

STAR-RIS 辅助 RSMA 系统的波束形成和速率分配联合优化

彭艺^{1,2}, 勒淑珍^{1,2}, 杨青青^{1,2*}, 李辉^{1,2}, 王健明^{1,2}

(1.昆明理工大学信息工程与自动化学院, 云南 昆明 650031; 2.昆明理工大学云南省计算机重点实验室, 云南 昆明 650500)

摘要:为提升可同时透射和反射的智能可重构表面(simultaneously transmissive and reflective intelligently reconfigurable surface, STAR-RIS)辅助的下行速率分割多址(rate-split multiple access, RSMA)接入系统的通信性能,解决用户信道增益接近时 NOMA(non-orthogonal multiple access)性能受限问题,提出联合波束形成与速率分配优化的方法。首先构建最大化和速率的优化问题,设置优化参数为波束形成向量、速率分配向量以及 STAR-RIS 透射和反射波束形成矩阵;其次用块坐标下降法将优化问题分解为两个子问题,其中用连续凸逼近优化波束形成向量、速率分配向量,并基于分式规划和半正定规划方法优化 STAR-RIS 透射和反射波束形成矩阵;最后通过交替迭代实现有功功率条件下的和速率最大化。仿真结果表明,所提算法优于现有的基准方案,整体性能提升 28.0%~37.3%,能够显著提高系统的和速率。

关键词:RSMA; STAR-RIS; 和速率; 功率

中图分类号:TN929.5 **文献标志码:**A

引用格式:彭艺,勒淑珍,杨青青,等. STAR-RIS 辅助 RSMA 系统的波束形成和速率分配联合优化[J]. 山东大学学报(理学版),2025,60(12): 1-10.

Joint optimisation of beam formation and rate allocation for STAR-RIS assisted RSMA systems

PENG Yi^{1,2}, LE Shuzhen^{1,2}, YANG Qingqing^{1,2*}, LI Hui^{1,2}, WANG Jianming^{1,2}

(1. School of Information Engineering and Automation, Kunming University of Science and Technology, Kunming 650031, Yunnan, China; 2. Yunnan Provincial Key Laboratory of Computer Science, Kunming University of Science and Technology, Kunming 650500, Yunnan, China)

Abstract: In order to enhance the communication performance of downlink rate-split multiple access (RSMA) systems assisted by simultaneously transmissive and reflective intelligently reconfigurable surface (STAR-RIS) and to solve the problem of limited performance of non-orthogonal multiple access (NOMA) when the channel gains are close to each other. In this paper, we propose a method of joint beam formation and rate allocation optimization. Firstly, the optimization problem of maximizing the sum rate is constructed that sets the optimization parameters as the beam formation vector, the rate allocation vector, and the STAR-RIS transmitted and reflected beam formation matrices. And then we decompose the optimization problem into two sub-problems by block coordinate descent. We optimize the beam formation vector and the rate allocation vector by successive convex approximation, and the STAR-RIS transmission and reflection beamforming matrices are optimized based on fractional programming and semi-definite programming methods. Finally, the sum-rate maximization under the power condition is achieved by alternating iterations. The simulation results demonstrate that the proposed algorithm exhibits superior performance in comparison to the existing benchmark scheme, achieving an overall enhancement in system sum rate ranging from 28.0% to 37.3%.

Key words: RSMA; STAR-RIS; sum rate; power

0 引言

为提升网络覆盖与速率,可重构智能表面(reconfigurable intelligent surface, RIS)被广泛认为是关键解

收稿日期:2024-09-26; 网络出版时间:2025-11-04 09:25:32

基金项目:云南省基础研究计划重点项目(202401AS070105); 国家自然科学基金资助项目(61761025)

第一作者:彭艺(1975—),女,教授,博士,研究方向为下一代无线通信技术和可重构智能表面. E-mail:527037928@qq.com

*通信作者:杨青青(1981—),女,讲师,博士,研究方向为可重构智能表面和应急通信. E-mail:1837424622@qq.com

决方案之一^[1]。RIS是由可独立调控相移/幅度的无源反射元件组成的超材料阵列,能精确操控信号传播路径。然而,传统RIS仅能反射信号,服务范围限于其前方 180° 半平面。为此,研究者提出了同时透射反射RIS(simultaneously transmitting and reflecting reconfigurable intelligent surface, STAR-RIS)^[2]。STAR-RIS可将入射信号同时透射和反射至两侧,实现全空间覆盖并引入新的自由度,显著提升系统性能^[3]。

面对下一代网络对高频谱效率和大规模连接的需求,非正交多址(non-orthogonal multiple access, NOMA)通过在功率域复用用户,相比正交多址(orthogonal multiple access, OMA)能提供更高频谱效率^[4]。但NOMA接收端需解码所有干扰信号,计算复杂度高。文献[5]提出速率分裂多址接入(rate-splitting multiple access, RSMA)的概念。通过将用户消息拆分为公共部分和私有部分,并灵活调整拆分比例,在复杂度与速率间取得平衡。然而,RSMA实际应用仍需解决公共/私有消息划分、资源管理及同步等挑战。

STAR-RIS部署能增强信道、实现全空间覆盖,尤其在基站-用户链路较差时。RSMA则能高效服务多用户并管理干扰。结合二者优势,为提升物联网(internet of everything, IoE)性能提供了新范式^[6]。STAR-RIS的无源阵列增益可减少RSMA对大量天线的需求;其优化的幅度/相移设计能减轻信道随机性,简化RSMA接收端连续干扰消除(successive interference cancellation, SIC)设计。文献[7]研究了采用RSMA的无线网络中和速率的最大化问题,并提出一种基于顺序凸近似(sequential convex approximation, SCA)算法以实现高质量通信。文献[8]通过联合设计功率分配和透射反射系数(TARCs),最大化了NOMA和OMA方案的覆盖范围。文献[9]研究了在多输入单输出(multiple-input single-output, MISO)网络中波束成形和透射反射系数的联合优化,旨在最大化加权总保密速率(secure sum rate, SSR)。文献[10-11]提出一种基于SCA和半定规划(semi-definite programming, SDP)的优化算法,以最大化用户的加权和速率(weighted sum rate, WSR)。文献[12]研究了通过STAR-RIS同时消除小区间干扰并增强下行NOMA网络中的期望信号。STAR-RIS与不同多址技术的结合展示了增强网络性能的潜力。文献[13-15]证明了NOMA相比传统OMA在频谱效率和覆盖能力方面的优势,并且最近的研究表明^[16-18],采用RSMA可以进一步提高系统性能。文献[16]探讨了STAR-RIS与RSMA集成的优势;RSMA对SIC解码不完善具有鲁棒性,STAR-RIS的阵列增益可补偿此性能下降;STAR-RIS提供的信道多样性可简化RSMA接收机设计。文献[17-18]进一步分析了STAR-RIS辅助RSMA系统的性能,验证了其提升和速率的潜力。

综上所述,尽管现有研究取得一定进展,但仍存不足。首先,大多数研究主要集中在单方面的优化,缺乏对两者的联合优化,导致系统性能未能达到最优状态。其次,理论分析常做简化假设,未能充分考虑实际应用中的各种限制因素,如硬件非理想性和信道估计误差等。基于此,本文提出一种STAR-RIS辅助的下行RSMA系统,旨在通过结合STAR-RIS的无源阵列增益和RSMA的干扰管理能力,实现系统和速率的最大化。首先,本文构建一个优化问题,目标是最大化系统的和速率,并通过优化波束形成向量、速率分配向量以及STAR-RIS的透射和反射波束形成矩阵这3个参数来实现。为了求解这一优化问题,本文利用块坐标下降(block coordinate descent, BCD)将其分解为两个子问题。具体而言,首先通过SCA对波束形成向量和速率分配向量进行优化,然后利用分式规划(fractional programming, FP)和半正定规划(semidefinite programming, SDP)获取最优的透射和反射波束形成矩阵。仿真结果显示,STAR-RIS辅助的RSMA系统在和速率方面高于传统RIS辅助的NOMA系统。

1 系统模型及问题描述

1.1 系统模型

STAR-RIS辅助RSMA下行通信系统如图1所示。在基站(base station, BS)与 N 个用户之间部署STAR-RIS辅助通信,其中BS配备 N_t 个发射天线,STAR-RIS由 M 个无源元件组成。令 $\mathcal{M} \triangleq \{1, 2, \dots, M\}$ 、 $\mathcal{N} \triangleq \{1, 2, \dots, N\}$ 分别表示为STAR-RIS元件和用户的集合。 $\mathbf{r}_i \in \mathbf{C}^{N \times 1}$ 、 $\mathbf{G} \in \mathbf{C}^{M \times N}$ 分别为STAR-RIS-第 m_i 个用户和BS-STAR-RIS的信道系数矩阵,可以表示为

$$\mathbf{G} = \sqrt{\frac{\omega_{B-S}}{1+\omega_{B-S}}} \mathbf{G}^{\text{LoS}} + \sqrt{\frac{1}{1+\omega_{B-S}}} \mathbf{G}^{\text{NLoS}},$$

$$\mathbf{r}_i = \sqrt{\frac{\omega_{S-U_i}}{1+\omega_{S-U_i}}} \mathbf{r}_i^{\text{LoS}} + \sqrt{\frac{1}{1+\omega_{S-U_i}}} \mathbf{r}_i^{\text{NLoS}}, \quad (1)$$

其中, ω_{B-S} 和 ω_{S-U_i} 是 BS-STAR-RIS 链路和 STAR-RIS-用户链路的莱斯因子。 \mathbf{G}^{LoS} 和 $\mathbf{r}_i^{\text{LoS}}$ 表示瑞利分布视距 (line of sight, LoS) 分量, \mathbf{G}^{NLoS} 和 $\mathbf{r}_i^{\text{NLoS}}$ 表示非视距分量。

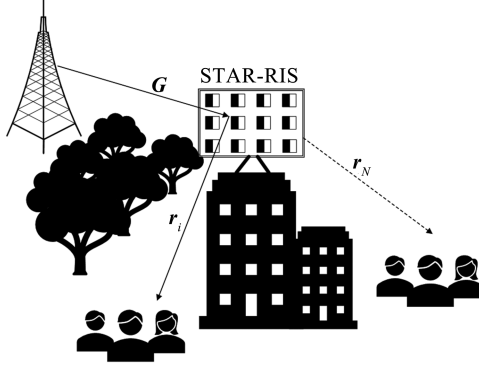


图 1 STAR-RIS 辅助 RSMA 系统模型

Fig.1 RSMA system model assisted by STAR-RIS

假设 BS、STAR-RIS 和用户均能获得完美的信道状态信息 (channel state information, CSI), 且 BS 天线采用均匀线性阵列。STAR-RIS 使用能量分割协议 (energy splitting, ES) 将覆盖区域划分为透射区和反射区。透射和反射系数分别表示为 β'_i 和 β''_i , 根据能量守恒原则, $\beta'_i + \beta''_i = 1$ 。折射和反射系数矩阵为

$$\Theta_p = \text{diag}(\sqrt{\beta_1^p} e^{j\theta_1^p}, \sqrt{\beta_2^p} e^{j\theta_2^p}, \dots, \sqrt{\beta_M^p} e^{j\theta_M^p}), \quad \Theta_p \in \mathbf{C}^{M \times M}, \quad \theta_M^p \in [0, 2\pi), \quad \forall M \in \mathcal{M}, \quad p \in (t, r),$$

$p \in (t, r)$ 表示用户是透射区用户 (t) 或反射区用户 (r)。

RSMA 的基本思想是将发送给第 m_i 用户的消息分为两部分: 公共部分和私有部分^[19]。所有用户的公共部分被组合并使用标准码本编码成单个公共消息 (s_0), 而每个私有部分被编码为每个用户的私有消息 (s_i^p), BS 能够同时向用户发送一个公共消息流和 N 个私有消息流。因此 BS 发送的信号为

$$\mathbf{x} = \mathbf{w}_0 s_0 + \sum_{i=1}^N \mathbf{w}_i s_i^p, \quad (2)$$

其中, $\mathbf{w}_i \in \mathbf{C}^{N_t \times 1}$, $\forall i \in \mathcal{N} \cup \{0\}$, 指的是消息流 s_i^p 的波束形成向量。由于 BS 和用户之间不存在链路, 当 BS 向用户发送信号时, 通过 STAR-RIS 透射或反射信号发送到用户。因此, 对于第 m_i 个用户接收的信号 y_i 为

$$y_i = (\sqrt{L_i} \mathbf{r}_i^T \Theta_{i,p} \mathbf{G}) \mathbf{x} + n_i, \quad (3)$$

式中: BS 与第 m_i 个用户之间的大规模路径损耗表示为 $L_i = d_{B-S}^{-\epsilon} d_{S-m_i}^{-\epsilon}$ ^[11], ϵ 表示路径损耗分量, d_{B-S} 和 d_{S-m_i} 表示 BS 与 STAR-RIS 之间及 STAR-RIS 与第 m_i 个用户之间的距离; T 表示矩阵的转置, n_i 是第 m_i 个用户的加性高斯白噪声 (additive white Gaussian noise, AWGN), $n_i \sim \text{CN}(0, \sigma^2)$ ^[20]。用户 m_i 处的公共信号和私有信号的信干噪比分别为

$$\gamma_{c,i} = \frac{L_i |\mathbf{r}_i^T \Theta_{i,p} \mathbf{G} \mathbf{w}_0|^2}{\sum_{j=1}^N L_i |\mathbf{r}_i^T \Theta_{i,p} \mathbf{G} \mathbf{w}_j|^2 + \sigma^2}, \quad \forall i \in \mathcal{N}, \quad (4)$$

$$\gamma_{p,i} = \frac{L_i |\mathbf{r}_i^T \Theta_{i,p} \mathbf{G} \mathbf{w}_i|^2}{\sum_{j=1, j \neq i}^N L_i |\mathbf{r}_i^T \Theta_{i,p} \mathbf{G} \mathbf{w}_j|^2 + \sigma^2}, \quad \forall i \in \mathcal{N}. \quad (5)$$

用户 m_i 解码公共流和预期的私有流的可实现速率 (bps/Hz) 分别表示为

$$c_i = \log_2(1 + \gamma_{c,i}), \quad p_i = \log_2(1 + \gamma_{p,i}), \quad \forall i \in \mathcal{M}. \quad (6)$$

为确保所有用户都成功解码公共消息, 公共消息的速率应该选择为 $\min_{i \in \mathcal{N}} c_i = R_c^{\min}$ ^[13]。给定的公共消息 $\min_{i \in \mathcal{N}} c_i$ 和分配给用户 m_i 的速率 a_i , 每个用户接收公共消息的数据速率的约束为

$$\sum_{i=1}^N a_i \leq R_c^{\min}, \quad i \in \mathcal{N}. \quad (7)$$

为在接收处成功实现 SIC 操作,每个用户的发射功率需要满足的约束为

$$L_i |r_i^T \Theta_{i,p} \mathbf{G} \mathbf{w}_0|^2 - \sum_{j=1}^N L_j |r_i^T \Theta_{i,p} \mathbf{G} \mathbf{w}_j|^2 - \sigma^2 \geq \theta, \quad (8)$$

其中, θ 表示接收端能够正确解码公共消息所需的最小信号功率^[21]。系统的和速率指的是公共速率和可实现的私有流速率的总和,表示为

$$R_i = \sum_{j=1}^N (a_j + p_j). \quad (9)$$

1.2 优化问题的建立

本节建立最大化和速率的优化问题,通过设计波束形成向量、速率分配向量以及 STAR-RIS 透射和反射波束形成矩阵,最大化系统的和速率。问题表示为

$$\begin{aligned} & \max_{\mathbf{w}, \mathbf{a}, \Theta_p} R_i \\ \text{s.t.} \quad & \text{C1: } a_i + p_i \geq R_{\min}, \quad \forall i \in \mathcal{N}; \\ & \text{C2: } \sum_{j=1}^N a_j \leq \log_2 \left(1 + \frac{|h_i^T \mathbf{w}_0|^2}{\sum_{j=1}^N |h_i^T \mathbf{w}_j|^2 + \sigma^2} \right), \\ & \text{C3: } |h_i^T \mathbf{w}_0|^2 - \sum_{j=1}^N |h_i^T \mathbf{w}_j|^2 - \sigma^2 \geq \theta, \\ & \text{C4: } \sum_{i=1}^N \mathbf{w}_i^T \mathbf{w}_i \leq P, \quad \forall i \in \mathcal{N}; \\ & \text{C5: } \beta_M^t + \beta_M^r = 1, \\ & \text{C6: } \beta_M^p \in [0, 1], \quad \theta_M^p \in [0, 2\pi), \quad \forall M \in \mathcal{M}, \quad p \in \{t, r\}, \\ & \text{C7: } a_i \geq 0, \quad \forall i \in \mathcal{N}, \end{aligned} \quad (10)$$

其中, $\mathbf{h}_i^T = \sqrt{L_i} \mathbf{r}_i^T \Theta_{i,p} \mathbf{G}$, $\mathbf{w} = [\mathbf{w}_0; \mathbf{w}_1; \dots; \mathbf{w}_N]$, $\mathbf{a} = [a_1, a_2, \dots, a_N]^T$, R_{\min} 表示所有用户所需的最小系统的和速率,约束 C1 是所有用户的最小速率限制, C2 确保每个用户可以对公共信息进行解码, C3 为 SIC 功率约束, P 是基站的最大发射功率, C4 为 BS 的最大发射功率约束, C5 和 C6 分别是 STAR-RIS 的折射功率和反射功率约束。

由于多个变量的相互耦合以及目标函数和约束条件高度非凸性,导致原优化问题难以通过直接方法求解。为了克服这一难题,使用一种基于 BCD 的算法将问题分解为两个子问题进行联合优化。

2 优化问题转换及求解

使用基于 SCA 和 BCD 的方案,旨在获得可行的解决方案,这一算法的核心思想是通过迭代优化波束形成向量、速率分配向量和 STAR-RIS 的参数来逐步逼近原始问题的解,直至收敛。更具体地说,将原始问题分解成与 \mathbf{w} 、 \mathbf{a} 、 Θ_p 3 个相关的凸的子问题,在内循环中将目标函数分解成多个子问题,在给定 STAR-RIS 系数矩阵的情况下,用拉格朗日对偶分解法求解波束形成向量和速率分配向量;其次,在给定波束形成向量和速率分配向量情况下,用 FP 和 SDP 以快速的方式寻求次优解。

2.1 优化波束赋形矩阵 \mathbf{w} 和速率分配向量 \mathbf{a}

在给定 STAR-RIS 相移矩阵 $\Theta_{i,p}$ 的情况下,采用 SCA 方法来处理式(10)中的非凸约束,式(10)简化为

$$\begin{aligned} & \max_{\mathbf{a}, \mathbf{w}} R_i \\ \text{s.t.} \quad & \text{C1: } a_i + p_i \geq R_{\min}, \quad \forall i \in \mathcal{N}; \\ & \text{C2: } \sum_{i=1}^N a_i \leq \log_2 \left(1 + \frac{|h_i^T \mathbf{w}_0|^2}{\sum_{j=1}^N |h_i^T \mathbf{w}_j|^2 + \sigma^2} \right), \end{aligned} \quad (11)$$

$$\text{C3: } |\mathbf{h}_i^T \mathbf{w}_0|^2 - \sum_{j=1}^N |\mathbf{h}_i^T \mathbf{w}_j|^2 - \sigma^2 \geq \theta,$$

$$\text{C4: } \sum_{i=1}^N \mathbf{w}_i^T \mathbf{w}_i \leq P, \quad \forall i \in \mathcal{N};$$

$$\text{C7: } a_i \geq 0, \quad \forall i \in \mathcal{N}_o$$

通过引入松弛变量 ψ_i 和 η_i , 问题 (11) 重构为

$$\max_{a, w} \sum_{i=1}^N (a_i + \log_2(1 + \psi_i))$$

$$\text{s.t. C8: } a_i + \log_2(1 + \psi_i) \geq R_i,$$

$$\text{C9: } \sum_{i=1}^N a_i \leq \log_2(1 + \eta_i),$$

$$\text{C10: } \frac{|\mathbf{h}_i^T \mathbf{w}_i|^2}{\sum_{j=1, j \neq i}^N |\mathbf{h}_i^T \mathbf{w}_j|^2 + \sigma^2} \geq \psi_i, \quad (12)$$

$$\text{C11: } \frac{|\mathbf{h}_i^T \mathbf{w}_0|^2}{\sum_{j=1}^N |\mathbf{h}_i^T \mathbf{w}_j|^2 + \sigma^2} \geq \eta_i,$$

$$\text{C3, C4, C7,}$$

其中, $\boldsymbol{\psi} = [\psi_1, \psi_2, \dots, \psi_N]$, $\boldsymbol{\eta} = [\eta_1, \eta_2, \dots, \eta_N]$ 。对于等价问题 (12) 的目标函数是凸的, 由于 C10、C11 和 C3 使得问题整体为非凸。引入新的非负松弛变量 α_i , C10 重新表述为

$$|\mathbf{h}_i^T \mathbf{w}_i|^2 \geq \psi_i \alpha_i, \quad (13)$$

$$\text{C12: } \sum_{j=1, j \neq i}^N |\mathbf{h}_i^T \mathbf{w}_j|^2 + \sigma^2 \leq \alpha_i. \quad (14)$$

式 (13) 中, 项 $\mathbf{h}_i^T \mathbf{w}_i$ 可以通过对相移波束形成的 \mathbf{w}_i 的任意旋转而用实数替代, 因此约束可以等价于 $\text{Re}(\mathbf{h}_i^T \mathbf{w}_i) \geq \sqrt{\psi_i \alpha_i}$, 其中 $\text{Re}(x)$ 表示复数 x 的实部。用一阶泰勒级数代替凸函数 $\sqrt{\psi_i \alpha_i}$, 式 (13) 重新表述为

$$\text{C13: } \text{Re}(\mathbf{h}_i^T \mathbf{w}_i) \geq \sqrt{\psi_i^{(n-1)} \alpha_i^{(n-1)}} + \frac{1}{2} \sqrt{\frac{\psi_i^{(n-1)}}{\alpha_i^{(n-1)}}} (\alpha_i - \alpha_i^{(n-1)}) + \frac{1}{2} \sqrt{\frac{\alpha_i^{(n-1)}}{\psi_i^{(n-1)}}} (\psi_i - \psi_i^{(n-1)}), \quad (15)$$

其中, 上标 $(n-1)$ 表示第 $(n-1)$ 迭代时变量的值。同理, 引入变量 ζ_i , 将式 C11 重新表述为

$$|\mathbf{h}_i^T \mathbf{w}_0|^2 \geq \zeta_i \eta_i = \frac{1}{4} ((\zeta_i + \eta_i)^2 - (\zeta_i - \eta_i)^2), \quad (16)$$

$$\text{C14: } \sum_{j=1}^N |\mathbf{h}_i^T \mathbf{w}_j|^2 + \sigma^2 \leq \zeta_i. \quad (17)$$

由于式 (16) 中存在 N 个不等式约束, 为了处理式 (16) 的非凸性, 采用两个凸函数 (difference of two convex, DC) 的差近似, 式 (16) 可以近似为

$$\text{C15: } 2\text{Re}(\mathbf{h}_i^T \mathbf{w}_0^{(n-1)} \mathbf{h}_i \mathbf{w}_0) - |\mathbf{h}_i^T \mathbf{w}_0^{(n-1)}|^2 \geq \frac{1}{4} ((\zeta_i + \eta_i)^2 - (\zeta_i^{(n-1)} - \eta_i^{(n-1)})(\zeta_i - \eta_i) + (\zeta_i^{(n-1)} - \eta_i^{(n-1)})^2), \quad (18)$$

左侧为 $|\mathbf{h}_i^T \mathbf{w}_0|^2$ 的一阶泰勒级数。通过使用 DC 近似, C3 可以重新表示为

$$\text{C16: } 2\text{Re}(\mathbf{h}_i^T \mathbf{w}_0^{(n-1)} \mathbf{h}_i \mathbf{w}_0) - |\mathbf{h}_i^T \mathbf{w}_0^{(n-1)}|^2 - \sum_{j=1}^N |\mathbf{h}_i^T \mathbf{w}_j|^2 - \sigma^2 \geq \theta. \quad (19)$$

非凸问题可转化为

$$\begin{aligned} & \max_{w, a, \psi, \eta, \alpha, \zeta} \sum_{i=1}^N (a_i + \log_2(1 + \psi_i)) \\ \text{s.t. } & \text{C4, C7, C8, C9, C12—C16,} \\ & \alpha_i \geq 0, \zeta_i \geq 0, \eta_i \geq 0. \end{aligned} \quad (20)$$

至此, 式 (20) 的优化问题属于一个凸问题, 可以借助 Matlab 软件中 CVX 工具包求解该问题。

2.2 优化 STAR-RIS 透射和反射矩阵 $\Theta_{i,p}$

本节在固定 BS 发射波束形成向量 \mathbf{w} 和速率分配向量 \mathbf{a} , 优化 $\Theta_{i,p}$, 此时式(10)依旧是一个非凸问题。利用 FP 变化来处理目标函数, 并将问题转化为一个标准的 SDP 半正定规划问题。令 $\phi_M = \beta_M^p e^{j\theta_M^p}$, $M \in \mathcal{M}$, $\phi = [\phi_1, \phi_2, \dots, \phi_M]^T$, 通过引入辅助变量 $\tau \triangleq [\tau_1, \tau_2, \dots, \tau_N]^T$, 采用拉格朗日对偶变换, 式(10)中的目标函数可以等价表示为

$$f_1(\phi, \tau) \triangleq \sum_{i=1}^N [\log_2(1+\tau_i) - \tau_i] + \sum_{i=1}^N \frac{(1+\tau_i) | \mathbf{h}_i^T \mathbf{w}_i |^2}{\sum_{j=1}^N | \mathbf{h}_i^T \mathbf{w}_j |^2 + \sigma^2}. \quad (21)$$

令 $\partial f_1 / \partial \tau_i = 0$, 可获得 τ 中元素的最优解为

$$\tau_i^* = \frac{| \mathbf{h}_i^T \mathbf{w}_i |^2}{\sum_{j=1}^N | \mathbf{h}_i^T \mathbf{w}_j |^2 + \sigma^2}. \quad (22)$$

目标函数中有多个分数, 采用二次变换, 引入辅助变量 $\mathbf{v} \triangleq [v_1, v_2, \dots, v_N]$, 式(21)进一步等价

$$f_2(\phi, \tau, \mathbf{v}) \triangleq \sum_{i=1}^N [\log_2(1+\tau_i) - \tau_i + 2\sqrt{1+\tau_i} \operatorname{Re}(\mathbf{v}_i^* \mathbf{h}_i^T \mathbf{w}_i) - |v_i|^2 (\sum_{j=1}^N | \mathbf{h}_i^T \mathbf{w}_j |^2 + \sigma^2)], \quad (23)$$

令 $\partial f_2 / \partial \tau_i = 0$ 可获得 \mathbf{v} 中元素的最优解为

$$\mathbf{v}_i^* = \frac{\sqrt{1+\tau_i} \mathbf{h}_i^T \mathbf{w}_i}{\sum_{j=1}^N | \mathbf{h}_i^T \mathbf{w}_j |^2 + \sigma^2}, \quad (24)$$

式(21)重新表述为

$$\begin{aligned} \max_{\Theta_p} \quad & f_2(\phi, \tau, \mathbf{v}) \\ \text{s.t.} \quad & \text{C1, C2, C5, C6.} \end{aligned} \quad (25)$$

由于式(25)是非凸的, 引入辅助变量:

$$\mathbf{A}_{1,c} = \operatorname{diag}(\mathbf{r}_i^T) \mathbf{G} \mathbf{w}_0 \mathbf{w}_0^T \mathbf{G}^T \operatorname{diag}(\mathbf{r}_i), \quad (26)$$

$$\mathbf{A}_{1,p} = \operatorname{diag}(\mathbf{r}_i^T) \mathbf{G} \mathbf{w}_i \mathbf{w}_i^T \mathbf{G}^T \operatorname{diag}(\mathbf{r}_i), \quad (27)$$

$$\mathbf{B}_{1,p} = \operatorname{diag}(\mathbf{r}_i^T) \mathbf{G} \mathbf{w}_i \mathbf{w}_i^T, \quad (28)$$

$$\mathbf{B}_{1,c} = \operatorname{diag}(\mathbf{r}_i^T) \mathbf{G} \mathbf{w}_0 \mathbf{w}_0^T, \quad (29)$$

根据式(26)、式(27)和式(28), SINR 中分子 $| \mathbf{h}_i^T \mathbf{w}_0 |^2$ 和 $| \mathbf{h}_i^T \mathbf{w}_i |^2$ 可以等价

$$| \mathbf{h}_i^T \mathbf{w}_0 |^2 = \phi^T \mathbf{A}_{1,c} \phi + \operatorname{Re}(\phi^T \mathbf{B}_{1,c}), \quad (30)$$

$$| \mathbf{h}_i^T \mathbf{w}_i |^2 = \phi^T \mathbf{A}_{1,p} \phi + \operatorname{Re}(\phi^T \mathbf{B}_{1,p}), \quad (31)$$

同理, SINR 中的分母也可等价, 令

$$\mathbf{C} = \operatorname{diag}(\mathbf{r}_i^T) \mathbf{G} \sum_{j=1}^N \mathbf{w}_j \mathbf{w}_j^T \mathbf{G}^T \operatorname{diag}(\mathbf{r}_i), \quad (32)$$

$$\mathbf{A}_{2,p} = \mathbf{A}_{1,p} + \mathbf{C}, \quad (32)$$

$$\mathbf{D} = \operatorname{diag}(\mathbf{r}_i^T) \mathbf{G} \sum_{j=1, j \neq i}^N \mathbf{w}_j \mathbf{w}_j^T, \quad (33)$$

$$\mathbf{B}_{2,p} = \mathbf{B}_{1,p} + \mathbf{D},$$

则 SINR 的分母等价

$$\sum_{j=1, j \neq i}^N | \mathbf{h}_i^T \mathbf{w}_j |^2 + \sigma^2 = \phi^T \mathbf{C} \phi + \operatorname{Re}(\phi^T \mathbf{D}), \quad (34)$$

$$\sum_{j=1}^N | \mathbf{h}_i^T \mathbf{w}_j |^2 + \sigma^2 = \phi^T \mathbf{A}_{2,p} \phi + \operatorname{Re}(\phi^T \mathbf{D}), \quad (35)$$

定义 $\gamma_p = 2^{R_i - a_i} - 1$, $\gamma_c = \sum_{i=1}^N a_i$, 则约束条件 C1 和 C2 转化为

$$\boldsymbol{\phi}^T(\mathbf{A}_{1,c}-\gamma_c\mathbf{A}_{2,p})\boldsymbol{\phi}+\text{Re}(\boldsymbol{\phi}^T(\mathbf{B}_{1,c}-\gamma_c\mathbf{B}_{2,p}))\geq\gamma_c, \quad (36)$$

$$\boldsymbol{\phi}^T(\mathbf{A}_{1,p}-\gamma_p\mathbf{C})\boldsymbol{\phi}+\text{Re}(\boldsymbol{\phi}^T(\mathbf{B}_{1,p}-\gamma_c\mathbf{D}))\geq\gamma_p. \quad (37)$$

通过上述变换后,式(25)可以转化为

$$\begin{aligned} & \max_{\boldsymbol{\phi}, \boldsymbol{\tau}, \mathbf{v}} \quad \text{Re}(\boldsymbol{\phi}^T E) - \boldsymbol{\phi}^T F \boldsymbol{\phi} \\ & \text{s.t.} \quad (34), (35), \text{C5}, \text{C6}, \end{aligned} \quad (38)$$

其中

$$E = 2 \sum_{i=1}^N \sqrt{(1+\tau_i)} \text{diag}(\mathbf{v}_i^* \mathbf{r}_i^T) \mathbf{G} \mathbf{w}_i - \sum_{i=1}^N |\mathbf{v}_i|^2 \mathbf{B}_{2,p}, \quad (39)$$

$$F = \sum_{i=1}^N |\mathbf{v}_i|^2 (\mathbf{C} + \mathbf{A}_{2,p}). \quad (40)$$

$\boldsymbol{\tau}$ 和 \mathbf{v} 的最优解可以分别由式(22)和式(24)得来。由于相位偏移 θ_M^o 和透射和反射系数 β_M^o 的存在,因此式(38)并不完全属于标准的 QCQP 问题。为解决这一问题,对相位偏移和透射和反射系数进行适当的处理和线性化。定义矩阵变量 $\boldsymbol{\Phi} = \boldsymbol{\phi} \boldsymbol{\phi}^T$, 将二次项转化为线性形式 $\boldsymbol{\phi}^T F \boldsymbol{\phi} = \text{tr}(F \boldsymbol{\Phi})$ 将优化问题转化 SDP,

$$\begin{aligned} & \max_{\boldsymbol{\phi}, \boldsymbol{\tau}, \mathbf{v}} \quad \text{Re}(\boldsymbol{\phi}^T E) - \text{tr}(F \boldsymbol{\Phi}) \\ & \text{s.t.} \quad \boldsymbol{\Phi} \geq \boldsymbol{\phi} \boldsymbol{\phi}^T, \\ & \quad (34), (35), \text{C5}, \text{C6}. \end{aligned} \quad (41)$$

仅保留 $\boldsymbol{\Phi}$ 半正定约束,其中, $\text{tr}(x)$ 表示为矩阵 x 的迹,问题(41)转化为一个凸问题。因此最佳的透射和反射系数矩阵可以通过 CVX 工具箱获得。式(10)中的和速率最大化解方案由算法 1 给出。

2.3 算法复杂度及流程

算法的计算复杂度是解决式(11)和式(41)的复杂度之和。波束形成和速率优化问题,由于式(11)存在 $(6N+1)$ 个约束,其复杂度为 $\mathcal{O}(\sqrt{6N+1} \log_2(1/\epsilon))$, 同理,由于式(41)是一个标准的 SDP 问题,因此(41)的复杂度为 $\mathcal{O}(\sqrt{M+1}(1+2M)M^3 \log_2(1/\epsilon))$ 算法的复杂度为 $(\log_2(1/\epsilon)(\sqrt{M+1}(1+2M)M^3 + \sqrt{6N+1}))$ 。

该算法是一种基于 SDP 的交替优化方法,其核心思想通过分步交替更新不同变量以实现目标函数的优化。

开始:

步骤 1 初始化参数

1) 初始值 $\boldsymbol{\Theta}, \mathbf{w}, \mathbf{a}$, 迭代次数 $t=1$;

2) 收敛精度 $\epsilon=10^{-3}$, 初始迭代计数器 t 。

重复:

步骤 2 基于当前变量 $\boldsymbol{\Theta}$ 的取值,根据式(20)计算并更新变量 $(\mathbf{w}^{(t)}, \mathbf{a}^{(t)})$;

步骤 3 固定已更新的 $(\mathbf{w}^{(t)}, \mathbf{a}^{(t)})$, 利用式(38)重新优化变量 $\boldsymbol{\Theta}^{(t)}$;

步骤 4 迭代计数器递增 $t=t+1$, 并返回步骤 2;

步骤 5 反复交替更新变量组 $(\mathbf{w}^{(t)}, \mathbf{a}^{(t)})$ 和 $\boldsymbol{\Theta}^{(t)}$, 逐步逼近最优解, 直至满足预设的收敛条件

$$|R_{\text{tot}}^{(t)} - R_{\text{tot}}^{(t-1)}| \leq \epsilon;$$

步骤 6 输出优化后的变量 $R_{\text{tot}}^{(t)}$ 作为结果。

3 结果与分析

3.1 仿真参数设置

本节通过数值比较的方式验证所提方法对于 STAR-RIS 辅助 RSMA 系统的有效性。系统仿真参数设置见表 2。

表2 仿真参数设置
Table 2 Simulation parameter setting

参数	数值
BS 到 STAR-RIS 的距离, d_{B-S}/m	100
用户到 STAR-RIS 的距离, d_{S-U_i}/m	50
噪声功率, σ^2/dBm	90
路径损耗分量, ε	2.5
用户数量, N	2
STAR-RIS 到用户路径损耗系数, ω_{S-U_i}	3
BS 到 STAR-RIS 路径损耗系数, ω_{B-S}	3

3.2 仿真结果分析

为了验证在不同系统总功率和 STAR-RIS 元件数量条件下, STAR-RIS 辅助 RSMA 算法的收敛性能, 在固定基站 (BS) 天线数量为 2 的情况下, 分别调整 STAR-RIS 元件数量和 BS 的总功率, 进行了多组仿真实验。图 2 给出这些实验的收敛性曲线。结果表明, 随着 STAR-RIS 元件数量和系统总功率的增加, 所提出的算法均能在第 8 次迭代内实现收敛, 体现出优良的收敛性能。然而, 进一步观察发现, 当 STAR-RIS 元件数量增加至 8, 且系统总功率提升至 30 dBm 时, 算法的收敛速度略低于元件数量为 4 时的收敛速度。这一现象表明, 在元件数量较少的配置下, 算法能够更快速地达到收敛状态, 而随着系统复杂度的提升 (即元件数量和功率的增加), 算法需处理更多的优化变量, 导致收敛速度有所减缓。

为了验证不同条件下 STAR-RIS 辅助 RSMA 系统的性能差异, 我们在固定基站 (BS) 天线数量为 2 且基站发射功率为 20 dBm 的条件下, 分别调整 STAR-RIS 元件数量和相位调整方案, 对不同方案的和速率进行了对比。结果如图 3 所示。图中包括优化相位调整的 RSMA、NOMA、OMA 方案以及采用随机相移的 RSMA 方案。可以看出, 随着 STAR-RIS 元件数量的增加, 各种方案的和速率均呈上升趋势。具体而言, 当 STAR-RIS 元件数量从 4 增加到 64 时, STAR-RIS 辅助 RSMA 系统的总速率从 5.4 bps/Hz 上升至 11.4 bps/Hz, 提升 111%。此外, 与 OMA 和 NOMA 相比, STAR-RIS 辅助 RSMA 系统在所有元件数量下均表现出更高的总和速率增益。在 STAR-RIS 元件数量较少 (如 4 个元件) 时, RSMA 系统的总速率比 NOMA 高 32%, 而在较多元件数量 (如 64 个元件) 时, 仍然比 NOMA 高 28%。值得注意的是, 采用随机相移的 RSMA 方案在各个元件数量下的和速率均低于优化相位调整的 RSMA 方案, 但仍然高于传统的 NOMA 和 OMA 方案。这表明优化相位调整显著提升了信道增益和系统性能。

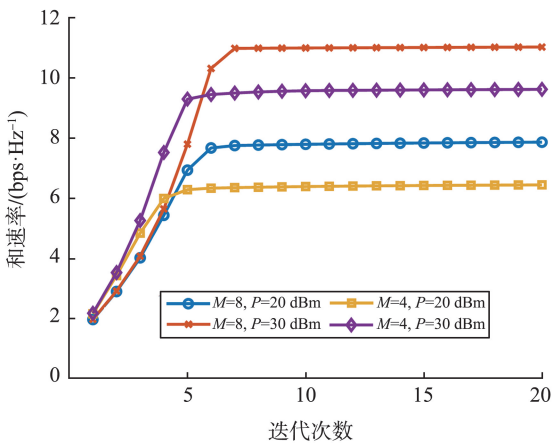


图2 和速率随迭代次数的变化

Fig.2 Variation of sum-rate with number of iterations

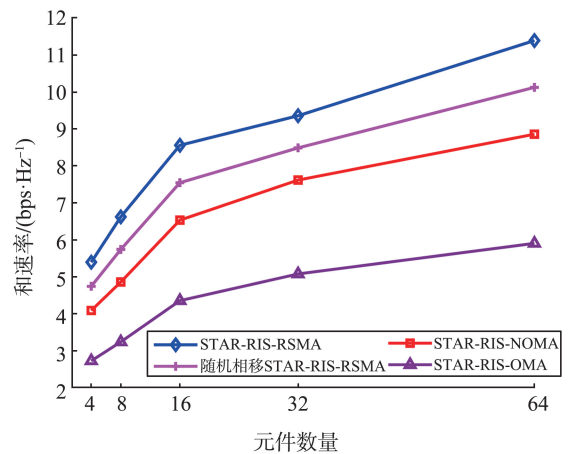


图3 各方案的和速率随 STAR-RIS 元件数量的变化

Fig.3 Variation of sum-rate with the number of STAR-RIS elements for each scheme

为了评估不同条件下 STAR-RIS 辅助 RSMA 系统的性能差异, 在固定基站 (BS) 天线数量为 2 且基站系统总功率为 20 dBm 的情况下, 分别调整 STAR-RIS 元件数量和相位调整方案, 对比了不同方案的和速率表现, 结果如图 4 和图 5 所示。图 4 表明, 随着系统总功率的提升, 各方案的和速率均呈现上升趋势。其中, STAR-RIS 辅助 RSMA 系统相较于 NOMA 系统和 OMA 系统, 能够显著提升和速率。具体而言, 当 STAR-

RIS 元件数量从 4 增加到 64 时,STAR-RIS 辅助 RSMA 系统的总速率从 5.4 bps/Hz 上升至 11.4 bps/Hz,提升了 111%。此外,与采用传统 RIS 的 NOMA 和 OMA 方案相比,STAR-RIS 的引入使得 RSMA 系统的和速率提升了 37.3%。值得注意的是,采用随机相移的 RSMA 方案虽然在各个元件数量下的和速率有所提升,但仍不及优化相位调整的 RSMA 方案。这主要归因于 RSMA 通过解码部分多用户干扰并将剩余干扰视为噪声,从而有效增强了信道容量,而优化相位调整进一步提升了信道增益。因此,结合 STAR-RIS 与 RSMA 的系统在功率增益和干扰管理方面表现出更优的性能,验证了所提方法的有效性和优势。

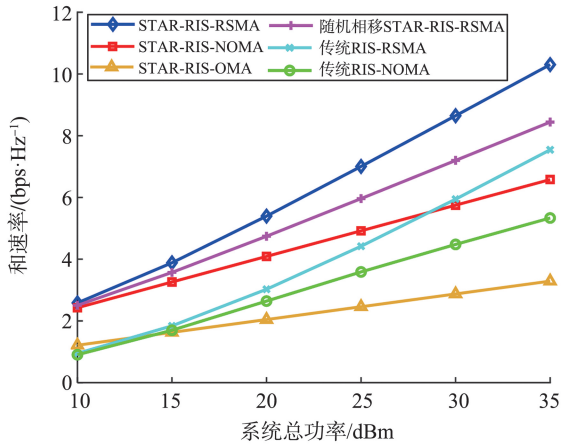


图 4 各方案的和速率随系统总功率的变化
Fig.4 Variation of sum-rate with total system power for each scheme

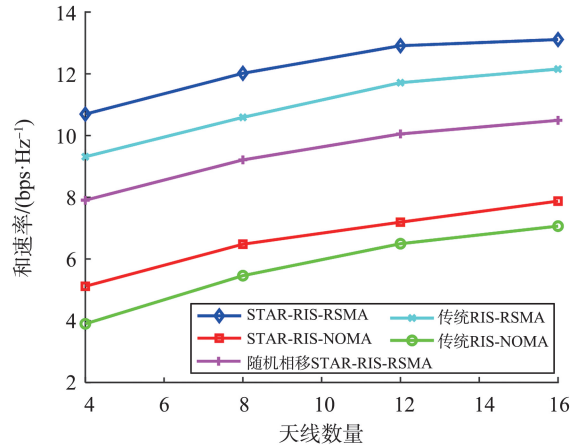


图 5 各方案的和速率随天线数量的变化
Fig.5 Variation of sum rate with number of antennas for each scheme

从图 5 可以看出,随着天线数量的增加,不同方案的频谱效率也随之提高。具体来说,STAR-RIS-RSMA 方案的增益最为显著,在天线数量从 4 增加到 16 时,其频谱效率从约 8 bps/Hz 提升至 12 bps/Hz。STAR-RIS-NOMA 和传统 RIS-RSMA 方案的增益也随着天线数量的增加有所提高,但不及 STAR-RIS-RSMA 显著。相比之下,传统 RIS-NOMA 的增益最小。可以看出,RSMA 在 STAR-RIS 中的应用显著提升了系统的频谱效率,这主要得益于其有效的干扰管理和灵活的消息分割机制。RSMA 通过将传输消息分割为公共消息和私有消息,使得用户能够更好地处理干扰并提高传输效率,而不仅仅依赖于天线数量增加带来的波束成形增益。与其他方案相比,STAR-RIS-RSMA 利用了 RSMA 的优势,在多用户共享资源时能够灵活管理干扰,从而实现更大的频谱效率增益。

4 结论

针对下行 STAR-RIS 辅助 RSMA 系统中最大化和速率的问题,本文通过建立融合 STAR-RIS 与 RSMA 的联合通信框架,提出一种基于 BCD、SCA、FP 和 SDP 的迭代算法。该算法通过将复杂的和速率最大化问题分解为两个子问题,逐步优化波束形成向量、速率分配向量以及 STAR-RIS 的透射和反射波束形成矩阵。仿真结果表明,与传统的 RIS 辅助 RSMA 系统相比,本文提出的 STAR-RIS 辅助 RSMA 系统在和速率方面表现出显著的优势。在相同的功耗条件下,STAR-RIS 辅助的 RSMA 系统能够有效提高和速率,验证了所提方法的有效性和优越性。本文的研究不仅为提升未来无线通信系统的性能提供了新的思路,也为进一步研究 STAR-RIS 与多址接入技术的结合提供了理论依据。未来的研究可以在更复杂的系统模型和不同的应用场景下进一步探讨 STAR-RIS 辅助的 RSMA 系统的潜力。

参考文献:

- [1] SAAD W, BENNIS M, CHEN M Z. A vision of 6G wireless systems: applications, trends, technologies, and open research problems[J]. IEEE Network, 2020, 34(3):134-142.
- [2] 张诚,王鸿. 智能反射面辅助的非正交多址系统高效传输方案研究[J]. 重庆邮电大学学报(自然科学版), 2023, 35(1): 16-22.
ZHANG Cheng, WANG Hong. Research on energy-efficient transmission scheme for IRS-assisted NOMA systems[J]. Journal

- of Chongqing University of Posts and Telecommunications (Natural Science Edition), 2023, 35(1):16-22.
- [3] ABEYWICKRAMA S, ZHANG R, WU Q Q, et al. Intelligent reflecting surface: practical phase shift model and beamforming optimization[J]. IEEE Transactions on Communications, 2020, 68(9):5849-5863.
- [4] HUANG C W, MO R H, YUEN C. Reconfigurable intelligent surface assisted multiuser MISO systems exploiting deep reinforcement learning[J]. IEEE Journal on Selected Areas in Communications, 2020, 38(8):1839-1850.
- [5] MAO Y J, DIZDAR O, CLERCKX B, et al. Rate-splitting multiple access: fundamentals, survey, and future research trends[J]. IEEE Communications Surveys & Tutorials, 2022, 24(4):2073-2126.
- [6] YANG Z H, SHI J F, LI Z Y, et al. Energy efficient rate splitting multiple access (RSMA) with reconfigurable intelligent surface[C]//2020 IEEE International Conference on Communications Workshops (ICC Workshops). Dublin: IEEE, 2020:1-6.
- [7] ZHANG S H, ZHANG H L, DI B Y, et al. Beyond intelligent reflecting surfaces: reflective-transmissive metasurface aided communications for full-dimensional coverage extension[J]. IEEE Transactions on Vehicular Technology, 2020, 69(11):13905-13909.
- [8] WU C Y, MU X D, LIU Y W, et al. Resource allocation in STAR-RIS-aided networks: OMA and NOMA[J]. IEEE Transactions on Wireless Communications, 2022, 21(9):7653-7667.
- [9] HOU T W, WANG J, LIU Y W, et al. A joint design for STAR-RIS enhanced NOMA-CoMP networks: a simultaneous-signal-enhancement-and-cancellation-based (SSECB) design[J]. IEEE Transactions on Vehicular Technology, 2022, 71(1):1043-1048.
- [10] ZUO J K, LIU Y W, DING Z G, et al. Joint design for simultaneously transmitting and reflecting (STAR) RIS assisted NOMA systems[J]. IEEE Transactions on Wireless Communications, 2023, 22(1):611-626.
- [11] GAO Q L, LIU Y W, MU X D, et al. Joint location and beamforming design for STAR-RIS assisted NOMA systems[J]. IEEE Transactions on Communications, 2023, 71(4):2532-2546.
- [12] SINGH S K, AGRAWAL K, SINGH K, et al. RSMA for hybrid RIS-UAV-aided full-duplex communications with finite blocklength codes under imperfect SIC[J]. IEEE Transactions on Wireless Communications, 2023, 22(9):5957-5975.
- [13] 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.
- [14] YANG H Z, OU X W, YI G L, et al. User group policy and resource allocation for downlink RSMA system[C]//2024 IEEE International Symposium on Broadband Multimedia Systems and Broadcasting (BMSB). Toronto: IEEE, 2024:1-5.
- [15] LI X H, WANG T, TONG H N, et al. Sum-rate maximization for active RIS-aided downlink RSMA system[C]//IEEE INFOCOM 2023-IEEE Conference on Computer Communications Workshops (INFOCOM WKSHPS). Hoboken: IEEE, 2023:1-6.
- [16] KATWE M, SINGH K, CLERCKX B, et al. Improved spectral efficiency in STAR-RIS aided uplink communication using rate splitting multiple access[J]. IEEE Transactions on Wireless Communications, 2023, 22(8):5365-5382.
- [17] MAGHREBI Y, ELHATTAB M, ASSI C, et al. Cooperative rate splitting multiple access for active STAR-RIS assisted downlink communications[J]. IEEE Wireless Communications Letters, 2024, 13(10):2827-2831.
- [18] KARIM F, SINGH S K, SINGH K, et al. Performance analysis for RSMA-empowered STAR-RIS-aided downlink communications[C]//2023 IEEE 34th Annual International Symposium on Personal, Indoor and Mobile Radio Communications (PIMRC). Toronto: IEEE, 2023:1-6.
- [19] WANG T Q, FANG F, DING Z G. Joint phase shift and beamforming design in a multi-user MISO STAR-RIS assisted downlink NOMA network[J]. IEEE Transactions on Vehicular Technology, 2023, 72(7):9031-9043.
- [20] ALI M S, HOSSAIN E, AL-DWEIK A, et al. Downlink power allocation for CoMP-NOMA in multi-cell networks[J]. IEEE Transactions on Communications, 2018, 66(9):3982-3998.
- [21] SONG Y X, XU S Y, XU R T, et al. Weighted sum-rate maximization for multi-STAR-RIS-assisted mmwave cell-free networks[J]. IEEE Transactions on Vehicular Technology, 2024, 73(4):5304-5320.

(编辑:胡春燕)