

基于智能超表面的自适应信号覆盖增强研究

吕武壕¹, 杨会平², 李杰¹

(1. 华南师范大学人工智能学院; 2. 华南师范大学电子与信息工程学院, 广东 佛山 528225)

摘要: 为推动智能超表面(RIS)在新一代通信系统中的可行性应用, 信号覆盖增强研究具有至关重要的意义。如何设计出具备实际可行性, 并兼顾硬件开销和用户性能算法是目前亟需解决的难题。为此, 首先根据RIS单元间空间信道的相关性设计一种自适应优化RIS配置的波束赋形算法; 其次, 结合反馈链路辅助, 在实测系统中部署算法; 再次, 在系统信号发送端与接收端之间采用通用软件无线电外设(USRP)构建视频传输方案; 最后, 在4个场景中验证所提方案的可行性。结果表明, 该方案在4个场景中能有效提升接收端信号功率, 最高可实现11.7 dB的增益, 与现有方案相比效果更优, 证实了其在推动RIS技术实践化应用方面的潜力。

关键词: 智能超表面; 波束赋形; 覆盖增强; 无线传输验证系统; 传输性能

DOI: 10.11907/rjdk.251110

扫描二维码阅读全文: 

中图分类号: TN92; TP301.6

文献标识码: A

文章编号: 1672-7800(2026)005-0151-07

Research on Adaptive Signal Coverage Enhancement Based on Reconfigurable Intelligent Surface

LYU Wuhao¹, YANG Huiping², LI Jie¹

(1. School of Artificial Intelligence, South China Normal University;

2. School of Electronic and Information Engineering, South China Normal University, Foshan 528225, China)

Abstract: In order to promote the feasibility application of reconfigurable intelligent surface (RIS) in the new generation communication system, the research on signal coverage enhancement is of great significance. How to design an algorithm that has practical feasibility and considers both hardware overhead and user performance is a problem that needs to be solved urgently. For this reason, firstly, a beamforming algorithm for adaptive optimization of RIS configuration is designed according to the correlation of spatial channels between RIS units; Secondly, with the aid of feedback link, the algorithm is deployed in the measured system; Thirdly, a video transmission scheme is built between the system signal sending end and the receiving end by using the Universal Software Radio Peripheral (USRP); Finally, the feasibility of the proposed scheme is verified in four scenarios. The results show that the scheme can effectively improve the signal power of the receiver in four scenarios, and can achieve a maximum gain of 11.7 dB. Compared with the existing scheme, the effect is better, which confirms its potential in promoting the practical application of RIS technology.

Key Words: reconfigurable intelligent surface; beamforming; coverage enhancement; wireless transmission verification system; transmission performance

0 引言

随着第五代(Fifth-generation, 5G)无线通信技术在全球逐渐部署, 其建设成本高、能耗大和频谱资源紧张等问

题日益凸显^[1-2]。为了应对这些挑战, 学术与工业界都在加快探索新一代移动通信技术^[3]。第六代(Sixth-generation, 6G)移动通信技术可进一步提升系统性能, 实现更广泛的连接性、更快的数据速率、更低的时延和更高的能源效率等, 以满足未来更为复杂和多样化的通信需求^[4-7]。

收稿日期: 2025-02-21

基金项目: 华南师范大学青年教师培育基金项目(KJF120240001)

作者简介: 吕武壕(2000-), 男, 华南师范大学人工智能学院硕士研究生, 研究方向为智能超表面算法设计; 杨会平(1984-), 男, 博士, 华南师范大学电子与信息工程学院副教授、硕士生导师, 研究方向为无线通信嵌入式系统、射频天线与系统; 李杰(1991-), 男, 博士, 华南师范大学人工智能学院副研究员、硕士生导师, 研究方向为云计算、数据管理、网络资源管理与优化、智能超表面辅助通信。本文通讯作者: 李杰。

考虑到目前低频段频谱紧张的情况,未来移动通信将不可避免地高频段拓展。然而,高频信号的衍射能力较弱,在传播路径中一旦遇到障碍物,极易发生信号遮挡和严重衰减,导致信号覆盖范围与强度大幅缩小。尽管通过增加基站的辐射功率与数量可以在一定程度上缓解信号覆盖与传输问题,但由此带来的建设成本增加和运营功率消耗问题更加突出。

智能超表面技术(Reconfigurable Intelligent Surface, RIS)作为未来6G网络的候选技术之一,具有低功耗、低成本、方便部署和可灵活波束赋形等特点^[8]。RIS是一种源自超材料技术,并具有可编程电磁特性的人工电磁表面结构^[9-10]。在这块表面上,电磁单元被精密且有序地排列着,用户可以通过对每个单元施加精确的控制信号,实现对其电磁特性的动态调控。这种动态调控使得RIS能够智能地操纵空间中的电磁波,从而灵活地调整无线传输信道,重塑无线通信环境^[11]。RIS在通信领域具有巨大潜力,为实现更高效、更可靠的无线通信提供了新的可能。

信号覆盖增强是当前国内外RIS领域中的热门研究方向,主要涉及基于超表面的波束赋形方法与系统实现。从理论层面,波束赋形理论的建立不仅能够促进科研人员深入理解超表面如何对电磁波进行灵活且精准的操控,而且能为未来通信系统的理论架构提供更坚实的支撑,为提升信号传输可靠性奠定基础。从应用层面,超表面实测系统的实现不仅能够验证理论技术的设想,推动新技术不断优化,而且能为未来通信发展决策提供及时可靠的数据支持,进一步推动通信领域的深度发展与变革。

在复杂多变的实际应用场景下,若要充分发挥RIS的卓越性能,实现高效稳定的信号传输,精准且实时的波束控制算法至关重要。因此,大量科研人员致力于波束赋形算法的理论研究,期望挖掘出RIS的最大潜力。例如,文献[12]假设信道状态信息(Channel State Information, CSI)误差的范围为一组确定值的上界且RIS单元具有无限高精度的连续相位,然后提出一种基于深度强化学习的深度确定性策略梯度方法,用于单用户多输入单输出(Multiple Input Single Output, MISO)系统的鲁棒波束赋形设计。文献[13]在MISO认知无线电系统中确保不干扰网络中现有主用户接收机的同时,使用交替优化和半定松弛技术设计RIS控制算法来最大化所有用户的速率总和。文献[14]设计了一个可自持续的、由RIS辅助的鲁棒安全多用户下行通信系统;同时在考虑到RIS单元无线能量获取能力、安全通信和满足潜在窃听者保密性的约束后,提出一种高效计算的迭代波束赋形算法,最终在实现RIS自持续性与系统总速率之间取得了平衡。文献[15]在一个RIS辅助的综合感知与通信系统中设计了一个鲁棒的非凸优化问题。同时,为解决优化问题的非凸性,结合交替优化、分段搜索法和等效瑞利商问题等理论提出一种高效的波束赋形算法。文献[16]考虑到非正交多址接入(Non-orthogonal Multiple Access, NOMA)网络中的情况,提出一种使用用户配对策略确保在RIS辅助下进行NOMA传输的鲁棒波

束赋形方案,从而降低了连续干扰消除的复杂性,提高了系统的整体性能。

对电磁波束赋形算法理论进行研究是为了将其应用于实践。因此,一部分学者致力于实测型研究,以推动RIS在新一代通信系统中实现商业化应用。例如,文献[17]将RIS部署到商用MISO网络中,显著提高了Wi-Fi性能与覆盖范围,实现了45 m的覆盖范围并显著增加了数据接收速率,充分验证了RIS原型的优越性能。文献[18]在信号覆盖不足的情况下,在室内真实场景中使用RIS和喇叭天线提升了位于盲点区域的接收端的性能。文献[19]在室内通信场景中,通过部署多比特RIS实现了更大的覆盖范围和更好的信号质量,显著提高了信号接收功率。文献[20]利用RIS的反射和折射特性,在通信原型系统中实现了全方位的信号覆盖、传输与控制。文献[21]构建了一个集成硬件和软件的原型系统,包括数据交换主机、基带和射频信号处理设备,以及含有有源单元的RIS。实验结果显示,该RIS能实现11.9 dB的增益,证明了其在实际应用中的可行性和有效性。

在以上理论研究中,关于RIS的波束赋形算法通常以RIS单元具有理想连续相位为前提。然而,实地测试表明,无限高精度的连续相位改变将带来更高的成本开销,导致硬件成本大幅攀升。有些理论研究中设计的算法由于复杂度过高,在现有硬件条件下难以完美实现并应用于实际通信场景中。还有很多理论研究没有考虑到实际应用场景中需要实时采集CSI的情况,而在实际通信场景中,CSI的获取和RIS配置的优化必须同时进行,且RIS单元应尽可能地设计为低分辨率。因此,本文将根据目前存在的难题展开分析,研究出能适应实际无线通信场景,并兼顾低硬件成本和用户性能的波束赋形算法,然后将其应用于无线传输验证系统中,对其性能进行评价。

1 RIS辅助的波束赋形方法

1.1 系统模型

在本文的无线通信系统中,单天线发射端(Transmitter, TX)和单天线接收端(Receiver, RX)在具有 $N = R_{row} \times R_{col}$ 个无源反射单元的RIS的辅助下实现数据传输。其中, R_{row} 和 R_{col} 分别表示RIS的行数和列数。RIS采用均匀平面阵列的形式分布,每个单元的相位值均具有两种状态,这意味着每个单元都可从逻辑“0”跳变到逻辑“1”,实现 180° 的相位差。将从TX到RIS和从RX到RIS的信道分别定义为 $g \in \mathbb{C}^{N \times 1}$ 和 $h \in \mathbb{C}^{N \times 1}$ 。TX与RX之间的视距链路信道定义为 $h_{los} \in \mathbb{C}$ 。由TX发射的第 k 个复基带信号定义为 $x[k]$,则接收端接收到的信号 $y[k]$ 可表示为:

$$y[k] = (g^T \theta h + h_{los})x[k] + n[k] \quad (1)$$

式中: $\theta = \text{diag}(a_1 e^{j\varphi_1}, a_2 e^{j\varphi_2}, \dots, a_N e^{j\varphi_N})$,表示RIS的反射系数矩阵; a_n 与 φ_n 分别表示第 n 个RIS单元的反射振幅和相位, $n \in \{1, \dots, N\}$; $n[k]$ 表示服从 $CN(0, \sigma_n^2)$ 分布的加

性高斯白噪声。为限制原型系统的复杂性,仅采用两个电压使无源RIS单元产生 180° 的相位差, $\varnothing_n$ 的实际相位值约为 20° 和 -160° 。

在单天线发送和单天线接收的通信场景中,通信系统的性能通常是由信噪比决定的。因此,RIS被应用于该系统的主要目的为通过改变反射单元的反射系数,使得在所有反射单元的联合作用下,经过RIS的反射波束方向得以重塑并对准接收端,从而增强接收端的信号功率,提高信噪比,进而改善通信系统性能^[22]。信噪比与端到端的增益 $|g^T \theta h + h_{LoS}|^2$ 成正比,因而调节RIS配置矩阵 θ 可使端到端的增益最大化。最佳的RIS配置矩阵可表示为:

$$\begin{aligned} \theta^* &= \arg \max_{\theta_n, \forall_n} |g^T \theta h + h_{LoS}|^2 \\ s.t. \theta_n &\in \{-160, 20\}, \forall_n. \end{aligned} \quad (2)$$

为了解决式(2)中的优化问题,本文以低复杂度和实际可行性为目标展开研究。由于该原型中每个RIS单元的相位值仅使用两种状态,一种最为简单的方式是采用搜索的方法找出能使接收端接收功率最大化的最佳RIS配置,整个搜索空间为 2^N 。然而,当RIS单元数量较多,即 N 的值十分大时,整个通信系统的复杂度和所消耗的计算资源十分庞大。因此,一个能快速地将信号反射到目标方向的解决方案具有极其重要的现实意义。具体来说,目标函数将被视为接收端信号的平均功率,接收端接收到的信号功率值会实时反馈回FPGA,并利用下文中提出的算法进行处理,从而获取能使反射波束向接收端方向聚焦的RIS配置,使得接收到的信号功率最大化。

1.2 贪婪子面波束赋形算法

用户最大的特点为移动性强且无规则,这一方面使得RIS到用户这段信道老化速度很快,因而需要反复获取新的CSI;另一方面使得RIS需要不断调整反射系数,从而使反射波束能实时跟踪用户移动位置,确保系统保持良好的传输性能。为此,文献[22]提出一种有效的RIS配置优化算法,首先从水平方向上选出最佳RIS配置;其次在垂直方向上执行同样的步骤得到最终的RIS配置。该算法的本质是对RIS单元进行分行和分列,从而显著降低算法复杂性,实现波束赋形。然而,当RIS单元数量较多时,每一行和每一列的首尾RIS单元的空间信道信息差异较大,RIS单元间的信道相关性未能得到充分利用^[23]。因此,本文提出贪婪子面波束赋形算法,目的是更加充分地利用反射单元空间信道信息的相关性,在将波束方向重塑至用户方向的同时获得更好的性能。

贪婪子面波束赋形算法的核心思想主要有两点:第一点是利用相邻单元信道相关性高的特点将整个表面划分为若干个子面,每个子面共享同一个反射系数;第二点是每次只改变RIS一个子面的相位,并根据反馈链路提供的反馈信息进行调整,如果与先前状态相比,该配置状态增加了接收信号功率,则使用新状态,否则舍弃该配置状态。具体而言,首先对RIS的反射系数矩阵 R 、 R_{temp} 和 R_{max} 进行

初始化,其中 R 表示RIS的当前配置, R_{temp} 表示算法运行过程中存储的中间变量, R_{max} 表示经算法优化后最终输出的配置。变量 P 和 P_{max} 分别表示接收功率的当前值和最大值,变量 T_{row} 和 T_{col} 分别记录当前正在处理的子面行数和列数。在使用 R_{temp} 对RIS的配置状态进行存储后,通过 T_{row} 和 T_{col} 展开一个子面大小的范围,并对该范围的RIS单元进行处理,使得每个RIS单元能够在两个状态间进行切换。其次,使用修改后的RIS配置测量接收端接收功率 P ,如果 P 超过 P_{max} ,则表明该配置对于接收功率来说贡献更大。在这种情况下,该RIS配置会被存储进 R_{max} , P_{max} 也会被同步更新,目的是为下一次比较作准备。如果使用修改后的RIS配置无法带来更好的接收功率,则使用 R_{temp} 将RIS的配置切换回原状态,这意味着舍弃了对该子面所进行的处理。经过上述步骤后, T_{row} 和 T_{col} 的值会得到更新,这意味着其所指示的子面起始位置发生了改变,将在下一轮循环中处理下一个子面。最后,在处理完所有子面后,优化后的RIS配置 R_{max} 将被保持服务于该通信系统。与初始配置相比,该配置将更加有效且细化地形成指向接收端的反射波束,使得接收功率得到明显提升。

该算法使用 $\frac{R_{row}}{S_{row}} \times \frac{R_{col}}{S_{col}}$ 次反馈迭代确定了反射系数。

当子面面积越小时,最终生成的反射波束越细化;反之,当子面面积越大时,所需要的反馈次数越少,但最终所带来的增益效果也会随之下降。值得一提的是,当用户从一个位置移动到另一个位置时,可多次重复运行该算法来优化反射系数,调整反射波束的方向指向用户位置,并在期间保持数据的传输。由于该算法采用子面分组的方法,充分利用了相邻单元信道相关性高的特点,与直接搜索遍历每种可能性相比,能更快找到合适的RIS配置,从而增强信号功率、提高通信性能。

贪婪子面波束赋形算法的伪代码为:

输入:接收端接收功率值 P ,RIS行数 R_{row} ,RIS列数 R_{col} ,子面行数 S_{row} ,子面列数 S_{col}

输出:RIS反射系数矩阵 R_{max}

1. $R, R_{temp}, R_{max} = [0, \dots, 0]$ //初始化所有RIS单元
2. $T_{row}, T_{col} = 0$ //存储子面第一个单元位置
3. $P_{max} = P$ //初始化最大功率值
4. WHILE TRUE//FPGA 晶振
5. $R_{temp} = R$
6. FOR $i = T_{row}$ TO $(T_{row} + S_{row} - 1)$
7. FOR $j = T_{col}$ TO $(T_{col} + S_{col} - 1)$
8. 切换 $R[i][j]$ 状态
9. END FOR
10. END FOR
11. 使用配置 R 测量接收功率 P
12. IF $P > P_{max}$ THEN
13. $P_{max} = P$
14. $R_{max} = R$
15. ELSE IF THEN

```

16.     $R = R_{temp}$ 
17.  END IF
18.  IF  $T_{col} + 2 \times S_{col} - 1 \leq R_{col} - 1$  THEN //切换子面起
始位
19.     $T_{col} = T_{col} + S_{col}$ 
20.  ELSE IF  $T_{row} + 2 \times S_{row} - 1 \leq R_{row} - 1$  THEN
21.     $T_{row} = T_{row} + S_{col}$ 
22.     $T_{col} = 0$ 
23.  ELSE IF THEN
24.    结束算法运行
25.  END IF
26. END WHILE
27. RETURN 反射系数矩阵  $R_{max}$ 

```

2 基于 RIS 的无线传输验证系统

为了将前文所述方案付诸实践,本文设计了基于 RIS 的无线传输验证系统,其实物图如图 1 所示。该系统由 RIS、现场可编程门阵列(Field Programmable Gate Array, FPGA)、个人计算机(Personal Computer, PC)、通用软件无线电外设(Universal Software Radio Peripheral, USRP)、喇叭天线和反馈链路等部分组成,主要作用是验证所提方案的有效性与优越性,期望能推动 RIS 在新一代通信系统中实现商业化应用。

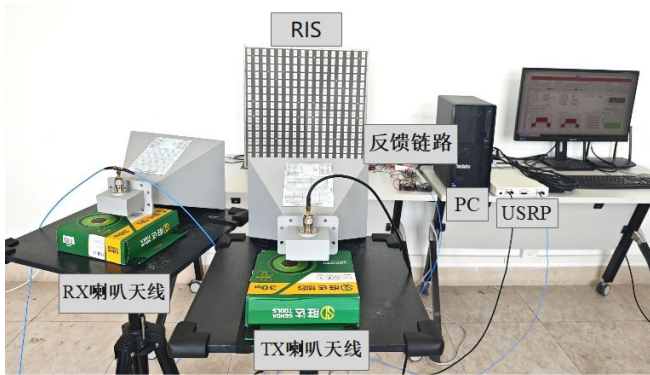


Fig. 1 Wireless transmission verification system based on RIS

图 1 基于 RIS 的无线传输验证系统

图 2 为系统的硬件框图。整个系统可分为信号发送端、信号接收端和信号重塑部分 3 个模块。信号发送端和信号接收端分别模拟现实世界中的基站和用户。其中, PC、USRP 和喇叭天线共同组成了信号发送端;信号接收端也具有相同的组成部分,与发送端的主要区别在于数据流的流向相反;信号重塑部分主要包括 FPGA、RIS 和反馈链路。

在信号重塑部分, RIS 的主要作用为智能地操纵反射波束的方向,使其能以灵活的方式对准接收端,从而达到重塑无线通信环境,提高无线通信网络性能的目的。当用户位置发生改变时,与用户有关的 CSI 会出现显著变化。为能自适应调节 RIS 反射系数,本文在 RIS 与接收端之间设计了反馈链路方案,包含 ADL5501 功率检波器模块、整

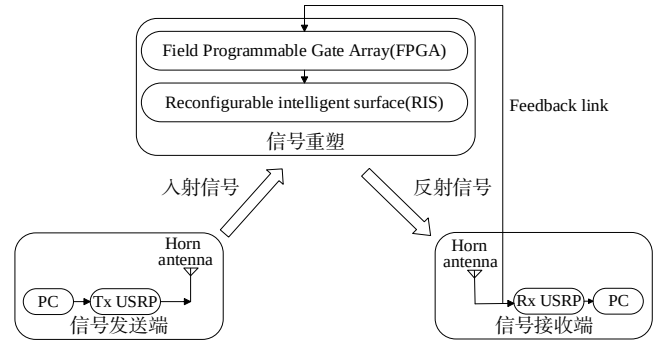


Fig. 2 Wireless transmission verification system hardware block diagram

图 2 无线传输验证系统硬件框图

流模块和分压模块。该方案能实时地将接收端的信号功率信息传输到 FPGA 进行处理。这种反馈机制能很好地辅助判断出附加在 RIS 的反射系数的有效性,进而使得反射波束实时对准接收端。

本文使用的 RIS 共有 256 个反射单元,呈 16 行 16 列的形式分布。FPGA 中存储着贪婪子面波束赋形算法,该算法根据反馈链路传回来的信息实时调整 RIS 单元的相位,并将优化后的结果以串行数据流的方式输出。该数据流将通过 26 个 I/O 引脚流向串转并模块进行处理。具体而言,其中 16 个 I/O 引脚负责处理数据,另外 10 个 I/O 引脚负责处理控制信息。每个处理数据的 I/O 引脚和两片 74HC595N 芯片共同组成 1 转 16 串转并子模块,用于实现将串行数据转为并行数据的功能。并行数据流经过滤波模块和电压放大模块后对应到每一个 RIS 单元, FPGA 通过每个 RIS 单元施加精确的控制信号,调整 RIS 反射单元的相位,进而控制信号反射方向,使得反射波束实时对准用户,从而提升系统通信性能。

对于信号发送端和信号接收端,得益于 LabVIEW 强大且简洁的图形化开发环境,本文结合 USRP 构建了视频传输方案,整个方案的思路如图 3 所示。首先, LabVIEW 通过用户数据报协议(User Datagram Protocol, UDP)套接字加载主机提供的视频数据,并将其作为有效载荷数据存储在传输块中;其次,经编码提高抗干扰能力后,将其映射到时域资源,应用正交频分复用调制技术将频域并行信号转换为时域串行信号;最后, USRP 将信号上变频到载波频率并进行数模转换,通过发射天线发射。接收端则执行与发送端相反的功能。首先,由喇叭天线接收信号, USRP 对接收到的射频信号进行模数转换,并进行数字下变频处理,以进行修正和采样率转换;其次,无线帧同步模块负责帧结构的检测与时序校准,并通过连续测量信号的自相关和互相关来实现载波频率的偏移补偿与同步;再次,应用正交频分复用解调技术将采样点从时域转换至频域,资源逆映射器会从载波中提取频域载波数据;最后,根据参考信号执行信道估算与均衡,经过解码后可在主机上实时播放视频。

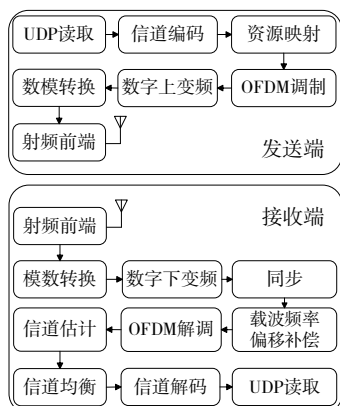


Fig. 3 Schematic of video transmission scheme based on USRP

图3 基于USRP的视频传输方案思路

3 验证测试

3.1 单用户室内视距传播场景

探究单用户室内视距传播(Line of sight, LoS)场景下的性能提升情况。如图4所示,该实验在校园内的一个自习室中进行,房间大小为5 m×3 m。USRP的中心频率为3.6 GHz,带宽为20 MHz。发送端的喇叭天线对准RIS的正中心,发射功率为0 dBm。接收端的喇叭天线始终指向RIS的中心,在TX-RIS-RX角度为 $\pm 60^\circ$ 的范围内移动,从 -60° 开始,每次递增 10° 。每到一个新的位置,RIS处于关闭状态的功率值会被记录下来。运行本文算法并记录接收到的信号功率,然后关闭RIS并切换为文献[22]中的算法重复测量步骤。

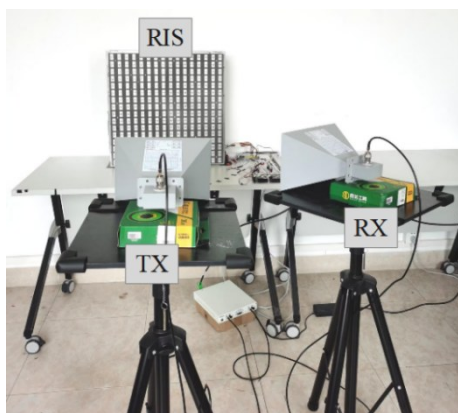


Fig. 4 Device location diagram of the single-user indoor LoS scenario

图4 单用户室内LoS场景设备位置示意图

如图5所示,在RIS的有效范围内,与关闭RIS的情况相比,本文算法能有效提升接收功率。与文献[22]中的算法相比,本文算法在性能上更有优势,RIS在静态条件下的办公环境中可以实现0.5~7.5 dB的增益,增益效果在 $\pm 10^\circ$ 时最弱,这是由于当角度较小时,接收端的喇叭天线遮挡了发射端喇叭天线的部分信号传输路径。

3.2 单用户室内非视距传播场景

探究单用户室内非视距传播(Non-LoS, NLoS)场景

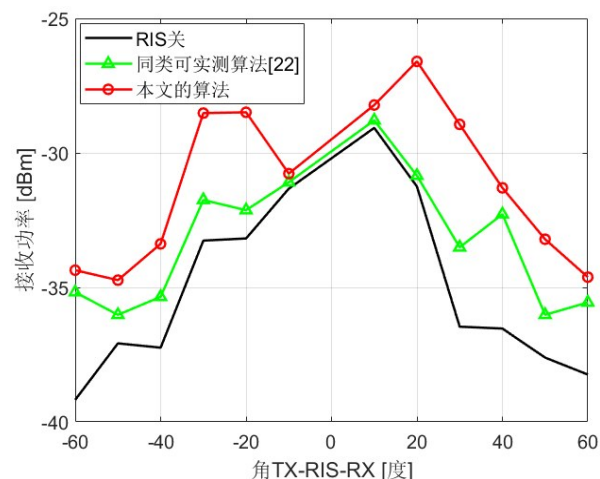


Fig. 5 Received power of the single-user indoor LoS scenario

图5 单用户室内LoS场景接收功率

下,用户在RIS有效角度范围内的接收功率是否有所提升。如图6所示,RIS的位置被移动到墙边,发射端喇叭天线与接收端喇叭天线之间由墙间隔开,发射功率调整至15 dBm。TX-RIS-墙的角度为 θ_1 ,RX-RIS-墙的角度为 θ_2 , θ_1 和 θ_2 的取值范围均为 $30^\circ \sim 60^\circ$,每次递增 10° 。每到一个新的位置便记录RIS关闭状态的接收功率值。运行本文算法并记录接收到的信号功率,随后关闭RIS并切换为文献[22]中的算法重复测量步骤。



Fig. 6 Device location diagram of the single-user indoor NLoS scenario

图6 单用户室内NLoS场景设备位置示意图

如图7所示,在NLoS场景下,本文算法在RIS有效角度范围内同样能使用户接收功率有效提升,且其性能优于文献[22]中的算法。然而与LoS的场景相比,NLoS场景下接收功率的提升程度明显下降,实现了0.5~6 dB的增益。这是由于在LoS场景下,信号可通过直射路径传播,RIS可通过相位调整将反射信号与直射信号相干叠加,显著增强接收功率。而在NLoS场景下,信号主要依赖反射、绕射等多径传播,路径损耗指数更高,即使RIS能优化反射路径,

但基础损耗更大,也会导致功率提升效果受限。

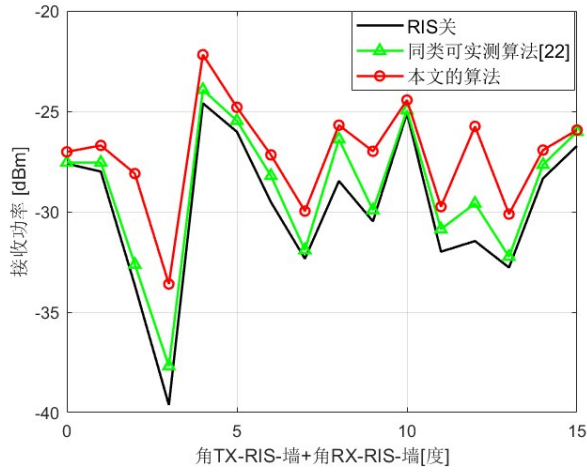


Fig. 7 Received power of the single-user indoor NLoS scenario

图7 单用户室内NLoS场景接收功率

3.3 单用户室外大厅场景

考虑到自习室内障碍物可能会对接收功率产生影响,所有设备被移至室外大厅再次进行测试。与自习室内的环境相比,该大厅的空间更为空旷,图8为设备在室外大厅的摆放位置。发射功率调整为15 dBm,发送端的喇叭天线始终对准RIS的正中心,距离为2 m。接收端的喇叭天线始终与RIS的中心保持1.5 m的距离,TX-RIS-RX角度在 $\pm 60^\circ$ 的范围内变动,每次递增 10° 。每到一个新的位置便记录RIS关闭状态,以及运行本文算法和文献[22]中算法时的接收端功率值。



Fig. 8 Device location diagram of the single-user outdoor hall scenario

图8 单用户室外大厅场景设备位置示意图

如图9所示,本文算法依旧可以起到增强接收功率的作用。在信号传播过程中,障碍物会与信号不断相互作用,对其产生吸收、反射和散射等影响,传播路径也变得复杂多样,导致信号能量大量损耗。得益于室外大厅的空旷环境,来自墙体等障碍物的影响明显减少,本文算法使RIS实现了2.4~8 dB的增益,取得了比室内场景更佳的效果。此外,本文算法与文献[22]中的算法相比仍然具有优势,

验证了RIS在室外环境中增强无线信号覆盖的潜力。

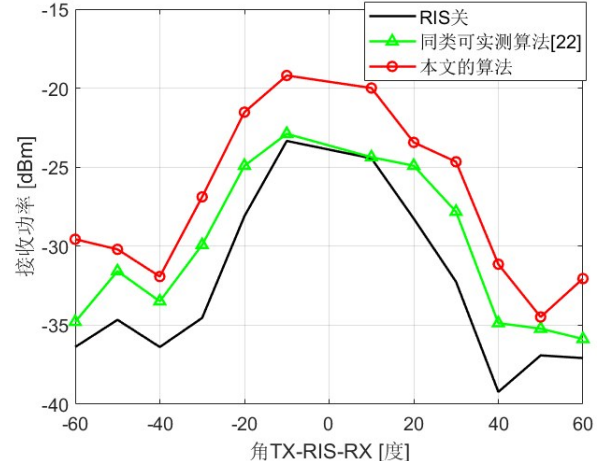


Fig. 9 Received power of the single-user outdoor hall scenario

图9 单用户室外大厅场景接收功率

3.4 双用户室内场景

为探究双用户情况下RIS辅助无线通信的潜力,一条新的反馈链路被应用于另一侧信号接收端,并保持与第一个信号接收端相同的配置,具体如图10所示。两个接收端的接收功率平均值被实时测量出,并作为所提算法的输入。TX-RIS-RX1的角度为 θ_3 ,TX-RIS-RX2的角度为 θ_4 , θ_3 和 θ_4 的取值范围均为 $30^\circ \sim 60^\circ$,初始值为 30° ,每次递增 10° 。信号发送端的发射功率为15 dBm。RIS首先保持关闭状态,记录两个接收端的初始功率值,随后打开RIS并运行所提算法,记录最终的接收功率值。更改接收端的位置,重复上述实验步骤。

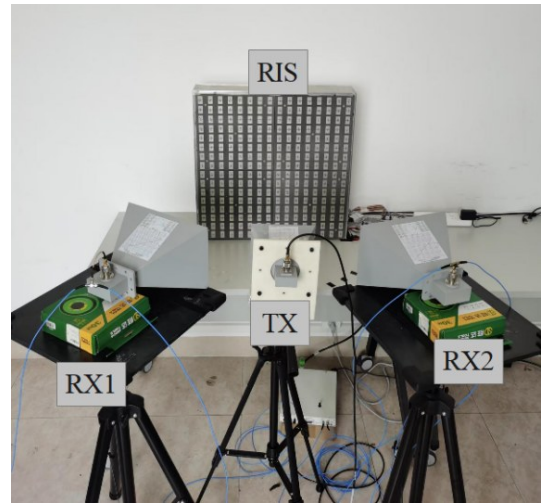


Fig. 10 Device location of the dual-user indoor scenario

图10 双用户室内场景设备位置示意

如图11所示,在本文算法的辅助下,撞击到RIS表面的波束能有效偏转到RX1和RX2的位置,从而提升两个接收端的接收功率。RX1和RX2在该环境中分别实现了1.1~11.7 dB和1.4~10.9 dB的增益,验证了RIS在双用户情况下辅助无线通信的潜力。

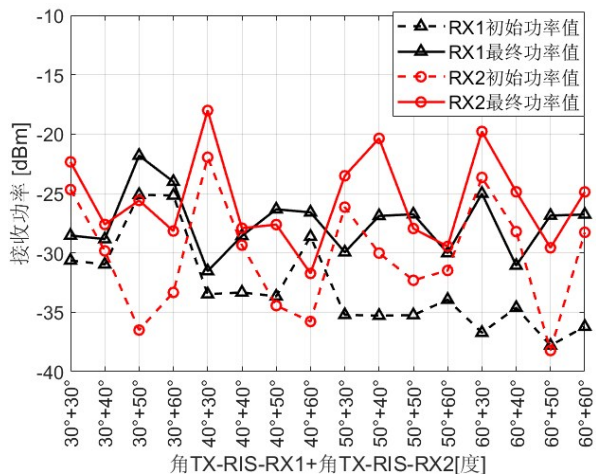


Fig. 11 Received power of the dual-user indoor scenario

图11 双用户室内场景接收功率

4 结语

本文提出了能适应实际无线通信场景、兼顾低硬件成本的波束赋形算法,并搭建了基于RIS的无线传输验证系统进行实测试验。本文主要在单用户室内视距传播、单用户室内非视距传播、单用户室外大厅和双用户室内4个场景下进行测试。实验结果表明,该系统能通过反馈机制不断调整RIS单元反射系数,使得反射波束在迭代优化后能够实时对准信号接收端,从而增强信号接收功率,提升接收端的传输性能。同时,与同类可实测算法相比,该算法的性能表现更具优势。研究结果为推动RIS技术面向实践化应用提供了新思路,有望助力通信行业突破现有瓶颈,提升无线传输的效率与稳定性。未来将进一步优化该实测系统,探索引入多面RIS协同工作,并尝试添加神经网络架构,基于海量历史数据与实时反馈信息自主学习并预测环境变化趋势,以进一步提升算法的精准度与实时性,并在不同通信环境下验证其性能表现与应用潜力。

参考文献:

- [1] REDDY M P, AMURU S D, KUCHI K K. Optimizing the placement and beamforming of RIS in cellular networks: a system-level modeling perspective[J]. IEEE Communications Letters, 2023, 27(12): 3399-3403.
- [2] KEYKHOSERAVI K, DENIS B, ALEXANDROPOULOS G C, et al. Leveraging RIS-enabled smart signal propagation for solving infeasible localization problems: scenarios, key research directions, and open challenges[J]. IEEE Vehicular Technology Magazine, 2023, 18(2): 20-28.
- [3] SHI L J, XUE M, YU C H, et al. Design of high-speed ADC data acquisition system based on FPGA[J]. Software Guide, 2024, 23(12): 136-142. 石朗杰, 薛萌, 于呈豪, 等. 基于FPGA的高速ADC数据采集系统设计[J]. 软件导刊, 2024, 23(12): 136-142.
- [4] GUO Y S, ZHANG C W, FU Y K. A novel superimposed 64QAM constellation design scheme[J]. Software Guide, 2024, 23(10): 168-172. 郭奕松, 张成武, 付彦琨. 一种新的叠加64QAM星座设计方案[J]. 软件导刊, 2024, 23(10): 168-172.
- [5] MIAO H, ZHANG J, TANG P, et al. Sub-6 GHz to mmWave for 5G-advanced and beyond: channel measurements, characteristics and impact on system performance[J]. IEEE Journal on Selected Areas in Communications, 2023, 41(6): 1945-1960.
- [6] RANA B, CHO S S, HONG I P. Review paper on hardware of reconfigurable intelligent surfaces[J]. IEEE Access, 2023, 11: 29614-29634.
- [7] BAGHERI A, BENCIVENNI C, GUSTAFSSON M, et al. A 28 GHz 8x8 gap-waveguide phased array employing GaN front-end with 60 dBm EIRP[J]. IEEE Transactions on Antennas and Propagation, 2023, 71(5): 4510-4515.
- [8] XU W, YANG Z, NG D W K, et al. Edge learning for B5G networks with distributed signal processing: semantic communication, edge computing, and wireless sensing[J]. IEEE Journal of Selected Topics in Signal Processing, 2023, 17(1): 9-39.
- [9] YANG D, XU J, XU W, et al. Secure communication for spatially correlated RIS-aided multiuser massive MIMO systems: analysis and optimization[J]. IEEE Communications Letters, 2023, 27(3): 797-801.
- [10] WU C, MU X, LIU Y, et al. Resource allocation in STAR-RIS-aided networks: OMA and NOMA[J]. IEEE Transactions on Wireless Communications, 2022, 21(9): 7653-7667.
- [11] CAO X, CHEN Q, TANAKA T, et al. A 1-bit time-modulated reflectarray for reconfigurable-intelligent-surface applications[J]. IEEE Transactions on Antennas and Propagation, 2023, 71(3): 2396-2408.
- [12] LIN J, ZOUT Y, DONG X, et al. Deep reinforcement learning for robust beamforming in IRS-assisted wireless communications[C]//GLOBECOM 2020-2020 IEEE Global Communications Conference, 2020: 1-6.
- [13] YUAN J, LIANG Y C, JOUNG J, et al. Intelligent reflecting surface-assisted cognitive radio system[J]. IEEE Transactions on Communications, 2020, 69(1): 675-687.
- [14] HU S, WEI Z, CAI Y, et al. Robust and secure sum-rate maximization for multiuser MISO downlink systems with self-sustainable IRS[J]. IEEE Transactions on Communications, 2021, 69(10): 7032-7049.
- [15] XING Z, WANG R, YUAN X. Joint active and passive beamforming design for reconfigurable intelligent surface enabled integrated sensing and communication[J]. IEEE Transactions on Communications, 2023, 71(4): 2457-2474.
- [16] ANJANA B S, KUMARAVELU V B. User pairing strategies for downlink reconfigurable intelligent surfaces-assisted Hybrid NOMA[C]//2024 3rd International Conference on Artificial Intelligence for Internet of Things, 2024: 1-6.
- [17] DUNNA M, ZHANG C, SIEVENPIPER D, et al. ScatterMIMO: enabling virtual MIMO with smart surfaces[C]//Proceedings of the 26th Annual International Conference on Mobile Computing and Networking, 2020: 1-14.
- [18] ARAGHI A, KHALILY M, SAFAEI M, et al. Reconfigurable intelligent surface (RIS) in the sub-6 GHz band: design, implementation, and real-world demonstration[J]. IEEE Access, 2022, 10: 2646-2655.
- [19] RAINS J, TUKMANOV A, CUI T J, et al. High-resolution programmable scattering for wireless coverage enhancement: an indoor field trial campaign[J]. IEEE Transactions on Antennas and Propagation, 2022, 71(1): 518-530.
- [20] ZHANG H, ZENG S, DI B, et al. Intelligent omni-surfaces for full-dimensional wireless communications: principles, technology, and implementation[J]. IEEE Communications Magazine, 2022, 60(2): 39-45.
- [21] SONG R, YIN H, WANG Z, et al. Modeling, design, and verification of an active transmissive RIS[J]. IEEE Transactions on Antennas and Propagation, 2024, 72(12): 9239-9250.
- [22] PEI X, YIN H, TAN L, et al. RIS-aided wireless communications: prototyping, adaptive beamforming, and indoor/outdoor field trials[J]. IEEE Transactions on Communications, 2021, 69(12): 8627-8640.
- [23] ZHENG B, ZHANG R. Intelligent reflecting surface-enhanced OFDM: channel estimation and reflection optimization[J]. IEEE Wireless Communications Letters, 2019, 9(4): 518-522.

(责任编辑:尹晨茹)