

## 基于 RIS 的室内无线通信信号增强系统

唐奎, 胡琪, 赵俊明, 陈克, 冯一军

(南京大学电子科学与工程学院, 江苏 南京 210023)

**摘 要:** 利用可重构智能表面 (RIS) 对电磁波反射特性的动态调控能力, 构建了室内无线通信信号增强系统, 可以实现室内信号弱覆盖盲区的接收端信号增强。首先, 设计了具有动态可调相位特性的 RIS 单元, 通过 2 个开关二极管的通断组合实现了 2 bit 反射相位的动态变化。然后, 实验验证了 RIS 对出射电磁波束方向的动态调控。最后, 通过上位机和现场可编程门阵列 (FPGA) 实现了 RIS 编码的智能调控, 并利用 RIS 口径上的反射相位分布实现了出射波束的动态改变, 同时结合遍历预编码的优化方法, 实验证明了室内接收信号功率的增强效果。仿真分析及实验结果均表明, 所设计的 RIS 系统能够有效动态提升室内无线信号覆盖质量, 其接收信号功率平均提升 8.9 dB, 最大可达 22 dB, 有望为 5G 及新一代通信网络优化提供基础硬件技术支持。

**关键词:** 可重构智能表面; 无线通信; 室内信号增强; 微波

**中图分类号:** TN92

**文献标志码:** A

**DOI:** 10.11959/j.issn.1000-436x.2022228

## RIS-based indoor wireless communication signal enhancement system

TANG Kui, HU Qi, ZHAO Junming, CHEN Ke, FENG Yijun

School of Electronic Science and Engineering, Nanjing University, Nanjing 210023, China

**Abstract:** By utilizing the tunable performances of the reconfigurable intelligent surface (RIS) to manipulate the reflected electromagnetic waves, an indoor wireless communication signal enhancement system was constructed, which could improve the signal quality of the receiving terminal in where the initial wireless signals were weak. First, a RIS unit cell with dynamically tunable phase characteristics was designed, and the dynamic change of the 2 bit reflection phases was realized by switching the working states of the two active diodes. Then, experiments were conducted to verify that the proposed RIS could dynamically reshape the beam direction. Finally, a host computer and field programmable gate array (FPGA) were used to realize the intelligent control of the coding sequences applied onto the proposed RIS. By changing the spatial phase distribution on the RIS aperture, the output beam could be controlled in real-time. By traversing the pre-loaded coding sequences, the enhancement of received signal in indoor wireless environments had been experimentally demonstrated. Both simulation and experiment results verify that the proposed RIS system can effectively and dynamically improve the quality of the indoor wireless signals. The received signal is increased by an average of 8.9 dB, with a maximum of 22 dB. The proposed work may provide basic hardware technical support for the optimization of 5G and the next-generation communication networks.

**Keywords:** reconfigurable intelligent surface, wireless communication, indoor signal enhancement, microwave

收稿日期: 2022-08-02; 修回日期: 2022-11-28

通信作者: 冯一军, yjfeng@nju.edu.cn

基金项目: 国家自然科学基金资助项目 (No.62271243, No.62071215, No.91963128); 国家重点研发计划基金资助项目 (No.2017YFA0700201)

**Foundation Items:** The National Natural Science Foundation of China (No.62271243, No.62071215, No.91963128), The National Key Research and Development Program of China (No.2017YFA0700201)

## 0 引言

近年来,随着移动通信技术飞速发展,5G 技术已在世界各地逐步部署,且在中国部署范围最广泛。相较于 4G,5G 虽然在通信时延、传输速率以及通信安全<sup>[1]</sup>等方面都有较大提升,但随之也暴露出了一些有待解决的问题,如能耗、成本等。一方面,5G 使用的频段越来越高,这将导致通信距离的下降<sup>[2]</sup>;另一方面,为了实现万物互联的物联网 (IoT, Internet of things)<sup>[3-4]</sup>,未来各种终端设备将不断增加到一个极大的数量级。基于这两方面的原因,真实场景中均需要大规模部署 5G 基站,这将大幅增加能耗、基站部署难度以及维护成本<sup>[5]</sup>。此外,通信质量在室内复杂环境下往往会严重下降。从电磁波传播的角度来看,由于室内环境中空间狭长,又存在较多障碍物,电磁波在传播过程中存在散射、多径效应等现象,而传统无线通信存在信道不可控的问题,因此导致了通信质量下降。

近年来,随着有源超表面技术的发展<sup>[6-9]</sup>,室内通信质量下降的问题有望得到解决。相关研究领域在有源超表面基础上提出了可重构智能表面 (RIS, reconfigurable intelligent surface) 技术<sup>[10-11]</sup>。RIS 能够动态调节电磁波传播,改善通信信道,并具有低功耗、低成本、易部署等优点,有望克服目前 5G 的部分缺陷。因此,RIS 技术被认为是 6G 的主要候选技术之一<sup>[12-13]</sup>。

可重构智能表面本质上是由有源超表面发展而来的一种具有可编程电磁特性的人工电磁表面结构,一般为加载有源元件(如 PIN 二极管、变容管等)的亚波长尺寸单元排列而成的二维平面结构。通过控制有源元件两端的电压来实现元件电路特性的改变,进而改变 RIS 单元的电磁响应特性并实现对电磁波频率、幅度、相位和极化等电磁波固有属性的动态调控。另外,也可通过可调材料(如相变材料)来实现动态可变的电磁响应功能<sup>[14-15]</sup>。

近年来,有学者进一步提出了数字编码表面的概念,将 RIS 单元的电磁响应与二进制数字编码建立联系,从而将电磁波的模拟世界与数字世界相连接。数字编码使用数字比特 0 和 1 来表征 RIS 电磁响应状态,可分为 1 bit、2 bit 以及  $n$  bit RIS ( $n$  为大于 2 的正整数),分别对应 2、4 以及  $2^n$  种可切换的电磁响应状态。数字编码表面通常由 RIS 与现场可编程门阵列 (FPGA, field programmable gate ar-

ray) 或者微控制单元 (MCU, micro control unit) 相结合,并利用 FPGA 或 MCU 动态输出不同的编码序列来实时调控 RIS 编码状态,进而实现如异常反射、漫散射、多波束反射以及波束聚焦等电磁调控。基于以上特性,目前,RIS 在通信中的应用可大致分为两类:一类是用 RIS 替代传统发射机,实现基于 RIS 的新型通信架构<sup>[16-18]</sup>;另一类是将 RIS 作为准无源中继,辅助无线通信,改善通信信道<sup>[19-21]</sup>。本文主要关注 RIS 作为准无源中继在室内环境下的应用研究。目前,该领域已有较多的研究工作,但大多数集中于理论研究和理想环境下的实验测试<sup>[22-24]</sup>,缺乏真实环境下的实验研究与分析,因此本文旨在通过具体的实验测试来探索与验证 RIS 作为准无源中继在室内环境中的应用潜力。

针对上述问题,本文主要开展了以下工作。

1) 研制基于 RIS 的室内无线通信信号(简称室内信号)增强系统原型机。首先,设计一种工作于 2.55 GHz 的 2 bit RIS 单元,并加工尺寸为 800 mm×820 mm 的 RIS 实物样件;然后,搭建 FPGA 控制电路部分,并与 RIS 进行联合测试,验证其对电磁波的动态调控能力。

2) 进行真实室内环境实验研究。搭建典型室内通信环境,通过动态改变 RIS 口径上的相位分布,研究区域信号覆盖的变化。实验分为空场、放置金属板以及放置 RIS 辅助通信 3 个对照组,对比分析实验结果。

3) 实验结果表明,相较于空场和金属板辅助的室内场景,本文所设计的基于 RIS 的室内信号增强系统能够大幅提高目标区域的通信信号功率,且覆盖区域可动态调节以保证用户通信质量。

## 1 可重构智能表面设计

### 1.1 单元设计

为了实现基于 RIS 的室内信号增强系统,本文设计了反射型 2 bit RIS 单元,该单元由上下两层印制电路板 (PCB, printed-circuit board) 构成,两层 PCB 之间为空气层,如图 1 所示。上层为 H 形金属结构的拓扑变形,在金属结构上沿  $y$  方向截断并加载 2 个 PIN 二极管构成电磁谐振结构。在沿  $y$  轴的三条金属臂上分别加载“正-负-正”的电压,形成共阴极的供电形式来控制 PIN 二极管的导通 (ON) 与截止 (OFF) 状态。下层为介质板,且介质板背面覆盖全金属层以保证 RIS 工作于全反射电磁波调控模式。

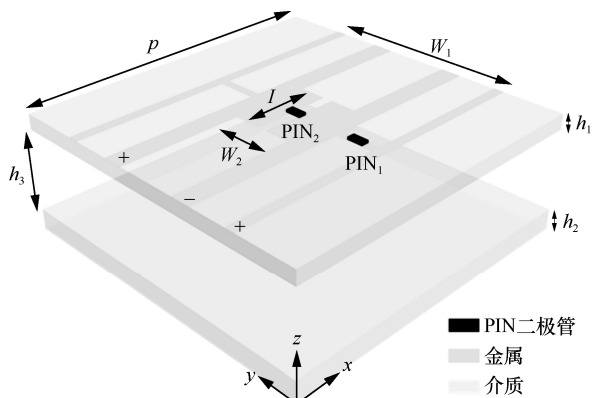


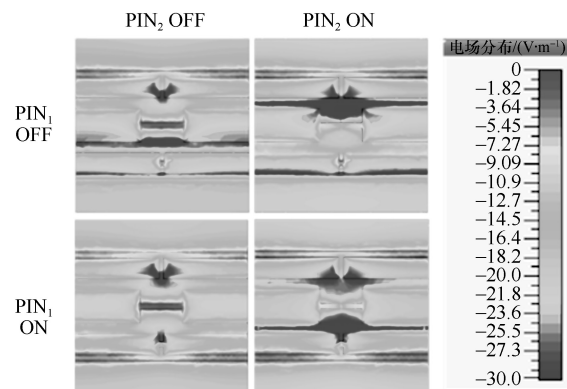
图 1 RIS 单元结构示意图

本文利用商业三维电磁场仿真软件 CST Microwave Studio 对图 1 所示结构进行建模与全波电磁仿真分析。金属层为电导率为  $5.8 \times 10^7 \text{ S/m}$  的铜膜，介质为 F4B 材料，其相对介电常数为  $\epsilon_r = 2.2$ ，损耗角正切函数为  $\tan \delta = 0.001$ 。通过构建 PIN 二极管的等效电路来模拟其导通与截止状态，当 PIN 二极管工作在 ON 状态时，其等效电路为电阻与电感的串联电路；当 PIN 二极管工作在 OFF 状态时，其等效电路则为电容与电感的串联。综合考虑仿真分析结果以及样品制备工艺等条件，最终优化后的单元结构参数如下。单元周期长度为  $p = 32 \text{ mm}$ ，上下两层 PCB 厚度分别为  $h_1 = 1.5 \text{ mm}$  和  $h_2 = 2.0 \text{ mm}$ ，中间空气层厚度为  $h_3 = 8.0 \text{ mm}$ ，上层金属结构各参数分别为  $l = 7.8 \text{ mm}$ 、 $w_1 = 19.9 \text{ mm}$ 、 $w_2 = 6.2 \text{ mm}$ 。

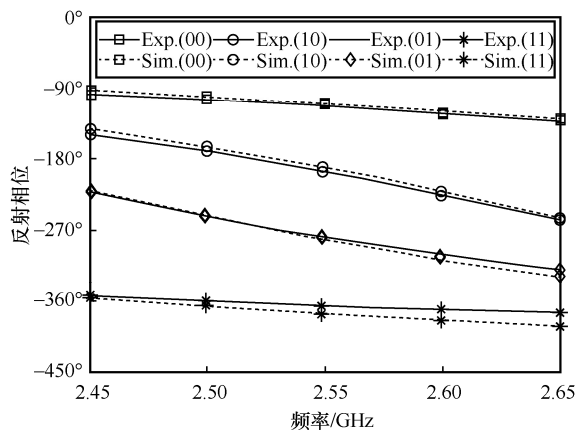
用 0 和 1 分别表示 PIN 二极管 OFF 状态和 ON 状态，2 个 PIN 管的开关状态 ( $\text{PIN}_1, \text{PIN}_2$ ) 可实现 4 种状态组合，即 OFF-OFF、ON-OFF、OFF-ON、ON-ON，对应的数字比特可表示为 00、10、01、11，形成 2 bit RIS 单元，可以实现  $2^2 = 4$  种反射相位。通过 CST 对该 RIS 单元进行仿真分析，得到 RIS 单元在 PIN 管不同状态下的仿真与实验结果如图 2 所示。

图 2(a) 为 RIS 单元在 PIN 管不同状态下的电场分布，可以清晰地看到，该单元实现不同反射相位的本质在于 PIN 的开关状态改变了 RIS 单元表面的感应电流和电场分布。这里以  $\text{PIN}_2$  为例，当  $\text{PIN}_2$  处于截止状态时，其等效为电感与电容的串联，因此单元表面金属中的感应电流路径被截断，从而在该位置处形成了位移电流，激励起较强的感应电场；当  $\text{PIN}_2$  处于导通状态时，其等效为电感与电阻的串联，此时感应电流可以自由通

过  $\text{PIN}_2$ ，因此该位置处未出现明显感应电场。 $\text{PIN}_1$  的工作原理与  $\text{PIN}_2$  类似。由此，不同的二极管状态形成不同的单元谐振特性，从而产生 4 种相位。优化单元结构参数使 4 种相位的相邻相位差为  $90^\circ$ ，即可实现 2 bit RIS 单元。



(a) 电场分布



(b) 反射相位

图 2 RIS 单元在 PIN 管不同状态下的仿真与实验结果

图 2(b) 显示了 RIS 单元反射相位的仿真 (Sim.) 与实验 (Exp.) 结果，可以看到，仿真与实验结果基本一致。在 2.55 GHz 处，相邻状态间的反射相位差均在  $90^\circ$  左右。在数字编码表面中，一般研究重点关注 RIS 不同状态间的相对反射相位，因此本文将 2.55 GHz 处 11 状态的相位归一化为  $0^\circ$ ，则该 RIS 可以动态实现  $0^\circ, 90^\circ, 180^\circ, 270^\circ$  这 4 种反射相位。

### 1.2 波束调控理论分析

在 RIS 单元的研究设计与测试基础上，本文进一步借助天线阵理论验证 RIS 对入射电磁波的调控功能。RIS 波束调控原理、RIS 相位分布及远场方向图如图 3 所示。

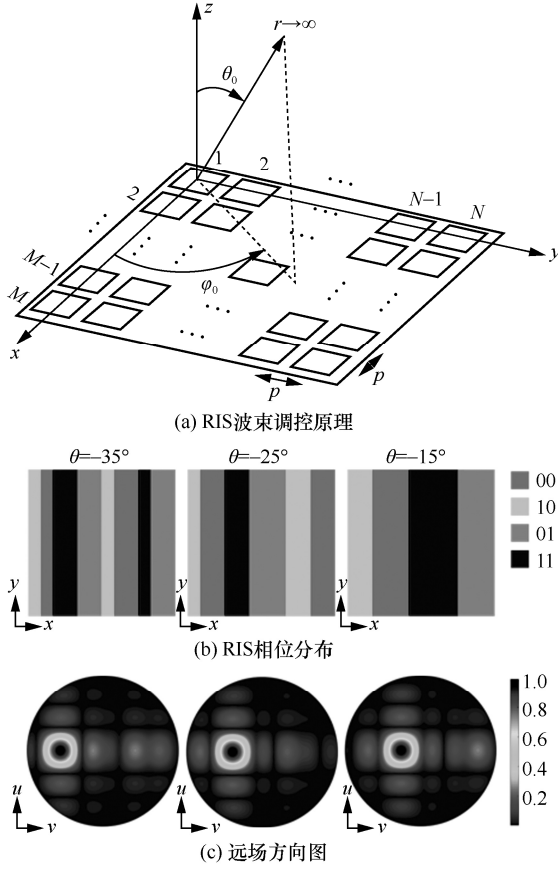


图 3 RIS 波束调控原理、RIS 相位分布及远场方向图

假设 RIS 由  $M \times N$  个单元构成，每个单元的周期长度为  $p$ ，以 RIS 左上角的单元为几何原点，如图 3(a)所示。在平面电磁波入射情况下，根据天线阵列理论可知，为了使反射波束辐射方向为  $(\theta_0, \varphi_0)$ ，单元  $(m, n)$  的反射相位必须满足式(1)。

$$\varphi(m, n) = -k_0 x_m \sin \theta_0 \cos \varphi_0 - k_0 y_n \sin \theta_0 \sin \varphi_0 \quad (1)$$

其中， $k_0 = \frac{2\pi}{\lambda_0}$  为自由空间波数， $\lambda_0$  为入射电磁波在空气中的波长， $(x_m, y_n)$  为单元  $(m, n)$  的坐标， $(\theta_0, \varphi_0)$  为定向反射波束的方向。

考虑到 RIS 在室内环境中的应用，可以采用列控 RIS 实现在俯仰角方向的波束扫描功能，即  $\theta_0 \in [-90^\circ, 90^\circ]$ ， $\varphi_0 = 0^\circ$ 。因此，式(1)可以进一步简化为

$$\varphi(m, n) = -k_0 x_m \sin \theta_0 \quad (2)$$

针对本文 RIS 单元可以实现的 4 种离散反射相位，需将式(2)得到的连续相位分布进行离散化处理。离散化相位采用就近原则，如式(3)所示，将反射相位离散化到  $0^\circ$ 、 $90^\circ$ 、 $180^\circ$ 、 $270^\circ$  这 4 个相位值，分别对应 RIS 单元 11、01、10、00 这 4 个比特状态。

$$\varphi_{2\text{bit}}(m, n) = \begin{cases} 0^\circ, & \varphi(m, n) \in [-45^\circ, 45^\circ) \\ 90^\circ, & \varphi(m, n) \in [45^\circ, 135^\circ) \\ 180^\circ, & \varphi(m, n) \in [135^\circ, 225^\circ) \\ 270^\circ, & \varphi(m, n) \in [225^\circ, 315^\circ) \end{cases} \quad (3)$$

由此，反射电磁波的远场方向图可表示为

$$F(\theta, \varphi) = \text{EP} \sum_{m=1}^M \sum_{n=1}^N \Gamma_{mn} e^{i\psi_{mn}} \quad (4)$$

其中， $\text{EP} = \cos^2 \theta$  为单元方向图，需注意 EP 为电压形式，其功率为  $\text{EP}^2$ ； $p$  为单元因子，本文采用偶极子模型描述 RIS 单元的电磁散射特性，因此可令  $p = 2$ ； $\Gamma_{mn} = a_{mn} \varphi(m, n)$  为单元复反射系数， $a_{mn}$  为单元反射幅度， $\varphi(m, n) = \varphi_{2\text{bit}}(m, n)$  为单元离散后的反射相位； $\psi_{mn} = k_0(x_m \sin \theta \cos \varphi + y_m \sin \theta \sin \varphi)$  为单元之间由空间位置不同所引入的相差。在较理想的情况（如微波暗室）下，RIS 反射后的远场波束可将实际测试的幅值和相位代入理论式计算得到。但是在其他较为复杂的环境（如室内）中，因复杂的散射与多径效应的干涉，RIS 的反射波束真实偏折方向可能与理论并不完全一致。因此，需要利用编码优化的方法，实际测试接收信号功率及角度。

这里假设 RIS 由  $12 \times 12$  个 2 bit 单元构成，结合式(1)~式(4)进行仿真计算，最后通过计算式  $u = \sin \theta \cos \varphi$  和  $v = \sin \theta \sin \varphi$  将笛卡尔坐标  $(x, y)$  转化为平面坐标  $(u, v)$ ，可得经过编码后 RIS 的理论远场方向图，这里分别给出  $\theta = -35^\circ$ 、 $\theta = -25^\circ$ 、 $\theta = -15^\circ$  这 3 种 RIS 的相位分布以及对应的远场方向图，如图 3(b)和图 3(c)所示。从图 3(b)和图 3(c)可以看出，RIS 的反射相位沿  $x$  轴方向呈逐渐增大的正相位梯度变化，并且随着所需反射波束偏转角度的增大，其反射相位梯度逐渐增大，反之则逐渐减小。全波仿真分析结果显示，反射波束角度与预期相符，角度误差很小，而部分结果旁瓣的增高主要是由相位离散化导致的。

## 2 室内信号增强系统与测试

整个基于 RIS 的室内信号增强系统主要由信号发射机、用户接收端、RIS、FPGA 以及上位机（计算机）五部分构成。信号由发射机发出，经过室内信道（包括直射路径、RIS 反射、墙壁散射等多条路径）到达接收端，上位机对接收信号功率进

行监控, 优化 RIS 编码分布, 从而使接收端的信号功率最大。

为了验证系统功能, 首先对基于 FPGA 的现场可编程 RIS 的波束调控功能进行验证, 然后在室内真实环境中验证该系统的对接收端信号增强的有效性。

### 2.1 现场可编程 RIS 实验测试与分析

为实现现场可编程动态波束调控, 本文使用基于 FPGA 的外部偏置电压控制器。以数字比特“1”表示 1.2 V 正电压输出, 即 PIN 二极管的“ON”状态; 数字比特“0”表示零电压输出, 对应 PIN 二极管的“OFF”状态。单个 FPGA 可支持 68 路电压比特流的输出与实时控制, 此外所使用的 FPGA 具有可扩展性, 可根据需求扩展输出电压的路数。本文设计的列控方案智能表面需 48 路输出。

首先, 测试 RIS 的电磁响应及其对波束的动态调控功能, 联合测试环境为图 4(a)所示的微波暗室环境。一对宽带双脊喇叭天线分别作为发射天线 (Tx) 和接收天线 (Rx) 连接矢量网络分析仪 (Agilent Technologies E8363A) 两端口。RIS 放置在弓形架测量系统的圆心位置, 发射天线垂直发射 2.55 GHz 的电磁波辐照 RIS, 接收天线沿弓形架移动, 接收反射信号, 其中, code1~code3 表示不同 RIS 编码对应的不同角度的反射波束。本文测试了预设  $\theta = -35^\circ$ 、 $\theta = -25^\circ$ 、 $\theta = -15^\circ$ 、 $\theta = 20^\circ$ 、 $\theta = 30^\circ$ 、 $\theta = 40^\circ$  共 6 种 RIS 编码, RIS 远场方向图测试与理论分析结果对比如图 4(b)所示, 其中, 图形表示测试结果, 线表示理论分析结果。从图 4(b)可以看出, 测试反射波束角度与仿真结果基本一致, 误差很小, 显示了 RIS 良好的电磁场波束调控能力。实测副瓣与理论分析结

果有所偏差, 特别是在大角度情况下。这主要是由有限尺寸 RIS 的边缘效应、单元之间的耦合效应以及单元反射性能随角度增大而下降等原因导致。

通过以上 RIS 的仿真设计、理论分析以及实验验证, 本文证明了所设计的 RIS 能对入射电磁波进行有效的动态调控, 有望进一步应用于改善室内通信环境。

### 2.2 信号增强系统及测试环境

室内环境中, 通信信号通过狭长的走廊到达尽头后, 由于走廊两侧水泥墙壁阻挡和散射等因素, 信号往往难以覆盖走廊尽头以及拐角的方向。为此, 在前述理论分析和初步实验测试的基础上, 本文考虑其在典型室内信号弱覆盖场景中的应用。在图 5 所示的室内测试场景中, 发射天线连接信号源, 位于沿  $x$  方向的走廊一侧, 天线距离地面高度 1.25 m, 距离 RIS 5.1 m, 并以入射角  $5^\circ$  向 RIS 样品的中心位置发射信号。接收天线采用全向天线, 与频谱仪相连, 位于测试区域, 并且接收天线距离地面 1.48 m, 此高度大约为人们使用手机时的平均高度, 可模拟室内客户端真实使用情况。在该场景中, 接收天线与发射天线之间因有水泥墙以及金属门的阻挡效应, 难以形成直接传输通道, 导致信号功率不高。这里 RIS 采用 4 块样品 (子 RIS) 拼接的方式实现, 其中, 每块子 RIS 由 12 行 12 列共 144 个 2 bit 单元构成, 整面 RIS 共有 24 行 24 列共 576 个单元, 最终 RIS 的尺寸为 800 mm×820 mm。由于本文将 RIS 应用于同一层楼的室内信号增强, 因此理论上只需要控制 RIS 波束的俯仰角  $\theta$ , 而方位角  $\varphi$  固定为  $0^\circ$  (如图 3(a)所示)。因此, 本文采用列控的馈电方式, 即同一列的单元所加载的电压相同。然后, 将 RIS 板紧贴墙壁放置, 并通过直流偏置线将 RIS 控制端口与 FPGA 输出端口相连接, 总计 48 路输出。通过控制

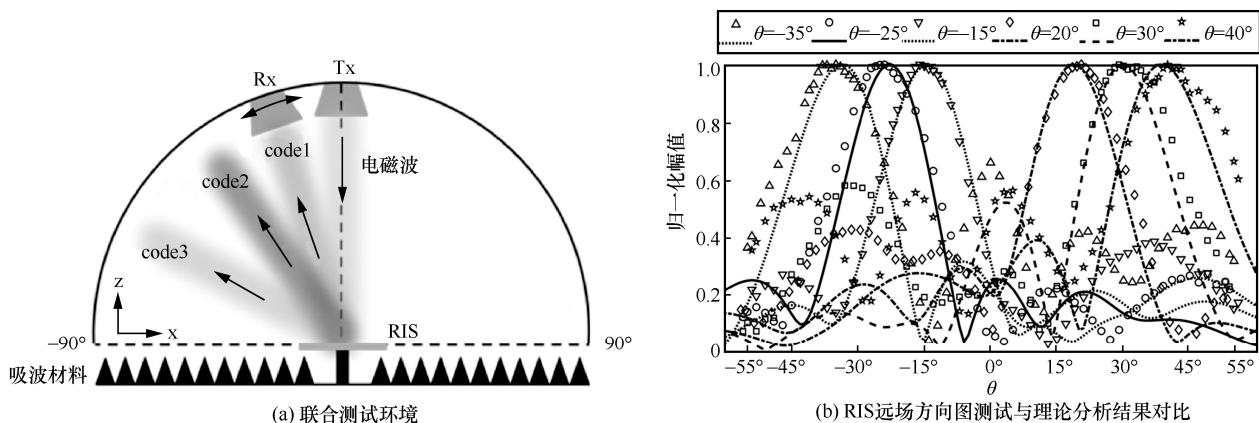


图 4 RIS 与 FPGA 联合测试

每列 RIS 单元的电磁响应状态最终实现散射波束扫描。信号源与频谱仪放置于一面吸波屏后方，以防止仪器对信号能量测试效果的影响。

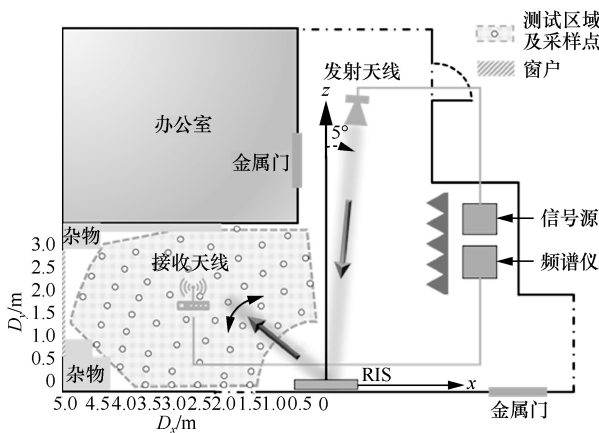


图 5 室内测试场景

测试区域面积约为  $15 \text{ m}^2$ 。本文对该区域进行均匀的离散采样测试。测试半径为  $1.5 \sim 5 \text{ m}$ ，每隔  $0.5 \text{ m}$  测试一条弧线上的信号功率，同时测试角度为  $10^\circ$  至  $90^\circ$ 。部分区域因杂物阻挡而未设置采样点，最终共计 56 个采样点。

本文对未放置 RIS 的空场情况、放置金属板以及放置 RIS 这 3 种场景进行了对比测试。其中，金属板的面积与 RIS 相同，放置位置也相同。发射天线辐射由信号源产生的  $2.55 \text{ GHz}$  信号，其极化方向为水平极化，其波束以  $5^\circ$  入射到墙壁某位置，即图 5 的坐标原点处。在空场及放置金属板的场景下，不需要任何额外操作，直接对采样点测试。在放置 RIS 的场景下，采用遍历 RIS 预编码的优化方式获取相对最佳信号。这里根据天线阵理论以及广义斯涅尔定律设计了 11 种 RIS 预编码，在理想情况下，其远场方向图如图 6 所示（图中  $\theta$  的负号表示波束方位角  $\varphi=90^\circ$ ）。

波束方向图根据广义斯涅尔定律或天线阵理论计算得到。然后，通过 FPGA 轮流切换编码，将频谱仪测试的数据上传至上位机进行比较后取其最大测量值。采用该方案的原因如下。一方面，室内电磁环境往往十分复杂，存在电磁散射、多径效应等因素，RIS 调控的反射波束会在室内进行多次反射，导致信号增强区域往往与简单波束的预期方向有所偏移，因此理论计算并不能完全指导辐射波束的覆盖区。另一方面，本文测试最小距离为  $5 \text{ m}$ ，不完全满足远场条件，辐射场的波瓣图及场增强方

向可能与预先设计编码的辐射效果不一致。通过遍历 RIS 预编码获取最佳信号的策略可以有效避免以上问题。最终，通过对比空场、放置金属板以及放置 RIS 这 3 种场景的测试结果，验证基于 RIS 的信号增强系统的有效性。

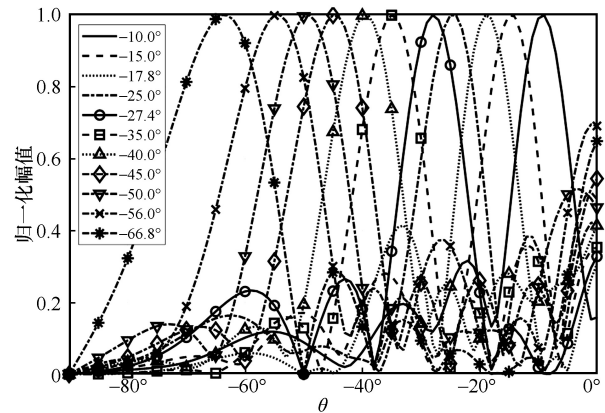


图 6 11 种 RIS 预编码在理想情况下的远场方向图

### 2.3 测试结果与分析

将测试得到的数据进行插值处理，不同场景下室内信号功率及增益测试结果如图 7 所示。图 7(a)~图 7(c)分别为空场、放置金属板、放置 RIS 这 3 种场景下测试的信号功率分布。在反射角较小 ( $10^\circ \sim 30^\circ$ ) 的区域内均具有较高的信号功率，因为该区域存在部分直射和墙壁镜面反射的情况，所以信号功率较高。空场与放置金属板的场景下，测试区域的信号功率差别不大。但是，放置 RIS 的场景下，在反射角为  $30^\circ \sim 80^\circ$  的范围内，测试区域中信号功率有明显提升，而空场情况下出现了信号覆盖极弱的区域。

分别将放置金属板与空场、放置 RIS 与放置金属板、放置 RIS 与空场的信号功率进行比较，计算信号功率增益，如图 7(d)~图 7(f)所示。从图 7(d) 可以看到，放置金属板相较于空场，在  $10^\circ \sim 70^\circ$  的区域，信号功率基本未增加，仅在  $70^\circ \sim 90^\circ$  的大角度区域对信号有微弱增强，其可能由有限大金属板的边缘散射效应导致。从图 7(e) 可知，放置 RIS 与放置金属板相比，在原先的弱覆盖区域，即左边  $3 \sim 5 \text{ m}$  的区域，信号得到明显提升，而  $1.5 \sim 3 \text{ m}$  区域由于金属板场景下本身信号较高，因此提升并不明显。放置 RIS 与空场场景下的对比结果如图 7(f) 所示，信号功率在  $2 \sim 5 \text{ m}$  的区域内均有明显提升。

整体而言，与空场相比，采用 RIS 的场景下，最大信号功率增益达到  $22 \text{ dB}$ ，平均增益为  $8.9 \text{ dB}$ 。对于信号原本较强的区域，如信号功率高于  $-60 \text{ dBm}$  的

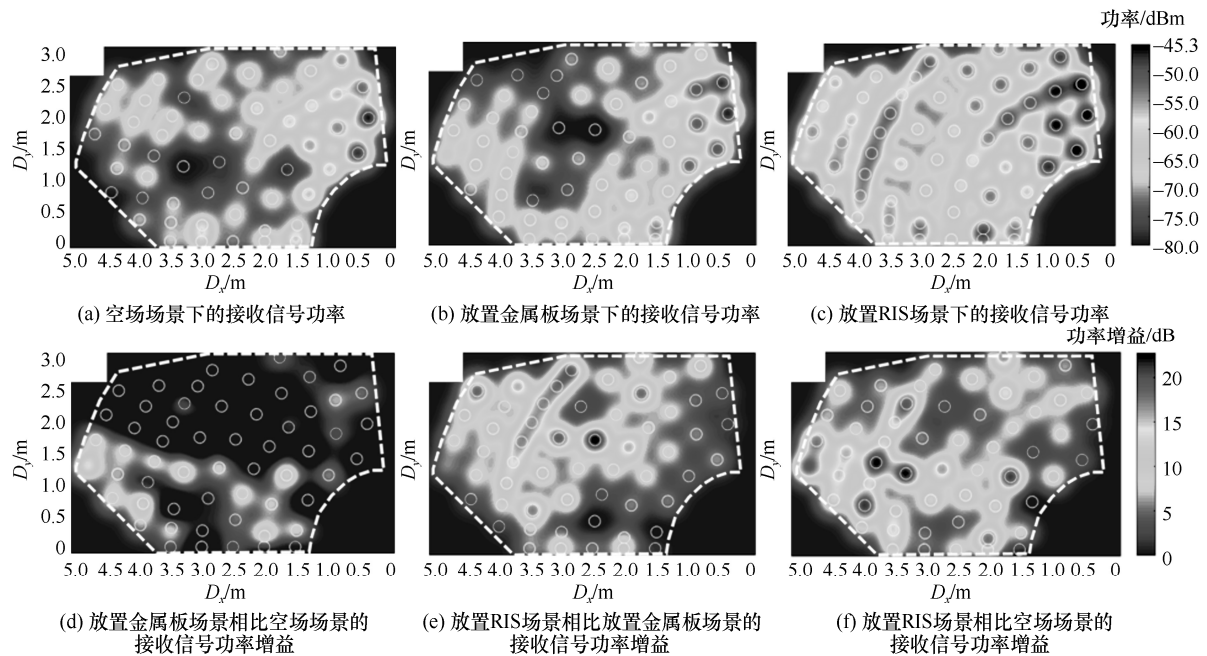


图 7 不同场景下室内信号功率及增益测试结果

区域, RIS 对信号功率增益有限, 平均增益为 5.34 dB; 对于信号低于 -70 dBm 的弱覆盖区域, RIS 可大幅提升信号功率, 平均增益为 13.53 dB, 部分区域, 如 4~5 m 的区域, 信号功率提升可达 19.70 dB, 从而大幅改善原先弱覆盖区域的信号质量。值得注意的是, 作为原理性验证, 本文仅测试了 11 种 RIS 编码, 事实上对于 2 bit 的 RIS, 其编码方式共有  $2^n$  ( $n=24$  为可独立控制的单元数) 种。因此, 本文所测结果尚未达到该系统的最佳增益效果, 尤其是在复杂室内环境中, 实际最佳增益所需的编码往往与基于波束调控方向理论计算的 RIS 编码存在较大偏差。即使如此, 在仅测试极少数 RIS 编码的情况下, 该系统对室内信号仍产生了大幅提升。

此外, 本文 RIS 作为准无源中继由于并不参与信号的调制、放大等, 因此理论上 RIS 对电磁波束的调控是互易的。虽然这里没有实验测试, 但根据电磁波的互易性原理, 该 RIS 也能实现双工通信。

### 3 结束语

本文设计了一种能够在外加电压激励下实时调节反射相位的 2 bit RIS 单元, 并在仿真分析及理论计算基础上构建了应用于室内接收信号增强的 RIS 系统原型。最后, 在真实室内环境中进行了实验验证。测试结果表明, 该系统对室内信号功率的平均提升为 8.9 dB, 尤其是对室内信号弱覆盖区域

的增强效果显著, 最大可达 22 dB。后续将重点研究如何结合算法优化, 利用智能表面实现自适应电磁波动态调控, 以进一步提升其应用前景。本文提出的智能表面及其原型系统未来有望进一步应用于室内、室外无线通信信号的覆盖提升, 以及无线传能等方面。

### 参考文献:

- [1] JI X S, HUANG K Z, JIN L, et al. Overview of 5G security technology[J]. Science China Information Sciences, 2018, 61(8): 1-25.
- [2] NIU Y, LI Y, JIN D P, et al. A survey of millimeter wave communications (mmWave) for 5G: opportunities and challenges[J]. Wireless Networks, 2015, 21(8): 2657-2676.
- [3] LI S C. 5G Internet of things: a survey[J]. Journal of Industrial Information Integration, 2018, 10: 1-9.
- [4] 邓宇, 赵军辉, 张青苗. 面向 IoT 的两级多接入边缘计算节能卸载策略[J]. 计算机工程与应用, 2022, 58(13): 94-101.
- [5] DENG Y, ZHAO J H, ZHANG Q M. Two-level multi-access edge computing energy-saving offloading strategy for IoT[J]. Computer Engineering and Applications, 2022, 58(13): 94-101.
- [6] 张英辉, 乔国繁, 杨春亮, 等. 5G 小基站应用场景综述[J]. 通信技术, 2021, 54(8): 1815-1819.
- [7] ZHANG Y H, QIAO G F, YANG C L, et al. Overview of the application scenario of 5G small cell base station[J]. Communications Technology, 2021, 54(8): 1815-1819.
- [8] CHEN K, ZHANG N, DING G W, et al. Active anisotropic coding metasurface with independent real-time reconfigurability for dual polarized waves[J]. Advanced Materials Technologies, 2020, 5(2): 1900930.

- [7] CHEN K, DING G W, HU G W, et al. Directional Janus metasurface[J]. *Advanced Materials*, 2020, 32(2): 1906352.
- [8] BAO L, CUI T J. Tunable, reconfigurable, and programmable metamaterials[J]. *Microwave and Optical Technology Letters*, 2020, 62(1): 9-32.
- [9] WU R Y, SHI C B, LIU S, et al. Addition theorem for digital coding metamaterials[J]. *Advanced Optical Materials*, 2018, 6(5): 1701236.
- [10] 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.
- [11] DAI J Y, TANG W K, CHEN M Z, et al. Wireless communication based on information metasurfaces[J]. *IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques*, 2021, 69(3): 1493-1510.
- [12] LIANG Y C, CHEN J, LONG R Z, et al. Reconfigurable intelligent surfaces for smart wireless environments: channel estimation, system design and applications in 6G networks[J]. *Science China Information Sciences*, 2021, 64(10): 1-21.
- [13] ZHAO J. A survey of intelligent reflecting surfaces (IRSs): towards 6g wireless communication networks[J]. *arXiv Preprint, arXiv: 1907.04789*, 2019.
- [14] AI H F, KANG Q L, WANG W, et al. Multi-beam steering for 6G communications based on graphene metasurfaces[J]. *Sensors*, 2021, 21(14): 4784.
- [15] GUO K, LI X, AI H, et al. Tunable oriented mid-infrared wave based on metasurface with phase change material of GST[J]. *Results in Physics*, 2022, 34: 105269.
- [16] TANG W K, DAI J Y, CHEN M Z, et al. Programmable metasurface-based RF chain-free 8PSK wireless transmitter[J]. *Electronics Letters*, 2019, 55(7): 417-420.
- [17] DAI J Y, TANG W K, ZHAO J, et al. Wireless communications through a simplified architecture based on time-domain digital coding metasurface[J]. *Advanced Materials Technologies*, 2019, 4(7): 1900044.
- [18] TANG W K, CHEN M Z, DAI J Y, et al. Wireless communications with programmable metasurface: new paradigms, opportunities, and challenges on transceiver design[J]. *IEEE Wireless Communications*, 2020, 27(2): 180-187.
- [19] 朱政宇, 王梓暉, 徐金雷, 等. 智能反射面辅助的未来无线通信: 现状与展望[J]. *航空学报*, 2022, 43(2): 203-217.
- ZHU Z Y, WANG Z X, XU J L, et al. Future wireless communication assisted by intelligent reflecting surface: state of art and prospects[J]. *Acta Aeronautica et Astronautica Sinica*, 2022, 43(2): 203-217.
- [20] ZHAO H T, SHUANG Y, WEI M L, et al. Metasurface-assisted massive backscatter wireless communication with commodity Wi-Fi signals[J]. *Nature Communications*, 2020, 11: 3926.
- [21] DAI L L, WANG B C, WANG M, et al. Reconfigurable intelligent surface-based wireless communications: antenna design, prototyping, and experimental results[J]. *IEEE Access*, 2020, 8: 45913-45923.
- [22] ZHOU R Y, CHEN X Y, TANG W K, et al. Modeling and measurements for multi-path mitigation with reconfigurable intelligent surfaces[C]//*Proceedings of 2022 16th European Conference on Antennas and Propagation (EuCAP)*. Piscataway: IEEE Press, 2022: 1-5.
- [23] TANG W K, CHEN M Z, CHEN X Y, et al. Wireless communications

with reconfigurable intelligent surface: path loss modeling and experimental measurement[J]. *IEEE Transactions on Wireless Communications*, 2021, 20(1): 421-439.

- [24] BASAR E, DI RENZO M, DE ROSNY J, et al. Wireless communications through reconfigurable intelligent surfaces[J]. *IEEE Access*, 2019, 7: 116753-116773.

#### [作者简介]



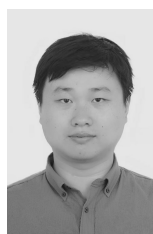
唐奎 (1998- ), 男, 四川德阳人, 南京大学博士生, 主要研究方向为可重构智能表面及其在无线通信中的应用等。



胡琪 (1996- ), 女, 浙江温州人, 南京大学博士生, 主要研究方向为时空编码可重构超表面在电磁波调控及无线通信中的应用。



赵俊明 (1981- ), 男, 江苏常州人, 博士, 南京大学教授、博士生导师, 主要研究方向为基于人工电磁材料的电磁吸波材料、可调控智能隐身材料、光学变换与场变换设计等。



陈克 (1990- ), 男, 江苏镇江人, 博士, 南京大学副教授、博士生导师, 主要研究方向为人工电磁材料及其在无线通信和新型电磁器件中的应用。



冯一军 (1964- ), 男, 江苏南京人, 博士, 南京大学教授、博士生导师, 主要研究方向为人工电磁材料及光电子器件应用、电磁波新材料、微波器件和技术。