

涡旋电磁波无线通信技术的进展

赵林军^{①②} 张海林^{*②} 刘乃安^②

^①(陕西理工大学物电学院 汉中 723000)

^②(西安电子科技大学通信工程学院 西安 710071)

摘 要: 由电磁动力学可知, 电磁波可携带与极化方式相关的自旋角动量(Spin Angular Momentum, SAM) 和与坡印廷矢量运动方式相关的轨道角动量(Orbital Angular Momentum, OAM)。当OAM不为零时, 电磁波的波前电场分布呈漩涡状且具有沿轴向传播的特性, 人们形象地将这类电磁波称为涡旋电磁波。学界在平面电磁波场强数学模型的基础上引入了一个以OAM 的拓扑荷 ℓ (又称模态)为参数的傅里叶旋转因子描述涡旋电磁波的波前场, 因此, 涡旋电磁波波前具有与拓扑荷 ℓ 相关联的“极化”图案, 利用不同模态的涡旋电磁波的极化图案可进一步提升无线通信系统信道容量。研究表明, 在开放环境下由均匀圆阵列(Uniform Circular Array, UCA)阵列产生“平面”涡旋电磁波波束尽管可行, 但要获得模态复用增益, 需要探索基于复平面内单位圆周上分布的正交相位序列的涡旋电磁波波束产生与信息传输方法。文中也调研了无线射频领域OAM与MIMO体制相兼容的研究现状。

关键词: 涡旋电磁波; 涡旋电磁波MIMO; 极化纹理; 轨道角动量; 模态正交分离

中图分类号: TN92

文献标识码: A

文章编号: 1009-5896(2021)11-3075-11

DOI: [10.11999/JEIT200899](https://doi.org/10.11999/JEIT200899)

Research Status of Vortex Electromagnetic Wave Wireless Communication Technologies

ZHAO Linjun^{①②} ZHANG Hailin^② LIU Naian^②

^①(School of Physics and Telecommunication Engineeringg, Shaanxi University of Technology, Hanzhong 723000, China)

^②(School of Telecommunications of Engineering, Xidian University, Xi'an 710071, China)

Abstract: It is known from electromagnetic momentum that electromagnetic waves can carry Spin Angular Momentum (SAM) related to polarization and Orbital Angular Momentum (OAM) related to the trajectory of the Poynting vector. When OAM is not zero, the wave-front electric field distribution of the electromagnetic wave is vortex-like and has the characteristic of propagating along the axial direction. Therefore, this electromagnetic wave is aptly named vortex electromagnetic wave. Based on the mathematical model of the plane electromagnetic wave field, the researchers introduce a Fourier factor that uses the topological charge (also called mode) of the OAM as a parameter to describe the field of the vortex electromagnetic wave. Therefore, the wave-front of the vortex electromagnetic wave with a “polarization” pattern associated with topological charge, the use of polarization patterns of vortex electromagnetic waves in different modes can further increase the spectrum effect of the wireless communication system. Studies show that although it is feasible to generate "planar" vortex electromagnetic wave beams from Uniform Circular Array (UCA) arrays in an open environment, to obtain modal multiplexing gain, and it is necessary to explore vortex electromagnetic wave beams based on orthogonal phase sequences distributed on a unit circle in the complex plane. At the same time, the paper also investigates the current research status of compatibility between OAM and Multiple Input Multiple Output (MIMO) systems in the field of radio frequency.

Key words: Vortex radio; OAM-based MIMO; Polarized texture; Orbital Angular Momentum (OAM); Mode orthogonal separation

收稿日期: 2020-10-21; 改回日期: 2021-03-03; 网络出版: 2021-10-23

*通信作者: 张海林 hlzhang@xidian.edu.cn

基金项目: 国家自然科学基金(61671347, 61876143), 陕西理工大学人才计划项目(SLGRC20200028)

Foundation Items: The National Natural Science Foundation of China (61671347, 61876143), The Talent Introduction Foundation of Shaanxi University of Technology (SLGRC20200028)

1 引言

由香农信道容量定理^[1]可知,无线通信系统的数据传输速率与该系统的带宽成正比。面对未来超大容量数据传输需要,即使应用了多天线等频谱增强等技术^[2,3],传统的平面电磁波通信技术面临频谱资源枯竭的窘境。在太赫兹的应用中,人们发现该技术也面临着环境风险与其器件的制造等问题^[4-6]。在此背景下,人们试图利用电磁波的轨道角动量(Orbital Angular Momentum, OAM)携带信息实现大容量传输。

根据电磁动力学知识^[7,8],电磁波的轨道角动量是其角动量的一部分。研究表明,携带OAM的电磁波的波印廷矢量轨迹是一条围绕其波束方向的螺旋曲线,从而影响其波前呈涡旋状。因此,具有OAM的电磁波的波前场分布具有与其拓扑荷 ℓ (俗称模态)相关的特殊“极化纹理”。目前,学界将OAM驱使的电磁波称为涡旋电磁波。

电磁波携带的OAM首先在光学中被发现与应用^[9]。直到2007年,文献^[10]将其引入无线射频领域。与平面电磁波无线通信技术^[11-13]发展相比较,涡旋电磁波通信技术的应用研究时间短^[14,15],尚有其传播机理与MIMO结合等科学或工程问题有待解决。

本文从7个方面总结了有关涡旋电磁波在无线通信领域的研究成果,给出涡旋电磁波传播机理与收发等问题的解决途径或方法,以促使该技术的发展。

本文后续章节的安排如下:第2节论述了电磁场(波)的动量理论;第3节论述了轨道角动量与模态 ℓ 的逻辑关系;第4节论述了定性分析涡旋电磁波的传播特性;第5节论述了涡旋电磁波在无线射频领域中的应用;第6节涡旋电磁波与MIMO的兼容性研究;第7节论述了涡旋电磁波无线通信演示验证;第8节为结论。

2 电磁场(波)的动量理论

2.1 电磁场(波)的动量

采用分离变量方法^[16]可由式(1)所示的达朗贝尔(d'Alembert)方程^[17],

$$\left. \begin{aligned} \nabla^2 A - \frac{1}{\varepsilon\mu} \frac{\partial A}{\partial t^2} &= -\mu j_d \\ \nabla^2 \phi - \frac{1}{\varepsilon\mu} \frac{\partial \phi}{\partial t^2} &= -\frac{\rho}{\varepsilon} \end{aligned} \right\} \quad (1)$$

确定电磁波的矢量势 $\mathbf{A}$ 与其标量势 ϕ 。

由洛伦兹(Lorentz)规范,可确定介质中电磁波的电场强度矢量 $\mathbf{E}$ 与磁场强度矢量 $\mathbf{H}$,

$$\left. \begin{aligned} \mathbf{E} &= -\nabla\phi - \frac{\partial \mathbf{A}}{\partial t} \\ \mathbf{H} &= \frac{1}{\mu} \nabla \times \mathbf{A} \end{aligned} \right\} \quad (2)$$

式(1)与式(2)中, ∇ 为矢量微分运算符; j_d 为天线阵子的激励电流密度, ρ 为电荷密度; ε 为传播介质的电介常数, μ 为传播介质的磁介常数。

根据文献^[18],可确定电磁波的动量体密度如式(3)所示,

$$\mathbf{g} = \varepsilon\mu \mathbf{E} \times \mathbf{H} = \frac{\mathbf{P}}{\kappa^2} \quad (3)$$

其中, $\mathbf{P}$ 为电磁波的坡印廷矢量, κ 为介质中电磁波的传播速度。可见,均匀介质中,电磁波的动量体密度 $\mathbf{g}$ 与电磁波的坡印廷矢量 $\mathbf{P}$ 是同向的^[8,19]。

对式(3)两边关于时间求导数,如式(4)所示,

$$\frac{\partial \mathbf{g}}{\partial t} = [-\mu \mathbf{H} \times (\nabla \times \mathbf{H}) + \varepsilon \mathbf{E} \times (\nabla \times \mathbf{E}) - \mathbf{E} (\nabla \cdot \varepsilon \mathbf{E}) - \mathbf{H} (\nabla \cdot \mu \mathbf{H})] - [\rho \mathbf{E} + \mathbf{j}_d \times \mu \mathbf{H}] \quad (4)$$

其中,第1个 $[-]$ 项定义了电磁波的动量密度流,第2个 $[-]$ 项定义了空间电荷所受电磁力的密度,物理学上将这种作用力称为功率密度^[19]。显然,在无带电体空间,式(4)可简化为

$$\frac{\partial \mathbf{g}}{\partial t} = [-\mu \mathbf{H} \times (\nabla \times \mathbf{H}) + \varepsilon \mathbf{E} \times (\nabla \times \mathbf{E}) - \mathbf{E} (\nabla \cdot \varepsilon \mathbf{E}) - \mathbf{H} (\nabla \cdot \mu \mathbf{H})] \quad (5)$$

可见,电磁波的动量密度流具有力(密度)的物理属性。

2.2 电磁波的角动量

由文献^[20]可知,漩涡状的龙卷风中具有“轴向”运动特性,其中水雾的运动就是其携带的角动量所致。为了便于理解,不妨以图1所示的质点系进一步说明运动物质的角动量的功能。设图1中质点1、质点2与质点3的质量分别为 m_1 , m_2 与 m_3 ,它们各自的运动速度为 $\mathbf{v}_1$, $\mathbf{v}_2$ 与 $\mathbf{v}_3$,建立以观测点 O 为原点的2维坐标系,质点系的质心 c 有运动速度 $\mathbf{v}_c$,则该质点系的总角动量^[21]为

$$\begin{aligned} \mathbf{J} &= \mathbf{r}_c \times \left(\sum_{i=1}^3 m_i \right) \mathbf{v}_c + \sum_{i=1}^3 (\mathbf{r}'_i \times m_i \mathbf{v}_i) \\ &= \mathbf{L} + \mathbf{S} \end{aligned} \quad (6)$$

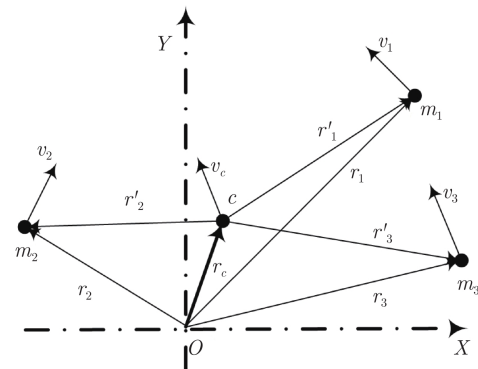


图1 携带角动量的质点系^[21]

其中, $\mathbf{L}$ 为轨道角动量, $\mathbf{S}$ 为自旋角动量。

式(6)说明质点(系)的动量是其角动量存在的前提; 角动量中的自旋角动量 $\mathbf{S}$ 分量不以观测点 O 的位置变化而变化, 因此 $\mathbf{S}$ 具有内禀性; 角动量中的轨道角动量分量还取决于观察点 O 的位置, 即由观察点 O 确定的径矢 $\mathbf{r}_c$ 方向与大小。显然。式(6)中的轨道角动量 $\mathbf{L}$ 不恒为0时, 则图1中的质心 c 相对观察点 O 有一条运动曲线, 换句话说, 轨道角动量 $\mathbf{L}$ 决定了质心 c 的运动轨迹。

现在以图2所示的电基本阵子辐射波为例研究电磁波的角动量的作用。参照图1所述的质心 c , 图2中电磁波波束的“质轴”可为电磁波波束传播方向(坡印廷矢量 $\mathbf{P}$ 的指向)为轴。

图2中点 a 有磁场矢量 $\mathbf{H}_a$ 、电场矢量 $\mathbf{E}_a$, 由式(3)可确定 a 点的动量密度为 $\mathbf{g}_a$ 。若以点 c 为观测点存在径矢 $\mathbf{r}_{ac}$, 则可确定其角动量体密度^[22,23]为

$$\mathbf{j}_a = \mathbf{r}_{ac} \times \mathbf{g}_a \quad (7)$$

不失一般性, 式(7)的径矢 $\mathbf{r}_{ac}$ 可记为 $\mathbf{r}$, $\mathbf{H}_a$ 记为 $\mathbf{H}$, $\mathbf{E}_a$ 记为 $\mathbf{E}$ 。在体积 V 内对式(7)计算体积分, 可得体积 V 内的电磁波携带的总角动量为

$$\mathbf{J} = \int_V (\mathbf{r}_{ac} \times \mathbf{E}_a \times \mathbf{H}_a) dv = \int_V (\mathbf{r} \times \mathbf{E} \times \mathbf{H}) dv \quad (8)$$

显然, 平面电磁波远场时, 由于径矢 $\mathbf{r}_a$ 与 a 点的坡印廷矢量 $\mathbf{P}_a$ 同向, 因此 $\mathbf{J} \equiv 0$, 但角动量体密度 $\mathbf{g}_a$ 不恒为0。那么, 平面电磁波波束的“质轴”是怎样变化的呢? 这就需要进一步考察其轨道角动量。

2.3 电磁波的轨道角动量

显然, 图2中以 c 点看 a 点电磁波, 其角动量密度 $\mathbf{j}_a$ 不恒为0。因此, 可由文献[9]知 a 点处的电磁波波束的波前是非平面的。

文献[24]认为携带OAM的电磁波的坡印廷矢量 $\mathbf{P}$ 是沿波束方向 Z 轴呈现螺旋状的, 如图3所示。

因此, 涡旋电磁波的波前电场矢量分布是围绕

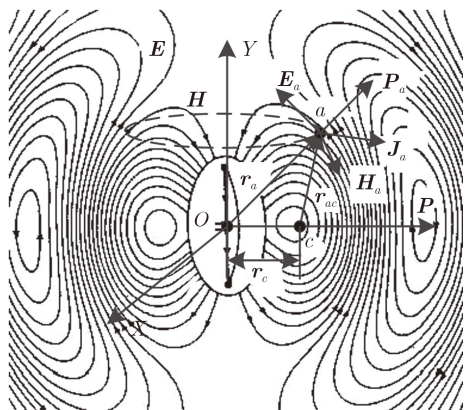


图2 电基本阵子角动量密度矢量示意图^[21]

其传播轴的旋涡状分布, 如图4所示, 其中图4(a)说明了涡旋电磁波的波前电场强度矢量 $\mathbf{E}$ 围绕传播方向具有特殊的“极化纹理”分布; 图4(b)又说明涡旋电磁波的波前“极化纹理”是可以沿传播轴向传播的。学界将涡旋电磁波的波前场矢量^[9,26]建模为

$$f(\omega, \ell, t) = \dot{s}(t) \cdot e^{j\omega t} \cdot e^{j\ell\varphi} \quad (9)$$

其中, $\dot{s}(t)$ 为复数振幅; ω 为载频频率; ℓ 为涡旋电磁波的模态, φ 是围绕波束传播方向的方位角。

从信号的角度分析式(9), 涡旋波信号的数学模型比普通信号模型多了一个与OAM模态 ℓ 相关的傅里叶旋转因子 $e^{j\ell\varphi}$ 。显然, 因子 $e^{j\ell\varphi}$ 具有不同模态 ℓ 关于方位角 φ 的正交性特性, 这就预示了不同模态涡旋电磁波信号具有共享信道传输的能力^[25,27]。同时, 当 $\ell = 0$ 时, 式(9)退化为普通的平面波信号, 这也说明平面电磁波是涡旋电磁波的一个特例。

3 轨道角动量与其模态的关系

柱坐标下, 文献[28]对极化矢量势为 $\mathbf{A} = u(x, y, z) e^{jkz} \cdot \mathbf{e}_x$ ($\mathbf{e}_x$ 为 x 轴的单位向量), 电磁波的动量密度 $\mathbf{g}$ 建模为

$$\mathbf{g} = \frac{j\omega\epsilon}{2} (u^* \nabla u - u \nabla u^*) + \omega k \epsilon |u|^2 \mathbf{e}_z + \frac{\omega \alpha \epsilon}{2} \frac{\partial |u|^2}{\partial r} \mathbf{e}_\varphi \quad (10)$$

其中, ∇ 为柱坐标系下的矢量微分算子, ω 为信号的载频, k 为波数, $\alpha = +1$ 表示右旋圆极化, $\alpha = -1$

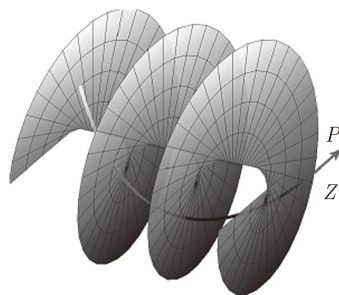


图3 携有OAM电磁波坡印廷矢量轨迹及其波前结构示意图^[24]

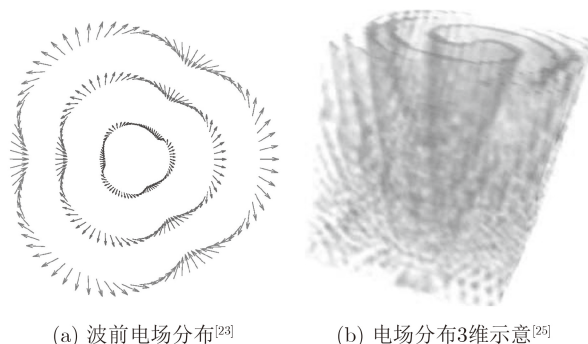


图4 涡旋电磁波波前电场相位示意图

为左旋圆极化, $\alpha = 0$ 为线极化, $\mathbf{e}_z$ 与 $\mathbf{e}_\varphi$ 分别为柱坐标系下 Z 轴与 ϕ 轴的单位矢量。

柱坐标下, 由径矢 $\mathbf{r} = (r, 0, \varphi)$ 可确定该电磁波的动量体密度 $\mathbf{g}_\varphi$ 对其轨道角动量密度 $\mathbf{L}_z$ 是有贡献的, 在柱坐标下, $\mathbf{L}_z$ 的大小为

$$l_z = r g_\varphi \quad (11)$$

其中 g_φ 表示取式(10)的 ϕ 轴的分量取值。

对于涡旋电磁波, 其电场强度矢量 $\mathbf{E}$ 与磁场强度矢量 $\mathbf{H}$ 均含 $e^{j\ell\varphi}$ 因子^[29]。因此涡旋电磁波的动量体密度 $\mathbf{g}$ 必然含有模态 ℓ 信息。经推演, 在文献^[28]基础上, 文献^[29]对模态为 ℓ 的涡旋电磁波的轨道角动量密度 $\mathbf{L}_z$ 的大小建模为

$$l_z = \varepsilon\omega \left(\ell |u|^2 - \frac{\alpha}{2} \cdot \frac{\partial |u|^2}{\partial r} \right) \quad (12)$$

其中 $\alpha = +1$ 表示右旋, $\alpha = -1$ 为左旋。

分析式(12), 有如下结论:

(1) 相同模的矢量势 $\mathbf{A}$, 不同模态 ℓ 涡旋电磁波沿其传播轴向 z 的轨道角动量 l_z 大小不同;

(2) 由矢量的运算规则, 波印廷矢量的 $\mathbf{P}_r$ 分量对涡旋电磁波的(轨道)角动量密度 $\mathbf{L}_z$ 是有贡献的。当模态 ℓ 越大时, 可以确定 $\mathbf{P}_r$ 越大, 意味着该模态的波束具有较大的开口;

(3) 与波印廷矢量的 $\mathbf{P}_r$ 分量相对应的电场量因可由圆锥金属板可其反射, 因此使用一定立体角的圆锥金属板可以实现对涡旋电磁波波束的汇聚。结合结论(2), 单一的波束汇聚方法难以对模态复用涡旋电磁波波束的实现一致性汇聚。

上述结论可由文献^[30,31]间接佐证。

4 涡旋电磁波的传播特性

开放介质中涡旋电磁波的传播也必然存在反射、折射以及散射等现象。目前, 无线射频波段关于涡旋电磁波的传播特性的研究成果报道的较少, 借助平面电磁波的传播特性^[32], 定性分析涡旋电磁波在分层介质与大气湍流中的传播特性, 不失为一个捷径。

4.1 涡旋电磁波在分层介质的传播特性

这里定性分析涡旋电磁波在分层介质中的传播特性。涡旋电磁波的波前电场矢量可分解为垂直分量 $\mathbf{E}_{\perp,\theta}^i$ 与水平分量 $\mathbf{E}_{\parallel,\theta}^i$, 它们入射到分层介质时, 根据文献^[32], 其传播系数与反射系数必然与涡旋电磁波的入射角 θ 有关。由于式(9)中所述的方位角 φ 对分层介质涡旋电磁波入射角 θ 的影响, 其透射分量与反射分量比然表现与入射角 θ 与涡旋电磁波方位角 φ 相关的畸变或衰落。

当涡旋电磁波无线通信信道存在非视距(Non-

Line-Of-Sight, NLOS)路径时, 模态分离前需要对方位角 φ 引起的畸变进行补偿^[25,33]。同时可知, $\mathbf{E}_{\parallel,\theta}^r$ 在分界面的变相必然在涡旋电磁波反射分量中引起模态镜像。

4.2 涡旋电磁波在湍流介质中的传播特性

涡旋电磁波在大气介质中传播时必然存在大气湍流的散射^[34]。由于无线射频信号的波长较大, 相同尺寸的大气湍流对无线射频信号模态的影响小于对光信号模态的影响^[35]。尽管如此, 湍流尺寸的变化对不同波长信号的影响^[36], 要求涡旋电磁波通信系统必须对波束需进行优化设计^[37,38]。目前, 关于大气湍流对涡旋电磁波的影响以及涡旋电磁波波束优化设计的研究成果较少。

5 涡旋电磁波在无线射频领域中的应用

学界已经对涡旋电磁波通信信道容量提升^[39]能力、用户信息的隔离^[40]能力以及基于模态正交接入^[41]的组网等进行了初步探索。现主要成果主要集中在涡旋电磁波产生、模态分离以及涡旋电磁波与MIMO的兼容3个方面。

5.1 涡旋电磁波的产生OAM波

5.1.1 波束移相法

在无线射频领域, 波束移相法主要是通过调控平面电磁波波束不同区域相位实现涡旋电磁波波束的。理论上, 这类涡旋电磁波的波印廷矢量的 $\mathbf{P}_r$ 分量、 $\mathbf{P}_\varphi$ 分量与 $\mathbf{P}_z$ 分量均存在, 因此它属于“立体”的。

基于波束移相的涡旋电磁波的产生方法主要包括: 螺旋反射面^[42]、螺旋相位板^[43]、人工电磁材料反射面^[44]、人工电磁材料透镜^[45]等方法, 如图5所示。从通信角度来看, 这类涡旋电磁波的产生方法的缺点主要有: 调制信息的加载方式不够灵活、波束方向的调控不便, 同一天线难以实现模态复用或模态子集复用, 当信号波长较长时对天线尺寸的要求较大, 不便于其移动等。

5.1.2 信号域移相法

该方法通过对信号附加移相因子, 并将移相后的信号作为均匀圆阵列(Uniform Circular Array, UCA)阵元的激励, 利用各阵元波束的空间叠加实现涡旋电磁波波束^[25]。

目前, 对UCA阵元激励附加相位的方法主要有射频域信号移相方法与基带域信号移相方法。其中, 射频域信号移相多采用Butler移相馈电网络^[46]或Rotman透镜^[47]实现, 如图6所示。

与射频域信号移相电路网路复杂相比, 在基带域易于实现信号的移相。研究表明, 在基带域通过傅里叶相位序列^[48]可产生模态复用涡旋电波波束。由于UCA阵列产生的涡旋电磁波的波印廷矢量中

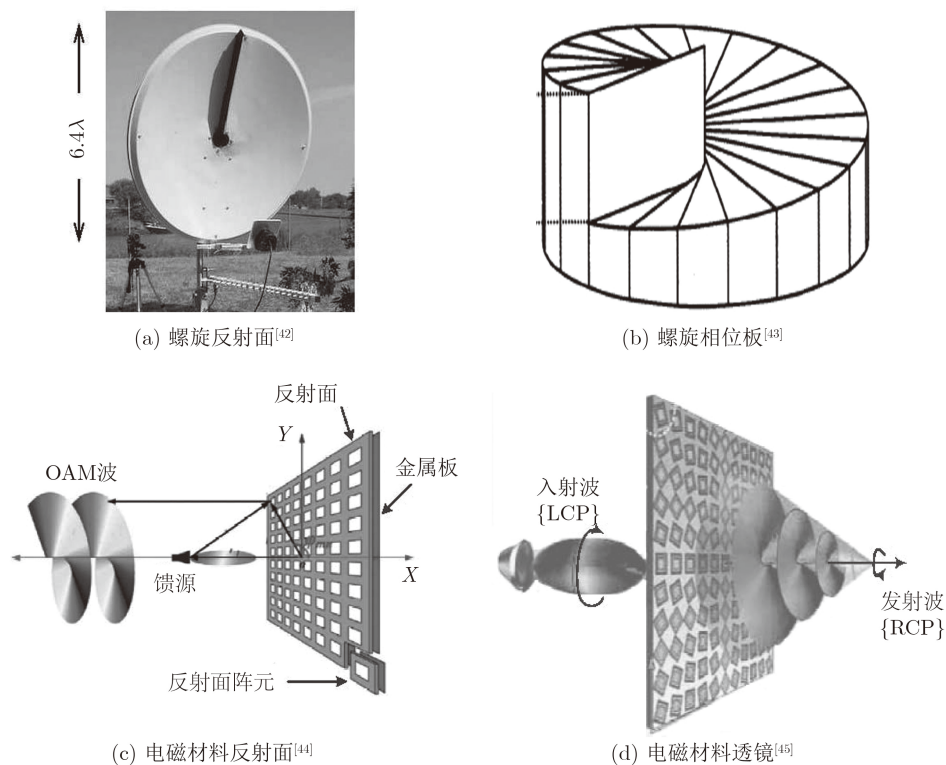


图5 波束移相法产生涡旋电磁波示意图

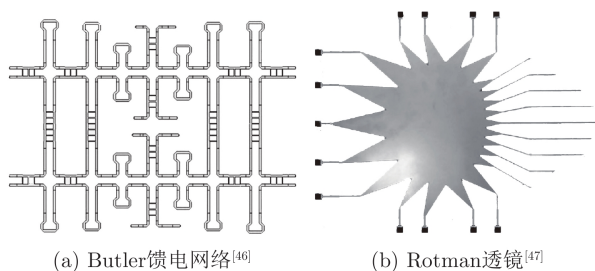


图6 射频域信号移相馈电网络示意图

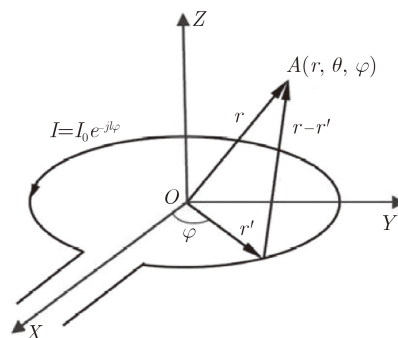


图7 射频域信号移相馈电网络示意图[52]

没有 P_z 分量,因此该波束属于“平面”的[49]。值得研究的是,将傅里叶相位序列改为Zadoff-chu序列[50],可由UCA阵列产生另一种非中空的涡旋电磁波波束,相比之下,该波束更适合较远距离传播。

5.1.3 其它方法

包括圆环行波天线[51]与金属环开槽天线[52]。如图7所示圆环行波天线涡旋电磁波产生方法,对天线激励信号附加与模态相关的连续相位 $I_0 e^{-j\ell\varphi}$ 实现不便,目前多见于微波波段使用。

5.2 涡旋电磁波的接收

5.2.1 部分方位角采样接收的梯度检测方法

部分方位角采样接收的梯度检测方法[25,52]的基本的原理如图8所示。

图8所示的部分方位角采样接收的梯度检测方法是通过对波束口径上两个采样接收点的响应存在的相位差 $\Delta\phi$,由 $\hat{\ell} = \Delta\phi / \beta$ 对涡旋电磁波携带的模态

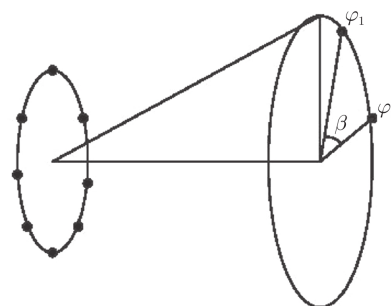


图8 相位梯度检测方法示意[25]

信息进行估计。该接收方法不支持涡旋电磁波的振幅、相位与频率均携带信息,不支持模态复用。

5.2.2 部分方位角采样接收的模态正交分离方法

部分方位角采样接收的模态正交分离方法[53]如图9所示。

部分方位角接收的模式正交分离方法的数学模型为

$$y(t) = \int_{\rho_1}^{\rho_2} s(\rho, z, t) \cdot \int_0^{2\pi/n} e^{j(\ell_1 - \ell_2)\varphi} d\varphi \quad (13)$$

显然, 当 $(\ell_1 - \ell_2)$ 可被 n 整除时, 将不能对信号模式信息实现正确分离。

5.2.3 全方位角采样接收的能量检测方法

全方位角采样接收如图10所示^[54,55]。该方法首先对阵元接收的响应 $\{y_0, y_1, \dots, y_{N-1}\}$ 做关于模式 ℓ_i 的FFT变换, 得到 $\tilde{y}_i$, 再由式(14)对模式信息进行估计。

$$\hat{\ell} = \max_i |\tilde{y}_i|^2 \quad (14)$$

显然, 全方位角采样接收是适合UCA阵列的, 但能量检测却限制了涡旋波信号的振幅、频率与相位“3个维度”携带调制信息。

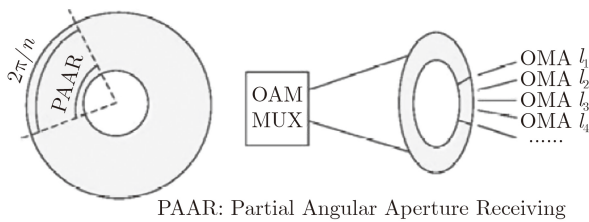
5.2.4 其它方法

包括光波段的螺旋介质透镜实现的电磁波模式方法^[56]与全息干涉方法^[57]。由于这两种涡旋电磁波信号传递方法中螺旋介质透镜的尺寸或干涉图样的尺寸与信号的波长呈正比, 因此在无线射频领域鲜有应用。

综上所述, 无线通信系统使用UCA阵列实现涡旋电磁波信号传输是可行的、便捷的。但远距离、非理想信道下涡旋电磁波信号的传输需解决信道衰落与波束汇聚等问题^[58-60]。

6 涡旋电磁波与 MIMO 的兼容性研究

2011年, 文献^[56,61]报道了UCA阵列的OAM



PAAR: Partial Angular Aperture Receiving

图9 部分方位角接收示意图^[53]

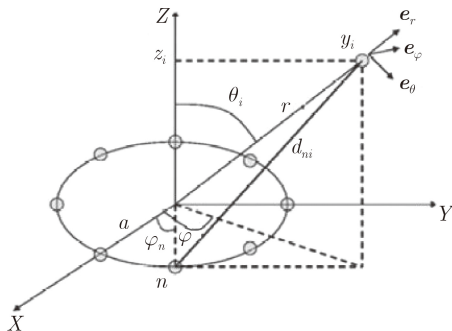


图10 全方位角采样接收方法示意图^[54]

MIMO系统是单输入单输出(Single Input Single Output, SISO)通信系统的一种自然应用。该结论很快在学界引起争议, 究其原因文献^[56,61]没有认识到涡旋电磁波前具有的特殊“极化纹理”, 因此, 该研究中所用信道矩阵并未充分反映涡旋电磁波信号的传输信道。

2015年, 文献^[62]以螺旋反射面天线^[41]构建了空分复用涡旋波OAM MIMO室外演示系统验证, 如图11所示。同年, 文献^[63]对螺旋反射面天线的圆周布局视距传播条件下的OAM MIMO的信道容量进行了仿真。

2018年, 文献^[64]研究了UCA分形嵌套阵列的模式(子)集复用OAM MIMO无线通信系统架构, 并在视距(Line Of Sight, LOS)传播条件下对信号产生、接收与模式并行分离进行了建模。

2019年, 文献^[65]以同心UCA阵列, 如图12所示, 研究了5模式复用时OAM MIMO系统的误码率。

7 涡旋电磁波无线通信的实现验证研究

7.1 光领域的实践研究

涡旋光通信按照信号传播介质不同, 可分3个应用场景:

(1) 以光纤为代表的恒定介质^[66], 该场景中多使用了介质透镜实现OAM模式的转换进行信息传递的, 如图13所示。

(2) 开放大气介质中的OAM光通信系统。该场景多使用空间光调制器(Spatial Light Modulator, SLM)产生OAM光源, 并用全息干涉方法实现OAM模式检测^[67]。该场景下代表性研究成果还包括: 2007年, 实现了轨道角动量共线叠加传输^[68];

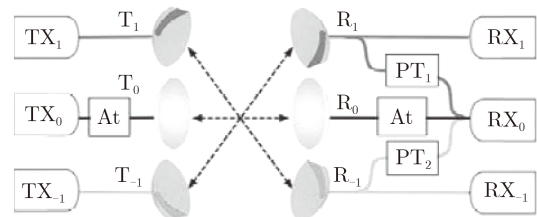


图11 3个OAM复用的MIMO链路示意图^[62]

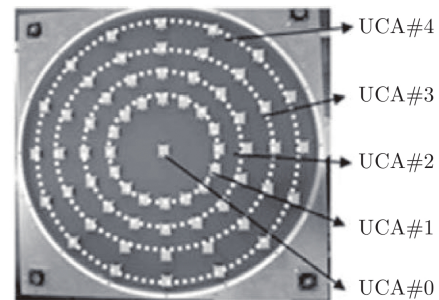


图12 同心圆嵌套时的模式复用OAM MIMO系统示意图^[65]

2014年, 在2.5 m的自由空间传输距离实现了16 bit/s/Hz的频效、 3.8×10^{-3} 误码率的实验验证系统^[69]; 2016年, 在相同的误码率条件下, 将传播距离扩展到了120 m并实现了25 bit/s/Hz的频谱效益^[70]。

(3) 水下涡旋光通信。2016年, 文献^[71]报道了2模态($\ell = -8, +8$)涡旋光水下演示验证系统, 其通信链路总长2.96 m, 数据总传输速率为3 Gbit/s(1.5 Gbit/s/Channel), 模态复用下各信道的平均误码率小于 2.073×10^{-4} 。

7.2 无线射频领域的实践

2007年, 文献^[10]基于UCA天线在千兆赫兹频段仿真了涡旋电磁波信号的产生。

2009年, 文献^[35]采用全息相位板在千兆赫兹频段产生涡旋电磁波实现了速率未压缩的视频数据传输, 研究了利用涡旋电磁波的可以实现通信系统的大容量传输。

2014年, 文献^[72]在28 GHz毫米波频段基于4模态($\ell = -3, -1, +1, +3$)复用与正交线偏振结合技术在2.5m距离大气介质中实现了总数据传输速率32 Gbit/s的涡旋电磁波无线演示系统。该系统采用16QAM/Channel调制, 调制符号传输速率为1.0 Gbaud/s/Channel, 实测各信道的平均误码率均低于 3.8×10^{-3} 。

2016年, 文献^[73]在60 GHz毫米波频段基于螺旋相位板实现了2模态($\ell = +1, +3$)与两极化方式复用的涡旋电磁波数据传输实验系统。该系统使用了16QAM/Channel调制且调制符号速率为20Gbaud/s/Channel, 获得了32 Gbit/s的等效数据传输速率, 各信道测试平均误码率同样不大于 3.8×10^{-3} 。

对比文献^[72]与文献^[73]的研究成果后可以发现, 当系统的总数据传输速率不变时, 改变涡旋电

磁波模态复用增益 N 到 $2N$, 则系统的频带消耗可由 W Hz缩小到 $W/2$ Hz。若将其使用的电磁波替换为平面电磁波时, 文献^[74]可知, 文献^[72]所述系统的信道总数将由8个缩减到正交极化区分的2个; 同样, 文献^[73]所述系统的信道总数也降到2个。在不考虑信道误码率变化前提下, 文献^[73]与文献^[74]中所述系统的数据传输速率将分别降为8 Gbit/s与16 Gbit/s。

2015年, 文献^[75]采用环形腔谐振器行波缝隙天线在设计了两个不同的OAM信号同轴传输的室内演示验证系统如图14所示。在该系统中, 一路OAM携带高清视频信息, 另一OAM携带方波信息。若模态复用数量增加, 则文献^[75]实现的环形腔谐振器的行波缝隙天线及其附属系统将变得较复杂。

同年, 文献^[76]报道了基于折叠反射阵列天线在 K_a 波段涡旋电磁波数据传输。该天线结构具有纵向尺寸小、效率高等特点。由于天线反的体积和重量较大, 降低了其可移动性, 且该方法并不能解决反射波束对馈源的固有影响。

2017年, 文献^[77]研究了UHF(Ultra High Frequency)波段涡旋电磁波能量传递问题, 并选载频为870 MHz通过交叉极子与一个不接触的铜环构建了一个涡旋电磁波能量传递系统。

2018年, 文献^[78]认为基于OAM的模分复用(Mode Division Multiplexing, MDM)是LOS路径下无线通信的一种调制方案, 理论分析了该方案具有误码率低的特点。

综上所述, 有:

(1) 光学领域对OAM的研究对无线射频领域具有引领作用;

(2) OAM在无线射频领域具有实现通信系统超大容量信息传递的潜能;

(3) 无线射频领域, 模态复用的涡旋电磁波信息传递需要灵巧化的信息加载与提取方法;

(4) 目前涡旋波模态复用信息传递系统的传输距离较短。

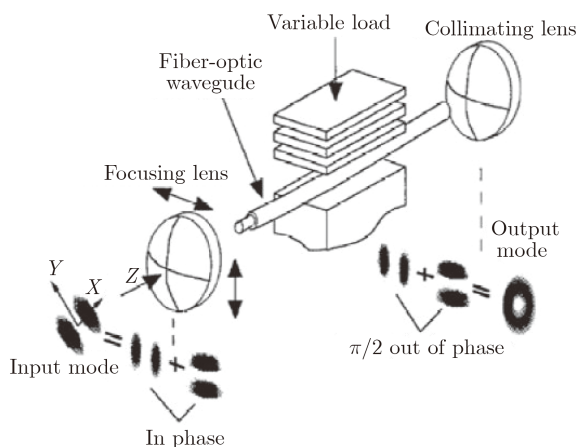


图 13 OAM光通信方案示意图^[66]

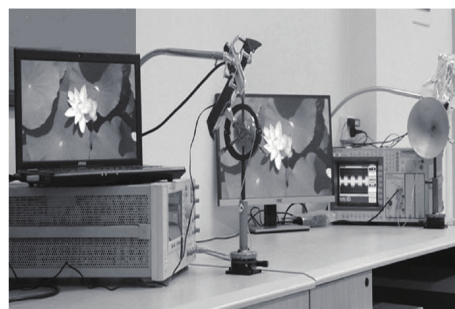


图 14 双模态无线室内演示系统示意图^[75]

8 结束语

通过文中分析, 涡旋电磁波的轨道角动量使其波前呈现与其模态相关的“极化纹理”。通信领域, 对涡旋波信号的识别与模态分离可从这个“极化纹理”着手。尽管涡旋电磁波的无线通信技术取得了一些进步, 但是要实现OAM模态复用与无线MIMO系统的结合, 尚需解决其信号分离、波束汇聚等诸多问题。探索以Zadoof-chu为代表的多相序列产生的非经典涡旋电磁波波束对无线通信系统而言更具有意义。跟踪并研究涡旋电磁波无线通信技术具有科学意义与工程需要。

参 考 文 献

- [1] SHANNON C E. A mathematical theory of communication[J]. *Bell System Technical Journal*, 1948, 27(3): 379–423. doi: [10.1002/j.1538-7305.1948.tb01338.x](#).
- [2] GOLDSMITH A, JAFAR S A, JINDAL N, *et al*. Capacity limits of MIMO channels[J]. *IEEE Journal on Selected Areas in Communications*, 2003, 21(5): 684–702. doi: [10.1109/JSAC.2003.810294](#).
- [3] WANG Linlin, WANG Shuxun, SUN Xiaoying, *et al*. Combined beamforming and space-time block coding for wireless communications[C]. 14th IEEE Proceedings on Personal, Indoor and Mobile Radio Communications, 2003. PIMRC 2003, Beijing, 2003: 607–611. doi: [10.1109/PIMRC.2003.1264344](#).
- [4] 刘盛纲, 钟任斌. 太赫兹科学技术及其应用的新发展[J]. 电子科技大学学报, 2009, 38(5): 481–486. doi: [10.3969/j.issn.1001-0548.2009.05.001](#).
LIU Shenggang and ZHONG Renbin. Recent development of terahertz science and technology and its applications[J]. *Journal of University of Electronic Science and Technology of China*, 2009, 38(5): 481–486. doi: [10.3969/j.issn.1001-0548.2009.05.001](#).
- [5] 胡海翔, 李光伟. 电磁辐射的生物学效应[M]. 胡海翔, 李光伟. 电磁辐射对人体的影响及防护. 北京: 人民军医出版社, 2015: 56–141.
- [6] 袁明文. 太赫兹波的几个基本问题[J]. 微纳电子技术, 2009, 46(5): 257–262. doi: [10.3969/j.issn.1671-4776.2009.05.001](#).
YUAN Mingwen. Several key problems of Terahertz[J]. *Micronanoelectronic Technology*, 2009, 46(5): 257–262. doi: [10.3969/j.issn.1671-4776.2009.05.001](#).
- [7] ROSE M E. Physical sciences: Elementary theory of angular momentum[J]. *Science*, 1958: 127. doi: [10.1126/science.127.3304.976](#).
- [8] 李书民. 电磁波的能量、动量与角动量[M]. 李书民. 电动力学概论. 合肥: 中国科技大学出版社, 2010: 124–125.
- [9] 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 A*, 1992, 45(11): 8185–8189. doi: [10.1103/PhysRevA.45.8185](#).
- [10] 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](#).
- [11] MAXWELL J C A. A treatise on electricity and magnetism[J]. *Nature*, 7(182): 478–480. doi: [10.1038/007478a0](#).
- [12] BURROWS C R. The history of radio wave propagation up to the end of world war I[J]. *Proceedings of the IRE*, 1962, 50(5): 682–684. doi: [10.1109/JRPROC.1962.288097](#).
- [13] ANDERSEN J B. History of communications/radio wave propagation from Marconi to MIMO[J]. *IEEE Communications Magazine*, 2017, 55(2): 6–10. doi: [10.1109/MCOM.2017.7841460](#).
- [14] BETH R A. Mechanical detection and measurement of the angular momentum of light[J]. *Physical Review Journals Archive*, 1936, 50(2): 115–125. doi: [10.1103/PhysRev.50.115](#).
- [15] PADGETT M J. Orbital angular momentum 25 years on [invited][J]. *Optics Express*, 2017, 25(10): 11265–11274. doi: [10.1364/OE.25.011265](#).
- [16] PLAAT O. Separation of variables[J]. *American Mathematical Monthly*, 1968, 75(8): 844–847. doi: [10.2307/2314333](#).
- [17] WILCOX C H. Scattering Theory for the D'Alembert Equation in Exterior Domains[M]. Berlin: Springer, 1975: 14–38. doi: [10.1007/BFb0070581](#).
- [18] 竺子民. 电磁场的动量守恒定律[M]. 竺子民. 物理光学. 武汉: 华中科技大学出版社, 2009: 18–21.
- [19] LEBEDEW P. Untersuchungen über die druckkräfte des lichtes[J]. *Annalen der Physik*, 1901, 311(11): 433–458. doi: [10.1002/andp.1901311102](#).
- [20] FORD K W, 高航, 译. 第9章角动量[M]. FORD K W, 高航, 译. 经典和近代物理学 第2册. 北京: 高等教育出版社, 1982: 147–160.
- [21] KRAUS J D and MARHEFKA R J. Antennas for All Applications[M]. 2nd ed. Boston: McGraw Hill, 1998: 50–60.
- [22] VAN ENK S J and NIENHUIS G. Eigenfunction description of laser beams and orbital angular momentum of light[J]. *Optics Communications*, 1992, 94(1/3): 147–158. doi: [10.1016/0030-4018\(92\)90424-P](#).
- [23] SJÖHOLM J and PALMER K. Angular momentum of electromagnetic radiation. Fundamental physics applied to the radio domain for innovative studies of space and development of new concepts in wireless communications[J]. *Physics*, 2009, 48(1): 15–21. doi: [10.2105/AJPH.48.1.15](#).

- [24] ALLEN L and PADGETT M. The orbital angular momentum of light: An introduction[M]. TORRES J P and TORNER L. Twisted Photons: Applications of Light with Orbital Angular Momentum. Weinheim: Wiley, 2011: 1–12. doi: [10.1002/9783527635368.ch1](https://doi.org/10.1002/9783527635368.ch1).
- [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] SIMPSON B N, 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](https://doi.org/10.1364/OL.22.000052).
- [27] YAO A M and PADGETT M J. Orbital angular momentum: Origins, behavior and applications[J]. *Advances in Optics and Photonics*, 2011, 3(2): 161–204. doi: [10.1364/AOP.3.000161](https://doi.org/10.1364/AOP.3.000161).
- [28] O'NEIL A T, MACVICAR I, ALLEN L, *et al.* Intrinsic and extrinsic nature of the orbital angular momentum of a light beam[J]. *Physical Review Letters*, 2002, 88(5): 053601. doi: [10.1103/PhysRevLett.88.053601](https://doi.org/10.1103/PhysRevLett.88.053601).
- [29] LITVIN I A, DUDLEY A, and FORBES A. Poynting vector and orbital angular momentum density of superpositions of Bessel beams[J]. *Optics Express*, 2011, 19(18): 16760–16771. doi: [10.1364/OE.19.016760](https://doi.org/10.1364/OE.19.016760).
- [30] VAN ENK S J and NIENHUIS G. Commutation rules and eigenvalues of spin and orbital angular momentum of radiation fields[J]. *Journal of Modern Optics*, 1994, 41(5): 963–977. doi: [10.1080/09500349414550911](https://doi.org/10.1080/09500349414550911).
- [31] SHAO Zengkai, ZHU Jiangbo, CHEN Yujie, *et al.* Spin-orbit interaction of light induced by transverse spin angular momentum engineering[J]. *Nature Communications*, 2018, 9(1): 926. doi: [10.1038/s41467-018-03237-5](https://doi.org/10.1038/s41467-018-03237-5).
- [32] BALANIS C A. Advanced Engineering Electromagnetics[M]. 2nd ed. Hoboken, America: Wiley & Sons, Inc, 2012: 924–927.
- [33] LIU Aiping, XIONG Xiao, REN Xifeng, *et al.* Detecting orbital angular momentum through division-of-amplitude interference with a circular plasmonic lens[J]. *Scientific Reports*, 2013, 3(1): 2402. doi: [10.1038/srep02402](https://doi.org/10.1038/srep02402).
- [34] PATERSON C. Atmospheric turbulence and orbital angular momentum of single photons for optical communication[J]. *Physical Review Letters*, 2005, 94(15): 153901. doi: [10.1103/PhysRevLett.94.153901](https://doi.org/10.1103/PhysRevLett.94.153901).
- [35] JIANG Yuesong, HE Yuntao, and LI Fang. Wireless communications using millimeter-wave beams carrying orbital angular momentum[C]. 2009 WRI International Conference on Communications and Mobile Computing, Kunming, China, 2009: 495–500. doi: [10.1109/CMC.2009.315](https://doi.org/10.1109/CMC.2009.315).
- [36] 中国科学院大气物理研究所微波遥感组. 中国晴空和云雨大气的微波辐射和传播特性[M]. 北京: 中防工业出版社, 1982.
- [37] LI Yaqing, WANG Ligu, and WU Zhensen. Study on intensities, phases and orbital angular momentum of vortex beams in atmospheric turbulence using numerical simulation method[J]. *Optik*, 2018, 158: 1349–1360. doi: [10.1016/j.ijleo.2018.01.029](https://doi.org/10.1016/j.ijleo.2018.01.029).
- [38] FU Shiyao and GAO Chunqing. Influences of atmospheric turbulence effects on the orbital angular momentum spectra of vortex beams[J]. *Photonics Research*, 2016, 4(5): B1–B4. doi: [10.1364/prj.4.0000b1](https://doi.org/10.1364/prj.4.0000b1).
- [39] BOZINOVIC N, YANG Yue, REN Yongxiong, *et al.* Terabit-scale orbital angular momentum mode division multiplexing in fibers[J]. *Science*, 2013, 340(6140): 1545–1548. doi: [10.1126/science.1237861](https://doi.org/10.1126/science.1237861).
- [40] ZHANG Zhaoyang, YUAN Yuqing, CANG Ji, *et al.* An orbital angular momentum-based in-band full-duplex communication system and its mode selection[J]. *IEEE Communications Letters*, 2017, 21(5): 1183–1186. doi: [10.1109/LCOMM.2017.2660478](https://doi.org/10.1109/LCOMM.2017.2660478).
- [41] CHENG Wench, 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).
- [42] TAMBURINI F, THIDÉ B, BOAGA V, *et al.* Experimental demonstration of free-space information transfer using phase modulated orbital angular momentum radio[J]. *Physics*, 2013: 1–7.
- [43] BEIJERSBERGEN M W, COERWINKEL R P C, KRISTENSEN M, *et al.* Helical-wavefront laser beams produced with a spiral phaseplate[J]. *Optics Communications*, 1994, 112(5/6): 321–327. doi: [10.1016/0030-4018\(94\)90638-6](https://doi.org/10.1016/0030-4018(94)90638-6).
- [44] YU Shixing, LI Long, SHI Guangming, *et al.* Design, fabrication, and measurement of reflective metasurface for orbital angular momentum vortex wave in radio frequency domain[J]. *Applied Physics Letters*, 2016, 108(12): 121903. doi: [10.1063/1.4944789](https://doi.org/10.1063/1.4944789).
- [45] ZHANG Kuang, YUAN Yueyi, ZHANG Dawei, *et al.* Phase-engineered metalenses to generate converging and non-diffractive vortex beam carrying orbital angular momentum in microwave region[J]. *Optics Express*, 2018, 26(2): 1351–1360. doi: [10.1364/OE.26.001351](https://doi.org/10.1364/OE.26.001351).
- [46] PALACIN B, SHARSHAVINA K, NGUYEN K, *et al.* An 8×8 butler matrix for generation of waves carrying orbital angular momentum (OAM)[C]. The 8th European Conference on Antennas and Propagation (EuCAP 2014), The Hague, 2014: 2814–2818. doi: [10.1109/EuCAP.2014.6902412](https://doi.org/10.1109/EuCAP.2014.6902412).

- [47] XU Chen, ZHENG Shilie, ZHANG Weite, *et al.* Free-space radio communication employing OAM multiplexing based on Rotman lens[J]. *IEEE Microwave and Wireless Components Letters*, 2016, 26(9): 738–740. doi: [10.1109/LMWC.2016.2597262](#).
- [48] STEIDL G and TASCHE M. A polynomial approach to fast algorithms for discrete Fourier-cosine and Fourier-sine transforms[J]. *Mathematics of Computation*, 1991, 56(193): 281–296. doi: [10.1090/s0025-5718-1991-1052103-1](#).
- [49] ZHANG Zhuofan, ZHENG Shilie, ZHANG Weite, *et al.* Experimental demonstration of the capacity gain of plane spiral OAM-based MIMO system[J]. *IEEE Microwave and Wireless Components Letters*, 2017, 27(8): 757–759. doi: [10.1109/LMWC.2017.2723719](#).
- [50] BEYME S and LEUNG C. Efficient computation of DFT of Zadoff-Chu sequences[J]. *Electronics Letters*, 2009, 45(9): 461–463. doi: [10.1049/el.2009.3330](#).
- [51] ZHENG Shilie, HUI Xiaonan, JIN Xiaofeng, *et al.* Transmission characteristics of a twisted radio wave based on circular traveling-wave antenna[J]. *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*, 2015, 63(4): 1530–1536. doi: [10.1109/TAP.2015.2393885](#).
- [52] ZHANG Weite, ZHENG Shilie, HUI Xiaonan, *et al.* Four-OAM-mode antenna with traveling-wave ring-slot structure[J]. *IEEE Antennas and Wireless Propagation Letters*, 2016, 16: 194–197. doi: [10.1109/LAWP.2016.2569540](#).
- [53] ZHENG Shilie, HUI Xiaonan, ZHU Jiangbo, *et al.* Orbital angular momentum mode-demultiplexing scheme with partial angular receiving aperture[J]. *Optics Express*, 2015, 23(9): 12251–12257. doi: [10.1364/OE.23.012251](#).
- [54] XIE Mutong, GAO Xinlu, ZHAO Mingyang, *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. doi: [10.1109/LAWP.2016.2624737](#).
- [55] YAO E, FRANKE-ARNOLD S, COURTIAL J, *et al.* Fourier relationship between angular position and optical orbital angular momentum[J]. *Optics Express*, 2006, 14(20): 9071–9076. doi: [10.1364/OE.14.009071](#).
- [56] EDFORS O and JOHANSSON A J. Is orbital angular momentum (OAM) based radio communication an unexploited area?[J]. *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*, 2012, 60(2): 1126–1131. doi: [10.1109/TAP.2011.2173142](#).
- [57] MAHMOULI F E and WALKER S. Orbital angular momentum generation in a 60GHz wireless radio channel[C]. 2012 20th Telecommunications forum (TELFOR), Belgrade, Serbia, 2012: 315–318. doi: [10.1109/TELFOR.2012.6419210](#).
- [58] WANG Xinguang, YANG Zhen, and ZHAO Shengmei. Influence of oceanic turbulence on propagation of Airy vortex beam carrying orbital angular momentum[J]. *Optik*, 2019, 176: 49–55. doi: [10.1016/j.ijleo.2018.09.028](#).
- [59] 柯熙政, 胥俊宇. 涡旋光束轨道角动量干涉及检测的研究[J]. *中国激光*, 2016, 43(9): 0905003. doi: [10.3788/CJL201643.0905003](#).
- KE Xizheng and XU Junyu. Interference and detection of vortex beams with orbital angular momentum[J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2016, 43(9): 0905003. doi: [10.3788/CJL201643.0905003](#).
- [60] SHIN D, PARK E, KANG J, *et al.* Identification of non-ideal receiver condition for orbital angular momentum transmission[C]. 2014 IEEE 79th Vehicular Technology Conference (VTC Spring), Seoul, South Korea, 2014: 1–5. doi: [10.1109/VTCSpring.2014.7022936](#).
- [61] TAMAGNONE M, SILVA J S, CAPDEVILA S, *et al.* The orbital angular momentum (OAM) multiplexing controversy: OAM as a subset of MIMO[C]. 2015 9th European Conference on Antennas and Propagation (EuCAP), Lisbon, Portugal, 2015: 1–5.
- [62] OLDONI M, SPINELLO F, MARI E, *et al.* Space-division demultiplexing in orbital-angular-momentum-based MIMO radio systems[J]. *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*, 2015, 63(10): 4582–4587. doi: [10.1109/TAP.2015.2456953](#).
- [63] ZHU Qibiao, JIANG Tao, QU Daiming, *et al.* Radio vortex-multiple-input multiple-output communication systems with high capacity[J]. *IEEE Access*, 2015, 3: 2456–2464. doi: [10.1109/ACCESS.2015.2503293](#).
- [64] ZHAO Linjun, ZHANG Hailin, and CHENG Wenchi. Fractal uniform circular arrays based multi-orbital-angular-momentum-mode multiplexing vortex radio MIMO[J]. *China Communications*, 2018, 15(9): 118–135. doi: [10.1109/CC.2018.8456457](#).
- [65] LEE D, SASAKI H, FUKUMOTO H, *et al.* An evaluation of orbital angular momentum multiplexing technology[J]. *Applied Sciences*, 2019, 9(9): 1729. doi: [10.3390/app9091729](#).
- [66] MCGLOIN D, SIMPSON N B, and PADGETT M J. Transfer of orbital angular momentum from a stressed fiber-optic waveguide to a light beam[J]. *Applied Optics*, 1998, 37(3): 469–472. doi: [10.1364/AO.37.000469](#).
- [67] 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](#).
- [68] LIN Jiawei, YUAN X C, TAO Shaohua, *et al.* Multiplexing free-space optical signals using superimposed collinear

- orbital angular momentum states[J]. *Applied Optics*, 2007, 46(21): 4680–4685. doi: [10.1364/AO.46.004680](#).
- [69] 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(1): 4876. doi: [10.1038/ncomms5876](#).
- [70] REN Yongxiong, WANG Zhe, LIAO Peicheng, *et al.* Experimental characterization of a 400 Gbit/s orbital angular momentum multiplexed free-space optical link over 120 m[J]. *Optics Letters*, 2016, 41(3): 622–625. doi: [10.1364/ol.41.000622](#).
- [71] BAGHDADY J, MILLER K, MORGAN K, *et al.* Multi-gigabit/s underwater optical communication link using orbital angular momentum multiplexing[J]. *Optics Express*, 2016, 24(9): 9794–9805. doi: [10.1364/oe.24.009794](#).
- [72] YAN Yan, XIE Guodong, HUANG Hao, *et al.* Demonstration of 8-mode 32-Gbit/s millimeter-wave free-space communication link using 4 orbital-angular-momentum modes on 2 polarizations[C]. 2014 IEEE International Conference on Communications (ICC), Sydney, Australia, 2014: 4850–4855. doi: [10.1109/ICC.2014.6884088](#).
- [73] YAN Yan, LI Long, ZHAO Zhe, *et al.* 32-Gbit/s 60-GHz millimeter-wave wireless communication using orbital angular momentum and polarization multiplexing[C]. 2016 IEEE International Conference on Communications (ICC), Kuala Lumpur, Malaysia, 2016: 1–6. doi: [10.1109/ICC.2016.7511277](#).
- [74] NYQUIST H. Certain factors affecting telegraph speed[J]. *Transactions of the American Institute of Electrical Engineers*, 1924, 43(2): 412–422. doi: [10.1109/T-AIEE.1924.5060996](#).
- [75] HUI Xiaonan, ZHENG Shilie, CHEN Yiling, *et al.* Multiplexed millimeter wave communication with dual orbital angular momentum (OAM) mode antennas[J]. *Scientific Reports*, 2015, 5(1): 10148. doi: [10.1038/srep10148](#).
- [76] LEI X Y and CHENG Y J. Ka-band orbital angular momentum folded reflectarray antenna[C]. 2015 Asia-Pacific Microwave Conference (APMC), Nanjing, China, 2015: 1–3. doi: [10.1109/APMC.2015.7413306](#).
- [77] ÉMILE O, BROUSSEAU C, ÉMILE J, *et al.* Energy and angular momentum transfers from an electromagnetic wave to a copper ring in the UHF band[J]. *Comptes Rendus Physique*, 2017, 18(2): 137–143. doi: [10.1016/j.crhy.2016.12.003](#).
- [78] BASAR E. Orbital angular momentum with index modulation[J]. *IEEE Transactions on Wireless Communications*, 2018, 17(3): 2029–2037. doi: [10.1109/TWC.2017.2787992](#).
- 赵林军：男，1973年生，博士，副教授，主要研究方向为无线通信传输技术等。
- 张海林：男，1963年生，博士生导师，主要研究方向为宽带无线通信数字传输关键技术及系统体制标准研究等。
- 刘乃安：男，1966年生，硕士生导师，教授，主要研究方向为无线通信与射频技术、无线局域网(WIFI)、无线分布式网络等。

责任编辑：陈 倩