科学通报 2026 年 第 71 卷 第 30 期: 6984 ~ 6994
电磁超材料与人工智能双向赋能专题 论 文
《中国科学》杂志社 SCIENCE CHINA PRESS

面向自适应通信增强的可移动智能超表面

赵克战, 李新羽*, 黄政, 赵禹丞, 毛陆骋, 季星悦, 黄琳杰, 游检卫*, 崔铁军*

东南大学毫米波全国重点实验室, 南京 211189

* 联系人, E-mail: xinyuli@seu.edu.cn; jvyou@seu.edu.cn; tjcui@seu.edu.cn

2025-11-28 收稿, 2026-03-09 修回, 2026-03-10 接受, 2026-03-11 网络版发表

国家自然科学基金(62301149, 62288101, 62101124)、博士后创新人才支持计划(BX20230066)、江苏省博士后科研资助计划(2023ZB318)、江苏省自然科学基金(BK20230820, BK20243015)和中国博士后科学基金(2024M750418)资助

摘要 随着5G/6G、毫米波通信和车联网等应用场景对可靠覆盖和高数据速率的需求持续攀升, 复杂环境中的信道衰落与遮挡问题逐渐成为影响通信性能的核心瓶颈. 智能超表面(reconfigurable intelligent surface, RIS)因其低功耗、可编程和易部署等优势, 成为提升无线通信质量的重要技术. 然而, 传统固定式RIS受限于空间刚性与场景变化, 难以在动态环境中保持稳定增益. 为此, 本文提出一种集视觉感知、三维建图、路径规划与电磁调控于一体的可移动智能超表面系统, 构建了“视觉感知—场景重建—位置/码本联合优化—通信增强”的闭环体系. 系统采用ZED 2i立体视觉实现对环境的三维点云重建, 并生成栅格地图用于障碍识别与路径规划; 基于双层粒子群优化算法同时优化RIS部署位置与编码模式, 使可移动平台能自主移动至最优反射点位并实现波束聚焦. 实验结果表明, 系统在不同光照条件下均能获得结构完整、密度均匀的三维重建结果, 平均定位误差小于0.05 m, 角度误差小于3°, 满足实时路径规划需求. 在通信性能方面, 相比“无RIS”场景, 可移动RIS显著提升接收信号强度, 丢包率降低68.3%; 与固定RIS相比, 移动式部署进一步改善链路稳定性与星座图稳定性, 使通信信号解调更为准确. 本研究验证了可移动智能超表面在弱覆盖区域链路构建与动态复杂场景通信质量增强中的有效性, 为构建自适应、环境智能化的6G通信系统提供了一种可行的技术路径.

关键词 智能超表面, 移动平台, 视觉感知, 电磁调控, 通信增强, 三维重建

随着科技社会的发展和生活水平的提高, 人们对于通信质量的要求不断提高. 关于环境中通信质量提高的解决方法, 目前主流的方向已从传统技术手段向智能化、环境感知化、多技术融合化演进, 但是无线通信系统的性能提升始终受限于复杂传播环境带来的信道衰落与遮挡问题, 这一挑战在5G/6G、毫米波通信和车联网等新兴场景中较为突出[1~3]. 在无线信号的传播过程中, 降低信号质量的因素有大尺度衰落和小尺度衰落. 大尺度衰落由路径损耗和阴影效应主导, 前者使信号强度随传播距离呈对数衰减, 后者因建筑物、山体等障碍物遮挡直达路径(line-of-sight, LOS), 引发信号功率缓慢波动, 且服从对数正态分布[4]; 小尺度衰落则是由于多径传播与多普勒频移, 多径信号的相消叠加会导致信号幅度在短距离内剧烈起伏, 形成瑞利衰落等典型特征[5], 而高速移动场景(如高铁、车联网)中的多普勒频移可高达数百赫兹, 严重影响信号解调精度[6]. 特别是在毫米波通信中, 信号衍射的能力很弱, 遮挡会中断通信的链路, 成为制约其超高速率发挥优势的核心瓶颈. 这些问题不仅会显著增加系统误码率、降低传输速率, 而且会导致关键场景(如远程医疗和自动驾驶)的通信中断, 引发安全风险或经济损失[7~9]. 因此, 深入研究信道衰落与遮挡的特性规律、

引用格式: 赵克战, 李新羽, 黄政, 等. 面向自适应通信增强的可移动智能超表面. 科学通报, 2026, 71: 6984–6994
Zhao K, Li X, Huang Z, et al. Mobile reconfigurable intelligent metasurface enabling adaptive communication enhancement (in Chinese). Chin Sci Bull, 2026, 71: 6984–6994, doi: 10.1360/CSB-2025-5842

© 2026《中国科学》杂志社

优化抗衰落抗遮挡技术, 对于拓展无线通信应用边界、提升系统可靠性与覆盖质量具有重要的理论价值和工程意义.

智能超表面(reconfigurable intelligent surface, RIS)[10~13]作为一种新兴的电磁波调控技术, 凭借其可编程、低功耗、易于部署等特性, 为应对未来无线通信网络在高数据速率、广域覆盖和超高可靠性方面面临的严峻挑战提供了革命性的解决方案. 在无线通信领域, 其核心潜力在于能主动构建可控的无线传播环境, 从而突破传统信道不可控的瓶颈. RIS是由大量无源电磁单元构成的二维平面结构, 能够对入射到表面的电磁波施加特定的相位、幅度乃至极化响应, 从而实现波束偏转和电磁波聚焦等关键功能. 在覆盖增强方面, RIS可以被战略性部署在信号盲区或小区边缘, 作为虚拟中继, 将基站信号智能地反射至原本难以抵达的用户终端, 显著提升接收信号强度与覆盖范围. 与传统有源中继相比, RIS无需功率放大器, 仅通过无源元件的参数调整实现功能, 具有极高的能量效率[14].

尽管RIS在理论上展现出巨大潜力, 但当前研究与应用中占主导地位的固定式RIS设计存在显著的固有局限性, 这极大地制约了其在动态真实环境下的性能表现. 其核心问题主要集中于空间覆盖的刚性以及与环境交互能力的缺失, 固定式RIS一旦被部署, 它的位置、朝向以及能够覆盖的范围就被确定了. 这种静态问题导致RIS难以适应无线通信环境的动态变化, 它的波束覆盖范围只能有效服务特定的反射区域内的终端, 如果用户移动到范围之外, 或者环境中存在影响通信质量的障碍物时, 固定式RIS就会变得无能为力. 现有的研究进展主要体现在RIS动态赋形波束与优化信道容量, 以及场景自适应智能调控两方面. 在动态波束赋形方面, RIS通过实时调整每个反射单元的幅度和相位, 能够构造高增益的定向波束以补偿路径损耗, 或生成零陷以抑制同频干扰, 显著提升边缘用户的信干噪比与系统频谱效率[15]. 在场景自适应方面, 研究重点已从静态优化转向基于深度强化学习的自主决策. 例如, Khoi等人[16]提出将RIS与通信环境建模为马尔可夫决策过程, 使RIS能够根据历史信道状态信息或部分实时反馈, 自主学习最优的反射系数配置策略, 以应对用户移动、业务突变等动态场景. 然而, 如何实现低开销、低延迟的场景感知与策略更新, 仍是亟待解决的关键挑战.

自主智能超表面是RIS技术的演进形态, 其核心特征在于将感知、计算与通信功能集成于一体, 赋予表面在局部进行信息处理与自主决策的能力[17~19]. 例如, Hu等人[17]通过利用大语言模型(large language model, LLM)开发了能够理解人类高级意图、进行自主任务规划与决策, 并与物理环境实时交互的闭环系统. 该系统能够执行需要多设备协作的复杂任务, 当接收到LLM分解出的子任务后, 系统能自主地从该地图中查询目标位置, 并自动生成实现波束聚焦所需的控制代码, 继而驱动超表面执行相应的电磁操控. Zhu等人[20]通过在RIS上集成低成本微波功率计, 检测基站与用户信号在表面形成的干涉全息图, 并据此直接解算出用户角度以完成波束赋形. 这一机制实现了不依赖基站控制的、完全自主的RIS操作, 这些环境感知是实现自主智能超表面“智能”与“自主”特性的基石, 缺乏环境感知的RIS犹如“盲波束赋形”, 难以在复杂的动态环境中维持稳定的性能增益. 其次, 更深层次的环境理解是实现真正场景自适应的关键, 这要求超表面不仅能感知电磁信号, 还能通过与光学、视觉等多模态传感数据的融合, 理解场景的语义信息. 光学传感与计算机视觉技术通过多维环境感知与精细化重建, 为自主智能超表面提供不可或缺的语义化场景理解能力. 例如, 计算光学成像通过协同优化光学编码与计算解码, 突破传统光学在感知维度与分辨率方面的局限. Bian等人[21]指出, 端到端的联合优化技术将光学编码过程数字化孪生为神经网络层, 显著提升了成像精度与效率. 在三维环境重建方面, 被动式立体视觉因其结构简单且信息丰富而成为发展趋势. 基于双目视觉的系统运用光学三角测量原理, 结合图像滤波预处理、区域立体匹配及点云深度学习网络, 可实现环境的高精度三维建模与对象识别.

本文提出一种可移动的智能超表面平台, 如图1所示, 该平台具备多维度环境感知与电磁波调控能力, 进而构建“视觉感知—场景重建—位置/码本联合优化—通信增强”闭环调控体系. 本系统通过光学摄像头获取环境视觉信息, 结合超表面的灵活波束调控能力, 在实现对周围场景高精度三维重建的基础上, 通过算法优化同时获取终端位置与超表面码本配置, 进而动态提升无线通信链路质量与传输可靠性. 实验表明, 通信性能相对于“无RIS”与“固定RIS”的场景大幅提高. 本平台为智能反射面与视觉辅助通信的协同研究提供了可验证的硬件基础与系统框架, 展现了通信感知一体化在复杂通信环境中的应用潜力.

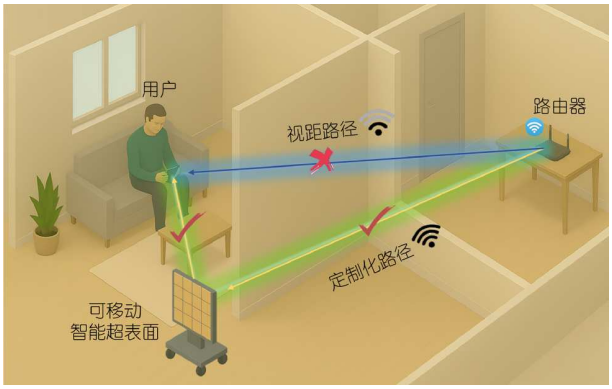


图 1 (网络版彩色)可移动的智能超表面平台及其应用示意图. 当用户通信质量较差时, 可移动智能超表面可以为用户定制化电磁波传播路径, 从而实现高质量通信、感知等专属服务

Figure 1 (Color online) Schematic diagram of the mobile intelligent metasurface platform and its applications. The mobile intelligent metasurface can customize an electromagnetic propagation path for the user when the communication quality is poor, enabling high-quality communication, sensing, and other personalized services

1 系统设计与原理

1.1 系统总体架构

系统总体架构由光学摄像头模块、决策规划模块、运动执行模块以及超表面模块四部分组成, 如图2所示. 首先, 光学摄像头对三维场景进行感知与重建, 为可移动超表面系统的障碍物检测与后续路径规划提供环境信息. 随后, 决策规划模块基于重建场景, 准确定位待建立通信链路的通信设施与潜在障碍物, 并据此生成最优的运动路径及超表面编码模式, 将优化结果通过蓝牙发送至运动执行模块和超表面模块. 运动执行模块在接收到路径指令(方向、速度等信息)后, 由单片机驱动可移动超表面平台的运动装置, 使其准确到达预定位置并完成姿态调整. 当可移动超表面系统到达目标位置后, 超表面模块根据接收到来自决策规划模块发来的编码模式, 配置各个单元状态, 实现电磁波的聚焦, 从而在目标节点间构建高效、稳定的通信链路. 四个模块协同运行, 形成“视觉感知—场景重建—路径与码本联合优化—通信增强”的闭环体系, 实现通信链路的智能构建与质量提升.

1.2 光学视觉感知与场景重建

在所提出的可移动智能超表面系统中, 光学摄像头模块承担着环境感知与三维几何信息获取的核心功能, 是实现路径规划与后续通信增强的关键前端. 本系统采用ZED 2i立体视觉传感器完成视觉感知与场景重建任务. ZED 2i由双目高分辨率摄像头及惯性测量单元(inertial measurement unit, IMU)组成, 能够实时采集同步的图像与姿态数据. 基于其内置的立体匹配算法, 系统可从双目图像中生成高精度深度图, 并进一步构建稠密三维点云, 为后端环境建模提供可靠基础. IMU的引入显著提高了动态场景下的深度估计与位姿追踪稳定性, 使系统中有移动障碍物、平台存在运动等情况下依然能保持鲁棒的三维重建能力, 如图3所示. 依托深度信息与多帧图像序列, ZED 2i内置的同步定位与地图构建(simultaneous localization and mapping, SLAM)功能可实现可移动超表面系统在场景中的实时定位与地图增量构建, 从而支持无先验环境信息条件下的感知任务. 同时, 视觉模块能够对场景中的关键构件(如障碍物、通信设施等)进行识别与语义分割, 为决策规划模块准确提取目标位置与障碍物空间分布提供必要输入. 综上, 光学视觉感知与场景重建模块为系统提供了高精度的三维几何结构与语义信息, 使得“视觉感知—场景重建—路径规划—超表面智能构建通信链路”成为可能, 是整个闭环系统的基础与前提.

1.3 决策规划模块

本文提出一种基于双层粒子群优化算法(particle swarm optimization, PSO)的可重构智能超表面自主部署策略. 其中, 外层PSO优化RIS位置和朝向, 内层PSO优化超表面的编码模式, 从而实现复杂无线通信场景下无线链路性能的自主提升. 粒子群优化算法模拟鸟群觅食行为, 通过个体与群体经验的协同搜索实现优化目标. 其中, 第i个粒子的位置向量和速度向量分别表示为

$$\begin{aligned}\vec{v}_i(t+1) &= w\cdot\vec{v}_i(t)+c_1\cdot r_1\cdot\left(\vec{p}_{\mathrm{best},i}-\vec{x}_i(t)\right)\\ &\quad +c_2\cdot r_2\cdot\left(\vec{g}_{\mathrm{best}}-\vec{x}_i(t)\right),\\ \vec{x}_i(t+1) &= \vec{x}_i(t)+\vec{v}_i(t+1),\end{aligned}\tag{1}$$

其中, $\vec{v}_i(t)$为粒子i在第t次迭代的速度, $\vec{x}_i(t)$为粒子i在第t次迭代的位置, $\vec{p}_{\mathrm{best},i}$为粒子$i$的个体历史最优位置, $\vec{g}_{\mathrm{best}}$为群体的全局历史最优位置, w为惯性权重, 平衡全局与局部搜索能力, c_1、c_2为学习因子, 分别调节个体与群体经验的影响程度, r_1、r_2为[0,1]区间均匀分布的随机数.

本策略首先依据栅格地图构建空间约束模型, 确保RIS的部署避开栅格中的障碍物并满足与收发终端

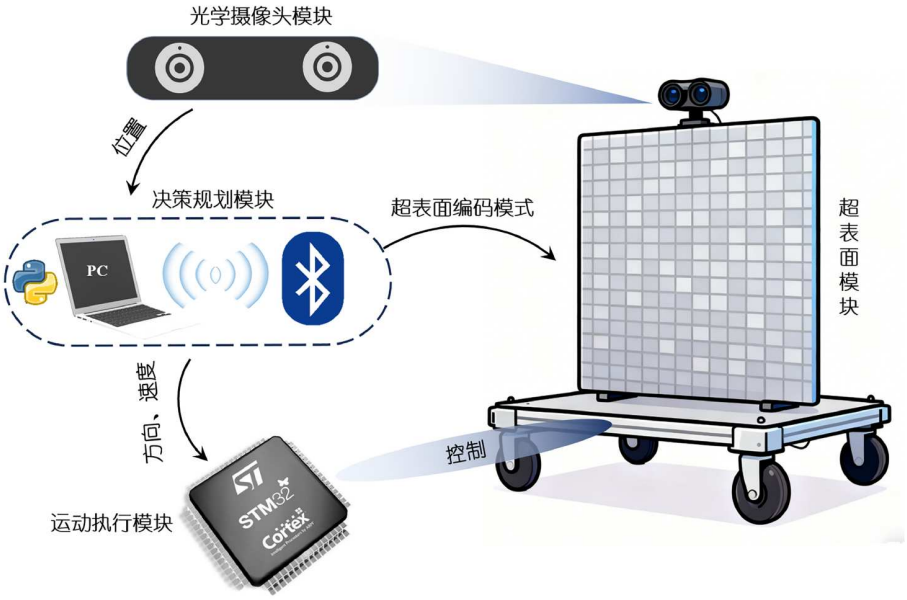


图 2 (网络版彩色)系统总体架构示意图. 系统由光学摄像头模块、决策规划模块、运动执行模块以及超表面模块构成. 各模块协同运行, 构建"视觉感知—场景重建—路径与码本联合优化—通信增强"的闭环体系, 实现通信链路的智能化构建与性能提升

Figure 2 (Color online) Overview of the system architecture. The system consists of four components: the optical imaging module, decision-planning module, motion execution module, and metasurface module. These components operate cooperatively to form a closed-loop framework of "visual perception–scene reconstruction–joint path and codebook optimization–communication enhancement", enabling intelligent construction and performance improvement of wireless communication links

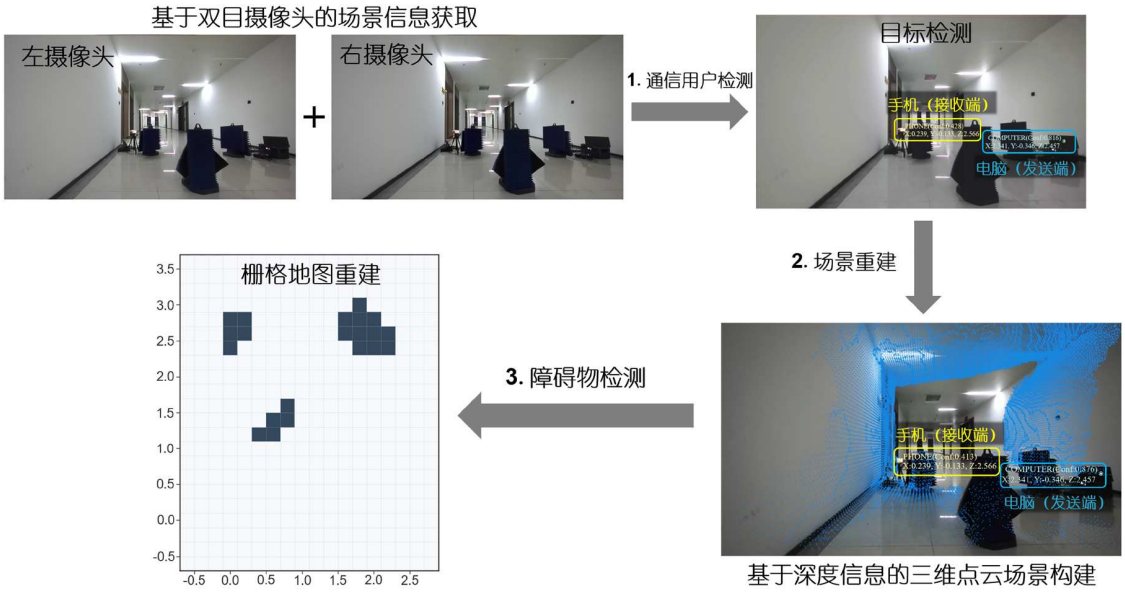


图 3 (网络版彩色)基于光学视觉感知的三维场景重建和栅格地图构建

Figure 3 (Color online) 3D scene reconstruction and occupancy grid mapping based on optical visual perception

间的路径条件. 约束条件存在以下五点: 栅格无障碍物、栅格不与发送端和接收端重合、栅格不在发送端和接收端的连线上、栅格与发送端和接收端的连线上均无障碍物、移动台-RIS-目标的夹角不超过120°(避免RIS过于偏置). 其中, 判断连线上是否有障碍物运用了Bresenham直线光栅化算法. 具体来说, 首先对地图

进行分辨率提升，采用Bresenham直线绘制算法遍历两点连线路径上的所有栅格:

$$\begin{aligned}&\Delta x = |x_2 - x_1|, \Delta y = |y_2 - y_1|,\\&\mathrm{err} = \mathrm{d}x - \mathrm{d}y,\\&s_x = \mathrm{sign}(x_2 - x_1), s_y = \mathrm{sign}(y_2 - y_1),\end{aligned} \tag{2}$$

其中, (x_1,y_1)和(x_2,y_2)分别是起点与终点的位置, 当前点$(x_{\mathrm{curr}},y_{\mathrm{curr}})$按照以下规则更新:

$$\begin{aligned}&e_2 = 2 * err,\\&e_2 > -\Delta y \Rightarrow err \leftarrow err - \Delta y, x_{\mathrm{curr}} \leftarrow x_{\mathrm{curr}} + s_x,\\&e_2 < \Delta x \Rightarrow err \leftarrow err + \Delta x, y_{\mathrm{curr}} \leftarrow y_{\mathrm{curr}} + s_y,\end{aligned} \tag{3}$$

若路径中存在任意一个障碍栅格，返回无视线(false); 否则, 返回视线通畅(true).

在此基础上，内层采用迭代相位恢复算法，根据RIS单元与目标点的几何关系生成聚焦波束, 使接收端能量集中度最大化. 整个优化过程具备全自主决策能力, 可适应终端位置动态变化, 在多重物理约束下实现RIS部署与波束成形的协同优化, 显著提升系统链路可靠性与传输效率. 外层PSO算法以栅格坐标和RIS平面法向角为决策变量，以路径损耗与波束聚焦能力的综合表现为适应度函数, 动态搜索最优部署位置, 并引入角度调整机制以保障反射路径处于有效入射-反射范围内. 具体来说, 适应度函数如下:

$$\begin{aligned}\mathrm{fitness} = {} & (1 - \mathrm{power}) * w1 + \mathrm{pen} * w2\\&+ \mathrm{path_length} * w3,\end{aligned} \tag{4}$$

其中, power是归一化聚焦强度, 其值等于焦斑图中“目标位置”的幅度除以全图功率最大值，用来惩罚“不理想但仍可接受”的位置(比如超距离、无LoS等)，为发射天线与接收天线到超表面中心的两段距离和, $w1$、$w2$、$w3$分别为它们的权重. 为评估外层PSO的收敛特性, 我们记录了在25 m^{2}地图下, 经过200次迭代的全局最优适应度(fitness). 如图4(a)所示, 随着迭代进行, 最优适应度呈阶梯式下降并逐渐趋于稳定, 表明外层搜索能够在有限迭代内找到更优的RIS部署参数. 进一步观察可发现，主要性能提升集中在前50次迭代内, 随后改进幅度明显减小，因此采用固定迭代次数可在保证优化效果的同时降低计算时延，从而提升动态场景下的实时可行性. 如图4(b)所示，内层的迭代体现在目标点归一化聚焦功率趋于平稳, 也可以发现, 主要性能提升集中在前50次迭代内.

双层PSO的外层用于搜索RIS放置位置与姿态，每次适应度评估会调用相位优化模块生成RIS的相位码与聚焦图样. 设外层粒子数为P, 外层迭代为(本文实现中$P = 10$，$I = 50$)，栅格地图大小为$K \times L$，RIS单元数为$N = N_x N_y$(本文$N = 16 \times 14 = 224$)，内层相位迭代次数为T(本文$T = 50$)，主导开销来自外层搜索超表面最佳位置与相位优化中的矩阵-向量乘法，总复杂度约为$O(P \cdot I \cdot (T \cdot N^2 + K \cdot L))$. 为评估不同场景规模下的计算开销, 在20×20、40×40、60×60栅格地图上随机生成Tx/Rx与障碍配置, 分别重复运行100次, 统计总运行时间的均值±标准差及P95分位数，结果如表1所示. 其中P95代表95%的实验运行时间不超过该值. 结果表明: 随着地图规模增大，算法运行时间呈上升趋势，但在60×60场景下仍能在秒级内完成优化, 满足静态或慢变化环境的在线计算需求.

在获得三维重建结果并构建栅格地图后，为使移动台在复杂障碍环境中稳定到达目标位置，本文采用

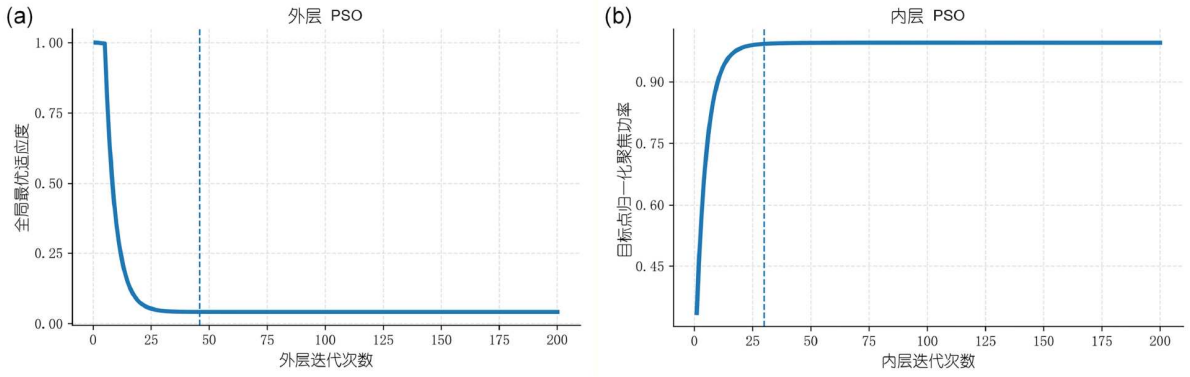


图 4 (网络版彩色)在25 m^{2}地图下内外层PSO收敛曲线: 全局最优适应度随迭代次数变化图

Figure 4 (Color online) Convergence curves of the inner and outer layers of PSO under a 25 m^2 map: graph showing the variation of the global optimal fitness with the number of iterations

表 1 双层PSO在不同地图规模下100次随机测试的运行时间统计

Table 1 The running time statistics of the double-layer PSO under 100 random tests for different map scales

地图规模	平均值(s)	标准差(s)	P95(s)
20×20	1.273	0.885	2.313
40×40	1.958	0.830	2.832
60×60	3.993	0.915	5.293

“安全边距膨胀+代价增强A*+运动学约束平滑”的两阶段路径生成策略. 首先将工作空间离散为分辨率为Δ的二维栅格, 考虑移动平台尺寸与定位误差, 在栅格层面引入安全边距, 并将其换算为安全栅格半径$r_s = d_s / \Delta$, 如果某节点在其r_s邻域内存在障碍物栅格, 那么该节点被视为不可达, 并且针对双层PSO算法所得到的起点/终点落入非安全区域的情况, 会在局部半径内搜索最近的安全替代点, 在路径的起点与终点位置考虑小车的朝向, 从而提升算法在动态与噪声环境下的鲁棒性.

在路径搜索阶段, 采用A*搜索生成栅格级可行路径. 启发函数采用节点到目标节点的欧氏距离$h(n)$, 综合代价定义为

$$f(n) = g(n) + h(n), \tag{5}$$

其中, $g(n)$为从起点到节点的累计代价. 为使路径在满足避障的同时减少靠近障碍物与急转弯, 本文中引入近障惩罚项与转向惩罚项, 近障惩罚项按与障碍距离的反比累加惩罚, 使路径更倾向于远离障碍、位于“通道中部”, 当相邻扩展方向发生变化时增大转向惩罚项, 从而减少不必要的方向切换与锯齿形路径. 与此同时, 为避免对角线扩展穿过障碍物, 当选择对角线邻接节点时, 要求其对应的两个正交邻接节点同样满足安全约束, 以排除从两个相邻障碍物缝隙走过的不可行路径. 为保障实时性, 搜索过程设置最大扩展次数上限, 当达到上限仍未找到可行解则返回失败并触发安全回退策略.

在连续轨迹生成阶段, 考虑移动平台的最小转弯半径与最大可接受转角约束, 本文将栅格路径转换为世界坐标后进行运动学感知的平滑处理: 在起点侧构造短直线“起步跑道”以满足初始航向约束; 在终点侧构造自适应“进站引导点”, 中段采用分段连接与贝塞尔融合得到连续曲线. 为避免平滑过度造成曲线切入障碍物, 对生成的连续轨迹再次进行线段级安全校验, 从而保证能够同时满足“路径平滑”与“避障安全”.

1.4 运动执行模块

运动执行模块以STM32F103C8T6微控制器作为核心控制单元, 整体由信号驱动、执行机构、功率控制与闭环调节四部分构成. 首先, STM32通过其定时器资源生成四路高精度脉宽调制(pulse-width modulation, PWM)控制信号, 用于独立驱动四个电机通道. 其次, 可移动超表面系统采用直流减速电机作为执行器, 不仅提供驱动力, 同时实现实时速度反馈, 为后端控制策略提供必要的数据支撑.

在功率驱动部分, 利用基于H桥结构的电机驱动板实现电机的正反转控制与功率放大, 确保系统在不同负载条件下仍能保持稳定输出. 为了进一步提升运动控制精度, 运动模块引入了比例-积分-微分(proportional-integral-derivative, PID)闭环控制算法, 通过持续比较目标转速与编码器反馈转速之间的偏差, 动态调整PWM输出, 实现对四个驱动轮的独立、精确且平稳的速度控制, 从而保证可移动超表面在直行、转向及复杂路径跟踪任务中的运动性能与稳定性.

$$u = k_0 \int_0^t e\mathrm{d}\tau + k_1 e + k_2 \frac{\mathrm{d}e}{\mathrm{d}t}, \tag{6}$$

其中, 积分项k_0消除稳态误差, 比例项k_1提供快速响应, 微分项k_2抑制超调与振荡. 通过光学摄像头实时监控可移动超表面所处位置, 将可移动超表面位置与目标位置的偏差转化为高分辨率PWM信号, 为可移动超表面提供精准的轨迹跟踪能力.

1.5 智能超表面设计

本工作采用了一种基于机械翻转结构的1-bit可重构智能超表面, 其整体由16×14共224个可独立寻址的机械翻转单元构成, 每个单元的物理尺寸为26 mm×26 mm, 每个翻转单元的正反两面分别加载了电磁响应不同的超表面单元, 并喷涂黑白两种指示颜色, 以清晰标识其当前编码状态. 在5.4 GHz工作频率下, 每个机械可重构超表面单元的两种翻转单元状态之间的反射相位差稳定接近180°, 同时其反射幅度在目标工作频段内保持接近1的高反射效率, 保证了超表面在切换过程中的能量保持与稳定. 依托电磁驱动模块提供的独立寻址能力, 各翻转单元能够快速完成180°机械翻转, 从而实现超表面编码模式的高速、可编程重构, 为后续的通信增强提供灵活的电磁聚焦与

场景适配能力. 图5展示了不同编码模式下, 仿真与实测得到的近场电场分布图. 可以看出仿真和实测结果具有几乎相同的电场分布, 从而证明了基于PSO算法优化出的码本具有精准的电磁波聚焦能力.

2 实验结果与分析

本节围绕我们构建的可移动智能超表面原型系统展开实验验证与性能分析. 该系统面向通信质量增强场景, 集成了视觉感知、路径规划与可重构电磁调控等关键功能. 我们通过多组对比实验系统评估其在环境感知效果、通信链路稳定性及通信质量方面的提升效果, 并对实验结果进行深入讨论, 以验证所提出方法的有效性与实用价值.

2.1 实验场景及参数设置

我们在实验室搭建了一个包含多类障碍物的典型室内通信环境, 如图6所示. 在该环境中, 通信发送端(transmitter, Tx)与接收端(receiver, Rx)之间采用符合IEEE 802.11g协议的16QAM Wi-Fi信号进行传输, 系统工作带宽为20 MHz, 双方均配置全向天线以保证辐射特性的一致性. 为了避免对室内现有商用无线信号造成干扰, 同时确保原型系统运行在超表面的设计工作频段内, 我们将通信链路的工作频率设定为5.4 GHz. 由图6可以观察到, 在障碍物遮挡条件下, Tx与Rx之间不存在可供高质量信号传输的有效直达路径, 使得通信质量显著受限. 为解决该问题, 我们搭建了如图6所示的可移动智能超表面原型系统, 用于在复杂环境中主动重构通信链路. 该系统由移动平台、基于机械翻转结构的1-bit可重构智能超表面、双目深度摄像头ZED 2i, 以及控制单元和独立供电模块组成. 移动平台能够在视觉感知与路径规划的协同作用下自主定位至最优反射点位, 随后由机械超表面实时调控其编码模式, 以构建高质量的反射辅助链路, 从而显著增强Tx与Rx之间的通信性能. 需要说明的是, 选择5.4 GHz的原因, 一方面是为了避开室内现有商用WLAN信道的干扰, 另一方面与本文1-bit机械翻转超表面的设计中心频点一致, 从而保证反射相位差与反射效率处于最佳工作区间.

2.2 视觉感知与路径规划结果与分析

为了验证基于ZED 2i的视觉感知模块在不同环境条件下的重建质量与鲁棒性, 我们对系统的三维点云

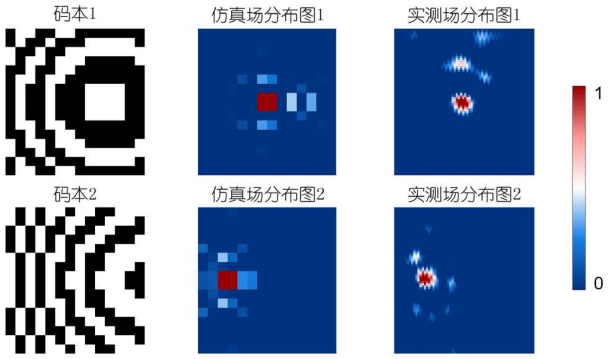


图 5 (网络版彩色)可重构智能超表面在不同编码模式下, 仿真与实测得到的近场电场分布图

Figure 5 (Color online) The near-field electric field distribution maps obtained through simulation and actual measurement of the reconfigurable intelligent metasurface under different coding modes

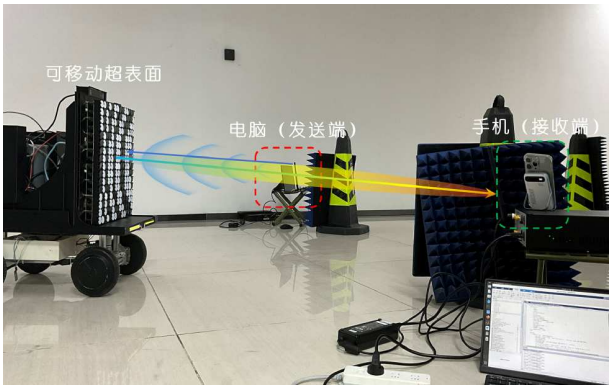


图 6 (网络版彩色)实验场景实拍图, 包括收发机、障碍物和可移动超表面等

Figure 6 (Color online) Photograph of the experimental scene, including the transceivers, obstacles, and the movable metasurface

构建与栅格地图生成性能进行了系统评估. 图7(c)和(d)分别展示了在图7(a)和(b)场景下的视觉三维场景重建结果. 首先, 在有光照条件下获得的三维点云如图7(c)所示, 整体结构清晰完整, 墙面、障碍物及关键设施均被准确刻画, 点云分布均匀, 密度达到约10^4点/m^2, 为路径规划与智能超表面定位提供了充分的几何信息. 相比之下, 无光照环境下的重建结果如图7(d), 虽然局部噪声略有增加, 但整体拓扑结构仍保持一致, 关键环境特征未发生明显丢失, 体现了系统在低光照场景下的良好鲁棒性. 在此基础上, 我们将重建的三维点云进一步转化为二维栅格地图, 用于运动规划.

图7(e)和(f)分别展示了稀疏障碍和密集障碍环境下生成的栅格地图及对应的可移动超表面行驶路径.

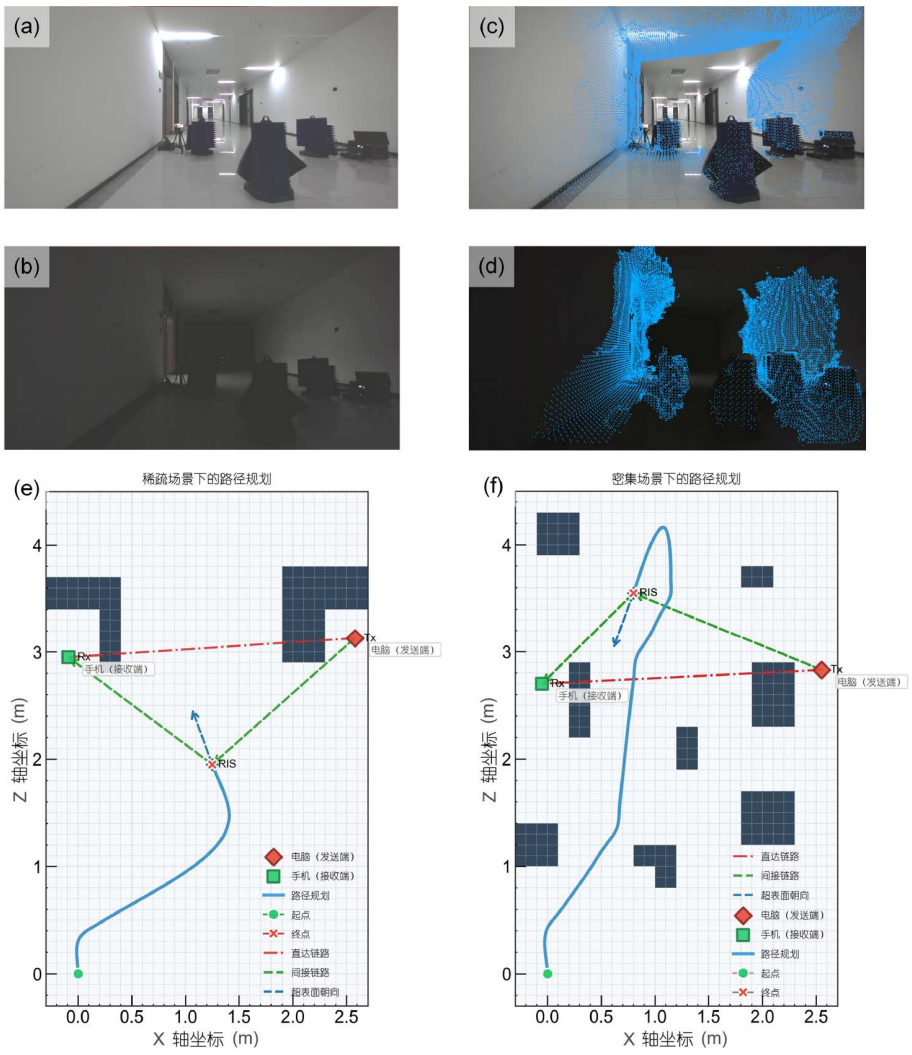


图 7 (网络版彩色)三维场景重建及栅格地图生成结果. (a, b) 不同光照条件下的场景实拍图. (c, d) 在(a, b)不同光照条件下的三维场景重建结果. (e, f) 稀疏障碍和密集障碍环境下生成的栅格地图及对应的可移动超表面行驶路径

Figure 7 (Color online) 3D scene reconstruction and grid map generation results. (a, b) Photographs of the scene under different lighting conditions. (c, d) Corresponding 3D scene reconstruction results under the lighting conditions shown in (a, b). (e, f) Generated grid maps and the corresponding trajectories of the movable metasurface in sparse-obstacle and dense-obstacle environments

可以看出, 系统能准确识别障碍区域与可通行空间, 实现不同布局下的自适应路径规划. 与此同时, 系统的实时性能也得到了有效验证, 单次路径规划(含A*与平滑校验)的平均耗时为55 ms, 为后续通信链路优化提供了可靠的环境感知基础. 可移动超表面平台根据路径规划结果不断调整其行进速度及转向角度, 并利用ZED摄像头及其中的惯性测量单元进行自身位置的估计和校准, 最终到达位置与目标期望位置之间的平均误差约为0.05 m, 角度偏差低于3°, 表明视觉感知模块能够为智能超表面平台提供可靠的位置信息支持.

2.3 通信质量提升结果与分析

为验证所提出的可移动智能超表面在复杂室内环境中的通信质量增强能力, 我们对比测试了“无RIS”“固定RIS”以及“可移动RIS”三种场景下的通信性能, 并重点分析了接收端信号强度、通信丢包率以及解调星座图的改善情况. 其中, “固定RIS”的位置是在与可移动RIS相同的可部署区域与安装约束下, 根据三维建图结果预先筛选出若干可安装候选点, 并在相同的发射功率与码本配置策略下选取链路稳定的点位作

为固定RIS的部署位置. 表2列出了三种对比方案下的平均接收信号强度(received signal strength, RSS)及数据丢包率. 实验结果表明, 与无RIS相比, 可移动RIS的RSS提升可达到19.96 dB, 丢包率改善超过68%; 相比固定RIS, 也取得了明显增益, 展示了灵活可移动的超表面部署带来的性能优势. 具体来说, 由于发射端与接收端之间不存在直接视距(non-line-of-sight, NLoS)链路, 因此在无RIS情况下接收信号强度最低, 链路完全由漫反射构成, 丢包率显著偏高, 通信性能不稳定; 当RIS固定在预设位置时, 可引导部分反射路径覆盖接收端, RSS较无RIS场景有明显提升, 丢包率明显下降. 然而, 由于RIS位置不随障碍分布变化而调整, 其性能受限于几何配置, 提升幅度有限. 通过视觉感知实现三维建图, 并基于路径与码本联合优化策略选择最佳部署位置, 使得超表面在多个可行区域中自动移动至最优点位. 本文所提出的方案实现了最高的RSS增益与最低的丢包率, 能够在多障碍环境中显著提升链路稳定性.

为进一步直观展示通信性能差异, 我们给出三种方案下16QAM调制信号的星座图, 如图8所示. 可以看出, 当没有RIS部署时, 星座点发散严重, 噪声强烈, 点云呈椭圆状扩散, 误差矢量幅度(error vector magnitude, EVM)显著偏高, 解调错误频发. 当存在固定部署的RIS时, 星座点收敛性明显好于无RIS情况, 散布范围缩小, 但仍存在可观察的相位漂移和幅度偏移. 相比之下, 可移动RIS使得星座点高度集中, 整体呈紧凑分布, 噪声抖动显著减少, EVM最低, 接收端能够稳定、准确地恢复调制符号. 上述结果表明, 可移动RIS能够主动寻找最佳反射路径与部署位置, 实现链路的高信噪比与最优调制还原质量. 我们以16QAM作为高阶调制方式的代表进行验证, 主要是由于其对EVM与相位噪声较为敏感, 能够更直观体现链路质量改善. 我们所提出的系统通过优化反射路径与聚焦提升RSS并降低多径引起的星座扩散, 其收益对其他调制方式(QPSK、16QAM、64QAM等)同样成立.

3 结论

本文构建了基于可移动智能超表面的自适应通信增强系统. 该系统可通过视觉感知、三维建图与可移动部署实现复杂室内环境中自适应通信链路的构建, 从而显著提升了通信质量. 实验表明, 所提出的可移动

表 2 在无RIS、固定RIS和本文所提出的可移动RIS场景下的接收端信号强度、通信丢包率、误差矢量幅度、误码率

Table 2 The received signal strength, communication packet loss rate, error vector magnitude, and bit error rate in the scenarios without RIS, with fixed RIS, and with the proposed mobile RIS

	无RIS	固定RIS	可移动RIS
信号强度RSS(dBm)	–37.64	–25.35	–17.68
通信丢包率(%)	68.9	8.08	0.63
误差矢量幅度EVM(dB)	–12.98	–18.18	–23.54
误码率BER(%)	2.03	0.075	0

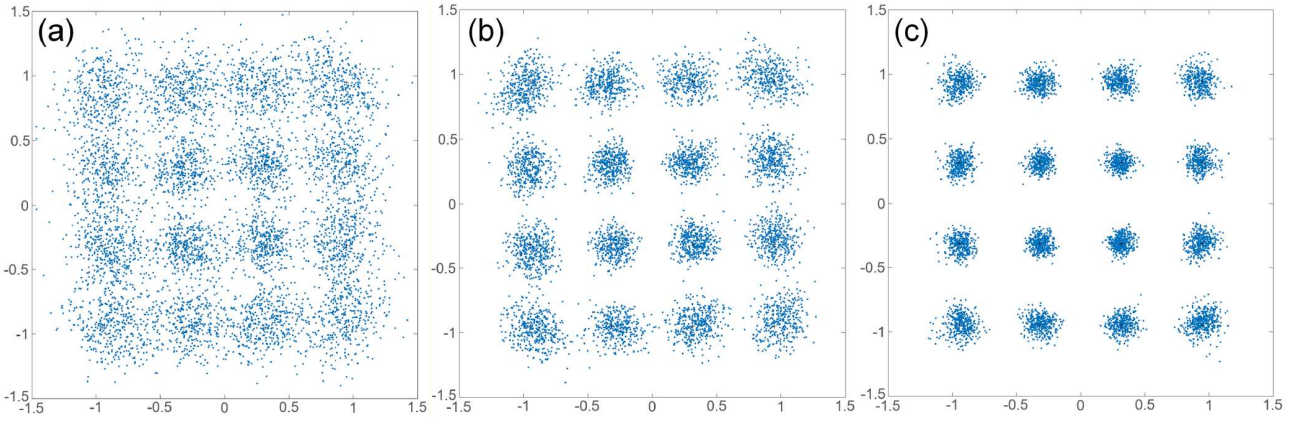


图 8 (网络版彩色)不同RIS配置下的16QAM调制信号的星座图. (a) 无RIS; (b) 固定RIS; (c) 本文所提出的可移动RIS

Figure 8 (Color online) Constellation diagrams of 16QAM-modulated signals under different RIS configurations. (a) Without RIS; (b) fixed RIS; (c) movable RIS proposed in this work

超表面系统能够在收发设备之间构建稳定的通信链路, 从而实现高质量的通信传输. 相比于“无RIS”场景, 本文所提出的可移动RIS平台将信号强度从–37.64 dBm提升至–17.68 dBm, 通信丢包率降低了68.3%. 在此基础上, 未来我们将进一步探索多超表面协同部署、自主学习驱动的智能优化以及“无线通信-视觉感知”的跨模态融合, 为6G智慧环境构建提供更具潜力的解决方案.

参考文献

1 Zhang Y, Pan Y, Gong C, et al. Channel estimation and signal detection for NLOS ultraviolet scattering communication with space division multiple access. IEEE Trans Commun, 2024, 72: 6427–6441
2 Kwon S C, Stuber G L. Polarization division multiple access on NLoS wide-band wireless fading channels. IEEE Trans Wireless Commun, 2014, 13: 3726–3737
3 Wu T, Yang F, Cao T, et al. Modeling of UV NLoS communication channels: from atmospheric scattering and obstacle reflection perspectives. IEEE J Sel Areas Commun, 2025, 43: 1590–1606
4 Van Chien T, Mollén C, Björnson E. Large-scale-fading decoding in cellular massive MIMO systems with spatially correlated channels. IEEE Trans Commun, 2018, 67: 2746–2762
5 Pizzo A, Marzetta T L, Sanguinetti L. Spatially-stationary model for holographic MIMO small-scale fading. IEEE J Sel Areas Commun, 2020, 38: 1964–1979
6 Han X H. Analysis of wireless channel characteristics (in Chinese). Radio Telev Inf, 2009, (7): 76–78 [韩晓晗. 无线信道特性分析. 广播电视信息, 2009, (7): 76–78]
7 Xu Y, Liu G, Jiang T. Leveraging rough-relay-surface scattering for non-line-of-sight mmWave radar sensing. IEEE Internet Things J, 2023, 11: 10964–10978
8 Rafique S, Arslan H. A rough surface-aided non-line-of-sight joint sensing and communication system for THz band. IEEE Open J Commun Soc, 2025, 6: 2239–2255
9 Redondi A E C, Innamorati C, Gallucci S, et al. A survey on future millimeter-wave communication applications. IEEE Access, 2024, 12: 133165–133182
10 Li L, Zhao H, Liu C, et al. Intelligent metasurfaces: control, communication and computing. eLight, 2022, 2: 7
11 Li X Y, Chen L, Qin S L, et al. BioMeta: modular reprogrammable metasurface for noninvasive human respiration monitoring. Nanophotonics, 2025, 14: 981–991
12 Li X, You J W, Gu Z, et al. Multiperson detection and vital-sign sensing empowered by space-time-coding reconfigurable intelligent surfaces. IEEE Internet Things J, 2024, 11: 28169–28183
13 Li X, Zhao K, Chen L, et al. Integration of person identification and respiratory monitoring based on reconfigurable intelligent surface. IEEE Sens J, 2025, 25: 27101–27110
14 Di Renzo M, Zappone A, Debbah M, et al. Smart radio environments empowered by reconfigurable intelligent surfaces: how it works, state of research, and the road ahead. IEEE J Sel Areas Commun, 2020, 38: 2450–2525
15 He Z Q, Yuan X. Cascaded channel estimation for large intelligent metasurface assisted massive MIMO. IEEE Wireless Commun Lett, 2020, 9: 210–214
16 Nguyen K, Masaracchia A, Yin C, et al. Deep reinforcement learning for intelligent reflecting surface-assisted D2D communications. 2021, arXiv: 2108.02892. arXiv: 2108.02892
17 Hu S, Xu J, Li M, et al. Language-controllable programmable metasurface empowered by large language models. Nanophotonics, 2024, 13: 2213–2222
18 Zhao H, Hu S, Zhang H, et al. Intelligent indoor metasurface robotics. Natl Sci Rev, 2023, 10: nwac266
19 Hu S, Li M, Xu J, et al. Electromagnetic metamaterial agent. Light Sci Appl, 2025, 14: 12
20 Zhu J, Gu Z, Ma Q, et al. A self-controlled reconfigurable intelligent surface inspired by optical holography. Nat Electron, 2025, 8: 1108–1118
21 Bian L, Zhan X, Yan R, et al. Physical twinning for joint encoding-decoding optimization in computational optics: a review. Light Sci Appl, 2025, 14: 162

Summary for “面向自适应通信增强的可移动智能超表面”

Mobile reconfigurable intelligent metasurface enabling adaptive communication enhancement

Kezhan Zhao, Xinyu Li*, Zheng Huang, Yucheng Zhao, Lucheng Mao, Xingyue Ji, Linjie Huang, Jian-Wei You* & Tie-Jun Cui*

State Key Laboratory of Millimeter Waves, Southeast University, Nanjing 211189, China
* Corresponding authors, E-mail: xinyuli@seu.edu.cn; jvyou@seu.edu.cn; tjcui@seu.edu.cn

As wireless technologies evolve toward 5G/6G, millimeter-wave communication, and vehicular networks, signal blockage and channel fading in complex environments have become major obstacles limiting link reliability and coverage quality. Reconfigurable intelligent surfaces (RIS) provide a promising, energy-efficient approach to reshape propagation by programming metasurface elements to steer reflections and focus electromagnetic energy toward intended receivers. However, conventional RIS deployments are usually fixed, so their performance is strongly tied to a specific installation location and can degrade when the environment or link geometry changes. To overcome these limitations, this paper proposes a mobile intelligent metasurface system that integrates visual perception, 3D scene reconstruction, path planning, and electromagnetic (EM) control, thus forming a closed-loop workflow encompassing visual perception, scene reconstruction, joint pose/codebook optimization, and communication enhancement. A ZED 2i stereo camera is employed to acquire dense 3D point clouds and occupancy grids for obstacle detection and motion planning. Based on this grid map, the mobile platform performs global path planning toward candidate locations and executes local obstacle avoidance for safe motion, enabling online navigation in obstacle-rich environments. When the scene changes or new obstacles appear, the planner can update the route accordingly, ensuring that RIS positioning and beam control remain feasible under practical mobility constraints. To maximize end-to-end link quality under mobility and actuation constraints, we develop a hierarchical particle swarm optimization (PSO) strategy that jointly optimizes the RIS deployment pose and the RIS coding pattern. The resulting optimum guides the platform to autonomously move to the selected reflective point, align the metasurface, and apply the corresponding coding pattern to achieve high-gain EM focusing. Experimental results demonstrate that the proposed system provides robust 3D reconstruction under both well-lit and low-light conditions, the average positioning error is less than 0.05 m and the angle error is less than 3°, meeting the requirements of real-time path planning. In terms of communication performance, the mobile RIS markedly improves the received signal strength and reduces the packet loss rate by 68.3% compared with the “no RIS” scenario. In addition, relative to a fixed RIS, the mobile RIS achieves more stable link quality and produces more compact constellation clusters, leading to improved demodulation accuracy. These results verify the effectiveness of the proposed mobile RIS for establishing reliable wireless links and enhancing communication quality in obstructed and dynamic indoor environments. Overall, the proposed system validates the effectiveness of perception-driven mobile RIS for building reliable links in weak-coverage regions and enhancing communication quality in dynamic, obstructed indoor environments, offering a practical pathway toward adaptive, environment-aware 6G networks.

reconfigurable intelligent surface (RIS), mobile platform, visual perception, electromagnetic wave manipulation, communication enhancement, 3-dimensional reconstruction

doi: 10.1360/CSB-2025-5842