

基于多用户反射单元选择的 IRS 速率最大化算法^{*}韩东升^{1,2} 蒋智泉¹

(1. 华北电力大学电子与通信工程系 保定 071003; 2. 华北电力大学河北省电力物联网技术重点实验室 保定 071003)

摘要: 智能反射面(IRS)是未来 6G 的关键技术之一,然而在多用户系统中,系统的计算复杂度随反射单元数量和用户数量增加而大幅度增加,系统的优化设计面临着极大挑战。为此,本文提出了一种基于多用户反射单元选择的低计算复杂传输速率最大化算法。该算法根据用户的速率需求和信道状况,选择匹配的反射单元,综合考虑相移设置和基站波束赋形,进行联合优化,建立了一个用户速率最大化问题。由于该优化问题变量之间存在高度耦合。因此,将原始问题划分为两个子问题进行求解,使用半正定松弛得到近似解。仿真结果表明,本文算法可以大幅降低系统的计算复杂度同时提高下行传输速率,相比与无 IRS 辅助系统,传输速率提升约 50%;与随机相位 IRS 相比,传输速率提升约 30%。

关键词: 智能反射面;选择算法;计算复杂度;资源分配

中图分类号: TN929.5 **文献标识码:** A **国家标准学科分类代码:** 510.50

IRS rate maximization algorithm based on multi-user reflection unit selection

Han Dongsheng^{1,2} Jiang Zhiquan¹

(1. Department of Electronic and Communication Engineering, North China Electric Power University, Baoding 071003, China;

2. Hebei Province Electric Power Internet of Things Technology Key Laboratory, North China Electric Power University, Baoding 071003, China)

Abstract: Intelligent reflecting surface (IRS) is one of the key technologies in the sixth generation (6G). However, for multi-user systems, the computational complexity of the system increases greatly with the increase of the number of reflective units and the number of users, and the optimal design of the system faces great challenges. In this paper, we propose a low computational complex transmission rate maximization algorithm based on multi-user reflection unit selection. According to the user's rate requirements and channel conditions, the algorithm selects the matching reflection unit, considers the phase shift setting and the base station beamforming, and carries out joint optimization to establish a user rate maximization problem. There is a high degree of coupling between the variables in this optimization problem. Therefore, the original problem is divided into two subproblems for solving, and the approximate solution is obtained by using semidefinite relaxation. The simulation results show that the algorithm proposed in this paper can significantly reduce the computational complexity of the system while improving the downlink transmission rate. Compared to a system without IRS assistance, the transmission rate increases by about 50%; compared to a random phase IRS, the transmission rate increases by about 30%.

Keywords: intelligent reflecting surface; selection algorithm; computational complexity; resource allocation

0 引言

智能反射面(intelligent reflecting surface, IRS)技术是下一代无线通信系统的重要技术之一,一经提出就引起了业界的广泛关注^[1]。IRS 由大量低成本无源器件组成,每个元件可以独立的调整反射信号的振幅和相位,从而重

塑基站和用户之间的无线电磁环境^[2-3]。通过将 IRS 与毫米波,大规模多输入多输出等技术结合使用,与现行 5G 通信系统相比可以大幅提高系统的能量效率和频谱效率^[4-5]。

与传统的中继模式相比,IRS 辅助的通信系统具有很多优势。IRS 可以根据系统需求调整反射信号的相移,且不需要额外的射频链路辅助,可以有效降低系统的能源消

耗,提高系统通信性能。当基站与用户之间存在视距链路时,通过联合优化基站处的波束赋形和 IRS 处的相移,可以使得两个传输链路相干叠加,优化系统传输性能。IRS 辅助通信系统现在实现能源效率最大化、数据速率最大化、保密率最大化、接收功率最大化、发射功率最小化等方面已被广泛研究^[6-10]。文献[10]使用半正定松弛算法和交替优化算法对系统进行联合优化,使系统的发射能耗最小化。文献[11]分析了 IRS 辅助系统的功率理论下限,并与交替优化算法结果进行了比较。文献[12-14]中,分别使用不同的算法对系统进行了优化。其中文献[12]使用逐次凸逼近算法和半正定松弛算法,联合优化了混合波束赋形和 IRS 处的相移,最大化用户加权和速率。文献[13]提出了天线选择与相移设计的交替优化算法,当天线数量和反射单元数量较大时,可有效降低系统的计算复杂度。文献[14]提出了一种贪婪算法来优化系统的资源分配。将发射功率和相移顺序分配给用户,从而提高了频谱效率,降低了计算复杂度。文献[15-16]面向不同目标对无线通信进行优化,文献[15]将无线通信位置与波束赋形进行联合优化算法,最大化系统的信道容量;文献[16]提出了一种基于信息年龄的无线接入算法,最小化了系统平均传输年龄。以上论文主要针对用户与反射单元数量较少时的场景,采用不同的优化方式为不同优化目标提供了有效的解决方案,但在系统的计算复杂度方面考虑较少。

随着通信网络的发展,网络中的用户数量不断增加;同时用户为获取更好的传输性能,将使用更多的反射单元。随着用户数量和反射单元的増加,系统需要获取的信道信息增加,同时还会导致获取 IRS 处最优相移的计算量大幅增加,极大的增加了系统的运营成本。针对上述问题,目前的主流解决方案是应用分组技术,将用户和 IRS 单元进行分类合并,减小系统的计算复杂度。

目前,已有学者在非正交多址系统和正交多址系统对 IRS 辅助通信系统的分组进行了研究,该技术将原有系统划分为几个子系统,IRS 以子系统为最小单位同时多个用户服务。在非正交多址系统中,文献[17]研究了 IRS 辅助单载波非正交多址系统,部署了一个 IRS 来为两个用户组提供服务。固定功率分配策略,同时对相移矩阵进行优化,最大化用户处接收到的信号功率。文献[18]研究了多 IRS 辅助的多用户系统竞争聚类算法,将用户划分为不同的集群,通过各个集群对不同 IRS 的选择,最小化系统的发射功率。上述文献分组主要基于用户分类,通过将多个用户共同进行相移设计降低系统的复杂度,在系统设计的灵活性方面仍存在不足,无法应用于常规 IRS 通信系统。

在正交多址系统中,用户分组更多依据信道的频率选择性衰落。文献[19]介绍了非正交多址系统的工作原理,文献[20]研究了频分多址系统的 IRS 分组问题,该分组方案将相邻的 IRS 单元分为一组,使其具有相同的反射系数,降低了系统的计算复杂度。文献[21]研究了多用户系统的

IRS 分组问题,在服务用户数量较多、反射单元数量有限的系统中,该策略的单元分组优于专用单元分配,提高了系统频谱利用效率。上述工作主要集中在 IRS 的分组方面,通过用户和反射单元之间的相关性,减少系统中用户和反射单元分组数量,降低系统的计算复杂度。在综合考虑用户速率需求联合波束赋形等方面内容仍需进一步研究。

本文针对 IRS 辅助的多用户系统中计算复杂度随用户数量增加而快速增加问题,首次提出了在保证用户最小接受信噪比的前提下,最大化系统总信噪比的反射单元选择算法,在发射功率,相移,反射单元选择等约束条件下,通过联合优化基站波束赋形,反射单元选择和相移,建立了最大化系统传输速率问题。由于反射单元的选择与相移设置问题高度耦合,且选择矩阵和相移矩阵均为高维矩阵,系统总传输速率最大化问题为非凸问题,无法直接求解。本文将原始优化问题分解为两个子问题进行求解。首先提出了一种基于接收信噪比的 IRS 的反射单元选择算法,为用户选择其使用的 IRS 单元。通过选择信道状况最优的反射单元,可以有效保证用户进行反射单元选择后,系统的传输速率不会大幅下降。然后将基站波束赋形矩阵与 IRS 相移矩阵进行联合优化,此时问题仍为非凸问题。使用半正定松弛算法将问题转化为凸问题进行求解。因对 IRS 反射单元进行选择,单一用户使用反射单元数量下降,系统的计算复杂度大幅降低。仿真结果表明本文所提算法可以有效的根据信道质量选择反射单元,与随机相位和无 IRS 辅助相比可以有效提高系统的传输速率。验证了所提理论和算法的可靠性和有效性。

1 系统模型

如图 1 所示,IRS 辅助的多用户系统模型由一个具有 M 根天线的基站,具有 N 个反射单元的大规模 IRS,和 K 个用户组成。假设在该模型中,系统采用正交频分多址技术,共使用 K 个子信道且每个用户独立占用一个子信道,子信道带宽均为 B 。为了优化算法设计,假设基站可以通过现有信道估计方法获得理想下行链路信道信息^[22]。信号经 IRS 会产生单次或多次反射,其中多次反射后会双衰落效应,功率损失较大,本文忽略多次反射的影响,仅考虑单次反射后的信号。系统根据信道状况为特定用户选定相应 IRS 单元,图 1 中用不同颜色区分不同用户对应的 IRS 单元及反射信号。

系统中下行信号从基站到用户的传输路径,可分为直射路径和经 IRS 反射的路径,令 $\mathbf{h}_d \in \mathbb{C}^{M \times K}$ 表示基站到用户侧的信道。其中反射路径由两部分组成,一部分为基站到 IRS 的路径,令 $\mathbf{G} \in \mathbb{C}^{N \times M}$ 表示基站到 IRS 侧的信道,另一部分为 IRS 到用户的路径,令 $\mathbf{h}_r \in \mathbb{C}^{N \times K}$ 表示 IRS 到用户侧的信道。信号在 IRS 单元发生反射,令 Θ 表示 IRS 处的相移矩阵, $\Theta = \text{diag}(\beta_1 e^{j\theta_1}, \beta_2 e^{j\theta_2}, \dots, \beta_n e^{j\theta_N})$, 其中, $\beta \in [0, 1], \theta \in [0, 2\pi]$ 。故用户 k 接收的信号可表示为:

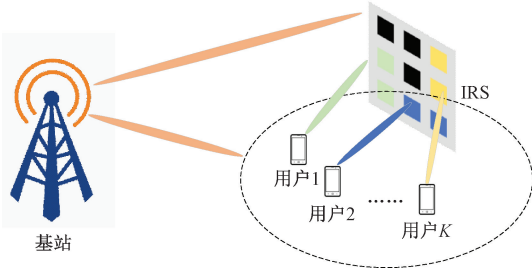


图 1 IRS 辅助通信系统模型图

Fig. 1 IRS aided communication system model

$$y_k = (\mathbf{h}_r^H \mathbf{\Theta} \mathbf{X}_k \mathbf{G} + \mathbf{h}_d^H) \mathbf{w}_k s_k + n_k, k = 1, \dots, K \quad (1)$$

其中, $n_k \sim \mathcal{CN}(0, \sigma_k^2)$ 表示用户接收端的加性高斯白噪声, 其均值为 0, 方差为 σ_k^2 ; s_k 表示基站发送的用户 k 的信息, 满足 $E[|s_k|^2] = 1$; $\mathbf{w}_k$ 表示用户 k 的归一化波束赋形矢量。 $\mathbf{X}_k$ 表示用户 k 的工作单元选择矩阵, $\mathbf{X}_k = \text{diag}(x_{k,i}), i \in (1, N)$, 其中被选中的 $x_{k,i} = 1$, 否则 $x_{k,i} = 0$ 。

在实际的工作过程中, 不同的 IRS 单元反射信道受空间位置和周围环境影响, 对不同用户的反射信道存在一定的性能差异。在本文中, 对于不同的用户的特异性的信道状况, 实时选择为其服务的工作 IRS 单元。本文假设选取的工作单元反射无衰减, 即 $|\beta_{\text{sel}}| = 1$; 未选取的工作单元无反射, 即 $|\beta_{\text{non}}| = 0$ 。对于用户 k , 其信道传输矩阵记为 $\mathbf{h}_{r,k}^H * \text{diag}(\mathbf{G}_k)$, 用户 k 最优 IRS 工作单元为非视距链路最大信噪比单元。用户 k 处的接收信噪比为:

$$\text{SINR} = \frac{|\mathbf{h}_r^H \mathbf{\Theta} \mathbf{X}_k \mathbf{G} + \mathbf{h}_d^H| \mathbf{w}_k|^2}{\sigma_k^2} \quad (2)$$

用户 k 的频带宽度为 B , 用户 k 处的信息传输速率为:

$$R_k = B \log_2 \left(1 + \frac{|\mathbf{h}_r^H \mathbf{\Theta} \mathbf{X}_k \mathbf{G} + \mathbf{h}_d^H| \mathbf{w}_k|^2}{\sigma_k^2} \right) \quad (3)$$

2 算法设计

为了最大化系统的传输速率, 同时有效降低多用户时的系统复杂度, 联合优化基站发射信号能量, IRS 反射相位, 本文提出了一种低复杂度多用户 IRS 反射单元选择算法。首先, 基于用户速率需求和信道状况进行 IRS 反射单元选择; 然后依据选择反射单元进行组合, 形成子系统; 对子系统联合波束赋形, 使用半正定松弛 (semidefinite relaxation, SDR) 得到近似解。

2.1 优化问题

优化问题可以建模为:

$$\begin{aligned} P1: & \max_{\theta, \mathbf{w}, \mathbf{X}} \sum_k R_k \\ \text{s.t.} & C1: \theta \in [0, 2\pi] \\ & C2: \beta \leq 1 \\ & C3: \frac{|\mathbf{h}_r^H \mathbf{\Theta} \mathbf{X}_k \mathbf{G}|^2}{\sigma_k^2} \geq \text{SINR}_{\text{RIS}} \\ & C4: \|\mathbf{w}_k\|^2 \leq \omega_0^2 \end{aligned}$$

$$C5: x_{i,j} \in \{0, 1\}$$

$$C6: \sum_{n=1}^N x_{i,n} \geq 1$$

$$C7: \sum_{k=1}^K x_{k,j} = 1 \quad (4)$$

其中, $\sum_k R_k$ 表示系统的总吞吐量; $C1$ 和 $C2$ 分别表示信号在 IRS 处的相移和幅值约束; $C3$ 为 IRS 处接收信噪比约束, SINR_{RIS} 表示用户经 IRS 反射路径的接收信噪比; $C4$ 是发射功率约束, ω_0^2 是基站处的最大发射功率; $C5 \sim C7$ 表示 IRS 的工作单元选择约束。每个 IRS 单元只能为一个用户工作, 且每个用户至少有一个 IRS 单元为其工作。

2.2 优化问题分解与算法设计

原始优化问题中反射单元选择矩阵与反射单元相移矩阵相互耦合, 用户传输速率与用户接收信噪比成非线性关系, 无法进行优化求解。因此, 将原始优化问题分解为反射单元选择和联合波束赋形两个子问题进行求解, 将反射单元选取和相移进行解耦。假设系统为最优相移设置, 仅考虑反射单元选取, 在保证用户接收信噪比的条件下, 最大化用户信息传输速率; 然后根据反射单元选取生成子系统, 此时问题为二次约束二次规划 (quadratically constrained quadratic programs, QCQP) 问题, 使用半正定松弛算法进行联合波束赋形优化, 求得系统近似解。

1) 反射单元选择算法

在已有的最大化系统传输速率的研究中, IRS 同一时间只能为单一用户服务, 未考虑不同用户之间的相关性, 无法动态分配 IRS 反射单元, 同时由于不同用户的信道质量不同, 导致用户信息传输速率差距较大, 造成系统通信性能浪费; 随着用户和反射单元数量增加, 系统的计算复杂度大幅增加。为此, 本文提出了一种最大化用户速率的低复杂度反射单元选择算法, 保证各用户最低接收信噪比的约束下, 最大化用户反射链路接收信噪比进行反射单元选择。具体算法如下:

首先, 初始化每个用户选用的 IRS 单元集合为空集, 第 k 个用户选取的集合为 N_k ; 每个用户匹配信道状况最佳的 IRS 单元, 若多个用户选取同一单元, 则此单元由信道状况最佳用户选取, 其他用户重复此步骤; 设定用户接收非视距路径最低信噪比; 计算比较用户非视距路径接收信噪比与最小信噪比差值, 优先为信噪比差值最大的用户选取 IRS 单元, 直到所有用户均达到最小接收信噪比; 在剩余单元中选取其信道状况最佳的 IRS 单元。算法流程如图 2 所示。

2) 基于 SDR 算法的联合优化算法

假设 IRS 处反射信号无衰减, 即 $\beta = 1$, 原始优化问题可以被简化为:

$$\begin{aligned} P2: & \max_{\theta, \mathbf{w}} \sum_k B \log_2 \left(1 + \frac{|\mathbf{h}_r^H \mathbf{\Theta} \mathbf{X}_k \mathbf{G} + \mathbf{h}_d^H| \mathbf{w}_k|^2}{\sigma_k^2} \right) \\ \text{s.t.} & \theta \in [0, 2\pi] \\ & \|\mathbf{w}_k\|^2 \leq \omega_0^2 \end{aligned} \quad (5)$$

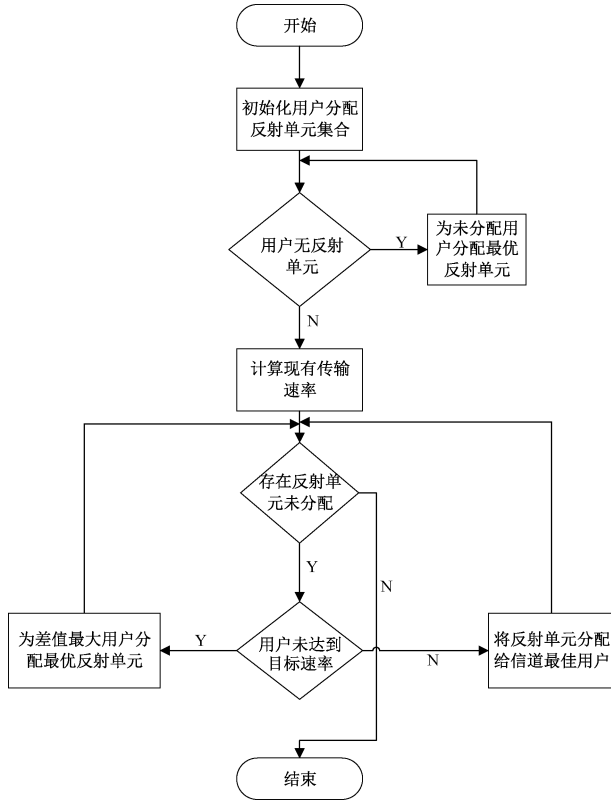


图 2 选择算法流程图

Fig. 2 Flowchart of select algorithm

对于任意的给定的 θ , 使用最大比传输 (maximum-ratio transmission, MRT) 方法, 可以求出系统的最优波束赋形矩阵, 即 $\mathbf{w}^* = \sqrt{P} \frac{(\mathbf{h}_r^H \mathbf{O} \mathbf{X}_k \mathbf{G} + \mathbf{h}_d^H)^H}{\|\mathbf{h}_r^H \mathbf{O} \mathbf{X}_k \mathbf{G} + \mathbf{h}_d^H\|}$ 。其中, P 表示基站处的发射功率。优化问题式(5)可化为:

$$\begin{aligned} \max_{\theta, \mathbf{p}} \sum_{k=1}^K B \log_2 \left(1 + \frac{P \|\mathbf{h}_r^H \mathbf{O} \mathbf{X}_k \mathbf{G} + \mathbf{h}_d^H\|^2}{\sigma_k^2} \right) \\ s.t. \quad 0 \leq \theta \leq 2\pi \\ \|\mathbf{w}_k\|^2 \leq w_0^2 \end{aligned} \quad (6)$$

当归一化波束赋形矢量取最大值时, 系统信息传输速率取得最大值。即当取 $\|\mathbf{w}_k\|^2 = w_0^2$ 时, 有发射功率 $P = w_0^2$ 。优化问题式(6)可化为:

$$\begin{aligned} \max_{\theta, \mathbf{p}} \sum_{k=1}^K B \log_2 \left(1 + \frac{w_0^2 \|\mathbf{h}_r^H \mathbf{O} \mathbf{X}_k \mathbf{G} + \mathbf{h}_d^H\|^2}{\sigma_k^2} \right) \\ s.t. \quad 0 \leq \theta \leq 2\pi \end{aligned} \quad (7)$$

此时优化问题式中仅存在变量 θ , 不同用户对应 $\mathbf{O} \mathbf{X}_k$ 相互独立, 因此问题式(7)可转化为求用户 k 的信息传输速率, 然后将不同用户信息传输速率进行求和; 又因为外部函数为凸函数, 当内部函数即用户 k 接收信噪比取最大值时, 原式取得最大值, 优化问题式(7)可转化为:

$$\begin{aligned} \max_{\theta, \mathbf{p}} \|\mathbf{h}_r^H \mathbf{O} \mathbf{X}_k \mathbf{G} + \mathbf{h}_d^H\|^2 \\ s.t. \quad 0 \leq \theta \leq 2\pi \end{aligned} \quad (8)$$

令 $\boldsymbol{\varphi} = [\varphi_1, \varphi_2, \dots, \varphi_n]^H$, 其中, $\varphi_n = e^{j\theta} x_k$ 。原相移

约束(C1)可转化为复平面单位圆约束, 即 $|\varphi_n|^2 = 1, \forall n$ 。令 $\mathbf{h}_r^H \mathbf{O} \mathbf{X}_k \mathbf{G} = \boldsymbol{\varphi}^H \boldsymbol{\Psi}$, 其中, $\boldsymbol{\Psi} = \text{diag}(\mathbf{h}_r^H) \mathbf{G} \in \mathbb{C}^{N \times M}$ 。优化问题式(8)可化为:

$$\begin{aligned} \max \quad \|\boldsymbol{\varphi}^H \boldsymbol{\Psi} + \mathbf{h}_d^H\|^2 \\ s.t. \quad |\varphi_n|^2 = 1, n = 1, \dots, N \end{aligned} \quad (9)$$

将上式展开为:

$$\begin{aligned} \max_{\boldsymbol{\varphi}} \quad \boldsymbol{\varphi}^H \boldsymbol{\Psi} \boldsymbol{\Psi}^H \boldsymbol{\varphi} + \boldsymbol{\varphi}^H \boldsymbol{\Psi} \mathbf{h}_d + \mathbf{h}_d^H \boldsymbol{\Psi}^H \boldsymbol{\varphi} + \|\mathbf{h}_d^H\|^2 \\ s.t. \quad |\varphi_n|^2 = 1, n = 1, \dots, N \end{aligned} \quad (10)$$

优化问题为非凸的二次约束二次规划问题, 难以直接求解, 可采用 SDR 算法进行优化。引入辅助变量 $t, t^2 = 1$, 将优化问题式(10)转化为:

$$\begin{aligned} \max_{\bar{\boldsymbol{\varphi}}} \quad \bar{\boldsymbol{\varphi}}^H \mathbf{R} \bar{\boldsymbol{\varphi}} + \|\mathbf{h}_d^H\|^2 \\ s.t. \quad |\bar{\varphi}_n|^2 = 1, n = 1, \dots, N+1 \end{aligned} \quad (11)$$

$$\text{其中, } \mathbf{R} = \begin{bmatrix} \boldsymbol{\Psi} \boldsymbol{\Psi}^H & \boldsymbol{\Psi} \mathbf{h}_d \\ \mathbf{h}_d^H \boldsymbol{\Psi}^H & 0 \end{bmatrix}, \bar{\boldsymbol{\varphi}} = \begin{bmatrix} \boldsymbol{\varphi} \\ t \end{bmatrix}。$$

因为 $\bar{\boldsymbol{\varphi}}^H \mathbf{R} \bar{\boldsymbol{\varphi}}$ 是标量, 可视为 1×1 矩阵, 其迹等于本身, 又因为迹的性质满足交换律, 所以 $\bar{\boldsymbol{\varphi}}^H \mathbf{R} \bar{\boldsymbol{\varphi}} = \text{tr}(\mathbf{R} \bar{\boldsymbol{\varphi}} \bar{\boldsymbol{\varphi}}^H)$ 。令 $\boldsymbol{\Gamma} = \bar{\boldsymbol{\varphi}} \bar{\boldsymbol{\varphi}}^H$, 满足 $\text{rank}(\boldsymbol{\Gamma}) = 1$, 且为半正定矩阵, 即 $\boldsymbol{\Gamma} \succeq 0$ 。原式可写为:

$$\begin{aligned} \max_{\boldsymbol{\Gamma}} \quad \text{tr}(\mathbf{R} \boldsymbol{\Gamma}) + \|\mathbf{h}_d^H\|^2 \\ s.t. \quad \boldsymbol{\Gamma}_{n,n} = 1, n = 1, \dots, N+1 \\ \boldsymbol{\Gamma} \succeq 0 \end{aligned} \quad (12)$$

将优化问题转化为半正定规划问题 (semi-definite programming, SDP), 可通过 CVX 工具包进行解决, 可以求出系统的最优解。

2.3 算法复杂度分析

算法复杂度主要由 IRS 选择算法, 通过 CVX 工具包求解 SDP 问题和高斯随机化过程组成。用户 k 的 IRS 选择算法的复杂度为 $\mathcal{O}(N + N_K(N - K + 1) + N_K)$, SDP 问题中变量数为 $(N_K + 1)^2$, 内点法计算需要 $\mathcal{O}(\sqrt{(N_K + 1)^2})$ 次迭代, 在每次迭代中得到结果需要进行 $\mathcal{O}(((N_K + 1)^2)^3)$ 次计算, 算法复杂度为 $\mathcal{O}((N_K + 1)^7)$ 。高斯随机化过程中特征值分解的复杂度为 $\mathcal{O}((N_K + 1)^3)$ 。

本文算法中用户 K 的计算复杂度为 $\mathcal{O}(N_K(N - K + 1) + (N_K + 1)^7)$, 其中, N_K 的平均取值为 (N/K) 。未对 RIS 反射单元进行选择时, 计算复杂度为 $\mathcal{O}((N + 1)^7)$ 。因此本文算法可以大幅降低系统的计算复杂度。

3 仿真结果与分析

本节对本文方案进行了仿真, D 表示基站与 IRS 之间的距离, 用户随机分布在以 IRS 为中心的圆形区域内, R 表示圆形区域的半径。参数设置如表 1 所示。

如图 3 所示, 不同用户数和反射单元数时系统吞吐量随基站发射功率的变化不同。随着基站发射的不断增大, 系统的吞吐量也随之增大。从图中可以看出, 当用户数量

表 1 相关参数表
Table 1 related parameters

参数	参数值
基站到用户距离 D/m	200
用户分布区域半径长 d/m	20
天线数量 M	4
噪声功率 σ^2/dBm	100
路径损耗系数 $\beta_1, \beta_2, \beta_3$	$[2, 2.8, 3.5]$

一定时,随着反射单元数量 N 增加,系统吞吐量逐渐增加,系统计算复杂度也随之增加;当反射单元数量一定时,随着用户数量 K 增加,系统吞吐量大幅度增加,同时根据 2.3 节中分析可知,系统的计算复杂度下降。

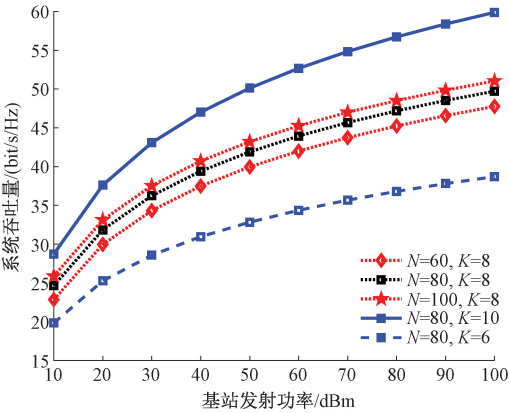


图 3 不同参数时系统吞吐量随站发射功率变化曲线
Fig. 3 System throughput variation curve with station transmission power under different parameters

如图 4 所示,不同参数时各用户接收速率比较与系统总吞吐量不同。不同颜色分别代表系统中不同用户的传输速率。下图为同组元素传输速率之和(系统吞吐量)比较,其中随机相位模型和无 IRS 辅助模型引自文献[7]。从图中可以看出,各用户速率均大于随机相位和无 IRS 辅助系统;从下图中可以观察到本文算法明显优于随机相位 IRS 和无 IRS 辅助系统,相比无 IRS 辅助系统性能提升约 50%,相比随机相位 IRS 提升约为 30%。

如图 5 所示,系统吞吐量随反射单元数量变化而变化。系统发射功率固定为 100 W。从图中可以看出,系统吞吐量随反射单元数量增加而提高。3 条吞吐量由大至小依次为 $K=10, K=8, K=6$ 。随着系统中用户数增加,可选信道增多,所选取的信道质量较好,系统吞吐量增大,根据 2.3 节中分析可知,系统的计算复杂度呈下降趋势。

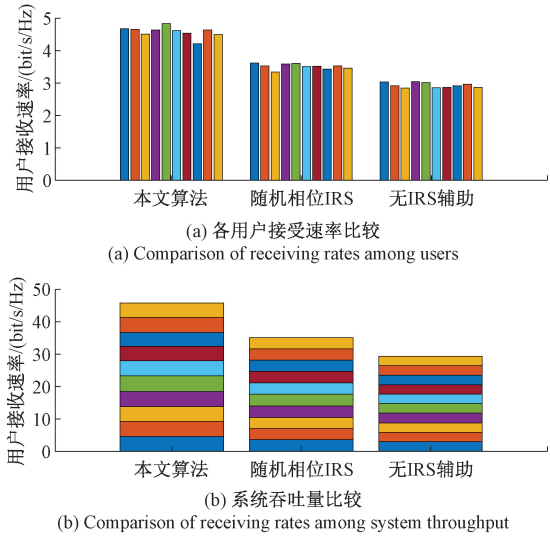


图 4 各用户接收速率比较与系统吞吐量比较
Fig. 4 Comparison of receiving rates among users and system throughput

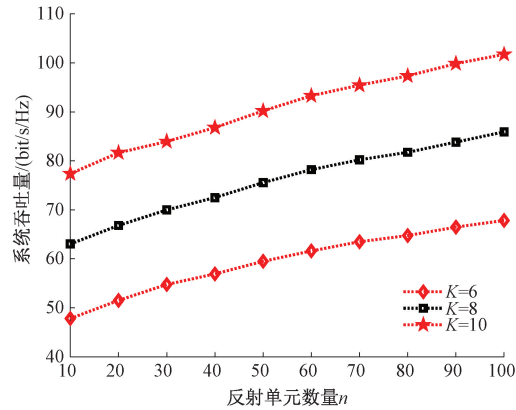


图 5 不同反射单元数时系统吞吐量比较
Fig. 5 Comparison of system throughput with different numbers of reflection units

4 结 论

本文针对 IRS 辅助的多用户无线通信系统,研究了基于多用户反射单元选择的 IRS 速率最大化问题,提出了一种联合优化 IRS 单元选择,基站波束赋形和 IRS 处反射相移的算法,最大化系统下行速率。仿真结果表明,本文算法可以大幅提高下行传输速率,相比与无 IRS 辅助系统,传输速率提升约 50%;与随机相位 IRS 相比,传输速率提升约 30%。由数学分析可知,本文算法可以在多用户的大规模 IRS 应用场景中有效降低系统计算复杂度。在未来的研究中,将考虑非正交频分多址系统等多种通信系统对 IRS 反射单元选择的影响。

参考文献

- [1] GONG SH M, LU X, NIYATO D T, et al. Toward smart wireless communications via intelligent reflecting surfaces: A contemporary survey [J]. IEEE Communications Surveys & Tutorials, 2020, 22(4): 2283-2314.
- [2] WU Q Q, ZHANG SH W, ZHENG B X, et al. Intelligent reflecting surface-aided wireless communications: A tutorial[J]. IEEE Transactions on Communications, 2021, 69(5):3313-3351.
- [3] XUE Q, LIU Y J, SUN Y, et al. Beam management in ultra-dense mmWave network via federated reinforcement learning: An intelligent and secure approach [J]. IEEE Transactions on Cognitive Communications and Networking, 2023, 9(1): 185-197.
- [4] HUANG CH W, 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.
- [5] 曾韦健,李 晖. 5G 异构网络中基于多目标 Actor-Critic 的资源分配[J]. 国外电子测量技术, 2024, 43(6): 33-40.
- CENG W J, LI H. Resource allocation based on multi-objective Actor-Critic in 5G heterogeneous networks[J]. Foreign Electronic Measurement Technology, 2024, 43(6):33-40.
- [6] YANG Y F, ZHENG B X, ZHANG SH W, et al. Intelligent reflecting surface meets OFDM: Protocol design and rate maximization[J]. IEEE Transactions on Communications, 2020, 68(7): 4522-4535.
- [7] XU D F, YU X H, SUN Y, et al. Resource allocation for secure IRS-assisted multiuser MISO systems[C]. IEEE Globecom Workshops, 2019:1-6.
- [8] WU Q Q, ZHANG R. Beamforming optimization for intelligent reflecting surface with discrete phase shifts[C]. IEEE International Conference on Acoustics, Speech and Signal Processing, 2019:7830-7833.
- [9] WU Q Q, ZHANG R. Intelligent reflecting surface enhanced wireless network via joint active and passive beamforming [J]. IEEE Transactions on Wireless Communications, 2019, 18(11): 5394-5409.
- [10] HAN H M, ZHAO J, NIYATO D, et al. Intelligent reflecting surface aided network: Power control for physical-layer broadcasting[C]. ICC 2020—2020 IEEE International Conference on Communications (ICC), 2020: 1-7.
- [11] HAO W M, SUN G C, ZENG M, et al. Robust design for intelligent reflecting surface-assisted MIMO-OFDMA terahertz IoT networks[J]. IEEE Internet of Things Journal, 2021, 8(16): 13052-13064.
- [12] ABDULLAH Z, CHEN G J, LAMBOTHARAN S, et al. Low-complexity antenna selection and discrete phase-shifts design in IRS-assisted multiuser massive MIMO networks[J]. IEEE Transactions on Vehicular Technology, 2022, 71(4): 3980-3994.
- [13] JIAO SH Y, FANG F, ZHOU X T, et al. Joint beamforming and phase shift design in downlink UAV networks with IRS-assisted NOMA [J]. Journal of Communications and Information Networks, 2020, 5(2): 138-149.
- [14] HOU T W, LIU Y W, SONG ZH Y, et al. Reconfigurable intelligent surface aided NOMA networks [J]. IEEE Journal on Selected Areas in Communications, 2020, 38(11): 2575-2588.
- [15] 韩东升,念欣然,李然. 无人机辅助无线通信位置和波束联合优化方法[J]. 电子测量技术, 2023, 46(20): 88-97.
- HAN D SH, NIAN X R, LI R. Joint optimization method of position and beam for UAV aided wireless communication [J]. Electronic Measurement Technology, 2023, 46(20):88-97.
- [16] 韩东升,岳棚彤. 基于信息年龄的变电站业务无线接入选择算法[J]. 电子测量技术, 2022, 45(20):29-36.
- HAN D SH, YUE X T. An wireless access selection algorithm of substation service based on age of information[J]. Electronic Measurement Technology, 2022, 45(20):29-36.
- [17] AL-OBIEDOLLAH H, SALAMEH H B, CUMANAN K, et al. Competitive IRS assignment for IRS-based NOMA system [J]. IEEE Wireless Communications Letters, 2024, 13(2): 505-509.
- [18] YANG Y F, ZHENG B X, ZHANG SH W, et al. Intelligent reflecting surface meets OFDM: Protocol design and rate maximization[J]. IEEE Transactions on Communications, 2020, 68(7): 4522-4535.
- [19] 侯卫民,王妍,侯艳丽. 低信噪比环境下一种 OFDM 抗

频偏定时同步算法[J]. 电子测量技术, 2023, 46(1): 148-153.

HOU W M, WANG Y, HOU Y L. An OFDM anti-frequency offset timing synchronization algorithm in low SNR environment[J]. Electronic Measurement Technology, 2023, 46(1): 148-153.

[20] ANJUM M, KHAN M A, BASHARAT S, et al. Dedicated versus shared element-allotment in IRS-aided wireless systems: When to use what? [C]. 2023 IEEE 97th Vehicular Technology Conference (VTC2023-Spring), 2023: 1-6.

[21] 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.

[22] MU X D, LIU Y W, GUO L, et al. Capacity and optimal resource allocation for IRS-assisted multi-user communication systems [J]. IEEE Transactions on Communications, 2021, 69(6): 3771-3786.

作者简介

韩东升, 博士, 教授, 博士生导师, 主要研究方向为无线通信新技术、电力系统通信。

E-mail: handongsheng@ncepu. end. cn

蒋智泉(通信作者), 硕士研究生, 主要研究方向为无线通信新技术。

E-mail: 1665925552@qq. com