

激光与光电子学进展

无线光通信系统轨道角动量技术研究进展

谢炎辰^{1*}, 梁静远¹, 丁德强^{2**}, 柯熙政¹, 董可¹¹西安理工大学自动化与信息工程学院, 陕西 西安 710048;²国防科技大学信息通信学院, 湖北 武汉 430035

摘要 无线光通信系统的传输容量已趋于香农极限, 而轨道角动量(OAM)这种新的横向空间维度资源的出现, 可以成倍提高无线光通信网络容量和频谱效率。采用OAM相关技术可以为未来实现超高速大容量的跨场景光通信提供潜在方案。本文在对比总结了国内外OAM相关研究成果的基础上, 介绍了西安理工大学在无线光通信领域中OAM技术的研究工作, 主要分为OAM光束的空间产生、传输特性、分离检测、应用等方面。最后, 展望了OAM技术在无线光通信领域未来的发展趋势及前景, 这为后续研究者们在该领域的探索提供了新的思路和参考价值。

关键词 无线光通信; 轨道角动量; 光束产生; 传输特性; 分离检测

中图分类号 TN929.12

文献标志码 A

DOI: 10.3788/LOP222674

Research Progress of Orbital Angular Momentum in Optical Wireless Communication System

Xie Yan Chen^{1*}, Liang Jing Yuan¹, Ding De Qiang^{2**}, Ke Xi Zheng¹, Dong Ke¹¹Faculty of Automation and Information Engineering, Xi'an University of Technology, Xi'an 710048, Shaanxi, China;²Faculty of Information and Communication, National University of Defense Technology, Wuhan 430035, Hubei, China

Abstract The transmission capacity of optical wireless communication systems has approached the Shannon limit, and the emergence of orbital angular momentum (OAM), as a lateral new space dimension resource, can exponentially improve the capacity and spectral efficiency of optical wireless communication networks. Adopting technologies of OAM-related can provide a potential solution for the realization of ultra-high speed and high capacity cross-scene optical communication in the future. On the basis of comparing and summarizing the relevant research results of OAM at domestic and overseas, this paper introduces the research work of OAM technology in the field of optical wireless communication in Xi'an University of Technology, which is mainly divided into the space generation, propagation characteristics, separation detection and application of OAM beams. Finally, the future development trend and prospect of OAM technology in the field of optical wireless communication are foreseen, which provides new thoughts and reference values for the subsequent researchers to explore in this field.

Key words optical wireless communication; orbital angular momentum; beam generation; propagation characteristic; separation detection

1 引言

自 1992 年 Allen 等^[1]在 Woerdman 的光量子实验室发现了螺旋结构分布的光束携带有轨道角动量(OAM)以来, 这一重大发现便引发了OAM的研究热潮。这种独特的空间域分布在扩充信道容量方面具有

良好应用前景。携带 OAM 这种特殊结构的光场也已广泛应用于超大容量光通信^[2]、粒子捕获^[3]、光学计算^[4]、量子科学^[5]等科学领域。

无线光通信是一种以激光为载波, 可进行视频、语音等数据传递的技术, 具有传输速率高、组网灵活、抗电磁干扰强等优点, 同时在解决“最后一公里”瓶颈问

收稿日期: 2022-09-30; 修回日期: 2022-11-24; 录用日期: 2022-11-30; 网络首发日期: 2023-01-04

基金项目: 陕西省重点产业创新项目(2017ZDCXL-GY-06-01)、西安市科技创新引导项目(201805030YD8CG14(12))

通信作者: *515972905@qq.com; **dingdeqiang17@nudt.edu.cn

题以及复杂恶劣环境通信等方面具有良好应用前景^[6]。当涡旋光在自由空间中传输时,大气湍流对激光束的吸收、散射及衰减作用会引起光束扩展、漂移、闪烁,从而造成较大的通信误码率甚至通信中断^[7]。因此,研究具有高传输速率、高安全性、强抗扰性能的 OAM 技术是无线光通信领域的研究热点之一。

2 OAM 基本概念

众所周知,光这种电磁波同时具有波粒二象性,它的波动性大家已经很熟悉,而粒子性包括能量、动量等属性却少有人了解。光在沿传播方向的纵向上具有线性动量,同时还有与偏振特性相关的自旋角动量 (SAM),以及垂直于传播方向的横向 OAM, OAM 独立于 SAM 而存在。

2.1 OAM 的性质

具有 OAM 的光束被称作涡旋光束,近年来得到了学术界的广泛研究与探索。图 1 为不同拓扑荷数下涡旋光束的螺旋波前分布。由于螺旋型波前相位的不确定性,造成光强度的相干相消,从而在涡旋光束中心处形成相位奇点,相位奇点就是光强度为零的点,此时 OAM 也为 0。涡旋光束的光场可以表示为 $E(x, y) = u(r, z) \exp(i l \theta) \exp(-i k z)$, $u(r, z)$ 为幅度函数, $k = 2\pi/\lambda$ 为波数, λ 表示波长, z 为光束的传播距离。

每个涡旋光束都具有螺旋相位因子项 $\exp(i l \theta)$, 其中, θ 为空间方位角, l 称作拓扑荷数,即围绕相位奇点一周,相位的变化是 2π 的 l 倍,产生了 l 个缠绕的螺旋波前。光束中每个光子携带 $l\hbar$ ($\hbar = h/2\pi$ 为约化普朗克常量) 个 OAM, 即光 OAM 对应无穷个本征模态,

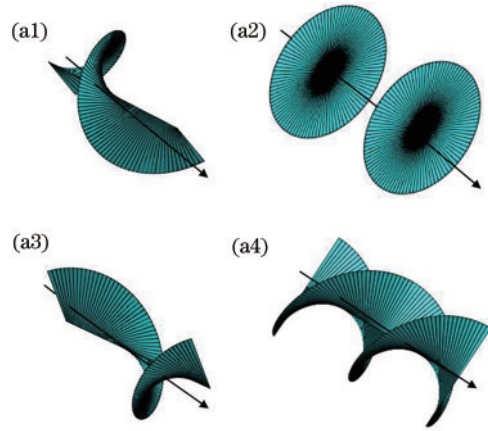


图 1 不同拓扑荷数的螺旋波前分布。(a1) $l = -1$;
(a2) $l = 0$; (a3) $l = 1$; (a4) $l = 2$

Fig. 1 Helical wavefront distribution with difference topological charges. (a1) $l = -1$; (a2) $l = 0$; (a3) $l = 1$; (a4) $l = 2$

可以构造无限维数的 Hilbert 空间,所以理论上可显著提升信息的容量和安全性^[8]。

2.2 OAM 光束种类

常见的涡旋光束一般分为三种:拉盖尔高斯 (LG) 光束、贝塞尔高斯 (BG) 光束、艾里涡旋 (AV) 光束。这些光束都携带有 OAM,但它们的特点各不相同。如: BG 光束具有无衍射特性、方向性好等优点; AV 光束具有自加速、自弯曲特性等; LG 光束具有高斯光束的特点且易在实验室进行制备,是一种最常用的涡旋光源,不同的拓扑荷数 l 、径向指数 p 组合可以形成不同形态的 LG_{lp} 光束,图 2 为不同 l 和 p 下 LG 光束的光强及相位分布。光束轮廓呈甜甜圈状分布,且光环数等于 $p + 1$ 。

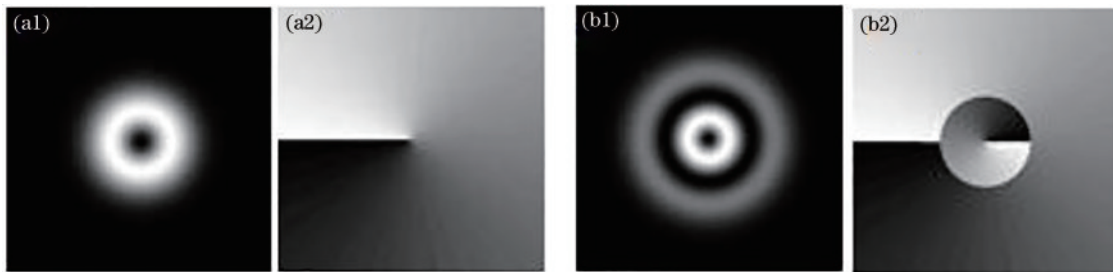


图 2 不同 l 和 p 下的 LG 光束光强及相位分布。(a1) LG_0^1 光束光强分布; (a2) LG_0^1 相位分布; (b1) LG_1^1 光束光强分布; (b2) LG_1^1 相位分布

Fig. 2 Intensity and phase distribution of LG beam under different l and p values. (a1) LG_0^1 beam intensity distribution; (a2) LG_0^1 phase distribution; (b1) LG_1^1 beam intensity distribution; (b2) LG_1^1 phase distribution

3 涡旋光束产生研究进展

3.1 单模态涡旋光束产生研究进展

1994 年, Barnett 等^[9]探讨了非傍轴近似下轴对称光束和 OAM 的关系,通过理论推导发现只要光束包含 $\exp(i l \theta)$ 项,就携带有 OAM, 这为引入除 LG 光束以外的各种 OAM 光束奠定了基础。

1989 年, Couillet 等^[10]利用激光谐振腔直接产生 OAM 光束,但是该方法对谐振腔的轴对称性要求较高,且腔内损耗较大,难以产生质量较好涡旋光束。

2013 年, Lee 等^[11]演示了在二极管端泵浦 Nd: GdVO₄ 自拉曼激光器的第一斯托克斯波长下直接产生 LG 模式,这是第一次使用自拉曼散射 (SRS) 在腔内进行频率转换。接下来,在 2014 年, Lee 等^[12]又证明

了通过腔内 Nd:GdVO₄ 晶体自 SRS 产生的斯托克斯波长倍频成 586 nm 的涡旋波进行发射,最终发射效率达 727 mW,二极管到可见光的转换效率为 4%。

1992 年,Heckenberg 等^[13]通过计算机生成的全息图(CGH)来产生 OAM 涡旋光束,全息光栅可通过在玻璃板上刻蚀划痕或者全息照相等方法产生。

2012 年,Li 等^[14]设计了一种叉型偏振光栅(FPG),可以有效产生 OAM 光束并在模式之间进行转换,模式间的相对功率也可以通过偏振来控制。这种方法衍射效率高于 90%,且适用于除紫外线红外外的任何波长。

2019 年,Vijayakumar 等^[15]使用多级 OAM 全息图来生成结构化 OAM 光场,通过理论和实验说明了至少需要 3 层螺旋相位片(SPP)相位才能产生 OAM 光束,同时与相位图相结合可以延迟其在三维空间的存留时间。

1993 年,Beijersbergen 等^[16]采用两个圆柱透镜构成的模式转换器将 HG 光束转换为高纯度 LG 光束。

2002 年,Shvedov 等^[17]利用单块光楔产生单模态 OAM 涡旋光,而按一定规则叠放多块光楔则可产生高阶模式。

2016 年,Forbes 等^[18]结合空间光调制器(SLM)对 OAM 光束进行生成,通过实时对数字全息图进行修改和写入来控制 SLM 调制生成不同种类、形态 OAM 光束。

2012 年,Saitoh 等^[19]利用微加工技术的螺旋波带片(SZP)生成了一系列汇聚的 OAM 电子波束,最高可产生拓扑荷数 90 的涡旋光束。

2021 年,胡晓波等^[20]利用数字微镜器件(DMD)生成和表征复杂矢量模式,并使用基于随机空间复用的二进制编码方案产生了诸如 LG、Ince-Gaussian、Mathieu-Gaussian 及 Parabolic-Gaussian 矢量光束。最后描述了实时斯托克斯偏振重建法等矢量模表征技术。

2015 年,Liu 等^[21]设计出一种广义光子筛来生成 OAM 光束,与原来的光子筛相比,针孔数由几千个降为几百个,而且可以产生不同径向指数、角向指数以及叠加态的 LG 光束。

2017 年,Devlin 等^[22]使用由动态相位和几何相位组成的二维超表面来产生 OAM 光束。这种超表面是由不同尺寸的矩形纳米天线构成的 J 板,相比于之前的 Q 板,可以实现任何正交偏振态到独立 OAM 模式的转换,且可以和大功率激光束一起使用。

2021 年,Dorrah 等^[23]设计出一种总角动量板(TAM),可实现两大类功能:第一类为偏振可切换装置,通过改变入射的正交偏振态在两个产生的涡旋光束间切换;另一类则对任何入射偏振态有效,可在沿传播方向实现对光 OAM、SAM 以及偏振振幅相位的灵活控制。

2019 年,吴文兵等^[24]设计出一种平板式 SPP 来产生涡旋光束,这种 SPP 可以灵活调整所生成涡旋光束的 OAM 角量子数及 SPP 高度,且生成光束的精度随着相位阶数的增加而增加。

2014 年,Brunet 等^[25]在环形光纤的环形区域添加了比包层折射率低材料,仿真产生并传输了 28 个 OAM 模式,实验则可容纳 36 个模式。2017 年,Pidishety 等^[26]利用单模光纤和环芯光纤组成的全光纤模式选择耦合器,通过直接相位匹配耦合实现 OAM 光束的激发,最终激发模式纯度高达 75%。

2020 年,Hassan 等^[27]提出一种圆芯型光子晶体光纤(PCF),中心是一个大的气孔,且可以支持多达 38 个 OAM 模式的稳定传输,具有更大的带宽及平坦的色散变化。同年,Israk 等^[28]设计出一种三层弯曲盘绕结构空腔构成的大带宽 PCF,其最多支持 56 个色散平缓变化的 OAM 模式,且限制损耗在 1.7407×10^{-11} dB/m 以下。

2020 年,Cognée 等^[29]证明了通过波导寻址的等离子光子谐振微盘腔可以产生可控 OAM 和 SAM 的相关光束。次年,Butt 等^[30]提出并比较了标准条形、槽型和混合等离子体波导的三种 μ 环谐振腔结构,结果发现:硅条波导环形谐振器制作简单,但灵敏度低;混合等离子体的具有最佳灵敏度;槽型波导的胜在质量因子、检测极限。

3.2 叠加态涡旋光束产生研究进展

2003 年,Pyragaite 等^[31]将两束相交的 LG 光束干涉叠加,产生了模式更加丰富的复合光学涡旋。复合涡旋的数目和位置可以通过改变涡旋的传播长度,各光束的拓扑荷数、相位差,交角和幅值比来改变。

2006 年,Galvez 等^[32]将两束 LG 光束共轴叠加,产生了具有新型相位奇点的复合涡旋光束,他们主要研究了两束 LG 光束的光强比对 LG 光束叠加态光强分布的影响。

2009 年,Baumann 等^[33]研究了相对振幅和相位对 LG 光束共线叠加离轴传播的影响,并利用 Gouy 相位进行了一定解释。

2009 年,杨德兴等^[34]研究了平面涡旋和环形涡旋的共线复合叠加,并提出了一种得到这种共线叠加涡旋位置和分布特性的方法。

2010 年,Ando 等^[35]分析了不同角向、径向指数下双模及多模 LG 光束叠加态的不同相位奇点结构特性,并通过理论推导和实验进行了奇点特性的验证。

2012 年,方桂娟等^[36]在理论和实验的基础上生成了分数阶双环涡旋光束,通过改变拓扑荷数可得到不同间距和缺口的双环光束。结果表明,分数阶双环涡旋光之间可以单独控制,比整数阶和单分数阶的更具有控制多样性。

2015 年,朱龙等^[37]提出一种模式搜索辅助迭代算法(PSI),利用其生成的相位图可以同时产生多 OAM

模式光束,最多能产生 100 个随机间距的 OAM 模式并可以对其相对功率分布进行控制,衍射效率高于 93%,同时具有较低的标准差和相对均方根误差。

2016 年,黄素娟等^[38]采用腔外选模法,利用改进的 CGH 实现了多个 LG 光束的共轴叠加,产生了质量较高的复合涡旋光束。

2020 年,Szatkowski 等^[39]提出了一种生成高对称性复合涡旋光束的方法。该方法允许控制结构之间的强度关系,使它们能够旋转,同时能够叠加两个以上这样的结构。结果表明,两个该结构的复合涡旋叠加能够生成高对称的复合涡旋光束。

2021 年,Kumar 等^[40]设计了一种混合二元叉型光栅(hBFG),通过去除对应的叉型位错周围的中心区域,并用不同拓扑荷对应的 BFG 代替而计算生成。对该光栅的几何参数进行优化后,可以生成 3 个不同拓扑荷数和更高阶径向指数组成的复合涡旋光束,并能控制单个模的强度和半径。

2022 年,Kotlyar 等^[41]研究了几个相同的平行单环 LG 光束的叠加,发现当叠加的加权系数为实值时,不管对于初始平面还是远场,叠加的净拓扑荷都等于各个组成的之和,且光束间的相位延迟可以改变叠加的净拓扑荷数。表 1 为涡旋光束产生国内外研究进展。

表 1 涡旋光束产生国内外研究进展

Table 1 Research progress on vortex beams generation at domestic and abroad

Time	Person	Research progress
1989	Coulet	In the laser resonator
2013	Lee	Diode-side pumped self Raman laser Nd:GdVO ₄
1992	Heckenberg	CGH
2012	Escuti	Fork shaped polarization grating
2019	Rosales	Multilevel OAM hologram
1993	Beijersbergen	Mode converter
2002	Shvedov	Single light wedge
2016	Forbes	SLM with modified CGH in RT
2012	Koh Saitoh	SZP
2021	Hu Xiaobo	DMD represents complex vector patterns
2015	Padgett	Generalized photon sieve
2017	Devlin	Two dimensional metasurface
2021	Dorrah	TAM plate
2019	Sheng Zongqiang	Flat plate SPP
2014	Brunet	Hollow core step fiber
2020	Hassan	Circular core PCF
2020	Cognee	Plasma resonant microdisk cavity of waveguide addressing
2003	Stabinis	Superposition of interference
2006	Galvez	Effect of light intensity ratio on LG beam superposition state
2009	Baumann	Effect of phase difference on composite vortex beams
2009	Yang Dexing	Interference superposition of planar vortex beams
2010	Ando	LG beam superposition state with different topological charge and radial indices
2012	Fang Guijuan	Superposition of fractional double vortex beams
2015	Zhu Long	The PSI algorithm generated the phase diagram
2016	Huang Sujuan	Improved computer hologram to generate multi-LG coaxial superposition
2020	Mateusz	Highly symmetrical composite vortex beams
2021	Kumar	Improved hBFG generation
2022	Kotlyar	Parallel single ring LG superposition

光的 OAM 从 1992 年开始研究至今,经过了 30 年发展,刚开始 OAM 光束的产生是在激光谐振腔内^[10],即一种光学涡旋激光器。这种有源方案一般分为直接产生法^[42]、环形光束泵浦法^[43-44]、中央受损腔镜法^[45-46]、热诱导膜孔径法^[47-48]。近些年,新产生一种计算机控制涡旋激光器^[49-50]的方法,这种方法将 SLM 应用到激

光腔内充当一片谐振镜,同时通过计算机可以灵活定制任意属性涡旋光束。这些主动从固态激光腔中产生涡旋光束的方法,需要在腔内设计特殊元器件或者较高泵浦光功率,简单易操作但无法产生同时满足高转换效率、高阶数、多模态的涡旋光束。

而另一种无源方案,主要在谐振腔外利用各种光

学元器件,将其他种类光束转换为涡旋光束,这类方法实现方式多种多样且灵活可控,如 CGH^[13-15]、SZP^[19]、模式转换器^[16]、光楔块^[17]、SPP^[24]、SLM^[18,51]、DMD^[20,52]、光子筛^[21]。其中:CGH 衍射法操作简便,成本低廉,但衍射效率低下,亦有提出利用迭代算法优化 CGH 质量的方式,如 GS 算法^[53]、PHIO 算法^[54]等;SZP 与 CGH 类似,不过衍射用的不是平面波而是球面波,而且更适用于电子显微领域;模式转换器产生的光束纯度高,但操作复杂;光楔块系统简单可靠,但元件对加工精度要求高;SPP 生成光束纯度高,但只能产生固定模态和参数的 OAM 光束;DMD 成本低廉,却可以在高切换速率下产生 OAM 模式,但衍射效率不理想;光子筛的可用波段较宽,空间分辨率较高,但同样衍射效率不高;SLM 方便调节参数、衍射效率较高,但有能量阈值的限制。接着是 q 板 J 板^[22]这种双折射晶体,可实现局部偏振态到 OAM 模式的转变,生成的 OAM 光束纯度较高,且 J 板可以使用高功率激光束。最后进化到超材料、超表面^[22-23]和光纤器件^[25-28]、光子集成器件^[29-30,55],这种系统结构紧凑,易集成,且可以生成多种类高质量的 OAM 模式。

叠加态涡旋光束方面,主要还是利用 SLM 加载 CGH 这种经典方法^[36-38,40]。只不过叠加态的形式是多种多样的,从最初双叠加态的花瓣状、圆孔分裂状、多环状到三、四束甚至更多束 LG 光相叠加,叠加的种类也有分数阶的叠加以及径向指数的叠加。这些多种类、多样式的叠加态涡旋光束也可以由单模态的光束参数进行控制,从而变换叠加光场结构和光强比^[31-33,39,41]。这为大规模无线光 OAM 通信系统传输容量的提升注入了新的活力,打下了坚实的基础。

4 涡旋光束传输研究进展

4.1 涡旋光束传输特性研究进展

2001 年,国际电信联盟为了研究涡旋光束在湍流中斜程传输的情况,提出一种能够随高度发生变化的 ITU-R 大气结构常数模型^[56]。

2005 年,Paterson^[57]研究了涡旋光场经过湍流散射后的探测概率分布,同时发现波束越窄,OAM 散射越小;波束越宽,闪烁越小。

2008 年,Anguita 等^[58]以 Kolmogorov 大气湍流谱为模型,分析了多路复用 OAM 系统在自由空间中传输时的系统容量并提出一种误码率评估方法。

2008 年,Gbur 等^[59]对涡旋光束在弱到强的湍流中传输进行了研究,结果表明,光束的拓扑荷在原理上是一个鲁棒量,经过长距离传输后仍不丢失,可以用作光通信的载体。

2009 年,Tyler 等^[60]研究了 OAM 光束在大气湍流中传输后的扰动,这里量化推导了编码在单光子 OAM 态上的量子信息在湍流传输中的丢失速率。

2009 年,蒲继雄课题组^[61]通过理论和实验证明了

涡旋光束在大气湍流中的光束扩展,发现相比于非涡旋光束,涡旋光束受湍流影响更小。2011 年,该课题组又研究了椭圆涡旋光束在不同湍流强度下的传输特性。发现椭圆的短轴与长轴之比越小,闪烁指数越小,这说明选用椭圆涡旋光束进行传输能够降低闪烁指数^[62]。2012 年,该课题组接着利用菲涅耳衍射理论研究了离轴 LG 光束的远场衍射强度分布,得到了拓扑荷符号影响奇点移动方向的规律^[63]。

2012 年,Lukin 等^[64]对低阶涡旋光束在大气湍流中光束展宽进行了数值模拟,发现涡旋光束的平均展宽小于高斯光束。同时拓扑荷数越大,光束扩展越小,受湍流影响越小。

2013 年,Aksenov 等^[65]利用数值模拟方法研究了 LG 光束在湍流中的漂移方差。结果表明,当拓扑荷数越大、径向指数越大、外尺度越小时,LG 光束的光斑漂移方差越小,且高斯光束的光束漂移比 LG 光束要大。

2014 年,Banakh 等^[66]研究了大气湍流中 LG 光束展宽效应,模拟仿真了 LG 光束传播后的强度分布,结果表明,LG 光束相对于衍射展宽的湍流展宽不依赖于模态,而取决于发射孔径处衍射区,相反 LG 光束的绝对湍流展宽随着拓扑荷增加而增加。

2016 年,葛筱璐等^[67]研究了 LG 光束在湍流中的相对束宽变化,发现传输距离越长、湍流强度越强、拓扑荷数越小、束腰越大、波长越短,LG 光束扩展受湍流影响越大。

2016 年,Filimonov 等^[68]数值模拟分析了 LG 光束在大气湍流中传播时 OAM 的变化,同时研究了光束和接收机轴对准误差对 OAM 波动均值和方差的影响。

2017 年,Porfirev 等^[69]研究了涡旋光束在随机气溶胶介质中的传播特性。发现在短距离下,涡旋光束的稳定性大多低于高斯光束,然而在长距离情况下,涡旋光束更加稳定,可能是由于它们通过障碍物后能够再生。

2018 年,田清华等^[70]研究了利用分步傅里叶变换方法,在大气湍流下对纵向 OAM 复用(LOAMM)系统进行了数值模拟。结果表明,在有限光阑条件下,系统的探测概率谱与 OAM 模数、湍流强度和传播距离成反比,且 LOAMM 系统的性能优于 OAM-SDM。

2019 年,骆传凯等^[71]利用广义惠更斯-菲涅耳原理和 Rytov 近似,推导了任意阶涡旋光束及其阵列在湍流中的传输强度表达式,并数值模拟了光束的扩展和演化,得到了不同光束和湍流参数变化下的均方光束宽度,最终得出涡旋光束阵列比单模涡旋光束受湍流的影响小,且径向涡旋光束阵列最后会演化为类高斯光束。

2020 年,闫家伟等^[72]利用菲涅耳衍射原理,分析了超高斯和高斯涡旋光束在湍流中的远场光强度分

布,得到了不同参数下两种光束畸变离散程度的变化。

2022年,Lazrek等^[73]基于扩展的惠更斯-菲涅耳衍射原理,仿真了涡旋余弦双曲高斯光束(vChGB)在海洋湍流中光束扩展和平均强度的演变,并分析了均方温度、温度与盐度波动比的耗散率等参数对光束传播的影响。

4.2 部分相干涡旋光束传输特性研究进展

2009年,蔡阳健课题组^[74-75]推导了部分相干标准和简化LG光束通过傍轴ABCD光学系统后的交叉谱密度解析公式并对比分析了其在自由空间中的光强和扩展特性,研究发现其光强和扩展特性与光源的初始相干态紧密相关。

2011年,崔执凤课题组^[76]利用扩展的惠更斯-菲涅耳原理和Wigner分布函数(WDF)的二阶矩对部分相干LG光束在大气湍流中传输后的角宽度和光束传输因子(M^2 因子)进行了分析。

2015年唐苗苗等^[77]从光强分布、空间相干度分布方面研究了各向同性和各向异性随机介质对MGSMV光束传输特性的影响。

2017年,姚明昨课题组^[78]讨论了Non-Kolmogorov湍流对MGSMV光束的束宽和角展宽的影响,得到了MGSMV光束的抗湍流性能要优于MGSM光束和GSM光束。

2018年,Stahl等^[79]引入了扭曲涡旋高斯谢尔模光束(tvGSM),这种新的部分相干涡旋光束OAM由随机光束的潜在涡旋阶数和光束集合的“弯曲”参数决定。同时分析了这种光束的传输特性和OAM密度。

2021年,Hyde等^[80]提出了扭曲时空涡旋光束(STOV),推导了互相干函数和线性动量密度和角动量密度,仿真了STOV光束的合成及不同相干程度下在自由空间中的传播。

2022年,Hricha等^[81]研究了部分相干涡旋余弦-双曲高斯光束(PCvChGB)通过透镜系统时的聚焦特性和焦移,得出空间相干长度、菲涅耳数和光束参数对光束聚焦区域的平均强度分布和焦移有较大影响。

4.3 矢量涡旋光束传输特性研究进展

2009年,Cheng等^[82]结合随机相位屏理论研究了矢量涡旋光束经大气湍流传输后的光强分布模型、偏振度以及闪烁指数,并与标准高斯光束和标量涡旋光束的传输特性进行了对比分析,发现同等光源条件下矢量涡旋光束的闪烁要小于标量涡旋光束。

2013年,Martinez-Herrero和Prado^[83]讨论了部分相干径向偏振涡旋光束偏振结构的演化过程。

2015年,江月松课题组^[84]研究了椭圆偏振涡旋光束在湍流中的偏振特性,分析了偏振椭圆度、拓扑荷数、光束宽度对平均偏振强度和偏振度的影响。同年,程科等^[85]介绍了一种在远场平面上为蝴蝶-高斯结构的线性偏振蝴蝶-高斯涡旋光束,讨论了拓扑荷数、线性偏振角、离轴距离以及散射长度等参数对线性偏振

蝴蝶-高斯涡旋光束远场衍射结构的影响。

2016年,郭利娜等^[86]推导了部分相干径向偏振涡旋(PCRPV)光束经ABCD光学系统后的交叉谱密度矩阵,发现涡旋相位可以减小相干引起的强度分布退化以及退偏振,同时还实验生成了PCRP涡旋光束。

2016年,Eyyuboğlu^[87]用随机相位屏法研究了矢量涡旋光束在强湍流区域的闪烁特性。结果发现随着拓扑荷数的增加,闪烁效应逐渐减弱,但减弱的速度逐渐变缓。

2018年,唐苗苗等^[88]引入了一种新的径向偏振光束:多余弦高斯谢尔(MCGSM)光束,同时对MCGSM光束在Non-Kolmogorov湍流中的光强、相干度、偏振度以及偏振态进行了分析,发现其偏振态存在自分裂特性。

2020年,Joshi等^[89]从理论和实验上研究了高阶矢量涡旋光束的相干偏振变化。结果表明,部分相干矢量涡旋光束(PCVVB)的横向偏振度(DOP)分布取决于该光束的空间相关性,而偏振态(SOP)保持不变。

2021年,Joshi等^[90]接着研究了嵌入V点的PCVVB的统计特性,发现对源平面空间相干长度的调制可以有效控制相干强度以及DOP、SOP分布。

2022年,该课题组的Manisha等^[91]从理论和实验两方面研究了非各向同性部分相干矢量涡旋光束(PCVVB)的远场强度分布、SOP和DOP分布,发现这些分布的变化都与输入光束的庞加莱霍普夫指数和非各向同性参数有关。同年,该课题组Arora等^[92]又从理论和实验两方面论证了均匀线偏振光束对矢量奇点的扰动,这种扰动引起的光束质心径向位移量可以测量扰动的强度。

4.4 涡旋光束自适应波前校正研究进展

2009年,Starikov等^[93]采用奇异重构技术的夏克哈特曼波(SH)前传感器和双形压电陶瓷反射镜对畸变涡旋光束进行相位校正,极大提高了斯特列尔比和光学系统分辨率。2012年,Garanin等^[94]利用柔性变形镜和SH算法对连续波和脉冲波激光进行波前校正,结果表明,校正后的斯特列尔比有了很大的提高,光束像差降低了一个数量级。

2012年,Zhao等^[95]使用SH算法和GS算法这两种像差校正方法来对经过湍流后的畸变OAM光束进行校正,发现两种方法均能提高单OAM态的纯度及FSO信道容量,但是GS算法的效果更好一些。

2007年,Jesacher等^[96]基于GS算法并利用空间光调制器加载其全息图来对LG光束进行校正,对低阶模式校正效果更好。

2018年,Baranek等^[97]通过引入优化的螺旋相位调制与GS算法相结合,将其与SLM组合成自适应校正系统来对涡旋光束光学像差进行校正,结果表明在迭代过程中利用涡旋像斑作为目标强度模式,可以显著提高GS算法像差校正的精度和效率。

2015 年,谢国栋等^[98]提出基于 Zernike 多项式的 SPGD 算法对多路畸变 OAM 光束进行校正,且各模式间串扰可降低 5 dB,并且从反馈回路得到修正模式的 Zernike 多项式系数。

2018 年,徐梓浩^[99]研究了利用液晶 AO 技术和 PD 算法相结合的双校正法,首先利用 AO 校正技术对湍流扰动造成的畸变进行第一次校正补偿,接着使用 PD 算法对残余波前畸变二次校正。

2020 年,高春清团队设计了一种湍流像差校正卷积神经网络(TACCNN)模型,通过大量实验样本的监督学习,该模型能对矢量涡旋光束的湍流像差进行校正补偿,模式纯度从 19% 提高到 70%^[100]。

2021 年,詹海潮等^[101]通过改进的水下湍流模型利用实验研究比较了 SH、SPGD、GS 算法的校正效果,发现 GS 算法的校正效果最好,SPGD 算法次之,SH 算法最差。表 2 为涡旋光束传输特性国内外研究进展。

表 2 涡旋光束传输特性国内外研究进展

Table 2 Research progress on propagation characteristics of vortex beams at domestic and abroad

Time	Person/organization	Research progress
2001	ITU-R	ITU-R model of atmospheric structure constant for slant propagation
2005	Patterson	Detection probability of OAM state after scattering
2008	Anguita	Multiplexing crosstalk in the Kolmogorov spectrum
2008	Gbur	Topological variation and conservation in turbulent flow
2009	Tyler	OAM encoded information loss rate
2009	Wang Tao	Vortex beams spreading in turbulence
2011	Pu Jixiong	Scintillation index of elliptical vortex beam
2012	Ding Panfeng	Intensity distribution and broadening of off-axis LG beam
2012	Lukin	Beam spreading of low-order vortex beams in turbulence
2013	Aksenov	Spot drift of LG beam in turbulence
2014	Banakh	LG beam broadening effect
2016	Ge Xiaolu	Beam spreading of vortex beams under different turbulence parameters
2016	GA Filimonov	Effect of beam and receiver axis alignment errors on OAM fluctuations
2017	Porfirev	Propagation characteristics of vortex beams in random aerosol medium
2017	Tian Qinghua	The probability density of average OAM mode
2019	Luo Chuankai	The beam spreading of vortex beams array and its evolution
2020	Yan Jiawei	Beam quality of Gaussian and super-Gaussian vortex beams
2022	Lazrek	Propagation characteristics of vChGB in ocean turbulence
2009	Cai Yangjian	Partial coherence standard and elegant LG beam spreading in free space
2011	Cui Zhifeng	The angular width and transmission factor of partially coherent LG beam in turbulence
2015	Tang Miaomiao	Influence of different parameters and random medium on MGSMV beam
2017	Yao Mingwu	Beam spreading and angle broadening of MGSMV beams induced by non-K spectrum
2018	Gbur	tvGSM propagation characteristics and OAM density
2021	Hyde	Synthesis and transmission of STOV in free space
2022	Hricha	PCvChGB through the focusing characteristics of the lens system
2009	Haus J W	The intensity distribution, polarization degree and scintillation index of VVB
2013	Martinez	Polarization structure evolution of PCRPV
2015	Jiang Yuesong/ Cheng Ke	The polarization characteristics of EPVB after turbulence, influence of linearly polarized butterfly-Gaussian vortex beams
2016	Guo Lina	Characteristic changes of partially PCRPV beams after ABCD matrix
2016	Eyyuboglu	Scintillation characteristics of VVB in strong turbulent region
2018	Tang Miaomiao	Radial polarization MCGSM beam in non-K spectrum
2020	Joshi	PCVVB polarization variation
2021	Joshi	PCVVB statistical features
2022	Manisha and Arora	Nonisotropic PCVVB far-field intensity distribution, V point polarization vector beam perturbation
2009	Starikov	Shack Hartmann wavefront correction
2012	Garanin	SH method for wavefront correction
2012	Leach J	SH and GS algorithms are used to correct the wavefront of single-mode
2007	Jesacher	GS algorithm for wavefront correction
2018	Baranek	Improved GS algorithm for aberration correction
2015	Xie Guodong	Wavefront correction of SPGD algorithm based on Zernike polynomial
2018	Xu Zihao	Dual wavefront correction based on liquid crystal AO technique and PD algorithm
2020	Gao Chunqing	Turbulence aberration correction model based on CNN
2021	Zhan Haichao	SH, SPGD and GS algorithms for underwater turbulence correction models

携带 OAM 的光束在大气湍流中的传输特性从 2000 年开始逐渐被广大学者所研究探索,在研究如光束扩展^[60-61,64,66-67,71,73]、光斑漂移^[60,63,65,102]、光强闪烁分布^[57,60,62]、能量衰减、螺旋谱弥散^[60,103]等湍流效应的同时,相干光学也发展迅速,涡旋光束也从完全相干扩展到部分相干^[74-81],标量光扩展到矢量光^[82-92],整数阶扩展到分数阶。不同光源的传输特性研究如椭圆涡旋^[62,104]、离轴涡旋^[63]、平顶涡旋^[105]、标准与简化涡旋^[106]、阵列涡旋^[71]、超高斯^[72]、vChGB^[73,107]等^[108-110]也如雨后春笋般出现。评价指标也从光强相位分布、螺旋谱分布、相对束宽、闪烁指数等到传输因子、复相干度、光束质量、偏振特性、模式概率密度、散射特性^[111]等。但大部分还停留在理论和仿真研究阶段,在实验研究方面^[112-113]还需进一步探索和研究。

而在自适应波前校正方面,逐渐由刚开始时有波前传感器的 SH 算法^[93-95]发展到无波前的 GS 算法^[96-97]、SPGD 算法^[98,114]、PD 算法^[99],评价指标也从光强相关系数、螺旋谱、斯特列尔比到光学传递函数、像清晰度函数等。

5 涡旋光束分离检测研究进展

2002 年,Leach 等^[115]提出了基于马赫-曾德尔干涉仪的 OAM 态检测方法,分离出多模 OAM 态,但仅能分离检测出 OAM 的奇偶态叠加。

2003 年,Vasnetsov 等^[116]提出了一种利用旋转多普勒效应测量涡旋光束 OAM 拓扑荷数的方法,即通过实验方法利用离轴孔径检测干涉图样的连续旋转,根据光束旋转的一定规律得出所测拓扑荷数。

2009 年,Ghai 等^[117]研究了涡旋光束通过单缝衍射后的光强分布情况,通过观察条纹的弯曲方向和程度可以判断涡旋光束的 OAM。

2014 年,Silva 等^[118]根据 LG 光束通过三角形和方形光阑后衍射图样的分布规律得出入射光的 OAM 大小及正负,发现方形光阑可以检测高达 20 阶的拓扑荷数,是三角形光阑的 2 倍。

2014 年,Emile 等^[119]使用涡旋光束进行双缝干涉实验,实验装置简单易操作,通过肉眼即可观察到干涉条纹的移动方向和移动量,最终得到入射涡旋光 OAM 的方向和大小。

2014 年,周海龙等^[120]在不透明屏上取两个狭缝而设计出一套动态双缝干涉检测系统,通过扫描狭缝中心,输出光功率在高低之间交替变化。利用这一特性,我们可以测量光束的 OAM。该方案简单易行、成本低,对光束入射偏差和模态不纯具有良好鲁棒性,且可以测量高阶 OAM 模式。

2016 年,付时尧等^[121]通过将 5×5 达曼涡旋光栅与 $-12 \sim +12$ 阶螺旋相位图合成从而将达曼涡旋光栅的检测范围从 $-12 \sim +12$ 扩大到 $-24 \sim +24$,同时通过远场衍射图中出现的实心亮斑来检测单模或叠加态

OAM。

2016 年,李建平课题组^[122]对周期渐变振幅光栅加以改进,提出周期渐变相位光栅,接着引入闪耀光栅并用特殊三角函数替换其中结构参数,使能量集中在二阶衍射级从而提高检测精度。

2017 年,Taira 等^[123]首次证明了利用一个简易的圆形光阑孔径对入射 LG 光束进行离轴衍射可以检测入射涡旋光束。涡旋光束的奇点沿着垂直于圆孔运动方向不断分裂,分裂的涡旋奇点数量和朝向分别与入射光束的拓扑荷大小和符号相一致。

2018 年,Acevedo 等^[124]通过数值仿真和实验利用矩形光阑和五边形光阑对光束 OAM 进行检测,得到了远场夫琅禾费衍射结果。发现矩形光阑只能检测出涡旋光的拓扑荷数大小,且检测范围只有 $0 \sim 5$ 。而非等边五边形光阑则同时可以检测出拓扑荷数的大小和正负,检测范围为 $0 \sim 20$,是三角形光阑的 2 倍。

2020 年,李永旭等^[125]又设计出周期渐变螺旋辐条光栅(GCPSSG),即将螺旋相位图和轴棱锥全息图以及周期渐变相位光栅相结合,最高可检测拓扑荷数为 160,该光栅对环境振动和光束对准具有良好容错性。

2017 年,Kotlyar 等^[126]利用圆柱透镜或倾斜球面透镜等方法引入的像散变换对涡旋光束进行检测,发现圆柱透镜的效果最好,最高可检测拓扑荷数达 100。

2018 年,李涛课题组^[127]通过片上等离子体纳米光栅将入射 OAM 光束耦合为单束具有不同分裂角的表面等离子体偏振光束,利用这种方法可以对 OAM 的大小符号进行检测。

2018 年,张民课题组^[128]提出一种基于卷积神经网络(CNN)的多层表示学习法来对经过湍流后的多 OAM 态进行检测,在 6 种典型湍流中的检测准确度接近 95.2%。

2020 年,Giordani 等^[129]利用 CNN 和 SVM 的加强算法,如 PCA 算法和 DR 算法,可以有效提取高维光子矢量涡旋光束系统的特性,最终的识别分类准确率达到 90% 以上。

2021 年,Rasouli 等^[130]设计出一种抛物线线性光栅来检测 OAM 光束的径向指数和拓扑荷数,实验结果表明,该光栅最高可检测 $l=5, p=2$ 的涡旋光束。同时其衍射图对光束与光栅中心的离轴值不敏感。

2022 年,王安廷课题组^[131]提出利用一种叉型光栅产生的远场衍射条纹检测高阶 OAM 光束、多 OAM 光束,同时通过增加分叉数和偏移量可以提高条纹检测的精度和可靠性。

2010 年,Berkhout 等^[132]利用坐标转换法有效分离检测光的 OAM 态,这种方法将含有螺旋相位的涡旋光束先转换为横向相位梯度的光束,然后根据水平位置的分布区分出单模或叠加涡旋光的 OAM 态,最终可以实现 11 个 OAM 态的分离检测。

2013 年,Mirhosseini 等^[133]在 Berkhout 提出的坐标

转换法基础上加以改进,结合了光束的“复制技术”(fan-out)算法后,使不同模态涡旋光分离后的横向相位梯度分布变得更加精细,相邻模式间重叠程度变得更低,实验表明相比于普通极坐标转换其分离效率从 77% 提高到 92%,这有利于实现 OAM 叠加态的高效分离和检测。

2017 年, Ruffato 等^[134]设计了高分辨率的纯相位衍射光学元件,并利用其对 OAM 模式进行分离检测。可分离的拓扑荷数范围 $-14\sim 14$,最终可达到 -15 dB 的串扰值,同时该器件有望集成到光学平台或光纤上

进行光处理。同年 Ruffato 等^[135]提出一种对数极坐标变换的紧凑 OAM 模式分类器,将坐标转换和相位校正的功能集成在一个相位掩模上,提高了 OAM 模式解复用器的紧凑性,简化了对准操作。

2017 年,赵生妹课题组^[136]提出了一种径向变相位法来分离 OAM 模式,OAM 值和径向变化相位决定了分离后光斑的水平和垂直位置。仿真和实验结果表明可以分离 2~3 种 OAM 叠加模态,相比于文献^[132]^[133]分离效率得到提高。表 3 为涡旋光束分离检测国内外研究进展。

表 3 涡旋光束分离检测国内外研究进展

Table 3 Research progress of vortex beam separation detection at domestic and aboard

Time	Person	Research progress
2002	Leach	Separation and detection of odd-even state superposition by Mach Zehnder interferometer
2003	Vasnetsov	Rotating Doppler effect
2009	Ghai	Single slit
2014	Silva	Triangular and square apertures
2014	Emile	Double slit interference
2014	Zhou Hailong	Dynamic double slit interference
2016	Fu Shiyao	Synthetic Dammann grating
2016	Li Jianping	Improved periodic gradually-changing phase grating
2017	Taira	Simple circular aperture
2018	Acevedo	Square and pentagonal aperture
2020	Li Yongxu	GCPSSG
2017	Kotlyar	Cylindrical lens
2018	Li Tao	Plasma metasurface
2018	Zhang Min	CNN multilayer representation learning method
2020	Giordani	CNN combined with SVM enhancement algorithm
2021	Rasouli	Parabolic line grating
2022	Wang Anting	Fork shaped grating
2010	Berkhout	Coordinate transformation method
2013	Mirhosseinil	Coordinate transformation method of fan-out algorithm
2017	Ruffato	High resolution compact OAM mode sorter
2017	Zhao Shengmei	Coordinate transformation method of radial varying phase
2018	Chen Yujie	Spiral transformation method
2019	Ruffato	A compact OAM mode classification system for log-polar transformation
2019	Fontaine	Particle swarm algorithm combined with MPLC
2021	Huang Zebin	5 layer diffraction depth neural network

2018 年,陈钰杰课题组^[137]对 OAM 光束进行螺旋变换,将 OAM 光束对应的相位图用螺旋线表示,再将采集的螺旋线转换为平行线,实现了 n 倍光斑的展宽。通过仿真和实验表明,该方法与对数极坐标转换相比可将光学精细度提高近 3 倍,最终分离出高分辨率 OAM 模式。

2019 年, Ruffato 等^[138]将光束展开器和相位校正器集成在透明石英片的同一面来实现一种紧凑型的 OAM 模式分类器。该方法能实现 $-10\sim 10$ 的 OAM 模式分离检测,并将可行性扩展到非傍轴状况下,显著提高了系统的集成度和对准度。

2019 年, Fontaine 等^[139]利用 7 个相位片和 SLM 以

及反射镜组成的多平面光转换器(MPLC)系统,实现了 210 个 LG 模式的生成和分离。接着将粒子群算法和波前匹配算法相结合,提出了 MPLC 逆设计方法,实现了设计参数的高效搜索^[140]。

2021 年,黄泽斌等^[141]设计出一种具有混合 OAM 模式产生、检测和切换功能的衍射深度神经网络(D²NN),实现了 OAM 键控、复用、解复用和模式切换的全光信号处理通信,衍射效率和模式转换纯度达 96% 以上。

在 OAM 的分离和检测方面,一般主要分为干涉法^[115,119-120]和衍射法^[117-118,121-126]。干涉法除了常见的平

面波、球面波干涉,还有双缝^[119]与动态双缝干涉^[120]。前面几种干涉法主要根据干涉条纹的朝向和个数来对 OAM 光束进行检测,而动态双缝干涉开创性地利用了旋转不透明屏的双缝衍射,根据接收干涉光斑的功率起伏检测高阶 OAM 光束。

衍射法是利用各种光阑^[117-119,123-124]、合成光栅^[121-122,125,130-131]进行检测。合成光栅主要由叉型^[131]、周期渐变^[142-143]、环形^[144]、达曼光栅^[121]、圆锥曲线^[130]构成的各种光栅来对检测性能进行提升,可以提高最大可检测拓扑荷数,衍射光斑能量分布等。但最终都是通过判断类厄米特高斯衍射光斑的条纹和朝向来判断拓扑荷数大小和正负。

衍射法中还有一类称为坐标转换法^[132-138],坐标转换法通过坐标转换和相位校正两个静态光学元件来对 OAM 光束进行分离检测,将甜甜圈型光斑转换为条状矩形光斑,根据光斑位置和坐标尺度的计算得出入射 OAM 光束的模态分布。在此基础上可以使用 fan-out 算法^[133]等提高衍射光斑的精度,抑或将两个相位图合成为一张相位掩模,以提高检测的对准度和系统集成度。最后是现如今集产生检测转换于一体的多层

光衍射神经网络^[139-141]。可检测分离的拓扑荷数直线上升,且整个检测系统朝着高效能、更紧凑、更小型集成化方向发展。

6 西安理工大学无线光通信系统 OAM 技术的研究进展

西安理工大学柯熙政等^[6]从 2002 年起开始对无线光通信技术进行系统研究,在信号的调制、纠错码、解调、波前校正、自动捕获对准跟踪、光学天线设计、光纤耦合、大气湍流传输、系统性能等方面技术的探索研究中取得了不错的成果。而随着现有维度资源的开发已到瓶颈,光通信容量危机便成为一个亟须解决的问题,此时具有空间变化相位的 OAM 结构光场吸引了越来越多学者的关注和投入。

柯熙政教授及其课题组从 2008 年起,就对无线光通信中的 OAM 技术开始进行了研究^[145],同时根据 OAM 复用通信系统中的各个环节在 OAM 光束的产生、传输特性、串扰分析、波前校正、分离检测、应用等方面进行了仿真和实验研究,并且取得了很好的进展,其研究内容结构图如图 3 所示。

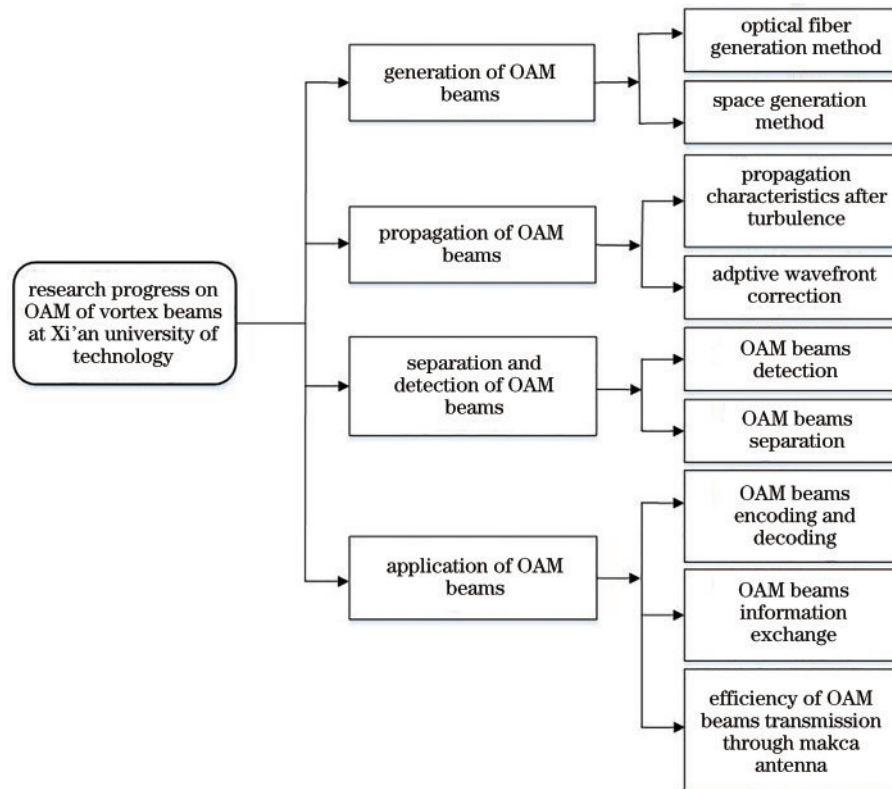


图 3 OAM 技术研究内容结构图

Fig. 3 OAM technology research content structure diagram

2015 年,李亚星等利用分数阶叉型光栅及其叠加生成了拓扑荷间隔为 0.5 的分数阶涡旋光束及其阵列,同时发现分数阶涡旋光束比整数阶光强分布要强,有利于远距离传输^[146]。

2018 年,葛甜等通过实验研究利用少模光纤

(FMF)产生了±1 阶 LG 光束,当调整光纤入射角度为 2.895°时,产生的低阶涡旋光束激发效率最高,达到 18.39%^[147]。

2019 年,陈云等在文献^[147]基础上改进了抛物线型光纤结构,加入了低折射率层增大了有效折射

率差,最高可产生 3 阶的涡旋光束^[148]。

2020 年,王沙沙等通过对 PCF 结构进行改进^[149],将其中一部分圆形空气孔改换为矩形空气孔,保证包层和纤芯间的高折射率差,又防止高阶模式泄漏至包层,最终该 PCF 可产生并支持 50 个 OAM 模式的传输。

2017 年,胥俊宇等利用叉型光栅叠加生成等量不等量异号花瓣状叠加涡旋光束,分裂的花瓣个数为两束光拓扑荷数绝对值之和^[150]。同年,薛璞等提出用螺旋相位图叠加生成圆孔分裂型叠加涡旋光束,亮斑的个数等于两束光的拓扑荷数之差的绝对值^[151]。

2018 年,石欣雨等在文献^[32]的基础上研究了高阶径向 LG 光束的叠加态生成,并分析了不同参数对叠加态的影响^[152]。

2019 年,赵杰等仿真了在轴和离轴情况下同号和异号的等差数列的多 LG 光束叠加态生成,并研究了它的分布规律^[153]。

2020 年,张蕾等通过仿真和实验研究了正交多环叠加态涡旋光束的生成^[154]。

2008 年,吕宏等^[155]将 LG 光束类比为高斯光束模型,根据广义米氏理论和局域近似法,对具有 OAM 光束的单球粒子散射进行了研究,得到了散射强度和散射截面分布图。

2009 年,吕宏等^[156]通过将 LG 光束转换为对应高阶 Bessel 无衍射光束,提出一种光 OAM 的高阶 Bessel 无衍射光束编解码方法。

2009 年,杨秦岭等研究了高阶椭圆厄米高斯光束的单光子平均 OAM 的概率分布及变化情况,发现其平均 OAM 与不同材料物质作用变化幅度不同^[157]。

2011 年,吕宏等^[158]利用复高斯函数展开法分析了 LG 光束经过两种不同光阑光学系统下,遮拦比对不同波长 LG 光束传输特性的影响,发现随着透镜与光阑间距变大、波长越长,遮拦比对 LG 光束影响越大。

2011 年,李铁等^[159]采用 Von-Karman 湍流谱建立双光子纠缠度模型,分析了传输距离、湍流强度、拓扑荷数、波长、束腰对纠缠光子对纠缠度的影响。

2013 年,王铁成等研究了自发参量下转换过程产生的 OAM 纠缠光子对的联合探测概率,发现束腰半径、角向及径向指数影响纠缠光子对的联合探测概率^[160]。

2014 年,杨一明等研究了 LG 光束在大气湍流斜程路径上的传输特性,得到了在不同湍流强度、束腰半径、拓扑荷数、天顶角、接收孔径下的螺旋谱分布^[161]。

2015 年,郭新龙等设计了一种八台阶结构(QSS)相位信息编解码方法来提高 OAM 通信的容量和效率^[162]。

2018 年,宁川等研究了多路复用 OAM 光束在不同湍流强度和传输距离下的光强相位分布,同时分析其螺旋谱得到了不同湍流强度下的系统误码率^[163]。

2018 年,王姣等研究了 LG 光束通过马卡天线光学系统后的衍射传输特性,发现拓扑荷数越大, LG 光束经过天线后的发射效率越高,可达 80% 以上^[164]。

2020 年,王姣等^[165]分析了拉盖尔高斯谢尔模涡旋光束(LGSMV)在 Non-Kolmogorov 湍流中的传输特性,推导了远场光强表达式,同时得到了不同湍流参数和光束参数下的相位奇点及光强分布变化情况。

2020 年,陈生涛等通过仿真和实验研究了不同 OAM 模式下的信息交换、模式切换及信道重构^[166]。

2021 年,李瑾等分析了湍流中 OAM-MIMO 系统的串扰抑制,对比分析了基于互相关函数的 MUK-MCMA 算法和 CC-MCMA 算法下系统的星座图和误码率图改善情况^[167]。

2017 年,王超珍等研究了部分相干 LG 光束在 Kolmogorov 湍流下的归一化光强分布,得到了不同参数下光强分布的变化曲线^[168]。

2019 年,王姣等分析了 Non-Kolmogorov 湍流中部分相干矢量涡旋光束,即电磁高斯谢尔模涡旋光束(EGSMV)的传输特性,得到了不同参数下偏振方向和偏振度的变化情况^[169]。

2018 年,王夏尧等研究了 SPGD 算法对畸变涡旋光束进行无波前传感器的自适应波前校正,发现这种算法能对单模及多模 OAM 光束进行波前畸变校正,但是 SPGD 算法对单模 OAM 光束的校正效果优于多模^[170]。

2020 年,崔娜梅等采用基于 PD 算法的无波前校正技术对涡旋光束进行波前畸变校正,通过仿真与实验验证了可行性,发现涡旋光束的校正效果随拓扑荷数的减小而提高^[171]。

2018 年,王姣等对比分析了 LG 光束通过圆形、方形、三角形、单缝、双缝光阑后的远场衍射特性,发现根据衍射光场中光斑或条纹的数量及其朝向,可以判断入射光束的拓扑荷数大小及正负^[172]。

2018 年,谢炎辰等利用多种周期渐变光栅和环形光栅对 LG 光束进行检测,并提出采用相位校正图和 fan-out 相位图可以改善这些光栅的检测性能,最终提高了可检测的拓扑荷数最高值^[8]。

6.1 涡旋光束 OAM 的产生

为了更好地实现 OAM 复用通信,首先需要产生携带 OAM 的涡旋光束。一般产生涡旋光束的常见方法有光纤产生法和空间产生法。

6.1.1 光纤产生法

由空间结构器件产生的涡旋光束会产生一定的能量损失,利用光纤产生涡旋光束能够降低光在通过结构性器件时的能量损失,所以光纤产生法的转换效率更高。表 4 对比了三种光纤产生涡旋光方法。

1) 少模光纤产生法

少模光纤是一种只存在基模与低阶模式的光纤,实验中选取 HI1060 少模光纤,图 4(a)^[173]为入射角度

和激发效率之间的关系曲线。在实验中,将入射角度控制在 $2.895^\circ \sim 5.729^\circ$ 之间时,可以在少模光纤中形成一阶涡旋光的基础模式。而当入射角度为 2.895°

时,一阶涡旋光的激发效率最大,其激发效率为 18.39%。图 4(b)^[173] 为少模光纤产生涡旋光的实验装置图。

表 4 光纤产生涡旋光总结

Table 4 Summary of generation of vortex beams by optical fiber

Fiber generation methods	Structure principle	Performance analysis
FMF	Adjust incident angle of FMF	Excitation efficiency of 18.39% with ± 1 order vortex beam
Inverted parabolic fiber structure	Addition of low refractive index layer	Produce 1-3 order vortex beams
Improved photonic crystal fiber	Rectangular air holes with circular air holes	Produce 1-13 order vortex beam in 850 nm range

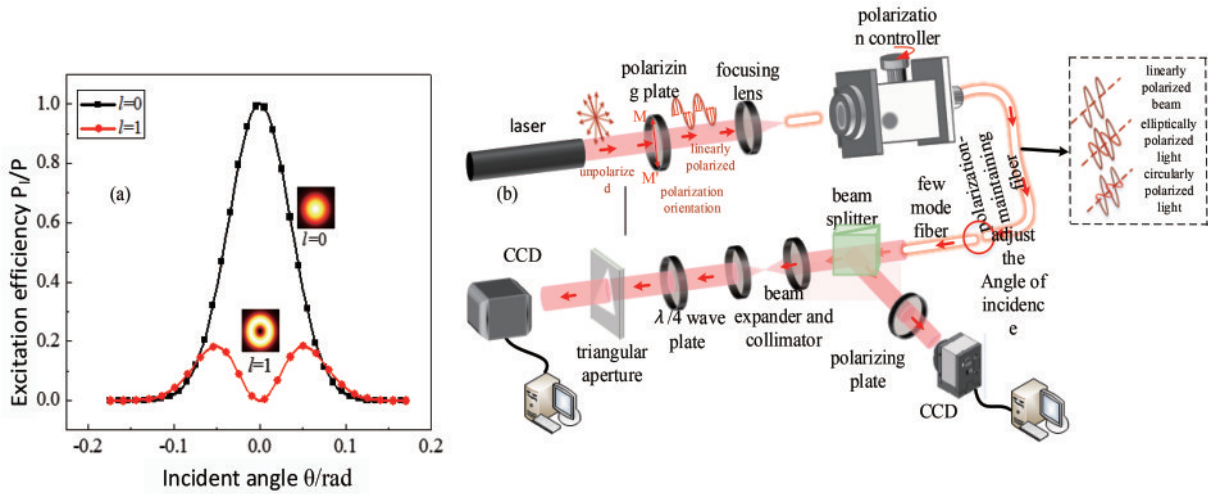


图 4 少模光纤实验。(a)少模光纤入射角度与激发效率关系曲线图;(b)少模光纤产生低阶涡旋光束实验装置图^[173]
Fig. 4 Few-mode fiber experiment. (a) Relationship between incident angle and excitation efficiency of few-mode fiber;
(b) experimental setup diagram of low-order vortex beam generated by few-mode fiber^[173]

图 5(a)和(b)^[173]分别为光纤中出现的一阶涡旋模式光斑仿真和实验图,图 5(c)和(d)^[173]是 LP_{11} 模式的

仿真和实验光斑图。 LP_{11} 模式形成的原因是光纤中多个矢量模式间的简并。

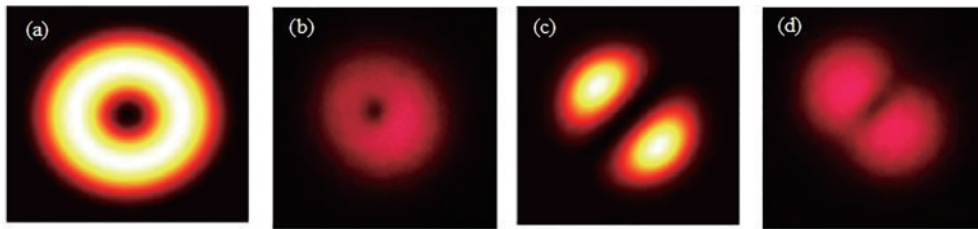


图 5 少模光纤中一阶模式的光强。(a)一阶模式仿真;(b)一阶模式实验;(c) LP_{11} 仿真;(d) LP_{11} 实验^[173]
Fig. 5 Intensity of first-order mode in few-mode fiber. (a) Simulation of first-order mode; (b) experiments of first-order mode;
(c) simulation of LP_{11} ; (d) experiments of LP_{11} ^[173]

2) 改进倒抛物线型光纤结构

为了增大纤芯与包层间的有效折射率差,在其中添加一层低折射率层,将少模光纤结构改进为倒抛物线分布型,令其容纳的模式数量更多。图 6(a)^[174]为改进光纤结构与原始光纤结构的折射率分布曲线,黑色为改进光纤结构,红色为原始光纤结构。图 6(b)^[174]为有效折射率和波长间的关系图。从图中看出光纤结构在纤芯折射率范围内可容纳 9 种模式,最多可传输 3 阶 OAM 模式。图 7^[174]为产生的 3 阶 OAM 模式的光强和相位分布。

3) 改进型光子晶体光纤结构

通过将矩形空气孔和圆形空气孔相组合,包层拥有了更大的空气填充率,增大了与环形高折射率层间的折射率差,同时又阻止了高阶模泄漏至包层。而且这种结构不易变形,具有更强的稳定性。图 8(a)^[175]为改进后 PCF 结构横截面及四分之一横截面示意图。

HE 模式的奇模和偶模叠加生成 OAM 模式的光场和相位图如图 8(b)所示,第一行和第二行分别为 HE_{21}^{even} 和 HE_{21}^{odd} 模式、 HE_{41}^{even} 和 HE_{41}^{odd} 模式叠加生成

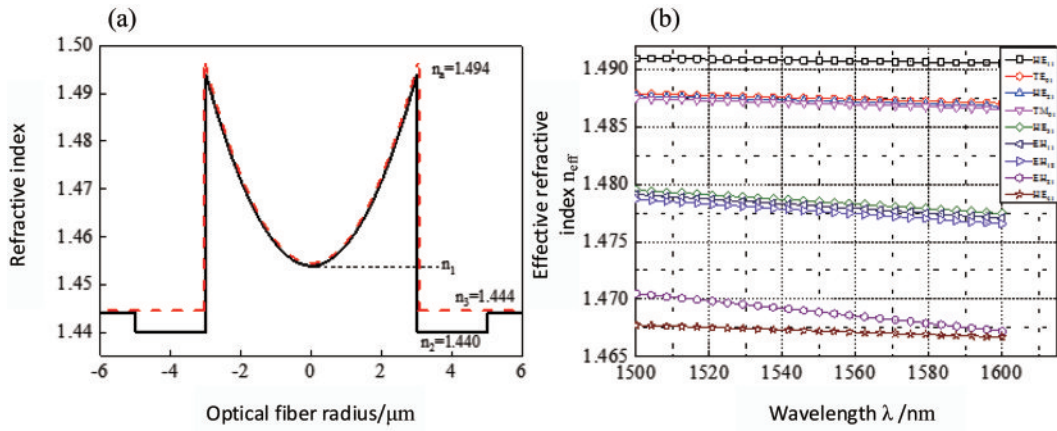


图 6 光纤结构折射率曲线。(a)改进光纤结构的折射率分布;(b)矢量有效折射率与波长关系^[174]

Fig. 6 Refractive index curve of fiber structure. (a) Refractive index distribution of improved fiber structure; (b) relationship between effective refractive index of vector and wavelength^[174]

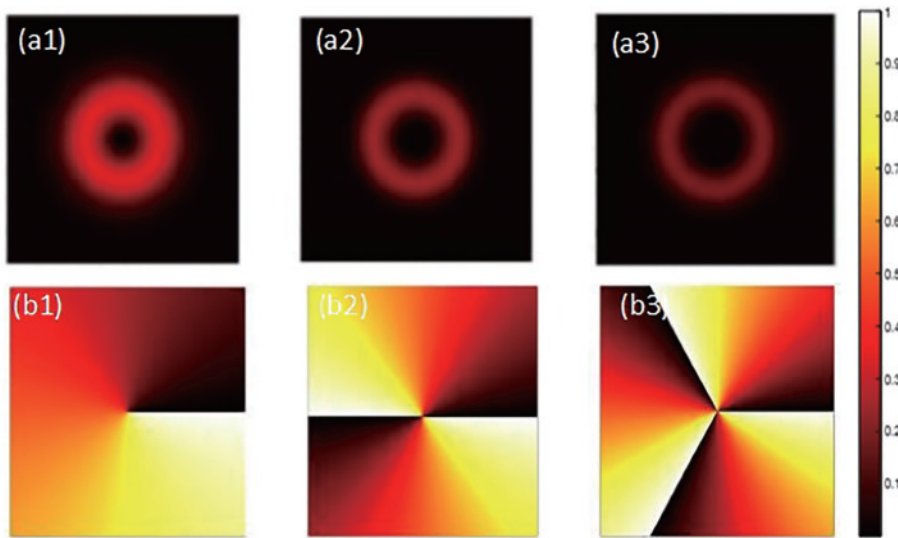


图 7 改进光纤生成涡旋光束的光强与相位分布。(a1)~(a3) OAM₁₁、OAM₂₁、OAM₃₁光强分布图;(b1)~(b3) OAM₁₁、OAM₂₁、OAM₃₁相位分布图^[174]

Fig. 7 Intensity and phase distribution of vortex beam generated by improved fiber. (a1)–(a3) Intensity distribution of OAM₁₁, OAM₂₁, and OAM₃₁; (b1)–(b3) phase distribution of OAM₁₁, OAM₂₁, and OAM₃₁^[174]

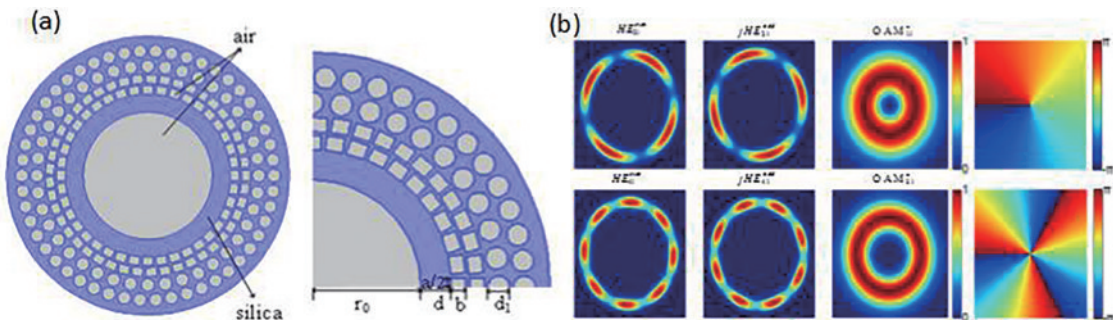


图 8 改进 PCF 中 OAM。(a)改进 PCF 结构横截面;(b)该 PCF 中 OAM 模式生成^[175]

Fig. 8 Improved OAM in PCF. (a) Improved structural cross section of PCF; (b) OAM mode generation in this PCF^[175]

OAM₁₁⁺模式和 OAM₃₁⁺模式的光场和相位分布图。根据 OAM 模式生成过程并分析 PCF 中矢量模式,得出该 PCF 在 850 nm 波段范围可支持传输的矢量模式拓扑荷数为 $l=1\sim 13$,合成了 13 个 OAM _{\pm l,m} 模式群组,

共 50 个 OAM 模态。相比文献[176]的 26 个模式和文献[177]的 58 个模式,波段更宽,模式数量更多。

6.1.2 空间产生法

利用空间结构产生涡旋光束一般有直接产生法、

模式转换法、SPP、CGH。这里我们主要利用的是 CGH 法,并将编程得到的全息光栅或者相位图通过计算机加载到空间光调制器上进行调制后使用,便可得到所需结构的 OAM 涡旋光束。表 5 对比了几种空间产生涡旋光方法。

1) 分数阶 LG 光束产生

将垂直位错 $l=0.5$ 和横向的分数阶叉型光栅叠加,得到如图 9(a)^[178] 所示的分数阶复合叉型光栅,而图 9(b)^[178] 为分数阶涡旋光束阵列的实验图,且随着拓扑荷数数值增大,缺口分布变大。

表 5 空间产生涡旋光总结

Table 5 Summary of spatial generation of vortex beams

Spatial generation method	Shape and properties of light spots
Generation of fractional grating	Fractional vortex beam array
Grating superposition generation	The number of petal-like spots is superimposed with different signs $N = l_1 + l_2 $
Phase superposition generation	Same sign is superimposed as a circular split spot $N = l_1 - l_2 $
LG beam orthogonal superposition	Double or triple ring superposition spot
Arithmetic distribution of multiple LG beams with the same number superposition	Number of dark spots on the outside of circular split light spots $\Delta \times (n - 1)$
Double high order radial LG beam superposition	Multiple rings $\sigma = \max\{p_1, p_2\} + 1, \sigma = n(p + 1)$, many petal shape $(p + 1) l_2 - l_1 $

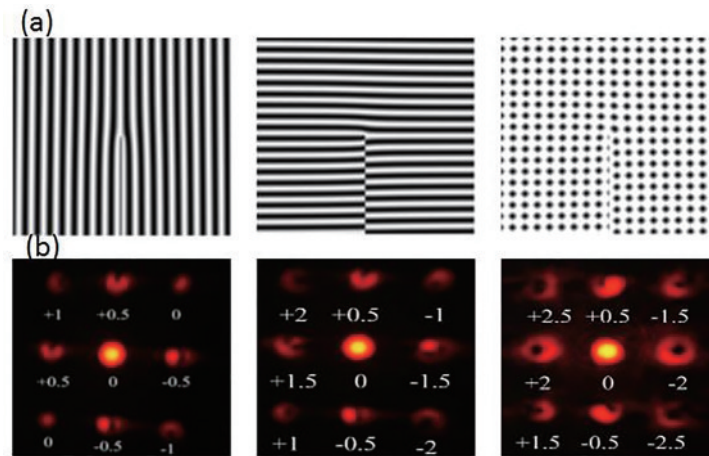


图 9 分数阶涡旋光束生成。(a)分数阶复合叉型光栅生成;(b)分数阶涡旋光束阵列^[178]

Fig. 9 Fractional vortex beam generation. (a) Fractional composite fork grating generation; (b) fractional vortex beam array^[178]

2) LG 光束叠加态产生

首先可以利用叠加光栅产生不同叠加态涡旋光,

图 10(a)^[179] 分别是拓扑荷 2 和 -3 与拓扑荷 3 和 -3 叉型光栅的叠加,将高斯光束打到叠加光栅上面便可产

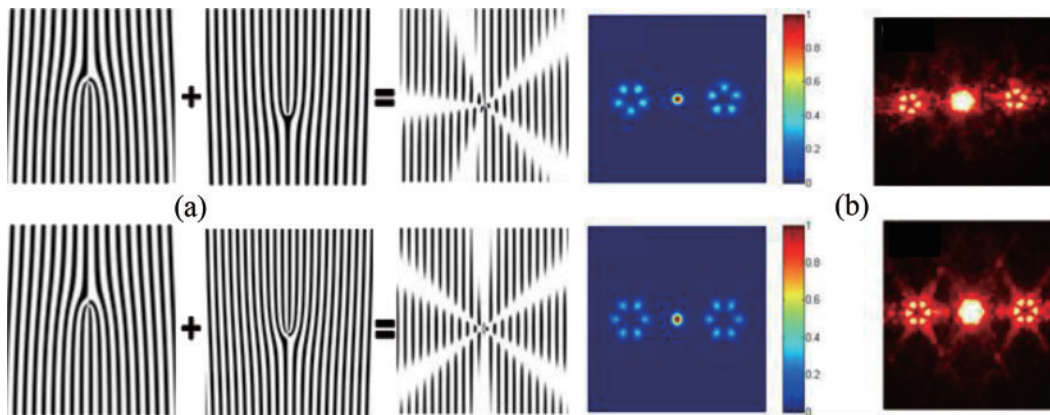


图 10 LG 光束叠加态制备。(a)叉型光栅的叠加;(b)异号拓扑荷数 LG 光束叠加态^[179]

Fig. 10 Superposition state preparation of LG beam. (a) Superposition of fork gratings; (b) LG beam superposition state with different topological charge^[179]

生如图 10(b)^[179]所示的叠加态 OAM 涡旋光束仿真和实验图,分裂的光斑花瓣个数为两束光拓扑荷数的绝对值之和。图 11 为干涉叠加态产生的实验装置图,主要用到两个 SLM 分别加载两个叉形光栅,进行共轴叠加干涉,但也可以将叠加光栅加载到一个 SLM 上实现高效相干叠加。

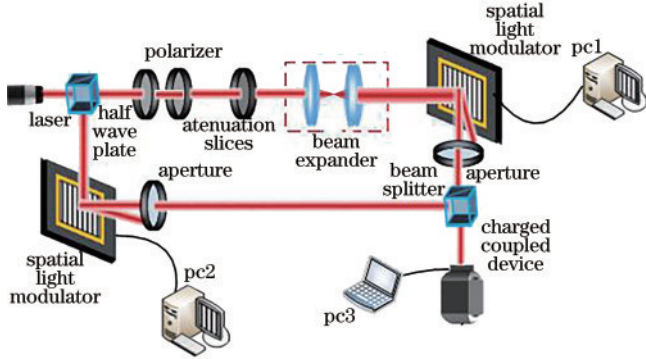


图 11 叠加态产生实验装置图

Fig. 11 Diagram of experimental setup for superposition state generation

除了利用叉型光栅的叠加制备出 LG 光束叠加态,也可以利用螺旋相位图的叠加进行生成。图 12(a1)和(b1)^[180]分别为 $l=1, 5$ 和 $l=2, 4$ 的叠加相位图。实验装置与图 11 类似。生成的叠加态涡旋光束如图 12(a2)、(a3)和(b2)、(b3)^[180]所示,分别为对应同号叠加态的仿真和实验图。此时形成的是一个圆形分裂光斑,其亮斑个数为 $N=|l_1 - l_2|$ 。

还有一种正交叠加态的产生,利用不同 OAM 模式

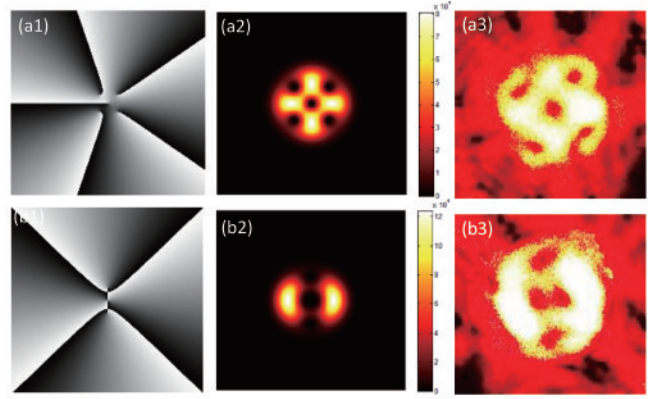


图 12 相位图叠加生成叠加态 LG 光束。(a1)~(a3) $l=1, 5$ 相位图叠加及对应仿真图和实验图;(b1)~(b3) $l=2, 4$ 相位图叠加及对应仿真图和实验图^[180]

Fig. 12 Superimposed LG beams generated by phase patterns. (a1)~(a3) $l=1, 5$ phase diagram superposition and corresponding simulation and experimental diagram; (b1)~(b3) $l=2, 4$ phase diagram superposition and corresponding simulation and experimental diagram^[180]

之间的正交性,将两束不同拓扑荷数的涡旋光束进行正交叠加,利用这种双环结构进行信息传输可以减少模式间串扰。图 13^[181]为同号 l 值正交叠加后的双环涡旋光束仿真图[图 13(a1)~(a3)]和实验图[图 13(b1)~(b3)],它的实验装置图与图 11 相同,唯一有区别的地方在于经过 SLM 反射后的出射光束需要经过偏振片控制其角度,使最终入射到偏振合束器上的两束涡旋光处于正交状态。

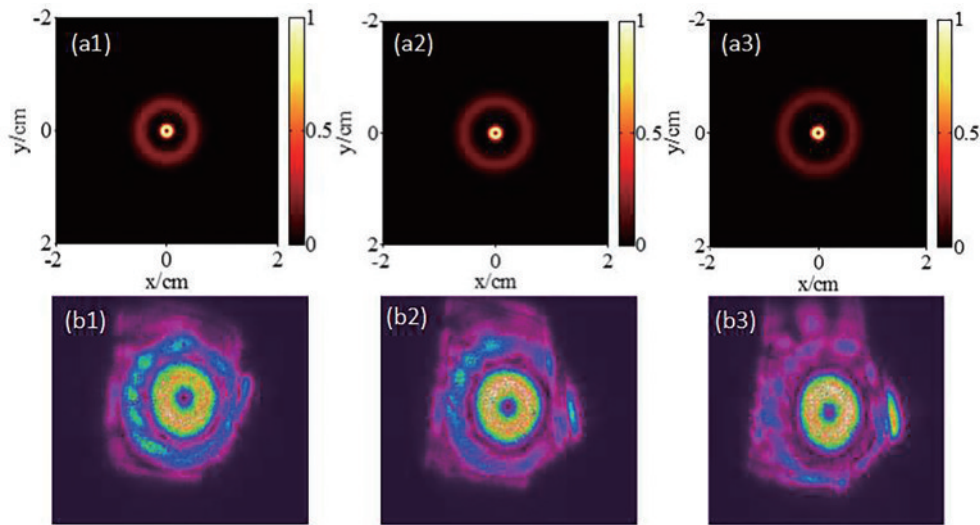


图 13 同号 l 值正交叠加态的仿真和实验图。(a1)(b1) $l=1, 5$; (a2) (b2) $l=1, 7$; (a3) (b3) $l=1, 9$ ^[181]

Fig. 13 Simulation and experimental diagram of orthogonal superposition state of same sign l value. (a1) (b1) $l=1, 5$; (a2) (b2) $l=1, 7$; (a3) (b3) $l=1, 9$ ^[181]

最后是一种多 LG 光束叠加态的产生,根据理论计算分析得到不同拓扑荷数的叠加涡旋光束的光场分布如图 14^[182]所示。图 14(a1)~(d1)和(a2)~(d2)所

示的公差分别是 $\Delta=1$ 和 $\Delta=2$ 的同号多 LG 模叠加仿真结果。从图中可以看出,由于共轴叠加光强图呈现亮暗斑相间,图 14(a1)~(d1)中较大亮斑的数目均

为 1, 叠加光场中心都有一个奇点, 外侧有暗斑, 暗斑数目为 $1 \times (n - 1)$ 。图 14(a2)~(d2) 中亮斑的数目为

2, 外侧暗斑数目为 $2 \times (n - 1)$ 。异号情况下的结果也一样, 只是此时光斑从圆圈状变为花瓣状。

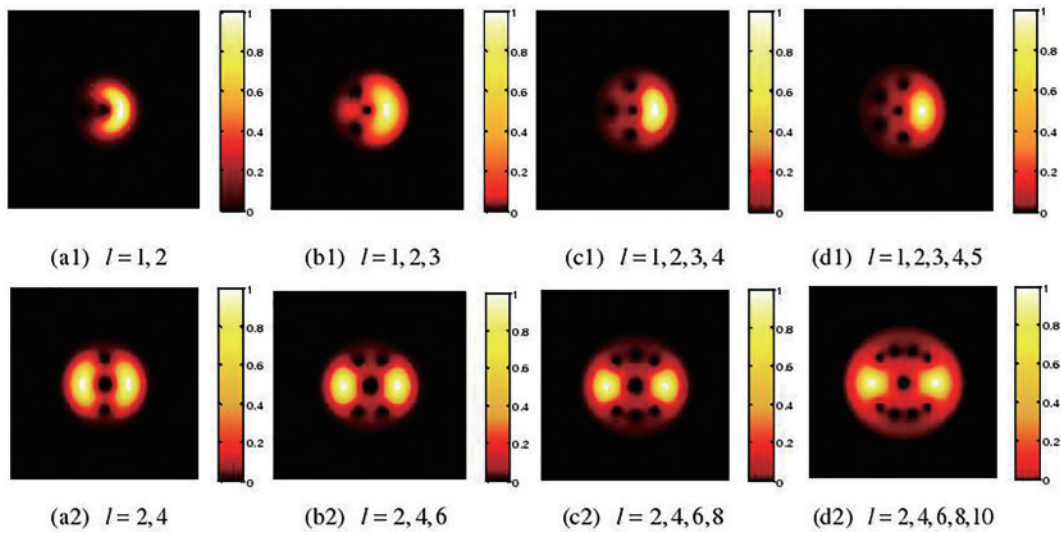


图 14 多个同号 LG 光束相叠加后光强分布图^[182]

Fig. 14 Light intensity distribution diagram after multiple LG beams superimposed of the same sign^[182]

3) 高阶径向 LG 光束叠加态产生

高阶径向 LG 光束叠加态应用于 OAM 复用通信系统, 可以提高通信系统容量、频谱利用率以及接收功

率。图 15(a1)~(a3)^[183] 所示分别是 LG_0^3 和 LG_1^3, LG_0^3 和 LG_2^3, LG_0^3 和 LG_3^3 的叠加光场, 光强分布呈多亮环状, 且其亮环数 $\sigma = \max\{p_1, p_2\} + 1$ 。图 15(b1)~

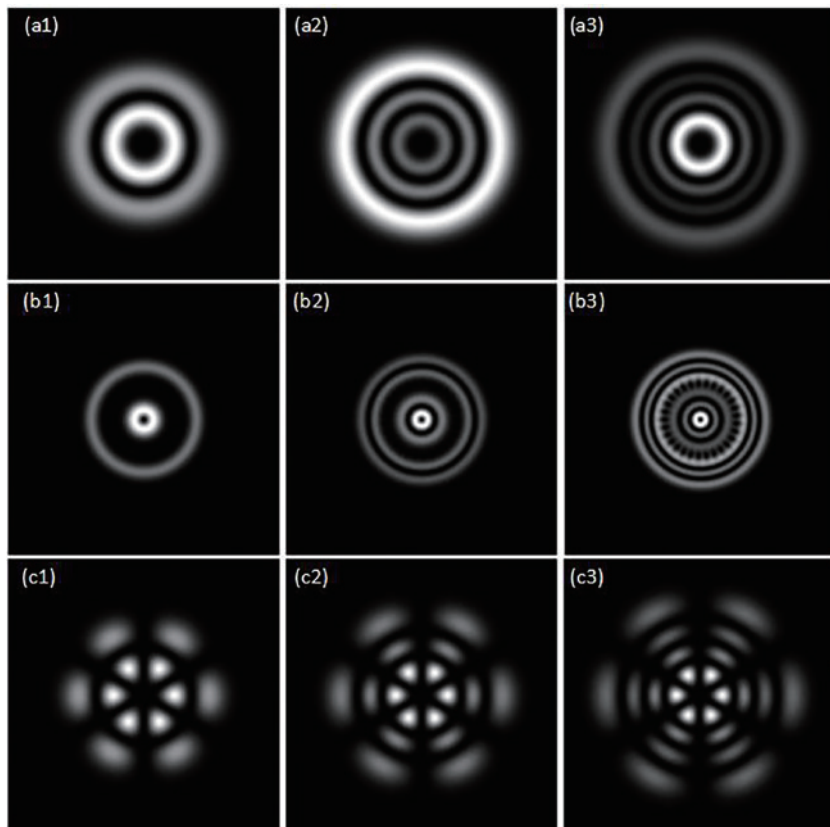


图 15 高阶径向 LG 光束叠加。(a1)~(a3) 相同拓扑荷数不同径向指数; (b1)~(b3) 相同径向指数、不同拓扑荷数; (c1)~(c3) 相同径向指数、拓扑荷互为相反数^[183]

Fig. 15 High-order radial LG beam superposition. (a1)~(a3) Same topological charge number and different radial index; (b1)~(b3) same radial index and different topological charge number; (c1)~(c3) same radial index and topological charge with opposite number of each other^[183]

(b3)所示分别是 LG_0^1 和 LG_0^{30} 、 LG_1^1 和 LG_1^{30} 、 LG_2^1 和 LG_2^{30} 的叠加光场,这时亮环的数目 $\sigma = n(p+1)$, n 代表共轴叠加的 LG 光束数目。图 15(c1)~(c3)^[183]所示分别是 LG_1^3 和 LG_1^{-3} 、 LG_2^3 和 LG_2^{-3} 、 LG_3^3 和 LG_3^{-3} 的叠加光场,其分布呈层圆对称分布的花瓣状,亮“花瓣”数目共计 $(p+1)|l_2 - l_1|$ 个。

6.2 涡旋光束 OAM 的传输

这里首先研究了 LG 光束在斜程湍流中的传输特性以及部分相干高斯谢尔模(GSM)涡旋光束在湍流中传输特性,接下来研究了复用涡旋光束在湍流下串扰特性的分析,然后是部分相干涡旋光束在 Kolmogorov 湍流和 Non-Kolmogorov 湍流谱下的传输特性,以及矢量部分相干涡旋光束及其阵列在湍流中的演化及传输特性,最后分析了湍流中 OAM-MIMO 系统不同算法的串扰抑制性能。

6.2.1 经过湍流后传输特性

LG 光束通过大气湍流斜程传输后,会引起 OAM 模式弥散和模间串扰,如图 16(a1)~(a3)、(b1)~(b3)、(c1)~(c3)、(d1)~(d3)^[161]分别为不同近地面折射率结构常数、入射光波长、接收孔径、天顶角、拓扑荷数情况下螺旋谱分量随传输距离的变化分布。可以看出随着传输距离增加,OAM 发散速度变缓。而除了波长相反以外,其他参数越大,OAM 螺旋谱发散越强烈。

接下来,研究了 GSM 涡旋光束在 Kolmogorov 湍流下的传输特性,图 17(a)~(f)^[184]分别为不同湍流强度、传输距离、拓扑荷数、相干长度、束腰半径、波长下的归一化光强分布曲线。从中可以看出湍流强度越强、传输距离越长、拓扑荷数越小、相干长度越小、束腰宽度越大,光束越容易转变成高斯分布,受湍流影响越大,而波长则无影响。

OAM 光束在自由空间中传输时受到湍流影响,这会导致 OAM 出现模间串扰和模式弥散,这样加大了误码率,降低了通信系统性能。然后如图 18(a1)~(a4)和 (b1)~(b4)^[185]分别为 $l=2, 4, 6, 8$ 的复用 OAM 光束在不同湍流强度和不同传输距离下的螺旋谱分布,随着湍流强度和传输距离的增大,各 OAM 态发生模式弥散程度逐渐严重,但还可以通过相对功率辨别,直到图 18(a4)、(b4)时弥散最严重,每个 OAM 模式都弥散到其他模式,已无法识别出原始光束信息。

在图 19^[185]中随着传输距离的增大,误码率逐渐变大,当传到 10000 m 时,由于噪声达到饱和,误码率稳定在 0.4 左右,当湍流强度变小时则降为 0.2 左右,同时复用光束中拓扑荷数越大,误码率越高。

光束阵列不仅能够提高光源发射功率而且对湍流也有一定抑制作用,在激光合成和空间光通信方面正是研究热点。图 20(a)~(c)^[186]分别是径向半径为 $r_n=5\omega_0$ 、 $r_n=7\omega_0$ 、 $r_n=10\omega_0$ 下径向部分相干涡旋光束

阵列经 Non-Kolmogorov 湍流传输 0.5 km、1.5 km、2 km、2.5 km、3 km 后的光强分布,随着传输距离的增加,每一个阵列光束逐渐转变为类高斯光束分布。且径向半径越大,转换为高斯分布所需传输距离越长。在同样湍流情况下,转换为高斯分布时的半径越大。而图 20(d)^[186]为 $r_n=5\omega_0$ 、 $z=1$ km 下不同阵列个数传输后的光强分布,说明了当径向阵列个数越多,光强分布越接近环形分布,即转化为高斯分布所需距离越短。

图 21(a)~(d)^[186]分别是不同波长、束腰半径、外尺度、湍流强度下的部分相干涡旋光束阵列经 Non-Kolmogorov 湍流传输后的光强分布和曲线。从图 21(a)~(d)可以看出,波长、束腰、湍流强度越大时转换为高斯分布所需传输距离越短,即受湍流影响越大。而外尺度的变化对光强分布几乎没有影响。图 21(d)^[186]是广义指数因子 $\alpha=3.15$ 时阵列光束受湍流影响最严重。

部分相干涡旋光束中 LGSMV 光束是由拉盖尔高斯谢尔(LGSM)光束经过螺旋相位调制后的一种新型涡旋光场。图 22(a)、(b)^[186]分别是不同外尺度 L_0 和内尺度 l_0 情况下 $l=3$ 的 LGSMV 光束经 Non-Kolmogorov 湍流传输后在广义指数因子 $\alpha=3.1$ 和 $\alpha=3.5$ 下光强分布曲线。从中可以看出,外尺度的变化对光束光强几乎没有影响。而内尺度越小,LGSMV 的光强分布逐渐展宽。当 $\alpha=3.1$ 即湍流最强时,内尺度对 LGSMV 光束光强分布影响较大,当 $\alpha=3.5$ 时,影响较小。

图 23(a)、(b)^[186]分别是不同阶数、拓扑荷数下 LGSMV 光束经湍流传输后相对束宽随传输距离变化曲线。图 23(a)表示阶数 n 变大,相对束宽逐渐减小,图 23(b)表示拓扑荷数增大,相对束宽也不断增大,图 23(c)表示湍流强度越大,相对束宽随广义因子增加的越快。

图 24(a)、(b)^[186]分别为不同波长、相干长度下 LGSMV 光束经 Non-Kolmogorov 湍流和自由空间传输后相对束宽的变化曲线。波长越短、相干长度越大,相对束宽随着传输距离增加而增大得越快,大气湍流对光束扩展的影响越严重。

通过对矢量电磁高斯谢尔模光束(EGSM)进行螺旋相位调制获得了矢量电磁高斯-谢尔涡旋光束(EGSMV),并分析了振幅分量及大气湍流内外尺度对偏振度(DoP)的影响。

图 25^[186]是 EGSMV 光束在不同波长下的 DoP 分布。可以看出,当波长越长时,EGSMV 光束经湍流后的 DoP 分布越分散,光束受湍流影响越大。

图 26^[186]是不同束腰半径下 $l=1$ 的 EGSMV 光束经湍流传输后的 DoP 分布曲线。无论束腰半径分量 ω_{0x} 和 ω_{0y} 是否相等,EGSMV 光束经大气湍流传输后的 DoP 分布随着束腰半径分量的增加而越分散。

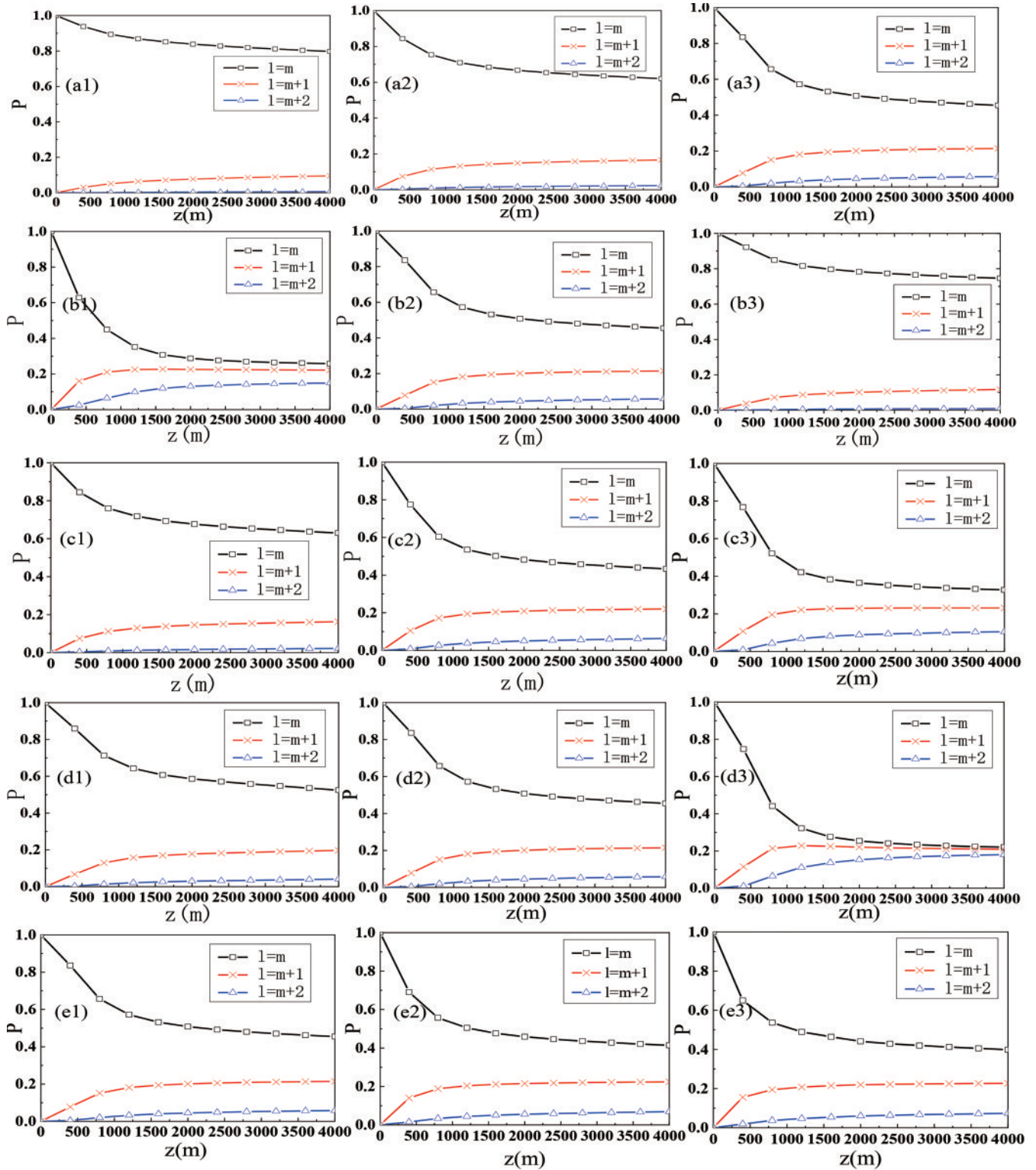


图 16 在不同参数下螺旋谱分量随传输距离的分布。(a1)~(a3)近地面折射率结构常数 $C_n^2(0) = 3.5 \times 10^{-15} \text{ m}^{-2/3}$, $8.1 \times 10^{-15} \text{ m}^{-2/3}$, $1.7 \times 10^{-14} \text{ m}^{-2/3}$; (b1)~(b3) $\lambda = 351 \text{ nm}$, 632 nm , 1068 nm ; (c1)~(c3) $R = 2 \text{ cm}$, 3 cm , 4 cm ; (d1)~(d3) $\alpha = \pi/4$, $\pi/3$, $\pi/2$; (e1)~(e3) $m = 3, 10, 20$ [161]

Fig. 16 Distribution of helical spectrum components with propagation distance under different parameters. (a1)–(a3) Near-ground refractive index structure constant: $C_n^2(0) = 3.5 \times 10^{-15} \text{ m}^{-2/3}$, $8.1 \times 10^{-15} \text{ m}^{-2/3}$, $1.7 \times 10^{-14} \text{ m}^{-2/3}$; (b1)–(b3) $\lambda = 351 \text{ nm}$, 632 nm , 1068 nm ; (c1)–(c3) $R = 2 \text{ cm}$, 3 cm , 4 cm ; (d1)–(d3) $\alpha = \pi/4$, $\pi/3$, $\pi/2$; (e1)–(e3) $m = 3, 10, 20$ [161]

图 27 [186] 为不同振幅分量 A_x 和 A_y 下 $l=1$ 的 EGSMV 光束经湍流传输后的 DoP 分布曲线。可以看出部分相干光源 EGSMV 光束经大气湍流传输后的

DoP 分布是与振幅比 A_x/A_y 有关, 而与单独的振幅 A_x 或 A_y 无关。当 A_x/A_y 越大, DoP 分布越发散, 光束受湍流影响越大。

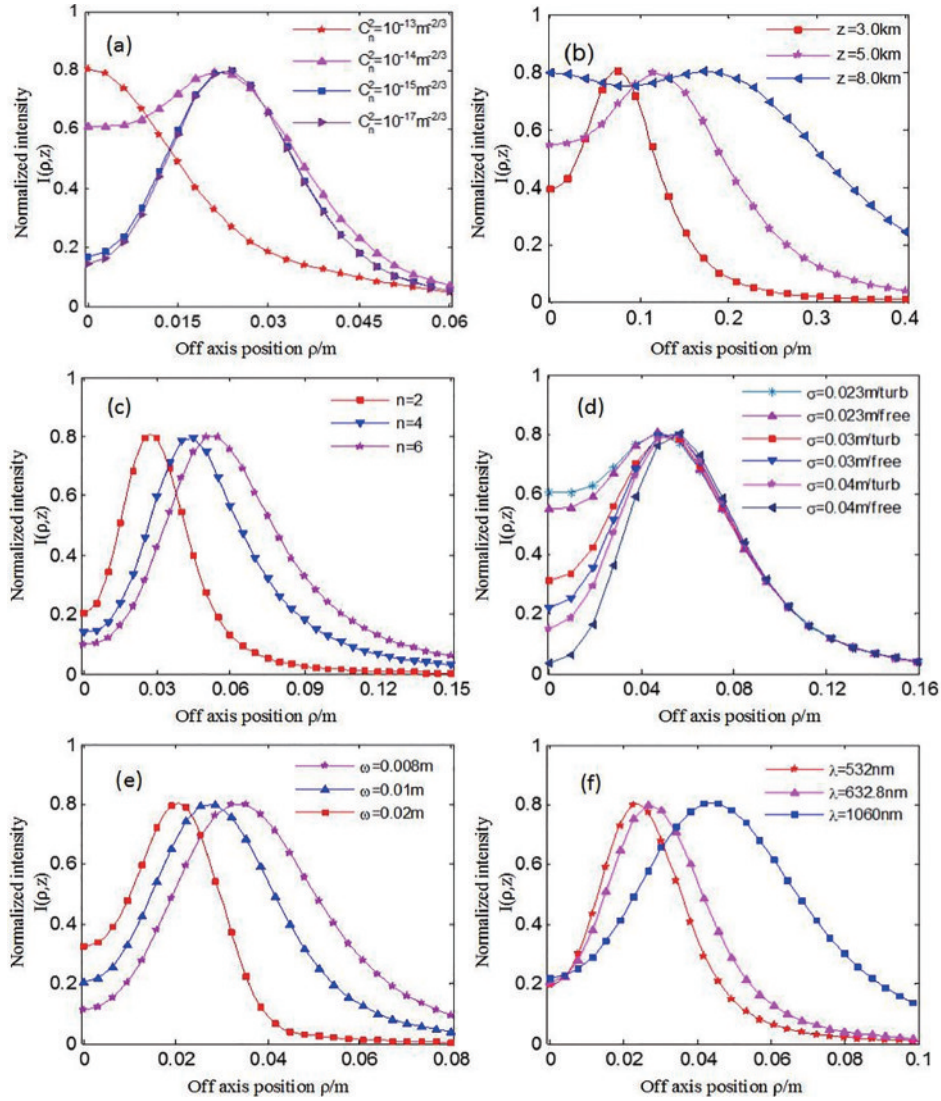


图 17 不同参数下 GSM 涡旋光束归一化光强分布。(a)湍流强度;(b)传输距离;(c)拓扑荷数;(d)相干长度;(e)束腰半径;(f)波长^[184]
 Fig. 17 Normalized intensity distribution of GSM vortex beams under different parameters. (a) Turbulence intensity; (b) transmission distance; (c) topological charge number; (d) coherence length; (e) beam waist radius; (f) wavelength^[184]

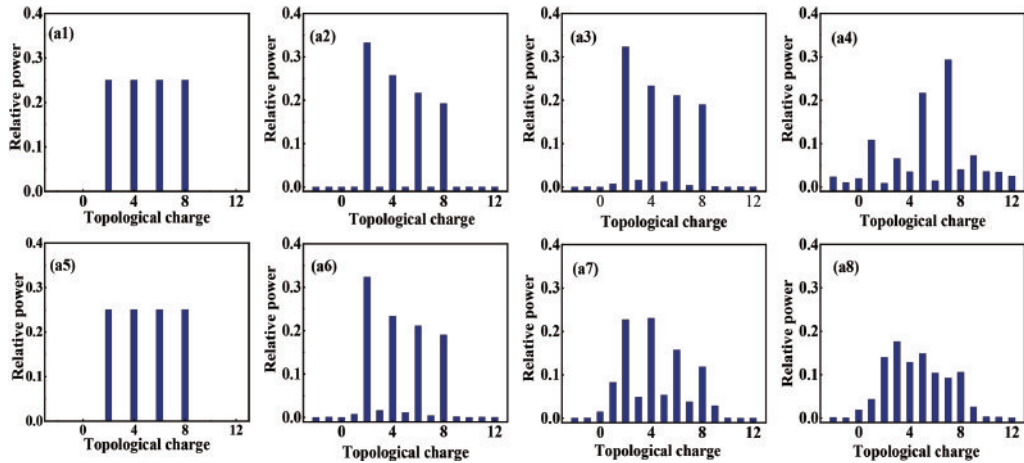


图 18 OAM 复用光束在不同湍流强度和传输距离下的螺旋谱分布。(a1)无湍流;(a2) $C_n^2 = 1 \times 10^{-17} \text{ m}^{-2/3}$; (a3) $C_n^2 = 1 \times 10^{-15} \text{ m}^{-2/3}$; (a4) $C_n^2 = 1 \times 10^{-13} \text{ m}^{-2/3}$; (a5) $z = 0 \text{ m}$; (a6) $z = 1000 \text{ m}$; (a7) $z = 3000 \text{ m}$; (a8) $z = 5000 \text{ m}$ ^[185]
 Fig. 18 Spiral spectrum distribution of OAM multiplexed beams under different turbulence intensities and transmission distances. (a1) No turbulence; (a2) $C_n^2 = 1 \times 10^{-17} \text{ m}^{-2/3}$; (a3) $C_n^2 = 1 \times 10^{-15} \text{ m}^{-2/3}$; (a4) $C_n^2 = 1 \times 10^{-13} \text{ m}^{-2/3}$; (a5) $z = 0 \text{ m}$; (a6) $z = 1000 \text{ m}$; (a7) $z = 3000 \text{ m}$; (a8) $z = 5000 \text{ m}$ ^[185]

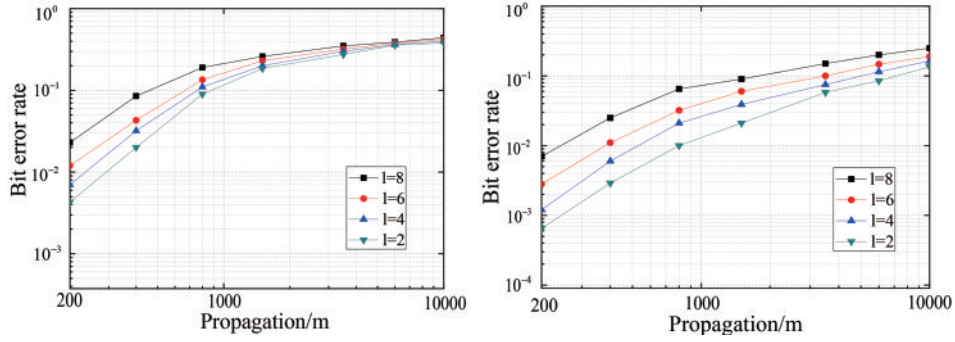


图 19 不同湍流强度下系统误码率变化曲线。(a) $C_n^2 = 5 \times 10^{-14} \text{ m}^{-2/3}$; (b) $C_n^2 = 1 \times 10^{-17} \text{ m}^{-2/3}$ ^[185]

Fig. 19 Bit error rate curves of the system under different turbulence intensities. (a) $C_n^2 = 5 \times 10^{-14} \text{ m}^{-2/3}$; (b) $C_n^2 = 1 \times 10^{-17} \text{ m}^{-2/3}$ ^[185]

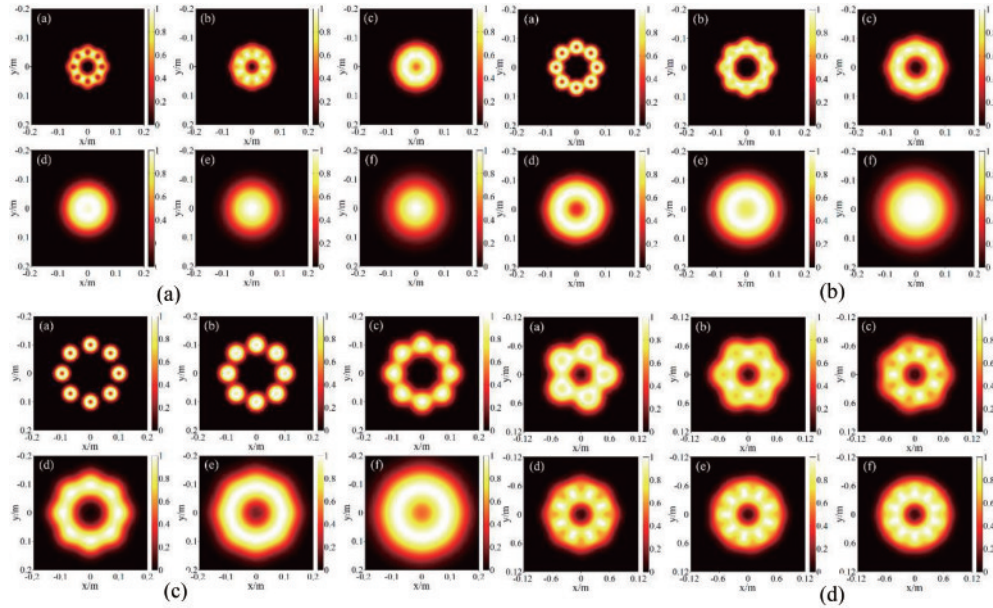


图 20 不同参数下径向部分相干涡旋光束阵列经 non-Kolmogorov 湍流传输不同距离后的光强分布。(a) $r_n = 5w_0$; (b) $r_n = 7w_0$; (c) $r_n = 10w_0$; (d) $N = 5 \sim 10$ ^[186]

Fig. 20 Light intensity distributions of radial partially coherent vortex beam arrays propagating over different distances through non-Kolmogorov turbulence with different parameters. (a) $r_n = 5w_0$; (b) $r_n = 7w_0$; (c) $r_n = 10w_0$; (d) N is 5–10^[186]

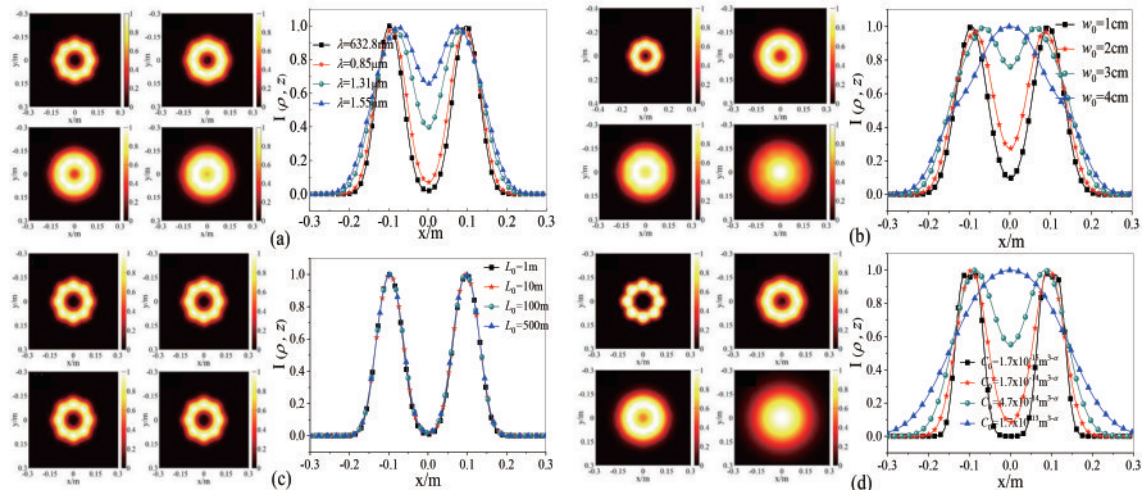


图 21 不同波长时径向部分相干涡旋光束阵列经 non-Kolmogorov 湍流中传输的光强分布和曲线。(a) 波长; (b) 束腰半径; (c) 外尺度; (d) 湍流强度^[186]

Fig. 21 Intensity distribution and curves of radial partially coherent vortex beam arrays transmitted through non-Kolmogorov turbulence at different wavelengths. (a) Wavelength; (b) beam waist radius; (c) coherence length; (d) turbulence intensity^[186]

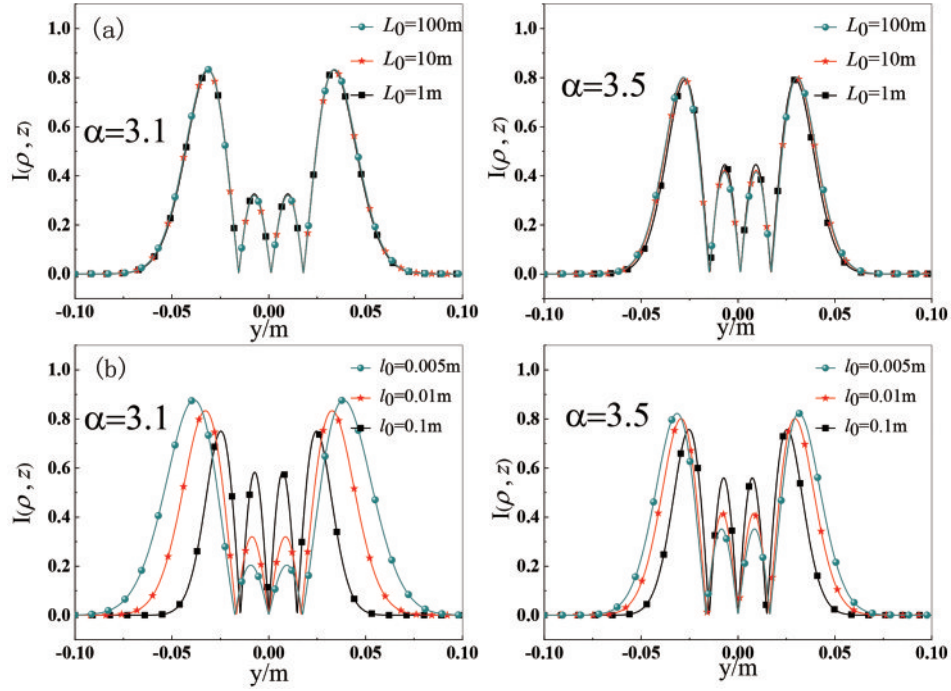


图 22 不同内外尺度下 LGSMV 光束经 non-Kolmogorov 湍流传输后的光强分布曲线。(a)外尺度;(b)内尺度^[186]

Fig. 22 Light intensity distribution curves of LGSMV beams transmitted by non-Kolmogorov turbulence at different inner and outer scales. (a) Outer scale; (b) inner scale^[186]

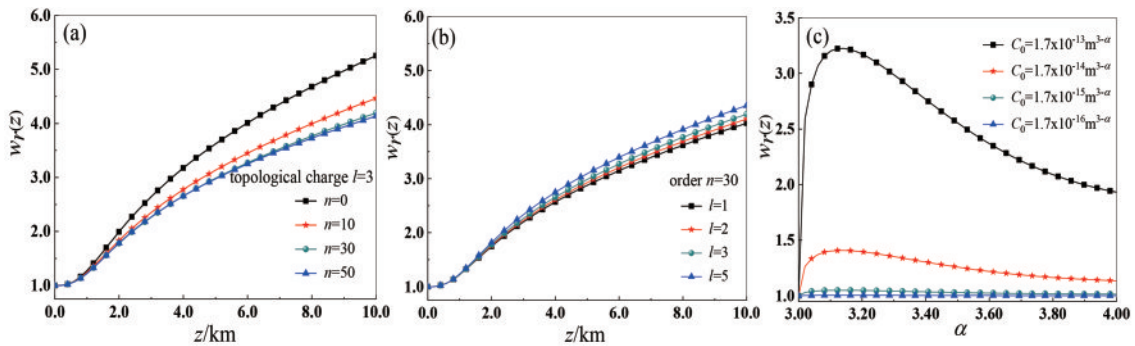


图 23 LGSMV 光束经 Non-Kolmogorov 湍流后相对束宽随传输距离的变化曲线。(a)不同阶数 n ; (b)不同拓扑荷数 l ; (c)不同湍流强度^[186]

Fig. 23 Relative beam width of LGSMV beams after non-Kolmogorov turbulence varies with the propagation distance. (a) Different order N ; (b) different topological charge l ; (c) different turbulence intensity^[186]

图 28^[186] 为 EGSMV 光束在不同内外尺度下的 DoP 分布曲线。在同一外尺度情况下,内尺度越大,DoP 越集中,且轴上点的 DoP 越大,受湍流影响越小。而大气湍流的外尺度对 DoP 的分布几乎没有影响。

在空间量子通信中,纠缠态的光子不仅受到大气粒子的吸收和散射,还受到大气湍流的消相干影响,这导致纠缠态的光子会演变为可分离态,造成空间量子通信性能下降。

图 29(a)、(b)和(c)、(d)^[187] 分别为不同湍流强度下不同 OAM 纠缠双光子的共生纠缠度及纠缠度变化曲线。结果发现,传输距离、湍流强度越大,衰减越快,且 OAM 值越大,反而衰减越慢。从一开始的最大纠缠态,逐渐变化为可分离态。

图 30(a)~(c)^[188] 分别为大气信道中不同传输距离、信号光波长、湍流强度下 OAM 纠缠双光子对的联合探测概率分布。可以看出,传输距离越大,湍流强度越强,信号光波长越小时 OAM 态 $|l_1; l_2 = l_p - l_1\rangle$ 的探测概率越小,双光子 OAM 态 $|l_1; l_2 \neq l_p - l_1\rangle$ 的联合探测概率随之增大,纠缠双光子受到湍流的影响越大。

图 31^[189] 为光子 OAM 的一些传输特性曲线。图 31(a) 曲线说明了非金属矿石对平均每光子 OAM 影响程度小于金属铁。图 31(b)~(d) 分别是湍流倾斜像差、彗差像差、像散像差受湍流的影响程度,得到了在相关参数一定时,湍流倾斜像差受影响是最大的,接着是彗差像差,最后是像散像差。

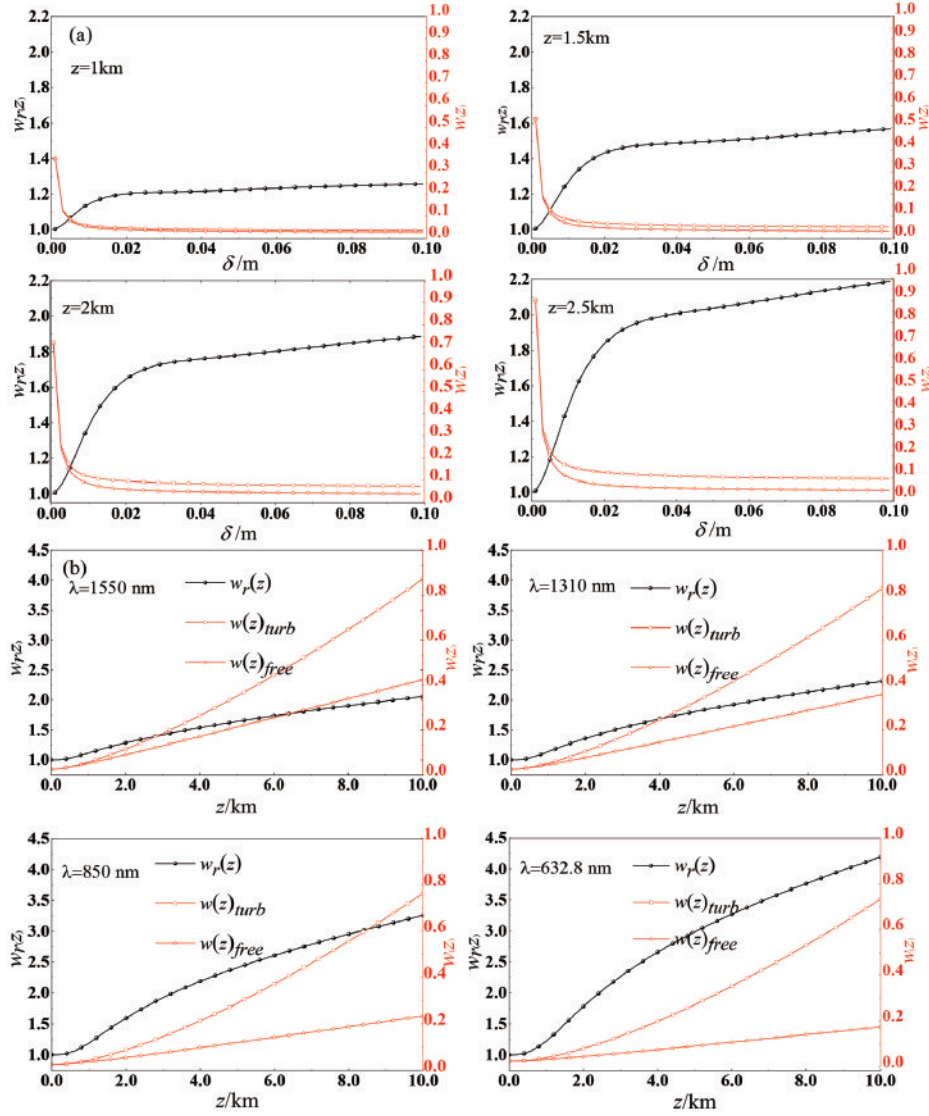


图 24 不同参数下 LGSMV 光束经 Non-Kolmogorov 湍流后相对束宽的变化曲线。(a) 波长; (b) 传输距离^[186]

Fig. 24 Relative beam width curves of LGSMV beams after non-Kolmogorov turbulence with different parameters. (a) Wavelength; (b) transmission distance^[186]

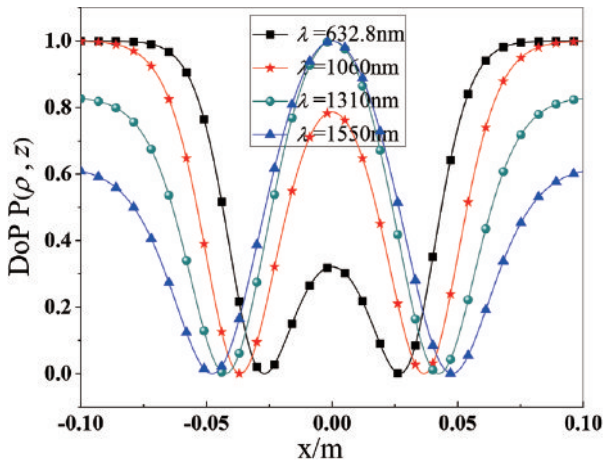


图 25 不同波长下 EGSMV 光束经湍流传输后的 DoP 分布曲线^[186]

Fig. 25 DoP distribution curves of EGSMV beams transmitted by turbulence at different wavelengths^[186]

最后研究了 OAM-MIMO 复用系统中的串扰抑制, 图 32(a)、(b)^[190] 分别是采用互相关函数-多模盲均衡 (CC-MCMA)、多用户峰度-多模盲均衡 (MUK-MCMA) 算法均衡前后的星座图对比, 可以很明显看出, 经过这两种 MIMO 均衡算法后星座图均得到了明显改善, 且 MUK-MCMA 算法恢复信号效果比 CC-MCMA 算法要强。

图 33(a)、(b)^[190] 分别是大气湍流信道下 OAM 复用通信系统平均误码率 (ABER) 随大气湍流强度和信噪比的变化曲线图。从图 33(a) 可以看出, 不论在强湍流还是弱湍流下, MUK-MCMA 算法分别能将系统 ABER 降低 3.5~1 个数量级和 1~0.4 个数量级。图 33(b) 中当信噪比 (SNR) 为 20 dB 左右时, MUK-MCMA 算法相比 CC-MCMA 算法对 ABER 均衡效果改善了 1 个数量级, 所以, MUK-MCMA 算法对 OAM 复用系统的均衡效果最好。

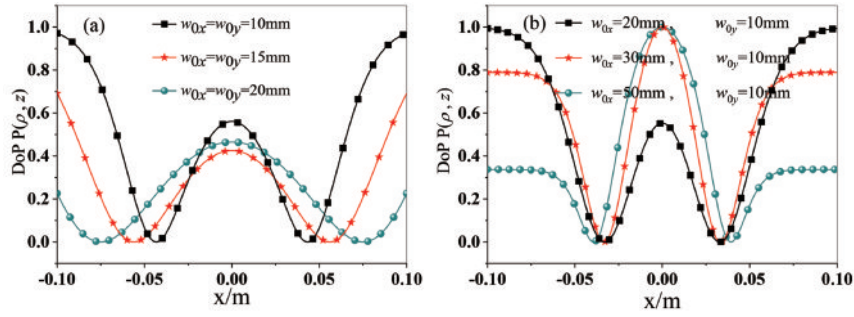


图 26 不同束腰半径下 EGSMV 光束经湍流传输后的 DoP 分布曲线。(a) $w_{0x}=w_{0y}$; (b) $w_{0x} \neq w_{0y}$ ^[186]

Fig. 26 DoP distribution curves of EGSMV beams with different waist radius after turbulent transmission. (a) $w_{0x}=w_{0y}$; (b) $w_{0x} \neq w_{0y}$ ^[186]

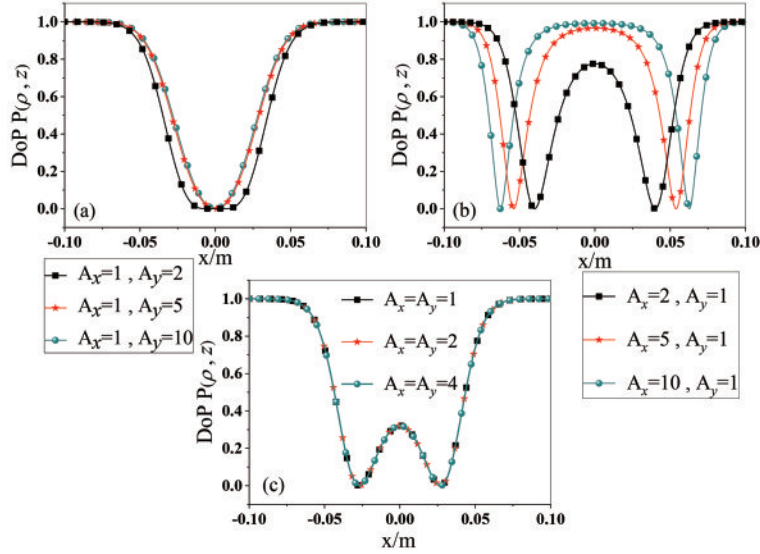


图 27 不同振幅下 EGSMV 光束经大气湍流传输后的 DoP 分布曲线。(a) $A_x=A_y$; (b) $A_x < A_y$; (c) $A_x > A_y$ ^[186]

Fig. 27 DoP distribution curves of EGSMV beams transmitted through atmospheric turbulence with different amplitudes. (a) $A_x=A_y$; (b) $A_x < A_y$; (c) $A_x > A_y$ ^[186]

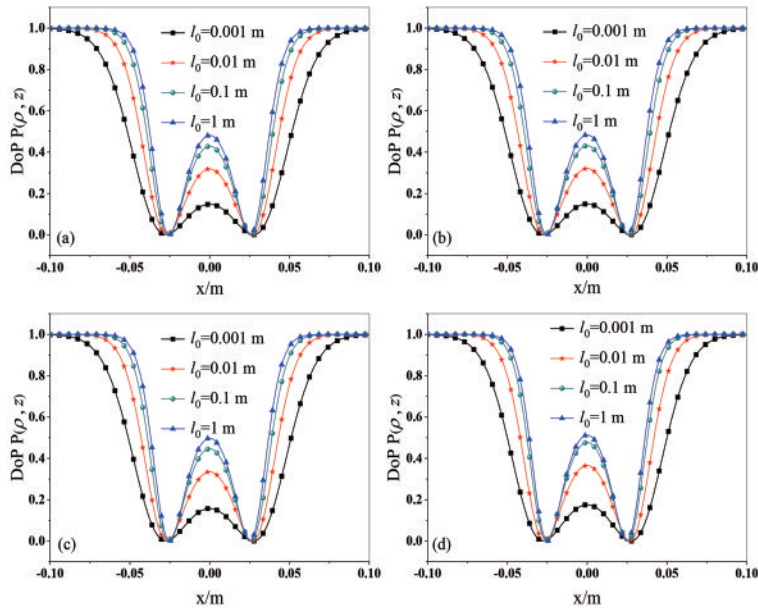


图 28 不同内、外尺度情况下 $l=1$ 的 EGSMV 光束经湍流传输后的 DoP 分布曲线。(a) $L_0=200$ m; (b) $L_0=100$ m; (c) $L_0=10$ m; (d) $L_0=1$ m^[186]

Fig. 28 DoP distribution curve of EGSMV beam with $l=1$ transmitted by turbulence at different inner and outer scales.

(a) $L_0=200$ m; (b) $L_0=100$ m; (c) $L_0=10$ m; (d) $L_0=1$ m^[186]

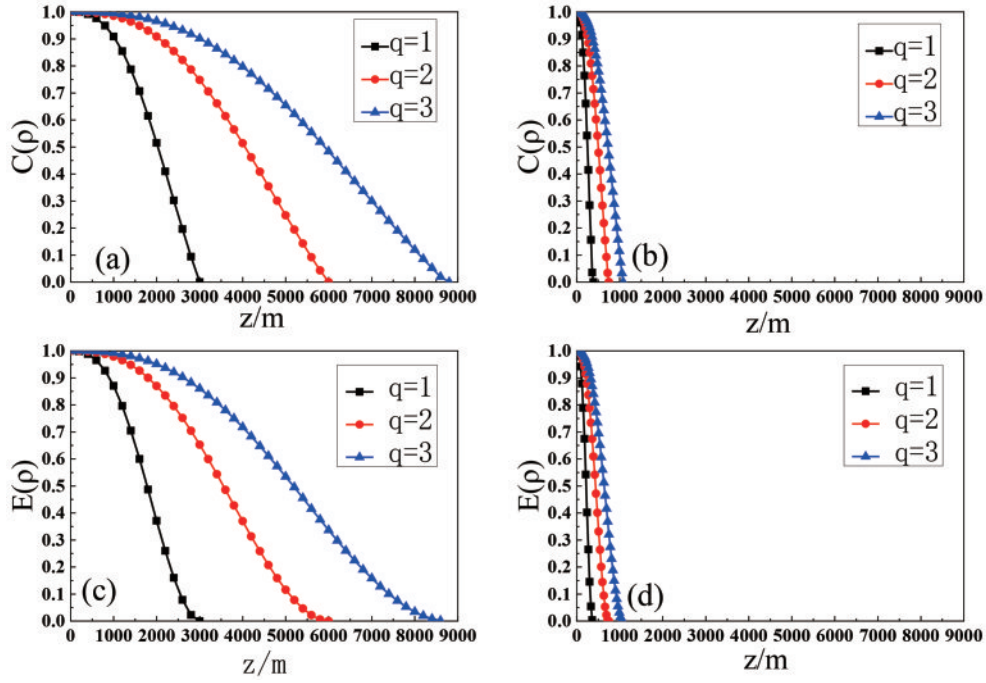


图 29 不同 OAM 纠缠双光子变化曲线。(a)(b)共生纠缠度；(c)(d)纠缠度^[187]

Fig. 29 Two-photon variation curves of different OAM entanglement. (a)(b) Concurrence entanglement degree; (c)(d) entanglement degrees^[187]

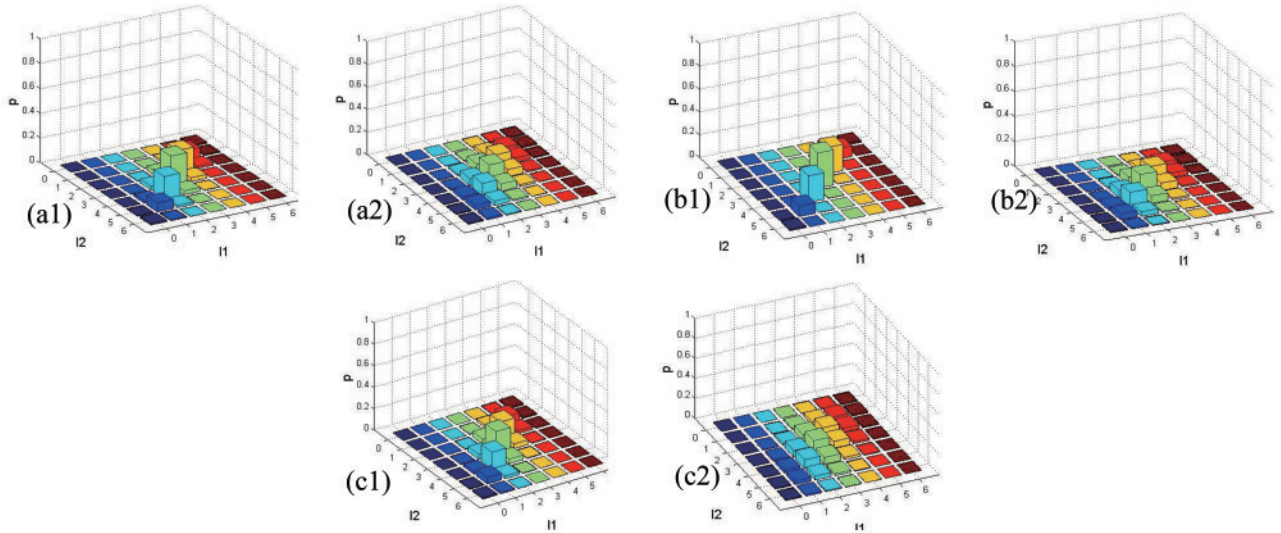


图 30 大气信道中不同传输距离、湍流强度、信号光波长下 OAM 纠缠双光子对的联合探测概率。(a1) (a2) 100 m, 300 m; (b1) (b2) $C_n^2 = 6.4 \times 10^{-17} \text{ m}^{-2/3}$, $C_n^2 = 8.7 \times 10^{-15} \text{ m}^{-2/3}$; (c1) (c2) 1028 nm, 632 nm^[188]

Fig. 30 Joint detection probability of OAM entangled two-photon pairs under different transmission distances, turbulence intensities, and signal light wavelengths in atmospheric channels. (a1) (a2) 100 m and 300 m; (b1) (b2) $C_n^2 = 6.4 \times 10^{-17} \text{ m}^{-2/3}$ and $C_n^2 = 8.7 \times 10^{-15} \text{ m}^{-2/3}$; (c1) (c2) 1028 nm and 632 nm^[188]

6.2.2 自适应光学波前校正

涡旋光束经过大气湍流后产生波前相位畸变,需要使用自适应光学校正技术来尽可能地恢复光束的光强相位信息。表 6 研究分析了基于 GS 相位恢复算法、SPGD 算法和 PD 算法的无波前测量自适应光学校正技术。

GS 算法是通过采集输入输出两个平面的光强信息,在一定条件下进行循环迭代从而反推得到畸变相

位信息,再通过取共轭后,将相位灰度图加载在校正器如 SLM 上,从而恢复出所需相位信息。

图 34^[191]是单模、多模涡旋光束经过 GS 算法校正前后的光强分布图,图 34(a1)~(d1)为无湍流下光斑,图 34(a2)~(d2)为经过湍流后的畸变光斑,经过校正后的光斑为图 34(a3)~(d3),可以看出光束的奇点不再漂移,且周围分布更加均匀。多模情况下的花瓣状光斑也更加完整。

表 6 自适应光学无波前校正算法总结

Table 6 Summary of correction algorithms with no wavefront sensor in adaptive optics

Adaptive optical wavefront correction algorithm	Algorithm principle	Effect of correction
GS algorithm	Wavefront intensity reconstructs wavefront phase	Single-mode and multi-mode can be corrected, and the energy distribution becomes uniform
SPGD algorithm	Maximum value of the correlation coefficient of light intensity is calculated corresponding to the optimal voltage driving of the deforming mirror	The light intensity in the center of the spot increases obviously and the energy converges
PD algorithm	Making difference between the distorted phase and the ideal vortex phase to obtain the conjugate	Single-mode and multimode can be corrected for more uniform light intensity distribution and energy enhancement

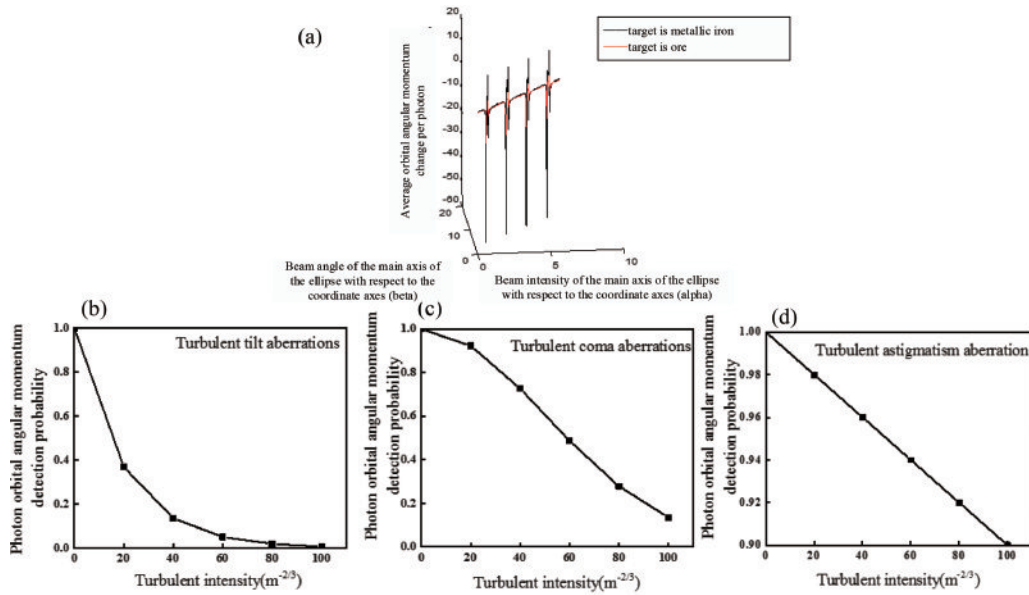


图 31 光子 OAM 传输特性。(a)高阶椭圆厄密-高斯光束与金属铁和矿石作用后的单光子平均 OAM 变化;(b)~(d)湍流中倾斜像差、彗差像差、像散像差对光子 OAM 探测概率影响^[189]

Fig. 31 Transmission characteristics of photon OAM. (a) Single-photon average OAM variation after interaction of high-order elliptic Hermite-Gaussian beam with metallic iron and ore; (b)~(d) effects of tilt aberration, coma aberration, and astigmatic aberration on photon OAM detection probability in turbulence^[189]

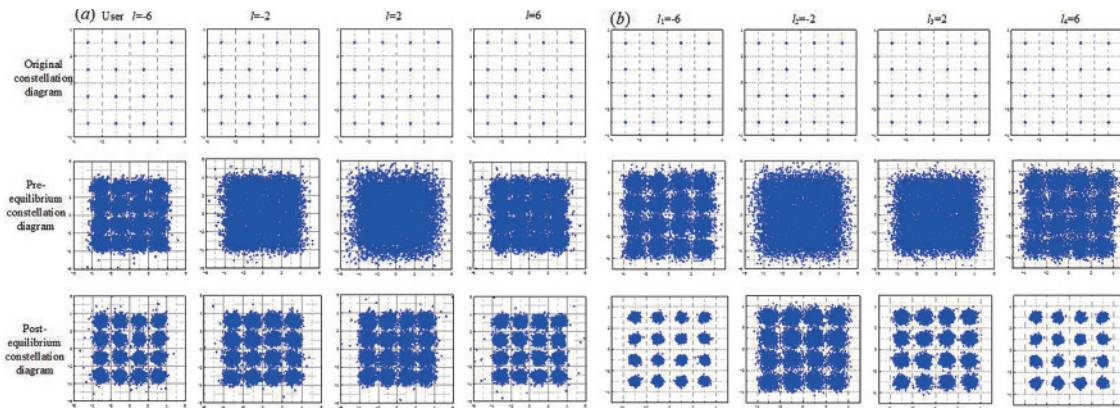


图 32 采用 MIMO 算法的均衡前后对比星座图。(a) CC-MCMA; (b) MUK-MCMA^[190]

Fig. 32 Constellation diagram before and after equilibrium using MIMO algorithm. (a) CC-MCMA; (b) MUK-MCMA^[190]

SPGD 算法依据迭代算法中光强相关函数的变化,计算得出光强相关系数最大值对应的变形镜最优电压值,进而驱动变形镜镜面产生新的形变,使反射出

变形镜的光束改变光程差,从而实现波前畸变校正^[191]。

图 35^[191]是单模、多模涡旋光束利用 SPGD 算法

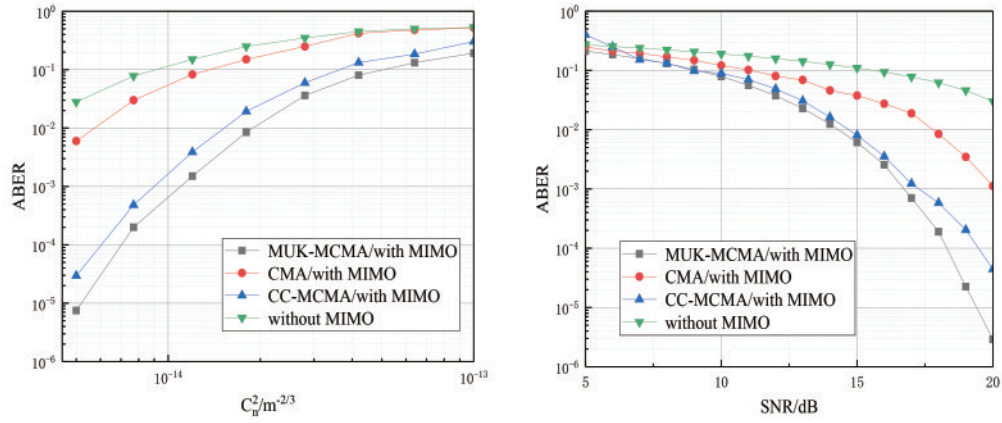


图 33 大气湍流信道下 OAM 复用通信系统平均误码率变化曲线。(a)湍流强度;(b)信噪比^[190]

Fig. 33 Variation curve of average bit error rate of OAM multiplexed communication system in atmospheric turbulence channel.

(a) Turbulence intensity; (b) signal-to-noise ratio^[190]

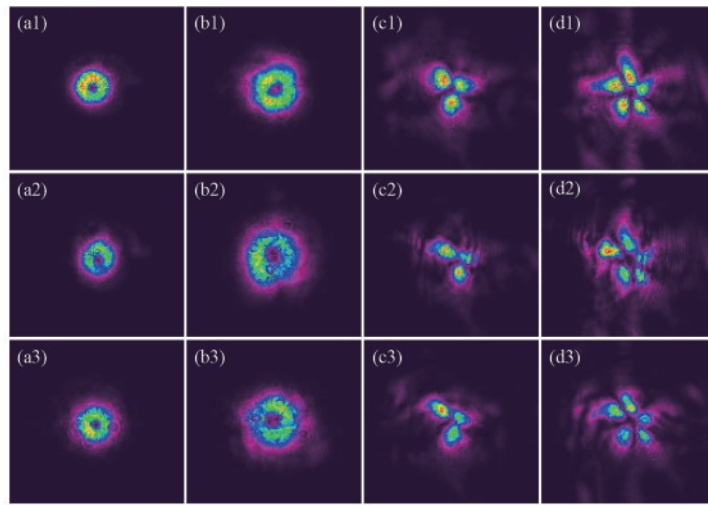


图 34 GS 算法校正前后光强分布图。(a1)~(d1)初始无湍流;(a2)~(d2)湍流影响;(a3)~(d3)校正后^[191]

Fig. 34 Light intensity distribution before and after GS algorithm correction. (a1)–(d1) Without turbulence; (a2)–(d2) with turbulence; (a3)–(d3) after correction^[191]

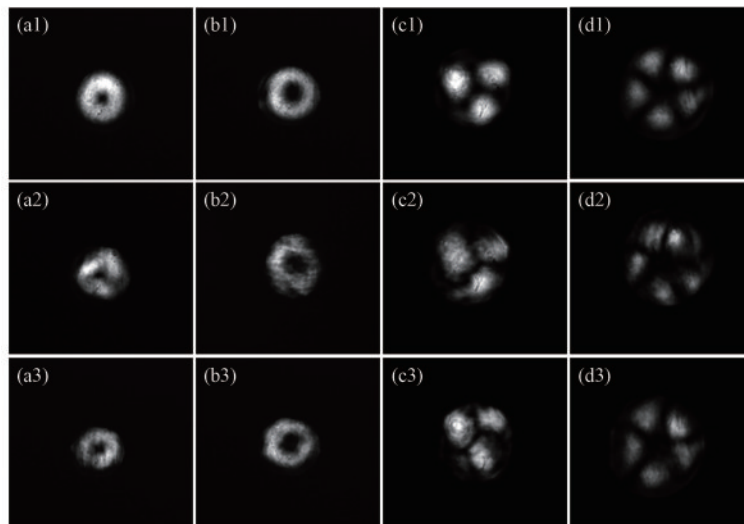


图 35 SPGD 算法校正前后光强分布图。(a1)~(d1)初始无湍流;(a2)~(d2)湍流影响;(a3)~(d3)校正后^[191]

Fig. 35 Light intensity distribution before and after SPGD algorithm correction. (a1)–(d1) Without turbulence; (a2)–(d2) with turbulence; (a3)–(d3) after correction^[191]

校正前后的光强分布图,图 35(a1)~(d1)为无湍流下光斑,图 35(a2)~(d2)为经过湍流后的畸变光斑,经过校正后的光斑为图 35(a3)~(d3)。可以看出,经 SPGD 算法校正后,涡旋光强度分布变得均匀,光斑形状也变得比较规整,且对于单模涡旋光束校正效果优于多模。

相位差法是一种相位复原和图像恢复技术,算法通过采集在焦面和离焦面的一对光束或图像信息,利用最大似然估计求解最优化后的目标函数,将得到的

畸变相位与理想涡旋相位作差得到相位畸变误差,最终利用相位畸变误差的共轭灰度图实现对波前相位或图像的恢复^[192]。

图 36(a1)~(c1)为无湍流下光束分布,图 36(a2)~(c2)及(a3)~(c3)为经过湍流后的焦面、离焦面畸变光斑,经过校正后的光斑为图 36(a4)~(c4)。可以看出,图 36(a2)~(c2)和(a3)~(c3)的光强分布发生了能量衰减和畸变,经相位差法校正后,能量明显得到恢复且畸变程度变轻。

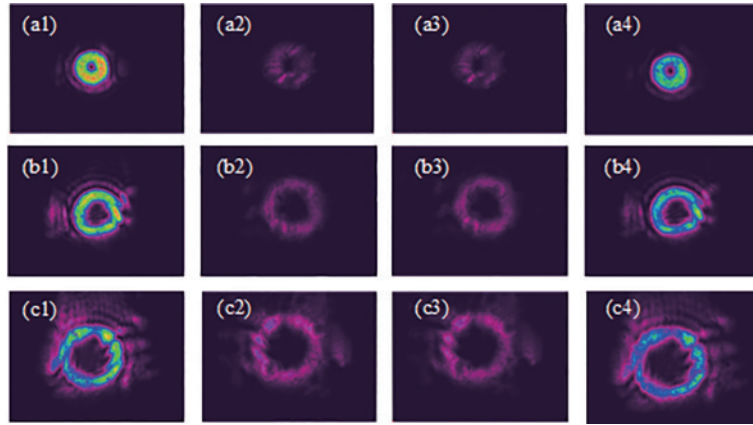


图 36 相位差法校正涡旋光束的光强分布图。(a1)~(c1)初始处;(a2)~(c2)焦面处;(a3)~(c3)离焦面处;(a4)~(c4)校正后^[192]

Fig. 36 Distribution of intensity and spiral spectrum of vortex beam corrected by phase difference method. (a1)~(c1) Initial plane; (a2)~(c2) focal plane; (a3)~(c3) defocus plane; (a4)~(c4) after correction^[192]

6.2.3 其他

除了以上传输特性的研究以外,还有 OAM 光束经过单球粒子散射的分析以及经过光阑光学系统的

分析。图 37^[193]是 OAM 光束单球粒子散射模型及变化曲线。从图 37(a)可见,总散射强度较平面波较弱,由图 37(b)~(c)可见,随着波束宽度增大,散射截

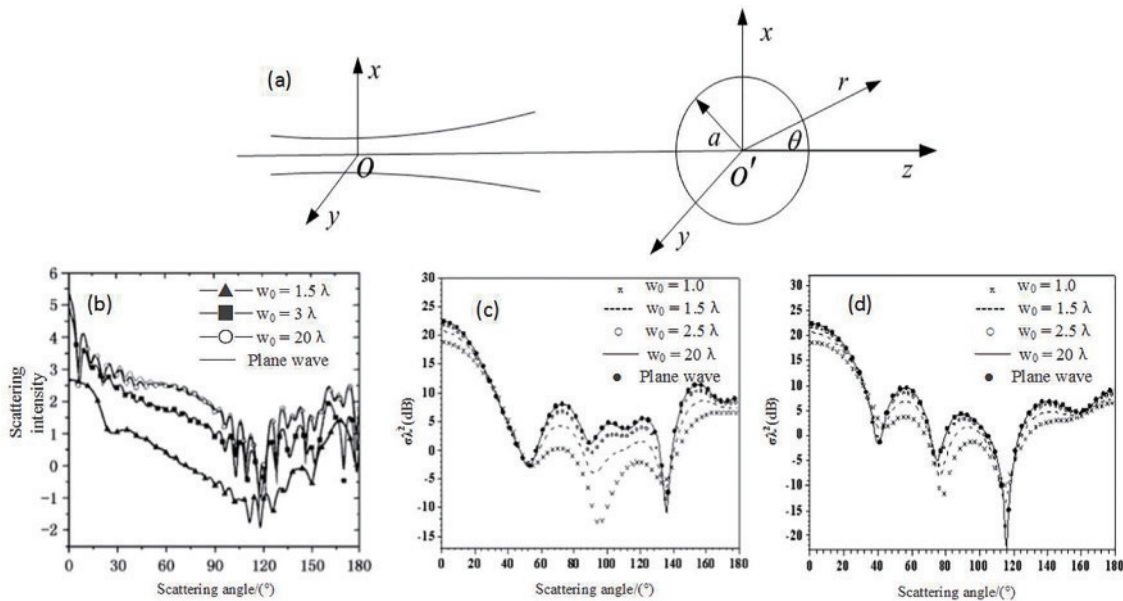


图 37 OAM 光束经单球粒子散射。(a)单球粒子对在轴高斯波束散射;(b)散射强度及角分布随波束宽度变化;(c)(d)波束宽度分别对 E、H 面散射截面影响^[193]

Fig. 37 OAM beam scattering by a single spherical particle. (a) Gaussian beam scattering by a single spherical particle pair at the axis; (b) scattering intensity and angle distribution vary with the beamwidth; (c) (d) influence of beamwidth on the E and H plane scattering cross sections, respectively^[193]

面也增大,同时粒子对平面波的散射截面比对高斯波的要大。

图 38(a)、(b)^[193]是 LG 光束通过两种光阑系统的物理模型。图 39^[193]为经过这两种光阑系统的光强分

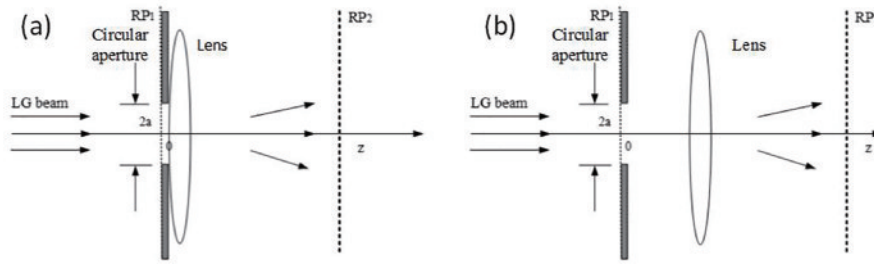


图 38 单光阑光学系统的物理模型。(a)透镜紧靠光阑;(b)透镜光阑分离^[193]

Fig. 38 Physical model of the optical system with a single aperture. (a) Lens adjacent to the aperture; (b) lens aperture separation^[193]

6.3 涡旋光束 OAM 的分离与检测

6.3.1 涡旋光束 OAM 检测

目前,检测 OAM 模式的方法主要有:1)涡旋光束和平面波球面波干涉;2)涡旋光束通过狭缝或者各类光阑后的衍射;3)涡旋光束经过光栅、相位图等光学器件衍射;4)其他新兴方法如偏振方向角检测等。

1) 涡旋光束干涉检测法

涡旋光束干涉检测是利用涡旋光与平面光进行干涉叠加,通过分析生成的干涉条纹检测涡旋光的拓扑荷数。由图 40^[186]可见不管仿真还是实验中分叉数都为 1,且 $l=1$ 时分叉朝上, $l=-1$ 时朝下。

2) 孔径光阑检测法

图 41(a)~(e)^[186]分别为圆孔、正方、三角孔光阑,以及单缝和双缝的示意图,涡旋光束经过这些光阑后的衍射图可以检测 OAM 模式。

图 42^[186]为涡旋光束经不同光阑衍射后的实验结果,从这些衍射光斑的扭曲方向可以判断拓扑荷数正负,而扭曲的程度、阵列光斑个数、条纹个数可以判断拓扑荷数的大小。表 7 为对这 5 种衍射光学元件检测效果的对比,除了圆孔光阑只能检测入射涡旋光束拓扑荷的大小以外,方孔光阑、三角孔光阑、单缝、双缝均可以检测入射涡旋光束拓扑荷数大小及正负。

3) 光栅检测法

涡旋光束经过周期渐变光栅以及环形光栅后的衍射光场也可以对 OAM 模式进行检测,图 43(a)~(h)^[194]分别为 ab 型周期渐变振幅光栅、ab 型周期渐变相位光栅、环形振幅、相位光栅以及相位校正图、fan-out 相位图。

根据菲涅耳衍射理论计算分析得到了各种光栅衍射及经过相位校正和 fan-out 相位图改善后的光场分布如图 44^[194]所示。通过判断衍射条纹的条数和朝向可以对入射涡旋光束拓扑荷数的大小及正负进行检测。环形相位光栅的衍射光强最好,条纹清晰,光强值最大。最后经过相位校正后周期渐变光栅最高可检测

布,可以发现系统遮拦比对光束强度有影响,对光束束宽基本没影响,波长越大遮拦比对光束传输影响越大。同时在近场接收范围,随着透镜与光阑的间距加大,光阑和光束的遮拦比对光束传输的影响会变大。

拓拓扑荷数达到正负 20 阶,环形光栅则达到了正负 30 阶。

4) 相位奇点演化

图 45^[186]为不同拓扑荷数和阶数的 LGSMV 光束经过传输后在远场的相位奇点演变。随着传输距离的增加,LGSMV 光强分布逐渐扩大,中心暗区出现分裂,且总的相位奇点个数等于原始拓扑荷数。

5) 偏振方位角

表征矢量涡旋光束偏振方向的偏振方位角(OAoP)也可以用来检测涡旋光束的拓扑荷数大小及正负。图 46(a1)~(e1)和(f1)~(j1)^[186]分别为拓扑荷数 $l=\pm 1, \pm 2, \pm 3, \pm 4, \pm 5$ 的涡旋光光场,而图 46(a2)~(e2)和(f2)~(j2)^[186]则为对应的 OAoP 分布,拓扑荷数大小等于花瓣个数的一半,拓扑荷正时花瓣逆时针旋转,反之为正。

6.3.2 涡旋光束 OAM 分离

图 47^[179]分别为 $l=1, 3, l=1, 5$ 和 $l=1, 7$ 经过坐标转换后的衍射光场分布,坐标转换后的光斑呈水平横向分布亮条纹状。根据坐标尺度距离公式的估算,可以得到不同位置对应的入射涡旋光束拓扑荷数,经过此种方法可以有效完成 OAM 叠加态的分离检测。

6.4 涡旋光束 OAM 应用

6.4.1 涡旋光束 OAM 编解码

在 OAM 复用通信中,利用涡旋光束的额外自由度进行多位数据编解码可以实现更高速率和容量的通信。这里根据 SPP 的八台阶结构进行相位编码,即通过等长编码后每个八台阶结构可编码 24 比特信息,这 8 个字符的取值和排序代表相位编码。并测量其螺旋谱,通过台阶编码与螺旋谱的对应方式将螺旋谱的数值与 QSS 的编码信息存储起来,实现信息解码。螺旋谱有对称结构和非对称结构分别如图 48(a)、(b)^[195]所示。

利用锥形透镜作为模式转换器将 LG 光束转换为高阶 Bessel 无衍射光束进行空间光信息传输编码,然后

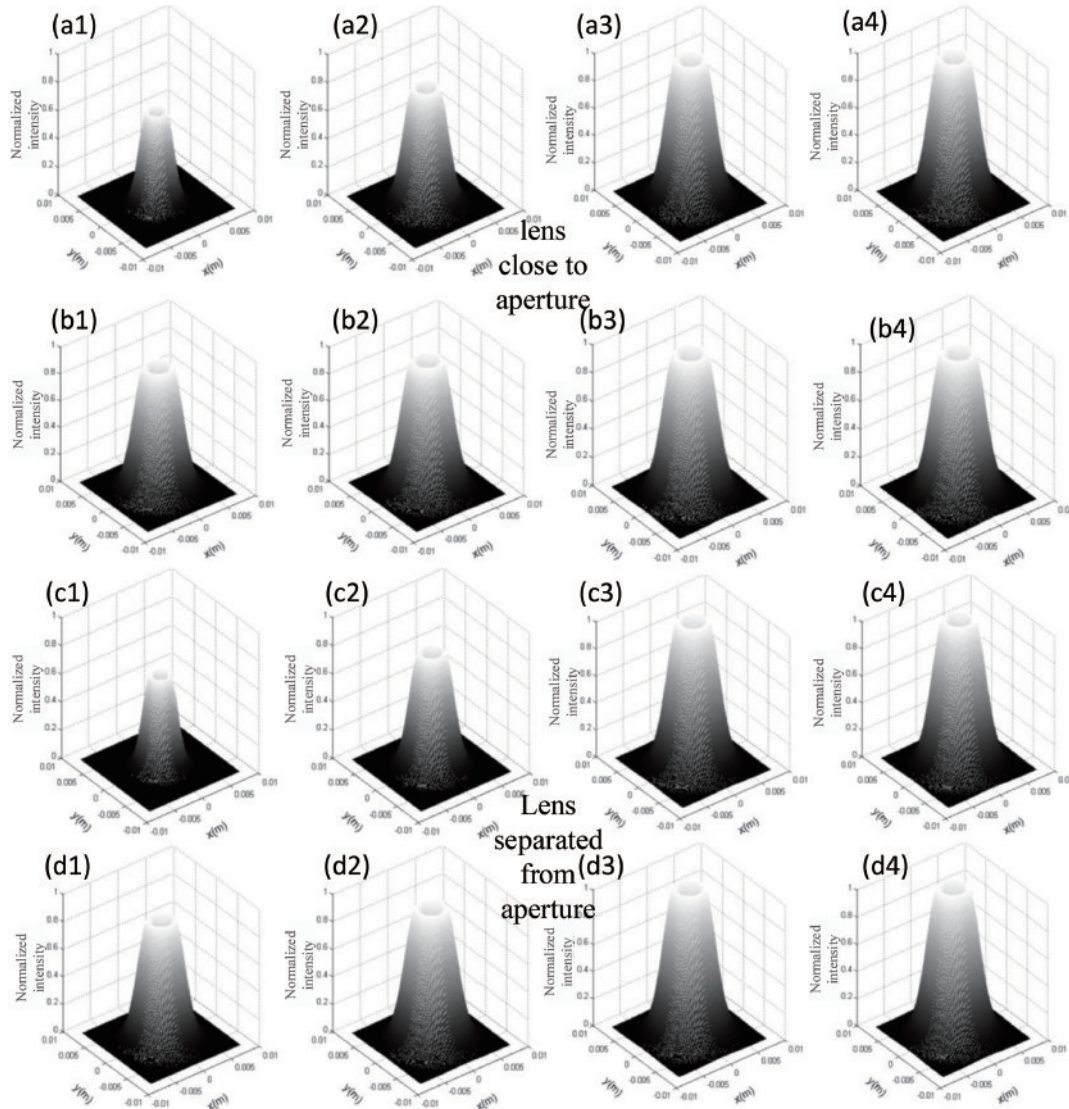


图 39 不同遮拦比、波长下 LG_0^1 光强分布。(a1)~(a4) $\lambda = 632.8 \text{ nm}$ 下遮拦比分别为 $a/w_0 = 1.2, 1.6, 1.8, 2.0$; (b1)~(b4) $\lambda = 1060 \text{ nm}$ 下遮拦比分别为 $a/w_0 = 1.6, 1.8, 2.6, 3.5$; (c1)~(c4) $\lambda = 632.8 \text{ nm}$ 下遮拦比分别为 $a/w_0 = 1.6, 1.8, 2.2, 3.5$; (d1)~(d4) $\lambda = 1060 \text{ nm}$ 下遮拦比分别为 $a/w_0 = 1.5, 2, 3, 4, 6$ ^[193]

Fig. 39 Light intensity distribution of LG_0^1 under different obscuration ratio a/w_0 and wavelength. (a1)–(a4) obscuration ratio under $\lambda = 632.8 \text{ nm}$ is $a/w_0 = 1.2, 1.6, 1.8, 2.0$; (b1) – (b4) obscuration ratio under $\lambda = 1060 \text{ nm}$ is $a/w_0 = 1.6, 1.8, 2.6, 3.5$; (c1)–(c4) obscuration ratio under $\lambda = 632.8 \text{ nm}$ is $a/w_0 = 1.6, 1.8, 2.2, 3.5$; (d1)–(d4) obscuration ratio under $\lambda = 1060 \text{ nm}$ is $a/w_0 = 1.5, 2, 3, 4, 6$ ^[193]

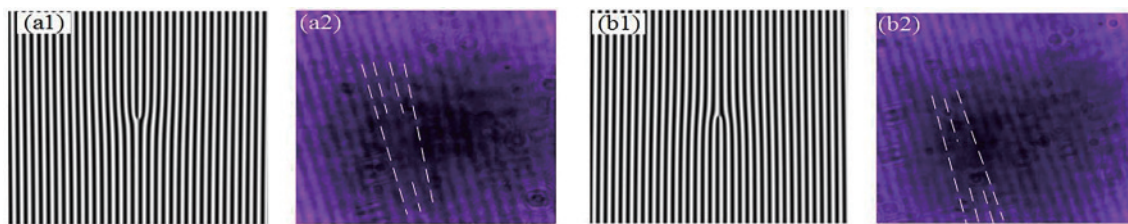


图 40 两束涡旋光干涉图仿真和实验图。(a1) (a2) $l = 1$ 的涡旋光干涉图; (b1) (b2) $l = -1$ 的涡旋光干涉图^[186]

Fig. 40 Interference pattern of two vortex beams. (a1) (a2) Vortex interference pattern with $l = 1$; (b1) (b2) vortex interference pattern with $l = -1$ ^[186]

利用阵列光栅进行解码, 图 49^[195] 为编解码系统示意图。

基于高阶 Bessel 函数的正交 OAM 态信息编码

利用单光子可携带确定的 OAM 态, 提高协议的密钥传输速率, 同时为增加光通信距离提供了一种解决方案。图 50^[195] 是 高阶 Bessel 光束光量子通信编解码

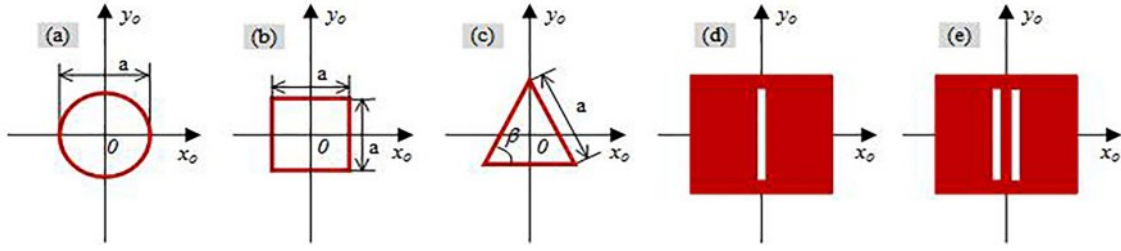


图 41 光阑。(a) 圆孔光阑；(b) 方孔光阑；(c) 三角孔光阑；(d) 单缝；(e) 双缝^[186]

Fig. 41 Apertures. (a) Circular apertures; (b) square apertures; (c) triangular aperture; (d) single slit; (e) double slit^[186]

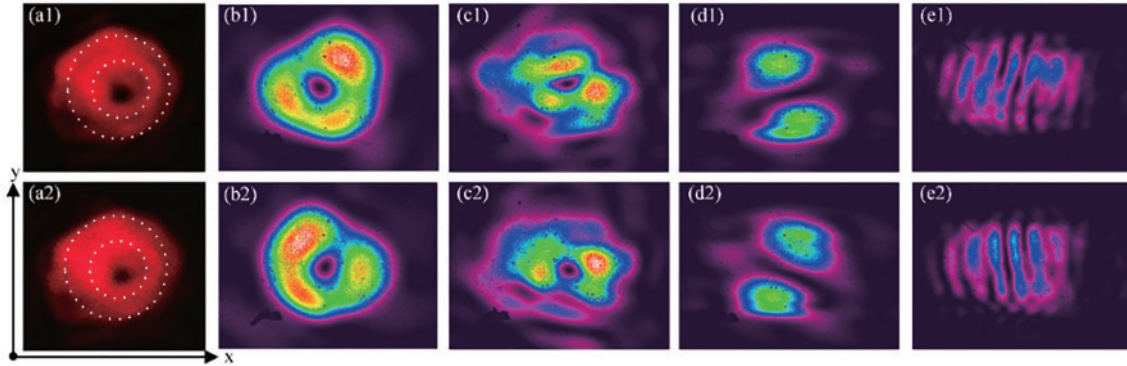


图 42 拓扑荷数。(a1)~(e1) $l=1$ ；(a2)~(e2) $l=-1$ 的涡旋光束经光阑的衍射图样 (a1)(a2) 圆孔光阑；(b1)(b2) 方孔光阑；(c1)(c2) 三角形光阑；(d1)(d2) 单缝；(e1)(e2) 双缝^[186]

Fig. 42 Diffraction patterns of vortex beams with topological charges. (a1)~(e1) $l=1$ and (a2)~(e2) $l=-1$ passing through an aperture (a1)(a2) circular aperture; (b1)(b2) square aperture; (c1)(c2) triangular apertures; (d1)(d2) single slit; (e1)(e2) double slit^[186]

表 7 衍射法检测效果的比较

Table 7 Comparison of measurement effects of diffraction

Diffraction topological	Magnitude determination method (diffracted spot or stripes)	Sign determination method (spot orientation or twist direction)	Measurement performance
Interference method	Stripe bifurcation number	Up: positive Down: negative	Low order/topological charge less than 5
Circular aperture	$ l +1$	-	Low order/topological charge less than 5
Triangular aperture	$(l ^2+3 l)/2+1$	Left: positive Right: negative	Low order/topological charge less than 10
Square aperture	Odd: $2(l +1)$ Even: $(l /2+1)^2$	Left: positive Right: negative	Low order/topological charge less than 10
Single slit	$ l -1$	Left: positive Right: negative	Low order/topological charge less than 5
Double slit	Degree of fringe distortion	Left: positive Right: negative	Low order/topological charge less than 5
A type period gradually-changed amplitude/phase grating	$ l -1$	- 1st order diffraction order with x -axis positive angle: $\theta \leq 90^\circ$ is positive; $90^\circ < \theta \leq 180^\circ$ is negative	Topological charge less than 10/ good diffraction effect for phase grating
B type period gradually-changed amplitude/phase grating	$ l -1$	- 1st order diffraction order with x -axis positive angle: $\theta \leq 90^\circ$ is positive; $90^\circ < \theta \leq 180^\circ$ is negative	Topological charge less than 10/ good diffraction effect for phase grating
Annular amplitude/phase grating	$ l -1$	- 1st order diffraction order with x -axis positive angle: $\theta \leq 90^\circ$ is positive; $90^\circ < \theta \leq 180^\circ$ is negative	Topological charge less than 25/ good diffraction effect for phase grating
Phase correction/fan-out	$ l -1$	- 1st order diffraction order with x -axis positive angle: $\theta \leq 90^\circ$ is positive; $90^\circ < \theta \leq 180^\circ$ is negative	Boost to 20 and 30 for gcpg and ag
Coordinate transformation method	Position of the light field after the coordinate transformation is combined with the coordinate scale distance formula		Single/double modes with low order

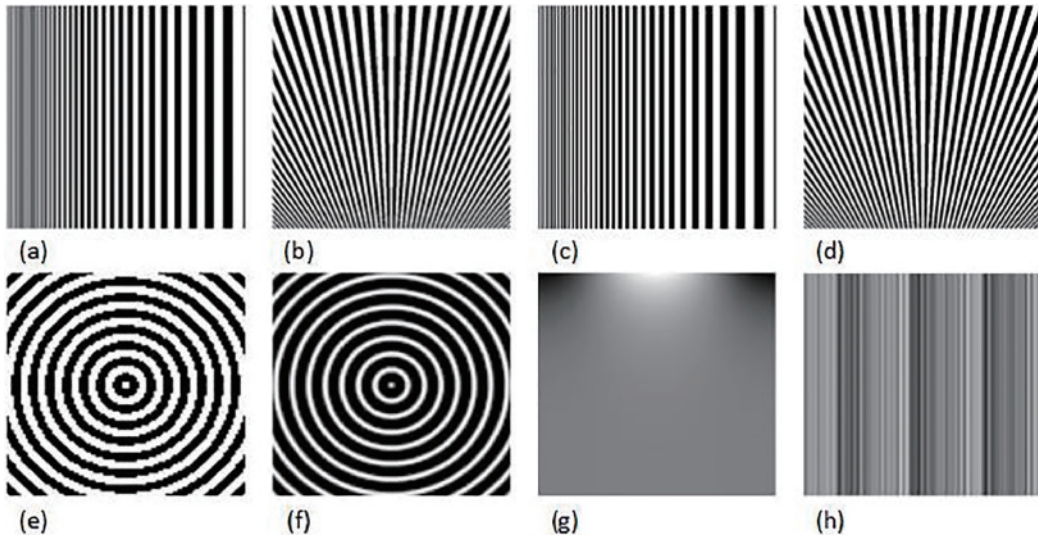


图 43 检测光栅及相位图^[194]

Fig. 43 Measurement grating and phase diagram^[194]

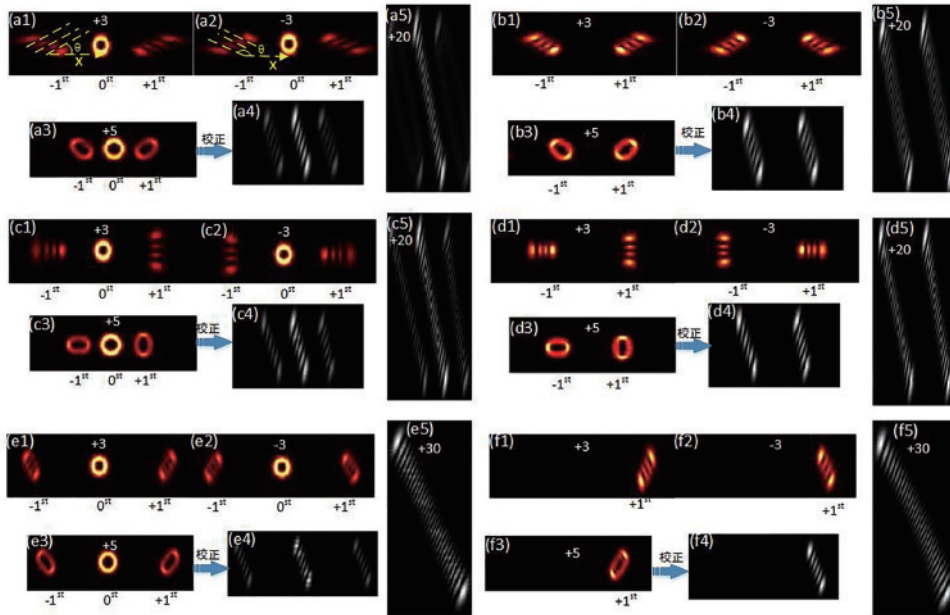


图 44 周期渐变光栅和环形光栅检测结果。(a1)~(a5) a 型周期渐变振幅光栅;(b1)~(b5) a 型周期渐变相位光栅;(c1)~(c5) b 型周期渐变振幅光栅;(d1)~(d5) b 型周期渐变相位光栅;(e1)~(e5) 环形振幅光栅;(f1)~(f5) 环形相位光栅^[194]

Fig. 44 Measurement results of periodic gradually-change grating and annular grating. (a1)~(a5) A-type periodic gradually-change amplitude grating; (b1)~(b5) a-type periodic gradually-change phase grating; (c1)~(c5) b-type periodic gradually-change amplitude grating; (d1)~(d5) b-type periodic gradually-change phase grating; (e1)~(e5) annular amplitude grating; (f1)~(f5) annular phase grating^[194]

系统。

6.4.2 涡旋光束 OAM 信息交换

OAM 复用通信系统中将不同数据流交换到不同 OAM 模式上,对不同 OAM 光束进行拓扑荷转换可以增加通信链路中数据管理和处理的灵活性,实现基于 OAM 的可重构光网络。

图 51^[196]是 OAM 光束信息交换原理示意图,通过在 SLM 上加载螺旋相位图,来使 OAM 模式即信息发生交换。图 52^[196]是在不同载波频率下不同 OAM 光束信息交换的实验结果,可以明显看出不同频率的信

号波形发生了对换,两束 OAM 光束信息发生了交换。

6.4.3 涡旋光束 OAM 经过马卡天线发射效率分析

马卡天线拥有较低的球面像差、色差及长焦距等优点,可以提高天线系统分辨率,广泛应用于卫星遥感和激光雷达系统中。这里提出利用螺旋分布的环形涡旋光束为光源可以提高马卡天线发射效率。图 53^[186]为 LG 光束通过马卡天线系统的示意图,入射光束首先打到次反射镜上,再反射到主反射镜上,最后透过弯月校正镜实现 LG 光束发射。

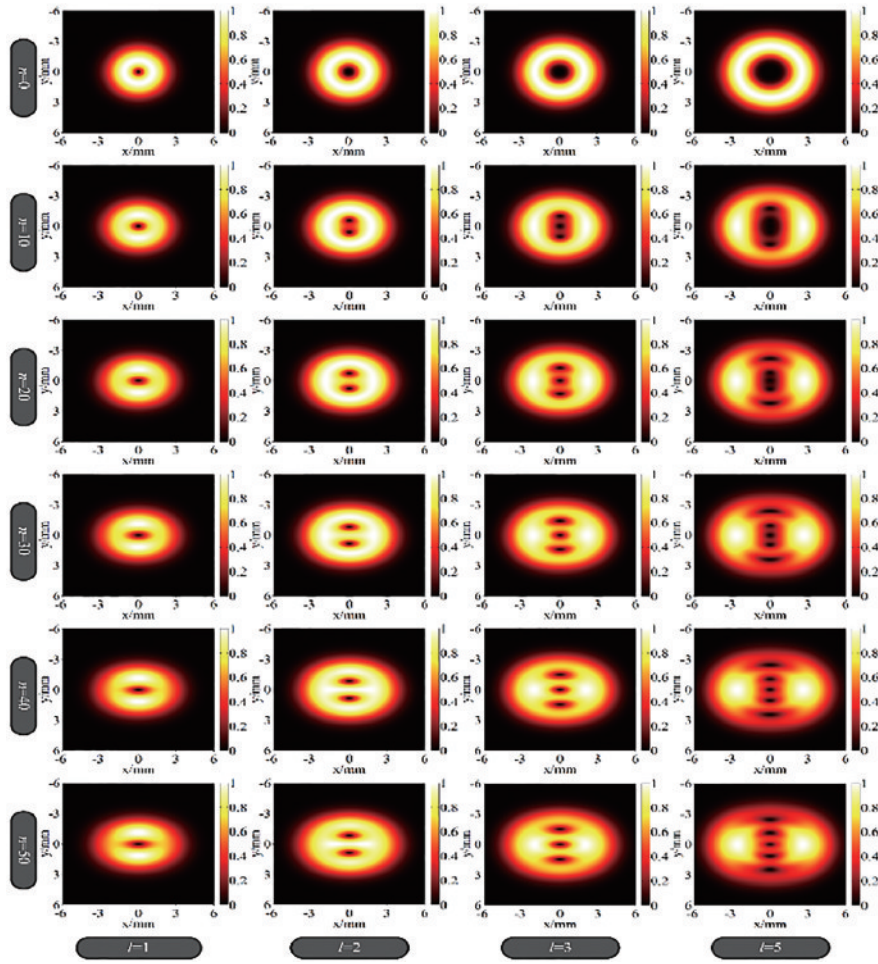


图 45 不同拓扑荷数和阶数时 LGSMV 光束相位奇点演变^[186]

Fig. 45 Phase singularity evolution of LGSMV beam with different topological charges and orders^[186]

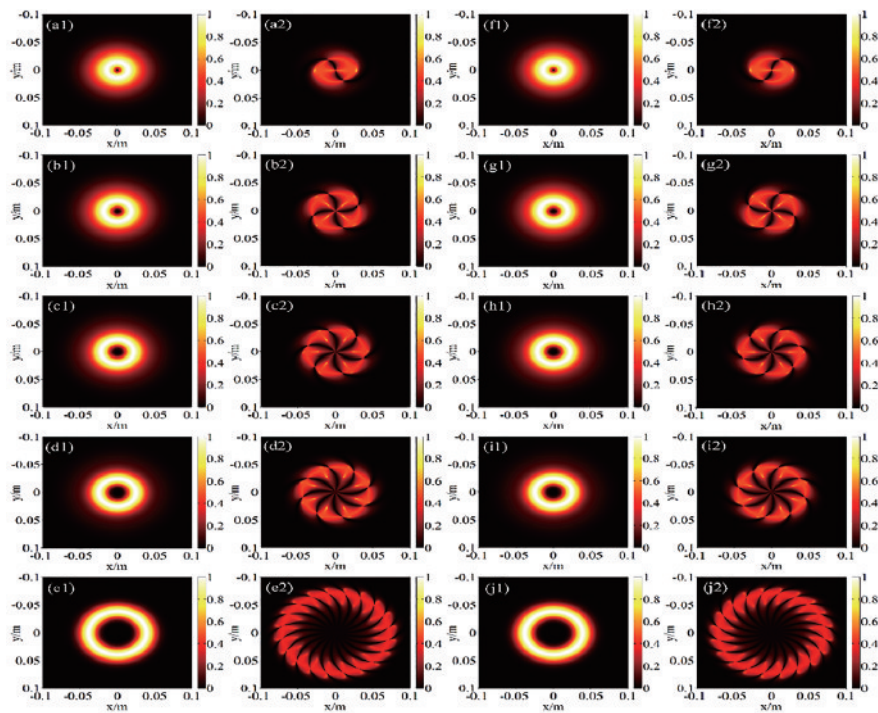


图 46 不同拓扑荷数 EGSMV 光束的远场衍射图^[186]

Fig. 46 Far-field diffraction patterns of EGSMV beams with different topological charges^[186]

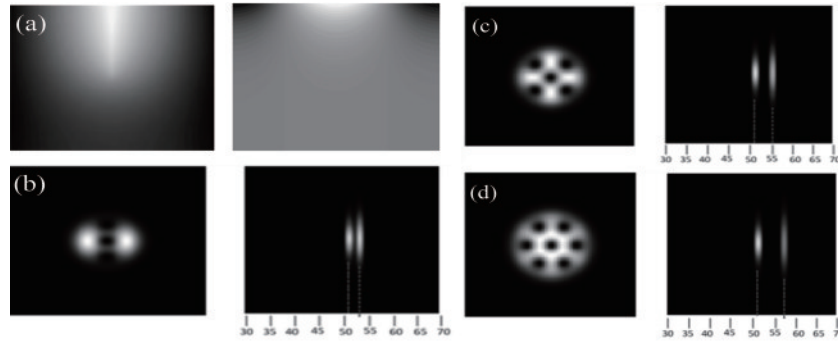


图 47 不同拓扑荷数叠加光场及坐标转换后的光场。(a)坐标转换相位掩模;(b) $l=1, 3$;(c) $l=1, 5$;(d) $l=1, 7$ ^[179]

Fig. 47 Light field superimposed by different topological charges and light field after coordinate transformation. (a) Phase mask of coordinate transformation; (b) $l=1, 3$; (c) $l=1, 5$; (d) $l=1, 7$ ^[179]

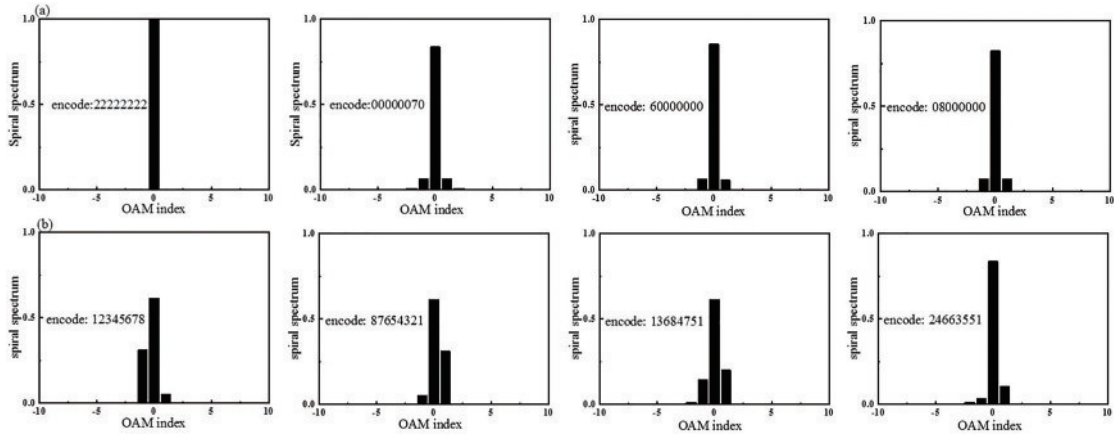


图 48 八台阶 QSS 相位编码。(a)对称螺旋谱;(b)非对称螺旋谱^[195]

Fig. 48 Eight-step QSS phase coding. (a) Symmetric spiral spectrum; (b) asymmetric spiral spectrum^[195]

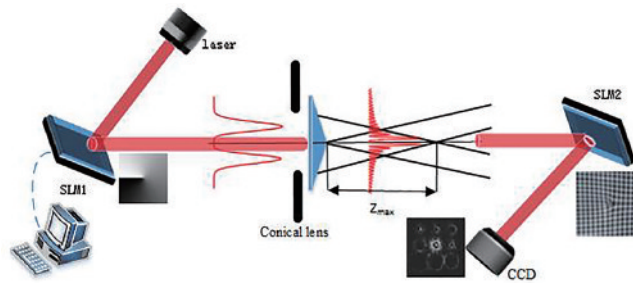


图 49 高阶 Bessel 无衍射光束编解码系统^[195]

Fig. 49 High-order Bessel beam encoding and decoding system without diffraction^[195]

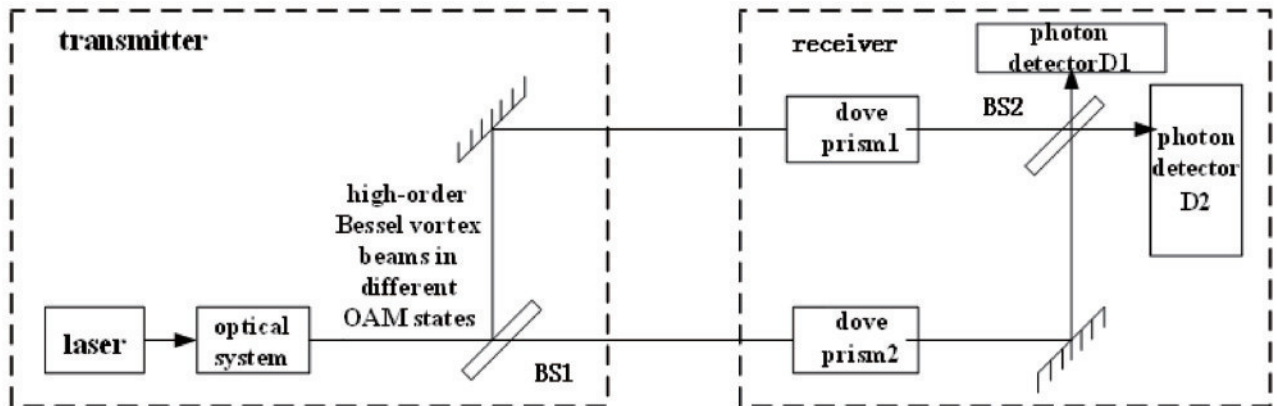


图 50 Bessel 光束 OAM 的光量子编解码系统^[195]

Fig. 50 Optical quantum encoding and decoding system of OAM of Bessel beam^[195]

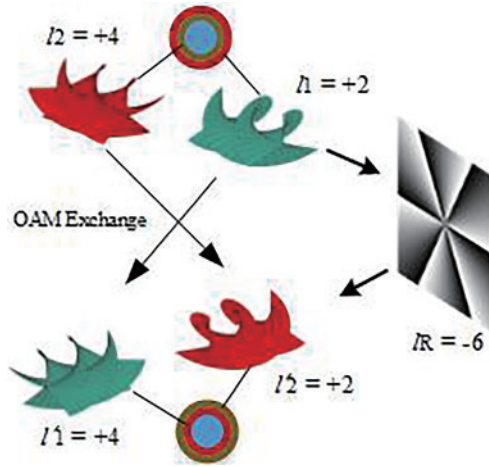


图 51 OAM 光束信息交换原理^[196]

Fig. 51 Principle of OAM beam information transfer^[196]



(a) $l_1 = +2, l_2 = +6$

(b) $l_1 = +2, l_2 = +8$

图 52 OAM 光束信息交换实验结果。(a) $l_1 = 2$ 与 $l_2 = 6$ 发生交换；(b) $l_1 = 2$ 与 $l_2 = 8$ 发生交换^[196]

Fig. 52 Experimental results of OAM beam information transfer. (a) $l_1 = 2$ is swapped with $l_2 = 6$; (b) $l_1 = 2$ is swapped with $l_2 = 8$ ^[196]

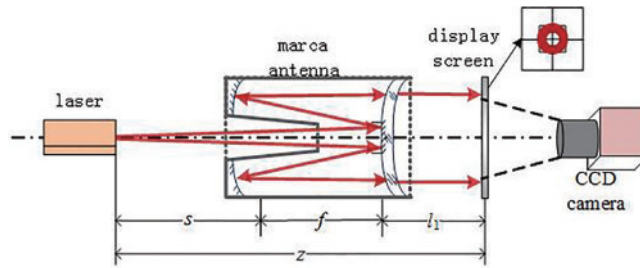


图 53 LG 光束通过马卡天线离轴发射示意图^[186]

Fig. 53 Schematic diagram of off-axis emission of LG beam through Marca antenna^[186]

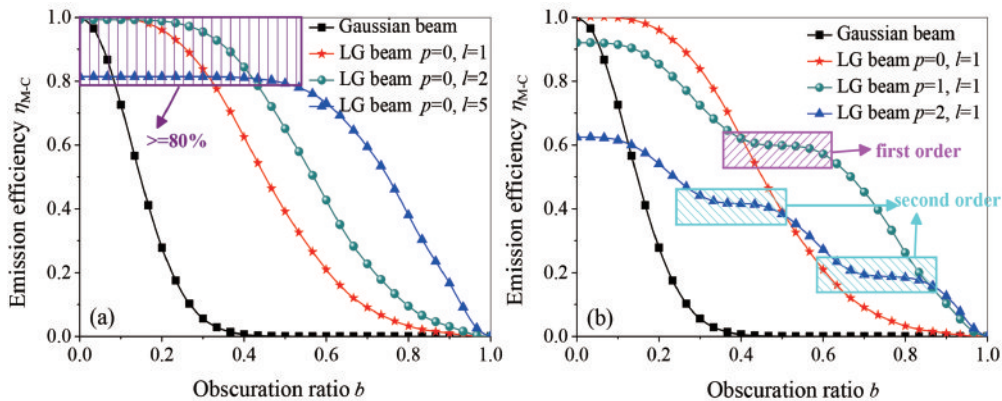


图 54 LG 光束通过马卡天线系统的发射效率曲线。(a) 不同拓扑荷数；(b) 不同径向指数^[186]

Fig. 54 Emission efficiency curve of LG beam through Marca antenna system. (a) Different topological charges; (b) different radial indices^[186]

图 54(a)、(b)^[186]分别为在不同拓扑荷数和径向指数下马卡天线发射效率随遮拦比的变化曲线,在一定遮拦比下,涡旋光束的发射效率远大于高斯光束,而且拓扑荷数越大,马卡天线发射效率越大,在较宽遮拦比范围可达 80% 以上。

7 结束语

随着携带 OAM 的结构光场的深入研究,传统的调控参数:振幅、相位、频率、和偏振态已不能满足需求,OAM 的出现提供了一种新型空域维度资源,为光通信的发展开拓了新思路。一方面,概述了 OAM 相关技术的国内外发展状况,总结对比了优缺点;另一方面,介绍了西安理工大学的相关研究工作,包括 OAM 复用通信系统中的单模、多模 OAM 光束产生、部分相干、矢量 OAM 光束传输特性、串扰分析、波前校正、光栅光阑检测、基于坐标转换法的分离检测以及实际应用等。随着全球通信一体化的到来,建立基于 6G 技术的陆海空天微通信网络,及其跨场景的万物互联智能光通信,是未来通信发展的大势所趋。今后无线光通信系统中的 OAM 相关技术可以向以下几个方面努力:

1) 生成新的 OAM 阵列光束,并研究其传输特性,以提高发射端光束的能量,从而提升无线光通信系统发射效率。

2) 将光 OAM 的几何坐标转换朝着紧凑型和小型化发展,并与改进后迭代算法相结合,以提高在接收端分离后光斑的分辨率和效率。

3) 将 MIMO 均衡技术和信道编码技术与 OAM 技术相结合,进一步减轻湍流效应对光束的影响。

4) 建立多层相位衍射光神经网络,来实现集 OAM 光束的产生、复用、解复用、检测于一体的装置,并加入迭代算法和误差函数进行优化和评价,这样可更快推进 OAM 技术在无线光通信中的集成化应用。

参 考 文 献

- [1] 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.
- [2] Bozinovic N, Yue Y, Ren Y X, et al. Terabit-scale orbital angular momentum mode division multiplexing in fibers[J]. *Science*, 2013, 340(6140): 1545-1548.
- [3] Paterson L, MacDonald M P, Arlt J, et al. Controlled rotation of optically trapped microscopic particles[J]. *Science*, 2001, 292(5518): 912-914.
- [4] Ruffato G, Massari M, Romanato F. Multiplication and division of the orbital angular momentum of light with diffractive transformation optics[J]. *Light: Science & Applications*, 2019, 8: 113.
- [5] Leach J, Jack B, Romero J, et al. Quantum correlations in optical angle-orbital angular momentum variables[J]. *Science*, 2010, 329(5992): 662-665.
- [6] 柯熙政, 邓莉君. 无线光通信[M]. 北京: 科学出版社, 2016: 10-13.
Ke X Z, Deng L J. *Wireless communication*[M]. Beijing: Science Press, 2016: 10-13.
- [7] 柯熙政, 吴加丽, 杨尚君. 面向无线光通信的大气湍流研究进展与展望[J]. *电波科学学报*, 2021, 36(3): 323-339.
Ke X Z, Wu J L, Yang S J. Research progress and prospect of atmospheric turbulence for wireless optical communication[J]. *Chinese Journal of Radio Science*, 2021, 36(3): 323-339.
- [8] 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.
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.
- [9] Barnett S M, Allen L. Orbital angular momentum and nonparaxial light beams[J]. *Optics Communications*, 1994, 110(5/6): 670-678.
- [10] Couillet P, Rocca G F. Optical vortices[J]. *Optics Communications*, 1989, 73(5): 403-408.
- [11] 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.
- [12] 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.
- [13] 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.
- [14] Li Y M, Kim J, Escuti M. Orbital angular momentum generation and mode transformation with high efficiency using forked polarization gratings[J]. *Applied Optics*, 2012, 51(34): 8236-8245.
- [15] Vijayakumar A, Rosales-Guzmán C, Rai M R, et al. Generation of structured light by multilevel orbital angular momentum holograms[J]. *Optics Express*, 2019, 27(5): 6459-6470.
- [16] 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.
- [17] Shvedov V G, Izdebskaya Y V, Alekseev A N, et al. The formation of optical vortices in the course of light diffraction on a dielectric wedge[J]. *Technical Physics Letters*, 2002, 28(3): 256-259.
- [18] Forbes A, Dudley A, McLaren M. Creation and detection of optical modes with spatial light modulators [J]. *Advances in Optics and Photonics*, 2016, 8(2): 200-227.
- [19] Saitoh K, Hasegawa Y, Tanaka N, et al. Production of electron vortex beams carrying large orbital angular momentum using spiral zone plates[J]. *Journal of*

- Electron Microscopy, 2012, 61(3): 171-177.
- [20] Hu X B, Rosales-Guzmán C. Generation and characterization of complex vector modes with digital micromirror devices: a tutorial[J]. *Journal of Optics*, 2022, 24(3): 034001.
- [21] Liu R, Li F, Padgett M J, et al. Generalized photon sieves: fine control of complex fields with simple pinhole arrays[J]. *Optica*, 2015, 2(12): 1028-1036.
- [22] 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.
- [23] Dorrah A H, Rubin N A, Tamagnone M, et al. Structuring total angular momentum of light along the propagation direction with polarization-controlled meta-optics[J]. *Nature Communications*, 2021, 12: 6249.
- [24] 吴文兵, 圣宗强, 吴宏伟. 平板式螺旋相位板的设计与应用[J]. *物理学报*, 2019, 68(5): 054102.
Wu W B, Sheng Z Q, Wu H W. Design and application of flat spiral phase[J]. *Acta Physica Sinica*, 2019, 68(5): 054102.
- [25] Brunet C, Vaity P, Messaddeq Y, et al. Design, fabrication and validation of an OAM fiber supporting 36 states[J]. *Optics Express*, 2014, 22(21): 26117-26127.
- [26] Pidishety S, Pachava S, Gregg P, et al. Orbital angular momentum beam excitation using an all-fiber weakly fused mode selective coupler[J]. *Optics Letters*, 2017, 42(21): 4347-4350.
- [27] Hassan M M, Kabir M A, Hossain M N, et al. Numerical analysis of circular core shaped photonic crystal fiber for orbital angular momentum with efficient transmission[J]. *Applied Physics B*, 2020, 126(9): 145.
- [28] Israk M F, Razzak M A, Ahmed K, et al. Ring-based coil structure photonic crystal fiber for transmission of orbital angular momentum with large bandwidth: outline, investigation and analysis[J]. *Optics Communications*, 2020, 473: 126003.
- [29] Cognée K G, Doeleman H M, Lalanne P, et al. Generation of pure OAM beams with a single state of polarization by antenna-decorated microdisk resonators[J]. *ACS Photonics*, 2020, 7(11): 3049-3060.
- [30] Butt M A, Khonina S N, Kazanskiy N L. Device performance of standard strip, slot and hybrid plasmonic μ -ring resonator: a comparative study[J]. *Waves in Random and Complex Media*, 2021, 31(6): 2397-2406.
- [31] Pyragaite V, Stabinis A. Interference of intersecting singular beams[J]. *Optics Communications*, 2003, 220(4/5/6): 247-255.
- [32] Galvez E J, Smiley N, Fernandes N. Composite optical vortices formed by collinear Laguerre-Gauss beams[J]. *Proceedings of SPIE*, 2006, 6131: 613105.
- [33] Baumann S M, Kalb D M, MacMillan L H, et al. Propagation dynamics of optical vortices due to Gouy phase[J]. *Optics Express*, 2009, 17(12): 9818-9827.
- [34] 杨德兴, 王浩, 何东升, 等. 环形与平面光学涡旋共线叠加的复合涡旋[J]. *光子学报*, 2009, 38(7): 1683-1686.
Yang D X, Wang H, He D S, et al. Complex vortices formed by coaxial superposition of circular and planar vortices[J]. *Acta Photonica Sinica*, 2009, 38(7): 1683-1686.
- [35] Ando T, Matsumoto N, Ohtake Y, et al. Structure of optical singularities in coaxial superpositions of Laguerre-Gaussian modes[J]. *Journal of the Optical Society of America A*, 2010, 27(12): 2602-2612.
- [36] 方桂娟, 孙顺红, 蒲继雄. 分数阶双涡旋光束的实验研究[J]. *物理学报*, 2012, 61(6): 064210.
Fang G J, Sun S H, Pu J X. Experimental study on fractional double-vortex beams[J]. *Acta Physica Sinica*, 2012, 61(6): 064210.
- [37] 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.
- [38] Huang S J, Miao Z, He C, et al. Composite vortex beams by coaxial superposition of Laguerre-Gaussian beams[J]. *Optics and Lasers in Engineering*, 2016, 78: 132-139.
- [39] Szatkowski M, Masajada J, Augustyniak I, et al. Generation of composite vortex beams by independent Spatial Light Modulator pixel addressing[J]. *Optics Communications*, 2020, 463: 125341.
- [40] Kumar N, Arora A, Krishnan A. Single-shot generation of composite optical vortex beams using hybrid binary fork gratings[J]. *Optics Express*, 2021, 29(21): 33703-33715.
- [41] Kotlyar V V, Kovalev A A, Savelyeva A A. Topological charge of a superposition of identical parallel single-ringed Laguerre-Gaussian beams[J]. *Computer Optics*, 2022, 46(2): 184-188.
- [42] 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.
- [43] Bisson J F, Senatsky Y, Ueda K I. Generation of Laguerre-Gaussian modes in Nd:YAG laser using diffractive optical pumping[J]. *Laser Physics Letters*, 2005, 2(7): 327-333.
- [44] Omatsu T, Miyamoto K, Lee A J. Wavelength-versatile optical vortex lasers[J]. *Journal of Optics*, 2017, 19(12): 123002.
- [45] Ito A, Kozawa Y, Sato S. Generation of hollow scalar and vector beams using a spot-defect mirror[J]. *Journal of the Optical Society of America A*, 2010, 27(9): 2072-2077.
- [46] Kano K, Kozawa Y, Sato S. Generation of a purely single transverse mode vortex beam from a He-Ne laser cavity with a spot-defect mirror[J]. *International Journal of Optics*, 2012, 2012: 359141.
- [47] Okida M, Omatsu T, Itoh M, et al. Direct generation of high power Laguerre-Gaussian output from a diode-pumped Nd:YVO₄ 1.3- μ m bounce laser[J]. *Optics Express*, 2007, 15(12): 7616-7622.
- [48] Thomas G M, Minassian A, Sheng X, et al. Diode-pumped Alexandrite lasers in Q-switched and cavity-dumped Q-switched operation[J]. *Optics Express*, 2016,

- 24(24): 27212-27224.
- [49] Forbes A. Controlling light's helicity at the source: orbital angular momentum states from lasers[J]. *Philosophical Transactions. Series A, Mathematical, Physical, and Engineering Sciences*, 2017, 375(2087): 20150436.
- [50] Veinhard M, Bellanger S, Daniault L, et al. Orbital angular momentum beams generation from 61 channels coherent beam combining femtosecond digital laser[J]. *Optics Letters*, 2020, 46(1): 25-28.
- [51] Guo C S, Liu X, Ren X Y, et al. Optimal annular computer-generated holograms for the generation of optical vortices[J]. *Journal of the Optical Society of America A Optics Image Science & Vision*, 2005, 22(2): 385-390.
- [52] Mirhosseini M, Loaiza O S M, Chen C, et al. Rapid generation of light beams carrying orbital angular momentum[J]. *Optics Express*, 2013, 21(25): 30196-30203.
- [53] Gerchberg R.W, Saxton W D. A practical algorithm for the determination of the phase from image and diffraction plane pictures[J]. *Optik*, 1972, 35: 237 - 246.
- [54] Hsu W.F, Lin S C. Iterative pixelwise approach applied to computer-generated holograms and diffractive optical elements[J]. *Applied Optics*, 2018, 57(1): A189-A196.
- [55] Cai X L, Wang J W, Strain M J, et al. Integrated compact optical vortex beam emitters[J]. *Science*, 2012, 338(6105): 363-366.
- [56] ITU-R. P. On propagation data and prediction methods required for the design of space-to-earth and earth-to-space optical communication systems[C]//Radio Communication Study Group Meeting Budapest. 2001.
- [57] Paterson C. Atmospheric turbulence and orbital angular momentum of single photons for optical communication [J]. *Physical Review Letters*, 2005, 94(15): 153901.
- [58] 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.
- [59] Gbur G, Tyson R K. Vortex beam propagation through atmospheric turbulence and topological charge conservation [J]. *Journal of the Optical Society of America A*, 2008, 25(1): 225-230.
- [60] 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.
- [61] Wang T, Pu J X, Chen Z Y. Beam-spreading and topological charge of vortex beams propagating in a turbulent atmosphere[J]. *Optics Communications*, 2009, 282(7): 1255-1259.
- [62] Liu X H, Pu J X. Investigation on the scintillation reduction of elliptical vortex beams propagating in atmospheric turbulence[J]. *Optics Express*, 2011, 19(27): 26444-26450.
- [63] 丁攀峰, 蒲继雄. 离轴拉盖尔-高斯涡旋光束传输中的光斑演变[J]. *物理学报*, 2012, 61(6): 064103.
Ding P F, Pu J X. Change of the off-center Laguerre-Gaussian vortex beam while propagation[J]. *Acta Physica Sinica*, 2012, 61(6): 064103.
- [64] Lukin V P, Konyaev P A, Sennikov V A. Beam spreading of vortex beams propagating in turbulent atmosphere[J]. *Applied Optics*, 2012, 51(10): C84-C87.
- [65] Aksenov V P, Kolosov V V, Pogutsa C E. The influence of the vortex phase on the random wandering of a Laguerre-Gaussian beam propagating in a turbulent atmosphere: a numerical experiment[J]. *Journal of Optics*, 2013, 15(4): 044007.
- [66] Banakh V A, Falits A V. Turbulent broadening of Laguerre-Gaussian beam in the atmosphere[J]. *Optics and Spectroscopy*, 2014, 117(6): 942-948.
- [67] 葛筱璐, 王本义, 国承山. 涡旋光束在湍流大气中的光束扩展[J]. *光学学报*, 2016, 36(3): 0301002.
Ge X L, Wang B Y, Guo C S. Beam broadening of vortex beams propagating in turbulent atmosphere[J]. *Acta Optica Sinica*, 2016, 36(3): 0301002.
- [68] Filimonov G A, Aksenov V P, Kolosov V V, et al. Fluctuations of the orbital angular momentum of vortex laser beam in turbulent atmosphere: dependence on turbulence strength and beam parameters[J]. *Proceedings of SPIE*, 2016, 10035: 100352F.
- [69] Porfirev A P, Kirilenko M S, Khonina S N, et al. Study of propagation of vortex beams in aerosol optical medium [J]. *Applied Optics*, 2017, 56(11): E8-E15.
- [70] Tian Q H, Zhu L, Wang Y J, et al. The propagation properties of a longitudinal orbital angular momentum multiplexing system in atmospheric turbulence[J]. *IEEE Photonics Journal*, 2018, 10(1): 7900416.
- [71] 骆传凯, 卢芳, 苗志芳, 等. 径向阵列涡旋光束在大气中的传输与扩展[J]. *光学学报*, 2019, 39(6): 0601004.
Luo C K, Lu F, Miao Z F, et al. Propagation and spreading of radial vortex beam array in atmosphere[J]. *Acta Optica Sinica*, 2019, 39(6): 0601004.
- [72] 闫家伟, 雍康乐, 唐善发, 等. 大气中超高斯和高斯涡旋光束传输特性比较 [J]. *光学学报*, 2020, 40(2): 0201002.
Yan J W, Yong K L, Tang S F, et al. Comparison of propagation characteristics between super Gaussian and Gaussian vortex beams in air[J]. *Acta Optica Sinica*, 2020, 40(2): 0201002.
- [73] Lazrek M, Hricha Z, Belafhal A. Propagation properties of vortex cosine-hyperbolic-Gaussian beams through oceanic turbulence[J]. *Optical and Quantum Electronics*, 2022, 54(3): 172.
- [74] Wang F, Cai Y J, Korotkova O. Partially coherent standard and elegant Laguerre-Gaussian beams of all orders[J]. *Optics Express*, 2009, 17(25): 22366-22379.
- [75] Zhang Y T, Liu L, Wang F, et al. Average intensity and spectral shifts of a partially coherent standard or elegant Laguerre-Gaussian beam beyond paraxial approximation[J]. *Optical and Quantum Electronics*, 2014, 46(2): 365-379.
- [76] Zhong Y L, Cui Z F, Shi J P, et al. Propagation properties of partially coherent Laguerre-Gaussian beams in turbulent atmosphere[J]. *Optics & Laser Technology*, 2011, 43(4): 741-747.

- [77] Tang M M, Zhao D M. Propagation of multi-Gaussian Schell-model vortex beams in isotropic random media[J]. *Optics Express*, 2015, 23(25): 32766-32776.
- [78] Wang X Y, Yao M W, Yi X, et al. Spreading and evolution behavior of coherent vortices of multi-Gaussian Schell-model vortex beams propagating through non-Kolmogorov turbulence[J]. *Optics & Laser Technology*, 2017, 87: 99-107.
- [79] Stahl C S D, Gbur G. Twisted vortex Gaussian Schell-model beams[J]. *Journal of the Optical Society of America A*, 2018, 35(11): 1899-1906.
- [80] Hyde IV M W. Twisted spatiotemporal optical vortex random fields[J]. *IEEE Photonics Journal*, 2021, 13(2): 1-16.
- [81] Hricha Z, Halba E M E, Lazrek M, et al. Focusing properties and focal shift of partially coherent vortex cosine-hyperbolic-Gaussian beams[J]. *Journal of Modern Optics*, 2022, 69(14): 779-790.
- [82] Cheng W, Haus J W, Zhan Q W. Propagation of vector vortex beams through a turbulent atmosphere[J]. *Optics Express*, 2009, 17(20): 17829-17836.
- [83] Martinez-Herrero R, Prado F. Overall characterization of the polarization structure of radially polarized partially coherent vortex beams[J]. *Proceedings of SPIE*, 2013, 8785: 8785AB.
- [84] Ou J, Jiang Y S, He Y T. Intensity and polarization properties of elliptically polarized vortex beams in turbulent atmosphere[J]. *Optics & Laser Technology*, 2015, 67: 1-7.
- [85] Cheng K, Zhou Y, Lu G, et al. Vectorial structures of linear-polarized Butterfly-Gauss vortex beams in the far zone[J]. *Optics Communications*, 2018, 415: 107-114.
- [86] Guo L N, Chen Y H, Liu X L, et al. Vortex phase-induced changes of the statistical properties of a partially coherent radially polarized beam[J]. *Optics Express*, 2016, 24(13): 13714-13728.
- [87] Eyyuboğlu H T. Scintillation behaviour of vortex beams in strong turbulence region[J]. *Journal of Modern Optics*, 2016, 63(21): 2374-2381.
- [88] Tang M M, Zhao D M, Li X Z, et al. Propagation of radially polarized multi-cosine Gaussian Schell-model beams in non-Kolmogorov turbulence[J]. *Optics Communications*, 2018, 407: 392-397.
- [89] Joshi S, Khan S N, Manisha, et al. Coherence-induced polarization effects in vector vortex beams[J]. *Optics Letters*, 2020, 45(17): 4815-4818.
- [90] Joshi S, Khan S N, Senthilkumaran P, et al. Statistical properties of partially coherent polarization singular vector beams[J]. *Physical Review A*, 2021, 103(5): 053502.
- [91] Manisha, Joshi S, Khan S N, et al. Investigation of partially coherent vector vortex beams with non-isotropic states of spatial correlation[J]. *Optics Express*, 2022, 30(18): 32230-32243.
- [92] Arora G, Stuti J, Hanuman S, et al. Perturbation of V-point polarization singular vector beams[J]. *Optics & Laser Technology*, 2023, 158: 108842.
- [93] Starikov F A, Kochemasov G G, Koltiygin M O, et al. Correction of vortex laser beam in a closed-loop adaptive system with bimorph mirror[J]. *Optics Letters*, 2009, 34(15): 2264-2266.
- [94] Garanin S G, Manachinsky A N, Starikov F A, et al. Phase correction of laser radiation with the use of adaptive optical systems at the Russian Federal Nuclear Center: institute of experimental physics[J]. *Optoelectronics, Instrumentation and Data Processing*, 2012, 48(2): 134-140.
- [95] Zhao S M, Leach J, Gong L Y, et al. Aberration corrections for free-space optical communications in atmosphere turbulence using orbital angular momentum states[J]. *Optics Express*, 2012, 20(1): 452-461.
- [96] Jesacher A, Schwaighofer A, Fürhapter S, et al. Wavefront correction of spatial light modulators using an optical vortex image[J]. *Optics Express*, 2007, 15(9): 5801-5808.
- [97] Baránek M, Běhal J, Bouchal Z. Optimal spiral phase modulation in Gerchberg-Saxton algorithm for wavefront reconstruction and correction[J]. *Proceedings of SPIE*, 2018, 10612: 106120B.
- [98] 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.
- [99] 徐梓浩. 基于相位差法的高分辨率液晶自适应光学技术研究[D]. 长春: 中国科学院长春光学精密机械与物理研究所, 2018.
Xu Z H. Research on high-resolution liquid crystal adaptive optics technique with phase diversity[D]. Changchun: Changchun Institute of Optics, Fine Mechanics and Physics, Chinese Academy of Sciences, 2018.
- [100] Zhai Y W, Fu S Y, Zhang J Q, et al. Turbulence aberration correction for vector vortex beams using deep neural networks on experimental data[J]. *Optics Express*, 2020, 28(5): 7515-7527.
- [101] Zhan H C, Wang L, Wang W N, et al. Experimental analysis of adaptive optics correction methods on the beam carrying orbital angular momentum mode through oceanic turbulence[J]. *Optik*, 2021, 240: 166990.
- [102] 吴冉, 陈君, 傅钢坤. 多模高阶涡旋光的光束漂移实验研究[J]. *光学学报*, 2022, 42(4): 0426001.
Wu R, Chen J, Fu G K. Experimental study of multi-mode high-order vortex beam wander[J]. *Acta Optica Sinica*, 2022, 42(4): 0426001.
- [103] Jiang Y S, Wang S H, Zhang J H, et al. Spiral spectrum of Laguerre-Gaussian beam propagation in non-Kolmogorov turbulence[J]. *Optics Communications*, 2013, 303(16): 38-41.
- [104] Zhang L P, Deng D M, Chen X Y, et al. Propagation of a radially polarized partially coherent rotating elliptical cosine-Gaussian beam with vortices in anisotropic turbulence[J]. *Applied Physics B*, 2019, 125(5): 79-90.
- [105] Liu D, Wang Y, Wang G, et al. Intensity properties of flat-topped vortex hollow beams propagating in

- atmospheric turbulence[J]. *Optik - International Journal for Light and Electron Optics*, 2016, 127(20):9386-9393.
- [106] Xu Y, Tian H, Feng H, et al. Propagation factors of standard and elegant Laguerre-Gaussian beams in non-Kolmogorov turbulence[J]. *Optik*, 2016, 127(22): 10999-11008.
- [107] Hricha Z, Lazrek M, Yaalou M, et al. Propagation of vortex cosine-hyperbolic-Gaussian beams in atmospheric turbulence[J]. *Optical and Quantum Electronics*, 2021, 53(7):1-15.
- [108] 李晋红, 吕百达. 部分相干涡旋光束通过大气湍流上行和下行传输的比较研究[J]. *物理学报*, 2011, 60(7): 074205.
Li J H, Lü B D. Comparative study of partially coherent vortex beam propagations through atmospheric turbulence along a uplink path and a downlink path[J]. *Acta Physica Sinica*, 2011, 60(7): 074205.
- [109] Wang D, Wang F, Cai Y, et al. Evolution properties of the complex degree of coherence of a partially coherent Laguerre-Gaussian beams in turbulent atmosphere[J]. *Journal of Modern Optics*, 2012, 59(4): 372-380.
- [110] 胡俊涛, 马海祥, 李新忠, 等. 同心矢量完美涡旋模式的特性[J]. *光学学报*, 2019, 39(1): 0126015.
Hu J T, Ma H X, Li X Z, et al. Characteristics of concentric vectorial perfect vortex mode[J]. *Acta Optica Sinica*, 2019, 39(1): 0126015.
- [111] 王明军, 张佳琳, 王主玉, 等. 水下悬浮球形藻类粒子群对拉盖尔-高斯涡旋光束的散射[J]. *光学学报*, 2022, 42(18): 1829001.
Wang M J, Zhang J L, Wang Z Y, et al. Scattering of Laguerre-Gaussian vortex beams by underwater suspended spherical algal particle swarms[J]. *Acta Optica Sinica*, 2022, 42(18): 1829001.
- [112] Chen Y, Wang F, Zhao C, et al. Experimental demonstration of a Laguerre-Gaussian correlated Schell-model vortex beam[J]. *Optics Express*, 2014, 22(5): 5826-5838
- [113] Zhang Y, Liu L, Zhao C, et al. Multi-Gaussian Schell-model vortex beam[J]. *Physics Letters A*, 2014, 378(9): 750-754.
- [114] 马圣杰, 郝士琦, 赵青松. 基于改进型 SPGD 算法的涡旋光波前畸变校正[J]. *光学学报*, 2021, 41(6): 0601001.
Ma S J, H S Q, Zhao Q S. Wavefront distortion correction of vortex beam based on improved SPGD algorithm[J]. *Acta Optica Sinica*, 2021, 41(6): 0601001.
- [115] 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(25): 257901.
- [116] Vasnetsov M V, Torres J P, Petrov D V, et al. Observation of the orbital angular momentum spectrum of a light beam[J]. *Optics Letters*, 2003, 28(23): 2285-2287.
- [117] Ghai D P, Senthilkumaran P, Sirohi R S. Single-slit diffraction of an optical beam with phase singularity[J]. *Optics and Lasers in Engineering*, 2009, 47(1): 123-126.
- [118] Silva J G, Jesus-Silva A J, Alencar M A R C, et al. Unveiling Square and triangular optical lattices: a comparative study[J]. *Optics Letters*, 2014, 39(4): 949-952.
- [119] Emile O, Emile J. Young's double-slit interference pattern from a twisted beam[J]. *Applied Physics B*, 2014, 117(1): 487-491.
- [120] Zhou H L, Shi L, Zhang X L, et al. Dynamic interferometry measurement of orbital angular momentum of light[J]. *Optics Letters*, 2014, 39(20): 6058-6061.
- [121] Fu S Y, Wang T L, Zhang S K, et al. Integrating 5×5 Dammann gratings to detect orbital angular momentum states of beams with the range of -24 to +24[J]. *Applied Optics*, 2016, 55(7): 1514-1517.
- [122] Li Y J, Deng J, Li J P, et al. Sensitive orbital angular momentum (OAM) monitoring by using gradually changing-period phase grating in OAM-multiplexing optical communication systems[J]. *IEEE Photonics Journal*, 2016, 8(2): 7902306.
- [123] Taira Y, Zhang S K. Split in phase singularities of an optical vortex by off-axis diffraction through a simple circular aperture[J]. *Optics Letters*, 2017, 42(7): 1373-1376.
- [124] Acevedo C, Moreno Y T, Guzmán Á, et al. Far-field diffraction pattern of an optical light beam with orbital angular momentum through of a rectangular and pentagonal aperture[J]. *Optik*, 2018, 164: 479-487.
- [125] Li Y X, Han Y P, Cui Z W. Measuring the topological charge of vortex beams with gradually changing-period spiral spoke grating[J]. *IEEE Photonics Technology Letters*, 2020, 32(2): 101-104.
- [126] Kotlyar V V, Kovalev A A, Porfirev A P. Astigmatic transforms of an optical vortex for measurement of its topological charge[J]. *Applied Optics*, 2017, 56(14): 4095-4104.
- [127] Chen J, Chen X, Li T, et al. On-chip detection of orbital angular momentum beam by plasmonic nanogratings[J]. *Laser & Photonics Reviews*, 2018, 12(8): 1700331.
- [128] 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.
- [129] Giordani T, Suprano A, Polino E, et al. Machine learning-based classification of vector vortex beams[J]. *Physical Review Letters*, 2020, 124(16): 160401.
- [130] Rasouli S, Fathollahzade S, Amiri P. Simple, efficient and reliable characterization of Laguerre-Gaussian beams with non-zero radial indices in diffraction from an amplitude parabolic-line linear grating[J]. *Optics Express*, 2021, 29(19): 29661-29675.
- [131] Jiang X H, Wang A T, Yao J N, et al. Measuring high-order multiple vortex beams with fork-shaped grating[J]. *Optik*, 2022, 257: 168742.
- [132] 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.
- [133] 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.
- [134] Ruffato G, Massari M, Parisi G, et al. Test of mode-division multiplexing and demultiplexing in free-space with diffractive transformation optics[J]. *Optics Express*, 2017, 25(7): 7859-7869.
- [135] Ruffato G, Massari M, Romanato F. Compact sorting of optical vortices by means of diffractive transformation optics[J]. *Optics Letters*, 2017, 42(3): 551-554.
- [136] Li C, Zhao S M. Efficient separating orbital angular momentum mode with radial varying phase[J]. *Photonics Research*, 2017, 5(4): 267-270.
- [137] 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.
- [138] Ruffato G, Massari M, Girardi M, et al. Non-paraxial design and fabrication of a compact OAM sorter in the telecom infrared[J]. *Optics Express*, 2019, 27(17): 24123-24134.
- [139] Fontaine N K, Ryf R, Chen H S, et al. Laguerre-Gaussian mode sorter[J]. *Nature Communications*, 2019, 10(1): 1-7.
- [140] He L, Lin Z Z, Wen Y H, et al. An inverse design method combining particle swarm optimization and wavefront matching method for multiplane light conversion[C]//*Frontiers in Optics/Laser Science 2020*, September 14-17, 2020, Washington, DC. Washington, D.C.: Optica Publishing Group, 2020: FM7D.5.
- [141] Huang Z B, Wang P P, Liu J M, et al. All-optical signal processing of vortex beams with diffractive deep neural networks[J]. *Physical Review Applied*, 2021, 15(1): 014037.
- [142] 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.
- [143] Fu S Y, Wang T L, Gao Y, et al. Diagnostics of the topological charge of optical vortex by a phase-diffractive element[J]. *Chinese Optics Letters*, 2016, 14(8): 080501.
- [144] Zheng S, Wang J. Measuring orbital angular momentum (OAM) states of vortex beams with annular gratings[J]. *Scientific Reports*, 2017, 7: 40781.
- [145] 柯熙政, 王姣. 涡旋光束的产生、传输、检测及应用[M]. 北京: 科学出版社, 2018: 10-13.
Ke X Z, Wang J. Generation, transmission, detection and application of vortex beam[M]. Beijing: Science Press, 2018: 10-13.
- [146] 柯熙政, 李亚星. 分数阶拉盖尔高斯光束轨道角动量的实验研究[J]. *激光与光电子学进展*, 2015, 52(8): 080501.
Ke X Z, Li Y X. Experimental study on fractional Laguerre Gaussian beam with orbital angular momentum [J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2015, 52(8): 080501.
- [147] 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): 1106004.
Ke X Z, Ge T. Experiment on generation of vortex light with few-mode fiber[J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2017, 44(11): 1106004.
- [148] 柯熙政, 陈云, 张颖. 高阶轨道角动量模场传输光纤的设计研究[J]. *激光与光电子学进展*, 2019, 56(2): 020601.
Ke X Z, Chen Y, Zhang Y. Design and analysis of a transmission fiber with high-order orbital angular momentum mode[J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2019, 56(2): 020601.
- [149] Ke X Z, Wang S S. Design of photonic crystal fiber capable of carrying multiple orbital angular momentum modes transmission[J]. *Optics and Photonics Journal*, 2020, 10(04): 49-63.
- [150] 柯熙政, 胥俊宇. 涡旋光束轨道角动量干涉及检测的研究[J]. *中国激光*, 2016, 43(9): 0905003.
Ke X Z, Xu J Y. Interference and detection of vortex beams with orbital angular momentum[J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2016, 43(9): 0905003.
- [151] 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): 0417007.
Ke X Z, Xue P. Generation of orbital angular momentum superpositions and its test[J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2018, 47(4): 0417007.
- [152] 柯熙政, 石欣雨. 高阶径向拉盖尔-高斯光束叠加态的实验研究[J]. *红外与激光工程*, 2018, 47(12): 1207002.
Ke X Z, Shi X Y. Experimental study on the superposition of high-order radial Laguerre-Gaussian beams[J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2018, 47(12): 1207002.
- [153] Ke X Z, Zhao J. Analysis on characteristic of Laguerre-Gaussian beams with topological charges of arithmetic progression[J]. *Optik*, 2019, 183: 302-310.
- [154] Ke X Z, Zhang L. Study on orthogonal superposition generation method of double-ring vortex beams[J]. *The European Physical Journal D*, 2020, 74(3): 1-6.
- [155] 吕宏, 柯熙政. 具有轨道角动量光束入射下的单球粒子散射研究[J]. *物理学报*, 2009, 58(12): 8302-8308.
Lü H, Ke X Z. Scattering of a beam with orbital angular momentum by a single sphere[J]. *Acta Physica Sinica*, 2009, 58(12): 8302-8308.
- [156] 吕宏, 柯熙政. 具轨道角动量光束用于光通信编码及解码研究[J]. *光学学报*, 2009, 29(2): 331-335.
Lu H, Ke X Z. Research on the beam with orbital angular momentum used in encoding and decoding of optical communication[J]. *Acta Optica Sinica*, 2009, 29(2): 331-335.
- [157] 柯熙政, 卢宁, 杨秦岭. 单光子轨道角动量的传输特性研究[J]. *物理学报*, 2010, 59(9): 6159-6163.
Ke X Z, Lu N, Yang Q L. Research of transmission characteristics of single-photon orbital angular momentum [J]. *Acta Physica Sinica*, 2010, 59(9): 6159-6163.
- [158] 吕宏, 柯熙政. 光阑对暗中空涡旋光束轨道角动量的影响[J]. *中国科学: 物理学 力学 天文学*, 2011, 41(8): 932-941.
Lü H, Ke X Z. Effects of aperture on the orbital angular momentum of hollow vortex beam[J]. *Scientia Sinica: Physica, Mechanica & Astronomica*, 2011, 41(8): 932-941.
- [159] 李铁, 谌娟, 柯熙政, 等. 大气信道中单光子轨道角动

- 量纠缠特性的研究[J]. 物理学报, 2012, 61(12): 124208.
- Li T, Chen J, Ke X Z, et al. Study of orbital angular momentum entangled photons entanglement in atmospheric channel[J]. Acta Physica Sinica, 2012, 61(12): 124208.
- [160] 谌娟, 柯熙政, 王铁成. 轨道角动量纠缠光子对联合探测概率的研究[J]. 量子电子学报, 2013, 30(4): 430-438.
- Chen J, Ke X Z, Wang T C. Joint detection probability of orbital angular momentum entangled photon pairs[J]. Chinese Journal of Quantum Electronics, 2013, 30(4): 430-438.
- [161] 柯熙政, 谌娟, 杨一明. 在大气湍流斜程传输中拉盖高斯光束的轨道角动量的研究[J]. 物理学报, 2014, 63(15): 150301.
- 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.
- [162] 柯熙政, 郭新龙. 用光束轨道角动量实现相位信息编码[J]. 量子电子学报, 2015, 32(1): 69-76.
- Ke X Z, Guo X L. Realization of optical phase information encode by using orbital angular momentum of light beam[J]. Chinese Journal of Quantum Electronics, 2015, 32(1): 69-76.
- [163] 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.
- 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.
- [164] Ke X Z, Wang J, Wang M J, et al. Diffraction characteristics of a Laguerre-Gaussian beam through a Maksutov-Cassegrain optical system[J]. Applied Optics, 2018, 57(10): 2570-2576.
- [165] Wang J, Ke X Z, Wang M J. Evolution of phase singularities of Laguerre-Gaussian Schell-model vortex beam[J]. Journal of Optics, 2020, 22(11): 115602.
- [166] Ke X Z, Chen S T. Reconfigurable orbital angular momentum exchange assisted by dual-area mirror[J]. Optical Engineering, 2020, 59(11): 116104.
- [167] Ke X Z, Li J. Using MCMA-MUK algorithm to suppress crosstalk in orbital angular momentum multiplexing communication system[J]. Optical Review, 2021, 28(4): 331-341.
- [168] 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.
- 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.
- [169] 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.
- [170] 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): 0328018.
- Ke X Z, Wang X Y. Experimental study on the correction of wavefront distortion for vortex beam[J]. Acta Optica Sinica, 2018, 38(3): 0328018.
- [171] Ke X Z, Cui N M. Experimental research on phase diversity method for correcting vortex beam distortion wavefront[J]. Applied Physics B, 2020, 126(4): 66.
- [172] Wang J, Wang M J, Ke X Z, et al. Direct determination of Laguerre-Gauss vortex beams' topological charges by aperture diffraction pattern[C]//2018 Progress in Electromagnetics Research Symposium (PIERS-Toyama), August 1-4, 2018, Toyama, Japan. New York: IEEE Press, 2018: 2155-2159.
- [173] 葛甜. 利用光纤产生涡旋光束的理论及实验研究[D]. 西安: 西安理工大学, 2018.
- Ge T. Theoretical and experimental research on the use of optical fiber to generate vortex beam[D]. Xi'an: Xi'an University of Technology, 2018.
- [174] 陈云. 高阶轨道角动量模场传输光纤的设计研究[D]. 西安: 西安理工大学, 2019.
- Chen Y. Design and research of transmission fiber with high order orbital angular momentum mode[D]. Xi'an: Xi'an University of Technology, 2019.
- [175] 王沙沙. 生成多种轨道角动量模式光纤的设计研究[D]. 西安: 西安理工大学, 2020.
- Wang S S. Research and design of the fiber for generating multiple orbital angular momentum modes[D]. Xi'an: Xi'an University of Technology, 2020.
- [176] Tian W, Zhang H, Zhang X G. A circular photonic crystal fiber supporting 26 OAM modes[J]. Optical Fiber Technology, 2016, 30: 184-189.
- [177] Bai X L, Chen H M, Ma Y Y, et al. Circular-lattice photonic crystal fiber with square air holes supporting 58 OAM modes[C]//2017 Progress in Electromagnetics Research Symposium-Spring (PIERS), May 22-25, 2017, St. Petersburg, Russia. New York: IEEE Press, 2017: 3105-3108.
- [178] 李亚星. 涡旋光束及其轨道角动量传输特性的实验研究[D]. 西安: 西安理工大学, 2016.
- Li Y X. Experimental study on angular momentum transmission characteristics of rotating beam and its orbit[D]. Xi'an: Xi'an University of Technology, 2016.
- [179] 胥俊宇. OAM光的产生与控制关键技术研究[D]. 西安: 西安理工大学, 2017.
- Xu J Y. The experimental study of important technologies of OAM beam generation and control[D]. Xi'an: Xi'an University of Technology, 2017.
- [180] 薛璞. 涡旋光束轨道角动量的分离与检测[D]. 西安: 西安理工大学, 2017.
- Xue P. Separation and detection of orbital angular momentum of vortex beam[D]. Xi'an: Xi'an University of Technology, 2017.
- [181] 张蕾. 多环涡旋光束的产生及其传输特性的研究[D]. 西安: 西安理工大学, 2020.
- Zhang L. Study on the generation and transmission characteristics of multi-ring vortex beams[D]. Xi'an: Xi'an University of Technology, 2020.
- [182] 赵杰. 多个拉盖尔-高斯光束叠加的光场分布特征[D]. 西安: 西安理工大学, 2019.

- Zhao J. Distribution characteristics of light field by superposition of multiple Laguerre-Gauss beams[D]. Xi'an: Xi'an University of Technology, 2019.
- [183] 石欣雨. 拉盖尔-高斯光束叠加态的特性研究[D]. 西安: 西安理工大学, 2018.
- Shi X Y. The characteristics of the superposition of Laguerre-Gaussian beams[D]. Xi'an: Xi'an University of Technology, 2018.
- [184] 王超珍. 部分相干涡旋光束在大气湍流中的光强分布研究[D]. 西安: 西安理工大学, 2017.
- Wang C Z. The intensity distribution of partially coherent vortex beam propagation in the atmosphere[D]. Xi'an: Xi'an University of Technology, 2017.
- [185] 宁川. 轨道角动量复用及其在大气湍流下的串扰分析[D]. 西安: 西安理工大学, 2018.
- Ning C. Orbital angular momentum multiplexing and crosstalk analysis under atmospheric turbulence[D]. Xi'an: Xi'an University of Technology, 2018.
- [186] 王姣. 大气湍流中部分相干涡旋光束的传输及衍射特性研究[D]. 西安: 西安理工大学, 2020.
- Wang J. Propagation and diffraction properties of partially coherent vortex beams in atmospheric turbulence[D]. Xi'an: Xi'an University of Technology, 2020.
- [187] 王铁成. 量子通信中光子轨道角动量纠缠的研究[D]. 西安: 西安理工大学, 2012.
- Wang T C. Study on angular momentum entanglement of photon orbit in quantum communication[D]. Xi'an: Xi'an University of Technology, 2012.
- [188] 杨一明. 光子的轨道角动量纠缠特性的研究[D]. 西安: 西安理工大学, 2014.
- Yang Y M. Study on entanglement characteristics of orbital angular momentum of photons[D]. Xi'an: Xi'an University of Technology, 2014.
- [189] 杨秦岭. 基于轨道角动量光(子)束的无线激光通信[D]. 西安: 西安理工大学, 2010.
- Yang Q L. The wireless laser communications for beam (photon) based on orbital angular momentum[D]. Xi'an: Xi'an University of Technology, 2010.
- [190] 李瑾. 大气湍流信道下 OAM-MIMO 系统的串扰抑制研究[D]. 西安: 西安理工大学, 2021.
- Li J. Research on crosstalk suppression of OAM-MIMO system in atmospheric turbulence channel[D]. Xi'an: Xi'an University of Technology, 2021.
- [191] 王夏尧. 涡旋光束的自适应光学校正技术研究[D]. 西安: 西安理工大学, 2018.
- Wang X Y. Research on adaptive optics correction technique of vortex beams[D]. Xi'an: Xi'an University of Technology, 2018.
- [192] 崔娜梅. 相位差法校正涡旋光束波前畸变的实验研究[D]. 西安: 西安理工大学, 2020.
- Cui N M. Experimental research on correcting wavefront distortion of vortex beam by phase diversity method[D]. Xi'an: Xi'an University of Technology, 2020.
- [193] 吕宏. 涡旋光场轨道角动量用于空间光量子通信研究[D]. 西安: 西安理工大学, 2011.
- Lü H. Study on the application of orbital angular momentum of vortex field in space optical quantum communication[D]. Xi'an: Xi'an University of Technology, 2011.
- [194] 谢炎辰. 涡旋光束轨道角动量检测技术研究[D]. 西安: 西安理工大学, 2019.
- Xie Y C. Research on measurement technology of orbital angular momentum of vortex beam[D]. Xi'an: Xi'an University of Technology, 2019.
- [195] 郭新龙. 光束轨道角动量编码和传输特性的研究[D]. 西安: 西安理工大学, 2015.
- Guo X L. Study on angular momentum coding and transmission characteristics of beam orbit[D]. Xi'an: Xi'an University of Technology, 2015.
- [196] 陈生涛. 涡旋光束信息交换及信道重构研究[D]. 西安: 西安理工大学, 2021.
- Chen S T. Research on vortex beam information exchange and channel reconstruction[D]. Xi'an: Xi'an University of Technology, 2021.