: x_{nk} 为发送给第 n 群体中的第 k 用户的数字信号, P_{nk} 为 AP 分配的发射功率。发送给任意用户的数字信号满足以下约束

$$E[x_{nk} x_{ml}^*] = \begin{cases} 1 & n = m \text{ 且 } k = l \\ 0 & \text{其他} \end{cases} \quad (10)$$

第 m 个 AP 进行预编码操作,向用户发射的信号可表示为

$$s_m = \sum_{k=1}^K \frac{\hat{h}_{mnk}^*}{|\hat{h}_{mnk}|} x_k = \sum_{k=1}^K \frac{v_{mk}^*}{|v_{mk}|} x_k \quad (11)$$

系统中 AP 服务所有用户,第 n 群体中的第 k 用户所接收到信号可表示为

$$y_{nk} = \sum_{m=1}^M h_{mnk} s_m + n_{nk} = \underbrace{\sqrt{P_{nk}} c_{nk} x_{nk}}_{\text{有用信号}} + \underbrace{\sum_{k'=1, k' \neq k}^K \sqrt{P_{nk'}} c_{nk'} x_{nk'}}_{\text{群体内干扰}} + \underbrace{\sum_{n'=1, n' \neq n}^N \sum_{k'=1}^K \sqrt{P_{n'k'}} c_{n'k'} x_{n'k'}}_{\text{群体间干扰}} + \underbrace{n_{nk}}_{\text{噪声}} \quad (12)$$

式中: $c_{nk} = \sum_{m=1}^M h_{mnk} \frac{v_{mk}^*}{|v_{mk}|}$, $c_{nk'} = \sum_{m=1}^M h_{mnk} \frac{v_{mk'}^*}{|v_{mk'}|}$, n_{nk} 为高斯白噪声。第 n 群体中的第 k 用户所接收到信号除了所需的有用信号外,还受到群体内其他用户,其他群体用户和噪声的干扰。

2 下行链路速率分析

根据式(12),第 n 群体中的第 k 用户的接收信号经过 GSIC 后,可以改写为

$$\tilde{y}_{nk} = \sqrt{P_{nk}} c_{nk} x_{nk} + \tilde{n}_{nk} \quad (13)$$

式(12)中的第1项为所需的有用信号分量,第2项 \tilde{n}_{nk} 表示为干扰信号,干扰信号可表示为

$$\tilde{n}_{nk} = \underbrace{\sum_{k'=1, k' \neq k}^K \sqrt{P_{nk'}} c_{nk'} x_{nk'}}_{\text{群体内干扰}} + \underbrace{\sum_{n'=1}^{n-1} \sum_{k'=1}^K \sqrt{P_{n'k'}} c_{n'k'} x_{n'k'}}_{\text{GSIC后未解调群体的干扰}} + \underbrace{\sum_{n'=n+1}^N \sum_{k'=1}^K \sqrt{P_{n'k'}} [c_{n'k'} x_{n'k'} - c_{n'k'} \hat{x}_{n'k'}]}_{\text{误差传播}} + \underbrace{n_{nk}}_{\text{噪声}} \quad (14)$$

式中: $\hat{x}_{n'k'}$ 为数字信号 $x_{n'k'}$ 的估计值,由文献[16]可知, $x_{nk} = \rho_{nk} \hat{x}_{nk} + e_{jk}$ 。其中, $\hat{x}_{nk} \sim CN(0, 1)$, $e_{jk} \sim CN(0, \sigma_{e_{jk}}^2 / (1 + \sigma_{e_{jk}}^2))$, $\rho = E[x_{nk}^* \hat{x}_{nk}] = E[x_{nk} \hat{x}_{nk}^*] = 1 / (1 + \sigma_{e_{jk}}^2)^{1/2}$, \hat{x}_{nk} 与 ρ 相互独立, ρ 反映了 x_{nk} 与 \hat{x}_{nk} 之间的相关性, ρ 值越大,相关性越强。根据式(14)进一步推导,得出群体 n 中用户 k 的下行链路的可达速率估计值 \tilde{R}_{nk} 为

$$\tilde{R}_{nk} = \frac{\tau_c - \tau}{\tau_c} \log_2 \left(1 + \frac{P_d}{\sum_{i=1}^3 P_{I_i} + \sigma_{nk}^2} \right) \quad (15)$$

式中: τ_c 和 τ 分别为相干间隔与正交导频序列长度, P_d 为所需有用信号功率, σ_{nk}^2 为加性高斯白噪声功率。 P_{I_1} 为干扰信号的功率, P_{I_1} 为群体内部其他用户信号的功率, P_{I_2} 为GSIC后未解调群体对当前解调群体的干扰功率, P_{I_3} 为由于不完美的GSIC导致的误差传播产生的干扰功率。所有项功率表示形式定义为

$$P_d = P_{nk} |c_{nk}|^2 \quad (16)$$

$$P_{I_1} = \sum_{k'=1, k' \neq k}^K P_{nk} |c_{nk'}|^2 \quad (17)$$

$$P_{I_2} = \left(\sum_{n'=1}^{n-1} P_{n'k} \right) |c_{nk}|^2 + \sum_{n'=1}^{n-1} \sum_{k'=1, k' \neq k}^K P_{n'k'} |c_{nk'}|^2 \quad (18)$$

$$P_{I_3} = \sum_{n'=n+1}^N \sum_{k'=1}^K P_{n'k'} E \left[|c_{n'k'} x_{n'k'} - c_{n'k'} \hat{x}_{n'k'}|^2 \right] \quad (19)$$

在GSIC-NOMA辅助的无小区大规模MIMO下行系统中,系统可以在用户数过载的情况下正常通信,此时数据流的数量大于空间自由度(系统中天线数目)。理论上,系统服务的用户数可以随着群体数的增加而无限地增长,然而,当系统中群体数量增大时,GSIC的复杂度也随之增加。

3 仿真结果与分析

本节提供基于GSIC-NOMA与基于传统SIC-NOMA辅助的无小区大规模MIMO下行系统的仿真结果,对比两者性能。规定传统SIC-NOMA系统中每个簇内用户数目相同。本文考虑一个大小为 $D \text{ m} \times D \text{ m}$ 的正方形模拟区域,所有用户和AP随机均匀分布在正方形模拟区域中。系统中单个AP的发射功率为 P_d ,根据信道增益低的群体分配高功率,信道增益高的群体分配低功率的原则,每个AP按照一定的比例给不同群体分配功率,每个群体内部的用户进行平均功率分配。本文参照文献[14]中大尺度功率增益 β_{mnk} 的模型进行仿真,具体仿真参数如表1所示。

表1 系统仿真参数

Table 1 System simulation parameters		
参数	物理意义	参数值
ρ	误差传播系数	0.9
P_p/mW	导频功率	100
P_d/mW	平均发射功率	200
σ_{sh}/dB	阴影衰落标准差	8
D/m	正方形模拟区域宽度	1 000
τ_c	相干间隔	100
τ	正交导频序列长度	K

图2对基于GSIC-NOMA与传统基于SIC-NOMA辅助的无小区大规模MIMO系统下行链路中簇内用户和速率的累积分布函数进行比较。其中,系统中的AP数为50,用户数分别为100和150两种情况。在基于GSIC-NOMA系统中,规定每个群体存在50个用户,当用户数为100时,分为2个群体($N=2$),当用户数为150时,分为3个群体($N=3$)。而在基于SIC-NOMA系统中,规定存在50个簇,当用户数为100时,簇内用户数 $N=2$,当用户数为150时,簇内用户数 $N=3$ 。从图2中可以明显地看出,在群体数 $N=2$ 和 $N=3$ 的情况下,相比于传统基于SIC-NOMA辅助的无小区大规模MIMO系统,所提出的基于GSIC-NOMA辅助的无小区大规模MIMO系统性能具有很大优势。这是因为SIC只能对一个簇内的几个用户信号进行干扰删除,而GSIC可以对先前解调几个群体内的所有用户信号进行干扰删除,有效减少用户信号间的干扰,提高目标用户的信噪比和用户可达速率。

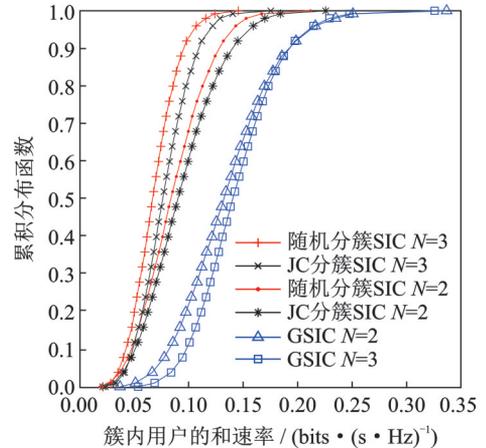


图2 簇内用户和速率的累积分布函数

Fig.2 Cumulative distribution function for sum rate of intra-cluster users

图3是基于GSIC-NOMA与传统基于SIC-NOMA辅助的无小区大规模MIMO系统下行链路中总速率随AP数的变化曲线,需要注意的是,系统所服务的用户数随AP数变化而等比例变化。从图3中可以看出,随着系统中AP数和用户数的变化,所提出的基于GSIC-NOMA的方案相比于传统基于SIC-NOMA的方案在系统总速率方面具有优势,证明GSIC可以很好地改善系统性能,提高系统可达速率。

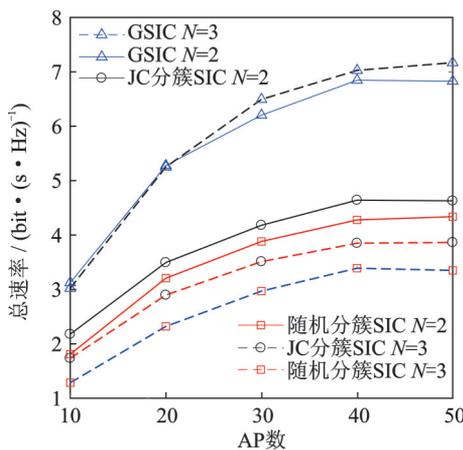


图3 系统速率与AP数关系图

Fig.3 System rate versus the number of AP

图4是基于GSIC-NOMA辅助的无小区大规模MIMO系统下行链路中总速率随群体数目的变化曲线,其中,系统中AP数固定为60,用户数固定为120。从图4可以看出,基于GSIC-NOMA的方案,在不考虑误差传播($p=1.0$)的情况下,系统总速率随着群体数增加而稳步提升;当考虑误差传播($p=0.9$)时,随群体数增加,系统总速率呈现先上升后下降的趋势,因此能够确定最优的群体数。

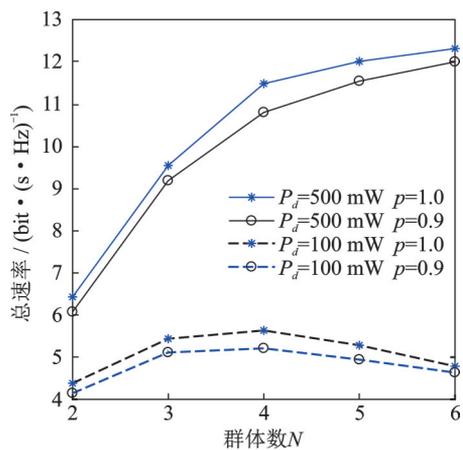


图4 系统速率与群体数关系图

Fig.4 System rate versus the number of groups

4 结束语

本文研究了无小区大规模 MIMO 与功率域 NOMA 的融合方案。将基于 GSIC-NOMA 应用于无小区大规模 MIMO 系统下行链路中,并与基于用户等效路径损耗划分群体的新方法相结合,推导出用户可达速率闭合表达式。相比于传统的 SIC-NOMA 系统,本文提出的基于 GSIC 的无小区大规模 MIMO-NOMA 系统在可达速率方面具有明显优势,可以更有效地利用稀缺频段资源。

参考文献:

- [1] YOU X H, WANG C X, HUANG J, et al. Towards 6G wireless communication networks: Vision, enabling technologies, and new paradigm shifts[J]. *Science China (Information Sciences)*, 2021, 64(1): 1-76.
- [2] CHEN Y, BAYESTEH A, WU Y, et al. Toward the standardization of non-orthogonal multiple access for next generation wireless networks[J]. *IEEE Communications Magazine*, 2018, 56(3): 19-27.
- [3] 束锋, 杨淑萍, 许正文, 等. 毫米波无线通信系统混合波束成形综述[J]. *数据采集与处理*, 2017, 32(3): 454-462.
SHU Feng, YANG Shuping, XU Zhengwen, et al. Overview of hybrid beamforming for millimeter wave systems[J]. *Journal of Data Acquisition and Processing*, 2017, 32(3): 454-462.
- [4] MARAQA O, RAJASEKARAN A S, AL-AHMADI S, et al. A survey of rate-optimal power domain NOMA with enabling technologies of future wireless networks[J]. *IEEE Communications Surveys & Tutorials*, 2020, 22(4): 2192-2235.
- [5] YUAN Y F, YUAN Z F, TIAN L. 5G Non-orthogonal multiple access study in 3GPP[J]. *IEEE Communications Magazine*, 2020, 58(7): 90-96.
- [6] LU J H, WANG Y T, LIU T T, et al. UAV-enabled uplink non-orthogonal multiple access system: Joint deployment and power control[J]. *IEEE Transactions on Vehicular Technology*, 2020, 69(9): 10090-10102.
- [7] 胡丽花, 宋荣方. 下行多用户 NOMA 系统中基于能效优化的资源分配[J]. *数据采集与处理*, 2019, 34(6): 1101-1109.
HU Lihua, SONG Rongfang. Energy efficient resource allocation in multi-user downlink non-orthogonal multiple access systems[J]. *Journal of Data Acquisition and Processing*, 2019, 34(6): 1101-1109.
- [8] 宋荣方, 王鸿. MIMO-NOMA 传输机制研究综述: 存在问题与新方法探索[J]. *南京邮电大学学报(自然科学版)*, 2022, 42(3): 1-13.
SONG Rongfang, WANG Hong. Survey on MIMO-NOMA systems: Problems and solutions[J]. *Journal of Nanjing University of Posts and Telecommunications (Natural Science Edition)*, 2022, 42(3): 1-13.
- [9] WANG H, ZHANG R B, SONG R F, et al. A novel power minimization precoding scheme for MIMO-NOMA uplink systems[J]. *IEEE Communications Letters*, 2018, 22(5): 1106-1109.
- [10] WANG H, LIU C, SHI Z, et al. GSIC for RIS-aided uplink multi-antenna NOMA systems[J]. *IEEE Communications Letters*, 2022, 26(1): 187-191.
- [11] WANG H, LIU C, SHI Z, et al. Power minimization for uplink RIS-assisted CoMP-NOMA networks with GSIC[J]. *IEEE Transactions on Communications*, 2022, 70(7): 4559-4573.
- [12] SHU F, LI J, HUANG M, et al. Enhanced secrecy rate maximization for directional modulation networks via IRS[J]. *IEEE Transactions on Communications*, 2021, 69(12): 8388-8401.
- [13] HU C, WANG H, SONG R F. Group successive interference cancellation assisted semi-blind channel estimation in multi-cell massive MIMO-NOMA Systems[J]. *IEEE Communications Letters*, 2021, 25(9): 3085-3089.
- [14] 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.
- [15] YANG H, MARZETTA T L. Energy efficiency of massive MIMO: Cell-free vs. cellular[C]//*Proceedings of IEEE Vehicular Technology Conference (VTC Spring)*. Porto, Portugal: IEEE, 2018: 1-5.
- [16] LI Y K, ARUMA BADUGE G A. NOMA-aided cell-free massive MIMO systems[J]. *IEEE Communications Letters*, 2018, 7(6): 950-953.
- [17] ZHANG Y, CAO H T, ZHOU M, et al. Spectral efficiency maximization for uplink cell-free massive MIMO-NOMA

networks[C]//Proceedings of IEEE International Conference on Communications Workshops (ICC Workshops). Shanghai, China: IEEE, 2019: 1-6.

- [18] ZHANG Y, CAO H T, ZHOU M, et al. Non-orthogonal multiple access in cell-free massive MIMO networks[J]. *China Communications*, 2020, 17(8): 81-94.
- [19] REZAEI F, HEIDARPOUR A R, TELLAMBURA C, et al. Underlaid spectrum sharing for cell-free massive MIMO-NOMA[J]. *IEEE Communications Letters*, 2020, 24(4): 907-1109.
- [20] ZHANG X, ZHU Q X. NOMA and user-centric based cell-free massive MIMO over 6G big-data mobile wireless networks [C]//Proceedings of IEEE Global Communications Conference (GLOBECOM). Taiwan, China: IEEE, 2020: 1-6.

作者简介:



刘成成(1995-),男,硕士,研究方向:无小区大规模MIMO-NOMA系统。



邵其心(1991-),男,硕士,研究方向:面向6G的宽带无线传输技术、大规模MIMO系统中的干扰消除技术。



刘鏐(2000-),男,硕士研究生,研究方向:智能反射表面辅助MIMO无线通信。



宋荣方(1964-),通信作者,男,教授,博士生导师,研究方向:宽带无线通信,E-mail: songrf@njupt.edu.cn。

(编辑:陈珺)