

涡旋波超表面研究现状与应用进展

司黎明^{1,2,3}, 陈璐璐^{1,2}, 孙厚军^{1,2,3}, 吕昕^{1,2}

1. 北京理工大学集成电路与电子学院, 北京 100081
2. 毫米波与太赫兹技术北京市重点实验室, 北京 100081
3. 北京理工大学唐山研究院, 唐山 063000

摘要 涡旋波超表面以其独特的电磁波操控能力和轨道角动量(OAM)特性,为电磁波的精准调控和应用提供了新的自由度。阐述了涡旋波的基本理论,包括其产生的原理及携带的轨道角动量的特性。介绍了涡旋波超表面的两大类型——反射型和透射型超表面,总结了涡旋波测量技术,为评估涡旋波超表面的性能提供了科学有效的方法。进而介绍了涡旋波超表面在提高无线通信系统的网络空间安全、数据传输容量、雷达系统的目标探测能力以及全息成像技术的成像质量等方面的应用。对涡旋波超表面的未来发展方向进行了展望,包括高阶多模式 OAM 波的研究、远距离传输中波束发散问题的解决、可重构涡旋波超表面的设计、OAM 隐秘信号传输以及多通道复用技术的开发等,为网络空间安全的建设提供支撑,为无线通信、雷达探测以及光学成像等领域提供更加高效、灵活的技术解决方案。

关键词 涡旋波;超表面;轨道角动量

超表面是电磁超材料在二维空间上的对应物,通过和电磁场的相互作用,产生自然材料所不具备的各种独特的电磁响应^[1]。超表面是在亚波长尺度上由周期或非周期基本单元组成的人工设计结构。通过改变超表面基本单元的结构、布局和工作模式,实现对入射电磁波振幅、相位和偏振等方面的

局部且精确地调控。相较于三维超材料,超表面具有结构简单、尺寸小、损耗低及集成度高等优势。

涡旋波,又称为轨道角动量(orbital angular momentum, OAM)波,是一种具有螺旋相位波前的电磁波^[2]。在电磁学和光学领域,当电磁波具有螺旋形状的相位波前时^[3],这种独特的空间结构赋予

收稿日期:2024-02-01;修回日期:2024-03-28

基金项目:国家重点研发计划项目(2022YFF0604801);国家自然科学基金项目(62271056,62171186,62201037);北京市自然科学基金-海淀原始创新联合基金项目(L222042);教育部供需对接就业育人项目——重点领域校企合作项目(20230101577);教育部产学研合作协同育人项目(220802936304151,221003880110032);高等学校学科科研创新引智计划项目(B14010)

作者简介:司黎明,副教授,研究方向为电磁场与微波技术,电子信箱:lms@bit.edu.cn

引用格式:司黎明,陈璐璐,孙厚军,等. 涡旋波超表面研究现状与应用进展[J]. 科技导报, 2024, 42(12): 107-124;

doi: 10.3981/j.issn.1000-7857.2024.02.00240

了电子或光子沿其传播方向的旋转运动特征,从而致使OAM的产生。涡旋波的每个波动模式都可以被准确地表示为具有特定的量化OAM值,即拓扑荷。区别于用来描述电磁波辐射极化状态的自旋角动量(spin angular momentum, SAM),OAM的无限模式和模式间的正交性使其在不增加频谱资源的情况下显著扩大信道容量,为电磁波的调制和信息承载提供了新的自由度。

图1为涡旋波超表面的类型、测量方法和应用前景。作为一种新兴的技术,涡旋波超表面在网络空间安全通信^[3]、雷达^[4]和全息^[5]等多个领域展现出广阔的应用前景。在通信领域,涡旋波的每一个模式都可以作为一个独立的信息传输通道,为解决无线通信中频谱拥挤问题提供了有效的处理思路^[3]。在雷达领域,相较于平面波,涡旋波超表面产生的回波信息中具有方位角信息,明显提高了雷达成像和探测的分辨率。在全息领域,通过将轨道角动量和频率、偏振、时空等多种形式结合产生OAM复用全息,这种复用技术在安全标识、数据存储、医疗成像等领域具有广泛的应用潜力。值得关注的是,在网络空间安全领域,涡旋波的螺旋相位结构赋予其在信号传播过程中极高的隐蔽性,使得非授权接收方难以检测和解码,攻击者难以通过传统解码方法解读信号内容。



图1 涡旋波超表面的类型、测量方法与应用

1 涡旋电磁波基础理论

根据电动力学理论,电磁场包含能量和动量2种基本属性。电磁波动量则包括线动量和角动量。角动量 \mathbf{J} 定义^[2]如下:

$$\mathbf{J} = \int \varepsilon_0 \mathbf{r} \times \text{Re}\{\mathbf{E} \times \mathbf{B}^*\} dV \quad (1)$$

式中, ε_0 为空气或真空中的电容率, \mathbf{r} 为电子距离原点位置的位置矢量, \mathbf{E} 为电场强度, \mathbf{B}^* 为磁感应强度的复共轭, V 表示积分区域的体积。

如图2所示,角动量可以被细分为与极化相关的自旋角动量和与空间相位分布相关的轨道角动量,定义如下:

$$\mathbf{S} = \varepsilon_0 \int \text{Re}\{\mathbf{E}^* \times \mathbf{A}\} dV \quad (2)$$

$$\mathbf{L} = \varepsilon_0 \int \text{Re}\{i\mathbf{E}^* [-i(\mathbf{r} \times \nabla) \cdot \mathbf{A}]\} dV \quad (3)$$

式中, \mathbf{S} 和 \mathbf{L} 分别表示自旋角动量和轨道角动量, ∇ 为梯度运算符, \mathbf{A} 为矢量位函数。

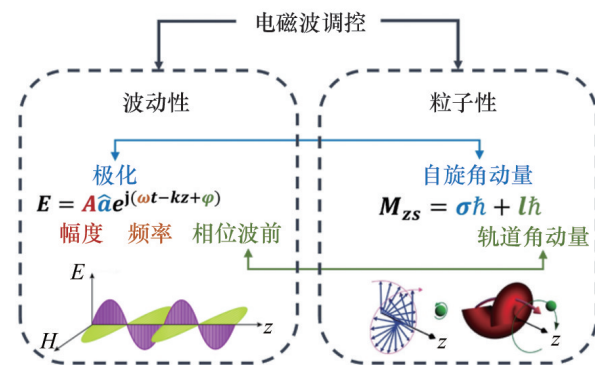


图2 电磁波可调控参数

携带轨道角动量的波束被称为涡旋波束^[2-3]。涡旋波束可分为拉盖尔-高斯(Laguerre-Gaussian beams, LG)^[6]波束、贝塞尔(Bessel)波束^[7]和厄米-高斯(Hermite-Gaussian beams, HG)波束^[8]。图3展示了LG波束的光强分布,LG波束具有螺旋形的相位波前,其强度在中心呈现圆形的空心结构。通过在柱坐标系下对波动方程进行求解可得到LG波束的光场分布方程:

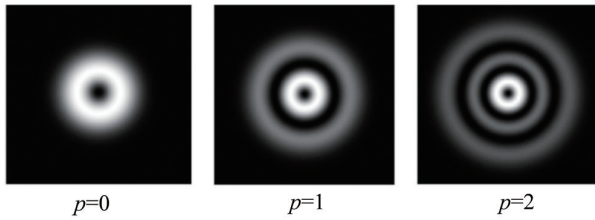


图3 不同径向指数的LG光束光强分布

$$\begin{aligned}
 LG_{p,l}(r,\varphi,z) = & \sqrt{\frac{2p!}{\pi(p+|l|!)}} \frac{1}{\omega(z)} \left(\frac{r\sqrt{2}}{\omega(z)}\right)^{|l|} \\
 & \cdot L_p^{|l|} \left(\frac{2r^2}{\omega^2(z)}\right) \cdot \exp\left(\frac{-r^2}{\omega^2(z)}\right) \\
 & \cdot \exp\left(\frac{-ikr^2z}{2R(z)}\right) \\
 & \cdot \exp\left[i(2p+|l|+1)\tan^{-1}\frac{z}{z_R}\right] \\
 & \exp(il\varphi)
 \end{aligned} \quad (4)$$

式中, $LG_{p,l}$ 为拉盖尔-高斯波束的模式函数, p 和 l 分别代表径向和角量子数, r 为到光束中心的径向距离, φ 为相对于参考轴的角坐标, $\omega(z)$ 为涡旋波束在传播距离为 z 时的束腰半径, $R(z)$ 为在传播距离 z 时波前的曲率, $L_p^{|l|}$ 表示拉盖尔缔合多项式, z_R 为瑞利距离, k 为电磁波波数, 定义为 $k = 2\pi/\lambda$ 。

如图4所示, Bessel波束的结构特征是: 以一个明亮的中心点为核心, 周围被若干暗色的同心圆环包围。

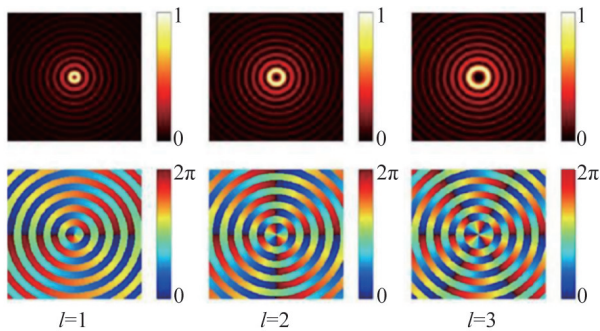


图4 不同拓扑电荷数的Bessel波束的光强和相位分布

Bessel波束具有无衍射效应^[7], 允许光束在长距离传播时保持光强分布的一致性。其光场方程为

$$E_n(\mathbf{r}, \varphi, z) = A e^{ik_z z} J_n(k_r \mathbf{r}) e^{\pm i n \varphi} \quad (5)$$

式中, \mathbf{r} 是电子距离原点位置的位置矢量, A 是常数, k_z 为径向传播方向上的波矢量, k_r 为传播方向上的波矢量, $J_n(x)$ 为第一类 n 阶 Bessel 函数。

HG波束具有矩形的横截面, 如图5所示其强度分布呈现出交替的亮暗条纹, 条纹的方向和数量取决于其模式指数。

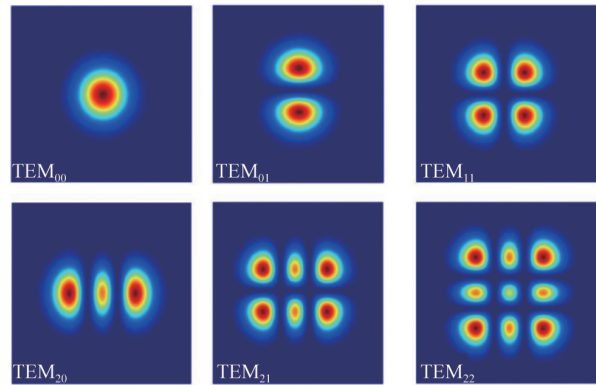


图5 HG波束光强分布

HG波束的光场分布为:

$$\begin{aligned}
 E = & \frac{A_{mn}\omega_0}{\sqrt{\omega_x(z)\omega_y(z)}} H_m \left[\frac{\sqrt{2x}}{\omega_x(z)} \right] \\
 & H_n \exp \left[-\frac{x^2}{\omega_x^2(z)} - \frac{y^2}{\omega_y^2(z)} \right] \times \left\{ -ik \left[\frac{x^2}{R_{mx}(z)} \right. \right. \\
 & \left. \left. + \frac{y^2}{R_{ny}(z)} - \varphi_{mn}(z) \right] \right\}
 \end{aligned} \quad (6)$$

式中, A_{mn} 表示振幅, $\varphi_{mn}(z)$ 为相位函数, H_m 、 H_n 分别为 x 方向的 m 阶和 y 方向的 n 阶 Hermite 多项式, $\omega_x(z)$ 和 $\omega_y(z)$ 分别为高斯光束 x 和 y 方向的束宽, $R_{mx}(z)$ 和 $R_{ny}(z)$ 则为曲率束宽, ω_0 为高斯光束在 $z=0$ 时的束宽。

涡旋波携带 $e^{il\varphi}$ 的相位因子, 其中 l 表示涡旋波的模式数。涡旋波不同模式之间相互正交, 即每一个不同的拓扑电荷数都可以被应用为一个独立的信息传输通道, 从而增加系统的总传输容量^[8-9]。除此以外, 拓扑电荷数 l 还可以通过计算涡旋波的模式纯度来作为生成 OAM 波的评估标准。模式纯度计算公式为^[10]

$$A_l = \frac{1}{2\pi} \int_{2\pi}^0 \mathbf{E}(\omega) e^{-il\varphi} d\omega \quad (7)$$

式中, A_l 表示拓扑电荷数为 l 的 OAM 波的振幅, $\mathbf{E}(\omega)$ 表示所选分析区域内不同方位角 ω 处的电场分布。

2 涡旋波超表面类型

传统意义上产生 OAM 波的方式包括螺旋相位片^[11]、阵列天线^[12]和行波天线^[13]等。这些方式都是通过引入相位因子 $e^{il\varphi}$ 从而产生具有特定拓扑荷的 OAM 波。螺旋相位片通过设计独特的螺旋结构来获得所需的相位波前^[14], 但是螺旋相位片只对特定的波长进行优化, 限制了其在宽带方面的应用。阵

列天线是通过精确的控制系统和复杂的馈电网络来产生具有特定模式的 OAM 波, 但这种馈电网络的复杂性不仅增加了系统的成本, 也提高了实际应用和维护的难度。而利用行波天线生成的 OAM 波则存在模式数量少、高阶模态效率低等不足。

近年来, 随着超表面技术的快速发展, 其在涡旋波的产生与控制方面展现出了显著的优势。表 1 为不同频段的 OAM 波生成方式和特点, 相较于传统的 OAM 波的生成方式, 超表面不仅可以灵活地调控电磁波波前, 还具有效率高、馈电网络简单、剖面低和易于集成到各类系统等优势。本节介绍生成 OAM 波的 2 种超表面类型——反射型超表面、透射型超表面, 并分析这些方法各自的特点及其在未来发展趋势中的潜在应用。

表 1 不同频段的 OAM 波产生方式和特点

方式	特点	频段
螺旋相位片 ^[11]	结构简单, 高精度, 高转换效率	微波、光学
超表面 ^[15-25]	可以灵活操控波前相位、振幅和偏振, 成本低, 尺寸小, 易于集成, 转换效率高, 有特定工作频率	微波、光学
Q-板 ^[15]	高转换效率, 成本低, 尺寸小, 易于集成, 模式纯度高	微波、光学
全息光栅 ^[16]	结构简单快速, 效率低	微波、光学
均匀圆阵列	通过激励相位差生成 OAM 波	微波
螺旋反射板 ^[17]	结构简单, 波束收敛效果好, 有特定工作频率, 难以确定拓扑电荷值	微波
空间光调制器 ^[18]	可灵活控制, 成本高	光学

2.1 反射型超表面

作为当前电磁领域的研究热点之一, 反射型超表面^[19]以其简单的系统设计和宽带特性, 在高数据传输的通信系统、成像技术以及复杂波前控制等应用中展现出了卓越的性能。

目前超表面的波前相位调制方式主要是 2 种: 一是传播相位调制, 通过改变超表面的结构参数来操控传播相位; 二是潘查拉特南-贝里 (Pancharatnam-Berry, PB) 相位^[20]调制, 通过旋转超表面单元有效地操控圆极化波的 PB 相位。然而, 基于 PB 相位的设计只能利用圆极化的交叉极化通道并产生共轭对称的波前分布。为了打破这种共轭耦合限制, Li 等^[21]提出了一种仅利用 PB 相位独立控制 OAM 波的圆极化状态的相位补偿方案, 实现了左

旋和右旋圆极化波束的任意拓扑电荷和偏转方向。研究人员设计了如图 6^[21]所示的相对带宽 67% 的单层宽带超表面, 在 (10~20) GHz 的频率范围内独立地生成具有不同拓扑电荷、偏转方向和偏振状态的

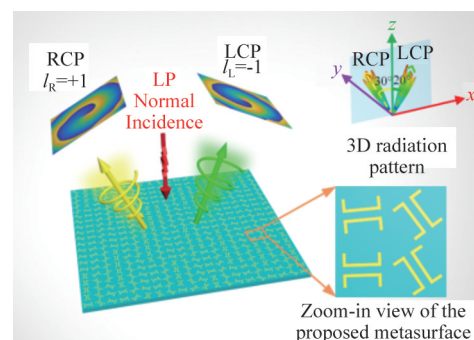


图 6 独立控制 OAM 波的模式和圆偏振的超表面示意

涡旋波,为未来无线通信系统中的应用提供了重要的技术基础。

超表面作为一种高效的电磁波控制技术,被广泛用于生成多模式的 OAM 波束。然而在多模 OAM 的应用场景中,设计一种既能高度集成又能独立实现极化和频率复用的超表面仍然是一个挑战。为此,Jiang 等^[22]提出了一种用于三频带三极化通道的单层反射型超表面。利用特定频率分量决定的谐振相位和准静态几何相位来操控双频段(Ku 和 K 频段)的正交线极化通道和 C&X 频段右旋圆极化通道。如图 7^[22]所示,超表面单元中引入了一个空心金属环作为隔离元素,不仅有效消除了右旋圆极化和正交线极化单元之间的强耦合而且还扩展了右旋圆极化通道的工作带宽。此外,这种单层反射型超表面在设计上具有很大的灵活性,可以通过简单的缩放将其应用于其他频段。

近年来,随着智能化设备及新兴技术的快速发展,网络数据流量呈现爆炸性增长。为了提高频谱利用率,Li 等^[23]提出了一种用于太赫兹频段的宽带双偏振双模式反射型超表面,通过提升载波频率至

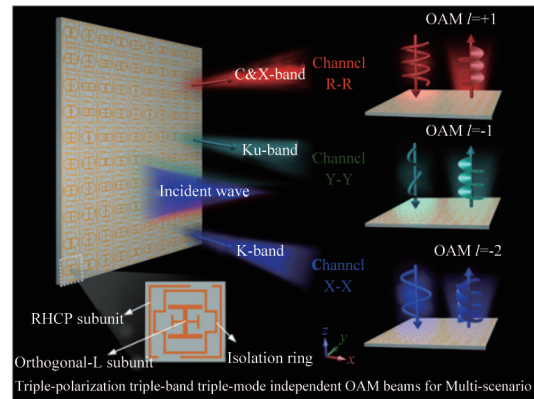


图7 单层共享孔径反射超表面示意

太赫兹频段^[24]来拓展通道容量,同时利用复用技术进一步增加独立通道数量。如图 8^[23]所示,超表面由 2 个不同半径的同心环组成,旨在产生轴向传播的 ± 1 模式的 OAM 波束。由于其各向同性结构,超表面对偏振不敏感,因此在(90~110)GHz 的频率范围内生成了 4 个独立且高纯度的 OAM 波束。基于该多功能超表面,研究人员实现了一个 48 Gbit/s 的太赫兹轨道角动量无线通信系统,有效地验证了超表面实现宽带多维 OAM 复用的可行性。

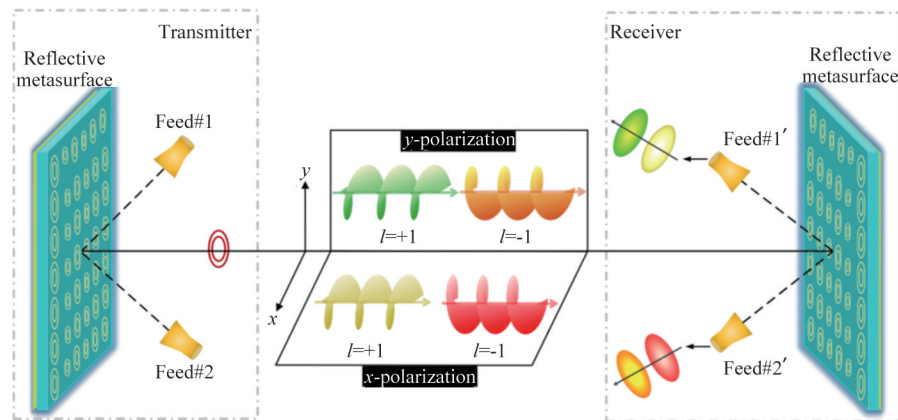


图8 太赫兹轨道角动量通信的双偏振双模式反射型超表面

无源超表面虽然结构简单,但是该类超表面在制造完成便固定电磁性能,限制了其在实际应用中的灵活性。为了适应不断变化的环境和多样化的应用需求,可重构和可编程超表面技术引起了学者的关注。Bai 等^[25]提出了一种由 1 位相位调制的反射型可编程超表面,通过外部控制信号实时调控电

磁响应,进而动态地产生多模式的涡旋波束。如图 9^[25]所示,通过在辐射贴片内集成正-本征-负(positive-intrinsic-negative, PIN)二极管实现对超表面单元共振特性的调制,从而获得低反射损耗和稳定的逆相位特性。在(28~30)GHz 频带范围内,通过可编程偏置电路调制超表面上的实时编码分布动

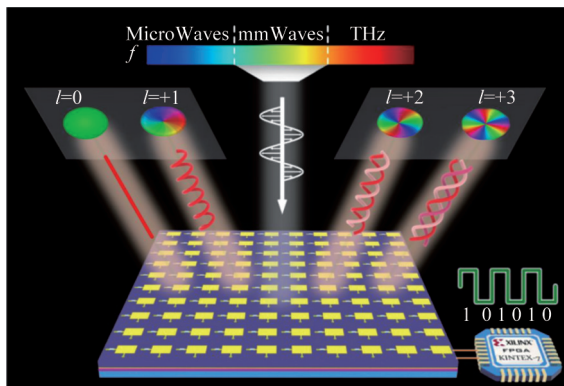


图9 可编程超表面生成动态毫米波OAM波束

态产生了拓扑电荷数 $l=0$ 、 $+1$ 、 $+2$ 和 $+3$ 这4种模式的涡旋波束,为毫米波和多模OAM技术的交叉融合提供了新的视角。

2.2 透射型超表面

反射型超表面的入射和反射电磁波位于超表面的同一侧,因此在设计时需要考虑馈源位置的影响。为了提高超表面设计的灵活性,研究人员采用透射型超表面生成OAM波。

目前,OAM发生器的设计大多只能产生少量不同的模式。为了扩展单个OAM发生器的信道容量,Liu等^[26]设计了一种圆极化辅助的全空间超表面,可根据不同的偏振状态、照明位置和入射波的入射方向产生6种OAM模式。如图10^[26]所示,基于几何相位和传播相位操控,超表面的内部圆形区域将正交圆极化入射波独立地转换成相应的携带不同OAM模式的交叉极化发射波,而外部方形区域

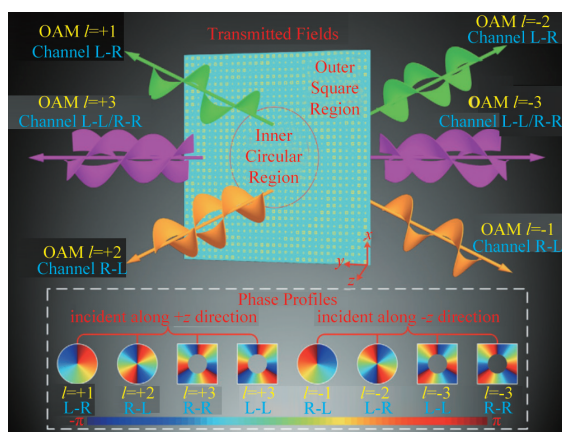


图10 圆极化辅助的全空间6种OAM模式

则将正交圆极化波发射成相应的同极化波。根据超原子的互易性和超表面的相位分布,当圆极化波照射到超表面的反面时产生另外3种不同的拓扑电荷。由于涡旋波束的正交偏振状态以及不同模式的OAM波束偏转角度不同,因此生成的OAM模式具有高纯度和低串扰的特点。该研究不仅可以增强单个超表面的集成和利用,而且在通信、成像、感测等领域存在潜在应用。

通过旋转超表面引入几何相位调控电磁波波前的方式,主要受限于圆极化的交叉极化通道。为了实现圆极化同极化通道的解耦,进一步拓展了极化传输通道的复用能力,Yuan等^[27]提出了一种超表面设计方法,通过分别旋转超表面的3层矩形贴片引入手性诱导相位作为新的自由度。在正交圆极化波入射条件下,结合手性诱导相位、传播相位和几何相位成功解耦并独立调控了所有的圆极化通道。设计得到的超表面能够生成具有4个独立拓扑荷的轨道角动量模式和4种任意折射波前(图11^[27])。这项工作不仅展示了超表面具有对所有圆极化通道完整且独立操控的能力,而且为可重构波束天线和无线通信系统等应用领域提供了新的技术途径。

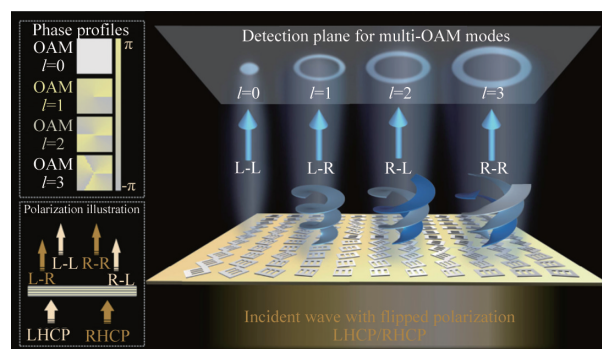


图11 四重极化通道中完全相位调制的超表面

反射型超表面因为存在金属地板,所以天然具有较高的工作效率。而透射型超表面则需要特定的设计来提高传输效率。提高效率的方法包括:采用多层谐振和互补结构的设计^[17,18],采用惠更斯超表面的形式。Xue等^[28]提出了一种位于单层印刷电路板上的双层金属结构惠更斯超表面。如图12^[28]

所示,该超表面顶层和底层金属层分别是由具有对称缺口的方形环和4个金属条组成。基于电磁谐振原理,通过调整单元结构参数改变等效阻抗大小,抑制反射能量的产生,进而提高超表面的透射效率。结果显示,该超表面能在28 GHz附近高效产生双极化OAM传输波(模式 $l=1$),且在28 GHz时达到23.4 dBi的峰值增益和 3.5° 的发散角。相较于传统OAM传输波束生成方法,该惠更斯超表面具有高增益、窄发散角和低成本组装的特点,极大促进涡旋波在无线通信领域的工程应用。

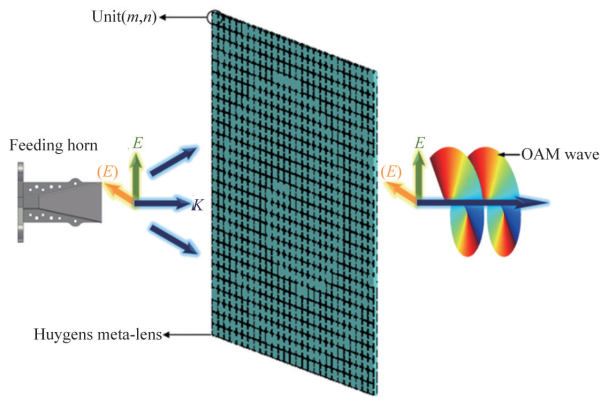


图12 利用惠更斯超表面高效生成双极化涡旋波

惠更斯超表面能够在实现高效率传输的同时调控电磁波的幅度和相位^[29]。然而这种调控方式并不支持幅度与相位的独立调控,这不仅增加了系统分析的复杂度,同时也使得独立偏振调控的难度加大。为了实现高效的幅度、相位和偏振独立调控, Yang等^[30]设计了一种包含2个外部交叉极化贴片和内部耦合结构的手性结构元原子。如图13^[30]所示该手性单元由输出 y 偏振上表面、中心有通孔的中间金属地和入射 x 偏振下表面组成,金属探针穿过通孔连接入射层与输出层,从而实现电磁波传输。通过改变单元的尺寸和旋转角度,可以分别调控传输相位和幅度,使幅度和相位调制完全解耦。同时改变入射和输出贴片间的相对旋转角度,可以实现完整的 2π 相移范围。仿真和实验结果证实可以通过操纵相位和振幅来有效地生成高阶贝塞尔光束,在电磁和光子领域具有广阔的应用前景。

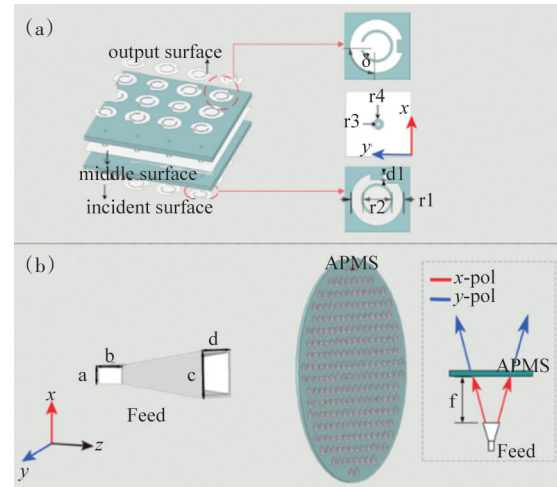


图13 同时控制振幅、相位和偏振的高效超表面

3 涡旋波测量技术

在当今科学研究和工程应用领域,精准的测量技术是推动技术革新和科学探索的基石。涡旋波测量可以看成涡旋波生成的逆过程,其关键在于如何在接收端对涡旋波的相位进行“反解旋”,即给涡旋波施加一个相位反转因子 $e^{-il\varphi}$ 。因此测量的难度在于准确识别涡旋电磁波的模式值 l ,表2展示了微波和光学领域OAM波的测量技术。

表2 涡旋波测量技术

方法	OAM模式	采样范围	系统复杂度	成本
干涉法 ^[31]	复合模式	2点	高	低
单点检测法 ^[32]	单模	1点	低	低
相位梯度法 ^[33]	单模	2点	低	低
圆形阵列天线 ^[34]	复合模式	整个波前	高	高
部分孔径接收 ^[35]	复合模式	部分波前	高	高
衍射光栅 ^[34]	复合模式	整个波前	低	低
模式分类器 ^[18]	复合模式	整个波前	低	低

3.1 微波测量法

涡旋电磁波的螺旋状波前导致在电磁波中心形成相位奇点。相位奇点的阶数,即环绕奇点一周的相位变化量,直接决定了OAM的模式数^[31]。虽然利用波束中的相位奇点检测涡旋波模式数的理论早已提出^[32],但是直到2010年, Uchida和Masa-

ya^[31]才通过实验观测到涡旋波的拓扑电荷。该实验首先将平面波束穿过由堆叠石墨膜制成的螺旋相位板,产生具有相位奇点的涡旋波束。如图 14^[31]所示,当平面波通过这样的相位奇点发生装置时,在入射平面波上留下螺旋波前特征,并且双棱镜使得穿过相位板的光束与平面电子波重叠。根据干涉条纹的分叉数来确定涡旋波的拓扑载荷,从而确定了 OAM 模式。在模态数量较低的涡旋波检测中,单点检测法^[33]同样是一种有效的手段。单点测量法通过在远场条件下对电场的垂直和横向分量进行单点采样,并依此近似计算轨道角动量,从而实现 OAM 的拓扑荷的计算。

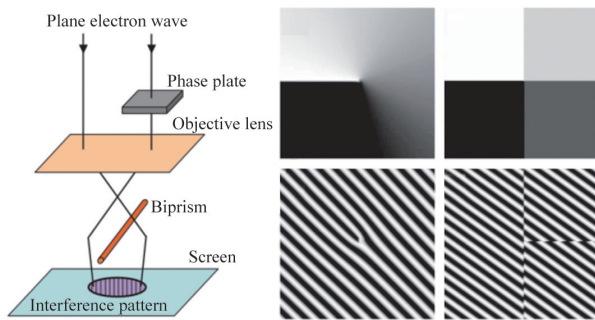


图 14 石墨薄膜螺旋状相位板与电子干涉图

干涉法是一种有效的单模 OAM 测量方法,然而该方法在多模态 OAM 波束检测的应用会导致接收设备的复杂度大幅提高。因此针对多个模式同时存在的复合模式检测, Xie 等^[34]提出射频频段下的基于圆形相位梯度的双模式 OAM 波测量方法。如图 15^[34]所示,通过测量以波束轴为中心并垂直于波束轴的接收圆周围的整个相位梯度,并计算其平均值和峰谷因子来准确地测量双模 OAM 波束。

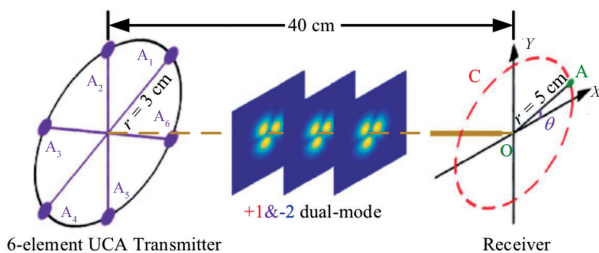


图 15 圆相位梯度法双模射频轨道角动量束的模式测量

无论单模还是多模检测,经典的圆形相位梯度方法都需要发射天线和接收天线之间的完美对准,然而在实际环境中很难满足精确对准的要求。为了改善因收发装置未对齐导致检测性能严重恶化的问题, Fan 等^[35]提出了一种基于均匀圆阵列(UCA)的样本学习的方法。基于研究非平行误差对 OAM 相位结构的影响,提出了 3 种模式检测方法:K 最近邻(KNN)、支持向量机(SVM)和反向传播神经网络(BPNN)。如图 16^[35]所示的仿真结果验证了所提出的多模式 OAM 检测方法在非平行未对准情况下的高效性和鲁棒性。

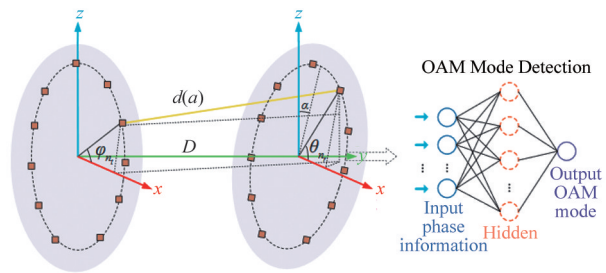


图 16 基于UCA样本学习的射频多模式OAM检测

由于 OAM 波束的发散性,要在远场检测 OAM 波束的功率,通常需要大型的接收阵列。为了减小接收端的规模, Hu 等^[36]采用部分孔径采样接收方法进行远场 OAM 检测。该方法使用部分波前信息来检测和区分不同的 OAM 模式。如图 17^[36]所示,它的接收弧是圆周的 $1/P$,并在弧上均匀分布 M 个天线作为信号采样点。相邻天线之间的角度是 $2\pi/MP$ 。通过满足 2 个条件—— $\text{mod}(|n_1 - n_2|, P) = 0$ 和 $\text{mod}(|n_1 - n_2|, MP) \neq 0$,保证了不同模式间严格的正交性并实现模式 n_1 和 n_2 的无串扰分离。

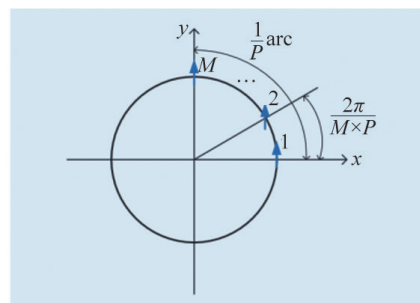


图 17 部分孔径采样接收方案示意

在 OAM 波的多模检测方法中,大多基于复杂的算法辅助检测。为使用一种简单的方式进行多模 OAM 检测,Chen 等^[37]基于超表面提出了一种在微波波段进行 OAM 的检测方法,利用透射函数来模拟透射型超表面。如图 18^[37]所示,设计超表面将一个 OAM 波转换为多个波,其中只有一个是高斯波。高斯波的辐射方向可以根据入射 OAM 的阶数来区分,因此通过定位高斯波,可以确定入射的 OAM 波。

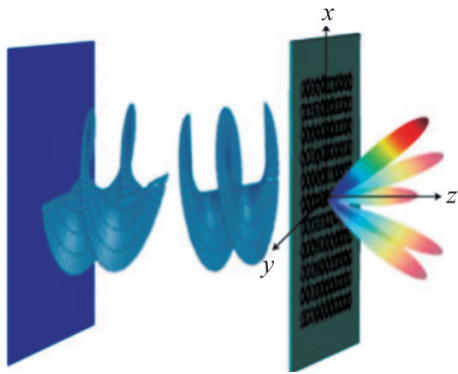


图 18 微波波段超表面轨道角动量检测

3.2 光学测量法

自 1992 年发现携带 OAM 的螺旋结构光束以来^[6],涡旋波超表面已经在激光光学、光学成像以及激光微加工等多个光学领域得到广泛的应用。

3.2.1 干涉法

21 世纪初,Leach 等^[38]提出了一种基于马赫-曾德尔干涉仪的 OAM 态检测方法(图 19^[38]),受限于当时的技术条件,该方法只能用于分离奇偶态。但是该研究是 OAM 态检测领域的先驱工作,为后续 OAM 光束测量提供了重要的基础。

涡旋光束的特征不仅体现在复杂的相位结构上,还体现在强度分布上。OAM 谱描述的是单一光束中不同 OAM 通道的强度权重^[37-40],通过对 OAM 谱分析可以更好地理解光束的复杂结构,有助于深入地研究光束的物理特性。OAM 谱测量的研究起步较晚,主要分为 2 类:一类是对各种 OAM 成分进行有效分类,例如通过马赫-曾德尔干涉仪^[38]和 OAM 模式分类器^[39];另一类是通过其他特征

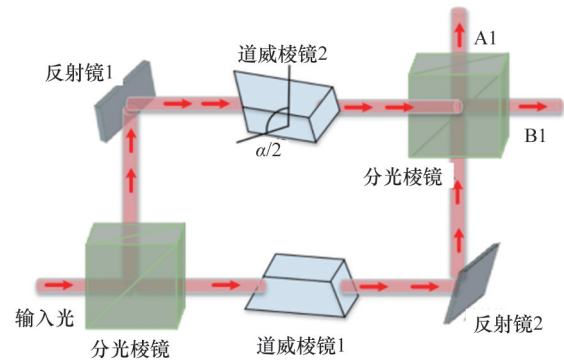


图 19 马赫-曾德尔干涉仪示意

参数的间接测量,如灰度算法^[40]、旋转多普勒频移^[41]等。

目前,OAM 谱的测量受到了检测范围和精度的限制。为了测量复杂光场的 OAM 谱,Fu^[42]建立了一个稳定但简单的干涉仪(图 20^[42]),该干涉仪通过引入参考高斯光束与待测光束的干涉作用,能够精确地捕捉被测光束的强度分布。从被测光束的强度分布、探测高斯光束和干涉场,可以很好地获得高精度的 OAM 光谱。此外,研究中所提出的方案不限于常见的环形 OAM 光束,也可以很好地分析像多环涡旋、贝塞尔-高斯光束等拥有复杂强度分布的 OAM 谱。

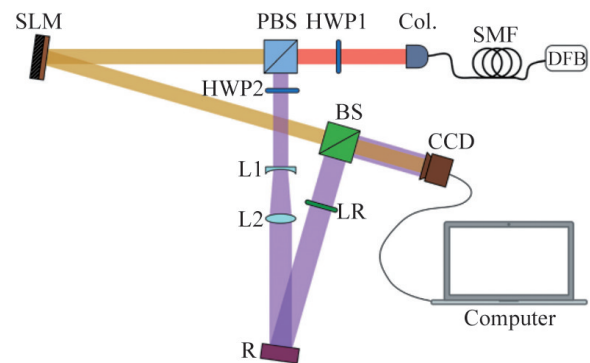


图 20 光束通用轨道角动量频谱分析仪

OAM 干涉仪大多是基于振幅分裂干涉,通过计算测试臂光路变化引起的干涉图的旋转角度从而进行物理量测量。因此,要实现超高精度和灵敏度的测量,干涉仪设计尺寸大且系统复杂性高。为

解决干涉仪尺寸较大且难以对准的问题, Yang等^[43]提出一种基于OAM的波前分裂干涉仪(WSI-OAM), 利用2个共轭的半OAM光束来进行干涉测量。结果表明, 该干涉仪能实现大约0.1 nm的分辨率和0.013 nm的不确定度, 测量精度超过99.90%。如图21^[43]所示, 由于仅由2个直角棱镜组成, WSI-OAM在设计上更为简单和紧凑, 易于校准。

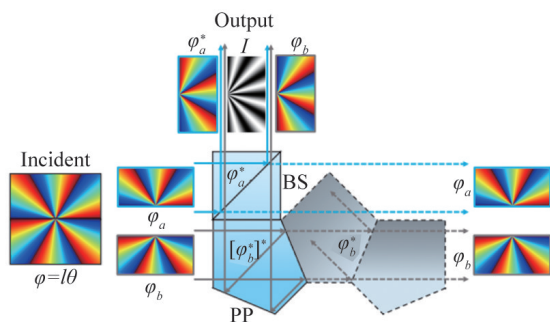


图21 基于轨道角动量束的波前分裂干涉仪

干涉法进行OAM光束检测时不仅需要将多个光路精确叠加, 而且为了形成参考光路还需要额外的光学元件, 如分束器、反射镜等。因此, 干涉法检测OAM光束实验的复杂性和设备成本相对较高。

3.2.2 衍射法

与前文中讨论的干涉法不同, 衍射法只需要将涡旋光束照射到衍射光栅或特定的装置上。这种方法不需要复杂的光路设计和额外的光学元件来形成参考光束, 另外衍射法产生的衍射图样通常与涡旋光束的拓扑电荷直接相关。Rasouli等^[44]设计了一种抛物线线性光栅, 用于检测OAM光束的径向指数和拓扑电荷数, 如图22^[44]所示。该光栅不仅最高可检测到 $l=2, p=5$ 的模式, 其衍射图案对于光束

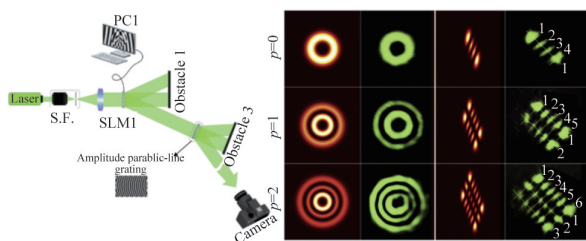


图22 在振幅抛物线线性光栅衍射表征拉盖尔-高斯光束

相对于光栅中心的偏离程度也表现出较高的鲁棒性。这一研究对于理解和利用OAM光束的复杂性质具有重要意义, 尤其是在涉及光束位置变化较大的应用场景中。

为了提高测量精度和OAM模式的阶数, 利用新型衍射元件进行高阶涡旋光束的测量引起学者的兴趣。如图23^[45]所示, Li等^[45]提出一种花瓣状区域光栅(petal-like zone plate, PZP)用于准确确定高阶OAM模式。当涡旋光束与PZP结合后在远场产生的衍射效果呈现出与原涡旋光束相似的厄米特型图案, 通过分析厄米特型图案中暗线的排列和数量来确定入射涡旋光束的拓扑电荷的幅度和符号。由于PZP具备多重聚焦特征, 使得涡旋光束的厄米特型图案可以不局限于单一位置。同时为了保证高检测效率, 对PZP的关键参数进行了详细研究, 实验结果表明测得的拓扑电荷数可达100。

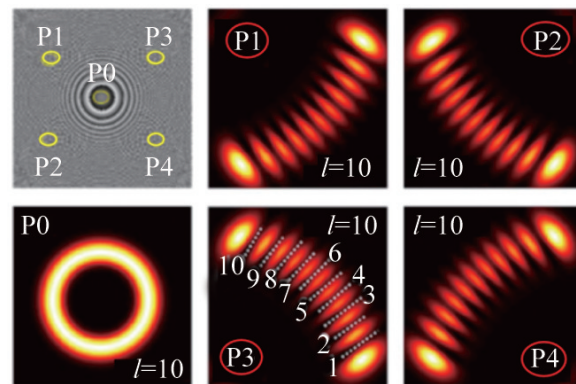


图23 用花瓣状波带片测量高阶光轨道角动量

为了更深入地分析OAM波, 尤其是在处理大规模数据集和复杂的模式识别时, 研究人员开始探索将先进的深度学习技术^[46]与传统的衍射方法相结合的新方法。通过应用深度学习神经网络, 可以有效地提高OAM波的检测和分类的准确性及效率。Huang等^[47]设计了一种基于衍射深度神经网络(D²NN)的系统, 该系统具备生成、检测以及切换混合OAM模式的功能, 如图24^[47]所示。这一系统在全光信号处理通信中实现了OAM键控、复用、解复用及模式切换, 并且该系统在衍射效率和模式转换纯度方均达到了96%以上。

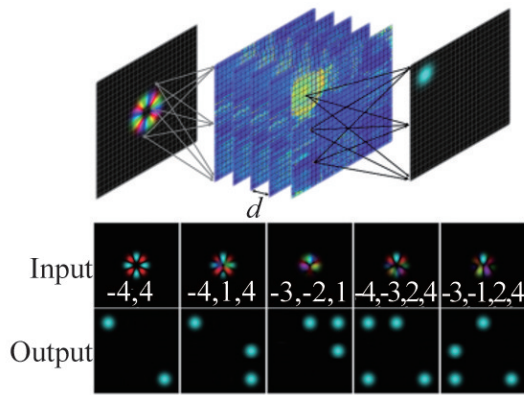


图24 利用衍射深度神经网络对涡旋光束进行全光信号处理

4 涡旋波超表面应用

4.1 涡旋波通信

随着无线通信的快速发展,频谱资源日益紧张。如何有效利用频谱资源,满足快速增长的频谱和网络空间安全需求,已成为未来无线电应用面临的重大挑战。理论上,涡旋波具有无穷多模态、低串扰且不同模态间的相互正交等独特优势,可以在不需要额外频率资源的情况下显著提高通信系统的数据传输容量和网络空间安全,在通信领域发挥重要作用。

作为一个独立的物理参数,OAM可以与频率、偏振等其他复用技术相结合,通过多维复用进一步提高容量密度。Yang等^[48]提出一种在W波段采用反射型超表面实现轨道角动量和偏振的多路复用通信。如图25^[48]所示,该研究能在 x,y 2种偏振下

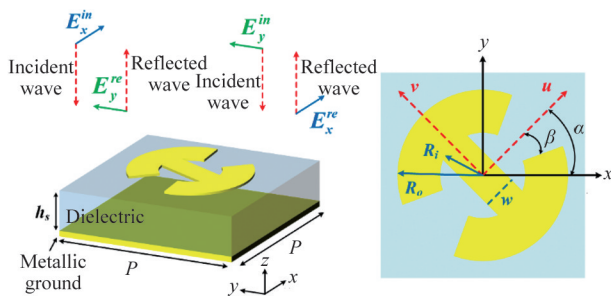


图25 用于W波段OAM和偏振复用通信的反射超表面

生成具有高模式纯度的多路复用OAM波束。接着将产生的波束作为4个独立的通道来传输正交相移键控(QPSK)格式的通信信号,所建立的复用通信系统的数据速率可以达到64 Gbit/s。

基于太赫兹和OAM 2项提高通信容量关键技术,Yang等^[3]又提出了一种基于透射超表面的太赫兹轨道角动量无线通信系统。如图26^[3]所示,该系统的多路复用超表面能同时生成2个同轴的不同模式($l=1$ 和 -1)OAM波束。采用开关键控(OOK)调制,实现了300 mm(100 GHz的100λ)传输距离下的10 Gbit/s数据速率,误码率(BERs)低于 3.8×10^{-3} ,证明了太赫兹OAM无线通信系统在未来具有明显应用潜力。

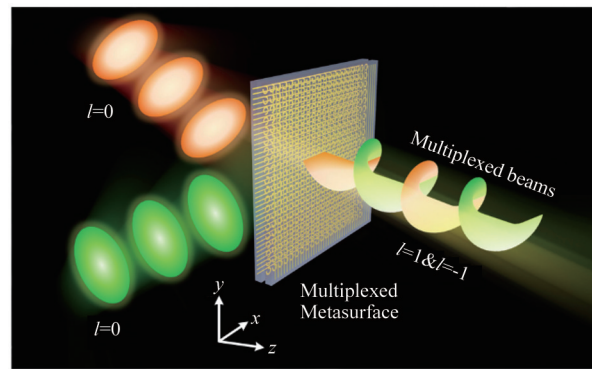


图26 基于透射式超表面的THz-OAM无线通信系统

由于OAM模式转换器的偏振敏感性和窄工作带宽,OAM复用技术在光纤无线通信中存在一定的限制。为了解决偏振敏感和工作带宽不足的问题,Mai等^[49]提出一种基于PB相位的介质超表面,用于射频光纤的三维多路复用通信(图27^[49])。通过操控2个相反手性的圆偏振分量来实现OAM模式转换。由于PB相位具有无色散的性质,该超表面具有宽带的工作波长(从1540 nm到1600 nm)和偏振不敏感性,使其易与波分复用和偏振分复用兼容。实验结果表明,该系统在100 GHz微波信号传输中表现出色,误码率极低,显示出在超宽带无线接入网络中的应用潜力。

涡旋波由于波前中心的相位奇点致使波的中心区域没有能量,从而形成了一个中空区域。随着

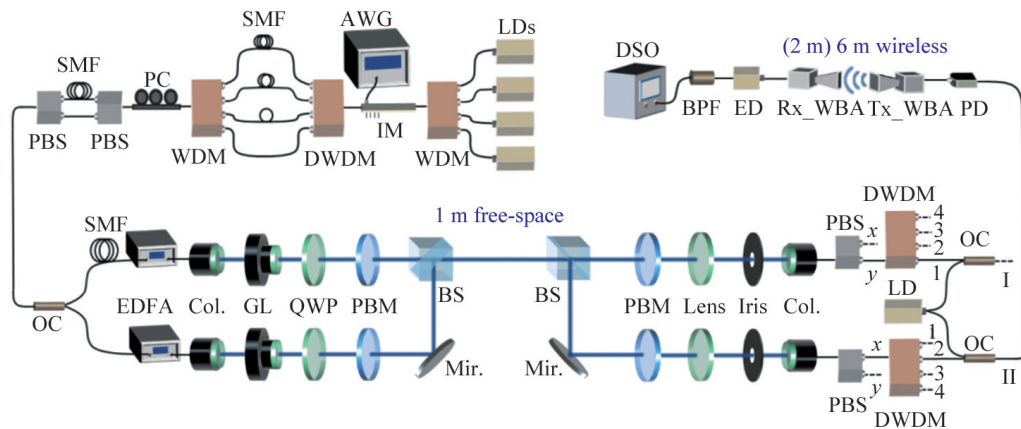


图 27 用于光纤无线电通信的基于超表面的OAM复用

拓扑电荷绝对值的增大及电磁波传播距离的增加, 涡旋波的中空区域范围变大、波束的发散性加剧。为改善长距离通信中的发散问题, Zhang等^[50]提出了聚焦涡旋波束的新型宽带透射超表面。利用相位补偿的方式设计并制备了携带+1模式和-2模式的OAM波束发生器。通过近场和远场的实验验证, 在(9.0~11.0)GHz的频率范围内, 该超表面具备将入射的球形相位波前转换为螺旋相位波前的能力(图28^[50])。此外, 该超表面还具有低廓性(0.133 λ_0)、高透射率、大带宽和低成本等优点, 为在射频区域生成任意OAM模式提供了潜在解决方案。

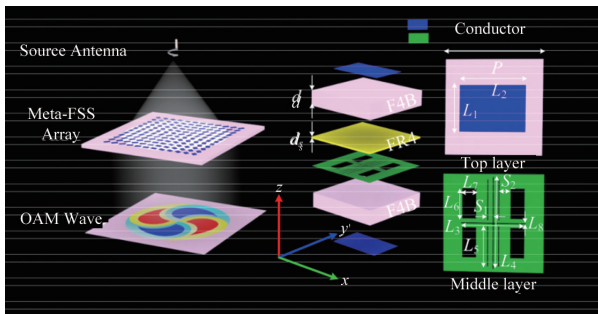


图 28 利用频率选择表面生成不同OAM模式的宽带涡旋光束

4.2 涡旋波雷达

在现代雷达技术的发展中, 追求更高的分辨率和更强的目标识别能力成为了主要趋势。涡旋波不仅在雷达探测中具备获取静态信息的能力, 而且

涡旋波所特有的旋转多普勒效应^[51]能够捕捉到平面波雷达难以探测的运动信息, 从而弥补了传统雷达技术的不足。

与平面波相比, OAM波束具有不同模式的螺旋相位波前, 这使得OAM波在照射物体时产生丰富的散射现象。因此, 携带轨道角动量的电磁波已被应用于旋转多普勒检测和目标成像等领域。Liu等^[52]研究了微波频率下2种标准物体对OAM波束的后向散射(图29^[52])。实验表明, 当OAM波束的相位奇点与轴对称物体的对称轴对齐时, 散射场保持涡旋场特性。此外, 对于完美电导体(PEC)球体和锥体, 归一化雷达散射截面方向角随拓扑电荷变化明显。因此与平面波相比, 给定特定的传播方向, OAM光束将为物体检测和识别提供更多信息。该研究有效解决了OAM光束与电大尺寸相互作用

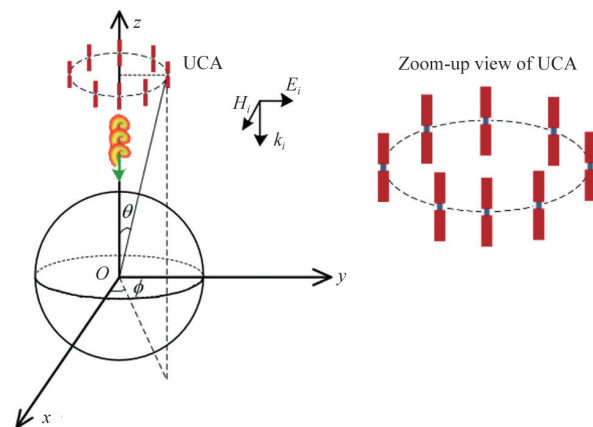


图 29 OAM光束照明的电大标准物体的后向散射

的问题^[53],对于 OAM 雷达系统和目标检测具有重要意义。

涡旋电磁波具有区分方位角的能力,进而实现雷达目标的二维重建。与平面波成像技术不同,涡旋电磁波的方位重建不再取决于孔径大小,而是取决于 OAM 模式的范围,因此涡旋电磁波雷达可以满足特定检测场景的需求。Zeng 等^[54]结合使用均匀圆形天线阵列和多信号分类(MUSIC)算法生成

OAM 波束,成功实现了 OAM 波的二维雷达成像,但是该二维雷达成像技术未能提供目标的高度信息。针对这一局限,Liang 等^[55]提出了一种适用于整数阶和分数阶 OAM 模式的三维成像方法。该研究采用均匀圆形阵列先生成不同 OAM 模式的涡旋电磁波并建立回波模型,使用快速傅里叶变换和蝴蝶算法对整数阶和分数阶回波进行处理,从而成功实现目标的三维重构(图 30^[55])。

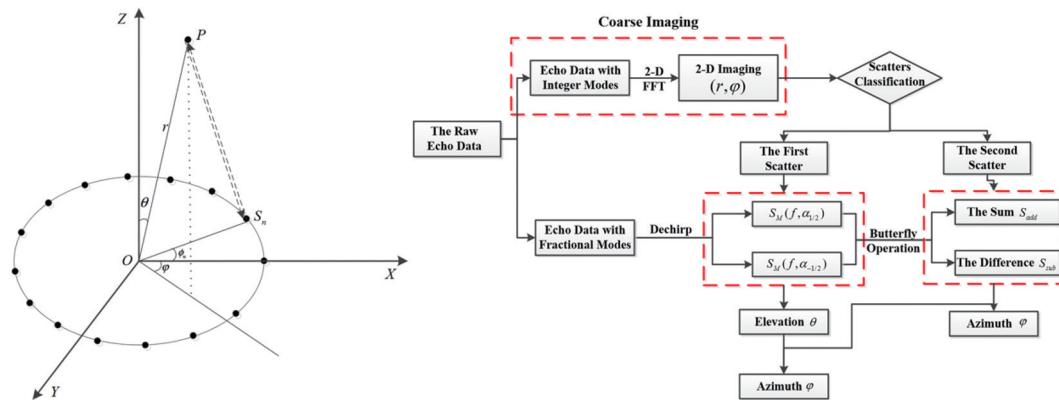


图 30 整数阶和分数阶 OAM 模式涡旋电磁波雷达三维成像

由于 OAM 相位奇点的零辐射特性,涡旋波具有极低雷达截面(RCS)。利用这一性质,Liu 等^[56]设计制造了一种新颖的雷达截面缩减超表面,用以灵活控制所生成涡旋波的波前和效率。如图 31^[56]所示,超表面由多个具有不同反射相位的方形环组成。利用 OAM 相位奇点的特性,超表面沿传播轴

呈现出显著的 RCS 缩减。测试结果显示,-1 阶超表面在 7.75 GHz 时实现 35 dB 的 RCS 减缩,-2 阶超表面在 7.6 GHz 时实现 48 dB 的 RCS 减缩。该研究为电磁散射控制领域的 RCS 超表面设计提供了新的方法。

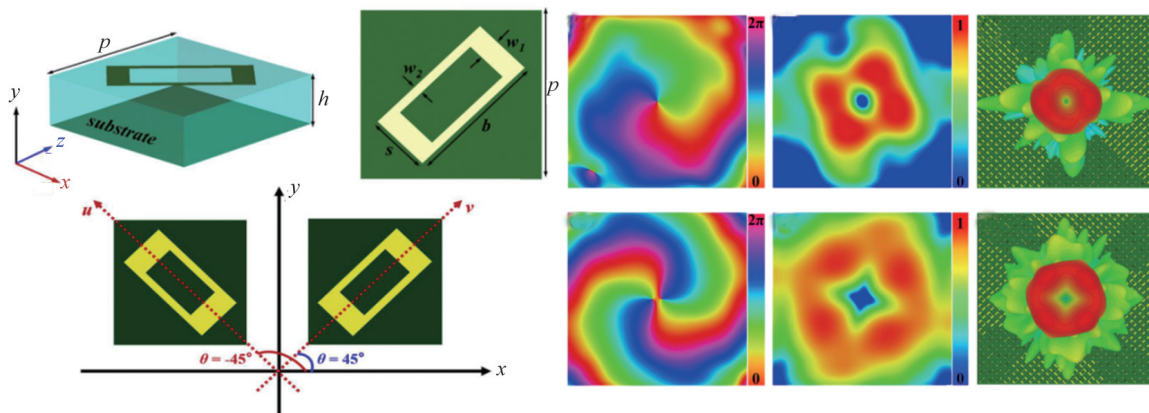


图 31 基于轨道角动量的 RCS 还原超表面

4.3 涡旋波全息

全息技术作为一种先进的光学记录与再现方法^[56],自20世纪中叶以来就引起学者的广泛研究。这种技术基于干涉和衍射原理,能够精确地捕捉和重现物体波前的信息^[57],包括光的强度和相位。与传统成像技术相比,全息成像提供了更为丰富的深度和细节信息。

超表面全息作为全息技术的一个分支,凭借其独特操纵光波前的能力,开启了全息技术的新篇章。这种技术通过设计具有亚波长结构的超表面,能够在微纳尺度上精确控制光的传播特性^[58],从而实现高分辨率和高效率的光学调制,为光学成像、信息处理、光通信^[59]等领域的研究提供新的工具。

近年来,将超表面技术与全息技术结合,实现多参数复用^[60](如波长、入射角、偏振态和时空维度)成为研究热点。然而在实际应用中,复用全息仍然存在带宽不足的问题。Ren等^[5]将信息储存在光束的轨道角动量中,利用轨道角动量作为信息通道时所特有的无限正交螺旋模式,有效解决了全息术带宽不足的问题。该研究展示一种新型OAM全息技术,实现了高达200个独立OAM通道的复用。基于动量空间内复杂金属表面的设计,实现了振幅与相位的独立调控。该研究支持无透镜重建及全息视频显示,并能通过聚合物基质在SiO₂上进行三维打印,适合大规模生产(图32^[5])。

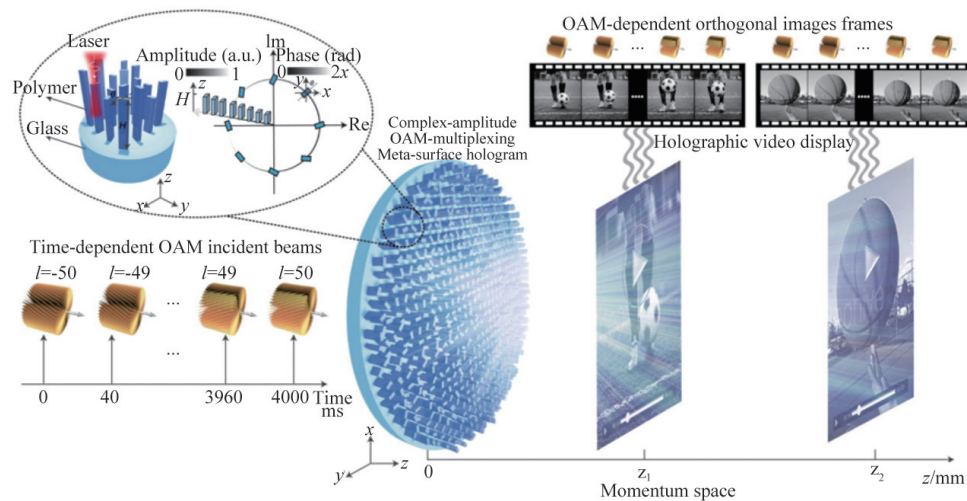


图32 动量空间中基于复振幅超表面的轨道角动量全息术

全息技术已从线性光学扩展至非线性光学,为了解决非线性光学中频率复用的问题,Fang等^[61]提出一种高维轨道角动量复用非线性全息的方法。通过将基波波前分割成不同的正交OAM通道并在空间频率域通过二型二次谐波生成过程,该方法独立重建了基波和二次谐波中的多个OAM和偏振相关全息图像(图33^[61])。该研究将频率复用和OAM复用相结合,不仅解决了非线性波耦合问题,还可扩展至级联 χ^2 非线性光学过程,为光通信、多波长显示及多维光存储等领域提供新的应用途径。

针对全息复用技术在螺旋相位角度空间利用

上的不足,Wang等^[62]提出了部分轨道角动量全息技术,该技术通过将一个完整的OAM模式分割成多个部分轨道角动量,每个部分分别对应不同的目标图像。通过这种方式,只有在特定的照射角度范围内使用适当部分的OAM模式才能重建图像,从而实现图像的全息复用。部分轨道角动量全息技术在增强信息容量的同时也为高安全性的光学加密提供了多样化的方法(图34^[62])。

为了进一步扩展OAM全息复用技术,Wang等^[63]提出了一种结合多偏振通道与轨道角动量的超表面全息复用技术。该技术基于自旋角动量与

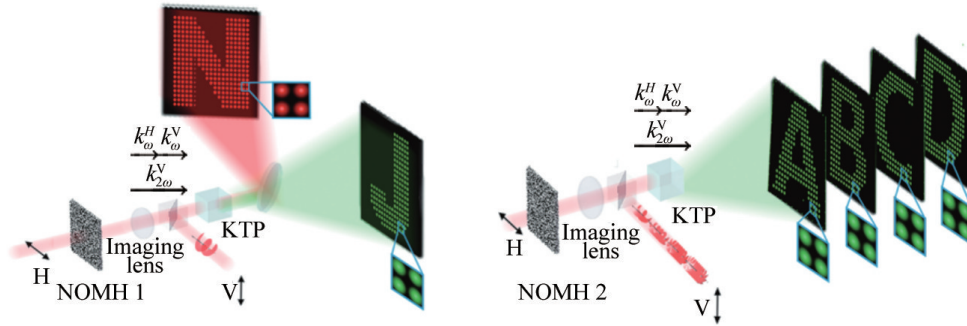


图33 高维轨道角动量复用非线性全息术

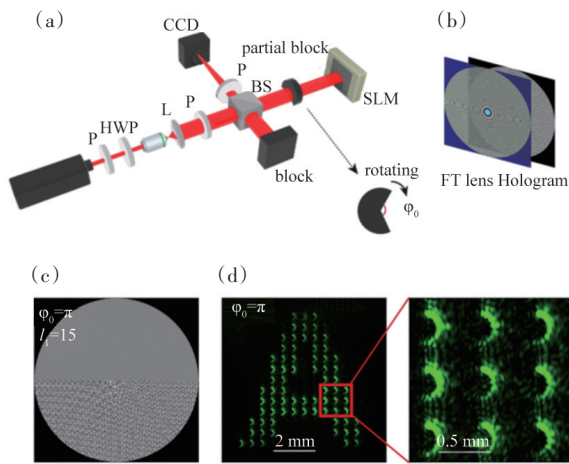


图34 轨道角动量全息术中部分螺旋相位模式的角复用

轨道角动量的正交性,在不同自旋偏振通道中实现了多个 OAM 复用全息图的创建。如图 35^[63],利用 OAM 复用和偏振复用之间良好的兼容性,在单个超表面上集成了 2 个多平面全息图和 15 个 OAM 复用全息图。此外,研究还介绍了一种针对并行通

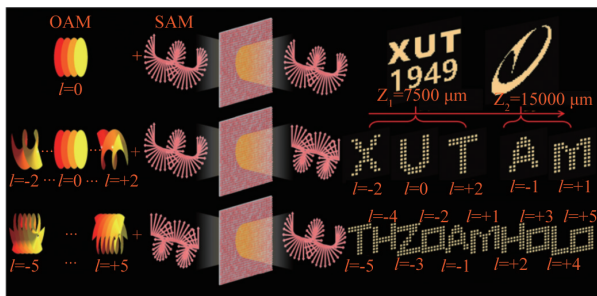


图35 基于多偏振通道超表面的轨道角动量复用全息术

信设计的光学嵌套加密框架,有效地提高了全息技术在容量和安全性方面的性能,为光通信和信息加密等相关技术领域提供了新的设计理念。

5 结论

综述了涡旋波超表面在设计和应用方面的最新进展。涡旋波超表面作为一种新兴的研究热点,其携带的轨道角动量因理论上可以产生无限多模式且不同模式之间无串扰的特性,为电磁波的控制和信息编码提供了新的自由度。在设计方面,反射型和透射型超表面的研究展示了在电磁波操控方面的多样性,而机器学习和人工智能的引入更是开辟了超表面设计的新领域。在测量技术方面,微波测量法和光学测量法为这些超表面的性能提供了有效的评估手段。在应用方面,涡旋波超表面在网络空间安全、无线通信、雷达和全息等领域显示出巨大的应用潜力。

对于涡旋波超表面的未来发展,可以结合以下几个方面考虑。(1) 高阶、多模式 OAM 波:在通信和雷达领域,为了获得更高的数据速率和频谱效率,需要涡旋波携带更多的拓扑电荷数以扩展 OAM 信道;而目前关于拓扑电荷数的研究多限于整数倍的 OAM 量值,未来可以研究分数模式和阶数更高的 OAM 波。(2) 抑制波束发散、提高传输距离:涡旋波的相位波前为螺旋状态,这种相位波前使得涡旋波束整体呈现发散状态,难以实现远距离通信。因此未来的研究应该聚焦实质性抑制或消

除发散角,解决远场的OAM传输问题。(3)可重构涡旋波超表面:通过利用可调节材料设计可切换超表面,实现对电磁波前进行实时的、任意的调控。(4)OAM多通道复用:将OAM与频率、时空、偏振等多种形式结合形成多通道复用,对于三维显示、信息传输、加密等领域具有巨大的应用价值。5)OAM与人工智能结合:使用深度学习算法^[64]预测和优化超表面结构,获得电磁波更高效、更复杂波前设计。

参考文献(References)

- [1] Yu N, Genevet P, Kats M A, et al. Light propagation with phase discontinuities: Generalized laws of reflection and refraction[J]. *Science*, 2011, 334(6054): 333-337.
- [2] Mohammadi S M, Daldorff L K S, Bergman J E S, et al. Orbital angular momentum in radio-A system study[J]. *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*, 2010, 58(2): 565-572.
- [3] Yang H, Zheng S, Zhang H, et al. A THz-OAM wireless communication system based on transmissive metasurface [J]. *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*, 2023, 71(5): 4194-4203.
- [4] Liu K, Wang H, Liu H, et al. Orbital angular momentum imaging based on waveform diversity and rotational array [J]. *IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques*, 2023, 71(6): 2714-2720.
- [5] Ren H, Fang X, Jang J, et al. Complex-amplitude metasurface-based orbital angular momentum holography in momentum space[J]. *Nature Nanotechnology*, 2020, 15(11): 948-955.
- [6] Allen L, Beijersbergen M W, Spreeuw R J C, et al. Orbital angular momentum of light and the transformation of Laguerre-Gaussian laser modes[J]. *Physical Review*, 1992, 45(11): 8185-8189.
- [7] Lian Y, Yu Y, Han S, et al. OAM beams generation technology in optical fiber: A review[J]. *IEEE Sensors Journal*, 2022, 22(5): 3828-3843.
- [8] Huang S, Miao Z, He C, et al. Composite vortex beams by coaxial superposition of Laguerre-Gaussian beams[J]. *Optics and Lasers in Engineering*, 2016, 78: 132-139.
- [9] Wang J, Yang J Y, Fazal I M, et al. Terabit free-space data transmission employing orbital angular momentum multiplexing[J]. *Nature Photonics*, 2012, 6(7): 488-496.
- [10] Sroor H, Huang Y W, Sephton B, et al. High-purity orbital angular momentum states from a visible metasurface laser[J]. *Nature Photonics*, 2020, 14(8): 498-503.
- [11] Tubull G A, Robertson D A, Smith G, et al. The generation of free-space Laguerre-Gaussian modes at millimetre-wave frequencies by use of a spiral phaseplate[J]. *Optics Communications*, 1996, 127: 183-188.
- [12] Liu Q, Chen Z N, Liu Y, et al. Circular polarization and mode reconfigurable wideband orbital angular momentum patch array antenna[J]. *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*, 2018, 66(4): 1796-1804.
- [13] A Saraereh O. Design and performance evaluation of OAM-antennas: A comparative review[J]. *IEEE Access*, 2023, 11: 27992-28013.
- [14] Chen Y, Zheng S, Li Y, et al. A Flat-lensed spiral phase plate based on phase-shifting surface for generation of millimeter-wave OAM beam[J]. *IEEE Antennas and Wireless Propagation Letters*, 2016, 15: 1156-1158.
- [15] Rubano A, Cardano F, Piccirillo B, et al. Q-plate technology: A progress review[J]. *Journal of the Optical Society of America B*, 2019, 36(5): D70.
- [16] Wang X, Nie Z, Liang Y, et al. Recent advances on optical vortex generation[J]. *Nanophotonics*, 2018, 7(9): 1533-1556.
- [17] Chen R, Zhou H, Moretti M, et al. Orbital angular momentum waves: Generation, detection, and emerging applications[J]. *IEEE Communications Surveys & Tutorials*, 2020, 22(2): 840-868.
- [18] Trichili A, Park K H, Zghal M, et al. Communicating using spatial mode multiplexing: Potentials, challenges, and perspectives[J]. *IEEE Communications Surveys & Tutorials*, 2019, 21(4): 3175-3203.
- [19] Cheng G, Si L, Shen Q, et al. Transmissive Pancharatnam-Berry metasurfaces with stable amplitude and precise phase modulations using dartboard discretization configuration[J]. *Optics Express*, 2023, 31(19): 30815.
- [20] Huang L, Chen X, Mu H, et al. Dispersionless phase discontinuities for controlling light propagation[J]. *Nano Letters*, 2012, 12(11): 5750-5755.
- [21] Li F, Yin X, Deng J Y. Wideband reflective metasurface for independent control of mode and circular polarization of orbital angular momentum[J]. *Optics Express*, 2023, 31(26): 43975.
- [22] Jiang Y, Liu L, Li S, et al. Highly efficient decoupled triple-channel OAM generation with a single-layer shared aperture reflective metasurface[J]. *Advanced Optical Materials*, 2023, 11(3): 2202071.
- [23] Li N, Zheng S, Yang H, et al. A broadband dual-polarized reflective metasurface for THz OAM communication [J]. *IEEE transactions on microwave theory and techniques*, 2024, 2(72): 1302-1311.
- [24] Huang H, Wang J. Switchable terahertz orbital angular momentum Bessel beams based on spin-decoupled multifunctional reflective metasurfaces[J]. *Optics Express*, 2023, 31(21): 34855.
- [25] Bai X, Zhang F, Sun L, et al. Dynamic millimeter-wave OAM beam generation through programmable metasurface[J]. *Nanophotonics*, 2022, 11(7): 1389-1399.
- [26] Liu T, Li W, Meng Y, et al. Six-mode orbital angular momentum generator enabled by helicity assisted full space metasurface with flexible manipulation of phase,

- polarization, and spatial information[J]. *Advanced Optical Materials*, 2022, 10(8): 2102638.
- [27] Yuan Y, Zhang K, Ratni B, et al. Independent phase modulation for quadruplex polarization channels enabled by chirality-assisted geometric-phase metasurfaces[J]. *Nature Communications*, 2020, 11(1): 4186.
- [28] Xue C, Zhao H, Li T, et al. Efficient generation of a dual-polarized vortex wave with an ultrathin Huygens' metasurface[J]. *Optics Express*, 2022, 30(21): 39175.
- [29] Kou N, Yu S, Li L. Generation of high-order bessel vortex beam carrying orbital angular momentum using multi-layer amplitude-phase-modulated surfaces in radiofrequency domain[J]. *Applied Physics Express*, 2017, 10(1): 016701.
- [30] Yang Y, Zhu Y, Xie W, et al. High-efficiency ultrathin metasurfaces with simultaneous control of complete phase, amplitude, and polarization[J]. *Optics Express*, 2023, 31(2): 3134.
- [31] Uchida M, Tonomura A. Generation of electron beams carrying orbital angular momentum[J]. *Nature*, 2010, 464(7289): 737–739.
- [32] Kotlyar V V, Khonina S N, Kovalev A A, et al. Diffraction of a plane, finite-radius wave by a spiral phase plate[J]. *Optics Letters*, 2006, 31(11): 1597.
- [33] Mohammadi S M, Daldorff L K S, Forozesh K, et al. Orbital angular momentum in radio: Measurement methods: OAM in radio-measurement methods[J]. *Radio Science*, 2010, 45(4): RS4007.
- [34] Xie M, Gao X, Zhao M, et al. Mode measurement of a dual-mode radio frequency orbital angular momentum beam by circular phase gradient method[J]. *IEEE Antennas and Wireless Propagation Letters*, 2017, 16: 1143–1146.
- [35] Fan J, Chen R, Long W X, et al. Radio-frequency multi-mode OAM detection based on UCA samples learning [C]//2021 IEEE 22nd International Workshop on Signal Processing Advances in Wireless Communications. Lucca, Italy: IEEE, 2021: 56–60.
- [36] Hu Y, Zheng S, Zhang Z, et al. Simulation of orbital angular momentum radio communication systems based on partial aperture sampling receiving scheme[J]. *IET Microwaves, Antennas & Propagation*, 2016, 10(10): 1043–1047.
- [37] Chen M L N, Jiang L J, Sha W E I. Detection of orbital angular momentum with metasurface at microwave band[J]. *IEEE Antennas and Wireless Propagation Letters*, 2018, 17(1): 110–113.
- [38] Leach J, Padgett M J, Barnett S M, et al. Measuring the orbital angular momentum of a single photon[J]. *Physical Review Letters*, 2002, 88(25): 257901.
- [39] Zhang N, Yuan X C, Burge R E. Extending the detection range of optical vortices by dammann vortex gratings[J]. *Optics Letters*, 2010, 35(20): 3495.
- [40] Fu S, Zhang S, Wang T, et al. Measurement of orbital angular momentum spectra of multiplexing optical vortices[J]. *Optics Express*, 2016, 24(6): 6240.
- [41] Zhou H L, Fu D Z, Dong J J, et al. Orbital angular momentum complex spectrum analyzer for vortex light based on the rotational Doppler effect[J]. *Light: Science & Applications*, 2016, 6(4): 16251–16252.
- [42] Fu S. Universal orbital angular momentum spectrum analyzer for beams[J]. *Photonix*, 2020, 1(1): 19.
- [43] Yang D, Yang Z, Zhang Y. Wavefront-splitting interferometer based on orbital angular momentum beams[J]. *Optics Express*, 2023, 31(18): 28954.
- [44] Rasouli S, Fathollahzade S, Amiri P. Simple, efficient and reliable characterization of Laguerre-Gaussian beams with non-zero radial indices in diffraction from an amplitude parabolic-line linear grating[J]. *Optics Express*, 2021, 29(19): 29661.
- [45] Li F, Ding H, Meng Z, et al. Measuring high-order optical orbital angular momentum with a petal-like zone plate[J]. *IEEE Photonics Technology Letters*, 2022, 34(2): 125–128.
- [46] Weng Y, Pan Z. Orbital angular momentum based sensing and their applications: A review[J]. *Journal of Lightwave Technology*, 2023, 41(7): 2007–2016.
- [47] Huang Z, Wang P, Liu J, et al. All-optical signal processing of vortex beams with diffractive deep neural networks[J]. *Physical Review Applied*, 2021, 15(1): 014037.
- [48] Yang H, Zheng S, Zhang H, et al. A reflective metasurface for OAM and polarization multiplexing communication in the w-band[J]. *IEEE Antennas and Wireless Propagation Letters*, 2023(1): 1–5.
- [49] Mai Q, Wang C, Wang X, et al. Metasurface based optical orbital angular momentum multiplexing for 100 GHz radio over fiber communication[J]. *Journal of Lightwave Technology*, 2021, 39(19): 6159–6166.
- [50] Zhang F, Song Q, Yang G M, et al. Generation of wide-band vortex beam with different OAM modes using third-order meta-frequency selective surface[J]. *Optics Express*, 2019, 27(24): 34864.
- [51] Han J, Li L, Yi H, et al. 1-bit digital orbital angular momentum vortex beam generator based on a coding reflective metasurface[J]. *Optical Materials Express*, 2018, 8(11): 3470.
- [52] Liu B, Chu H, Giddens H, et al. Rotational doppler effect of spinning metasurface in radar system[C]//2019 IEEE International Symposium on Antennas and Propagation and USNC-URSI Radio Science Meeting. Atlanta, GA, USA: IEEE, 2019: 1967–1968.
- [53] Liu K, Liu H, Sha W E I, et al. Backward scattering of electrically large standard objects illuminated by OAM beams[J]. *IEEE Antennas and Wireless Propagation Letters*, 2020, 19(7): 1167–1171.
- [54] Zeng Y, Wang Y, Chen Z, et al. Two-dimensional OAM radar imaging using uniform circular antenna arrays[C]//2020 14th European Conference on Antennas and Propagation

- gation. Copenhagen, Denmark: IEEE, 2020: 1–4.
- [55] Liang J, Chen Y, Zhang Q, et al. Three-dimensional imaging of vortex electromagnetic wave radar with integer and fractional order OAM modes[J]. *Remote Sensing*, 2023, 15(11): 2903.
- [56] Liu Q, Chen H, Yan Y, et al. RCS reduction metasurface based on orbital angular momentum[J]. *Results in Physics*, 2023, 53: 107008.
- [57] Yang R, Wan S, Shi Y, et al. Immersive tuning the guided waves for multifunctional on chip metaoptics[J]. *Laser & Photonics Reviews*, 2022, 16(8): 2200127.
- [58] Maurer C, Jesacher A, Bernet S, et al. What spatial light modulators can do for optical microscopy[J]. *Laser & Photonics Reviews*, 2011, 5(1): 81–101.
- [59] Li Z, Rukhlenko I D, Zhu W. Microwave metasurface hologram for holographic imaging and its data encryption applications[J]. *Journal of Optics*, 2022, 24(11): 113001.
- [60] Willner A E, Pang K, Song H, et al. Orbital angular momentum of light for communications[J]. *Applied Physics Reviews*, 2021, 8(4): 041312.
- [61] Fang X, Yang H, Yao W, et al. High-dimensional orbital angular momentum multiplexing nonlinear holography[J]. *Advanced Photonics*, 2021, 3(1): 015001.
- [62] Wang F, Zhang X, Xiong R, et al. Angular multiplexation of partial helical phase modes in orbital angular momentum holography[J]. *Optics Express*, 2022, 30(7): 11110.
- [63] Wang Y, Yao Z, Cui Z, et al. Orbital angular momentum multiplexing holography based on multiple polarization channel metasurface[J]. *Nanophotonics*, 2023, 12(23): 4339–4349.
- [64] Wu G, Si L, Xu H, et al. Phase-to-pattern inverse design for a fast realization of a functional metasurface by combining a deep neural network and a genetic algorithm [J]. *Optics Express*, 2022, 30(25): 45612.

The research status and application progress of orbital angular momentum wave metasurface

SI Liming^{1,2,3}, CHEN Lulu^{1,2}, SUN Houjun^{1,2,3}, LÜ Xin^{1,2}

1. School of Integrated Circuits and Electronics, Beijing Institute of Technology, Beijing 100081, China
2. Beijing Key Laboratory of Millimeter Wave and Terahertz Techniques, Beijing 100081, China
3. Tangshan Research Institute, Beijing Institute of Technology, Tangshan 063000, China

Abstract With the advancement of radio technology, there is a growing demand for high-precision electromagnetic wavefront manipulation. Vortex electromagnetic wave technology and its applications have emerged as an international academic frontier and a research hotspot. With its unique ability to manipulate the electromagnetic waves and characteristics of orbital angular momentum (OAM), vortex wave metasurface provides a new degree of freedom for precision modulation and application of electromagnetic waves. This paper first reviewed the fundamental theory of the vortex wave, including its generating principles and the characteristics of orbital angular momentum which it has carried. Then it introduced the two primary categories of vortex wave metasurfaces: reflective and transmissive metasurfaces. Subsequently, it summarized the measurement technology for vortex waves, providing a scientific and effective approach to evaluate the performance of vortex wave metasurfaces. The paper also discussed the applications of vortex wave metasurfaces in the fields, including to improve the cyberspace security and the data transmission capacity for the wireless communication systems, the target detection capabilities of radar systems, and the imaging quality of holographic imaging technology. Finally, it outlines future development directions for vortex wave metasurfaces, including research of high-order multi-mode OAM waves, solution of the beam divergence in long-distance transmission, design of reconfigurable vortex wave metasurfaces, development of OAM covert signal transmission and multi-channel multiplexing technology, to strengthen the security of cyber space and provide more efficient and flexible technical solutions in the fields of wireless communications, radar detection, optical imaging, and etc.

Keywords vortex wave; metasurface; orbital angular momentum ●



(责任编辑 徐丽娇)