

激光与光电子学进展

基于涡旋电磁波的无线通信技术(特邀)

王健^{1,2*}, 王仲阳^{1,2}, 刘劲峰^{1,2}, 汪朔^{1,2}¹华中科技大学武汉光电国家研究中心, 湖北 武汉 430074;²湖北光谷实验室, 湖北 武汉 430074

摘要 介绍了无线通信和涡旋电磁波的基本概念及相关技术,详细回顾了近年来基于涡旋电磁波的无线通信技术实验研究进展,包括微波涡旋电磁波通信、太赫兹涡旋电磁波通信、中红外涡旋电磁波通信、近红外涡旋电磁波通信和可见光涡旋电磁波通信等。同时,介绍了卫星涡旋激光通信技术的理论研究进展以及拓展结构光(如贝塞尔光和矢量光等)通信在抵抗障碍物和湍流影响方面的实验研究进展。最后也讨论了涡旋电磁波无线通信技术的挑战与展望。多频段和多维度融合的涡旋电磁波及拓展结构化电磁波,可以为多场景、跨尺度、大容量、远距离、高鲁棒性的无线通信提供潜在解决方案,也有望应用于未来卫星通信中。

关键词 无线通信; 自由空间光通信; 轨道角动量; 涡旋电磁波; 结构化电磁波; 卫星通信

中图分类号 O436

文献标志码 A

DOI: 10.3788/LOP240754

Wireless Communication Technologies using Vortex Electromagnetic Waves (Invited)

Wang Jian^{1,2*}, Wang Zhongyang^{1,2}, Liu Jinfeng^{1,2}, Wang Shuo^{1,2}

¹Wuhan National Laboratory for Optoelectronics, Huazhong University of Science and Technology, Wuhan 430074, Hubei, China;

²Optics Valley Laboratory, Wuhan 430074, Hubei, China

Abstract This article introduces the basic concepts and related technologies of wireless communications and vortex electromagnetic waves. After that, we give a comprehensive overview of the experimental research progress of wireless communication technologies based on vortex electromagnetic waves in recent years, including microwave vortex electromagnetic wave communications, terahertz vortex electromagnetic wave communications, mid-infrared vortex electromagnetic wave communications, near-infrared vortex electromagnetic wave communications, and visible light vortex electromagnetic wave communications. At the same time, the theoretical research progress of satellite vortex laser communication technology and the experimental research progress of extended structured light (such as Bessel light beam and vector light beam) communications against obstacles and turbulence effects are introduced. At the end of the article, the challenges and prospects of vortex electromagnetic wave wireless communication technologies are also discussed. Multi-band and multi-dimensional fusion of vortex electromagnetic waves and extended structured electromagnetic waves, may provide potential solutions for multi-scenario, cross-scale, large-capacity, long-distance, and high-robustness wireless communications, and are also expected to be applied in future satellite communications.

Key words wireless communications; free-space optical communications; orbital angular momentum; vortex electromagnetic waves; structured electromagnetic waves; satellite communications

1 引言

在过去几十年里,无线通信技术极大地促进了经济和社会发展,无线通信技术的快速进步及传统方案

面临的挑战也带动了卫星互联网通信需求的不断增加,特别是在无线信号覆盖不足的乡村、山区和海洋区域,卫星互联网与传统地面无线网络可以相互补充,共同提供高带宽低延时的网络通信服务。然而,伴随着

收稿日期: 2024-01-27; 修回日期: 2024-02-18; 录用日期: 2024-02-21; 网络首发日期: 2024-02-29

基金项目: 国家杰出青年科学基金 (62125503)

通信作者: *jwang@hust.edu.cn

高速互联网、视频会议、实时流媒体等应用的日益普及,带宽和容量需求与日俱增,这种对数据和多媒体服务不断增长的需求导致了传统无线电射频(RF)频谱出现拥堵,因此产生了从无线电 RF 转向光载波的需求。无线光通信是一种使用光载波通过自由空间传输信息的技术,被认为是下一代无线高速宽带连接的高效解决方案,其具有极大的带宽、部署简便、无需频谱分配许可、低功耗(约为 RF 的 1/2)、小尺寸(约为 RF 天线直径的 1/10)和更高的传输安全性^[1]。1876 年, Bell 展示了第一个无线电话系统^[2],通过将声波转换为电信号,并使用太阳光作为载体在几英尺(1 英尺=30.48 cm)外传输语音信号,这个设备也被称为“光电话”。随着 1960 年休斯实验室发明了第一台激光器^[3],无线光通信技术开始快速发展。

无线光通信可以分为两大类,室内无线光通信和室外无线光通信。室内无线光通信使用红外或可见光在建筑内通信,当通信很难通过物理连接实现时,无线通信就变得十分必要^[4-11]。室外无线光通信也被称为自由空间光通信(FSO),室外无线光通信系统进一步分为地面之间、地面到卫星、卫星到地面、卫星之间、卫星到机载平台(飞机、无人机、热气球)^[12-14]之间的通信。Fried^[15]于 1967 年首次从理论上研究了从地面到卫星的光上行链路传输。几年后,Minot^[16]演示了使用地面连续波(CW)氩离子激光向地球轨道卫星-II(GEOS-II)进行上行链路传输实验。此后,提出了多项理论研究^[17-19],并进行了实验^[20-21]。1990 年初,使用三束激光进行了中继镜实验(RME),研究受大气湍流影响光束的时间性质^[22]。1992 年,伽利略光学实验(GOPEX)展示了与深空飞行器的上行光通信^[23]。1995 年末,使用氩离子激光器实现了第一个在地面和轨道卫星间地对空双向激光通信链路演示(GOLD)^[24]。1997 年, Wilson 等^[25]采用自适应光学器件减轻大气湍流的影响,演示了双向地月激光链路。2002 年,欧洲航天局在 SPOT-4 和 ARTEMIS 卫星之间成功演示了第一个星间激光通信链路,用于光数据中继服务^[26]。2005 年,日本 KIRARI 卫星和欧洲航天局的 Artemis 卫星之间成功地实现了双向光链路^[27]。2008 年,OGS 和 ETS-VI 卫星成功建立了地面到卫星光链路^[28]。

无论是利用无线电微波还是激光作为载波,卫星无线电磁波通信仍然面临许多挑战,其中带宽和容量问题最为严峻。为开发电磁波新的维度资源,促进无线通信技术可持续扩容,结构化电磁波近年来逐渐走进视野。例如,通过剪裁光波的空间结构,可以构造出具有非均匀场分布的结构光,包括空间上变化的幅度、相位和偏振分布等特性。这种方法相较于传统的高斯光,开辟了光波的空间新维度资源,从而为提高光通信的容量以及丰富通信的形式提供了全新的视角和方法。进一步地将这种方式拓展到其他频段电磁波,我们能够实现更加多样性的无线通信系统,从而应对信

息传输过程中的各种挑战,如增加通道容量、增强信号的鲁棒性以及实现更复杂的编码策略等。携带轨道角动量(OAM)的涡旋电磁波是结构化电磁波的一个典型例子,其具有独特的场强分布,即场强在中心为零并呈圆环形分布^[29],涡旋电磁波的波前呈现螺旋状,中心是一个相位奇点。例如,电磁波中涡旋光(OAM 模式)的特殊空间幅度和相位结构为其在光学操控、显微成像、传感测量、量子科学等多个领域的应用提供了可能^[30]。涡旋光与传统的圆偏振光不同,后者携带的自旋角动量(SAM)只有两种取值,即左旋和右旋,而涡旋光携带的 OAM 阶数可以有多种取值,这些不同阶数的 OAM 模式之间具有正交性,这种正交性类似于光波波长维度的多值性和正交性,使得 OAM 模式可以像波长一样用于复用和携带信息^[31-32]。因此,利用 OAM 模式在光通信中携带信息,可以大大增加通信系统的容量,为大容量光通信和信息处理提供了新的方法和策略。

本文聚焦自由空间涡旋电磁波通信技术,按照电磁波的波段,详细阐述了近年来微波、太赫兹、中红外、近红外及可见光等涡旋电磁波无线通信的研究进展,同时也介绍了涡旋电磁波在卫星通信领域的理论研究工作,以及拓展结构化电磁波无线通信技术的进展。最后,对于涡旋电磁波无线通信技术未来面临的挑战和展望也进行了简要讨论。

2 无线通信技术

无线通信技术,是一种在两个或多个点之间通过无线电磁波传输信息的技术,无需电缆或光纤等特殊的物理传输通道,具有灵活性高、部署速度快和覆盖区域广等特点。无线通信系统主要由发射装置、传输链路和接收装置组成,能够实现多种通信连接方式,如点对点、单点对多点和移动通信系统。无线通信技术广泛应用于移动电话、无线网络、卫星通信等多个领域。无线通信可以在电磁波谱中多个电磁波频段内实现通信功能,各个频段的电磁波具有不同的特征和应用领域。

电磁波谱,从长波长低能量的无线电波到短波长高能量的伽马射线,其分为无线电波、微波、红外、可见光、紫外、X 射线和伽马射线,如图 1 所示。无线电波具有最低的能量和最长的波长,能够被天线发射和接收,并能穿透大气层、植被以及大多数建筑材料,而伽马射线具有最强的能量和最短的波长。无线电波的波长通常在几米到数千米,广泛应用于广播、通信、定位等领域;微波的波长从几毫米到几厘米不等,主要应用于雷达、卫星通信和无线网络;太赫兹波段介于微波和远红外之间,其频率范围约为 300 GHz~30 THz,近年来报道了多种太赫兹技术在成像和通信方面的应用;红外波段覆盖了 300 GHz~400 THz 范围,主要分为三部分,远红外(1 mm~10 μm)、中红外(10~2.5 μm)、近红外(2500~750 nm),其中近红外波段中 1550 nm 附近激

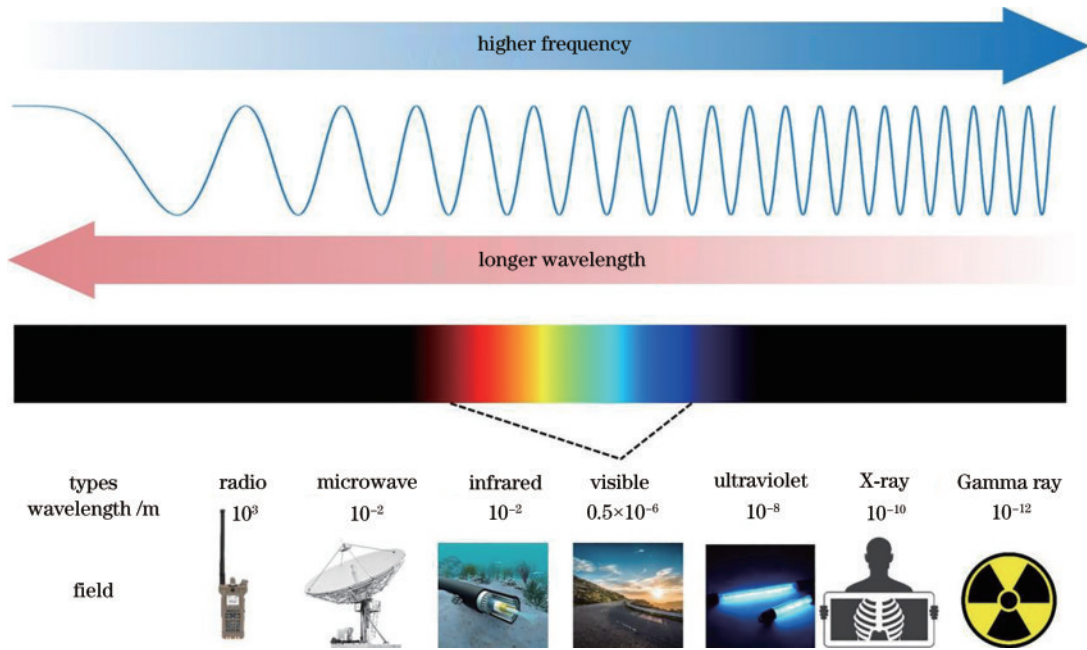


图 1 电磁波频谱示意图

Fig. 1 Schematic of electromagnetic spectrum

光由于其在光纤中出色的低损耗、低色散性能,被广泛应用于长距离光纤通信系统;可见光是人眼较为敏感的电磁波谱部分,频率在 $400 \sim 790$ THz,可被人眼检测并感知,除了应用于视觉领域,可见光还可以应用于部分通信场景,尤其是适合于水下通信的蓝绿光波段;紫外线、X射线和伽马射线由于波长较短,具有较高的能量,常常应用于消毒、医学成像等领域。

无线通信依赖于电磁波谱中的特定频段来传输信息,例如无线电波、微波、红外和可见光波段,这些频段的电磁波可以携带信息,在自由空间进行通信而无需

物理连接。无线通信系统基本模型如图 2 所示,来自发射端的音频、文本、静态图像、视频等数据,经过处理转换为信号,并通过调制将信号发送出去,同样地,在接收端需要进行解调操作,并将信号恢复为原本的数据,常见的调制技术有调幅(AM)、调频(FM)、相移键控调制(PSK)、正交幅度调制(QAM)、正交频分复用调制(OFDM)等。调制解调技术,使得远距离发送数据成为可能,值得注意的是,QAM和OFDM等技术利用了电磁波的幅度、相位、频率多种维度,在有限的频谱范围内实现了更大容量的数据传输。

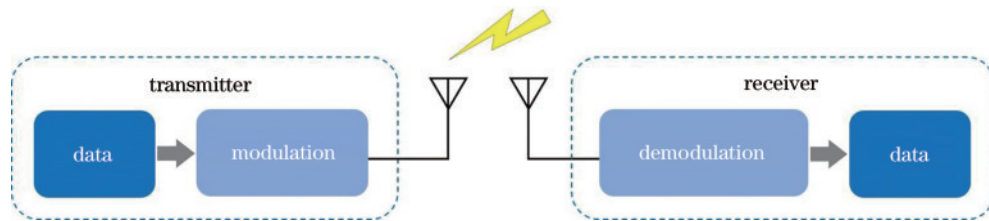


图 2 无线通信系统模型

Fig. 2 Wireless communication system model

3 涡旋电磁波

随着无线通信正面向第五代(5G)、第六代(6G)甚至更高级别的技术迁移,迫切需要满足爆炸式增长的数据流量需求。然而,在过去的几十年里,很多电磁波维度资源,如频率、时间等,已开发殆尽。如今,利用传统的接入技术如频分多址和时分多址来增加容量或支持更多用户变得越来越困难。未来无线通信系统的一种潜在扩容方式是采用涡旋电磁波进行通信。涡旋电磁波所携带的OAM阶数可以有多种取值,并且这些

OAM彼此正交,这种正交性可以被用来在同一通道中复用不同的OAM,这为增加通道容量和频谱效率提供了一种新方法^[33-34]。因此,将涡旋电磁波与无线通信系统结合使用,有望大幅提升服务质量,实现更高的数据速率、更高的频谱效率和更高的通信安全性。

电磁波的传播模式与其携带的动量类型相关,包括线性动量和角动量,其中角动量又可分为SAM和OAM。若电磁波中电场围绕传播方向旋转(例如圆偏振)即为SAM,若电磁波波矢绕传播方向螺旋运动从而构成螺旋相位面,则为OAM^[35]。1992年,Allen

等^[29]展示了具有方位角相位项 $\exp(i\ell\theta)$ 的螺旋相位波前光束,其每个光子携带的 OAM 为 $\ell\hbar$,其中, \hbar 为约化普朗克常数, ℓ 为 OAM 拓扑电荷数或 OAM 阶数, ℓ 可取正值(顺时针)、负值(逆时针)和零值(无螺旋相位,如传统平面波或高斯波的束腰位置), θ 为方位角。

OAM 模式的螺旋相位结构使其中心为相位奇点,因此呈现出中心电场强度为零的环状分布,图 3 为携带不同阶数的 OAM 模式的相位波前、横向相位分布和强度分布,这种具有螺旋相位波前和中心强度为零的电磁波,称为 OAM 电磁波或涡旋电磁波。

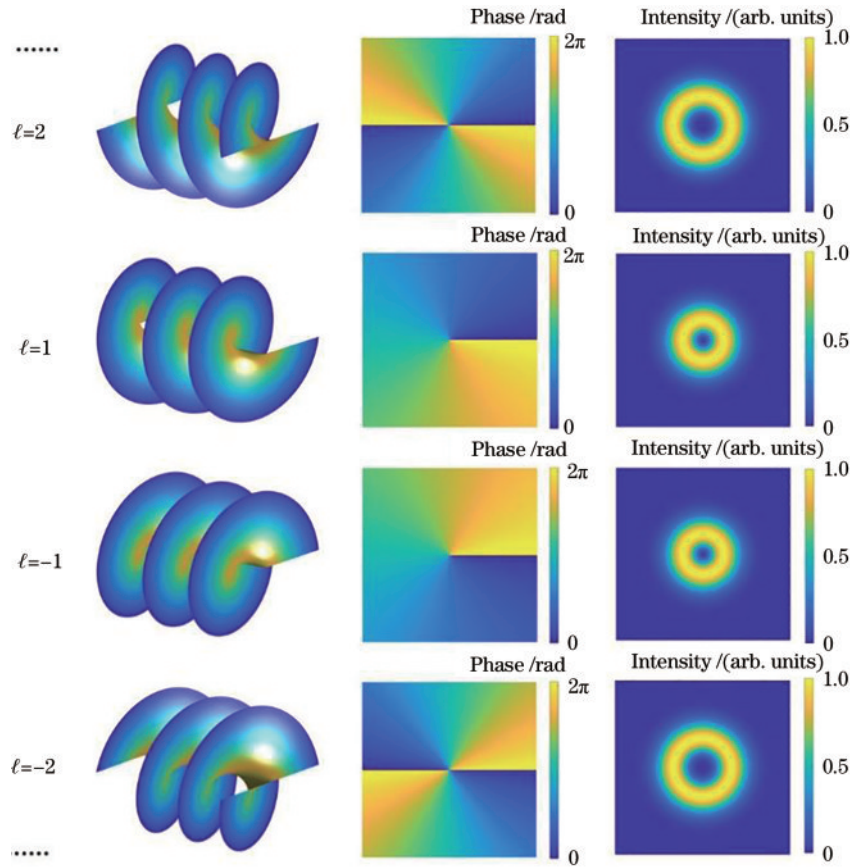


图 3 具有不同阶数的 OAM 模式的相位波前、横向相位分布和强度分布

Fig. 3 Phase front, transverse phase distribution, and intensity profile of OAM modes with different topological charges

涡旋电磁波的生成需要产生对应的螺旋相位因子 $\exp(i\ell\theta)$ 。目前在无线电及微波领域已经有许多涡旋电磁波产生方案,例如,螺旋相位板(SPP)天线^[36]、均匀圆形阵列(UCA)天线^[37]和超表面^[38]等。此外,在光波范畴,OAM 模式的产生可分为有源和无源,其中有源的方法是利用激光腔直接产生 OAM 光束^[39-40],所生成的光束具有良好的质量^[41],而采用无源方法产生 OAM 光束具有可控性强、实现便捷、方式多样等特点,主要有衍射光学元件、变换光学方法、SPP、Q 板、J 板、数字微镜器件(DMD)、空间光调制器(SLM)、光纤器件、光子集成器件、超材料、超表面等^[42-51]方案,此外,OAM 梳的方案也有相应讨论^[52]。1996 年,Turnbull 等^[53]利用 SPP 在毫米波段成功产生了涡旋电磁波。随后,在 2007 年,瑞典空间物理研究所的 Thidé 等^[54]通过对 UCA 的各个阵元施加不同相位生成了涡旋电磁波。2011 年,意大利的 Tamburini 等^[55]设计了一种螺旋反射面天线,这一设计不仅实现了在 2.4 GHz 频段产生涡旋电磁波,同时也实现了其测量。2013 年,

Mahmouli 等^[56]通过 SPP 和全息幅度板两种不同的方法,设计了工作在 60 GHz 频点的 OAM 天线。2015 年,Wei 等^[57]利用 3D 打印技术,并通过适当的轴向设计,实现了在 0.3 THz 频段下产生任意阶的贝塞尔(Bessel)光束。2016 年,Yu 等^[58]开发并实验验证了一种电磁超表面,展现了其在射频域生成多种 OAM 的能力。Chen 等^[59]通过结合 SPP 与透镜设计,成功减小了涡旋电磁波的波束发散角。2018 年,Zhao 等^[51]设计并制造了一种反射增强型表面等离子体超表面,实现了在 2 μm 波长(中红外波段)下结构光(相位螺旋和强度螺旋)的生成。通过对超表面的亚波长结构进行工程化设计,不仅能够超出传统空间光调制器能力范围的 2 μm 处产生结构光,还能在无需分离出参考光的情况下产生自参考强度螺旋。

在涡旋电磁波通信系统中,发射端通常需要完成数据信息的加载和 OAM 模式的产生和复用,而接收端需要关注 OAM 模式的解复用检测和数据信息的解调。与发射端 OAM 模式的产生相对应,接收端为了

将特定的 OAM 模式从 OAM 复用通道中分离出来,通常可以对 OAM 模式施加相反阶数 $-\ell$ 的螺旋相位,通过解调将 OAM 模式转换为类高斯模式,并经过空间滤波得到所需要的信号,常用的方法有 SPP 天线、UCA 天线、干涉测量、光学几何变换、光子集成器件等^[36, 60-66]。在 OAM 模式复用通信系统中,采用可扩展的多通道 OAM 模式复用解复用器,能够更加有效地进行 OAM 模式的生成、复用、解复用和检测。

4 涡旋电磁波无线通信

未来无线通信系统扩容的一种潜在手段是采用涡旋电磁波,OAM 模式有多种取值且彼此正交,这种正交性允许在同一通道内复用不同的 OAM 模式,以此增加通道容量和频谱效率,本章节重点介绍不同频段

涡旋电磁波在无线通信领域的应用。

4.1 微波涡旋电磁波通信

近年来,OAM 技术在无线电和微波领域显示了快速发展趋势^[33, 67-71]。2012 年,Tamburini 等^[67]通过实验验证展示了一种无线 OAM 微波通信技术,其采用两种不同的 OAM 微波进行复用通信,以此实现两个独立微波信道的同时传输。该技术原则上可以在给定的固定带宽内,不依赖于极化、多端口或是调制编码技术,实现多个信道的复用传输。实验结果显示,通过使用螺旋形的抛物面天线产生 OAM 微波,通过在 OAM 微波通道中应用复用技术,可以有效增加通信容量。实验中,即使在远场区域以及非相干非单色的波束中,空间相位的特征也得到了有效的保留。图 4 给出了该实验的实验场地及实验示意图。

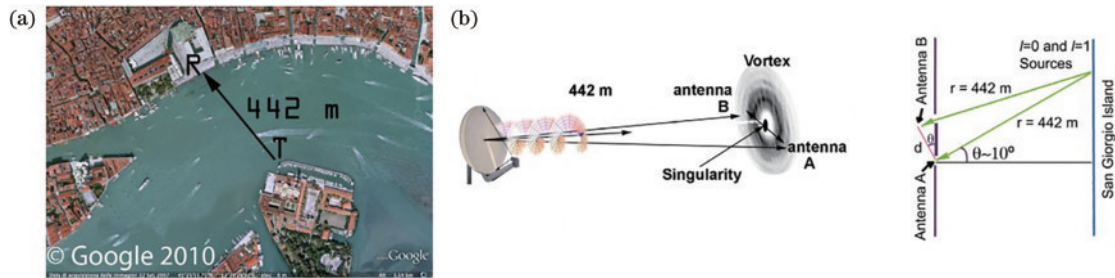


图 4 利用射频涡旋对同一频率上的多个通道(含 OAM 通道)进行复用^[67]。(a)实验场地;(b)实验示意图

Fig. 4 Multiplexing many channels (with OAM channel) on the same frequency through radio vorticity^[67]. (a) Experimental site; (b) experimental schematic diagram

2014 年,Yan 等^[33]通过实验展示了一种大容量的毫米波通信链路,使用 4 个独立的 OAM 波束和 2 个偏振实现了 32 Gbit/s 的传输速率和 16 (bit/s)/Hz 的频谱效率。所有 8 个 OAM 模式的比特误码率(BER)低于 3.8×10^{-3} 。此外,他们还演示了一个毫米波 OAM 模式解复用器,用于解复用 4 个 OAM 模式,其串扰小于 -12.5 dB,并展示了一个包含 2 个 OAM 模式和 2 个偏振的 8 Gbit/s 链路。图 5(a)展示了实验中使用的

的 OAM 模式产生与复用的实验装置概念图。图 5(b)展示了在单偏振和双偏振情况下,OAM 通道 $\ell = -1$ 中传输 1 Gbaud 正交相移键控(QPSK)信号接收到的星座图。图 5(c)展示了毫米波 OAM 模式复用通信的 BER 曲线。这项工作表明,OAM 模式多路复用可以显著增加无线通信系统的容量和频谱效率,为毫米波无线通信系统容量提升提供了一种新方法。

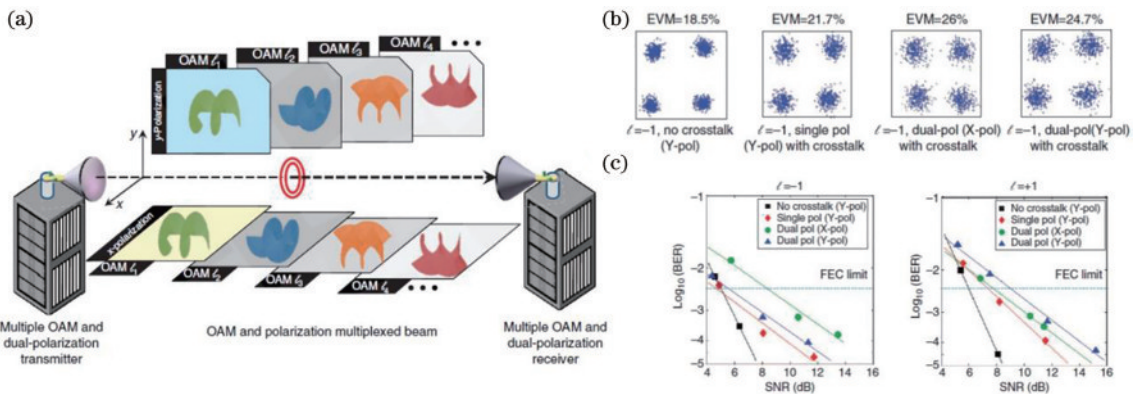


图 5 基于 OAM 复用的大容量毫米波通信^[33]。(a)概念图;(b) 1 Gbaud QPSK 信号接收星座图;(c)毫米波 OAM 模式测量 BER 曲线
Fig. 5 High-capacity millimeter-wave communications with OAM multiplexing^[33]. (a) Concept diagram; (b) received constellations of 1 Gbaud QPSK signals; (c) measured BER curves for millimeter-wave OAM modes

2014年,Fang等^[72]提出并实验验证了一种新型的大容量接入网络架构,该架构利用集成的W波段无线、FSO链路以及OAM复用技术,以支持未来对带宽和系统灵活性有额外需求的大容量W波段与FSO融合接入网络。该实验在0.6m的FSO链路和0.4m的100GHzW波段无线链路上使用10个OAM模式复用传输了20Gbaud的QPSK信号。图6(a)示意了集成

W波段无线和FSO链路以及OAM复用的接入网络架构。实验装置如图6(b)所示。图6(c)给出了BER与接收功率的关系,通过0.4m的W波段无线链路传输的QPSK信号的性能损失小于1dB。实验结果表明,该架构能够有效支持移动数据网络中对大容量和系统灵活性的需求。

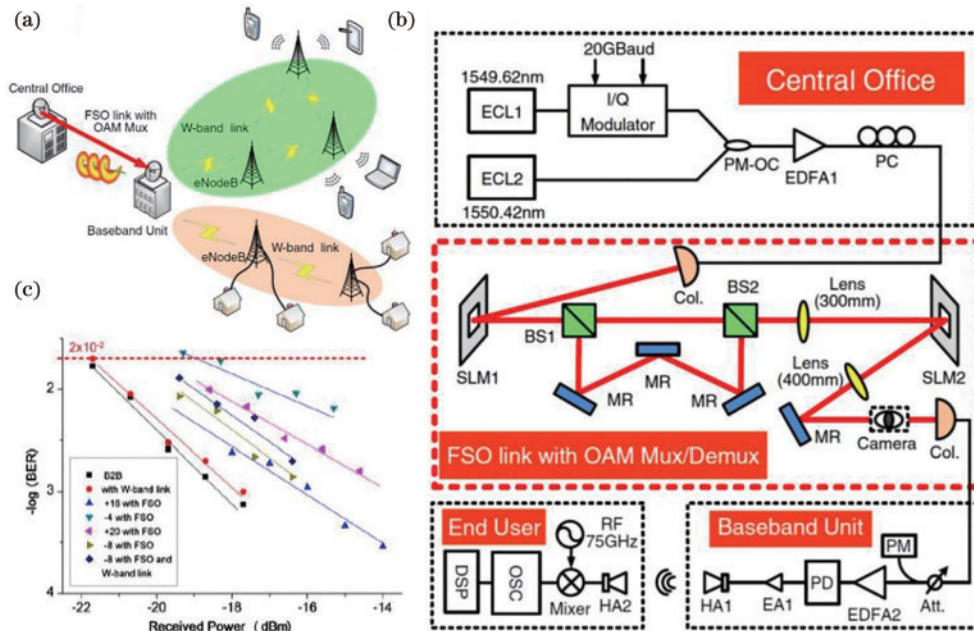


图6 使用集成W频段无线和自由空间光链路及OAM复用的大容量接入网络架构^[72]。(a)架构示意图;(b)实验装置;(c)BER性能
Fig. 6 High-capacity access network architecture using integrated W-band wireless and free-space optical links with OAM multiplexing^[72].

(a) Architecture diagram; (b) experimental setup; (c) BER performance

4.2 太赫兹涡旋电磁波通信

2022年,Zhou等^[69]利用结构化的太赫兹(THz)波束携带OAM进行复用,为大容量太赫兹通信提供了新途径。通过在0.3THz的载波频率上复用2个太赫兹OAM模式,实验展示了60Gbit/s的QPSK和24Gbit/s的16阶正交幅度调制(16QAM)数据传输,BER低于 3.8×10^{-3} 。此外,通过结合不同的复用方法,他们还成功展示了一个80Gbit/s的QPSK太赫兹通信链路,该链路通过在2个偏振、2个频率和2个OAM模式上复用8路数据来实现。图7(a)介绍了该方法利用OAM复用来增加数据容量和频谱效率。图7(b)给出了不同偏振、频率和OAM模式之间通道的归一化串扰测量结果。图7(c)展示了所有8路数据在不同信噪比(SNR)下的BER测试结果。这项工作不仅展示了在太赫兹波段应用OAM提高自由空间通信系统容量方面的潜力,还验证了不同复用方法的兼容性,为未来的大容量通信系统提供了有价值的参考。

4.3 中红外涡旋电磁波通信

中红外波段拥有多个透射窗口,这些窗口能够提供相对较低的大气衰减和波束失真^[73-74],在这些特定的波长范围内,大气对光波的吸收较小,从而允许信号

以更小的能量损耗进行远距离传输。此外,中红外波段的波束在穿越大气时的失真也相对较小^[75],这对于提高远距离通信的信号质量和稳定性至关重要。因此,中红外波段的这些特性使其成为高精度遥感、长距离通信以及某些特定军事应用的理想选择^[76-93]。

2017年,Gailele等^[76]提出了一种能够减小大气吸收衰减的光学链路。该实验演示了中红外波段携带OAM空间模式的产生和检测,利用携带OAM空间模式在方位角和径向的自由度来增加链路容量。如图8(a)所示,携带OAM的空间模式通过SLM生成,对激光束的空间相位和空间幅度进行复振幅调制,以生成拉盖尔-高斯(LG)模式。这些模式在空间中传播时具有正交性,可以采用模式分解来检测这些模式,实验结果如图8(b)所示。图8(c)展示了发送图像的数据传输演示,像素的不同灰度用不同的空间模式来编码,然后逐个像素进行编码传输,同时通过编码SLM的复用全息图检测,检测到的模式在傅里叶平面上进行空间分离,最终光强度信号通过相机记录以检测信息并恢复出发送的图像。该研究通过实验验证中红外波段携带OAM空间模式的产生与探测,并利用空间模式编码技术传输图像和SLM复用全息图进行检测,

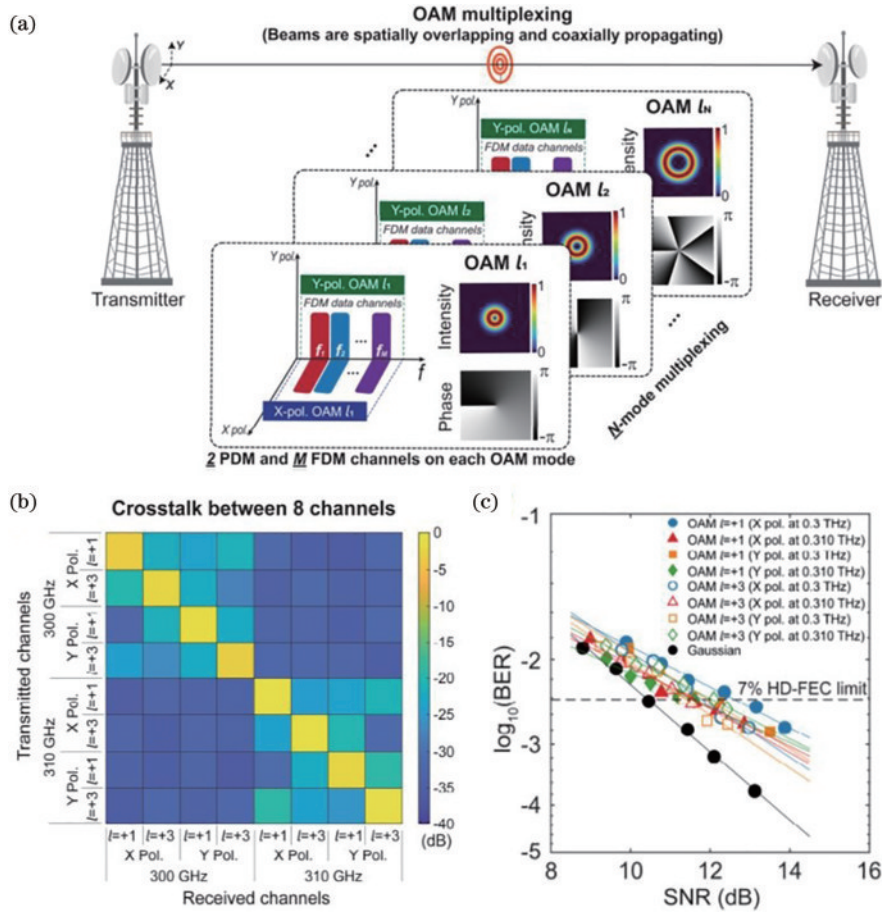


图 7 利用携带 OAM 结构化太赫兹波束的复用实现大容量通信^[69]。(a)原理框图；(b)归一化串扰；(c)在不同 SNR 下测量的所有 8 个复用通道的 BER

Fig. 7 Utilizing multiplexing of structured THz beams carrying OAM for high-capacity communications^[69]. (a) Schematic diagram; (b) measured normalized crosstalk; (c) measured BERs for all 8-multiplexed channels under different SNRs

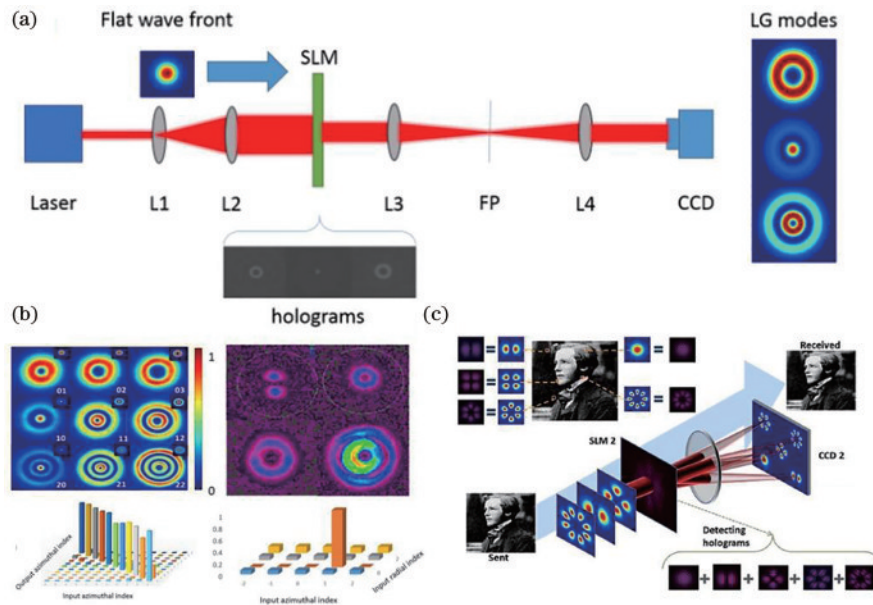


图 8 中红外 OAM 模式编解码图像传输^[76]。(a) LG 模式生成与检测的实验装置；(b) LG 模式生成光斑与分解结果；(c)使用光的空

Fig. 8 Mid-infrared OAM mode encoding and decoding for image transmission^[76]. (a) Experimental setup for the generation and detection of LG modes; (b) beam patterns of produced LG modes and their decomposition results; (c) information transmission using spatial modes of light

展现了利用携带 OAM 空间模式提高自由空间光通信链路容量的潜力。

2022 年, Zou 等^[77]展示了一种通过结合波分复用(WDM)和模分复用(MDM)技术在中红外波段显著提升 FSO 数据传输能力的方案。得益于中红外波段低大气吸收率及其在恶劣天气条件下良好的穿透能力, 中红外波段在实现大容量自由空间通信方面拥有巨大潜力。该实验在一个长度约 0.5 m 的中红外 FSO 链路上, 演示了使用单偏振, 3 个 3.4 μm 附近的波长(分别是 3.396 μm 、3.397 μm 和 3.398 μm) 的波分复用通信传输, 并在每个波长上进一步实现了模式复用, 最终达到了 300 Gbit/s 的总传输容量。通过将 C 波段信号转换至中红外波长, 使用现有的 C 波段收发转换器进行高速数据的生成和检测, 与以往在中红外波段

通信的实验演示相比, 该技术大幅提高了数据传输容量。此外, 该研究还探讨了利用非线性器件进行波长转换及其 BER 性能。图 9(a) 为基于中红外 WDM 和 OAM 的 MDM 自由空间光通信系统概念, 图 9(b) 给出了模式复用中 OAM₊₁ 和 OAM₊₃ 模式强度分布、解调类高斯光强度分布、干涉图以及 OAM 模式复用的归一化串扰矩阵。图 9(c) 为中红外 WDM 和 MDM 通信系统的实验装置, 图 9(d) 的左图和右图分别给出了传输 2 种 OAM 模式和单个 OAM 模式时的 BER 与接收信号光信噪比(OSNR) 关系, 以及同时发送 2 种 OAM 模式且每种模式包含 3 个波长时所有通道的 BER 与 OSNR 关系。该实验不仅为中红外 FSO 系统中实现大容量数据传输提供了一种新方法, 也为该领域未来研究和开发提供了思路。

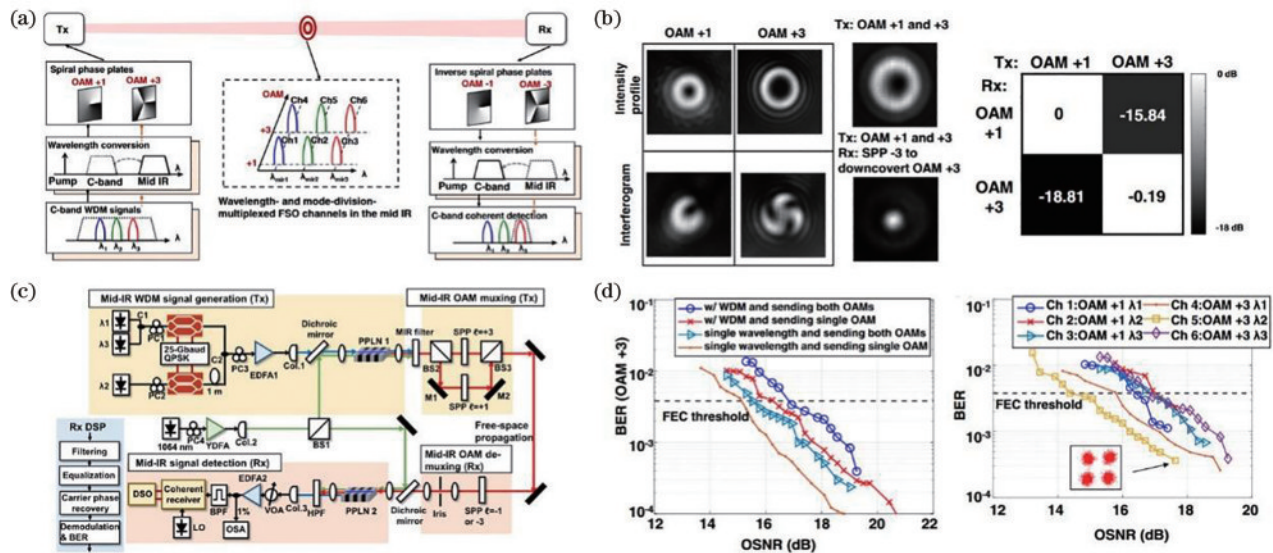


图 9 基于中红外波分复用和 OAM 模式复用的自由空间光通信系统^[77]。(a) 概念图; (b) 强度分布图和干涉图及归一化串扰矩阵;

(c) 实验装置图; (d) 单波长和多波长下不同空间模式测得的 BER 与 OSNR 关系

Fig. 9 Free-space optical communication systems based on mid-infrared WDM and OAM-based MDM^[77]. (a) Concept diagram; (b) intensity distribution, interference pattern, and normalized crosstalk matrix; (c) experimental setup; (d) measured BER vs OSNR for different spatial modes under single and multiple wavelengths

针对上述中红外波段 OAM 模式通信实验, 2023 年, Willner 等^[78]深入分析了中红外波段在 FSO 系统中的应用, 探讨了宽带波长转换、效率增强以及 FSO 通信系统中的调制与检测技术。该研究回顾了利用 WDM 和 MDM 技术在中红外波段实现的 FSO 系统, 讨论了中红外 FSO 通信链路的影响因素, 介绍了在中红外光束上进行信号调制与检测的多种方法。此外, 研究还探讨了中红外 WDM 以及 OAM 光束的产生和检测技术, 并评估了这些复用技术结合应用于中红外波段 FSO 系统的性能。不同中红外波长和正交 OAM 模式携带多路数据信息, 通过复用方式在自由空间传输, 如图 10(a) 所示。WDM 中红外信号首先在 C 波段产生, 随后转换至中红外波段, 而中红外高斯光束则通过螺旋相位板转换为 OAM 光束。利用中红外波段的低大

气吸收率和更宽的光谱窗口等特性, 如图 10(b) 所示, 可以有效减少大气引起的信号衰减, 从而提供更大的通信带宽。此外, 基于非线性波长转换技术, 可以在中红外波段实现宽谱的波长转换, 如图 10(c) 所示, 再结合 C 波段器件和现有中红外器件, 可以实现高速中红外波段 FSO。

4.4 近红外涡旋电磁波通信

位于近红外波段的 OAM 光束是目前研究最为广泛的一种, 已经被应用于各种领域^[94-107]。2012 年, Wang 等^[94]演示了通过使用 OAM 多路复用技术, 实现了 Tbit 级自由空间数据传输。实验中利用四个具有不同阶数的 OAM 光束, 每个 OAM 光束携带 42.8 × 4 Gbit/s 的 16-QAM 信号, 通过多路复用和解复用, 实现了 1.37 Tbit/s 的总传输速率和 25.6 (bit/s)/Hz 的频

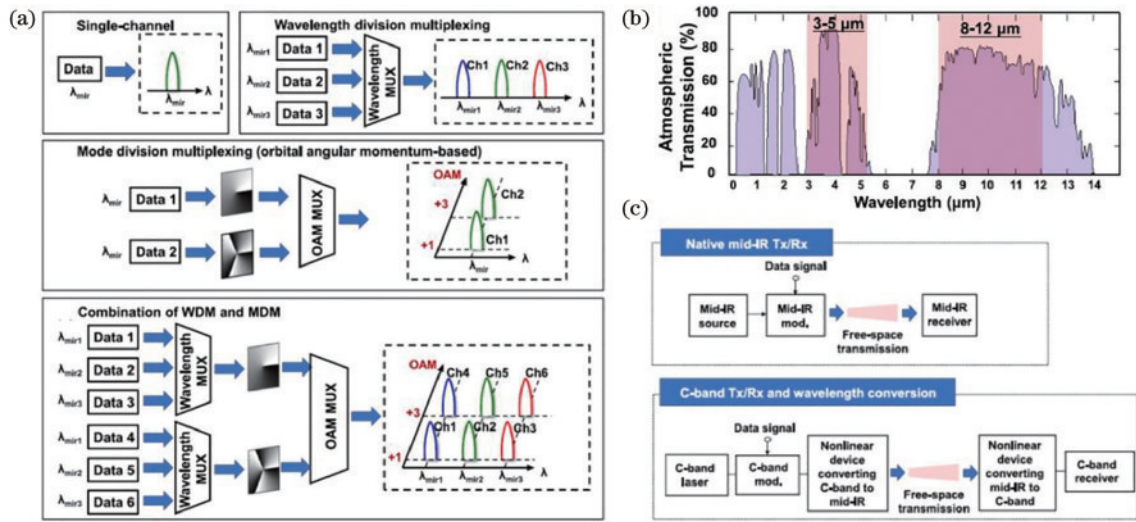


图 10 中红外 OAM 自由空间光通信^[78]。(a) 概念图; (b) 不同波长的大气传输特性 (中红外 2 个传输窗口); (c) 两种中红外光束的调制和检测方法
 Fig. 10 Mid-infrared OAM free-space optical communications^[78]. (a) Concept diagram; (b) atmospheric transmission characteristics of different wavelengths (2 transmission windows in the mid-infrared region); (c) modulation and detection methods for two types of mid-infrared beams

谱效率。此外,通过在空间域中基于两组不同尺寸同心环的 8 个偏振复用 OAM 光束,进一步将通信容量提升至 2.56 Tbit/s,并将频谱效率提升至 95.7 (bit/s)/Hz。该实验还报道了携带 100 Gbit/s 差分正交相移键控 (DQPSK) 信号的 OAM 光束之间进行数据交换的能力。该实验证明, OAM 作为一个额外的自由度可以有效增加自由空间通信容量。实验概念和原理如图 11(a) 所示,其中展示了携带数据信息的 OAM 光束的产生和检测,通过特定阶数的螺旋相位板 (如 $\ell = +4$) 将平面相位波前转换为螺旋相位波前,从而生成携带数据信息的 OAM 光束。相反地,使用相反阶数的螺旋相位板 (如 $\ell = -4$) 可以将携带数据信息的

OAM 光束恢复为具有平面相位波前的光束。图 11(b) 为 OAM 光束多路复用和解复用的概念图,通过使用不同阶数的螺旋相位板,将 4 个携带数据信息的高斯光束转换为 OAM 光束来进行多路复用,并结合偏振复用进一步增加容量和频谱效率,实现在同一波长上复用 8 路数据信息,从而为系统提供了 8 倍的数据容量和频谱效率。通过使用相反阶数的螺旋相位板来解调所需要的 OAM 光束,将其转换回具有平面相位波前的光束,并通过空间滤波从其他 OAM 光束中分离出来。图 12(a) 给出了实验中 4 个偏振复用 OAM 光束 ($OAM_{+4}, OAM_{+8}, OAM_{-8}, OAM_{-16}$) 的多路复用和解复用实验结果,实验中观察到 4 个 OAM 光束的强度分

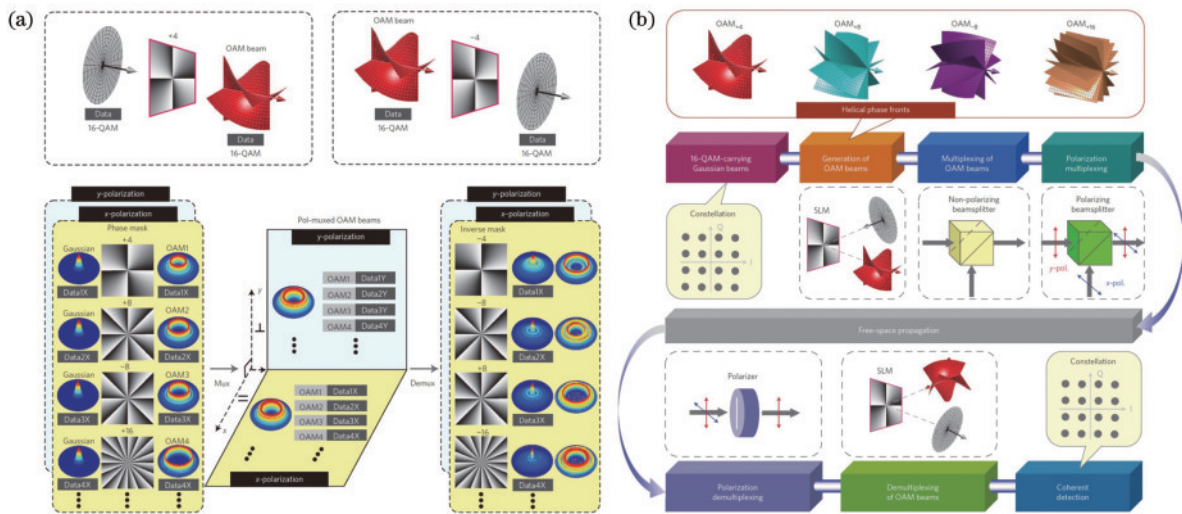


图 11 利用 OAM 复用的太比特自由空间数据传输^[94]。(a) 实验概念及原理图; (b) 实验装置框图
 Fig. 11 Terabit free-space data transmission employing OAM multiplexing^[94]. (a) Concept and principle; (b) block diagram of experimental setup

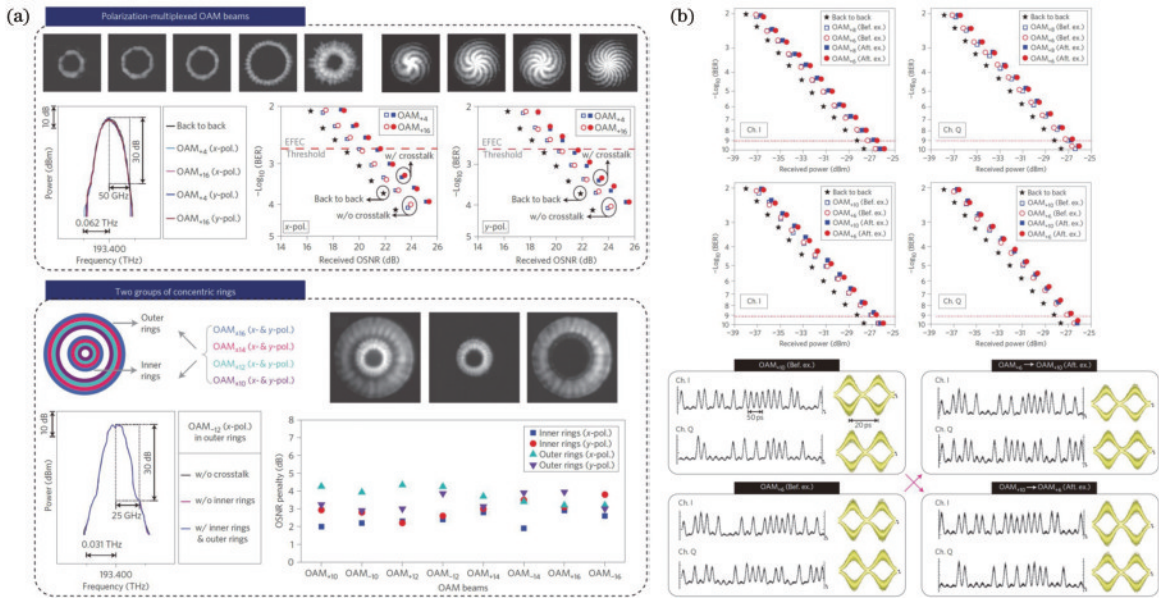


图 12 利用 OAM 复用的太比特自由空间数据传输实验结果^[94]。(a) 偏振复用 OAM 光束传输 16-QAM 信号; (b) 携带 100 Gbit/s DQPSK 信号 OAM 光束间的数据交换

Fig. 12 Experimental results for terabit free-space data transmission employing OAM multiplexing^[94]. (a) Transmission of 16-QAM signals over polarization multiplexed OAM beams; (b) data exchange between 100 Gbit/s DQPSK-carrying OAM beams

布呈现典型的甜甜圈形状,通过复用这些 OAM 光束,图中也给出了 4 个偏振复用 OAM 光束总的强度分布。同时,通过干涉图测量可以确定 4 个偏振复用 OAM 光束(OAM₊₄, OAM₊₈, OAM₋₈, OAM₊₁₆)的阶数。实验测试了使用 4 个偏振复用 OAM 光束传输 42.8 × 4 Gbit/s 的 16-QAM 信号时的频谱效率和总传输容量,以及不同偏振状态下的 BER 性能和 OSNR。此外,还展示了空间域中 OAM 光束多路复用和解复用的可扩展性,包括使用相同阶数不同光束尺寸的 OAM 模式复用,以及通过空间滤波实现同心环不同尺寸的 OAM 模式群解复用。图 12(b) 给出了 2 组携带 100 Gbit/s 的 DQPSK 信号的 OAM 光束(OAM₊₈ 和 OAM₊₆ 与 OAM₊₁₀ 和 OAM₊₆)进行数据交换的实验结果。测试

得到的 BER 曲线显示了在极低误码率(1 × 10⁻⁹)条件下的功率代价小于 2.1 dB 和 1.9 dB。此外,通过观察解调后的同相(Ch. I)和正交(Ch. Q)分量的时间域波形和平衡探测眼图,可以确认数据交换功能的实现,且数据交换串扰较低。该实验展示了通过偏振复用和 OAM 模式空间复用技术实现大容量和高效频谱效率的自由空间光通信的潜力。

2014 年, Wang 等^[95]进一步利用 N 维复用技术,在 368 个波长上偏振复用 26 个 OAM 模式并携带 54.139 Gbit/s OFDM-8QAM 信号,演示了一个具有 1.036 Pbit/s 的总传输容量和 112.6 (bit/s)/Hz 频谱效率的自由空间数据链路。图 13(a) 为实验装置图,其中发射端包含 368 个波长(C+L 波段)通道,均传输

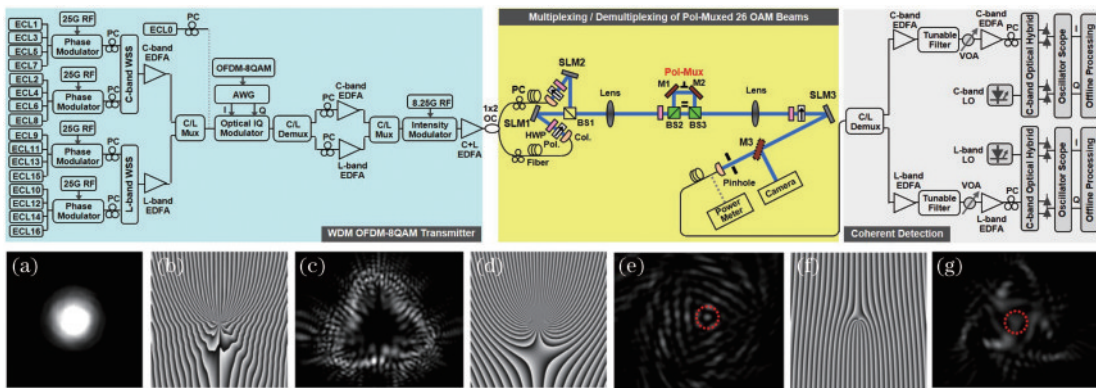


图 13 使用 368 个 WDM、偏振复用、26 个 OAM 模式传输 OFDM-8QAM 信号,具有 1.036 Pbit/s 传输容量和 112.6 (bit/s)/Hz 频谱效率的 N 维复用链路^[95]。(a)-(g) 测得的强度分布和加载在 SLMs 上的相位图

Fig. 13 N-dimensional multiplexing link with 1.036 Pbit/s transmission capacity and 112.6 (bit/s)/Hz spectral efficiency using OFDM-8QAM signals over 368 WDM polarization multiplexed 26 OAM modes^[95]. (a)-(g) Measured intensity profiles and phase patterns loaded onto SLMs

OFDM-8QAM 信号。信号光经过光纤分成两路,经过相对延时后,通过 2 个 SLM 分别产生相应 OAM 模式,这样就生成了携带不同数据信息的 2 组 OAM 模式。该实验通过改进的自适应加法算法和模式搜索优化算法生成了从单个高斯光束到多个 OAM 模式的相位图形,并加载在 SLM 上。图 13(b)给出了空间模式的强度分布和加载到 SLM 上的相位图。该实验首先通过测试所有 OAM 通道上的功率分布来检测生成的偏振复用 OAM 模式的质量,如图 14(a)所示,所有偏振复用

26 个 OAM 模式观察到的消光比大于 13.0 dB。图 14(b)给出了 C 波段和 L 波段中单波长 X 偏振和 Y 偏振 OAM 模式的 BER 曲线,观察到在 HD-FEC 阈值下 BER 为 1.5×10^{-2} 时,OSNR 代价小于 2 dB。图 14(c)给出了 OAM₋₆ 的 X 偏振和 OAM₊₄₂ 的 Y 偏振中所有 368 个波长通道(C+L 波段)上的 BER 和 Q 值。该实验清晰地展示了所有通道数据传输 BER 小于 1.5×10^{-2} ,从而验证了 N 维复用技术可以有效提高自由空间数据链路传输容量和频谱效率。

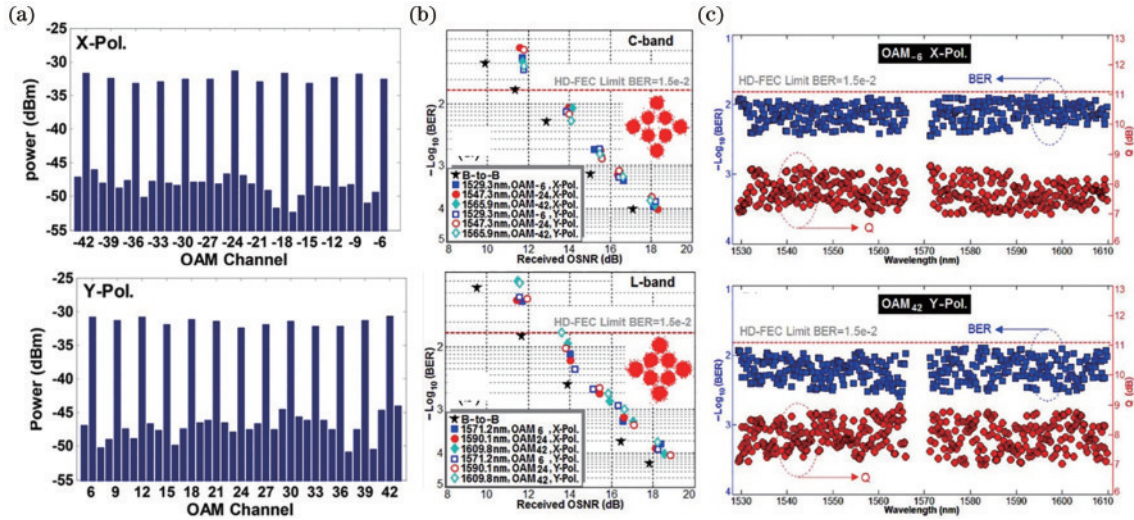


图 14 具有 1.036 Pbit/s 传输容量和 112.6 (bit/s)/Hz 频谱效率的 N 维复用链路实验结果^[95]。(a)测量的功率分布;(b)单波长 BER 测试结果;(c) 368 个 WDM 通道中不同 OAM 模式和偏振态的 BER 和 Q 值

Fig. 14 Experimental results for N-dimensional multiplexing link with 1.036 Pbit/s transmission capacity and 112.6 (bit/s)/Hz spectral efficiency^[95]. (a) Measured power distribution; (b) BER performance for single wavelength; (c) BER and Q values for various OAM modes and polarization states over all 368 WDM channels

2015 年, Wang 等^[96]通过采用 N 维复用和调制技术,在多达 52 个偏振复用 OAM 模式(共 104 个通道)上,每路传输 5.8 Gbaud Nyquist 32-QAM 信号,实现了一个频谱效率高达 435 (bit/s)/Hz 的自由空间数据链路,在所有通道上实现了低于 3.8×10^{-3} (SD-FEC 阈值)的 BER。图 15(a)示意了该实验 N 维复用和调制的概念,同时使用多个维度,即空间维度上 OAM 复用(ODM)、偏振维度上偏振复用(PDM)和振幅、相位、时间维度上 Nyquist m-QAM 高阶信号。通过在多个偏振复用 OAM 模式上传输 Nyquist m-QAM 信号,频谱效率得到了极大的提高。图 15(b)示意了从携带数据的高斯光束转换为携带数据的 OAM 模式,以及反向转换为携带数据的类高斯光束的原理。图 15(c)为实验装置,图中说明了如何生成 5.8 Gbaud Nyquist 32-QAM 信号,在 3 个波长上通过使用 4 个 SLM 加载 4 种不同的相位图形,从单个高斯光束生成多个 OAM 模式。如图 16 所示,实验中所有 104 个通道均实现了低于 3.8×10^{-3} 的 BER,表现出该系统在所有 OAM 模式中均具有良好的传输性能。

2023 年, Zhao 等^[108]通过实验演示了一种利用

OAM 复用传输 16-QAM 信号的 260 m 安全光学传输链路,对 OAM 光束漂移、功率波动、通道串扰、误码率性能和链路安全性进行了研究,此外还研究了 260 m 范围内 1 对 9 广播通信的性能。考虑到接收端功率可能受到大气湍流波动的影响,该实验系统引入了一种反馈机制来稳定接收功率。实验结果显示,链路平均模式串扰低于 -20 dB,当 OAM 模式光场被遮挡 1/4 时,解复用性能降低到约 -10 dB,说明了 260 m OAM 传输链路具有高安全性。图 17(a)上半部分展示了使用 2 个不同的 OAM 模式进行复用的安全光学互连链路概念和原理。图 17(a)下半部分展示了实验装置图。OAM 多路复用和广播实验互连链路设置在 WNLO-E 栋到 WNLO-H 栋之间传输,发射器和接收器均位于 WNLO-E 栋,反射镜位于链路的末端,经过反射后的传输距离为 260 m。图 17(b)展示了 260 m 安全 OAM 复用和广播链路的实验装置,10 Gbaud 的 16-QAM (40 Gbit/s)信号被分为两路,分别在 2 个 OAM 模式中传输,其中一路信号通过 2 km 单模光纤(SMF)延时,用于将 2 路数据信息去相关。经过掺铒光纤放大器(EDFA)、可调衰减器(VOA)和偏振控制器(PC)进行

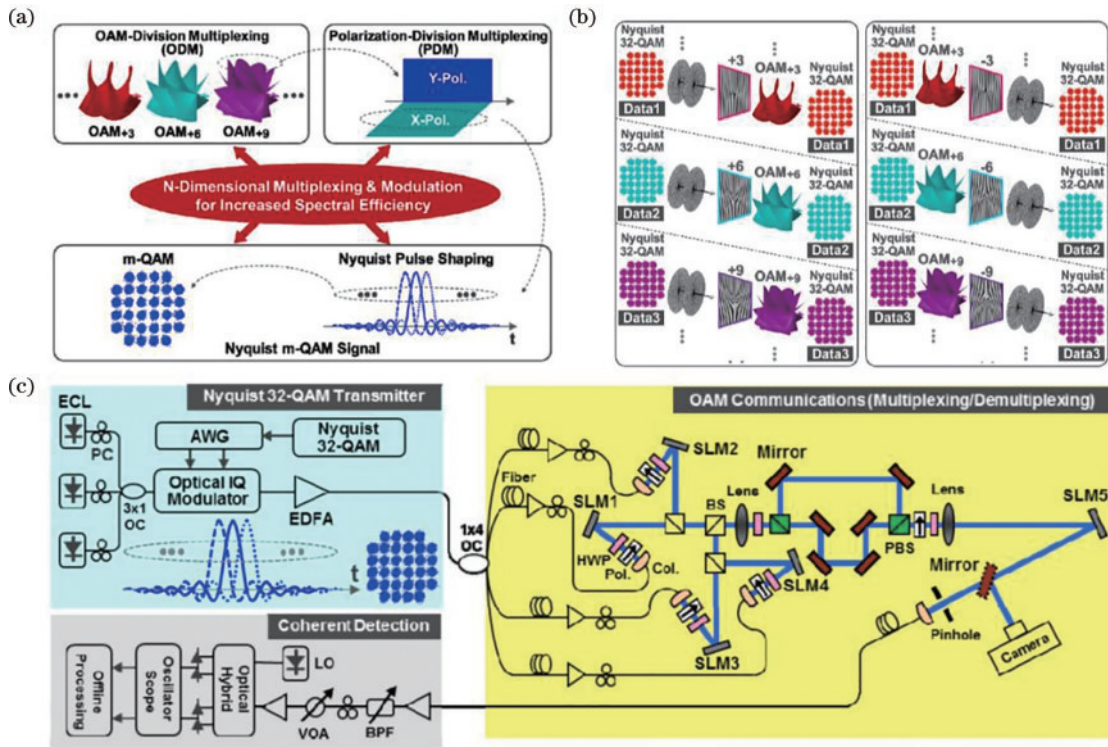


图 15 具有超高频谱效率的 N 维复用和调制链路^[96]。(a) 概念图; (b) 高斯光束向 OAM 光束转换及反向转换为类高斯光束; (c) 实验装置
Fig. 15 N -dimensional multiplexing and modulation link with ultra-high spectral efficiency^[96]. (a) Conceptual diagram; (b) conversion from Gaussian beams to OAM beams and back-conversion to Gaussian-like beams; (c) experimental setup

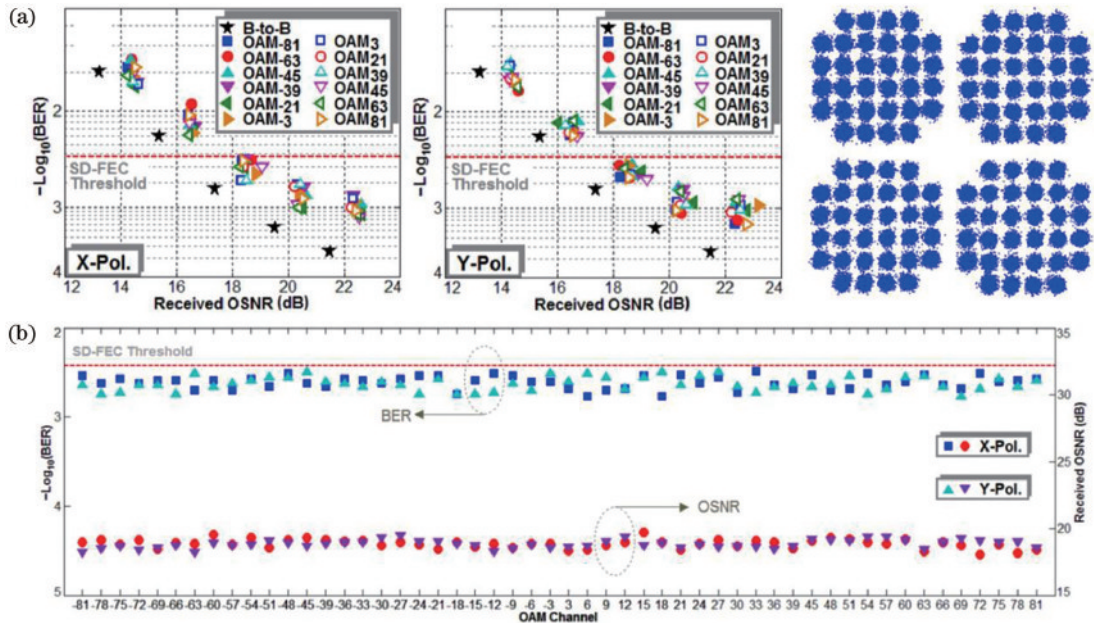


图 16 具有超高频谱效率的 N 维复用和调制链路实验结果^[96]。(a) BER 性能和星座图; (b) 所有 104 个通道测得的 BER
Fig. 16 Experimental results for N -dimensional multiplexing and modulation link with ultra-high spectral efficiency^[96]. (a) BER performance and constellations; (b) measured BER of all 104 channels

适当的功率和偏振控制, 2 路光路中的两个 SLM 将光束调制为 $OAM_{\pm 3}$, 并通过分束器合束, He-Ne 激光器主要用于系统对准。OAM 接收端收到一个光斑直径约 4 cm 的光束, 通过在 SLM-3 上加载相反的螺旋相位来解调 OAM 模式, 并经过放大和准直耦合进 SMF, 再采用离线数字信号处理 (DSP) 进行检测。图 18(a) 给

出了通过 OAM 复用实现的安全光学互连链路的 BER 性能和安全性分析, 通过在 SLM-3 上分别加载其中 1/16、1/8、1/4 被遮挡的螺旋相位图形, 展示了加载 $\ell = +3$ 和 $\ell = -3$ 相反螺旋相位解调的 BER 性能, 以此验证窃听者窃听到部分 OAM 光束时的系统安全性。实验结果显示, 当窃听到小部分被遮挡 OAM 光束 (1/16

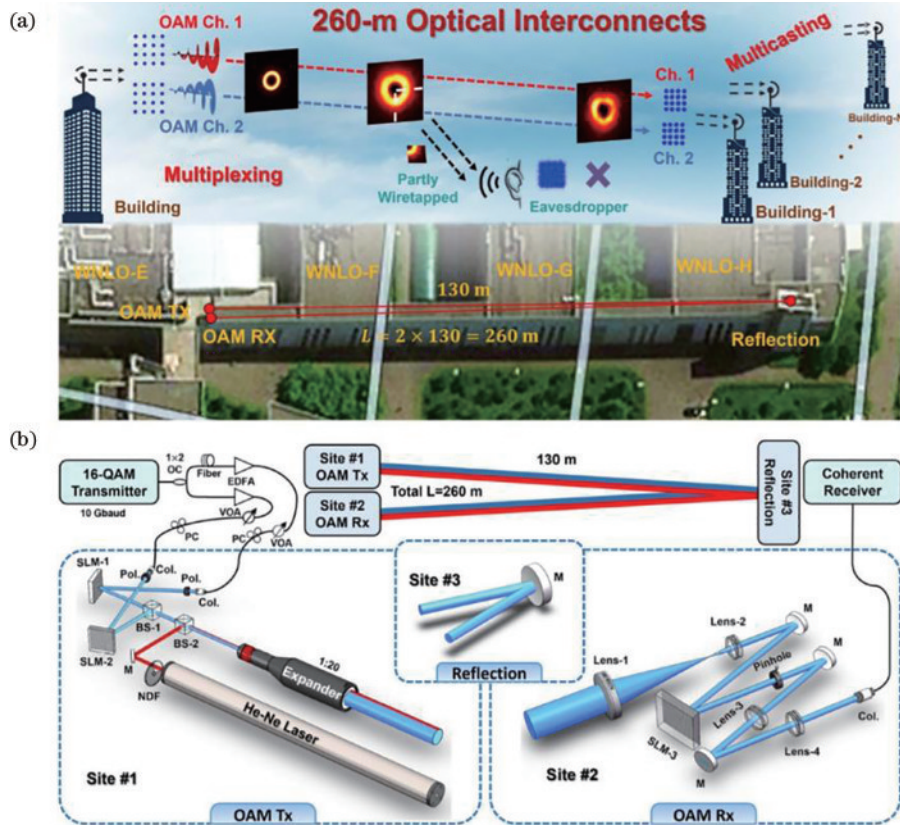


图 17 使用 OAM 光束复用和广播实现安全光互连^[108]。(a)概念和原理图;(b)实验装置

Fig. 17 Secure optical interconnects using OAM beams multiplexing and multicasting^[108]. (a) Concept and principle; (b) experimental setup

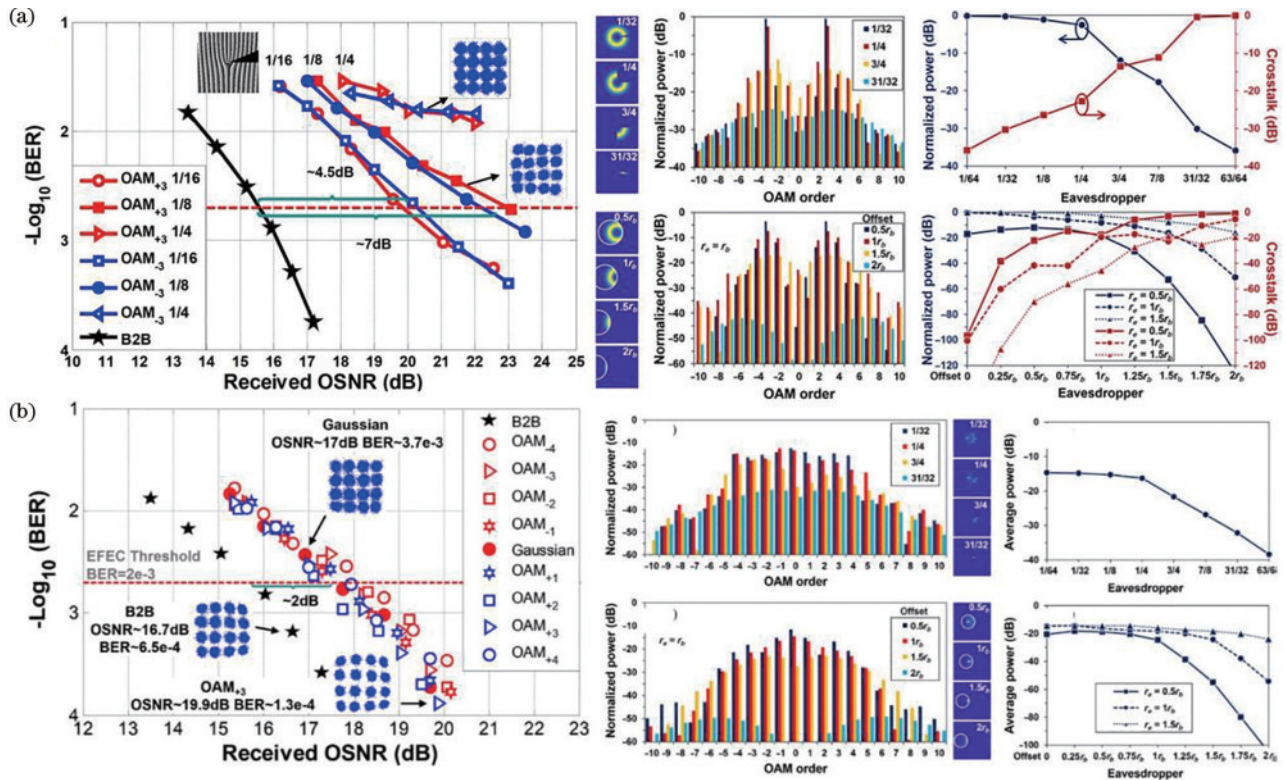


图 18 使用 OAM 光束复用和广播实现安全光互连实验结果^[108]。(a)复用通信 BER 性能;(b)广播通信 BER 性能

Fig. 18 Experimental results for secure optical interconnects using OAM beams multiplexing and multicasting^[108]. (a) BER performance for multiplexing communications; (b) BER performance for multicasting communications

遮挡)时,BER曲线仍低于EFEC阈值(2×10^{-3}),但与加载完整的螺旋相位相比,OSNR代价增加约4.5 dB,这主要是由于遮挡部分OAM光束时,OAM通道间串扰增加,从而提高了OAM复用传输链路的安全性。随着OAM光束的遮挡部分增加,BER性能迅速劣化,在1/8的螺旋相位被遮挡时,OSNR代价增加到约7 dB,而当遮挡1/4时,该实验链路的BER性能无法达到EFEC阈值。此外,图18(a)还给出了不同光束偏移情况下,使用加载1/4遮挡螺旋相位的SLM解调BER性能。随着光束偏移量的增加,系统的误码率显著升高,当偏移量增至 ± 2.5 cm和 ± 5 cm时,所需的接收光功率显著增加。图18(b)给出了加入反馈功率控制功能的1对9广播通信链路的BER性能,所有9个模式(含高斯光束)BER曲线性能均达到EFEC阈值,平均OSNR代价约为2 dB。此外,图18(b)给出了窃听者窃听9个广播通道($\ell = 0, \pm 1, \pm 2, \pm 3, \pm 4$)的OAM模式谱,随着窃听到的光场面积增加,所接收到的OAM模式功率逐渐降低,该实验还模拟了窃听者窃听到不同光场大小时,OAM模式广播的平均功率,随着窃听光场面积的减少,所需的平均功率从-14.66 dB

减少到-38.44 dB。实验还评估了广播互连系统在一般情况下的安全性,结果表明,随着相对正确接收区域位置的偏移,9个广播OAM模式接收平均功率迅速下降。因此当窃听者窃听到较大OAM模式光场时,系统的通信性能急剧下降,从而提高了系统的安全性,窃听者难以准确恢复原始信息。该实验不仅证明了OAM复用技术在提高传输容量和频谱效率方面的潜力,还验证了其在安全光学互连和多播系统中的应用价值。

4.5 可见光涡旋电磁波通信

OAM通信在可见光波段的研究近年来也取得了显著进展,这些实验验证展示了利用可见光波段进行OAM通信的可行性^[109-117],针对水下可见光轨道角动量通信也进行过详细综述^[118]。2014年,Krenn等^[109]在维也纳城市内进行了3 km强湍流下可见光OAM模式叠加态经典信息传输实验,并且利用神经网络识别OAM模式叠加态。该实验所设计的人工神经网络能够区分16种不同OAM模式叠加态,实现了对模式强度分布的直接观察解码,并以大约1%的平均错误率解码灰度图像。图19(a)为在维也纳进行3 km自由

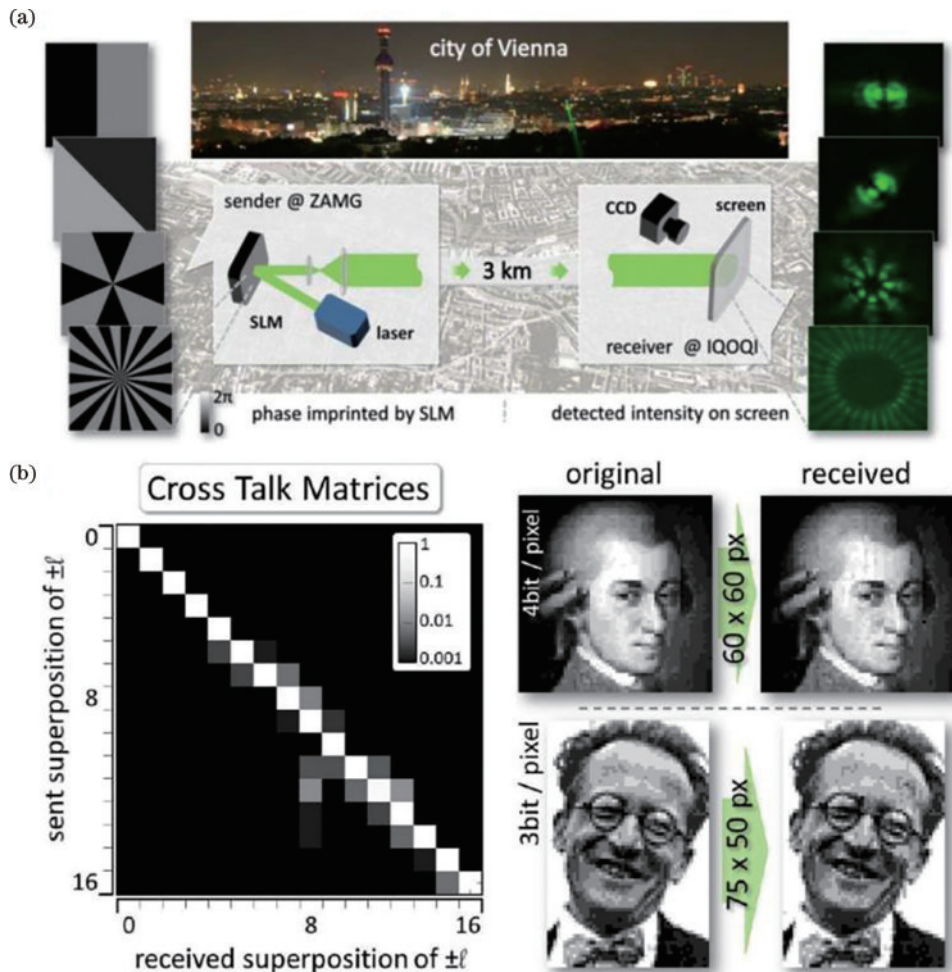


图19 穿过大气湍流的涡旋光通信^[109]。(a)实验装置;(b)灰度图像传输

Fig. 19 Vortex light communications through turbulent air^[109]. (a) Experimental setup; (b) transmission of greyscale images

空间 OAM 模式叠加态传输的实验装置,发射端使用 SLM 调制 532 nm 激光产生 OAM 模式叠加态,经过自由空间传输后,在接收端,通过相机观察传输的模式。图 19(b)给出了不同 OAM 模式叠加态的串扰矩阵,不同 OAM 模式叠加态之间具有较低的串扰。此外,利用 OAM 模式叠加态实验还传输了两幅灰度图像,平均错误率约为 1%。该实验为使用 OAM 模式进行长距离通信提供了可能。

2019 年, Cai 等^[110]提出并展示了使用 OAM 模式和快速自动对准系统的水下无线可见光链路。该实验演示了 2 m 水下 OAM 模式复用链路,模式串扰小于 -9 dB。实验装置采用自动对准系统,能够克服信号波动,提供稳定的输出,从而实现高质量的水下 OAM 模式复用通信。图 20(a)给出了在发射端和接收端以

及解调的 OAM₊₃和 OAM₋₃模式的强度分布。在发射端,调制后的 OAM 模式呈现完美的环状分布。通过 2 m 水下传播后,接收的 OAM 模式畸变很小,仍然具有高质量的强度分布。当在 SLM 上加载相反螺旋相位时,分布在光束中心的区域出现类似高斯分布的亮斑,说明 OAM 模式解调效果良好。图 20(b)给出了快速自动对准系统对光束位置稳定性的影响。在没有快速自动对准系统的情况下, OAM 光束中心的最大位置变化约为 0.7 mm,引入快速自动对准系统后,最大位置变化减少到约 0.2 mm,表明接收光强在快速自动对准系统的帮助下更为稳定。此外,图 20(b)还给出了 2 m 水下传播后,携带 QPSK 信号的 OAM 模式复用的 BER 性能,经过快速自动对准,通信链路更为稳定。该实验显示了水下可见光波段 OAM 模式复用通信的可行性。

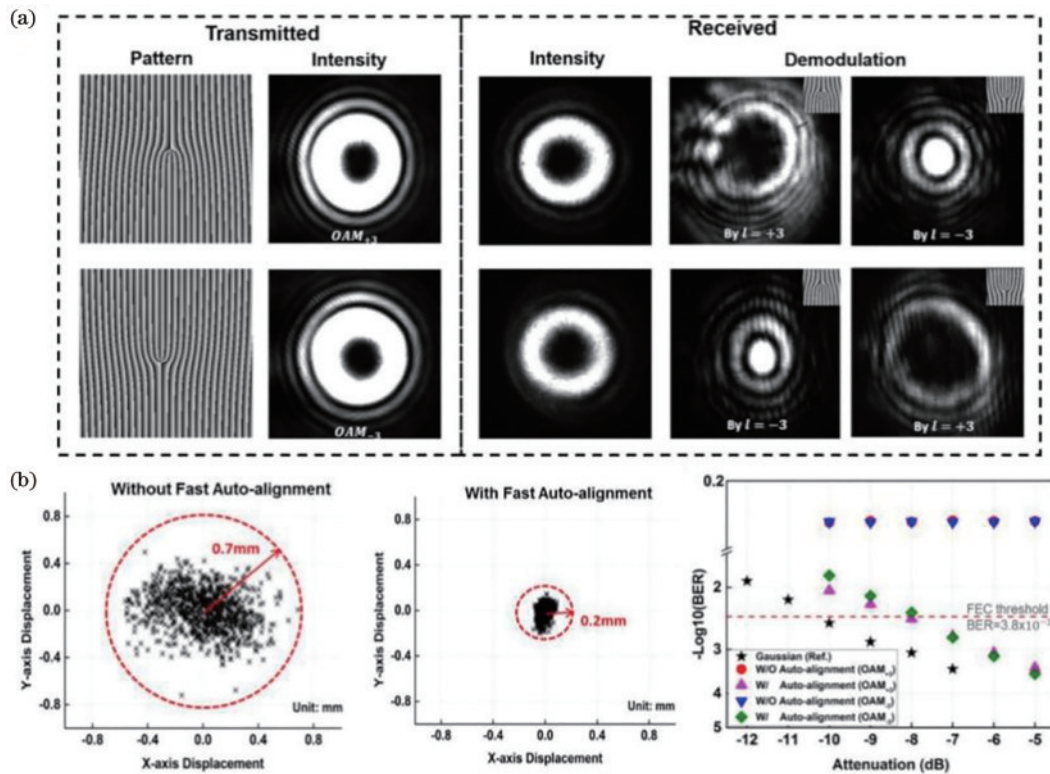


图 20 采用 OAM 模式和快速自动对准系统的水下无线光通信链路的实验演示^[110]。(a)测得的强度分布;(b)快速自动对准系统对光束位置稳定性和系统 BER 性能的影响

Fig. 20 Experimental demonstration of an underwater wireless optical communication link employing OAM modes and fast auto-alignment system^[110]. (a) Measured intensity profiles; (b) influence of fast auto-alignment system on beam position stability and system BER performance

5 卫星涡旋激光通信

在卫星无线光通信系统中,基于 OAM 模式的自由空间光通信尚未被广泛研究和应用,目前研究工作主要还局限在理论研究^[119-120]和数值分析阶段^[121]。2011 年, Djordjevic^[119]提出了一种既能满足未来星际通信对高带宽的需求,又能保持系统成本和功耗在合理水平的通信系统。如图 21(a)所示,利用 OAM 模式本征态之间的相互正交性,实现 N 维数据信号传输。

通过结合 OAM 模式和其他自由度,利用 OAM 模式产生和复用技术,有望有效解决未来深空及近地光通信的高带宽需求。图 21(b)和(c)分别给出了这一通信系统的发射机和接收机的架构设计。OAM 技术在深空通信中面临的主要挑战是维持宇宙飞船与地面站点之间连接的稳定性,因为大气湍流可能会破坏 OAM 模式间的正交性。通过结合使用低密度奇偶校验(LDPC)码的 OAM 调制方案,即使在强大气湍流条件下也能保持较高的通信稳定性。相比于传统的脉冲位

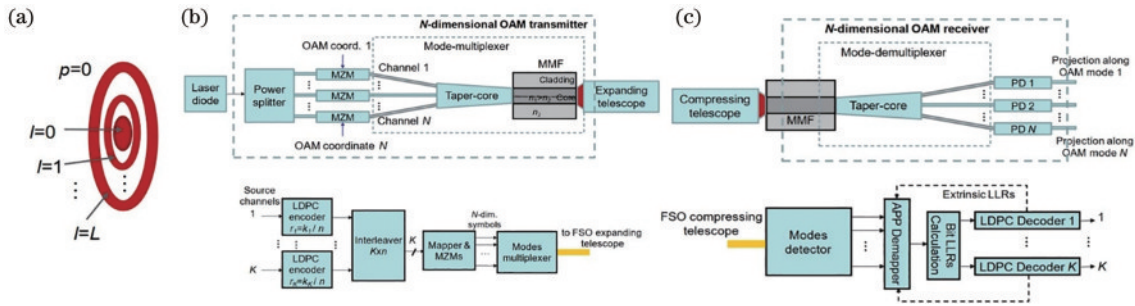


图 21 多维 LDPC 编码 OAM 调制方案^[119]。(a) OAM 模式在 $p=0$ 时的空间强度分布；(b) N 维 OAM 发射机架构；(c) N 维 OAM 接收机架构

Fig. 21 Multi-dimensional LDPC-coded OAM modulation scheme^[119]. (a) Spatial intensity distributions for OAM modes with $p=0$; (b) N -dimensional OAM transmitter architecture; (c) N -dimensional OAM receiver architecture

置调制 (PPM), 这一方案在频谱效率上的提升可以达到 $N^2/\log_2 N$ 倍, 这为未来星际通信提供了一种潜在解决方案。

2017 年, Djordjevic^[122] 提出了一种基于 OAM 模式的混合 FSO-THz 多维编码调制方案, 旨在同时解决光学、无线网络和卫星通信间的容量限制和物理层安全问题。通过在 FSO 系统和 THz 子系统中利用 OAM 模式, 大大提高频谱效率和物理层安全性。FSO 链路常常受大气湍流、散射效应和雾天低可见性

的影响, 而 THz 技术相对受影响较小且带宽与光波系统相当, 通过这种互补性, 混合 FSO-THz 技术能显著提高 FSO 和无线通信系统的频谱效率和物理层安全性。图 22(a) 给出了提出的混合 FSO-THz 的物理层安全方案。图 22(b) 给出了混合 FSO-THz、毫米波、射频网络的示例。图 22(c) 展示了 512 进制 6D 混合 FSO-THz 的 LDPC 编码调制的 BER 性能, 通过采用 512 进制 6D 数据信号, 结合 3 个 THz 波、3 个 OAM 模式以及 2 个偏振态, 即使在较少 THz 和 OAM 模式通道的情况下, 也能实现 900 Gbit/s 的数据速率。

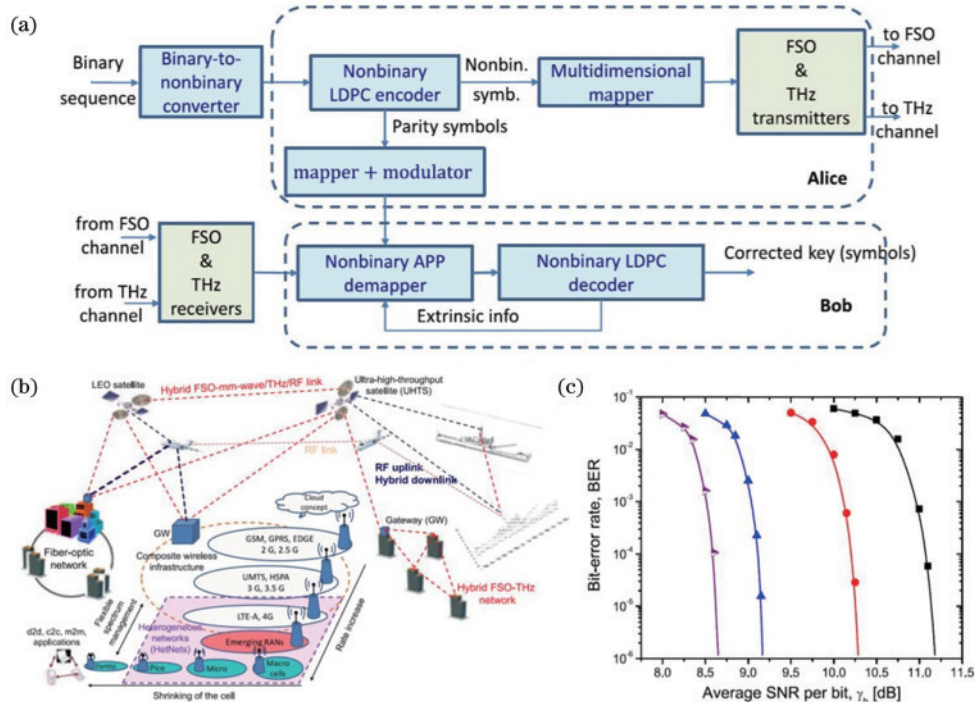


图 22 基于 OAM 混合自由空间光学太赫兹多维编码调制和物理层安全^[122]。(a) 混合 FSO-THz 物理层加密方案；(b) 混合网络示例；(c) BER 性能

Fig. 22 OAM-based hybrid FSO-THz multi-dimensional encoding modulation and physical-layer security^[122]. (a) Hybrid FSO-THz physical-layer security scheme; (b) example of hybrid networks; (c) BER performance

2019 年, Wang 等^[123] 通过蒙特卡罗方法模拟验证了在卫星到地面的量子通信中使用 OAM 的可行性。尽管大气湍流对 OAM 检测有不利影响, 但通过将地

面站放置在更高海拔和选择合适的波长, 以及采用先进的实时自适应光学技术, 可以减轻这些效应影响, 从而实现更高质量的光通信。图 23(a) 介绍了卫星到地

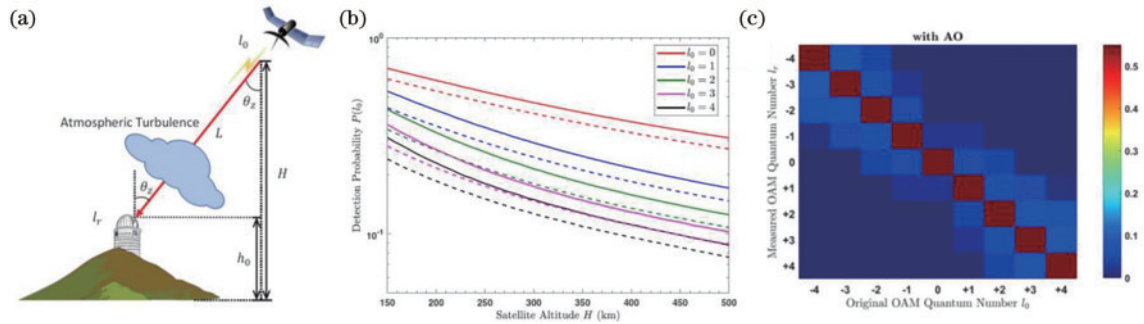


图 23 检测星地量子通信中光的轨道角动量^[123]。(a)系统设置;(b)探测概率;(c)使用自适应光学的串扰矩阵

Fig. 23 Detecting OAM of light in satellite-to-ground quantum communications^[123]. (a) System settings; (b) detection probabilities; (c) crosstalk matrix with adaptive optics

量子通信系统中,卫星通过大气向地面站发送具有量子数 ℓ_0 的 OAM 本征态的场景。图 23(b) 比较了在不同光波长下的 OAM 探测概率。图 23(c) 给出了在采用自适应光学技术情况下的系统串扰矩阵,采用自适应光学技术显著降低了系统的串扰,从而提高了 OAM 态的检测精度。此外,研究还探讨了在特定参数下使用 OAM 进行卫星到地面量子通信的可行性,为未来太空 OAM 系统的实现提供了一个潜在的解决方案。

2020 年, Wang 等^[121] 探索了利用光的 OAM 态实现卫星到地球量子密钥分发(QKD)的可能性。一般来说,由于 OAM 态的易受损特性,普遍认为大气湍流会使得在卫星到地球的通信链路中应用 OAM-QKD

遥不可及。然而,通过对预期的大气湍流条件进行详细的模拟,发现在一定的系统配置下,特别是在后选择状态下利用量子通道信息时,可以实现 OAM-QKD。通过使用经典纠缠光束作为量子通道的探针,并选择合适的发射和接收口径大小,可以在海平面高度的地面站实现非零的 QKD 传输速率。若未使用经典光探针,则 OAM-QKD 的应用将限于具有较大接收口径的高海拔地面站。该研究对卫星 OAM-QKD 的性能进行了定量评估,在安全通信领域特定条件下,有效利用了 OAM 的更高维度。图 24(a) 示意了湍流条件下的星地 OAM-QKD 系统模型,图 24(b) 给出了卫星到地球大气通道的多层复杂环境建模,图 24(c) 为星对地 OAM-QKD 系统示意图。

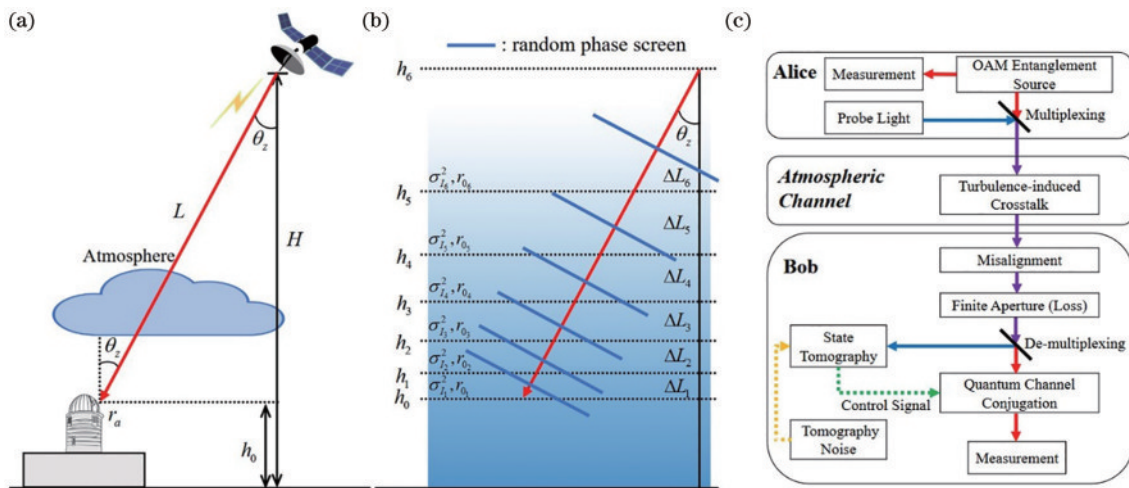


图 24 复杂星地环境 OAM 通信分析^[121]。(a)星对地 OAM-QKD 系统模型;(b)卫星到地球大气通道的建模;(c)星对地 OAM-QKD 系统示意图

Fig. 24 Analysis of OAM communication in complex satellite-to-earth environment^[121]. (a) Satellite-to-earth OAM-QKD system model; (b) modeling of the atmospheric channel from satellite to earth; (c) schematic diagram of the satellite-to-earth OAM-QKD system

2023 年, Sachdeva 等^[120] 提出使用偏振复用 256-QAM(PDM-256-QAM)结合光学 OAM 技术实现超大容量光学卫星通信系统。该研究设计了一个具有 4.8 Tbit/s 传输能力的轨道角动量-光学卫星通信(OAM-OSC)系统,并对该系统在不同输入参数条件

下的表现进行了深入分析,包括不同的 OSC 链路长度、指向误差和接收望远镜的天线直径,此外,还对不同 OAM 光束的 BER、SNR 和误差向量幅度(EVM)性能进行了研究。进一步,研究探讨了 DSP 技术在基于 OAM 的 OSC 系统中对性能的具体影响。研究结果显

示 DSP 在优化系统性能方面起到了关键作用,特别是在补偿非线性效应、色散以及相位误差等方面。图 25(a)示意了光学卫星通信链路的一般架构,图 25(b)详细展

示了基于 320 Gbit/s \times 5 个波长 \times 3 个 OAM 模式的光学卫星通信系统配置。OAM-OSC 系统展现了未来整合更多 OAM 光束以增强系统可扩展性的潜力。

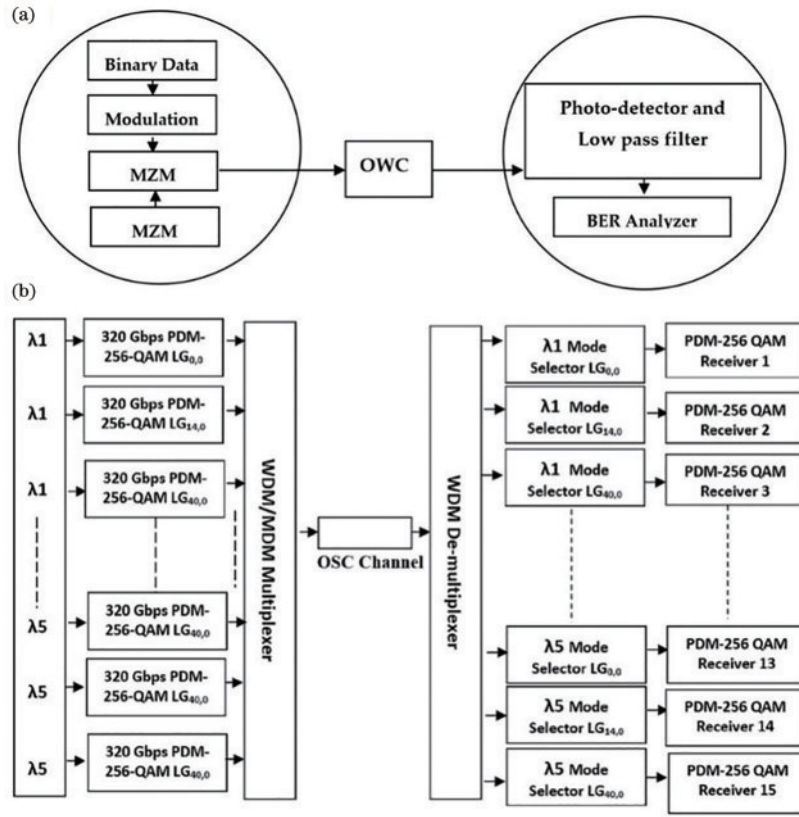


图 25 利用 OAM 光束实现超大容量光学卫星通信系统^[120]。(a)光学卫星通信链路的一般架构;(b)光学卫星通信系统的系统装置
Fig. 25 Ultra-high capacity optical satellite communication system using OAM beams^[120]. (a) General architecture of an optical satellite communication link; (b) system configuration of the optical satellite communication system

6 拓展结构化电磁波通信

除了上述通过直接叠加螺旋相位因子实现的 OAM 模式之外,近年来,其他一些拓展结构光形式也已被应用于自由空间光通信技术中^[124-131]。2015 年, Du 等^[124]提出并实验演示了利用 Bessel 光束进行 12 m 距离抵抗障碍物的多进制符号编解码自由空间光通信系统。实验结果显示,使用不同阶数的 Bessel 光束进行 16 进制和 32 进制编解码时,当光传播路径中放置障碍物时,16 进制编解码传输 500 个符号数据的 BER 仍为 0。此外,实验还探讨了有无障碍物对编解码结果的影响,验证了 Bessel 光束在遭遇障碍物时具有自恢复的特性。图 26(a)示意了使用 Bessel 光束在自由空间光通信系统中进行多进制符号编解码的概念和原理。在发射端,每个多进制数字对应一个具有特定阶数的 Bessel 光束,例如,0 代表 l_i ,1 代表 l_{i+1} ,2 代表 l_{i+2} ,以此类推。编码后,数据序列转换为时变的 Bessel 光束序列,在自由空间中发送至接收端。在接收端,通过加载相反阶数的相位板来检测 Bessel 光束序列。图 26(b)给出了对 32 进制数据 14 在有障碍物

和有障碍物但有所偏移的情况下进行解码后的横向强度分布测量结果。图 26(c)测试了 16 进制和 32 进制编解码时的 BER,并分别在无障碍物、障碍物偏移传播路径和障碍物遮挡传播路径的情况下进行了对比,其中 16 进制编解码的性能几乎不受障碍物的影响,对于 32 进制编解码,其 BER 性能表现出一定程度的下降。实验证明了即使在存在障碍物的情况下,通过利用 Bessel 光束的无衍射特性和自恢复能力,也能在自由空间光通信中实现高维结构光的编解码。

2015 年,Zhao 等^[125]提出并实验演示了一种基于高阶矢量光束编解码的可见光通信链路。使用 SLM 生成了 16 种矢量光束,代表 16 进制数字。实验中,传输了一串包含 10000 个 16 进制数字的随机高阶数序列和一幅 64 pixel \times 64 pixel 的灰度“Lena”图像,包含 8192 个 16 进制数据,实验实现了所有接收到的 16 进制数据无误码,体现了使用高阶矢量光束编解码链路优越的通信性能。图 27(a)示意了矢量光束的产生、传输、检测及编解码通信过程。图 27(b)给出了加载到 SLM 上用于生成四种不同矢量光束(径向、角向、 $P=2, \varphi_0=0$ 和 $P=3, \varphi_0=0$)的相位图形,以及通过

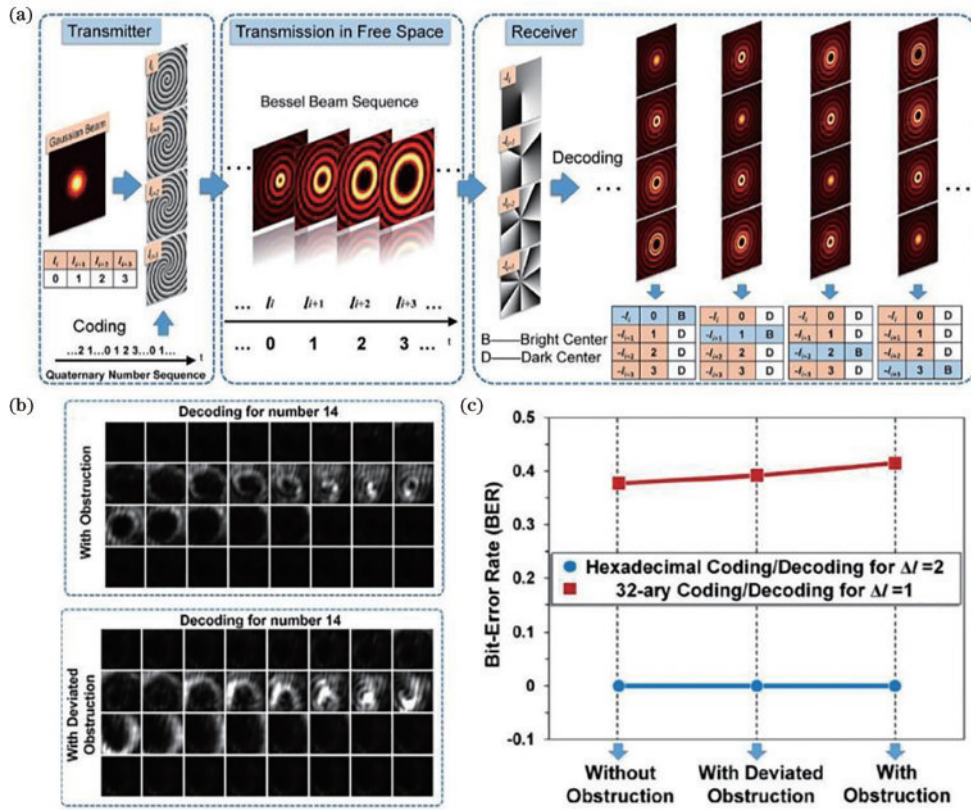


图 26 抵抗障碍物影响的自由空间高维结构光编解码通信^[124]。(a)概念和原理;(b)横向强度分布测量结果;(c)测得的BER
Fig. 26 Free-space high-dimensional structured light coding/decoding communications free of obstructions^[124]. (a) Concept and principle; (b) measured transverse intensity profiles; (c) measured BER

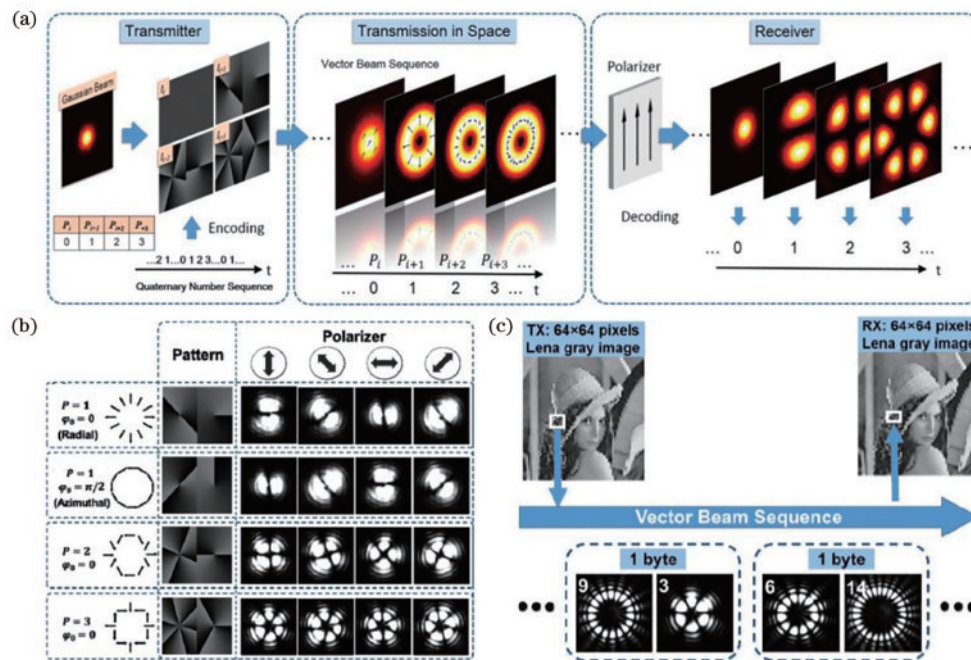


图 27 高维矢量光束编解码通信^[125]。(a)概念及原理;(b)强度分布;(c)灰度图像传输实验结果
Fig. 27 High-base vector beam encoding/decoding communications^[125]. (a) Concept and principle; (b) intensity profiles; (c) experimental results for gray image transmission

起偏器后四种矢量光束预期的空间偏振分布和测量得到的对应矢量光束多瓣强度分布图。图 27(c)展示了利用实验链路传输 64 pixel×64 pixel 灰度“Lena”图

像,通过改变加载到SLM上的相位图形传输随机的数字序列。实验评估了系统数据传输的BER性能,在10000个16进制数据中实现了无误码传输。此外,对

于高阶偏振光束没有观察到显著的性能退化,显示出该系统可靠的通信性能。

2016年,Chen等^[126]提出并演示了一种通过自适应湍流补偿技术实现的20 Gbit/s高速Bessel光束编解码自由空间光通信链路。通过将传统的幅度调制映射到空间调制,并采用自适应光学补偿技术,成功实验演示了通过大气湍流的高速Bessel光束编解码。实验中使用SLM加载伪随机相位掩模来模拟大气湍流,并通过自适应光学技术来感知高斯光束的相位畸变并进行补偿。实验结果显示了该系统优异的通信性能,实现了20 Gbit/s的Bessel光束编解码,并有效克服了大气湍流造成的影响。图28(a)示意了Bessel光束的高速编解码基本概念图,实验中使用2个携带有关键信号的高斯光束,通过2个SLM生成2个具有不同 l 值的

Bessel光束。由于Bessel光束在大气湍流中传播时会发生畸变,通过自适应光学系统的补偿,恢复Bessel光束,从而减少通道间的串扰,提高编解码的质量。图28(b)为实验装置。图28(c)给出了生成Bessel光束所用的叉形相位图形以及大气湍流前后的Bessel光束强度分布图,通过自适应补偿前后的比较,显示补偿效果显著,能有效恢复畸变的Bessel光束,提高通信链路的质量和稳定性。图29给出了20 Gbit/s高速Bessel光束编解码链路在随机大气湍流条件下的BER性能以及湍流补偿前后的眼图对比分析。在没有湍流的情况下,Ch I和Ch II在BER为 1×10^{-3} (7%前向纠错阈值)时观测到的OSNR代价小于0.9 dB。在存在湍流的情况下,补偿前的OSNR代价增加到小于3.9 dB,而补偿后减少到小于1.2 dB,表明实验系统具有良好的补偿性能。

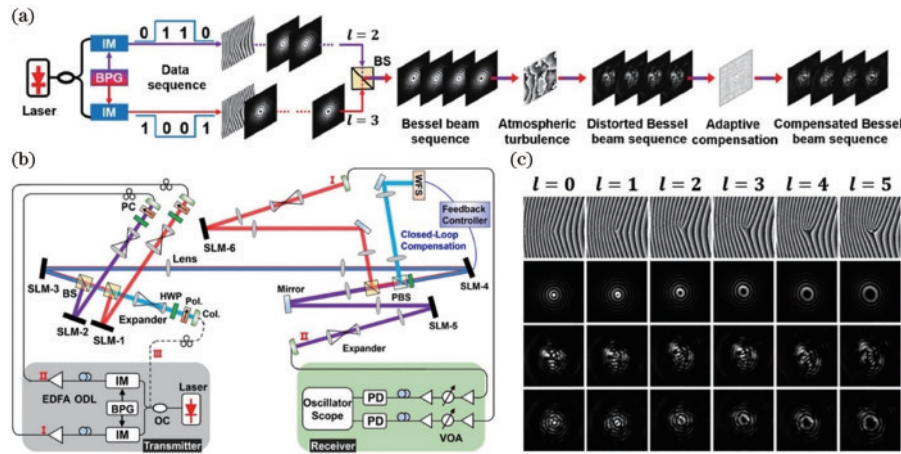


图 28 具有自适应湍流补偿的高速贝塞尔光束编解码链路演示^[126]。(a)概念和原理;(b)实验装置;(c)叉形相位图形和测量的Bessel光束强度分布

Fig. 28 Demonstration of high-speed Bessel beam encoding/decoding link with adaptive turbulence compensation^[126]. (a) Concept and principle; (b) experimental setup; (c) fork phase patterns and measured intensity profiles of Bessel beams

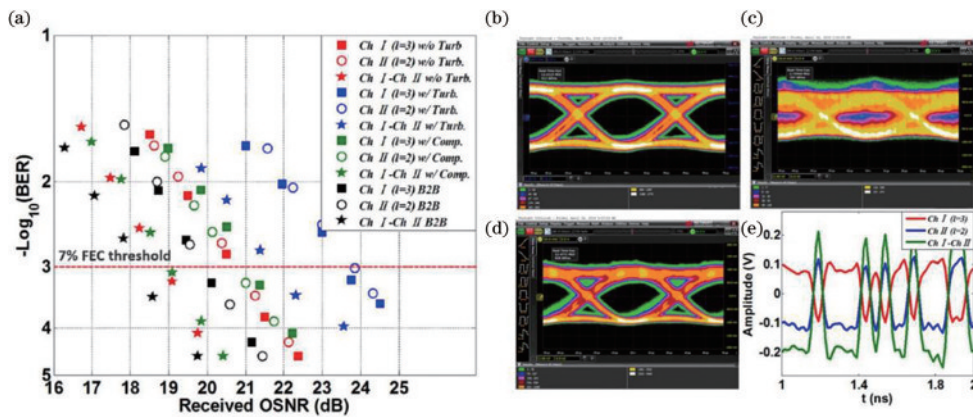


图 29 高速贝塞尔光束编解码链路实验结果^[126]。(a) BER 性能;(b) Ch I 背靠背眼图;(c) Ch I 补偿前眼图;(d) Ch I 补偿后眼图;(e) Ch I 和 Ch II 通道的时域波形

Fig. 29 Experimental results for high-speed Bessel beam encoding/decoding link^[126]. (a) BER performance; (b) eye diagram of back-to-back Ch I; (c) eye diagram of Ch I before compensation; (d) eye diagram of Ch I after compensation; (e) temporal waveforms of Ch I and Ch II

7 涡旋电磁波无线通信挑战与展望

信息与通信技术的快速发展推动了高速网络、视频会议及实时直播等应用的广泛普及。这一趋势随之带来了带宽和通信容量的巨大需求。随着对数据服务及多媒体内容需求的驱动,传统的 RF 频谱资源变得日益拥挤,这一现状催生了从 RF 载波到光载波通信技术的转型需求。FSO 与 RF 通信的差异主要源于其载波波长的不同。在晴朗大气条件下,对于 FSO 通信,大气传输窗口位于近红外波长范围内,约为 700~1600 nm 之间,而 RF 通信的大气传输窗口在 30 mm~3 m 之间,由此可见,FSO 通信的波长较 RF 通信短得多。FSO 通信带来的好处首先表现在大带宽。众所周知,更高的载波频率会允许更大的信息带宽,即信息承载能力,即使设定通信系统的带宽为载波的 1%,FSO 通信所能提供带宽可达太赫兹级别,这几乎是传统 RF 通信系统的上百倍^[132-133]。FSO 通信系统的功率要求更低,这主要是由于光载波的发散角更小,在一定发射功率下,FSO 系统所接收到的信号功率更高。例如,天线增益相同情况下,航天器中 FSO 和 RF 的典型

尺寸分别为 0.3 m 和 1.5 m^[134],这一特点表明 FSO 系统传输方向性更强。此外,由于 RF 系统频谱拥挤,需要监管机构授权,而 FSO 系统尚不需要国际许可,大大降低了初期成本和开发时间^[135]。FSO 系统更小的发散角和更低的穿透能力,也为其带来了更高的安全性。

传统上,卫星通信主要采用地球静止轨道(GEO)卫星,此类卫星可有效避免终端和卫星之间的跟踪问题,并且允许单个卫星对地面进行覆盖。近年来,低地球轨道(LEO)卫星吸引了人们的兴趣。LEO 卫星最初由 Sturza^[136]于 1995 年提出,可提供低延迟和高吞吐量的宽带通信服务,SpaceX、Amazon、OneWeb、TeleSAT 都是其中代表,截至 2023 年 12 月,SpaceX 旗下的 Starlink 的在轨 LEO 卫星已达 5144 颗,是目前规模最大的卫星通信网络。

在进行卫星与地面、卫星与卫星、卫星与海洋、卫星与机载平台以及卫星与深空之间的通信时,即涉及星地、星间、星海、星空、深空通信,各自因传输介质和距离的差异而面临一系列挑战。如图 30 所示,星地通信需穿透大气层,受天气和地理位置这些不可预测的

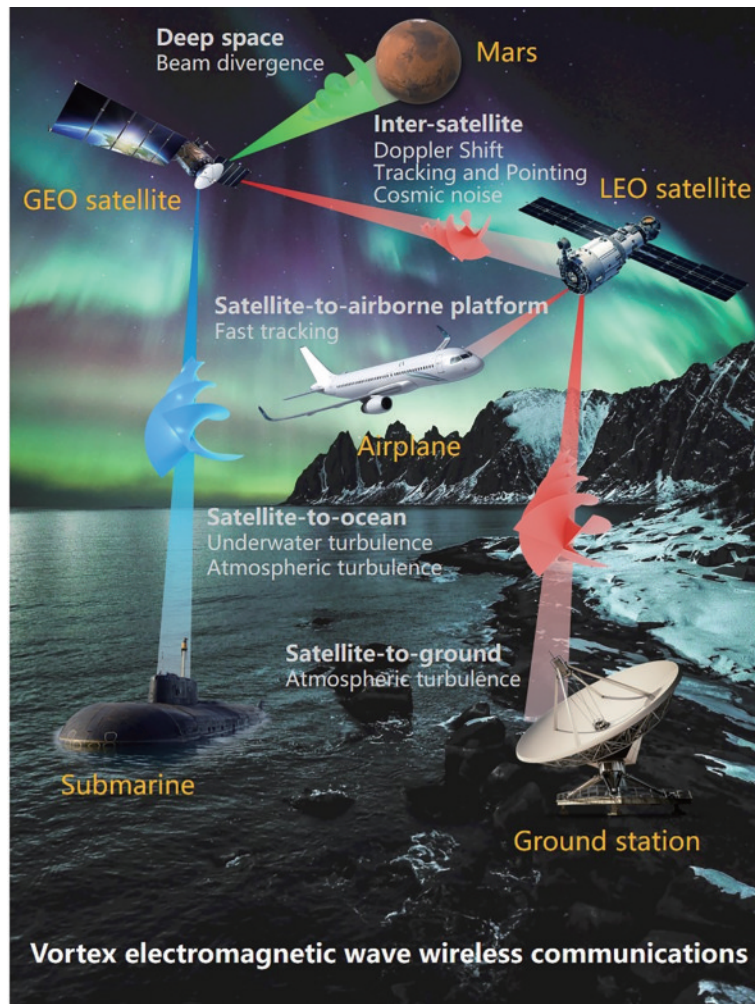


图 30 涡旋电磁波无线通信挑战与展望

Fig. 30 Challenges and prospects of vortex electromagnetic wave wireless communications

环境因素影响,传输信号会遭受急剧衰减和损伤,传输距离也会相应缩短。为保障星地通信的可靠性,需克服大气传播损失,包括吸收、散射损耗和大气湍流等因素。星间链路通信主要在太空中进行,虽不受大气环境干扰,但仍需解决多普勒频移、精准跟踪瞄准和背景辐射等问题。星海通信,即卫星与海洋目标间的通信,除了星地通信中大气湍流的影响,还需要解决海水的盐度、温度、浊度及水下复杂湍流导致的散射和衰减问题。星空通信涉及卫星与飞机、无人机等快速移动平台的通信,关键在于精确跟踪和定位以确保通信链路的稳定性。深空通信,作为一个广泛研究的领域,其距离定义在 200 万 km 以上,例如近地轨道卫星与火星之间的光通信链路建立,最大挑战是克服深空距离导致的光束发散,即使采用无线光通信技术,光束的发散也可能达到 0.1 个地球直径的量级^[137]。

在未来,海陆空天信息一体化通信是无线通信技术发展的重要趋势,大容量、远距离、高鲁棒性的无线通信技术是重要方向,这也是卫星互联网技术进步的动力。为了满足这些发展需求,拓展和融合电磁波通信频段是其中一个重要策略,其涉及到无线电、微波、红外及可见光等多个频段的有机结合。例如,在传统无线电和微波频段无线通信基础上,对于需要大容量和即时通信服务的场景,可以采用红外和可见光,同时,不同频段无线通信相互间还可以形成备份,从而提高无线通信链路的可靠性。

调控电磁波的空间维度是另一个重要策略,比如利用涡旋电磁波的编码、复用和广播可以有效提升无线通信的容量和灵活性,从涡旋电磁波还可以拓展到广义结构化电磁波以充分开发其空间维度资源,同时,涡旋电磁波和广义结构化电磁波还可以和传统维度资源充分兼容和结合,利用多维融合的电磁波无线通信技术可以实现可持续扩容。特别地,相比于传统高斯形式的电磁波,结构化的电磁波由于其特殊的电磁场空间结构有些可以表现出抵抗复杂介质环境扰动影响的内禀特性,从而有望增强传统无线通信技术的鲁棒性,同时突破通信传输距离的限制。

由此可见,多频段融合和多维度融合有望为未来多场景、跨尺度电磁波无线通信提供有效解决方案,这也是基于涡旋电磁波无线通信技术的重要发展趋势。值得注意的是,这些新技术的发展不仅需要全球信息一体化的需求牵引,同时也依赖于核心技术和关键器件的进步,特别是目前尚不成熟的电磁波频段。比如,对于微波和太赫兹涡旋电磁波通信,需要紧凑型、轻量化、可重构的涡旋电磁波发射、复用、解复用、接收技术和器件;对于近红外涡旋电磁波通信,虽然涡旋光调控器件已经相对比较成熟,不过大多是体光学元器件,体积大、成本高,高速率、可编程、多维度的集成光场调控器件仍然有待突破,同时,支持大通道数涡旋的光通信系统也有待开发,可以抵抗复杂介质环境影响的结构

光通信还处于基础研究阶段;对于中红外和可见光涡旋电磁波通信,即使是传统基于高斯光的通信,其器件也没有近红外波段成熟,比如缺乏低成本高性能的激光器以及高速调制器和探测器,一种潜在解决方法是充分利用近红外波段的成熟光电子器件,然后通过非线性效应实现近红外波段到中红外波段和可见光波段的转换,其中的关键是高效、宽带的波长转换器。对于大容量、远距离、高鲁棒性的电磁波无线通信,大容量需要多频段和多维度的大通道数复用(如密集波分复用和多通道涡旋复用),远距离需要高功率的发射源和高灵敏的接收器(如高功率激光器和高灵敏度弱光探测器),高鲁棒性需要更加灵活的结构光调控(如抵抗雨雾烟尘湍流等复杂环境扰动的特殊光场结构)。另外,涡旋电磁波及结构化电磁波技术与传统无线通信技术的充分融合也至关重要,比如各种编解码技术和数字信号处理技术等。

对于基于涡旋电磁波的卫星通信技术,当前主要还停留在理论研究和数值分析阶段,尚未有实际应用于卫星通信,部分原因是高昂的卫星发射成本,同时目前像卫星激光通信还处于初级阶段,因而对于更高级的卫星涡旋激光通信的需求还不十分显著。不过,随着 LEO 卫星甚至超低轨道(VLEO)卫星的不断发展及成本的快速降低,特别是全球信息一体化大趋势下对于容量不断增长的需求,将涡旋电磁波实验应用于卫星通信值得期待。

8 结束语

在通信容量需求快速增长的今天,OAM 作为除传统频率、幅度、相位、偏振、时间以外的一种电磁波新维度,其为电磁波无线通信的可持续扩容提供了新的潜在解决方案。随着卫星互联网向着低轨化、大规模、低延时、低成本的方向发展,涡旋电磁波也有望应用于卫星通信技术领域。本文首先介绍了无线通信技术的基本概念和涡旋电磁波的原理、特性以及产生和探测方法。进一步,全面综述了涡旋电磁波无线通信技术的研究进展。根据电磁波的工作频段,分别详细梳理了微波、太赫兹、中红外、近红外和可见光涡旋电磁波通信的实验研究进展,阐述了涡旋电磁波在卫星通信领域的理论研究结果,同时介绍了拓展结构化电磁波通信的一些研究工作。最后,讨论了涡旋电磁波无线通信技术未来面临的挑战与展望。多频段、多维度、多场景、跨尺度融合的涡旋电磁波无线通信技术是重要发展趋势,有望推动无线通信技术向着更大容量、更远距离、更高鲁棒性的方向可持续发展。面向未来,在卫星通信领域,建设全球覆盖、全程自主可控的高速、高效、可靠、安全的卫星互联网对于我国成为太空强国具有重要意义,涡旋电磁波无线通信技术,特别是卫星涡旋激光通信技术,也有望在其中发挥重要作用。

参 考 文 献

- [1] Chan V W S. Free-space optical communications[J]. *Journal of Lightwave Technology*, 2006, 24(12): 4750-4762.
- [2] Hutt D L, Snell K J, Bélanger P A. Alexander graham Bell's PHOTOPHONE[J]. *Optics and Photonics News*, 1993, 4(6): 20-25.
- [3] Hecht J. Beam: the race to make the laser[J]. *Optics and Photonics News*, 2005, 16(7): 24-29.
- [4] Gfeller F R, Bapst U. Wireless in-house data communication via diffuse infrared radiation[J]. *Proceedings of the IEEE*, 1979, 67(11): 1474-1486.
- [5] Moreira A J C, Tavares A M R, Valadas R J M T, et al. Modulation methods for wireless infrared transmission systems: performance under ambient light noise and interference[J]. *Proceedings of SPIE*, 1995, 2601: 226-237.
- [6] Street A M, Stavrinou P N, O'Brien D C, et al. Indoor optical wireless systems-a review[J]. *Optical and Quantum Electronics*, 1997, 29(3): 349-378.
- [7] Tang A P, Kahn J M, Ho K P. Wireless infrared communication links using multi-beam transmitters and imaging receivers[C]//*Proceedings of ICC/SUPERCOMM'96-International Conference on Communications*, June 23-27, 1996, Dallas, TX, USA. New York: IEEE Press, 1996: 180-186.
- [8] Carruther J B, Kahn J M. Angle diversity for nondirected wireless infrared communication[J]. *IEEE Transactions on Communications*, 2000, 48(6): 960-969.
- [9] Ramirez-Iniguez R. Indoor optical wireless communications [C]//*IEE Colloquium Optical Wireless Communications*, June 22, 1999, London, UK. London: IEE Press, 1999.
- [10] Heatley D J T, Wisely D R, Neild I, et al. Optical wireless: the story so far[J]. *IEEE Communications Magazine*, 1998, 36(12): 72-74.
- [11] Fernandes J J G, Watson P A, Neves J C. Wireless LANs: physical properties of infra-red systems *vs.* mmw systems[J]. *IEEE Communications Magazine*, 1994, 32(8): 68-73.
- [12] Ghassemlooy Z, Popoola W. Terrestrial free-space optical communications[M]//Ait S, Adachi F. *Mobile and wireless communications network layer and circuit level design*. London: InTech, 2010
- [13] Yura H T, McKinley W G. Optical scintillation statistics for IR ground-to-space laser communication systems[J]. *Applied Optics*, 1983, 22(21): 3353-3358.
- [14] Sharma V, Kumar N. Improved analysis of 2.5 Gbps-inter-satellite link (ISL) in inter-satellite optical-wireless communication (IsOWC) system[J]. *Optics Communications*, 2013, 286: 99-102.
- [15] Fried D L. Scintillation of a ground-to-space laser illuminator[J]. *Journal of the Optical Society of America*, 1967, 57(8): 980-983.
- [16] Minott P O. Scintillation in an earth-to-space propagation path[J]. *Journal of the Optical Society of America*, 1972, 62(7): 885-888.
- [17] Titterton P J. Power reduction and fluctuations caused by narrow laser beam motion in the far field[J]. *Applied Optics*, 1973, 12(2): 423-425.
- [18] Fried D L. Statistics of laser beam fade induced by pointing jitter[J]. *Applied Optics*, 1973, 12(2): 422-423.
- [19] Bufton J L. Scintillation statistics measured in an earth-space-earth retroreflector link[J]. *Applied Optics*, 1977, 16(10): 2654-2660.
- [20] Aruga T, Araki K, Igarashi T, et al. Earth-to-space laser beam transmission for spacecraft attitude measurement[J]. *Applied Optics*, 1984, 23(1): 143-147.
- [21] Aruga T, Araki K, Hayashi R, et al. Earth-to-geosynchronous satellite laser beam transmission[J]. *Applied Optics*, 1985, 24(1): 53-56.
- [22] Lightsey P A. Scintillation in ground-to-space and retroreflected laser beams[J]. *Optical Engineering*, 1994, 33(8): 2535.
- [23] Wilson K E, Lesh J R. An overview of the galileo optical experiment (GOPEX) [EB/OL]. [2024-01-05]. <https://ntrs.nasa.gov/citations/19940009913>.
- [24] Wilson K E. An overview of the GOLD experiment between the ETS-VI satellite and the table mountain facility[J]. *Telecommunications and Data Acquisition Progress Report*, 1995, 124: 8-19.
- [25] Wilson K E, Leatherman P R, Cleis R, et al. Results of the compensated Earth-Moon-Earth retroreflector laser link (CEMERLL) experiment[EB/OL]. [2024-01-05]. <https://ntrs.nasa.gov/citations/20040191393>.
- [26] Tolker-nielsen T, Oppenhauser G. In-orbit test result of an operational optical intersatellite link between ARTEMIS and SPOT4, SILEX[J]. *Proceedings of SPIE*, 2002, 4635: 1-15.
- [27] Fujiwara Y, Mokuno M, Jono T, et al. Optical inter-orbit communications engineering test satellite (OICETS) [J]. *Acta Astronautica*, 2007, 61(1/2/3/4/5/6): 163-175.
- [28] Toyoda M, Toyoshima M, Takahashi T, et al. Ground-to-ETS-VI narrow laser beam transmission[J]. *Proceedings of SPIE*, 1996, 2699: 71-80.
- [29] 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*, 1992, 45(11): 8185-8189.
- [30] Yao A M, Padgett M J. Orbital angular momentum: origins, behavior and applications[J]. *Advances in Optics and Photonics*, 2011, 3(2): 161-204.
- [31] Wang J. Twisted optical communications using orbital angular momentum[J]. *Science China Physics, Mechanics & Astronomy*, 2018, 62(3): 34201.
- [32] Wang J, Liu J, Li S H, et al. Orbital angular momentum and beyond in free-space optical communications[J]. *Nanophotonics*, 2022, 11(4): 645-680.
- [33] Yan Y, Xie G D, Lavery M P J, et al. High-capacity millimetre-wave communications with orbital angular momentum multiplexing[J]. *Nature Communications*, 2014, 5: 4876.
- [34] Su H, Shen X P, Su G X, et al. Efficient generation of microwave plasmonic vortices via a single deep-

- subwavelength meta-particle[J]. *Laser & Photonics Reviews*, 2018, 12(9): 1800010.
- [35] Willner A E, Huang H, Yan Y, et al. Optical communications using orbital angular momentum beams [J]. *Advances in Optics and Photonics*, 2015, 7(1): 66-106.
- [36] Ren Y X, Li L, Xie G D, et al. Line-of-sight millimeter-wave communications using orbital angular momentum multiplexing combined with conventional spatial multiplexing [J]. *IEEE Transactions on Wireless Communications*, 2017, 16(5): 3151-3161.
- [37] Lin M T, Gao Y, Liu P G, et al. Theoretical analyses and design of circular array to generate orbital angular momentum[J]. *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*, 2017, 65(7): 3510-3519.
- [38] Yu S X, Li L, Shi G M, 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.
- [39] Lee A J, Omatsu T, Pask H M. Direct generation of a first-Stokes vortex laser beam from a self-Raman laser[J]. *Optics Express*, 2013, 21(10): 12401-12409.
- [40] Lee A J, Zhang C Y, Omatsu T, et al. An intracavity, frequency-doubled self-Raman vortex laser[J]. *Optics Express*, 2014, 22(5): 5400-5409.
- [41] 刘俊, 王健. 涡旋光激光器研究进展[J]. *中国激光*, 2022, 49(12): 1201001.
- Liu J, Wang J. Research progress of vortex laser[J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2022, 49(12): 1201001.
- [42] Beijersbergen M W, Allen L, van der Veen H E L O, et al. Astigmatic laser mode converters and transfer of orbital angular momentum[J]. *Optics Communications*, 1993, 96(1/2/3): 123-132.
- [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.
- [44] Devlin R C, Ambrosio A, Rubin N A, et al. Arbitrary spin-to-orbital angular momentum conversion of light[J]. *Science*, 2017, 358(6365): 896-901.
- [45] 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.
- [46] Krishna Inavalli V V G, Viswanathan N K. Switchable vector vortex beam generation using an optical fiber[J]. *Optics Communications*, 2010, 283(6): 861-864.
- [47] Lin J, Yuan X C, Tao S H, et al. Synthesis of multiple collinear helical modes generated by a phase-only element [J]. *Journal of the Optical Society of America A*, 2006, 23(5): 1214-1218.
- [48] Marrucci L, Manzo C, Paparo D. Optical spin-to-orbital angular momentum conversion in inhomogeneous anisotropic media[J]. *Physical Review Letters*, 2006, 96(16): 163905.
- [49] Su T H, Scott R P, Djordjevic S S, et al. Demonstration of free space coherent optical communication using integrated silicon photonic orbital angular momentum devices[J]. *Optics Express*, 2012, 20(9): 9396-9402.
- [50] Zhao Z, Wang J, Li S H, et al. Metamaterials-based broadband generation of orbital angular momentum carrying vector beams[J]. *Optics Letters*, 2013, 38(6): 932-934.
- [51] Zhao Y F, Du J, Zhang J R, et al. Generating structured light with phase helix and intensity helix using reflection-enhanced plasmonic metasurface at 2 μm [J]. *Applied Physics Letters*, 2018, 112(17): 171103.
- [52] Wang J. High-dimensional orbital angular momentum comb[J]. *Advanced Photonics*, 2022, 4(5): 050501.
- [53] Turnbull G A, Robertson D A, Smith G M, et al. The generation of free-space Laguerre-Gaussian modes at millimetre-wave frequencies by use of a spiral phaseplate [J]. *Optics Communications*, 1996, 127(4/5/6): 183-188.
- [54] 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.
- [55] Tamburini F, Mari E, Thidé B, et al. Experimental verification of photon angular momentum and vorticity with radio techniques[J]. *Applied Physics Letters*, 2011, 99(20): 204102.
- [56] Mahmoudi F E, Walker S D. 4-Gbps uncompressed video transmission over a 60-GHz orbital angular momentum wireless channel[J]. *IEEE Wireless Communications Letters*, 2013, 2(2): 223-226.
- [57] Wei X L, Liu C M, Niu L T, et al. Generation of arbitrary order Bessel beams via 3D printed axicons at the terahertz frequency range[J]. *Applied Optics*, 2015, 54(36): 10641-10649.
- [58] Yu S X, Li L, Shi G M, et al. Generating multiple orbital angular momentum vortex beams using a metasurface in radio frequency domain[J]. *Applied Physics Letters*, 2016, 108(24): 241901.
- [59] Chen Y L, Zheng S L, Li Y, et al. A flat-lensed spiral phase plate based on phase-shifting surface for generation of millimeter-wave OAM beam[J]. *IEEE Antennas and Wireless Propagation Letters*, 2015, 15: 1156-1158.
- [60] Cheng W C, Zhang H L, Liang L P, et al. Orbital-angular-momentum embedded massive MIMO: achieving multiplicative spectrum-efficiency for mmWave communications [J]. *IEEE Access*, 2017, 6: 2732-2745.
- [61] Zhang W H, Qi Q Q, Zhou J, et al. Mimicking faraday rotation to sort the orbital angular momentum of light[J]. *Physical Review Letters*, 2014, 112(15): 153601.
- [62] Genevet P, Lin J, Kats M A, et al. Holographic detection of the orbital angular momentum of light with plasmonic photodiodes[J]. *Nature Communications*, 2012, 3: 1278.
- [63] Belmonte A, Torres J P. Digital coherent receiver for orbital angular momentum demultiplexing[J]. *Optics Letters*, 2013, 38(2): 241-243.
- [64] Berkhout G C G, Lavery M P J, Courtial J, et al. Efficient sorting of orbital angular momentum states of light[J]. *Physical Review Letters*, 2010, 105(15):

- 153601.
- [65] Mirhosseini M, Malik M, Shi Z M, et al. Efficient separation of the orbital angular momentum eigenstates of light[J]. *Nature Communications*, 2013, 4: 2781.
- [66] Malik M, Mirhosseini M, Lavery M P J, et al. Direct measurement of a 27-dimensional orbital-angular-momentum state vector[J]. *Nature Communications*, 2014, 5: 3115.
- [67] 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.
- [68] Hui X N, Zheng S L, Chen Y L, et al. Multiplexed millimeter wave communication with dual orbital angular momentum (OAM) mode antennas[J]. *Scientific Reports*, 2015, 5: 10148.
- [69] Zhou H B, Su X Z, Minoofar A, et al. Utilizing multiplexing of structured THz beams carrying orbital-angular-momentum for high-capacity communications[J]. *Optics Express*, 2022, 30(14): 25418-25432.
- [70] Yan Y, Li L, Zhao Z, 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), May 22-27, 2016, Kuala Lumpur, Malaysia. New York: IEEE Press, 2016.
- [71] Sasaki H, Lee D, Fukumoto H, et al. Experiment on over-100-Gbps wireless transmission with OAM-MIMO multiplexing system in 28-GHz band[C]//2018 IEEE Global Communications Conference (GLOBECOM), December 9-13, 2018, Abu Dhabi, United Arab Emirates. New York: IEEE Press, 2018.
- [72] Fang Y, Yu J J, Zhang J W, et al. Ultrahigh-capacity access network architecture for mobile data backhaul using integrated W-band wireless and free-space optical links with OAM multiplexing[J]. *Optics Letters*, 2014, 39(14): 4168-4171.
- [73] Earle M. Infrared system engineering[J]. *IEEE Transactions on Automatic Control*, 1971, 16(4): 392-393.
- [74] Prasad N S. Optical Communications in the mid-wave IR spectral band[M]//Majumdar A K, Ricklin J C. Free-space laser communications. Optical and fiber communications reports. New York: Springer, 2005, 2: 347-391.
- [75] Arnulf A, Bricard J, Curé E, et al. Transmission by haze and fog in the spectral region 0.35 to 10 microns[J]. *Journal of the Optical Society of America*, 1957, 47(6): 491-498.
- [76] Gailele L, Maweza L, Dudley A, et al. Multiplexing of spatial modes in the mid-IR region[J]. *Proceedings of SPIE*, 2017, 10090: 100900Z.
- [77] Zou K H, Pang K, Song H, et al. High-capacity free-space optical communications using wavelength- and mode-division-multiplexing in the mid-infrared region[J]. *Nature Communications*, 2022, 13: 7662.
- [78] Willner A E, Zou K H, Pang K, et al. Free-space mid-IR communications using wavelength and mode division multiplexing[J]. *Optics Communications*, 2023, 541: 129518.
- [79] Wheeler N V, Heidt A M, Baddela N K, et al. Low-loss and low-bend-sensitivity mid-infrared guidance in a hollow-core - photonic-bandgap fiber[J]. *Optics Letters*, 2014, 39(2): 295-298.
- [80] Yu M J, Okawachi Y, Griffith A G, et al. Silicon-chip-based mid-infrared dual-comb spectroscopy[J]. *Nature Communications*, 2018, 9: 1869.
- [81] Walsh M J, Reddy R K, Bhargava R. Label-free biomedical imaging with mid-IR spectroscopy[J]. *IEEE Journal of Selected Topics in Quantum Electronics*, 2012, 18(4): 1502-1513.
- [82] Soibel A, Wright M W, Farr W H, et al. Midinfrared interband cascade laser for free space optical communication[J]. *IEEE Photonics Technology Letters*, 2010, 22(2): 121-123.
- [83] Pang X D, Schatz R, Joharifar M, et al. Direct modulation and free-space transmissions of up to 6 Gbps multilevel signals with a 4.65 μm quantum cascade laser at room temperature[J]. *Journal of Lightwave Technology*, 2022, 40(8): 2370-2377.
- [84] Dely H, Bonazzi T, Spitz O, et al. 10 Gbit s^{-1} free space data transmission at 9 μm wavelength with unipolar quantum optoelectronics[J]. *Laser & Photonics Reviews*, 2022, 16(2): 2100414.
- [85] Pang X D, Dely H, Schatz R, et al. 11 Gb/s LWIR FSO Transmission at 9.6 μm using a Directly-Modulated Quantum Cascade Laser and an Uncooled Quantum Cascade Detector[C]//2022 Optical Fiber Communications Conference and Exhibition (OFC), March 6-10, 2022, San Diego, CA, USA. New York: IEEE Press, 2022.
- [86] Cho P S, Harston G, Büchter K D F, et al. Optical homodyne RZ-QPSK transmission through wind tunnel at 3.8 and 1.55 micron via wavelength conversion[J]. *Proceedings of SPIE*, 2009, 7324: 73240A.
- [87] Su Y L, Wang W, Hu X H, et al. 10 Gbps DPSK transmission over free-space link in the mid-infrared[J]. *Optics Express*, 2018, 26(26): 34515-34528.
- [88] Wang W, Zheng Y Q, Xie X P, et al. 5 Gbaud QPSK coherent transmission in the mid-infrared[J]. *Optics Communications*, 2020, 466: 125681.
- [89] Zou K H, Pang K, Song H, et al. Demonstration of free-space 300-gbit/s QPSK communications using both wavelength- and mode- division-multiplexing in the mid-IR[C]//2021 Optical Fiber Communications Conference and Exhibition (OFC), June 6-10, 2021, San Francisco, CA, USA. New York: IEEE Press, 2021.
- [90] Su Y L, Tian W L, Yu Y, et al. Free-space transmission of picosecond-level, high-speed optical pulse streams in the 3 μm band[J]. *Optics Express*, 2023, 31(17): 27433-27449.
- [91] Didier P, Dely H, Spitz O, et al. Progress in high-speed optical links in the 8 to 12 μm thermal atmospheric window from the perspective of unipolar quantum technology[J]. *Proceedings of SPIE*, 2023, 12515: 1251507.

- [92] Su Y L, Meng J C, Wei T T, et al. 150 Gbps multi-wavelength FSO transmission with 25-GHz ITU-T grid in the mid-infrared region[J]. *Optics Express*, 2023, 31(9): 15156-15169.
- [93] Han M Y, Joharifar M, Wang M G, et al. High spectral efficiency long-wave infrared free-space optical transmission with multilevel signals[J]. *Journal of Lightwave Technology*, 2023, 41(20): 6514-6520.
- [94] Wang J, Yang J Y, Fazal I M, et al. Terabit free-space data transmission employing orbital angular momentum multiplexing[J]. *Nature Photonics*, 2012, 6: 488-496.
- [95] Wang J, Li S H, Luo M, et al. N-dimensional multiplexing link with 1.036-Pbit/s transmission capacity and 112.6-bit/s/Hz spectral efficiency using OFDM-8QAM signals over 368 WDM pol-muxed 26 OAM modes[C]//2014 The European Conference on Optical Communication (ECOC), September 21-25, 2014, Cannes, France. New York: IEEE Press, 2014.
- [96] Wang J, Liu J, Lv X, et al. Ultra-high 435-bit/s/Hz spectral efficiency using N-dimensional multiplexing and modulation link with pol-muxed 52 orbital angular momentum (OAM) modes carrying Nyquist 32-QAM signals[C]//2015 European Conference on Optical Communication (ECOC), September 27-October 1, 2015, Valencia, Spain. New York: IEEE Press, 2015.
- [97] Zhao Y F, Wang A D, Zhu L, et al. High-speed spatial light modulation enabling 25-Gbit/s twisted light encoding/decoding and 260-m security free-space data transmission[J]. *Optics Letters*, 2023, 48(21): 5571-5574.
- [98] Liang Y Z, Su X Z, Cai C K, et al. Adaptive turbulence compensation and fast auto-alignment link for free-space optical communications[J]. *Optics Express*, 2021, 29(24): 40514-40523.
- [99] Gibson G, Courtial J, Padgett M, et al. Free-space information transfer using light beams carrying orbital angular momentum[J]. *Optics Express*, 2004, 12(22): 5448-5456.
- [100] Du J, Wang J. Design of on-chip N-fold orbital angular momentum multicasting using V-shaped antenna array[J]. *Scientific Reports*, 2015, 5: 9662.
- [101] Du J, Wang J. Dielectric metasurfaces enabling twisted light generation/detection/(de)multiplexing for data information transfer[J]. *Optics Express*, 2018, 26(10): 13183-13194.
- [102] Willner A J, Ren Y X, Xie G D, et al. Experimental demonstration of 20 Gbit/s data encoding and 2 ns channel hopping using orbital angular momentum modes [J]. *Optics Letters*, 2015, 40(24): 5810-5813.
- [103] Fu S Y, Zhai Y W, Zhou H, et al. Demonstration of free-space one-to-many multicasting link from orbital angular momentum encoding[J]. *Optics Letters*, 2019, 44(19): 4753-4756.
- [104] Fu S Y, Zhai Y W, Zhou H, et al. Experimental demonstration of free-space multi-state orbital angular momentum shift keying[J]. *Optics Express*, 2019, 27(23): 33111-33119.
- [105] Zhu L, Wei X L, Wang J, et al. Experimental demonstration of basic functionalities for 0.1-THz orbital angular momentum (OAM) communications[C]//Proceedings of the OFC, March 9-13, 2014, San Francisco, CA, USA. New York: IEEE Press, 2014.
- [106] Ren Y X, Wang Z, Liao P C, 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.
- [107] Zhao Y F, Liu J, Du J, et al. Experimental demonstration of 260-meter security free-space optical data transmission using 16-QAM carrying orbital angular momentum (OAM) beams multiplexing[C]//2016 Optical Fiber Communications Conference and Exhibition (OFC), March 20-24, 2016, Anaheim, CA, USA. New York: IEEE Press, 2016.
- [108] Zhao Y F, Liu J, Li S H, et al. Secure optical interconnects using orbital angular momentum beams multiplexing/multicasting[J]. *Advanced Photonics Nexus*, 2023, 3(1): 016004.
- [109] Krenn M, Fickler R, Fink M, et al. Twisted light communication through turbulent air across Vienna[EB/OL]. (2014-02-11) [2023-11-12]. <https://arxiv.org/abs/1402.2602v1>.
- [110] Cai C K, Zhao Y F, Zhang J Y, et al. Experimental demonstration of an underwater wireless optical link employing orbital angular momentum (OAM) modes with fast auto-alignment system[C]//2019 Optical Fiber Communications Conference and Exhibition (OFC), March 3-7, 2019, San Diego, CA, USA. New York: IEEE Press, 2019.
- [111] Morgan K S, Miller J K, Cochenour B M, et al. Free space propagation of concentric vortices through underwater turbid environments[J]. *Journal of Optics*, 2016, 18(10): 104004.
- [112] Zhao Y F, Xu J, Wang A D, et al. Demonstration of data-carrying orbital angular momentum-based underwater wireless optical multicasting link[J]. *Optics Express*, 2017, 25(23): 28743-28751.
- [113] Ren Y X, Li L, Wang Z, et al. Orbital angular momentum-based space division multiplexing for high-capacity underwater optical communications[J]. *Scientific Reports*, 2016, 6: 33306.
- [114] Zhao Y F, Wang A D, Zhu L, et al. Performance evaluation of underwater optical communications using spatial modes subjected to bubbles and obstructions[J]. *Optics Letters*, 2017, 42(22): 4699-4702.
- [115] Wang A D, Zhu L, Zhao Y F, et al. Adaptive water-air-water data information transfer using orbital angular momentum[J]. *Optics Express*, 2018, 26(7): 8669-8678.
- [116] Zhao Y F, Cai C K, Zhang J R, et al. Feedback-enabled adaptive underwater twisted light transmission link utilizing the reflection at the air-water interface[J]. *Optics Express*, 2018, 26(13): 16102-16112.
- [117] Cai C K, Zhao Y F, Zhang J Y, et al. Fast auto-alignment underwater wireless optical communications employing orbital angular momentum modes[J]. *Optics*

- Continuum, 2022, 1(12): 2590-2599.
- [118] 王健, 王仲阳. 水下轨道角动量光通信[J]. 光学学报, 2024, 44(4): 0400001.
Wang J, Wang Z Y. Underwater orbital angular momentum optical communications[J]. Acta Optica Sinica, 2024, 44(4): 0400001.
- [119] Djordjevic I B. Deep-space and near-Earth optical communications by coded orbital angular momentum (OAM) modulation[J]. Optics Express, 2011, 19(15): 14277-14289.
- [120] Sachdeva S, Kaur S, Arora R, et al. Ultra-high capacity optical satellite communication system using PDM-256-QAM and optical angular momentum beams[J]. Sensors, 2023, 23(2): 786.
- [121] Wang Z Q, Malaney R, Burnett B. Satellite-to-earth quantum key distribution via orbital angular momentum [J]. Physical Review Applied, 2020, 14(6): 064031.
- [122] Djordjevic I B. OAM-based hybrid free-space optical-terahertz multidimensional coded modulation and physical-layer security[J]. IEEE Photonics Journal, 2017, 9(4): 7905812.
- [123] Wang Z Q, Malaney R, Green J. Detecting orbital angular momentum of light in satellite-to-ground quantum communications[C]//2019 IEEE Global Communications Conference (GLOBECOM), December 9-13, 2019, Waikoloa, HI, USA. New York: IEEE Press, 2019.
- [124] Du J, Wang J. High-dimensional structured light coding/decoding for free-space optical communications free of obstructions[J]. Optics Letters, 2015, 40(21): 4827-4830.
- [125] Zhao Y F, Wang J. High-base vector beam encoding/decoding for visible-light communications[J]. Optics Letters, 2015, 40(21): 4843-4846.
- [126] Chen S, Li S H, Zhao Y F, et al. Demonstration of 20-Gbit/s high-speed Bessel beam encoding/decoding link with adaptive turbulence compensation[J]. Optics Letters, 2016, 41(20): 4680-4683.
- [127] Zhu L, Wang A D, Wang J. Free-space data-carrying bendable light communications[J]. Scientific Reports, 2019, 9: 14969.
- [128] Lin W, Wen Y H, Chen Y J, et al. Resilient free-space image transmission with helical beams[J]. Physical Review Applied, 2019, 12(4): 044058.
- [129] Milione G, Lavery M P J, Huang H, et al. 4×20 Gbit/s mode division multiplexing over free space using vector modes and a q-plate mode (de)multiplexer[J]. Optics Letters, 2015, 40(9): 1980-1983.
- [130] Chen S Q, Xie Z Q, Ye H P, et al. Cylindrical vector beam multiplexer/demultiplexer using off-axis polarization control[J]. Light, Science & Applications, 2021, 10: 222.
- [131] Zhao Y F, Li S H, Du J, et al. Demonstration of a visible-light parallel communication link based on hexadecimal vector beam array coding/decoding[C]//2017 16th International Conference on Optical Communications and Networks (ICOON), August 7-10, 2017, Wuzhen, China. New York: IEEE Press, 2017.
- [132] Williams W D, Collins M, Boroson D M, et al. RF and optical communications: a comparison of high data rate returns from deep space in the 2020 timeframe[EB/OL]. [2023-11-12]. <https://ntrs.nasa.gov/citations/20070017310>.
- [133] Sova R M, Sluz J E, Young D W, et al. 80 Gb/s free-space optical communication demonstration between an aerostat and a ground terminal[J]. Proceedings of SPIE, 2006, 6304: 630414.
- [134] Jeganathan M, Wilson K E, Lesh J R. Preliminary analysis of fluctuations in the received uplink-beacon-power data obtained from the GOLD experiments[EB/OL]. [2023-11-12]. https://ipnpr.jpl.nasa.gov/progress_report/42-124/124J.pdf.
- [135] Henniger H, Wilfert O. An introduction to free-space optical communications[J]. Radioengineering, 2010, 19(2): 203-212.
- [136] Sturza M. The teledesic satellite system: overview and design trades[EB/OL]. [2023-11-12]. https://www.academia.edu/11450518/THE_TELEDESIC_SATELLITE_SYSTEM_OVERVIEW_AND_DESIGN_TRADES.
- [137] Franz J, Jain V K. Optical communications: components and systems: analysis·design·optimization·application [EB/OL]. [2023-11-12]. <https://searchworks.stanford.edu/view/4500280>.