

激光与光电子学进展

基于协作关系的智能反射面通信增强模型

韩博宇^{1,2,3}, 梁旭文¹, 谢卓辰^{1*}, 杜旭^{2,3}, 贺晓赫^{1,2,3}

¹中国科学院微小卫星创新研究院, 上海 201203;

²中国科学院大学, 北京 100049;

³上海科技大学信息学院, 上海 201210

摘要 智能反射面(IRS)是一种集成大量低成本、低损耗、可重构无源反射元件的平面,可以智能地配置信号传播,提高无线网络的频谱效率和能量效率。即在获知用户位置后,利用优化算法计算信号的反射相位,提高用户接收到的功率。提出了一种在室内小范围环境下具有协作关系的双 IRS 模型,利用两个具有协作关系的 IRS 增强基站与用户间直连链路不可用时用户接收到的信号功率。用两个 IRS 的移相矩阵作为优化变量,最大化用户接收到的信号功率。该问题的建模为非凸网络优化问题,采用基于内点优化的求解器进行仿真,同时与无协作关系模型的性能进行了对比。对比结果表明,在室内小范围环境下,具有协作关系的模型比无协作关系模型的增强效果更好。

关键词 光纤光学; 网络优化; 智能反射面; 协作关系; 非凸优化

中图分类号 TN929.5

文献标志码 A

doi: 10.3788/LOP202259.2306003

Communication Enhancement Model of Intelligent Reflecting Surface Based on Cooperative Relationship

Han Boyu^{1,2,3}, Liang Xuwen¹, Xie Zhuochen^{1*}, Du Xu^{2,3}, He Xiaohe^{1,2,3}

¹Innovation Academy for Microsatellite, Chinese Academy of Sciences, Shanghai 201203, China;

²University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China;

³School of Information Science and Technology, ShanghaiTech University, Shanghai 201210, China

Abstract Intelligent reflecting surface (IRS) is a plane that integrates a large number of low-cost, low loss, reconfigurable passive reflectors. It could intelligently configure signal propagation and improve the spectrum efficiency and energy efficiency of wireless network. Specifically, after the position of the user is known, the reflected phase of the signal is calculated by using the optimization algorithm to enhance the power received by the user. This paper proposes a dual IRS model with cooperative relationship in indoor small-scale environment, which uses two IRSs with cooperative relationship to enhance the signal power received by the user when the direct link between the base station and the user is unavailable. The phase shift matrixes of the two IRS are used as the optimization variables to maximize the signal power received by the user. The problem is a nonconvex network optimization problem, which is solved by solver based on interior point optimization, and compared with the model without cooperation at the same time. The comparison results show that the model with cooperation relationship has a better enhancement effect than the model without cooperation relationship in small-scale environment.

Key words fiber optics; network optimization; intelligent reflecting surface; cooperative relationship; nonconvex optimization

OCIS codes 060.4256; 060.2330

收稿日期: 2021-02-01; 修回日期: 2021-03-01; 录用日期: 2021-03-23

通信作者: *xiezc.ac@hotmail.com

1 引言

目前,采用大规模多输入多输出(MIMO)网络、超密网络、毫米波等关键技术的5G无线网络已经实现了至少千亿级的设备连接以及1000倍的网络容量增长^[1]。但随之而来的是高复杂性、高昂的硬件成本以及巨大的能量消耗。如在超密网络中大量部署基站不仅会增加硬件成本,还会加剧网络干扰问题。此外,将大规模输入输出从6 GHz以下扩展到毫米波频带通常需要更复杂的信号处理和更耗能、更昂贵的硬件。因此,研究下一代创新、节能、低成本的无线网络技术是当务之急^[2]。

智能反射面(IRS)作为一种新兴、高效技术,可通过补偿无线信号的传播路径收集溢散能量,提高无线网络的频谱效率和能量效率^[3-4]。具体来说,IRS是一种由大量可重构无源无线电元件构成的平面阵列,具有非自然特性,其中的每个元件都可以根据不同的信道条件独立反射入射信号^[5-6],并智能调节反射角度,从而提高无线链路的灵活性和功率增益^[7]。由于IRS采用了屏蔽层,使电磁波经反射面反射后的能量损失非常低,且几乎不会产生额外的热噪声。同时,IRS是小规模器件,可以被灵活部署和移除。这些优点使部署IRS成为提高下一代无线网络性能的有效解决方案,特别是在体育馆、购物中心、展览中心和机场等高密度用户的室内场景中^[8]。已有研究主要集中在利用IRS增强无线波束形成设计方面^[9]。Wu等^[10]研究了一种利用单个IRS增强点对点多输入单输出(MISO)无线系统的问题。通过联合优化基站处有源天线阵列的发射波束形成以及IRS中被动反射波束形成,最大限度地提高用户接收到的信号功率。Fu等^[11]利用单个IRS增强的非正交多址网络,通过联合优化基站处的发射波束形成器及IRS处的移相矩阵,最小化下行链路的传输功率。Cao等^[12]利用多个IRS增强多用户毫米波系统,通过优化主被动波束的形成最大化多用户接收到的信号功率。上述研究表明,通过部署IRS可以保证在用户接收信号功率一定时,最小化基站的信号发射功率,或在基站信号发射功率一定时,最大化用户的接收信号功率。

现有模型通常使用单个IRS或多个无协作关系的IRS^[13-18],没有考虑任意两个IRS间的协作过程,但实际中每两个IRS间也会有信号的反射,且在小范围环境内的作用明显。因此,本文着重研究在室

内小范围环境下用户接收信号功率的增强问题。该问题可以建模成一个非凸优化问题。其中,多天线基站在两个协作IRS的增强下服务于单天线用户。为了更好地体现IRS的增强效果,假设基站到用户的传输路径被遮挡,信号不具备直接传输条件,用户仅能接收反射自两个协作IRS的信号。通过优化两个协作IRS移相器的相位,最大限度地提高用户接收的信号功率。一般来说,两个IRS移相器的相位依赖于基站到IRS的信道、IRS与IRS之间的信道和IRS到用户的信道。在算法部分,针对IRS模型建立的问题通常是非凸的,采取的解决方案是将非凸问题经半正定规划松弛^[19]放缩为凸问题^[20],并使用凸优化求解器CVX(Matlab Software for Disciplined Convex Programming)求解^[21],但未对该过程中产生的误差进行量化分析。针对该问题,本方案基于内点优化(IPOPT)的求解器CasADi^[22]解决光滑的非凸优化问题,避免了放缩过程产生的误差。

2 系统模型与问题建模

2.1 系统模型

图1为具有协作关系的双IRS增强MISO无线通信系统,该系统由一个配备均匀天线阵列的基站(BS)、两个IRS和一个单天线用户组成。其中,基站由 m 个天线构成,两个IRS分别由 n_1 (IRS-1)、 n_2 (IRS-2)个无源反射元件构成。IRS单元的反射模式由智能控制器进行协调控制。两个IRS分别放置在呈 90° 的任意垂直墙和天花板上,基站、双IRS、单天线用户的位置是固定的。

假设所有信道都经历了准静态平稳衰落,根据3D Saleh-Valenzuela信道^[23]生成基站分别到两个

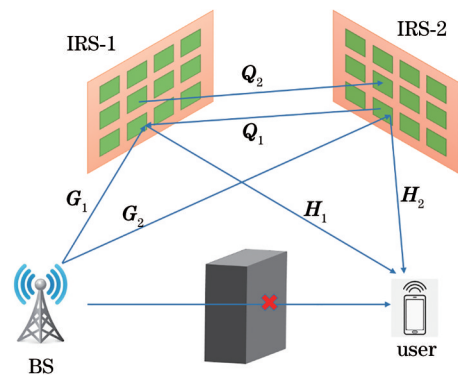


图1 有协作关系双IRS增强的MISO无线通信系统
Fig. 1 MISO wireless communication system enhanced by two IRS with cooperative relationship

IRS 的信道、IRS-1 与 IRS-2 之间的信道以及两个 IRS 分别到用户的信道。其中,基站到 IRS-1 的信道用维度为 $n_1 \times m$ 的矩阵 \mathbf{G}_1 表示,基站到 IRS-2 的信道用维度为 $n_2 \times m$ 的矩阵 \mathbf{G}_2 表示,IRS-1 到 IRS-2 的信道用维度为 $n_2 \times n_1$ 的矩阵 \mathbf{Q}_2 表示,IRS-2 到 IRS-1 的信道用维度为 $n_1 \times n_2$ 的矩阵 \mathbf{Q}_1 (矩阵 \mathbf{Q}_2 的转置) 表示,IRS-1 到用户的等效信道用维度为 $1 \times n_1$ 的矩阵 \mathbf{H}_1 表示,IRS-2 到用户的等效信道用维度为 $1 \times n_2$ 的矩阵 \mathbf{H}_2 表示。实验场景中基站到用户的直接传输路径受障碍物遮挡,基站发射的信号仅通过两个 IRS 的反射传输到用户,因此无需生成从基站到用户的信道矩阵。移相矩阵变量分别用维度为 $n_1 \times n_1$ 的矩阵 Φ_1 和维度为 $n_2 \times n_2$ 的矩阵 Φ_2 表示,可表示为

$$\Phi_1 = \text{diag}(\varphi_{1,1}, \dots, \varphi_{1,n_1}), \quad (1)$$

$$\Phi_2 = \text{diag}(\varphi_{2,1}, \dots, \varphi_{2,n_2}), \quad (2)$$

式中, $\text{diag}(\cdot)$ 为向量 \mathbf{a} 的对角线矩阵, $\varphi_{i,k} = \exp(j\theta_{i,k})$, $\theta_{i,k} \in [0, \pi]$ 为第 i 个反射面的第 k 维入射信号相移量。信号在每个 IRS 上的反射操作类似于将其与相应的移相矩阵相乘,然后反射到用户。若基站的发射信号是维度为 $m \times 1$ 的矩阵 \mathbf{x} ,则在单个 IRS 的反射作用下用户接收到的信号可表示为^[24]

$$\mathbf{y} = \mathbf{H}\Phi\mathbf{G}\mathbf{x} + \mathbf{w}, \quad (3)$$

式中, \mathbf{w} 为用户附近均值为 0, 方差为 σ^2 的加性高斯白噪声。则用户接收到的信号功率可表示为

$$P = \|\mathbf{H}\Phi\mathbf{G}\mathbf{x}\|_2^2. \quad (4)$$

2.2 问题建模

建立无协作关系双 IRS 模型的原理:根据用户接收到的信号功率模型推导出用户接收到的总功率,忽略基站到用户的直传信号,得到来自 IRS-1 和 IRS-2 的信号功率 P_1, P_2 为

$$P_1 = \|\mathbf{H}_1\Phi_1\mathbf{G}_1\mathbf{x}\|_2^2, \quad (5)$$

$$P_2 = \|\mathbf{H}_2\Phi_2\mathbf{G}_2\mathbf{x}\|_2^2. \quad (6)$$

为了最大化用户接收到的总功率 (P_1 和 P_2 的和),将优化变量设置为两个 IRS 的移相矩阵 Φ_1 和 Φ_2 。因此,无协作关系的双 IRS 问题建模可表示为

$$\max_{\Phi_1, \Phi_2} P_1 + P_2. \quad (7)$$

假设基站发射信号是一个常量,且尽可能大,以保证用户接收到足够功率的信号。因此,在后续问题模型中不再考虑基站的发射信号。简化后的信号功率 Z_1, Z_2 可表示为

$$Z_1 = \|\mathbf{H}_1\Phi_1\mathbf{G}_1\|_2^2, \quad (8)$$

$$Z_2 = \|\mathbf{H}_2\Phi_2\mathbf{G}_2\|_2^2, \quad (9)$$

简化后的无协作关系双 IRS 问题是光滑且非凸的,可通过标准的 CasADi 求解器得到有效的解,可表示为

$$\max_{\Phi_1, \Phi_2} Z_1 + Z_2. \quad (10)$$

建立有协作关系双 IRS 模型的原理:每个 IRS 在接收到基站发射信号的同时,也会接收到另一个 IRS 的反射信号,两路信号叠加后共同反射给用户。两个 IRS 被放置在合适的位置后,不再发生变化。忽略基站到用户的直传信道,根据无协作关系双 IRS 模型推导出用户接收到来自 IRS-1 和 IRS-2 的信号功率 P_1 和 P_2 ,可表示为

$$P_1 = \|\mathbf{H}_1\mathbf{M}_1\mathbf{x}\|_2^2, \quad (11)$$

$$P_2 = \|\mathbf{H}_2\mathbf{M}_2\mathbf{x}\|_2^2, \quad (12)$$

式中, \mathbf{M}_1 和 \mathbf{M}_2 分别为维度为 $n_1 \times m$ 和 $n_2 \times m$ 的中间变量,具体表现为移相矩阵与 IRS-1 或 IRS-2 接收到的总信号信道乘积,可表示为

$$\mathbf{M}_1 = \Phi_1(\mathbf{G}_1 + \mathbf{Q}_1\mathbf{M}_2), \quad (13)$$

$$\mathbf{M}_2 = \Phi_2(\mathbf{G}_2 + \mathbf{Q}_2\mathbf{M}_1). \quad (14)$$

为了最大化用户接收到的信号总功率,将优化变量设置为两个 IRS 的移相矩阵 Φ_1, Φ_2 及中间变量 $\mathbf{M}_1, \mathbf{M}_2$,从而将有协作关系的双 IRS 问题建模为

$$\max_{\Phi_1, \Phi_2, \mathbf{M}_1, \mathbf{M}_2} P_1 + P_2,$$

$$\text{s.t. } \mathbf{M}_1 = \Phi_1(\mathbf{G}_1 + \mathbf{Q}_1\mathbf{M}_2),$$

$$\mathbf{M}_2 = \Phi_2(\mathbf{G}_2 + \mathbf{Q}_2\mathbf{M}_1). \quad (15)$$

忽略基站的发射信号常量,得到简化后的 P_1, P_2 为

$$Z_1 = \|\mathbf{H}_1\mathbf{M}_1\|_2^2, \quad (16)$$

$$Z_2 = \|\mathbf{H}_2\mathbf{M}_2\|_2^2. \quad (17)$$

最终得到有协作关系的双 IRS 问题同样是光滑且非凸的,可通过标准的 CasADi 求解器得到有效的解,可表示为

$$\max_{\Phi_1, \Phi_2, \mathbf{M}_1, \mathbf{M}_2} Z_1 + Z_2,$$

$$\text{s.t. } \mathbf{M}_1 = \Phi_1(\mathbf{G}_1 + \mathbf{Q}_1\mathbf{M}_2),$$

$$\mathbf{M}_2 = \Phi_2(\mathbf{G}_2 + \mathbf{Q}_2\mathbf{M}_1). \quad (18)$$

3 基于 CasADi 的模型求解

为了解决 CasADi 求解器无法识别虚数的问题,将上述两个 IRS 模型分别按实虚部重新进行拆

分建模。

3.1 无协作关系的双 IRS 模型

对无协作关系的双 IRS 模型进行实虚部拆分, 需要拆分的矩阵有基站到两个 IRS 的信道 G_1, G_2 , 两个 IRS 的移相矩阵 Φ_1, Φ_2 , 两个 IRS 到用户的信道 H_1, H_2 , 可表示为

$$G_1 = G_{1r} + jG_{1i}, G_2 = G_{2r} + jG_{2i}, \quad (19)$$

$$\Phi_1 = \Phi_{1r} + j\Phi_{1i}, \Phi_2 = \Phi_{2r} + j\Phi_{2i}, \quad (20)$$

$$H_1 = H_{1r} + jH_{1i}, H_2 = H_{2r} + jH_{2i}, \quad (21)$$

式中, 下标 r 为实部, i 为虚部, $j = \sqrt{-1}$ 为虚数。将拆分好的矩阵代入无协作关系的双 IRS 模型, 得到实部表达式为

$$Z_{1r} = \left\| H_{1r}\Phi_{1r}G_{1r} - H_{1i}\Phi_{1i}G_{1r} - H_{1r}\Phi_{1i}G_{1i} - H_{1i}\Phi_{1r}G_{1i} \right\|_2^2, \quad (22)$$

$$Z_{2r} = \left\| H_{2r}\Phi_{2r}G_{2r} - H_{2i}\Phi_{2i}G_{2r} - H_{2r}\Phi_{2i}G_{2i} - H_{2i}\Phi_{2r}G_{2i} \right\|_2^2, \quad (23)$$

虚部表达式为

$$Z_{1i} = \left\| H_{1r}\Phi_{1r}G_{1i} - H_{1i}\Phi_{1i}G_{1i} + H_{1r}\Phi_{1i}G_{1r} + H_{1i}\Phi_{1r}G_{1r} \right\|_2^2, \quad (24)$$

$$Z_{2i} = \left\| H_{2r}\Phi_{2r}G_{2i} - H_{2i}\Phi_{2i}G_{2i} + H_{2r}\Phi_{2i}G_{2r} + H_{2i}\Phi_{2r}G_{2r} \right\|_2^2, \quad (25)$$

最终, 经拆分后的无协作关系双 IRS 模型可表示为

$$\max_{\Phi_1, \Phi_2} Z_{1r} + Z_{1i} + Z_{2r} + Z_{2i}. \quad (26)$$

3.2 有协作关系的双 IRS 模型

对有协作关系的双 IRS 模型进行实虚部拆分, 除了无协作关系模型部分拆好的矩阵, 还需拆分的有两个 IRS 相互的信道 Q_1, Q_2 以及两个 IRS 接收到的总信号信道叠加矩阵 M_1, M_2 , 可表示为

$$Q_1 = Q_{1r} + jQ_{1i}, Q_2 = Q_{2r} + jQ_{2i}, \quad (27)$$

$$M_1 = M_{1r} + jM_{1i}, M_2 = M_{2r} + jM_{2i}, \quad (28)$$

将拆分好的矩阵代入有协作关系的双 IRS 问题模型, 得到实部表达式为

$$Z_{1r} = \left\| H_{1r}M_{1r} - H_{1i}M_{1i} \right\|_2^2, \quad (29)$$

$$Z_{2r} = \left\| H_{2r}M_{2r} - H_{2i}M_{2i} \right\|_2^2, \quad (30)$$

$$M_{1r} = \Phi_{1r}G_{1r} - \Phi_{1i}G_{1i} + \Phi_{1r}Q_{1r}M_{2r} - \Phi_{1r}Q_{1i}M_{2i} - \Phi_{1i}Q_{1i}M_{2r} - \Phi_{1i}Q_{1r}M_{2i}, \quad (31)$$

$$M_{2r} = \Phi_{2r}G_{2r} - \Phi_{2i}G_{2i} + \Phi_{2r}Q_{2r}M_{1r} - \Phi_{2r}Q_{2i}M_{1i} - \Phi_{2i}Q_{2i}M_{1r} - \Phi_{2i}Q_{2r}M_{1i}, \quad (32)$$

虚部表达式为

$$Z_{1i} = \left\| H_{1r}M_{1i} + H_{1i}M_{1r} \right\|_2^2, \quad (33)$$

$$Z_{2i} = \left\| H_{2r}M_{2i} + H_{2i}M_{2r} \right\|_2^2, \quad (34)$$

$$M_{1i} = \Phi_{1i}G_{1r} + \Phi_{1r}G_{1i} + \Phi_{1i}Q_{1r}M_{2r} - \Phi_{1i}Q_{1i}M_{2i} + \Phi_{1r}Q_{1i}M_{2r} + \Phi_{1r}Q_{1r}M_{2i}, \quad (35)$$

$$M_{2i} = \Phi_{2i}G_{2r} + \Phi_{2r}G_{2i} + \Phi_{2i}Q_{2r}M_{1r} - \Phi_{2i}Q_{2i}M_{1i} + \Phi_{2r}Q_{2i}M_{1r} + \Phi_{2r}Q_{2r}M_{1i}, \quad (36)$$

最终, 经拆分实虚部后有协作关系的双 IRS 模型可表示为

$$\begin{aligned} & \max_{\Phi_1, \Phi_2, M_{1r}, M_{1i}, M_{2r}, M_{2i}} Z_{1r} + Z_{1i} + Z_{2r} + Z_{2i}, \\ \text{s.t. } & M_{1r} = \Phi_{1r}G_{1r} - \Phi_{1i}G_{1i} + \Phi_{1r}Q_{1r}M_{2r} - \Phi_{1r}Q_{1i}M_{2i} - \Phi_{1i}Q_{1i}M_{2r} - \Phi_{1i}Q_{1r}M_{2i}, \\ & M_{1i} = \Phi_{1i}G_{1r} + \Phi_{1r}G_{1i} + \Phi_{1i}Q_{1r}M_{2r} - \Phi_{1i}Q_{1i}M_{2i} + \Phi_{1r}Q_{1i}M_{2r} + \Phi_{1r}Q_{1r}M_{2i}, \\ & M_{2r} = \Phi_{2r}G_{2r} - \Phi_{2i}G_{2i} + \Phi_{2r}Q_{2r}M_{1r} - \Phi_{2r}Q_{2i}M_{1i} - \Phi_{2i}Q_{2i}M_{1r} - \Phi_{2i}Q_{2r}M_{1i}, \\ & M_{2i} = \Phi_{2i}G_{2r} + \Phi_{2r}G_{2i} + \Phi_{2i}Q_{2r}M_{1r} - \Phi_{2i}Q_{2i}M_{1i} + \Phi_{2r}Q_{2i}M_{1r} + \Phi_{2r}Q_{2r}M_{1i} \end{aligned} \quad (37)$$

4 数值仿真结果及分析

实验环境: 系统为 Windows 10 64 位操作系统, Intel(R) Core(TM) i5-8400, CPU 2.8 GHz,

内存为 16.0 GB, Matlab 版本为 R2018b, 求解器为 CasADi-v3.4.5 中的 IPOPT。由于实验重点考虑的是小范围室内场景, 因此在仿真中固定基站、双 IRS 以及用户的相对位置, 预设两个 IRS 间的

距离为 1 m, 随机生成 5 次、10 次、15 次、20 次信道, 仿真得到无协作关系与有协作关系双 IRS 模型中用户接收到的信号功率如表 1 所示。可以发

现, 在小范围室内场景下, 相比无协作关系的双 IRS 模型, 有协作关系双 IRS 模型的性能有明显提升。

表 1 两种 IRS 模型中用户接收到的信号总功率

Table 1 Total power of the signal received by the user in two IRS models

Generation times	5	10	15	20
Collaborative	8.5479×10^{-10}	4.4324×10^{-10}	3.1811×10^{-10}	2.6135×10^{-10}
Non-collaborative	7.0616×10^{-10}	3.6867×10^{-10}	2.6726×10^{-10}	2.2443×10^{-10}

为了得到一个性能更优的有协作关系双 IRS 模型, 还需进一步验证该协作模型的有效作用范围。固定基站、双 IRS 以及用户的相对位置, 将两个 IRS 之间的距离从 1 m 逐渐增大到 100 m 时, 仿真得到用户接收信号功率随双 IRS 间距的变化曲线如图 2 所示。可以发现, 随着两个 IRS 间距离的增加, 两种模型中用户接收到的信号功率会越来越接近, 有协作关系双 IRS 模型的性能提升随着距离的增长越来越弱。当两个 IRS 之间的距离从 1 m 逐渐增加到 10 m 时, 性能提升从 30% 下降到 3%; 当两个 IRS 之间的距离从 10 m 增加到 50 m 时, 性能提升从 3% 下降到 0.65%, 此时两模型的增强效果逐渐接近; 当两个 IRS 之间的距离从 50 m 增加到 100 m 时, 性能提升从 0.65% 下降到 0.32%, 两模型的增强效果几乎相同。

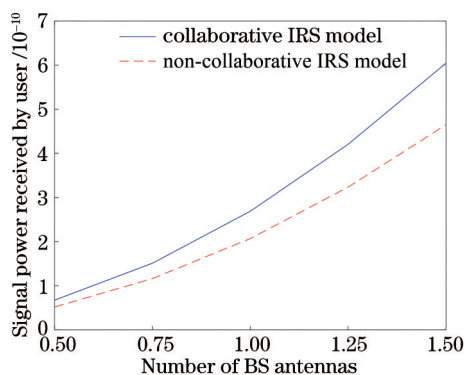


图 3 用户接收的信号功率随基站天线数目的变化曲线

Fig. 3 Change curve of the signal power received by the user with the number of base station antennas

30% 左右, 这表明天线数目的变化不会对有协作关系 IRS 模型有额外的性能提升或下降。但随着天线数目的变化, 有协作关系的 IRS 模型能保持稳定的性能提升, 验证了该模型的创新性。

5 结 论

网络通信在有障碍物遮挡的环境下, 用户和基站之间的连接会受阻, IRS 可提高无线网络的覆盖范围, 且在小范围环境下多 IRS 之间的协作关系对网络性能的影响比较明显, 因此, 结合实际情况创新性地提出了一种有协作关系的双 IRS 模型。通过将两个 IRS 的移相矩阵作为优化变量, 最大化增强点对点 MISO 系统中用户接收到的信号功率。为了体现有协作关系 IRS 模型性能的提升效果, 对无协作关系和有协作关系的双 IRS 问题进行了仿真对比, 并利用 CasADi 求解器求解。仿真结果表明, 在 10 m 以内的近距离环境中, 相比无协作关系的双 IRS 模型, 有协作关系的双 IRS 模型能显著提高用户接收到的信号功率。

参 考 文 献

[1] Boccardi F, Heath R W, Lozano A, et al. Five disruptive technology directions for 5G[J]. IEEE

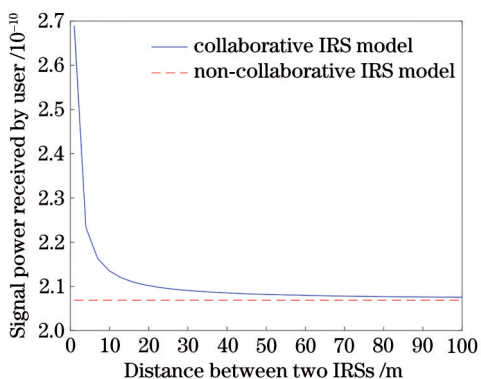


图 2 用户接收的信号功率随 IRS 间距的变化曲线

Fig. 2 Change curve of the signal power received by the user with the IRS interval

为了验证天线数目对有协作关系 IRS 模型性能的影响, 分别取原始实验天线数目的 0.5、0.75、1、1.25、1.5 倍进行实验, 仿真得到固定基站、双 IRS 以及用户的相对位置且双 IRS 间距离为 1 m 时的实验结果如图 3 所示。可以发现, 当天线数目以步长 0.25 从 0.5 倍增加到 1.5 倍时, 有协作关系 IRS 模型相比无协作关系 IRS 模型的性能提升稳定保持在

- Communications Magazine, 2014, 52(2): 74-80.
- [2] Wu Q Q, Li G Y, Chen W, et al. An overview of sustainable green 5G networks[J]. IEEE Wireless Communications, 2017, 24(4): 72-80.
- [3] Renzo M D, Debbah M, Phan-Huy D T, et al. Smart radio environments empowered by reconfigurable AI meta-surfaces: an idea whose time has come[J]. EURASIP Journal on Wireless Communications and Networking, 2019, 2019(1): 129.
- [4] Liang Y C, Long R Z, Zhang Q Q, et al. Large intelligent surface/antennas (LISA): making reflective radios smart[J]. Journal of Communications and Information Networks, 2019, 4(2): 40-50.
- [5] Liaskos C, Nie S, Tsioliaridou A, et al. A new wireless communication paradigm through software-controlled metasurfaces[J]. IEEE Communications Magazine, 2018, 56(9): 162-169.
- [6] Huang C 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.
- [7] 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.
- [8] Chu Z, Hao W M, Xiao P, et al. Intelligent reflecting surface aided multi-antenna secure transmission[J]. IEEE Wireless Communications Letters, 2020, 9(1): 108-112.
- [9] Nadeem Q U A, Kammoun A, Chaaban A, et al. Large intelligent surface assisted MIMO communications [EB/OL]. (2019-03-19) [2021-01-25]. <https://arxiv.org/abs/1903.08127>.
- [10] 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.
- [11] Fu M, Zhou Y, Shi Y M. Intelligent reflecting surface for downlink non-orthogonal multiple access networks[C]//2019 IEEE Globecom Workshops, December 9-13, 2019, Waikoloa, HI, USA. New York: IEEE Press, 2019: 1-6.
- [12] Cao Y S, Lü T, Ni W. Intelligent reflecting surface aided multi-user mm wave communications for coverage enhancement[C]//2020 IEEE 31st Annual International Symposium on Personal, Indoor and Mobile Radio Communications, August 31-September 3, 2020, London, UK. New York: IEEE Press, 2020: 1-6.
- [13] Pan C H, Ren H, Wang K Z, et al. Intelligent reflecting surface aided MIMO broadcasting for simultaneous wireless information and power transfer[J]. IEEE Journal on Selected Areas in Communications, 2020, 38(8): 1719-1734.
- [14] Wu Q Q, Zhang S W, Zheng B X, et al. Intelligent reflecting surface-aided wireless communications: a tutorial[J]. IEEE Transactions on Communications, 2021, 69(5): 3313-3351.
- [15] Zhou G, Pan C H, Ren H, et al. Intelligent reflecting surface aided multigroup multicast MISO communication systems[J]. IEEE Transactions on Signal Processing, 2020, 68: 3236-3251.
- [16] Abeywickrama S, Zhang R, Wu Q Q, et al. Intelligent reflecting surface: practical phase shift model and beamforming optimization[J]. IEEE Transactions on Communications, 2020, 68(9): 5849-5863.
- [17] Dong L M, Wang H M. Secure MIMO transmission via intelligent reflecting surface[J]. IEEE Wireless Communications Letters, 2020, 9(6): 787-790.
- [18] Wang Z R, Liu L, Cui S G. Channel estimation for intelligent reflecting surface assisted multiuser communications: framework, algorithms, and analysis [J]. IEEE Transactions on Wireless Communications, 2020, 19(10): 6607-6620.
- [19] Luo Z Q, Ma W K, So A M C, et al. Semidefinite relaxation of quadratic optimization problems[J]. IEEE Signal Processing Magazine, 2010, 27(3): 20-34.
- [20] Alavi F, Cumanan K, Ding Z G, et al. Beamforming techniques for nonorthogonal multiple access in 5G cellular networks[J]. IEEE Transactions on Vehicular Technology, 2018, 67(10): 9474-9487.
- [21] Grant M, Boyd S, Ye Y Y. Disciplined convex programming[M]//Global optimization. Boston: Kluwer Academic Publishers, 2006: 155-210.
- [22] Andersson J A E, Gillis J, Horn G, et al. CasADi: a software framework for nonlinear optimization and optimal control[J]. Mathematical Programming Computation, 2019, 11(1): 1-36.
- [23] Akdeniz M R, Liu Y P, Samimi M K, et al. Millimeter wave channel modeling and cellular capacity evaluation[J]. IEEE Journal on Selected Areas in Communications, 2014, 32(6): 1164-1179.
- [24] Guo H Y, Liang Y C, Chen J, et al. Weighted sum-rate maximization for reconfigurable intelligent surface aided wireless networks[J]. IEEE Transactions on Wireless Communications, 2020, 19(5): 3064-3076.