

6G 新高频无线接入技术的创新与试验

Innovation and Testing of 6G High Frequency Wireless Access Technology

彭琳¹, 罗钧¹, 方敏¹, 田珅¹, 张忠皓², 李福昌², 唐雪¹ (1. 中兴通讯股份有限公司, 北京 100191; 2. 中国联通研究院, 北京 100048)

Peng Lin¹, Luo Jun¹, Fang Min¹, Tian Kun¹, Zhang Zhonghao², Li Fuchang², Tang Xue¹ (1. ZTE Corporation, Beijing 100191, China; 2. China Unicom Research Institute, Beijing 100048, China)

摘要:

阐述了太赫兹技术成为 6G 无线接入关键技术所面临的挑战, 详细介绍了解决传统太赫兹技术低谱效、高阻塞、非视距(NLOS)等瓶颈问题的技术方案, 包括高谱效大带宽实时通信系统、近场自愈抗阻塞、超表面非视距覆盖等技术试验的初步结果, 以推进太赫兹技术向 6G 新高频无线接入技术的发展进程。

关键词:

6G 新高频; 近场移动接入; 自愈; 超表面
doi: 10.12045/j.issn.1007-3043.2025.01.004
文章编号: 1007-3043(2025)01-0021-06
中图分类号: TN929.5
文献标识码: A
开放科学(资源服务)标识码(OSID):



Abstract:

It elaborates the challenges faced by terahertz technology as a key technology for 6G wireless access, and provides a detailed overview of solutions to overcome the traditional bottlenecks of THz technology, such as low spectral efficiency, high blockage susceptibility, and non-line-of-sight (NLOS) limitations. These solutions include a high-spectral-efficiency, wideband real-time communication system, near-field self-healing anti-blockage mechanisms, and RIS-enabled NLOS coverage. Preliminary results from experimental trials, aiming to advance THz technology toward its integration into 6G high-frequency wireless access systems.

Keywords:

6G high-frequency; Near-field mobile access; Self-healing; RIS

引用格式: 彭琳, 罗钧, 方敏, 等. 6G 新高频无线接入技术的创新与试验[J]. 邮电设计技术, 2025(1): 21-26.

0 前言

6G 网络将支持沉浸式通信、超大规模连接、极高可靠低时延、人工智能(AI)与通信的融合、感知与通信的融合、泛在连接等六大应用场景, 以及峰值速率、用户体验速率、频谱效率、区域流量容量、连接数密度、移动性、时延、可靠性、覆盖能力、定位精度、感知相关能力、AI 相关能力、安全隐私弹性性能、可持续性、互操作性等十五大基本能力^[1]。随着 AI 时代的到来, 6G 网络将提供“大带宽+大连接+大智能”的通感智

算服务, 如全息与 XR 沉浸交互、智能体 3D 通感自治交互、大规模数字孪生服务、AIGC 全天候高密度交互服务。为满足上述 6G 通感智算及 5G eMBB 长期演进服务需求, 6G 无线接入需向更大带宽的新中频(6~24 GHz)与新高频(100 GHz 以上)扩展, 以提供 100 Gbit/s 以上的小区容量和 0.5~1 Gbit/s 用户体验数据率。

1 6G 高频接入技术的挑战

尽管 6G 新高频太赫兹提供了较大的带宽, 并有能力支持每秒数十 Gbit/s 的链路, 但大气吸收引起的高路径损耗仍然是其应用在通信领域的一个主要挑战。太赫兹频率下的大气吸收有利于安全通信, 但同时也

收稿日期: 2024-12-09

限制了有效传输范围。

目前大多数太赫兹(THz)通信的验证主要是理论上的或只包含有限技术模块的实验验证,用于THz通信的高效实时通信系统实验平台并不多见,主要存在如表1所示的技术挑战^[2-4]。

表1 太赫兹技术挑战

类别	面临的挑战
信道建模挑战	• 全新参数化模型: 现有标准缺乏大于 100 GHz 的信道模型, 传播特性具有差异性 • 构建高精度的信道模型: 大带宽和大阵列带来的多径分量更加稀疏, 时延和角度分辨率更精细 • 感知信道建模: 和通信传播模型差异比较大
射频挑战	• 片上集成收发信机: 高功率, 高效能 • 器件: CMOS 到 III-V 族类半导体, HEMT, 低 NF Rx, 高精度大带宽 AD/DA • 天线: 相控阵列, 等离子表面, 新材料/石墨烯/碳基
基带挑战	• 超宽带数字信号处理的高复杂度: 波形设计, 新信号处理架构及算法 • 射频失真补偿算法: 改善宽带射频器件的损伤特性, 例如相位噪声、相位不平衡、带内平坦度 • 极窄波束跟踪和管理算法 • 高精度高效通信感知算法
系统挑战	• 电子学与光子学或者混合, 固定到移动, 连续口径面到相控阵 • 封装和集成: 金属封装、MCM、SiP、异质/异构集成 • 通信与感知架构融合 • 系统性能、复杂度与成本、功耗的协调平衡优化 • 覆盖组网问题: NLOS 覆盖能力、移动场景支持能力

太赫兹频段长期面临缺乏高功率放大器、高速调制解调器以及高灵敏度检测器等问题,客观上阻碍了人们对THz频段在实际应用方面的探索。近些年来,材料和器件技术的进步使太赫兹组件(如高功率放大器、低噪声放大器、倍频器和混频器等的实现)成为可能。电子学、光子学、材料学方面的最新技术进展正在缩小“THz Gap”。

随着带宽需求的扩大,对模数转换器/数模转换器(ADC/DAC)提出了更高转换速率要求,宽带射频失真更加显著,超宽带数字信号处理复杂度升高。基于高效实时通信的需求,探索新的波形设计、信号处理架构、射频失真补偿算法,既非常必要,又充满挑战。

此外,随着频率的提高,为了补偿高路径损耗,天线增益要更高,波束宽度要更窄,使得天线指向、捕获和跟踪更具挑战性。在太赫兹频段等超高频率下,天线所需的面积变得非常小,使得能够实施拥有数百或数千根天线规模的MIMO方案,形成和跟踪极窄太赫兹波束。然而,在大规模MIMO阵列中动态控制多个波束的新型系统架构和算法仍需持续研究突破。

即使有正确的控制机制,在太赫兹频率下波束阻

塞仍是一个重要挑战(见图1),需新的解决方案来避免波束阻塞,并扩展传输范围。

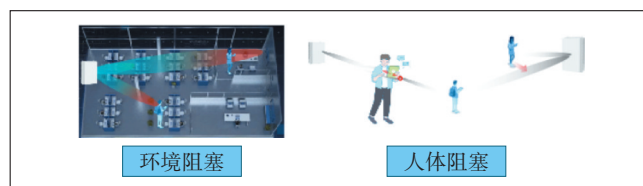


图1 高频阻塞场景

对于太赫兹波束的阻塞,可以分远场和近场2个部分来考虑。对于远场区,太赫兹波束以近似平面波形态存在,能够调整的维度只有角度,对抗阻塞的方式可以考虑使用太赫兹 RIS 改变入射波的方向,将NLOS径转化为LOS径;对于近场区,6G迎来了一个新的契机,即新高频超大规模阵列使得近场区域扩展覆盖到常规场景,使用基站原生具有自愈合特性的近场波束有望成为对抗高频波束阻塞的一种新可能。

2 太赫兹高效实时通信技术实验室测试验证

如图2所示,太赫兹实时通信系统由一个发射样机和一个接收样机组成,样机主要由基带单元、射频单元、天馈单元3个部分组成,各部分主要完成的功能如下。

a) 基带单元主要完成系统控制、业务交换、基带调制解调等功能。

b) 射频单元分为发送链路和接收链路,接收链路主要完成天线口接收到的射频信号向I/Q信号的转换;发射链路主要完成I/Q信号向射频信号的转换,并对射频信号进行功率放大,将射频信号发送到天线口。

c) 天馈单元将射频信号转换为电磁波发射出去或将接收到的电磁波转换为射频信号。其中正交模转换器(OMT)用于将垂直极化和水平极化的信号分别引导到不同的信号路径中,在射频链路中起到极化分离和组合的功能,确保信号的有效传输和接收。

项目组在某地基于140 GHz频段单极化单输入单输出(SISO)系统进行了室外310 m现场测试,基于2×2极化MIMO系统进行了室外1.3 km现场测试和室内20 m现场测试。

在以上太赫兹实时通信测试平台上验证了太赫兹软硬件水平和对系统关键性能指标的支持能力:支持多种调制方式,最高调制方式可支持至256QAM, SISO的频谱效率可达7.07 bit/Hz;配合50 dBi的高增

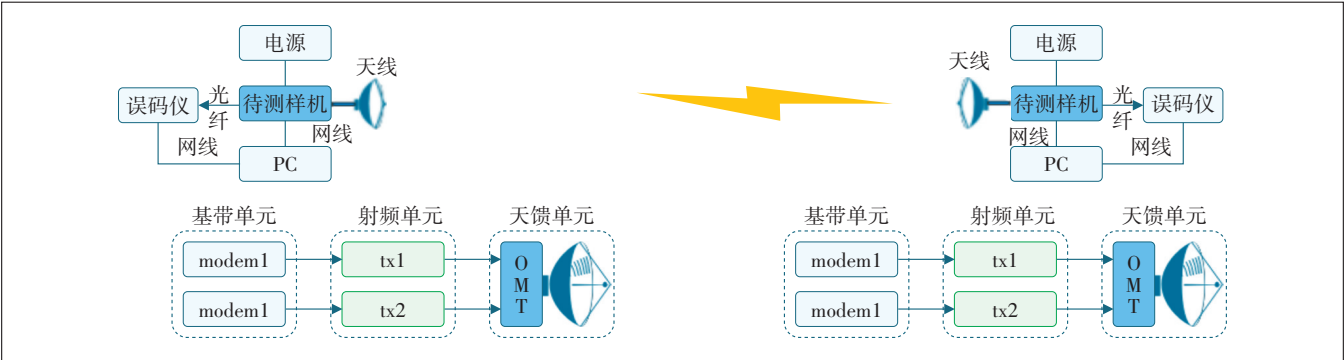


图2 太赫兹实时通信测试平台系统架构

益卡塞格林天线,测试样机室外点对点传输距离超过 1 km;总带宽为 8 GHz 的 4 载波双极化 MIMO 测试样机的实时峰值速率可达 79.9 Gbit/s。

太赫兹通信中需要应对高路径损耗、功率放大器(PA)效率低和相位噪声高的挑战。具体来说,需要通过降低峰均功率比(PAPR)、减少带外泄漏和改善相位噪声估计与补偿来提高 THz 通信的性能,因此需要优化设计新的波形。在太赫兹实时通信测试平台上,也初步开展了新波形性能的研究^[5-6](见图 3)。

从测试结果来看,相近配置条件下新波形 eDFT-s-OFDM 波形相比 5G 中使用的 CP-OFDM、DFT-s-

OFDM 峰均比更低。

基于太赫兹实时通信测试平台的实测结果表明,当前充分利用太赫兹频段丰富的频谱资源实现 6G 百 Gbit/s 甚至 Tbit/s 需求是可行的。今后的研究工作将继续针对太赫兹无线接入关键挑战,将基于太赫兹实时通信测试平台由点对点场景扩展到支持点对多点、移动场景等。

3 太赫兹自愈合技术仿真与实验室测试

6G 通信系统的高频接入技术(如毫米波、太赫兹波段)面临信号易衰减、遮挡敏感和路径动态变化等

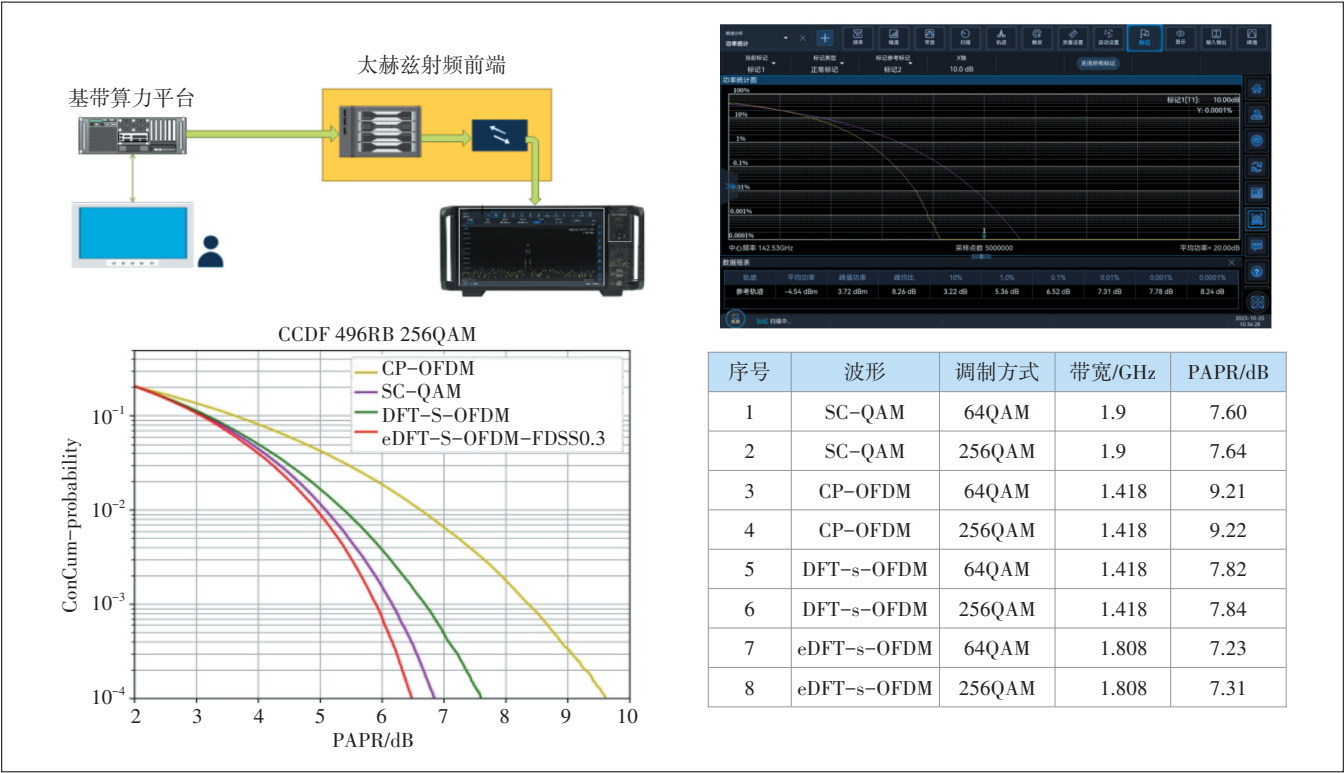


图3 太赫兹新波形测试

挑战。而无衍射波束的自愈合和自加速特性为解决这些问题提供了新颖的方法。高频信号传播损耗大, 覆盖范围有限, 容易受环境阻碍的影响。在传播过程中对障碍物敏感, 任何阻挡(如建筑物、人体、绿植甚至雨雪)都会引起严重的路径丢失或衰减。

传统高频通信依赖于窄波束传输的高频接入, 传统波束需要精确对准, 且易失链。而本文提出的自愈合自加速技术主要利用了无衍射波束(如贝塞尔波束^[7]、艾里波束^[8])的自愈合和自加速特性, 能够显著缓解上述问题。在传播过程中, 自愈合波束即使遇到障碍(如遮挡或散射), 依然能够恢复其原有形态, 能够很好地适应动态环境, 避免因遮挡导致的链路断开, 提高通信可靠性, 在复杂电磁环境中保持高质量的信号传输。而自加速波束能够实现传播路径的灵活规划, 使得无衍射波束能够沿曲线轨迹传播, 无需外部介入即可动态避开障碍物。有利于实现动态路径调整, 解决高频信号直线传播限制, 支持复杂环境中的灵活部署。在 NLOS 通信场景下, 通过弯曲传播路径绕过障碍物, 实现可靠连接。同时, 自愈合自加速技术由于其在传播中具有极小的扩散效应的特点, 主瓣能量集中且远距离传播稳定, 能够拓展覆盖范围, 降低多径干扰。

对于自愈合技术的仿真设计, 采用商业全波仿真软件 ANSYS HFSS (High Frequency Structure Simulator) 建模仿真了 140 GHz 太赫兹阵列, 在相同阵列口径下, 分别生成了自愈合波束以及远场聚焦波束。在太赫兹阵列传播方向上放置一个障碍物, 其电场分布如图

4 所示, 相对于传统的远场聚焦波束, 自愈合波束在遇到障碍物后有明显的增益收益, 并能够恢复其原有波束形状。

为了验证自愈合波束技术的有效性, 本文设计并制造了一套自愈合波束生成器, 并搭建了完整的测试平台。测试环境包括太赫兹发射机、自愈合波束生成器、障碍物、太赫兹接收机、XR 头显以及 XR 服务器等(见图 5)。在实验过程中, 太赫兹收发信机的载波频率设定为 140.5 GHz, 带宽设定为 2 GHz, 借助金属板模拟典型的环境阻塞条件, 评估自愈合波束的性能。实验结果表明, 在上述试验条件下, XR 业务可实现 40 Mbit/s 的传输速率和约 50 ms 的端到端时延。

在试验环境中, XR 设备的正常工作状态可通过信号接收电平来衡量, 当 XR 设备在信号接收电平低于特定门限时无法正常工作, 传输的业务画面会出现卡顿甚至停止。为了研究自愈合波束的特性, 实验在视距传输范围内设置了一块金属板作为障碍物, 用以模拟信号传播中的遮挡效应。实验发现, 障碍物显著影响了传统波束传输的太赫兹 XR 业务流, 导致 XR 画面传输中断。然而, 当系统切换至自愈合波束模式后, XR 业务流得以迅速恢复。实验数据显示, 自愈合波束技术在信号受到阻挡的近场通信场景中表现出卓越的自愈合能力, 与传统波束相比具有显著的增益, 能够有效改善因遮挡导致的信号中断问题, 在受阻塞的近场通信场景中, 增益提升幅度可达 10 dB 以上。

此外, 由于仿真环境的局限性, 在远距离传播条件下难以获得完整的电场分布。然而, 通过进一步的

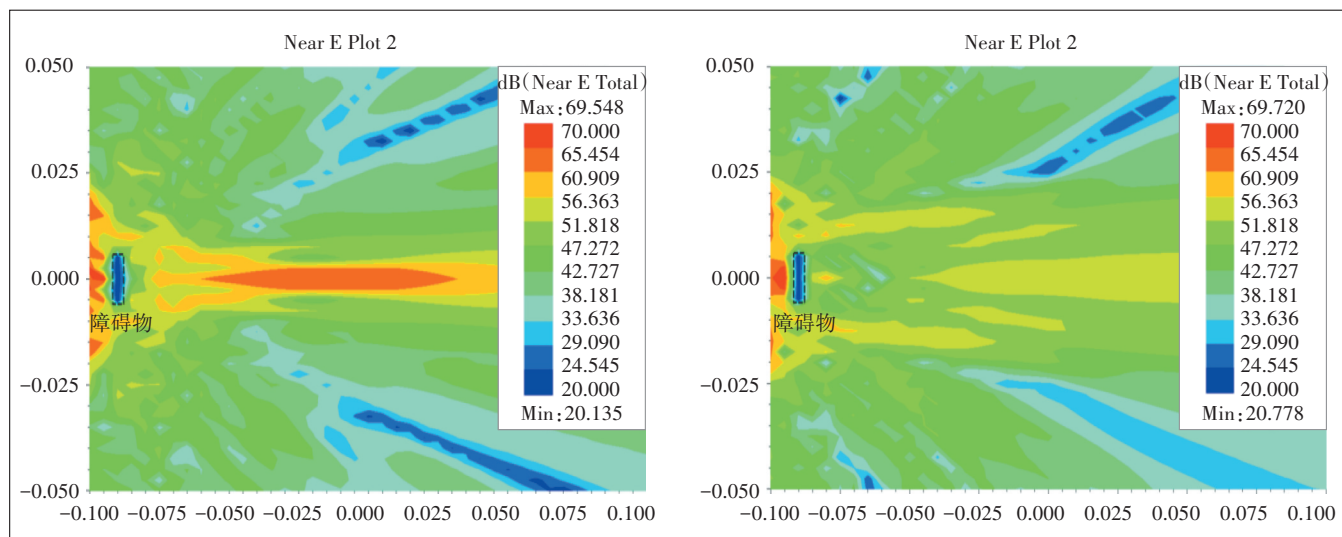


图4 自愈合波束与远场聚焦波束近场场强分布

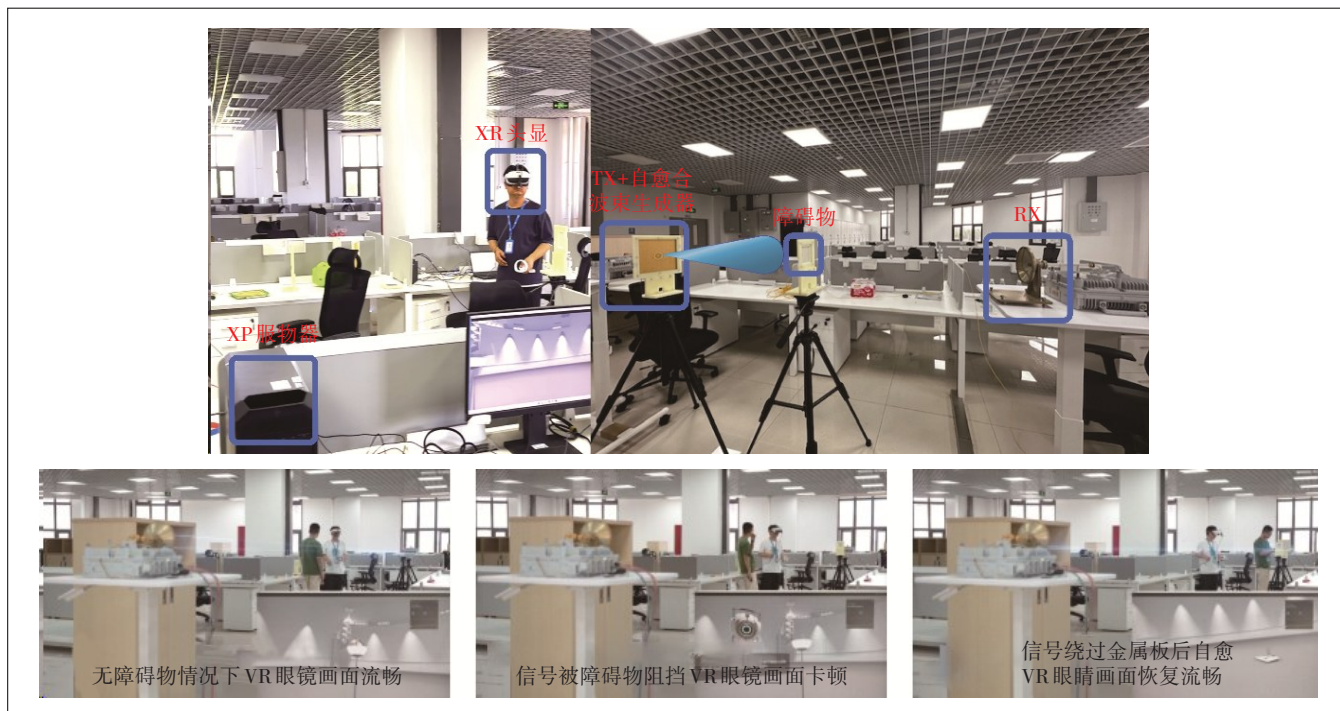


图5 自愈合技术测试场景

试验证实,自愈合波束技术在远距离传播时仍然表现出一定的自愈合特性,能够有效缓解高频信号受阻后的质量下降问题。上述结果表明,自愈合波束技术不仅能够改善信号传输的可靠性,还在应对高频信号衰减和遮挡问题上展现出巨大的潜力。

自愈合波束技术的成功为6G通信系统的高频接入提供了强有力的技术支撑,在解决信号衰减、遮挡敏感性和路径动态调整方面具有广阔应用前景。未来,结合AI和RIS,自愈合波束技术有望在6G低空经济、无线电能传输、太赫兹通信感知、精准探测与成像等多个领域实现规模化应用。这项技术的持续发展将推动6G通信系统在复杂电磁环境下实现高效、稳定且灵活的信号传输,推动6G技术迈向新的高度。

4 基于太赫兹超表面的覆盖扩展技术与测试

由于极高的频率,太赫兹信号通常衰减严重,衍射能力较差,这限制了它的传输距离和在移动通信中的应用。尽管MIMO技术可以用于设计高增益定向波束成形以提高信号强度,但太赫兹信号仍然容易受到障碍物的阻塞^[9-10],障碍物的存在会严重降低波束成形增益。因此,对于太赫兹通信来说,发射器和接收器之间拥有视距链路是至关重要的。在近场区,第3章验证了近场自愈合波束的抗阻塞效果,而在远场太

赫兹波束以近似平面波形态存在,能够调整的维度只有角度,对抗阻塞情况的方式可以通过使用太赫兹RIS技术智能反射接收到的信号来创建额外的视距链路,将NLOS径转化为LOS径,进而增强太赫兹信号强度并扩展太赫兹通信的覆盖范围。

如图6所示,在室内测试太赫兹遇到障碍物的表现时,太赫兹发射机(TX)受到室内立柱A和立柱B的遮挡,在接收点RX1和RX2造成覆盖盲区,接收机无法收到信号。本次测试设计了太赫兹超表面,将入射波束反射成2个不同角度的双波束,分别覆盖接收点RX1和RX2方向,实测结果表明增加太赫兹超表面后将原有无法通信的NLOS盲区的信号覆盖改善至可以满足正常通信,实验结果支持太赫兹超表面未来成为遮挡阻塞NLOS场景覆盖扩展的有效解决方案。

5 结束语

基于太赫兹技术的6G新高频无线接入技术,从突破性创新到技术成熟,再到商用落地的窗口期大致还有5~7年,而需要产学研联合攻关的太赫兹技术,不仅包括本文重点验证的高谱效、高阻塞、非视距传输技术,同时也包括完备的近场与远场太赫兹通信信道模型;显著提升频谱与能量效率的空间复用技术;可持续发展的收发信机架构;可规模商用的低成本片上集

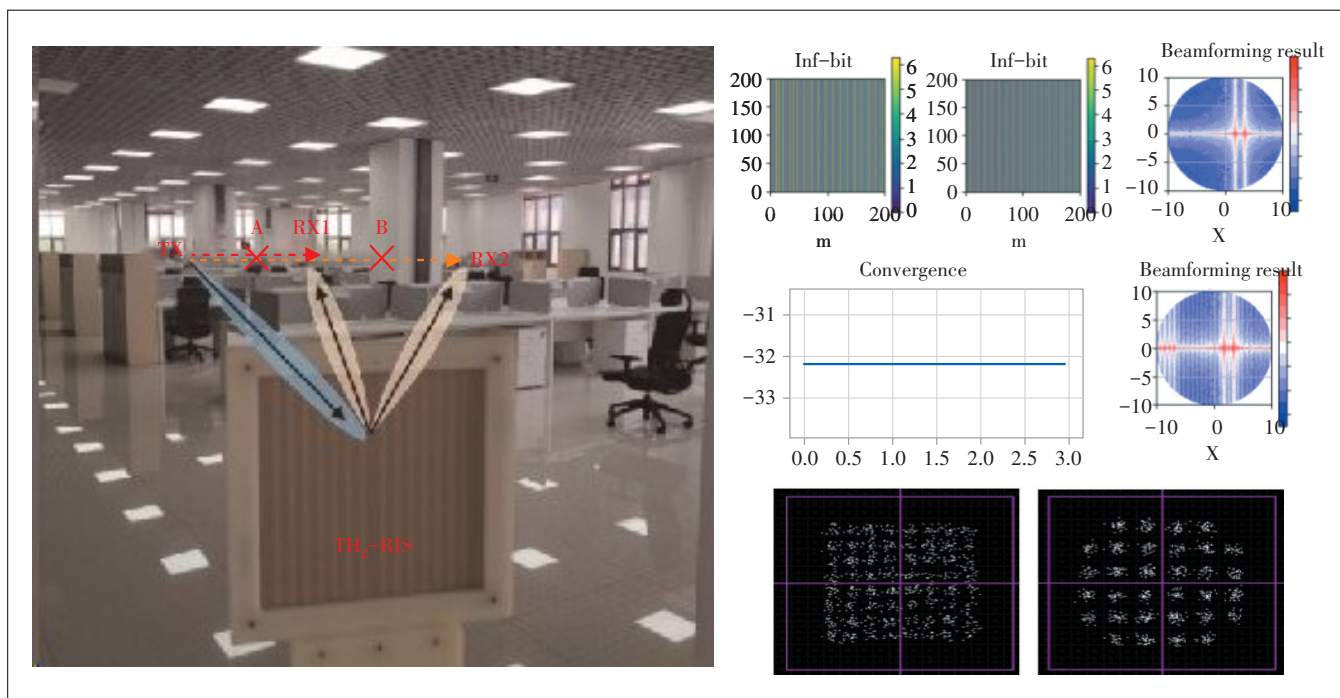


图6 基于太赫兹超表面的覆盖扩展测试

成收发信机与高增益大规模天线阵等。

因此,6G产学研合作创新对突破上述太赫兹基础技术至关重要,后续我们将继续开放创新、持续突破,加速太赫兹技术向6G新高频无线接入及6G新中频无线前传的发展步伐,并推动6G产业链与价值链的“双链”发展进程。

参考文献:

- [1] ITU. Framework and overall objectives of the future development of IMT for 2030 and beyond: ITU-R M.2160-0 [S/OL]. [2024-06-09]. https://www.itu.int/dms_pubrec/itu-r/rec/m/R-REC-M.2160-0-202311-1!!PDF-E.pdf.
- [2] SWAIN A, HIREMATH S M, BATCHU K, et al. Recent trends in terahertz communication; applications and open research problems [C]//2021 Advanced Communication Technologies and Signal Processing (ACTS). Rourkela: IEEE, 2021: 1-6.
- [3] AKYILDIZ I F, HAN C, HU Z F, et al. Terahertz band communication; an old problem revisited and research directions for the next decade [J]. IEEE Transactions on Communications, 2022, 70 (6): 4250-4285.
- [4] SHAFIE A, YANG N, HAN C, et al. Terahertz communications for 6G and beyond wireless networks: challenges, key advancements, and opportunities[J]. IEEE Network, 2023, 37(3): 162-169.
- [5] XIN Y, BAO T, HUA J, et al. A novel waveform scheme for THz communications [C]//2021 IEEE 94th Vehicular Technology Conference (VTC2021-Fall). Norman: IEEE, 2021: 1-6.
- [6] LIU L P, TONG B, XIN Y, et al. Research on reference signal scheme

for high-mobility scenarios in the Terahertz frequency band[J]. Telecommunications Science, 2024, 40(8): 34-41.

- [7] REDDY I V A K, BODET D, SINGH A, et al. Ultrabroadband terahertz-band communications with self-healing besel beams [J]. Communications Engineering, 2023, 2(1): 70.
- [8] HU Y, SIVILOGLOU G A, ZHANG P, et al. Self-accelerating airy beams: generation, control, and applications [M]//CHEN Z G, MORANDOTTI R. Nonlinear Photonics and Novel Optical Phenomena. New York: Springer, 2012: 1-46.
- [9] CHEN Z, NING B Y, HAN C, et al. Intelligent reflecting surface assisted terahertz communications toward 6G [J]. IEEE Wireless Communications, 2021, 28(6): 110-117.
- [10] HAO W M, ZHOU F H, ZENG M, et al. Ultra wideband THz IRS communications: applications, challenges, key techniques, and research opportunities[J]. IEEE Network, 2022, 36(6): 214-220.

作者简介:

彭琳,射频系统工程师,主要研究方向包括毫米波与太赫兹通信、无线应用的智能超表面技术、近场通信技术、电磁信息论、新型MIMO技术等5G-A和6G技术;罗钧,工程师,主要研究方向为智能超表面技术、近场通信技术、新型MIMO天线技术以及毫米波与太赫兹技术等;方敏,中兴通讯6G无线架构规划总工程师,博士,主要研究方向为下一代MIMO、可编程无线信道、E2E智能通信等;田坤,射频系统架构师,主要从事无线通信基站的架构设计和预研产品设计以及5G-A和6G技术的研发工作;张忠皓,教授级高级工程师,博士,主要从事无线通信网络研究等方面的工作;李福昌,教授级高级工程师,博士,主要从事无线通信网络研究等方面的工作;唐雪,中兴通讯副总裁,无线及算力产品经营部副总经理,主要从事移动通信相关的研发、规划及市场工作。