
高维度涡旋电磁波复用超表面

作者：writer 来源：科学网

本文原地址：<https://www.iikx.com/news/progress/41844.html>

本文仅供学习交流之用，版权归原作者所有，请勿用于商业用途！

高维度涡旋电磁波复用超表面。 导读

轨道角动量（OAM）是电磁波固有的一种空间模式属性，表现为波前在传播过程中呈现螺旋形的相位结构，因此常被称为涡旋波束。不同的OAM模式具有不同的螺旋相位分布与场结构；这些不同模式在数学意义上彼此正交，作为相互独立的复用通道，为通信系统引入新的物理维度，有望显著提升系统的通信容量。近日，香港城市大学电机工程系、太赫兹及毫米波全国重点实验室吴耿波教授团队提出了一种高维度OAM复用的超表面实现方案：通过FPGA驱动的时空编码序列，在一块可编程超表面单一紧凑的孔径上同时实现对涡旋电磁波相位、幅度、频率、极化以及动量特性的灵活调控，并在OAM模式—极化—频率三种正交维度上进行联合复用。更重要的是，该超表面不仅能塑造波束，还可借助对各OAM模式相位与幅度的调制直接将基带信息写入波束，从而减少对外部调制器、混频器与高速数模转换器等传统射频模块的依赖，显著降低发射机硬件成本。该工作为构建小型化、软件可定义、可扩展的高维无线发射平台提供了新思路，在短距超高速连接、设备间互联与数据中心通信等场景中展现出广阔应用前景。相关研究成果以High-dimensional multiplexing through vortex electromagnetic wave manipulation by space – time – coding metasurfaces，为题发表于《Light: Science Applications》。香港城市大学的杨晨峰和王思然为论文的共同第一作者，吴耿波为论文的通讯作者。

研究背景

传统OAM涡旋波束的产生方法包括螺旋相位板、柱透镜等光学器件，以及均匀圆形天线阵列、环形行波天线等电磁器件。超表面作为一种由亚波长超构原子组成的薄型二维结构，能够以低成本、轻量化且高效率的方式重构电磁波波前，因此也被广泛用于涡旋波束的产生与操控。然而，现有大量OAM生成方案仍依赖无源结构，器件一旦加工完成便只能输出预设的固定轨道角动量模式，缺乏动态可重构能力，难以满足未来高容量、强自适应通信系统对按需生成、快速切换、灵活扩展的需求。尽管近年来出现了多种可编程超表面用于实现可切换的OAM电磁波，但这类方案通常仍以单一模式输出为主，难以在同一孔径内同时生成并独立操控多个OAM模式，从而限制了基于OAM的模式复用与信道数扩展，并进一步增加系统架构复杂度与硬件开销。

研究亮点

在此背景下，团队提出了双极化异步时空编码超表面方案，将时间调制机制引入传统可编程超表面设计，实现电磁波在空间域，极化域与时间域的协同调控，从而构建高维度复用能力。该方案可在单一超表面口径上同时开辟多条并行信道，实现多信道的同步传输，显著提升链路容量与系统集成度。如图1所示，该超表面通过时空编码对散射响应进行精细调控，实现散射波相位与幅

度的连续可调，从而按需生成携带不同OAM模式的涡旋波束。与此同时，研究团队将超表面孔径划分为两个子区域，分别加载不同周期的编码序列进行异步调制，使系统在产生涡旋波束的同时进一步引入频率自由度，实现通信复用。由于超表面单元支持双线极化工作，该方案还可在正交极化之间并行传输信息，进一步扩展复用维度与系统容量。

图1：基于提出的双极化异步时空编码超表面的高维复用系统概念示意图

研究团队给出了实现多种OAM叠加与调制的电磁波前的设计流程：将待传输信息对应的相位与幅度直接编码到各个轨道角动量模式的电磁波上，得到相应的模式电场；随后将多个模式电场进行叠加，构建目标的复用涡旋场。最后，把该目标场分布等效映射为超表面所需的相位与幅度编码，实现多模轨道角动量波束的同步生成，并完成信息的直接写入与调制（对应图2）。

图2：用于生成携带信息的多模式OAM所需等效相位与幅度分布获取过程示意图

图3展示了在两种OAM模式、两种正交极化以及两个频率通道共同构成的高维复用条件下的实验结果。可以看到，在不同频率通道与正交极化通道中，各轨道角动量模式均可实现有效解复用；对应的星座图中，QPSK调制的四个聚类点清晰可辨，表明信号质量良好。与此同时，各通道传输的图像内容能够被高准确度地解调与重构，进一步验证了在高维度复用系统中并行信道的可分离性以及信息恢复的可靠性。

图3：实测高维复用通信结果。a、c

高维信号空间中已启用的通信信道。彩色球表示已启用信道，白色球表示未启用信道。b、d两组实验中各个信道的实测星座图与恢复的图像，展示了该高维复用系统稳定的通信性能

总结与展望

本研究提出的基于时空调制超表面的通信硬件不仅能够在有限的孔径内同时利用轨道角动量、极化和频率实现高维复用，从而提升无线容量；还能够通过将数据直接写入涡旋波束，避免使用冗余的外部调制器和射频链路，从而简化发射机结构。

展望未来，该框架还可进一步融合时间/空间/码分等额外复用维度以拓展通信维数，并可分配部分超表面单元用于到达角估计等感知功能以实现通信感知一体化与智能操作，甚至利用多OAM模式支撑量子密钥分发以增强网络安全性。该突破有望为紧凑、软件可定义的短距超高速通信带来新机遇，例如无线传能、电子设备间直连以及数据中心之间的互连。（来源：LightScienceApplications微信公众号）

相关论文信息：<https://doi.org/10.1038/s41377-026-02232-6>

特别声明：本文转载仅仅是出于传播信息的需要，并不意味着代表本网站观点或证实其内容的真实性；如其他媒体、网站或个人从本网站转载使用，须保留本网站注明的“来源”，并自负版权等法律责任；作者如果不希望被转载或者联系转载稿费等事宜，请与我们接洽。

作者：吴耿波等 来源：《光：科学与应用》

更多 科学进展 请访问 <https://www.iikx.com/news/progress/>

本文版权归原作者所有，请勿用于商业用途，[爱科学iikx.com](https://www.iikx.com)转发