

双STAR-RIS辅助下行NOMA系统中最大化和速率的方法

田心记^{*①} 孟浩然^① 李兴旺^① 张辉^②

^①(河南理工大学物理与电子信息学院 焦作 454003)

^②(贵州理工学院矿业工程学院 贵阳 550003)

摘要: 对于两个同时透射和反射的智能可重构表面(STAR-RIS)辅助的下行非正交多址接入(NOMA)系统, 该文提出一种最大化和速率的方法。首先构建最大化和速率的优化问题, 优化参数为STAR-RIS相移、功率分配和时间分配; 然后用半正定规划法(SDP)优化双STAR-RIS相移; 最后, 用迭代的方法交替优化功率分配和时间分配, 在每次迭代过程中分别用拉格朗日对偶分解法优化功率分配和函数极值法优化时间分配。仿真结果显示, 双STAR-RIS辅助的NOMA系统的和速率高于单STAR-RIS辅助的NOMA系统。

关键词: 非正交多址接入; 同时透射和反射的智能可重构表面; 和速率; 功率; 相移

中图分类号: TN92

文献标识码: A

文章编号: 1009-5896(2024)00-0001-07

DOI: 10.11999/JEIT240007

Method of Maximizing Sum Rate for Dual STAR-RIS Assisted Downlink NOMA Systems

TIAN Xinji^① MENG Haoran^① LI Xingwang^① ZHANG Hui^②

^①(Institute of Physics and Electronic Information, Henan Polytechnic University, Jiaozuo 454000, China)

^②(Institute of Mining Engineering, Guizhou Institute Technology, Guiyang 550003, China)

Abstract: A sum-rate maximization method is proposed for two Simultaneously Transmitting And Reflecting Reconfigurable Intelligent Surface (STAR-RIS) assisted downlink Non-Orthogonal Multiple Access (NOMA) systems. Firstly, the optimization problem for maximizing sum rate is constructed, with STAR-RIS phase shifts, power allocation and time allocation as optimization parameters. Then the Semi-Definite Programming method (SDP) is used to optimize the phase shifts these two STAR-RISs. Finally, the power allocation and time allocation are optimized alternately by iterative method. In each iteration, Lagrange dual decomposition method is used to optimize power allocation and function extremum method is used to optimize time allocation. Simulation results show that the sum rate of the dual STAR-RIS-assisted NOMA system is higher than that of the single STAR-RIS-assisted NOMA system.

Key words: Non-Orthogonal Multiple Access (NOMA); Simultaneously Transmitting And Reflecting Reconfigurable Intelligent Surface (STAR-RIS); Sum rate; Power; Phase shift

1 引言

随着第6代(The Sixth Generation, 6G)移动通信技术时代的到来, 为应对爆炸式增长的数据流量需求, 通信网络的部署密度和覆盖范围在逐步增加^[1]。由于所传输的无线电波与周围物体之间存在不可控的相互作用, 传播环境不能为随机的发送信

号提供高质量的传输条件。可重构智能表面(Reconfigurable Intelligent Surface, RIS)作为一种新的革命性技术, 能有效地解决这些问题, 实现可重构的无线传播环境^[2]。具体来说, RIS由大量低成本的无源反射元素组成, 每个元素均可调整入射信号的振幅和相位^[3,4]。但RIS只能服务半空间的用戶, 限制了部署RIS的灵活性。随着研究的不断深入, 提出了一种同时透射和反射的智能可重构表面(Simultaneously Transmitting And Reflecting Reconfigurable Intelligent Surface, STAR-RIS)。与传统的RIS不同, STAR-RIS可以实现全空间覆盖, 扩大了信号的覆盖范围^[5], 为信号传播提供了新的自由度, 从而增加了网络设计的灵活性。此

收稿日期: 2024-01-16; 改回日期: 2024-06-14; 网络出版: 2024-06-18

*通信作者: 田心记 tian215216@sohu.com

基金项目: 国家自然科学基金(52164007), 河南理工大学博士基金(B2018-39)

Foundation Items: The National Natural Science Foundation of China (52164007), The Doctoral Fund of Henan Polytechnic University (B2018-39)

外, STAR-RIS具有很强的兼容性, 可与多种技术相融合, 受到了研究界和业界的广泛关注。

另一方面, 非正交多址接入 (Non-Orthogonal Multiple Access, NOMA) 技术是第5代移动通信的关键技术之一。与传统的正交多址接入 (Orthogonal Multiple Access, OMA) 技术相比, NOMA可以同时为多个用户提供服务, 从而显著地提高了资源的利用率^[6]。因此, NOMA是近年的研究热点之一, 具有广阔的应用前景。

STAR-RIS和NOMA都是未来无线通信的关键技术之一, 将两者结合可以更好地利用两者的优点, 进一步提升系统的性能。STAR-RIS辅助的NOMA系统中的资源分配涉及到功率分配和STAR-RIS透射元素和反射元素的振幅和相移, 是影响系统性能的重要因素之一。为此, 学者们对STAR-RIS辅助的NOMA系统中的资源分配展开了大量的研究。

文献[7-10]研究了STAR-RIS辅助的上行NOMA系统中的资源分配的方法。文献[7]通过联合优化用户的发射功率、波束赋形、STAR-RIS相移和时间分配, 最小化系统的总功率。文献[8]也研究了该系统中最小化功率的方法, 利用块坐标下降法优化STAR-RIS相移, 并用迭代的方法交替优化功率和STAR-RIS相移。文献[9]通过联合优化该系统中的STAR-RIS相移和信道分配, 最大化系统的平均速率。文献[10]研究了该系统中最大化和速率的方法, 首先提出了一种低复杂度的用户分组方案, 用于解决初始用户分组和解码顺序问题, 然后采用迭代的方法交替优化STAR-RIS相移和分组方案, 在每次迭代过程中用半正定规划法 (Semi-Definite Programming, SDP) 优化STAR-RIS相移。

文献[11-14]研究了STAR-RIS辅助的下行NOMA系统中的资源分配的方法。文献[11]研究了该系统中最大化能量效率的方法, 采用迭代的方法交替优化STAR-RIS相移和波束赋形, 在每次迭代的过程中分别利用逐次凸逼近法 (Successive Convex Approximation, SCA) 优化STAR-RIS相移和拉格朗日对偶法优化波束赋形。为了降低复杂度, 文献[12]采用深度强化学习算法来联合优化波束赋形和STAR-RIS相移, 以最大化系统的能量效率。文献[13]构建了该系统中最大化和速率的优化问题, 首先提出了一种基于位置的匹配算法进行子信道分配, 然后分别利用SCA、半正定松弛法 (SemiDefinite Relaxation, SDR) 和几何规划法优化STAR-RIS相移、解码顺序和功率分配。文献[14]也研究了该系统中最大化和速率的方法, 提出了一种双层迭代的算法, 外层迭代遍历解码顺序, 内层迭代在给了解码顺序

的前提下, 交替优化功率分配系数、波束赋形和STAR-RIS相移。由于STAR-RIS具有低成本、易部署的优势, 多个STAR-RIS的部署既能实现更广泛的信号覆盖, 又能同时为多个用户提供服务, 实现更高的频谱效率和用户容量。然而, 文献[11-14]的模型中只有一个STAR-RIS, 尚未有学者研究多STAR-RIS辅助的下行NOMA系统中最大化和速率的方法。

综上所述, 本文提出了双STAR-RIS辅助的下行NOMA系统最大化和速率的方法。首先构建该系统中最大化和速率的优化问题, 优化参数包括双STAR-RIS相移、功率分配和时间分配, 然后用SDP优化双STAR-RIS相移, 最后采用迭代的方法交替优化功率分配和时间分配。仿真结果显示, 双STAR-RIS辅助的NOMA系统的和速率高于单STAR-RIS辅助的NOMA系统。

2 系统模型

考虑如图1所示的双STAR-RIS辅助下行的NOMA系统, 包含1个基站 (Base Station, BS)、2个STAR-RIS和若干用户, 其中BS和用户都配置单根天线。基站的服务区域分为1个小区边沿反射区域和2个小区边沿透射区域。反射区域和透射区域的用户与BS通信均需要STAR-RIS的辅助。位于反射区域的用户可由STAR-RIS₁和STAR-RIS₂两个STAR-RIS辅助通信, 用用户R表示; 位于两个透射区域的用户只能由单个STAR-RIS辅助通信, 分别用用户T和用户C表示, 其中用户T由STAR-RIS₁辅助通信, 用户C由STAR-RIS₂辅助通信。

假设共有 K 个用户, 其中用户R、用户T和用户C的集合分别表示为 $k_R = \{1, 2, \dots, K_R\}$, $k_T = \{1, 2, \dots, K_T\}$ 和 $k_C = \{1, 2, \dots, K_C\}$, $K_R + K_T + K_C = K$ 。STAR-RIS₁和STAR-RIS₂都有 N 个反射元素, 分别用 θ_{R1} 和 θ_{T1} 表示STAR-RIS₁的反射相移矩阵

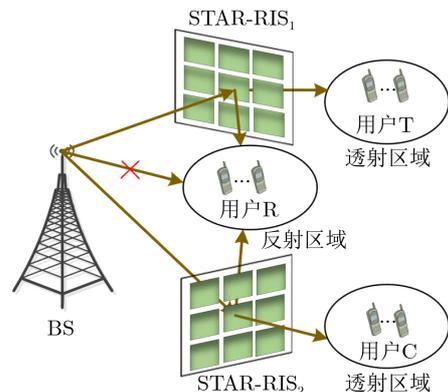


图1 双STAR-RIS辅助的下行NOMA系统

和透射相移矩阵，分别用 $\boldsymbol{\theta}_{R2}$ 和 $\boldsymbol{\theta}_{T2}$ 表示 STAR-RIS₂ 的反射相移矩阵和透射相移矩阵，其中， $\boldsymbol{\theta}_q = \text{diag}(e^{j\theta_1^q}, e^{j\theta_2^q}, \dots, e^{j\theta_N^q})$ ， $q \in \{R1, T1\}$ ， $\boldsymbol{\theta}_u = \text{diag}(e^{j\theta_1^u}, e^{j\theta_2^u}, \dots, e^{j\theta_N^u})$ ， $u \in \{R2, T2\}$ ， $\theta_n^q, \theta_n^u \in [0, 2\pi)$ ， $n \in \{1, 2, \dots, N\}$ 。STAR-RIS 采用时间切换协议，即同一个 STAR-RIS 辅助的反射用户和透射用户的传输时间正交。假设两个 STAR-RIS 的反射时间同步并且透射时间也同步，分别用 λ_R 和 λ_T 表示 STAR-RIS 辅助的反射用户传输时间的百分比和透射用户传输时间的百分比，其中， $0 < \lambda_R < 1$ 且 $\lambda_T = 1 - \lambda_R$ 。

第 k 个用户 R、第 i 个用户 T 和第 o 个用户 C 的接收信号分别为

$$\mathbf{y}_k = (\mathbf{h}_{R1,k} + \mathbf{h}_{R2,k}) \sum_{a=1}^{K_R} \sqrt{P_{R,a}} x_{R,a} + \mathbf{n} \quad (1)$$

$$\mathbf{y}_i = \mathbf{h}_{T1,i} \left(\sum_{b=1}^{K_T} \sqrt{P_{T,b}} x_{T,b} + \sum_{c=1}^{K_C} \sqrt{P_{C,c}} x_{C,c} \right) + \mathbf{n} \quad (2)$$

$$\mathbf{y}_o = \mathbf{h}_{T2,o} \left(\sum_{c=1}^{K_C} \sqrt{P_{C,c}} x_{C,c} + \sum_{b=1}^{K_T} \sqrt{P_{T,b}} x_{T,b} \right) + \mathbf{n} \quad (3)$$

其中， $\mathbf{h}_{R1,k} = \mathbf{g}_{R1,k}^T \boldsymbol{\theta}_{R1} \mathbf{f}_1$ ， $\mathbf{h}_{R2,k} = \mathbf{g}_{R2,k}^T \boldsymbol{\theta}_{R2} \mathbf{f}_2$ ， $\mathbf{h}_{T1,i} = \mathbf{g}_{T1,i}^T \boldsymbol{\theta}_{T1} \mathbf{f}_1$ 和 $\mathbf{h}_{T2,o} = \mathbf{g}_{T2,o}^T \boldsymbol{\theta}_{T2} \mathbf{f}_2$ 是等效信道， $(\cdot)^T$ 表示矩阵的转置。 $\mathbf{g}_{R1,k}$ ， $\mathbf{g}_{R2,k}$ ， $\mathbf{g}_{T1,i}$ 和 $\mathbf{g}_{T2,o}$ 分别表示第 k 个用户 R 到 STAR-RIS₁ 的信道、第 k 个用户 R 到 STAR-RIS₂ 的信道、第 i 个用户 T 到 STAR-RIS₁ 的信道和第 o 个用户 C 到 STAR-RIS₂ 的信道，阶数均为 $N \times 1$ ， $k \in k_R$ ， $i \in k_T$ ， $o \in k_C$ 。 \mathbf{f}_1 和 \mathbf{f}_2 分别表示 BS 到 STAR-RIS₁ 的信道和 BS 到 STAR-RIS₂ 的信道， \mathbf{f}_1 和 \mathbf{f}_2 的阶数均为 $N \times 1$ 。 $x_{R,a}$ 和 $P_{R,a}$ 分别为第 a 个用户 R 的期望接收信号和 $x_{R,a}$ 对应的功率， $x_{T,b}$ 和 $P_{T,b}$ 分别为第 b 个用户 T 的期望接收信号和 $x_{T,b}$ 对应的功率， $x_{C,c}$ 和 $P_{C,c}$ 分别为第 c 个用户 C 的期望接收信号和 $x_{C,c}$ 对应的功率。噪声 \mathbf{n} 的每个元素相互独立，并且服从均值为零且方差为 σ^2 的复高斯分布。

基于连续干扰消除技术 (Successive Interference Cancellation, SIC) 的原理，用户 k 在解码自身信号之前，需要依次解码该区域内信道较弱的用户的信号，并从接收信号中消除该信号造成的干扰。不失一般性，假设等效信道增益满足， $|\mathbf{h}_{R1,1} + \mathbf{h}_{R2,1}|^2 \geq |\mathbf{h}_{R1,2} + \mathbf{h}_{R2,2}|^2 \geq \dots \geq |\mathbf{h}_{R1,K_R} + \mathbf{h}_{R2,K_R}|^2$ ， $|\mathbf{h}_{T1,1}|^2 \geq |\mathbf{h}_{T1,2}|^2 \geq \dots \geq |\mathbf{h}_{T1,K_T}|^2$ ， $|\mathbf{h}_{T2,1}|^2 \geq$

$|\mathbf{h}_{T2,2}|^2 \geq \dots \geq |\mathbf{h}_{T2,K_C}|^2$ 。则第 k 个用户 R 解码自身信号的信干噪比 (Signal to Interference and Noise Ratio, SINR) 为

$$\text{SINR}_{R,k} = P_{R,k} |\mathbf{h}_{R1,k} + \mathbf{h}_{R2,k}|^2 / \left(|\mathbf{h}_{R1,k} + \mathbf{h}_{R2,k}|^2 \sum_{a=1}^{k-1} P_{R,a} + \sigma^2 \right) \quad (4)$$

同理，第 i 个用户 T 解码自身信号时和第 o 个用户 C 解码自身信号时，其 SINR 分别为

$$\text{SINR}_{T,i} = P_{T,i} |\mathbf{h}_{T1,i}|^2 / \left(|\mathbf{h}_{T1,i}|^2 \left(\sum_{b=1}^{i-1} P_{T,b} + \sum_{c=1}^{K_C} P_{C,c} \right) + \sigma^2 \right) \quad (5)$$

$$\text{SINR}_{C,o} = P_{C,o} |\mathbf{h}_{T2,o}|^2 / \left(|\mathbf{h}_{T2,o}|^2 \left(\sum_{c=1}^{o-1} P_{C,c} + \sum_{b=1}^{K_T} P_{T,b} \right) + \sigma^2 \right) \quad (6)$$

第 k 个用户 R、第 i 个用户 T 和第 o 个用户 C 的速率分别为

$$R_{R,k} = \log_2 \left(1 + P_{R,k} |\mathbf{h}_{R1,k} + \mathbf{h}_{R2,k}|^2 / \left(|\mathbf{h}_{R1,k} + \mathbf{h}_{R2,k}|^2 \sum_{a=1}^{k-1} P_{R,a} + \sigma^2 \right) \right) \quad (7)$$

$$R_{T,i} = \log_2 \left(1 + P_{T,i} |\mathbf{h}_{T1,i}|^2 / \left(|\mathbf{h}_{T1,i}|^2 \left(\sum_{b=1}^{i-1} P_{T,b} + \sum_{c=1}^{K_C} P_{C,c} \right) + \sigma^2 \right) \right) \quad (8)$$

$$R_{C,o} = \log_2 \left(1 + P_{C,o} |\mathbf{h}_{T2,o}|^2 / \left(|\mathbf{h}_{T2,o}|^2 \left(\sum_{c=1}^{o-1} P_{C,c} + \sum_{b=1}^{K_T} P_{T,b} \right) + \sigma^2 \right) \right) \quad (9)$$

因此，系统的和速率为

$$R = \lambda_R \sum_{k=1}^{K_R} R_{R,k} + \lambda_T \sum_{i=1}^{K_T} R_{T,i} + \lambda_T \sum_{o=1}^{K_C} R_{C,o} \quad (10)$$

3 优化问题的建立

本节建立了最大化和速率的优化问题，在满足用户最低速率需求的条件下，通过设计 STAR-RIS₁ 相移、STAR-RIS₂ 相移、功率分配和时间分配，最大化系统的和速率。该目标用公式表示为

$$\max_{\theta_q, \theta_u, \mathbf{P}, \lambda_R, \lambda_T} \left(\lambda_R \sum_{k=1}^{K_R} R_{R,k} + \lambda_T \sum_{i=1}^{K_T} R_{T,i} + \lambda_T \sum_{o=1}^{K_C} R_{C,o} \right) \quad (11a)$$

$$\text{s.t. } \theta_n^q \in [0, 2\pi), \theta_n^u \in [0, 2\pi), q \in \{\text{R1}, \text{T1}\}, \\ u \in \{\text{R2}, \text{T2}\}, n = 1, 2, \dots, N \quad (11b)$$

$$\lambda_T = 1 - \lambda_R, \lambda_R \in (0, 1) \quad (11c)$$

$$\lambda_R R_{R,k} \geq R_{\min}, \lambda_T R_{T,i} \geq R_{\min}, \lambda_T R_{C,o} \geq R_{\min}, \\ k \in k_R, i \in k_T, o \in k_C \quad (11d)$$

$$\sum_{k=1}^{K_R} P_{R,k} \leq P_{\max}, \sum_{i=1}^{K_T} P_{T,i} + \sum_{o=1}^{K_C} P_{C,o} \leq P_{\max} \quad (11e)$$

其中, P_{\max} 是基站的最大发送功率, $\mathbf{P} = [P_{R,1}, P_{R,2}, \dots, P_{R,K_R}, P_{T,1}, \dots, P_{T,K_T}, P_{C,1}, \dots, P_{C,K_C}]^T$, R_{\min} 是用户单位时间内所需的最低吞吐量。为了简化式(11a)的优化问题, 令 $\mathbf{h}_{R,k} = [\text{diag}(\mathbf{g}_{R1,k}) \mathbf{f}_1; \text{diag}(\mathbf{g}_{R2,k}) \mathbf{f}_2]$, $\boldsymbol{\theta}_R = [\boldsymbol{\theta}_{R1}, \boldsymbol{\theta}_{R2}]$, 此时式(7)可以改写为

$$R_{R,k} = \log_2 \left(1 + P_{R,k} |\boldsymbol{\theta}_R \mathbf{h}_{R,k}|^2 \right. \\ \left. / \left(|\boldsymbol{\theta}_R \mathbf{h}_{R,k}|^2 \sum_{a=1}^{k-1} P_{R,a} + \sigma^2 \right) \right) \quad (12)$$

4 优化问题的求解

本节求解式(11)的优化问题。首先, 用SDP求解双STAR-RIS的相移; 然后, 在给定时间分配的情况下, 用拉格朗日对偶分解法求解功率分配; 其次, 在给定功率分配的情况下, 用函数极值法求解时间分配; 最后, 采用迭代的方法交替优化功率分配和时间分配。

4.1 优化双STAR-RIS相移

本节给出了STAR-RIS相移的一种次优的求解方法。在相同的功率下, 系统的和速率随信道增益的增大而增大, 因此可通过最大化等效信道增益之和来优化STAR-RIS相移。此外, 反射相移矩阵和透射相移矩阵在时间上相互独立, 并且两个STAR-RIS的透射相移矩阵在空间上相互独立, 因此可以分别优化双STAR-RIS的反射相移矩阵 $\boldsymbol{\theta}_R$ 、STAR-RIS₁的透射相移矩阵 $\boldsymbol{\theta}_{T1}$ 和STAR-RIS₂的透射相移矩阵 $\boldsymbol{\theta}_{T2}$, 相应的优化问题为

$$\max_{\boldsymbol{\theta}_R} \sum_{k=1}^{K_R} |\boldsymbol{\theta}_R \mathbf{h}_{R,k}|^2 \quad (13a)$$

$$\text{s.t. } \theta_n^{\text{R1}}, \theta_n^{\text{R2}} \in [0, 2\pi), n = 1, 2, \dots, N \quad (13b)$$

$$\max_{\boldsymbol{\theta}_{T1}} \sum_{i=1}^{K_T} |\mathbf{g}_{T1,i}^T \boldsymbol{\theta}_{T1} \mathbf{f}_1|^2 \quad (14a)$$

$$\text{s.t. } \theta_n^{\text{T1}} \in [0, 2\pi), n = 1, 2, \dots, N \quad (14b)$$

$$\max_{\boldsymbol{\theta}_{T2}} \sum_{o=1}^{K_C} |\mathbf{g}_{T2,o}^T \boldsymbol{\theta}_{T2} \mathbf{f}_2|^2 \quad (15a)$$

$$\text{s.t. } \theta_n^{\text{T2}} \in [0, 2\pi), n = 1, 2, \dots, N. \quad (15b)$$

接下来给出式(13)中优化问题的求解方法。 $|\boldsymbol{\theta}_R \mathbf{h}_{R,k}|^2$ 可等效表示为

$$|\boldsymbol{\theta}_R \mathbf{h}_{R,k}|^2 = |\mathbf{v}_{R,k} \mathbf{e}|^2 = \text{Tr} \left(\mathbf{v}_{R,k} \mathbf{e} (\mathbf{v}_{R,k} \mathbf{e})^H \right) \\ = \text{Tr} (\mathbf{V}_{R,k} \mathbf{E}) \quad (16)$$

其中, $\text{Tr}(\cdot)$ 表示矩阵的迹, $(\cdot)^H$ 表示矩阵的共轭转置, $\mathbf{e} = [e^{j\theta_1^{\text{R1}}}, e^{j\theta_2^{\text{R1}}}, \dots, e^{j\theta_N^{\text{R1}}}, e^{j\theta_1^{\text{R2}}}, \dots, e^{j\theta_N^{\text{R2}}}]^T$, $\mathbf{v}_{R,k} = \mathbf{h}_{R,k}$, $\mathbf{V}_{R,k} = \mathbf{h}_{R,k}^H \mathbf{h}_{R,k}$, $\mathbf{E} = \mathbf{e} \mathbf{e}^H$, 矩阵 \mathbf{E} 的秩为1。式(13)的问题可以转化为

$$\max_{\mathbf{E}} \text{Tr} \left(\sum_{k=1}^{K_R} \mathbf{V}_{R,k} \mathbf{E} \right) \quad (17a)$$

$$\text{s.t. } \mathbf{E}(n, n) = 1, n \in [1, 2N], \mathbf{E} \geq 0, \text{rank}(\mathbf{E}) = 1. \quad (17b)$$

式(17)的优化问题是凸问题, 可采用Matlab中CVX工具求解该问题^[15], 求得的最优解 E^* 是一个秩为1的半正定矩阵, 若得到的最优解不满足 $\text{rank}(E^*) = 1$, 则用高斯随机化修正该解, 使其满足式 $\text{rank}(E) = 1$ 。同理, 可用相同的方法求解式(14)和式(15)中的优化问题。

4.2 已知相移和时间分配优化功率分配

本节在已知双STAR-RIS相移、 λ_R 和 λ_T 的情况下优化功率分配, 此时, 式(11)的优化问题可转化为

$$\max_{P_{R,k}, P_{T,i}, P_{C,o}} \left(\lambda_R \sum_{k=1}^{K_R} R_{R,k} + \lambda_T \sum_{i=1}^{K_T} R_{T,i} \right. \\ \left. + \lambda_T \sum_{o=1}^{K_C} R_{C,o} \right) \quad (18a)$$

$$\text{s.t. } \lambda_R R_{R,k} \geq R_{\min}, \lambda_T R_{T,i} \geq R_{\min}, \lambda_T R_{C,o} \geq R_{\min}, \\ k \in k_R, i \in k_T, o \in k_C \quad (18b)$$

$$\sum_{k=1}^{K_R} P_{R,k} \leq P_{\max}, \sum_{i=1}^{K_T} P_{T,i} + \sum_{o=1}^{K_C} P_{C,o} \leq P_{\max} \quad (18c)$$

在其他条件相同的情况下, 功率越高, 系统的和速率越高, 因此约束条件 $\sum_{k=1}^{K_R} P_{R,k} \leq P_{\max}$ 等价

于 $\sum_{k=1}^{K_R} P_{R,k} = P_{\max}$ ，同理， $\sum_{i=1}^{K_T} P_{T,i} + \sum_{o=1}^{K_C} P_{C,o} = P_{\max}$ 。式(18)是一个凸优化问题，可

$$\begin{aligned}
L(P_{R,k}, P_{T,i}, P_{C,o}, \alpha_1, \alpha_2, \alpha_3, \alpha_4, \alpha_5) &= \lambda_T \sum_{i=1}^{K_T} \log_2 \left(1 + P_{T,i} |h_{T1,i}|^2 / \left(|h_{T1,i}|^2 \left(\sum_{b=1}^{i-1} P_{T,b} + \sum_{c=1}^{K_C} P_{C,c} \right) + \sigma^2 \right) \right) \\
&+ \lambda_T \sum_{o=1}^{K_C} \log_2 \left(1 + P_{C,o} |h_{T2,o}|^2 / \left(|h_{T2,o}|^2 \left(\sum_{c=1}^{o-1} P_{C,c} + \sum_{b=1}^{K_T} P_{T,b} \right) + \sigma^2 \right) \right) \\
&+ \lambda_R \sum_{k=1}^{K_R} \log_2 \left(1 + P_{R,k} |\theta_R h_{R,k}|^2 / \left(|\theta_R h_{R,k}|^2 \sum_{a=1}^{k-1} P_{R,a} + \sigma^2 \right) \right) \\
&- \alpha_1 (R_{\min} - \lambda_R R_{R,k}) - \alpha_2 (R_{\min} - \lambda_T R_{T,i}) - \alpha_3 (R_{\min} - \lambda_T R_{C,o}) \\
&- \alpha_4 \left(\sum_{i=1}^{K_T} P_{T,i} + \sum_{o=1}^{K_C} P_{C,o} - P_{\max} \right) - \alpha_5 \left(\sum_{k=1}^{K_R} P_{R,k} - P_{\max} \right) \quad (19)
\end{aligned}$$

在满足式(18)的约束条件下，根据KKT (Karush-Kuhn-Tucker)定理，式(18)的最优解可由式(20)求出

$$\begin{aligned}
\frac{\partial L(P_{R,k}, P_{T,i}, P_{C,o}, \alpha_1, \alpha_2, \alpha_3, \alpha_4, \alpha_5)}{\partial \Delta} &= 0, \\
\Delta \in \{P_{R,k}, P_{T,i}, P_{C,o}\}, \quad (20)
\end{aligned}$$

然后用次梯度下降法计算拉格朗日乘子 α_1 , α_2 , α_3 , α_4 和 α_5 ，使得运用一个固定的步长可以将问题的最优解收敛到一个很小的范围内。根据次梯度下降法可得 $\alpha_1^{(l+1)} = [\alpha_1^l - \eta_1^l (R_{\min} - \lambda_R R_{R,k})]^+$, $\alpha_2^{(l+1)} = [\alpha_2^l - \eta_2^l (R_{\min} - \lambda_T R_{T,i})]^+$, $\alpha_3^{(l+1)} = [\alpha_3^l - \eta_3^l (R_{\min} - \lambda_T R_{C,o})]^+$, $\alpha_4^{(l+1)} = [\alpha_4^l - \eta_4^l \left(\sum_{i=1}^{K_T} P_{T,i} + \sum_{o=1}^{K_C} P_{C,o} - P_{\max} \right)]^+$, $\alpha_5^{(l+1)} = [\alpha_5^l - \eta_5^l \left(\sum_{k=1}^{K_R} P_{R,k} - P_{\max} \right)]^+$ ，其中， $\eta_1^l, \eta_2^l, \eta_3^l, \eta_4^l$ 和 η_5^l 为迭代步长， l 为迭代次数， $[m]^+ = \max(0, m)$ 。

4.3 已知相移和功率分配优化时间分配

本节在已知双STAR-RIS相移和 P 的情况下优化时间分配，式(11)的优化问题可转化为

$$\max_{\lambda_R, \lambda_T} \left(\lambda_R \sum_{k=1}^{K_R} R_{R,k} + \lambda_T \sum_{i=1}^{K_T} R_{T,i} + \lambda_T \sum_{o=1}^{K_C} R_{C,o} \right) \quad (21a)$$

$$\text{s.t. } \lambda_T = 1 - \lambda_R, \lambda_R \in (0, 1) \quad (21b)$$

$$\begin{aligned}
\lambda_R R_{R,k} &\geq R_{\min}, \lambda_T R_{T,i} \geq R_{\min}, \lambda_T R_{C,o} \geq R_{\min}, \\
k \in k_R, i \in k_T, o \in k_C \quad (21c)
\end{aligned}$$

接下来在满足式(21c)的约束条件下，可得

$$\begin{aligned}
\lambda_R &\geq \max_{k \in k_R} (R_{\min} / R_{R,k}) \triangleq \lambda_R^{\min}, \\
\lambda_T &\geq \max_{i \in k_T, o \in k_C} (R_{\min} / R_{T,i}, R_{\min} / R_{C,o}) \triangleq \lambda_T^{\min} \quad (22)
\end{aligned}$$

以采用拉格朗日对偶分解法来求解。用 $\alpha_1, \alpha_2, \alpha_3, \alpha_4$ 和 α_5 表示拉格朗日乘子，构建拉格朗日函数

由式(21b)可知，若 $\sum_{k=1}^{K_R} R_{R,k} \geq \sum_{i=1}^{K_T} R_{T,i} + \sum_{o=1}^{K_C} R_{C,o}$ ，则最优的时间分配为 $\lambda_T = \lambda_T^{\min}$, $\lambda_R = 1 - \lambda_T^{\min}$ ；若 $\sum_{k=1}^{K_R} R_{R,k} < \sum_{i=1}^{K_T} R_{T,i} + \sum_{o=1}^{K_C} R_{C,o}$ ，则最优的时间分配为 $\lambda_R = \lambda_R^{\min}$, $\lambda_T = 1 - \lambda_R^{\min}$ 。

4.4 优化问题的求解

本节交替优化功率分配和时间分配，具体步骤如下。

步骤1 初始化 $\lambda_R^{(0)}$ 和 $\lambda_T^{(0)}$ ，令 $t = 0$ 。

步骤2 令 $t = t + 1$ ，把 $\lambda_R^{(t-1)}$, $\lambda_T^{(t-1)}$ 和双STAR-RIS相移代入式(18)中，求解该优化问题得到 $\mathbf{P}^{(t)}$ 。

步骤3 把 $\mathbf{P}^{(t)}$ 代入式(21)中，求解该优化问题得到 $\lambda_R^{(t)}$ 和 $\lambda_T^{(t)}$ 。

步骤4 把 $\lambda_R^{(t)}$, $\lambda_T^{(t)}$, $\mathbf{P}^{(t)}$ 和双STAR-RIS相移代入式(11)中，得到优化目标函数的值。

步骤5 重复步骤2—步骤4，直到目标函数收敛或 t 达到预先设置的最大值。

其中，双STAR-RIS相移由4.1节求得， t 表示算法迭代的次数， $\lambda_R^{(t)}$ 中的上标表示第 t 次迭代。

在求解和速率时，由于系统的吞吐量是有上限的，随着迭代次数的增加，和速率增加或保持不变，因此所提方案算法收敛。所提方案对双STAR-RIS相移、用户功率和时间分配进行了求解，计算复杂度为 $O(2N^{3.5} + Klt)$ 。

5 仿真结果分析

本节对所提方案的和速率进行了仿真实验，假定所有信道服从莱斯分布，例如

$$\begin{aligned}
\mathbf{f}_1 &= d_1^{-\zeta_1/2} \left(\sqrt{K_1 / (K_1 + 1)} \mathbf{f}_1^{\text{LOS}} \right. \\
&\quad \left. + \sqrt{1 / (K_1 + 1)} \mathbf{f}_1^{\text{NLOS}} \right), \quad (23)
\end{aligned}$$

其中, f_1 表示BS到STAR-RIS₁的信道, d_1 和 ζ_1 分别为BS到STAR-RIS₁的距离和路径损耗指数, K_1 为莱斯因子, f_1^{LOS} 和 f_1^{NLOS} 分别为可视路距和非可视路距。仿真参数设置如表1所示。

目前, 尚未查到该模型中最大化和速率的文献, 所以本节只仿真了所提方案、平均时间分配方案、随机相移方案和OMA系统方案, 并与文献[13]的方案对比。在所提方案参数设置的基础上, 平均时间分配方案另设置 $\lambda_T = \lambda_R = 0.5$; 随机相移方案另设置双STAR-RIS的相移矩阵随机生成; OMA系统方案另设置系统模型为OMA系统。

图2给出了所提方案和随机相移方案的迭代次数与和速率的关系, 从中可以看出所提方案收敛速度快, 说明算法具有很好的收敛性。

图3给出了双STAR-RIS反射元素数量改变时系统的和速率, 其中 $P_{\max} = 22$ dBm。从中能看出, 随着双STAR-RIS元素数量的增加, 系统的和速率呈增长趋势。这是因为, 随着STAR-RIS元素数量的增加, 给系统带来了更多的自由度, 能够获得更优的资源分配效率, 进而提升了系统的性能。从中还能看出, 同等条件下, 所提方案的和速率优于OMA系统方案, 这是因为NOMA系统可同时连

表 1 仿真参数

参数	数值
BS与STAR-RIS ₁ 路径损耗指数	2
BS与STAR-RIS ₂ 路径损耗指数	2
STAR-RIS ₁ 与用户T/R路径损耗指数	2
STAR-RIS ₂ 与用户C/R路径损耗指数	2
莱斯因子(dB)	5
用户R、用户T、用户C数目	2,2,2
BS与两个STAR-RIS距离(m)	50,50
STAR-RIS ₁ 与用户T/R距离(m)	10
STAR-RIS ₂ 与用户C/R距离(m)	10
噪声功率 σ^2 (dBm)	-99
R_{\min} (bit/(s·Hz))	0.1

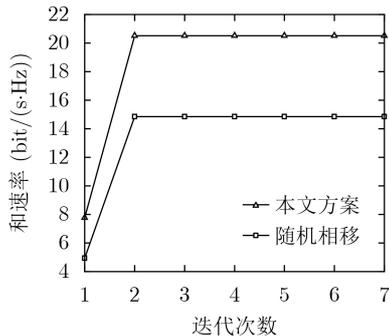


图 2 迭代次数图

接多个用户, 能获得高于OMA系统的性能增益。此外, 所提方案的和速率高于平均时间分配方案和随机相移方案, 这是因为所提方案同时优化了STAR-RIS相移和时间分配, 相较于另外两种方案具有更优的参数。另外, 时间分配对系统的和速率影响较小, STAR-RIS相移对系统的和速率影响较大。

图4给出了最大发送功率 P_{\max} 改变时4种方案的和速率, 其中 $N=32$ 。从图中能看出, 随着 P_{\max} 的增大, 4种方案的和速率也随之增加。这是因为随着基站发送功率 P_{\max} 的增大, 分配给用户的功率增加, 系统的和速率也随之增大。

通过与文献[13]的方案对比, 文献[13]的和速率明显低于所提方案, 这是因为所提方案有两个STAR-RIS辅助通信, 而文献[13]只有1个STAR-RIS辅助通信, 引入多个STAR-RIS可以进一步增加系统的容量和频谱效率, 但是相应的计算量也随之增加。单STAR-RIS的相移求解复杂度为 $O(N^{3.5})$, 而双STAR-RIS的相移求解复杂度为 $O(2N^{3.5})$ 。

6 结束语

本文提出了双STAR-RIS辅助的下行NOMA系

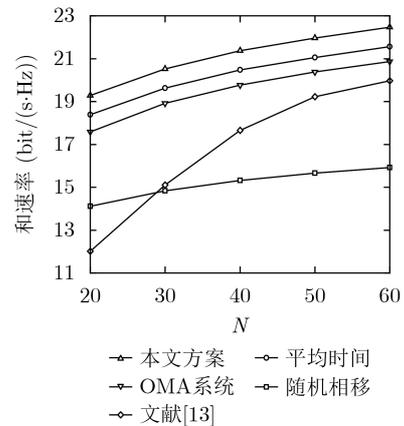


图 3 双STAR-RIS反射元素数量改变时系统的和速率

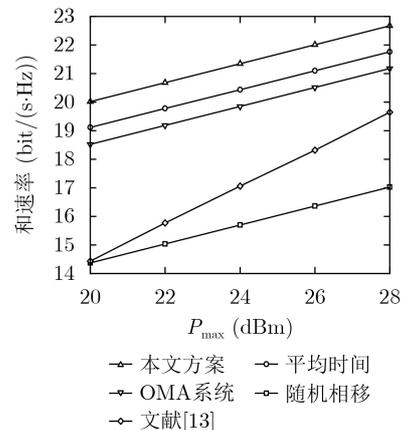


图 4 发射功率 P_{\max} 改变时系统的和速率

统中最大化和速率的方法，首先构建最大化和速率的优化问题，然后优化双STAR-RIS的相移，最后用迭代的方法交替功率分配和时间分配。仿真结果显示，双STAR-RIS辅助的NOMA系统的和速率高于单STAR-RIS辅助的NOMA系统，并且在时间切换协议中时间分配对系统的和速率影响较小，STAR-RIS相移对系统的和速率影响较大。然而，所提方案的双STAR-RIS采用时间切换协议，如何在其他协议下最大化系统的和速率有待于研究。

参考文献

- [1] GAN Xu, ZHONG Caijun, HUANG Chongwen, *et al.* Multiple RISs assisted cell-free networks with two-timescale CSI: Performance analysis and system design[J]. *IEEE Transactions on Communications*, 2022, 70(11): 7696–7710. doi: [10.1109/TCOMM.2022.3208629](https://doi.org/10.1109/TCOMM.2022.3208629).
- [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. doi: [10.3979/j.issn.1673-825X.202110130355](https://doi.org/10.3979/j.issn.1673-825X.202110130355).
ZHANG Cheng and 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. doi: [10.3979/j.issn.1673-825X.202110130355](https://doi.org/10.3979/j.issn.1673-825X.202110130355).
- [3] LIU Yuanwei, LIU Xiao, MU Xidong, *et al.* Reconfigurable intelligent surfaces: Principles and opportunities[J]. *IEEE Communications Surveys & Tutorials*, 2021, 23(3): 1546–1577. doi: [10.1109/COMST.2021.3077737](https://doi.org/10.1109/COMST.2021.3077737).
- [4] XIE Zhen, LI Xingwang, ZENG Ming, *et al.* Resource allocation for double IRSs assisted wireless powered NOMA networks[J]. *IEEE Wireless Communications*, 2023, 12(5): 823–827. doi: [10.1109/LWC.2023.3244997](https://doi.org/10.1109/LWC.2023.3244997).
- [5] WANG Peiyu, WANG Hong, MA Haochun, *et al.* Sum rate maximization for STAR-RIS aided NOMA system with two-way communication[J]. *IEEE Communications Letters*, 2023, 27(10): 2857–2861. doi: [10.1109/LCOMM.2023.3306557](https://doi.org/10.1109/LCOMM.2023.3306557).
- [6] WANG Kaijie, ZHOU Ting, XU Tianheng, *et al.* Asymmetric adaptive modulation for uplink NOMA systems[J]. *IEEE Transactions on Communications*, 2021, 69(11): 7222–7235. doi: [10.1109/TCOMM.2021.3102152](https://doi.org/10.1109/TCOMM.2021.3102152).
- [7] ZUO Jiakuo, LIU Yuanwei, DING Zhiguo, *et al.* Uplink NOMA for STAR-RIS networks[EB/OL]. <https://doi.org/10.48550/arXiv.2110.05686>, 2021.
- [8] FU Shen, WANG Hong, ZHAO Haitao, *et al.* On STAR-RIS-aided NOMA with multi-group detection[J]. *IEEE Wireless Communications Letters*, 2023, 12(11): 1971–1975. doi: [10.1109/LWC.2023.3303414](https://doi.org/10.1109/LWC.2023.3303414).
- [9] WANG Peiyu, WANG Hong, and FU Yibo. Average rate maximization for mobile STAR-RIS-aided NOMA system[J]. *IEEE Communications Letters*, 2023, 27(5): 1362–1366. doi: [10.1109/LCOMM.2023.3261442](https://doi.org/10.1109/LCOMM.2023.3261442).
- [10] 王培宇, 王鸿, 马昊淳. 多通道STAR-RIS辅助的NOMA系统用户分组方案研究[J]. 南京邮电大学学报(自然科学版), 2022, 42(5): 47–53. doi: [10.14132/j.cnki.1673-5439.2022.05.007](https://doi.org/10.14132/j.cnki.1673-5439.2022.05.007).
WANG Peiyu, WANG Hong, and MA Haochun. On user grouping for multi-carrier STAR-RIS-aided NOMA systems[J]. *Journal of Nanjing University of Posts and Telecommunications (Natural Science)*, 2022, 42(5): 47–53. doi: [10.14132/j.cnki.1673-5439.2022.05.007](https://doi.org/10.14132/j.cnki.1673-5439.2022.05.007).
- [11] FANG Fang, WU Bibo, FU Shu, *et al.* Energy-efficient design of STAR-RIS Aided MIMO-NOMA networks[J]. *IEEE Transactions on Communications*, 2023, 71(1): 498–511. doi: [10.1109/TCOMM.2022.3223706](https://doi.org/10.1109/TCOMM.2022.3223706).
- [12] GUO Yi, FANG Fang, CAI Donghong, *et al.* Energy-efficient design for a NOMA assisted STAR-RIS network with deep reinforcement learning[J]. *IEEE Transactions on Vehicular Technology*, 2023, 72(4): 5424–5428. doi: [10.1109/TVT.2022.3224926](https://doi.org/10.1109/TVT.2022.3224926).
- [13] WU Chenyu, MU Xidong, LIU Yuanwei, *et al.* Resource allocation in STAR-RIS-aided networks: OMA and NOMA[J]. *IEEE Transactions on Wireless Communications*, 2022, 21(9): 7653–7667. doi: [10.1109/TWC.2022.3160151](https://doi.org/10.1109/TWC.2022.3160151).
- [14] ZUO Jiakuo, LIU Yuanwei, DING Zhiguo, *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. doi: [10.1109/TWC.2022.3197079](https://doi.org/10.1109/TWC.2022.3197079).
- [15] GRANT M and BOYD S P. CVX: MATLAB software for disciplined convex programming[EB/OL]. https://www.researchgate.net/publication/229058225_CVX_MATLAB_software_for_disciplined_convex_programming, 2014.

田心记：女，副教授，研究方向为新一代宽带移动通信系统的新理论及技术。

孟浩然：男，硕士生，研究方向为新一代无线通信技术。

李兴旺：男，副教授，研究方向为新一代宽带移动通信系统的新理论及技术。

张辉：男，教授，研究方向为智能信息开采、矿井通信。

责任编辑：余蓉