



DOI: 10.12086/oe.2020.190593

OAM 光通信技术研究进展

郭忠义^{1*}, 龚超凡¹, 刘洪郡¹, 李晶晶¹, 王子坤¹, 杨阳², 官玉彬²¹合肥工业大学计算机与信息学院, 安徽 合肥 230009;²电子科技大学电子科学与工程学院微波电真空器件国家重点实验室, 四川 成都 610054

摘要: 涡旋光束携带的轨道角动量(OAM)为光波的空间域提供了新的维度资源,吸引了越来越多研究人员的关注。由于具有不同 OAM 模式值的涡旋光束相互正交,因此将 OAM 模式引入传统光通信领域,衍生出两种新的应用机制——OAM 键控(OAM-SK)与 OAM 复用(OAM-DM),这为未来实现高速、大容量及高频谱效率的光通信技术提供了潜在的解决方案。本文将从 OAM 光束的类别和产生方法等基本概念理论出发,对这两种通信应用机制相关的典型研究案例做简要概述,并重点论述三种关键技术,包括 OAM 光束复用技术、OAM 光束解调技术以及 OAM 光通信的大气湍流效应抑制技术。最后,对 OAM 光通信技术的未来发展趋势及其前景进行了分析与展望。

关键词: 轨道角动量; 自由空间光通信; OAM 复用; 大气湍流

中图分类号: TN929.1

文献标志码: A

引用格式: 郭忠义, 龚超凡, 刘洪郡, 等. OAM 光通信技术研究进展[J]. 光电工程, 2020, 47(3): 190593

Research advances of orbital angular momentum based optical communication technology

Guo Zhongyi^{1*}, Gong Chaofan¹, Liu Hongjun¹, Li Jingjing¹, Wang Zikun¹, Yang Yang²,
Gong Yubin²¹School of Computer Science and Information Engineering, Hefei University of Technology, Hefei, Anhui 230009, China;²National Key Laboratory on Vacuum Electronics, School of Electronic Science and Engineering, University of Electronic Science and Technology of China, Chengdu, Sichuan 610054, China

Abstract: Orbital angular momentum (OAM) carried by the vortex beam provides a new dimension resource in the spatial domain of light waves, which attracting more and more researching attentions. Since the vortex beams with different OAM mode values are orthogonal to each other, the OAM mode is introduced into the field of traditional optical communication, and two new application mechanisms are derived: OAM shift keying (OAM-SK) and OAM division multiplexing (OAM-DM), which provides a potential solution for future high-speed, high-capacity and high-spectrum efficiency optical communication technologies. Based on the basic concepts and theories of OAM beam types and their generation methods, this paper will give a brief overview of typical research cases related to the application mechanisms of these two communication systems. Three key technologies have been discussed, including OAM beam multiplexing technology, OAM beam demodulation technology, and turbulence suppression technology of OAM-based optical communication. Finally, the future developing trends and prospects of OAM-based

收稿日期: 2019-10-03; 收到修改稿日期: 2019-11-04

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(61775050, 61531010); 中央高校基本研究经费(PA2019GDZC0098)

作者简介: 郭忠义(1981-), 男, 博士, 教授, 主要从事先进光通信技术、涡旋雷达技术、偏振智能信息处理、光电信息器件等的研究。E-mail: guozhongyi@hfut.edu.cn

版权所有©2020 中国科学院光电技术研究所

optical communication technology are analyzed and forecasted.

Keywords: orbital angular momentum; free-space optical communication; OAM multiplexing; atmosphere turbulence

Citation: Guo Z Y, Gong C F, Liu H J, *et al.* Research advances of orbital angular momentum based optical communication technology[J]. *Opto-Electronic Engineering*, 2020, 47(3): 190593

1 引言

近年来,随着现代信息技术产业的迅速发展,诸如物联网、电子商务、视频电话等大流量消耗型业务的不断兴起,人们对信息的需求量越来越大,网络带宽已逐渐达到瓶颈,因而扩大通信系统的通信容量已成为通信领域一个亟待解决的问题,对更多通信资源维度的发掘成为构建高速大容量的通信技术的必然趋势。与电子的有限维度不同,光子具有多个基本维度,如图 1 所示,包括波长/频率、时间、复振幅(幅度,相位)、偏振及空间域^[1-2]。所有与光波相关的应用几乎都是围绕光子的维度资源展开的,因此,通过对光子在这些物理维度上的操控,可以实现多种与光相关的应用^[2-3]。在传统光通信领域,信息载波调制主要是基于平面波,围绕光波的波长/频率、时间、偏振态等维度资源展开。相应地,各类复用技术,如波分复用(wavelength division multiplexing, WDM)、时分复用(time division multiplexing, TDM)、偏振复用(polarization division multiplexing, PDM)等,以及高级信号调制技术,如正交幅度调制(quadrature amplitude

modulation, QAM)、脉冲位置调制(pulse position modulation, PPM)、多进制相移键控等推动着光通信技术不断发展变革^[3-7]。然而,近年来对于这些已有维度资源的开发几乎达到了极限,容量危机仍然是光通信面临的极大挑战^[8]。

当前,光波空间域维度资源的开发为光通信的可持续扩容提供了新的思路,如以空间排布为基础发展起来的多芯光纤已经广泛应用于光纤通信领域,成为缓解容量需求的有效选择之一^[8-9]。此外,具有不同空间结构特征的结构光场提供了更具多样性的光场存在形式,也可在无线光通信系统中用于提升通信容量^[9],典型的结构光场包括具有空间变化相位分布的轨道角动量(orbital angular momentum, OAM)光场^[9-15]、具有空间变化偏振分布的矢量光场^[9-15]、具有空间变化幅度的厄米高斯光场^[9-15]等。这些结构光场凭借着其独特的空间分布特性,已被广泛应用到各个科学领域^[9-15],例如:光学操控、粒子捕获、成像、量子科学等。近年来,结构光场在光通信领域也有了新的应用,其中,具有空间相位变化的 OAM 光场更是成为了目前光通信领域的研究热点。

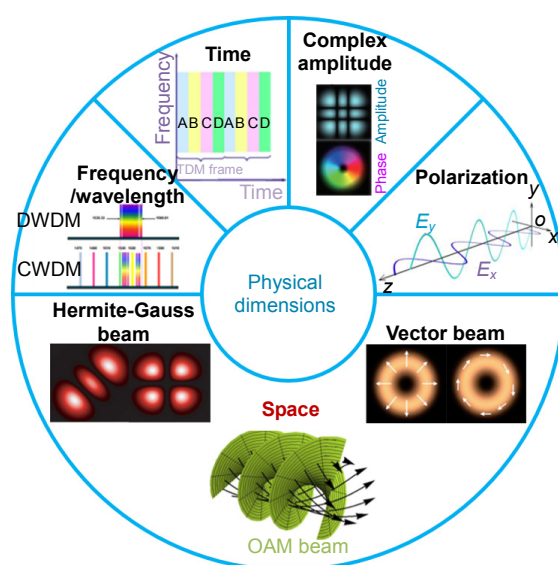


图 1 光子物理维度资源示意图

Fig. 1 Schematic illustration of physical dimension resources of photons

动量是物理学中的一个基本物理量。结构光束除了携带线性动量外，还可以携带角动量，其中又包括自旋角动量和轨道角动量(OAM)^[17-19]。自旋角动量与光波的圆偏振性质相关，轨道角动量(OAM)在经典力学和量子力学中被广泛研究，它与射线束的空间分布有关，是螺旋相位射线束的自然特性。20世纪70年代，Berry等^[16-17]提出并发展了相位位错、相位积点、涡旋光束等概念，在此基础上，Allen等^[18]于1992年通过实验进一步研究揭示了具有螺旋型相位波前的光束携带着OAM。由于螺旋型相位波前信息不确定性引起的强度相干相消，光束具有中心相位奇点，使得中心光场呈现出强度为零的环状光强分布，因此该光束也被称作涡旋光束。其携带 $\exp(il\varphi)$ 的相位因子，其中 l 称作为OAM的模式值或拓扑荷数，理论上可取任意整数， φ 为方位角，OAM光束中每个光子携带 lh 的OAM，其中 h 是约化普朗克常量(普朗克常量 h 与 2π 的商)

理论上，由于OAM模式值取值无限且携带不同整数阶OAM的光束之间相互正交，这启发了人们可将OAM光束的空间维度资源作为信息的载体，应用于自由空间光(free space optical, FSO)通信领域来摆脱通信资源日益紧缩的困境^[19]。随着研究人员的不断探索与发掘，当前，对于OAM光束在通信与信号处理方面的应用主要包括两种机制^[19]：其一是根据OAM模式值的取值多样性，实现数字信号到不同OAM光束之间的映射，每个OAM模式值代表一个数据比特。类比于振幅键控(amplitude shift keying, ASK)、频移键控(frequency shift keying, FSK)等调制技术，人们称之为OAM键控(OAM-SK)^[20-29]。其二是将OAM光束作为调制信号的载波，利用不同OAM光束之间的正交性来实现信道的多路复用，从而成倍地提升成信道容量。类比于WDM、TDM、PDM等复用通信技术，人们称之为OAM复用(OAM-DM)^[30-50]。

尽管基于OAM的FSO通信在提升信道利用率，增大信息传输容量等方面有较大优势，而且在星地通信、深空通信、拓展无线通信覆盖范围的超宽带通信等领域有潜在应用价值^[19]。但其在实际的应用设计及商业化进程中还面临着技术和传输环境这两个方面的挑战。对于技术方面的发展，为实现高质量通信性能的OAM光通信系统，如何将OAM光束的生成器做得集成度更高，如何设计更加高效的OAM复用及解调模块等仍是亟待解决的难题。此外，环境因素如大

气湍流、雾霾和障碍物等会对FSO光通信系统带来恶劣的信道传输环境，其对OAM光束相位的扰动，使得OAM信道间串扰急剧增加，大大降低了通信系统的性能，因此对湍流效应抑制方案的探究也是OAM光通信技术的重中之重^[19]。

本文全面综述了基于OAM的FSO通信基本理论及关键技术研究进展。在简要介绍OAM光束的基本概念、产生方案及OAM-FSO通信的应用机制后，对近些年OAM光束复用技术，OAM光束解调技术，以及OAM通信的湍流效应抑制技术的研究成果与进展进行了详细阐述。最后，对OAM光通信技术的未来发展趋势及其前景进行展望。

2 OAM光束的种类与产生方案

2.1 OAM光束的种类

常见的具有螺旋型相位波前的OAM光束有多种类型，不同的OAM光束的横截面光强分布不尽相同，但他们的共同特征是其中中心存在的相位奇点会导致光强呈现出具有中心暗核的环形分布。本节介绍几种常用于OAM-FSO通信系统的OAM光束，主要包括拉盖尔高斯光束、贝塞尔高斯光束、完美涡旋光束以及矢量涡旋光束等。

2.1.1 拉盖尔高斯光束

拉盖尔高斯(Laguerre-Gaussian, LG)光束是目前OAM-FSO通信系统中应用最为广泛的OAM光束，它是在傍轴近似的条件下，亥姆霍兹方程在柱坐标系中的特解，其光场分布满足^[18]：

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

其中： $k=2\pi/\lambda$ 为波数， λ 为波长， l 为OAM模式值或称作拓扑荷数，代表沿着方向角的相位变化， p 为径向模式值，代表沿半径方向的相位变化。 $w(z) = w_0\sqrt{1+(z/z_R)^2}$ ， w_0 是高斯项光束半径， $z_R = \pi w_0^2/\lambda$ 表示瑞利距离， $L_p^{|l|}$ 为拉盖尔多项式， $(2p+|l|+1)\arctan(z/z_R)$ 为Gouy相位。典型LG光束的光强及相位分布如图2(a)所示。携带有不同OAM模式或径向模式值的LG光束之间满足相互正交的数量关系，且由于LG光束在实验生成上相对简便，因

此 LG 光束是 OAM 光通信信号载波的热门选择之一。

2.1.2 贝塞尔高斯光束

另一种常用于 OAM-FSO 通信系统的光束是贝塞尔(Bessel)光束。与 LG 光束类似,贝塞尔光束也具有螺旋相位结构。理想情况下,贝塞尔光束光强分布在垂直于传播方向的截面上表现为贝塞尔函数形式。值得一提的是,具有无穷大横截面积的理想贝塞尔光束需要无穷大的能量才能实现,因此在实际的工程应用中,通常对理想贝塞尔光束进行高斯截断来获得近似的贝塞尔光束,即贝塞尔高斯(Bessel-Gaussian, BG)光束,其光场表达式为^[51]

$$BG(r, \theta) = J_l(\alpha r) \exp(i l \varphi) \exp\left(-\frac{r^2}{w^2}\right), \quad (2)$$

其中: α 是横向波数, l 既是贝塞尔函数的阶数也是 BG 光束的 OAM 模式值, $\exp(-r^2/w^2)$ 代表基模高斯光束。当 $l \neq 0$ 时, J_l 是第 l 类零阶贝塞尔函数,其光强及相位分布如图 2(b)所示,呈现出中间一个亮圈,外部由几个不同直径同心旁瓣圆环的形式。作为一种无衍射光束,BG 光束还有 LG 光束所不具有的自恢复特性,

这使得在传输信道环境恶劣(如存在微小障碍物)的情况下,受阻挡的 BG 光束能在经过一段距离的传输后恢复原来相对稳定的复振幅分布,凭借这一优势,BG 光束在 OAM-FSO 通信系统中得到了广泛运用^[28,52-55]。

2.1.3 完美涡旋光束

无论是 LG 光束还是 BG 光束,其光束直径都会随着 OAM 模式值的增大而增大,这在长距离传输后不利于接收端的探测耦合。2013 年, Ostrovsky 等^[56]利用加载在空间光调制器(spatial light modulator, SLM)上的独特相位模式,在远场生成了一种光场亮环半径不随 OAM 模式值增大而改变的新型光束,并称之为完美涡旋光束(perfect optical vortex, POV),其复振幅表达式为^[56-57]

$$E_{\text{perfect}}(r, \varphi) = \delta(r - r_0) \exp(i l \varphi), \quad (3)$$

其中: $\delta(r)$ 是用来限制涡旋光束直径的狄拉克函数。 r_0 为 POV 半径。由于狄拉克函数只存在于理想状态下,因此在实验环境下生成符合式(3)的 POV 是相当困难的。而对理想状态下的贝塞尔光束进行傅里叶变换得到的复振幅分布仅与式(3)相差一个比例系数^[57-58],因

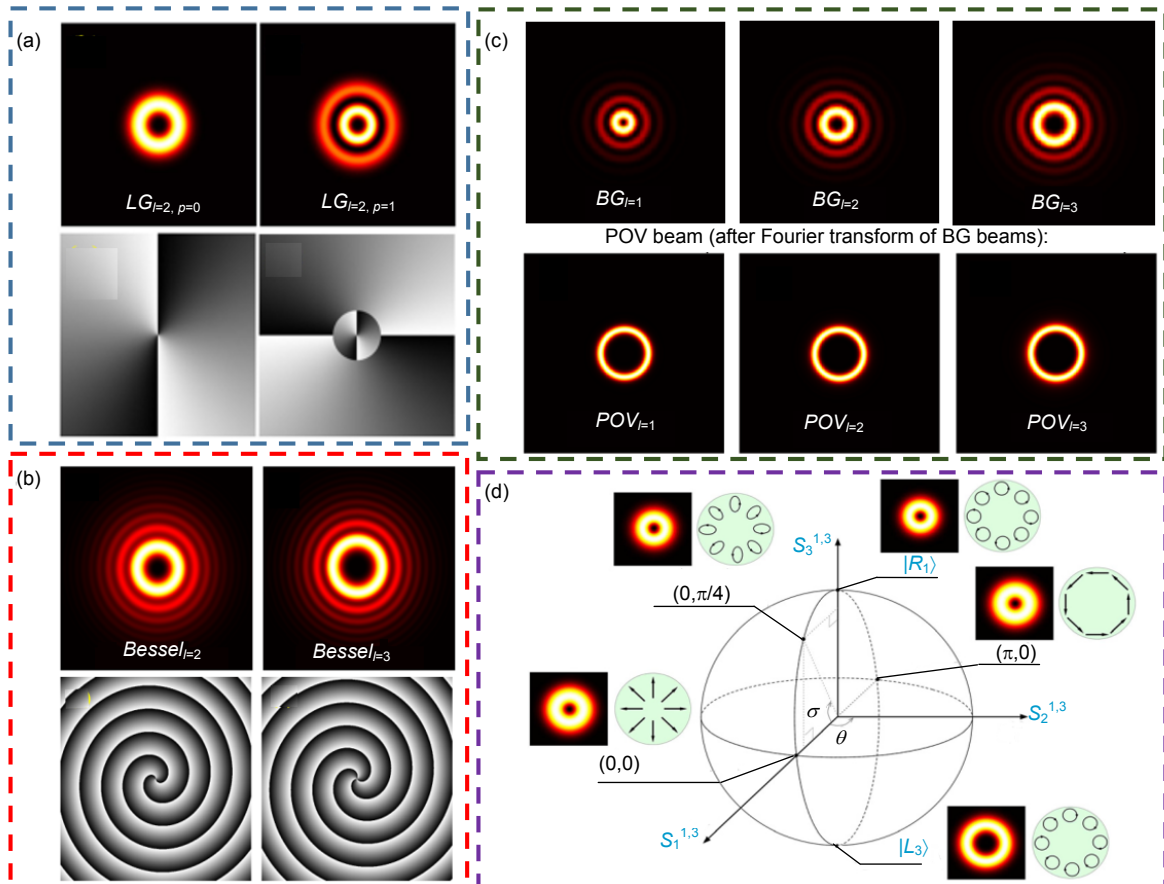


图 2 几种常见的 OAM 光束。(a) LG 光束; (b) POV 光束; (c) BG 光束; (d) 庞加莱球表示的 VV 光束^[68]

Fig. 2 Several common OAM beams. (a) LG beams; (b) POV beams; (c) BG beams; (d) VV beams represented by Poincaré sphere^[68]

此,在实际中人们常对 BG 光束进行傅里叶变换即可得到近似于式(3)的光场分布,其复振幅表达式为^[57]

$$E_{\text{BG-perfect}}(r, \varphi) = \int_0^\infty \int_0^{2\pi} \rho \text{BG}(\rho, \theta) \cdot e^{-i2\pi r \cos(\varphi-\theta)} \rho d\rho d\theta$$

$$= \frac{k}{f} i^{l-1} e^{i\varphi} \int_0^\infty J_l(\alpha r) J_l\left(\frac{kr\rho}{f}\right) e^{-\frac{\rho^2}{w^2}} \rho d\rho \quad (4)$$

POV 的优势在于携带任意 OAM 模式值的光束半径几乎一致,如图 2(c)所示,这使得在实现较长距离的 OAM 通信实验时,采用 POV 能减小能量的发散,从而可以大大降低接收端的接收难度^[59-60]。

2.1.4 矢量涡旋光束

随着光场调控技术研究的不断发展,具有横截面偏振态各向异性分布,同时又携带有 OAM 的光束引起了人们的关注,这种新型 OAM 光束通常被称为矢量涡旋(vector vortex, VV)光束^[61-62],其在 OAM-FSO 通信、激光加工等领域也具有重要的应用价值^[62-67]。一束矢量涡旋光束 $|\psi\rangle$ 可以在正交圆偏振基底 $\{R_m, L_n\}$ 上分解为两束携带不同 OAM 的涡旋光束^[62]:

$$|\psi\rangle = \psi_R^l |R_R\rangle + \psi_L^l |L_L\rangle \quad (5)$$

其中: $|R_R\rangle$ 和 $|L_L\rangle$ 分别代表了携带拓扑荷为 l_R 和 l_L 的右、左旋圆偏振态,复系数 ψ_R^l 和 ψ_L^l 表征 $|R_R\rangle$ 和 $|L_L\rangle$ 的振幅和初始相位。随着广义庞加莱球模型的提出,矢量涡旋光束也得到了更好的表征^[67-68],如图 2(d)所示,用庞加莱球法从几何角度对 $l_R=1, l_L=3$ 的矢量涡旋偏振态进行直观描述,球上每个点 (θ, σ) 的位置由与 $\{l_R, l_L\}$ 相关的经度 θ 和纬度 σ 确定,其中球的两极表征的是左、右旋圆偏振态,赤道上各点表征振动方向不同的线偏振态,其他任意一点表征着椭圆偏振态。目前,基于 VV 的 OAM 光通信技术仍处于起步阶段,其具体的应用场景还有待于人们进一步发掘^[63-66]。

目前,针对上述几种 OAM 光束物理特性的研究已经较为成熟,而对于工程应用领域,尤其是 OAM-FSO 通信领域,这些 OAM 光束凭借着其各自不同的特性也表现出不同的应用前景。通常,相比于 BG 光束、POV 光束和 VV 光束, LG 光束在实验中生成所需的光学器件较为简单且成本相对较低(在 2.2 节中详细介绍),因此其是目前 OAM-FSO 通信系统中应用最为广泛和成熟的 OAM 光束。而对于 BG 光束,凭借着遇障碍物后的自恢复特性,其更适合应用于复杂信道环境下的 OAM-FSO 通信系统。对于 POV 光束,由于 POV 光环半径与 OAM 模式取值无关的这一重要特性,其很好地解决了接收孔径有限时, OAM 模式值较大的 LG 光束和 BG 光束的光环半径过大而带来

的不易于接收的问题。同时,需要指出的是,由于 POV 只有在傅里叶透镜的焦点处产生,在焦点位置前后仍然是 BG 光束,所以过去在实验上往往通过在透镜焦点处放置一块显微物镜并在其后续级联一个透镜来对光束进行准直的方法维持 POV 的长距离传输^[59-60]。因此,在接收机孔径有限且要实现较长距离的 OAM-FSO 通信时, POV 光束将会是较好的选择之一。此外,对于 VV 光束,目前的研究多在其本身的物理特性上,对其具体的应用场合(如 OAM-FSO 通信)的研究仍然处于起步阶段,其具体的应用场景还有待于研究者们将来去进一步在理论和实验上去细致探究。

2.2 OAM 光束的产生方案

高质量 OAM 光束的产生是 OAM 光通信系统成功运行的关键。目前, OAM 光束的产生方案主要分为有源和无源两类。其中,有源方案主要利用激光腔直接输出 OAM 光束^[69-73]。基于该类方案直接产生的 OAM 光束具有良好的光束质量,因而获得了广泛的研究。当泵浦光输入到激光腔时会产生包含基模在内的多种共振模式,激光腔可对光束的横向模态进行调控,进而可控制出射光束的空间分布、偏振和传播特性。因此若要产生 OAM 光束,则需要对激光腔进行特殊设计,迫使激光在特定应用所需的选定单模上振荡,从而获得 OAM 光束。常用的方法有利用激光增益介质的热透镜效应进行横向模式选择^[69]以及插入特殊设计的元器件,如带有缺陷点的透镜^[71-72]等。近年来,直接在激光腔中产生 LG 模式,而不需要插入额外元器件的方法也被提出。例如,可以利用双端极化泵浦技术与离轴泵浦技术相结合,在 Z 型腔内产生涡旋光束^[73]。然而,这些方法通常需要较高的泵浦光功率或特殊设计的元件,效率相对较低,其产生功率受到一定的限制,也不易产生高阶 OAM 模式。相反地,无源方案主要指在腔外通过转换器件将普通的高斯光束转换成 OAM 光束,该方案凭借着其实现简单、灵活、可控性强、实现方式多样等特点,目前已成为 OAM 光束产生的主流方案。其常用的 OAM 转换器件包括螺旋相位板(SPP)^[74-79]、衍射光学元件^[80-84]、模式转换器^[18, 85]、q 板^[86-89]、J 板^[90]、超材料或超表面^[91-98]、基于光纤的器件^[99-105]、光子集成器件^[106-111]等。

螺旋相位板(SPP)是一种最为直接、高效的转换器件^[74-79],是一种表面呈螺旋阶梯状分布的透明板,如图 3(a1)所示,其厚度 h 沿角向逐渐增大。由于不同方位角上厚度的不同,引起透射光光程差的不同,进而

造成不同方位角上相位差的变化,这使得具有平面等相位的光束入射共轴放置的 SPP 后可产生具有螺旋相位的 OAM 光束。SPP 具有很高的转换效率,可用于大功率激光束的转换。但是,每种 SPP 只能产生一种模式的 OAM 光束,并且在加工上具有非常严格的精度要求。

更为灵活、快捷的方案是通过可重构的衍射光学元件产生 OAM 光束,例如,空间光调制器(SLM)^[80-82]、

数字微镜(digital micromirror display ,DMD)^[83]等。SLM 是一种像素化的液晶器件,其液晶分子可以通过编程来动态改变入射光束的参数,包括横向平面上的光束相位,从而产生 OAM 光束^[80-82]。一般来说,为了产生 OAM 光束,加载到 SLM 上的为相位全息图^[84],其可以为螺旋相位形式(如图 3(a2)所示)、叉形全息图形式(如图 3(a3))或二值化的叉形光栅形式。相对比其他的调制方法,SLM 在提高效率、降低能耗、提高转换

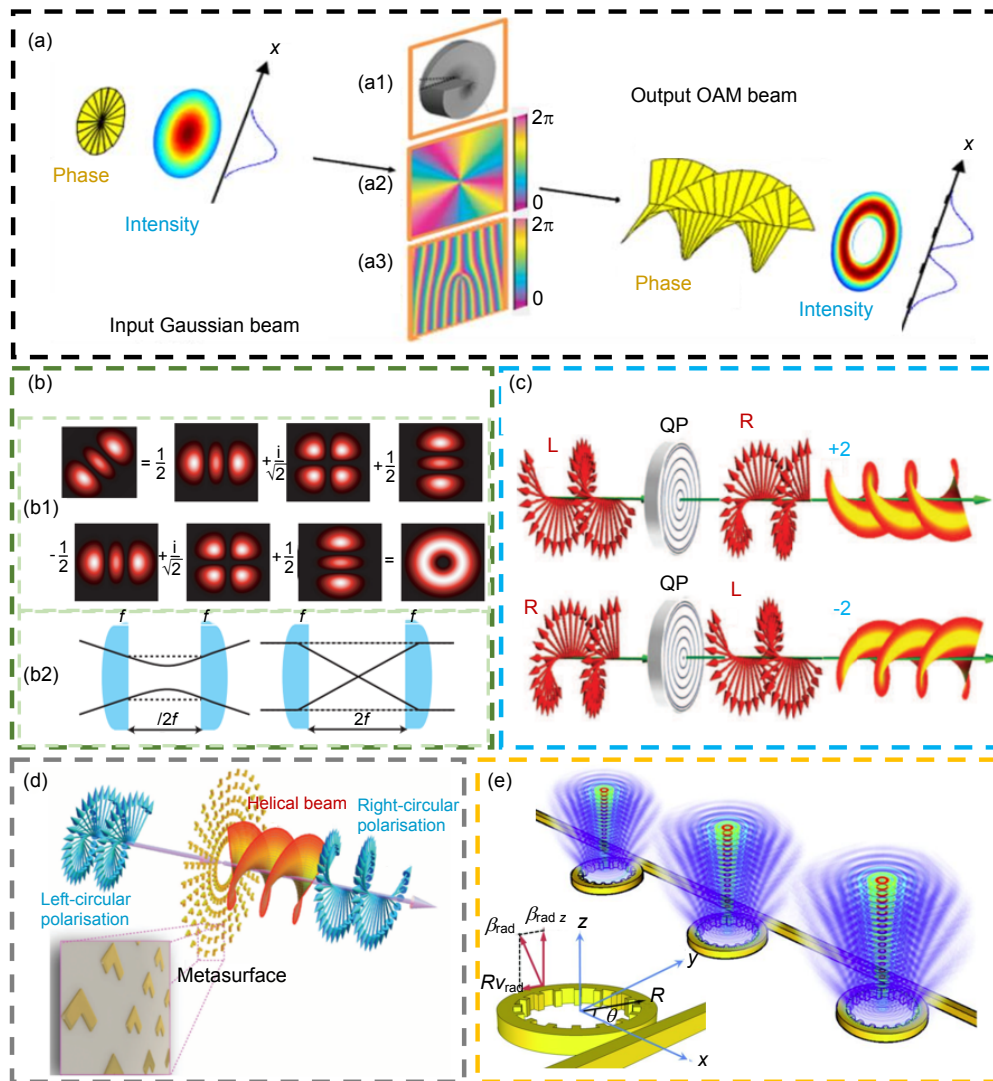


图 3 (a) 利用螺旋相位板(SPP) (a1), 螺旋相位全息图(a2), 叉形光栅(a3)产生 OAM 光束示意; (b) 利用模式转换器将 HG 光束转化为 LG 光束, (b1) 2 阶 HG 模的分解及 LG 模式的合成^[19], (b2) $\pi/2$ 模式转换器及 π 模式转换器^[19]; (c) q 板对圆偏振光的作用^[89]; (d) L 形天线组成的超表面产生 OAM 光束^[92]; (e) 微环谐振器产生 OAM 光束^[106]

Fig. 3 (a) OAM beams generated by spiral phase plate(SPP) (a1), spiral phase hologram (a2), forked hologram(a3); (b) HG beam to LG beam with mode converter, (b1) decomposition of 2nd order HG mode and the composition of a LG mode^[19], (b2) $\pi/2$ and π mode converters^[19]; (c) Illustration of q plate's function to input circularly polarized plane-wave light^[89]; (d) OAM generated by metasurface composed of L-shape antennas^[92]; (e) Illustration of the microring resonator to generate OAM beams^[106]

速度和质量方面均具有明显的优势。但是 SLM 相对昂贵,并有一个能量阈值,使其无法使用高功率激光束。近年来,在液晶 SLM 的基础上,又引入了一种名为 DMD 的衍射光学元件,该元件成本低、刷新速度快,但衍射效率相对较低^[83]。

模式转换也是目前产生 OAM 光束的方案之一。利用柱面透镜可以将厄米-高斯(HG)光束转换为 LG 光束^[18,85]。图 3(b1)展示了 2 阶 HG 模的分解及 LG 模式的合成示意图,图 3(b2)为柱面透镜组成的 $\pi/2$ 模式转换器及 π 模式转换器。尽管柱面透镜模式转换器转换效率高,生成的 OAM 光束纯度高,但其对结构精度要求较高,同时由于需要非常精确的入射角,灵活性相对较差。

利用局域偏振变化引入螺旋相位,这类 OAM 光束的转换器件称为 q 板^[86-89]。q 板一般由双折射晶体构成,晶体快慢轴之间的相位延迟为 π ,空间各点光轴方向与方位角 φ 有关,表示为 $\alpha(r,\varphi) = q\varphi + \alpha_0$ 。如图 3(c)所示,当左旋或者右旋圆偏振光经过 q 板时,受双折射晶体光轴取向的影响产生 Pancharatnam-Berry 相位,入射光束会经历 $\exp(il\varphi)$ 的相位变化,其中 $l = 2q$,并且圆偏振光的偏振态也会发生反转。q 板能够产生纯的 OAM 模式,但是它也有一个能量阈值的限制,因此不能与大功率激光束一起使用。并且,由于设计的对称性(只有元素的旋转角度不同),输出的 OAM 模式不是独立的,且转换对象只限于圆偏振。而进一步改进的 J 板可以克服这些限制,可实现任何正交偏振态到完全独立的 OAM 模式的转换^[90]。

然而,利用光学元器件产生 OAM 光束的传统方案面临着所需器件体积较大且不易集成的挑战。近年

来,超材料和超表面的发展为 OAM 光束的生成提供了新的解决方案^[91-98]。超表面作为平面超薄光学元件,通常由亚波长结构单元组成,如 L 形天线^[92](如图 3(d))、V 形天线^[93]等。基于光的反射和衍射原理,通过控制亚波长结构单元或高折射率的介质材料的结构参数(如形状、尺寸、方向等)来控制反射、衍射光束的相位、振幅或偏振态。使用超材料或超表面的最大优点是其体积小,便于集成,这使得该方案成为未来产生 OAM 光束的可替代方案之一。

此外,基于光纤集成链路的方案也可实现 OAM 光束的高效产生。利用光纤产生 OAM 光束主要包括三种方法^[99-105]: 光纤耦合转换法、光子晶体光纤转换法和光波导器件转换法。OAM 光束还可利用光子集成器件^[106-111]来产生,如微环谐振器^[106]等,其构造如图 3(e)所示,微环谐振器内谐振的回音壁模式具有螺旋型的相位分布,通过在其侧壁上引入角向光栅,通过调控角向光栅的周期数和回音壁模式的阶数可控制耦合到自由空间光束的 OAM 模式数。相较于分立的光学元器件,基于光子集成器件的 OAM 产生方案由于其可靠、紧凑、可扩展性的优势而获得了广泛应用。常用的不同 OAM 光束产生方案在多个方面的性能比较如表 1 所示。

3 OAM 通信应用机制

在传统 FSO 通信领域,信息载波调制主要是基于平面光波的波长/频率、时间、偏振态等维度资源展开,而 OAM 模式可充分利用空间维度资源,且凭借着携带不同 OAM 模式值的光束之间相互正交的特性,将其应用于自由空间(FSO)光通信领域可摆脱传统光通

表 1 不同 OAM 光束产生方案的性能比较

Table 1 Performance comparison of different schemes of generating OAM beams

	SPP	SLM	DMD	Mode conversion	Q-plate	Metasurface	Optical fiber integration	Photonic integration
Cost	Low	High	Normal	Low	High	Low	Normal	Normal
Speed	Normal	Fast	Fast	Normal	Fast	Normal	Fast	Fast
Conversion efficiency	Normal	High	Low	Relatively high	Relatively high	Relatively high	High	High
OAM mode	Single	Single /multiplex	Single /multiplex	Single	Single	Single	Single /multiplex	Single /multiplex
Processing difficulty	High	High	High	Low	Low	High	High	High
System complexity	Low	Low	Low	High	Low	Low	Low	Low

信领域信道容量受限的困境^[19]。当前,对于 OAM 光束在通信中的应用机制主要包括以每个数据比特映射为不同 OAM 模式值的 OAM 键控(OAM-SK)通信^[20-29],以及将 OAM 光束作为调制信号载波的 OAM 复用通信(OAM-DM)^[30-50]。本节将分别对这两种 OAM 通信应用机制相关的典型研究案例做简要概述。

3.1 OAM-SK 通信

早在 2004 年, Gibson 等^[20]就成功利用 OAM-SK 机制构建了 15 m 的 FSO 通信实验链路,并实现了数据的传输和接收。如图 4(a1)所示,实验中准直的 He-Ne 激光入射到 SLM 上,通过不断刷新加载在 SLM 上的全息图,入射光束被转换为 8 个不同的 OAM 模式值的 OAM 光束,并经自由空间传输,在接收端通过 SLM 上加载的二维叉形光栅全息图进行 OAM 解调。如图 4(a2)所示,光束将被分成 9 个与 OAM 模式值对应的衍射级次,其中心光束用于对准。通过每个衍射级是否出现中心亮斑,来确定入射光束中是否有相应的 OAM 模式成分。

2008 年, Liu 等^[21]提出了一种使用静态二值振幅光栅和道威棱镜实现两螺旋光束叠加的方法,该方法仅通过旋转道威棱镜即可实现两 OAM 光束的 10 种不同的同轴叠加方式,进而可构建出 OAM-SK 编码系统,简化了编码装置。

为了验证长距离 OAM-SK 通信的可行性,2014 年, Krenn 等^[22]在维也纳市上空进行了 3 km 传输距离的基于 OAM 模式叠加态的编译码通信实验。如图 4(b)所示,激光器发射出的光束经 SLM 调制后产生 OAM 模式,后经望远镜系统对光束扩大,并利用一个高质量的大焦距镜头发射到接收端。在接收端, CCD 相机用于捕获投射在接收屏幕上的强度模式分布,并收集到的光强图像集送入计算机,再利用机器学习技术来完成解调任务。通过测量串扰矩阵,该系统的解调错误率为 1.7%。为进一步检验通信质量,该课题组尝试将两张灰度图像的每个像素值映射到 16 个 OAM 模式上,利用键控编码技术进行图像信息传输,两张图片均取得了良好恢复效果。2016 年,该课题组进一步进行了 143 km 长传输距离的 OAM-SK 编译码实验^[23]。如图 4(c)所示,由于超远距离传输的 OAM 光束会出现发散的问题,该实验中接收的光束直接打在“光学地面站”的墙壁上用以观察,在用像机记录光斑图像后,再利用机器学习技术对光斑图像进行分类识别,测得的总误码率为 8.33%,证实了在超过 100 km 的自由空

间中进行 OAM-SK 通信的可行性。

由于 OAM-SK 通信系统中 SLM 的刷新速率相对有限,直接限制了单位时间内的通信容量,为了实现高速 OAM-SK 光通信,2015 年, Willner 等^[24]用切换速率可达 10 GHz 的高速光开关高速切换不同 OAM 模式,将连续激光转换成四个 OAM 模式构成的模组中的任意一个,从而完成高速映射编码。编码后每个码元周期内的状态占据 N 种可能模式中的一种,因此完成映射编码后,每个码元包含 $\log_2 N$ 个比特($N=4$)。该工作中,基于该快速光开关的切换,实现了 20 Gbit/s 的 OAM 高速编译码通信。同时,OAM 跳模通信的可行性也在该工作中被进一步研究。如图 4(d)所示,其原理类似传统通信中的跳频技术,通过跳模控制器在不同时间窗口中从 OAM 模组中选择任意一种 OAM 模式承载信息。值得注意的是,该工作中进行 OAM 模式跳模通信时,并不使用 OAM 模式值本身进行数据信息的键控编码,而是将已有 100 Gbit/s 的 QPSK 数据信号先加载在光波上,之后再跳模切换到不同 OAM 模式上,并且在跳模过程中需要一个与跳模开关切换时间相对应的保护时间,以便保证信息的有效恢复。

OAM 光束本身具有的空间维度资源还可以与物理空间维度联用,使得 OAM-SK 通信的信道容量呈几何增长。2017 年, Li 等^[25]提出了一种利用 OAM 阵列的通信方案。其原理如图 4(e)所示,使用阵列光源产生入射光束,利用 SLM 对空间阵列进行编码,不同的 OAM 模式在不同空间位置生成,通过改变不同空间位置生成的 OAM 模式获得不同的阵列状态,一个阵列状态代表一个码元。以用于编码的 OAM 模式数 $N=2(l=1,2)$ 为例, OAM 模式阵列空间位置数量等于 $4(n=4)$,则总状态数为 $N^n = 2^4 = 16$,与基于单个空间位置键控编码方案的信息量相比提升了 8 倍。OAM 模式与光束的振幅维度资源相联用也是提升信道容量的可行性方案之一。2018 年, Fu 等^[26]提出一种基于 OAM-ASK 的数据传输方案。如图 4(f)所示,该方案可对两个独立维度、OAM 模式和振幅分别进行调制。假设 OAM 模式和光束振幅分别用于表征 n 元和 m 元符号,则当两个维度同时使用时,总共可生成 $\log_2 mn$ 个比特信息,因此该方案可以使用更少的 OAM 模式数来实现更高位的编码,有效扩充信道容量。

在 OAM-SK 光通信系统中,对复用和解调技术的优化也是研究的重中之重。2017 年,合肥工业大学郭

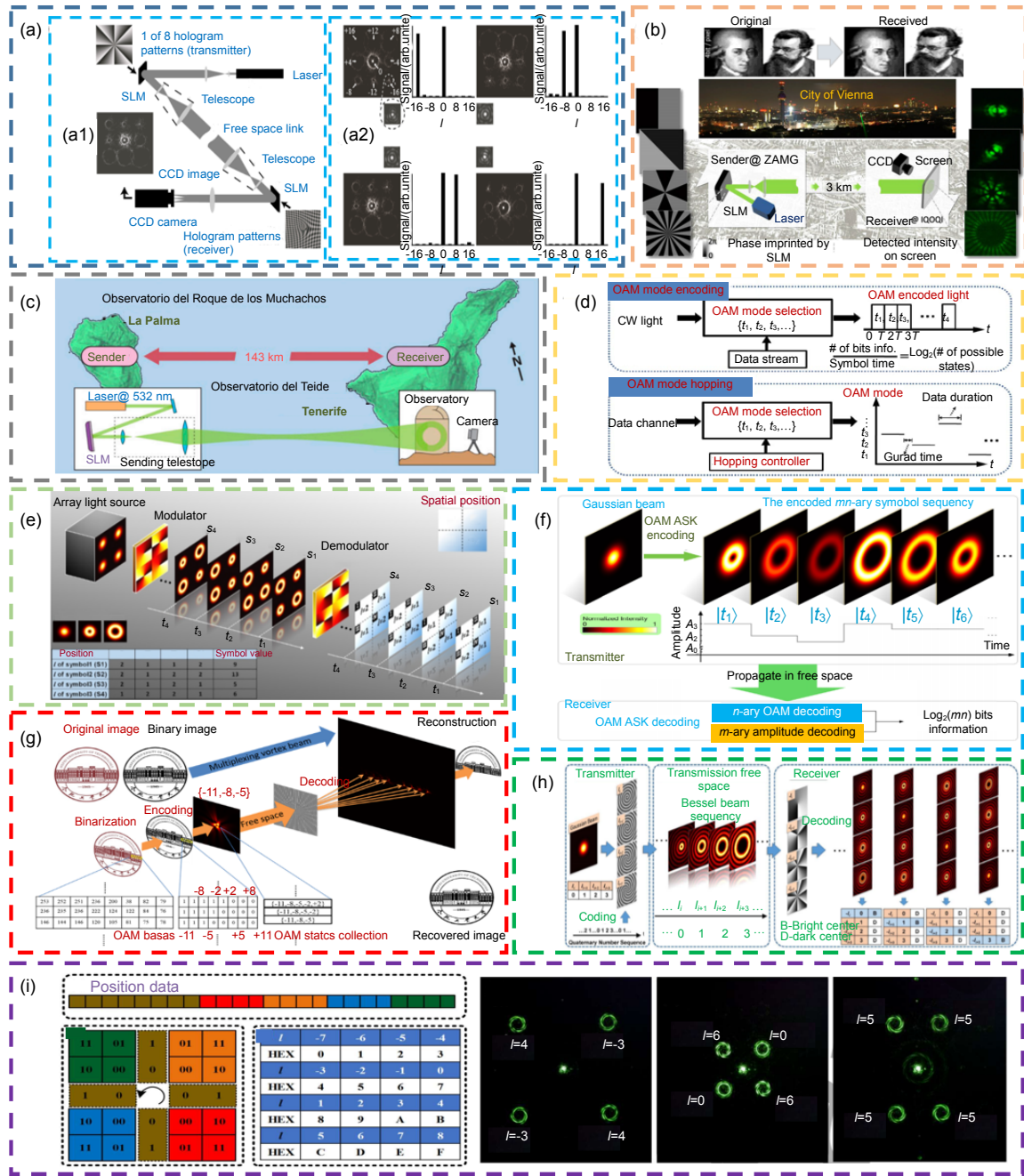


图 4 (a) 基于 OAM-SK 的 FSO 通信方案, (a1) 系统实验装置, (a2) OAM 模式解调结果(部分)^[20]; (b) 基于 OAM 模式叠加态的编译码通信方案^[22]; (c) 143 km 传输距离的 OAM-SK 编译码通信方案^[23]; (d) 高速通信中 OAM 模式数据编码和 OAM 跳模通信概念^[24]; (e) 基于 OAM 空间阵列的通信方案^[25]; (f) OAM 模式和振幅分别进行调制的 OAM-ASK 方案^[26]; (g) 采用计算全息图实现高效的 OAM-SK 通信^[27]; (h) 基于贝塞尔光束 OAM-SK 方案^[28]; (i) 基于 POV 的 OAM-SK 方案^[29]

Fig. 4 (a) FSO communication scheme based on OAM-SK, (a1) system experimental device, (a2) demodulation results of OAM modes (partial)^[20]; (b) Coding/decoding communication scheme based on superposition of OAM modes^[22]; (c) OAM-SK communication scheme with a transmission distance of 143 km^[23]; (d) Concept of data encoding and OAM channel hopping in high-speed communication^[24]; (e) Communication scheme based on space array of OAM modes^[25]; (f) OAM-ASK scheme based on OAM mode and amplitude modulation respectively^[26]; (g) Efficient OAM-SK communication based on computational hologram^[27]; (h) OAM-SK system scheme based on Bessel beam^[28]; (i) OAM-SK system based on POV^[29]

忠义研究团队^[27]对设计传统相位全息图所需的迭代算法进行优化,通过改变迭代步长来扩大权重系数的选择范围,同时在不同步长下都使用相同迭代算法来进行并行计算,从而设计出最优的计算全息图并用于 OAM 光束的产生与解调。该方案通过传输一张灰度图像,验证了其设计的计算全息图的高效转换效率,其通信系统框图如图 4(g)所示。

值得注意的是,对于一般的 OAM-SK 通信系统而言,当传统 OAM 光束(如 LG 光束)在自由空间传输时易受到障碍物的影响,部分或完全遮挡光路会导致链路连接中断,从而降低通信质量。因此人们也将视线转向具有无衍射特性的贝塞尔光束在光通信中的应用。2015 年, Du 等^[28]利用贝塞尔光束成功实现了 12 m 多进制 OAM-SK 光通信,如图 4(h)所示,在发送端多进制数字序列信号映射到不同贝塞尔螺旋相位模式,并加载到 SLM 上从而将入射高斯光束转换成不同的随时间变化的 BG 光束序列。在完成键控编码过程后,接收端通过反相位板进行解调译码。该实验探究了不同 OAM 模式值的贝塞尔光束的 16 进制和 32 进制编译码性能。其实验结果表明,即使在传输路径上存在一定的障碍物,接收端仍能实现零误码率的高质量通信性能,这使得基于贝塞尔光束的 OAM 通信成为光通信领域的另一个研究热门。

此外,基于 POV 的 OAM-SK 系统也是人们重点关注的对象。2019 年, Li 等^[29]提出了一种基于傅里叶变换定理的二维 POV 阵列的生成方法,以及一种二维 POV 阵列的十六进制编解码方案,实现了高容量的数据传输。如图 4(i)所示,其编码的数据序列包含各 POV 的位置和 OAM 模式值信息,可以通过向特殊设计的纯相位光栅中加入相移因子来调制。基于位置和 OAM 模式信息,二维 POV 阵列可以实现 SDM 和 OAM-SK 的功能,该方案为大容量光通信系统的设计提供了新思路。

3.2 OAM-DM 通信

与传统 FSO 光通信相比, OAM-DM 通信机制相当于将承载调制信号的高斯载波替换为 OAM 光束,每束载波的 OAM 模式在时序上连续不变,而利用正交性,若干 OAM 载波光束的复用可极大提升通信容量,且具有高光谱效率低误码率的优势,因此, OAM-DM 通信一度成为 OAM 光通信的研究热点。而为了实现更高速率的通信, OAM-DM 通常与偏振复用、波分复用、空间复用等技术相结合,这使得

OAM-DM 系统的 OAM 复用信道数、频谱效率和传输容量不断被突破^[30-50]。

2010 年, Awaji 等^[30]实验上实现了 2 个携带 10 Gbit/s 信号 OAM 光束的复用传输,如图 5(a)所示,该工作是 OAM-DM 通信机制的雏形,为后续工作奠定了基础。2011 年, Wang 等^[31]利用 LG 光束实现了四路复用的通信链路,该实验中 LG 光束搭载 10.7 Gbaud 的 16-QAM 信号进行 DM 传输,其频谱效率达到 12.8 bit/s/Hz 且信道串扰小于 -20 dB。在此基础上该课题组利用偏振维度资源,将 OAM-DM 与偏振复用相结合,使得频谱效率翻倍达到 25.6 (bit/s)/Hz^[32]。同年,他们再利用上波长维度资源,将两路 OAM 模式和每个 OAM 模式的 25 个 WDM 信道相结合,实现了传输速率为 2 Tbit/s 的 FSO 光通信链路^[33]。2012 年,该课题组通过 4 路 OAM 光束与两种偏振态一起复用/解复用实现了 1.37 Tbit/s 的 OAM-DM 自由空间光通信^[34]。如图 5(b1)所示,该系统中 4 路 OAM 模式与两偏振态结合,分别加载 42.8 Gbit/s \times 4 的 16-QAM 信号,总传输速率达到约 1.37 Tbit/s,频谱效率 25.6 (bit/s)/Hz。同时,该工作中利用物理空间维度资源,如图 5(b2)所示,通过复用 8 个半径不同的同心 OAM 信道,系统容量可进一步扩展到 2.26 Tbit/s,频谱效率高达 95.7 (bit/s)/Hz。此外,该工作中还利用反射型 SLM 实现了不同 OAM 模式间所携带数据信息的交换。如图 5(b3)所示,携带不同 100 Gbit/s 数据信息且 OAM 模式值不同(l_1, l_2)的光束入射到加载 OAM 模式值为 $-(l_1 + l_2)$ 的 SLM 上后,两 OAM 光束的模式值转换为 $-l_2$ 和 $-l_1$,再经过反射的“镜像”转换,最终得到 OAM 模式值互换的两 OAM 光束,成功实现了所携信息的交换功能,且功率代价小于 2.1 dB,提高了通信链路中数据处理和管理的灵活性。该项工作在国际上产生了重要影响,为高速光通信的可持续发展提供了新方法。2013 至 2015 年间,该课题组进一步利用 OAM-DM 与现有通信资源维度的融合,在通信容量与频谱效率上不断突破,相继利用 12 个 OAM 信道结合双偏振态与 42 个波长,实现高达 100.8 Tbit/s 的通信容量^[35-36](如图 5(c))。利用双偏振 22 个 OAM 信道实现 230 (bit/s)/Hz 的频谱效率^[37]。通过双偏振 26 个 OAM 信道并覆盖 C+L 波段 368 个波长实现了 1.036 Pbit/s 的通信容量^[38]。利用 52 个 OAM 信道结合双偏振模式实现高达 435 (bit/s)/Hz 的频谱效率^[39]。

2015 年, Lei 等人^[40]利用达曼涡旋光栅(DOVG)进

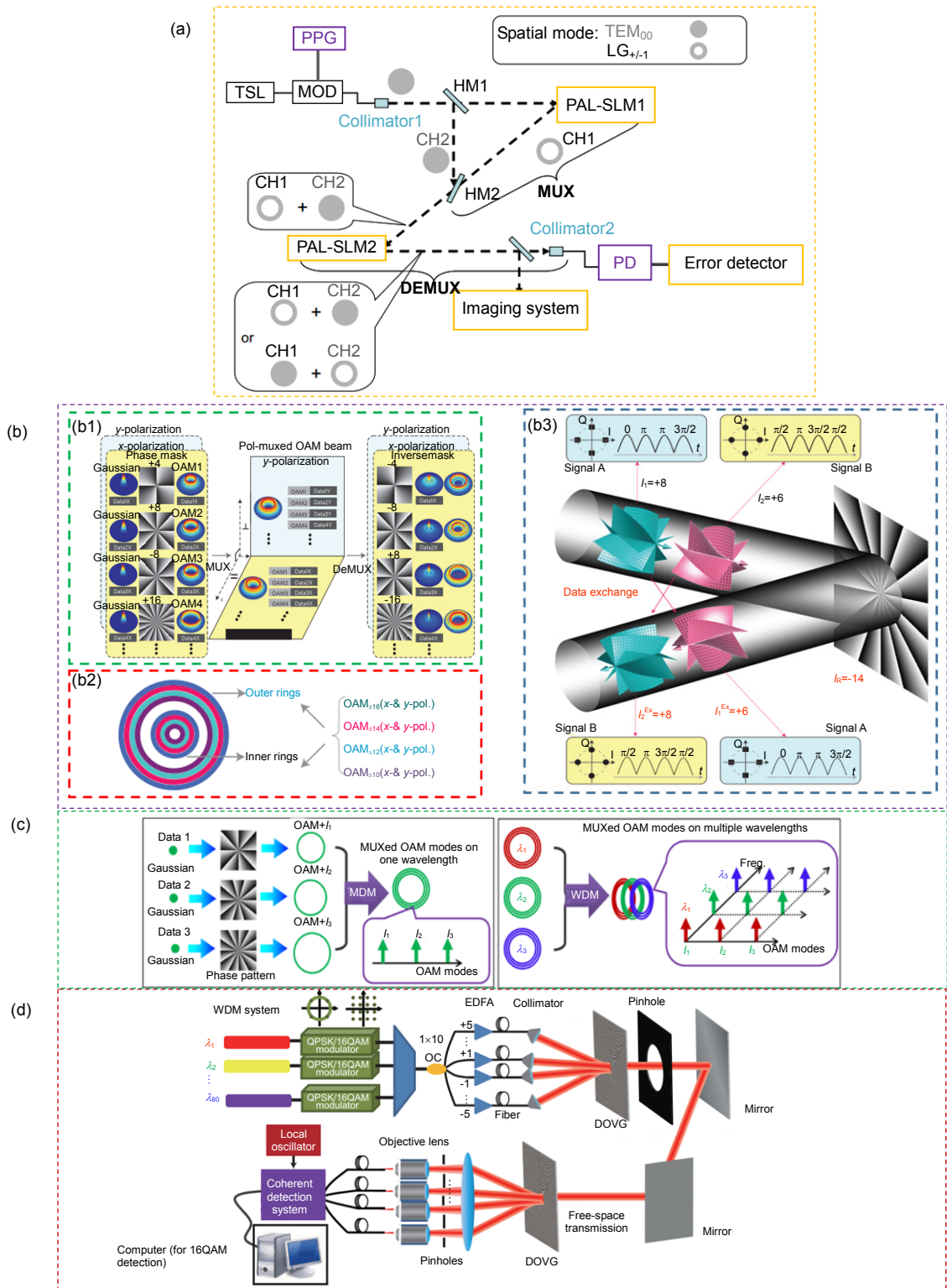


图5 (a) 2束OAM光束复用传输的实验方案^[30]; (b) 利用偏振与空间维度资源的OAM-DM方案, (b1) 利用偏振维度的OAM-DM方案, (b2) 利用物理空间维度的OAM光束叠加方案, (b3) OAM光束间数据交换方案^[34]; (c) 利用偏振维度与波长维度的OAM-DM方案^[35-36]; (d) 利用DOVG进行复用和解调的OAM-DM实验方案^[40]

Fig. 5 (a) Experimental scheme for multiplexed transmission of 2 OAM beams^[30]; (b) OAM-DM scheme using polarization and spatial dimension resources, (b1) OAM-DM scheme using polarization dimension, (b2) OAM beam superposition scheme using physical space dimension, (b3) Data exchange between OAM beams^[34]; (c) OAM-DM scheme using polarization dimension and wavelength dimension^[35-36]; (d) Experimental device of multiplexing and demodulation using DOVG^[40]

行 OAM 光束的复用与解调,突破了并行检测多个共线 OAM 光束所需的实验装置复杂的限制。其实验装置如图 5(d)所示,搭载信号的激光束沿达曼涡旋光栅的不同衍射级入射,在零级上输出具有 10 种不同 OAM 模式值的同轴复用 OAM 光束,接收端通过 DOVG 进行解调并在 10 个衍射级方向检测光信号。该方案通过采用 10 个 OAM 模式值、80 个波长和两个偏振复用,实现了 1600 个独立调制的正交相移键控(QPSK)/16QAM 数据传输,通信容量最大可达 160 Tbit/s。

2016 年,Zhu 等^[41]实验上搭建了一个采用强度调制直接检测(IM-DD)技术的单波长 Tbit 自由空间通信系统。该工作中采用 12 个 OAM 模式与两偏振态共 24 路信道,每路信道搭载 30 Gbaud 奈奎斯特 PAM-4 信号,实现了单波长 1.44 Tbit/s 的总传输容量,调制效率达 48 bits/symbol。

由此可见,PDM、WDM、SDM 等传统光通信中常用的复用技术可以与 OAM-DM 相结合使得通信容量成倍增长。需要指出的是,通常情况下 PDM 仅需若干光学元件的组合(如偏振片、偏振分束器等)即可在实验中上相对容易地实现,因此 OAM-DM 与 PDM 的结合成为了常用的复用方案^[32,34,37,39,41]。但是,PDM 的可用维度较低(通常只可选用相互垂直的两个偏振维度),因此其提升通信容量的能力相对有限,而 WDM 凭借着其波长选择范围宽、技术相对成熟等优势,与 PDM 相比在信道复用能力和提升通信容量的性能上有着更佳的表现^[33,35-36]。正如参考文献^[38]和^[40]所提到的,在实际中为充分发挥 PDM 与 WDM 的优势,人们也尝试了在 OAM-DM 系统中同时联用 PDM 与 WDM 技术以追求更高的通信容量与频谱效率,并且取得了较为优异的性能表现,这使得 OAM-DM 系统中联用多种复用技术的方案为人们进一步研究更高速率的 OAM 光通信技术提供了新思路^[38,40]。此外,过去也有相关的工作在 OAM-DM 系统中采用了 SDM 技术^[34],尽管在通信性能上取得了较好的表现,但是由于 SDM 在实验操作上对光束尺寸的调控精度要求较高,且半径不同的同轴复用 OAM 光束在经长距离传输后其信道间的耦合作用可能会加剧,这会对通信质量造成些许影响,因此对于 SDM 与 OAM-DM 相结合的方案还有待研究者们进一步改进完善。

上述这些实验结果证明了 OAM-DM 技术在提高通信容量和频谱利用率方面具有巨大的潜力。同时,

除了在自由空间构建 OAM-DM 系统外,OAM-DM 系统还可以应用于光纤通信中^[42-44]。从上个世纪九十年代起,研究者们就开始对光纤中 OAM 模式的传输特性展开研究,随着研究的深入,近些年研究者们也开始将目光转向基于 OAM-DM 的光纤通信系统,国内外许多课题组也搭建了基于 OAM 的光纤通信实验系统,成功实现了 OAM 多路信道的复用^[42-44]。此外,水下信道环境 OAM-DM 系统的搭建也是近些年人们的研究热点之一^[46-50],其基本实验系统的构建与自由空间相似,仅仅是传输信道环境不同,因此本章节不做过多介绍。

4 OAM 光束复用技术

在实现光通信系统大容量和高速率传输过程中,OAM 复用可以高效地与其他复用方式结合在一起使用,这可以保证在原有的复用技术之上大幅度提升系统的通信容量和传输速率。在发射端,能够高效、低串扰地产生复用 OAM 光束是 OAM 光通信的一个重要研究内容。产生 OAM 复用光束的常用方法有采用分束器^[34,112]、光子集成技术^[107,113]、涡旋达曼光栅^[40]、复合相位全息图^[27,80,115]等。其中,复合相位全息图因其具有灵活、高效,各 OAM 态功率可调的特点,引起了广泛的关注。除此之外,复合相位全息图还可以用于实现 OAM 组播,在 OAM 复用系统中也得到了诸多应用。本节对上述的几种 OAM 光束的复用方法进行了概述,并重点介绍了采用复合相位全息图实现 OAM 复用的方法。

基于分束器(BS)组合的复用方案^[34,112]凭借着其操作简单,实验系统易于搭建等优势,成为是复用 OAM 光束最基本也是最常用的方案之一。如图 6(a)所示,复用时 N 个 OAM 模式值分别为 $l_1 \sim l_N$ 的 OAM 光束,在通过 $N-1$ 个 BS 后可被合并成为一束。然而,随着通信要求的提高,实现大容量的信息传输意味着需要建立大量 OAM 光束复用的系统,但是大量分束器的采用往往会大大增加系统的复杂度,也不利于系统的集成。

随着精密加工与集成技术的快速发展,基于光子集成技术的 OAM 复用方案成为了大容量高速光通信系统中的关键技术之一。2012 年,Fontaine 等^[113]采用孔径阵列和星形耦合器组成光子集成电路(PIC),实现了 OAM 光束的复用。如图 6(b)所示,当光束从右方入射到星形耦合器的输入端口后,由于到达每个路径长度匹配波导入口处的光程差异会产生具有线性梯度

相位的光束,再分别耦合到输出端口即可产生具有螺旋相位梯度的 OAM 光束。同理,当入射多光束时,输出端口会产生复用的 OAM 光束。通过增加波导臂的数量,该结构支持生成的 OAM 模式数可扩展到 32 个以上,且该结构可与单模光学元件(如光纤耦合元件、快速光电探测器)对接,具有体积小、效率高的特点,使得 OAM 空间多路复用技术在集成化的道路上迈出了一大步。2014 年, Guan 等^[107]将混合 3D 光子集成电路(该混合器件由一个二氧化硅平面光波电路(PLC)和一个三维波导电路组成)应用于实际的自由空间相干光通信系统中,实现了 OAM 光束的高效复用,实验上成功传输了速率为 20 Gbit/s,频谱效率为 1.67 (bit/s)/Hz 的正交相移键控(QPSK)信号且具有良好的抗干扰性能。

以 DOVG 为代表的光学衍射元件也可实现 OAM 光束的同轴复用,并且基于 DOVG 的复用方案也是由于 DOVG 本身独特的相位结构使得入射平面波衍射成能量相等的 N 个级次的 OAM 光束。利用这一特点,如图 6(c)所示,当 N 束平面波沿着光栅衍射级次的角度入射时,出射端会在零级合成一束同轴光束,并且携带与衍射级次相关的不同 OAM 模式值。2015 年, Lei 等^[40]正是基于 DOVG,成功实现了 10 OAM 态、80 个波长和两个偏振态的 1600 个独立调制 QPSK/16-QAM 复用数据的传输系统,其信道容量高达 160 Tbit/s。自此以后,基于 DOVG 的复用方案成为 OAM 光通信领域的主流方案之一,为未来大容量高速 OAM 光通信链路的设计提供了参考。

尽管基于衍射光学元件的复用原理相对简单,但它要求在光学波段内加工纳米量级的超精确结构,并且一旦结构定型,其只能适用于特定的解调场合。因此实际应用中,往往通过在计算机可调控设备 SLM 上加载动态可变的相位全息图来实现衍射光学元件的功能^[114]。而正是由于相位全息图的调控过程精确可控,采用复合相位全息图产生复用 OAM 光束的方案也引起了人们广泛的研究^[27,80,115]。2006 年, Lin 等^[80]提出一种基于复合相位全息图的产生复用 OAM 光束的方案。该方案基于角谐波与傅里叶变换之间的理论关系,采用一种可自发交替幅值和相位的迭代算法来设计复合相位全息图,并且通过设置算法的输入来控制复用光束中各 OAM 光束的能量比重,实现接近 90% 的能量利用率,从而有效地节约系统的能量。但是,在该方案中仍然存在着实际光束与预设目标光束功率分布

偏差明显的劣势,该问题可通过优化迭代算法提高能量转化效率来解决。2015 年, Zhu 等^[115]对该 Lin 算法进行初步改进,设计了另一个迭代过程来搜索一组优化的初始权重系数并将它们应用于 Lin 算法,利用该算法设计的复合全息图可将入射光束转换成 100 种 OAM 模式随机间隔和 50 种均匀间隔的 OAM 复用光束,其衍射效率超过 93%。2017 年,合肥工业大学郭忠义研究团队^[27]对该迭代算法进行了进一步优化,通过改变迭代步长来扩大权重系数的选择范围,同时对不同的步长都使用相同的 Lin 算法来进行迭代,通过这种并行运算可以更进一步找出最优的解。基于该方案所产生的复合相位全息图如图 6(d)所示,光束入射采用改进的 Lin 算法所生成的复合相位全息图后,其光强中心仍存在一个涡旋暗核,证明复合 OAM 光束仍然具有涡旋特性。且各 OAM 模式成分的功率分布与目标功率分布相近。

事实上,通过单一元器件产生同轴复用 OAM 光束的复用技术通常被用于实现相同数据信号复制到多个 OAM 模式信道的 OAM 多播/组播通信系统中。2013 年, Yan 等^[116]将单个 OAM 空间信道传输的数据复制到了等间距的多个 OAM 信道上。通过在 SLM 上加载优化设计后如图 6(e)所示的组播相位全息图,在实验上搭建了承载 100 Gbit/s 正交相移键控(QPSK)信号的单输入 OAM 光束进行 5 路和 7 路均衡组播的通信系统,且每路信道具有均衡的功率分布。相类似的复用技术还可用于特殊光束如贝塞尔 OAM 光束的复用系统。2015 年, Zhu 等^[52]通过对复合相位全息图的设计与优化,实现了从高斯模式到多个同轴复用贝塞尔 OAM 模式的转化,其原理如图 6(f)所示。该工作在实验上选择搭载 20 Gbit/s 的 QPSK 信号来验证组播性能,其结果表明,对于 10 OAM 信道组播,其相邻信道间的串扰小于 -15 dB,而进行 4 OAM 信道组播时,串扰小于 -10 dB,均彰显出良好的通信质量。

值得一提的是,根据光源的相干性,OAM 光束的复用方式可分为两类,即相干叠加复用和非相干叠加复用^[117]。由于理论上单色激光源只发射单一频率的光波,但在实际的多激光源的 OAM-DM 实验系统中,激光源辐射出的光束总以某一频率为中心存在着一定频率宽度,且不同激光源辐射出的光束在偏振和相位上也存在着细小偏差,所以很难实现多个光源发射出完全相同的光束。因此过去的 OAM-SK/DM 实验系统中通常产生的为近似非相干的光源,其复用方式多为

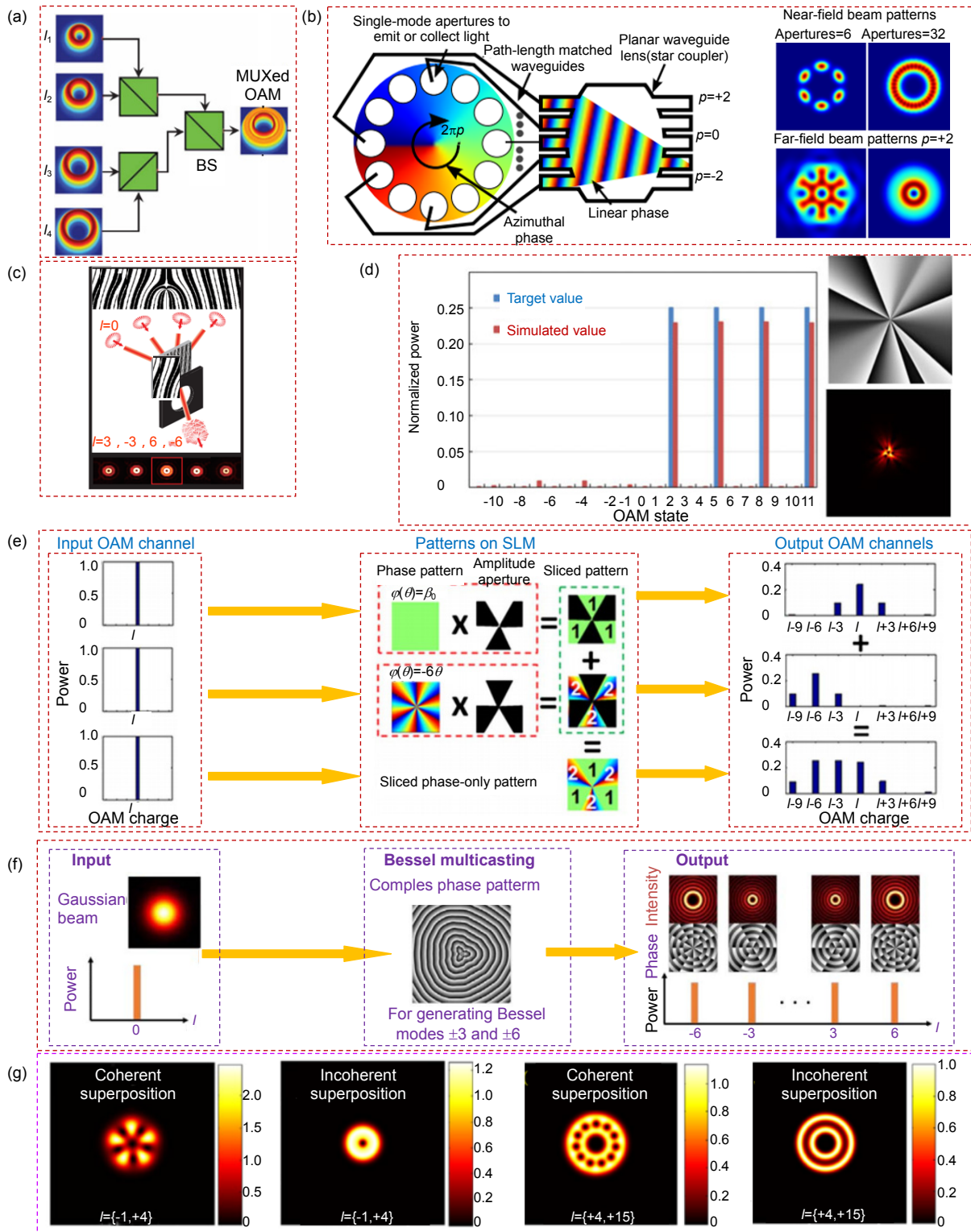


图 6 (a) 采用分束器产生复用 OAM 光束方案; (b) 基于光子集成技术产生复用 OAM 光束的方案^[113]; (c) 利用 DOVG 产生复用 OAM 光束方案^[40]; (d) 利用改进后的 Lin 算法生成能量均等的复用 OAM 光束^[27]; (e) OAM 组播原理示意^[52]; (f) 贝塞尔模式组播的原理示意^[52]; (g) OAM 光束非相干叠加与相干叠加的光强分布^[117]

Fig. 6 Scheme of generating multiplexed OAM beams using (a) BS; (b) Photon integration techniques^[113]; (c) DOVG^[40]; (d) Modified Lin algorithm^[27]; (e) Schematic diagram of OAM multicasting^[52]; (f) Schematic diagram of Bessel modes multicasting^[11]; (g) Intensity distributions of incoherent superposition and coherent superposition of OAM beams^[117]

非相干复用,如图 6(g)所示,其总光强处处等于各个光束的光强之和。实际上,相干叠加复用的方式多用于以单个激光器为发射源的通信系统,例如上文论述的 OAM 组播通信系统。两束光束频率相同,二者之间存在相互平行的偏振分量且具有稳定相位差的相干光场叠加后的光强即干涉光强,由于两个相干光场叠加区域的相位差不同,导致每个区域的干涉光强呈现出如图 6(g)所示的不同分布。不同的叠加复用方式会使得接收端检测到的光信号大不相同,从而直接影响通信系统的性能。2019 年,合肥工业大学郭忠义研究团队^[117]对基于这两种叠加复用方式的 OAM-SK 通信系统做了对比,该工作仿真了两种不同复用叠加方式作为发送端和两种常用解调衍射元件(二维达曼叉形光栅和二维解调相位全息图)作为接收端组合而成的 OAM-SK 通信系统,并尝试传一个灰度值图像来对系统的性能进行评估。其结果表明,在具有不同 OAM 模式值的光束相干叠加复用的过程中,由于相长相消,接收端会获得较不规则的光强分布,直接导致解调后衍射级中心位置处的高斯亮点的能量降低,在抽样判决过程中发生错误。而对于非相干叠加复用方案,它遵循光强标量相加。不同光源之间具有很低的相互作用,因此接收端的光强分布较为均匀,损耗较小。因此,当解调方案相同时,在一定的判决阈值范围内,采用非相干叠加复用方案所得到的图像传输错误率比相干叠加复用方案低,通信性能更优。

5 OAM 光束解调技术

OAM 复用技术应用到光通信中后,使得光通信系统获得了超高的传输容量和频谱效率,这一优异的特性吸引了大量的国内外学者的关注。而对于 OAM 通信系统来说,接收端需要对传输后 OAM 光束所携带的信息进行高质量提取,这就使得 OAM 光束解调技术成为保证通信质量的关键所在。目前,国内外学者从 OAM 光束的特性出发,已经提出了多种不同的 OAM 解调方案。常见的传统方案主要包括基于螺旋相位板^[74]、衍射光学元件^[118-120]、相位全息图^[27]、干涉或衍射^[121-128]、光学几何变换^[129-134]、模式转换法^[135]、OAM 谱分析^[136]的方案等。而近些年,随着计算机科学技术特别是机器学习技术^[137]的发展,出现了一些新型的 OAM 解调方案,如基于机器学习/深度学习的自适应 OAM 解调方案等^[22,138-146]。本节对 OAM 光通信中几种传统的解调方案进行概述,并着重介绍基于机器学习的新型 OAM 光束解调方案。

5.1 传统 OAM 光束解调方案

1994 年,Beijersbergen 团队^[74]提出了使用螺旋相位板(SPP)的 OAM 光束解调方案。如图 7(a)所示,其解调过程就是用 SPP 产生 OAM 光束的逆过程,当携带 lh 的 OAM 光束入射在具有相反相位($\exp(-il\varphi)$)结构的 SPP 上后会被转化为高斯平面波,从而完成了 OAM 光束的解调,之后经过光纤耦合和光电转换再进一步进行传统光通信的信号处理过程。

以光栅为主的衍射光学元件也是解调 OAM 光束的选择之一。其结构图如图 7(b)所示,由于该光栅不同的衍射级次上包含不同的 OAM 模式值,当 OAM 光束中包含相反的 OAM 模式值时,通过观察对应的衍射级上是否出现高斯亮点来判断该衍射级是否检测到对应的 OAM 成份^[40,118]。2010 年,Cottrell 等^[118]在此基础上提出了基于 DOVG 的解调方案。该方案可保证光栅各个衍射级上的能量分布接近理想的相同分布,使得基于 DOVG 的解调方案一度成为 OAM 解调技术的研究热门。2015 年,Lei 等^[40]将 DOVG 用于大容量 OAM 光通信系统中,实现了 10 路 OAM 信道携带 QPSK/16QAM 信号的同步解调,其实验方案如图 7(c)所示。该项工作对于简化 OAM-FSO 系统的设置,提高其可靠性有着积极的推动作用。与叉型光栅的功能相似,周期渐变光栅与环形光栅也可用作 OAM 光束解调元件,对这两种光栅研究工作也取得了良好的进展^[119-120]。

在实际应用中,往往通过在 SLM 上加载动态可变的相位全息图来实现 SPP 或 DOVG 的功能。2019 年,合肥工业大学郭忠义研究团队^[117]对基于 DOVG 和计算全息图的两种 OAM 光束解调方案进行了详细对比与讨论。在该工作中,对于 DOVG,采用的是两互相垂直的一维 DOVG 相互叠加而得到的二维 DOVG;对于计算全息图,采用的是基于改进后的 Lin 迭代算法设计的各个衍射级能量取值任意可控的新型纯相位二维解调全息图。同时,该工作中还考虑了这两种方案对相干叠加和非相干叠加 OAM 光束的解调效果,其结果如图 7(d)所示,二维解调相位全息图实现零传输像素错误率(PER)的判决阈值区域整体要高于二维 DOVG。这是因为二维 DOVG 不能将所有入射光能量集中在目标 OAM 模式值上,这会对其他衍射级造成不必要的能量损失。而二维解调相位全息图只要迭代误差足够,就可以实现能量的高效集中,因此在能量利用方面二维解调相位全息图更为优秀。

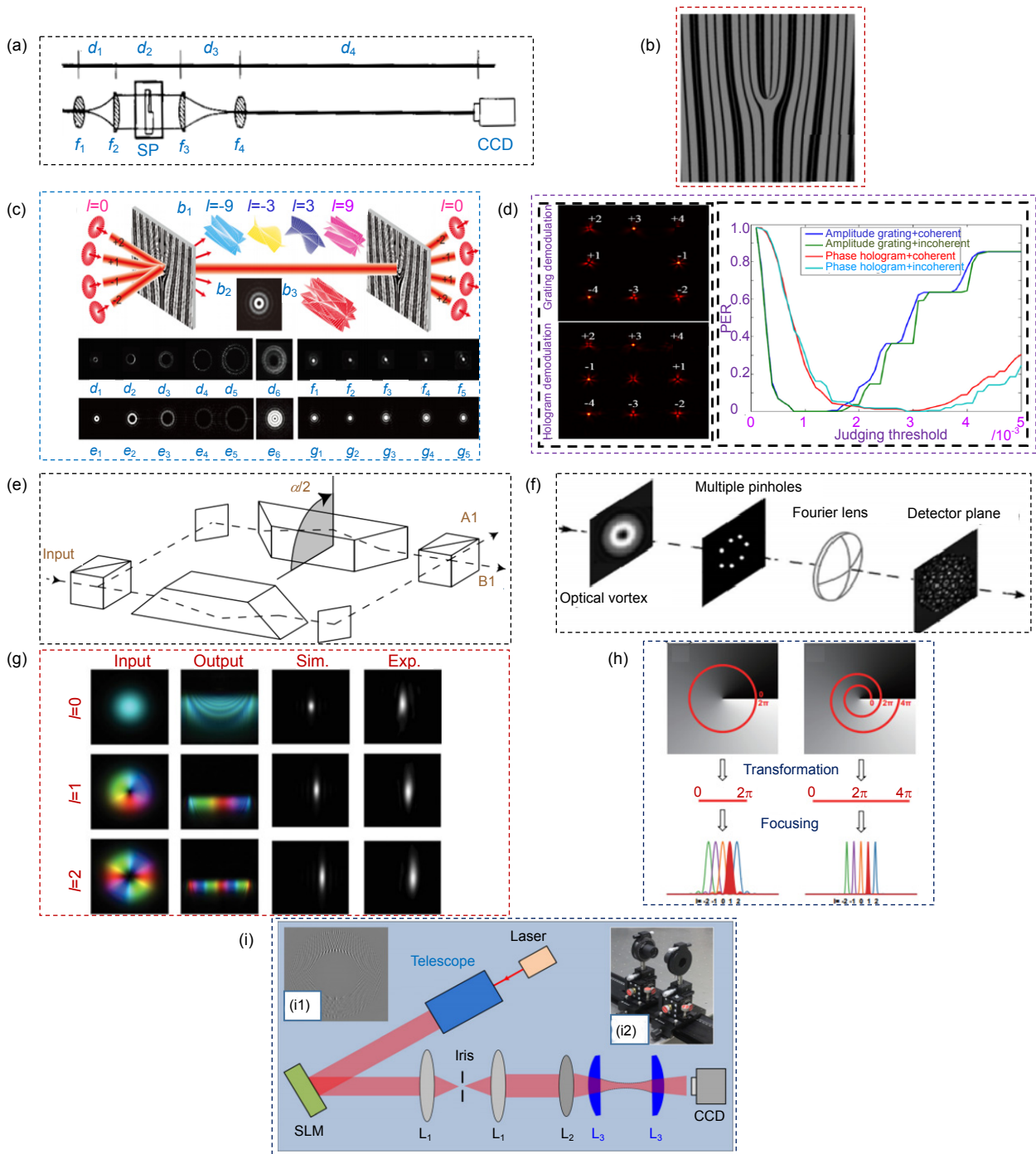


图 7 (a) 基于 SPP 的 OAM 解调方案^[74]; (b) DOVG 示意图^[118]; (c) 采用 DOVG 实现 OAM 光束解调的系统^[40]; (d) 基于二维 DOVG 和计算全息图的两 OAM 解调方案的性能对比^[117]; (e) 改进的马赫-曾德尔干涉仪示意图^[121]; (f) 采用多孔衍射实现 OAM 光束解调原理图; (g) 基于光学几何变换的 OAM 解调原理图^[129]; (h) 对数几何变换的原理及基于螺旋变换的 OAM 模式分离方案^[131]; (i) 产生 LG 光束并转化为 HG 模式进行检测的实验装置图^[135], (i1) 产生 LG 光束的相位全息图, (i2) $\pi/2$ 模式转换器

Fig. 7 (a) OAM beam demodulation based on SPP; (b) Schematic of DOVG; (c) System for realizing OAM beam demodulation using DOVG; (d) Comparison results of OAM beam demodulations by DOVG and computer generated hologram^[117]; (e) Schematic of the modified Mach-Zehnder(MZI) interferometer^[121]; (f) OAM beam demodulation based on porous diffraction; (g) OAM demodulation based on optical geometric transformation^[129]; (h) Principle of logarithmic geometric transformation and OAM mode separation scheme based on spiral transformation^[131]; (i) Experimental device for generating an LG beam and converting it to HG mode for detection, (i1) phase hologram for generating LG beam, (i2) $\pi/2$ converter^[135]

干涉或衍射方案也是常用的 OAM 光束解调方案之一。早在 2002 年, Leach 等^[121]提出了马赫-曾德尔干涉仪与道威棱镜结合的 OAM 解调方案。如图 7(e)所示,在该方案中,改进的马赫-曾德尔干涉仪是在标准的马赫-曾德尔干涉仪的两臂嵌入两个道威棱镜而构成的。若棱镜间的夹角为 α , 两个干涉臂之间的相移为 $\Delta\varphi = 2l\alpha$, 则可从 $\Delta\varphi$ 和 α 推出不同输出端口的光束携带的 OAM 模式值 l 。2006 年, Sztul 等^[122]提出了用基于杨氏双缝干涉的方案。该方法通过观察干涉后的条纹的弯曲及方向来确定 OAM 模式数。同时, 利用 OAM 光束的叠加干涉特性, 通过观察两束不同 OAM 光束等量和非等量的叠加图规律实现对光束模式值的检测^[123]。此后, 经过人们的不断探索, 多种孔径衍射方案也被用于 OAM 光束的解调, 如多孔衍射(如图 7(f)所示)、三角缝衍射、环形缝衍射、弧形缝衍射、矩形缝干涉等^[124-128]。这些方案在实验上都取得了较好的效果, 在丰富了光束衍射理论的同时也为 OAM 光束的解调方案提供了新思路。

基于光学几何变换的 OAM 解调方案近些年受到了研究人员的关注, 并且取得了较大进展。2010 年, Berkhout 等^[129]提出一种基于光学几何变换的高效 OAM 解调方案。该方案中, OAM 光束先后入射两个加载着特殊相位全息图的 SLM, 分别实现笛卡尔坐标下 OAM 光束螺旋相位到极坐标下梯度相位的几何变换和出射光程差的校正, 接着再通过透镜将具有不同 OAM 模式值的光束聚焦在如图 7(g)所示的不同横向位置上, 且亮斑的横向位置与 OAM 模式数相关, 因此, 通过判断焦平面上亮斑的位置, 可以实现对 OAM 模式的区分。但该方案仍然面临着在分离间隔为 1 的相邻 OAM 模式时会出现光斑重叠的问题, 这种由于光束重叠所带来的串扰在实际的通信系统中会严重影响系统的复用能力和传输信号的质量。为了解决这个问题, 2013 年, Mirhosseini 等^[130]提出使用 fan-out 的几何变换技术来改善分离效果。该方案使用周期相位全息图作为 fan-out 元件来对衍射光斑进行多次复制, 通过增加光斑的相位梯度使得衍射条纹更加精细, 避免了光斑的重叠问题, 最终实现解调效果的改善。此外, 对光学几何变换方案的研究也在稳步推进。2018 年, Wen 等^[131]提出了基于对数螺旋几何变换的方案。如图 7(h)所示, 这种方案不仅可以实现 OAM 光束的并行、高效的解调, 同时由于螺旋线变换后光束的长度足够细长, 与 fan-out 的最终解调效果类似, 也有效

避免了相邻 OAM 模式间光斑的重叠所引入的串扰。

2019 年, 柯熙政团队^[132]在实验上将基于几何变换的相位校正技术和 fan-out 技术与基于周期渐变光栅和环形光栅的 OAM 光束解调方案相结合, 使得 OAM 光束在经过光栅后的衍射条纹更加清晰, 从而可以提高 OAM 解调精度并扩大 OAM 模式值的解调范围。同时, 在该工作中对二值化相位光栅和振幅光栅的解调性能进行了对比, 结果表明, 经过 $0-\pi$ 二值化相位光栅的衍射条纹强度高于振幅光栅, 经过环形光栅的衍射条纹强度高于周期渐变光栅, 因此使用环形二值化相位光栅的解调性能最优。该工作中将多解调技术相结合的方案也为后续对 OAM 解调工作的研究提供了新思路。同年, 合肥工业大学郭忠义研究团队^[133]将光学几何变换和干涉仪干涉两种解调方案的优势整合, 提出了一种基于改进的马赫-曾德尔干涉仪和模式分析器相结合的方案。如图 8(a)所示, 该系统由两部分构成: 改进的马赫-曾德尔干涉仪和基于光学几何变换的模式分析器。在改进的马赫-曾德尔干涉仪中固定两臂的威棱镜放置的相对摆放角度为 $\pi/2$, 则经过上下两臂的光路将会产生 $l\pi$ 的相位差, 进而在 A 端口的两路光束间引入 $l\pi$ 的相位差, 在 B 端口两路光束间引入 $l\pi + \pi$ 的相位差, 从而实现入射的 OAM 模式的奇偶分离。也就是说, 对于改进的马赫-曾德尔干涉仪输出的两束 OAM 光束, 它们携带的 OAM 模式的最小间隔为 2。因此, 在基于几何变换的模式分析器前面放置一个改进的马赫-曾德尔干涉仪, 最后在焦平面上得到的光斑将不再重叠。其仿真结果如图 8(b)所示, 以实现分离由 25 个 OAM 模式组成的复合 OAM 光束为例, 图 8(b1)展示了未引入马赫-曾德尔干涉仪的光学几何变换方案的分离效果, 其分离光强存在着明显的重叠。而如图 8(b2)、8(b3)所示, 在引入马赫-曾德尔干涉仪后, 通过先进行奇偶 OAM 模式值的 OAM 光束的分离, 后进行光学几何变换, 可以很好地解决传统几何变换方案固有的重叠问题。并且通过计算两输出端口的能量分布及串扰可知, 约 91% 的能量可以被正确测量, 串扰均小于 -10 dB, 即在实现对高密度 OAM 模式的解调任务上展现出了优越的性能。与该联合方案相类似, 2019 年, 郭忠义研究团队^[134]提出将改进的马赫-曾德尔干涉仪与复合相位光栅(CPG)结合的 OAM 解调方案, 其原理图如图 8(c)所示, 复用的 OAM 光束首先通过改进的马赫-曾德尔干涉仪, 实现携带奇偶 OAM 模式值光束在 A、B 两输出

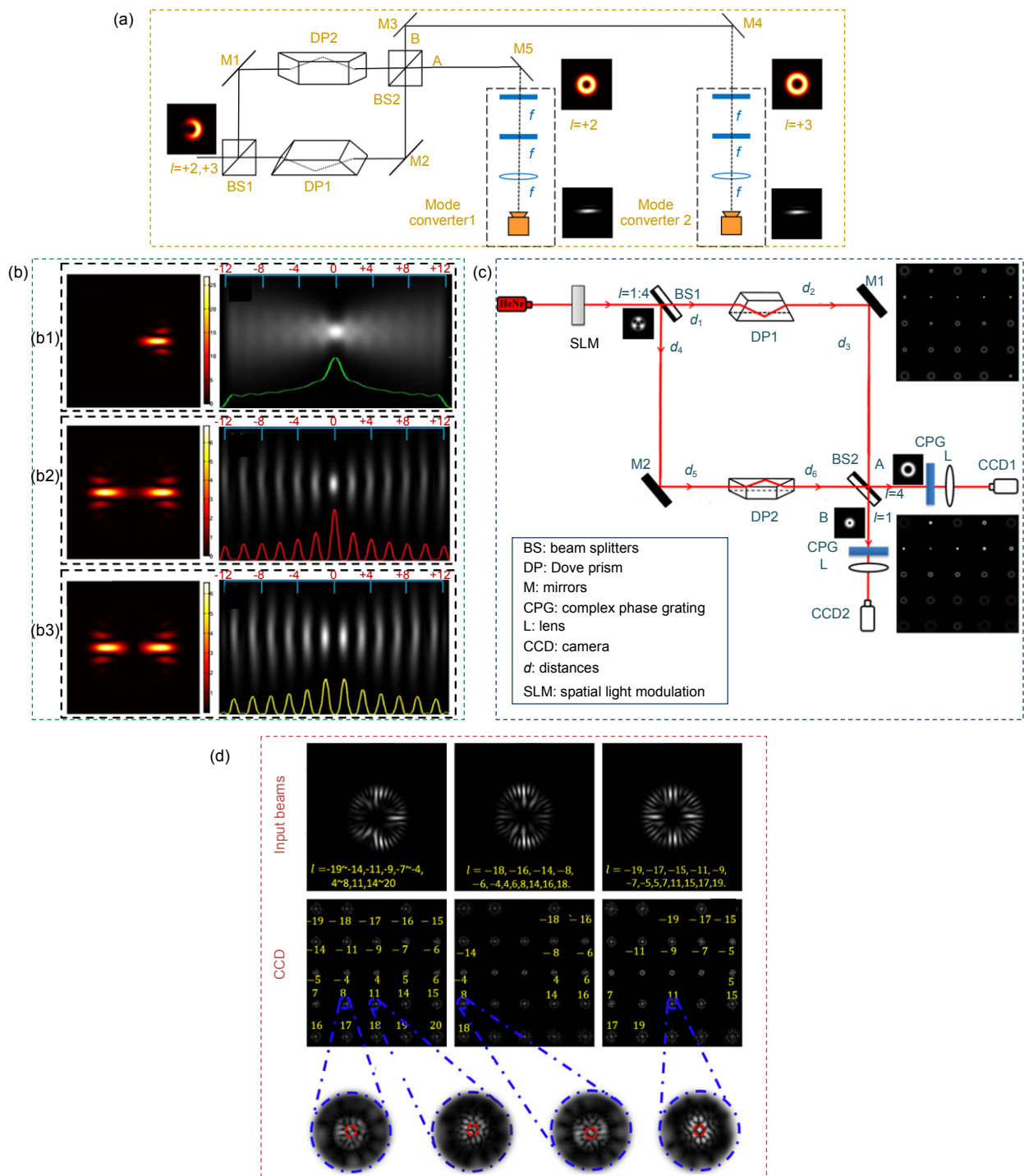


图 8 (a) 基于改进马赫-曾德尔干涉仪与光学几何变换联合的高密度 OAM 解调方案系统框图^[133]; (b1) 未引入马赫-曾德尔干涉仪复合 OAM 光束光强分布及解调效果, (b2)、(b3) 引入马赫-曾德尔干涉仪后在 AB 两个输出端口测得的光强分布及解调结果^[133]; (c) 基于改进马赫-曾德尔干涉仪与复合相位光栅联合的 OAM 光束解调方案系统框图^[134]; (d) 基于改进马赫-曾德尔干涉仪和复合相位光栅的联合方案对 25 种 OAM 模式的解调效果^[34]

Fig. 8 (a) System diagram of high-density OAM demodulation scheme based on improved Mach-Zehnder interferometer combined with optical geometry transformation^[133]; (b1) Intensity distribution and demodulation effect of composite OAM beam without Mach-Zehnder interferometer^[133]; (b2)、(b3) Intensity distribution and demodulation results measured at two output ports of A、B after introduction of the Mach-Zehnder interferometer; (c) System diagram of OAM beam demodulation scheme based on improved Mach-Zehnder interferometer combined with composite phase grating^[134]; (d) Demodulation effect of 25 OAM modes based on improved joint scheme of Mach-Zehnder interferometer and composite phase grating^[134]

端口处的初步分离, 两路复合光束再入射到螺旋相位与可控制传播方向的闪耀光栅相位相结合设计而成的CPG, 最后 CCD 相机捕获光强阵列, 通过观察与 OAM 模式值相对应的衍射级次处是否出现亮斑, 来判断入射复合 OAM 光束中是否存在相应的 OAM 模式值。其解调效果如图 8(d)所示, 不同衍射级上解调后的光斑清晰可见, 解调精度高, 范围大, 且相邻模态之间的串扰较小。凭借这些优势, 该方案在基于 OAM 的数据传输网络中有一定的应用潜力。

值得一提的是, 在 OAM 光束的生成方案中, 一组特殊设计的柱形镜系统能将 HG 模式转换成 LG 模式, 事实上其逆过程也可用于 OAM 光束的解调, 其实验方案如图 7(i)所示, 该方法通常被称为模式转换法^[135]。通过观察 HG 光强图中光斑的行数和列数, 即可确定 OAM 模式值。

此外, 基于旋转多普勒效应的 OAM 谱分析方案也吸引了研究者的关注^[136]。该方案核心在于对 OAM 光束入射到旋转物体后产生的基模拍频信号进行傅里叶分析, 由于其基模拍频信号的角频率是待测 OAM 光束与参考光束的 OAM 模式值之差, 其幅度正比于待测 OAM 光束的幅度, 通过对收集到的基模信号功率进行傅里叶分析, 即可得到待测 OAM 光束对应的 OAM 谱。

5.2 新型 OAM 光束解调方案

过去研究者在上述这些传统 OAM 方案的优化与改进上进行了坚持不懈地探索, 也取得了很大进步, 推动着 OAM 光通信技术不断向前发展。但是需要指出的是, 这些传统解调方案在所需成本、解调速度和精度、解调范围、器件加工难度上还有些许提升的空

间(如表 2 所示)。此外, 对于实际的 OAM 光通信系统, 大气湍流所引起的 OAM 光束畸变对解调工作也带来了极大挑战, 因此, 研究恶劣大气传输环境下 OAM 光束的解调方案迫在眉睫。

近些年, 机器学习技术凭借着其强大的数据解析及信息处理优势在计算机工程及图像处理等领域得到了广泛应用^[137]。而在 OAM 光通信领域, 越来越多的人也将目光转向该项技术, 对基于机器学习/深度学习 OAM 光束解调方案进行了不断的探索, 取得了一些突破。

2014 年, Krenn 等^[22]首次将机器学习中无监督学习经典模型之一的自组织映射(SOM)神经网络应用于 OAM 光通信领域来实现 OAM 光束的解调任务。在该方案中, 接收的具有不同分布特征的 OAM 光束强度畸变图像被输入 SOM 网络用于训练, 利用竞争学习策略, SOM 网络可依靠网络中不同神经元之间的互相竞争不断迭代更新神经元上的权值以训练优化网络。在训练完成后, SOM 网络对输入的不同 OAM 模式值光束的强度分布图像有不同的响应输出, 即可初步实现一般大气湍流传输环境下, 未知 OAM 光束的分类任务。

随着深度学习技术的不断发展, 基于深度神经网络(DNN)的 OAM 光束解调方案使得 OAM 光束的解调准确率和精度上都迈上了新台阶^[138]。而深度学习中监督学习的经典模型之一——卷积神经网络(convolution neural network, CNN), 得益于其能使用具有局部连接和权值共享的多层表示学习技术来提取和识别输入原始图像的固有特征, 其在实现 OAM 光束解调的任务上也有着相当卓越的表现。

表 2 不同 OAM 光束解调方案的性能比较

Table 2 Performance comparison of different schemes of demodulation OAM beams

	SPP	Diffractive optical element	Phase hologram	Interference /diffraction	Geometric transformation	Mode conversion	Machine learning
Cost	Low	Normal	Low	Low	High	Low	Low
Speed	Normal	Fast	Fast	Normal	Normal	Normal	Fast
Demodulation precision	Normal	Normal	Normal	Low	High	Relatively high	High
OAM mode	Single	Single /multiplex	Single /multiplex	Single	Single /multiplex	Single	Single /multiplex
Processing difficulty	High	High	High	Low	High	Low	Low
System complexity	Low	Low	Low	Low	High	High	Low

2017年, Doster等^[139]首次将CNN引入OAM光通信领域来实现OAM光束的高效解调。如图9(a)所示, 该方案中选用了CNN的经典模型——AlexNet模型, 并将其训练为一个OAM解调器, 通过对输入图像强度分布特征的提取, 依据不同OAM模式特征分布不同的特性来实现携带OAM的复用BG光束的精准解调。同时, 在与传统的共轭解调方案的性能进行比较后, 其表现出的远高于传统解调方案解调准确率的巨大优势, 使得基于深度学习技术的OAM光束解调方案成为OAM光通信领域一个新的研究热点。同年, Li等^[140]设计了一个基于CNN的m-ary自适应解调器, 并且与基于K近邻(KNN)、朴素贝叶斯(NBC)、反向传播人工神经网络(BP-ANN)等网络的解调器进行了性能对比, 其结果如图9(b)所示。仿真结果表明, 即使在强湍流信道环境与1000m的传输距离下, 基于CNN的解调方案错误率仅为0.86%, 与基于KNN、NB和BP-ANN解调方案的错误率相比降低了近30%。在此基础上, 该课题组在后续的工作中继续深化改进了CNN结构层数, 进一步实现了大气湍流探测的功能, 且其湍流强度检测准确率高达95.2%^[141]。

对于实际的通信系统, 当基于CNN的解调方案与其他传统光通信技术相结合时可保证系统有着更高质量的信息传输与解码能力。2018年, Tian等^[142]就首次提出了一套基于8层的CNN自适应解调器与Turbo编译码联合方案的OAM-SK-FSO通信系统。其系统框图如图9(c)所示, 该工作以传输灰度值图像为例, 在将图像的每个像素值转换为二进制序列后, 先对其进行Turbo编码, 后通过SLM将编码后序列映射为不同的OAM模式值, 经过自由空间传输后, 接收端捕获光强图像并送入训练好的CNN网络来实现OAM光束解调, 最后进行Turbo译码和序列的解映射, 从而恢复传输的灰度值图像。该联合方案的提出, 使得基于CNN的OAM光通信技术在系统化道路上迈出了一大步。同年, Zhao等^[143]对传统CNN做出了改进, 如图9(d)所示, 通过增加多视野池化层来多维度提取不同光强分布的特征, 并在网络训练过程中采用数据扩增技术, 实现了对多角度偏移OAM光束的自适应解调。2018年, Jiang等^[144]在Li等^[140]研究的基础上, 提出了CNN与相干解调的联合方案。该方案框图如图9(e)所示, 在CNN处理之前先采用相干解调技术即用本振光与传输的OAM光束先进行干涉, 再将捕获的干涉图像送入CNN进行后续分类处理。其仿

真结果表明, 与非相干系统相比, 该方案具有较高的检测图像信噪比(signal-to-noise ratio, SNR)和更高的解调准确率。

过去的工作在CNN层数较少时解调准确率相对较低; 而在层数较深时, 训练参数多, 计算复杂度上升且可能存在过拟合。针对这些问题, 2019年, 合肥工业大学郭忠义研究团队^[145]在网络计算复杂度和识别准确率之间做出权衡, 在CPU平台中建立了一个特殊设计的6层CNN结构。其系统方案及CNN结构设置如图10(a)所示, 在该方案中, 通过在CNN训练过程中引入分批训练法与学习速率指数下降法以及在两层全连接层之间插入dropout单元等优化方法, 实现了在不同大气湍流强度、传输距离、OAM模式间隔等情况下OAM光束的高效解调。同时, 该工作中比较了解调单个OAM光束与复合OAM光束的性能表现, 其仿真结果表明, 基于该特殊设计的CNN结构, 同轴复用OAM光束即使在强湍流的信道环境下经过2000m长距离传输后, 仍能获得96.25%的OAM解调精度, 这使得对基于CNN的自适应解调器的研究迈上了新的高度。同年, Chi等^[146]对过去多种基于CNN解调器的OAM-SK系统进行了总结。如图10(b)所示, 该工作中系统总结了不同发射模式(包括发送单OAM光束、共轭叠加OAM光束与复合OAM光束)与不同接收方法(包括相干接收与非相干接收)下用CNN进行解调的性能情况。该成果对推进基于CNN的OAM解调技术的系统化与成熟化有一定的参考价值。

总体而言, 凭借着所需成本低、速度快、精度高、解调范围大、器件加工难度低且无需冗余的光学设备等优势, 基于机器学习/深度学习的OAM光束解调方案仍是目前OAM光通信领域中的一个研究热点, 该技术对今后实现光信号的超高速解调及构建更大容量的高速光通信网络具有积极的推动作用。

5.3 高阶径向模式的OAM光束解调方案

目前, 对OAM光束解调方案的研究已经取得了较大的进展。值得一提的是, OAM光通信系统中常用的LG光束, 除了其携带的OAM模式可作为角向维度资源来利用之外, 其携带的径向模式(p模式)也可作为新的空间维度资源应用于光通信。这是因为具有不同径向模式的LG光束之间也满足相互正交的条件, 因此径向模式的解调方案也具有一定的研究价值。

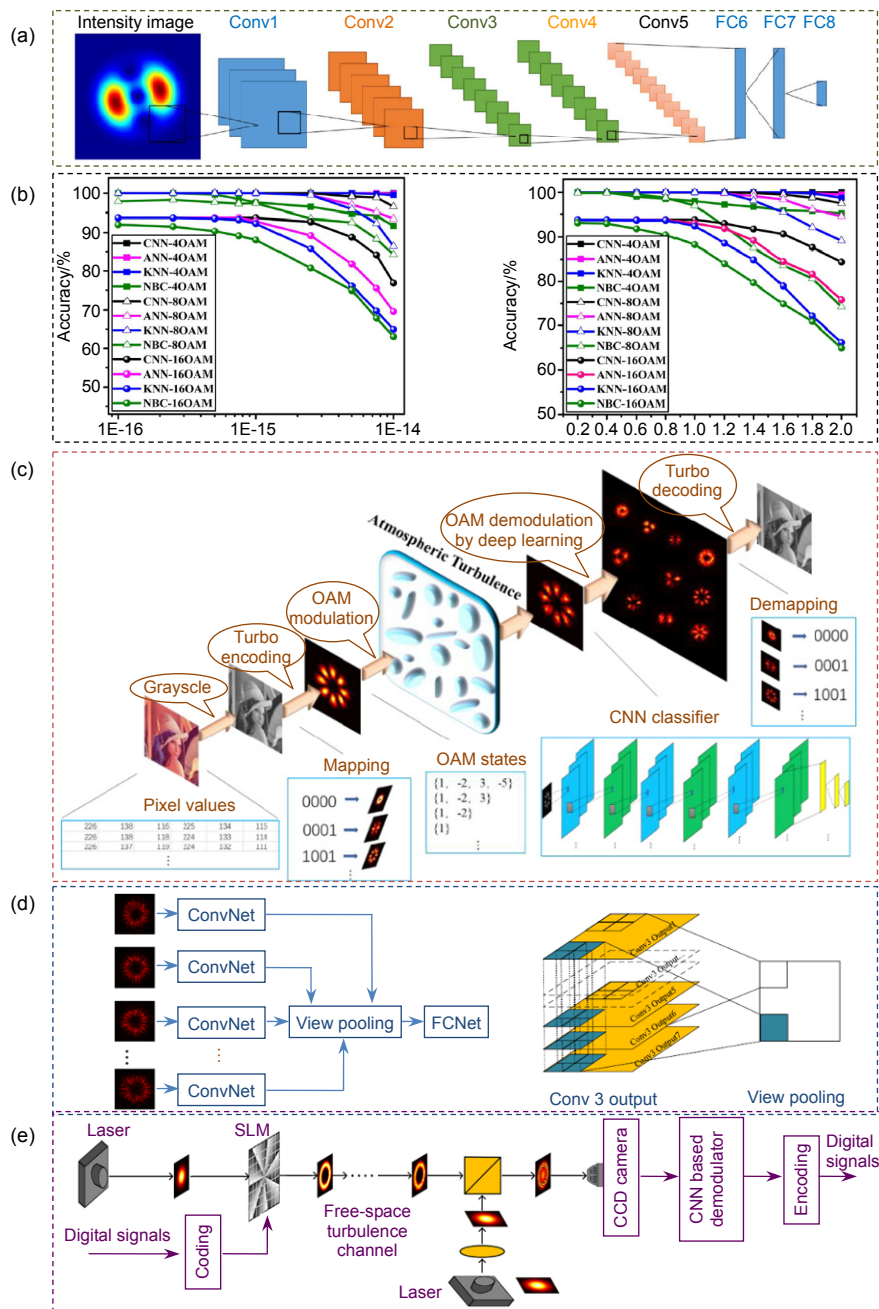


图9 (a) CNN 经典架构——AlexNet 架构。黑色方框表示用于提取图像分布特征的卷积核，输入图像在经过若干层的卷积层(包含激活及池化操作)之后，全连接层的 softmax 分类器分别计算输入属于每个类的概率，进而实现 OAM 模式分类^[139]；(b) 基于 CNN，KNN，NBC 和 ANN 的自适应解调器的解调性能对比^[140]；(c) 基于 CNN 与 Turbo 编译码联合方案的 16-ary OAM-SK-FSO 通信系统^[142]；(d) 采用多视野池化层改进的 CNN 结构^[143]；(e) 基于 CNN 的相干解调 OAM-SK 系统^[26]

Fig. 9 (a) Classical architecture of CNN——AlexNet. The black squares represent the convolution kernel used to extract image distribution features, after the input image passes through several layers of convolution layer (including activation and pooling operation), softmax classifier of the fully connection layer calculates the probability of the input belonging to each class respectively, and then realizes OAM mode classification^[139]; (b) Demodulation performance comparison of adaptive demodulator based on CNN, KNN, NBC and ANN^[140]; (c) Turbo-coded 16-ary OAM shift keying FSO communication system combining the CNN-based adaptive demodulator^[142]; (d) Improved CNN structure with a view-pooling layer and schematic diagram of the view-pooling layer^[143]; (e) Diagram of the coherently demodulated OAM-SK system based on CNN^[26]

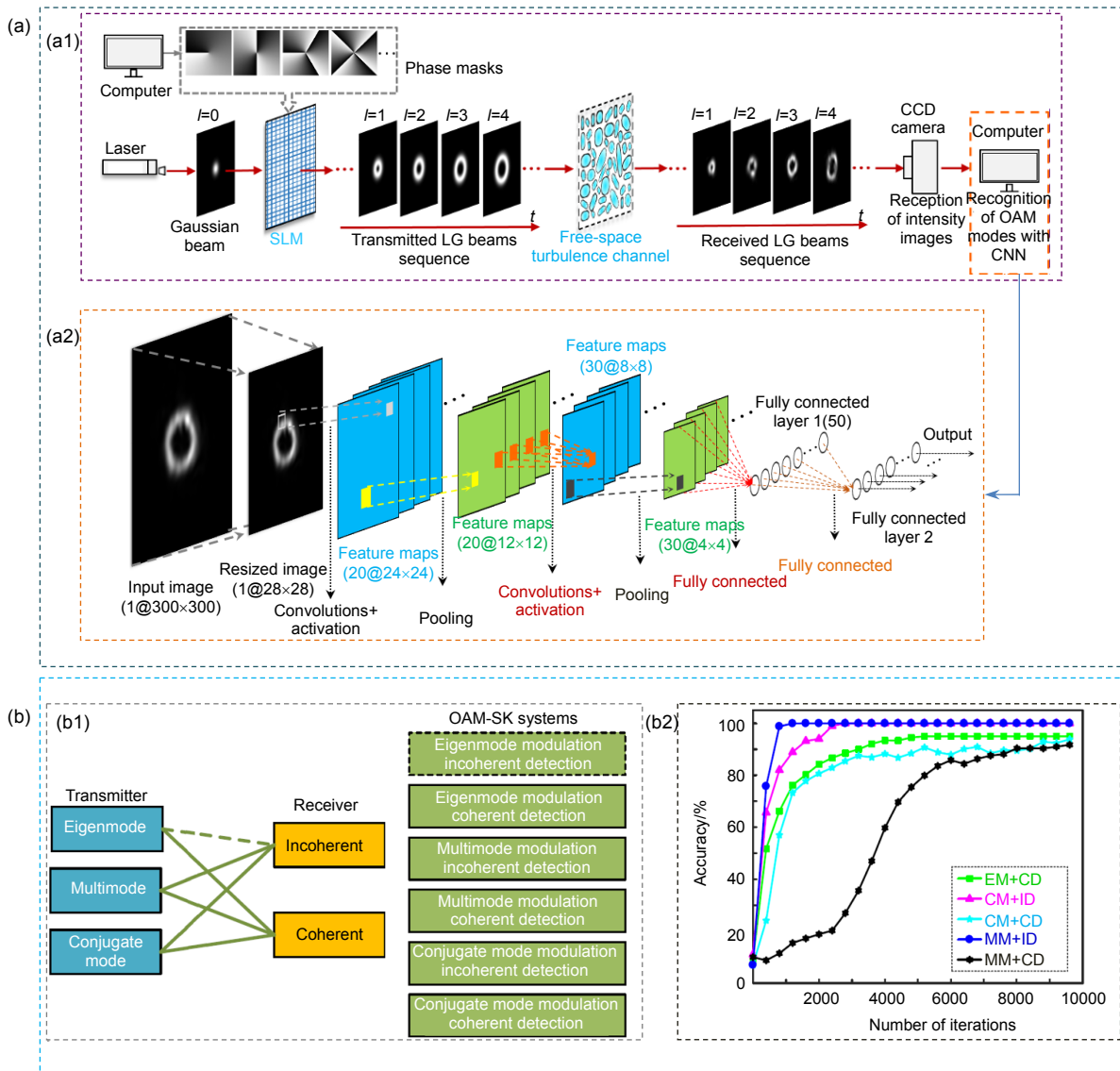


图 10 (a) 基于 CNN 的 OAM 传输系统方案^[145], (a1) OAM 传输系统框图, (a2) 6 层 CNN 架构;
(b) 基于 CNN 的(b1)多种 OAM-SK 架构与(b2)性能对比^[146]

Fig. 10 (a) CNN-based OAM transmission system^[145], (a1) OAM transmission system block diagram, (a2) 6-layer CNN architecture; (b) CNN-based (b1) multiple OAM-SK architectures and (b2) performance comparison^[146]

近些年,同时使用角向与径向模式的 OAM 复用系统正在被初步探索^[147-149]。

2016 年, Xie 等^[147]实验上用加载在 SLM 上经特殊设计的相位模式将携带径向模式的 LG 光束转换为高斯光束($l=0, p=0$),并且利用 $p=1$ 的 LG 光束无法被耦合进单模光纤(SMF)的特点,利用 SMF 实现了 $p=0$ 与 $p=1$ 的 LG 光束的分离,从而实现了 OAM 复用系统中径向模式的解调,其系统实验装置如图 11(a)所示。2017 年, Li 等^[148]对自由空间非零径向模式 LG 光束的接收性能进行了研究,如图 11(b)所示,其结果表明,

在短传输距离和接收孔径有限的情况下,非零径向模式 LG 光束可以在自由空间光链路中接收到更高的信号功率,并且 $p=0$ 的 LG 光束与 $p=1$ 的 LG 光束进行多路复用,后者的信号功率损失与串扰更低。该项研究成果有力推动了基于径向模式的 OAM 复用及解调技术的研究进展。2018 年,合肥工业大学郭忠义研究团队^[149]提出了共轭光场解调方案,接收端通过计算所有可能的共轭 OAM 光场与接收 OAM 光场的乘积,并通过相移因子与质心算法的结合,最终在经过傅里叶变换的接收平面上检测二维光强阵列中不同衍射级

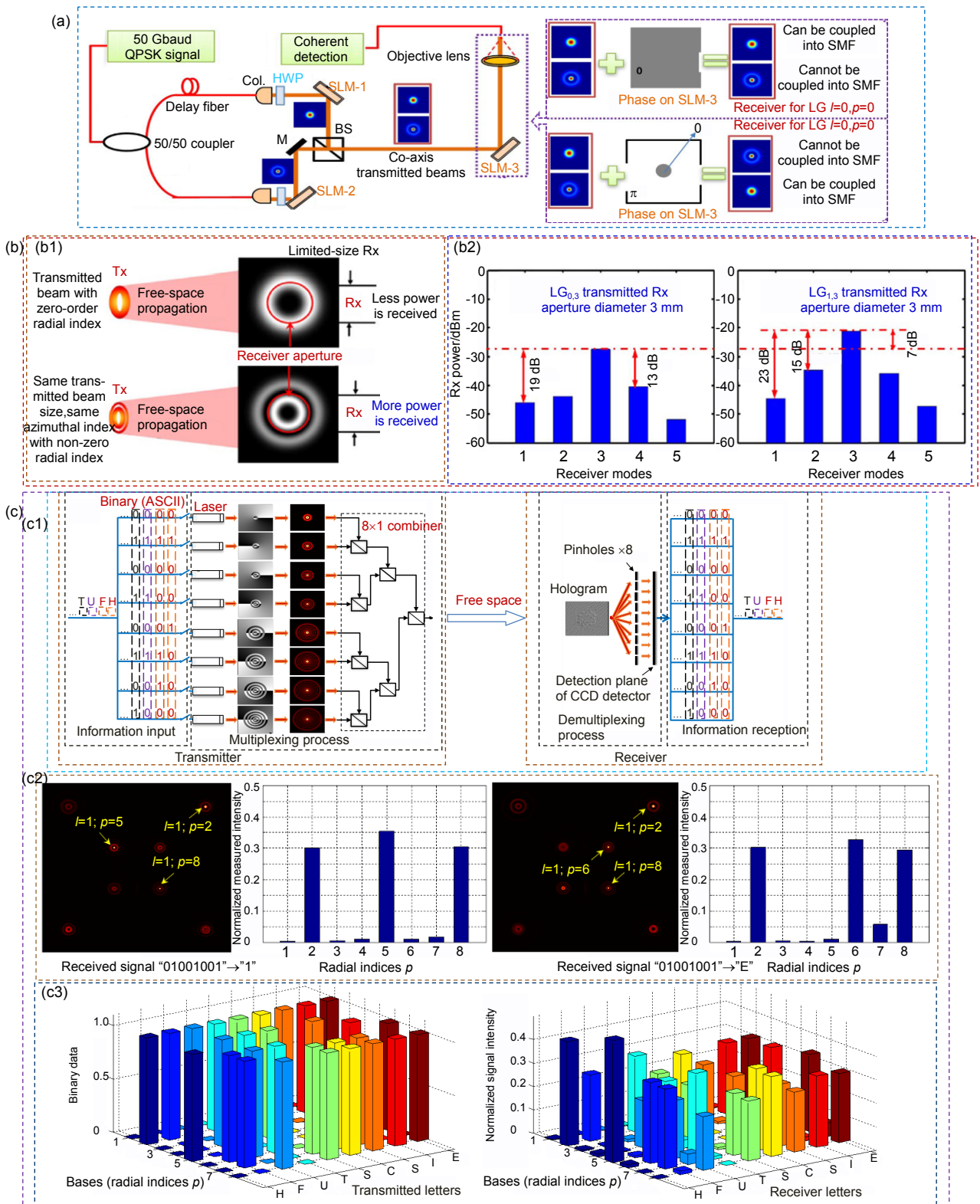


图 11 (a) $LG_{p=0,l=0}$ 与 $LG_{p=1,l=1}$ 复用的 FSO 通信系统实验装置^[147]; (b) 非零径向模式 LG 光束自由空间接收示意及接收性能^[148]; (c) 基于径向模式的 OAM 编码系统方案^[149], (c1) 系统框图,

(c2) 径向模式解调结果(部分), (c3) 字符映射关系与接收能量分布

Fig. 11 (a) Experimental setup of a FSO communication system multiplexing $LG_{p=0,l=0}$ and $LG_{p=1,l=1}$ ^[147]; (b) Concept and the reception performance of free-space optical link transmitting LG beams with nonzero radial index^[148]; (c) OAM coding system scheme based on radial modes, (c1) system block diagram, (c2) radial mode demodulation results (partial), (c3) character mapping relationship and received energy distribution^[149]

中心是否有亮点来判定是否完成相应径向模式的解调。基于该解调方案,该课题组在仿真环境中建立了一个基于高阶径向模式的 OAM 编码系统。如图 11(c1)所示,发射端将所需传输的字符信息转换为二进制序列,并以 1 和 0 信号来控制激光器的通断,接着高斯光束入射到一系列全息图上以产生若干 OAM 模式相同但径向模式不同($p\{1,2,3,4,5,6,7,8\}$)的 LG 光束并复用后同轴传输,至此完成二进制信号到不同径向模式的映射。在接收端,采用上述共轭光场解调方案来实现每个信道中径向模式的同时解调和传输信息的精确解码,其部分结果如图 11(c2), 11(c3)所示。该工作的成功实现,为径向模式解调方案的设计和建立高阶径向模式的 OAM 编码系统提供了新思路。同年,柯熙政等^[82]对高阶径向 LG 光束的叠加态进行了研究。该工作先从理论上探讨了传播距离和束腰半径对径向复合 LG 光束光强分布的影响,后进行了实验验证。在实验中利用叠加全息图实现径向 LG 光束的同轴叠加,并且光束的束腰半径灵活可控。该研究结果对深入理解高阶复合 OAM 光束的产生机理和进一步探究径向模式的解调理论提供了依据。

6 OAM 通信的湍流效应抑制技术

在实际的 OAM 光通信系统中,制约信号传输质量的一个重要因素是大气湍流。大气湍流带来的影响实质上是因温度随机变化和空气对流运动所引起的空气折射率的波动,极大地扰动了传输光束的相位波前,造成光束畸变、漂移、扩展以及到达角偏差^[150-157],进而带来 OAM 信道间串扰,降低信道容量,使得通信质量急剧恶化^[158-162]。因此,为减轻湍流效应,降低信道串扰以保证信号的高质量传输,湍流效应抑制技术成为了人们研究的重点,也取得了较大进展^[163-177]。

目前主流的湍流效应抑制技术可分为两大类:基于自适应光学(AO)的抑制方案^[163-173]和基于信号处理的抑制方案^[174-177]。基于 AO 的抑制方案可对接收的 OAM 光束的失真波前进行校正,其可根据技术细节进一步细分,如根据是否利用测量失真相位的波前传感器(wavefront sensor, WFS),可分为有 WFS 和无 WFS(包括基于相位恢复算法或机器学习算法的无 WFS 方案等)类型;根据是否使用探测失真相位的参考光束,可以将其分为有探针和无探针类型;根据相位校正装置位置的前后可分为预补偿和后补偿类型。而基于信号处理的抑制方案,较常见的是采用数字信号处理(digital signal processing, DSP)相关算法,如多

输入多输出(multiple inputs and multiple outputs, MIMO)均衡算法以及信道编码等技术,来提升通信质量,且由于该类方案无需额外的光学装置,在实用性与经济性方面有一定优势,因此也是未来大气湍流效应抑制方案的一个主要拓展方向之一。

6.1 基于自适应光学(AO)的湍流效应抑制方案

由于 OAM 光束相位奇点的存在会降低传感器的探测精度,因此用传统的波前传感器(WFS)直接测量 OAM 光束的波前仍然面临着测量结果失准的难题。为了克服这个问题,2014 年,Ren 等^[163]提出了一种利用单独高斯探针光束进行相位畸变传感的 AO 方案。如图 12(a)所示,发射端通过偏振分束器将高斯探针光束与其偏振态正交的 OAM 光束复用并在湍流环境中同轴传播,在经历了相同的波前畸变后,在接收端,被滤除后的高斯探针光束入射到 WFS 进行波前畸变的评估,再推导出畸变相位的校正模式并通过反馈控制器发送到波前校正器来的两束光进行相位补偿。其实验结果表明,在采用该湍流效应抑制方案后,相邻 OAM 模式间的串扰被有效地降低了 12.5 dB,功率代价提升了 11 dB。同年,考虑到双向通信链路中反向传播的载波光束也有可能发生类似湍流畸变,因此该课题组在上述方案的基础上设计了一个可对双向 FSO 链路中畸变 OAM 光束进行预补偿和后补偿的系统^[164]。其概念图如图 12(b),TX-1 和 TX-2 处分别生成携带数据的 OAM 载波光束并在相同大气湍流环境中沿相反方向传播。其中,TX-2 侧设置 AO 系统,对接收到的来自于 TX-1 的畸变 OAM 光束进行相位校正,而由 TX-2 发出的 OAM 光束先经 AO 系统的校正后再发送至 TX1。随后,在 RX-1 和 RX-2 处分别对接收到的两路 OAM 波束进行解调与信号处理。此外,针对高斯探针光束占用了一个偏振度而牺牲了复用的偏振自由度的问题,2015 年,该课题组继续对先前的工作做出改进,提出充分利用波长维度资源,使用单独波长的高斯探针光束来避免牺牲偏振自由度的 AO 方案^[165],其概念图如图 12(c),该方案使得基于 AO 的湍流效应抑制在成熟化和系统化的道路上迈出了一大步。

除了基于 WFS 的 AO 方案之外,基于相位检索算法的无 WFS 湍流抑制方案也常被用于 OAM 光通信系统。利用相位检索算法,可直接从捕获的光强图像中反演出畸变相位,其主流经典算法包括 Gerchberg-Saxton(GS)算法^[166]和随机并行梯度下降(SPGD)^[167]算法等。2012 年,Ren 等^[168]提出一套基于

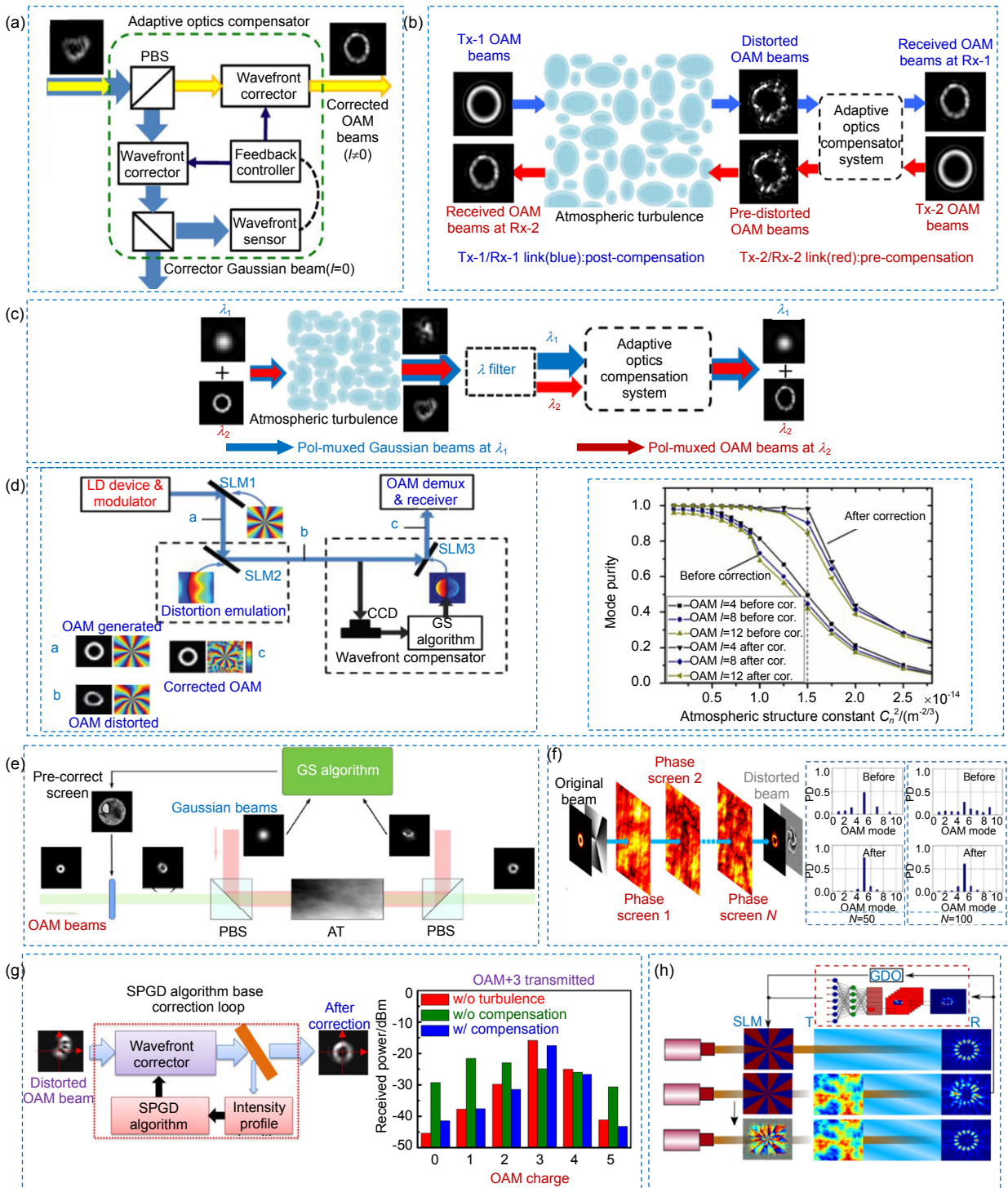


图 12 基于 AO 的湍流效应抑制方案。(a) 利用高斯探针光束进行波前传感的 AO 方案^[163]，(b) 双向 OAM-FSO 链路湍流抑制方案^[164]，(c) 单波长高斯探针光束进行波前传感的 AO 方案^[165]，(d) 基于 GS 算法的无 WFS 的 AO 方案^[168]，(e) 基于高斯探针光束与 GS 算法联合的 AO 方案^[169]，(f) 湍流仿真过程及 GS 算法校正性能(部分)^[170]，(g) 基于 SPGD 算法的无 WFS 方案^[172]，(h) 基于人工神经网络的 AO 方案^[173]

Fig. 12 Turbulence suppression scheme based on AO. (a) AO scheme for wavefront sensing using Gaussian probe beam^[163]; (b) Turbulence suppression scheme of a bidirectional OAM-FSO link^[164]; (c) AO scheme for wavefront sensing with single-wavelength Gaussian probe beam^[165]; (d) AO scheme without WFS based on GS algorithm^[168]; (e) AO scheme based on Gaussian probe beam combined with GS algorithm^[169]; (f) Turbulence simulation process and GS algorithm correction performance (partial)^[170]; (g) A WFS-free scheme based on SPGD algorithm^[172]; (h) AO scheme based on artificial neural network^[173]

GS 算法的 OAM 光束缓解系统,如图 12(d)所示。其仿真结果表明,在一定湍流强度下,接收端利用 GS 算法推导出畸变相位并对传输波前进行纠正后,OAM 模式的纯度恢复至接近于无湍流影响的水平,并且通过计算可知,信道间串扰降低了约 20 dB。2016 年, Fu 等^[169]提出一种利用高斯探针光束与 GS 算法相结合的 OAM 光束预补偿方案。如图 12(e)所示,先利用高斯探针光束探测湍流引起的相位畸变,然后利用 GS 算法对原始图像和畸变图像进行分析,计算预补偿相位,并在发射端对 OAM 光束加入预补偿校正相位。其实验结果表明,该方案能较好地补偿单个或复合 OAM 光束,在 OAM 数据传输系统中有一定的应用潜力。但需要指出的是,虽然 GS 算法在相位恢复上有较好的效果,但是随着湍流强度的增大,该算法仍然存在校正极限。为了探究这个问题,2019 年,合肥工业大学郭忠义研究团队^[170]在仿真建模中通过改变湍流模拟相位屏个数以及折射率结构系数,进一步探究了在模拟湍流环境下 GS 算法对 OAM 光束的恢复极限(如图 12(f)所示)。其仿真结果表明,1000 m 传输距离内,当大气折射率结构系数 C_n^2 小于 $1 \times 10^{-14} \text{ m}^{-2/3}$,同时模拟湍流相位屏个数 N 设置在 100 块以内时,GS 算法的采用可有效恢复失真 OAM 光束的波前,且对单 OAM 光束的恢复效果优于对复合 OAM 光束的恢复效果。而当 C_n^2 和 N 超出上述范围时,GS 算法会失去其校正性能。与 GS 算法类似,SPGD 算法凭借着其优良的相位校正能力,近些年也常作为湍流抑制方案的核心被用于 OAM 光通信领域^[171]。2015 年, Xie 等^[172]利用基于 Zernike 多项式的 SPGD 算法对测量的 OAM 光束进行分析。算法中通过基于迭代的反馈回路检测畸变 OAM 光束的强度分布来得到 Zernike 多项式系数,再通过该多项式的线性组合来拟合出校正相位,进而对畸变光束进行相位校正,其方案及校正性能如图 12(g)所示。实验结果表明,利用 SPGD 算法可极大抑制湍流效应,大幅提升 OAM 信号光束的纯度,并且 OAM 信道间串扰可降低 5 dB 以上。

尽管以 GS 算法和 SPGD 算法等相位检索算法为代表的无 WFS 的 AO 方案在湍流效应抑制工作上取得了较为优秀的表现,但是在算法便捷度上仍有提升的空间并且其校正的范围依旧相对有限。而近些年随着机器学习技术的迅猛发展,基于机器学习技术的 AO 方案凭借着其相应速度快和校正质量高等优势越来越受到人们的关注。2018 年, Lohani 等^[173]设计了一种基

于人工神经网络的 AO 方案。

如图 12(h)所示,训练好的人工神经网络用于测量畸变的 OAM 光强分布,对未知湍流强度做出预测并推算出校正相位,通过反馈回路采用预补偿的方式来减小湍流对 OAM 光束的影响。仿真结果表明,接收端接收到的经校正后的光强分布与期望的光强分布基本相同,均方误差指数接近于零,从而大大提高了 OAM-FSO 链路的鲁棒性,这也为后续新型 AO 抑制方案的设计提供了新思路。

6.2 基于信号处理的湍流效应抑制方案

目前,上述的基于 AO 的湍流效应抑制方案已广泛应用于 OAM 光通信领域。此外,基于信号处理的湍流效应抑制方案凭借着复杂性小、成本低廉等优势也吸引着研究人员的关注,取得了一系列进展。在传统无线通信领域常见的信号处理方法如多输入多输出(MIMO)均衡技术和信道编码技术等,均可用于 OAM 通信系统中来减轻湍流效应。

2014 年, Huang 等^[174]实验上利用外差检测技术设计了一个适用于 OAM-FSO 通信链路的 4×4 自适应 MIMO 均衡器。其装置如图 13(a)所示,首先,接收端的光分器对接收到携带信号的复用 OAM 光束进行分束,接着进行 OAM 光束解调操作,解调后的光束在与本振光束相干后一并送入光电二极管进行光电转换,然后通过一个四通道实时示波器采样,最后对多路采样信号进行离线 MIMO 数字信号处理。其实验结果表明, MIMO 均衡有助于减轻由湍流引起的串扰,采用 MIMO 均衡技术后 OAM 复用光通信链路中信号的误差矢量幅度(EVM)和误码率(BER)均明显下降,功率代价提升了 4.5 dB 左右。而针对 MIMO 技术在强湍流环境下可能会失效的问题,2016 年, Ren 等^[175]提出了空间分集技术与湍流效应抑制技术相结合的联合方案。如图 13(b)所示,实验结果证明在弱湍流信道环境下,仅使用 4×4 MIMO 均衡可以帮助恢复系统 BER,且功率代价低于 2.5 dB。而在强湍流信道环境下,双 OAM 信道可通过空间分集技术和 MIMO 均衡来恢复,且功率代价低于 7.5 dB。此外,一些传统信道编码技术如 LDPC 码^[19,176-177], Turbo 码等^[19,142]也是降低湍流信道环境下通信链路误码率的良好选择,通过信道编码技术往往可使 OAM 通信链路的误码率降低 4 到 6 个数量级^[19]。这些方案的提出大大提升了系统的鲁棒性,使得 OAM 光通信技术在实用化的方向上迈出了的一大步。

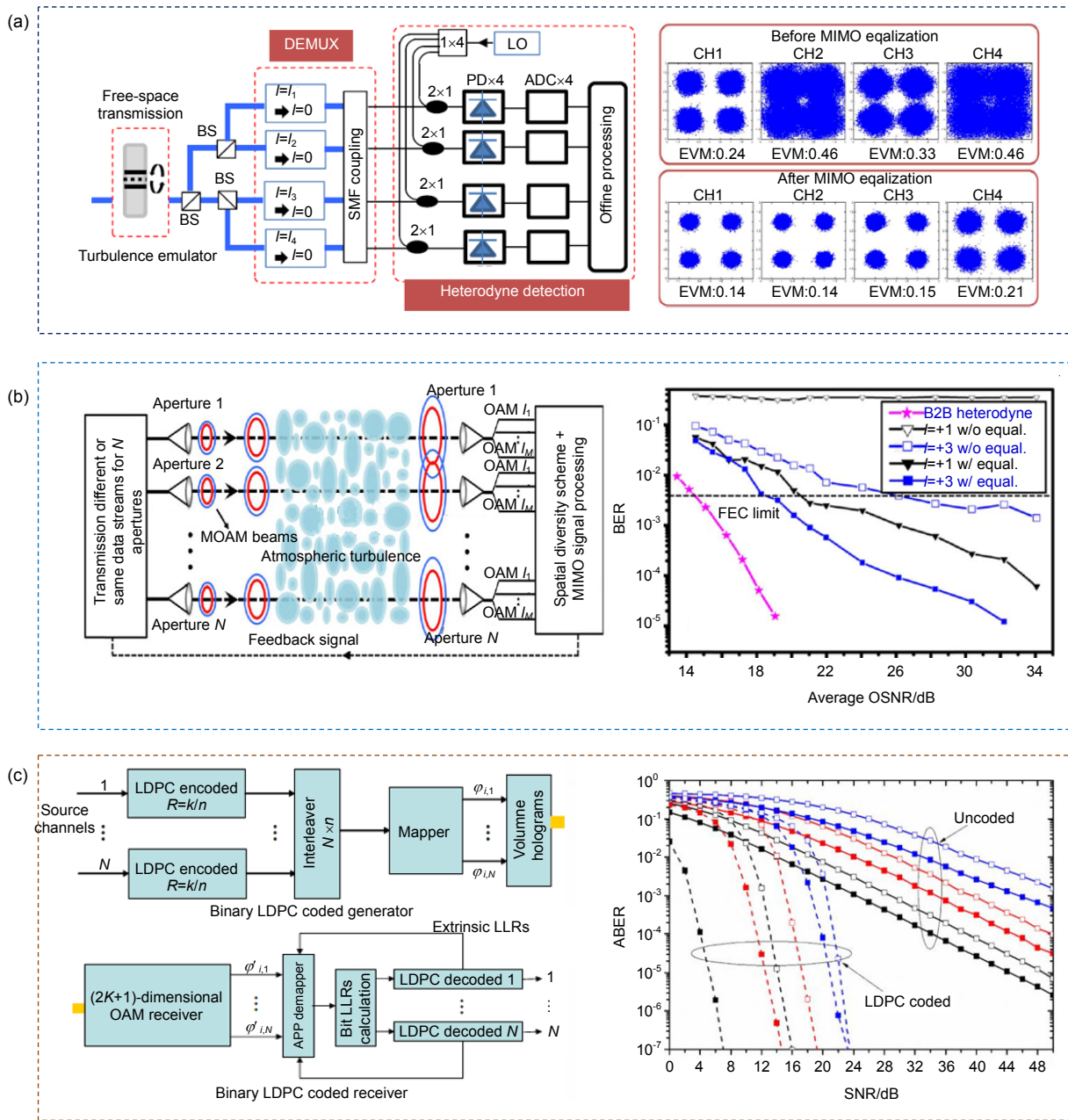


图 13 基于信号处理的湍流效应抑制技术。(a) 基于 MIMO 均衡算法的 OAM 通信系统实验及信号均衡结果^[174];

(b) 基于 MIMO 均衡算法与空间分集技术联合方案的 OAM 通信系统及 BER 性能表现^[175];

(c) LDPC 编译码结构^[19]及 OAM 通信系统 BER 性能表现^[177]

Fig. 13 Turbulence suppression technology based on signal processing.

(a) Experiment of OAM communication systems and results of signal equalizations based on MIMO equalization^[174];

(b) BER performance of OAM communication system based on MIMO equalization algorithm and spatial diversity technology^[175];

(c) LDPC structure^[19] and BER performance of OAM communication system^[177]

7 结论与展望

利用 OAM 模式值的无穷性和 OAM 光束之间的正交性，基于 OAM 的光通信技术改变了以往光通信局限于波长/频率、时间、复振幅和偏振等维度资源的

现状，对空间维度资源进行了充分利用，并由此产生的 OAM-SK 及 OAM-DM 两种通信机制使得传统光通信技术迈上了一个新台阶。利用 OAM 光束作为信息载体为丰富 FSO 光通信系统中的调制方式和在空间维度方面提升信息传输容量提供了潜在的解决方案。本

文从 OAM 的基本理论出发, 综述了 OAM 光束的种类及产生方案。同时, 对近些年 OAM-SK 和 OAM-DM 这两种应用机制的典型研究方案进行了概述, 对其中涉及的 OAM 光束复用技术、解调技术和 OAM 光通信湍流效应抑制技术等关键技术进行了详细阐述。

随着全球信息一体化进程的加速, 海、陆、空、天化跨场景的光通信网将会是未来通信发展的重要趋势, 而 OAM 光通信有望在光通信组网领域大放异彩。这就要求着 OAM 光通信的核心器件需向着更加小型化和集成化的方向发展。例如, 研究发展具有更高刷新速率和更快响应时间的调制器件, 以满足更加高速的通信需求; 研究发展更加简易小型的解调器件以满足大规模通信组网的需要。并且, 通信组网对信道传输环境要求较高, 这就使得需要充分考虑传输信道如自由空间、光纤、水下等复杂介质的传输信道损耗及损伤机制, 从而进一步设计和改进适用于复杂信道环境的 OAM 光通信方案。总之, OAM 光通信作为一种新型光通信技术目前已经受到了研究人员的广泛关注, 但是仍然存在着些许问题与挑战, 值得进一步深入研究和解决。此外, OAM 除了在光通信领域有所发展, 其在声通信及传统射频通信领域也有着十分广阔的应用前景^[178-179], 其未来是否能参与推动下一代无线通信技术的革命性变革, 值得期待。

参考文献

- [1] Wang J. Metasurfaces enabling structured light manipulation: advances and perspectives[J]. *Chinese Optics Letters*, 2018, **16**(5): 050006.
- [2] Yi A L, Yan L S, Pan Y, et al. Transmission of multi-dimensional signals for next generation optical communication systems[J]. *Optics Communications*, 2018, **408**: 42–52.
- [3] Winzer P J. Modulation and multiplexing in optical communications[C]//*Conference on Lasers & Electro-Optics*, Baltimore, Maryland United States, 2009.
- [4] Zhou X, Yu J J. Multi-level, multi-dimensional coding for high-speed and high-spectral-efficiency optical transmission[J]. *Journal of Lightwave Technology*, 2009, **27**(16): 3641–3653.
- [5] Richter T, Palushani E, Schmidt-Langhorst C, et al. Transmission of single-channel 16-QAM data signals at terabaud symbol rates[J]. *Journal of Lightwave Technology*, 2012, **30**(4): 504–511.
- [6] Gnauck A H, Winzer P J, Chandrasekhar S, et al. Spectrally efficient long-haul WDM transmission using 224-Gb/s polarization-multiplexed 16-QAM[J]. *Journal of Lightwave Technology*, 2011, **29**(4): 373–377.
- [7] Zhou X, Yu J J, Huang M F, et al. 64-Tb/s, 8 b/s/Hz, PDM-36QAM transmission over 320 km using both pre- and post-transmission digital signal processing[J]. *Journal of Lightwave Technology*, 2011, **29**(4): 571–577.
- [8] Winzer P J. Making spatial multiplexing a reality[J]. *Nature Photonics*, 2014, **8**(5): 345–348.
- [9] 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.
- [10] Guo Z Y, Qu S L, Liu S T. Generating optical vortex with computer-generated hologram fabricated inside glass by femtosecond laser pulses[J]. *Optics Communications*, 2007, **273**(1): 286–289.
- [11] Guo Z Y, Qu S L, Sun Z H, et al. Superposition of orbital angular momentum of photons by a combined computer-generated hologram fabricated in silica glass with femtosecond laser pulses[J]. *Chinese Physics B*, 2008, **17**(11): 4199–4203.
- [12] Ran L L, Qu S L, Guo Z Y. Surface micro-structures on amorphous alloys induced by vortex femtosecond laser pulses[J]. *Chinese physics B*, 2010, **19**(3): 034204.
- [13] Li Y, Guo Z Y, Qu S L. Living cell manipulation in a microfluidic device by femtosecond optical tweezers[J]. *Optics and Lasers in Engineering*, 2014, **55**: 150–154.
- [14] Zhu L, Guo Z Y, Xu Q, et al. Calculating the torque of the optical vortex tweezer to the ellipsoidal microparticles[J]. *Optics Communications*, 2015, **354**: 34–39.
- [15] Liu C X, Guo Z Y, Li Y, et al. Manipulating ellipsoidal micro-particles by femtosecond vortex tweezers[J]. *Journal of Optics*, 2015, **17**(3): 035402.
- [16] Nye J F, Berry M V. Dislocations in wave trains[J]. *Proceedings of the Royal Society of London. A. Mathematical and Physical Sciences*, 1974, **336**(1605): 165–190.
- [17] Berry M V, Nye J F, Wright F J. The elliptic umbilic diffraction catastrophe[J]. *Philosophical Transactions of the Royal Society of London. Series A, Mathematical and Physical Sciences*, 1979, **291**(1382): 453–484.
- [18] 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.
- [19] Yuan X C, Jia P, Lei T, et al. Optical vortices and optical communication with orbital angular momentum[J]. *Journal of Shenzhen University (Science & Engineering)*, 2014, **31**(4): 331–346.
袁小聪, 贾平, 雷霆, 等. 光学旋涡与轨道角动量光通信[J]. *深圳大学学报(理工版)*, 2014, **31**(4): 331–346.
- [20] 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.
- [21] Liu Y D, Gao C Q, Gao M W, et al. Superposition and detection of two helical beams for optical orbital angular momentum communication[J]. *Optics Communications*, 2008, **281**(14): 3636–3639.
- [22] Krenn M, Fickler R, Fink M, et al. Communication with spatially modulated light through turbulent air across Vienna[J]. *New Journal of Physics*, 2014, **16**(11): 113028.
- [23] Krenn M, Handsteiner J, Fink M, et al. Twisted light transmission over 143 km[J]. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, 2016, **113**(48): 13648–13653.
- [24] 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.
- [25] Li S H, Wang J. Experimental demonstration of optical interconnects exploiting orbital angular momentum array[J]. *Optics Express*, 2017, **25**(18): 21537–21547.
- [26] Fu S Y, Zhai Y W, Yin C, et al. Mixed orbital angular momentum

- amplitude shift keying through a single hologram[J]. *OSA Continuum*, 2018, 1(2): 295–308.
- [27] Kai C H, Huang P, Shen F, *et al.* Orbital angular momentum shift keying based optical communication system[J]. *IEEE Photonics Journal*, 2017, 9(2): 7902510.
- [28] 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.
- [29] Li X K, Li Y, Zeng X N, *et al.* Perfect optical vortex array for optical communication based on orbital angular momentum shift keying[J]. *Journal of Optics*, 2018, 20(12): 125604.
- [30] Awaji Y, Wada N, Toda Y. Demonstration of spatial mode division multiplexing using Laguerre-Gaussian mode beam in telecom-wavelength[C]//2010 23rd Annual Meeting of the IEEE Photonics Society, Denver, CO, USA, 2010: 551–552.
- [31] Wang J, Yang J Y, Fazal I M, *et al.* Demonstration of 12.8-bit/s/Hz spectral efficiency using 16-QAM signals over multiple orbital-angular-momentum modes[C]//2011 37th European Conference and Exhibition on Optical Communication, Geneva, Switzerland, 2011: 1–3.
- [32] Wang J, Yang J Y, Fazal I M, *et al.* 25.6-bit/s/Hz spectral efficiency using 16-QAM signals over pol-muxed multiple orbital-angular-momentum modes[C]//IEEE Photonic Society 24th Annual Meeting, Arlington, VA, USA, 2011: 587–588.
- [33] Fazal I M, Wang J, Yang J Y, *et al.* Demonstration of 2-Tbit/s data link using orthogonal orbital-angular-momentum modes and WDM[C]//Frontiers in Optics 2011, San Jose, California United States, 2011.
- [34] Wang J, Yang J Y, Fazal I M, *et al.* Terabit free-space data transmission employing orbital angular momentum multiplexing[J]. *Nature Photonics*, 2012, 6(7): 488–496.
- [35] Huang H, Xie G D, Yan Y, *et al.* 100 Tbit/s free-space data link using orbital angular momentum mode division multiplexing combined with wavelength division multiplexing[C]//2013 Optical Fiber Communication Conference and Exposition and the National Fiber Optic Engineers Conference (OFC/NFOEC), Anaheim, CA, USA, 2013: 1–3.
- [36] Huang H, Xie G D, Yan Y, *et al.* 100 Tbit/s free-space data link enabled by three-dimensional multiplexing of orbital angular momentum, polarization, and wavelength[J]. *Optics Letters*, 2014, 39(2): 197–200.
- [37] Wang J, Li S H, Li C, *et al.* Ultra-high 230-bit/s/Hz spectral efficiency using OFDM/OQAM 64-QAM signals over pol-muxed 22 orbital angular momentum (OAM) modes[C]//Optical Fiber Communications Conference & Exhibition, San Francisco, CA, USA, 2014: 1–3.
- [38] 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, Cannes, France, 2014: 1–3.
- [39] 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), Valencia, Spain, 2015: 1–3.
- [40] Lei T, Zhang M, Li Y R, *et al.* Massive individual orbital angular momentum channels for multiplexing enabled by Dammann gratings[J]. *Light: Science & Applications*, 2015, 4(3): e257.
- [41] Zhu Y X, Zou K H, Zheng Z N, *et al.* 1 λ × 1.44 Tb/s free-space IM-DD transmission employing OAM multiplexing and PDM[J]. *Optics Express*, 2016, 24(4): 3967–3980.
- [42] Li S H, Wang J. Multi-orbital-angular-momentum multi-ring fiber for high-density space-division multiplexing[J]. *IEEE Photonics Journal*, 2013, 5(5): 7101007.
- [43] Yue Y, Yan Y, Ahmed N, *et al.* Mode properties and propagation effects of optical orbital angular momentum (OAM) modes in a ring fiber[J]. *IEEE Photonics Journal*, 2012, 4(2): 535–543.
- [44] Li S H, Wang J. A compact trench-assisted multi-orbital-angular-momentum multi-ring fiber for ultrahigh-density space-division multiplexing (19 rings × 22 modes)[J]. *Scientific Reports*, 2014, 4: 3853.
- [45] 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.
- [46] 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.
- [47] Wang W, Wang P, Cao T, *et al.* Performance investigation of underwater wireless optical communication system using M-ary OAMSK modulation over oceanic turbulence[J]. *IEEE Photonics Journal*, 2017, 9(5): 7905315.
- [48] 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.
- [49] 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.
- [50] 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.
- [51] Gori F, Guattari G, Padovani C. Bessel-gauss beams[J]. *Optics Communications*, 1987, 64(6): 491–495.
- [52] Zhu L, Wang J. Demonstration of obstruction-free data-carrying N-fold Bessel modes multicasting from a single Gaussian mode[J]. *Optics Letters*, 2015, 40(23): 5463–5466.
- [53] Ahmed N, Lavery M P, Huang H, *et al.* Experimental demonstration of obstruction-tolerant free-space transmission of two 50-Gbaud QPSK data channels using Bessel beams carrying orbital angular momentum[C]//2014 The European Conference on Optical Communication (ECOC), Cannes, France, 2014: 1–3.
- [54] Li S H, Wang J. Adaptive free-space optical communications through turbulence using self-healing Bessel beams[J]. *Scientific Reports*, 2017, 7: 43233.
- [55] Mphuthi N, Gailele L, Litvin I, *et al.* Free-space optical communication link with shape-invariant orbital angular momentum Bessel beams[J]. *Applied Optics*, 2019, 58(16): 4258–4264.
- [56] Ostrovsky A S, Rickenstorff-Parrao C, Arrizón V. Generation of the “perfect” optical vortex using a liquid-crystal spatial light modulator[J]. *Optics Letters*, 2013, 38(4): 534–536.
- [57] Wang Y J, Li X Z, Li H H, *et al.* Research progress of perfect vortex field[J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2017, 54(9): 090007.
王亚军, 李新忠, 李贺贺, 等. 完美涡旋光场的研究进展[J]. *激光与光电子学进展*, 2017, 54(9): 090007.
- [58] Vaity P, Rusch L. Perfect vortex beam: Fourier transformation of a Bessel beam[J]. *Optics Letters*, 2015, 40(4): 597–600.
- [59] Zhu F Q, Huang S J, Shao W, *et al.* Free-space optical communication link using perfect vortex beams carrying orbital angular momentum (OAM)[J]. *Optics Communications*, 2017, 396:

- 50–57.
- [60] Wang L, Jiang X C, Zou L, *et al.* Two-dimensional multiplexing scheme both with ring radius and topological charge of perfect optical vortex beam[J]. *Journal of Modern Optics*, 2019, **66**(1): 87–92.
- [61] Zhan Q W. Cylindrical vector beams: from mathematical concepts to applications[J]. *Advances in Optics and Photonics*, 2009, **1**(1): 1–57.
- [62] Fu S Y, Gao C Q. Selective generation of arbitrary vectorial vortex beams (Invited Paper)[J]. *Acta Optica Sinica*, 2019, **39**(1): 0126014.
付时尧, 高春清. 矢量涡旋光束的模式连续可调生成技术 (特邀论文)[J]. *光学学报*, 2019, **39**(1): 0126014.
- [63] Ndagano B, Nape I, Cox M A, *et al.* Creation and detection of vector vortex modes for classical and quantum communication[J]. *Journal of Lightwave Technology*, 2018, **36**(2): 292–301.
- [64] Lavery M P J, Milione G, Nguyen T A, *et al.* Space division multiplexing in a basis of vector modes[C]//2014 *The European Conference on Optical Communication (ECOC)*, Cannes, France, 2014: 1–3.
- [65] Zhao Y F, Wang J. High-base vector beam encoding/decoding for visible-light communications[J]. *Optics Letters*, 2015, **40**(21): 4843–4846.
- [66] Zhang J B, Li F, Li J P, *et al.* 120 Gbit/s 2×2 vector-modes-division-multiplexing DD-OFDM-32QAM free-space transmission[J]. *IEEE Photonics Journal*, 2016, **8**(6): 7907008.
- [67] Li P, Zhang Y, Liu S, *et al.* Generation of perfect vectorial vortex beams[J]. *Optics Letters*, 2016, **41**(10): 2205–2208.
- [68] Fu S Y, Wang T L, Zhang Z Y, *et al.* Selective acquisition of multiple states on hybrid Poincare sphere[J]. *Applied Physics Letters*, 2017, **110**(19): 191102.
- [69] Okida M, Omatsu T, Itoh M, *et al.* Direct generation of high power Laguerre-Gaussian output from a diode-pumped Nd:YVO₄ 1.3- μm bounce laser[J]. *Optics Express*, 2007, **15**(12): 7616–7622.
- [70] 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.
- [71] 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.
- [72] Miao P, Zhang Z F, Sun J B, *et al.* Orbital angular momentum microlaser[J]. *Science*, 2016, **353**(6298): 464–467.
- [73] Wang S, Zhang S L, Qiao H C, *et al.* Direct generation of vortex beams from a double-end polarized pumped Yb:KYW laser[J]. *Optics Express*, 2018, **26**(21): 26925–26932.
- [74] 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.
- [75] 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**(4–6): 183–188.
- [76] Oemrawsingh S S R, Van Houwelingen J A W, Eliel E R, *et al.* Production and characterization of spiral phase plates for optical wavelengths[J]. *Applied Optics*, 2004, **43**(3): 688–694.
- [77] Sueda K, Miyaji G, Miyajima N, *et al.* Laguerre-Gaussian beam generated with a multilevel spiral phase plate for high intensity laser pulses[J]. *Optics Express*, 2004, **12**(15): 3548–3553.
- [78] Massari M, Ruffato G, Gintoli M, *et al.* Fabrication and characterization of high-quality spiral phase plates for optical applications[J]. *Applied Optics*, 2015, **54**(13): 4077–4083.
- [79] Rafighdoost J, Sabatyan A. Spirally phase-shifted zone plate for generating and manipulating multiple spiral beams[J]. *Journal of the Optical Society of America B*, 2017, **34**(3): 608–612.
- [80] 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.
- [81] Wei S B, Wang D P, Lin J, *et al.* Demonstration of orbital angular momentum channel healing using a Fabry-Pérot cavity[J]. *Opto-Electronic Advances*, 2018, **1**(5): 180006.
- [82] Ke X Z, Xue P. Generation of Orbital Angular Momentum superpositions and its test[J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2018, **47**(4): 417007.
柯熙政, 薛璞. 轨道角动量叠加态的产生及其检验[J]. *红外与激光工程*, 2018, **47**(4): 417007.
- [83] Mirhosseini M, Magaña-Loaiza O S, Chen C C, *et al.* Rapid generation of light beams carrying orbital angular momentum[J]. *Optics Express*, 2013, **21**(25): 30196–30203.
- [84] Heckenberg N R, McDuff R, Smith C P, *et al.* Generation of optical phase singularities by computer-generated holograms[J]. *Optics Letters*, 1992, **17**(3): 221–223.
- [85] 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**(1–3): 123–132.
- [86] 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.
- [87] Karimi E, Piccirillo B, Nagali E, *et al.* Efficient generation and sorting of orbital angular momentum eigenmodes of light by thermally tuned q-plates[J]. *Applied Physics Letters*, 2009, **94**(23): 231124.
- [88] Cardano F, Karimi E, Slussarenko S, *et al.* Polarization pattern of vector vortex beams generated by q-plates with different topological charges[J]. *Applied Optics*, 2012, **51**(10): C1–C6.
- [89] Marrucci L, Karimi E, Slussarenko S, *et al.* Spin-to-orbital conversion of the angular momentum of light and its classical and quantum applications[J]. *Journal of Optics*, 2011, **13**(6): 064001.
- [90] 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.
- [91] Guo Z Y, Wang Y Z, Zheng Q, *et al.* Advances of research on antenna technology of vortex electromagnetic waves[J]. *Journal of Radars*, 2019, **8**(5): 631–655.
郭忠义, 汪彦哲, 郑群, 等. 涡旋电磁波天线技术研究进展[J]. *雷达学报*, 2019, **8**(5): 631–655.
- [92] 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.
- [93] 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.
- [94] 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.
- [95] 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.
- [96] Wang W, Li Y, Guo Z Y, *et al.* Ultra-thin optical vortex phase plate based on the metasurface and the angular momentum transformation[J]. *Journal of Optics*, 2015, **17**(4): 045102.
- [97] 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.
- [98] Ma Z J, Li Y, Li Y, *et al.* All-dielectric planar chiral metasurface with gradient geometric phase[J]. *Optics Express*, 2018, **26**(5): 6067–6078.
- [99] Inavalli V V G K, Viswanathan N K. Switchable vector vortex beam generation using an optical fiber[J]. *Optics Communications*, 2010, **283**(6): 861–864.
- [100] Yan Y, Wang J, Zhang L, *et al.* Fiber coupler for generating orbital angular momentum modes[J]. *Optics Letters*, 2011, **36**(21): 4269–4271.
- [101] Yan Y, Zhang L, Wang J, *et al.* Fiber structure to convert a Gaussian beam to higher-order optical orbital angular momentum modes[J]. *Optics Letters*, 2012, **37**(16): 3294–3296.
- [102] Yan Y, Yue Y, Huang H, *et al.* Efficient generation and multiplexing of optical orbital angular momentum modes in a ring fiber by using multiple coherent inputs[J]. *Optics Letters*, 2012, **37**(17): 3645–3647.
- [103] Fang L, Wang J. Flexible generation/conversion/exchange of fiber-guided orbital angular momentum modes using helical gratings[J]. *Optics Letters*, 2015, **40**(17): 4010–4013.
- [104] Li S H, Mo Q, Hu X, *et al.* Controllable all-fiber orbital angular momentum mode converter[J]. *Optics Letters*, 2015, **40**(18): 4376–4379.
- [105] Ke X Z, Ge T. Experiment on generation of vortex light with few-mode fiber[J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2017, **44**(11): 176–183.
柯熙政, 葛甜. 利用少模光纤产生涡旋光的实验[J]. *中国激光*, 2017, **44**(11): 176–183.
- [106] Cai X, Wang J, Strain M J, *et al.* Integrated compact optical vortex beam emitters[J]. *Science*, 2012, **338**(6105): 363–366.
- [107] Guan B B, Scott R P, Qin C, *et al.* Free-space coherent optical communication with orbital angular, momentum multiplexing/demultiplexing using a hybrid 3D photonic integrated circuit[J]. *Optics Express*, 2014, **22**(1): 145–156.
- [108] Su T, 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.
- [109] Xiao Q S, Klitis C, Li S M, *et al.* Generation of photonic orbital angular momentum superposition states using vortex beam emitters with superimposed gratings[J]. *Optics Express*, 2016, **24**(4): 3168–3176.
- [110] Zheng S, Wang J. On-chip orbital angular momentum modes generator and (de) multiplexer based on trench silicon waveguides[J]. *Optics Express*, 2017, **25**(15): 18492–18501.
- [111] Zhou N, Zheng S, Cao X P, *et al.* Generating and synthesizing ultrabroadband twisted light using a compact silicon chip[J]. *Optics Letters*, 2018, **43**(13): 3140–3143.
- [112] 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.
- [113] Fontaine N K, Doerr C R, Buhl L L. Efficient multiplexing and demultiplexing of free-space orbital angular momentum using photonic integrated circuits[C]//*OFC/NFOEC*, Los Angeles, CA, USA, 2012: 1–3.
- [114] Liu Y J, Xuan L, Hu L F, *et al.* Investigation on the liquid crystal spatial light modulator with high precision and pure phase[J]. *Acta Optica Sinica*, 2005, **25**(12): 1682–1686.
刘永军, 宣丽, 胡立发, 等. 高精度纯相位液晶空间光调制器的研究[J]. *光学学报*, 2005, **25**(12): 1682–1686.
- [115] Zhu L, Wang J. Simultaneous generation of multiple orbital angular momentum (OAM) modes using a single phase-only element[J]. *Optics Express*, 2015, **23**(20): 26221–26233.
- [116] Yan Y, Yue Y, Huang H, *et al.* Multicasting in a spatial division multiplexing system based on optical orbital angular momentum[J]. *Optics Letters*, 2013, **38**(19): 3930–3933.
- [117] Kai C H, Feng Z K, Dedo M I, *et al.* The performances of different OAM encoding systems[J]. *Optics Communications*, 2019, **430**: 151–157.
- [118] Zhang N, Davis J A, Moreno I, *et al.* Analysis of multilevel spiral phase plates using a Dammann vortex sensing grating[J]. *Optics Express*, 2010, **18**(25): 25987–25992.
- [119] Dai K J, Gao C Q, Zhong L, *et al.* Measuring OAM states of light beams with gradually-changing-period gratings[J]. *Optics Letters*, 2015, **40**(4): 562–565.
- [120] Zheng S, Wang J. Measuring orbital angular momentum (OAM) states of vortex beams with annular gratings[J]. *Scientific Reports*, 2017, **7**: 40781.
- [121] Leach J, Padgett M J, Barnett S M, *et al.* Measuring the orbital angular momentum of a single photon[J]. *Physical Review Letters*, 2002, **88**: 257901.
- [122] Sztul H I, Alfano R R. Double-slit interference with Laguerre-Gaussian beams[J]. *Optics Letters*, 2006, **31**(7): 999–1001.
- [123] Ke X Z, Xu J Y. Interference and detection of vortex beams with orbital angular momentum[J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2016, **43**(9): 192–197.
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): 192–197.
- [124] Berkhout G C G, Beijersbergen M W. Method for probing the orbital angular momentum of optical vortices in electromagnetic waves from astronomical objects[J]. *Physical Review Letters*, 2008, **101**(10): 100801.
- [125] Guo C S, Lu L L, Wang H T. Characterizing topological charge of optical vortices by using an annular aperture[J]. *Optics Letters*, 2009, **34**(23): 3686–3688.
- [126] Berkhout G C G, Beijersbergen M W. Measuring optical vortices in a speckle pattern using a multi-pinhole interferometer[J]. *Optics Express*, 2010, **18**(13): 13836–13841.
- [127] Mesquita P H F, Jesus-Silva A J, Fonseca E J S, *et al.* Engineering a square truncated lattice with light's orbital angular momentum[J]. *Optics Express*, 2011, **19**(21): 20616–20621.
- [128] Ferreira Q S, Jesus-Silva A J, Fonseca E J S, *et al.* Fraunhofer diffraction of light with orbital angular momentum by a slit[J]. *Optics Letters*, 2011, **36**(16): 3106–3108.
- [129] 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.
- [130] Mirhosseini M, Malik M, Shi Z M, *et al.* Efficient separation of the orbital angular momentum eigenstates of light[J]. *Nature Communications*, 2013, **4**(1): 2781.
- [131] Wen Y H, Chremmos I, Chen Y J, *et al.* Spiral transformation for high-resolution and efficient sorting of optical vortex modes[J]. *Physical Review Letters*, 2018, **120**(19): 193904.
- [132] Ke X Z, Xie Y C, Zhang Y. Orbital angular momentum measurement of vortex beam and its performance improvement[J]. *Acta Optica Sinica*, 2019, **39**(1): 0126017.
柯熙政, 谢炎辰, 张颖. 涡旋光束轨道角动量检测及其性能改善[J]. *光学学报*, 2019, **39**(1): 0126017.
- [133] Feng Z K, Wang X Y, Dedo M I, *et al.* High-density Orbital Angular Momentum mode analyzer based on the mode converters combining with the modified Mach-Zehnder interferometer[J]. *Optics Communications*, 2019, **435**: 441–448.

- [134] Mamadou D, Shen F, Dedo M, *et al.* High-efficiency sorting and measurement of orbital angular momentum modes based on the March–Zehnder interferometer and complex phase gratings[J]. *Measurement Science and Technology*, 2019, **30**(7): 075201.
- [135] Zhou J, Zhang W H, Chen L X. Experimental detection of high-order or fractional orbital angular momentum of light based on a robust mode converter[J]. *Applied Physics Letters*, 2016, **108**(11): 111108.
- [136] Zhou H L, Fu D Z, Dong J J, *et al.* Orbital angular momentum complex spectrum analyzer for vortex light based on the rotational Doppler effect[J]. *Light: Science & Applications*, 2016, **6**(4): e16251.
- [137] LeCun Y, Bengio Y, Hinton G. Deep learning[J]. *Nature*, 2015, **521**(7553): 436–444.
- [138] Knutson E M, Lohani S, Danaci O, *et al.* Deep learning as a tool to distinguish between high orbital angular momentum optical modes[C]//*Optics and Photonics for Information Processing X. International Society for Optics and Photonics*, San Diego, California, United States 2016, **9970**: 997013.
- [139] Doster T, Watnik A T. Machine learning approach to OAM beam demultiplexing via convolutional neural networks[J]. *Applied Optics*, 2017, **56**(12): 3386–3396.
- [140] Li J, Zhang M, Wang D S. Adaptive demodulator using machine learning for orbital angular momentum shift keying[J]. *IEEE Photonics Technology Letters*, 2017, **29**(17): 1455–1458.
- [141] Li J, Zhang M, Wang D S, *et al.* Joint atmospheric turbulence detection and adaptive demodulation technique using the CNN for the OAM-FSO communication[J]. *Optics Express*, 2018, **26**(8): 10494–10508.
- [142] Tian Q H, Li Z, Hu K, *et al.* Turbo-coded 16-ary OAM shift keying FSO communication system combining the CNN-based adaptive demodulator[J]. *Optics Express*, 2018, **26**(21): 27849–27864.
- [143] Zhao Q S, Hao S Q, Wang Y, *et al.* Mode detection of misaligned orbital angular momentum beams based on convolutional neural network[J]. *Applied Optics*, 2018, **57**(35): 10152–10158.
- [144] Jiang S Q, Chi H, Yu X B, *et al.* Coherently demodulated orbital angular momentum shift keying system using a CNN-based image identifier as demodulator[J]. *Optics Communications*, 2019, **435**: 367–373.
- [145] Wang Z K, Dedo M I, Guo K, *et al.* Efficient recognition of the propagated orbital angular momentum modes in turbulences with the convolutional neural network[J]. *IEEE Photonics Journal*, 2019, **11**(3): 7903614.
- [146] Chi H, Jiang S Q, Ou J, *et al.* Comprehensive study of orbital angular momentum shift keying systems with a CNN-based image identifier[J]. *Optics Communications*, 2019, **454**: 124518.
- [147] Xie G D, Ren Y X, Yan Y, *et al.* Experimental demonstration of a 200-Gbit/s free-space optical link by multiplexing Laguerre–Gaussian beams with different radial indices[J]. *Optics Letters*, 2016, **41**(15): 3447–3450.
- [148] Li L, Xie G D, Yan Y, *et al.* Power loss mitigation of orbital-angular-momentum-multiplexed free-space optical links using nonzero radial index Laguerre–Gaussian beams[J]. *Journal of the Optical Society of America B*, 2017, **34**(1): 1–6.
- [149] Guo Z Y, Wang Z K, Dedo M I, *et al.* The orbital angular momentum encoding system with radial indices of Laguerre–Gaussian beam[J]. *IEEE Photonics Journal*, 2018, **10**(5): 7906511.
- [150] Andrews L C, Phillips R L. *Laser Beam Propagation through Random Media*[M]. 2nd ed. Bellingham, WA: SPIE Press, 2005.
- [151] Ke X Z, Wang J, Wang M J. Evolution of degree of polarization of partially coherent beams propagation in slant and horizontal atmospheric turbulence[J]. *Indian Journal of Physics*, 2019, **93**(6): 691–699.
- [152] Wang J, Ke X Z, Wang M J. Influence of source parameters and atmospheric turbulence on the polarization properties of partially coherent electromagnetic vortex beams[J]. *Applied Optics*, 2019, **58**(24): 6486–6494.
- [153] Ke X Z, Ning C, Wang J. Crosstalk analysis of orbital angular momentum-multiplexed state under atmospheric turbulence[J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2018, **47**(11): 1122002.
柯熙政, 宁川, 王姣. 大气湍流下轨道角动量复用态串扰分析[J]. *红外与激光工程*, 2018, **47**(11): 1122002.
- [154] Ke X Z, Wang C Z. Intensity distribution of partially coherent off-axis vortex beam propagating in atmospheric turbulence[J]. *Acta Optica Sinica*, 2017, **37**(1): 36–42.
柯熙政, 王超珍. 部分相干离轴涡旋光束在大气湍流中的光强分布[J]. *光学学报*, 2017, **37**(1): 36–42.
- [155] Ke X Z, Wang C Z. Intensity distribution of the partially coherent vortex beams propagating in atmospheric turbulence[J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2016, **53**(11): 110604.
柯熙政, 王超珍. 部分相干涡旋光束在大气湍流中传输时的光强分布[J]. *激光与光电子学进展*, 2016, **53**(11): 110604.
- [156] Ke X Z, Chen J, Yang Y M. Study on orbital angular momentum of Laguerre-Gaussian beam in a slant-path atmospheric turbulence[J]. *Acta Physica Sinica*, 2014, **63**(15): 150301.
柯熙政, 谌娟, 杨一明. 在大气湍流斜程传输中拉盖斯光束的轨道角动量的研究[J]. *物理学报*, 2014, **63**(15): 150301.
- [157] Xi R, Zhu B. Experimental study on short-distance free-space transmission characteristics of OAM beam[J]. *Opto-Electronic Engineering*, 2019, **46**(6): 180386.
席瑞, 朱冰. OAM 光束短距离自由空间传输特性的实验研究[J]. *光电工程*, 2019, **46**(6): 180386.
- [158] Anguita J A, Neifeld M A, Vasic B V. Turbulence-induced channel crosstalk in an orbital angular momentum-multiplexed free-space optical link[J]. *Applied Optics*, 2008, **47**(13): 2414–2429.
- [159] Tyler G A, Boyd R W. Influence of atmospheric turbulence on the propagation of quantum states of light carrying orbital angular momentum[J]. *Optics Letters*, 2009, **34**(2): 142–144.
- [160] Malik M, O'Sullivan M, Rodenburg B, *et al.* Influence of atmospheric turbulence on optical communications using orbital angular momentum for encoding[J]. *Optics Express*, 2012, **20**(12): 13195–13200.
- [161] Rodenburg B, Lavery M P J, Malik M, *et al.* Influence of atmospheric turbulence on states of light carrying orbital angular momentum[J]. *Optics Letters*, 2012, **37**(17): 3735–3737.
- [162] Ren Y X, Huang H, Xie G D, *et al.* Atmospheric turbulence effects on the performance of a free space optical link employing orbital angular momentum multiplexing[J]. *Optics Letters*, 2013, **38**(20): 4062–4065.
- [163] Ren Y X, Xie G D, Huang H, *et al.* Adaptive optics compensation of multiple orbital angular momentum beams propagating through emulated atmospheric turbulence[J]. *Optics Letters*, 2014, **39**(10): 2845–2848.
- [164] Ren Y X, Xie G D, Huang H, *et al.* Adaptive-optics-based simultaneous pre-and post-turbulence compensation of multiple orbital-angular-momentum beams in a bidirectional free-space optical link[J]. *Optica*, 2014, **1**(6): 376–382.
- [165] Ren Y X, Xie G D, Huang H, *et al.* Turbulence compensation of an orbital angular momentum and polarization-multiplexed link using a data-carrying beacon on a separate wavelength[J]. *Op-*

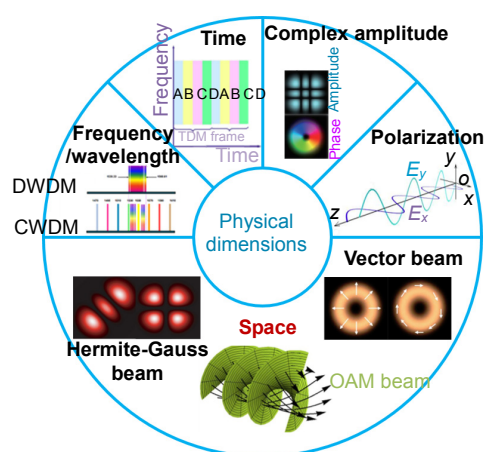
- tics Letters*, 2015, **40**(10): 2249–2252.
- [166] Gerchberg R W, Saxton W O. A practical algorithm for the determination of phase from image and diffraction plane pictures[J]. *Optik*, 1972, **35**: 237–246.
- [167] Liu L, Vorontsov M A. Phase-locking of tiled fiber array using SPGD feedback controller[C]//*Target-in-the-Loop: Atmospheric Tracking, Imaging, and Compensation II. International Society for Optics and Photonics*, San Diego, California, United States, 2005, **5895**: 58950P.
- [168] Ren Y X, Huang H, Yang J Y, *et al.* Correction of phase distortion of an OAM mode using GS algorithm based phase retrieval[C]//*CLEO: Science and Innovations 2012*, San Jose, California United States, 2012.
- [169] Fu S Y, Zhang S K, Wang T L, *et al.* Pre-turbulence compensation of orbital angular momentum beams based on a probe and the Gerchberg–Saxton algorithm[J]. *Optics Letters*, 2016, **41**(14): 3185–3188.
- [170] Dedo M I, Wang Z K, Guo K, *et al.* Retrieving Performances of Vortex Beams with GS Algorithm after Transmitting in Different Types of Turbulences[J]. *Applied Sciences*, 2019, **9**(11): 2269.
- [171] Ke X Z, Wang X Y. Experimental study on the correction of wavefront distortion for vortex beam[J]. *Acta Optica Sinica*, 2018, **38**(3): 197–203.
柯熙政, 王夏尧. 涡旋光波前畸变校正实验研究[J]. *光学学报*, 2018, **38**(3): 197–203.
- [172] Xie G D, Ren Y X, Huang H, *et al.* Phase correction for a distorted orbital angular momentum beam using a Zernike polynomials-based stochastic-parallel-gradient-descent algorithm[J]. *Optics Letters*, 2015, **40**(7): 1197–1200.
- [173] Lohani S, Glasser R T. Turbulence correction with artificial neural networks[J]. *Optics Letters*, 2018, **43**(11): 2611–2614.
- [174] Huang H, Cao Y W, Xie G D, *et al.* Crosstalk mitigation in a free-space orbital angular momentum multiplexed communication link using 4×4 MIMO equalization[J]. *Optics Letters*, 2014, **39**(15): 4360–4363.
- [175] Ren Y X, Wang Z, Xie G D, *et al.* Atmospheric turbulence mitigation in an OAM-based MIMO free-space optical link using spatial diversity combined with MIMO equalization[J]. *Optics Letters*, 2016, **41**(11): 2406–2409.
- [176] Djordjevic I B, Arabaci M. LDPC-coded orbital angular momentum (OAM) modulation for free-space optical communication[J]. *Optics Express*, 2010, **18**(24): 24722–24728.
- [177] Zhang Y, Wang P, Liu T, *et al.* Performance analysis of a LDPC coded OAM-based UCA FSO system exploring linear equalization with channel estimation over atmospheric turbulence[J]. *Optics Express*, 2018, **26**(17): 22182–22196.
- [178] Shi C Z, Dubois M, Wang Y, *et al.* High-speed acoustic communication by multiplexing orbital angular momentum[J]. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, 2017, **114**(28): 7250–7253.
- [179] Willner A E, Ren Y X, Xie G D, *et al.* Recent advances in high-capacity free-space optical and radio-frequency communications using orbital angular momentum multiplexing[J]. *Philosophical Transactions of the Royal Society A: Mathematical, Physical and Engineering Sciences*, 2017, **375**(2087): 20150439.

Research advances of orbital angular momentum based optical communication technology

Guo Zhongyi^{1*}, Gong Chaofan¹, Liu Hongjun¹, Li Jingjing¹,
Wang Zikun¹, Yang Yang², Gong Yubin²

¹School of Computer Science and Information Engineering, Hefei University of Technology, Hefei, Anhui 230009, China;

²National Key Lab on Vacuum Electronics, School of Electronic Science and Engineering, University of Electronic Science and Technology of China, Chengdu, Sichuan 610054, China



Schematic illustration of physical dimension resources of photons

Overview: In recent years, expanding capacity of communication systems has become an urgent problem in the communication field, and the exploration of more communication resource dimensions has become an inevitable trend in building high-speed communication technologies. Momentum is a fundamental quantity in physics. Besides linear momentum, structural beam can also carry angular momentum, including spin angular momentum and orbital angular momentum (OAM). OAM is widely studied in classical mechanics and quantum mechanics. It should be noted that the OAM carried by the vortex beam provides a new dimension resource for the spatial domain of the light wave. Using the infinity of OAM mode values and the orthogonality between OAM mode values, OAM-based optical communication technology has changed the previous situation that optical communication is limited to dimensional resources. There are two mechanisms in current OAM-based optical communication. The first is to map the digital signal to different OAM beams and each OAM mode represents one data bit according to the diversity of the OAM modes, which is called OAM shift keying (OAM-SK). The second is to use the OAM beam as the carrier of the modulated signal and utilize the orthogonality between different OAM modes to achieve channel multiplexing so as to multiplying the channel capacity, which is called OAM division multiplexing (OAM-DM). These two communication mechanisms have brought traditional optical communication technology to a new level. In order to achieve high-quality communication performance, they are still urgent problems to make the OAM beams' generator more integrated, and design more efficient OAM multiplexing and demodulation modules. Here, this paper introduces the basic theory of OAM, and summarizes the types of OAM beams and their generating schemes. At the same time, the typical research schemes of two application mechanisms of OAM-SK and OAM-DM in recent years are summarized, and the key technologies such as OAM multiplexing technology, demodulation technology and atmospheric turbulence suppression technology involved in them are also described in details.

Citation: Guo Z Y, Gong C F, Liu H J, *et al.* Research advances of orbital angular momentum based optical communication technology[J]. *Opto-Electronic Engineering*, 2020, 47(3): 190593

Supported by National Natural Science Foundation of China (61775050, 61531010) and Fundamental Research Funds for the Central Universities of China (PA2019GDZC0098)

* E-mail: guozhongyi@hfut.edu.cn