

文章编号: 2095-4980(2025)12-1301-08

地铁场景 RIS 辅助的 2.6 GHz 与太赫兹混合 IoT 覆盖增强

杨 晨¹, 黄子博^{*2a,2b}, 弓子悦³, 官 科^{2a,2b}

(1.北京市地铁运营有限公司 供电分公司, 北京 100044; 2.北京交通大学 a.先进轨道交通自主运行全国重点实验室;
b.电子信息工程学院, 北京 100044; 3.北京乾径科技有限公司, 北京 100076)

摘 要: 随着第五代移动通信技术(5G)及太赫兹通信技术的发展, 地铁场景下的高容量、低时延无线通信需求日益迫切。但地铁站台等典型复杂室内环境存在严重的多径效应与遮挡问题, 导致无线覆盖不足和信号衰落。本文提出一种基于智能超表面(RIS)的混合物联网(IoT)覆盖增强方案。基于射线追踪技术对地铁站台进行仿真, 识别信号覆盖薄弱区域; 针对广域覆盖不足问题, 采用 2.6 GHz 频段的 RIS 实现覆盖增强, 有效改善基站至弱覆盖区域的链路质量。结果表明, 该方法能够显著提升复杂地铁站台场景的通信性能, 减少盲区并提高系统容量。此外, 为进一步解决热点区域内的高速率业务需求, 引入太赫兹频段 RIS 进行局部增强。该混合 RIS 协同方案在保证广覆盖的同时, 兼顾高速率与低时延特性, 为地铁场景下的物联网链路质量提供了高效、灵活的解决途径。

关键词: 射线追踪; 智能超表面; 多径干扰; 无线网络优化

中图分类号: TN92

文献标志码: A

DOI: 10.11805/TKYDA2025292

Subway scenario reconfigurable intelligence surface-assisted 2.6 GHz and terahertz hybrid IoT coverage enhancement

YANG Chen¹, HUANG Zibo^{*2a,2b}, GONG Ziyue³, GUAN Ke^{2a,2b}

(1.Power Supply Branch, Beijing Subway Operation Co., Ltd., Beijing 100044, China;

2a.State Key Laboratory of Advanced Rail Autonomous Operation; 2b.School of Electronic and Information Engineering, Beijing Jiaotong University, Beijing 100044, China; 3.Beijing MetaRadio Technology Co., Ltd., Beijing 100076, China)

Abstract: With the advancement of 5G and terahertz communication technology, there is a growing demand for high-capacity and low-latency wireless communication in subway environments. However, typical complex indoor settings such as subway waiting halls suffer from severe multipath effects and signal blockages, leading to insufficient wireless coverage and signal degradation. This paper proposes a hybrid Internet of Things(IoT) coverage enhancement scheme based on Reconfigurable Intelligent Surface(RIS). Using a ray-tracing method, the subway waiting hall is simulated to identify areas with weak coverage. To address the issue of insufficient wide-area coverage, a reconfigurable intelligent surface operating in the 2.6 GHz frequency band is employed to enhance coverage, effectively improving the link quality between base stations and weakly covered areas. The results demonstrate that the proposed method significantly enhances communication performance in complex waiting hall environments, reducing blind spots and increasing system capacity. Furthermore, to meet the high-rate demands in hotspot areas, a terahertz-band RIS is introduced for local enhancement. This hybrid RIS

收稿日期: 2025-09-19; 修回日期: 2025-10-25

基金项目: 北京地铁自有信息化改造科研资助项目(2024000501000012)

*通信作者: 黄子博 email:huangzibo@bjtu.edu.cn

引用格式: 杨晨,黄子博,弓子悦,等. 地铁场景 RIS 辅助的 2.6 GHz 与太赫兹混合 IoT 覆盖增强[J]. 太赫兹科学与电子信息学报, 2025,23(12): 1301-1308. DOI:10.11805/TKYDA2025292.

Citation format: YANG Chen,HUANG Zibo,GONG Ziyue,et al. Subway scenario reconfigurable intelligence surface-assisted 2.6 GHz and terahertz hybrid IoT coverage enhancement[J]. Journal of Terahertz Science and Electronic Information Technology, 2025,23(12): 1301-1308. DOI:10.11805/TKYDA2025292.

cooperative scheme ensures broad coverage while simultaneously supporting high data rates and low latency, providing an efficient and flexible solution for improving IoT link quality in subway scenarios.

Keywords: ray tracing; Reconfigurable Intelligent Surface(RIS); multipath interference; wireless network optimization

随着信息社会的不断发展,第五代移动通信技术(5G)已逐步进入大规模商用阶段,并在移动互联网、智能制造、车联网和物联网等领域展现出巨大的应用潜力^[1]。与此同时,作为第六代移动通信技术(6G)的重要候选技术之一,太赫兹(Terahertz, THz)通信因其超大带宽和超高速率特性,成为学术界和产业界广泛关注的研究热点^[2-3]。在未来的智慧城市中,地铁作为典型的大容量公共交通基础设施,不仅需要承载乘客的日常通信业务,还需满足安防监控、环境监测、应急通信和多类型物联网设备的数据回传需求^[4]。因此,如何在地铁场景下实现高容量、低时延和高可靠性的无线通信,成为当前亟待解决的重要问题。

地铁场景具有独特的传播环境特征:候车厅、站台等区域空间封闭,结构复杂,墙体、立柱以及人群会对电磁波传播造成严重的遮挡与散射。这不仅导致多径效应明显,还容易形成信号盲区和覆盖不足区域。传统的基站和分布式天线系统在地铁中虽然能够一定程度上改善覆盖区域,但其部署成本高,能耗大,且难以在有限空间内灵活调整传播环境,因而在满足未来物联网的多样化需求方面存在局限性。特别是在热点区域,当用户数量激增时,现有系统往往无法同时兼顾广域覆盖和高速率传输,进一步加剧了通信性能的瓶颈^[5]。

近年来,智能超表面(RIS)的提出为解决上述问题提供了全新的思路。RIS是一种由大量可编程单元组成的超表面结构,能够通过调节电磁波的相位、幅度和偏振,实现对传播环境的智能重构^[6]。与传统有源中继和天线阵列不同,RIS具有低功耗、易部署和高度灵活等优点,能够在不显著增加能耗和硬件开销的前提下,显著提升系统覆盖和链路质量^[7]。因此,RIS被认为是5G演进和6G网络中的关键使能技术之一。文献[8]针对高速铁路通信场景,建立了基站-车载接入点与基站-RIS-车载接入点两类链路模型,并通过仿真对比验证了RIS在改善链路质量、提升覆盖性能方面的有效性,为未来高铁5G网络的优化与部署提供了可行思路。文献[9]则针对现有特殊波束超表面仅能实现静态单一波前调控的不足,提出了一种基于石墨烯的动态波前调控超表面。利用石墨烯费米能级的可调性实现更加灵活的相位分布控制,突破了传统金属结构的限制,为太赫兹波段的高分辨成像、可调透镜及光学微操作等应用提供了新的设计思路。文献[10]面向高铁高架桥场景,基于射线跟踪技术对2.1 GHz频段下的电波传播特性进行了精确建模,并对RIS部署前后的多维度信道特性进行了对比研究,结果表明RIS的引入不仅能够提升覆盖质量,还能增强系统容量,为高铁通信环境下5G-R系统与RIS的联合设计和优化提供了理论依据与数据支撑。

本文针对地铁场景提出一种RIS辅助的2.6 GHz与太赫兹混合IoT覆盖增强方案。具体而言,首先利用射线追踪方法对地铁候车厅进行精确建模仿真,分析其电磁传播特性并识别覆盖薄弱区域。在此基础上,设计工作于2.6 GHz频段的RIS进行广域覆盖增强,改善基站到弱覆盖区域的通信链路。随后,再引入工作于太赫兹频段的RIS^[11],对候车厅内的热点区域进行局部补偿,满足其高速率和高可靠性需求。通过这种低频广覆盖与高频精细化增强相结合的混合RIS协同方案,可在保证通信质量的同时,提升网络灵活性与资源利用率,为地铁场景下的IoT回传提供一种高效可行的技术路径。

1 基于RT的地铁IoT覆盖分析

1.1 地铁场景建模

在针对地铁候车厅开展的研究中,本研究聚焦于北京东四地铁站候车厅这一典型场景。通过实地测量获取几何数据后,对场景内诸如地铁车门、立柱、电梯、墙面以及站台等常见物体进行精细化处理,完整保留其关键细节,构建三维数字模型^[12]。图1(a)为东四地铁站候车厅的实景照片,图1(b)为高度还原的三维数字模型。此外,为使模型更贴近真实场景和确保仿真场景的物理真实性,项目组依据长期实地测量与反复验证所获得的准确数据,为模型中不同物体表面赋予了相应的材料及其电磁参数值^[13],从而实现了从几何形态到电磁特性的全要素复现。

1.2 射线追踪

射线追踪方法^[14-15]作为分析复杂电磁环境中电波传播特性的关键技术,在无线通信、雷达探测、电磁兼容等众多领域有着广泛应用。其理论基础主要涵盖几何光学与几何绕射理论,通过将电波传播过程抽象为射线的传播路径,能够高效且精准地模拟直射、反射、绕射、透射、散射等多种电波传播机理^[16]。在几何光学中,射线

被视为沿直线传播, 遇到理想导体表面时会发生镜面反射; 而几何绕射理论则进一步考虑了射线在遇到边缘、尖顶等不连续结构时的绕射现象, 弥补了几何光学在处理复杂边界问题时的不足。



Fig.1 Measurement images and 3D model of the waiting hall of Dongsidi subway station
图 1 东四地铁候车厅测量图片与三维模型

本文依托高性能射线追踪仿真平台 CloudRT^[17], 该平台能够全面支持直射、反射、绕射、透射、散射等多种电波传播机理的模拟与分析, 各种传播机理使用的几何与电磁模型如表 1 所示。仿真结果涵盖了与每对收发天线相对应的信道传输函数、多径信息、位置信息以及时延信息。基于这些数据, 不仅能够精确计算路径损耗、阴影衰落等大尺度信道传播特性, 还可深入萃取空间域、时间域、能量域、频域等多维度的小尺度信道传播特性^[18]。

表 1 射线跟踪传播机理模型
Table1 Principles applied in Ray-Tracing models

mechanism of transmission	geometric model	electromagnetic model
Line of Sight(LOS)	free-space path loss	Friis transmission equation
reflection	Snell's law of reflection ^[19]	Fresnel equations ^[19]
scattering	directional scattering ^[20]	scattering coefficient and equivalent roughness ^[20]
transmission	Snell's law ^[21]	Fresnel equations ^[21]
diffraction	Fermat's principle ^[22]	Uniform Theory of Diffraction(UTD) ^[22]

1.3 RIS 设计

基于相控阵的 RIS 设计以相位可控性为核心, 通过集成相控阵技术实现动态波束重构能力。相控阵的波束扫描特性与 RIS 的智能反射特性深度融合, 每个 RIS 单元被设计为可独立调控相位与幅度的单元, 其调控精确度直接关联波束聚焦性能。这种设计突破传统相控阵固定阵列的限制, 通过二维平面阵列布局实现三维空间波束的精准指向与动态调整, 为复杂场景提供可编程无线环境。本文中的 RIS 是基于 Matlab 中的 pattern() 函数生成的, 该函数是为在天线工具箱中生成天线阵列的辐射模式而开发的^[11], RIS 模型与 CloudRT 平台的融合在文献[23]中进行了介绍。

2 物联网覆盖仿真分析

基于 CloudRT 平台与构建的地铁候车厅三维场景模型, 开展地铁候车厅场景的仿真工作, 并对其无线信号覆盖能力进行深入分析。在高铁车站这一特定场景中, 无线信号传播的主要机制涵盖直射、反射、散射以及透射。因此, 在 RT 仿真中, 相应地配置了直射、一阶反射、一阶散射以及透射这几种传播机制。本次仿真采用的中心频率为 2.6 GHz, 带宽为 100 MHz。选取北京东四地铁站场景中 39 m×14 m 区域作为仿真区域, 区域内包括 6 根立柱、电梯与多个站台门。发射机固定安装在天花板上, 距离地面的高度为 3.75 m, 相对位置如图 2 所示。接收机部署在图中发射机周围 11 m×14 m 的区域内, 接收机的移动步长设定为 0.5 m, 其高度统一为 1.5 m。

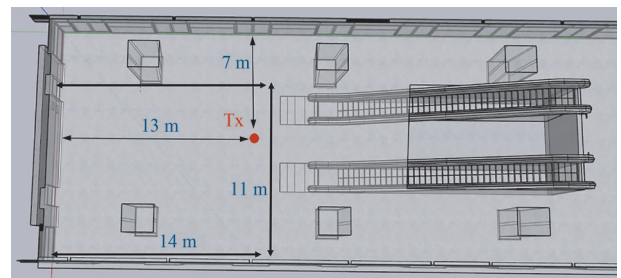


Fig.2 Schematic diagram of the relative position of the transmitter and receiver in the 2.6 GHz frequency band
图 2 收发机相对位置示意图(2.6 GHz)

在 2.6 GHz 频段下, 对模型中各材料的电磁参数进行配置, 具体参数详见表 2。发射天线选用增益为 10 dBi 的垂直极化定向天线, 接收天线选用垂直极化全向天线。收发机的归一化天线方向图如图 3 所示。

通过 RT 仿真获取了各接收机的接收功率, 图 4 为接收功率分布热图。热图显示右下方存在显著的信号覆盖薄弱区域, 主要由地铁候车厅内的立柱遮挡造成。

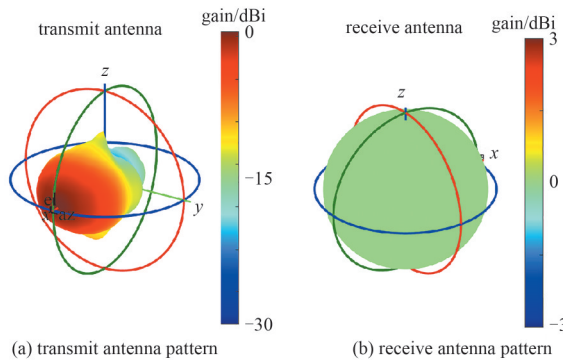


Fig.3 Normalized antenna pattern of the transceiver in the 2.6 GHz band
图 3 收发机归一化天线方向图(2.6 GHz)

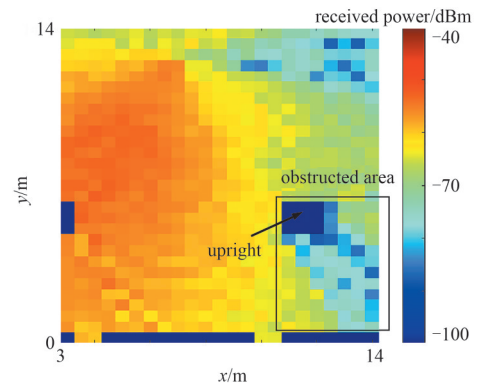


Fig.4 Receiving power coverage heatmap in the 2.6 GHz frequency band
图 4 接收功率覆盖热图(2.6 GHz)

表 2 相应材料电磁参数(2.6 GHz)

Table 2 Electromagnetic parameters of the corresponding material at 2.6 GHz

ictm	real part of relative permittivity	loss tangent
beton	5.24	0.128 7
glass	6.31	0.014 2
metal	1.00	1×10^7

3 混合 RIS 部署与应用

在地铁候车厅等复杂场景中, 密集分布的立柱等障碍物会形成显著的信号遮挡, 导致通信盲区与服务质量劣化, 成为实现高质量无缝覆盖的主要挑战。同时, 部分传感器存在较高的传输速率需求, 但高频段天线因波束宽度较窄且路径损耗较高, 难以同时覆盖多个传感器。结合物联网设备对无线连接的多维度需求: 既需要支撑基础广域覆盖, 又需满足局部高传输速率传感器的高速率要求^[23], 本文提出一种混合频段 RIS 部署方案。通过 2.6 GHz 频段 RIS 实现大范围覆盖增强, 解决障碍物遮挡引发的覆盖盲区; 同时针对高传输速率传感器部署太赫兹频段 RIS, 利用其超大带宽特性实现热点区域速率提升, 进行针对性热点增强, 弥补高频天线覆盖能力不足的问题, 最终构建“广域覆盖+局部热点”的协同增强架构。

3.1 2.6 GHz RIS 覆盖增强

地铁候车厅由于客流较为集中, 容易产生较大的话务, 频率高、带宽大的 2.6 GHz 频段被广泛部署。但密集立柱等障碍物导致的信号遮挡会形成覆盖盲区, 传统 5G 基站因波束宽度固定且调整灵活性有限, 难以精准补偿此类遮挡损耗。为此, 提出基于 2.6 GHz 频段的 RIS 覆盖增强方案, 通过动态重构无线信道, 实现对遮挡区域的定向信号补偿。

RIS 板的参数如表 3 所示。RIS 板设计采用两种阵列规格: 20×20 单元阵列与 10×10 单元阵列。其中, 20×20 阵列总单元数为 400 个; 10×10 阵列总单元数为 100 个。每个反射单元的物理尺寸为 0.5λ (λ 为波长), 以确保阵列无栅瓣辐射。如图 5 辐射波瓣图所示, 20×20 阵列的 RIS 板较 10×10 阵列的 RIS 板增益更大, 但波瓣宽度更窄, 物理尺寸更大。

将 RIS 板作为特殊散射体加入地铁候车厅三维模型进行射线追踪仿真, 其位置坐标如图 6 所示。通过仿真获取各点位接收功率并绘制热图, 如图 7 所示。从图中可以看出明显的覆盖增强效果, 20×20 阵列的 RIS 板相较于 10×10 阵列的 RIS 板, 增益效果更加显著。根据天线理论, 天线的增益与有效孔径面积成正比。 20×20 阵列的 RIS 板拥有 400 个单元, 其物理孔径面积是仅有 100 个单元的 10×10 阵列 RIS 板的 4 倍。更大的孔径面积意味着 RIS 能够形成更尖锐、能量更集中的波束, 从而在接收端汇聚更高的功率密度。单元数量的倍增极大提升了 RIS 对电磁波相位的调控自由度, 使其能够更精确地补偿信道中的相位失真, 更有效地收集并重构散射信号, 最终在克服路径损耗和穿透损耗方面展现出更优越的性能。

表 3 RIS 参数(2.6 GHz)

Table 3 RIS parameters(2.6 GHz)

RIS parameter	value
frequency/GHz	2.6
size	$20 \times 20; 10 \times 10$
unit interval	0.5λ
phase bit number	2
main lobe beam zenith angle/(°)	99
main lobe beam azimuth angle/(°)	-14.6

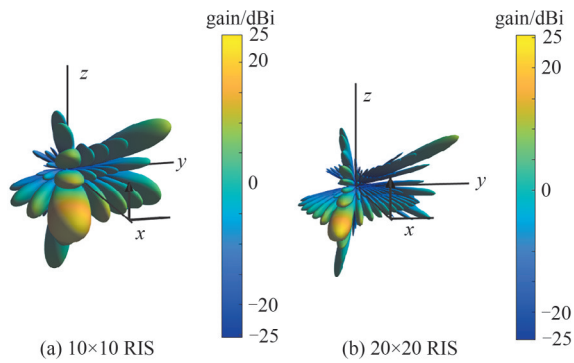


Fig.5 Radiation beam patterns of RIS boards of different sizes in the 2.6 GHz frequency band
图5 不同尺寸 RIS 板辐射波瓣(2.6 GHz)

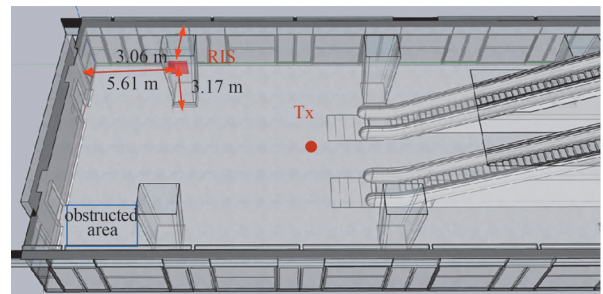


Fig.6 Relative position of the 2.6 GHz RIS board
图6 RIS 板相对位置(2.6 GHz)

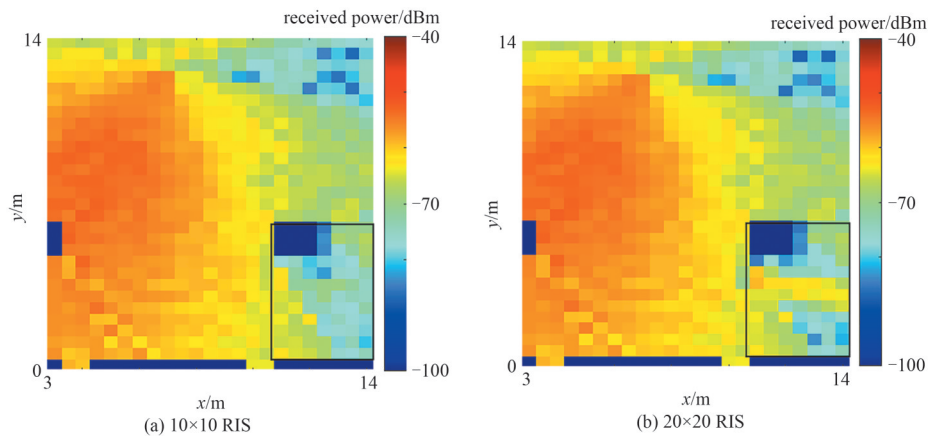


Fig.7 Coverage heatmap after deployment of 2.6 GHz RIS
图7 部署 2.6 GHz RIS 后覆盖热图

3.2 太赫兹 RIS 热点增强

IEEE 802.15.3d-2017 标准是全球首个针对太赫兹频段 (100 GHz~1 THz) 无线通信的规范, 其定义的核心应用场景, 如高速点对点无线数据链接、无线回传以及设备间瞬时大数据同步等, 与地铁候车厅场景高度契合。在地铁候车厅场景中, 为满足未来多路高清视频(如 4K/8K 监控视频、乘客信息服务、设备状态监测等)及大量高速传感器的同步回传需求, 通信系统需要支持 GHz 级别的连续大带宽。现有低频段频谱资源难以提供如此巨大的带宽, 而太赫兹频段因其丰富的频谱资源, 能够提供充足的连续带宽, 是满足未来超高速率、超大容量传输需求的可行技术方案。但太赫兹系统存在路径损耗较大的痛点问题, 因此太赫兹系统通常采用大规模天线阵列实现高增益补偿路径损耗。但这种部署方案同时会导致辐射波束宽度极窄, 难以同时覆盖多个传感器节点, 从而给系统部署带来挑战。太赫兹频段具有超大带宽特性, 理论上可实现 Tbps 级超高速传输, 但受窄波束宽度与高路径损耗限制, 传统高频天线难以实现多传感器节点的协同覆盖^[24]。本文提出基于太赫兹频段的 RIS 热点增强方案, 通过部署太赫兹频段 RIS, 可构建动态可重构的波束聚焦系统, 针对性增强热点区域的高速率传输能力, 从而解决高频段覆盖能力不足的问题。

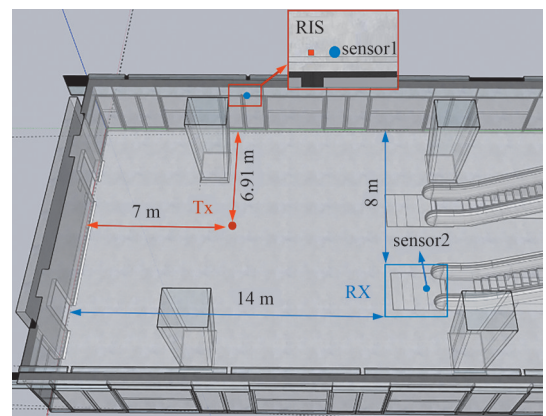


Fig.8 Deployment of terahertz frequency band RIS and the relative positions of transceiver units
图8 太赫兹频段 RIS 部署及收发机相对位置

图 8 为地铁候车厅内具有高速率传输需求传感器的相对位置及收发机的部署位置。发射机位于天花板上, 高度为 3.75 m; 候车厅部署了 2 个传感器, 传感器 1 为地铁车门上的传感器, 传感器 2 为电梯传感器。发射机波束

指向传感器 1, 为传感器 1 提供高速率传输的覆盖。RIS 安装在传感器 1 左侧, 通过 RIS 为传感器 2 提供高速率传输的覆盖。接收机设置在传感器 2 周围 2 m 范围内, 步长为 0.5 m。

仿真的中心频率为 328.5 GHz, 带宽为 1 GHz; 发射天线为该频率下的垂直极化定向天线, 增益为 25 dBi; 接收天线则与 2.6 GHz RIS 仿真中所用的全向天线一致。模型中的材料在 328.5 GHz 下的电磁参数如表 4 所示。太赫兹 RIS 板设计参数如表 5 所示。

表 4 相应材料电磁参数(328.5 GHz)

item	real part of relative permittivity	loss tangent
beton	3.691	0.054 4
glass	5.79	0.056 2
metal	1	1×10^7

表 5 太赫兹 RIS 参数

RIS parameter	value
frequency/GHz	328.5
size	100×100
unit interval	0.5λ
phase bit number	4
main lobe beam zenith angle/(°)	102.2
main lobe beam azimuth angle/(°)	43

将 RIS 板导入模型中进行射线跟踪仿真, 得到接收机的接收功率并绘制热图。图 9 为未使用 RIS 和使用 RIS 增强后的接收功率热图对比结果, 可以看出有明显的信号增强效果。

4 混合 RIS 辅助下的覆盖效果评估

针对 2.6 GHz RIS 的覆盖增强方案, 设计了两种不同尺寸的 RIS。图 10 为部署 RIS 前后接收功率的累积分布函数(Cumulative Distribution Function, CDF)对比。其中, 10×10 阵列的 RIS 在被遮挡区域可实现最大 11.5 dB 的增益, 而 20×20 阵列的 RIS 在同一区域的最大增益达到 23.2 dB, 且从图中可明显观察到 20×20 阵列的 RIS 具有更高的接收功率。以 -80 dB 作为接收功率阈值进行分析: 未部署 RIS 时, 超过该阈值的区域占比为 79.37%; 部署 10×10 阵列的 RIS 后, 该比例提升至 95.24%; 部署 20×20 阵列的 RIS 时, 则为 92.06%。不同尺寸的 RIS 各有特点: 小尺寸 RIS 虽辐射波瓣增益较小, 但波瓣宽度更大且物理部署更灵活。由于其物理尺寸更小, 重量更轻, 在如墙面转角、柱体侧面或天花板特定点位等空间受限场景中部署更具可行性; 大尺寸 RIS 则能提供更强的增益。实际应用中可根据场景需求灵活选择 RIS 的部署方案。

在太赫兹 RIS 的热点增强方案中, 传感器 2 处的接收功率增加了 18.1 dB, 有效满足了太赫兹频段覆盖多个传感器并实现高速率传输的需求。为保障上述增益能在实际网络中实现, 需对关键工程挑战制定实施方案。在控制链路设计上, 对于室内固定场景, 可采用以太网供电进行稳定连接与集中控制; 针对实时调控, 建议部署基于信标帧的感知机制, 并采用低复杂度的智能算法, 以降低计算开销与响应时延; 同时, 需建立周期性的在线校准流程, 通过内置自检测技术补偿相位误差, 确保 RIS 在复杂环境下的性能稳定性。通过上述措施, 可系统性地解决从仿真验证到实际部署的核心障碍。

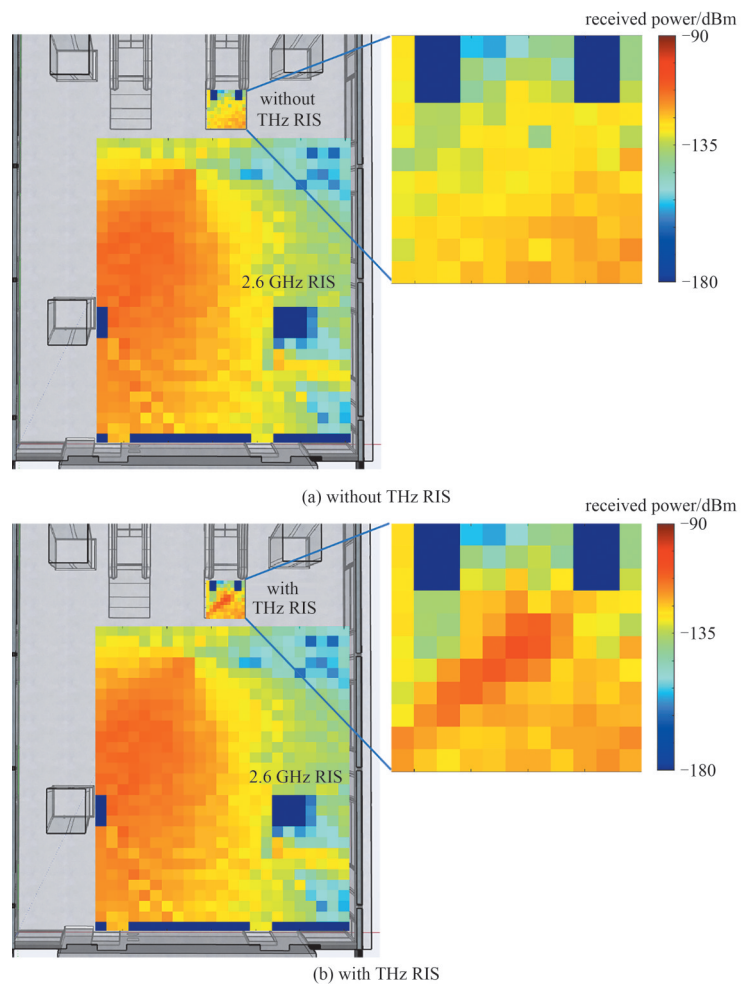


Fig.9 Thermal map of received power before and after RIS deployment in the terahertz frequency band

图 9 太赫兹频段 RIS 部署前后接收功率热图

5 结论

本文针对地铁候车厅复杂环境中存在的信号遮挡与局部高速率传输需求, 提出并验证了基于 RIS 的覆盖增强方案。对于 2.6 GHz, 设计并仿真了 10×10 阵列与 20×20 阵列两种规格的 RIS 板。仿真结果表明, 两种 RIS 均能有效改善候车厅中的信号覆盖, 其中 10×10 阵列的 RIS 在灵活部署和覆盖范围方面具有优势, 而 20×20 阵列的 RIS 则能提供更高的接收功率与增益效果。在被遮挡区域, 最大增益可分别达到 11.5 dB 和 23.2 dB, 且相较于未部署 RIS 时, 覆盖区域的比例显著提升。在太赫兹频段, 提出了面向热点区域的 RIS 增强方案, 结合候车厅内具体传感器的分布进行射线跟踪仿真。结果显示, RIS 能够有效实现对目标区域的定向补偿, 接收功率提升 18.1 dB, 从而满足多传感器节点的高速率传输需求。RIS 在地铁候车厅场景中展现出良好的覆盖增强与热点补偿能力。不同尺寸 RIS 板可根据应用场景进行灵活选择, 而在高频段应用中, RIS 则为解决覆盖能力不足、实现高速率传输提供了有效途径。

参考文献:

- [1] 官科, 张美文, 何丹萍, 等. 无线信道数字孪生关键技术现状及展望[J]. 电波科学学报, 2025, 40(5): 789–799. (GUAN Ke, ZHANG Meiwen, HE Danping, et al. The current situation and prospects of the critical digital twin technology for wireless channels[J]. Chinese Journal of Radio Science, 2025, 40(5): 789–799.) DOI:10.12265/j.cjors.2024178.
- [2] LIU Mengyu, ZHANG Yang, JIN Yasheng, et al. Towards Near-Field Communications for 6G: challenges and opportunities[J]. ZTE Communications, 2024, 22(1): 3–15. DOI:10.12142/ZTECOM.202401002.
- [3] 刘斯琦, 林长星, 刘娟, 等. 太赫兹近场通信信道特性研究综述[J]. 太赫兹科学与电子信息学报, 2024, 22(6): 647–657. (LIU Siqi, LIN Changxing, LIU Juan, et al. A review on the characteristics of terahertz near field communication channels[J]. Journal of Terahertz Science and Electronic Information Technology, 2024, 22(6): 647–657.) DOI:10.11805/TKYDA2024110.
- [4] 钟章队, 官科, 陈为, 等. 铁路新一代移动通信的挑战与思考[J]. 中兴通讯技术, 2021, 27(4): 44–50. (ZHONG Zhangdui, GUAN Ke, CHEN Wei, et al. Challenges and perspective of new generation of railway mobile communications[J]. ZTE Technology Journal, 2021, 27(4): 44–50.) DOI:10.12142/ZTETJ.202104009.
- [5] 艾渤, 何丹萍, 钟章队. 高性能射线跟踪技术在智能交通领域的应用[J]. 太赫兹科学与电子信息学报, 2023, 21(4): 530–538. (AI Bo, HE Danping, ZHONG Zhangdui. Application of high-performance ray tracing technology in intelligent transportation[J]. Journal of Terahertz Science and Electronic Information Technology, 2023, 21(4): 530–538.) DOI:10.11805/TKYDA2023031.
- [6] 何俊岩, 赖海光, 赵鑫杰, 等. 智能超表面辅助低轨卫星通信技术综述[J]. 太赫兹科学与电子信息学报, 2024, 22(3): 240–248. (HE Junyan, LAI Haiguang, ZHAO Xinjie, et al. Overview of reconfigurable intelligent surface for low earth orbit satellite communication[J]. Journal of Terahertz Science and Electronic Information Technology, 2024, 22(3): 240–248.) DOI:10.11805/TKYDA2023419.
- [7] 张欣怡, 江沸波, 彭于波, 等. H-ResGAN 在智能反射面辅助通信系统中的信道估计[J]. 电波科学学报, 2023, 38(6): 1048–1056. (ZHANG Xinyi, JIANG Feibo, PENG Yubo, et al. Hybrid loss based residual generative adversarial network for channel estimation in intelligent reflecting surface assisted communication systems[J]. Chinese Journal of Radio Science, 2023, 38(6): 1048–1056.) DOI:10.12265/j.cjors.2022253.
- [8] 单馨漪, 何丹萍, 费丹, 等. 智能反射面辅助的 5G 高铁车站覆盖增强技术研究[J]. 电波科学学报, 2023, 38(1): 63–70. (SHAN Xinyi, HE Danping, FEI Dan, et al. Intelligent reflecting surface-assisted 5G high-speed railway station coverage enhancement technology[J]. Chinese Journal of Radio Science, 2023, 38(1): 63–70. DOI:10.12265/j.cjors.2022153.
- [9] 鲁金梁, 王序峰, 王东杰, 等. 基于石墨烯太赫兹超表面的特殊波束动态调控[J]. 太赫兹科学与电子信息学报, 2024, 22(4): 365–372. (LU Jinliang, WANG Xufeng, WANG Dongjie, et al. Graphene terahertz metasurfaces for dynamic manipulation of special beams[J]. Journal of Terahertz Science and Electronic Information Technology, 2024, 22(4): 365–372.) DOI: 10.11805/TKYDA2023399.
- [10] 申瑜, 欧盼, 陈付坤, 等. 智能超表面辅助的 5G 高铁场景信道特性[J]. 北京交通大学学报, 2023, 47(2): 23–35. (SHEN Yu, OU Pan, CHEN Fukun, et al. Reconfigurable intelligent surface-assisted channel characteristics in 5G high-speed railway scenario[J]. Journal of Beijing Jiaotong University, 2023, 47(2): 23–35.) DOI:10.11860/j.issn.1673–0291.20220098.

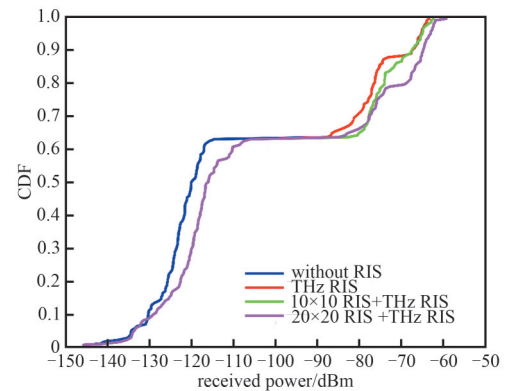


Fig.10 CDF of received power before and after RIS deployment
图 10 RIS 部署前后接收功率的 CDF

- [11] JENSEN G, JUNG B K, LUO Q, et al. Enhancing wireless communications at 300 GHz using RIS in an industrial scenario[C]// 2025 the 19th European Conference on Antennas and Propagation(EuCAP). Stockholm, Sweden: IEEE, 2025:1–5. DOI:10.23919/EuCAP63536.2025.10999650.
- [12] DUAN Hongyu, WANG Mengyang, DUO Hao, et al. Channel measurement and analysis of human body radar cross section in 26 GHz ISAC systems[J]. ZTE Communications, 2025,23(2):3–10. DOI:10.12142/ZTECOM.202502002.
- [13] GUO Lantu, GUAN Ke, LIU Ting, et al. Obtaining electromagnetic properties of multi-type media in realistic environments: state-of-the-art and prospects[J]. China Communications, 2025,22(1):25–40. DOI:10.23919/JCC.fa.2024-0056.202501.
- [14] HE Danping, GUAN Ke, YAN Dong, et al. Physics and AI-based digital twin of multi-spectrum propagation characteristics for communication and sensing in 6G and beyond[J]. IEEE Journal on Selected Areas in Communications, 2023,41(11):3461–3473. DOI:10.1109/JSAC.2023.3310108.
- [15] 曾成胜. 基于高性能射线跟踪的高铁车站场景 5G-R 网络优化技术[J]. 北京交通大学学报, 2023,47(2):13–22. (ZENG Chengsheng. 5G-R network optimization technology for high-speed railway station scenes based on high-performance ray tracing[J]. Journal of Beijing Jiaotong University, 2023,47(2):13–22.) DOI:10.11860/j.issn.1673-0291.20220110.
- [16] JIANG Suying, WANG Wei, MIAO Yang, et al. A survey of dense multipath and its impact on wireless systems[J]. IEEE Open Journal of Antennas and Propagation, 2022(3):435–460. DOI:10.1109/OJAP.2022.3168400.
- [17] HE Danping, AI Bo, GUAN Ke, et al. The design and applications of high-performance ray-tracing simulation platform for 5G and beyond wireless communications: a tutorial[J]. IEEE Communications Surveys & Tutorials, 2019,21(1):10–27. DOI:10.1109/COMST.2018.2865724.
- [18] AN Hao, GUAN Ke, WANG Xinhui, et al. Vehicle-to-vehicle channel measurements and power domain modeling in mountainous plateau environments for emergency communications[J]. IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems, 2024,25(12):21060–21073. DOI:10.1109/TITS.2024.3465014.
- [19] ANDREW S G. An introduction to ray tracing[M]. New York: Academic Press Ltd., 1989.
- [20] DEGLI-ESPOSTI V, FUSCHINI F, VITUCCI E M, et al. Measurement and modelling of scattering from buildings[J]. IEEE Transactions on Antennas and Propagation, 2007,55(1):143–153. DOI:10.1109/TAP.2006.888422.
- [21] HE D P, LIANG G X, PORTILLA J, et al. A novel method for radio propagation simulation based on automatic 3D environment reconstruction[C]// 2012 the 6th European Conference on Antennas and Propagation(EUCAP). Prague, Czech Republic: IEEE, 2012:1445–1449. DOI:10.1109/EuCAP.2012.6206457.
- [22] KELLER J B. Geometrical theory of diffraction[J]. Journal of the Optical Society of America, 1962,52(2):116–130.
- [23] CHEN Ben, ZHONG Zhangdui, GUAN Ke, et al. Terahertz signal coverage enhancement in hall scenarios based on single-hop and dual-hop reconfigurable intelligent surfaces[J/OL]. arXiv:2512.14394. DOI:10.48550/arXiv.2512.14394.
- [24] 徐少毅, 吕剑书. 物联网中基于重传的无人机覆盖效率最大化[J]. 北京交通大学学报. 2023,47(2):58–66. (XU Shaoyi, LYU Jianshu. Maximizing UAV coverage efficiency based on retransmission in the Internet of Things[J]. Journal of Beijing Jiaotong University, 2023,47(2):58–66.) DOI:10.11860/j.issn.1673-0291.20220133.
- [25] 吉用华, 张晨, 张更新. 面向高吞吐量的 NB-IoT 低轨卫星物联网资源调度[J]. 太赫兹科学与电子信息学报, 2024,22(9):933–943. (JI Yonghua, ZHANG Chen, ZHANG Gengxin. NB-IoT low-orbit satellite IoT resource scheduling for high throughput[J]. Journal of Terahertz Science and Electronic Information Technology, 2024,22(9):933–943.) DOI:10.11805/TKYDA2024112.

作者简介:

杨 晨(1982–), 男, 高级工程师, 主要研究方向为物联网技术 .email:13810195562@bjsubway.com.

黄子博(2001–), 男, 在读硕士研究生, 主要研究方向为宽带移动通信与专用移动通信.

弓子悦(2000–), 男, 硕士, 工程师, 主要研究方向为宽带移动通信与专用移动通信.

官 科(1983–), 男, 教授, 主要研究方向为电磁环境数字孪生.