

基于无源可重构智能超表面的室内无线信号覆盖增强

刘海霞, 易浩, 马向进, 乐舒瑶, 孔旭东, 马培, 曾宇鑫, 李龙

(西安电子科技大学超高速电路设计与电磁兼容教育部重点实验室, 陕西 西安 710071)

摘要: 可重构智能超表面 (RIS) 是一种新型人工电磁材料, 可灵活调控电磁波的频率、幅度、相位、极化、传播方向、波形等特性。在无线通信领域, 可利用 RIS 重构无线通信信道, 实现无线信号的盲区覆盖, 提高通信质量。首先, 概述了 RIS 技术的发展和研究现状, 分析了 RIS 的关键技术和应用场景。然后, 提出了一种新型无源 RIS, 通过无源编码和拼接原理实现了 RIS 口径可重构和波束可重构特性, 具有低成本、低功耗、低复杂度的优点。最后, 在实际室内环境下进行了基于无源 RIS 的室内无线信号盲区覆盖增强实验。通过仿真与实测对比, 证明了无源可拼接超表面在无线通信补盲场景应用中的有效性。此外, 针对 5G/6G 毫米波通信, 设计了双层交叉振子无源 RIS, 应用到室内典型的 L 形走廊场景, 验证了无源 RIS 对室内无线信号覆盖的增强效果。

关键词: 无源可重构智能超表面; 信道重构; 盲区覆盖; 无线通信

中图分类号: TN92

文献标志码: A

DOI: 10.11959/j.issn.1000-436x.2022229

Indoor wireless signal coverage and enhancement based on passive reconfigurable intelligent metasurface

LIU Haixia, YI Hao, MA Xiangjin, YUE Shuyao, KONG Xudong, MA Pei, ZENG Yuxin, LI Long

Key Laboratory of High-Speed Circuit Design and EMC, Ministry of Education, Xidian University, Xi'an 710071, China

Abstract: Reconfigurable intelligent metasurface (RIS) is a new type of artificial electromagnetic metamaterial, which can control the frequency, amplitude, phase, polarization, propagation direction and wave type of electromagnetic wave flexibly. In the field of wireless communication, RIS can be used to reconstruct the wireless communication channel to achieve blind coverage of wireless signals and improve the communication quality. First, the development and research status of RIS, the key technologies and application scenarios of RIS were summarized and analyzed. Then, a new passive RIS was proposed to realize the characteristics of the aperture reconfiguration and beam reconfiguration through passive coding and splicing principle, which had the advantages of low cost, low power consumption and low complexity. Finally, the blind area coverage enhancement experiment of indoor wireless signal based on passive reflection metasurface was carried out. The effectiveness of passive splicing metasurface in wireless communication blind coverage scenarios was proved by comparison between simulation and field measurement. In addition, for 5G/6G millimeter wave communication, the passive RIS with double-layer cross dipole elements was designed and applied to typical indoor L-shaped corridor scene to verify the enhancement effect of indoor wireless signal coverage.

Keywords: passive reconfigurable intelligent metasurface, channel reconstruction, blind zone coverage, wireless communication

收稿日期: 2022-08-07; 修回日期: 2022-11-25

通信作者: 李龙, lilong@mail.xidian.edu.cn

基金项目: 国家自然科学基金资助项目 (No.62288101); 国家重点研发计划基金资助项目 (No.2021YFA1401001); 陕西省重点领域科技创新团队基金资助项目 (No.2021TD-07); 陕西省杰出青年科学基金资助项目 (No.2019JC-15)

Foundation Items: The National Natural Science Foundation of China (No.62288101), The National Key Research and Development Program of China (No.2021YFA1401001), The Key Research and Development Program of Shaanxi for Science and Technology Innovation Team (No.2021TD-07), Outstanding Youth Science Foundation of Shaanxi Province (No.2019JC-15)

0 引言

随着社会经济的发展和进步，移动通信的发展越来越快，连接无处不在，人们对高速无线通信的需求越来越高。5G 的关键技术包含毫米波、大规模多输入多输出 (MIMO, multiple-in multiple-out)、智能设备等^[1]。毫米波通信的到来带来了更丰富的频谱资源，同时也带来了更多的难题和挑战。毫米波通信具有容量大、传输质量高以及保密性强等优点，在物联网通信中有非常广阔的应用前景^[2-3]。但是，电磁波在毫米波频段主要以直达波的形式传播，空间衰落快，在复杂的室内会造成传输损耗激增和通信空洞的现象，从而降低毫米波有源基站的信号覆盖。虽然通过加载有源中继^[4-5]或者部署小型化基站的方法也能够增强信号覆盖，但是这种方法往往会带来高额的成本、巨大的调控难度以及非必要的电磁能量泄露等。因此，如何降低通信系统的复杂度，同时开发出低功耗、低成本的盲区覆盖与增强技术是当今研究人员迫切需要解决的问题。近年来，研究人员尝试使用电磁超材料技术来解决这个问题，通过在环境中部署电磁超材料，并将其作为无源微基站，改变无线通信的电磁环境和信道链路，从而实现高效的无线信号能量利用。

人工电磁媒质也称为电磁超材料，是一种天然材料所不具备的超常物理性质的人工复合结构或复合材料^[6]。从本质上讲，这是一种新颖的材料设计思想，通过在材料的关键物理尺度上的有序结构设计来突破某些表象自然规律的限制，从而获得超常的材料功能。近年来，随着认知无线电技术、微电子技术、计算机技术的发展，数字化技术被引入人工电磁媒质领域，以满足人工超材料对环境变化和应用对象变化的适应性要求。Cui 等^[7]最早在 2014 年提出数字编码超材料和现场可编程超材料的概念，并利用空间编码 0 和 1 来表征超材料，从而与信息建立联系。人工电磁超表面可实现对电磁波频率、幅度、相位、极化以及波形等参数的综合调控^[8-9]。可重构技术通过加载电子器件或使用机械方法改变辐射源的辐射特性^[10-11]，在同一辐射源中，天线的工作频率、辐射方向图和极化特性会根据外部需求灵活调整，这不仅提供了一种高效且受控的系统整理技术，而且满足系统对应用对象和外部环境变化的适应性要求。基于人工电磁超材料、数字超材料和可重构超材料的研究，研究人员又将

智能化的概念融入其中，使超材料具备环境自适应动态调整的能力，于是智能超材料技术应运而生。可重构智能超表面 (RIS, reconfigurable intelligent metasurface) 是一种新型人工电磁材料，与有源中继放大信号不一样，RIS 只是将入射波信号灵活调控到既定的区域，这样既不会产生大的功耗，也不用引入新的信号源，使通信环境从物理层上增强了安全性，是 IMT2030-6G 通信的核心技术之一^[12]。

Li 等^[13-15]首次提出了利用反射超表面进行无线通信的盲区覆盖工作，设计了一个交叉偶极子阵列和一个印刷在介质衬底两侧的方环频率选择表面 (FSS, frequency selective surface) 组成的频率选择反射面 (FSR, frequency selective reflector)，并将 FSR 应用于室外墙面装置和宽带码分多址系统以消除基站和移动用户之间的通信盲区。通过实际链路计算分析，证明了 FSR 在改善移动通信城市电波环境、消除通信盲区方面的有效性。Wu 等^[16]提出 RIS 技术可以通过重新配置信号传播进而提高网络性能。通过部署 RIS，协助从一个接入点 (AP, access point) 到一个用户的通信。因此，用户同时接收到直接从 AP 发送的信号和 RIS 反射的信号。通过联合优化 AP 的发射波束成形和 RIS 的反射波束成形，使用户接收的总信号功率最大。Nemati 等^[17]通过随机几何学研究 RIS 辅助的大型毫米波蜂窝网络的覆盖范围，提出采用大规模 RIS 调控主波束方向来提升 5G 毫米波的通信覆盖范围的方案，结果表明，部署可重构智能超表面能够增强毫米波的覆盖。Lu 等^[18]提出在室内建筑常见的 T 形和 L 形走廊中可以利用无源反射阵完成室内毫米波的盲区覆盖，加载无源反射阵前后盲区信号可提高 15 dB 左右。

RIS 无线通信系统工作示意如图 1 所示。RIS 通过提供额外的视线线路 (LOS, line of sight) 链接来增加用户接收到的信号功率，通过共同优化 AP 与用户形成的直接链路和 AP-RIS-用户形成的间接链路，最大限度地提高用户接收到的信号功率。从上述分析可知，RIS 在无线通信应用中具有巨大潜力，但是 RIS 为了实现实时波束可调，仍然需要加载大量有源器件，会导致成本和功耗的增加。为了解决这一问题，本文提出一种无源 RIS，不仅保留 RIS 的优势，还具有低成本、低功耗、低复杂度的优点。为了验证无源 RIS 在实际情况下对室内盲区信号覆盖的有效性，本文先采用无源 RIS 进行室内盲区覆盖实验，证实无源微带反射超表面在实际使

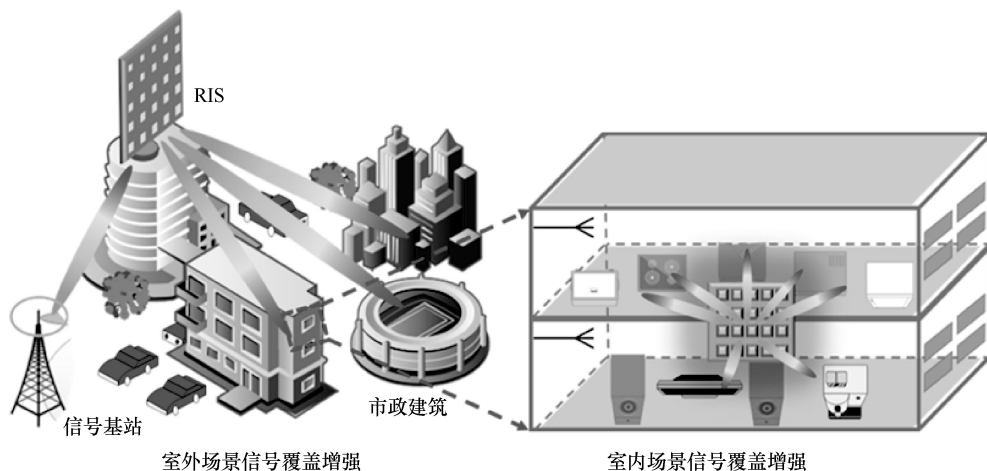


图 1 RIS 无线通信系统工作示意

用的可行性, 再采用无源 RIS 对毫米波盲区可重构覆盖进行验证。

本文的主要内容如下。首先, 从微带反射阵工作原理入手, 设计一种基于比特量化原理的无源 RIS, 通过无源编码和拼接原理实现 RIS 可重构特性, 既能保留无源反射阵的低成本优势, 又能在一定程度上实现 RIS 口径和波束同时可重构, 满足不同场景的应用需求。其次, 构建无线通信场景研究无线信号的传输盲区增强问题, 通过设计和部署无源微带反射超表面, 在所构建场景中进行测试来验证无源 RIS 在无线信号覆盖盲区增强方面的能力, 并说明无源 RIS 在盲区覆盖实际应用中的有效性。最后, 在上述实验以及理论基础上设计针对常见 L 形走廊的无源 RIS, 进一步对场景进行建模仿真, 设计双层十字交叉振子无源 RIS, 验证无源 RIS 在毫米波无线信号覆盖盲区增强方面的效果。

1 RIS 的设计原理

1.1 反射超表面工作原理

反射超表面由人工反射超表面单元结构按照一定规则排布形成。在介质板的上表面蚀刻超表面单元, 下表面覆盖金属, 就构成了典型的反射单元。反射超表面具有高增益、低剖面以及设计简便等优点。反射超表面的工作原理如图 2 所示。当馈源发出的入射波照射到反射超表面的单元时, 各个单元接收入射波并经过特定的相位时延后形成再次辐射。由于从馈源到各个反射超表面单元的传播路径不同, 所造成的空间相位时延也不同, 因此会造成再次辐射时的方向图纷繁不同。为了在远场形成良好的预定主波束辐射方向图, 基于阵列天线基本理

论, 各个单元需要对空间中的不同相位时延进行补偿, 从而得到特定需求方向上的相位同相叠加, 产生特定波束。通过调节反射超表面单元的尺寸和相对旋转角度等参数, 可以调节反射超表面口径面上的相位分布, 使各个单元处的入射波得到对应的相位补偿, 从而产生预定的主波束。

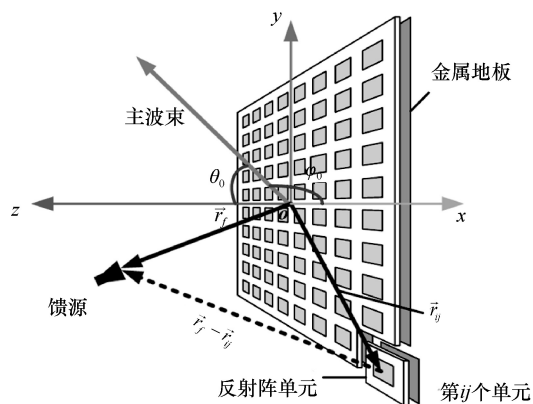


图 2 反射超表面的工作原理

$M \times N$ 的反射超表面形成预定主波束的关键在于各个单元补偿相位的计算, 正确的补偿相位将会在预定方向形成高增益或特定成形的主波束。如图 2 所示, 假设超表面单元处于 $z=0$ 的平面上, 口径面上的第 i 行第 j 列的单元中心坐标为 $(x_i, y_j, 0)$, 其与原点的相对位置为 \vec{r}_{ij} ; 馈源中心坐标为 (x_f, y_f, z_f) , 其与原点的相对位置为 \vec{r}_f , 因此反射电场的计算式为

$$E(\hat{u}) = \sum_{i=1}^M \sum_{j=1}^N F(\vec{r}_{ij}, \vec{r}_f) A(\vec{r}_{ij}, \vec{r}_f) A(\hat{u}, \hat{u}_0) \cdot e^{-jk_0(|\vec{r}_f - \vec{r}_{ij}| - \vec{r}_{ij} \cdot \hat{u}) - j\phi_R} \quad (1)$$

其中, A 为超表面的单元辐射方向图函数, F 为馈源的方向图函数, φ_R 为每个单元的补偿相位, \hat{u}_0 为天线的波束方向。当反射波束指向为 (θ_0, φ_0) 时, 总的传播路径之差 Δl 可表示为

$$\Delta l = |\vec{r}_f - \vec{r}_{ij}| - x_i \sin \theta_0 \cos \varphi_0 - y_i \sin \theta_0 \sin \varphi_0 \quad (2)$$

那么 Δl 对应的相位时延 φ_l 可表示为

$$\varphi_l = k_0 (|\vec{r}_f - \vec{r}_{ij}| - x_i \sin \theta_0 \cos \varphi_0 - y_i \sin \theta_0 \sin \varphi_0) \quad (3)$$

其中, k_0 为真空中的波数且 $k_0 = \frac{2\pi}{\lambda}$, 当反射波设定为 (θ_0, φ_0) 方向出射时, φ_l 与反射阵上的各单元相位偏移 φ_R 需满足

$$\varphi_l + \varphi_R = 2n\pi \quad (4)$$

其中, n 为大于或等于 0 的整数, 最终得到每个单元的补偿相位 φ_R 为

$$\varphi_R = -\frac{2\pi}{\lambda} \left(\sqrt{(x_f - x_i)^2 + (y_f - y_j)^2 + z_f^2} - x_i \sin \theta_0 \cos \varphi_0 - y_i \sin \theta_0 \sin \varphi_0 \right) + 2n\pi \quad (5)$$

1.2 无源 RIS 设计理论

1.2.1 可重构反射超表面相位量化原理

反射超表面中提出了补偿相位, 通过调整单元尺寸改变单元反射相位, 从而对空间中的出射电磁波实现相位补偿, 可实现经典的笔形波束出射。普通的反射超表面虽然可以提供笔形波束出射, 但是不能实现实时的波束调控, 因此可重构反射超表面应运而生。基于反射超表面的补偿相位特征, 研究者提出相位量化原理。平面反射超表面中每一个反射单元的相位都是连续变化的, 由式(5)可以算出微带反射阵中每一个单元需要补偿的相位, 通过在单元表面加载 N 个电控元件, 可以得到 2^N 个相位, 即实现 N bit。对于 1 bit 相位量化, 只有 0° 和 180° 这 2 个相位, 通过式(6)可以完成相位量化。

$$\phi = \begin{cases} 0^\circ, & 0 \leq \phi \leq \pi \\ 180^\circ, & \pi < \phi \leq 2\pi \end{cases} \quad (6)$$

基于 1 bit 相位量化技术, 相位量化可以从 1 bit 扩展到 2 bit, 甚至更多, 相位量化的比特越多, 意味着精度越高, 这就需要产生更大的自由度来控制电磁波。但是随着比特数的增多, 直流偏置控制电路的复杂度以及成本也会随之上升, 对于不同场景, 需要综合考虑。

1.2.2 基于比特相位量化的无源可拼接超表面设计理论

对于波束在方位面指向为 θ_a 的平面反射超表

面, 超表面上各单元的相位梯度 p_g 为

$$p_g = k_0 \sin \theta_a \quad (7)$$

对于平面波激励的笔形波束或成形波束, 由式(7)可知, 波束指向 θ_a 由相位梯度 p_g 决定。假设有 2 种具有不同相位梯度的子阵, 分别用 1 bit 相位量化原理中的数字符号 0 和 1 表示, 其中, 0 的相位梯度为 p_{g0} , 波束指向为 θ_{a0} ; 1 的相位梯度为 p_{g1} , 波束指向为 θ_{a1} 。根据插值理论, 利用若干 0 和 1 的组合可以得到等效相位梯度 p_{gi} 的阵列, 其中, p_{gi} 的变化范围为 $[p_{g0}, p_{g1}]$ 。由于等效相位梯度 p_{gi} 发生变化, 波束指向 θ_{ai} 理论上可以得到 $[\theta_{a0}, \theta_{a1}]$ 范围内的任意值。为了确定波束指向为 θ_{ai} 的子阵拼接方式, 本文提出平均相位梯度原则。假设阵列由 M 个子阵 0 和 N 个子阵 1 构成, 那么阵列可以记为行向量 \mathbf{V} , \mathbf{V} 中包含 N 个元素 0 和 M 个元素 1。拼接后阵列的总移相量为 ψ_{all}

$$\psi_{\text{all}} = 2\pi(M + N) \quad (8)$$

平均相位梯度定义为

$$\overline{p_g} = \frac{\psi_{\text{all}}}{L(\mathbf{V})} \quad (9)$$

其中, $L(\mathbf{V})$ 为阵列沿方位方向的物理长度。要使波束指向为 θ_{ai} , 需根据式(10)和式(11)使逼近误差 ε 足够小, 则可以认为通过 M 个子阵 0 和 N 个子阵 1 构造阵列 \mathbf{V} 使波束指向期望值 θ_{ai} 。

$$\varepsilon = |p_{gi} - \overline{p_g}| \quad (10)$$

$$\varepsilon' = \left| \theta_{ai} - \sin^{-1} \left(\frac{MN \sin \theta_{a0} \sin \theta_{a1}}{M \sin \theta_{a0} + N \sin \theta_{a1}} \right) \right| \quad (11)$$

需要注意的是, 由式(11)可知, 如果存在解 M_0 和 N_0 , 那么一定存在解 kM_0 和 kN_0 , 因此规定 $M_0 + N_0$ 取最小值时的向量 \mathbf{V} 为最小向量 \mathbf{V}_{min} 。为了满足周期性原则, \mathbf{V} 由 K 个 \mathbf{V}_{min} 拼接而成

$$\mathbf{V} = \left[\underbrace{\dots \mathbf{V}_{\text{min}} \dots}_K \right], \quad K \text{ 为正整数} \quad (12)$$

对于最小向量 \mathbf{V}_{min} , 当 $M_0 > 1$ 和 $N_0 > 1$ 时, \mathbf{V}_{min} 具有多种 0 和 1 的排列组合方式。取 $K=2$, 通过阵列方向图公式计算理论方向图, 选取波束指向误差以及副瓣最小的组合方式。通过无源子阵拼接方式, 取一个周期内的阵元为子阵, 通过拼接多个子阵, 可以使超表面阵列扩展至任意期望口径, 同时

保持相位梯度和波束指向不变。因此,这种无源 RIS 技术不但具有 RIS 的可重构和智能化功能,即可以根据外部环境的变化实时拼接超表面阵列,从而实现可重构的阵列口径、可重构的波束指向和可重构的波束成形,而且是完全无源的设计,可进行大规模实施,具有低成本、低功耗、低复杂度的优点。

2 基于无源 RIS 的室内无线信号覆盖

2.1 基于无源 RIS 的室内盲区覆盖方案

本文采用常用的 5.8 GHz Wi-Fi 信号来验证基于无源 RIS 的室内通信盲区覆盖实验。采用无线电波传播与无线网络规划领域内的标准软件工具 WinProp 对复杂的室内场景进行建模分析,在此基础上设计无源 RIS 并加工测试,实地测试架设超表面前后室内无线信号功率分布,以此验证无源 RIS 对室内信号盲区覆盖的有效性。

2.1.1 室内场景建模与分析

复杂室内场景下的无线通信有多径传播^[19]的特征。这些场景中的主要传播除了直射外,还包括建筑物墙壁上的多次反射以及绕射。本文采用 Winprop 构建室内场景模型,仿真对比加载无源 RIS 前后室内 Wi-Fi 信号功率覆盖情况。一般情况下,建筑材料不同、厚度不同以及信号频率不同,传输损耗也不同。根据实际场景的材料尺寸构建 3D 模型,将建好的 3D 模型导入 Winprop 中进行信号传播仿真。Winprop 软件采用的传播模型需要考虑建模对象的 3D 数据,并在三维环境中计算,通过一致性绕射理论、反射的菲涅尔系数以及经验相互作用模型来计算沿射线的路径损失。根据环境不同、工作频率不同,需要在 Winprop 中选择不同模式的传播模型进行仿真分析。

经验传播模型示意如图 3 所示,其根据收集的部分特征数据和路径损耗公式,预测信号功率分布情况。这种模型的优点是简单快速,多数应用在大型的室外环境下,可以进行快速有效的大范围信号传播分布预测,计算发射源到接收点的直线路径损耗,从而预测整个区域的信号功率分布。经验模型也会针对环境变化加入不同的环境特征,例如森林植被密度、楼层墙体数目等。但是由于通信区域划分得越来越小,各个通信环境之间的相似性越来越低,需要针对特定区域进行精确的电波预测模型,例如,室内住宅中墙体障碍物分布没有规律,也没有统一度量单位,经验传播模型并不适用于预测所有场景的信号分布。



图 3 经验传播模型示意

射线追踪模型示意^[20]如图 4 所示。这种模型是一种确定性建模方法。首先,根据障碍物分布特点,运用几何光学理论、一致性绕射理论将辐射源发出的信号等效为射线;然后,对每条射线进行路径跟踪,在遇到散射体时按反射、绕射或散射等物理机制进行电磁场计算;最后,在接收点处将各个到达的射线综合,定量计算出信号到达接收点的幅度、时延以及瞬时相位,从而实现精准的传播预测^[19]。射线追踪模型可以有效克服经验传播模型的局限性,根据具体环境特征,其将对目标区域信号强度有所贡献的直射射线、反射射线以及绕射射线等综合叠加,是一种精度较高的信号传播模型。



图 4 射线追踪模型示意

当频率较高时,电磁波特性与光特性相似,采用射线追踪模型将数百条射线综合叠加更符合信号传播的实际情况。当频率较低时,在 Wi-Fi 频段(5.8 GHz 和 2.4 GHz),数百条射线中的 2~3 条射线就贡献了 90% 以上的信号功率,这种情况下只需叠加这些主导路径射线功率强度就能达到较高精度。对于无线电覆盖的预测,分析室内 Wi-Fi 信号覆盖时可以选择采用主导路径模型(DPM, dominant path model)。

室内无线信号功率分布和射线寻迹如图 5 所示。在 DPM 下,选定室内住宅场景对室内 Wi-Fi 信号分布进行分析。路由器等效为一个辐射源,放

置在图 5 中所示位置，设置发射功率为 20 dBm。当区域信号功率强度大于-80 dBm 时，用户可以接收到 Wi-Fi 信号，其中 A 房间与 B 房间信号功率强度已经低于-80 dBm，无法正常接收 Wi-Fi 信号，属于通信网络的盲区。由图 5 可知，A 房间与 B 房间无法接收到信号源的直接信号，这是因为信号源发出的信号经过数次折射或反射到达 A 房间与 B 房间时已经非常微弱，难以正常接收。

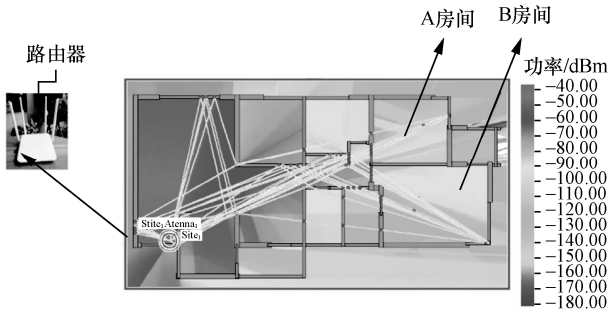
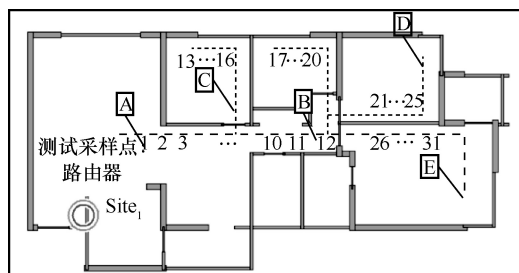
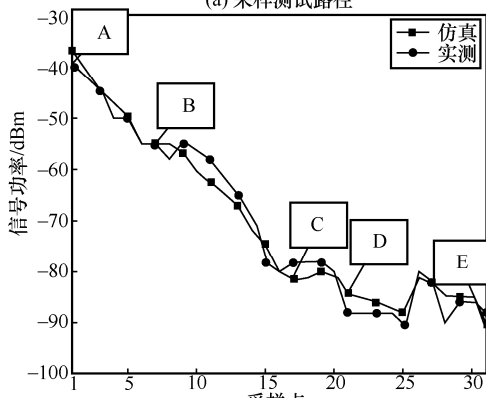


图 5 室内无线信号功率分布和射线寻迹

为了验证仿真的正确性，对该场景下的实际 Wi-Fi 信号分布进行采样测试，如图 6(a)所示，其中，Site 表示辐射源位置。由图 6(a)可知，实际 Wi-Fi 信号分布与仿真基本一致。实测信号功率分布与仿真相比最大差值不超过 5 dBm，这是由 Wi-Fi 信号波动以及实际住宅内堆砌的家具杂物等导致的，如图 6(b)所示，由此可见采用 DPM 仿真的有效性。



(a) 采样测试路径



(b) 实测与仿真信号功率对比

图 6 室内无线信号实测与仿真信号功率对比

基于上述室内 Wi-Fi 信号覆盖情况，由图 5 可知，A 房间与 B 房间处于非视距 (NLOS, non-line-of-sight) 区域，无法直接接收到路由器的信号，信号覆盖所要求的最低功率为-75 dBm。因此，可通过安装反射超表面来实现 Wi-Fi 信号定向覆盖增强。如图 7 所示，通过合理设置反射超表面的位置以及口径大小，将信号源部分信号按照一定角度 θ_{rc} 反射到非视距区域，从而消除覆盖盲区。



图 7 反射超表面在室内场景的布置示意

针对图 7 中的辐射源位置，设定无源 RIS，如图 7 中白色区域所示，距离辐射源 Site₁ 2.2 m。采用等效源模型，在 Winprop 中辐射源设置通过导入天线辐射方向图并设置输入功率或者等效全向辐射功率 (EIRP, equivalent isotropica radiated power) 实现。反射超表面作为等效辐射源的等效 EIRP 可表示为

$$EIRP = \frac{T_{BS} - EIRP}{4\pi d^2} RCS_A(\theta, \varphi) \quad (13)$$

其中， $RCS_A(\theta, \varphi)$ 表示天线 RCS 方向图， T_{BS_EIRP} 表示信号源发射功率， d 表示信号源到超表面的距离。采用等效辐射源模式，设置反射超表面的 EIRP 并导入 Wi-Fi 天线辐射方向图。为了同时增强 A 房间与 B 房间的整体 Wi-Fi 信号功率，将无源 RIS 放置在不同位置进行对比分析。这种应用也可以等效于采用不同的子阵拼接来实现波束方向的可重构控制。

图 8 为反射超表面安装在不同位置时的信号功率分布对比。以图 8(c)为例，在主客厅墙面上安装一个无源 RIS，信号源距超表面的距离为 2.2 m，无源超表面将部分信号反射到 NLOS 区域，可使盲区信号功率提升。为了满足信号覆盖所要求的最低功率为-75 dBm，由式(13)可知，无源 RIS 阵列的方向性需达到 26 dB 以上。为了进一步验证室内 Wi-Fi 信号覆盖方案的有效性，对反射超表面阵列进行加工实测。

2.1.2 无源 RIS 的设计与实测

基于 1.1 节中的平面反射超表面的工作原理，设计无源 RIS 单元和阵列如图 9 所示。本文采用改

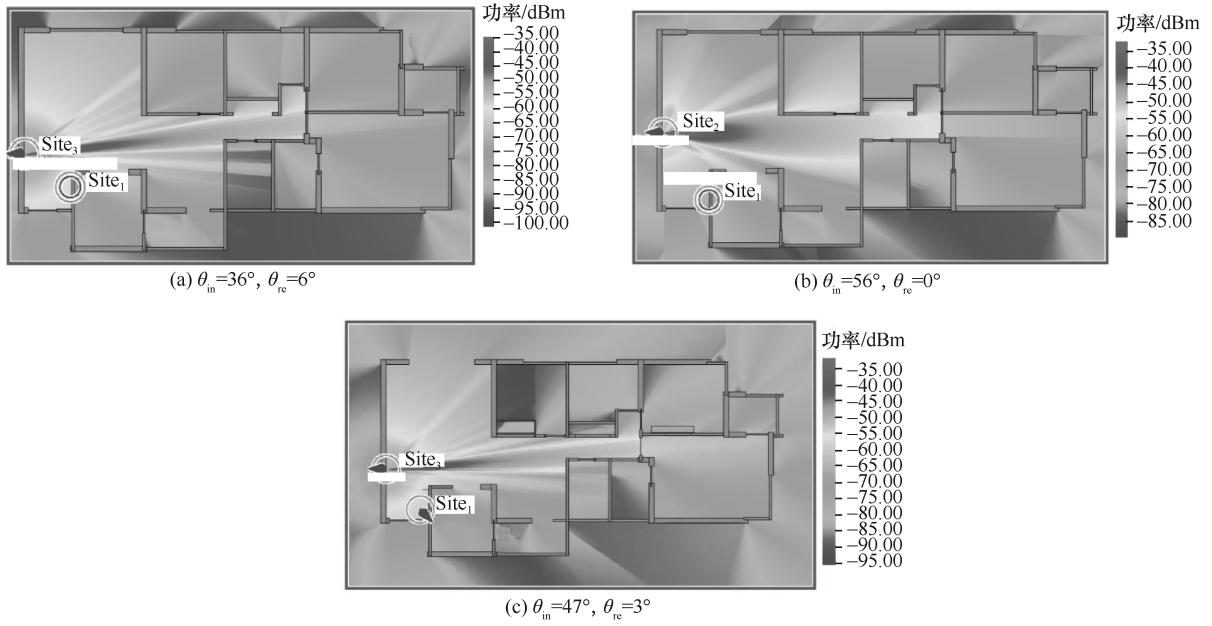


图 8 反射超表面安装在不同位置时的信号功率分布对比

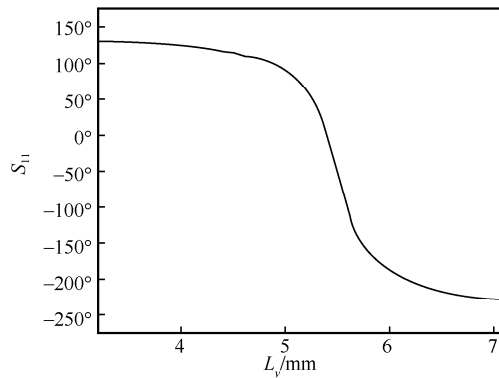
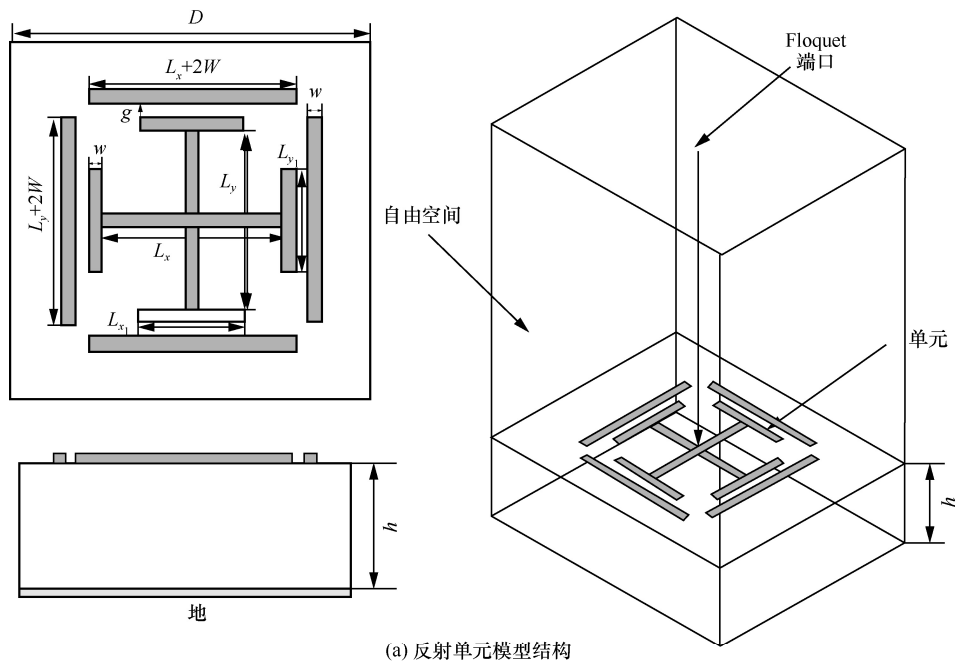


图 9 无源 RIS 单元和阵列

进型的十字结构作为反射超表面的单元，这种结构通过引入多谐振模式，相移范围大，频点之间反射相位曲线平行度较高，比较适用于宽带工作。在高频结构仿真软件（HFSS, high frequency structure simulator）中建立的反射单元模型结构如图 9(a)所示，通过内部十字的尺寸控制相移，仿真得到的反射相位曲线如图 9(b)所示。由图 9(b)可知，相移范围大于 350°。

实际场景应用时，信号源距离超表面阵列为 2.2 m，入射信号以平面波入射，工作频率为 5.8 GHz。因此，设计平面波入射情况下口径为 476 mm×442 mm 的无源 RIS 阵列，如图 10 所示。RIS 的入射角为 47°，要求反射主波束方向为 4°，方向性系数为 29.4 dBi，超表面的辐射方向图特性如图 11 所示，满足设计要求。

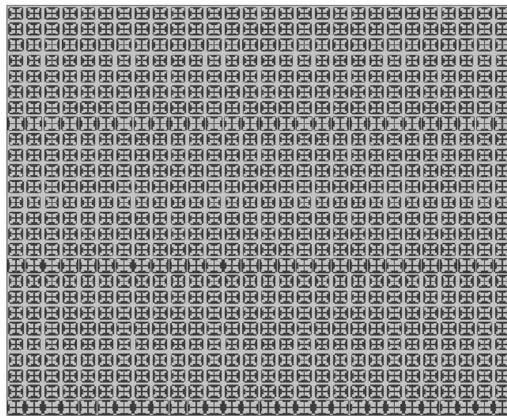


图 10 无源 RIS 阵列

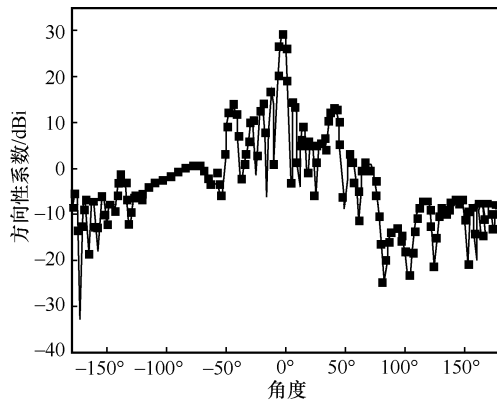


图 11 超表面的辐射方向图特性

在微波暗室中对该无源 RIS 进行测试，测试场景如图 12 所示。在微波暗室中进行测试时，采用喇叭馈源入射作为验证，馈源喇叭离阵面 40 cm，将喇叭作为辐射源，并与实际测试结果对比，结果如图 13 所示。由图 13 可知，仿真与测试结果吻合良好，其性能满足设计要求。

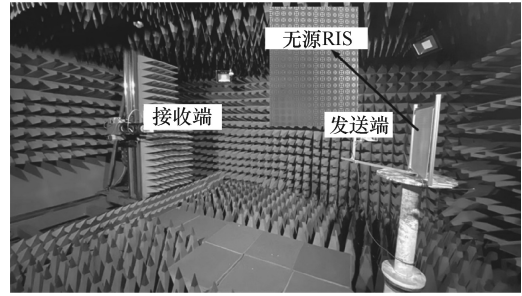


图 12 无源 RIS 微波暗室测试场景

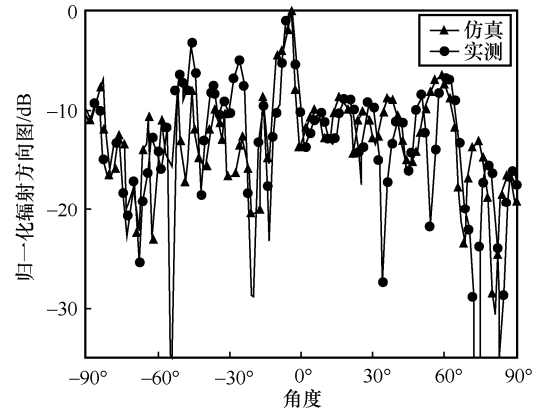


图 13 无源 RIS 辐射方向图实测与仿真结果对比

进一步验证基于无源 RIS 室内盲区覆盖方案的有效性，对上述 Winprop 中加载无源反射面的室内盲区覆盖仿真内容进行实际测试，验证实际场景中加载无源 RIS 前后无线信号功率分布变化是否与仿真结果一致。按照图 14 所示采样路径，采用工作在 5.8 GHz 的标准增益喇叭天线作为发射器和接收器，发射端采用线缆将信号发生器连接发射喇叭作为信号发射源，接收端采用线缆将接收喇叭连接频谱分析仪记录接收信号。仿真中设置的信号源发射信号功率为 20 dBm，但考虑到喇叭增益以及线缆损耗，实际设置的信号发生器的发射功率为

$$T_{x-EIRP} = P_S + P_G - L_{loss1} \quad (14)$$

其中， T_{x-EIRP} = 20 dBm 为发射端的发射功率， P_S 为信号源输出功率， P_G 为发射喇叭的增益， L_{loss1} 为发射端的线缆 1 的损耗。信号覆盖所要求的最低功率为 -75 dBm。

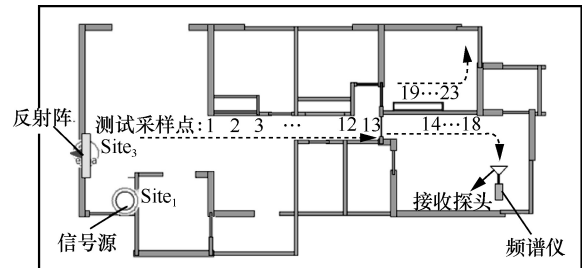


图 14 测试路径

测试场景如图 15 所示。收集采样点信号功率，对比喇叭作为发射源时 Winprop 仿真结果，实测加载无源 RIS 前后采样点信号功率与仿真结果基本一致，部分采样点实测与仿真结果有差异，但最大差异不超过 3 dBm，如图 16 所示。从图 16 可以看出，采样点靠近信号源（采样点 1~采样点 6）时信号提升 3~5 dBm，这是因为采样点靠近信号源，接收到的主要是信号源的直接信号；采样点远离信号源（采样点 7~采样点 13）进入 NLOS 区时，信号功率提升 10~13 dBm，这时从信号源直接接收到的信号减弱，从 RIS 反射过来的信号成为接收信号的主导信号。在 A 房间与 B 房间内采样时，信号功率有 15~23 dBm 的大幅度提升，由于 B 房间距离源有 5 道墙，A 房间在住宅角落处，因此发射源的信号难以直接进入这 2 个房间，接收到的信号主要由反射阵表面反射。从仿真和实测结果可以看到，在室内环境中，加载无源 RIS，可以有效调控无线通信的信道，消除通信盲区。



图 15 测试场景

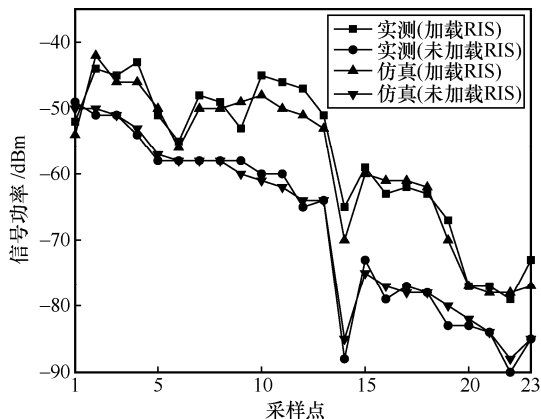


图 16 加载无源 RIS 前后采样点信号功率

2.2 基于无源 RIS 的毫米波室内盲区覆盖方案

由 2.1 节实验可知，无源反射面可以有效调控无

线信号的室内盲区覆盖，这不仅说明了无源 RIS 在实际室内无线通信应用中的有效性，也说明了无源 RIS 在无线信号的盲区覆盖中的可行性，此外，Winprop 的室内信号分布仿真与实际吻合度较好，因此本节采用 Winprop 对基于无源 RIS 的毫米波室内盲区覆盖增强实验进行仿真分析，在典型 L 形走廊场景中，验证无源 RIS 的毫米波室内盲区覆盖增强效果。

2.2.1 场景建模与分析

本文以室内典型的 L 形走廊场景为例，在实际的 L 形走廊通信场景中，由自身的毫米波有源基站发出的电波受到传输损耗与遮挡效应，往往无法覆盖整个走廊，从而形成通信盲区。为了解决这种问题，可以采用无源 RIS 接收有源基站的来波，并以不同的角度反射到走廊中，通过增加直射路径来有效覆盖原先的通信盲区，如图 17 所示。

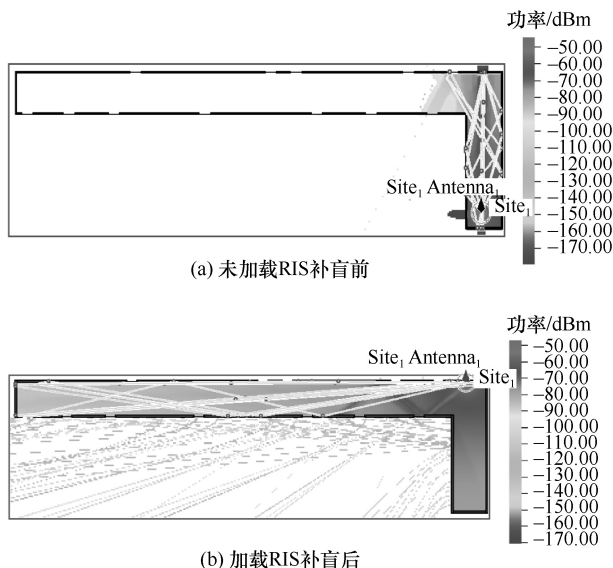


图 17 L 形走廊毫米波通信补盲场景射线循迹示意

2.2.2 无源 RIS 可拼接设计

针对实际楼层中最常见的 L 形走廊场景进行建模，实际走廊场景如图 18 所示。走廊宽度为 2.07 m，高度为 3.8 m，长度为 33.7 m。为了使大多数 L 形走廊实现盲区覆盖，设定无源 RIS 可实现的波束重构范围满足 $[40^\circ, 60^\circ]$ 。

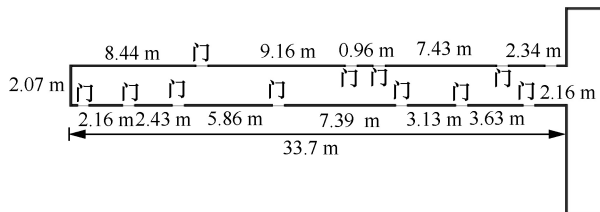


图 18 实际走廊场景

无源 RIS 由具有不同相位梯度的 2 种子阵组成，采用比特概念用 0 表示指向为方位面 θ_{a0} 的均匀相位梯度子阵，用 1 表示指向为方位面 θ_{a1} 的均匀相位梯度子阵。子阵各单元沿方位面的相位变化范围刚好为一个相位周期，即从第一个阵元到下一周期的第一个阵元的相位变化为 2π ，子阵各单元沿俯仰方向相位变化为 0，即各单元沿俯仰向保持相同。根据平均相位梯度原理，将 M_s 个子阵 0 与 N_s 个子阵 1 进行有序排列，组成反射阵列列中最小周期行向量 \mathbf{V}_{\min} ，其中， M_s 和 N_s 是大于或等于 0 的整数。为了使该最小周期行向量 \mathbf{V}_{\min} 在频率为 f 时主波束指向为 θ ，根据具体应用场景，以最小周期行向量 \mathbf{V}_{\min} 为单位分别在阵列的俯仰面和方位面进行扩展，达到重构超表面口径的目的。改变子阵排列顺序可以使面阵的方位面波束指向

θ 在 $[\theta_{a0}, \theta_{a1}]$ 变化，从而达到重构波束指向的目的。为了使 RIS 的重构波束指向变化范围满足 $[40^\circ, 60^\circ]$ ，子阵 0 和 1 的波束指向应分别选择在 40° 和 60° 附近。综上所述，最终设计中心工作频率为 28 GHz 时，反射波束指向 $\theta_{a1} = 41.7^\circ$ 的子阵 0，反射波束指向 $\theta_{a2} = 62^\circ$ 的子阵 1。无源 RIS 子阵 0 和 1 的参数如表 1 所示。

表 1 无源 RIS 子阵 0 和 1 的参数

子阵	波束指向	平均相位梯度	比特符号
子阵 0	41.7°	22.3°	0
子阵 1	62°	29.6°	1

无源 RIS 子阵单元采用双层十字交叉振子，单元结构如图 19 所示。单元设计中心频率为 28 GHz，单元周期为 4 mm，子阵结构如图 20 所示。

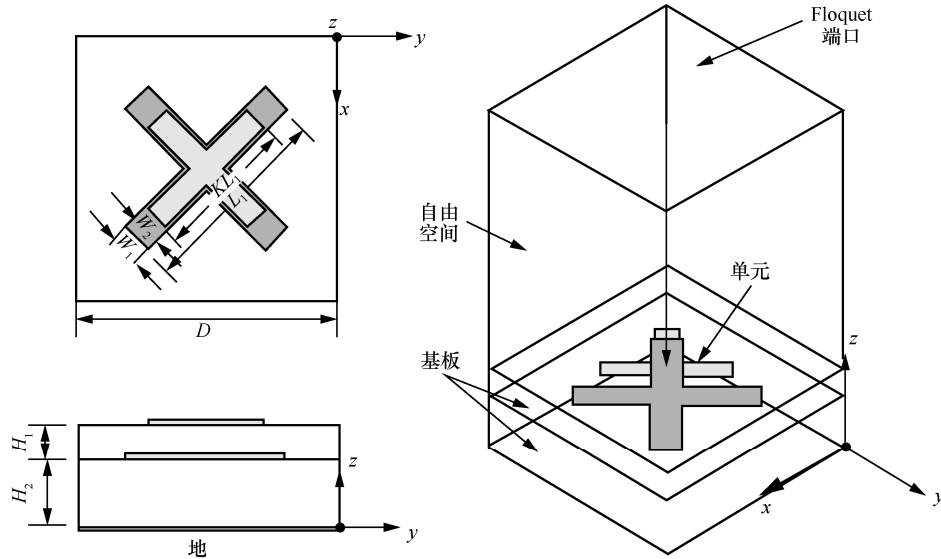


图 19 无源 RIS 单元结构

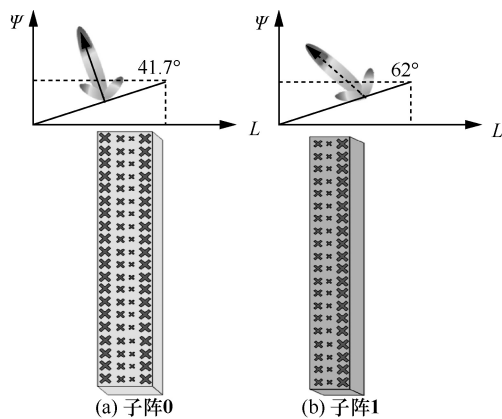


图 20 无源 RIS 子阵 0 和子阵 1 的可拼接结构

为了验证无源 RIS 能否实现波束可重构，设计阵列波束指向为 45° 。由式(11)可知，当 4 个子阵 0 与一个子阵 1 组成最小行向量 \mathbf{V}_{\min} 时，通过阵列天线方向图理论和平均相位梯度原理计算 \mathbf{V}_{\min} 的理论波束指向如图 21 所示。由图 21 可知，5 种排列方式的最大误差 $\varepsilon' = 0.6^\circ$ ，在毫米波通信补盲应用中，盲区主要靠无源 RIS 主波束的多次反射进行覆盖，因此这个误差不会影响补盲效果。将 5 种排列方式进行对比，综合考虑波束指向和副瓣电平，选取 $\mathbf{V}_{\min} = [0 \ 0 \ 0 \ 1 \ 0]$ ， \mathbf{V}_{\min} 方向图的理论计算结果和全波仿真结果吻合良好。

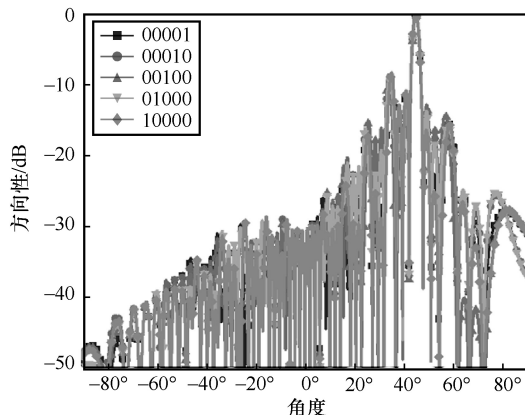


图 21 波束指向为 45° 时的理论波束指向

为了进一步验证平均相位梯度原则估算波束指向的有效性，表 2 给出了 5 组不同向量 V 波束指向的理论计算结果和全波仿真结果。这 5 组向量 V 的波束指向理论值分别为 41.7°、44.8°、49.3°、56°、62.3°，基本能满足 [40°, 60°] 的波束指向可重构范围。从表 2 中可以看出，理论计算结果与 HFSS 仿真结果的最大偏差仅为 0.3°。因此，对于图 20 所示子阵，利用平均相位梯度原则可有效估算可拼接阵列的波束指向。

表 2 5 组不同向量 V 波束指向的理论计算结果和全波仿真结果

V_{min} 排列方式	θ 理论值	θ 全波仿真值
[0]	41.7°	41.9°
[00010]	44.8°	44.8°
[01]	49.3°	49.4°
[11101]	56°	56°
[1]	62.3°	62°

基于 2.2.1 节的 L 形走廊模型，通过对比计算之后选择加载波束指向为 45° 的无源 RIS。在 WinProp 中分别对未加载无源 RIS 以及加载无源 RIS 的情况进行仿真分析，用喇叭模拟基站入射的情况，其信号功率分布如图 22 所示。设定信号覆盖所要求的最低功率为 -90 dBm，在未加载无源 RIS 时，信号不能完全覆盖走廊，盲区约为 25 m；在加载无源 RIS 后，走廊的信号覆盖功率均大于 -90 dBm，说明加载无源 RIS 对盲区覆盖有效。针对不同长度的走廊和不同类型的室内场景，可根据具体场景改变无源 RIS 子阵排布方式，即可实现不同区域信号覆盖，本文只需设计 2 种通用型的超表面子阵即可覆盖用户所有需求，还可应用到无线携

能通信系统^[21-22]，对无源 RIS 低成本和低碳应用具有重要意义。

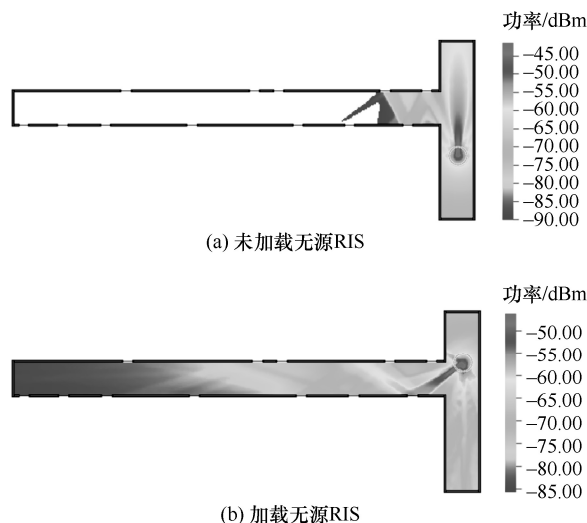


图 22 未加载无源 RIS 以及加载无源 RIS 的信号功率分布

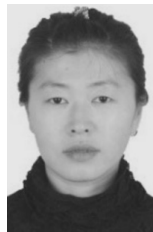
3 结束语

本文提出了基于无源 RIS 在室内无线通信盲区覆盖和信号增强的应用研究。首先阐述了 RIS 技术的主要技术手段以及应用场景。通过对现有研究的调研发现，RIS 技术在硬件研究以及算法实现上都有较大突破，但是在实际应用中，有源 RIS 阵面上集成的大量 PIN 二极管或变容二极管等器件使其成本和功耗增加、产生非线性效应等，这为 RIS 系统进一步实际落地带来新的问题和挑战。为了既保留 RIS 波束可调等优势，又保证低成本、低功耗、低复杂度的优点，本文提出一种基于比特量化原理的可拼接无源 RIS。为了验证这种无源 RIS 在实际盲区覆盖应用的可行性，首先采用无源 RIS 对典型室内区域进行定向覆盖实验，在仿真基础上制作实物并测试超表面对实际室内的无线信号覆盖效果。在验证了无源 RIS 在室内信号覆盖中的有效性后，设计了基于比特量化技术的无源 RIS。通过仿真和实测结果表明，无源 RIS 可通过子阵拼接的方式实现超表面阵列口径可重构、反射波束方向可重构，以及波束成形可重构等特性，从而实现无线信道的可重构。同时，在典型的 L 形走廊模型中进行了加载毫米波无源 RIS 前后的仿真实验对比，从结果可以看出，无源 RIS 在室内对无线信号覆盖的增强效果显著，这为 RIS 在 5G/6G 无线通信中的应用奠定了坚实的基础。

参考文献：

- [1] BOCCARDI F, HEATH R W, LOZANO A, et al. Five disruptive technology directions for 5G[J]. IEEE 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] ZHANG R, HO C K. MIMO broadcasting for simultaneous wireless information and power transfer[J]. IEEE Transactions on Wireless Communications, 2013, 12(5): 1989-2001.
- [4] LYU J B, ZHANG R. Hybrid active/passive wireless network aided by intelligent reflecting surface: system modeling and performance analysis[J]. IEEE Transactions on Wireless Communications, 2021, 20(11): 7196-7212.
- [5] RENZO M D, NTONIN K, SONG J, et al. Reconfigurable intelligent surfaces vs. relaying: differences, similarities, and performance comparison[J]. IEEE Open Journal of the Communications Society, 2020, 1: 798-807.
- [6] TAWALBEH M, KHAN H A, HAJAR A A, et al. Applications of metamaterials[J]. Reference Module in Materials Science and Materials Engineering, 2022, 3(2): 11-24.
- [7] CUI T J, QI M Q, WAN X, et al. Coding metamaterials, digital metamaterials and programmable metamaterials[J]. Light: Science & Applications, 2014, 3(10): e218.
- [8] PAN S P, FENG Y, QI L, et al. Design of dual-band frequency reconfigurable microstrip antenna array[C]//Proceedings of 2020 Cross Strait Radio Science & Wireless Technology Conference (CSRSWTC). Piscataway: IEEE Press, 2020: 1-3.
- [9] NISHAMOL M S, SARIN V P, TONY D, et al. An electronically reconfigurable microstrip antenna with switchable slots for polarization diversity[J]. IEEE Transactions on Antennas and Propagation, 2011, 59(9): 3424-3427.
- [10] GUCLU C, PERRUISSEAU-CARRIER J, CIVI O. Proof of concept of a dual-band circularly-polarized RF MEMS beam-switching reflectarray[J]. IEEE Transactions on Antennas and Propagation, 2012, 60(11): 5451-5455.
- [11] LI L, LI Y J, WU Z, et al. Novel polarization-reconfigurable converter based on multilayer frequency-selective surfaces[J]. Proceedings of the IEEE, 2015, 103(7): 1057-1070.
- [12] 崔铁军, 金石, 章嘉懿, 等. 智能超表面技术研究报告[R]. 2021. CUI T J, JIN S, ZHANG J Y, et al. The research report of reconfigurable intelligent metasurface technology[R]. 2021.
- [13] LI L, CHEN Q, YUAN Q, et al. Microstrip reflectarray using crossed-dipole with frequency selective surface of loops[C]//Proceedings of 2008 International Symposium on Antennas and Propagation (ISAP2008). Piscataway: IEEE Press, 2008: 1-4.
- [14] LI L, CHEN Q, YUAN Q W, et al. Novel broadband planar reflectarray with parasitic dipoles for wireless communication applications[J]. IEEE Antennas and Wireless Propagation Letters, 2009, 8: 881-885.
- [15] LI L, CHEN Q, YUAN Q W, et al. Frequency selective reflectarray using crossed-dipole elements with square loops for wireless communication applications[J]. IEEE Transactions on Antennas and Propagation, 2011, 59(1): 89-99.
- [16] WU Q Q, ZHANG R. Intelligent reflecting surface enhanced wireless network: joint active and passive beamforming design[C]//Proceedings of 2018 IEEE Global Communications Conference. Piscataway: IEEE Press, 2018: 1-6.
- [17] NEMATI M, PARK J, CHOI J. RIS-assisted coverage enhancement in millimeter-wave cellular networks[J]. IEEE Access, 2020, 8: 188171-188185.
- [18] LU Z Q, FANG Y, YI H, et al. Broadband reflectarray for millimeter wave coverage enhancement in indoor NLOS scenario[C]//Proceedings of 2019 Cross Strait Quad-Regional Radio Science and Wireless Technology Conference (CSQRWC). Piscataway: IEEE Press, 2019: 1-3.
- [19] 李双德, 刘芫健, 林乐科. 28 GHz 室内毫米波信道路径损耗模型研究[J]. 电波科学学报, 2017, 32(5): 602-611. LI S D, LIU Y J, LIN Y K. Path loss models of millimeter-wave channel in indoor environment at 28GHz[J]. Chinese Journal of Radio Science, 2017, 32(5): 602-611.
- [20] DORST L, FONTIJNE D, MANN S. Geometric Algebra for Computer Science [M]. Amsterdam: Elsevier, 2007.
- [21] TIAN S C, ZHANG X M, WANG X, et al. Recent advances in metamaterials for simultaneous wireless information and power transmission[J]. Nanophotonics, 2022, 11(9): 1697-1723.
- [22] ZHOU J F, ZHANG P, HAN J Q, et al. Metamaterials and metasurfaces for wireless power transfer and energy harvesting[J]. Proceedings of the IEEE, 2022, 110(1): 31-55.
- [23] 李龙, 张沛, 韩家奇, 等. 基于电磁超材料的微波无线能量传输与收集关键技术(特邀)[J]. 光子学报, 2021, 50(10): 11-26. LI L, ZHANG P, HAN J Q, et al. Key technologies of microwave wireless power transfer and energy harvesting based on electromagnetic metamaterials(invited)[J]. Acta Photonica Sinica, 2021, 50(10): 11-26.

[作者简介]



刘海霞 (1976-), 女, 河北秦皇岛人, 博士, 西安电子科技大学副教授, 主要研究方向为智能超材料、电路分析、无线能量传输与收集、场路协同设计。



易浩 (1988-), 男, 湖南常德人, 西安电子科技大学博士生, 主要研究方向为毫米波雷达天线、超表面天线。



马向进（1998- ），男，安徽阜阳人，西安电子科技大学博士生，主要研究方向为可编程超表面及其新体制雷达系统。



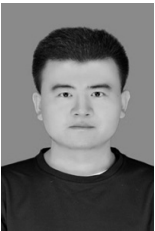
马培（1995- ），女，河南南阳人，西安电子科技大学硕士生，主要研究方向为吸波、透波一体化的频率选择表面的设计。



乐舒瑶（1997- ），女，四川成都人，西安电子科技大学硕士生，主要研究方向为毫米波阵列天线、部分有源可重构反射阵。



曾宇鑫（1998- ），男，广东揭阳人，西安电子科技大学硕士生，主要研究方向为基于电磁超材料的电磁波调控、多频数字编码可重构超表面设计。



孔旭东（1997- ），男，甘肃平凉人，西安电子科技大学硕士生，主要研究方向为基于电磁超材料的电磁波调控、毫米波阵列天线优化设计。



李龙（1977- ），男，贵州安顺人，博士，西安电子科技大学教授，主要研究方向为智能超表面、超材料天线与微波器件、无线能量传输与收集、微波集成电路的电磁兼容与防护。