

面向无线通信的轨道角动量关键技术研究进展

廖希^{*①②} 周晨虹^① 王洋^① 廖莎莎^① 周继华^② 张杰^①

^①(重庆邮电大学通信与信息工程学院 重庆 400065)

^②(重庆金美通信有限责任公司 重庆 400030)

摘要: 电磁涡旋因携带轨道角动量而具有高维可调制自由度, 被引入无线通信中以提升频谱效率和抗干扰能力。该文首先介绍了轨道角动量和电磁涡旋的基本原理与特性; 然后比较了电磁涡旋的产生方法, 给出了超表面产生轨道角动量的工作原理, 综述了基于超表面的轨道角动量产生方法和研究现状; 总结了轨道角动量的传输性能、接收与检测方法、复用与解复用性能; 最后讨论了未来在应用无线通信轨道角动量时需要解决的关键问题。

关键词: 无线通信; 电磁涡旋; 轨道角动量; 频谱效率

中图分类号: TN921

文献标识码: A

文章编号: 1009-5896(2020)07-1666-12

DOI: 10.11999/JEIT190372

A Survey of Orbital Angular Momentum in Wireless Communication

LIAO Xi^{①②} ZHOU Chenhong^① WANG Yang^① LIAO Shasha^①

ZHOU Jihua^② ZHANG Jie^①

^①(School of Communication and Information Engineering, Chongqing University of Posts and Telecommunications, Chongqing 400065, China)

^②(Chongqing Jinmei Communications Co. LTD, Chongqing 400030, China)

Abstract: Electromagnetic vortices are introduced into wireless communication to improve spectral efficiency and anti-interference capability. In this paper, the basic principle and characteristics of Orbital Angular Momentum (OAM) and electromagnetic eddy are introduced firstly. The principle of generating Orbital Angular Momentum from supersurface is given, and the methods and research status of generating orbital angular momentum based on supersurface are summarized. The transmission performance, receiving and detecting method, multiplexing and demultiplexing performance of orbital angular momentum are summarized. Finally, the key problems to be solved in the future application of wireless communication orbital angular momentum are discussed.

Key words: Wireless communication; Electromagnetic vortices; Orbital Angular Momentum (OAM); Spectrum efficiency

1 引言

轨道角动量(Orbital Angular Momentum, OAM)作为继时间、频率、空间和码型之后出现的新维度资源, 凭借其完美的正交性可以实现同时同

频多路信息调制, 不仅能极大地提升无线通信系统的信息传输和获取能力, 解决容量提升等瓶颈问题, 而且有望解决一直以来困扰无线通信系统的同频干扰问题, 被视为一项革命性创新无线通信技术。不同于描述电磁辐射极化状态的自旋角动量(Spin Angular Momentum, SAM), OAM是一种与空间相位分布有关的角动量。在20世纪初期, Poynting^[1]预测圆极化光波束包含SAM之后, Darwin^[2]于1932年指出角动量在高阶原子/分子转移期间保持时, 要求每个光子携带 lh 个OAM(l 为模态数, h 为普朗克常数)。随后, 1992年Allen等人^[3]通过横向相位 $\exp(il\phi)$ 构建螺旋相位波前的光波束, 等效于产生了携带 lh 的OAM。该波束绕传播方向上旋转, 在光轴上具有相位奇点, 呈现出涡旋形状, 因

收稿日期: 2019-05-20; 改回日期: 2019-09-18; 网络出版: 2020-03-02

*通信作者: 廖希 liaoxi@cqupt.edu.cn

基金项目: 国家自然科学基金(61801062, 61601073, 61801063), 重庆市基础科学与前沿技术研究项目(CSTC2017JCYJA0817), 重庆邮电大学博士启动基金(A2016-110)

Foundation Items: The National Natural Science Foundation of China (61801062, 61601073, 61801063), The Chongqing Research Program of Basic Research and Frontier Technology (CSTC2017JCYJA0817), The Dr. Start-up Funding of Chongqing University of Posts and Telecommunications (A2016-110)

此被称为光学涡旋。至此，光学涡旋被广泛用于实现光镊^[4]、光学扳手^[5]、光学引导^[6]等微操控纳米技术，以及应用在光谱分析^[7]、光子计算^[8]和光学通信^[9,10]等领域。因具有量子特性和独特空间相位特征，OAM被延伸至量子、雷达和通信等领域，用于量子通信^[11]、雷达成像^[12]和雷达目标检测^[13]、水下通信^[14]和无线通信等。2007年，Thide等人^[15]首次使用相控阵列天线产生了电磁涡旋，这为OAM作为信息载体用于扩展无线通信系统的通信容量提供了思路。相关研究^[16,17]论证了OAM用于无线通信系统信息传输的可行性，并且指出OAM具有提升无线通信系统频谱效率、实现多用户模分多址接入和抗干扰的潜能。尽管轨道角动量在无线通信领域的应用远不及光学涡旋，但是由于其在无线通信领域的巨大潜能，近年来受到了学者们的广泛关注。目前，学者们针对OAM在无线通信中的应用研究主要集中在电磁涡旋的产生与接收、复用与解复用、收发对齐、衰落与汇聚等方向，旨在突破电磁涡旋的高效产生与检测、信息复用、有效传输与兼容性等难题，期望充分利用OAM这一物理量，为突破无线通信系统的通信容量和抗干扰等难题提供一条可行的技术途径。

自OAM提出以来已经产出了很多研究成果，Padgett^[18]追溯了OAM的发展历史，综述了在光学操控、成像、量子光学和光通信中的应用。国防科技大学刘康等人^[19]梳理了电磁涡旋成像和旋转多普勒检测的发展历程和研究现状，并且面向雷达目标探测需求，对电磁涡旋产生技术进行了较为全面的总结。文献^[20]讨论了OAM信号产生、波束汇聚和OAM信号接收，并且研究了无线网络中不同OAM模态的多用户接入、低模态电磁涡旋通信^[21]、调模通信^[22]、电磁涡旋嵌套MIMO^[23]等关键技术。孙学宏等人^[24]从OAM产生与发射方式、接收与检测、OAM复用、能量发散、OAM波束汇聚等方向对OAM在无线通信领域的应用成果进行了综述。但是，为了充分挖掘并明确OAM在无线通信中的应用潜力，国内外学者相继提出了诸多新的解决方案和研究方向。本文分析已有综述论文，总结最新研究成果，着重梳理并总结基于超表面的轨道角动量产生和接收检测方法，分析OAM无线通信的传输性能，总结不同的OAM复用系统，指出未来研究方向。

2 轨道角动量及电磁涡旋

2.1 轨道角动量基本原理

经典的电磁场理论证明了电磁场可以传递能量和动量，其中动量由线性动量和角动量组成。在自由空间的体积V中，与扭动、扭矩作用相关的角动量J可以表示为^[25]

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

其中， \mathbf{E} 和 \mathbf{B} 分别表示电场矢量和磁场矢量。 \mathbf{r} 是空间任意检测点至场源的位置矢量，表示角动量产生的力矩使光束在传播路径上发生的扭动， ε_0 是真空介电常数，*表示矢量复共轭。 \mathbf{J} 包括OAM(\mathbf{L})和SAM(\mathbf{S})，满足 $\mathbf{J} = \mathbf{L} + \mathbf{S}$ 。

角动量的状态由模态数 j 区分，表示为

$$j = \frac{\omega J_z}{(\varepsilon_0/2) \int (|\mathbf{E}|^2 + c^2 |\mathbf{B}|^2) dV} \quad (2)$$

其中，与 x, z, v 方向上电场强度和磁场强度相关的 J_z 表示为

$$J_z = \varepsilon_0 \int \text{Re} \{ x(E_z B_x^* - E_x B_z^*) - y(E_v B_z^* - E_z B_v^*) \} dV \quad (3)$$

式(2)中的模态数 j 可以是正整数和负整数，并且满足 $j=l+s$ ， l 是OAM的模态数(也称为拓扑电荷)， s 是SAM的模态数。

2.2 电磁涡旋概念及特性

与光学涡旋类似，可将轨道角动量相位因子“添加”到平面电磁波上产生电磁涡旋。当电磁波 $u(\rho, \phi, z)$ 在圆柱坐标系下有式(4)形式

$$u(\rho, \phi, z) = u_0(\rho, z) \exp(il\phi) \quad (4)$$

电磁波能量 W 与其OAM分量 J_z 满足关系式 $J_z/W=(l+s)/\omega$ ，且电磁波沿 z 轴在横贯面上呈现 $|l|$ 倍螺旋相位结构。模态 l 代表扭曲方式，其数字和符号分别表示缠绕扭转度数和方向，这决定了电磁涡旋波的形态。具有式(4)形式的电磁波称为电磁涡旋。

与传统电磁波相比，电磁涡旋利用OAM这一新型维度资源进行复用传输，理论上具有无限个相互正交的互用状态，能够大幅度提高信息传输的容量和频谱效率，因此受到广泛关注。除了模态间的正交性之外，还具有如表1所示的发散性、稳定性、反射性、安全性和多维量子纠缠等特性，因而电磁涡旋技术在无线通信、生物医疗、太空通信、新型雷达与定位、光纤通信中有潜在的应用前景。

3 轨道角动量典型产生方法

由式(4)可知，产生电磁涡旋的关键技术问题在于如何在平面电磁波的基础上“增加”相位因子并改变相位因子倍数。近年来，学者们针对此问题开展了深入研究，孙学宏等人^[24]综述了透射光栅结构、透射螺旋结构、螺旋反射面和天线阵列等4类产生电磁涡旋的方式，其相应原理、代表性方法及应用如表2所示。

表1 电磁涡旋特性

特性	基本原理	潜在应用
正交性	任意两个整数阶模态的OAM波束互相正交, 构成无穷维希尔伯特空间	提升系统频谱效率
发散性	随着距离和OAM阶数的增加, OAM波束发散程度加剧	-
稳定性	OAM的相位结构与传输距离无关 ^[26] ; 当拓扑电荷为整数时相位奇点处场强为零, 并且随着传播距离增加, 中心对称的场强分布保持稳定。	实现长距离传输
反射性	OAM涡旋波束经过镜面反射只改变旋转方向不影响波前相位结构	有利于分析多径效应对传输系统的影响
安全性	受到角度限制和横向偏移的影响, 在传输过程中对信号的抽样检测存在不确定性 ^[9] , 可有效防止信息被窃取。	更高编码强度, 实现高容量高保密性通信 ^[27]
多维量子纠缠	单光子或纠缠光子可用于量子信息处理, 非整数模态OAM模态可以分解为整数OAM模态的线性叠加; 纠缠的量子态不可分离 ^[28] 。	

表2 典型OAM产生方法与分类

产生方式	生成原理	典型代表	优缺点	应用
透射光栅结构	利用干涉条纹产生的交叉错位结果得到的叉形光栅生成相位全息图, 结合计算机仿真数据制作相位全息面。	空间光调制器	成本低、转换速度快、可工作在任意频率、系统复杂度较低; 但是仅能实现单模态和非纯模态的生成、器件实现较复杂。	可用于毫米波段产生OAM波束, 通过空间复用提高频谱效率。
透射螺旋结构	波束透过厚度 h 随中心旋转方位角 ϕ 比例变化的相位板, 产生相位差随厚度变化的透射电磁波。	单阶梯型螺旋相位板 多阶梯型螺旋相位板 多孔型螺旋相位板	成本低、转换效率高、系统复杂度较低; 但是仅能在单点频率上实现单模态转换, 并且器件转换过程较复杂。	可用于实现高容量、高频谱效率的毫米波和太赫兹通信。
透射反射面	波束入射到非平面螺旋结构的不同区域, 导致波束相邻部分存在相对延迟。	阶梯型反射面 螺旋抛物面天线	成本低、系统复杂度较低、转换效率和转换速度正常; 但是仅能在单点频率上生成单模态和非纯模态, 并且实现过程较复杂。	通过OAM编码技术实现同频宽带干扰和地面反射干扰的鲁棒性传输。
天线阵列	为各阵列单元馈送相同信号, 通过改变阵元间馈电相位差产生不同的模态。	圆形相控阵 时间开关阵列 巴特勒矩阵 馈电阵列 光实时延时天线阵列	可在所有频率范围内生成多个模态和相反模态, 器件制作较容易, 转换速度和效率一般; 但是成本高、系统复杂度较高。	可对携带OAM的射频信号进行多路复用和解复用, 增加系统容量和效率。
q-板	在普通介质材料上加工特定几何形状的凹槽形成一种非均匀双折射结构。	-	成本低、系统复杂度较低、转换速度一般; 但是仅能在单点频率处生成单模态, 实现过程也较复杂。	可用于100 GHz毫米波OAM波束的产生和检测 ^[30] 。

除表2所示的各种典型产生方式外, 也可通过超表面来产生轨道角动量^[29], 这是一种产生电磁涡旋新思路。下文将引入基于超表面产生OAM波束的基本原理, 并且总结分析最新的研究成果。

3.1 基于超表面涡旋阵列的OAM波束产生原理

超表面是一种单元结构尺度远小于工作波长的人工周期性结构, 其电磁特性取决于单元结构而不是材料本身^[31], 因此可以通过控制超表面单元结构的形态和分布调控波束相位进而产生轨道角动量。平面电磁波极化电场矢量是以水平和垂直极化为基础的, 对超表面上的散射体, 其入射波和散射波的线极化状态可通过琼斯矩阵 \mathbf{J} 联系在一

起^[29], 即

$$\begin{pmatrix} E_x^s \\ E_y^s \end{pmatrix} = \mathbf{J}^l \begin{pmatrix} E_x^i \\ E_y^i \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} J_{xx} & J_{xy} \\ J_{yx} & J_{yy} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} E_x^i \\ E_y^i \end{pmatrix} \quad (5)$$

其中, E_x^i 和 E_y^i 分别是入射波 i 的水平和垂直分量。 E_x^s 和 E_y^s 分别是散射波 s 的水平和垂直分量。

$$\mathbf{J}^l = \begin{pmatrix} J_{xx} & J_{xy} \\ J_{yx} & J_{yy} \end{pmatrix} \quad (6a)$$

其中, 矩阵中各元素下标中的第1个字母表示入射波的极化, 第2个字母表示散射波极化。

通过坐标变换得到的圆极化琼斯矩阵 \mathbf{J}^c , 表示为

$$\mathbf{J}^c = \begin{pmatrix} J_{++} & J_{-} \\ J_{-+} & J_{--} \end{pmatrix} = \frac{1}{2} \begin{pmatrix} (J_{xx} + J_{yy}) + i(J_{xy} - J_{yx}) & (J_{xx} - J_{yy}) - i(J_{xy} + J_{yx}) \\ (J_{xx} - J_{yy}) + i(J_{xy} + J_{yx}) & (J_{xx} + J_{yy}) - i(J_{xy} - J_{yx}) \end{pmatrix} \quad (6b)$$

其中, “+”和“-”分别表示右旋圆极化(Right Circularly Polarized, RCP)和左旋圆极化(Left Circularly Polarized, LCP)分量。

当散射体满足RCP波和LCP波完美转换条件 $J_{yy} = -J_{xx}$, $J_{yx} = J_{xy} = 0$ 时, 式(6a)和式(6b)改写为

$$\mathbf{J}_{\text{pol}}^l = \begin{pmatrix} J_{xx} & 0 \\ 0 & -J_{xx} \end{pmatrix} \quad (7a)$$

$$\mathbf{J}_{\text{pol}}^c = \begin{pmatrix} 0 & J_{xx} \\ J_{xx} & 0 \end{pmatrix} \quad (7b)$$

若散射体以方位角 α 旋转, 式(7a)和式(7b)修正为

$$\mathbf{J}_{\text{pol}}^l(\alpha) = J_{xx} \begin{pmatrix} \cos(2\alpha) & \sin(2\alpha) \\ \sin(2\alpha) & -\cos(2\alpha) \end{pmatrix} \quad (8a)$$

$$\mathbf{J}_{\text{pol}}^c(\alpha) = J_{xx} \begin{pmatrix} 0 & e^{-2i\alpha} \\ e^{2i\alpha} & 0 \end{pmatrix} \quad (8b)$$

式(8)引入的相位因子 $\exp(\pm 2i\alpha)$ 表示通过改变散射体旋转角度 α 实现 2π 相移。因此, 为获得电磁涡旋的相位轮廓 $\exp(il\phi)$, 散射体的方位角 ϕ 和旋转角 α 需满足如式(9)的关系:

$$\alpha = \pm l\phi/2 \quad (9)$$

式中, 符号“ \pm ”取决于入射圆极化态。 α/ϕ 为超表面的拓扑数 q 。显然, OAM模式 l 由 q 值确定, 且为 q 值的两倍。

3.2 超表面产生OAM电磁涡旋的研究现状

超表面产生电磁涡旋的技术途径在于保证散射

体间耦合和高阶衍射合理的前提下设计并优化散射体结构。目前, 学者们已经提出了以偶极子^[32]、等离激元^[33]、L型纳米天线^[34]、椭圆形纳米天线^[35]和开口谐振环^[29,36]等为单元散射体的超表面, 如表3所示。

浙江大学联合香港大学^[32]创新提出了一种复合导体(Perfect Electric Conductor, PEC)-磁导体(Perfect Magnetic Conductor, PMC)各向异性超表面, 其示意图如图1(a)所示。PEC-PMC表面散射体单元结构如图1(b), 该结构由两片人造金属条和接地层组成; 图1(c)给出了人造PEC表面及由蘑菇状高阻抗表面实现的人造PMC表面。该表面将PEC金属条排列形成一系列同心环, 通过改变不同方位角处散射体的旋转角度, 最终产生了2和-2两个模式。然而, 上述超表面散射体为离散状态, 在发生旋转时会破坏 x 和 y 方向上的连续性, 因此该团队提出将PEC层的散射体设计为准连续模式, 以降低由离散散射体的局部响应不连续引起的失真, 同时避免发生高阶衍射^[40]。而后他们还利用3维光子晶体点缺陷产生了电磁涡旋^[37]。该方法首先将线缺

表 3 基于超表面的电磁涡旋产生方法比较

研究团队	单元结构	产生方法/原理	实验频率	模式 l	存在问题
香港大学和浙江研 究团队	-	3维光子晶体点缺陷 ^[37]	8.8 GHz	± 2	-
	偶极子	通过调整散射体的几何形状改变其谐振频率, 使得相移在设计频率处发生变化 ^[32]	9.7 GHz	± 1	超表面散射体之间通常存在不可避免相互耦合现象
上海同济大学	金属贴片 层金属接 地层介电 间隔层 金属片和 衬底	梯度相位反射超表面 ^[38]	10 GHz	1	不连续相位剖面会引入相位噪声
西安交通大学		由变容二极管加载可调谐散射体超表面 ^[39]	5.35 GHz	$\pm 1, \pm 2$	元件数量受限, 难以生成高模式

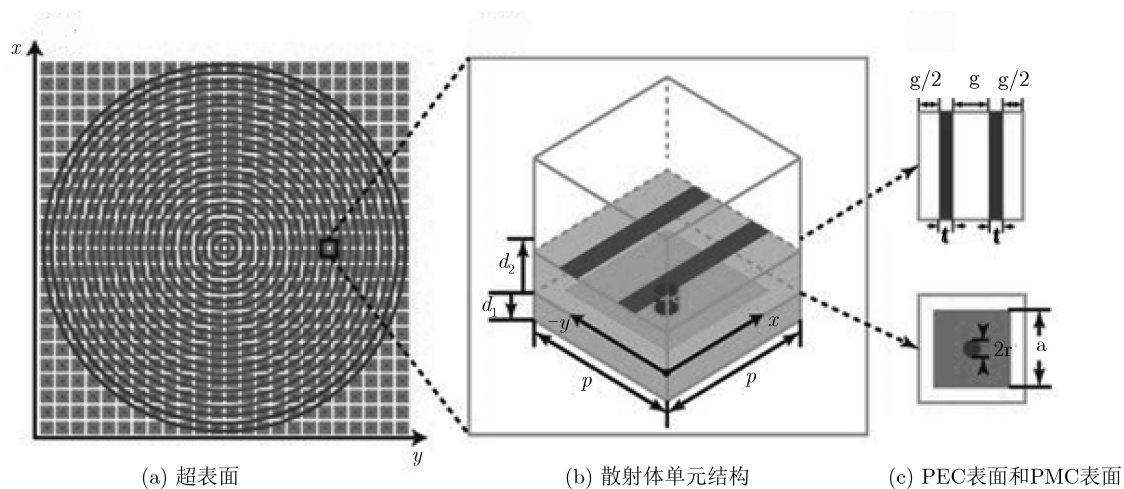


图 1 PEC-PMC超表面示意图

陷中的导波耦合至点缺陷中的局部模式里,并由圆形开口辐射出去,然后用预先设计的相位延迟,激发点缺陷中正交振动模式下的缺陷状态,最终产生 ± 1 和 ± 2 4模态。

中国科学院光电技术研究所Guo等人^[33]提出了如图2所示环形孔超表面。首先通过改变孔径方向,产生几何相位(类似于多孔型相位板);再通过改变孔径宽度,产生等离激元延迟相位,经过两个阶段共同作用生成任意模态的OAM波束。与传统相移超表面相比,该方法不仅减少了由不连续相位剖面引入的相位噪声,还降低了设计和制造的复杂度。

加拿大渥太华大学的研究者^[34]发现将圆偏振光作用于等离子体超表面可产生轨道角动量。随后,他们利用由L型纳米天线阵列组成的等离子体超表面,将自旋角动量与轨道角动量耦合,并根据这种耦合关系设计了一种超薄OAM发生器。基于此,文献^[36]于2017年提出了一种双层互补超表面,该

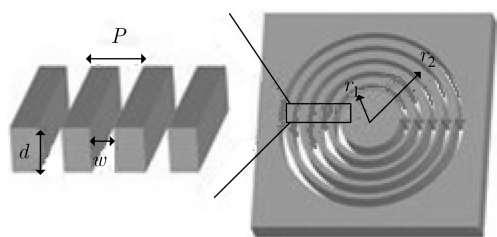
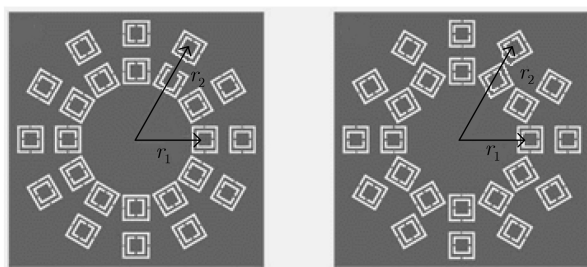


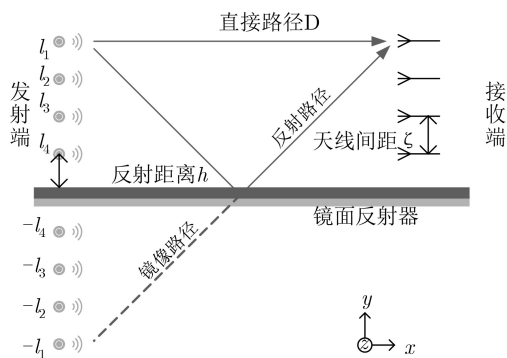
图2 实验测量装置图



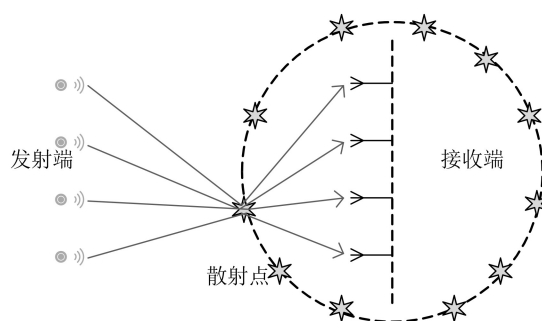
(a) 结构1: $l=1$

(b) 结构2: $l=2$

图3 环形孔超表面示意图



(a) 镜面反射模型



(b) 圆散射模型

图4 超表面的几何结构俯视图

超表面包括24个单位晶胞,每个晶胞为半波长谐振下处于亚波长尺寸的方环形散射体,如图3所示。该超表面产生了 $l=1$ 和 $l=2$ 两个模态,半径 $r_1=14$ mm, $r_2=21$ mm,在17.84 GHz频率下能获得81%的圆偏振转换效率。

超表面(图4)通过改变单元结构的相位产生电磁涡旋。它的出现避免了传统大容量器件的使用,并且因其超薄结构、可调谐、低成本、质量小等优势,已经被广泛用于产生电磁涡旋。但是,基于超表面的涡旋波信号产生机制难以精确地控制调制信号的相位,因此不适用于无线通信中多个OAM模态的传输。

此外,在实际传输场景中,电磁波会发生直射、反射、散射、衍射和绕射等多种传播现象,导致接收信号是多路径传播成分的叠加。然而,多径效应下,电磁涡旋在某些路径上的传播特性有异于普通电磁波和光波,因此下面将对多径条件下轨道角动量传输的研究现状进行分析与总结,并且梳理轨道角动量的接收与检测,强调未来的研究重点。

4 轨道角动量的传输与接收检测

4.1 多径条件下轨道角动量传输性能研究现状

利用电磁涡旋独特的螺旋相位结构和模态间的正交性实现在同一频率(或同一频带)内多路信号并行传输,进而挖掘电磁涡旋波提升无线通信系统容量的潜能。但在传输过程中,受多径效应和噪声等一系列不确定因素的影响,电磁涡旋的螺旋谱结构容易发散,且发散性随着传播距离的增加而加剧,产生的信道间串扰和信道内串扰影响通信系统性能。目前,学者们对电磁涡旋波的研究主要集中在视距条件,对非视距条件的相关研究不足。

新加坡国立大学和浙江大学的学者们^[41]通过建立镜面反射模型和圆散射模型,对比分析了视距和非视距信道下,平面螺旋轨道角动量-多输入多输出(MIMO)复用系统和传统MIMO系统性能随发射

OAM模态、反射器距离、OAM首模态、天线间距、散射体位置、莱斯K因子等因素的变化趋势，系统模型如图5所示。

南加州大学^[42]将喇叭天线和螺旋相位板(Spiral Phase Plate, SPP)结合，利用镜面反射模型研究了28 GHz下的OAM毫米波复用链路的多径效应，以及同一模态信道内干扰和不同模态信道间干扰，如图6所示。研究表明OAM模态数越高，发散特性越大，接收功率越低；直射径与反射径之间的模态内干扰强度与反射器距离相关，接收功率随距离增加而增加。可见，因OAM波束的发散性和接收端SPP板的滤波效应，高模态的OAM波束更容易受到信道内和信道间干扰。

上海交通大学Yao等人^[43]将OAM波分解为具有不同仰角和方位角的平面波，对OAM的反射和折射传播特性进行了理论分析。研究发现，折射后的OAM模态不变，反射后OAM波模态相反。通过研究OAM通信链路的散射效应，美国南加州大学和日本电气实验室的研究者们^[44]观察分析了不同OAM模态下的链路功率损耗、模态纯度、串扰和误码率性能。结果表明散射效应对功率损耗影响较大，对模态纯度影响不显著，并且由模态数增加引入的串扰会降低OAM复用链路的性能。

目前，学者们集中于研究视距传播下的OAM系统性能^[45]，对非视距传播条件下的OAM系统性能分析不足，未来需要提出新的多径模型以明确多径效应对OAM传输的影响。

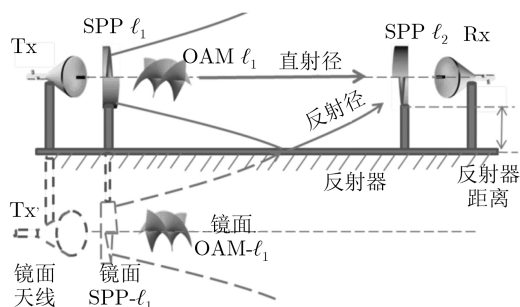


图5 多径信道系统模型示意图

4.2 轨道角动量接收与检测的研究现状

电磁涡旋的接收与检测归类为两种方法：(1)用天线(或天线阵)接收整个螺旋波束^[15]，再使用单点法或相位梯度法检测模态。其中，单点法是利用OAM的远场近似，对检测点上电场和磁场的所有3个分量进行模式分析，计算出空间特定点上的拓扑电荷值，达到“去旋转”的目的，是一种最直接的方法。相位梯度法是一种通过计算两个接收器接收信号的相位差来确定OAM模态的方法，尽管该方法局限于严格的收发天线对齐，但它计算简单，为OAM模态检测提供了一种简单方法；(2)将螺旋波束转换成性质明确且便于分析的波束(如高斯波^[46])，研究转换后的波束以确定OAM模态。其中，前者因波束的发散特性需要大口径的接收天线，因此不易于用于长距离传输的OAM通信系统。

除了单点法^[47]和相位梯度法^[17]等通用检测方法外，学者们相继提出了多环谐振器OAM天线^[48]、数字虚拟天线^[49]、衍射模式转换器^[50]、超表面^[46]、部分孔径取样接收法^[51]和均匀圆形天线阵^[52]等方法，如表4所示。

浙江大学武华阳^[52]提出了一种基于均匀环形天线阵列的偏轴检测法。实际无线通信系统同时存在横向偏移和角度倾斜，但是该文献中的“偏轴”仅考虑了横向偏移，因此提出的检测方法不易于扩展，仍需深入研究更普适的检测方法。

武汉光电国家实验室Liu等人^[50]提出了一种利用衍射模式变换器区分太赫兹涡旋波束的有效方法。文中利用SPP板生成OAM波束，使用2个3维打印的衍射元件构建的模式变换器变换入射波束，再利用透镜分离OAM模态，进而通过分析焦平面图像，检测出-3到+3的7种模态。

除上述检测方法外，也可以基于超表面设计轨道角动量的接收与检测方法。香港大学和浙江大学的学者们^[46]提出了一种可检测多个OAM模态的全息超表面。该表面首先根据改进的透射率函数优化超表面，进而将入射波转换为高斯波，然后通过定位高斯波在设定位置处的场强确定入射波束模态。

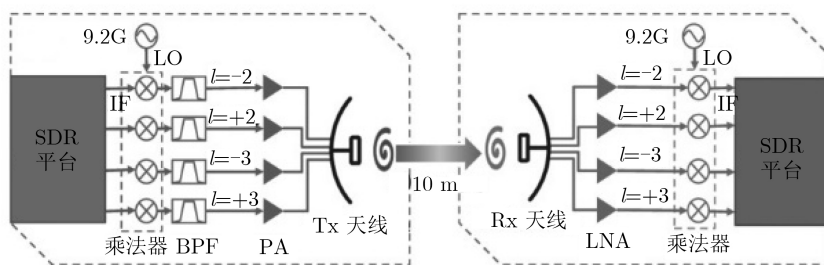


图6 OAM多径效应镜面反射模型示意图^[47]

表4 典型的OAM检测方法

检测方法	结构	基本原理	优缺点	结果
单点法	-	利用OAM远场近似, 对检测点上电场和磁场的 所有3个分量进行模式分析, 计算得出 在空间特定点上的拓扑电荷值。	成本低、系统复杂度较低; 需对整个波前 进行采样; 适用于单模态和较低模态的检 测。	-
相位梯度法	-	检测两点间相位梯度, 通过螺旋相位结构 判定OAM模态。	成本低、系统复杂度较低; 仅需分析波前 上的两个采样点, 适用于单模态检测。	-
多环谐振器OAM 天线	经验模式分解	电磁波的基础可以由经验模式分解中的固 有模式函数构成, 由此定义每个局部拓扑 电荷。	能够检测叠加态。	检测了-2和3的叠 加态
数字虚拟旋转 天线	接收天线高速采样示 波器频谱分析仪	根据旋转多普勒频移和OAM模态之间的 关系确定OAM模态。	系统较复杂; 适用于检测单个模态。	检测了1, 2, 4共 3个单模态
衍射模式转换器	OAM模式转换器, 接收天线	SPP板产生不同模态涡旋波束; 模式转换 器将涡旋波束映射为平面波, 通过透镜聚 焦产生横向光斑, 最后接收。	成本较低; 需检测整个波前, 但是适用于 单模态和叠加态的检测。	检测了-3到3共 7个单模态和两 个叠加态
全息超表面	全息超表面	超表面将OAM波束转换为高斯波束, 通 过定位高斯波束在设定位置处的场强确定 入射OAM模态。	系统复杂度较低; 成本高、器件实现较复 杂; 适用于多个单模态的检测。	检测了-2到2共 5个单模态
部分孔径取样接 收法	-	将光学中用于OAM解复用的偏角接收孔 径法和采样接收法结合。	仅需对部分波前进行采样, 以检测多个模 态; 成本高;	-
均匀圆形天线 阵列	-	对接收到的电磁涡旋进行频谱分析。	可检测相反模态和但, 模态; 成本高, 需 对整个波前采样, 系统复杂度高。	-

该超表面采用全息概念, 具有小巧和高调谐灵活性的优点。

5 轨道角动量的复用和解复用

利用电磁涡旋的螺旋相位波前特征^[53], 可以实现以OAM为自由度的模分复用。模分复用系统被认为是空分复用系统的子集。与传统空分复用系统不同的是, 模分复用系统可以在同一频率或同一频段下对不同OAM信号进行调制, 从而同时实现多个信道的传输, 且无需进行信道对角化等复杂信号处理, 这不仅极大地提升了无线通信系统的容量和抗干扰能力, 而且还降低了复杂度。

表5给出了几种典型通信技术的传输速率和频谱利用率^[16]。结果表明, 利用OAM复用的通信方式频谱利用率高达95.5 bps/Hz, 是长期演进技术(Long Term Evolution, LTE)通信方式频谱利用率的5倍; OAM复用系统的传输速率可达Tbps数量级, 约为LTE传输速率的8000倍。

5.1 复用原理

基于OAM的复用技术得益于轨道角动量的正交性。在设计OAM复用系统时, 可以根据信道数 L 确定最大调制模态数, 即 $N=2L+1, l \in \{-L, \dots,$

表5 OAM与LTE传输速率和频谱利用率比较

通信类型	频谱利用率(bps/Hz)	传输速率(Mbps)	调制方式
OAM	95.5	2560	16-QAM ^[16]
LTE	16.32	326.4	64-QAM

$-1, 0, \dots, L\}$ 。理论上通过增加OAM模态数, 便可以提高系统的数据传输速率和频谱利用率^[54]。

东南大学和新加坡国立大学的学者们^[55]提出了一种轨道角动量-模分复用(Mode Division Multiplexing, MDM)系统, 如图7所示, 在10 GHz的频率下实现了 ± 3 和 ± 2 共4个模态的复用和解复用。理论分析和实验结果表明: 与传统视距MIMO系统相比, 该系统的频谱效率提升了4倍, 同时接收复杂度降低。

5.2 超表面复用系统

根据OAM的空间相位分布特征, 成都光电研究所的学者们^[56]设计了一种表面高度集成的离轴技术, 实现对OAM的复用和解复用, 如图8所示。实验中用偶极子天线设计了一种超表面, 在超表面上

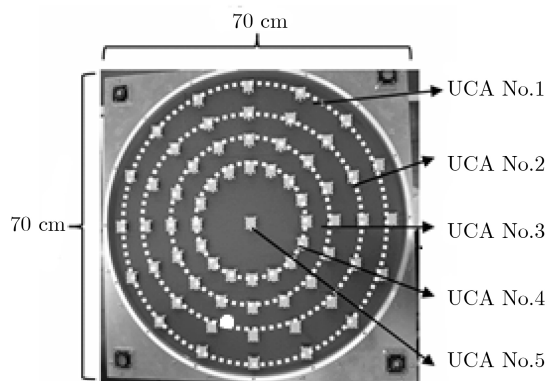


图7 OAM-MDM系统示意图

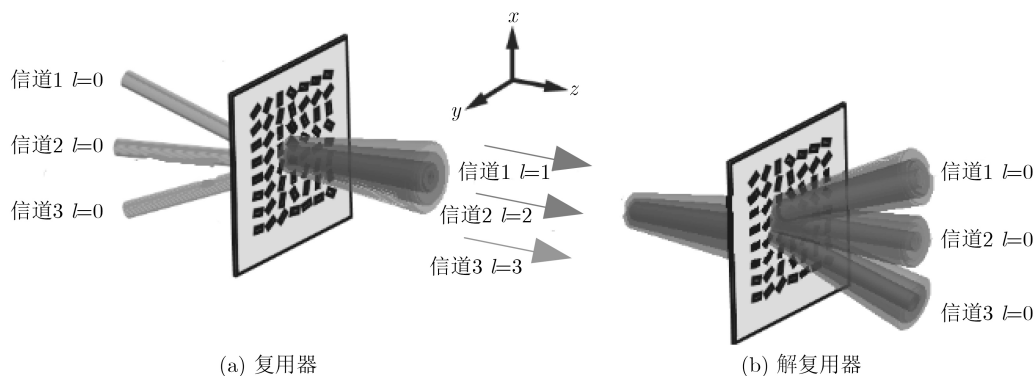


图8 复用与解复用示意图

集成了空分复用、波分复用和偏振多路复用等组件。其复用与解复用过程为：复用器将以不同角度入射的普通波束转换成携带不同OAM模态的同轴波束；解复用过程则与复用过程相反。

空军工程大学Zhang等人^[57]提出了一种用于OAM复用的共用孔径超表面。实验将相移网络馈电的相控阵天线安装在超表面的反射孔径上，使超表面在7.1~7.5 GHz处于反射阵列模式，在7~7.5 GHz处于相控阵模式，对应产生-1和+1模态。测试结果表明两种工作模式间的传输系数低于-30 dB，包络相关系数接近0，这说明了两种工作模式的隔离性能良好。

5.3 OAM-MIMO复用系统

为了进一步提升MIMO系统性能，研究者们提出将OAM与MIMO进行复用。Opore等人^[58]提出了一个OAM嵌入大规模MIMO通信的框架，结果表明嵌入系统的频谱效率增益大于传统的大规模MIMO通信系统。日本NTT网络创新实验室的学者们^[59]提出了一种OAM-MIMO复用系统，该系统

的收发天线均由5个不同半径的均匀圆形阵列(Uniform Circular Array, UCA)组成同心环，每组UCA可同时发送或接收5个OAM模态(0, ±1, ±2)，天线结构如图9所示。该系统在28 GHz频段处，实现了10 m距离下的100 Gbps传输，点对点高速传输达到了新高度。

5.4 OAM-OFDM复用系统

由于OAM波束发散且受到多径效应的影响，OAM模态会受到严重的信道内和信道间串扰。为了解决这个问题，研究者们提出了正交频分复用(OFDM)-轨道角动量复用系统。南加州大学^[60]研究了在OFDM-OAM系统的信道性能。研究表明OFDM-OAM系统可在一定程度上改善信道性能。文献^[61]提出了一种宽带OFDM-OAM无线通信系统收发器架构，该系统使用基带数字2维快速傅里叶变换来生成和接收OFDM-OAM信号。相比使用射频模拟移相器，提出的设计方法降低了能耗和硬件成本。文献^[62]提出一种基于时间序列切换的OFDM-OAM系统，研究了不同结构系统之间的容

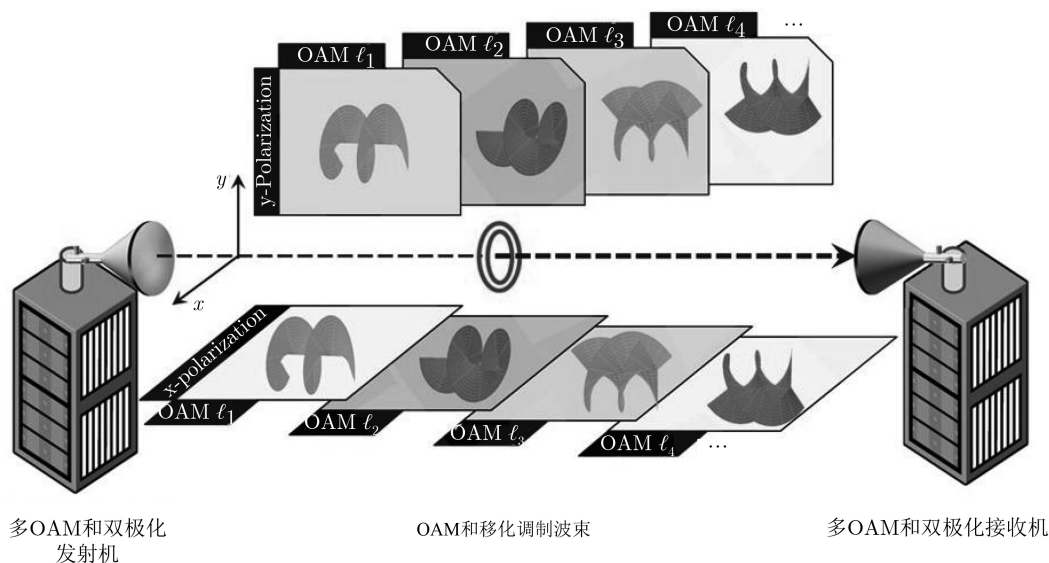


图9 天线UCA示意图

量和传输距离以及倾斜角之间的关系,结果表明在距离较远时所提出系统的性能表现优于其他系统,在不对齐状态下系统容量总体优于其他系统,且提升了频谱效率,降低了成本和计算复杂度。

OAM系统可被视为以模态为自由度的模分复用系统, OAM系统与其他系统复用概念的提出为提升OAM系统容量提供了一种新思路。除了OAM-MIMO, OAM-OFDM复用系统外, OAM还可以与波分复用(Wavelength Division Multiplexing, WDM)构建新的复用系统,高效发挥OAM系统的性能优势^[63]。

5.5 复用实验

表6中比较了现有的传输实验,其中南加州大学的学者们^[64]在2.5 m距离下,实现了32 Gbps的轨道角动量毫米波通信传输,分别在X极化和Y极化上成功传输了 $l=-1, -3, 1$ 和 3 共计8个通信信道的电磁涡旋,误码率低于 3.8×10^{-3} 。清华大学航电实验室提出了部分波阵面接收法,并于2016年底前,先后成功完成1 km传输(昌平虎峪)、7.3 km传输(清华大学至百望山)、13.6 km传输(清华大学至香山),以及27.5 km传输(10 GHz, 清华大学至千灵山)等多次实验,验证了该方法用于检测和区分不同OAM模态的有效性。据悉,清华大学航电实验室正在开展100 km的传输试验^[65]。

表6 不同传输实验比较

文献	方法	模态 l	传输距离	传输速率	频率	频谱效率	误码率
文献[17]	螺旋抛物面天线	0, -1	442 m	-	2.4 GHz	-	-
文献[64]	贴片阵列天线	$\pm 1, \pm 3$	2.5 m	32 Gbps	毫米波	16 Gbps/Hz	3.8×10^{-3}
文献[65]	部分波阵面接收	-	27.5 km	-	10 GHz	-	-

轨道角动量在提升无线通信系统性能上具有巨大的潜力,但是目前还面临许多问题和挑战,未来仍需对以上问题进行深入研究。

参考文献

- [1] POYNTING J H. The wave motion of a revolving shaft, and a suggestion as to the angular momentum in a beam of circularly polarised light[J]. *Proceedings of the Royal Society A: Mathematical, Physical and Engineering Sciences*, 1909, 82(557): 560-567.
- [2] DARWIN C G. Notes on the theory of radiation[J]. *Proceedings of the Royal Society A: Mathematical, Physical and Engineering Sciences*, 1932, 136(829): 36-52.
- [3] ALLEN L, BELJERSBERGEN M W, SPREEUW R J C, et al. Orbital angular momentum of light and the transformation of Laguerre-Gaussian laser modes[J]. *Physical Review A*, 1992, 45(11): 8185-8189. doi: 10.1103/

6 结束语

基于轨道角动量的无线通信技术是一项可以有效提升频谱效率和抗干扰能力的创新性技术。要充分利用OAM的调至自由度,需要突破OAM的产生、传输、接收检测和复用等问题。本文跟踪并综述了最新的研究成果,基于对现有理论与结果的分析指出未来还需在如下方面开展深入研究:

(1) OAM产生方式: 高效、灵活、低成本地产生多模态电磁涡旋是研究重点和难点。理论上OAM模态数量无限,但多模态电磁涡旋的产生尚未出现重大突破,未来需要进行深入研究。

(2) OAM传输性能: 传输环境和传输距离制约了OAM系统的性能提升。电磁涡旋波的传输能力与多径效应、大气湍流、传播距离、收发天线对齐等因素有关,未来需对以上因素进行深入研究。

(3) OAM接收与检测: 目前有两种接收观点: 一是随着传播距离增加, OAM波束中空部分变大,导致天线接收困难^[66]; 另一种认为OAM信道取决于载波相位结构,而相位结构与传播距离无关^[26]。虽然上述观点均有理论依据,但是尚未得出明确结论。同时,超表面的出现为模态检测提供了新方法,但是在多模态分离和检测中的适用性需要进一步论证。

[PhysRevA.45.8185](#).

- [4] TAO S H, YUAN X C, LIN J, et al. Fractional optical vortex beam induced rotation of particles[J]. *Optics Express*, 2005, 13(20): 7726-7731. doi: 10.1364/OPEX.13.007726.
- [5] SIMPSON N B, DHOLAKIA K, ALLEN L, et al. Mechanical equivalence of spin and orbital angular momentum of light: An optical spanner[J]. *Optics Letters*, 1997, 22(1): 52-54. doi: 10.1364/OL.22.000052.
- [6] DI TRAPANI P, CHINAGLIA W, MINARDI S, et al. Observation of quadratic optical vortex solitons[J]. *Physical Review Letters*, 2000, 84(17): 3843-3846. doi: 10.1103/PhysRevLett.84.3843.
- [7] POPESCU G and DOGARIU A. Spectral anomalies at wave-front dislocations[J]. *Physical Review Letters*, 2002, 88(18): 183902. doi: 10.1103/PhysRevLett.88.183902.
- [8] BERŽANSKIS A, MATIJOŠLUS A, PISKARSKAS A, et al. Conversion of topological charge of optical vortices in a

- parametric frequency converter[J]. *Optics Communications*, 1997, 140(4/6): 273–276.
- [9] GIBSON G, COURTIAL J, PADGETT M J, *et al.* Free-space information transfer using light beams carrying orbital angular momentum[J]. *Optics Express*, 2004, 12(22): 5448–5456. doi: [10.1364/OPEX.12.005448](https://doi.org/10.1364/OPEX.12.005448).
- [10] XIE Guodong, REN Yongxiong, YAN Yan, *et al.* Experimental demonstration of a 200-Gbit/s free-space optical link by multiplexing Laguerre–Gaussian beams with different radial indices[J]. *Optics Letters*, 2016, 41(15): 3447–3450. doi: [10.1364/OL.41.003447](https://doi.org/10.1364/OL.41.003447).
- [11] NDAGANO B, NAPE I, COX M A, *et al.* Creation and detection of vector vortex modes for classical and quantum communication[J]. *Journal of Lightwave Technology*, 2018, 36(2): 292–301. doi: [10.1109/JLT.2017.2766760](https://doi.org/10.1109/JLT.2017.2766760).
- [12] YUAN Tiezhu, WANG Hongqiang, CHENG Yongqiang, *et al.* Electromagnetic vortex-based radar imaging using a single receiving antenna: Theory and experimental results[J]. *Sensors*, 2017, 17(3): 630. doi: [10.3390/s17030630](https://doi.org/10.3390/s17030630).
- [13] LIN Mingtuan, LIU Peiguo, GAO Yue, *et al.* Super-resolution orbital angular momentum based radar targets detection[J]. *Electronics Letters*, 2016, 52(13): 1168–1170. doi: [10.1049/el.2016.0237](https://doi.org/10.1049/el.2016.0237).
- [14] SHI Chengzhi, DUBOIS M, WANG Yuan, *et al.* High-speed acoustic communication by multiplexing orbital angular momentum[J]. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, 2017, 114(28): 7250–7253. doi: [10.1073/pnas.1704450114](https://doi.org/10.1073/pnas.1704450114).
- [15] THIDÉ B, THEN H, SJÖHOLM J, *et al.* Utilization of photon orbital angular momentum in the low-frequency radio domain[J]. *Physical Review Letters*, 2007, 99(8): 087701. doi: [10.1103/PhysRevLett.99.087701](https://doi.org/10.1103/PhysRevLett.99.087701).
- [16] WANG Jian, 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. doi: [10.1038/nphoton.2012.138](https://doi.org/10.1038/nphoton.2012.138).
- [17] TAMBURINI F, MARI E, SPONSELLI A, *et al.* Encoding many channels on the same frequency through radio vorticity: First experimental test[J]. *New Journal of Physics*, 2012, 14(3): 033001. doi: [10.1088/1367-2630/14/3/033001](https://doi.org/10.1088/1367-2630/14/3/033001).
- [18] PADGETT M J. Orbital angular momentum 25 years on [Invited][J]. *Optics Express*, 2017, 25(10): 11265–11274. doi: [10.1364/OE.25.011265](https://doi.org/10.1364/OE.25.011265).
- [19] 刘康, 黎湘, 王宏强, 等. 涡旋电磁波及其在雷达中应用研究进展[J]. *电子学报*, 2018, 46(9): 2283–2290. doi: [10.3969/j.issn.0372-2112.2018.09.034](https://doi.org/10.3969/j.issn.0372-2112.2018.09.034).
- LIU Kang, LI Xiang, WANG Hongqiang, *et al.* The advances of vortex electromagnetic wave in radar applications[J]. *Acta Electronica Sinica*, 2018, 46(9): 2283–2290. doi: [10.3969/j.issn.0372-2112.2018.09.034](https://doi.org/10.3969/j.issn.0372-2112.2018.09.034).
- [20] CHENG Wenchi, ZHANG Wei, JING Haiyue, *et al.* Orbital angular momentum for wireless communications[J]. *IEEE Wireless Communications*, 2019, 26(1): 100–107. doi: [10.1109/MWC.2017.1700370](https://doi.org/10.1109/MWC.2017.1700370).
- [21] JING Haiyue, CHENG Wenchi, LI Zan, *et al.* Concentric UCAs based low-order OAM for high capacity in radio vortex wireless communications[J]. *Journal of Communications and Information Networks*, 2018, 3(4): 85–100. doi: [10.1007/s41650-018-0036-z](https://doi.org/10.1007/s41650-018-0036-z).
- [22] CHENG Wenchi, ZHANG Hailin, LIANG Liping, *et al.* Orbital-angular-momentum embedded massive MIMO: Achieving multiplicative spectrum-efficiency for mmwave communications[J]. *IEEE Access*, 2018, 6: 2732–2745. doi: [10.1109/ACCESS.2017.2785125](https://doi.org/10.1109/ACCESS.2017.2785125).
- [23] LIANG Liping, CHENG Wenchi, ZHANG Wei, *et al.* Mode hopping for anti-jamming in radio vortex wireless communications[J]. *IEEE Transactions on Vehicular Technology*, 2018, 67(8): 7018–7032. doi: [10.1109/TVT.2018.2825539](https://doi.org/10.1109/TVT.2018.2825539).
- [24] 孙学宏, 李强, 庞丹旭, 等. 轨道角动量在无线通信中的研究新进展综述[J]. *电子学报*, 2015, 43(11): 2305–2314. doi: [10.3969/j.issn.0372-2112.2015.11.025](https://doi.org/10.3969/j.issn.0372-2112.2015.11.025).
- SUN Xuehong, LI Qiang, PANG Danxu, *et al.* New research progress of the orbital angular momentum technology in wireless communication: A survey[J]. *Acta Electronica Sinica*, 2015, 43(11): 2305–2314. doi: [10.3969/j.issn.0372-2112.2015.11.025](https://doi.org/10.3969/j.issn.0372-2112.2015.11.025).
- [25] 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. doi: [10.1109/TAP.2009.2037701](https://doi.org/10.1109/TAP.2009.2037701).
- [26] TAMBURINI F, THIDÉ B, MARI E, *et al.* Reply to comment on ‘encoding many channels on the same frequency through radio vorticity: First experimental test’[J]. *New Journal of Physics*, 2012, 14(11): 118002. doi: [10.1088/1367-2630/14/11/118002](https://doi.org/10.1088/1367-2630/14/11/118002).
- [27] BOUCHAL Z and CELECHOVSKY R. Mixed vortex states of light as information carriers[J]. *New Journal of Physics*, 2004, 6(1): 131.
- [28] MAIR A, VAZIRI A, WEIHS G, *et al.* Entanglement of the orbital angular momentum states of photons[J]. *Nature*, 2001, 412(6844): 313–316. doi: [10.1038/35085529](https://doi.org/10.1038/35085529).
- [29] CHEN Menglin, JIANG Lijun, and SHA Wei. Orbital angular momentum generation and detection by geometric-phase based metasurfaces[J]. *Applied Sciences*, 2018, 8(3): 362. doi: [10.3390/app8030362](https://doi.org/10.3390/app8030362).
- [30] MACCALLI S, PISANO G, COLAFRANCESCO S, *et al.* Q-plate for millimeter-wave orbital angular momentum

- manipulation[J]. *Applied Optics*, 2013, 52(4): 635–639. doi: [10.1364/AO.52.000635](https://doi.org/10.1364/AO.52.000635).
- [31] KOU Na, YU Shixing, and LI Long. Generation of high-order Bessel vortex beam carrying orbital angular momentum using multilayer amplitude-phase-modulated surfaces in radiofrequency domain[J]. *Applied Physics Express*, 2017, 10(1): 016701. doi: [10.7567/APEX.10.016701](https://doi.org/10.7567/APEX.10.016701).
- [32] CHEN Menglin, JIANG Lijun, and SHA Wei. Artificial perfect electric conductor-perfect magnetic conductor anisotropic metasurface for generating orbital angular momentum of microwave with nearly perfect conversion efficiency[J]. *Journal of Applied Physics*, 2016, 119(6): 064506. doi: [10.1063/1.4941696](https://doi.org/10.1063/1.4941696).
- [33] GUO Yinghui, PU Mingbo, ZHAO Zeyu, *et al.* Merging geometric phase and plasmon retardation phase in continuously shaped metasurfaces for arbitrary Orbital angular momentum generation[J]. *ACS Photonics*, 2016, 3(11): 2022–2029. doi: [10.1021/acsphotonics.6b00564](https://doi.org/10.1021/acsphotonics.6b00564).
- [34] KARIMI E, SCHULZ S A, DE LEON I, *et al.* Generating optical orbital angular momentum at visible wavelengths using a plasmonic metasurface[J]. *Light: Science & Applications*, 2014, 3(5): e167.
- [35] MA Xiaoliang, PU Mingbo, LI Xiong, *et al.* A planar chiral meta-surface for optical vortex generation and focusing[J]. *Scientific Reports*, 2015, 5: 10365. doi: [10.1038/srep10365](https://doi.org/10.1038/srep10365).
- [36] CHEN Menglin, JIANG Lijun, and SHA Wei. Ultrathin complementary metasurface for orbital angular momentum generation at microwave frequencies[J]. *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*, 2017, 65(1): 396–400. doi: [10.1109/TAP.2016.2626722](https://doi.org/10.1109/TAP.2016.2626722).
- [37] CHEN Menglin, JIANG Lijun, and SHA Wei. Generation of orbital angular momentum by a point defect in photonic crystals[J]. *Physical Review Applied*, 2018, 10(1): 014034. doi: [10.1103/PhysRevApplied.10.014034](https://doi.org/10.1103/PhysRevApplied.10.014034).
- [38] XU Bijun, WU Chao, WEI Zeyong, *et al.* Generating an orbital-angular-momentum beam with a metasurface of gradient reflective phase[J]. *Optical Materials Express*, 2016, 6(12): 3940–3945. doi: [10.1364/OME.6.003940](https://doi.org/10.1364/OME.6.003940).
- [39] SHI Hongyu, WANG Luyi, PENG Gantao, *et al.* Generation of multiple modes microwave vortex beams using active metasurface[J]. *IEEE Antennas and Wireless Propagation Letters*, 2019, 18(1): 59–63. doi: [10.1109/LAWP.2018.2880732](https://doi.org/10.1109/LAWP.2018.2880732).
- [40] CHEN Menglin, JIANG Lijun, and SHA Wei. Quasi-continuous metasurfaces for orbital angular momentum generation[J]. *IEEE Antennas and Wireless Propagation Letters*, 2019, 18(3): 477–481. doi: [10.1109/LAWP.2019.2894772](https://doi.org/10.1109/LAWP.2019.2894772).
- [41] ZHENG Shilie, DONG Ruofan, ZHANG Zhuofan, *et al.* Non-line-of-sight channel performance of plane spiral orbital angular momentum MIMO systems[J]. *IEEE Access*, 2017, 5: 25377–25384. doi: [10.1109/ACCESS.2017.2766078](https://doi.org/10.1109/ACCESS.2017.2766078).
- [42] YAN Yan, LI Long, XIE Guodong, *et al.* Experimental measurements of multipath-induced intra- and inter-channel crosstalk effects in a millimeter-wave communications link using orbital-angular-momentum multiplexing[C]. 2015 IEEE International Conference on Communications, London, UK, 2015: 1370–1375.
- [43] YAO Yu, LIANG Xianlin, ZHU Maohua, *et al.* Analysis and experiments on reflection and refraction of orbital angular momentum waves[J]. *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*, 2019, 67(4): 2085–2094. doi: [10.1109/TAP.2019.2896760](https://doi.org/10.1109/TAP.2019.2896760).
- [44] ZHANG Runzhou, LI Long, ZHAO Zhe, *et al.* Coherent optical wireless communication link employing orbital angular momentum multiplexing in a ballistic and diffusive scattering medium[J]. *Optics Letters*, 2019, 44(3): 691–694. doi: [10.1364/OL.44.000691](https://doi.org/10.1364/OL.44.000691).
- [45] NIEMIEC R, BROUSSEAU C, EMILE O, *et al.* Study of OAM waves reflection on different types of surfaces or objects at 2.45 GHz[C]. The 1st URSI Atlantic Radio Science Conference, Las Palmas, Spain, 2015: 1–2.
- [46] CHEN Menglin, JIANG Lijun, and SHA Wei. Detection of orbital angular momentum with metasurface at microwave band[J]. *IEEE Antennas and Wireless Propagation Letters*, 2018, 17(1): 110–113. doi: [10.1109/LAWP.2017.2777439](https://doi.org/10.1109/LAWP.2017.2777439).
- [47] MOHAMMADI S M, DALDORFF L K S, FOROZESH K, *et al.* Orbital angular momentum in radio: Measurement methods[J]. *Radio Science*, 2010, 45(4): RS4007.
- [48] HUI Xiaonan, ZHENG Shilie, ZHANG Weite, *et al.* Local topological charge analysis of electromagnetic vortex beam based on empirical mode decomposition[J]. *Optics Express*, 2016, 24(5): 5423–5430. doi: [10.1364/OE.24.005423](https://doi.org/10.1364/OE.24.005423).
- [49] ZHANG Chao and MA Lu. Detecting the orbital angular momentum of electro-magnetic waves using virtual rotational antenna[J]. *Scientific Reports*, 2017, 7(1): 4585. doi: [10.1038/s41598-017-04313-4](https://doi.org/10.1038/s41598-017-04313-4).
- [50] LIU Changming, WEI Xuli, NIU Liting, *et al.* Discrimination of orbital angular momentum modes of the terahertz vortex beam using a diffractive mode transformer[J]. *Optics Express*, 2016, 24(12): 12534–12541. doi: [10.1364/OE.24.012534](https://doi.org/10.1364/OE.24.012534).
- [51] ZHENG Shilie, JIN Xiaofeng, ZHANG Xianmin, *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.
- [52] 武华阳. 无线轨道角动量通信与雷达目标成像技术研究[D].

- [硕士论文], 浙江大学, 2017.
- WU Huayang. Research on wireless communication and radar target imaging technique based on OAM[D]. [Master dissertation], Zhejiang University, 2017.
- [53] LEE D, SASAKI H, FUKUMOTO H, *et al.* Orbital angular momentum (OAM) multiplexing: An enabler of a new era of wireless communications[J]. *IEICE Transactions on Communications*, 2017, 100(7): 1044–1063.
- [54] 黄铭, 毛福春, 曾佳, 等. 轨道角动量复用技术[J]. *中国无线电*, 2013(5): 34–36. doi: [10.3969/j.issn.1672-7797.2013.05.018](https://doi.org/10.3969/j.issn.1672-7797.2013.05.018).
HUANG Ming, MAO Fuchun, ZENG Jia, *et al.* Orbital angular momentum multiplexing technology[J]. *China Radio*, 2013(5): 34–36. doi: [10.3969/j.issn.1672-7797.2013.05.018](https://doi.org/10.3969/j.issn.1672-7797.2013.05.018).
- [55] ZHANG Weite, ZHENG Shilie, HUI Xiaonan, *et al.* Mode division multiplexing communication using microwave orbital angular momentum: An experimental study[J]. *IEEE Transactions on Wireless Communications*, 2017, 16(2): 1308–1318. doi: [10.1109/TWC.2016.2645199](https://doi.org/10.1109/TWC.2016.2645199).
- [56] LI Yang, LI Xiong, CHEN Lianwei, *et al.* Orbital angular momentum multiplexing and demultiplexing by a single metasurface[J]. *Advanced Optical Materials*, 2017, 5(2): 1600502. doi: [10.1002/adom.201600502](https://doi.org/10.1002/adom.201600502).
- [57] ZHANG Di, CAO Xiangyu, GAO Jun, *et al.* A shared aperture 1 bit metasurface for orbital angular momentum multiplexing[J]. *IEEE Antennas and Wireless Propagation Letters*, 2019, 18(4): 566–570. doi: [10.1109/LAWP.2019.2893492](https://doi.org/10.1109/LAWP.2019.2893492).
- [58] OPARE K A, KUANG Yujun, and KPONYO J J. Mode combination in an ideal wireless OAM-MIMO multiplexing system[J]. *IEEE Wireless Communications Letters*, 2015, 4(4): 449–452. doi: [10.1109/LWC.2015.2434375](https://doi.org/10.1109/LWC.2015.2434375).
- [59] LEE D, SASAKI H, FUKUMOTO H, *et al.* An experimental demonstration of 28 GHz band wireless OAM-MIMO (orbital angular momentum multi-input and multi-output) multiplexing[C]. The 87th IEEE Vehicular Technology Conference, Porto, Portugal, 2018: 1–5.
- [60] YAN Yan, LI Long, XIE Guodong, *et al.* OFDM over mm-wave OAM channels in a multipath environment with intersymbol interference[C]. 2016 IEEE Global Communications Conference, Washington, USA, 2016: 1–6.
- [61] CHEN Rui, YANG Wenhai, XU Hui, *et al.* A 2-D FFT-based transceiver architecture for OAM-OFDM systems with UCA antennas[J]. *IEEE Transactions on Vehicular Technology*, 2018, 67(6): 5481–5485. doi: [10.1109/TVT.2018.2817230](https://doi.org/10.1109/TVT.2018.2817230).
- [62] HU Tao, WANG Yang, LIAO Xi, *et al.* OFDM-OAM modulation for future wireless communications[J]. *IEEE Access*, 2019, 7: 59114–59125. doi: [10.1109/ACCESS.2019.2915035](https://doi.org/10.1109/ACCESS.2019.2915035).
- [63] GOU Pengqi, KONG Miao, YANG Guomin, *et al.* Integration of OAM and WDM in optical wireless system by radial uniform circular array[J]. *Optics Communications*, 2018, 424: 159–162. doi: [10.1016/j.optcom.2018.04.059](https://doi.org/10.1016/j.optcom.2018.04.059).
- [64] YAN Yan, XIE Guodong, LAVERY M P J, *et al.* High-capacity millimetre-wave communications with orbital angular momentum multiplexing[J]. *Nature Communications*, 2014, 5: 4876. doi: [10.1038/ncomms5876](https://doi.org/10.1038/ncomms5876).
- [65] 观察者. 中国完成世界首次微波频段轨道角动量电磁波27.5公里长距离传输实验[EB/OL]. https://www.guancha.cn/Science/2017_02_22_395395.shtml, 2017.
Guancha Syndicate. China has completed the world's first long-distance transmission experiment of 27.5 km of microwave frequency orbital angular momentum electromagnetic wave[EB/OL]. https://www.guancha.cn/Science/2017_02_22_395395.shtml, 2017.
- [66] TAMAGNONE M, CRAEYE C, and PERRUISSEAU-CARRIER J. Comment on ‘encoding many channels on the same frequency through radio vorticity: First experimental test’[J]. *New Journal of Physics*, 2012, 14(11): 118001. doi: [10.1088/1367-2630/14/11/118001](https://doi.org/10.1088/1367-2630/14/11/118001).
- 廖希: 女, 1988年生, 讲师, 博士, 研究方向为涡旋电磁波、电波传播、射频与微波电子学、信道建模等。
- 周晨虹: 女, 1996年生, 硕士生, 研究方向为轨道角动量产生与传播。
- 王洋: 男, 1986年生, 副教授, 博士, 研究方向为天线与传播、雷达信号处理、无线通信等。
- 廖莎莎: 女, 1990年生, 讲师, 博士, 研究方向为微波光子学、硅光子学、射频信号处理等。
- 周继华: 男, 1979年生, 研究员, 博士, 博士生导师, 研究方向为移动网络、无线通信、5G等。
- 张杰: 男, 1967年生, 教授, 博士, 研究方向为涡旋电磁波、毫米波通信、智能环境建模与设计等。

责任编辑: 陈倩