

论涡旋电磁波轨道角动量传输新维度

张超, 王元赫

(清华大学航天航空学院航空宇航电子系统实验室, 北京 100084)

摘要: 轨道角动量 (OAM) 是电磁波的固有物理量, 与电场强度的物理量纲线性无关, 可构成无线传输中的新维度。从电磁波资源利用和发展的历史出发, 分析了电磁波轨道角动量的物理特征, 明确了只有电磁波量子携带内禀 OAM 的涡旋电磁波传输系统才可以获得 MIMO 传输以外的无线传输新维度; 统计态 OAM 涡旋波束中的电磁波量子形成的外部 OAM 与空域维度相耦合, 无法构成 MIMO 传输以外的新维度, 但在直射视距 (LoS) 信道时可获得额外自由度和较低的复杂度。依据信道容量的不同, 将典型涡旋电磁波 OAM 传输系统划分为 4 个不同区域, 并着重指出量子态 OAM 涡旋电磁波传输可以形成超越传统 MIMO 容量界的含有 OAM 维度的新 MIMO 容量界。

关键词: 轨道角动量; 无线通信; 涡旋微波量子; 涡旋电磁波; 内禀轨道角动量; 外部轨道角动量

中图分类号: TN92

文献标志码: A

DOI: 10.11959/j.issn.1000-436x.2022087

New dimension in vortex electro-magnetic wave transmission with orbital angular momentum

ZHANG Chao, WANG Yuanhe

Labs of Avionics, School of Aerospace Engineering, Tsinghua University, Beijing 100084, China

Abstract: Orbital angular momentum (OAM) is a physical quantity in the electro-magnetic (EM) wave which has the physical dimension linearly independent with that of the electric field strength, so that the OAM can constitute the new dimension in the wireless transmission. With tracing back to the history of EM wave utilization and development, the physical characteristics of OAM were analyzed, and the fact that only the vortex wave transmission system with EM wave photon carrying intrinsic OAM could obtain the new dimension besides MIMO transmission was clarified. Compared with the MIMO transmission, the extrinsic OAM formed by the plane microwaves in the statistical OAM beam was coupled with the space domain and could not provide the additional new dimension. However, in the line of sight (LoS) channel, the additional degrees of freedom and lower complexity could be achieved compared with MIMO transmission. Moreover, the typical vortex EM wave OAM transmission systems could be divided into four different regions based on the different channel capacities. Taking the microwave band as an example, it is pointed out that the quantum OAM transmission based on vortex microwave photon can form the new MIMO bound with the OAM dimension, which is beyond the traditional MIMO bound.

Keywords: orbital angular momentum, wireless communication, vortex microwave photon, vortex electro-magnetic wave, intrinsic OAM, extrinsic OAM

0 引言

在频谱资源日益紧张的背景下, 作为下一代移动通信中潜在关键技术^[1], 轨道角动量 (OAM,

orbital angular momentum) 传输技术有望凭借 OAM 物理量, 构成无线传输中新维度, 提供额外的并行信道, 增大传输速率, 大幅提升频谱效率。现代物理学表明, 宏观上所谓的电磁波在微观上都是由大

收稿日期: 2021-12-23; 修回日期: 2022-03-23

基金项目: 国家自然科学基金资助项目 (No.61731011)

Foundation Item: The National Natural Science Foundation of China (No.61731011)

量的电磁波量子组成的。每个电磁波量子都有自己的能量、动量、角动量等物理量。特别是角动量，可以分为自旋角动量（SAM, spin angular momentum）、轨道角动量。轨道角动量又包括内禀 OAM (intrinsic OAM) 和外部 OAM (extrinsic OAM)。如果将地月系统比作电磁波量子，则地球自转可表征自旋角动量，月球绕地球公转表征内禀 OAM，地月系统绕太阳公转表征外部 OAM。

根据电磁波量子是否携带内禀 OAM，涡旋电磁波传输技术可以分为量子态 OAM 涡旋电磁波和统计态 OAM 涡旋电磁波束两类^[2]。量子态 OAM 涡旋电磁波需借助相对论电子辐射电磁波涡旋量子，并采用专门传感器进行接收。与传统天线辐射的平面波电磁波量子（简称平面电磁波量子，内禀 OAM 为零）相比，电磁波涡旋量子携带非零内禀 OAM，能够利用内禀 OAM 提供完全独立于电场强度的新物理量和传输中的新维度，未来极具潜力；统计态 OAM 涡旋电磁波通过不同相位的大量电磁波量子构建具有螺旋相位面的共轴波束而形成，其波束的 OAM 由电磁波量子外部 OAM 积分得到。因为可以采用传统天线（阵）辐射不同初相的平面电磁波量子构成涡旋波束，所以技术成熟度较高，相关研究与实验报道也较多^[3-4]。

虽然统计态 OAM 涡旋波束实现简单，但学术界对于其在无线传输中是否提供新的物理维度与自由度存在一定争议^[5]。根本原因在于，统计态 OAM 涡旋波束可由均匀圆形阵列（UCA, uniform circular array）天线等形式的阵列天线产生，与基于多天线的多输入多输出（MIMO, multiple-input multiple-output）传输系统具有类似的硬件结构，因此这种统计态 OAM 涡旋波束传输常被认为是多天线 MIMO 传输系统的特例。即与传统多天线 MIMO 系统相比，没有新维度产生。当然，除了 UCA 天线产生统计态 OAM 涡旋波束，一些 OAM 专用天线也可产生此类涡旋波束，比如采用螺旋相位板、衍射光栅等^[6-7]。

OAM 新维度的争论反映了目前 OAM 无线传输研究对涡旋电磁波的物理本质缺乏深入了解，尚停留在宏观电磁波的范畴中，对 OAM 物理维度的机理认识不足，亟待澄清。本文将从涡旋电磁波资源利用和开发的历史出发，阐明 OAM 物理量和在传输中形成“新维度”的机理，并以信道容量的高低为依据，将典型 OAM 传输系统划分到 4 个区域，论述其与传统多天线 MIMO 容量界之间的关系，并

依次分析传输性能、技术特点与应用场景，指明未来研究发展方向。

1 电磁波的物理维度

1.1 电磁波资源开发利用历史

电磁波承载并传输信息，在无线通信系统中起到关键作用。利用电磁波进行无线通信起源于电磁学蓬勃发展的 19 世纪。描述电场和磁场关系的库仑定律、毕奥-萨伐尔定律和电磁感应定律等均在 19 世纪上半叶建立。在此基础上，1865 年英国物理学家麦克斯韦总结归纳得到麦克斯韦方程组，成为经典电磁学的基石，并预言了电磁波的存在^[8]。

在电磁学启发下，1888 年赫兹公开实现了室内电磁波传输实验，验证了麦克斯韦方程组的正确性和对电磁波存在的预言。赫兹的实验仅在接收端感应并检测到电磁波的存在，并没有借助电磁波调制并传输信息。在此基础上，意大利工程师马可尼意识到电磁波可以代替有线电报中的电信号，达到无线传输信息的目的。相应的无线电报实验于 1896 年完成并申请专利，随后于 1901 年实现首次跨大西洋通信，揭开了人类无线通信的序幕^[9]。

无线通信系统为了传输信息，需要在发射端按照一定规律，控制电磁波的特定物理量发生变化。在接收端，只要检测并记录接收电磁波该物理量的变化，即可获知希望传输的信息，实现无线通信的目的。因此，无线通信对电磁波的利用，本质上就是对电磁波物理量的挖掘与开发。电磁波的各个物理量也构成了电磁波可开发利用的资源。

从马可尼时代至今，无线通信系统均采用天线辐射电磁波，并用天线检测电磁波“电场强度”物理量。天线可以被认为是电场强度传感器（极化被定义为电场强度的方向）。由于实现方法简单，无线通信最初通过改变电磁波的电场强度幅度使电磁波承载信息，对应的技术称为幅度调制。随着电子器件的发展，利用电磁波电场强度信号的频率和相位承载信息的频率调制和相位调制也逐渐被提出。其中，接收天线中感生电流信号的幅度表示电场强度的大小，信号的频率表示电场强度变化的快慢，信号的相位表示电场强度变化的早晚。

随着多天线传输系统和波束成形的提出，表示电场强度分布的空间资源被深入利用，比如多天线 MIMO 传输、空间调制等^[10-11]。围绕电场强度利用形成了多自由度的资源域，比如电场强度信号的时

域、频域、码域、空域、功率域等。对于移动通信而言，从 1G 中的频分复用到 5G 中的大规模空间复用，均没有超出利用电场强度的范畴。如果止步于电场强度的利用，为了提高传输容量，就只能不停地提高载波频率和带宽，以及采用更加密集的空间复用方式。这不仅明显受到器件和工艺发展瓶颈的制约，造成继续发展很困难，而且受到香农容量公式边际效应的制约。

1.2 电磁波新物理量

从目前电磁波和无线通信技术发展来看，对于特定的无线通信系统，适于传输的频率位于一些有限的频段。例如移动通信，对移动用户覆盖较好的是 6 GHz 以下频段。因此传统提高载波频率和带宽的办法不可能持续使用，无法从根本上解决用户容量需求不断增加的问题。随着适宜传输的电场强度信号资源逐渐耗尽，如果希望继续发展无线通信，提高传输速率和频谱效率，就必须寻找电磁波中更多的物理量，开发利用新资源，为传输系统提供新维度。除了电场强度，电磁波还拥有磁场、动量、SAM、OAM、宇称等物理量。除了已作为极化利用的 SAM 外，这些物理量相比于电场强度，利用难度均较高。从目前物理层技术发展来看，进一步可以利用的物理量就是电磁波的 OAM，包括内禀 OAM 和外部 OAM^[12-13]。

力学理论指出，角动量分为 SAM 和 OAM，区别在于前者描述物体相对质心的转动，而后者表示物体绕原点转动^[14]。根据电动力学理论，电磁场的角动量也可分为自旋角动量 \mathbf{S} 和轨道角动量 \mathbf{L} ^[15]。自旋角动量表示电场围绕传播方向的旋转，模态值只能是“+1”或“-1”，对应于电磁波的圆极化；OAM 则表示整体旋转特性，表现为相位面的螺旋周期性，理论上不同的模态值可以取任意整数。不同模态值的涡旋电磁波相互正交，意味着可以利用 OAM 实现信息的承载与复用。OAM 的量纲 (ML^2T^{-1}) 和电场强度的物理量纲 ($\text{MLT}^{-3}\text{I}^{-1}$) 线性无关，其中，M、L、T 和 I 分别表示质量、长度、时间和电流强度的物理量纲。所以电磁波 OAM 与电场强度相互独立。

具体而言，电磁波角动量可表示为^[2]

$$\mathbf{J} = \frac{1}{c^2} \int_V \mathbf{r} \times (\mathbf{E} \times \mathbf{H}) d^3v = \epsilon_0 \int_V \sum_{i=1}^3 E_i (\mathbf{r} \times \nabla) A_i d^3v + \epsilon_0 \int_V \mathbf{E} \times \mathbf{A} d^3v =$$

$$\epsilon_0 \int_V \sum_{i=1}^3 E_i \left[(\mathbf{r}^{(i)} + \mathbf{r}^{(e)}) \times \nabla \right] A_i d^3v + \epsilon_0 \int_V \mathbf{E} \times \mathbf{A} d^3v = \epsilon_0 \int_V \sum_{i=1}^3 E_i (\mathbf{r}^{(i)} \times \nabla) A_i d^3v + \epsilon_0 \int_V \sum_{i=1}^3 E_i (\mathbf{r}^{(e)} \times \nabla) A_i d^3v + \epsilon_0 \int_V \mathbf{E} \times \mathbf{A} d^3v = \mathbf{L}^{(i)} + \mathbf{L}^{(e)} + \mathbf{S} = \mathbf{L} + \mathbf{S} \quad (1)$$

其中， c 为真空中光速， \mathbf{r} 为位置矢量， \mathbf{E} 和 \mathbf{H} 分别为电场强度和磁场强度， ϵ_0 为真空中介电常数， E_i 和 A_i 分别为电场强度 \mathbf{E} 和磁矢量势 \mathbf{A} 在 i 方向 ($i = x, y, z$) 上的分量， ∇ 为微分算符， V 为电磁波占据区域， d^3v 为空间微元。如图 1 所示， $\mathbf{r}^{(e)}$ 和 $\mathbf{r}^{(i)}$ 分别为电磁波量子（波包）内部中心点 O' 至参考坐标系原点 O 的距离和空间任意一点至波包内部中心点 O' 的距离，二者之和为位置矢量。 \mathbf{L} 和 \mathbf{S} 分别为 OAM 和 SAM。OAM 表征了电磁波的波包在空间中的旋转特性，根据取值是否与参考坐标系的选择有关，OAM 进一步分为内禀 OAM 和外部 OAM，分别用 $\mathbf{L}^{(i)}$ 和 $\mathbf{L}^{(e)}$ 表示，前者反映了粒子波包特征，后者则与粒子轨迹有关。

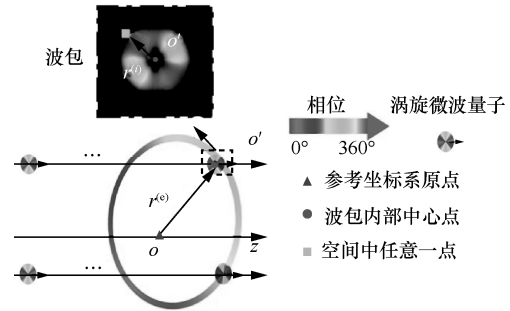


图 1 $\mathbf{r}^{(i)}$ 和 $\mathbf{r}^{(e)}$ 示意

量子力学常用算符表示物理量。在指定传播主轴上，OAM 算符可写为 $\hat{L} = -\frac{j\hbar\partial}{\partial\phi}$ ，其中， $j = \sqrt{-1}$ 为虚数单位， \hbar 为约化普朗克常数， ϕ 为方位角坐标^[14]。携带内禀 OAM 的单个粒子含有空间相位项 $\exp(jl^{(i)}\phi)$ ，利用量子力学中的 OAM 算符即可计算得到对应内禀 OAM 为 $\hbar l^{(i)}$ 。

2 轨道角动量传输新维度

在量子电动力学 (QED, quantum electro-dynamics) 视角下，电磁波可以看成由大量电磁波量子构成^[16]。作为电磁场量子化的结果，电磁波量子是一种无静止质量的基本粒子，常用于描述电磁辐射现象。在微波频段，电磁波量子

可称为“微波量子”。由于无线通信多用微波频段,不失一般性,后文均以微波量子为例说明电磁波量子特性。微波量子的概念提出至今已超过半个世纪^[17]。微波量子的状态可借助能量、OAM 模态值和自旋角动量模态值等表示。一般微波量子的 OAM 指内禀 OAM。根据微波量子内禀 OAM 是否为零,可以分为平面波微波量子(以下简称“平面微波量子”)和涡旋微波量子。平面微波量子 and 涡旋微波量子皆可构成涡旋电磁波^[2]。内禀 OAM 描述涡旋微波量子的量子态,可以形成量子态 OAM 涡旋电磁波。相对应地,外部 OAM 描述大量微波量子(比如平面微波量子)针对传播主轴的角动量积分(如式(1)所示),根据统计物理,可形成统计态 OAM 的涡旋电磁波束,具有螺旋相位面。

对于量子态 OAM,早在 1992 年,Allen 等^[18]便提出了单个光子携带 OAM。量子态 OAM 电磁波起源于光学,受限于微波频段中单个量子能量很低,目前研究主要仍集中在光学领域,相关内容可参考文献[19]。相比之下,射频频段的 OAM 主要采用统计态波束实现。其中,文献[20]提出了阵列天线的射频频段中统计态 OAM 涡旋波束产生方法;文献[21]指出了射频频段中的相应涡旋波束在下一代移动通信中具有数据高速传输等应用潜力。统计态 OAM 涡旋波束呈倒锥状,随着传输距离的增加而发散,而且模态值越大,发散越严重。目前仅适用于点对点共轴传输场景,远距离大容量传输困难。随着统计态 OAM 涡旋波束局限性逐渐暴露,以及量子态制备技术的提升,量子态 OAM 涡旋电磁波的研究成为焦点。

无论是量子态 OAM 涡旋微波量子,还是统计态 OAM 涡旋波束,其分别蕴含的内禀 OAM 和外部 OAM 都是独立于电场强度的物理量,但应用于无线传输是否构成新维度并突破传统 MIMO 容量界?本节具体分析和讨论该问题。

2.1 量子态 OAM 涡旋电磁波

量子态 OAM 涡旋电磁波中,涡旋微波量子的产生与耦合均需逐个微波量子进行,即每个微波量子均有内禀 OAM,同时微波量子制备与模态检测等均需 QED 理论支持^[22-24]。不同于统计态 OAM 涡旋波束需要多模态波束共轴传输和接收,并进行解复用或模态解算,量子态 OAM 电磁波则理论上只需对单个微波量子接收即可识别模态。因此在空域

资源外,量子态 OAM 电磁波提供了 OAM 域的独立新维度,该维度来源于量子波包内的中心对称结构,与外界宏观空域相独立。OAM 新维度进而可以提升传统多天线 MIMO 容量界至含有 OAM 维度的新 MIMO 容量界。

“新”一方面指在无线通信中 OAM 是一种新的承载信息的维度,另一方面则指涡旋微波量子的产生与接收方式新颖,完全不同于传统天线对电磁波的接收机理,突破了马可尼 100 多年前形成的无线通信体系架构。如图 2 所示,传统天线发射端按照一定规则对天线两端施加电压,天线中的自由电子便沿一定方向(图中为 x 方向)发生振荡,从而辐射含有特定电场强度的平面电磁波。接收端对电场强度的检测也同样方便。在入射电磁波的扰动下,天线中的自由电子随着外部电场强度的变化,在相应方向上振荡,形成感生电流信号。相比之下,涡旋微波量子的辐射需要借助空间中高速回旋运动的电子,通过模态选择器辐射特定模态的涡旋微波量子。在接收端,则与自由电子耦合后形成涡旋电子。由于角动量守恒,涡旋电子模态即反映出涡旋微波量子模态,对涡旋电子模态探测与分选即对涡旋微波量子的探测与分选。这不仅体现了电场强度与 OAM 在传输和探测方法上的不同,也反映出了两者物理本质的不同。

作为示例,量子态 OAM 涡旋电磁波传输系统示例如图 3 所示。在发射端,基带信号控制回旋管辐射涡旋微波量子。高压电源将高能电子束以一定角度注入回旋管中。在均匀强磁场作用下,回旋电子在回旋管的真空环境中形成朗道能级,其状态可用径向量子数 n 和角量子数 m 表示。处于朗道能级的电子的角动量由 m 表征。在相互作用过程中,涡旋电子与电磁波进行角动量交换,使电磁波获得内禀 OAM,从而辐射涡旋微波量子。详细的涡旋微波量子产生方法可参见文献[2]。

在接收端,涡旋微波量子模态检测方法众多,这里采用电子衍射法检测^[24]。涡旋微波量子经过自由空间传输后抵达接收端回旋管,将内禀 OAM 传递给电子并形成涡旋电子。不同模态值的涡旋电子通过晶体衍射,产生的衍射图样也不同,因此可以借助区分衍射图样,实现涡旋微波量子模态值的辨识。另外,还可以增加涡旋电子分选装置^[25-27],分选特定模态涡旋电子,以便完成 OAM 信号的解复用。

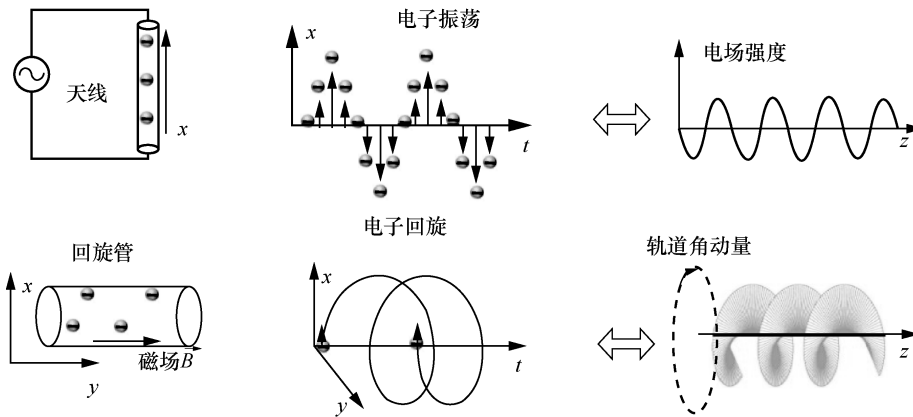


图 2 平面电磁波和涡旋电磁波的产生

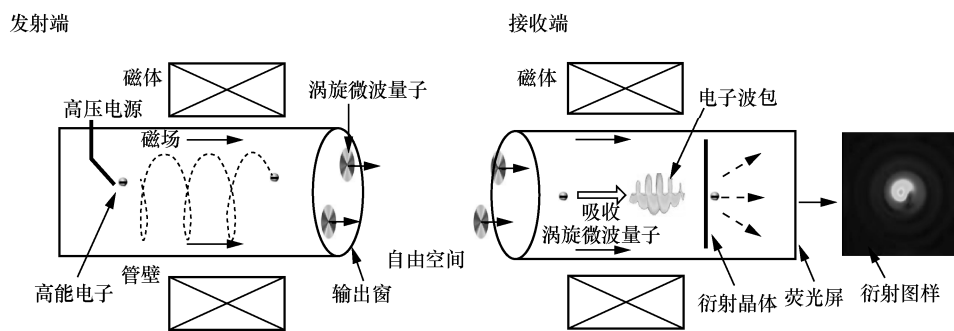


图 3 量子态 OAM 涡旋电磁波（涡旋微波量子）传输系统示例

相比于传统多天线波束成形系统，每个量子态波束均可独立地传输携带内禀 OAM 的涡旋微波量子，因此量子态 OAM 传输系统可以同时利用空域和 OAM 域资源传输信息。结合了 OAM 域和空域资源的量子态 OAM 电磁波具有提升传统多天线系统容量界的潜力，具体分析见第 4 节。

2.2 统计态 OAM 涡旋电磁波束

从微观层面看，传统天线中的电子不可能做高速回旋运动，只能辐射平面微波量子，所以传统电磁波由天线辐射出的平面微波量子构成，这决定了采用天线（阵）产生涡旋波束时与传统 MIMO 传输系统无物理本质区别。而且，统计态 OAM 涡旋波束与传统 MIMO 传输系统同时占据了空域资源。具体而言，在 OAM 表达式（即式(1)）中，电磁波的电场强度 E 和磁场强度 H 存在耦合关系（根据麦克斯韦方程组 2 个旋度方程可知），而位置矢量 $r^{(e)}$ 本身即宏观空域资源，既说明利用外部 OAM 的统计态涡旋波束并没有提供电场强度和宏观空域之外的物理资源，又说明统计态 OAM 涡旋波束占用了宏观空域资源。需要注意，这里宏观空域就是传统多天线 MIMO 系统利用的空域资源。另外， $r^{(e)}$ 随着特定模

态的涡旋微波量子取特定值，与宏观空域无关（也可认为自成独立微观空域）。同时，统计态涡旋波束 OAM 模态值与方位角之间满足傅里叶变换关系。这意味着统计态 OAM 模态域与空域相互耦合，OAM 模态由空间相位面在方位角方向的周期性决定。传统多天线 MIMO 传输利用空域信号的正交性，涡旋波束则也构成空域的正交信号，占用了传统空域资源。因此，采用天线（阵）产生的涡旋波束也被认为是多天线 MIMO 的特例^[5]。统计态 OAM 涡旋电磁波束呈倒锥状，存在如下三方面的局限性。

- 1) 理论上，统计态 OAM 涡旋波束的 OAM 域和空域耦合，无法构成 MIMO 传输以外的新维度。
- 2) 倒锥状波束在传播时能量发散，若全相位面接收，则接收天线尺寸限制传输距离。
- 3) 主要用于点对点直射视距（LoS, line of sight）信道传输，各个模态的涡旋波束共轴传输，天线需要严格对准。

统计态 OAM 涡旋波束由大量具有螺旋初相位空间分布的微波量子组成。这种通过大量粒子的运动轨迹形成的 OAM 属于外部 OAM，因此仅观测单个微波量子是无法检测到外部 OAM 模态的，理论上

需要对组成波束的所有微波量子求和才能得到, 因此对应的 OAM 只具有统计意义, 属于统计物理范畴, 这也是“统计态”名称的由来。

除此之外, 统计态 OAM 电磁波存在中空发散角, 主能量波瓣接收困难。对于最常见的 UCA 形式产生模态值为 l 的统计态波束, 辐射方向图呈 l 阶贝塞尔函数形式, 所有非零模态值的统计态的能量主波瓣均不在传播轴方向上, 且模态值越高, 发散角越大^[28]。如果接收端仍采用全相位面接收, 则天线阵列半径随着传输距离的增加而增加, 实际场景下难以满足。此时解决方法要么是设计专用天线汇聚波束, 减小发散角, 要么就只能接收部分相位面。当然, 部分相位面的接收会带来容量的下降。

需要强调一点, 除了天线阵列产生统计态 OAM 涡旋波束外, 还可以用螺旋相位板、衍射光栅或反射面天线等 OAM 专用天线产生。如果馈源是传统天线, 则 OAM 专用天线产生的电磁波仍然是平面微波量子构成, 不具备量子态 OAM, 不能形成具有内禀 OAM 的涡旋微波量子, 所形成的波束就是统计态 OAM 涡旋波束。值得一提的是, 如果馈源本身辐射涡旋微波量子, 则会形成一种具有外部 OAM 的涡旋微波量子, 即此时的波束 2 种 OAM 都有。为便于探究讨论, 可将该情况归为量子态 OAM 涡旋电磁波。

重新审视学术界对 OAM 波束与传统 MIMO 传输比较时的质疑, 易发现以文献[5]为代表的观点仅仅针对统计态 OAM 涡旋波束。与传统多天线 MIMO 系统相比, 统计态 OAM 涡旋波束确实无法为传输系统提供新维度。然而, 在涡旋微波量子传输理论, 以及相应产生与检测装置逐渐成熟的背景下, 基于涡旋微波量子的传输系统终将充分发挥其内禀 OAM 新维度优势, 提升无线传输系统性能。

3 典型轨道角动量传输系统架构

依上文分析, 根据信号源是否采用具有内禀 OAM 不为零的涡旋微波量子, 当前的 OAM 传输系统可以分为“量子态 OAM 传输系统”和“统计态 OAM 传输系统”, 而统计态 OAM 传输系统依据收发天线的不同, 又继续划分为“OAM 专用天线传输系统”“阵列天线全相位面传输系统”“部分相位面传输系统”。下面将对典型轨道角动量传输系统架构进行介绍。

3.1 量子态 OAM 传输系统

量子态 OAM 传输系统如图 4 所示。量子态 OAM 传输系统的调制和解调方式与传统通信系统类似, 可以采用模态键控或者复用传输, 二者分别可以借助回旋管或者具有大带宽的回旋行波管实现, 不采用传统天线发射和接收。多路不同模态值的涡旋微波量子通过合路器形成单路信号, 且仍保持各自独立的模态正交性。之后通过移相器进行馈相, 并通过天线阵列在空间中形成多波束, 通过不同的路径到达接收端。接收端同样布置多个接收器, 接收不同路径上的量子态波束。多个模态混合的量子态波束通过移相处理后, 分路至对应的回旋管, 实现涡旋微波量子的检测与基带信号的恢复。因此, 量子态 OAM 涡旋电磁波传输系统可以同时利用 OAM 域和空域传输信息。

3.2 OAM 专用天线传输系统

统计态 OAM 传输系统应用于 LoS 信道可采用专门产生 OAM 波束的天线, 即 OAM 专用天线, 这类天线包括螺旋相位板、衍射光栅、反射面等。特别是设计特殊的反射面, 让馈源产生的各个 OAM 模态的波束汇聚起来, 发散角趋于一致^[29], 便于接收天线对波束能量的接收, 而且可以进一步降低信道条件数, 提高信道容量。

传统 MIMO 在 LoS 环境传输时信道矩阵降秩, 子信道相关性强, 损失自由度。与之相比, 统计态 OAM 涡旋波束则在 LoS 环境传输时恢复了信道矩阵的秩, 去除子信道相关性, 重新获得额外自由度, 信道容量提升。

OAM 专用天线传输系统如图 5(a)所示。其中, 信号源采用平面微波量子, 收发天线阵列均采用 OAM 专用天线。不同于 UCA, OAM 专用天线可以共轴辐射多种模态的统计态波束, 并借助物理波束成形(如抛物面或透镜汇聚), 使不同模态的波束发散角趋于一致, 对应于图 5(a)中不同模态的主能量波瓣辐射方向一致。以抛物面 OAM 天线为例, 涡旋波束经过抛物面反射后, 不同模态具有相同衰减, 即随着传输距离 d 的增加, 衰减为 d^{-4} ^[29]。

3.3 阵列天线全相位面传输系统

作为经典的统计态 OAM 传输系统, 阵列天线全相位面传输系统如图 5(b)所示。不失一般性, 此处以 UCA 为例进行说明, 收发端均采用 UCA, 接收端对相位面均匀空间采样。也可用其他阵列天线, 比如均匀方形阵列天线(URA, uniform rectangular array)。除

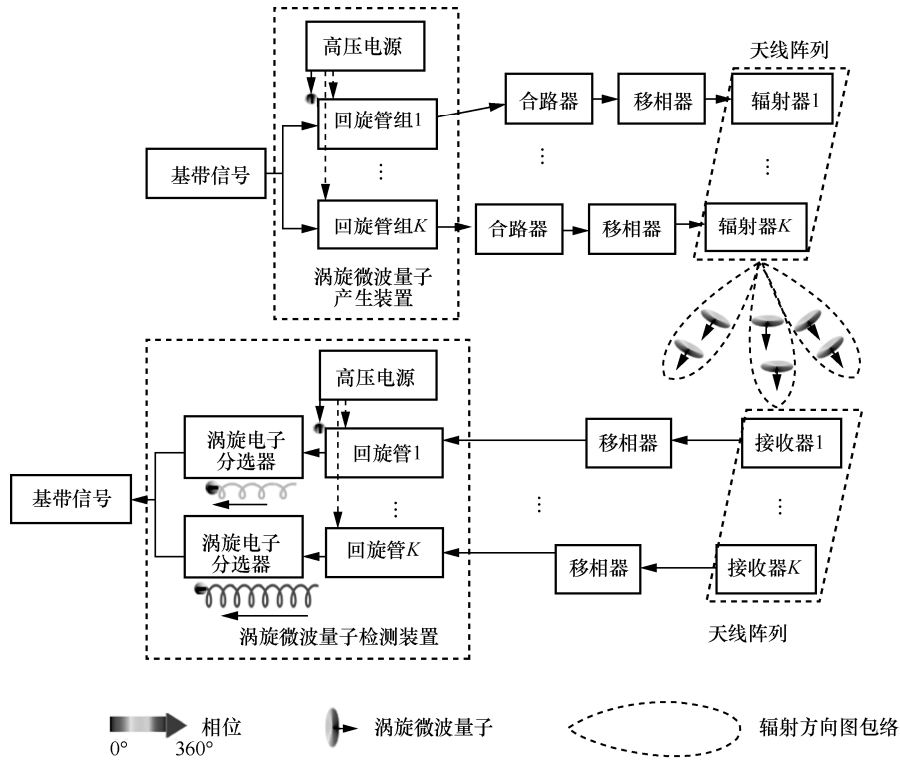


图 4 量子态 OAM 传输系统

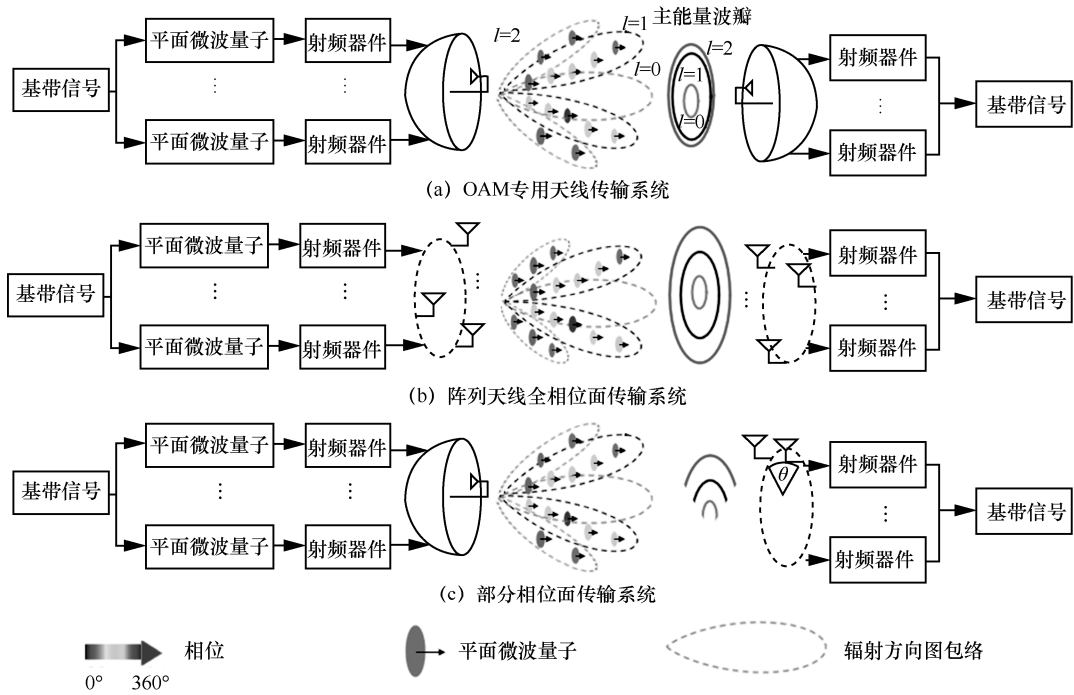


图 5 典型统计态 OAM 涡旋电磁波束传输系统

了单环 UCA，多环 UCA 也属于阵列天线全相位面传输系统，比如日本电报电话公司（NTT, Nippon Telegraph & Telephone）于 2021 年实现了 200 Gbit/s OAM 大容量传输实验^[30]，验证了 OAM 阵列天线全

相位面传输技术的有效性。相比于其他天线阵列形式，UCA 的好处在于 LoS 信道下，UCA 只需借助离散傅里叶变换即可完成统计态模态（空间子信道）的复用与解复用，系统结构简单，计算复杂度低。

3.4 部分相位面传输系统

在长距离传输场景下,若仍欲对全相位面进行接收,则接收端天线阵列半径过大,实际工程中往往难以实现。此时,只需对较小区域进行采样的部分相位面传输系统被提出^[31]。部分相位面传输系统如图 5(c)所示,由于尺寸限制,接收端天线(阵)被限制在一个小角度区间 $[0, \theta]$ 内。相互距离较近导致信道相关性强,信道矩阵的条件数较大,降秩可能性较大。与全相位面传输相比,部分相位面传输会损失容量,且随着传输距离的增加,所占相位面比例越来越小,容量亦随之下降。另外,长距离传输下,信道状态难以及时反馈至发射端,发射端无法采用注水原理等方法合理分配发射功率,只能在子信道上平均分配功率,影响传输速率提升。

4 轨道角动量传输信道容量分析

信道容量是传输系统的重要性能指标,因此本节将分析轨道角动量传输系统的信道容量。量子态 OAM 传输新维度为信道容量带来功率复用。因为 OAM 与电场强度独立,可以采用各自的传感器接收电磁波中对应的物理量,所以电磁波功率既对电场强度信号做贡献,也对 OAM 信号做贡献,称之为“功率复用”。功率复用直接的结果是获得了电场强度信号和 OAM 信号两部分传输容量。

传统通信系统借助电磁波的电场强度变化传输信息。既然 OAM 与电场强度相互独立,故 OAM 随时间的变化也可以产生对应的信道容量。发射功率在电场强度和 OAM 上被同时用于信息传输,信号功率得到了复用。因此,同时采用了电场强度和 OAM 的传输系统的信道容量可写为电场强度信道容量 $C^{(E)}$ 和 OAM 信道容量 $C^{(O)}$ 之和^[32],即

$$C = C^{(E)} + C^{(O)} = \sum_{n=1}^N B_n \log(1 + \eta_{\text{SNR,E}}^{(n)}) + \sum_{m=1}^M W_m \log(1 + \eta_{\text{SNR,O}}^{(m)}) \quad (2)$$

其中, N 和 M 分别为电场强度和 OAM 的信道个数, B_n (或 W_m) 分别为第 n (或 m) 个信道的电场强度带宽 (或 OAM 带宽), $\eta_{\text{SNR,E}}^{(n)}$ (或 $\eta_{\text{SNR,O}}^{(m)}$) 分别为第 n (或 m) 个信道的信噪比。功率复用特性意味着,可以提供无线传输新维度的量子态 OAM 具有提升传统 MIMO 系统容量界至含有 OAM 维度的新 MIMO 容量界的潜力。

为了更直观地体现不同系统的应用潜力,下面对典型的 OAM 传输系统进行信道容量区域分析和划

分。具体区域划分如图 6 所示,所形成的信道容量由高到低的 4 个区域 (即区域 A、B、C、D) 分别由 3 条容量界分隔开,即①传统多天线 MIMO 传输容量界,②LoS 环境具有信道状态信息反馈的闭环 MIMO 传输容量界,③LoS 环境下无信道状态信息反馈的开环 MIMO 传输容量界。区域 A、B、C、D 分别对应第 3 节中 4 种典型 OAM 传输系统。为了更直观地体现出 4 个区域容量界的区别,表 1 给出了一组在特定参数下不同容量界数值的示例。表 1 中,收发天线数目均为 8,收发阵列均采用半径为 0.5 m 的 UCA,工作频率为 10 GHz。空间各信道功率增益之和为定值,当信噪比为 10 dB 时,LoS 环境无信道状态信息反馈的开环 MIMO 传输容量界约为 14.7 bit/(s·Hz); LoS 环境具有信道状态信息反馈的闭环 MIMO 传输容量界约为 17.6 bit/(s·Hz); 传统多天线 MIMO 传输容量界约为 27.6 bit/(s·Hz)。相比之下,当量子态 OAM 复用模态数为 2 时, $N = 16$, 含有 OAM 维度的新 MIMO 容量界约为 41.3 bit/(s·Hz); 再增加 2 模态键控后,按照功率复用计算键控传输容量,同时多天线系统空域资源提供多路独立信道^[32],即 $M = 8$ 。此时容量界提高到 49.3 bit/(s·Hz), 均超过传统 MIMO 传输容量界,展示了量子态 OAM 涡旋电磁波传输系统巨大潜力。

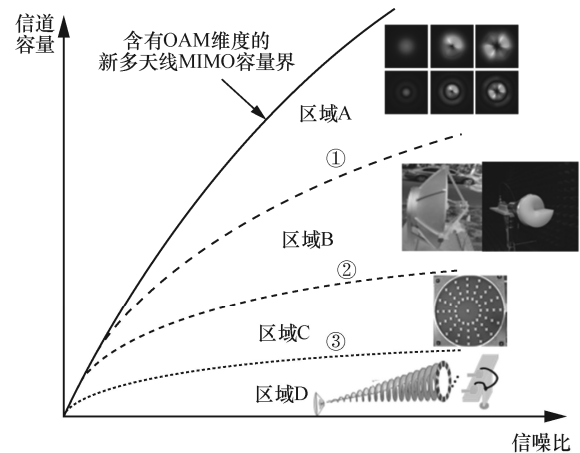


图 6 典型的轨道角动量通信系统的信道容量区域划分概念

表 1 不同场景下容量界具体数值

容量界	信道容量/ (bit·(s·Hz) ⁻¹)
开环 MIMO 传输容量界 (区域 C 与 D 分界线)	14.7
闭环 MIMO 传输容量界 (区域 B 与 C 分界线)	17.6
传统多天线 MIMO 传输容量界 (区域 A 与 B 分界线)	27.6
含 OAM 维度的新多天线 MIMO 容量界(2 模态复用)	41.3
含 OAM 维度的新多天线 MIMO 容量界 (2 模态复用和 2 模态键控)	49.3

具有无线传输新维度的量子态 OAM 传输系统, 在理想信道下, 可以提升传统多天线容量界至含有 OAM 维度的新多天线 MIMO 容量界; 非理想信道下, 信道容量也远超相应的统计态 OAM 传输系统, 对应的信道容量区域为区域 A。区域 A 中, OAM 新维度得到充分开发, 突破了传统多天线 MIMO 系统的容量限制, 使电场强度信号带宽不再成为传输系统中的瓶颈, 是未来 OAM 的研究发展方向。另外, 香农信道容量公式是对数形式, 所以随着并行信道的增加, 其容量提升也呈对数形式, 造成容量增益随着并行信道数的增加越来越小, 形成香农容量公式的边际效应。引入 OAM 新维度, 利用功率复用获得额外容量, 可以在一定程度上克服香农信道容量边际效应的影响。

相比于量子态 OAM 系统, OAM 专用天线系统只能利用空域资源。因此, OAM 专用天线系统的信道容量不会超过传统多天线容量界, 但凭借波束汇聚等成形特性, 在 LoS 环境下传输速率仍优于传统阵列天线全相位面传输系统。采用 OAM 专用天线避免因信道相关造成传输信道矩阵降秩, 比视距 MIMO 具有更大自由度^[33], 容量可以逼近传统多天线 MIMO 的容量界, 相应的信道容量区域为区域 B。在量子态系统相关技术成熟前, OAM 专用天线系统作为统计态 OAM 涡旋电磁波束传输的代表, 将被广泛应用于视距信道下大容量传输场景中。

相比于 OAM 专用天线传输系统, 阵列天线全相位面传输系统的高阶 OAM 模态波束的发散角大, 信道增益减小, 对应的信道质量下降, 其信道容量小于 OAM 专用天线传输系统, 对应区域为区域 C, 相应的上界为具有反馈信道状态信息的闭环传输系统信道容量。区域 C 中的 UCA 虽因工程实现简单、算法简单且复杂度低, 成为了 OAM 传输技术早期代表, 但作为一种特殊的多天线 MIMO 传输系统, 仅在特殊条件下具有复杂度上的优势, 理论研究意义和工程应用价值有限, 性能上更是劣于同为统计态的 OAM 专用天线传输系统。

相比于全相位面传输系统, 部分相位面传输系统中, 采用更高阶统计态 OAM 模态值复用才有可能获得正交性, 且收发端无法及时获取信道状态, 进一步导致信道增益和信道容量降低, 对应于信道容量最低的区域 D。然而由于统计态波束天然的倒锥状特性, 只有部分相位面传输系统适合长距离传

输场景。因此, 区域 D 是除量子态技术外, 目前 OAM 长(远)距离传输的唯一可行方案。由于容量有限, 因此部分相位面长距离传输中 OAM 维度可主要用于抗干扰、抗截获、加密传输等特殊通信场景。2016 年和 2018 年, 清华大学航电实验室分别完成了 27.5 km 陆地传输和 172 km 机载传输^[34-38], 即该区域实验的典型代表。

这里需要强调, 虽然统计态涡旋波束与传统多天线 MIMO 系统相比, 没有引入新维度且传输容量不会超越传统多天线 MIMO 容量界, 但在 LoS 信道中具有突出优点, 反映了统计态涡旋波束应用价值所在。与信道矩阵严重降秩的传统视距 MIMO 系统相比, 在区域 B 的 OAM 专用天线全相位面传输系统恢复信道正交性和信道矩阵的秩, 获得容量提升; 在区域 C 的 OAM 阵列天线全相位面传输系统具有更低的系统复杂度; 在区域 D 的部分相位面传输系统则可以获取长距离 OAM 传输能力。

5 讨论与展望

针对下一代移动通信, 统计态 OAM 涡旋波束和量子态 OAM 涡旋电磁波均可找到应用场景, 具体的适用范围涵盖 OAM 复用传输、OAM 多址技术、OAM 超窄带 (UNB, ultra narrow band) 传输、回传链路和近场通信 (NFC, near field communication) 等领域。对于区域 A 而言, 量子态 OAM 传输借助多个模态的涡旋微波量子进行复用、键控或多址传输, 且不受波束发散影响, 能够广泛应用于移动通信场景中。其中实用性较强的应用之一是基于量子态 OAM 的超窄带传输系统^[39]。量子态 OAM 系统发射信号时实时切换量子态 OAM 模态, 同时尽量保持电场强度时域波形仍为连续正弦波, 在极窄带宽条件下实现了信息传输, 有望缓解频谱资源紧张的困境。对于区域 B 和 C 而言, 统计态 OAM 系统可应用于 LoS 信道下大容量传输, 比如回传链路系统。随着频段的进一步提高, 路径损耗不断增大, 单个基站的覆盖范围也在减少。为了解决这个问题, 可以将基站分为宏基站和自回传小基站。宏基站功率大, 覆盖范围广, 而自回传小基站负责小范围内大量(大容量)终端的接入, 并通过回传链路将数据回传至宏基站处理, 这样可以避免光纤回传带来的较高基建成本。回传链路多为固定的 LoS 信道, 且对传输速率要求高, 基于专用天线的统计

态 OAM 波束完全可以胜任。另外借助传输环境中的智能超表面可以进一步构建增强 OAM 传输的广义波束^[40]。除此之外,近场通信也可利用统计态涡旋波束提升室内通信速率^[41]。对于区域 D 而言,部分相位面传输系统可以结合虚拟旋转天线 (VRA, virtual rotational antenna) 和索引调制等方法,实现长距离 OAM 无线传输^[36,42]。

无线传输中的 OAM 新维度可以利用不同模式值相互独立正交的特性,实现隐蔽抗截获通信和抗干扰通信,以及利用 OAM 专用信道的加密安全通信,保证了强对抗环境下通信数据链的可靠性^[43-46]。此外,OAM 涡旋电磁波还可应用于雷达探测领域,除了利用涡旋波束获得方位向成像能力外,分别借助统计态和量子态 OAM 涡旋电磁波,可实现反结构隐身和反材料隐身,提升接收信噪比和检测概率,成为反隐身探测利器^[47-50]。

6 结束语

针对学术界中具有 OAM 的涡旋电磁波是否为无线传输系统提供新维度的争议,本文从电磁波的利用历史出发,分析了电磁波 OAM 传输机理和特征,并指出无论是内禀 OAM 还是外部 OAM,都是电磁波可以利用的 OAM 物理量,但只有基于内禀 OAM 的量子态 OAM 涡旋微波量子传输可以在无线传输中产生 MIMO 传输以外的新维度;与之相比,基于外部 OAM 的统计态 OAM 涡旋波束则无法构成 MIMO 传输以外的新维度,只能算作多天线 MIMO 系统特例。

OAM 新维度的引入可以形成功率复用,即容量包含了传统电场强度信号形成的容量,也包含了 OAM 信号形成的容量。因此不仅可以超越传统多天线 MIMO 容量界,形成包含 OAM 维度的新 MIMO 容量界,而且可以在一定程度上克服传统香农信道容量的边际效应。

为了说明量子态 OAM 电磁波和统计态 OAM 电磁波的应用范围和所利用的突出优点,本文基于信道容量对典型 OAM 传输系统按信道容量由高到低进行 4 个区域的划分。其中,区域 A 属于具有无线传输新维度的量子态 OAM 传输系统,采用涡旋微波量子传输信息,其容量界相比于传统多天线 MIMO 容量界获得提升;区域 B、C 和 D 属于统计态 OAM 涡旋波束,虽然不具备 MIMO 传输以外的新维度,但在 LoS 信道中有突出表现。与传统视距

MIMO 传输相比,区域 B 为 OAM 专用天线传输系统,可恢复信道正交性和信道矩阵的秩,获得容量提升,代表着统计态 OAM 涡旋波束使用的发展趋势;区域 C 为阵列天线全相位面传输系统,系统复杂度低,且作为早期 OAM 技术代表,成熟度较高;区域 D 为部分相位面传输系统,不需要接收完整相位面,适用于统计态涡旋波束长距离传输。

参考文献:

- [1] IMT-2030(6G)推进组. 6G 总体愿景与潜在关键技术[R]. 2021. IMT-2030(6G) Promotion Group. 6G overall vision and potential key technologies[R]. 2021.
- [2] 谢翔东,何耀宇,张超. 涡旋电磁波轨道角动量传输技术[J]. 邮电设计技术, 2021(12): 6-13. XIE X D, HE Y Y, ZHANG C. Vortex electromagnetic waves transmission with orbital angular momentum[J]. Designing Techniques of Posts and Telecommunications, 2021(12): 6-13.
- [3] JIANG Z, WERNER D H. Electromagnetic vortices: wave phenomena and engineering applications[M]. New Jersey: Wiley-IEEE Press, 2021.
- [4] CHEN R, ZHOU H, LONG W X, et al. Spectral and energy efficiency of line-of-sight OAM-MIMO communication systems[J]. China Communications, 2020, 17(9): 119-127.
- [5] EDFORS O, 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.
- [6] RUFFATO G, MASSARI M, ROMANATO F. Generation of high-order Laguerre-Gaussian modes by means of spiral phase plates[J]. Optics Letters, 2014, 39(17): 5094-5097.
- [7] MAHMOULI F E, WALKER S D. 4-Gbit/s uncompressed video transmission over a 60-GHz orbital angular momentum wireless channel[J]. IEEE Wireless Communications Letters, 2013, 2(2): 223-226.
- [8] MAXWELL J C. A dynamical theory of the electromagnetic field[J]. Philosophical Transactions of the Royal Society of London, 1865, 155: 459-512.
- [9] BELROSE J S. Fessenden and Marconi: their differing technologies and transatlantic experiments during the first decade of this century[C]//Proceedings of the 1995 International Conference on 100 Years of Radio. London: IET, 1995: 32-43.
- [10] LARSSON E G, EDFORS O, TUFVESSON F, et al. Massive MIMO for next generation wireless systems[J]. IEEE Communications Magazine, 2014, 52(2): 186-195.
- [11] MESLEH R Y, HAAS H, SINANOVIC S, et al. Spatial modulation[J]. IEEE Transactions on Vehicular Technology, 2008, 57(4): 2228-2241.
- [12] 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.
- [13] HARRIS J, GRILLO V, MAFAKHERI E, et al. Structured quantum waves[J]. *Nature Physics*, 2015, 11(8): 629-634.
- [14] GRIFFITHS D J, SCHROETER D F. Introduction to quantum mechanics[M]. Cambridge: Cambridge University Press, 2018.
- [15] JACKSON J D. Classical electrodynamics 3rd edition[M]. New York: Wiley, 1998.
- [16] FEYNMAN R P. Quantum electrodynamics[M]. [S.l.]: Avalon Publishing, 1998.
- [17] 任之恭. 微波量子物理学[M]. 北京: 科学出版社, 1980.
- RENG Z G. Microwave quantum physics[M]. Beijing: Science Press, 1980.
- [18] ALLEN L, BEIJERSBERGEN M W, SPREEUW R J, et al. Orbital angular momentum of light and the transformation of Laguerre-Gaussian laser modes[J]. *Physical Review A, Atomic, Molecular, and Optical Physics*, 1992, 45(11): 8185-8189.
- [19] ANDREWS D L, BABIKER M. The Angular momentum of light[M]. Cambridge: Cambridge University Press, 2009.
- [20] 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.
- [21] 魏克军, 赵洋, 徐晓燕. 6G 愿景及潜在关键技术分析[J]. *移动通信*, 2020, 44(6): 17-21.
- WEI K J, ZHAO Y, XU X Y. Analysis of 6G vision and potential key technology[J]. *Mobile Communications*, 2020, 44(6): 17-21.
- [22] 徐鹏飞. 电磁波轨道角动量量子态研究[D]. 北京: 清华大学, 2020.
- XU P F. Research on orbital angular momentum quantum state[D]. Beijing: Tsinghua University, 2020.
- [23] ZHANG C, XU P F, JIANG X F. Vortex electron generated by microwave photon with orbital angular momentum in a magnetic field[J]. *AIP Advances*, 2020, 10(10): 105230.
- [24] ZHANG C, XU P F, JIANG X F. Detecting superposed orbital angular momentum states in the magnetic field by the crystal diffraction[J]. *The European Physical Journal Plus*, 2021, 136(1): 1-13.
- [25] GRILLO V, TAVABI A H, VENTURI F, et al. Measuring the orbital angular momentum spectrum of an electron beam[J]. *Nature Communications*, 2017, 8: 15536.
- [26] TAVABI A H, ROSI P, ROTUNNO E, et al. Experimental demonstration of an electrostatic orbital angular momentum sorter for electron beams[J]. *Physical Review Letters*, 2021, 126(9): 094802.
- [27] MCMORRAN B J, HARVEY T R, LAVERY M P J. Efficient sorting of free electron orbital angular momentum[J]. *New Journal of Physics*, 2017, 19(2): 023053.
- [28] MOHAMMADI S M, DALDORFF L K S, FOROZESH K, et al. Orbital angular momentum in radio: measurement methods[J]. *Radio Science*, 2010, 45(4): 1-14.
- [29] WU Q L, JIANG X F, ZHANG C. Attenuation of orbital angular momentum beam transmission with a parabolic antenna[J]. *IEEE Antennas and Wireless Propagation Letters*, 2021, 20(10): 1849-1853.
- [30] YAGI Y, SASAKI H, YAMADA T, et al. 200 Gb/s wireless transmission using dual-polarized OAM-MIMO multiplexing with uniform circular array on 28 GHz band[J]. *IEEE Antennas and Wireless Propagation Letters*, 2021, 20(5): 833-837.
- [31] ZHANG W T, ZHENG S L, CHEN Y L, et al. Orbital angular momentum-based communications with partial arc sampling receiving[J]. *IEEE Communications Letters*, 2016, 20(7): 1381-1384.
- [32] WANG Y H, ZHANG C. Enhanced Shannon capacity with orbital angular momentum dimension[C]//Proceeding of 2022 IEEE International Conference on Communications Workshops (ICC Workshops). Piscataway: IEEE Press, 2022: 1-6.
- [33] ZHANG C, JIANG J, ZHAO Y F, et al. New degrees of freedom for beamforming manipulation in MIMO transmission with OAM[C]//Proceedings of 2019 IEEE Globecom Workshops. Piscataway: IEEE Press, 2019: 1-6.
- [34] 马路. 电磁波轨道角动量长距离传输方法研究[D]. 北京: 清华大学, 2017.
- MA L. Research on the method of long-distance transmission of electro-magnetic waves with orbital angular momentum[D]. Beijing: Tsinghua University, 2017.
- [35] 李晋. 基于智能压缩感知的长距离轨道角动量传输技术研究[D]. 北京: 清华大学, 2020.
- LI J. Research on long distance orbital angular momentum transmission technology based on intelligent compressive sensing[D]. Beijing: Tsinghua University, 2020.
- [36] 赵宇飞. 涡旋电磁波长距离大容量传输方法研究[D]. 北京: 清华大学, 2020.
- ZHAO Y F. Research on long distance and high capacity transmission with orbital angular momentum wave[D]. Beijing: Tsinghua University, 2020.
- [37] ZHANG C, ZHAO Y F. Orbital angular momentum nondegenerate index mapping for long distance transmission[J]. *IEEE Transactions on Wireless Communications*, 2019, 18(11): 5027-5036.
- [38] ZHAO Y F, ZHANG C. Distributed antennas scheme for orbital angular momentum long-distance transmission[J]. *IEEE Antennas and Wireless Propagation Letters*, 2020, 19(2): 332-336.
- [39] WU Q L, ZHANG C. Ultra narrow band transmission system with orbital angular momentum[C]//Proceedings of 2021 IEEE International Conference on Communications Workshops. Piscataway: IEEE Press, 2021: 1-5.
- [40] 蒋金. 涡旋电磁波 OAM 维度空间和波束赋形方法研究[D]. 北京: 清华大学, 2021.
- JIANG J. Research on OAM dimensional space and beamforming transmission method of vortex electromagnetic wave[D]. Beijing: Tsinghua University, 2021.
- [41] LYU R Y, CHENG W C, ZHANG W. Modeling and performance analysis of OAM-NFC systems[J]. *IEEE Transactions on Communica-*

- tions, 2021, 69(12): 7986-8001.
- [42] ZHANG C, MA L. Millimetre wave with rotational orbital angular momentum[J]. Scientific Reports, 2016, 6(1): 31921.
- [43] 张超, 姜学峰. 电磁波轨道角动量隐蔽传输系统: CN108540256A[P]. 2018-09-14.
- ZHANG C, JIANG X F. Hidden transmission system based on OAM of electromagnetic wave: CN108540256A[P]. 2018-09-14.
- [44] ZHANG C, JIANG X F. Secure high-speed spread spectrum transmission system with orbital angular momentum[J]. IET Communications, 2020, 14(11): 1709-1717.
- [45] JIANG X F, ZHANG C. Secure transmission aided by orbital angular momentum jamming with imperfect CSI[C]//Proceedings of 2019 IEEE International Conference on Communications (ICC). Piscataway: IEEE Press, 2019: 1-6.
- [46] LIANG L P, CHENG W C, ZHANG W, et al. Mode hopping for anti-jamming in radio vortex wireless communications[J]. IEEE Transactions on Vehicular Technology, 2018, 67(8): 7018-7032.
- [47] 郭桂蓉, 胡卫东, 杜小勇. 基于电磁涡旋的雷达目标成像[J]. 国防科技大学学报, 2013, 35(6): 71-76.
- GUO G R, HU W D, DU X Y. Electromagnetic vortex based radar target imaging[J]. Journal of National University of Defense Technology, 2013, 35(6): 71-76.
- [48] 陈东. 电磁波轨道角动量雷达探测与成像方法研究[D]. 北京: 清华大学, 2019.
- CHEN D. Research on detection and imaging methodology for orbital angular momentum based radar[D]. Beijing: Tsinghua University, 2019.
- [49] ZHANG C, CHEN D, JIANG X F. RCS diversity of electromagnetic wave carrying orbital angular momentum[J]. Scientific Reports, 2017, 7(1): 15412.
- [50] 张超, 王元赫, 姜学峰. 涡旋微波量子雷达[J]. 雷达学报, 2021, 10(5): 749-759.
- ZHANG C, WANG Y H, JIANG X F. Quantum radar with vortex microwave photons[J]. Journal of Radars, 2021, 10(5): 749-759.

[作者简介]



张超(1978-), 男, 陕西城固人, 博士, 清华大学教授、博士生导师, 主要研究方向为涡旋电磁波传输与探测, 以及航空宇航电子系统。



王元赫(1997-), 男, 江苏涟水人, 清华大学博士生, 主要研究方向为电磁波轨道角动量传输与探测。