

双智能反射面辅助的上行链路通信调度分析

柳 翠 芮 贤 义*

(苏州大学电子信息学院, 江苏苏州 215006)

摘要: 本文旨在研究一种基于双智能反射面(Intelligent Reflecting Surface, IRS)辅助的上行链路多用户通信方案,以提高用户的信息传输速率。研究提出了一种合作式被动波束成形技术,作为新型的 IRS 反射波束成形技术。与传统的被动波束成形技术不同的是,合作式被动波束成形技术允许不同的 IRS 之间进行协作,能够进一步提高系统性能。通过联合优化基站(Base Station, BS)处的接收波束成形和两个分布式 IRS(分别部署在 BS 和用户附近)处的合作式反射波束成形,本研究能够最大化用户的信息传输速率。仿真实验的结果展示了基于双 IRS 辅助的多用户调度通信系统在最大化信息传输速率方面的显著优势。此外,本文量化比较了我们的方案与现有类似方案的性能改进。仿真结果表明,相较于现有方案,本系统在提高信息传输速率方面有显著的性能提升。特别是在用户数量较大时,双 IRS 合作系统可以更好地克服路径损耗和多路径干扰,进一步提高系统的性能表现。本研究的创新点总结如下:1)提出了合作式被动波束成形技术作为一种新型的 IRS 反射波束成形技术,具有重要的理论和实用价值;2)通过联合优化基站处的接收波束成形和两个分布式 IRS 处的合作式反射波束成形,实现了多用户通信系统的性能最大化;3)在仿真实验中展示了基于双 IRS 辅助的多用户调度通信系统在最大化信息传输速率方面的显著优越性。本研究不仅为 IRS 辅助通信技术的推广提供了有益的参考,也为未来智能无线通信系统的发展提供了重要的支持。同时,也为 IRS 辅助用户调度技术的发展提供了新的思路和方法。

关键词: 智能反射面; 多用户调度; 上行链路; 信息传输速率; 联合波束成形

中图分类号: TN925 **文献标识码:** A **DOI:** 10.16798/j.issn.1003-0530.2024.02.013

引用格式: 柳翠, 芮贤义. 双智能反射面辅助的上行链路通信调度分析[J]. 信号处理, 2024, 40(2): 356-363. DOI: 10.16798/j.issn.1003-0530.2024.02.013.

Reference format: LIU Cui, RUI Xianyi. Uplink communication scheduling analysis with assistance of dual intelligent reflecting surfaces[J]. Journal of Signal Processing, 2024, 40(2): 356-363. DOI: 10.16798/j.issn.1003-0530.2024.02.013.

Uplink Communication Scheduling Analysis with Assistance of Dual Intelligent Reflecting Surfaces

LIU Cui RUI Xianyi*

(School of Electronic and Information Engineering, Soochow University, Suzhou, Jiangsu 215006, China)

Abstract: This study investigated a multi-user communication scheme for uplink channels that used intelligent reflecting surfaces (IRSs). This scheme made it possible to fully exploit the beamforming gain of the IRSs and improve the information transmission rate to users. A cooperative passive beamforming technique was investigated as a novel IRS beamforming technology. Unlike traditional passive beamforming techniques, the cooperative passive beamforming technique allows collaboration among different IRS elements, thereby further enhancing the system performance. The users' information transmission rate is maximized by jointly optimizing the receive beamforming at the base station (BS) and coop-

收稿日期: 2023-05-08; 修回日期: 2023-06-15

*通信作者: 芮贤义 xyru@suda.edu.cn *Corresponding Author: RUI Xianyi, xyru@suda.edu.cn

基金项目: 国家自然科学基金(61201213, 62071319)

Foundation Items: The National Natural Science Foundation of China (61201213, 62071319)

erative reflective beamforming at two distributed IRS elements (deployed near the BS and users). Simulation results demonstrated the significant advantages of a multi-user scheduling communication system assisted by dual IRSs in maximizing the information transmission rate. Furthermore, this paper quantitatively evaluates the performance improvement provided by our proposed solution compared with similar existing approaches. The simulation results showed a significant performance enhancement in terms of improving the information transmission rate compared to existing solutions. In particular, the cooperative system with dual IRSs exhibited better resilience against path loss and multipath interference, thereby further enhancing the system performance, especially with a large number of users. The innovative contributions of this research can be summarized as follows: 1) proposing cooperative passive beamforming as a novel IRS beamforming technology with significant theoretical and practical value; 2) maximizing the performance of a multi-user communication system through joint optimization of the receive beamforming at the base station and cooperative reflective beamforming at two distributed IRS elements; 3) demonstrating the significant advantages of a multiuser scheduling communication system assisted by dual IRSs in maximizing the information transmission rate through simulation experiments. This research not only provides valuable references for promoting IRS-assisted communication technology but also offers significant support for the development of future intelligent wireless communication systems. Additionally, it provides new ideas and methods for the development of IRS-assisted user scheduling techniques.

Key words: intelligent reflecting surface; multi-user scheduling; uplink link; information transfer rate; joint beamforming

1 引言

随着移动互联网、物联网等技术的发展,无线通信系统的需求越来越大。用户对高速、高质量的数据传输的要求不断增加,提高信息传输速率已经逐渐成为无线通信系统中的一个重要问题。为此,学术界和工业界一直在探索各种技术来提高无线通信系统的传输速率和容量。其中,使用智能反射面(Intelligent Reflecting Surface, IRS)作为无线通信系统的辅助设计引起了广泛的关注^[1-2]。IRS是由大量反射单元组成的一种被动元件,可以改变电磁波的相位和振幅,从而控制电磁波的传播,用于控制信号的波束形成,改善信号的强度和信噪比,以及抑制多径衰落等^[3]。例如,Wu等人^[4]研究了一种使用IRS增强的点对点多输入单输出(MISO)无线系统,其中部署了一个IRS来协助多天线的接入点(AP)与单天线用户之间的通信,通过联合优化AP的主动发射波束成形和IRS的被动反射波束成形,旨在最大化用户接收到的总信号功率。他们首先提出了一种基于半定松弛(SDR)技术的集中式算法,假设IRS具有全局信道状态信息(CSI)。然而,由于集中式实现需要大量的信道估计和信号交换开销,因此进一步提出了一种低复杂度的分布式算法。分布式算法中,AP和IRS独立地调整发射波束成形和相位调整,直到达到收敛。仿真结果表明,与基准方案相比,所提出的算法能够实现显著的性能提升。他们的实验证实使用IRS相较传统设置能够显著提高链路质量和覆盖范围。类似地,IRS还被广泛研究和应用于无线通信系统中,以提高通信

速率和容量^[5-7]。

现有的IRS研究主要集中在被动波束成形设计和性能优化,例如通过调整IRS的反射相位和振幅来实现波束成形^[8-10]。在单一天线系统中,波束成形技术可以通过改变天线辐射图的形状来实现信号传输的指向性。然而,对于多用户的情况,天线的指向性不能很好地满足用户间的信号隔离要求^[11-13]。因此,近年来智能反射面(IRS)技术在多用户调度上的应用逐渐受到研究者的关注。但是,现有研究通常只考虑了单个IRS的情况,并且没有考虑反射面之间的信号反射。目前,众多研究已在多IRS辅助通信系统领域取得了显著进展。不少研究者认为可以部署双IRS分布在建筑物表面,以协助发射器向接收器传输自己的信号,并通过IRS的被动波束成形改善信号传播。文献[14]提出了一种针对双IRS辅助的多用户MIMO系统的有效上行链路信道估计方案,通过最大化反射信号功率和利用级联CSI的低维缩放版本,实现了最小化训练时间和开销的信道估计方法。此外,还有一些研究考虑了多IRS辅助下的多用户波束成形问题,例如HAO等人^[15]提出了双IRS辅助的多用户MIMO通信系统,通过联合接收和协同反射波束形成优化,实现了显著的性能增益。在该信道模型中,从MT发射的一部分信号在到达MR之前会反射到靠近发射器的IRS或靠近接收器的IRS上。一些信号从MT发射出来后,会射到集群上,然后再到达MR。文章研究了双IRS MIMO信道传播特性,即空时(ST)交叉相关函数(CCF),针对不同数量和布局的IRS单元格以及IRS的方向角进行了研究。但是这

些研究通常集中在优化波束成形权重矩阵,以最大化多用户之间的通信速率。然而,尽管现有研究在多IRS辅助通信系统领域取得了显著进展,但它们通常没有考虑到多用户调度下的多IRS与用户侧的功率分配和波束成形的联合优化问题。在多用户场景中,用户间的干扰和信号隔离问题变得更加复杂,需要综合考虑功率分配和波束成形策略,以实现更高的系统性能。

同时,缺乏对用户侧的功率分配策略的考虑也可能导致传输性能的损失。因此,在多用户调度下,必须进行多个IRS与用户侧功率分配和波束成形的联合优化,以充分发挥多个IRS的协同优势,最大化系统的传输速率和容量。

本文的研究工作将聚焦于多用户调度下的多IRS系统。我们旨在提出一种联合优化多个IRS的反射系数、基站的发射波束成形以及用户侧的功率分配的算法,以实现系统速率的最大化。通过在多个IRS之间实现协同波束成形和优化功率分配,我们可以进一步提高系统的抗干扰性能和用户的传输速率。

具体来说,为了解决多用户调度下的多IRS与用户侧功率分配和波束成形的联合优化问题,本文提出了一个双智能反射表面(IRS)辅助的上行多用户调度系统。该系统采用了被动波束成形设计,将多个IRS之间的协同作用融入系统的优化过程中。在该系统中,优化问题是联合优化两个IRS的反射系数以及基站端的发射波束成形,在满足约束条件的同时最大化系统的传输速率。具体而言,我们考

虑了反射系数和发射波束成形权重的联合调整,以实现多个IRS之间的协同优化。通过调整反射系数,每个IRS可以调整反射信号的相位和振幅,从而对信号进行精确的波束成形。同时,基站也可以优化发射波束成形权重,以最大化用户接收到的总信号功率。通过仿真实验,本文评估了该优化算法在双IRS多用户调度模型中的性能表现。结果显示,该算法能够显著提升用户的传输速率。通过联合优化多个IRS的反射系数和基站的发射波束成形,系统能够更好地控制信号的传播和干扰,从而提高用户的传输质量和速率。

2 系统和信道模型

2.1 系统模型

如图1所示,本文考虑一个点对点单输入多输出(SIMO)无线系统,其中包括一个配备了 M 个天线的基站(BS)和 K 个单天线用户。为了提高链路的性能,在周围安装了两个分别由 N_1, N_2 个无源元件组成的智能反射面(IRS),用于协助用户-BS上行链路的通信功率传输。与现有的IRS技术相比,本文提出的创新之处在于双IRS的协同辅助方式。每个IRS配备了一个智能控制器,能够通过对传播环境的周期性感知学习,并动态调整每个反射元件的相移。具体而言,IRS控制器协调两种工作模式之间的切换:接收模式用于环境感知(如CSI估计),而反射模式用于散射来自基站的入射信号。本文假设受到IRS反射两次及以上的信号功率可以忽略不

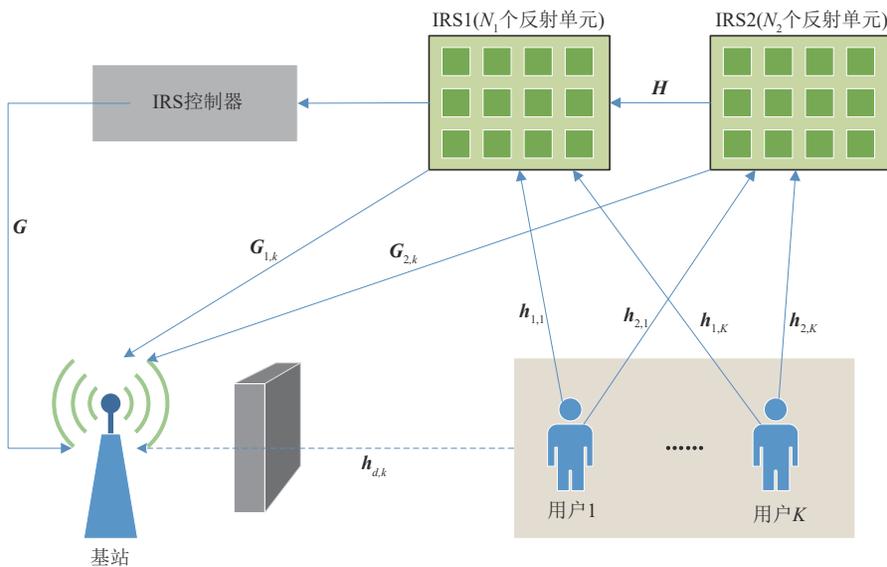


图1 双IRS协同辅助的多用户通信系统

Fig. 1 Multi-User Communication System with Dual IRS-Assisted Cooperative Technique

计,因为存在显著的路径损耗。此外,我们采用准静态的平面衰落信道模型来描述所考虑的系统设置。虽然我们关注的是从AP到用户的上行通信,但结果也适用于下行链路。考虑到IRS是一种被动反射设备,本文采用时分双工协议用于上行和下行传输,并利用信道互易性在两个链路方向上获取IRS的信道状态信息(CSI)。

用户-AP链路,用户-IRS链路,IRS-AP链路分别用 $\mathbf{h}_{d,k}^H \in \mathbb{C}^{1 \times M}$, $\mathbf{h}_{r,k}^H \in \mathbb{C}^{1 \times N_r}$, $\mathbf{G}_{1,k} \in \mathbb{C}^{M \times N_1}$, $\mathbf{G}_{2,k} \in \mathbb{C}^{M \times N_2}$ 表示,上标H表示共轭转置操作。两个IRS之间的通信链路用 \mathbf{H} 表示, $\mathbf{H} \in \mathbb{C}^{N_1 \times N_2}$ 。然后,复合用户-IRS-AP信道可以表示为三个链路的串联,即用户-IRS链路,带相位反射的IRS和IRS-AP链路。它不同于传统的AF中继信道,因为中继不仅放大其接收的源信号,而且放大其自己的接收噪声,并将放大的信号转发到目的地。在本文中,在BS处接收到的用户 k 的信号可以表示为

$$y_k = \mathbf{f}_k^H (\mathbf{h}_{d,k} + \mathbf{G}_{1,k} \Phi_{1,k} \mathbf{h}_{1,k} + \mathbf{G}_{2,k} \Phi_{2,k} \mathbf{h}_{2,k} + \mathbf{G}_{1,k} \Phi_{1,k} \mathbf{H} \Phi_{2,k} \mathbf{h}_{2,k}) x_k + \mathbf{f}_k^H \mathbf{n} \quad (1)$$

其中 $\mathbf{f}_k \in \mathbb{C}^{M \times 1}$, 对BS处接收到的信号进行波束成形, 即有 $\|\mathbf{f}_k\|^2 = 1$ 。其中 x_k 是用户 k 的发射信号, 有 $E[|x_k|^2] = 1$ 。 $\mathbf{n} \sim CN(0, \sigma^2 \mathbf{I}_m)$ 为加性高斯白噪声(AWGN), $\mathbf{n} \in \mathbb{C}^{M \times 1}$ 。由此可得BS处用户 k 信号的速率为

$$R_k = \frac{|\mathbf{f}_k^H (\mathbf{h}_{d,k} + \mathbf{G}_{1,k} \Phi_{1,k} \mathbf{h}_{1,k} + \mathbf{G}_{2,k} \Phi_{2,k} \mathbf{h}_{2,k} + \mathbf{G}_{1,k} \Phi_{1,k} \mathbf{H} \Phi_{2,k} \mathbf{h}_{2,k})|^2}{\sigma^2} \quad (2)$$

2.2 数学模型

在实际应用中,所提出的系统可被应用于无线功率或信息传输。在前一种情况下,收集的能量通常被建模为信息传输速率 R 的凹形和递增函数。在后一种情况下,信息可达率是信息传输速率的对数函数,它也随着 R 的增加而增加。因此,在AP的最大传输功率约束下,通过联合优化传输波束形成 \mathbf{f}_k 和相移 $\Phi_{1,k}$ 、 $\Phi_{2,k}$ 来最大化信息传输速率,即相应的优化问题可以表述为

$$\begin{aligned} \text{(P1): } & \max_{\mathbf{f}_k, \Phi_{1,k}, \Phi_{2,k}} R_k \\ & \text{s.t. } \|\mathbf{f}_k\|^2 = 1, \\ & 0 \leq \theta_{n_1} \leq 2\pi, \forall n_1 = 1, \dots, N_1, \\ & 0 \leq \theta_{n_2} \leq 2\pi, \forall n_2 = 1, \dots, N_2 \end{aligned} \quad (3)$$

虽然所有的约束都是凸的,但由于问题(P1)是

非凸的,因此该问题是一个非凸优化问题。一般来说,没有标准的方法来最优地求解这类非凸优化问题。接下来本文将使用一个分布式算法,应用交替优化技术来求解。

3 联合优化设计算法

为了便于实现,本节提出了一种基于交替优化的低复杂度分布式算法。具体地说,AP的发射波束形成 \mathbf{f}_k 和两个IRS的相移 $\Phi_{1,k}$ 、 $\Phi_{2,k}$ 以交替的方式进行迭代优化,每次迭代中固定一个,直到收敛或最大迭代次数。值得指出的是,交替优化本身并不一定意味着分布式实现,而利用我们制定问题的特殊结构,使我们能够避免AP和IRS之间的信道反馈/信号交换,也降低了信道估计的复杂度。我们首先提出了基于交替优化的求解方法如下。

对于任何给定的相移 θ , 可以验证最大比传输(MRT)是问题(P1)的最优传输波束形成解决方案^[16], 即

$$\begin{aligned} \mathbf{f}_k^* &= \sqrt{p} \\ & \frac{(\mathbf{h}_{d,k} + \mathbf{G}_{1,k} \Phi_{1,k} \mathbf{h}_{1,k} + \mathbf{G}_{2,k} \Phi_{2,k} \mathbf{h}_{2,k} + \mathbf{G}_{1,k} \Phi_{1,k} \mathbf{H} \Phi_{2,k} \mathbf{h}_{2,k})^H}{\|\mathbf{h}_{d,k} + \mathbf{G}_{1,k} \Phi_{1,k} \mathbf{h}_{1,k} + \mathbf{G}_{2,k} \Phi_{2,k} \mathbf{h}_{2,k} + \mathbf{G}_{1,k} \Phi_{1,k} \mathbf{H} \Phi_{2,k} \mathbf{h}_{2,k}\|} \\ & \triangleq \mathbf{f}_{k\text{MRT}} \end{aligned} \quad (4)$$

对于任意给定的发射波束形成 \mathbf{f}_k , P1的目标函数满足以下不等式:

$$\begin{aligned} & \left| \mathbf{f}_k^H (\mathbf{h}_{d,k} + \mathbf{G}_{1,k} \Phi_{1,k} \mathbf{h}_{1,k} + \mathbf{G}_{2,k} \Phi_{2,k} \mathbf{h}_{2,k} + \mathbf{G}_{1,k} \Phi_{1,k} \mathbf{H} \Phi_{2,k} \mathbf{h}_{2,k}) \right| = \left| \mathbf{f}_k^H \mathbf{h}_{d,k} + \mathbf{f}_k^H \mathbf{G}_{1,k} \Phi_{1,k} \mathbf{h}_{1,k} + \right. \\ & \left. \mathbf{f}_k^H \mathbf{G}_{2,k} \Phi_{2,k} \mathbf{h}_{2,k} + \mathbf{f}_k^H \mathbf{G}_{1,k} \Phi_{1,k} \mathbf{H} \Phi_{2,k} \mathbf{h}_{2,k} \right| \leq \\ & \left| \mathbf{f}_k^H \mathbf{h}_{d,k} \right| + \left| \mathbf{f}_k^H \mathbf{G}_{1,k} \Phi_{1,k} \mathbf{h}_{1,k} \right| + \left| \mathbf{f}_k^H \mathbf{G}_{2,k} \Phi_{2,k} \mathbf{h}_{2,k} \right| + \\ & \left| \mathbf{f}_k^H \mathbf{G}_{1,k} \Phi_{1,k} \mathbf{H} \Phi_{2,k} \mathbf{h}_{2,k} \right| \end{aligned} \quad (5)$$

其中 $\mathbf{f}_k^H \mathbf{h}_{d,k}$ 和 $\mathbf{G}_{1,k} \Phi_{1,k} \mathbf{H} \Phi_{2,k} \mathbf{h}_{2,k}$ 均为常数项。当且仅当 $\arg(\mathbf{f}_k^H \mathbf{h}_{d,k}) = \arg(\mathbf{G}_{1,k} \Phi_{1,k} \mathbf{h}_{1,k}) = \arg(\mathbf{G}_{2,k} \Phi_{2,k} \mathbf{h}_{2,k}) = \arg(\mathbf{G}_{1,k} \Phi_{1,k} \mathbf{H} \Phi_{2,k} \mathbf{h}_{2,k}) = \varphi_0$ 时, 式(5)中的等式才成立, 其中 $\arg(\cdot)$ 表示复向量的分量相位。接下来, 证明总是存在一对解 $\Phi_{1,k}$ 、 $\Phi_{2,k}$, 满足(5)相等以及(3)中的相位约束。这里可以看出 $\Phi_{1,k}$ 、 $\Phi_{2,k}$ 耦合在一起, 没有办法同时进行处理。因此我们需要分两步对他们进行优化。

首先我们对 $\Phi_{1,k}$ 进行处理, 通过忽略常数项 $|\mathbf{f}_k^H \mathbf{h}_{d,k}|$ 和无关项 $|\mathbf{f}_k^H \mathbf{G}_{2,k} \Phi_{2,k} \mathbf{h}_{2,k}|$, 可以通过应用变量 $\mathbf{f}_k^H \mathbf{G}_{1,k} \Phi_{1,k} \mathbf{h}_{1,k} = \mathbf{v}_1^H \mathbf{a}_1$, 其中 $\mathbf{v}_1 = [e^{j\theta_1} \dots e^{j\theta_{N_1}}]^H$, $\mathbf{a}_1 =$

$\mathbf{f}_k^H \mathbf{G}_{1,k} \text{diag}(\mathbf{h}_{1,k})$; 将问题(P1)简化为

$$\begin{aligned} \text{(P1): } & \max_{\mathbf{v}_1} |\mathbf{v}_1^H \mathbf{a}_1| \\ \text{s.t. } & |\mathbf{v}_{n_1}| = 1, \forall N=1, \dots, N_1, \\ & \arg(\mathbf{v}_1^H \mathbf{a}_1) = \varphi_0 \end{aligned} \quad (6)$$

可以证明问题的最优解(P1)是由 $\mathbf{v}_1^* = \mathbf{e}^{j(\varphi_0 - \arg(\mathbf{f}_k^H \mathbf{G}_{1,k} \text{diag}(\mathbf{h}_{1,k})))}$ 给出的。因此,在IRS1处对应的第 n_1 个相移由式(7)给出

$$\theta_{n_1}^* = \varphi_0 - \arg(\mathbf{f}_k^H \mathbf{g}_{n_1}^H \mathbf{h}_{n_1,r}^H) = \varphi_0 - \arg(\mathbf{f}_k^H \mathbf{g}_{n_1}^H) - \arg(\mathbf{h}_{n_1,r}^H) \quad (7)$$

其中 $\mathbf{h}_{n_1,r}^H$ 是 \mathbf{h}_r^H 的第 n_1 个元素, $\mathbf{g}_{n_1}^H$ 是 $\mathbf{G}_{1,k}$ 的第 n_1 行向量。注意, $\mathbf{f}_k^H \mathbf{g}_{n_1}^H$ 结合了发射端的波束成形和 AP-IRS1 信道,因此可以被视为 IRS1 中第 n_1 个反射元素感知到的等效信道。同时式(7)可以看出若要实现最优解,IRS1 的第 n_1 个相移的设置应该满足以下条件:通过 AP-IRS1 和 IRS1-用户链路的信号相位与 AP-用户直接链路的信号相位对齐。此外,值得注意的是,所得到的相位 $\theta_{n_1}^*$ 与 $\mathbf{h}_{n_1,r}$ 的振幅无关。

接下来我们再处理 $\Phi_{2,k}$, 其优化步骤与 IRS1 完全一致。同样地,忽略常数项 $|\mathbf{f}_k^H \mathbf{h}_{d,k}|$ 和无关项 $|\mathbf{f}_k^H \mathbf{G}_{1,k} \Phi_{1,k} \mathbf{h}_{1,k}|$, 应用变量 $\mathbf{f}_k^H \mathbf{G}_{2,k} \Phi_{2,k} \mathbf{h}_{2,k} = \mathbf{v}_2^H \mathbf{a}_2$, 其中 $\mathbf{v}_2 = [\mathbf{e}^{j\theta_1} \dots \mathbf{e}^{j\theta_{N_2}}]^H$, $\mathbf{a}_2 = \mathbf{f}_k^H \mathbf{G}_{2,k} \text{diag}(\mathbf{h}_{2,k})$; 得到问题 P1''

$$\begin{aligned} \text{(P1''): } & \max_{\mathbf{v}_2} |\mathbf{v}_2^H \mathbf{a}_2| \\ \text{s.t. } & |\mathbf{v}_{n_2}| = 1, \forall N=1, \dots, N_2, \\ & \arg(\mathbf{v}_2^H \mathbf{a}_2) = \varphi_0 \end{aligned} \quad (8)$$

可以证明问题(P1'')的最优解是由 $\mathbf{v}_2^* = \mathbf{e}^{j(\varphi_0 - \arg(\mathbf{a}_2))} = \mathbf{e}^{j(\varphi_0 - \arg(\mathbf{f}_k^H \mathbf{G}_{2,k} \text{diag}(\mathbf{h}_{2,k})))}$ 给出的。因此,在IRS2处对应的第 n_2 个相移由式(9)给出

$$\begin{aligned} \theta_{n_2}^* &= \varphi_0 - \arg(\mathbf{f}_k^H \mathbf{g}_{n_2}^H \mathbf{h}_{n_2,r}^H) = \\ & \varphi_0 - \arg(\mathbf{f}_k^H) - \arg(\mathbf{g}_{n_2}^H \mathbf{h}_{n_2,r}^H) \end{aligned} \quad (9)$$

同样地,其中 $\mathbf{h}_{n_2,r}^H$ 是 \mathbf{h}_r^H 的第 n_2 个元素, $\mathbf{g}_{n_2}^H$ 是 $\mathbf{G}_{2,k}$ 的第 n_2 行向量。注意, $\mathbf{f}_k^H \mathbf{g}_{n_2}^H$ 结合了发射端的波束成形和 AP-IRS2 信道,因此可以被视为 IRS2 中第 n_2 个反射元素感知到的等效信道。同时式(9)可以看出为实现最优解,IRS2 的第 n_2 个相移的设置应该满足下面条件:通过 AP-IRS2 和 IRS2-用户链路的信号相位与通过 AP-用户直接链路的信号相位对齐。同样值得注意的是,所得到的相位 $\theta_{n_2}^*$ 与 $\mathbf{h}_{n_2,r}$ 的振幅无关。最后,我们用给定的 $\theta_{n_1}^*$ 、 $\theta_{n_2}^*$ 优化波束成形 \mathbf{f}_k^H 。在表1中详细给出了实现上述交替优化的分布式算法的步骤。

表1 算法步骤

Tab. 1 Steps of the algorithm	
步骤	具体内容
输入	$k, N_1, N_2, \mathbf{h}_{1,k}, \mathbf{h}_{2,k}, \mathbf{h}_{d,k}, \mathbf{G}_1, \mathbf{G}_2, \mathbf{H}, \sigma^2, p_k, \epsilon$ 和 L_{\max}
输出	$\mathbf{f}_k, \Phi_{1,k}$ 和 $\Phi_{2,k}$
1	初始化 $\Phi_{1,k}^{(0)}$ 和 $\Phi_{2,k}^{(0)}$, 设置 $m=1$;
2	重复:
3	给定 $\Phi_{1,k}^{(m-1)}$ 和 $\Phi_{2,k}^{(m-1)}$, 根据式(1)优化 $\mathbf{f}_k^{(m)}$;
4	给定 $\Phi_{2,k}^{(m-1)}$ 和 $\mathbf{f}_k^{(m)}$, 根据式(2)优化 $\Phi_{1,k}^{(m)}$;
5	给定 $\Phi_{1,k}^{(m)}$ 和 $\mathbf{f}_k^{(m)}$, 根据式(3)优化 $\Phi_{2,k}^{(m)}$;
6	更新 $m=m+1$;
7	直到 P1 中的目标值低于阈值 $\epsilon > 0$, 或 $m=L_{\max}$ 。

4 仿真结果与性能分析

本节通过仿真实验对提出的方案进行性能分析。本文假设 AP-IRS 信道由 LoS 链路主导,因此相应的信道矩阵 \mathbf{G} 的秩为 1, 其中行/列向量是线性相关的。然而,考虑到用户的移动性和复杂的传播环境(如室内),将独立瑞利衰落和 IRS 用户信道的路径损耗指数设置为 3。在本研究中,我们使用 AP 的信息传输速率作为性能度量指标,并考虑一个信息传输场景。在仿真中,AP 和用户的天线增益均为 0 dBi, 而 IRS 处各反射元件的天线增益均为 5 dBi。其他所需参数参考文献[17], 设置如下: $\epsilon = 10^{-4}$ 、 $\sigma^2 = -90$ dBm、 $\bar{p} = 5$ dBm、 $L_{\max} = 40$ 。

在仿真过程中采用了不同的用户调度方法,包括遍历(Transverses)、距离(Distance)、信道质量(Channel quality)、轮询(Round-Robin)等。这些用户调度方法的选择将直接影响所提出的联合设计方法的性能表现^[18]。不同的用户调度方法具有不同的优缺点,它们的选择将直接影响所提出的联合设计方法的性能表现。仿真中考虑了多个影响因素,如 IRS 反射单元数量、基站天线数量、用户数量、用户区域半径等,并对每种影响因素进行了分析。

4.1 计算复杂度分析

在本节中,我们将对双智能反射面(IRS)辅助的上行链路通信调度方案的计算复杂度进行详细分析。复杂度的计算主要集中在涉及复数乘法的三个步骤中。算法方案的复杂度主要源于求解欧几里得梯度的过程。首先,针对步骤3,计算复数乘法的次数的复杂度为 $O(M^2)$, 其中 M 表示涉及的复数的数量。在该步骤中,本文执行了多次复数乘法操作,因此复杂度与复数数量的平方成正比。步骤

4 和步骤 5 这两个步骤中,涉及到的计算主要是基于矩阵运算和计算向量的范数。对于步骤 4,其复杂度为 $O(N_1^2)$,其中 N_1 表示涉及的矩阵的维度。类似地,步骤 5 的复杂度为 $O(N_2^2)$,其中 N_2 表示另一个涉及的矩阵的维度。这些复杂度与涉及的矩阵维度的平方成正比。

假设我们进行 L 次迭代,则算法的整体复杂度为 $O[L(M^2 + N_1^2 + N_2^2)]$ 。这表示在 L 次迭代的过程中,我们需要考虑步骤 3、步骤 4 和步骤 5 的复杂度。总的计算复杂度取决于迭代次数 L 以及涉及的复数和矩阵的数量和维度。

即:复杂度计算:计算复数的乘法次数

步骤 3: $O(M^2)$

步骤 4: $O(N_1^2)$

步骤 5: $O(N_2^2)$

假设迭代次数: L 次

算法复杂度 $O[L(M^2 + N_1^2 + N_2^2)]$

4.2 IRS 反射单元总数目与传输速率的关系

图 2 展示了 IRS 反射单元数对系统信息传输速率的影响。根据仿真结果,随着 IRS 反射单元总数的增加,信息传输速率逐渐增加。这是因为更多的 IRS 反射单元提供了更多的反射链路,增加了能量和信息传输的机会。此外,遍历调度方法在多种调度方案中表现略优,因为遍历调度方法能够更好地利用多个 IRS 反射单元进行通信。当有两个 IRS 均参与通信时,信息传输速率均高于只有一个 IRS 参与通信的情况,而且离基站端较近的 IRS 可以实现更高的信息传输速率。因此,合理的 IRS 布置方式和用户调度方法可以有效提高信息传输速率。

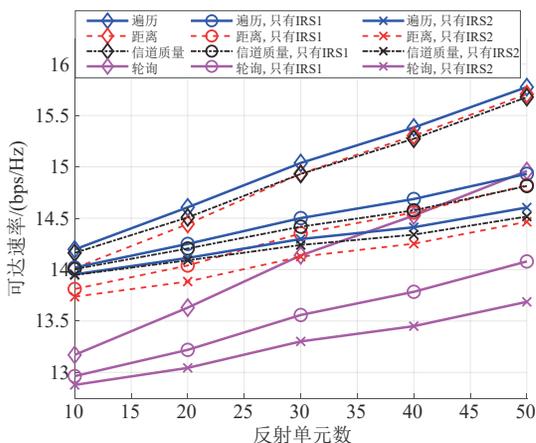


图 2 反射单元数与信息传输速率曲线图

Fig. 2 Number of Reflection Units vs. Information Transmission Rate Curve

4.3 基站天线数与传输速率的关系

图 3 显示了基站天线数 M 与系统信息传输速率呈正相关关系。结果显示,基站天线数与信息传输速率呈正相关关系。随着 M 的增加,IRS 可以为基站和无线设备之间能量和信息传输提供更多的反射链路,从而使系统的信息传输速率增加。遍历调度方法在各种调度方案中表现最佳,略优于信道质量调度和距离调度方法,而轮询调度方案的性能最差。这是因为遍历调度方法能够更好地利用多个基站天线和 IRS 反射单元进行通信。

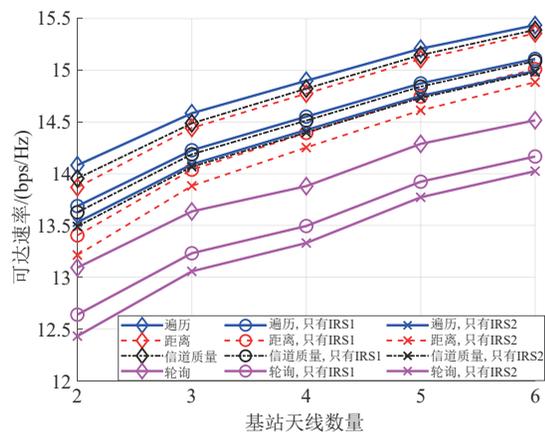


图 3 基站天线数目与信息传输速率曲线图

Fig. 3 Number of Base Station Antennas vs. Information Transmission Rate Curve

4.4 用户个数与传输速率的关系

图 4 展示了无线用户数量 K 对多用户通信系统信息传输速率的影响。结果表明,随着无线用户数量 K 的增加,系统信息传输速率也随之增加。这是

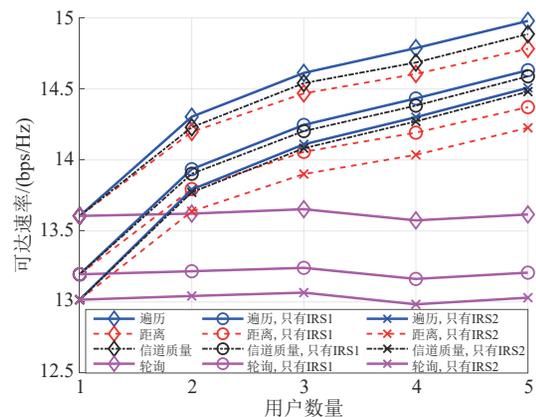


图 4 用户数与信息传输速率曲线图

Fig. 4 Number of Users vs. Information Transmission Rate Curve

因为无线设备所能收集的信号能量随着设备数量的增多而增加,从而提高了系统信息传输速率。同时,遍历调度方法在所有用户数量下表现出最佳性能,并且其优势逐渐扩大。轮询调度方法不随用户数量的增加而改善,其曲线趋于平稳。这是因为轮询调度方法没有考虑到用户的空间分布信息,无法有效利用多个天线和反射单元进行通信。

4.5 用户区域半径与信息传输速率的关系

从图5可知,随着用户区域半径的增大,系统信息传输速率也随之增加。这是因为用户区域半径的增大增加了覆盖范围,使得更多的用户能够受益于多个基站天线和IRS反射单元的通信。然而,轮询调度方法的性能并没有得到明显的提高,甚至略有下降。这是因为轮询调度方法没有充分考虑用户的空间分布,无法有效地利用多个天线和反射单元进行通信。

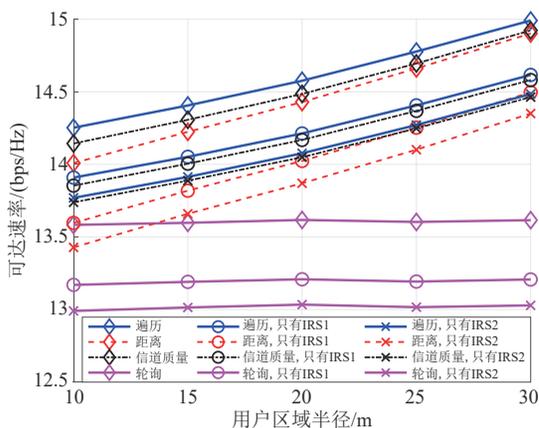


图5 用户区域半径与信息传输速率曲线图

Fig. 5 User Area Radius vs. Information Transmission Rate Curve

通过对图2至图5的定量分析,我们可以进一步理解所提出的方案对系统性能的改进。在不同情况下,合理的IRS布置方式和用户调度方法可以充分利用多个天线和反射单元,提高信息传输速率。这验证了所提算法的有效性,并展示了其在理论上的创新贡献。

5 结论

本文主要研究了基于双智能反射表面(IRS)辅助通信的上行链路多用户调度问题,并提出了一种联合用户调度和被动波束成形设计的方法,旨在最大化无线通信系统的信息传输速率。该模型对上行链路中多个用户进行调度,接着再对双IRS进行

波束成形设计。通过采用低复杂度的分布式迭代算法,联合优化用户侧的功率分配和波束成形,以及基站和IRS的被动波束成形,实现了系统性能的优化。实验结果验证了所提出方法在多用户上行调度模型中的适用性,并展示了双IRS合作系统在最大化信息传输速率和提高多用户有效信道秩方面的优越性。基于双IRS辅助的上行链路多用户通信方案可以广泛应用于各种需要高效、可靠通信的场景,如大型企业办公楼、会议中心、机场、体育场馆等。在这些场景中,存在大量用户同时进行上行通信的需求,而传统系统常常面临容量限制和干扰问题。通过引入双IRS辅助,我们可以充分利用波束成形和信号反射的优势,提高系统的传输效率和抗干扰能力,从而满足多用户通信的需求。因此,该研究对无线通信技术的发展具有重要意义,为多用户通信系统的性能提升和优化提供了新的途径,有助于推动无线通信技术在各种实际应用场景中的应用和发展。

参考文献

- [1] BASAR E, DI RENZO M, DE ROSNY J, et al. Wireless communications through reconfigurable intelligent surfaces[J]. IEEE Access, 2019, 7: 116753-116773.
- [2] WU Qingqing, ZHANG Rui. Towards smart and reconfigurable environment: Intelligent reflecting surface aided wireless network[J]. IEEE Communications Magazine, 2020, 58(1): 106-112.
- [3] 马好好, 解培中, 李汀. IRS辅助的安全通信系统波束成形嵌套优化算法[J]. 信号处理, 2022, 38(8): 1728-1736.
MA Haohao, XIE Peizhong, LI Ting. Beamforming nested optimization algorithm for IRS-assisted secure communication systems[J]. Journal of Signal Processing, 2022, 38(8): 1728-1736. (in Chinese)
- [4] WU Qingqing, ZHANG Shuowen, ZHENG Beixiong, et al. Intelligent reflecting surface-aided wireless communications: A tutorial[J]. IEEE Transactions on Communications, 2021, 69(5): 3313-3351.
- [5] GUO Huayan, LIANG Yingchang, CHEN Jie, et al. Weighted sum-rate maximization for reconfigurable intelligent surface aided wireless networks [J]. IEEE Transactions on Wireless Communications, 2020, 19(5): 3064-3076.
- [6] WU Qingqing, ZHANG Rui. Intelligent reflecting surface enhanced wireless network via joint active and passive beamforming[J]. IEEE Transactions on Wireless Communications, 2019, 18(11): 5394-5409.

- [7] ZHENG Beixiong, ZHANG Rui. IRS meets relaying: Joint resource allocation and passive beamforming optimization [J]. IEEE Wireless Communications Letters, 2021, 10(9): 2080-2084.
- [8] HUANG Kewen, WANG Huiming. Passive beamforming for IRS aided wireless networks [J]. IEEE Wireless Communications Letters, 2020, 9(12): 2035-2039.
- [9] 张雷, 王玉, 田建杰, 等. 基于 IRS 辅助的 MIMO 车联网系统联合波束成形设计 [J]. 通信学报, 2023, 44(2): 59-69.
ZHANG Lei, WANG Yu, TIAN Jianjie, et al. Joint beamforming design for IRS-aided MIMO Internet of vehicles system [J]. Journal on Communications, 2023, 44(2): 59-69. (in Chinese)
- [10] 李中捷, 熊吉源, 高伟, 等. 分布式 IRS 辅助毫米波 MU-MISO 系统联合波束成形设计 [J]. 通信学报, 2022, 43(4): 216-226.
LI Zhongjie, XIONG Jiyuan, GAO Wei, et al. Joint beamforming design for distributed IRS assisted millimeter wave MU-MISO system [J]. Journal on Communications, 2022, 43(4): 216-226. (in Chinese)
- [11] 徐顺清, 石晶林, 周一青, 等. 基于波束训练的大规模 MIMO 多用户调度算法 [J]. 高技术通讯, 2022, 32(3): 248-260.
XU Shunqing, SHI Jinglin, ZHOU Yiqing, et al. Large-scale MIMO multi-user scheduling algorithm based on beam training [J]. Chinese High Technology Letters, 2022, 32(3): 248-260. (in Chinese)
- [12] 任静. 基于毫米波大规模 MIMO 的用户调度问题 [J]. 空军工程大学学报(自然科学版), 2020, 21(6): 60-65.
REN Jing. Research on user scheduling problems based on millimeter wave massive MIMO [J]. Journal of Air Force Engineering University (Natural Science Edition), 2020, 21(6): 60-65. (in Chinese)
- [13] 何世文, 袁军, 安振宇, 等. 基于图神经网络的联合用户调度与波束成形优化算法 [J]. 通信学报, 2022, 43(7): 73-84.
HE Shiwen, YUAN Jun, AN Zhenyu, et al. GNN-based optimization algorithm for joint user scheduling and beamforming [J]. Journal on Communications, 2022, 43(7): 73-84. (in Chinese)
- [14] ZHENG Beixiong, YOU Changsheng, ZHANG Rui. Efficient channel estimation for double-IRS aided multi-user MIMO system [J]. IEEE Transactions on Communications, 2021, 69(6): 3818-3832.
- [15] ZHENG Beixiong, YOU Changsheng, ZHANG Rui. Double-IRS assisted multi-user MIMO: Cooperative passive beamforming design [J]. IEEE Transactions on Wireless Communications, 2021, 20(7): 4513-4526.
- [16] TSE D, VISWANATH P. Fundamentals of Wireless Communication [M]. Cambridge: Cambridge University Press, 2005.
- [17] WU Qingqing, ZHANG Rui. Intelligent reflecting surface enhanced wireless network: joint active and passive beamforming design [C] // 2018 IEEE Global Communications Conference (GLOBECOM). Abu Dhabi, United Arab Emirates. IEEE, 2019: 1-6.
- [18] 晏蕾琴. 毫米波大规模 MIMO 系统中预编码及用户调度技术的研究 [D]. 北京: 北京邮电大学, 2019.
YAN Leiqin. Research on precoding and user scheduling in millimeter-wave massive MIMO system [D]. Beijing: Beijing University of Posts and Telecommunications, 2019. (in Chinese)

作者简介



柳翠女, 2001年生, 安徽芜湖人。苏州大学电子信息学院硕士研究生, 主要研究方向为智能反射面、协作通信、物理层安全技术等。
E-mail: 20214228041@stu.suda.edu.cn



芮贤义男, 1981年生, 江苏南京人。毕业于上海交通大学电子系并获得博士学位, 苏州大学电子信息学院信息工程系副教授, 主要研究方向为智能反射面、协作通信、物理层安全技术等。
E-mail: xyru@suda.edu.cn

(责任编辑: 边熙淳)