

面向6G的全息超表面通信技术

HOLOGRAPHIC METASURFACE
COMMUNICATION TECHNOLOGY FOR 6G



参与单位

中信科移动通信技术股份有限公司

北京大学 中国移动通信有限公司研究院 中国电信股份有限公司研究院

中国信息通信研究院 东南大学 华中科技大学 清华大学

北京三星通信技术研究有限公司 北京邮电大学 北京交通大学

武汉大学 鹏城实验室 香港城市大学 吉林大学

摘要

随着 5G 技术的规模化商用，全球通信产业正加速向第六代移动通信（6G）演进。6G 的重要突破方向之一是实现沉浸式全息移动通信，突破传统通信在空间维度与感官体验上的限制，支持超大规模用户的高精度三维数据实时交互。这一愿景对无线通信系统提出了超高传输速率、超低时延、超低功耗的严苛要求，迫切需要能够同时实现高方向性增益、精细波前调控与高效传输的新型天线技术。在这一技术背景之下，全息超表面技术通过将光学全息原理引入微波频段，采用亚波长密集排布的超材料辐射单元和串行馈电架构，突破了传统相控阵的半波长间距限制与并行馈电的结构瓶颈，在提升电磁调控能力的同时，大幅削减了硬件成本与功耗开销，有望成为支撑 6G 沉浸式全息移动通信的物理层重要使能技术。

本白皮书对全息超表面技术的总体发展动向进行了系统分析，分别从理论维度、技术维度、实现维度和应用维度展开论述。针对理论维度，白皮书从全息超表面的技术内涵入手，对全息超表面调控机理进行

了深入探讨，揭示了亚波长密集阵列带来的电磁信息论新特性。针对技术维度，白皮书对可重构全息超表面串行传输方案设计、等效孔径全息波束赋形、多波束全息图样线性叠加、宽带码本设计与波束训练以及互耦效应下的波束优化等关键技术进行了详细阐述。针对实现维度，白皮书介绍了基于可重构全息超表面的毫米波通信系统样机设计，并展示了相关实验验证结果，展示了该技术在实际系统中的性能表现。针对应用维度，白皮书对全息通感一体化、低轨卫星地面终端、无人机低空经济等支撑沉浸式全息移动通信的典型应用场景进行了前瞻性介绍与分析。

通过以上几方面的探讨与论述，本白皮书力图从全息超表面技术研究、标准化及产业推动的角度，对该技术在 6G 沉浸式全息移动通信系统中的发展潜力进行预判并对其技术演进方向进行展望。与此同时，我们期望偕同产业界和学术界以此为契机，着眼于更为广阔的未来，通过产学研用的深入合作，共同推进全息超表面技术与相关产业的进一步发展。

面向6G的全息超表面通信技术白皮书

本白皮书版权专属中信科移动通信技术股份有限公司（以下简称“中信科移动”）所有，并受法律保护。如需基于非商业目的引用、转载、传播或以其他方式合理使用本白皮书的全部或部分内容，应完整注明来源。违反前述声明者，中信科移动将追究其法律和商业道德之责任。

第一章：技术背景 01

1.1 移动通信系统发展趋势 02

1.2 传统 MIMO 技术发展瓶颈 03

1.3 全息超表面技术 04

第二章：全息超表面技术原理 08

2.1 全息超表面的基本原理与结构组成 09

2.2 全息图样构造与波束赋形实现机制 10

第三章：全息超表面通信技术创新与突破 11

3.1 全息波束赋形传输技术 12

3.1.1 现有研究进展与技术路线 13

3.1.2 全息波束赋形关键技术 15

3.2 全息超表面天线设计 22

3.2.1 全息超表面天线单元设计 22

3.2.2 全息超表面天线阵列设计 23

3.3 全息超表面天线系统样机 24

3.3.1 样机组成 24

3.3.2 系统测试 25

第四章：应用场景 28

4.1 基于大规模全息超表面的无线通信基站 29

4.2 全息通感一体化 29

4.3 基于大规模全息超表面天线的低轨卫星地面终端 30

4.4 全息超表面天线赋能的无人机低空经济 31

第五章：总结与展望 32

5.1 大规模应用面临的技术挑战 33

5.2 技术演进路线 33

5.3 未来展望 35

参考文献 36

01

技术背景

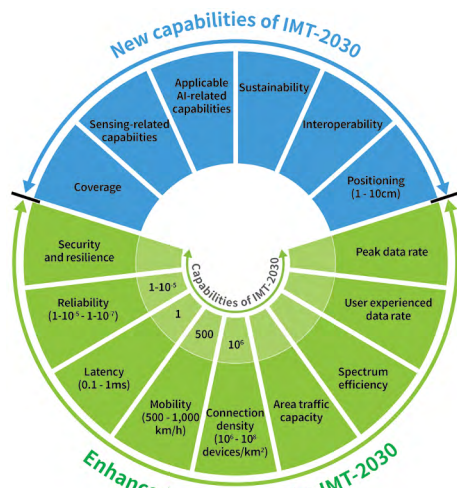
—

1.1 移动通信系统发展趋势

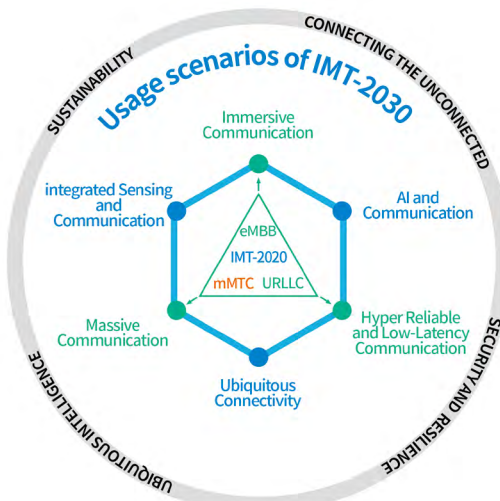
移动通信系统的代际演进以无线传输能力的持续提升为核心目标，天线技术升级与阵列规模扩展是支撑这一目标实现的重要基础。4G 阶段，多输入多输出（multiple-input multiple-output, MIMO）天线技术通过在收发两端引入多天线结构，充分利用空间分集与空间复用能力，有效提升了链路可靠性、系统容量和频谱利用效率；进入 5G 阶段，大规模多输入多输出（large-scale MIMO, L-MIMO）天线技术得到规模化应用，天线阵列规模进一步扩大，使无线系统能够在空间维度上形成更高增益、更强指向性的定向波束，从而显著增强多用户并发传输能力和频谱资源利用能力；面向 6G，超大规模多输入多输出（extremely large-scale MIMO, XL-MIMO）天线技术将进一步拓展阵列物理孔径和空间调控自由度，为更高容量、更高频谱效率、更精细的波束赋形以及通信感知一体化等新型能力提供关键支撑。在由 MIMO、L-MIMO 向 XL-MIMO 持续演进的过程中，多天线技术的发展主线已从单纯扩大阵列规模，逐步拓展为在更大空间自由度基础上的多维能力协同。超维度天线（extreme

multiple input multiple output, E-MIMO）正是在这一趋势下形成的重要技术概念，其核心内涵是在空间维度持续扩展的基础上，通过新型天线结构、人工智能工具、通信感知融合能力和高能效设计，进一步实现空间维度的持续扩展、智能维度的深度挖掘、功能维度的显著增强以及能效维度的充分优化。超维度天线为 6G 多天线技术从规模扩展走向多维能力协同提供了系统化框架，而天线规模的持续扩展则是支撑这一框架落地和无线系统能力边界拓展的重要基础^[1]。

随着 5G 技术的规模化商用，全球通信产业正加速向第六代移动通信（6G）演进。2023 年，国际电信联盟（ITU）正式发布了《IMT-2030（6G）框架及总体目标建议书》（ITU-R M.2160），明确提出 6G 将在峰值数据速率、频谱效率等方面实现进一步提升。其中，数据速率与频谱效率的提升依赖于大规模天线阵列提供的空间复用能力、方向性增益和精细化波束调控能力。上述性能指标共同构成了 6G 新型应用场景的技术基础，尤其为高精度、高吞吐、低时延的沉浸式通信提供了关键支撑。



a) 性能指标



b) 应用场景

图 1 - IMT-2030 的性能指标及应用场景

基于此，ITU 明确将“沉浸式通信 (immersive communication)”列为 6G 六大典型场景之一^[2-4]。中信科移动、中国移动等相继布局并发布全息沉浸式通信为核心的业务演示系统。这一愿景力求突破传统通信在空间维度与感官体验上的限制，通过全息远程呈现等业务，支持超大规模用户的高精度三维数据实时交互。这对无线传输技术提出了严苛的要求，其核心在于通过大规模天线阵列，一方面利用空间复用来提高定向传输的方向性增益，从而提升频谱效率，另一方面增强电磁波波前调控能力，支持信号在复杂环境中的实时传输^[5-6]。

在标准化演进层面，第三代合作伙伴计划 (3GPP) 正在推动移动通信系统从 5G-Advanced 向 6G 逐步过渡。继 Release 18/19 对天线演进的持续探索后，3GPP 已经在 Release 20 中全面启动 6G 无线接入网 (RAN) 的技术研究并将 Release 21 开展 6G 的标准制定^[7]。Release 18 作为 5G-Advanced 的首个版本，已围绕多天线增强开展了持续演进，重点涉及信道状态信息 (CSI) 反馈、多传输接收

点 (multi-TRP) 协同、上行多面板传输、参考信号设计以及面向波束管理、CSI 反馈和定位的 AI/ML 空口研究；Release 19 则进一步强化 MIMO、波束管理、CSI 预测、双工演进、网络节能以及 7-24GHz 高中频段信道建模等内容，为 6G 无线接入技术奠定基础。根据 3GPP 的规划，Release 20 主要承担 6G 场景、需求与关键无线技术的研究工作，Release 21 则将启动 6G 规范化制定，形成首批 3GPP 6G 技术规范。面向 6G，更高频段、更大带宽和更大规模阵列将推动天线系统由传统大规模 MIMO 向超大规模 MIMO (XL-MIMO) 及新型可重构电磁表面形态演进。XL-MIMO 通过扩展阵列口径和天线单元规模，能够在空间复用、波束增益和空间分辨率等方面进一步提升系统能力，已被确认为核心研究课题之一。与此同时，3GPP 在既有 FR2 毫米波频段基础上，正进一步探索中频段 (FR3, 7-24 GHz) 及毫米波频段 (24.25-52.6 GHz) 的海量带宽潜力，为 6G 在容量、覆盖、感知和智能波束调控等方面的性能提升提供标准化支撑。

1.2 传统 MIMO 技术发展瓶颈

传统 MIMO 技术主要依赖相控阵天线实现空间波束调控。相控阵通常采用半波长的天线单元间距，通过馈线网络向各天线单元馈电，并借助移相器、功率放大器等射频器件对不同单元的激励相位和幅度进行调节，从而在空间中形成具有特定指向性的波束。基于这一机制，相控阵能够通过波束赋形提升链路增益，实现无线通信系统的高性能稳定传输。其技术体系成熟、实现路径清晰，是当前无线系统的重要实现方案。

然而，面向 6G 的超大规模天线系统，传统基于相控阵的技术路线面临着硬件复杂度、功耗、成本和规模可扩展性等方面的内在约束。一方面，

相控阵通常需要为大量天线单元配置移相器和功率放大器，其硬件功耗与成本会随天线单元数量线性增长。当系统向更高频段演进时，阵列规模会受限于硬件成本与功耗，为实现 XL-MIMO 带来挑战；另一方面，馈电网络的复杂度随着天线单元数量的增加而增加，进一步限制了阵列规模扩展。对于 6G 所期望基于 XL-MIMO 的高能效传输、低成本部署和通信感知一体化等需求，仅依赖传统相控阵架构难以在性能提升与工程代价之间取得理想平衡。因此，亟需探索更低成本、更低功耗、更易扩展的新型电磁调控技术，为 XL-MIMO 的工程落地提供新的实现路径。

1.3 全息超表面技术

在众多潜在的核心技术中,全息超表面(reconfigurable holographic surface, RHS)技术凭借其独特优势,吸引了广泛关注。该技术通过集成全息超表面或紧密排布的连续孔径天线阵列,实现了对电磁波空间特性的精细波前调控^[8-9]。这与IMT-2030(6G)推进组所倡导的超大规模天线、全息无线电(holographic radio)及近场通信等发展方向高度契合^[10]。与传统相控阵不同,基于全息超表面的MIMO技术通过将光学全息原理应用于微波频段,电磁波在阵面上串行传播,仅通过加载低功耗动态元件来控制电磁响应,即可重构阵面全息干涉图样,从而在实现超高方向性增益和空间复用能力的同时,大幅削减了硬件成本与功耗开销^[11-12]。这种架构为进一步有效扩展多天线系统空间维度、近-远场精细波束调控以及复杂电磁环境下的全息波前重建提供了物理层支撑。本白皮书旨在集中探讨全息超表面的发展历程、核心技术、样机演示与应用场景,为加速全息移动通信技术的实用化进程提供深入见解与建议,树立我国在6G核心技术方面的领先优势。

传统大规模MIMO(massive MIMO)受限于半波长天线间距的准则,其空间自由度存在物理瓶颈。随着XL-MIMO向更高频段、更紧凑空间演进,全息超表面作为超大规模MIMO(XL-MIMO)领域的一种突破性实现形态应运而生。这一创新范式设想在紧凑空间内集成大量亚波长、低成本、可重构的天线单元,从而实现对电磁波响应的精细调控。此外,全息超表面可以使用简单的二极管动态元件来调制电磁波并重构辐射场分布,从而降低对高成本、高复杂度有源器件的依赖。得益于低功耗、低成本、高集成度和灵活可重构等特点,全息超表面被认为是实现超大规模MIMO系统的一种重要技术路径,并在未来高性能集成化无线系统中具有广阔的应用前景。

值得指出的是,全息超表面并不等同于常用于无线通信覆盖增强的反射超表面^[13](reconfigurable intelligent surface, RIS)。反射超表面由外部馈源和大量可调反射单元组成,通过反射馈源发射的信号并控制反射信号的相位响应产生定向波束。二者虽然都可实现波束调控,但在结构形态、响应机理和应用场景上存在明显差异:

结构形态

反射超表面的馈源通常布设于超表面外部,其单元主要由来自外部空间的入射波进行激励。而全息超表面的馈源可与超表面结构一体化设计,并通过集成馈电网络对超表面单元进行激励,因此整体集成度更高,硬件结构也更为紧凑。

响应机理

对于反射超表面,入射信号在空气中传播并通过并行馈电同步激励各超表面单元,各超表面单元通过调节反射波的电磁响应形成定向波束;全息超表面则采用串行馈电,信号通过馈源入射并沿着超表面传播,依次激励各超表面单元,各超表面单元通过调控辐射电磁波的能量实现波束成形。

应用场景

反射超表面由于其外部馈源和反射特性,一般不会直接紧凑的集成到收发机上,而是作为中继增强发射机信号,常用于改善遮挡、增强覆盖和提升链路质量等。全息超表面具有高度集成和低剖面结构,更适合与发射或接收机集成,作为紧凑型阵列天线用于移动平台、卫星通信、高容量接入以及感知成像等场景。

在全息表面天线中,“全息”二字来源于将光学全息原理应用于天线的创新性尝试,最早由 G. A. Deschamps 于 1967 年首次提出^[14]。21 世纪初, D. R. Smith 团队将超材料的动态可调特性与全息原理相结合,解决了全息波束的动态控制难题^[15]。2020 年以来,国内多个团队基于全息超表面的技术路线,

逐渐将全息技术从单一的硬件辐射机制演变成为一种无线通信范式,进而形成了全息超表面这一超大规模 MIMO 的一种实现路径。

具体而言,全息超表面通过全息干涉原理实现波束赋形,具有以下物理特性:

全息波前映射

全息超表面将所需的定向波束视为“目标像”,而由馈源注入超表面的导行波充当“参考光”^[16]。通过精确控制表面上每个亚波长辐射单元的幅相响应,能够在阵面上重构出特定的全息干涉图样,从而在空间中激发出预期的辐射场。

串行架构优势

全息超表面采用串行传播方式,可以支持混合波束赋形架构,即一个射频通道可以带动多个天线单元,其功放和射频通道数量与数字通道数量处于一个量级,突破了毫米波传统天线阵列结构中功放 / 射频链路的数量与天线阵元数量相当导致的复杂硬件限制^[17]。

精细近场调控

由于全息超表面能实现高密度的单元排布,它在近场区域具备较强的波束聚焦能力,这为 6G 场景下的高精度感知和全息通信提供了核心支撑^[18]。

全息超表面与传统相控阵技术对比如表 1 所示。综上所述,全息超表面不仅通过超材料技术解决 XL-MIMO 的功耗难题,更是通过全息干涉理论

重新定义了无线接口。它的上述特性引发了电磁调控机理的变革,本白皮书将在后续章节对其基础理论进行剖析。

	相控阵	全息超表面
单元间距	单元间距一般为半波长	单元间距远小于半波长（波长/4 或更小）
动态元件	移相器，集成放大器	采用二极管等低功耗动态元件
优点	天线单元独立设计，设计难度低	功耗较低，规模易扩大
缺点	随频段升高， 阵列规模受限于硬件成本和功耗	不同于传统天线独立设计，全息单元耦合效应强， 需阵列整体设计
结论	技术成熟、实现路径清晰， 是高性能无线系统的重要实现方案	在实现低功耗、低成本的大规模天线系统方面具有巨大 潜力，是面向未来超大规模集成天线的重要发展方向

表 1- 传统相控阵与全息超表面的对比

当前，全息超表面已成为产业界和学术界重点推进的潜在技术方向之一。在业界落地方面，2024 年 2 月，Pivotal Commware 推进基于全息波束成形的 5G 毫米波固定无线接入产品生态，其中 Pivot 5G 网络中继器利用全息波束成形技术形成可扫描、高增益窄波束，用于捕获并重定来自基站的毫米波信号，从而绕开建筑物等遮挡物，扩展 gNB 的有效覆盖范围，体现出全息波束成形技术在毫米波覆盖增强中的工程化价值；2024 年 3 月，Kymeta 开始交付 Osprey u8 HGL 多轨道移动卫星平板终端，实现 GEO/LEO/LTE 混合连接，显示出全息波束成形技术在卫星通信移动终端的应用前景；2025 年 3 月，中信科移动在 MWC 2025 首次展示“基于全息超表面的新型天线阵列（二代）”，面向传统毫米波有源阵列在成本、功耗、重量、体积和部署复杂度上的瓶颈，通过低成本、低功耗可控单元实现大规模波束控制和赋形，为该技术进一步实用化创造条件；2025 年 4 月，中信科移动、中国移动和北京大学联合发布“6G 全息超表面宽带移动通信系统样机”，将光学全息原理应用于微波领域，采用超薄平板低功耗天线阵列和动态电磁响应控制实现空间

波束重构，并形成面向 6G 毫米波多用户多流宽带移动通信的系统级样机，表明全息超表面正从器件级验证走向基站侧通信系统验证。

在学术研究方面，全息超表面已成为 6G 无线通信中实现低成本、低功耗超大规模阵列的重要前沿方向，其学术研究总体处于从概念建构迈向系统化验证的阶段。现有成果表明，全息超表面的核心价值在于利用可重构超材料单元构造超薄平板天线，以幅度可控的全息图样替代传统相控阵中大量高精度移相器，从而在毫米波、近场通信、通感一体化等场景下提升阵列规模、能效和工程可部署性。

在基础理论方面，Shlezinger 等人^[19]从动态超表面天线角度建立了上行大规模 MIMO 通信模型，说明超表面孔径可在物理天线结构中完成模拟合并和压缩处理，从而降低射频链路、功耗和硬件规模；在此基础上，Deng 等人^[20]系统提出面向未来无线通信的全息超表面框架，明确全息超表面不同于可重构反射超表面的被动反射机制，而是可直接集成于收发端的超薄全息天线，并通过全息波束赋形实现低成本多波束辐射；Chen 等人^[21]进一步提出波数域统一表征，明确说明传统角域模型在



统一刻画近场与远场信道的局限性，该波数域方法为全息超表面的近场与远场传播机制研究提供了一致的分析基础。

在算法设计方面，Deng 等人^[22]提出全息图样划分多址 (HDMA)，将多用户接入资源从传统时间、频率、码域扩展到全息图样域，通过不同用户全息图样的叠加与预编码抑制非正交干扰，为多用户通信提供了新的多址思路；An 等人^[23]分别系统总结了信道建模与估计、空间自由度分析与全息波束赋形；Yue 等人^[24]进一步揭示了混合近场 / 远场信道中的功率扩散效应，说明传统仅适用于纯近场或纯远场的方法会出现虚假路径问题，并据此提出新的估计算法；Zhu 等人^[25]面向全息超表面通感一体化系统，在满足用户通信速率约束的同时优化感知互信息，推动算法研究从单一通信速率最大化走向通信、感知和安全等多目标协同优化。

在实现路径方面，Wei 等人^[26]提出了一种面向毫米波应用的二维波束扫描漏波天线阵列，通过可重构漏波辐射单元在固定工作频率下实现二维

空间波束扫描，说明毫米波全息超表面的硬件实现可沿着低剖面、高增益、阵列级可控波束成形方向推进；Di 等人^[27]不仅论证了可重构全息超表面作为 ultra-massive MIMO 替代传统相控阵的可行性，并且实现了全息超表面阵列原型机，搭建了基于全息超表面的无线通信平台，利用 USRP 和变频模块完成链路验证，实测支持 1920×1080 的实时视频传输，接收端 SNR 高于 20 dB。将全息超表面的实现研究从理论层面推进到工程验证阶段。

本白皮书的贡献在于，在已有研究基础上，不仅关注全息超表面“能否工作”的理论与样机验证问题，更聚焦其“如何面向6G系统落地”的关键路径：围绕可重构全息超表面，系统讨论其在全息波束赋形传输技术的创新与突破，同时结合毫米波样机和典型应用场景，分析其在低功耗、低成本、轻量化和高集成部署方面的工程价值，从而为全息超表面由前沿研究走向标准化、产品化和产业化提供相对完整的技术参照。



全息超表面技术原理

—



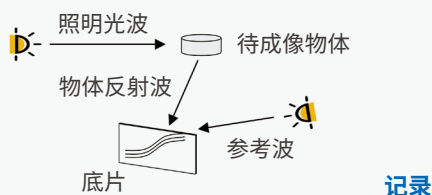
2.1 全息超表面的基本原理与结构组成

全息超表面的工作原理演进自光学全息技术。如图 2 所示，光学全息是一种能够记录并随后重建波前的技术。具体而言，全息图是通过将参考波（reference wave）与物波（object wave）叠加而生成的，由此产生的干涉图样被记录在物理介质（如感光底片）上^[28]。当仅用参考波照射该干涉图样时，波会发生衍射，从而重新呈现出原始的物波。

在微波频段，可重构全息超表面天线（RHS）

充当了记录全息图样的“数字化底片”。全息超表面天线的核心工作逻辑在于利用全息干涉原理，在物理尺度上实现对空间波束的精确调制。其核心逻辑在于：利用超表面单元的电控特性，在阵面上人工构造出特定的电磁干涉纹理，从而将能量导向预期的空间方向。不同于传统相控阵通过离散移相器控制相位，全息超表面通过对表面阻抗图样的动态重构，实现对电磁场分布的连续或准连续控制。

光学全息：以光波形式“记录和再现”物体全部信息，实现光学成像



微波全息：以微波形式“记录和再现”物体信息，即目标方向的波束

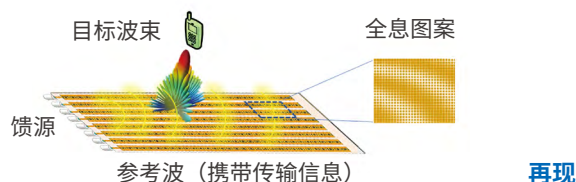
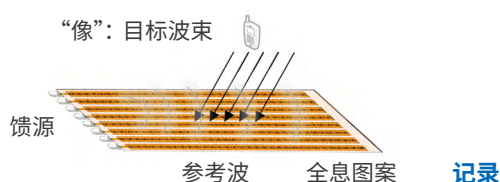


图 2 - 光学全息与微波全息原理

全息超表面主要由集成馈源、导波结构（如介质集成波导）以及亚波长超材料单元阵列组成。其馈源一般嵌于超表面的边缘或者背板上，它可以将输入的信号转化成电磁波，该电磁波也称作参考波。全息超表面采用的是串行馈电的方式，如图 3 所示，即从馈源发出的参考波沿着超表面自主传播，并且逐一激励全息超表面辐射单元。每个单元都可以

通过电调谐的方式在一定频率上谐振并向自由空间辐射出能量。此时，每一个单元如同一个微小的“水龙头”，通过电调控（如二极管、液晶）改变其谐振状态。当单元受激辐射时，部分导行波能量被提取并释放到自由空间。这种基于串行传播的受控辐射机制，本质上是一种可重构的漏波天线设计。

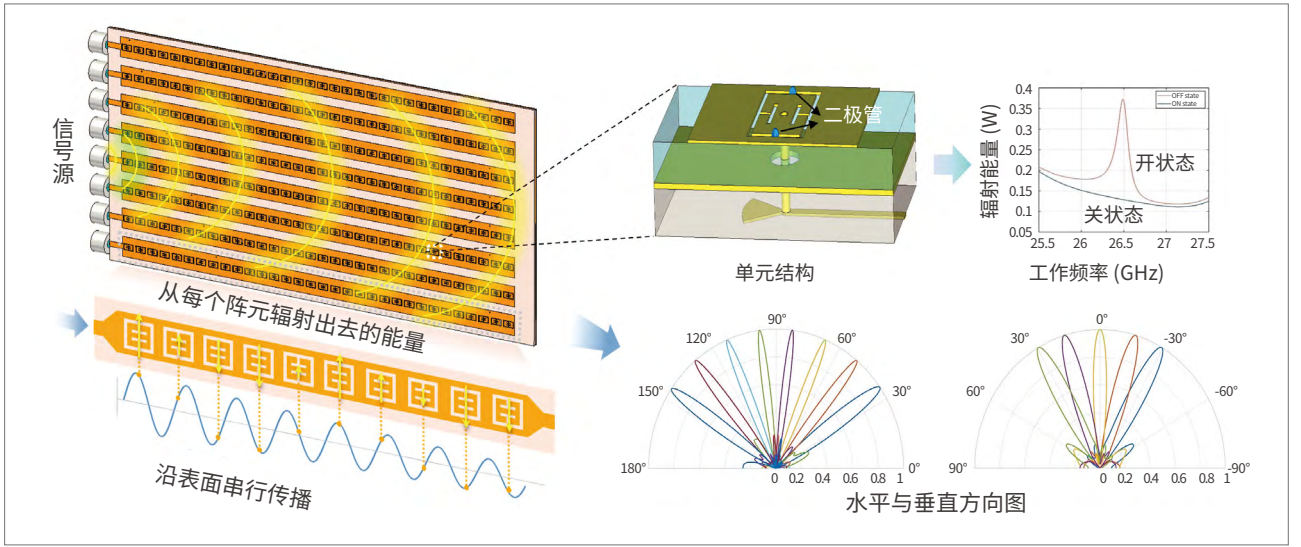


图 3 - 可重构全息超表面串行传播示意图与辐射方向图

2.2 全息图样构造与波束赋形实现机制

为了进一步阐明全息工作原理，考虑一个有 K 个馈源和 N 个辐射单元的全息超表面天线阵列，将在自由空间中沿 (θ, φ) 方向传播至接收机的目标

波束表示为 Ψ_{obj} ，将由馈源 k 产生的携带传输信号的参考波表示为 Ψ_{ref} ，则第 n 个 RHS 辐射单元处，目标波束 Ψ_{obj} 和参考波 Ψ_{ref} 可以分别表示为^[29]：

$$\Psi(\theta, \varphi, \mathbf{r}_n) = e^{-j\mathbf{k}_f(\theta, \varphi) \cdot \mathbf{r}_n}, \quad \Psi_{ref}(\theta, \varphi, \mathbf{r}_n^k) = e^{-j\mathbf{k}_s \cdot \mathbf{r}_n^k}.$$

其中， $\mathbf{k}_f(\theta, \varphi)$ 是自由空间中传播矢量， $\mathbf{r}_n$ 是第 n 个 RHS 辐射单元的位置向量， $\mathbf{k}_s$ 为参考波的传播矢量， $\mathbf{r}_n^k$ 是从馈源 k 指向第 n 个 RHS 辐射单元的距离向量。全息超表面实现全息波束成形的关键在于其可以在超表面上构造全息图样来记录目标波束与参考波之间的干涉 Ψ_{intf} 。具体来说，根据全息干涉原理，目标波束与参考波之间的干涉可以表示为 $\Psi_{intf} = \Psi_{obj} \Psi_{ref}^*$ 。因此，在可重构全息超表面所记录的全息图样被参考波激励时，产生的漏波，即 $\Psi_{intf} \Psi_{ref}$ 满足 $\Psi_{intf} \Psi_{ref} \propto \Psi_{obj} / |\Psi_{ref}|^2$ ，此时 $1/|\Psi_{ref}|^2$ 这一项抵消了参考波的相位偏置，辐射场在相位上将与目标波一致，表明其自由空间传播方向正是与目标波束方向相同的 (θ, φ) ，即在远场相干叠加形成定向波束。

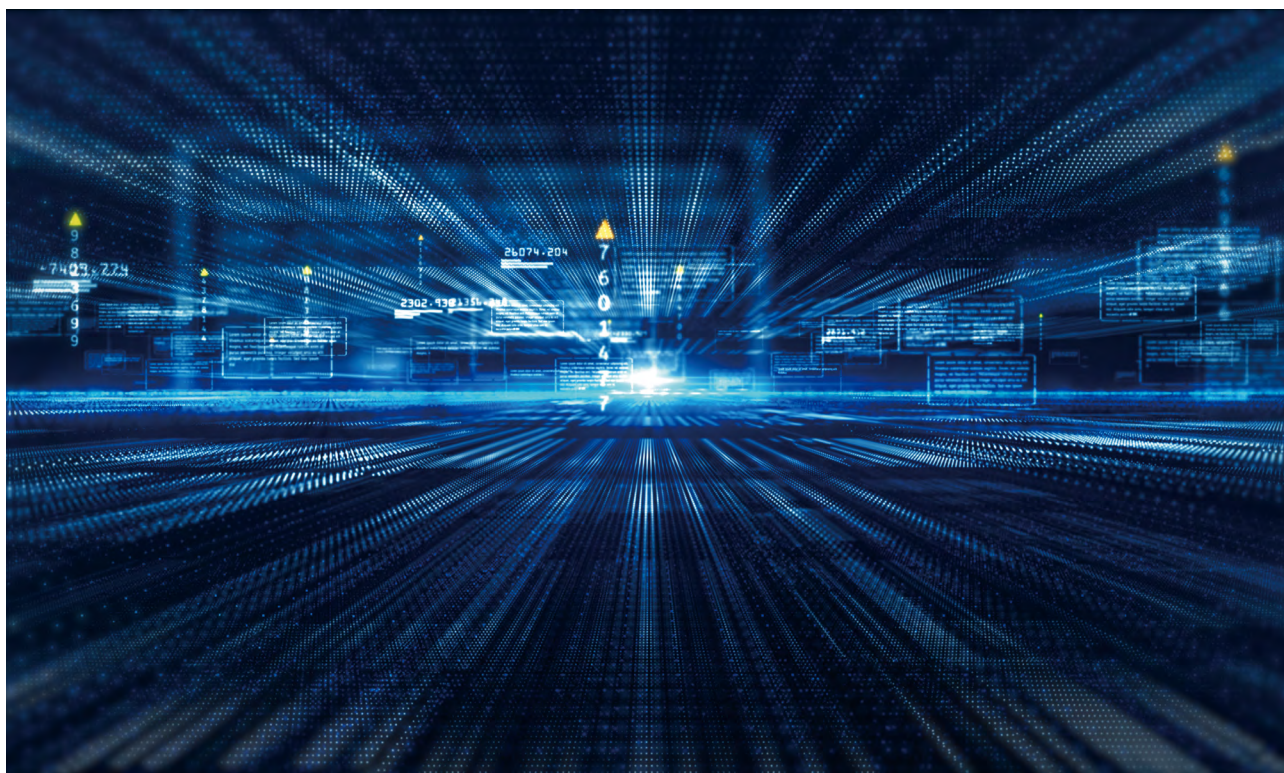
在工程实现中，其调控逻辑包含两方面：1) 相干增强（辐射态）：当参考波传播到某单元的瞬时相位与目标波束所需的相位高度匹配时，调控电路使该单元处于强谐振状态，向空间辐射大量能量；2) 相消抑制（非辐射态）：当两者相位失配时，调控

电路抑制该单元的辐射响应，防止其对目标方向产生破坏性干涉。这种基于全息干涉的调控方式，使得全息超表面无需昂贵的移相器，仅需通过简单的幅调（或阻抗调控）即可实现精细的波束赋形。



全息超表面通信技术创新与突破





本章围绕全息超表面通信技术从理论机制到工程验证的关键环节展开，重点研究全息波束赋形传输技术、全息超表面天线设计和全息超表面天线系统样机三项内容。其中，全息波束赋形传输技术决定了全息超表面如何实现面向多用户、多波束和高频段场景的空间信号调控，是通信性能提升的核心机制；全息超表面天线设计决定了可重构单元、

馈电结构和阵列形态如何支撑上述传输机制，是技术工程实现的硬件基础；全息超表面天线系统样机则用于验证算法、器件和阵列设计在真实通信链路中的综合性能，是推动该技术从理论研究走向系统应用的重要环节。因此，本章以这三项技术为主线，系统分析全息超表面通信技术的创新突破与应用潜力。

3.1 全息波束赋形传输技术

波束赋形传输技术是实现空间复用、提升频谱效率的核心手段。全息波束赋形作为一种新型的波束赋形范式，通过将光学全息原理应用于微波频段，实现了基于幅度 / 相位 / 频率控制的波束调控。与相控阵的并行馈电和相位控制不同，全息超表面天线

采用串行馈电结构，电磁波沿超表面传播并依次激励各辐射单元，通过调节各单元的幅度响应来重构全息干涉图样，从而生成定向波束。这种架构大幅简化了硬件设计，降低了功耗和成本，为超大规模天线的实用化提供了可行路径。

3.1.1 波束赋形技术难点分析与研究进展

➤ 3.1.1.1 传统波束赋形技术

传统 MIMO 系统的波束赋形主要分为数字波束赋形、模拟波束赋形和混合波束赋形三类。

数字波束赋形在基带对信号进行处理，每个天线单元配备独立的射频链路，可以实现完全灵活的波束控制。然而，随着天线数量增加，射频链路的数量和功耗急剧上升，硬件成本高昂。

模拟波束赋形通过模拟移相器网络实现波束控制，仅需少量射频链路，硬件成本低。但模拟波束

赋形只能生成单一波束，无法支持多流传输，频谱效率受限。

混合波束赋形结合了数字和模拟波束赋形的优点，采用少量射频链路和大量移相器，在降低硬件成本的同时支持多流传输。然而，混合波束赋形仍需要复杂的移相器网络和功率分配器，在大规模阵列场景下面临实现挑战。

➤ 3.1.1.2 全息波束赋形技术

可重构全息表面是实现全息波束赋形的核心器件。每个单元的幅度响应可通过二极管等低功耗器件独立调控，从而在全息面上重构干涉图样，生成

定向波束。与传统相控阵相比，可重构全息表面具有以下独特优势：

结构简化

由于全息超表面采用串行传播方式，可以支持混合波束赋形架构，即一个射频通道可以带动多个天线单元（如图 4a 所示），其功放和射频通道数量与数字通道数量处于一个量级，从而大幅简化发射机结构，突破了毫米波传统天线阵列结构中功放 / 射频链路的数量与天线阵元数量相当导致的复杂硬件限制（如图 4b 所示）。

能效优势

一方面，可重构全息超表面天线仅通过二极管进行动态调控，大幅降低电路功耗。另一方面，所采用的混合波束赋形传输架构所使用的功放可直接连接射频通道，无需与天线单元逐个相连，因此功放的功率附加效率也高于传统天线阵列的多通道波束赋形器中的功放，使基于全息超表面的毫米波通信系统“更绿色”。

复杂度低

基于全息原理，利用全息干涉图样的线性可叠加性，可以支持低复杂度的多用户波束赋形传输方案，克服大规模阵列配置实时调控复杂度高的问题。

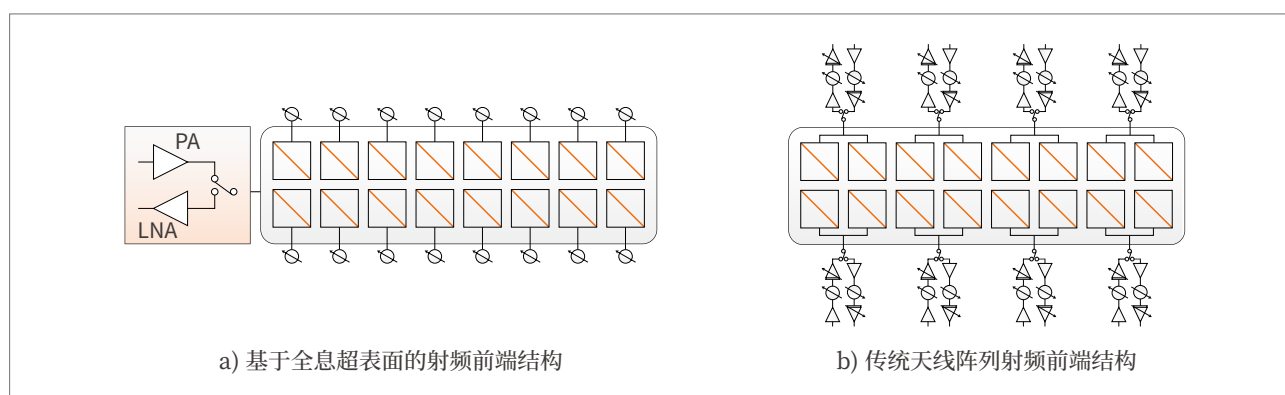


图 4 - 射频前端结构对比

根据硬件实现的不同，全息波束赋形可分为多种控制模式：

幅度控制模式^[9]:

每个单元的幅度响应可在 0 到 1 之间连续调节，提供最大的控制自由度。幅度控制模式可以实现精细的波束赋形，但硬件复杂度相对较高。进一步的，可以利用 PIN 二极管（positive-intrinsic-negative diode）实现二进制幅度控制，即每个单元的幅度响应仅为 0 或 1，实现更为简单。

洛伦兹相位控制模式^[30]:

部分现有全息超表面分析方法在理论建模上采用了单元响应受洛伦兹共振特性约束这一设定，即在复平面上呈现圆形轨迹。这种模式介于幅度控制和相位控制之间，可以在保持低复杂度的同时实现较好的波束赋形性能。

现有研究针对不同控制模式提出了相应的波束赋形优化算法。Deng 等人提出了基于交替优化的混合波束赋形方案，数字波束赋形采用迫零预编码，全息波束赋形通过优化单元幅度响应来最大化系统和速率^[31]。Hu 等人研究了有限分辨率幅度控制下的全息波束赋形，证明 2 比特量化的幅度控制即可接近连续幅度控制的性能^[32]。Zhang 等人提出了基于等效缩放的改进方案，通过松弛硬件约束来随着天线孔径的增大，近场区域显著扩展，基于全息超表面的近场波束聚焦技术因此受到关注。全息超表面的近场波束聚焦能力源于其亚波长密集排布的辐射单元。由于单元间距远小于半波长，全息超表面

可以精确调控波前的相位和幅度分布，在空间中形成聚焦点。相比相控阵，全息超表面在近场区域具有更高的波束聚焦增益和更窄的聚焦点尺寸。

现有研究提出了多种近场波束聚焦优化方法。Zhang 等人分析了全数字、混合和全息超表面 MIMO 发射机的近场通信性能，证明波束聚焦可以显著提升近场可达速率^[33]。Wei 等人研究了三极化全息 MIMO 系统，设计了基于近场信道模型的波束赋形方案，有效抑制了用户间干扰^[34]。Wu 等人探索了全息无线能量传输系统，提出了多点波束聚焦方案，并通过仿真和实验进行了验证^[35]。

此外，全息超表面独特的物理实现机制也带来

了新的技术挑战。1) 物理层面的功率约束：串行馈电架构阵列需要满足漏波功率约束，即能量沿传播方向呈指数衰减，这对波束赋形的幅度加权提出了约束。2) 电磁层面的互耦干扰：全息超表面的单元间距通常小于半波长，所带来的电磁互耦效应使得传统基于独立单元假设的波束赋形算法失效，须建

立全新的耦合模型。3) 宽带带来的波束色散效应：在大带宽场景下，波束分裂效应与混合近远场效应并存，使得波束训练的复杂度呈指数级上升。针对上述挑战，本章节将在接下来的 3.1.2 小节进行关键技术阐述。

3.1.2 全息波束赋形关键技术

➤ 3.1.2.1 串行传输方案设计

与传统相控阵的并行馈电不同，可重构全息超表面采用串行馈电结构。电磁波从边缘馈源注入超表面，沿微带线传播并依次激励各辐射单元。每个单元将部分能量辐射到自由空间，剩余能量继续

传播至下一个单元，如图 5 所示。这种串行传输模式带来了独特的泄漏功率约束^[17]：所有单元辐射的总功率不能超过馈源的输入功率。漏波功率约束可以表示为：

$$\sum_{i=1}^N \eta_i |m_i|^2 \leq 1,$$

其中 η_i 表示第 i 个单元接收功率与总发射功率的比值， m_i 表示第 i 个单元的幅度响应， N 为单元总数。 η_i 遵循指数衰减规律，距离馈源越远的单元接收到的功率越小。漏波功率约束反映了单元之间的能量耦合效应，对波束赋形设计提出了新的要求。在优化幅度响应时，需要同时考虑波束增益和泄漏功率约束，确保总辐射功率不超过输入功率。

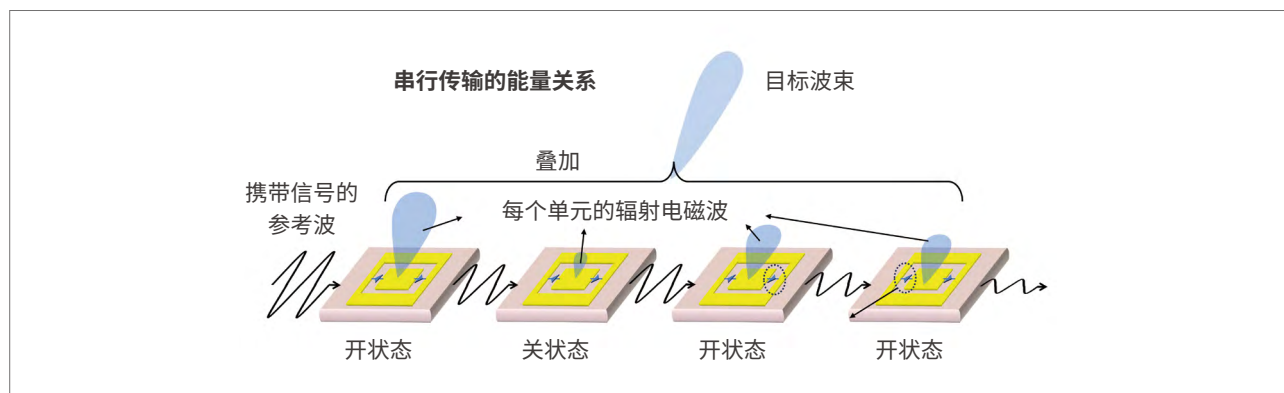


图 5 - 串行传输能量关系

整个数字 - 全息波束赋形流程如图 6 所示：基站首先通过基带处的数字波束成形器对不同数据流

进行编码，以消除用户间的干扰。随后，信号经由射频链路进行上变频处理至载波频率。每条射频

链路都连接全息超表面的一个馈源，负责先将传输信号上变频，再将其发送至对应的馈源。馈源随后将高频电流转换为电磁波（即参考波），该参考波以表面波形式在超表面上传播。接着，全息超表面

单元将电磁波能量泄漏至自由空间进行辐射。通过遵循泄漏功率约束的全息波束成形器，对每个全息超表面单元处的参考波辐射幅度进行调控，从而实现所需定向波束的生成。

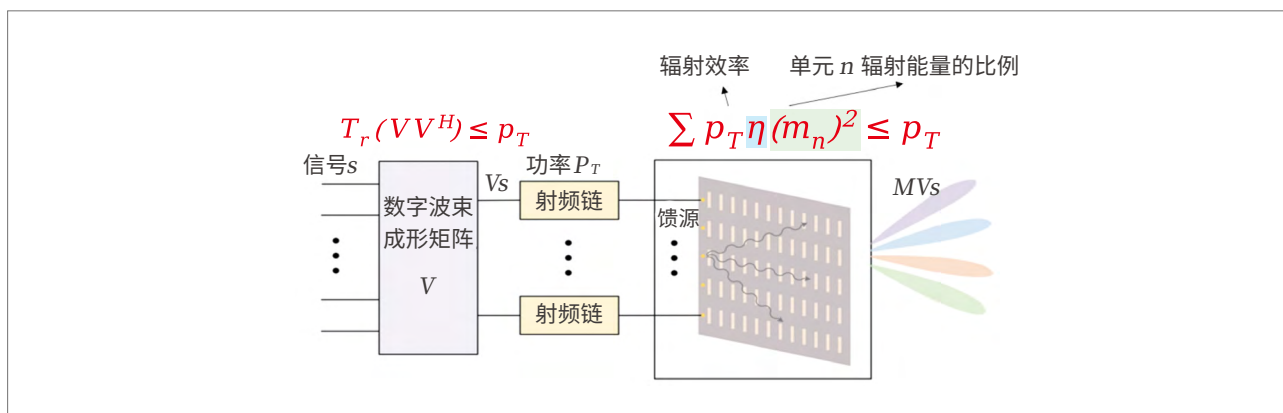


图6 - 数字 - 全息波束赋形

➤ 3.1.2.2 等效孔径可重构全息波束赋形

全息超表面的幅度控制特性使得等效孔径可以动态调整。通过将部分单元的幅度响应设为0（“关闭”状态），可以等效地改变天线孔径的大小和位置，从而实现孔径可重构的波束赋形。

具体而言，天线孔径大小与波束宽度成反比。通过调整等效孔径的大小，可以生成不同宽度的

波束^[36]。大孔径生成的窄波束覆盖范围小，适用于高增益传输；小孔径生成的宽波束覆盖范围大，适用于覆盖大范围区域。如图7所示，通过调整等效孔径的位置，可以改变波束的形状和方向，从而更好地规避干扰源，提升通信质量。

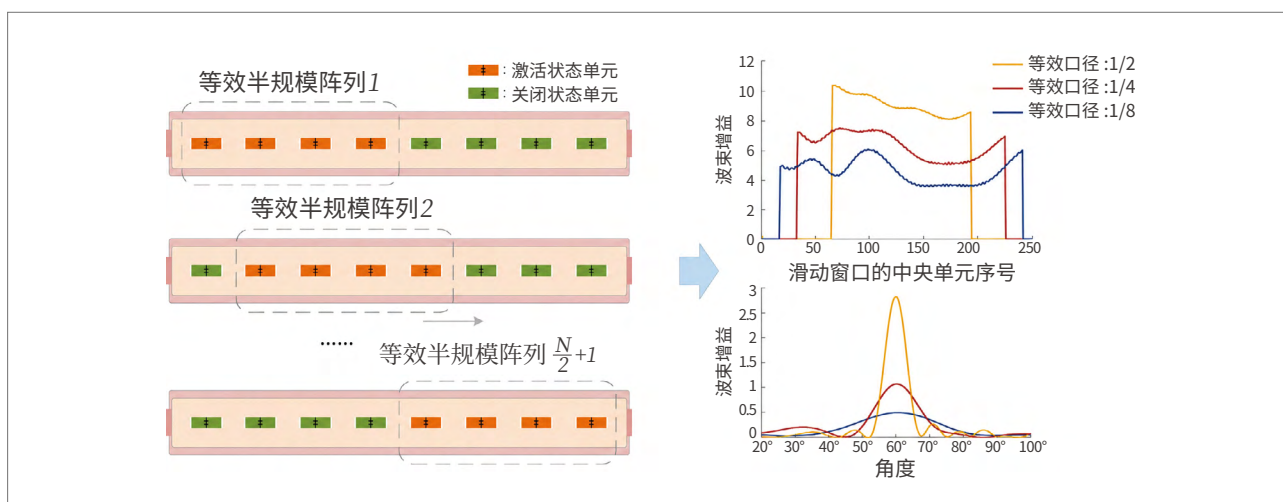


图7 - 等效孔径可重构全息波束赋形

➤ 3.1.2.3 多波束全息图样线性叠加

在多用户传输场景中，需要同时生成多个波束服务不同用户。传统方法需要求解大规模优化问题，

计算复杂度高。全息图样叠加利用 RHS 幅度响应的可加性，提供了一种低复杂度的多波束生成方案。

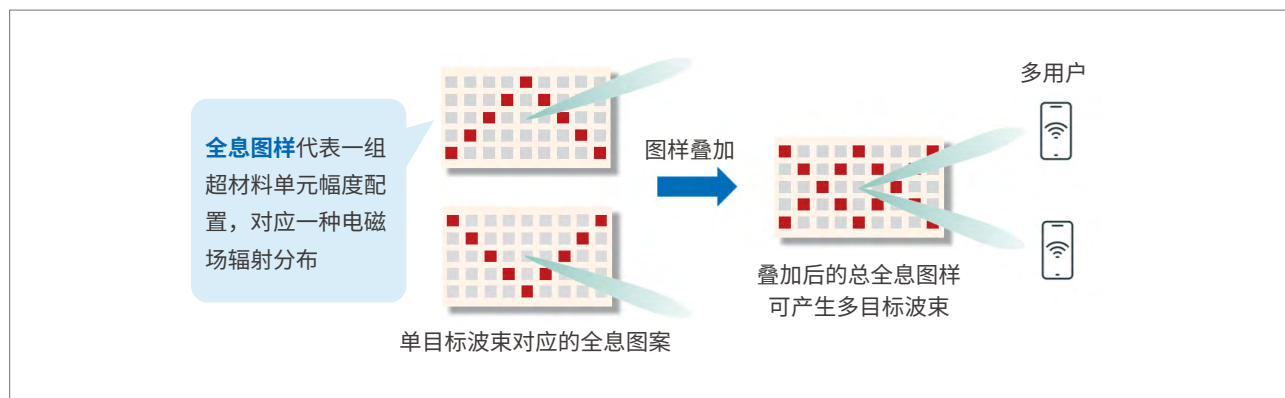


图 8 - 全息图样线性叠加原理

如图 8 所示，全息图样叠加的基本原理是：将多个单波束全息模式线性叠加，生成多波束全息模式。每个单波束模式对应一个特定方向的波束，

叠加后的模式可以同时生成多个方向的波束。多波束全息模式可以表示为：

$$m_{multi} = \sum_{k=1}^K w_k m_k,$$

其中， m_k 表示第 k 个单波束模式， w_k 表示对应的权重系数， K 为用户数量。

由于单波束模式可以预先计算并存储，因此通过全息图样叠加，多波束模式通过简单的线性叠加获得，无需实时求解优化问题，从而降低计算复杂度。此外，叠加操作仅涉及幅度相加，计算量小，可以在毫秒级时间内完成多波束生成，支持快速波束切换。

由于权重系数影响各波束的功率分配和总辐射

功率，全息图样叠加的设计需要考虑权重系数优化，并保证叠加后的总辐射功率需要满足泄漏功率约束。因此，需要根据用户信道条件、业务需求和泄漏功率约束，优化权重系数以最大化系统性能。叠加后的图样（辐射模式）可能在某些方向上产生干扰，影响波束质量。需要设计单波束模式，使得叠加后的干扰最小化。

➤ 3.1.2.4 宽带全息码本设计与波束训练

在宽带通信场景中，由于不同子载波对应的传播特性存在差异，波束在空间中的指向会随频率

发生偏移，形成典型的波束分裂现象。对于远场用户，这种分裂主要表现为角度维度上的偏移，即不同

频率的波束指向不同方向；而在近场区域，波束不仅在角度上发生变化，同时在距离维度上也会产生明显偏移，呈现出更复杂的空间分布。在可重构全息表面天线架构下，所有子载波共享同一全息图样进行波前调控，宽带信道的传播特性自然使得全息图样在不同频率下存在空间响应差异。通过利用

这种频率相关性带来的波束空间偏移，可以在无需引入额外硬件的情况下，实现对空间区域的扩展覆盖，从而提升波束训练效率。

为刻画宽带条件下的波束行为，引入变换域表示方法，将极坐标中的角度 θ 与距离 r 映射至 ψ - μ 域，其中：

$$\psi = \sin \theta, \quad \mu = \frac{1 - \sin^2 \theta}{2r}.$$

在该空间变换域中，不同子载波的波束指向随频率变化而产生的偏移关系可表示为

$$\psi_k = \frac{f_c}{f_k} \psi_c, \quad \mu_k = \frac{f_c}{f_k} \mu_c.$$

其中 (ψ_c, μ_c) 和 (ψ_k, μ_k) 分别表示中心频率波束和第 k 个子载波波束在变换域中的空间指向。如图9所示，在近场条件下，角度与距离的耦合使得波束在空间中分裂维度得以扩展，不仅局限于远场场景中的角度分裂。这种由频率驱动的空间扩展为后续码本设计提供了基础（注：上述公式适用于工作频段内 RHS 传播介质近似无色散的情况）。

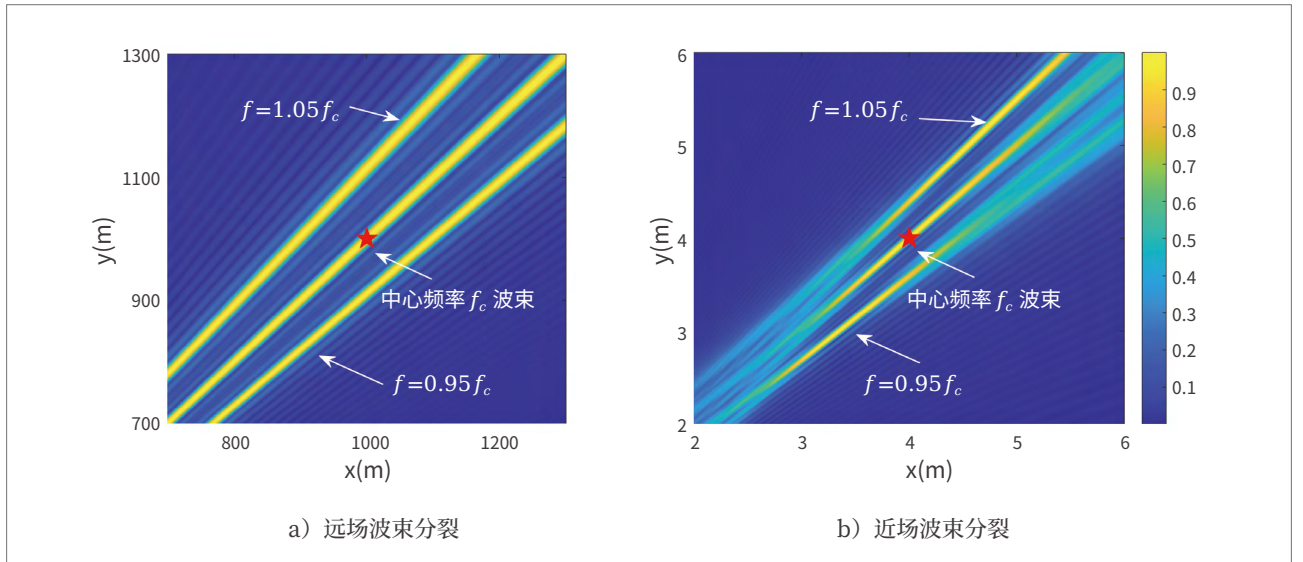


图9 - 全息超表面通信系统中的波束分裂效应

基于上述特性，宽带全息码本的构建采用中心频率下的二维采样策略。在角度维度上选取若干代表性方向，在距离维度上进行分层离散，从而在空间变换域中形成有限数量的采样点。每个采样点

对应一个单波束全息图样，其由参考波与目标波的干涉关系确定。通过频率变化，这些码字在不同子载波下会自动产生空间偏移，使得原本离散的采样点在宽带范围内扩展为连续覆盖区域，从而在保持

较少码字数量的同时,实现对近远场空间的有效覆盖。

在此基础上,进一步构建宽带全息波束训练过程。首先,通过覆盖范围较大的远场全息码字进行初始扫描,以快速确定用户所在的角度区间;随后,在候选角度范围内引入包含距离信息的近远场码字进行细化搜索,从而逐步缩小空间范围;最后,通过单频波束的精细扫描,对候选方向进行逐一验证,

并结合不同子载波上的接收功率变化,识别最优传播路径及其对应的空间位置。

在整个过程中,统一的全息图样在不同频率下呈现出差异化的空间响应,使得单次波束扫描即可同时获取多个空间位置的信息。这种方式充分利用了全息图样的宽带响应特征和波束的覆盖优势,有效减少了波束训练所需的码字数与搜索开销。

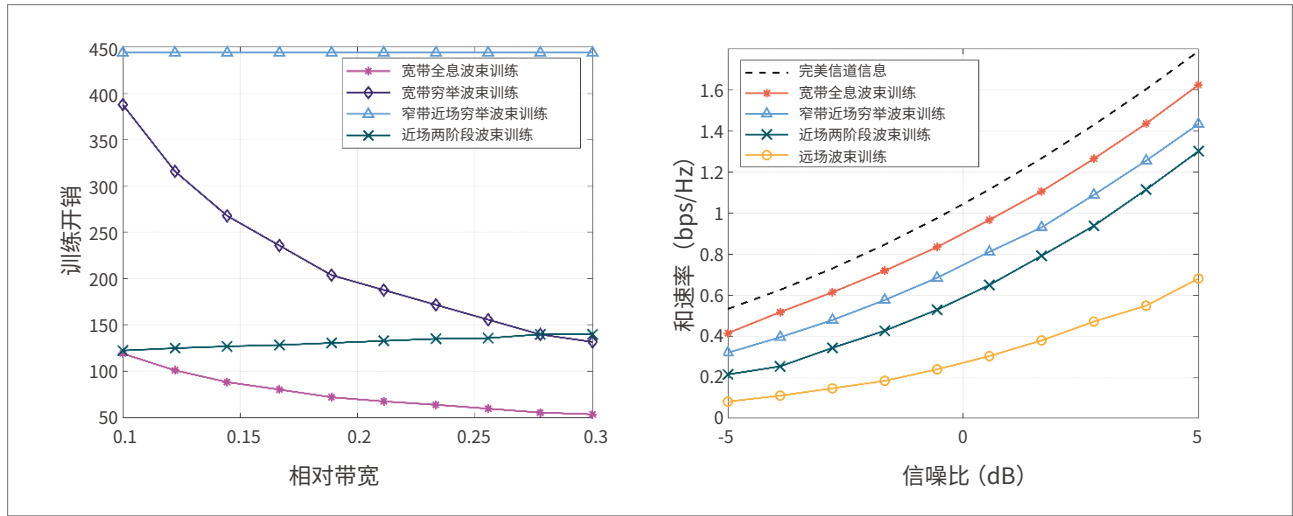


图 10 - a) 不同带宽下的波束训练时间开销; b) 不同波束训练方案的通信速率

如图 10 所示,仿真结果表明,宽带全息码本设计与波束训练方法在不同带宽条件下均能有效控制训练开销,随着系统带宽的增加,相比传统方法仍可保持较低的训练复杂度。同时,在不同信噪比

条件下,该方法能够实现更高的通信速率,体现出其在宽带场景中的稳定性能与高效传输能力,验证了利用波束分裂特性进行全息设计的有效性。

➤ 3.1.2.5 互耦效应下的全息波束赋形

全息超表面通过亚波长密集排布的辐射单元实现波束赋形,单元间距通常仅为四分之一波长甚至更小。这种密集排布虽然带来了高空间分辨率和灵活的波束调控能力,但也导致了显著的电磁互耦效应^[37]。具体而言,在全息超表面内部,某一个单元辐射的电磁场会耦合到相邻的单元中,从而在相邻单元感应出额外的电流。这些随时间变化的电流反过来又会产生散射场,再次冲击原始单元并激发新的电流,这种

复杂的物理现象即为互耦,如图 11 所示。

本章节进一步考虑互耦效应对全息波束赋形优化的影响。为了建模全息超表面单元间的互耦效应,采用耦合偶极子近似模型(coupled dipole approximations)。该模型将电尺寸极小的全息超表面单元视为磁偶极子,这些偶极子通过耦合场相互作用构成一个整体的耦合系统。在此框架下,考虑互耦效应的全息波束赋形矩阵 M 建模为:

$$\mathbf{M} = k((e^{j\tau}\Theta)^{-1} - G)^{-1}\tilde{\mathbf{F}}^{ref}$$

其中, k 是与全息超表面配置无关的复常数, Θ 为反映全息图样的极化率幅度对角矩阵, G 为记录不同全息超表面单元间电磁耦合系数的耦合矩阵, $\tilde{\mathbf{F}}^{ref}$ 则表示输入馈源产生的初始参考波分布。通过改变施加在全息超表面单元上的偏置电压, 可以等效地改变极化率幅度对角矩阵 Θ , 从而实现波束赋形。基于上式中的全息波束赋形矩阵表达式, 可以建模耦合对于通信传输速率的影响。



图 11 - 用于建模全息超表面间互耦效应的耦合偶极子近似模型示意图

互耦矩阵 G 的存在引入了逆矩阵运算, 导致极化率幅度 (全息图样) 与波束赋形输出之间呈现高度非线性, 使得优化问题本质上是非凸的。为此, 通过在每次迭代中限制全息图样的变化步长 (即微小增量), 即可通过纽曼级数 (Neumann

series) 将非线性的波束赋形矩阵近似转化为线性函数, 从而进一步将复杂的非凸问题转化为一系列二次约束二次规划 (quadratically constrained quadratic programming, QCQP) 问题, 便于求解。

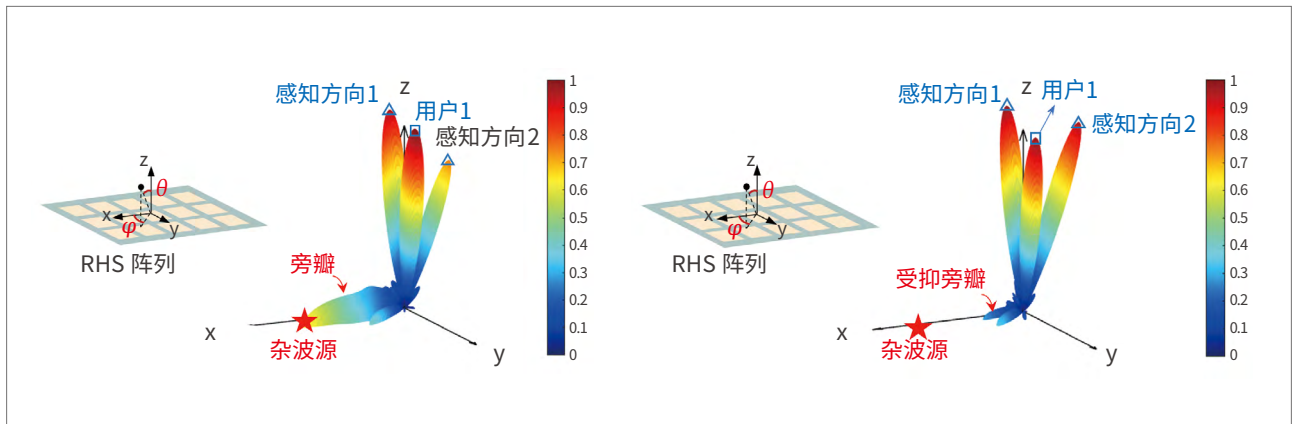


图 12 - a) 传统没有考虑互耦的全息波束赋形方案; b) 提出的考虑了互耦的全息波束赋形方案

如图 12 中的仿真结果所示, 相比于传统未考虑互耦的全息波束赋形方案, 采用互耦感知全息波束

赋形算法后, 杂波方向的旁瓣电平被从 -1.88 dB 抑制至 -4.57 dB, 证明了所提出方案的有效性。

3.1.2.6 动态场景下的全息超表面波束追踪

结合前述章节中的关键技术，面向高速移动场景，全息波束赋形技术的发展还可进一步探索

利用信道地图先验信息的波束快速追踪和对准方案。

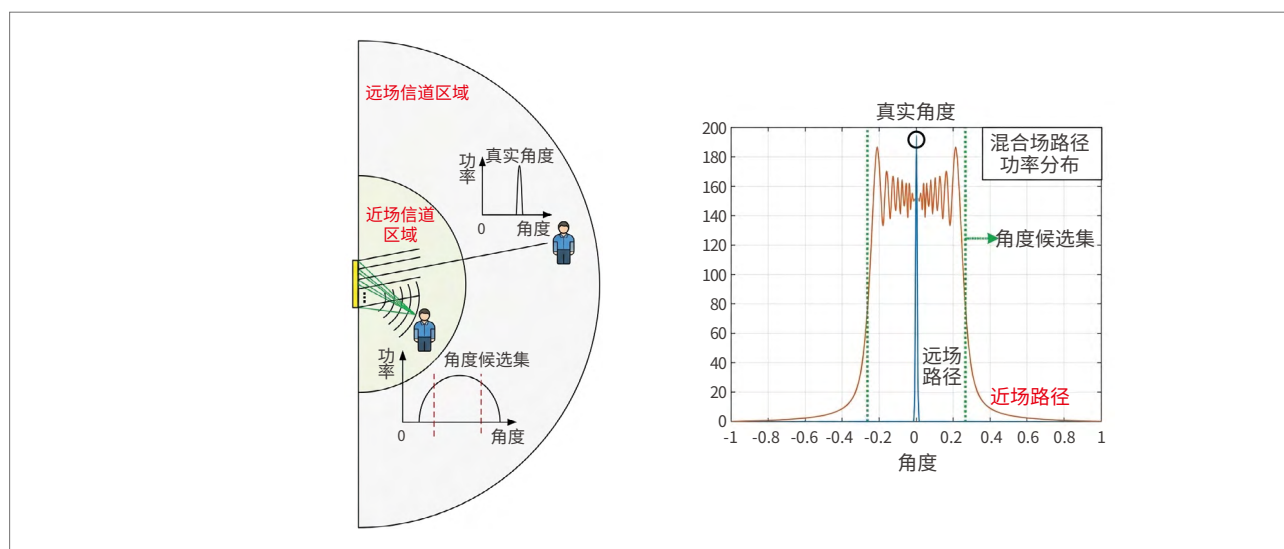


图 13 - 超大规模全息超表面天线混合场角度域特征示意图

高速用户的移动会导致不可忽略的信道特征变化，例如远近场模式之间的切换。挖掘信道路径的角度谱宽度等特征与用户远、近场位置间的直接关联，自适应识别信道远近场模式并构建相应码本，解决基于单一远场或近场码本的波束训练无法实现混合场区域全覆盖的问题。如图 13 所示，近场用户角度谱具有一定的展宽宽度，表现为大量连续的高能量角度候选值，且扩展宽度随基站 - 用户距离减小而增加，而远场用户角度谱较窄，呈现单一或少量的连续高能量角度候选值，因此，可基于用户位置与角度扩展宽度间的先验关联信息，构建距离 - 角度谱宽度字典。在波束训练时，可先通过低复杂度的初始角度域波束扫描，获取角度谱宽度信息；进而结合字典获取当前角度谱宽度所对应的距离区间，从而自适应识别用户信道区域。如用户处于远场，可根据初始角度域波束扫描结果直接获取最优波束；若用户处于近场，则可根据初始波束扫描与字典

搜索结果，缩减候选距离与角度的搜索空间，进而对该子集内的位置点进行细化扫描，实现高分辨率近场波束对准。

考虑到用户移动会导致角度 - 功率谱发生变化。其中，用户在平行于超大规模超表面阵列法线方向上的移动会导致扩展角度集合展宽或收缩。基于该观察，可以对用户移动方向矢量在天线阵列法线方向及其垂直方向上进行正交分解，通过分析其角度 - 功率谱图像中心位置及扩展宽度的变化趋势，预测用户移动轨迹及速度。在后续时刻，只需对用户移动方向上的子空间进行细化波束训练，可获取用户移动方向及移动速度信息，并结合信道地图先验信息，缩减用户未来位置的码字候选区域范围，进而挖掘用户移动矢量域波束扫描结果变化模式之间的内在联系，通过用户未来位置域码字区间的主动预测，实现低开销波束追踪和波束对准。

3.2 全息超表面天线设计

全息超表面天线设计一般分为两个阶段：单元设计与阵列设计。在单元设计阶段，需要设计在目标工作频段可以正常对电磁波响应进行调节的超表面辐射单元，并进行全波电磁仿真分析，验证单元的辐射特性；在阵列设计阶段，基于可调节电磁波

响应的超表面辐射单元，设计能够在目标工作频段通过全息干涉原理进行精准波束调控的全息超表面阵列，并利用全波电磁仿真对全息超表面阵列进行天线性能评估。

3.2.1 全息超表面天线单元设计

利用超材料等效介质理论，考虑工作在毫米波频段的可重构全息超表面天线设计，设计可对电磁波响应进行调节的超材料单元。可重构全息超表面辐射单元由五层结构构成：1) 一层即顶层为嵌有谐振结构（如 cELC 谐振器，缝隙结构等）的金属层；2) 第二层为射频（radio frequency, RF）介质基层，用于引导参考波在介质中的传播。3) 第三层为铜片即接地层；4) 第四层为绝缘垫层，用于将地层（即，第三层）与直流（direct current, DC）偏置馈线（即，第五层）隔离开；5) 第五层即底层为直流馈线层，其中直流馈线通过一条穿过绝缘垫层、地层、射频介质基底和顶层辐射结构的通孔，

向顶层动态元件（如，PIN 二极管）施加偏置电压。金属顶层、介质基层、金属地层和贯穿这三层的金属壁共同构成了介质集成波导结构，用于电磁波信号的传输。以图 14 为例，图中所示的全息超表面单元采用互补型电感 - 电容（complementary electric-inductive-capacitive, cELC）谐振器作为顶层辐射结构。其中，cELC 谐振器是指通过在微带线上蚀刻环形槽形成的包含闭环的金属贴片。为了提高全息天线单元设计的自由度，例如谐振频率、辐射效率等，在矩形金属贴片的每个长边的中间，设计有一个 T 形槽，从而可以提供更多的可调节的几何特性维度。

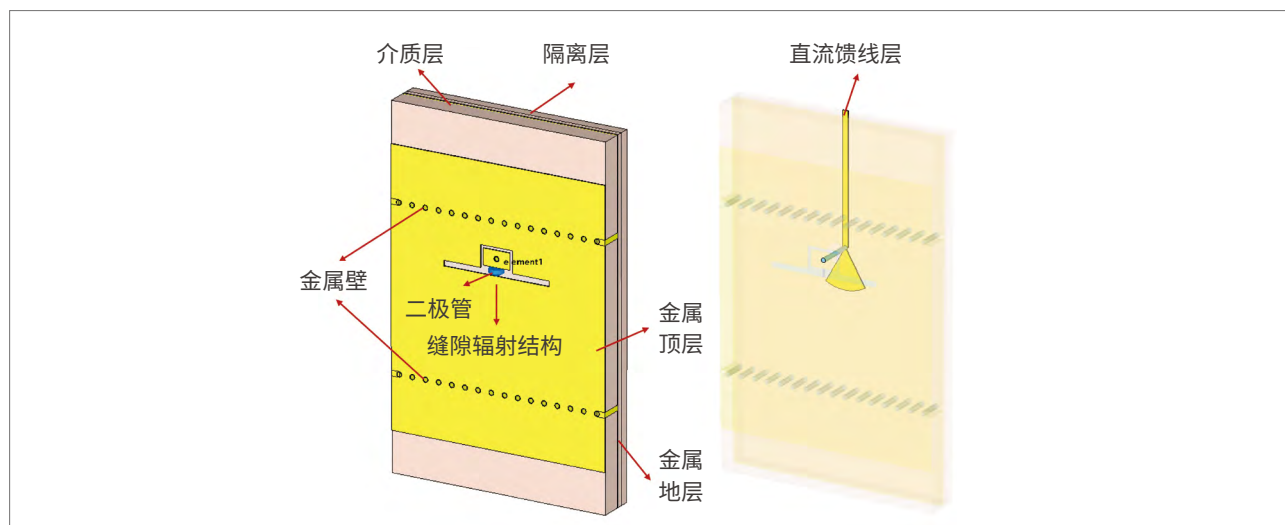


图 14 - 可重构全息超表面天线单元结构示意图

根据辐射单元对电磁波辐射特性的调控要求，全息超表面单元对参考波的幅度调节通过在谐振结构上加载 PIN 二极管动态元件实现。通过施加不同的偏置电压，可以控制 PIN 二极管的开关状态（打开或关闭）。PIN 二极管不同的开关状态能够决定辐射结构的谐振特性以及参考波的辐射功率。具体来说，当这两个 PIN 二极管处于关闭状态时，辐射功率将会很大。相反地，当这些 PIN 二极管处

于打开状态时，辐射功率将会很小。这种设计可以调节辐射功率，以适应定向传输的需求和应用。基于全息干涉原理以及上述单元结构设计，利用 CST 软件进行三维全波电磁仿真，对由辐射单元组成的可重构全息超表面进行结构优化与分析，可以得到可重构全息超表面单元的散射参数 (scattering parameters)，并进一步分析其辐射性能。

3.2.2 全息超表面天线阵列设计

基于上述全息超表面单元，设计能够进行精准波束调控的全息超表面阵列。全息超表面阵列设计

主要包含四部分：全息超表面单元、功分器及馈入结构、调控网络及控制电路，其中：

全息超表面单元

由上述可重构全息超表面辐射单元设计得到。各全息天线单元的调控相互独立，协同工作以实现特定的信号传输和接收功能。

功分器及馈入结构

用于将传输信号从发射机射频信号源传送至可重构全息超表面天线的各行单元。馈入结构旨在确保发射信号与天线之间的阻抗匹配，以最大程度地提高信号传输性能；功分器旨在将馈入的一路信号按功率均分为多路。

调控网络

为了独立控制每个超表面单元的电磁响应，还需设计调控网络，直流引脚头外接偏置电压，馈线将直流引脚头的偏置电压传给每个超表面单元的动态元件。通过控制电路改变外接电压，可以独立调控每个单元的电磁响应，从而调控波束。

控制电路

采用 FPGA 对各个二极管上的电压进行控制，从而实现波束调控。

为了进行精确波束调控，基于全息原理设置每个可重构全息超表面辐射单元 PIN 二极管的 ON/OFF（开/关）状态。具体地，对于某一给定传播方向的目标波束，首先根据全息原理计算每个可重构全息超表面辐射单元的理论辐射幅值。当幅值大于预定义阈值时，PIN 二极管处于 OFF 状态；相反，当幅值

小于阈值时，PIN 二极管则处于 ON 状态。由此，全息超表面可以通过幅度调控实现全息波束成形。

基于全波仿真的结果，对可重构全息超表面进行实物制板，全息超表面天线实物与其归一化方向图分别如图 15a、15b 所示。

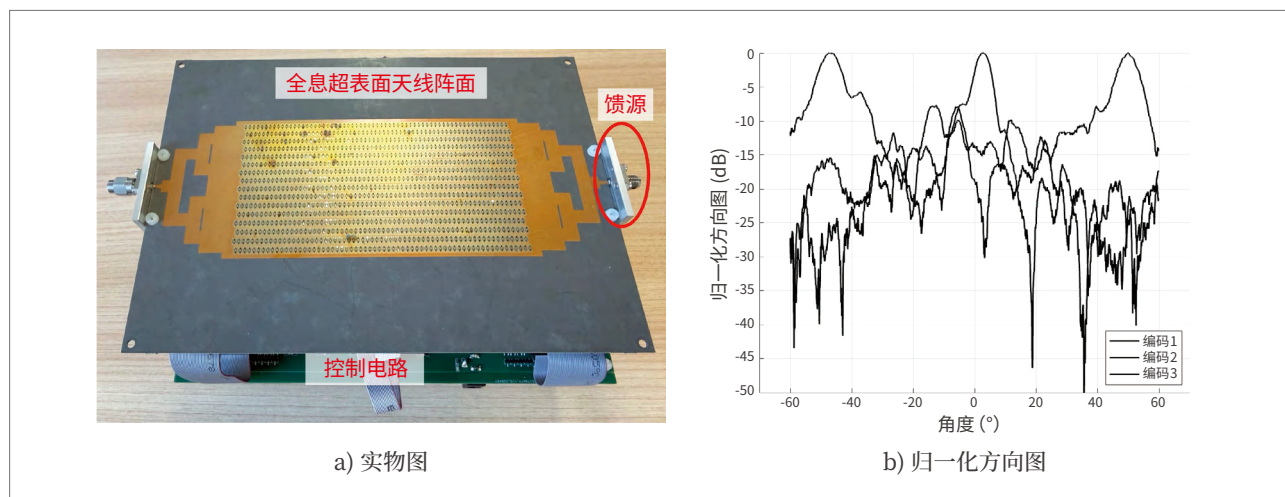


图 15 - 全息超表面天线阵列

3.3 全息超表面天线系统样机

3.3.1 样机组成

如图 16 和图 17 所示，基站由基带模块与基于全息超表面天线阵列的有源天线单元（AAU）构成，采用基于多面板的混合波束赋形架构支持多流数据

传输，可服务多部终端。发射方向，通过电缆将毫米波信号馈入全息超表面天线阵列，实现水平和垂直双极化。



图 16 - 毫米波全息超表面宽带高速通信系统
(双用户传输为例)

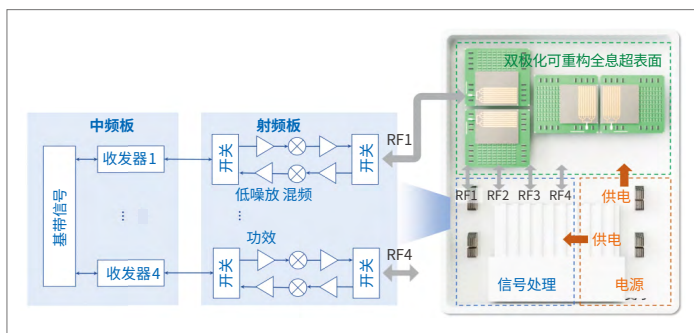


图 17 - 发射机 AAU
内部组成

➤ 3.3.1.1 系统功能

工作于24.25-27.5GHz 频段, 可支持水平 / 垂直极化, 配置4个射频通道, 传输带宽不低于800MHz, 波束的水平方向扫描范围 $\pm 60^\circ$, 垂直方向扫描范围

$\pm 45^\circ$ 。该系统波束切换时延小于 2 微秒, 可支持单用户两流 / 两用户四流波束赋形传输、波束跟踪功能。

➤ 3.3.1.2 系统亮点

结构简化

全息超表面天线阵列, 采用串行馈电方式, 电磁波沿超表面传播并逐个激发各天线单元, 一个射频通道可以驱动多个天线单元, 突破了传统天线阵列结构中射频通道数量与天线阵元数量同一数量级的限制, 简化多路射频通道并行馈电的天线阵列结构。

能效提升

一方面, 全息超表面的每个天线单元可通过功耗极低的控制器件如二极管进行动态幅度 / 相位调控, 避免使用有源移相器。另一方面, 可以采用输出功率高、功率附加效率高的功放器件, 比如饱和功率不小于 36.5dBm 的功放, 无需使用波束赋形芯片 (beamformer) 中输出功率低、功率附加效率低的功放。因此, 使基于全息超表面的有源天线阵列“更绿色”。

成本降低

就有源天线阵列整体而言, 经测算, 相同阵列口径, 全息超表面天线阵列以及 PA、LNA 等关键有源器件, 可降低约 20% 成本, 如未来批量生产及部署, 其预期成本将进一步降低。

阵列轻便

该样机全息超表面天线阵列厚度为 1.44mm, 且相比于相同阵列口径的传统相控阵, 重量大幅下降。

3.3.2 系统测试

➤ 3.3.2.1 单用户波束追踪测试

图 18 展示了单用户波束跟踪效果。具体而言, 全息超表面预部署了波束赋形码本, 以便在终端移动时进行波束跟踪。随着终端位置的变化, 参考信

号接收功率 (reference signal received power, RSRP) 为指示波束跟踪效果的指标。实验设定在位置 4 时, 基于全息超表面的有源天线单元 (active

antenna unit, AAU) 与终端之间仅存在非视距 (non-line-of-sight, NLoS) 传播路径, 而在其他位置则同时存在视距 (line-of-sight, LoS) 和非视

距 (NLoS) 传播路径。根据波束码本不同, 单用户动态波束跟踪测试包括以下两种情况:

基于预设码本的波束切换

在这种情况下, 全息超表面的码字是根据终端的运动轨迹和速度预先设计的。具体来说, 在码本中仅选择五个码字, 分别对应五个终端采样位置, 且每个位置的码字均是根据全息波束赋形原理预先设计的。在速度固定的前提下, 全息超表面在每个位置直接启用相应的码字。

基于通用码本的波束训练与跟踪

与预设码本的情况不同, 在全息超表面采用了通用码本, 不依赖预设的终端轨迹和速度信息。

具体而言, 基站将参考信号与全息超表面模拟波束进行匹配, 终端通过波束训练与基站形成稳定链路。在移动的过程中, 终端不断反馈性能最佳的参考信号, 基站选择对应的码本, 全息超表面形成对应的模拟波束。

为了进行对比, 同时使用传统相控阵天线进行了单用户波束跟踪测试。基于全息超表面阵列测量得到的 RSRP 在图 18 中以蓝色柱状图表示。基于传统相控阵测量得到的 RSRP 由图 18 中的灰色柱状图标识。对于两种天线阵列而言, 终端在相同位置测量到 RSRP 基本一致。这显示全息超表面阵列与传统相控阵具有相同的波束跟踪能力。

此外, 全息超表面阵列可以完成微秒级波束切换, 满足通信对于波束切换时延的需求。

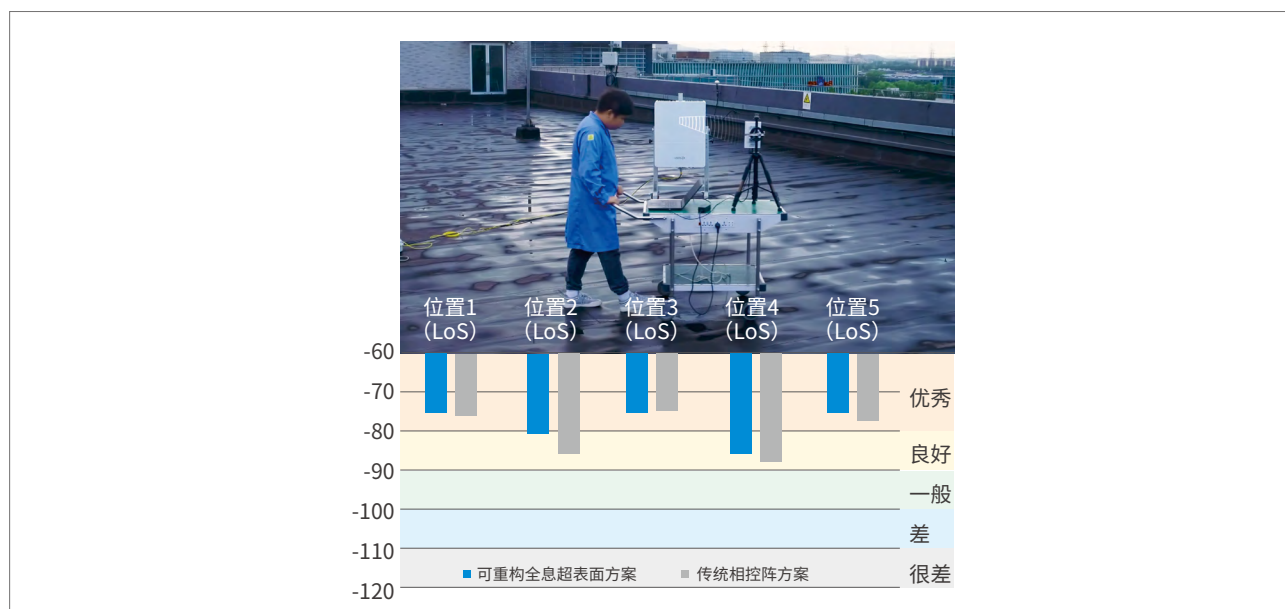


图 18 - 单用户测试结果图

3.3.2.2 两用户传输测试

进一步进行两用户传输测试。为了评估系统在视距和非视距场景下的数据传输性能，位置 1 和 2 分别被设置为视距和非视距。我们在位置 2 的正前方放置了一个障碍物以形成非视距传播。

对于每个位置的终端，系统均执行波束训练：基站通过预定义的模拟波束码本进行波束扫描，两个终端根据各自接收到的信号强度分别上报最优

码字。随后，基站分别为这两个终端确定用于数据传输的最优模拟波束。需要注意的是，尽管位置 2 不存在视距传播路径，但仍可以选择性能最优的模拟波束进行数据传输，该模拟波束对应于终端反馈接收信号强度最优的码字。之后，系统通过不同的模拟波束为两终端同时传输数据。

通过测量不同设置下的接收指标来评估系统性能:

EVM (误差向量幅度)

在 100MHz 传输带宽情况下 EVM 约为 7%，符合 3GPP 对 64QAM 的指标要求（即 <8%）在载波聚合情况下，EVM 有所下降，但仍符合指标要求。

RSRP (参考信号接收功率)

由于物体阻挡导致传播损耗更大，位置 2 终端测量获得的 RSRP 较位置 1 的有所降低。此外，在非视距场景下，模拟波束宽度（如全息超表面天线阵列 30°波束比 45°波束窄）也会影响 RSRP。

下行速率

配置 800MHz 传输带宽的载波聚合, 位置 1、2 的终端均单流传输, 下行传输速率均保持在 2Gbps 以上。

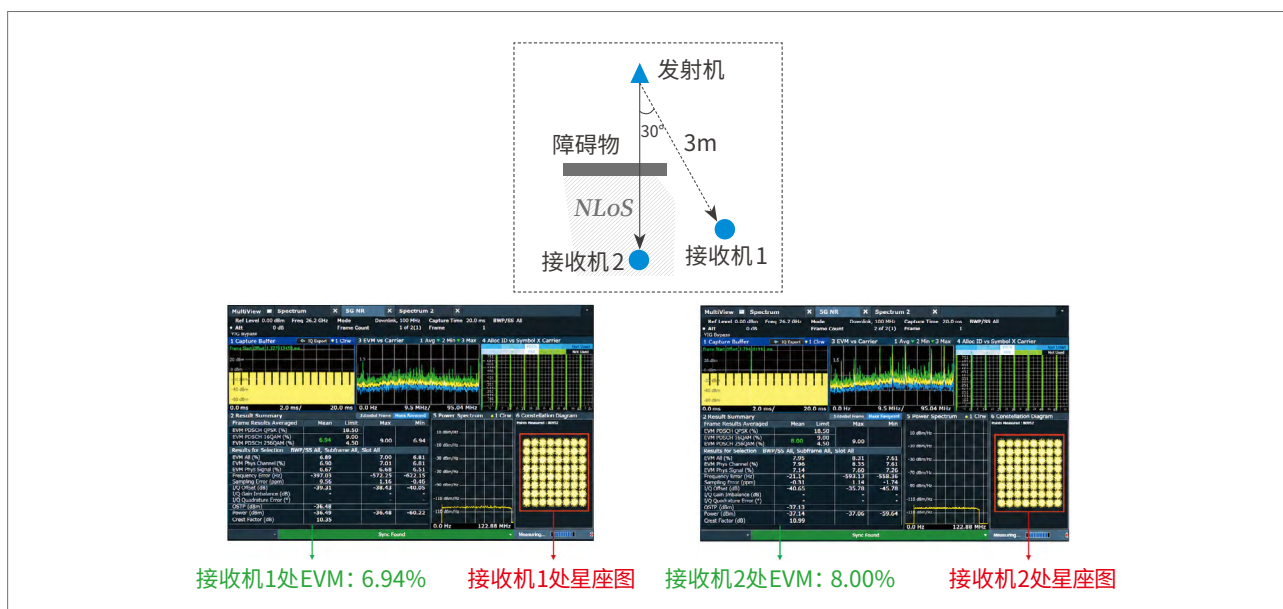


图 19-毫米波可重构全息超表面天线通信系统两用户传输测试

应用场景



4.1 基于大规模全息超表面的无线通信基站

随着移动通信系统向毫米波、亚太赫兹等更高频段演进，基站需要通过更大规模的天线以获得更高阵列增益和更精细波束控制能力。全息超表面为基站超大规模天线阵列提供了一种低功耗、低成本、高集成度的新型实现路径。全息超表面包含密集排列的可重构辐射单元，射频信号馈入后，通过串行馈电的方式依次激励各辐射单元，通过调控各单元辐射状态实现精细的波束调控。此外，基站可通过低功耗动态元件调控单元电磁响应，无需依赖复杂硬件。因此，全息超表面在实现低功耗、低成本的大规模天线系统方面具有巨大潜力，适合用于 6G 热点覆盖、室内外高容量接入以及多用户并发传输等典型基站场景。

典型的基站全息超表面天线系统可由基带处理模块与基于可重构全息超表面阵列的天线模块组成，如图 20 所示。基带处理单元产生数字信号并将其输入基于可重构全息超表面阵列的天线模块，后者进行射频信号处理，并通过混合波束赋形架构支持多流数据传输，同时服务多终端用户。从网络部署角度看，基站超大规模天线阵列是全息超表面技术进入移动通信系统的基础承载形态。其核心价值在于解决 6G 高频段基站“阵列做大”与“功耗成本可控”之间的矛盾，实现高容量、高能效和可规模部署的超大规模 MIMO 能力。在此基础上，全息超表面的精细波束调控、高感知分辨率和轻薄化形态还可进一步扩展到通感一体化、卫星终端、低空平台等更复杂应用场景。

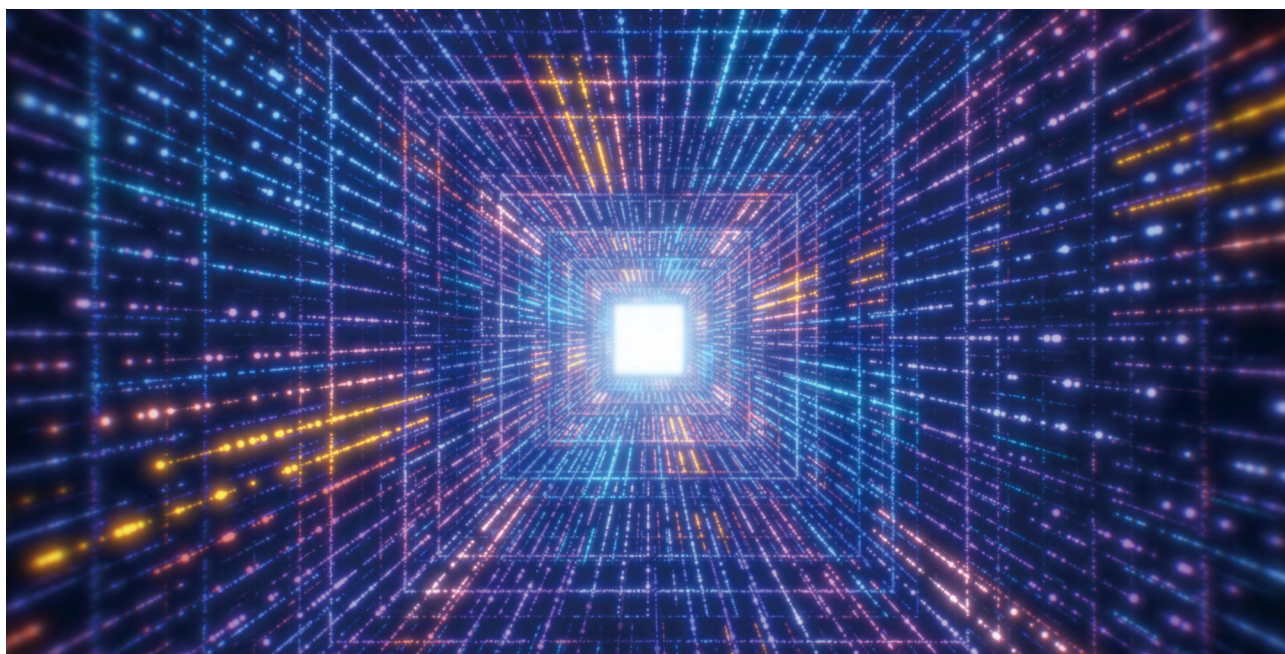


图 20 - 基于全息超表面的无线通信系统样机

4.2 全息通感一体化

未来 6G 的演进趋势之一是利用通信网络基础设施，在不增加额外成本的前提下通过硬件复用实现

感知功能，从而支持定位、重建等应用。全息超表面凭借低功耗、低成本、轻薄化和灵活波束调控等



硬件优势，为全息通感一体化提供了物理基础。其核心思想是：利用全息超表面的灵活波束调控能力，在同一时频资源上同时传输通信数据和执行感知任务。通信波形承载信息传输功能，同时其回波信号可用于目标检测、参数估计和成像识别。通过联合优化全息波束赋形，可以在保证通信质量的前提下，最大化感知性能，实现通信与感知的双赢。

典型的全息通感一体化系统由配备可重构全息超表面发射天线和接收天线阵列的基站、多个通信用户以及待感知目标组成。系统工作流程包含三个关键环节。1) 联合优化阶段：基站根据用户信道状态信息和目标位置信息联合优化 ISAC 信号，在满足通信服务质量（quality of service, QoS）要求的前提下提升感知性能；2) 信号发射阶段：全息

超表面通过全息波束赋形生成指向用户和目标的多波束信号，并利用幅度响应的线性可加性实现全息图样叠加，从而同时服务多个用户和多个目标；3) 信号接收阶段：通信用户接收并解调下行信号，基站接收目标回波并完成感知信号处理。与此同时，全息超表面天线阵列具有时间域电磁互易性，使发射端与接收端可共享相同的漏波功率约束模型，从而简化系统设计；其超薄轻量化形态也便于部署在多种平台，进一步拓展了 ISAC 系统的应用边界。现有工作已构建全息通感一体化架构并搭建实验系统，在未知信道信息条件下实现了障碍物与通信用户定位，并基于位置信息优化用户通信码字，达到微秒级测距延迟分辨率，同时能够在室内环境中完成三维物体的语义分割与识别。

4.3 基于大规模全息超表面天线的低轨卫星地面终端

低轨（low earth orbit, LEO）卫星通信正成为全球通信基础设施的重要组成部分，以 Starlink、

OneWeb、Kuiper 等为代表的低轨卫星星座通过部署大规模卫星网络，实现全球无缝覆盖和高速宽带

接入。然而，低轨卫星的高速运动特性（约 7.5 km/s）对地面终端提出了快速波束扫描和无缝切换等严苛要求。传统抛物面天线依赖机械伺服跟踪，体积大、重量高、功耗高，难以适应移动场景和便携部署；电子扫描相控阵虽可实现无机械运动的波束控制，但仍需要大量的移相器和复杂的馈电网络，成本和功耗仍然是规模化部署的瓶颈。

在此背景下，全息超表面凭借低功耗、低剖面、轻量化和无机械运动部件等优势，为平板卫星终端天线提供了有效解决方案。美国 Kymeta 公司已推出 Hawk u8 LEO 和 Peregrine u8 LEO 等商用终端，采用基于液晶动态调控的电子扫描全息波束赋形阵列，实现了低轨卫星通信的规模化商用部署；

国内多家单位也在积极开展可重构全息超表面辅助卫星通信研究，为自主可控的低功耗、低成本、高增益卫星终端技术提供支撑。现有全息超表面方案包括矩形波导、微带线、间隙波导和基片集成波导等，其中基片集成波导（substrate integrated waveguide, SIW）方案因其平面化结构易于与标准 PCB 工艺集成，并具备低插入损耗、高功率容量和天然频率色散特性，尤其适用于卫星通信中的宽带波束扫描与多频段兼容需求。未来，Ku/Ka 频段共口径超表面天线也将成为重要研究方向，通过双频段隔离在同一孔径上同时支持 Ku 波段和 Ka 波段工作，可满足多轨道卫星网络的兼容接入需求，进一步提升终端通用性和频谱利用效率。

4.4 全息超表面天线赋能的无人机低空经济

无人机作为低空经济的核心载体，在物流配送、应急救援等场景具有广阔应用前景。机载通信系统不仅需要突破视距限制、保障链路可靠性并承载海量数据，还需具备对周边环境的精准感知能力。现有无人机通信与感知方案主要依赖全向辐射天线和微带贴片阵列：前者安装便捷但增益有限，缺乏波束成形能力，难以满足定向通信与雷达探测需求；后者虽可通过组阵提升增益，但通常波束指向固定或依赖机械扫描，响应速度受限，难以适应高速机动场景。若借鉴地面蜂窝网络成熟的相控阵技术路线，虽然能够实现高增益电子扫描波束，但复杂的

功分网络、有源移相器和功率放大器阵列会显著增加重量、功耗和成本，不利于载荷与续航时间受限的飞行平台。

全息超表面天线凭借轻薄平板形态和串行馈电架构，可将系统厚度压缩至毫米量级并大幅减少射频链路数量，从而有可能降低机载载荷和系统功耗；同时，其灵活波束赋形能力支持毫秒级电子扫描与多波束并行生成，既可建立高容量通信链路，又可通过回波信号处理实现环境感知与目标识别，为无人机集群协同、自主避障和精准作业提供硬件基础。



05

总结与展望



5.1 大规模应用面临的技术挑战

全息超表面具有低功耗、轻薄化、易扩展等特点，有望在未来无线通信基站、通感一体化、卫星通信、无人机低空通信等应用场景中发挥重要作用。随着应用场景从实验室样机走向大规模工程部署，其面临的挑战也将从单点性能验证转向长期稳定运行、规模化阵列效率和系统级集成能力等综合问题。因此，仍需要围绕辐射效率、结构集成与稳定性、全息波束赋形传输技术等方面持续优化。

在辐射效率方面，如何克服多源损耗的耦合制约是提升全息超表面天线辐射效率的关键。当前研究与工程经验表明，通过漏泄波导耦合架构抑制能量逸散、特征电流节点弱耦合方法解耦插入损耗、空气填充间隙波导降低介质损耗以及透明化偏置网络抑制寄生扰动等创新路径，有望突破效率瓶颈，进一步提升增益，为全息超表面天线的高效工程化应用铺平道路。

在结构集成与稳定性方面，全息超表面的轻薄化特征有利于降低系统重量和部署成本，但在大规模部署条件下，也会对长期机械稳定性、环境适应性和批量一致性提出更高要求。当阵列规模进一步

增大时，局部结构偏差还可能累积为系统级性能波动。因此，未来需要在介质材料选择、封装设计和环境适应性测试等方面开展系统优化。此外，随着全息超表面单元数量增加，驱动电路的复杂度也将同步上升。面向大规模应用，海量可重构单元需要稳定、低功耗、低时延的协同控制，这将带来控制通道数量增加、布线复杂、供电管理困难等挑战。未来需要进一步推动控制电路向小型化、集成化和低功耗方向演进，提升系统在卫星、无人机等各类平台上的部署灵活性与规模化扩展能力。

在全息波束赋形传输技术方面，大规模全息超表面阵列将显著提升空间自由度和波前调控能力，但也会带来全息波束赋形的复杂度增加。同时，阵列近场区域也将随着阵列规模的扩大而扩展，当用户处于近场区域时，电磁波的球面波传播特性使波束赋形从传统的角度域指向控制进一步拓展为距离、角度的联合调控。如何在超大规模阵列条件下实现低复杂度、高精度的全息波束赋形，是该技术走向大规模应用的核心挑战之一。

5.2 技术演进路线

面向上述大规模应用挑战，全息超表面技术的演进路线需要围绕辐射效率、结构集成与稳定性、全息波束赋形传输技术等方向协同推进，并逐步从器件级优化走向阵列级扩展、系统级验证和网络级应用。

在辐射效率方面，全息超表面技术将围绕低损耗馈电、高效率辐射和宽带波束调控持续演进。

未来可通过优化漏泄波导结构、降低介质与导体损耗、抑制单元互耦和寄生扰动、改进宽带波束赋形机制等方式，提升大规模阵列的能量利用效率和波束控制精度。在此基础上，全息超表面有望在毫米波、亚太赫兹等高频段实现更高阵列增益和更优能效表现，为6G大容量接入、通感一体化和空天地一体化通信提供关键支撑。



在结构集成方面，全息超表面技术将从轻薄化设计进一步走向高可靠封装与工程化结构设计。未来需要面向基站、卫星终端、无人机载荷等不同应用环境，开展材料、工艺、封装和安装方式的一体化优化，提升天线在温度变化、机械振动、长期服役和复杂安装条件下的结构一致性与电磁稳定性。在控制电路方面，全息超表面技术将向高集成、低功耗、智能化控制方向发展。未来需要将编码控制、驱动电路、供电管理和状态监测等功能进一步集成，形成适配大规模可重构阵列的控制架构。随着结构可靠性与集成度提升，全息超表面才能支撑更大孔径、更高密度和更复杂场景下的持续稳定运行，逐步演进为空间电磁环境的智能调控平台。

在全息波束赋形传输技术方面，未来将从面向有限阵列规模和远场波束指向控制的波束赋形，逐步演进为面向超大规模阵列、近远场混合场景的

精细化波前调控。随着阵列孔径持续扩大，全息超表面的近场区域将显著扩展，波束赋形需要从传统角度域设计进一步拓展到距离、角度等多维联合调控。在此基础上，可进一步发展全息图案叠加等低复杂度全息波束赋形技术，使全息超表面在保持低功耗和低复杂度优势的同时，充分释放超大规模阵列带来的空间自由度和波前调控能力。

在上述技术路线的支撑下，全息超表面的应用边界将进一步拓展。其低功耗、轻薄化和大孔径特性不仅适用于地面基站超大规模 MIMO，也可延伸至低轨卫星终端、无人机低空通信、移动终端以及通信感知一体化等场景。随着器件工艺、阵列设计、控制芯片和系统算法的不断成熟，全息超表面有望逐步完成从实验室样机到场景化试验、再到规模化部署的演进。

5.3 未来展望

信息传输速率与效率始终是通信系统服务数字社会的核心价值所在，而底层天线技术的革新则是推动这一能力持续跃升的根本动力。进入 5G 时代，超大规模多天线技术在提升频谱效率方面已展现出巨大潜力，但传统相控阵架构固有的复杂性——依赖大量移相器、功分网络与功率放大器——导致其在功耗、成本与形态方面面临严峻挑战，难以满足 6G 对低成本、高能效的严苛要求，成为制约技术规模化部署的关键瓶颈。

面向 6G 时代，沉浸式全息移动通信的愿景对无线接口提出了全新要求：不仅需要支持超高吞吐量的数据传输，更要实现三维空间内精细的波前调控与低功耗辐射。在此背景下，全息超表面技术通过将光学全息原理引入微波频段，以亚波长密集排布的超材料单元构建连续电磁孔径，为上述挑战提供了突破性解决路径。这一技术范式以“低功耗、大规模、高集成”为核心特征，既契合 6G 业务对极致能效的需求，也顺应了电磁理论向连续孔径演进的发展趋势。

全息超表面作为超大规模 MIMO 的潜在实现方案，其核心价值在于重构了天线系统的能效曲线。通过“串行代并行”的馈电架构，在保持波束赋形灵活性的同时，将射频链路数量压缩至与数据流数量同量级，显著降低了系统复杂度与能耗。可重构全息超表面作为一种亚波长密集阵列，所带来的传输特性、串行馈电架构下的漏波功率约束、单元间强互耦效应的非线性影响，均对信道估计、波束赋形与系统优化提出了全新挑战。而超材料工艺的成熟、人工智能算法的进步以及新型半导体器件的

发展，正为克服这些障碍提供日益丰富的技术手段。

全息超表面的技术优势不仅体现在地面基站场景。其超轻薄的形态特征，使其能够突破传统相控阵的平台适配限制，向低轨卫星终端、无人机载荷、移动终端等场景延伸。同时，全息超表面的轻薄特性与低功耗优势，与以用户为中心的网络架构高度契合，为未来网络的柔性部署与绿色运营提供了硬件基础。

展望未来，全息超表面技术将不仅局限于通信功能的增强。其大孔径特性与灵活的波束操控能力，天然适用于通信感知一体化场景，可同时实现高速数据传输与高分辨率环境感知；幅度响应的线性可加性支持多波束并行生成，为多点同时接入与多目标跟踪提供了低复杂度方案。这些功能维度的拓展，将使全息超表面从单纯的通信管道演变为智能化的空间信息接口。

能效优化始终是全息超表面技术发展的主线。从串行馈电架构的漏波功率约束优化，到动态元件的精细化功耗管理，再到基于业务需求的智能休眠机制，“绿色全息”理念将贯穿技术与产业化的全生命周期，助力通信行业实现可持续发展目标。

综上所述，全息超表面技术正站在从理论突破走向规模应用的关键节点。通过阵列规模的演进、能效性能的极致优化、智能算法的深度融合以及应用场景的多元拓展，该技术有望重塑 6G 无线接口的基本形态。作为超大规模天线阵列的重要候选方案，全息超表面将为构建沉浸式全息移动通信网络、实现物理与数字世界的无缝融合奠定坚实的技术基石。

参考文献

- [1] 中信科移动通信技术有限公司, 无线移动通信全国重点实验室 (中国信科), 北京大学, 超维度天线 (E-MIMO) 技术白皮书, 2023 年 9 月.
- [2] Report ITU-R M.2516, “Future Technology Trends of Terrestrial IMT Systems Towards 2030 and Beyond,” Jun. 2022.
- [3] S. Chen, Y.-C. Liang, S. Sun, S. Kang, W. Chen, and M. Peng, “Vision, Requirements, and Technology Trend of 6G: How to Tackle the Challenges of System Coverage, Capacity, User Data-Rate and Movement Speed,” *IEEE Wireless Commun.*, vol. 27, no. 2, pp. 218–228, Apr. 2020.
- [4] S. Chen and S. Kang, “The Dual Iconic Features and Key Enabling Technologies of 6G,” *Engineering*, Sept. 2023.
- [5] Z. Wang, Y. Du, K. Wei, K. Han, X. Xu, G. Wei, W. Tong, P. Zhu, J. Ma, J. Wang, G. Wang, X. Yan, J. Xiang, H. Huang, R. Li, X. Wang, Y. Wang, S. Sun, S. Suo, Q. Gao, and X. Su, “Vision, Application Scenarios, and Key Technology Trends for 6G Mobile Communications,” *Sci. China Inf. Sci.*, vol. 65, no. 5, pp. 151301, May 2022.
- [6] Z. Wang, J. Zhang, H. Du, D. Niyato, S. Cui, B. Ai, M. Debbah, K. B. Letaief, and H. V. Poor, “A Tutorial on Extremely Large-Scale MIMO for 6G: Fundamentals, Signal Processing, and Applications,” *IEEE Commun. Surveys & Tut.*, vol. 26, no. 3, pp. 1560–1605, Jan. 2024.
- [7] 3GPP, “Study on 6G Scenarios and Requirements,” 3rd Generation Partnership Project (3GPP), Tech. Rep. TR 38.914, Mar. 2026.
- [8] E. J. Black, “Holographic Beamforming and MIMO,” *Pivotal Commware*, vol. 12, pp. 1–8, Apr. 2017.
- [9] R. Deng, Y. Zhang, H. Zhang, B. Di, H. Zhang, H. V. Poor, and L. Song, “Reconfigurable Holographic Surfaces for Ultra-Massive MIMO in 6G: Practical Design, Optimization and Implementation,” *IEEE J. Sel. Areas Commun.*, vol. 41, no. 8, pp. 2367–2379, Aug. 2023.
- [10] Next G Alliance, “Reply Liasion Statement to External Organizations, Development of IMT Vision for 2030 and Beyond,” 2021. [Online].
- [11] B. Di, Y. Zhang, R. Deng, M. Wang, S. Sun, and L. Song, “Holographic Metasurfaces for Extremely Large-Scale MIMO Communications: Design, Implementation, and Experiment Results,” *IEEE Wireless Commun.*, Nov. 2025.
- [12] C. Huang, S. Hu, G. C. Alexandropoulos, A. Zappone, C. Yuen, R. Zhang, M. Di Renzo, and M. Debbah, “Holographic MIMO Surfaces for 6G Wireless Networks: Opportunities, Challenges, and Trends,” *IEEE Wireless Commun.*, vol. 27, no. 5, pp. 118–125, Oct. 2020.
- [13] C. Huang, A. Zappone, G. C. Alexandropoulos, M. Debbah, and C. Yuen, “Reconfigurable Intelligent Surfaces for Energy Efficiency in Wireless Communication,” *IEEE Trans. Wireless Commun.*, vol. 18, no. 8, pp. 4157–4170, Aug. 2019.
- [14] G. A. Deschamps, “Some Remarks on Radio-Frequency Holography,” *Proc. IEEE*, vol. 55, no. 4, pp. 570–571, Apr. 1967.

- [15] D. R. Smith, O. Yurduseven, L. P. Mancera, P. Bowen, and N. B. Kundtz, “Analysis of a waveguide-fed metasurface antenna,” *Phys. Rev. Appl.*, vol. 8, no. 5, Nov. 2017.
- [16] R. Deng, Y. Zhang, H. Zhang, B. Di, H. Zhang, and L. Song, “Reconfigurable Holographic Surface: A New Paradigm to Implement Holographic Radio,” *IEEE Veh. Technol. Mag.*, vol. 18, no. 1, pp. 20–28, Mar. 2023.
- [17] B. Di, S. Zhang, Z. Han, and R. Zhang, “Holographic Beamforming with Leakage Power Constraints,” *IEEE Wireless Commun.*, vol. 32, no. 4, pp. 14–21, Aug. 2025.
- [18] H. Zhang, H. Zhang, B. Di, M. Di Renzo, Z. Han, H. V. Poor, and L. Song, “Holographic Integrated Sensing and Communication,” *IEEE J. Sel. Areas Commun.*, vol. 40, no. 7, pp. 2114–2130, Jul. 2022.
- [19] N. Shlezinger, O. Dicker, Y. C. Eldar, I. Yoo, M. F. Imani, and D. R. Smith, “Dynamic Metasurface Antennas for Uplink Massive MIMO Systems,” *IEEE Trans. Commun.*, vol. 67, no. 10, pp. 6829–6843, Oct. 2019.
- [20] R. Deng, B. Di, H. Zhang, D. Niyato, Z. Han, H. V. Poor, and L. Song, “Reconfigurable Holographic Surfaces for Future Wireless Communications,” *IEEE Wireless Commun.*, vol. 28, no. 6, pp. 126–131, Dec. 2021.
- [21] Y. Chen, X. Guo, G. Zhou, S. Jin, D. W. K. Ng, and Z. Wang, “Unified Far-Field and Near-Field in Holographic MIMO: A Wavenumber-Domain Perspective,” *IEEE Commun. Mag.*, vol. 63, no. 1, pp. 30–36, Jan. 2025.
- [22] R. Deng, B. Di, H. Zhang, and L. Song, “HDMA: Holographic-Pattern Division Multiple Access,” *IEEE J. Sel. Areas Commun.*, vol. 40, no. 4, pp. 1317–1332, Apr. 2022.
- [23] J. An, C. Yuen, C. Huang, M. Debbah, H. V. Poor, and L. Hanzo, “A Tutorial on Holographic MIMO Communications - Part II: Performance Analysis and Holographic Beamforming,” *IEEE Commun. Lett.*, vol. 27, no. 7, pp. 1669–1673, Jul. 2023.
- [24] S. Yue, S. Zeng, L. Liu, Y. C. Eldar, and B. Di, “Hybrid Near-Far Field Channel Estimation for Holographic MIMO Communications,” *IEEE Trans. Wireless Commun.*, vol. 23, no. 11, pp. 15798–15813, Nov. 2024.
- [25] P. Zhu, W. Ni, and X. Wang, “Integrated Sensing and Communication with Reconfigurable Holographic Surface,” *IEEE Trans. Commun.*, vol. 73, no. 11, pp. 10377–10390, Nov. 2025.
- [26] B. Wei, Z. Li, Y. Ma, Z. Wang, and J. Wang, “A 2-D Fixed-Frequency Beam-Scanning Leaky Wave Antenna Array for Millimeter-Wave Applications,” *IEEE Trans. Antennas Propag.*, vol. 72, no. 6, pp. 4888–4899, Jun. 2024.
- [27] B. Di, H. Zhang, Z. Han, R. Zhang, and L. Song, “Reconfigurable Holographic Surface: A New Paradigm for Ultra-Massive MIMO,” *IEEE Trans. Cogn. Commun. Netw.*, vol. 11, no. 6, pp. 3761–3783, Dec. 2025.
- [28] M. C. Johnson, S. L. Brunton, N. B. Kundtz, and N. J. Kutz, “Extremumseeking Control of the Beam Pattern of a Reconfigurable Holographic Metamaterial Antenna,” *J. Opt. Soc. Amer. A, Opt. Image Sci.*, vol. 33, no. 1, pp. 59–68, Jan. 2016.

- [29] S. Zhang, Y. Zhang, Y. Liu, and B. Di, “Codebook Design and Beam Alignment for IOS-Aided Communications: From the Near-Field and Far-Field Boundary Perspective,” *IEEE Trans. Wireless Commun.*, vol. 24, no. 12, pp. 9826–9839, Dec. 2025.
- [30] D. R. Smith, O. Yurduseven, L. P. Mancera, P. Bowen, and N. B. Kundtz, “Analysis of a Waveguide-Fed Metasurface Antenna,” *Phys. Rev. Applied*, vol. 8, no. 5, p. 054048, Nov. 2017.
- [31] R. Deng, B. Di, H. Zhang, Y. Tan, and L. Song, “Reconfigurable Holographic Surface-Enabled Multi-User Wireless Communications: Amplitude-Controlled Holographic Beamforming,” *IEEE Trans. Wireless Commun.*, vol. 21, no. 8, pp. 6003–6017, Aug. 2022.
- [32] X. Hu, R. Deng, B. Di, H. Zhang, and L. Song, “Holographic Beamforming for Ultra Massive MIMO with Limited Radiation Amplitudes: How Many Quantized Bits Do We Need?,” *IEEE Commun. Lett.*, vol. 26, no. 6, pp. 1403–1407, Jun. 2022.
- [33] H. Zhang, N. Shlezinger, F. Guidi, D. Dardari, M. F. Imani, and Y. C. Eldar, “Beam Focusing for Near-Field Multiuser MIMO Communications,” *IEEE Trans. Wireless Commun.*, vol. 21, no. 9, pp. 7476–7490, Sept. 2022.
- [34] L. Wei, C. Huang, G. C. Alexandropoulos, Z. Yang, J. Yang, W. E. Sha, Z. Zhang, M. Debbah, and C. Yuen, “Tri-Polarized Holographic MIMO Surface in Near-Field: Channel Modeling and Precoding Design,” *arXiv preprint arXiv:2211.03479*, Nov. 2022.
- [35] X. Wu, F. Hou, Y. Li, S. Zhao, S. Zhang, H. Xue, M. Chang, J. Han, H. Liu, and L. Li, “Multitarget Wireless Power Transfer System Strategy Based on Metasurface-Holography Multifocal Beams,” *IEEE Trans. Microw. Theory Techn.*, vol. 71, no. 8, pp. 3479–3489, Aug. 2023.
- [36] S. Zhang, Y. Zhang, H. Hashida, Y. C. Eldar, M. Di Renzo, and B. Di, “Fluid Antenna Systems Enabled by Reconfigurable Holographic Surfaces: Beamforming Design and Experimental Validation,” *IEEE J. Sel. Areas Commun.*, vol. 44, pp. 1417–1431, Oct. 2026.
- [37] S. Zeng, H. Zhang, B. Di, H. Zhang, Z. Shao, Z. Han, H. V. Poor, and L. Song, “Holographic Beamforming for Integrated Sensing and Communication with Mutual Coupling Effects,” *IEEE J. Sel. Areas Commun.*, Sept. 2025.



中国信科



中信科移动

中信科移动通信技术股份有限公司
CICT Mobile Communication Technology Co., Ltd.

网址: www.cictmobile.com