

STAR-RIS 辅助 NOMA 系统联合功率分配及波束成形方法研究

邵钰清¹, 窦海娥¹, 姚继明^{1,2}, 王磊¹

(1. 南京邮电大学 通信与信息工程学院, 江苏 南京 210003; 2. 国网智能电网研究院有限公司, 北京 102211)

摘要: 同时透射和反射可重构智能表面(STAR-RIS)与非正交多址(NOMA)技术均被认为是后5G和6G时代无线通信网络中的关键技术,能够辅助多用户通信。针对STAR-RIS辅助的下行NOMA通信系统的资源分配问题,为处理原始非凸优化问题的复杂性和各种优化变量之间的耦合问题,将原问题解耦为3个子问题分别进行求解,即功率分配、主动波束成形和被动波束成形优化问题。通过引入松弛变量和一阶泰勒近似求解最优功率分配,提出一种基于分式规划与逐次凸逼近的交替优化算法求解主动及被动波束成形,旨在最大化系统的加权和速率。仿真实验结果证实了所提算法对系统加权和速率的提升优势,表明该算法能够解决STAR-RIS-NOMA系统中联合功率分配及波束成形优化问题。

关键词: 同时透射和反射可重构智能表面;非正交多址;加权和速率;功率分配;波束成形

DOI:10.11907/tjdc.241288

开放科学(资源服务)标识码(OSID):



中图分类号:TN92

文献标识码:A

文章编号:1672-7800(2025)005-0154-09

Research on Joint Power Allocation and Beamforming Scheme for STAR-RIS Assisted NOMA System

SHAO Yuqing¹, DOU Hai'e¹, YAO Jiming^{1,2}, WANG Lei¹

(1. School of Communications and Information Engineering, Nanjing University of Posts and Telecommunications, Nanjing 210003, China; 2. State Grid Smart Grid Research Institute Co., Ltd., Beijing 102211, China)

Abstract: Simultaneous transmission and reflection reconfigurable intelligent surface (STAR-RIS) and non orthogonal multiple access (NOMA) technologies are both considered key technologies in wireless communication networks in the post 5G and 6G era, which can assist multi-user communication. For the resource allocation problem of STAR-RIS assisted downlink NOMA communication system, in order to deal with the complexity of the original non convex optimization problem and the coupling problem between various optimization variables, the original problem is decoupled into three sub problems and solved separately, namely power allocation, active beamforming, and passive beamforming optimization problems. After introducing relaxation variables and first-order Taylor approximation to solve the optimal power allocation, an alternating optimization algorithm based on fractional programming and successive convex approximation is proposed to solve active and passive beamforming, aiming to maximize the weighted sum rate of the system. The simulation experiment results confirmed the advantage of the proposed algorithm in improving the weighted sum rate of the system, indicating that the algorithm can solve the joint power allocation and beamforming optimization problems in STAR-RIS-NOMA systems.

Key Words: STAR-RIS; NOMA; weighted sum rate; power allocation; beamforming

收稿日期:2024-03-22

扫描二维码阅读全文:



基金项目:国家自然科学基金项目(62071255);江苏省重点研发计划项目(BE2023087);江苏省高等学校自然科学研究重大项目(20KJA510009)

作者简介: 邵钰清(1999-),女,南京邮电大学通信与信息工程学院硕士研究生,研究方向为无线通信中可重构智能表面资源分配技术;窦海娥(1980-),女,南京邮电大学通信与信息工程学院博士研究生、高级实验师,研究方向为多媒体无线通信;姚继明(1987-),男,南京邮电大学通信与信息工程学院博士研究生,国网智能电网研究院有限公司高级工程师,研究方向为电力无线通信技术;王磊(1977-),男,博士,南京邮电大学通信与信息工程学院教授、博士生导师,研究方向为多媒体无线通信。本文通讯作者:窦海娥。

0 引言

近年来,可重构智能表面(Reconfigurable Intelligent Surface, RIS)作为无线通信中一种新兴的低成本技术,引起了学术界的广泛关注。RIS是一个由大量无源反射元件组成的平面阵列,每个无源反射元件都能独立调整输入信号的振幅和相位^[1-2]。其在增强通信覆盖率、吞吐量以及提高频谱效率(Spectrum Efficiency, SE)和能效(Energy Efficiency, EE)方面表现出色^[3-4]。RIS在各种通信场景中的优势已经得到证明,联合优化方法也常用于研究RIS相关问题,包括但不限于功率分配、主动和被动波束成形、信道估计等^[5-12]。由于传统RIS仅能反射入射信号给其同侧用户,覆盖范围被限制于180°半平面,在一定程度上限制了其部署灵活性以及应对动态信道环境的能力。为克服这一挑战,学术界引入同时透射和反射可重构智能表面(Simultaneous Transmitting and Reflecting-Reconfigurable Intelligent Surfaces, STAR-RIS)技术,其兼具反射和透射功能,突破了传统RIS仅有反射功能的限制,实现了360°全方位服务^[13-14]。这一创新有望拓展RIS的应用领域,进而提供更加全面的用户服务。

此外,非正交多址(Non-Orthogonal Multiple Access, NOMA)技术作为一种提高频谱效率、支持大规模连接的关键技术,也为新一代无线通信网络容纳海量用户提供了一种解决方案。通过允许用户共享相同的时隙、频域和信道码,NOMA的性能显著优于传统的正交多址(Orthogonal Multiple Access, OMA)方法^[15-16]。目前的NOMA方案可分为功率域NOMA和码域NOMA两种^[17]。功率域NOMA在接收端可以通过接收功率的差异来区分不同用户,并使用串行干扰消除(Successive Interference Cancellation, SIC)技术实现数据接收。通过引入RIS并对其部署位置、相移等进行合理设计能有效提升NOMA通信系统的性能,达到提升系统用户速率、降低系统总发射功率等目的,但RIS只能服务同侧用户,限制了其使用场景。而STAR-RIS兼具反射和透射功能,支持全方位用户,能极大增强部署灵活性。因此,研究STAR-RIS技术在NOMA系统中的应用对于进一步提高通信系统的性能有重要意义。

1 相关工作

1.1 RIS-NOMA 系统

RIS-NOMA系统能够提供丰富的空间、频率和时间自由度,其资源分配问题被广泛讨论,以进一步提高通信系统性能^[18]。所讨论的优化问题包括但不限于优化通信资源,例如RIS元件的反射角和幅度系数、波束成形、子信道和基站发射功率等。文献[19]利用RIS来辅助NOMA通信系统与基站通信中位于死区的两个边缘用户,提出一种

基于逐次凸逼近(Successive Convex Approximation, SCA)与半定松弛(Semi-Definite Relaxation, SDR)的反射波束成形优化算法,在最大化速率与最小化总功耗之间获得了最佳平衡。文献[20]提出一种基于SCA的联合优化算法,首次实现了RIS辅助毫米波NOMA系统中主被动波束成形以及功率分配的联合优化。文献[21-22]对多RIS辅助的多集群NOMA网络进行了研究。文献[21]在NOMA通信中使用单个RIS来辅助由中心用户和边缘用户组成的多用户集群,联合优化了基站处发射波束成形矩阵和RIS的反射系数矢量,以最小化系统总发射功率;同时提出一种低复杂度的算法,依靠二阶锥规划和交替方向乘法计算出优化问题的局部最优解。相较于文献[21],文献[22]进一步考虑了多个RIS的情况,其中每个RIS服务于一个NOMA用户集群,一个集群由两个用户组成,分别为靠近基站的用户和远离基站的边缘用户。通过同时优化每个RIS的波束成形、功率分配和相移以最小化传输功率,证明了RIS增强毫米波NOMA系统的覆盖能力,尤其是当直接链路被阻塞时。

1.2 STAR-RIS-NOMA 系统

考虑到STAR-RIS和NOMA在无线通信领域的优势,可以尝试将两者结合起来,进一步提高通信系统的性能,增强EE、SE和覆盖能力。目前,很多学者对STAR-RIS辅助NOMA系统的数据传输问题进行了研究。例如,为提高系统的SE,文献[23]提出一种低复杂度的迭代算法,并设计了一种STAR-RIS协同大规模多进多出(Multiple-input Multiple-output, MIMO)-NOMA系统频谱效率最大化方案,根据基站到STAR-RIS的距离、用户到STAR-RIS的距离和信道增益研究出一个深度框架来预测用户处的功率分配、STAR-RIS处的透射和反射相移矩阵最优值。文献[24]设计了STAR-RIS辅助下OMA和NOMA网络中的资源分配方案。对于OMA,首先利用匹配理论确定信道分配的有效方案,然后提出一种交替优化算法来迭代优化功率、时间分配以及波束成形矢量。对于NOMA,则提出一种降低复杂度的匹配算法来确定信道分配,利用凸上界近似和几何规划逐步优化解码顺序、波束成形矢量和功率分配。文献[25]提出基于波束成形器的NOMA和基于集群的NOMA两种方案,为提高用户的加权和速率(Weighted Sum Rate, WSR),对每种方案中STAR-RIS的部署位置、被动透射、反射波束成形以及基站处的主动波束成形进行联合优化,证实了STAR-RIS的具体部署位置会影响系统的WSR。文献[26]研究了STAR-RIS辅助多用户下行系统的联合最小EE优化问题,在满足用户公平性的前提下联合优化功率分配系数、发射及反射波束成形,利用Dinkelbach算法及交替最大化算法求解非凸问题,最大化最小EE,从而保证用户之间的公平性。

综上所述,STAR-RIS在无线通信中具有覆盖广泛和

无线信道可调的优势,而NOMA技术能提高频谱效率、增加蜂窝边缘吞吐量、降低信道反馈要求和低传输延迟的优势。因此,在NOMA系统中引入STAR-RIS可以进一步提高通信性能、数据速率以及频谱效率。

如果信号经过的信道存在噪声,信号传输便会受到干扰,从而影响通信的可靠性,可采用WSR这一指标衡量信号质量。通信系统的WSR通常是根据信号的概率分布和信道的噪声特性推导求出的。通常情况下,WSR越高,信号传输质量越好。目前关于STAR-RIS辅助NOMA系统的WSR优化研究较少,且大多数没有共同考虑功率分配和波束成形问题。为此,本文进行以下研究:①建立STAR-RIS-NOMA系统模型。相较于MIMO系统,多输入单输出(Multiple-Input Single-Output, MISO)系统可以更容易地管理多用户之间的干扰,所有用户均使用相同的频谱资源,只是通过功率分配来区分它们的传输。因此,设计一个STAR-RIS辅助的MISO-NOMA下行通信系统,配备一个多天线基站、多个单天线用户和一个STAR-RIS用于辅助用户通信,其中用户根据相对于STAR-RIS平面的位置被分为透射用户和反射用户,通过联合优化系统的功率分配、基站处的主动波束成形和STAR-RIS处的被动波束成形最大化系统的WSR。由于优化变量的耦合性,原优化问题是非凸的且复杂度较高。为有效求解原优化问题,将其解耦为功率分配、被动波束成形和主动波束成形3个子问题,分别进行求解;②求解优化问题。首先引入松弛变量,通过一阶泰勒近似将目标函数转化为凸函数,求解近似最优功率分配。得出最优功率分配后,通过分式规划(Fractional Programming, FP),将WSR问题转化为分式问题并解耦信号与噪声功率;然后分别利用拉格朗日乘子法和连续凸逼近交替优化主被动波束成形,以获得主动波束成形的最优解与被动波束成形的次优解;③针对波束成形提出一种交替优化算法。具体而言,为了得到主动波束成形的全局最优解,采用FP将二次变换(Quadratic Transform, QT)与拉格朗日变换相结合,将原优化问题从分式转化为加减形式,原非凸优化函数转化为凸形式,进而求解。由于被动波束优化时需要求解非凸二次约束二次规划问题(Quadratically Constrained Quadratic Programming, QCQP),采用SCA方法求得其次优解。

2 系统模型

如图1所示,本文考虑一个STAR-RIS辅助的下行NOMA通信场景。该场景有一个基站,基站处的天线数为 N ,具有 M 个反射元件的STAR-RIS用于辅助用户与基站之间的通信,且STAR-RIS的每个元件都能够进行透射和反射。由于STAR-RIS能够覆盖 360° 平面,将其服务的区域分为两个部分 $L, L \in \{T, R\}$,即透射区(Transmit Region)和反射区(Reflect Region),区域内的用户相应地分为T用户和R

用户。假设T用户和R用户的用户对均为 K ,为简化问题求解步骤,假设每个用户对中有两个用户,即一个近端用户和一个远端用户。对于功率域NOMA,子信道上的配对用户在相同的时间和频率资源块上服务,假设功率域NOMA有 K 个子信道,一个用户对中的两个用户在NOMA的同一个资源块中配对,即系统中共有 $2K$ 个用户对, $4K$ 个用户。 $U_{k,i}$ 表示第 k 个用户对中的第 i 个用户,其中 $k \in K = \{L_1, L_2, \dots, L_K\}, L \in \{T, R\}, i = \{1, 2\}$ 。基站到STAR-RIS的信道系数为 $\mathbf{G} \in \mathbb{C}^{M \times N}$,基站到用户 $U_{k,i}$ 的信道系数为 $\mathbf{h}_{k,i} \in \mathbb{C}^{N \times 1}$,STAR-RIS到用户 $U_{k,i}$ 的信道系数为 $\mathbf{g}_{k,i} \in \mathbb{C}^{M \times 1}$ 。计算公式为:

$$\mathbf{G} = \sqrt{\frac{\delta}{(d_r)^\rho}} \left(\sqrt{\frac{\beta_1}{1+\beta_1}} \bar{\mathbf{G}} + \sqrt{\frac{1}{1+\beta_1}} \tilde{\mathbf{G}} \right) \quad (1)$$

$$\mathbf{g}_{k,i} = \sqrt{\frac{\delta}{(d_{k,i})^\rho}} \left(\sqrt{\frac{\beta_2}{1+\beta_2}} \bar{\mathbf{g}}_{k,i} + \sqrt{\frac{1}{1+\beta_2}} \tilde{\mathbf{g}}_{k,i} \right) \quad (2)$$

式中: δ 为路径损耗; d_r 和 $d_{k,i}$ 分别为基站到STAR-RIS的距离和STAR-RIS到用户 $U_{k,i}$ 的距离; β_1 和 β_2 为莱斯衰落系数; $\bar{\mathbf{G}}$ 为视线链路(Line of Sight, LoS), $\tilde{\mathbf{G}}$ 为非视线链路(Non-LoS, NLoS); $\bar{\mathbf{g}}_{k,i}$ 为LoS, $\tilde{\mathbf{g}}_{k,i}$ 为NLoS。

STAR-RIS在用户处的反射/透射系数为:

$$\boldsymbol{\Theta}_L = \text{diag} \{ \sqrt{\alpha_1^L} e^{j\theta_1^L}, \sqrt{\alpha_2^L} e^{j\theta_2^L}, \dots, \sqrt{\alpha_M^L} e^{j\theta_M^L} \}, L \in \{T, R\} \quad (3)$$

式中: $\sqrt{\alpha_m^L} \in [0, 1], \theta_m^L \in [0, 2\pi]$ 表示STAR-RIS第 m 个元件的幅度、相位系数,假设满足T/R协议,则有 $\alpha_m^T + \alpha_m^R = 1, \forall m \in \{1, 2, \dots, M\}$ 。

假设NOMA系统在发射方采用叠加编码,在接收端采用SIC进行干扰消除,则在基站处发射给用户 k 的信息承载符号为 s_k ,发送 s_k 所需要的波束成形矢量为 $\mathbf{w}_k$ 。那么,基站处的发射信号为:

$$\mathbf{x} = \sum_{k \in K} \mathbf{w}_k s_k, k = \{L_1, L_2, \dots, L_K\}, L \in \{T, R\} \quad (4)$$

式中: $s_k = \sum_i \sqrt{p_{k,i}} s_{k,i}, i = \{1, 2\}; s_{k,i}$ 为用户 $U_{k,i}$ 收到的信号; $p_{k,i}$ 为 $U_{k,i}$ 的传输功率。则用户 $U_{k,i}$ 用于信息解码的信号可表示为:

$$y_{k,i} = (\mathbf{g}_{k,i}^H \boldsymbol{\Theta}_{k,i} \mathbf{G}) \mathbf{x} + \mathbf{n}_{k,i} = \mathbf{g}_{k,i}^H \boldsymbol{\Theta}_{k,i} \mathbf{G} \mathbf{w}_k (\sqrt{p_{k,1}} s_{k,1} + \sqrt{p_{k,2}} s_{k,2}) + \mathbf{n}_{k,i} \quad (5)$$

因此,基站到用户 $U_{k,i}$ 的等效信道为:

$$\mathbf{H}_{k,i} = \mathbf{g}_{k,i}^H \boldsymbol{\Theta}_{k,i} \mathbf{G} \quad (6)$$

假设 $U_{k,1}$ 的信道质量优于 $U_{k,2}$,根据下行NOMA系统的解调规则, $U_{k,i}$ 在解调自身信号之前需要先解调系统中所有信道增益弱于自身的信号,则 $U_{k,i}$ 解调自身信号的信噪比(Signal to Interference plus Noise Ratio, SINR)为:

$$\gamma_{k,i} = \frac{p_{k,i} |\mathbf{H}_{k,i} \mathbf{w}_k|^2}{\sum_{j=i+1}^K p_{k,j} |\mathbf{H}_{k,j} \mathbf{w}_k|^2 + \sigma^2} \quad (7)$$

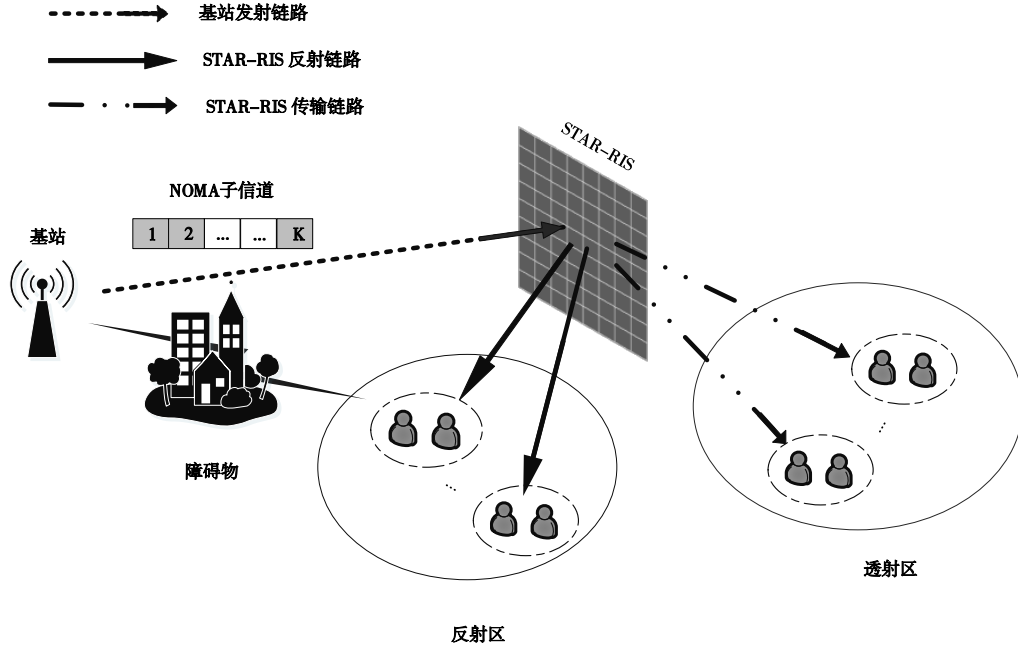


Fig. 1 STAR-RIS assisted downlink NOMA system model

图 1 STAR-RIS 辅助下行 NOMA 系统模型

因此,用户 $U_{k,i}$ 的相应可达速率为:

$$R_{k,i} = \log_2(1 + \gamma_{k,i}) \quad (8)$$

为保证每个用户能成功执行 SIC,第 k 个用户对中 $U_{k,i}$ 解码用户 $U_{k,j}$ 的信号所能实现的速率不应小于用户 $U_{k,j}$ 解码其自身信号所能实现的速率。即:

$$\gamma_{k,i} \leq \gamma_{k,i \rightarrow j} \quad (9)$$

3 问题建立与求解

为最大化系统 WSR,联合优化系统的功率分配、基站处主动波束成形和 STAR-RIS 处被动波束成形。本文优化问题可建立为:

$$\begin{aligned} (P1) \quad & \max_{\mathbf{p}, \mathbf{w}_k} \sum_{k=1}^K \sum_{L \in \{T, R\}} \sum_{i \in \{1, 2\}} \lambda_{k,i} R_{k,i} \\ \text{s.t.} \quad & C1: \sum_k p_{k,i} \leq P_{\max} \\ & C2: \gamma_{k,i} \geq \gamma_{\min} \\ & C3: \alpha_m^T + \alpha_m^R = 1, m = 1, 2, \dots, M \\ & C4: 0 \leq \theta_m^L < 2\pi, m = 1, 2, \dots, M \end{aligned} \quad (10)$$

式中: $\lambda_{k,i}$ 为用户 $U_{k,i}$ 的固定权重;约束 C1 为用户的功率约束,其中 $P_{\max}$ 为基站处的最大发射功率, $p_{k,i}$ 为用户 $U_{k,i}$ 被分配到的传输功率;约束 C2 规定了 $U_{k,i}$ 解码信号需要的 SINR 要求,其中 $\gamma_{\min}$ 为解码信号需要的最小 SINR;约束 C3 和 C4 分别为 STAR-RIS 的透射和反射离散相移控制约束。可以看出,该优化问题为非凸的,可以将其解耦为 3 个子问题进行求解,即功率分配、主动发射波束成形及 STAR-RIS 被动波束成形优化。

3.1 功率分配优化问题

原始的功率分配问题是一个非凸优化问题,这可能导

致存在多个局部最优解,直接求解这样的问题会导致高复杂度和计算密集。非凸问题的求解并不能保证找到全局最优解,且算法的求解过程不够高效。通过引入松弛变量,可以将原始非线性的非凸优化问题转化为凸优化问题,变为更易于求解的形式。松弛变量作为优化变量的一部分,允许问题在一定程度上“松弛”原有的严格约束,从而简化问题求解。这一步骤是为了解耦原始问题中的变量关系,使问题变得更易处理。此外,一阶泰勒近似能够将非线性函数近似为线性函数,通过在某一点的一阶导数近似原函数,将复杂的非线性问题转化为线性问题。这种近似使得原始的非凸问题被转换为凸问题,而凸问题可以通过现有的凸优化技术高效求解,确保找到全局最优解。因此,通过引入松弛变量并结合一阶泰勒近似能够求解功率分配优化问题。具体步骤为:

$$\begin{aligned} & p_{k,i} \text{ 在目标函数中是耦合的,因此引入松弛变量 } \mu_{k,i} = \\ & \frac{p_{k,i} \left| \mathbf{H}_{k,i} \mathbf{w}_k \right|^2}{\sum_{j=1}^K p_{k,j} \left| \mathbf{H}_{k,j} \mathbf{w}_k \right|^2 + \sigma^2}, \text{ 则原优化问题可转换为:} \\ & \sum_k \mu_{k,i} p_{k,i} + \mu_{k,i} f_{k,i} \leq p_{k,i} \end{aligned} \quad (11)$$

在式(10)中, $p_{k,i}$ 与 $\mu_{k,i}$ 相互作用,通过一阶泰勒近似可将该函数转化为一个凸函数:

$$\varsigma_{j,m} = \mu_{k,i}^{(t)} p_{k,i}^{(t)} + \mu_{k,i}^{(t)} (p_{k,i} - p_{k,i}^{(t)}) + p_{k,i}^{(t)} (\mu_{k,i} - \mu_{k,i}^{(t)}) \quad (12)$$

式中: $\mu_{k,i}^{(t)}$ 和 $p_{k,i}^{(t)}$ 为第 t 次迭代的优化解。

采用 $\varsigma_{j,m}$ 代替 $\mu_{k,i}$ 和 $p_{k,i}$,将问题转换为凸优化问题,然后利用 MATLAB 的 CVX 工具箱进行求解,得到最优功率分配系数 $p_{k,i}^*$,则原优化问题转变为:

$$\begin{aligned}
(P2) \max_{\mathbf{w}, \Theta} h_1(\mathbf{w}, \Theta) &= \sum_{k=1}^K \sum_{i \in \{1,2\}} \lambda_{k,i} (1 + \gamma_{k,i}) \\
s.t. \quad C1: &\sum_{k \in K} \|\mathbf{w}_k\|^2 \leq P_{\max} \\
C2: &\gamma_{k,i} \geq \gamma_{\min}, k = 1, 2, \dots, K, i \in \{1, 2\} \\
C3: &0 \leq \theta_m^L < 2\pi, m = 1, 2, \dots, M, L \in \{T, R\}
\end{aligned} \quad (13)$$

由于优化问题(P2)并不是一个严格的分式问题,直接求解复杂度很高,可以采用FP对优化问题进行简化。令 $\mathbf{v} = [\nu_1, \nu_2, \dots, \nu_K]^T$ 为 $\gamma_{k,i}$ 的拉格朗日辅助变量,即 $\nu_{k,i} = \gamma_{k,i}$,此时问题(P2)中的目标函数可转换为:

$$\begin{aligned}
h_2(\mathbf{w}, \Theta, \mathbf{v}) &= \sum_{k=1}^K \sum_{i \in \{1,2\}} \lambda_{k,i} \log_2(1 + \nu_k) \\
&\quad - \sum_{k=1}^K \sum_{i \in \{1,2\}} \lambda_{k,i} \nu_k + \sum_{k=1}^K \sum_{i \in \{1,2\}} \frac{\lambda_{k,i} (1 + \nu_k)}{1 + \gamma_{k,i}}
\end{aligned} \quad (14)$$

当后续固定 $\mathbf{v}$ 进行交替优化时,初始化 $\gamma_{k,i}$ 并去除常数项,上式可等效为:

$$h_3(\mathbf{w}, \Theta) = \sum_{k=1}^K \sum_{i \in \{1,2\}} \frac{\widetilde{\nu_{k,i}} \gamma_{k,i}}{1 + \gamma_{k,i}} \quad (15)$$

式中: $\widetilde{\nu_{k,i}} = \lambda_{k,i} (1 + \nu_{k,i})$ 。由于 $\mathbf{w}$ 和 Θ 仍然是耦合的,可以通过交替优化进行求解,其过程可以被表示为:

$$\dots \rightarrow \mathbf{v}^{(t)} \rightarrow \mathbf{w}^{(t)} \rightarrow \Theta^{(t)} \rightarrow \mathbf{v}^{(t+1)} \rightarrow \dots \quad (16)$$

为处理波束成形设计中非凸的服务质量(Quality of Service, QoS)约束,通过 QT 与拉格朗日变换相结合,将原优化问题从分式转化为加减形式,目的是将原本非凸的优化函数转化为凸形式。这一转换允许利用已知的凸优化技术来求解问题,使得原本难以直接求解的非凸问题变得可解。具体来说,QT 方法能有效处理因信号干扰而引入的非凸约束条件,通过将这些非凸条件转换为凸条件,可以简化问题求解的复杂度。因此,原约束条件 C2 可以通过 QT 进一步转换为:

$$\sqrt{1 + \frac{1}{\gamma_{\min}}} \mathbf{H}_{k,i} \mathbf{w}_k \geq \left\| \frac{\mathbf{H}_{k,i}}{\sigma} \right\|, k = 1, 2, \dots, K, i \in \{1, 2\} \quad (17)$$

新增约束条件进行求解,即:

$$C4: \mathbf{H}_{k,i} \mathbf{w}_k \geq 0, k = 1, 2, \dots, K, i \in \{1, 2\} \quad (18)$$

3.2 主动波束成形优化问题

固定 $\mathbf{v}$ 和 Θ , 求解 $\mathbf{w}$, 优化问题可被写为:

$$\begin{aligned}
(P3) \max_{\mathbf{w}} h_4(\mathbf{w}) &= \sum_{k=1}^K \sum_{i \in \{1,2\}} \frac{\widetilde{\nu_{k,i}} |\mathbf{H}_{k,i} \mathbf{w}_k|^2}{\sum_{j=i+1}^K |\mathbf{H}_{k,j} \mathbf{w}_k|^2 + \sigma^2} \\
s.t. \quad C1, C2, C4
\end{aligned} \quad (19)$$

通过 QT 转换上式,可将原优化函数从分数形式转换为和差形式。即:

$$\begin{aligned}
\max_{\mathbf{w}} h_5(\mathbf{w}) &= \sum_{k=1}^K \sum_{i \in \{1,2\}} 2\sqrt{\widetilde{\nu_{k,i}}} \operatorname{Re} \{ \eta_{k,i}^* \mathbf{H}_{k,i} \mathbf{w}_k \} \\
&\quad - \sum_{k=1}^K \sum_{i \in \{1,2\}} |\eta_{k,i}|^2 \left(\sum_{j=i+1}^K |\mathbf{H}_{k,j} \mathbf{w}_k|^2 + \sigma^2 \right) \\
s.t. \quad C1, C2, C4
\end{aligned} \quad (20)$$

式中: $\operatorname{Re} \{ \}$ 为取实部操作; $*$ 为取共轭操作,且 $\boldsymbol{\eta} = [\eta_1, \eta_2, \dots, \eta_K]$, $\partial h_5 / \partial \mathbf{w}_k = 0$, $\boldsymbol{\eta}$ 的最优解为 $\boldsymbol{\eta}_{k,i}^* =$

$$\frac{\sqrt{\widetilde{\nu_{k,i}}} \mathbf{H}_{k,i} \mathbf{w}_k}{\sum_{j=i+1}^K |\mathbf{H}_{k,j} \mathbf{w}_k|^2 + \sigma^2}.$$

通过应用拉格朗日乘子法引入拉格朗日算子 $\tau_0^* = \min \{ \tau_0: \sum_{k \in K} \|\mathbf{w}_k\|^2 \leq P_{\max} \}$, 可以得出 $\mathbf{w}_k$ 的全局最优解为:

$$\mathbf{w}_k^* = \sqrt{\widetilde{\nu_{k,i}}} \boldsymbol{\eta}_{k,i} \left(\sum_{j=i+1}^K \tau_0^* \mathbf{I}_M + \sum_{j=i+1}^K \sum_{i \in \{1,2\}} |\eta_{k,j}|^2 \mathbf{H}_{k,j} \mathbf{H}_{k,j}^H \right)^{-1} \mathbf{H}_{k,i} \quad (21)$$

3.3 STAR-RIS 被动波束成形优化问题

固定 $\mathbf{w}$, 优化 Θ , 优化问题可表示为:

$$\begin{aligned}
(P4) \max_{\Theta} f_1(\Theta) &= \sum_{k=1}^K \sum_{i \in \{1,2\}} \frac{\widetilde{\nu_{k,i}} |\mathbf{H}_{k,i} \mathbf{w}_k|^2}{\sum_{j=i+1}^K |\mathbf{H}_{k,j} \mathbf{w}_k|^2 + \sigma^2} \\
s.t. \quad C2, C3, C4
\end{aligned} \quad (22)$$

令 $q_{k,i} = \sqrt{s} \operatorname{diag}(\mathbf{g}_{k,i}^H) \mathbf{G} \mathbf{w}_k, z_{k,i} = \mathbf{h}_{k,i}^H \mathbf{w}_k$, 可以得到:

$$\begin{aligned}
|\mathbf{g}_{k,i}^H \Theta_{k,i} \mathbf{G} \mathbf{w}_k|^2 &= |z_{k,i} + \sqrt{s} \Theta_{k,i}^H \operatorname{diag}(\mathbf{g}_{k,i}^H) \mathbf{G} \mathbf{w}_k|^2 \\
&= |z_{k,i} + \Theta_{k,i}^H q_{k,i}|^2
\end{aligned} \quad (23)$$

因此,可以将函数 f_1 转换为:

$$f_1(\Theta) = \sum_{k=1}^K \sum_{i \in \{1,2\}} \frac{\widetilde{\nu_{k,i}} |\Theta_{k,i}^H q_{k,i} + z_{k,i}|^2}{\sum_{j=i+1}^K |\Theta_{k,j}^H q_{k,j} + z_{k,j}|^2 + \sigma^2} \quad (24)$$

对式(24)进行 QT, 能够得到:

$$\begin{aligned}
(P5) \max_{\Theta, \vartheta} f_2(\Theta, \vartheta) &= \sum_{k=1}^K \sum_{i \in \{1,2\}} 2\sqrt{\widetilde{\nu_{k,i}}} \operatorname{Re} \{ \vartheta_{k,i}^* \Theta_{k,i}^H q_{k,i} + \vartheta_{k,i}^H z_{k,i} \} \\
&\quad - \sum_{k=1}^K \sum_{i \in \{1,2\}} |\vartheta_{k,i}|^2 \left(\sum_{k=1}^K \sum_{i \in \{1,2\}} |\Theta_{k,i}^H q_{k,i} + z_{k,i}|^2 + \sigma^2 \right) \\
s.t. \quad C2, C3, C4
\end{aligned} \quad (25)$$

式中: $\vartheta = [\vartheta_1, \vartheta_2, \dots, \vartheta_K]$, $\partial f_2 / \partial \vartheta_k = 0$, 元素 ϑ 的最优解为:

$$\vartheta_k^* = \frac{\sqrt{\widetilde{\nu_{k,i}}} (\Theta_{k,i}^H q_{k,i} + z_{k,i})}{\sum_{j=i+1}^K |\Theta_{k,j}^H q_{k,j} + z_{k,j}|^2 + \sigma^2} \quad (26)$$

函数 f_2 的 QCQP 问题为:

$$\begin{aligned}
\max_{\Theta} f(\Theta) &= -\Theta^H \mathbf{J} \Theta + 2 \operatorname{Re} \{ \Theta^H \mathbf{f} \} \\
\mathbf{J} &= \sum_{k=1}^K \sum_{i \in \{1,2\}} |\vartheta_{k,i}|^2 \sum_{j=i+1}^K q_{k,j} q_{k,j}^H, \mathbf{f} =
\end{aligned} \quad (27)$$

$$\sum_{k=1}^K \sum_{i \in \{1,2\}} (\sqrt{\widetilde{\nu_{k,i}}} \vartheta_{k,i}^* q_{k,i} - |\vartheta_{k,i}|^2 \sum_{j=i+1}^K z_{k,j}^* q_{k,j}) \quad (28)$$

典型的非凸 QCQP 问题可以采用 SCA 方法求解。SCA 方法的核心思想为将非凸优化问题转化为一列凸优化子问题, 这些子问题可以采用现有的凸优化技术高效求解。每次迭代都围绕当前解的邻域构造一个凸近似问题,

然后求解这个凸问题来更新当前解。重复进行这个过程,直至满足收敛条件。具体步骤为:首先进行初始化,选择一个初始可行解 $\Theta^{(0)}$ 和预定阈值 ρ 进行迭代求解。在第 n 次迭代中,对于 $f(\Theta)$,寻找其在当前点 $\Theta^{(n)}$ 的一阶泰勒展开近似原函数,进行线性化处理,即 $f(\Theta) \approx f(\Theta^{(n)}) + \nabla f(\Theta^{(n)})^H (\Theta - \Theta^{(n)})$ 。采用线性化后的表达式替换 $f(\Theta)$,通过求解由此产生的凸优化问题来更新 Θ ;其次,根据凸子问题的解来更新 $\Theta^{(n)}$,直至 $|\Theta^{(n+1)} - \Theta^{(n)}| < \rho$,表明算法收敛,停止迭代,此时能够得到原始非凸问题的次优解 Θ^* 。在每次迭代中,需要解决的凸子问题为:

$$\max_{\Theta_k} -(\Theta - \Theta^{(n)})^H \mathbf{J}(\Theta - \Theta^{(n)}) + 2\text{Re}\{\nabla f(\Theta^{(n)})^H (\Theta - \Theta^{(n)})\} \quad (29)$$

式中: $\nabla f(\Theta^{(n)})$ 为 $f(\Theta)$ 在 $\Theta^{(n)}$ 处的梯度。

至此,STAR-RIS辅助NOMA系统的联合功率分配与波束成形优化问题已被求解。

4 仿真与验证

为验证本文算法的性能,进行以下仿真实验,通过分析仿真数据证实其有效性。假设用户与基站之间的信道为瑞利衰落信道,通过对STAR-RIS的位置进行合理部署可以保证基站与STAR-RIS之间存在LoS。从基站到STAR-RIS的信道及STAR-RIS到用户的信道均为莱斯衰落信道,其LoS和NLoS链路均服从瑞利衰落。如图2所示,基站、STAR-RIS与用户之间的位置关系可以通过三维坐标系来表示。

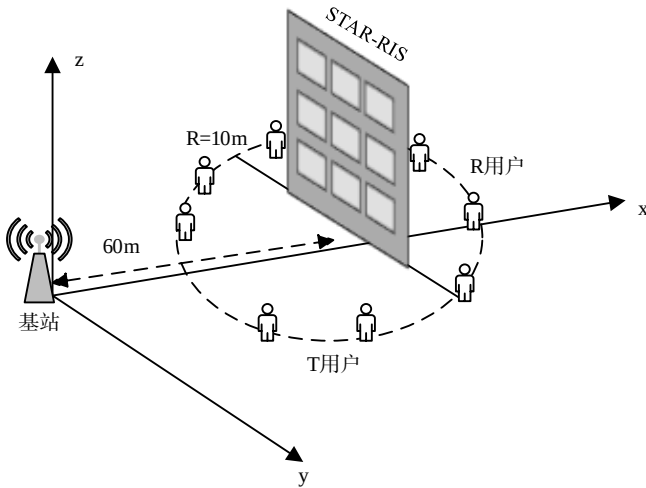


Fig. 2 Location relationship among BS, STAR-RIS, and users

图2 基站、STAR-RIS与用户之间的位置关系

假设存在一个三维坐标系,基站位于原点位置,STAR-RIS部署于地面(即 x - y 平面),STAR-RIS配备一个均匀平面阵列,其参考中心设置为 $(60, 0, 0)$ m。T用户群和R用户群分别位于STAR-RIS反射及透射侧半径为10 m的半圆上,均为 K 个。假设所有用户在规定范围内随机生

成,且均匀随机分布在以STAR-RIS为中心的圆上。与距离相关的路径损耗模型可建模为 $L(d) = s_0 (\frac{d}{d_0})^\rho$,其中 d 为单个链路直接的距离, s_0 为参考距离 $d_0 = 1$ m 的路径损耗, ρ 为路径损耗系数。因此,参考式(1)、式(2),基站到STAR-RIS和STAR-RIS到用户的路径损耗系数分别设置为 $\rho_{BR} = 2.2$, $\rho_{RU} = 2.8$,莱斯衰落因子设置为 $\beta_1 = \beta_2 = 3$,常用的最小速率要求 $\gamma_{\min} = 0.1$ bit/s/Hz。此外,为便于CVX求解,归一化处理噪声,并且将信道增益同等倍数放大,其中分配给用户的权重为 $1/K$ 。

4.1 仿真参数设置

仿真参数设置如表1所示。

Table 1 Simulation parameters settings

表1 仿真参数设置

参数	参数名称	参数值
$\lambda_{k,i}$	分配给用户的权重	0.25
δ	路径损耗/dB	-30
N	基站处天线数量	4
M	STAR-RIS的元件数量	50
K	单天线用户数量	4
σ^2	噪声功率/dB	-110

4.2 仿真结果分析

设置以下3种基线方案与本文提出的SCA相位控制的STAR-RIS进行比较:①随机相位的STAR-RIS。每个反射及透射元件的相移均在 $[0, 2\pi]$ 上均匀而独立产生;②SCA相位控制的RIS^[27];③随机相位的RIS。RIS每个反射元件的相移均在 $[0, 2\pi]$ 上均匀而独立产生。同时,仿真比较了文献[28]中提出的迫零(Zero Forcing, ZF)预编码方法得到主动波束成形,采用SCA方法对STAR-RIS进行相位控制、文献[29]中提出的FP-RM算法(采用FP优化主动波束成形,采用黎曼流形(Riemannian Manifold, RM)算法优化被动波束成形)与本文所提FP-SCA算法的收敛度。

如图3所示,FP-SCA结合了分数规划和连续凸逼近的策略,旨在通过逐步线性化非凸问题来实现高效收敛。其在处理分数优化问题时可能提供与FP-RM相似的收敛速度,因为两者均利用FP来简化问题。但当问题可以通过SCA有效线性化时,FP-SCA比FP-RM收敛得更快。与ZF-SCA相比,FP-SCA能够提供更优的解,因为FP-SCA直接针对原问题的非凸性进行处理,而不是首先应用ZF简化问题。FP-SCA具有较高的算法复杂度,因为每次迭代都需要解决一个线性化后的问题,但这种复杂度是为了换取更好的收敛性和解的质量。相比之下,ZF-SCA通过ZF简化可能在算法复杂度上有所降低,但牺牲了最终性能。

如图4所示,各方案的WSR随着基站处发射功率的增加而逐步提升。具体而言,本文所提SCA控制的STAR-RIS系统的WSR相较3种基线方案分别平均提升了19.5%、35.6%和77.2%。随着发射功率的增加,系统的

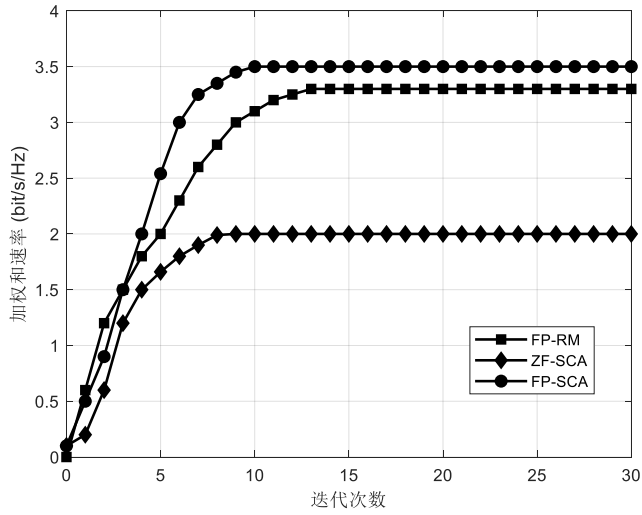


Fig. 3 The trend of WSR variation with iteration times for each scheme

图3 各方案WSR随迭代次数的变化趋势

WSR均相应提高,表明提高发射功率能够改善系统性能,且在相同发射功率下,STAR-RIS在提升WSR方面的性能优于传统RIS。然而,功率的进一步增加会导致WSR的增长趋于饱和,因此在实际系统设计中需要考虑功率控制策略,以实现性能与能效之间的最佳平衡。

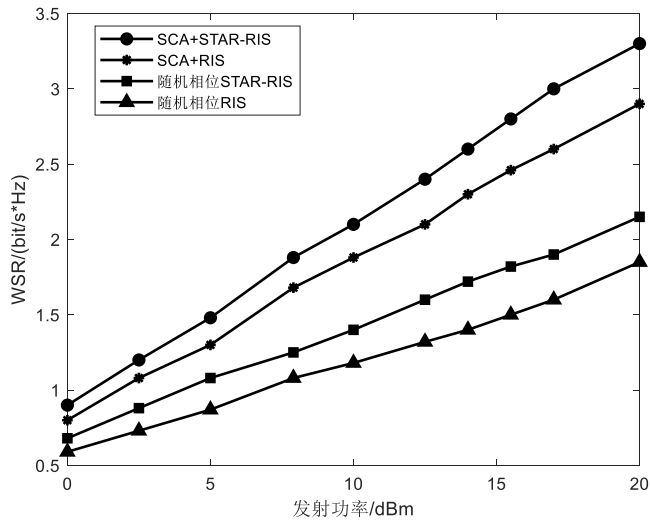


Fig. 4 The trend of WSR variation with transmission power in the system

图4 系统WSR随发射功率的变化趋势

由图5可知,随着反射单元数量的增加,各方案的WSR也随之增大,具体而言,SCA+STAR-RIS系统的WSR相较3种基线方案分别平均提升了10.01%、28.40%和64.08%。这是由于随着STAR-RIS单元数量的增加,系统能够通过更多信号反射/透射路径来提升信号强度,从而改善WSR。虽然适当增加STAR-RIS单元可以显著提升系统性能,但是在实际应用中需要权衡成本与实际部署的复杂性。

固定STAR-RIS的部署位置,假设T用户和R用户与

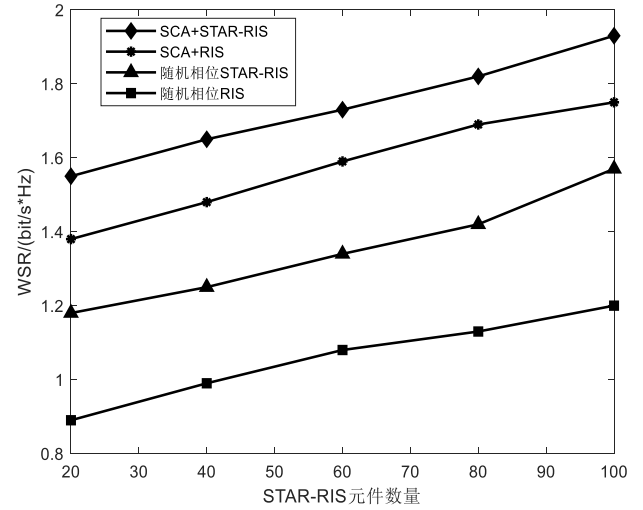


Fig. 5 The trend of system WSR variation with the number of STAR-RIS components

图5 系统WSR随STAR-RIS元件数量的变化趋势

STAR-RIS的距离分别为 d_i 和 d_r ,其中 $d_i + d_r = 20$ m。图6为系统吞吐量随 d_i 的变化趋势。可以看出,当用户为非对称分布时,多数系统资源被分配给具有更高信道增益的近用户,相较于对称分布会产生更高的吞吐量。随着用户位置的变化,STAR-RIS可以在反射与透射模式之间切换,从而更灵活地分配系统资源,性能优于传统RIS。

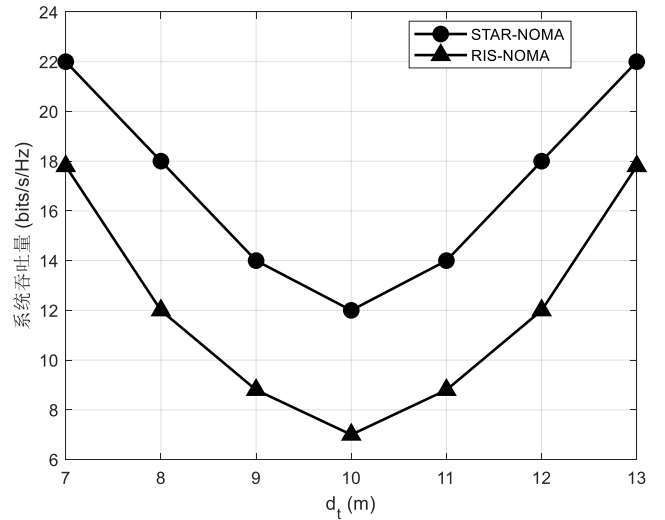


Fig. 6 The trend of system throughput changing with user location

图6 系统吞吐量随用户位置的变化趋势

图7为STAR-RIS元件的反射/透射振幅系数调整,始终满足 $\alpha_i + \alpha_r = 1$ 。当系统中用户对称分布于反射区和透射区时,对于传统RIS辅助的通信网络,由于服务用户的信道增益彼此近似,NOMA增益可能无法完全获得。而STAR-RIS可以通过调整入射信号的幅度克服这一缺点,从而将更多功率分配给拥有更多强用户的一方。在用户配对后,STAR-RIS可以调整其反射/透射振幅系数,将更多能量分配给解码阶数较高用户所在的区域,使更多用户可以从NOMA传输中受益。相较于传统RIS,STAR-RIS具

有更高的灵活性和信号调控能力。

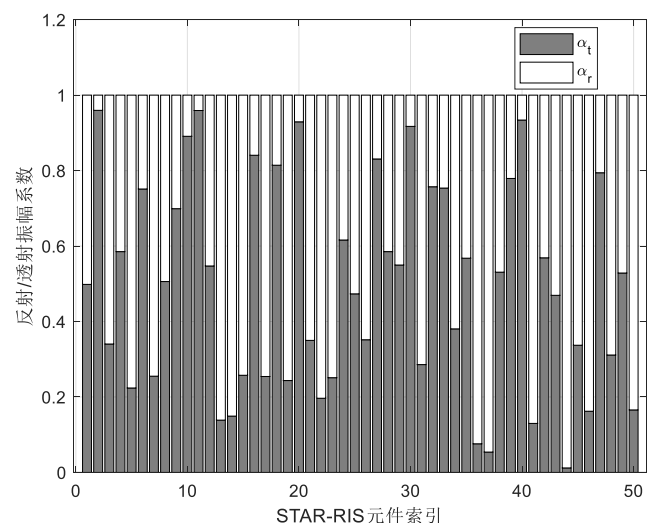


Fig. 7 Amplitude adjustment of reflection and transmission signals of STAR-RIS elements

图7 STAR-RIS各元件反射和透射信号幅度调整

5 结语

本文针对STAR-RIS辅助下行NOMA系统中的WSR最大化问题建立了联合功率分配和波束成形问题的优化模型,采用一阶泰勒近似求取最优功率分配,并提出一种基于FP-SCA的交替优化算法设计波束成形,针对系统功率分配、基站处主动波束成形和STAR-RIS处被动波束成形进行了联合优化。具体而言,通过引入松弛变量,利用一阶泰勒近似将原本的非凸优化问题转化为凸优化问题,精简求解过程,求解最优功率分配,并利用FP转换WSR问题,基于拉格朗日乘子法与SCA交替优化主被动波束成形。一系列仿真实验验证了所提算法的有效性,不仅展示了其在不同网络条件和用户分布场景下的适用性,而且证明了对WSR的提升效果。

尽管本研究取得了一定成果,但仍存在一些改进空间。未来的研究方向可能包括:①探索更多元的系统模型,包括不同类型的信道模型和用户分布,以进一步优化系统性能^[30];②考虑到实际应用中的硬件限制和能源效率,未来可着重于开发更加节能和节省成本的优化算法^[31];③设计STAR-RIS的部署策略和尺寸,以最大程度地提升系统整体性能。随着6G等下一代通信技术的发展,STAR-RIS可与其他先进技术,如机器学习和大数据分析相结合,以实现更智能和自适应的通信系统^[32]。

参考文献:

[1] HUANG C, ZAPPONE A, ALEXANDROPOULOS G C, et al. Reconfigurable intelligent surfaces for energy efficiency in wireless communication [J]. IEEE Transactions on Wireless Communications, 2019, 18(8):

4157–4170.

- [2] MU X, LIU Y, GUO L, et al. Exploiting intelligent reflecting surfaces in NOMA networks: joint beamforming optimization [J]. IEEE Transactions on Wireless Communications, 2020, 19(10): 6884–6898.
- [3] WU Q, ZHANG R. Towards smart and reconfigurable environment: Intelligent reflecting surface aided wireless network [J]. IEEE Communications Magazine, 2019, 58(1): 106–112.
- [4] ALGHAMDI R, ALHADRAMI R, ALHOTHALI D, et al. Intelligent surfaces for 6G wireless networks: a survey of optimization and performance analysis techniques [J]. IEEE Access, 2020, 8: 202795–202818.
- [5] ZHENG B, WU Q, ZHANG R. Intelligent reflecting surface-assisted multiple access with user pairing: NOMA or OMA? [J]. IEEE Communications Letters, 2020, 24(4): 753–757.
- [6] 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.
- [7] WANG C J. Research on joint beamforming optimization of RIS assisted wireless communication system [D]. Nanjing: Nanjing University of Posts and Telecommunications, 2023.
王长江. RIS辅助无线通信系统联合波束赋形优化研究 [D]. 南京: 南京邮电大学, 2023.
- [8] MA H C. Research on transmission scheme for reconfigurable intelligent surface assisted uplink NOMA system [D]. Nanjing: Nanjing University of Posts and Telecommunications, 2023.
马昊淳. 可重构智能表面辅助的上行NOMA系统传输方案研究 [D]. 南京: 南京邮电大学, 2023.
- [9] MA S T. Two-timescale channel estimation of MIMO communication based on IRS assistance [J]. Software Guide, 2023, 22(5): 158–164.
马诗婷. 基于IRS辅助MIMO通信的双时间尺度信道估计 [J]. 软件导刊, 2023, 22(5): 158–164.
- [10] HUANG C, ZAPPONE A, ALEXANDROPOULOS G C, et al. Reconfigurable intelligent surfaces for energy efficiency in wireless communication [J]. IEEE Transactions on Wireless Communications, 2019, 18(8): 4157–4170.
- [11] CHEN G, WU Q, LIU R, et al. IRS aided MEC systems with binary offloading: a unified framework for dynamic IRS beamforming [J]. IEEE Journal on Selected Areas in Communications, 2022, 41(2): 349–365.
- [12] 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.
- [13] LIU Y, MU X, XU J, et al. STAR: simultaneous transmission and reflection for 360° coverage by intelligent surfaces [J]. IEEE Wireless Communications, 2021, 28(6): 102–109.
- [14] JIAN M, ALEXANDROPOULOS G C, BASAR E, et al. Reconfigurable intelligent surfaces for wireless communications: overview of hardware designs, channel models, and estimation techniques [J]. Intelligent and Converged Networks, 2022, 3(1): 1–32.
- [15] WU C, MU X, LIU Y, et al. Resource allocation in STAR-RIS-aided networks: OMA and NOMA [J]. IEEE Transactions on Wireless Communications, 2022, 21(9): 7653–7667.
- [16] DING Z, YANG Z, FAN P, et al. On the performance of non-orthogonal multiple access in 5G systems with randomly deployed users [J]. IEEE Signal Processing Letters, 2014, 21(12): 1501–1505.

- [17] RAJ R, DIXIT A. An energy-efficient power allocation scheme for NOMA-based IoT sensor networks in 6G[J]. *IEEE Sensors Journal*, 2022, 22(7): 7371–7384.
- [18] DING Z, LV L, FANG F, et al. A state-of-the-art survey on reconfigurable intelligent surface-assisted non-orthogonal multiple access networks[J]. *Proceedings of the IEEE*, 2022, 110(9): 1358–1379.
- [19] FANG F, XU Y, PHAM Q V, et al. Energy-efficient design of IRS-NOMA networks[J]. *IEEE Transactions on Vehicular Technology*, 2020, 69(11): 14088–14092.
- [20] ZUO J, LIU Y, BASAR E, et al. Intelligent reflecting surface enhanced millimeter-wave NOMA systems [J]. *IEEE Communications Letters*, 2020, 24(11): 2632–2636.
- [21] LI Y, JIANG M, ZHANG Q, et al. Joint beamforming design in multi-cluster MISO NOMA reconfigurable intelligent surface-aided downlink communication networks [J]. *IEEE Transactions on Communications*, 2021, 69(1): 664–674.
- [22] XIE X, FANG F, DING Z. Joint optimization of beamforming, phase-shifting and power allocation in a multi-cluster IRS-NOMA network[J]. *IEEE Transactions on Vehicular Technology*, 2021, 70(8): 7705–7717.
- [23] PERDANA R H Y, NGUYEN T V, PRAMITARINI Y, et al. Deep learning-based spectral efficiency maximization in massive MIMO-NOMA systems with STAR-RIS[C]//2023 International Conference on Artificial Intelligence in Information and Communication, 2023: 644–649.
- [24] WU C, MU X, LIU Y, et al. Resource allocation in STAR-RIS-aided networks: OMA and NOMA[J]. *IEEE Transactions on Wireless Communications*, 2022, 21(9): 7653–7667.
- [25] GAO Q, LIU Y, MU X, et al. Joint location and beamforming design for STAR-RIS assisted NOMA systems[J]. *IEEE Transactions on Communications*, 2023, 71(4): 2532–2546.
- [26] WANG K, XUE L, YANG Z, et al. Max-min energy-efficiency fair optimization in STAR-RIS assisted communication system [J]. *IEEE Access*, 2023, 11: 51106–51116.
- [27] KUMAR V, ZHANG R, DI RENZO M, et al. A novel SCA-based method for beamforming optimization in IRS/RIS-assisted MU-MISO downlink [J]. *IEEE Wireless Communications Letters*, 2022, 12(2): 297–301.
- [28] CHEN X, HUANG Y S, SHI J F, et al. Joint beamforming for intelligent reflecting surface-aided multi-user massive MIMO system [J]. *Telecommunication Engineering*, 2023, 63(9): 1285–1290.
- 陈晓, 黄岩松, 施建锋, 等. 智能反射面辅助多用户大规模MIMO系统的联合波束成形[J]. *电讯技术*, 2023, 63(9): 1285–1290.
- [29] LI X L, MA S H. Joint beamforming design for IRS-assisted multi-Cell MISO system [J]. *Communications Technology*, 2023, 56(10): 1146–1153.
- 李校林, 马升华. IRS辅助多小区MISO系统的联合波束成形设计[J]. *通信技术*, 2023, 56(10): 1146–1153.
- [30] XU H, QIAN M J. Beamforming design of STAR-RIS assisted secure communication system [J]. *Wireless Communication Technology*, 2023, 32(4): 1–6.
- 许浩, 钱慕君. STAR-RIS辅助的安全通信系统的波束形成设计[J]. *无线通信技术*, 2023, 32(4): 1–6.
- [31] HOU T W, LI J, WANG J, et al. Synchronous transmission reflection intelligent metasurface signal enhancement algorithm for non orthogonal multiple access[J]. *Journal of Beijing University of Posts and Telecommunications*, 2024, 47(1): 7–12.
- 侯天为, 李洁, 王俊, 等. 非正交多址接入的同步透射反射智能超表面信号增强算法[J]. *北京邮电大学学报*, 2024, 47(1): 7–12.
- [32] ZHANG P, WANG J W, ZENG Z H. Development and application analysis of 6G intelligent metasurface technology [J]. *Information and Communication Technology*, 2023, 17(6): 63–71.
- 张朋, 王佳维, 曾哲昊. 6G智能超表面技术发展及应用分析[J]. *信息通信技术*, 2023, 17(6): 63–71.

(责任编辑:尹晨茹)