真实环境中的多RIS辅助无线通信：原型制作与现场试验

Rujing Xiong、Jianan Zhang、Xuehui Dong、Zhengyu Wang、Junshuo Liu、Wei Yang，*IEEE*学生会员，Tiebin Mi，*IEEE*会员，Wenbo Huang，*IEEE*学生会员，Robert Caiming Qiu，*IEEE*会士，

arXiv:2303.03287v2 [eess.SY] 1 Jul 2023

摘要——**以往研究对多个可重构智能表面的性能关注有限。本文通过研究多个可重构智能表面在真实环境网络中的能力，填补了这一研究空白。我们提出了一种简化且高度可扩展的夹层架构，用于实现单比特单元，并可灵活支持多比特单元。为有效控制多个可重构智能表面，我们提出了一种经济高效的远程控制方案，并开发了云端RIS管理系统。通过一系列四项现场试验，我们展示了多跳路由方案在建立可靠链路方面的有效性。实验表明，在多可重构智能表面辅助的Wi-Fi和商用5G网络中，信号强度和数据传输均得到显著提升。此外，我们研究了RIS辅助波束成形的功率缩放定律，并深入分析了多跳中继链中后续节点的作用。**

索引词—**多RIS辅助通信、多跳、现场试验、RIS原型制作。**

I. 引言

可重构智能表面（RIS）因能够智能地调控无线传播环境而受到广泛关注。与传统中继不同，RIS本质上是无源的，无需复杂的射频电路。一个RIS由规则排列的电磁（EM）单元组成，通常是在介质基板上印制的亚波长微带贴片 [1]。这些单元可编程，能够控制电磁波的反射特性。这项新兴技术在下一代通信中具有巨大潜力，并可应用于多个领域 [2], [3]。

根据单元的结构，RIS可分为两类：基于短截线的结构和基于缝隙的结构。这两种结构的顶部均设有主要金属贴片，用于产生特定的谐振特性。根据单元的可调谐方式，RIS可分为基于正本征负（PIN）二极管的类型和基于变容二极管的类型。

为评估可重构智能表面在真实场景中的实际有效性，已开展了各种实验 [4]–[11]。这些实验大多主要侧重于评估单个可重构智能表面的性能。这些测量在消声室 [4], [5] 以及实际环境 [6]–[11] 中进行，以研究其基本特性。通常采用通用软件无线电外设（USRP）、频谱分析仪和矢量网络分析仪等实验室设备，以促进数据采集并确保测量准确性。

据我们所知，目前针对多个可重构智能表面在真实商用网络中性能的现场试验评估还很有限。只有少数研究探讨了多个可重构智能表面的特性和行为。本文评估了双跳可重构智能表面在 Wi-Fi 和商用 5G网络中的性能。此外，我们还展示了在消声室中开展多跳可重构智能表面实验所获得的实测结果。研究结果表明，利用可重构智能表面的多跳路由方案能够建立可靠的通信链路，即使是在长通道和隧道等具有挑战性的环境中也是如此。

本文的贡献总结如下：

- **简化架构**。我们提出了一种用于实现单比特单元的简化且高度可扩展的夹层架构。该架构可轻松适配多比特单元。所设计的可重构智能表面工作于 5.8 GHz，由 10×16 个此类一比特单元组成，最大功耗为 0.2 W。

- **无线控制**。为实现对多个可重构智能表面的远程控制，我们采用了一种集成Wi-Fi联网功能的专用微控制器单元（MCU）。该方案使可重构智能表面能够通过互联网或局域网（LAN）进行控制。此外，我们开发了一个基于云的管理系统，利用服务器的计算能力和存储容量，从而提升了可扩展性。

- **多跳现场试验**。我们在Wi-Fi和5G网络中开展了全球首个两跳现场试验，突出展示了多个可重构智能表面在扩大覆盖范围和数据传输方面的有效性。此外，我们还在消声室中进行了全球首个多跳可重构智能表面测试，以研究其基本能力。我们观察到后续可重构智能表面节点的功率增益有限，从而揭示了多跳配置在实际应用中的局限性。

本文其余部分安排如下。第二节讨论可重构智能表面的设计，包括基于短截线的单元，以及用于实时控制多个可重构智能表面的无线实现方案。第三节介绍四种不同多 RIS 辅助通信系统的搭建，并展示相应的

R. Xiong 等人来自华中科技大学电子信息与通信学院，中国武汉 430074（电子邮箱：rujing@hust.edu.cn）。国家自然科学基金（NFSC）项目编号 12141107 资助了本研究。稿件收到日期：xxx，2023年。

测试结果。最后，第四节对本文进行总结。

II. 原型设计

A. 单元的简化架构

单元的实现涉及微带天线与可调谐元件的集成。我们首先介绍一种简化但高度可扩展的夹层架构，用于实现单元。该架构由一个主要金属贴片和开关枝节组成，前者作为产生特定谐振特征的主要元件，后者由微带线和PIN二极管构成。通过控制PIN二极管的工作状态，可以实现不同的反射相位响应。

在图1所示的示例中，我们全面介绍了工作于5.8 GHz的一比特单元的架构和参数。该结构由三层铜层组成，中间夹有两层基板。顶部夹层架构由上方两层铜层和基板组成，用于实现辐射单元。底层专用于数字控制电路。

在辐射单元内，主金属贴片与偏置线相连。为确保安全，采用扼流电感（LQW15AN19NG00D）将直流电与偏置电路隔离。贴片的相邻边缘通过一个枝节与接地相连。该枝节由专门设计的微带线和PIN二极管（SMP1345-079LF）组成，从而实现相位配置功能。上层基板由F4B制成，相对介电常数为2.65，损耗角正切为0.001。下层基板采用常用的FR4材料制成。

通过采用等效电路模型，可以确定单元的反射系数。该模型利用传输线理论的原理，将复杂的电磁问题转换为更简单的电路问题。对于 PIN 二极管，其特性可以使用集总参数电路进行建模，如图1所示。当二极管正向偏置时，可将其表示为一个与 2 Ω 电阻串联的 0.7 nH 电感。当二极管切换至关断状态时，则将其建模为一个与 0.7 nH 电感串联的 1.8 pF 电容。

为了准确评估单元的响应，我们采用 CST Studio Suite，这是一款用于分析电磁元件的高性能软件包。从图1所示的仿真结果可以观察到，该单元架构产生的反射系数超过 0.95，表明入射波中有相当大一部分被反射。此外，当配置为导通和关断状态时，该单元表现出两种不同的状态，其相位值分别为 -25° 和 156°。

值得注意的是，所提出的架构可轻松扩展以适配两比特单元。通过增加一个额外的短截线即可实现这一点。利用这种方法，我们设计了一块由 10×20 个工作于 3.4 GHz 的两比特单元组成的可重构智能表面板。为促进知识共享，工作于 5.8 GHz 的一比特单元设计，以及由 10×16 个此类单元组成的可重构智能表面原型，均以 OpenRIS 之名开源于 https://github.com/RujingXiong/OpenRIS.git。

B. 无线控制实现

为有效控制部署在广阔区域内的多个可重构智能表面，我们开发了一种便捷的远程控制方案，采用经济实惠的微控制器和移位寄存器。具体而言，可重构智能表面板使用 ESP8266-12F 作为主控单元，使用 74LS595D 作为移位寄存器。为便于多个可重构智能表面级联，该板设计为支持两种模式：主模式和从模式。在从模式下，微控制器进入低功耗休眠状态。

在功耗方面，单块可重构智能表面板由 10×16 个工作于 5.8 GHz 的单比特单元组成，在主模式下运行时功耗较低，仅为 0.2 W。若切换至从模式，功耗则显著降低至仅 0.03 W。

为实现对多个可重构智能表面的无缝控制，我们利用 ESP8266-12F 集成的 Wi-Fi 功能。这一内置功能使我们能够远程配置工作于不同频率的多个可重构智能表面。我们开发了一套云端RIS管理系统，采用消息队列遥测传输（MQTT）协议。该系统配备专用服务器，为管理和控制广阔区域内大量RIS板提供高效且可扩展的解决方案。

C. 波束整形

可重构智能表面的一项显著能力是重新分配入射功率，以产生所需的功率辐射方向图。然而，由于存在非凸约束，尤其是配置中的模值为一约束，实现复杂的波束整形功能颇具挑战。为解决这些问题，人们采用了多种方法，包括半定松弛 [12],交替方向乘子法 [13], 和流形优化（MO）[14]。

在所提到的方法中，尤其推荐采用流形优化（MO）。利用流形的几何特性，可以将一类有约束优化问题转化为流形上的无约束优化问题。对于配置的模值为一约束，流形优化可将解直接限制在嵌入 $\mathbb{C}^{\mathbb{N}}$ 中的光滑黎曼流形上。我们采用该方法在远场 [14] 中进行波束整形。

现在考虑近场场景，此时源位于RIS板的近场范围内，但对于每个独立的单元而言仍处于远场范围。在这种情况下，电磁波以球面波的形式传播。照射到每个单元上的入射波会产生与距离直接成正比的相位延迟。为了实现准直波束，相位配置必须补偿这种空间相位差。

所需的相位配置如下 [15]

$$\begin{aligned}\omega_i &= \omega_i^{\mathrm{Arr}} + \omega_i^{\mathrm{Dep}} \\ &= -k_0(d_i - \sin\theta_0(x_i\cos\varphi_0 + y_i\sin\varphi_0)).\end{aligned} \tag{1}$$

在该方程中， ω_i^{Arr}表示对入射相位延迟的补偿， d_i 是从信源到位于 $(x_i,\ y_i)$ 的单元的距离，而 k_0 是波数。

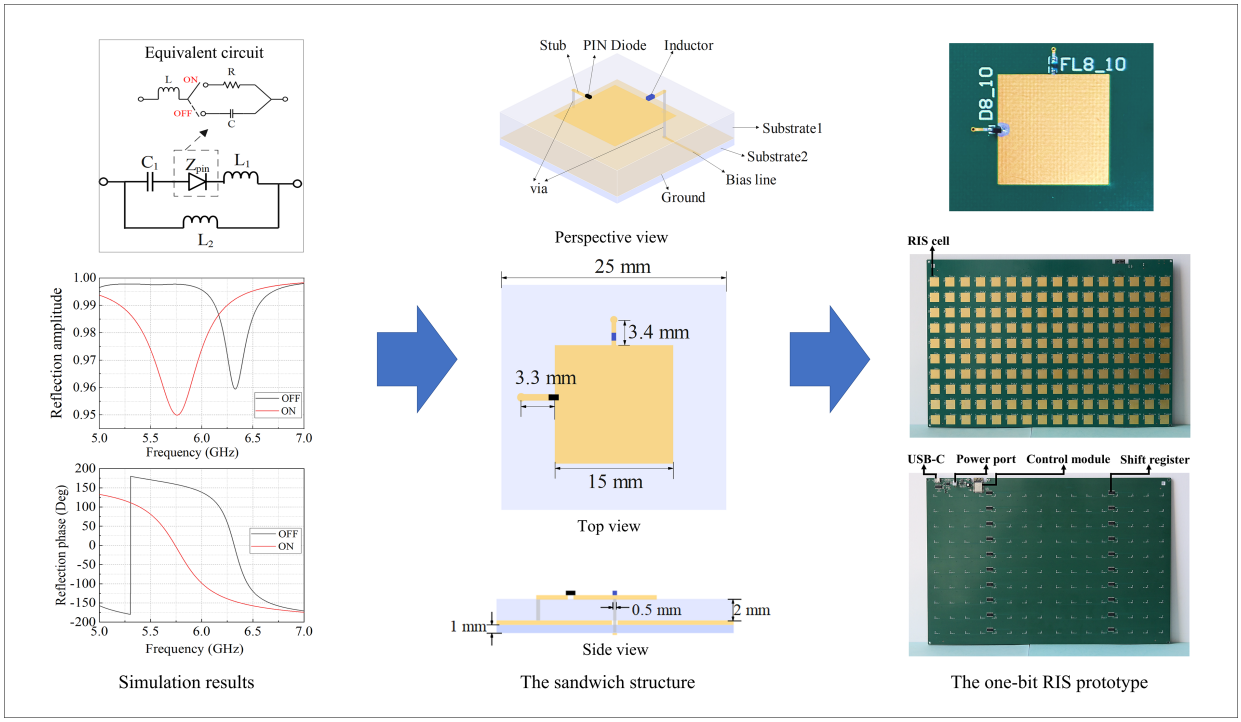


图1. 所提出的单比特可重构智能表面，工作中心频率为 5.8 GHz。

项 ω_i^{Dep} 表示用于将主波束引导至所需方向 $(\theta_0,\ \phi_0)$ 的渐进相位。

III. 实验评估

可重构智能表面单元数量与性能增益之间的关系，以及多个可重构智能表面的部署策略，仍是一个重要的研究课题。我们开展了四项实验，探究各种可重构智能表面辅助无线通信的优势与局限。这些实验分为两种类型：两项在消声室中进行，另外两项在实际环境中开展。在消声室实验中，我们研究尺度定律和多跳路由的局限等基本特性。此外，我们还在不同场景下，对可重构智能表面辅助 Wi-Fi 6 网络和商用 5G 网络进行测试，以评估两个可重构智能表面在真实网络中的性能。

A. 越大越好

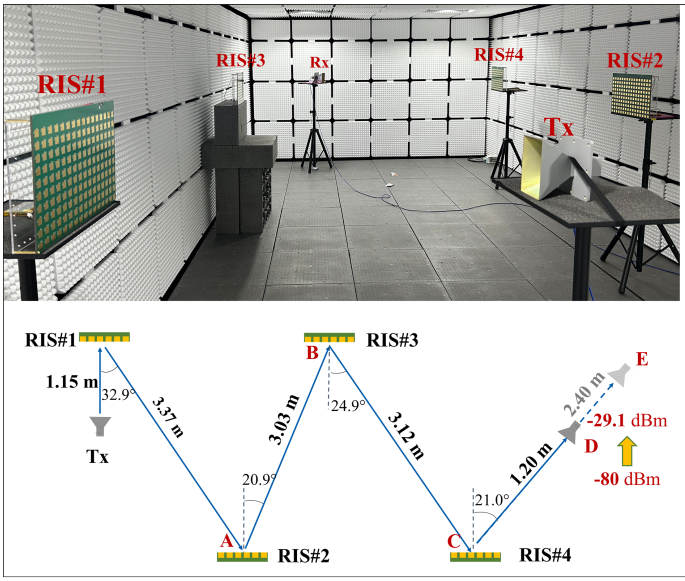
尺度定律对于设计可重构智能表面辅助系统至关重要。尽管已有若干理论研究探讨这一问题，但仍需通过实际实验，在真实场景中验证和检验尺度定律。我们研究中的第一项实验旨在通过使用实际的可重构智能表面辅助系统进行测试，弥补这一空白。我们研究接收功率与可重构智能表面单元数量之间的关系。为此，我们使用单个可重构智能表面、两个可重构智能表面和四个可重构智能表面，在近场和远场中进行信号增强测试。

在我们的实验设置中，单个可重构智能表面板由 10×16 个单元组成。双可重构智能表面由 10×32 个单元组成，四个可重构智能表面的尺寸为 20×32。我们在消声室中使用一台全双工软件定义无线电 USRP 2954R，以及一对喇叭天线。测试的载波频率设置为 5.8 GHz，发射信号的带宽为 100 KHz。接收信号功率通过对 8192 个数据点取平均值计算得出。

在近场测试中，优化单元的配置可显著提升接收功率。配置单个可重构智能表面时，接收功率从 -65 dBm 提升至 -43 dBm。启用双可重构智能表面后，接收功率提升至 -33 dBm。部署四个可重构智能表面后，接收功率提升至 -28 dBm。这些发现清楚地表明，利用可重构智能表面能够显著提升接收信号功率。

我们在远场区域进行了相同的测试。与近场测试结果类似，通过优化单个可重构智能表面、双可重构智能表面和四个可重构智能表面的配置，我们观察到接收信号功率显著提升。完成最优配置后，测得的接收功率分别为：单个可重构智能表面为 -39.48 dBm，双可重构智能表面为 -36.03 dBm，四个可重构智能表面为 -33.41 dBm。这些结果有助于深入了解接收功率与单元数量之间的关系。具体而言，在远场区域中，我们观察到，单元数量翻倍时，接收功率约提升 3 分贝。这一发现表明，接收功率遵循关于可重构智能表面单元数量的尺度定律。

总之，我们的实际实验表明，在近场和远场测试中，接收功率均与可重构智能表面的尺寸呈正相关。增加单元数量会带来更高的功率增益，这凸显了



Rx	Configured RIS	To be configured	Power		
			Before (dBm)	After (dBm)	Gain (dB)
A	null	RIS#1	-24.2	-7.4	+16.8
B	RIS#1	RIS#2	-26.3	-18.3	+8
C	RIS#1, RIS#2	RIS#3	-27.0	-27.0	0
D	RIS#1, RIS#2, RIS#3	RIS#4	-30.0	-29.1	+0.9
E	RIS#1, RIS#2, RIS#3	RIS#4	-33.3	-33.3	0

图 2. 多跳 RIS 辅助通信实验。

可重构智能表面尺寸的重要性。然而，由于菲涅耳区的特性，近场中的功率缩放定律更为复杂，因此难以建立明确的线性关系。

B. 多跳路由

在实际实验中，多 RIS 辅助通信的有效性，尤其是涉及两跳以上的情况，尚未得到充分探索。为此，我们按照图 2 所示的配置在消声室中进行实验。实验中使用多个可重构智能表面（最多四个），依次将信号从信号源转发至接收端。每个可重构智能表面均由 10×16 个一比特单元组成，并由锂离子电池供电。

在第一个实验中，我们研究了不同 RIS 路由配置（包括单跳、两跳、三跳和四跳路由）所实现的功率增益。信号源朝向 RIS#1 发射电磁波，发射角为 0°。每个可重构智能表面均采用波束重塑技术，将入射电磁波聚焦至下一个可重构智能表面的位置。为确保比较公平，在每项测试中，接收端的喇叭天线均指向最后一个可重构智能表面。

在没有可重构智能表面的情况下，接收端的功率测量值约为 -80 分贝毫瓦。当可重构智能表面经过策略性部署并进行最优配置后，我们观察到接收端的接收功率显著提升。单跳、两跳、三跳和四跳可重构智能表面路径的测量功率分别为 -13.9 分贝毫瓦、-23.3 分贝毫瓦、-26.4 分贝毫瓦和 -29.1 分贝毫瓦。这些结果表明，可重构智能表面能够在发射机与接收端之间建立可靠的链路。

一个有趣的发现是，随着中继链中可重构智能表面数量的增加，多跳可重构智能表面所实现的功率增益会降低。这一趋势可归因于多个可重构智能表面的存在所引入的多个路径段的路径损耗。尽管可重构智能表面能够带来增益，但这些增益可能无法完全抵消中继链上累积的路径损耗。因此，如果条件允许，最好减少可重构智能表面的数量，以尽量降低额外路径损耗的影响。

在第二项研究中，我们进一步考察了沿指定路径进行的多跳可重构智能表面路由。与第一项实验中接收端位置固定且朝向最后一个可重构智能表面的情况不同，我们改变了接收端的位置。对于单跳、两跳、三跳和四跳可重构智能表面路径，接收端目前分别位于 A、B、C 和 D（或 E）点。

图 2 所示结果表明，各个 RIS 在增强信号方面发挥着不同作用。具体而言，RIS#1（位于链路起始处）带来了 16.8 分贝的显著功率增益，使其成为增强接收信号影响最大的因素。RIS#2 也贡献了 8 分贝的增益，但不如 RIS#1 显著。令人意外的是，即使采用最优配置，RIS#3 和 RIS#4 也未能带来显著的功率增益。不过，这些后续 RIS 节点有助于延长传播路径。

为进一步了解后续节点的作用，我们进行了额外测试，以探究 RIS#3 的作用。我们将单个可重构智能表面替换为由 20×32 个单元组成的四个可重构智能表面。测试旨在评估更大的 RIS 是否能够提升整体性能。然而，结果显示，四个可重构智能表面带来的功率增益仅为 0.9 分贝，远低于理论值 6 分贝。造成这一现象的主要原因是 RIS#2 的反射功率有限，导致入射到下一个 RIS#3 上的入射波较弱。即使对 RIS#3 进行最优配置，其反射功率仍然较弱。

总而言之，实验得出了两个有趣的发现：

- 多跳可重构智能表面能够有效增强隧道等复杂环境中的无线通信，从而显著提升接收信号功率。

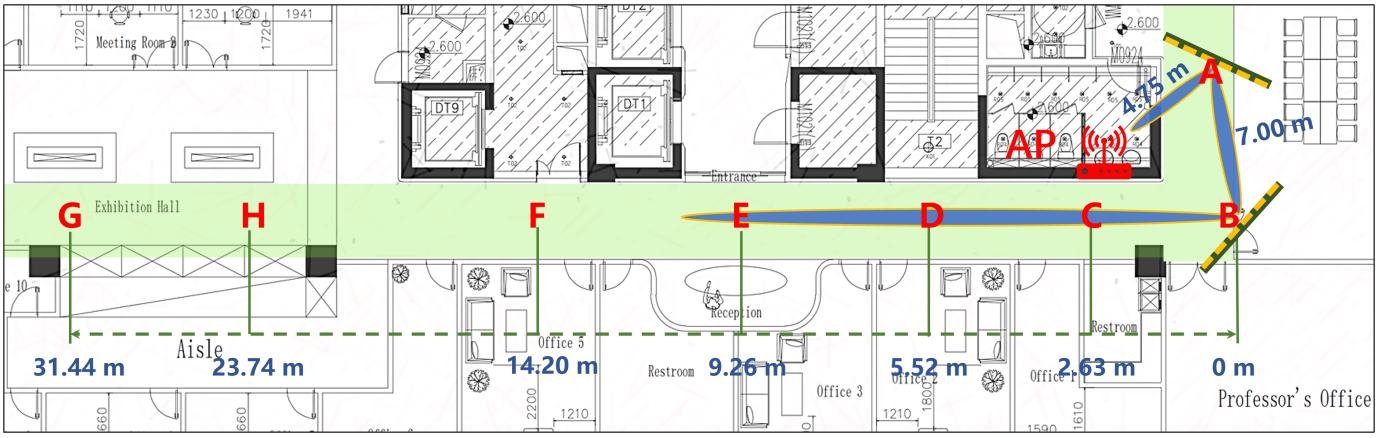


图3. 办公楼中多RIS辅助Wi-Fi通信的实验设置。

- 多跳可重构智能表面所实现的功率增益会随着中继链中可重构智能表面数量的不同而变化。多个可重构智能表面虽能共同增强信号，但后续可重构智能表面带来的功率增益可能不足以完全弥补由此引入的路径损耗。

*C. RIS*辅助*Wi-Fi*通信

为评估多个可重构智能表面在实际网络中的性能，我们在RIS辅助Wi-Fi 6网络中进行了测试。实验设置包括一个充当信号源的接入点（荣耀XD20 @5.8 GHz）和一个充当接收端的站点（联想ThinkPad T14）。在链路中部署一个或两个可重构智能表面，以评估其对网络性能的影响。除信号强度外，我们还将数据速率、抖动和丢包作为评估指标。这些指标能够全面评估网络性能，尤其是与用户体验相关的性能。

为评估信号增强能力，我们使用单个可重构智能表面将Wi-Fi信号中继至尺寸为 $5 \times 7 \times 6$ m^3的消声室中进行实验。接入点位于消声室外部，而一个工作在5.8 GHz频段的可重构智能表面则放置在入口处。为测量和分析信号强度，我们使用名为NetSpot的Wi-Fi分析仪工具。平均而言，消声室内的信号强度提升了10分贝以上。这种增强直接得益于可重构智能表面重塑入射信号、扩大覆盖范围并缓解盲区的能力

此外，我们在办公楼的 L形通道沿线搭建了一个双跳可重构智能表面系统，以增强 Wi-Fi 6 的覆盖范围。除了使用 NetSpot 评估信号强度外，我们还使用 iPerf3 从数据速率、抖动和丢包等方面评估性能。iPerf3 是一种标准化的性能测量工具，因为它能够提供与用户体验密切相关的准确测量结果。

图 3 展示了双跳可重构智能表面辅助 Wi-Fi 网络的设置。接入点充当发射机，位于洗手间内，并朝向短走廊中的第一个可重构智能表面。位于拐角处的第二个可重构智能表面充当中继器，以增强沿长走廊传输的 Wi-Fi 信号。两个可重构智能表面均安装在 1 米高处。我们使用 RGD算法优化相位配置 [14]。

我们使用笔记本电脑记录了八个不同测点（A 至 H）的性能指标，并将结果列于表 I。值得注意的是，随着距离增加，数据速率、抖动和丢包均显著改善。长走廊尽头的测点（H 和 G）改善最为显著。例如，在测点 H，数据速率从 17.27 Mbps 提高至 34.80 Mbps，抖动从 52.56 ms 降至 9.91 ms，丢包从 69.20% 降至 7.51%。相比之下，靠近起点的测点（A 和 B）仅有小幅改善。这是因为即使没有可重构智能表面，这些测点的性能也已经足够好。

*D. RIS*辅助蜂窝通信

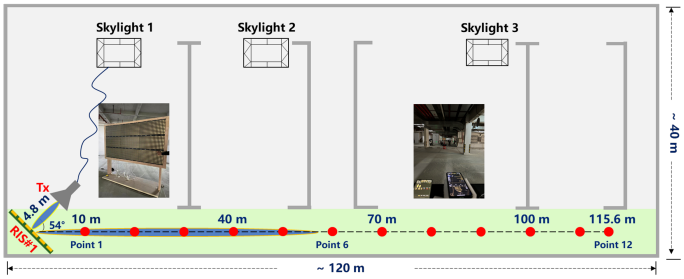
为了探索多个可重构智能表面在真实商用5G网络中的潜力，我们在一处地下停车库进行了额外评估。该停车库面积约为125 m $\times$ 40 m，存在信号阻塞和路径损耗等问题，可能对蜂窝通信造成重大影响。我们的目的是评估在停车库内部署可重构智能表面以改善信号覆盖并提升整体网络性能的效果。

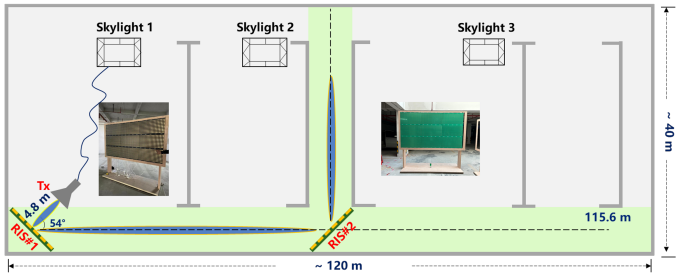
为便于开展实验，我们使用了一台定制中继器，用于捕获中国电信N78频段（3.4-3.5 GHz）的信号。信号如图4(a)所示，经由天窗进入停车库，中继器则充当馈源。需要注意的是，即使启用了中继器，地下停车库中的N78频段信号仍极其微弱。参考信号接收功率（RSRP）平均值低于运营商设定的可接受阈值（-100 dBm）。为改善信号质量，我们策略性地部署了两块工作于3.4 GHz的可重构智能表面，每块均由 30×60 个两比特单元组成。移动设备充当接收器。

我们开展了两项试验，以评估可重构智能表面辅助网络的性能。在第一项试验中，我们在

表 I 不同位置的用户体验性能指标

位置	接收信号强度（dBm）		数据速率/Mbps		抖动/ms		丢包率/%	
标识符	不使用可重构智能表面	采用可重构智能表面进行通信	无可重构智能表面	借助可重构智能表面	无可重构智能表面	借助可重构智能表面	无可重构智能表面	借助可重构智能表面
A	-55	-53	40.00	40.00	4.89	3.22	0.00	0.00
B	-56	-54	40.00	40.00	7.00	3.45	0.92	0.00
C	-66	-63	39.70	40.00	10.08	3.78	5.70	0.03
D	-71	-66	36.66	40.00	9.28	7.76	13.52	0.03
E	-76	-69	34.62	39.90	25.65	7.57	41.00	2.33
F	-78	-72	30.68	39.30	27.61	8.74	48.95	6.94
G	-79	-72	27.73	36.50	29.93	8.82	63.50	7.20
H	-83	-73	17.27	34.80	52.56	9.91	69.20	7.51

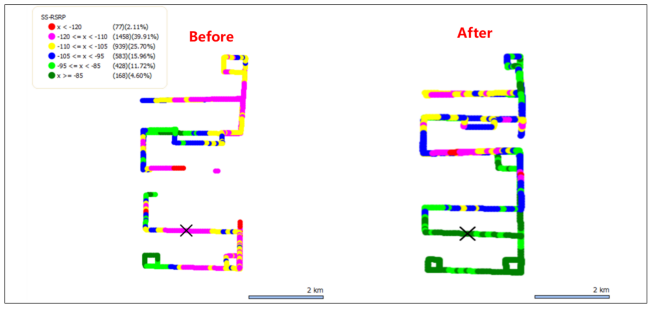




RIS configured	10 m	20 m	30 m	40 m	50 m	60 m	70 m	80 m	90 m	100 m	110 m	115.6 m
Before (dBm)	-85	-95	-95	-105	-109	-111	-101	-100	-	-	-	-
After (dBm)	-80	-79	-83	-87	-84	-80	-80	-81	-80	-82	-81	-85
Gains by RIS	5 dB	16 dB	12 dB	18 dB	25 dB	31 dB	31 dB	29 dB	> 40 dB	> 38 dB	> 39 dB	> 35 dB

'-' denotes the signal power is smaller than -120 dBm, which cannot be detected.

(a)



(b)

图 4. 多RIS辅助蜂窝通信。(a) 使用位于左下角的单个可重构智能表面，评估沿通道的信号增强效果。(b) 使用双跳可重构智能表面，评估整个停车场内的信号增强效果。

左下角部署一个单个可重构智能表面，以评估沿通道的信号增强情况。我们使用智能手机和 Cellular-Pro（一款免费的专业网络优化应用）在 12 个点采集测量数据。在第二项试验中，我们在一个 T形路口额外部署一个可重构智能表面，以考察整个停车场的总体性能提升情况。为确保测量全面且准确，我们使用智能手机和 Pilot Pioneer 软件（一款用于网络性能基准测试的商业工具）。这些测量为了解用户对所提供服务的感受提供了宝贵见解。

首次试验的结果如图 4 (a)（下方）所示。在对可重构智能表面进行最优配置后，沿这条长 120 米的通道，平均信号强度从 -100 dBm 提升至 -80 dBm，增益约为 20 dBm。此外，我们观察到，整个通道的参考信号接收功率始终保持在 -80 dBm 左右。

信号强度的提升可归因于两个因素。首先，在接收阶段，增加单元的数量可以提高接收功率，使无源 RIS 能够转换更多功率，并将其重新定向至所需方向。其次，在反射阶段，RIS 的大面积有助于提高波束成形增益。这意味着更大的孔径能够形成更集中、更强的主波束。此特性进一步增强了沿途的信号覆盖。

在第二次试验中，我们评估双跳可重构智能表面辅助蜂窝通信的性能。为提高覆盖率，我们将第二个可重构智能表面战略性地部署在 T 形路口，如图 4(b) 所示。与首次试验仅在通道沿线采样 12 个点不同，我们的目标是收集整个停车场内全面的信号测量数据。为此，我们使用三部智能手机，并借助 Pilot Pioneer 软件进行实时测量。

第二次试验的测量结果显示，整个停车场的信号覆盖范围显著改善。如图 4(b)（下图）所示，信号强度低于 -110 dBm 的区域（以红色和粉色点表示）大幅缩小，而信号强度高于 -95 dBm 的区域（以浅绿色和深绿色点表示）则显著扩大。整个停车场的平均参考信号接收功率（RSRP）

从 -105.84 dBm 提升至 -91.87 dBm，增益约为 14 分贝。此外，下行速率从 79.63 Mbps 提升至 110.58 Mbps，上行速率则从 9.99 Mbps 提升至 17.54 Mbps。这些结果表明，双跳RIS辅助5G网络的信号质量和数据传输速率均得到显著提升。

IV. 结论

本研究聚焦于多RIS辅助通信的设计与性能评估。我们提出了一种用于实现单元的简化且可扩展架构，并制造了工作于5.8 GHz和3.4 GHz的RIS板。通过在消声室和实际环境中开展的一系列实验，我们评估了所设计可重构智能表面的性能，并研究了多个可重构智能表面的潜在优势。

我们的研究结果表明，多跳可重构智能表面能够有效增强复杂环境中的无线通信，从而显著提高接收信号功率。此外，在某些场景中，经优化配置的可重构智能表面所实现的功率增益与单元数量成正比，遵循功率缩放定律。然而，一个有趣的发现是，功率增益可沿多跳可重构智能表面的中继链发生较大变化，后续可重构智能表面的功率增益低于较早节点。未来研究可重点开发多个可重构智能表面之间的协同算法。

参考文献

[1] C. Della Giovampaola 和 N. Engheta，《数字超材料》，*Nature Materials*，第 13 卷第 12 期，第 1115–1121 页，2014年。[2] A. U. Makarfi 等，《广义衰落信道中的可重构智能表面赋能物联网网络》，载于 *ICC 2020-2020 IEEE*国际通信会议 *(ICC)*，第 1–6 页，IEEE，2020年。[3] S. Kisseleff 等，《面向智慧城市的可重构智能表面：研究挑战与机遇》，*IEEE*通信学会开放期刊，第 1 卷，第 1781–1797 页，2020年。[4] J.-B. Gros 等，《基于二进制相位可调超表面的毫米波可重构智能表面》，*IEEE*通信学会开放期刊，第 2 卷，第 1055–1064 页，2021年。[5] W. Tang 等，《采用可重构智能表面的无线通信：路径损耗建模与实验测量》，*IEEE*无线通信汇刊，第 20 卷，439，2020年 1，421第。期 页 – 。[6] X. Pei 等，《可重构智能表面辅助无线通信：原型制作、自适应波束成形与室内外现场试验》，*IEEE*通信汇刊，第 69 卷第 12 期，第 8627–8640 页，2021年。[7] L. Dai 等，《基于可重构智能表面的无线通信：天线设计、原型制作与实验结果》，*IEEE Access*，第 8 卷，第 45913–45923 页，2020年。[8] J. Rains 等，《用于无线覆盖增强的高分辨率可编程散射：室内现场试验活动》，*arXiv*预印本 *arXiv:2112.11194*，2021年。[9] G. C. Trichopoulos 等，《真实环境中的可重构智能表面设计与评估》，*IEEE*通信学会开放期刊，第 3 卷，第 462–474 页，2022年。[10] J. Sang 等，《在 5G商用移动网络中部署可重构智能表面以增强覆盖范围：现场试验》，*IEEE Wireless Communications*，2022年。[11] A. Araghi 等，《6 GHz以下频段的可重构智能表面（RIS）：设计、实现与真实环境演示》，*IEEE Access*，第 10 卷，第 2646–2655 页，2022年。[12] Q. Wu 和 R. Zhang，《通过有源与无源联合波束成形增强的智能反射面无线网络》，*IEEE*无线通信汇刊，第 18 卷第 11 期，第 5394–5409 页，2019年。[13] B. Ning 等，《智能反射面辅助多输入多输出的波束成形优化：路径增益和最大化方法》，*IEEE*无线通信快报，第 9 卷第 7 期，第 1105–1109 页，2020年。[14] R. Xiong 等，《真实环境中的可重构智能表面辅助无线通信：天线设计、原型制作、波束重塑与现场试验》，*arXiv*预印本 *arXiv:2303.03287*，2023年。[15] W. L. Stutzman 和 G. A. Thiele，《天线理论与设计》。约翰·威立父子公司，2012年。

个人简介

Rujing Xiong [S'22] (rujing@hust.edu.cn)于2017年获得中国郑州大学生物信息学学士学位，并于2020年获得中南大学电子与通信工程硕士学位。目前，他正在华中科技大学攻读博士学位。

Jianan Zhang [S'22] (zhangjn@hust.edu.cn)于2021年获得中国太原山西大学信息与通信工程硕士学位。目前，她正在华中科技大学攻读博士学位。

Xuehui Dong [S'22] (dong_xh@hust.edu.cn)于2021年获得中国华中科技大学通信工程学士学位，目前正在该校电子信息与通信学院攻读博士学位。

Zhengyu Wang [S'22](wangzhengyu@hust.edu.cn)于2020年获得中国长沙中南大学通信工程学士学位。目前，她正在中国华中科技大学攻读博士学位。

Junshuo Liu [S'23] (junshuo liu@hust.edu.cn)于2018年获得南京邮电大学学士学位，并于2019年获得英国伦敦国王学院理学硕士学位。目前，他正在中国华中科技大学攻读博士学位。

Wei Yang [S'23] (yangwei eic@hust.edu.cn)于2021年获得武汉科技大学工学学士学位。目前，他在华中科技大学攻读理学硕士学位。

Tiebin Mi [M] (mitiebin@hust.edu.cn)于2002年获得中国西安电子科技大学计算机科学工学学士学位，并于2010年获得中国科学院声学研究所电气工程博士学位。目前，他任职于中国华中科技大学，担任讲师（助理教授）。

Wenbo Huang [S'21](eric_huang@hust.edu.cn)于2021年获得中国华中科技大学电子工程工学学士学位，目前正在该校攻读博士学位。

Robert Caiming Qiu [F] (caiming@hust.edu.cn)获得了纽约大学电气工程博士学位。自2020年起，他在中国华中科技大学电子信息与通信学院担任正教授。