

doi:10.14132/j.cnki.1673-5439.2022.05.007

多通道 STAR-IRS 辅助的 NOMA 系统用户分组方案研究

王培宇,王 鸿,马昊淳

(南京邮电大学 通信与信息工程学院,江苏 南京 210003)

摘要:同时透射和反射的智能反射面(Simultaneously Transmitting and Reflecting Intelligent Reflecting Surface, STAR-IRS)被视为第六代移动通信的革新性技术。文中研究了 STAR-IRS 辅助的上行非正交多址接入(Non-Orthogonal Multiple Access, NOMA)系统中用户与子信道配对问题,通过对用户合理分组与相移矩阵优化使得系统和速率最大。首先,根据系统和速率表达式,提出了一种低复杂度的用户分组方案,通过最大化级联信道增益,解决用户初始分组和解码顺序问题;其次,在满足每个用户传输速率的约束下,为了进一步提升系统和速率,交替优化相移矩阵和分组方案。仿真结果表明,与其他基准方案相比,文中提出的用户与子信道配对方案可以有效提高系统的和速率性能。

关键词:智能反射面;非正交多址;资源分配;同时透射和反射

中图分类号:TN929.5 **文献标志码:**A **文章编号:**1673-5439(2022)05-0047-07

On user grouping for multi-carrier STAR-IRS-aided NOMA systems

WANG Peiyu, WANG Hong, MA Haochun

(School of Communications and Information Engineering, Nanjing University of Posts and Telecommunications, Nanjing 210003, China)

Abstract: Simultaneously transmitting and reflecting intelligent reflecting surface (STAR-IRS) is regarded as a revolutionary technology for the sixth generation (6G) mobile communication networks. This paper investigates the pairing scheme between the channels and the users for uplink transmission of STAR-IRS aided non-orthogonal multiple access (NOMA) systems. The system sum-rate is maximized by carefully designing user grouping and optimizing the phase shift matrix of STAR-IRS. First, based on the expression of the system sum-rate, a user grouping scheme is proposed with low complexity. Further, by maximizing the sum of the combined channel gains, the initial grouping scheme of users and the decoding order are developed. Second, in order to improve the sum-rate under the constraint of each user's transmission rate, an alternating method is developed to optimize the phase shift matrix of STAR-IRS and the user grouping scheme. Simulation results show that compared with various benchmarks, the proposed user and sub-channel pairing scheme is capable of enhancing the sum-rate of STAR-IRS assisted NOMA system.

Keywords: intelligent reflecting surface; non-orthogonal multiple access (NOMA); resource allocation; simultaneously transmitting and reflecting (STAR)

智能反射面(Intelligent Reflecting Surface, IRS)因其可以主动改变无线传播环境而受到广泛的关注,并被认为是第六代移动通信中一种有前途的技

术^[1]。IRS 由大量无源反射单元构成,通过反射单元对入射信号相移与幅度的调整可改变信号的传播方向,从而满足不同无线通信系统的需求。在传统

收稿日期:2022-05-16;修回日期:2022-07-04 本刊网址: <http://nyzr.njupt.edu.cn>

基金项目:国家自然科学基金(62171237)资助项目

作者简介:王培宇,男,硕士研究生;王鸿(通信作者),男,博士,副教授, wanghong@njupt.edu.cn

引用本文:王培宇,王鸿,马昊淳.多通道 STAR-IRS 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.

无线通信中,信道被视为一种影响信号传输的不利因素,IRS 则打破这一传统思维,通过主动改变信道来实现提升系统性能的目的^[2]。IRS 还可和其他新兴技术有效融合,比如大规模天线^[3]、无线携能通信^[4]、非正交多址接入^[5]。

但由于传统 IRS 只具备单一的透射或者反射功能,对用户的位置分布有很多的约束,于是一种新的 IRS 技术被提出,也就是同时透射和反射的智能反射面 (Simultaneously Transmitting and Reflecting Intelligent Reflecting Surface, STAR-IRS)。相较于传统 IRS 只能进行半平面覆盖,STAR-IRS 可利用反射与透射功能同时服务 IRS 两侧用户,实现了全空间 360°覆盖。因此,STAR-IRS 对信号的传输方面有着更高的自由度。目前 STAR-IRS 可以分为 3 类,分别为能量分割 (Energy Splitting, ES)、时间切换 (Time Switching, TS) 和模式切换 (Mode Switching, MS),目前研究集中于 ES 模式的 STAR-IRS^[6]。

由于 STAR-IRS 具有改变级联信道状态信息的特性,因此 STAR-IRS 反射单元参数的设计直接关系到聚合信道的质量。目前,关于 STAR-IRS 的研究刚刚兴起,文献[7]将求解相移矩阵中的秩 1 约束问题转变为矩阵的迹与其 2 范数差的形式,将原问题转变为差分问题,并提出了一种凸差分算法,交替优化求解波束成形向量和相移矩阵。文献[8]对实际情况下相移参数无法连续取值问题进行了研究,为了降低穷举法获得最优离散相移的复杂度,研究者们先通过求得连续相移的最优解,再在离散相移中寻找与最优相移角度最接近的离散相移值作为问题的次优解。对于离散相位优化问题,文献[9]采用序列旋转算法依次求解各个相位偏移的最优值。

非正交多址接入 (Non-Orthogonal Multiple Access, NOMA) 和 STAR-IRS 的融合不仅可以改变用户信道增益的差异性,还可以利用增加的自由度对无线资源进行合理分配,以此提高系统的性能。但是 NOMA 与 STAR-IRS 的结合也带来了许多新的挑战,因为 NOMA 系统中较为关键的问题是确定信号的解码顺序,而解码顺序往往由 STAR-IRS 相关的级联信道增益决定,这就需要合理设计 STAR-IRS 的参数才能满足多样化的系统需求。文献[10]研究了 NOMA 上行系统的和速率与解码次序的关系,提出了一种基于半正定规划 (Semidefinite Relaxation, SDR) 算法求解相移优化问题的次优解,其中秩 1 约束通过最大特征值所对应的特征向量得

到。文献[11]通过求解每个用户的最大信道增益来确定解码顺序,并对目标函数进行转化后使用一维搜索的方式进行求解。文献[12]提出了一种多信道 IRS 辅助 NOMA 的框架,分别使用 SDR 和逐次凸逼近 (Successive Convex Approximation, SCA) 优化功率分配和相移矩阵,以达到系统最大的和速率,其中解码顺序是以最大化所有用户的信道增益总和为依据来确定。在满足用户差异化服务质量的约束条件下,文献[13]推导了用户所需发射功率与 IRS 相移之间的关系,并进一步将功率最小化问题转化为 Max-Min 问题进行求解。文献[14]对 STAR-IRS 辅助的多输入单输出系统进行了研究,交替优化波束成形向量和 STAR-IRS 相移,其中通过引入松弛变量求解波束成形向量优化问题,并将非凸问题转变为凸问题求得系统的最大能量利用率。文献[15]研究了 STAR-IRS 辅助的 NOMA 通信系统,其解码顺序是在给定相移矩阵的前提下,对级联信道增益大小进行排序来确定。对于优化问题的非凸约束,通过将分子与分母分离,并利用一阶泰勒展开将其转变为凸问题进行求解。文献[16]提出了一个允许多个用户被分配到同一信道上的多信道下行 IRS-NOMA 框架,在接收端进行串行干扰消除 (Successive Interference Cancellation, SIC),交替优化相移矩阵和功率分配系数。文献[17]对于 STAR-IRS 辅助的下行 NOMA 多信道分配问题,提出了一种 2 对 1 的匹配理论算法,可以合理对子信道和用户进行分配,以此提高系统的和速率性能。

综上所述,对于 NOMA 与 STAR-IRS 结合的研究仍有一定的局限性。目前的研究主要集中在通过对 STAR-IRS 参数和 BS 处的波束成形向量进行联合优化,以提升系统和速率、能效、功率等方面的性能。但已有文献对 NOMA 系统中用户分组问题的研究仍存在不足,鉴于此,本文针对 STAR-IRS 辅助的 NOMA 上行系统子信道分配问题进行了深入研究。本文的创新之处在于:从更加切合实际的角度出发,通过最大化所有用户的信道增益,提出了一种利用信道增益差异的用户组合方式。此外,通过组内信道增益的比较确定解码顺序,并在满足用户最低速率的要求下,进一步通过对 STAR-IRS 相移参数的优化,改善分组方案以达到最大化系统和速率的目标。仿真结果表明,相较于其他基准方案,本文提出的分组方案可以有效提高系统的和速率性能,且随着用户数量的增加系统性能提升更加明显。

1 系统模型

如图1所示,本文考虑 STAR-IRS 辅助 NOMA 的上行系统,其由1个单天线基站、1个有 M 个无源器件的 STAR-IRS 和 K 个单天线用户组成。系统整体带宽为 W , 被分为 I 个子信道, 每个子信道最多只能供两个用户使用, 每个用户最多只能占用1个子信道, 即 $K = 2I$ 。用户随机分布在距离 STAR-IRS 为 L 的圆形区域内, 由于用户和基站之间的传播链路存在障碍物的遮挡, 用户和基站只能通过 STAR-IRS 传输信号。为了便于区分不同区域内的用户, 将 STAR-IRS 两侧定义为透射区域和反射区域, 透射区域内的用户称为 T 用户, 反射区域内的用户称为 R 用户。

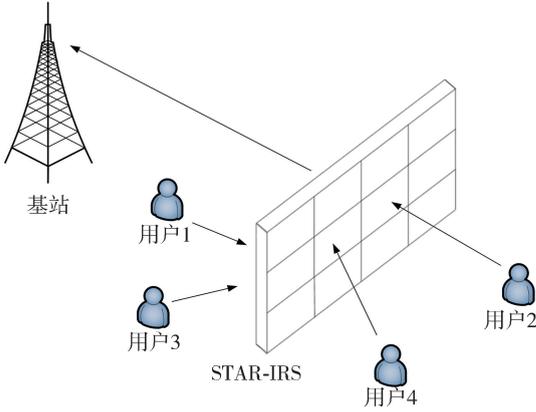


图1 系统模型

NOMA 系统中同一组用户采用同一频段同时向基站发射信号, 因此基站处所接收的信号可以表示为

$$y = \sum_{i=1}^I \sum_{k=1}^2 \mathbf{h}_{IB}^H \boldsymbol{\theta}_k \mathbf{h}_{UI,k} \sqrt{P} s_k + n \quad (1)$$

式中, $\mathbf{h}_{IB} \in \mathbb{C}$ 表示 STAR-IRS 与基站之间的信道系数, $\mathbf{h}_{UI,k} \in \mathbb{C}$ 表示第 k 个用户与 STAR-IRS 之间的信道系数, P 表示用户的发射功率。假设基站最大接收功率为 P_{\max} , 每个用户的发射功率相等, 即 $P = P_{\max}/K$ 。 n 表示服从均值为 0, 方差为 σ^2 的加性高斯白噪声。相位偏移矩阵满足以下关系:

$$\boldsymbol{\theta}_t = \text{diag}(\sqrt{\beta'_1} e^{j\varphi'_1}, \sqrt{\beta'_2} e^{j\varphi'_2}, \dots, \sqrt{\beta'_N} e^{j\varphi'_N}) \quad (2)$$

$$\boldsymbol{\theta}_r = \text{diag}(\sqrt{\beta''_1} e^{j\varphi''_1}, \sqrt{\beta''_2} e^{j\varphi''_2}, \dots, \sqrt{\beta''_N} e^{j\varphi''_N}) \quad (3)$$

式中, $\boldsymbol{\theta}_t, \boldsymbol{\theta}_r$ 分别表示 STAR-IRS 的透射面相移矩阵和反射面相移矩阵, $\beta'_n, \beta''_n \in [0, 1]$ 分别表示

STAR-IRS 的第 n 个单元的透射系数和反射系数。由于需要满足能量守恒定律, 透射系数和反射系数还需要满足 $\beta'_n + \beta''_n = 1, \varphi'_n, \varphi''_n \in [0, 2\pi)$ 分别表示 STAR-IRS 透射面和反射面的第 n 个单元相移。

路径损耗模型为 $L(d) = d^{-\alpha/2}$, d 表示链路的传播距离, α 表示路径损耗指数。由于 STAR-IRS 可以人工选址摆放, 用户与 STAR-IRS、STAR-IRS 与基站之间信道服从莱斯分布, 信道模型分别建立如下。

$$\mathbf{h}_{IB} = L(d_{IB}) \left(\sqrt{\frac{K}{K+1}} \mathbf{h}_{IB}^{\text{LOS}} + \sqrt{\frac{1}{K+1}} \mathbf{h}_{IB}^{\text{NLOS}} \right) \quad (4)$$

$$\mathbf{h}_{UI,k} = L(d_{UI,k}) \left(\sqrt{\frac{K}{K+1}} \mathbf{h}_{UI,k}^{\text{LOS}} + \sqrt{\frac{1}{K+1}} \mathbf{h}_{UI,k}^{\text{NLOS}} \right) \quad (5)$$

式中, $d_{IB}, d_{UI,k}$ 分别表示 STAR-IRS 到基站的距离, 第 k 个用户到 STAR-IRS 的距离。 K 表示莱斯因子, $\mathbf{h}_{IB}^{\text{LOS}}$ 和 $\mathbf{h}_{UI,k}^{\text{LOS}}$ 分别表示 STAR-IRS 到基站和第 k 个用户到 STAR-IRS 的视距传输 (Line of Sight, LoS) 链路信道信息, $\mathbf{h}_{IB}^{\text{NLOS}}$ 和 $\mathbf{h}_{UI,k}^{\text{NLOS}}$ 表示 STAR-IRS 到基站和第 k 个用户到 STAR-IRS 服从 $\text{CN} \sim (0, \sigma^2)$ 的非视距传输 (Non Line of Sight, NLoS) 链路信道信息。为了便于分组方案、解码顺序、相移矩阵的设计, 本文假设所有信道状态信息都是已知的。

根据系统模型, 考虑 NOMA 上行系统的组内解码顺序对系统和速率的影响, 假定同一子信道内不同用户信道增益之间的关系满足: $|\mathbf{h}_{IB}^H \boldsymbol{\theta}_{i,2} \mathbf{h}_{i,2}|^2 > |\mathbf{h}_{IB}^H \boldsymbol{\theta}_{i,1} \mathbf{h}_{i,1}|^2$, 则同一子信道下不同用户的速率可以表示为

$$R_{i,1} = \log_2 \left(1 + \frac{|\mathbf{h}_{IB}^H \boldsymbol{\theta}_{i,1} \mathbf{h}_{i,1}|^2 P}{\sigma^2} \right) \quad (6)$$

$$R_{i,2} = \log_2 \left(1 + \frac{|\mathbf{h}_{IB}^H \boldsymbol{\theta}_{i,2} \mathbf{h}_{i,2}|^2 P}{|\mathbf{h}_{IB}^H \boldsymbol{\theta}_{i,1} \mathbf{h}_{i,1}|^2 P + \sigma^2} \right) \quad (7)$$

由此可得, 某一子信道下所有用户的速率总和可以表示为

$$R_i = \log_2 \left(\frac{|\mathbf{h}_{IB}^H \boldsymbol{\theta}_{i,1} \mathbf{h}_{i,1}|^2 P + |\mathbf{h}_{IB}^H \boldsymbol{\theta}_{i,2} \mathbf{h}_{i,2}|^2 P + \sigma^2}{\sigma^2} \right) \quad (8)$$

从而, 系统的和速率可以表示为

$$R = \sum_{i=1}^I R_i = \sum_{i=1}^I \log_2 \left(\frac{|\mathbf{h}_{IB}^H \boldsymbol{\theta}_{i,1} \mathbf{h}_{i,1}|^2 P + |\mathbf{h}_{IB}^H \boldsymbol{\theta}_{i,2} \mathbf{h}_{i,2}|^2 P + \sigma^2}{\sigma^2} \right) \quad (9)$$

2 问题表述及其解决方法

为了提高系统的和速率性能,本节首先通过解决级联信道增益的最大化问题,将获得的不同用户信道增益用于推导 NOMA 系统的用户分组方案,并在完成用户分组的基础上,对 STAR-IRS 的相移进行优化,再次调整用户的分组方式以最大化系统和速率。

优化问题可以表示为

$$\max_{\theta} \sum_{i=1}^I R_i \quad (10)$$

$$\text{s.t. } R_k \geq \gamma_k \quad (11)$$

$$\varphi_n^t, \varphi_n^r \in [0, 2\pi) \quad (12)$$

$$\beta_n^t, \beta_n^r \in [0, 1] \quad (13)$$

$$\beta_n^t + \beta_n^r = 1 \quad (14)$$

其中,式(11)表示每个用户的最低速率要求,式(12)表示 STAR-IRS 相移约束,式(13)、式(14)表示 STAR-IRS 透射系数和反射系数的约束。

2.1 用户分组方案设计

通过观察系统和速率表达式(9),可以发现,和速率与组内用户的信道增益之和、不同组的速率之积有关。由此获得启发,将系统和速率可以近似表示为

$$\max \prod_{i=1}^I (|\mathbf{h}_{IB}^H \boldsymbol{\theta}_{i,1} \mathbf{h}_{i,1}|^2 + |\mathbf{h}_{IB}^H \boldsymbol{\theta}_{i,2} \mathbf{h}_{i,2}|^2) \quad (15)$$

通过表达式的结构可以看出,系统和速率与每个用户的信道增益有关。为了最大化式(15)的结果,提出一种将信道增益最大的用户与信道增益最小的用户分配到同一个子信道的用户分组方案,由此,充分发挥 NOMA 在信道增益差较大时的优势。具体过程如下:首先计算每个用户的信道增益并进行排序,假设第 k 个用户的信道增益为 $|\mathbf{h}_{IB}^H \boldsymbol{\theta}_k \mathbf{h}_k|^2 = G_k$ 。不失一般性,所有用户信道增益大小关系为

$$G = \{G_k \mid G_1 > G_2 > \dots > G_K\} \quad (16)$$

从 G 分别选取最大值和最小值作为同一组,并将已选择的用户剔除,直到 G 内不再含有信道增益数值,由此可以获得最终的分组方案为

$$(G_1 + G_K)(G_2 + G_{K-1}) \dots (G_{K/2-1} + G_{K/2}) \quad (17)$$

证明:以 4 个用户分为两组的情况为例,信道增益大小排序为 $G_1 > G_2 > G_3 > G_4$, 最佳组合方式为 $R_1 = (G_1 + G_4)(G_2 + G_3)$, 假设其他随机分组方案为 $R_2 = (G_1 + G_2)(G_3 + G_4)$, 将两式相减得

$$R_1 - R_2 = (G_1 + G_4)(G_2 + G_3) - (G_1 + G_2)(G_3 + G_4) = (G_1 - G_3)(G_2 - G_4) > 0$$

由此可以证明 $R_1 > R_2$ 。

接下来推广到 K 个用户分为 I 组的情况,在满足信道增益大小关系 $G_1 > G_2 > \dots > G_K$ 的条件下,随机分组方案为 $(G_1 + G_2)(G_3 + G_4) \dots (G_{K-1} + G_K)$ 。在保持其他用户分组不变的情况下,根据 4 个用户情况的证明,对比任意两组用户可以得出

$$(G_1 + G_2)(G_3 + G_4) \dots (G_{K-1} + G_K) < (G_1 + G_4)(G_2 + G_3) \dots (G_{K-1} + G_K)$$

以此类推,最终可以获得最佳的组合方案为 $(G_1 + G_K)(G_1 + G_{K-1}) \dots (G_{K/2-1} + G_{K/2})$ 。因此在不符合所提出组合方案的前提下,总能找到一对用户组在其按照所提出用户分组方案交换用户之后,使得最终结果上升,并在多次交换后最终结果达到最大,而此时的组合方式即为提出的方案。(证毕)

(1) 初始相移的确定

为确保各用户信道增益的相关性,初始信道增益通过最大化所有用户的级联信道增益获得,从而求得 STAR-IRS 处相移矩阵,此问题可以表示为

$$\max_{\theta} \sum_{k=1}^K |\mathbf{h}_{IB}^H \boldsymbol{\theta}_k \mathbf{h}_k|^2 \quad (18)$$

$$\text{s.t. } R_k \geq \gamma_k \quad (19)$$

$$\varphi_n^t, \varphi_n^r \in [0, 2\pi) \quad (20)$$

$$\beta_n^t, \beta_n^r \in [0, 1] \quad (21)$$

$$\beta_n^t + \beta_n^r = 1 \quad (22)$$

$$\boldsymbol{\theta}_k \in \{\boldsymbol{\theta}_t, \boldsymbol{\theta}_r\} \quad (23)$$

为了便于求解,将此问题转变为含有秩 1 约束的 SDP 问题后再进行优化,经过变换后的表达式为

$$\max_{V_k} \sum_{k=1}^K \text{Tr}(\mathbf{V}_k \mathbf{H}_k) \quad (24)$$

$$\text{s.t. } \text{diag}(\mathbf{V}_t) + \text{diag}(\mathbf{V}_r) = \mathbf{I}^N \quad (25)$$

$$\text{Tr}(\mathbf{V}_k \mathbf{H}_k) P \geq (2^{\gamma_k} - 1) \sigma^2 \quad (26)$$

$$\mathbf{V}_k \geq 0 \quad (27)$$

$$\text{rank}(\mathbf{V}_k) = 1 \quad (28)$$

式中, $\mathbf{h}_k = \text{diag}(\mathbf{h}_{IB}^H) \mathbf{h}_k$, $\mathbf{V}_k = \boldsymbol{\theta}_k \boldsymbol{\theta}_k^H$, $\mathbf{H} = \mathbf{h}_k \mathbf{h}_k^H$, 式(25)与原问题中的式(21)和(22)是等价的, \mathbf{I}^N 是一个所有单元全为 1 的 N 维列向量。将式(28)移除后,原问题已经转变为一个 SDP 问题,可以通过使用 MATLAB 工具包 CVX 进行求解。对于式(28)的秩 1 约束问题,根据文献[10],分别将透射面相移和反射面相移近似为 $\mathbf{v}_l^* = \sqrt{\lambda_l} \mathbf{q}_l$, $l \in \{t, r\}$, 其中 λ_l 和 \mathbf{q}_l 分别代表 \mathbf{V}_l^* 最大特征值和其对应的特

征向量。为了满足式(25),对 \mathbf{v}_l^* 进行归一化处理
后获得最终结果 \mathbf{v}_l^{**} , 具体求解过程如下

$$\text{real}(\mathbf{v}_l^{**}) = \text{real}(\mathbf{v}_l^*)/v_{\text{real}} \quad (29)$$

$$\text{imag}(\mathbf{v}_l^{**}) = \text{imag}(\mathbf{v}_l^*)/v_{\text{imag}} \quad (30)$$

$$\mathbf{v}_l^{**} = \text{real}(\mathbf{v}_l^{**}) + \text{imag}(\mathbf{v}_l^{**}) \quad (31)$$

$$v_{\text{real}} = \sqrt{(\text{real}(\mathbf{v}_l))^2 + (\text{real}(\mathbf{v}_r))^2} / \sqrt{2} \quad (32)$$

$$v_{\text{imag}} = \sqrt{(\text{imag}(\mathbf{v}_l))^2 + (\text{imag}(\mathbf{v}_r))^2} / \sqrt{2} \quad (33)$$

式中, $\text{real}(\ast)$ 表示取 \ast 的实部, $\text{imag}(\ast)$ 表示取 \ast 的虚部。

(2) 分组方案的确定

在解决了问题式(18)之后,将获得的 STAR-IRS 相移变量,通过与信道信息的计算即可获得不同用户的级联信道增益,即 $|\mathbf{h}_{IB}^H \boldsymbol{\theta}_k \mathbf{h}_k|^2 = G_k$, 并根据式(17)的用户分组方案进行分组。

(3) 组内解码顺序

本文考虑了用户的最低速率要求,而组内用户的速率表达式由于解码顺序的不同也会存在差异。用户分组方案是由级联信道增益大小确定的,因此在已经获得的信道增益的基础上,可以给出组内解码顺序。由式(17)的分组方案可以确定用户速率表达式为

$$R_{k1} = \log_2 \left(1 + \frac{G_{k1}P}{G_{k2}P + \sigma^2} \right) \quad G_{k1} > G_{k2} \quad (34)$$

$$R_{k2} = \log_2 \left(1 + \frac{G_{k2}P}{\sigma^2} \right) \quad G_{k1} > G_{k2} \quad (35)$$

2.2 STAR-IRS 相移的优化及分组方案的调整

当用户分组完成时,在满足各个用户最低传输速率需求的约束下,本文要解决的优化问题简化为

$$\max_{\boldsymbol{\theta}} \sum_{i=1}^I \log_2 \left(\frac{|\mathbf{h}_{IB}^H \boldsymbol{\theta}_{i,1} \mathbf{h}_{i,1}|^2 P + |\mathbf{h}_{IB}^H \boldsymbol{\theta}_{i,2} \mathbf{h}_{i,2}|^2 P + \sigma^2}{\sigma^2} \right) \quad (36)$$

$$\text{s.t. } R_{i,2} = \log_2 \left(1 + \frac{|\mathbf{h}_{IB}^H \boldsymbol{\theta}_{i,2} \mathbf{h}_{i,2}|^2 P}{|\mathbf{h}_{IB}^H \boldsymbol{\theta}_{i,1} \mathbf{h}_{i,1}|^2 P + \sigma^2} \right) \geq \gamma_k \quad (37)$$

$$R_{i,1} = \log_2 \left(1 + \frac{|\mathbf{h}_{IB}^H \boldsymbol{\theta}_{i,1} \mathbf{h}_{i,1}|^2 P}{\sigma^2} \right) \geq \gamma_k \quad (38)$$

$$|\mathbf{h}_{IB}^H \boldsymbol{\theta}_{i,2} \mathbf{h}_{i,2}|^2 > |\mathbf{h}_{IB}^H \boldsymbol{\theta}_{i,1} \mathbf{h}_{i,1}|^2 \quad (39)$$

式(12) ~ (14)

其中,式(37)、式(38)为用户需要满足的最低速率要求,式(39)为组内用户的信道增益大小关系,以此来确定解码顺序。为了便于后续数据的处理,引

入辅助变量,将原问题转换为

$$\max_{\xi, \mathbf{V}} \sum_{i=1}^I \log_2 \left(\frac{\xi_i}{\sigma^2} \right) \quad (40)$$

$$\text{s.t. } \text{Tr}(\mathbf{V}_{i,1} \mathbf{H}_{i,1}) P + \text{Tr}(\mathbf{V}_{i,2} \mathbf{H}_{i,2}) P + \sigma^2 \geq \xi_i \quad (41)$$

$$\text{Tr}(\mathbf{V}_{i,1} \mathbf{H}_{i,1}) P \geq (2^{\gamma_{i,1}} - 1) \sigma^2 \quad (42)$$

$$\text{Tr}(\mathbf{V}_{i,2} \mathbf{H}_{i,2}) P \geq (2^{\gamma_{i,2}} - 1) (\text{Tr}(\mathbf{V}_{i,1} \mathbf{H}_{i,1}) P + \sigma^2) \quad (43)$$

$$\text{Tr}(\mathbf{V}_{i,2} \mathbf{H}_{i,2}) \geq \text{Tr}(\mathbf{V}_{i,1} \mathbf{H}_{i,1}) \quad (44)$$

$$\text{diag}(\mathbf{V}_i) + \text{diag}(\mathbf{V}_r) = \mathbf{I}^N \quad (45)$$

$$\mathbf{V}_k \geq 0 \quad (46)$$

$$\text{rank}(\mathbf{V}_k) = 1 \quad (47)$$

其中,式(46)确保相移矩阵为半正定。对于式(47)秩1约束问题,前文已经进行了描述,在此处就不做赘述。上述优化问题可使用 CVX 进行求解。

为了进一步提高系统和速率,对用户分配方案和 STAR-IRS 相移优化进行迭代,具体过程如下:

设此时系统和速率为 R_t , 根据问题式(36)优化所得的 STAR-IRS 相移,再次计算信道增益并按照式(17)对用户进行重新分配,再根据问题式(40)优化 STAR-IRS 相移获得系统和速率 R_{t+1} 。重复上述过程,直到所求得的最优和速率小于上一次所得和速率,即 $R_t \geq R_{t+1}$, 此时 R_t 即为最终结果。由于系统和速率为单调递增且存在上界,因此,提出算法可以保证目标函数值的收敛性。图2展示了所提出算法的整体流程图。

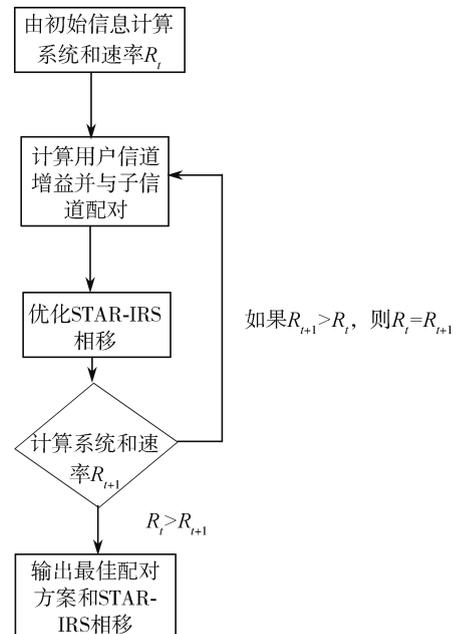


图2 整体迭代优化过程

3 仿真结果及分析

本节将展示所提出算法的性能及其分析,并与以下基准方案进行对比:STAR-IRS 辅助 NOMA 系统用户随机分组方案,STAR-IRS 辅助 NOMA 系统随机相移方案和 STAR-IRS 辅助的 OMA 系统最优传输方案。此外,在已有文献中,对于上行 STAR-IRS 辅助的 NOMA 系统用户与子信道配对问题的研究尚未见报道,因此,本文将文献[17]提出的应用于下行 STAR-IRS 辅助的 NOMA 系统的匹配理论算法也作为一种基准方案。本文仿真参数如表 1 所示。

表 1 仿真参数

参数	数值
STAR-IRS 的基本单元数量	32
基站与 STAR-IRS 的距离/m	50
用户到 STAR-IRS 的距离/m	4~6
噪声功率/dBm	-100
用户数量	[4,8,12,16,20]
用户最低速率要求/($\text{b} \cdot \text{s}^{-1} \cdot \text{Hz}^{-1}$)	0.1
系统最大功率/W	1.5
莱斯因子	4
路径损耗因子	[2,3]

图 3 绘制了在基站最大接收功率为 1.5 W 的前提下,系统和速率与用户数量之间的关系。结果表明,所提出的方案相对于随机分组之间的性能差异随着用户数量的增加而逐渐变大,原因是当用户数较小时,随机分组有一定概率将用户组合成最佳的分组方案,但随着用户数量的增加,这种概率逐渐减小。而 NOMA 系统优于 OMA 系统是因为 NOMA 有着更高的频谱利用率。对 STAR-IRS 相移进行优化的系统明显优于随机相移。相对于随机分组情况,匹配理论分组方案反而下降,这是因为文献[17]所提出的方案适用于 NOMA 下行系统,当在上行系统中使用其所设计的用户与信道配对方案略显不足。而 STAR-IRS 随机相移方案速率大幅度降低的原因,是因为 STAR-IRS 相移矩阵需要优化透射面相移、透射系数、反射面相移、反射面系数 4 个参数,而随机相移由于各个参数的不确定性无法准确控制信号的传输,从而导致性能大幅度降低。

图 4 绘制了 4 个用户、STAR-IRS 单元数为 32 的模型在不同功率的情况下各种方案的和速率大小。从图中可以看出,随着最大功率的提升,本文所提出的方案的性能仍高于其他方案。每个方案之间

的差距基本没有随着功率的变化而变化,结果进一步表明,本文所提出的方案不受功率约束的限制,且更适合多用户的情况。而随机 STAR-IRS 相移方案和速率虽然逐渐增高,但仍和其他对比方案有着巨大差距,结合图 3 可以得到,STAR-IRS 处参数的优化对于系统和速率的提升至关重要。

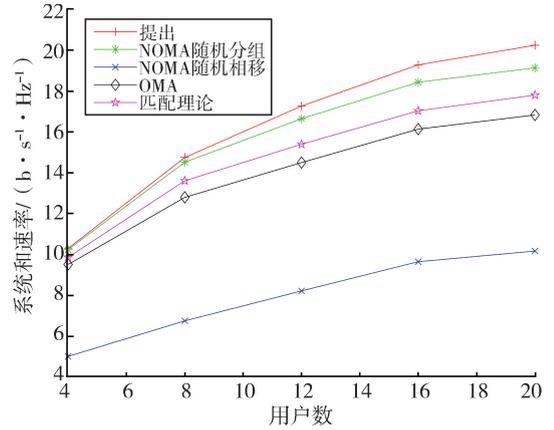


图 3 $N=32, P=1.5 \text{ W}$ 和速率与用户数关系

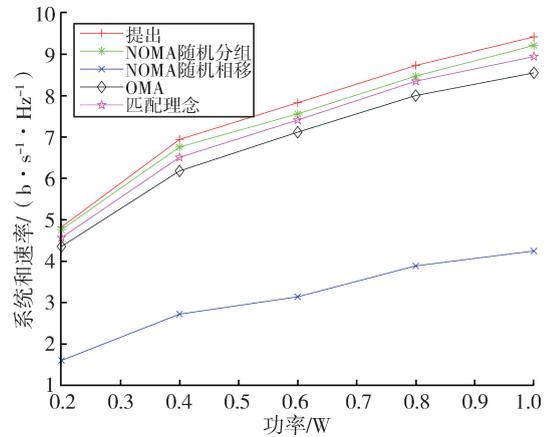


图 4 $N=32, K=4$ 不同功率时的和速率比较

为了更加直观看出所提出的用户组合方案与对比方案之间的差距,图 5 绘制了不同用户组合方案最终和速率的柱状图。

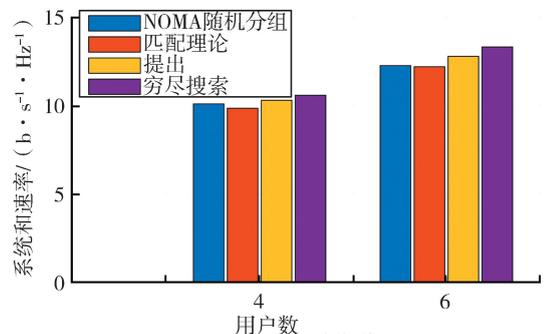


图 5 $N=32, P=1.5 \text{ W}$ 不同方案与穷尽搜索比较

除此之外,将穷举所有用户的组合方式作为系统性能的上界,在用户数为 K 的情况下,穷举法的用户组合共有 $(K-1)!!$ 种方式,为了降低程序复杂度及运算时间,本文只对比了用户数为 4 和 6 的情况。从结果可以看出,本文所提出的用户分组方案有效地缩短了其他基准方案和穷举法之间的差距。

4 结束语

本文以最大化系统和速率为目标,研究了 STAR-IRS 辅助的上行 NOMA 系统子信道分配问题。通过最大化所有用户级联信道增益之和获取 STAR-IRS 相移矩阵,并推导最佳的用户组合方案,同时对于组内解码顺序由级联信道增益确定。最后将原问题转变为一个 SDP 问题,通过 CVX 求解。仿真结果表明,本文提出的用户分组方案相较于其他基准方案,系统和速率有了明显提升,且随着用户数的增多,性能提升增大。

参考文献:

[1] WU Q Q, ZHANG R. Towards smart and reconfigurable environment: intelligent reflecting surface aided wireless network [J]. IEEE Communications Magazine, 2020, 58(1): 106-112.

[2] 姚建文,王楠. 智能反射面:大有前景的 6G 技术[J]. 电信快报, 2020(7): 8-13.
YAO Jianwen, WANG Nan. Intelligent reflecting surface: a promising technique for 6G[J]. Telecommunications Information, 2020(7): 8-13.(in Chinese)

[3] KANG J M, YUN S, KIM I M, et al. MSE-based joint transceiver and passive beamforming designs for intelligent reflecting surface-aided MIMO systems[J]. IEEE Wireless Communications Letters, 2022, 11(3): 622-626.

[4] 孙巍,宋清洋,郭磊. 智能反射表面辅助的无线携能通信网络资源分配算法[J]. 通信学报, 2022, 43(2): 34-43.
SUN Wei, SONG Qingyang, GUO Lei. Resource allocation algorithm for intelligent reflecting surface-aided SWIPT networks[J]. Journal on Communications, 2022, 43(2): 34-43.(in Chinese)

[5] 董园园,巩彩红,李华,等. 面向 6G 的非正交多址接入关键技术[J]. 移动通信, 2020, 44(6): 57-62, 69.
DONG Yuanyuan, GONG Caihong, LI Hua, et al. The key technologies of non-orthogonal multiple access for 6G systems[J]. Mobile Communications, 2020, 44(6): 57-62, 69.(in Chinese)

[6] LIU Y W, MU X D, XU J Q, et al. STAR: simultaneous transmission and reflection for 360° coverage by intelligent surfaces [J]. IEEE Wireless Communications, 2021,

28(6): 102-109.

- [7] FU M, ZHOU Y, SHI Y M. Intelligent reflecting surface for downlink non-orthogonal multiple access networks [C]//IEEE Globecom Workshops. 2019: 1-6.
- [8] 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.
- [9] 王强,王鸿. 智能反射面辅助的下行 NOMA 系统和速率最大化研究[J]. 南京邮电大学学报(自然科学版), 2022(1): 23-29.
WANG Qiang, WANG Hong. On sum rate maximization for IRS-aided downlink NOMA systems[J]. Journal of Nanjing University of Posts and Telecommunications (Natural Science Edition), 2022(1): 23-29.(in Chinese)
- [10] ZENG M, LI X W, LI G, et al. Sum rate maximization for IRS-assisted uplink NOMA[J]. IEEE Communications Letters, 2021, 25(1): 234-238.
- [11] YANG G, XU X, LIANG Y C. Intelligent reflecting surface assisted non-orthogonal multiple access [C]//IEEE Wireless Communications and Networking Conference (WCNC). 2020: 1-6.
- [12] ZUO J K, LIU Y W, QIN Z J, et al. The application of intelligent reflecting surface in downlink NOMA systems [C]//IEEE International Conference on Communications Workshops. 2020: 1-6.
- [13] 马昊淳,王鸿. 智能反射面辅助的上行 NOMA 系统低功耗传输方案研究[J]. 南京邮电大学学报(自然科学版), 2021, 41(5): 30-35.
MA Haochun, WANG Hong. On power minimization for IRS-aided uplink NOMA systems[J]. Journal of Nanjing University of Posts and Telecommunications (Natural Science Edition), 2021, 41(5): 30-35.(in Chinese)
- [14] FANG F, XU Y Q, PHAM Q V, et al. Energy-efficient design of IRS-NOMA networks[J]. IEEE Transactions on Vehicular Technology, 2020, 69(11): 14088-14092.
- [15] ZUO J, LIU Y, DING Z, et al. Simultaneously transmitting and reflecting (STAR) RIS assisted NOMA systems [C]//IEEE Global Communications Conference (GLOBECOM). 2021: 1-6.
- [16] ZUO J K, LIU Y W, QIN Z J, et al. Resource allocation in intelligent reflecting surface assisted NOMA systems [J]. IEEE Transactions on Communications, 2020, 68(11): 7170-7183.
- [17] 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.