

OAM 光通信系统能量利用效率研究

周红平, 潘珍珍, 郭 凯, 雷 艺, 郭忠义

(合肥工业大学计算机与信息学院, 安徽合肥 230009)

摘 要: 涡旋光是一种携带轨道角动量(Oribital Angular Momentum, OAM)的特殊光束,由于携带不同 OAM 的涡旋光之间相互正交,并且 OAM 无限取值的特性,使得其可为光通信系统提供一个新的物理维度,因此吸引了国内外众多学者的关注.随着 OAM 光通信技术的研究深化,各类 OAM 通信系统得到了飞速发展,但通信系统中的能量利用效率问题却较少受到关注.本文聚焦近期典型成果中的 OAM 光束的产生、检测以及整体通信系统的能量利用效率,对之进行概括,并对未来 OAM 光通信系统的能量利用效率的发展趋势及前景进行分析与展望.

关键词: 轨道角动量; 通信维度; 光通信; 通信系统; 能量利用效率

中图分类号: TN929.12 **文献标识码:** A **文章编号:** 0372-2112(2021)10-1881-12

电子学报 URL: <http://www.ejournal.org.cn>

DOI: 10.12263/DZXB.20210231

Research on the Energy-Utilization Efficiency of OAM Based Optical Communication Systems

ZHOU Hong-ping, PAN Zhen-zhen, GUO Kai, LEI Yi, GUO Zhong-yi

(School of Computer and Information, Hefei University of Technology, Hefei, Anhui 230009, China)

Abstract: Optical vortex beam is a special beam that carries orbital angular momentum (OAM). Optical vortex beams with different OAMs are orthogonal to each other, and it's numbers are infinite in theory, which can provide a new communication dimension for the optical communication systems. Therefore, it has attracted great attentions of worldwide scholars. With the in-depth investigations of OAM based optical communication technology, various OAM communication systems have been developed rapidly, but people seldom pay attention to the topic of energy-utilization efficiency in OAM based communication systems. This paper focuses on and summarizes energy-utilization efficiencies of OAM's generation, detection, and the energy-utilization efficiency of whole communication systems in recent typical achievements. And the development trends and prospects for the energy-utilization efficiency of the future systems have been analyzed and prospect-ed.

Key words: orbital angular momentum (OAM); communication dimension; optical communication; communication systems; energy-utilization efficiency

1 引言

近年来,随着当代信息产业的飞速发展,人们对高速率、大容量的通信技术需求与日俱增,但通信带宽已逐渐到达瓶颈.因此,发掘更多的通信维度资源已成为发展大容量通信技术的必然趋势.在传统光通信领域,目前常利用波分复用、时分复用及偏分复用等多维度复用技术来提高光通信系统的通信容量^[1-3].然而,现有维度资源的开发利用几乎已经达到极限,因此光通信容量危机是目前亟需研究解决的问题.近些年,利用

光波空间域的维度资源成为解决通信容量危机的新思路.其中,OAM 光束凭借其在空间域上的独特分布(OAM 态的无限取值特性及不同 OAM 态之间相互正交特性)^[4-9],在扩充信道容量方面具有很好的应用前景,因此吸引着越来越多的研究学者投入其中,同时也使该技术成为解决当今容量危机的新型方案.

自 1992 年被 Allen 等人^[10]证实以后,携带 OAM 的涡旋波束被广泛应用于光学^[4-7,11-20]、声学^[8,21-24]、电磁学^[9,25-31]及力学^[32-35]等众多领域.这种涡旋光束的相位波前用相位因子 $\exp(il\phi)$ 表示,其中 ϕ 被称为方位角, l

被称为 OAM 模式数,也被称为涡旋的拓扑荷,理论上可取任意值,并且每个光子携带 $\hbar l$ 的 OAM, \hbar 为约化普朗克常数. 由于 OAM 模式在理论上可取任意值,且携带不同 OAM 模式的涡旋光束相互正交,因此不同的 OAM 光束可在同一个信道中复用,并应用于自由空间光通信领域以增加信息的传输容量.

随着 OAM 光束在光通信领域研究的不断深入,目前有两种主要的 OAM 通信机制在自由空间光通信领域得到了广泛应用,分别是 OAM 键控(OAM-Shift Keying, OAM-SK)^[36-42]和 OAM 信道复用(OAM-Division Multiplexing, OAM-DM)^[43-52]. 对于目前提出的各种通信系统,为证明其有效性和高效性,大部分文章仅从所提系统的容量及误码率方面来讨论系统的性能,而系统中的能量利用效率问题却鲜少提及. 通信系统中的光源能量往往是有限的,当光信号在通信系统中传播时,系统中的各类器件通常都将对光源能量造成一定的衰减,因此在系统接收端接收到的光信号只占发送信号能量的一部分. 光通信系统的能量利用效率问题,关乎整个通信系统的实际应用效果,但目前大部分关于涡旋光束通信系统的性能研究,大都关注于 OAM 通信系统本身的物理特性,鲜有关注 OAM 光通信器件及系统的能量利用效率问题.

本文聚焦 OAM 通信系统的能量利用效率问题,详细阐述了 OAM 通信系统中关于 OAM 光束产生、检测及传输过程中各类器件的能量利用效率方面的研究成果,并对其进行了总结,最后对于未来 OAM 通信系统中的能量利用效率的发展前景进行了展望.

2 OAM 生成器件能量利用效率分析

在 OAM 光通信系统中,OAM 光束的产生是光通信系统最为关键的一部分. OAM 光束的产生方案一般利用诸如螺旋相位板^[53-56]、空间光调制器(spatial light modulator, SLM)^[57,58]、数字微透镜^[59]、超材料^[60-64]等光学转换器件,将高斯光束转换成 OAM 光束. 产生 OAM 光束的光学器件往往对入射光的能量有着一定要求,导致从光源到生成 OAM 光束过程中的能量利用效率问题显得十分突出.

2.1 基于螺旋相位板的能量利用效率分析

对于 OAM 光束的产生,其中最简单的一种方法就是将光束直接通过一块螺旋相位板,一般情况下其厚度随方位角的增加而变化. 当入射的高斯光束正面通过螺旋相位板时,由于在各个方位角处相位板的厚度不同,因此所经历的光程也是不同的,造成光束各方位角上的相位延迟,从而产生螺旋相位分布的波前. 1996 年,Turnbull 等人利用螺旋相位板将厄米高斯光束转换成拉盖尔高斯(Laguerre Gauss, LG)光束^[53],其实验装

置图及结果图如图 1 所示,实验结果证明,该方法可以将入射光束的大部分能量转换成拉盖尔高斯模式,但由于加工尺寸有限导致相位板中心缺陷,且光束与相位板可能存在轻微错位,因此利用该种方案产生 OAM 光束会导致产生涡旋光的能量分布不够均匀.

随着制作工艺的进步,2014 年,Ruffato 等人利用电子束光刻技术在聚甲基丙烯酸甲酯上制备了用于产生 LG 光束的螺旋相位板^[65],同时对该光学元件的转换效率进行了讨论. 实验证实,当生成 OAM 模式 $l=+1, p=0$ 的 LG 光束时,高斯光束的大部分能量转移到生成的 OAM 模式中,其能量转换效率可达到 93%. 对于螺旋相位板转换效率的影响,除了制作工艺上的缺陷,其输入光束和输出光束之间的束腰比也会影响螺旋相位板的转换效率,2017 年,Longman 等人对其进行了研究^[66]. 当光束束腰比设置成最佳值时,其转换效率可略高于 93%,而其余能量会转移到其他高阶径向模式,从而造成螺旋相位元件转换效率的降低.

螺旋相位板是目前 OAM 光束生成方案中最直接、高效的一种方案. 由于螺旋相位板的制作对精度要求极高,为了实现不同波长的折射率匹配,其对精度的要求需达到纳米级,这样可大大降低实验误差对入射光束的能量损耗,从而提高能量利用效率. 但是极高的精度要求提高了制作成本,且产生的 OAM 模式单一,因此利用该方案产生 OAM 光束受到了限制.

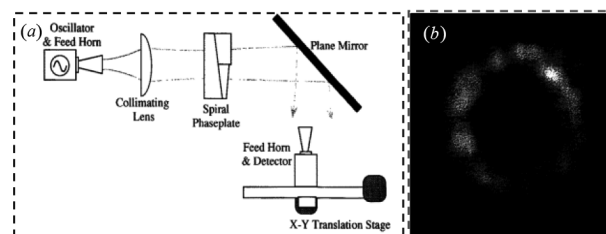


图1 (a)基于螺旋相位板的实验装置图^[53]; (b)生成的 OAM 模式为 $l=2$ 的拉盖尔高斯光束^[53]

2.2 基于模式转换的能量利用效率分析

模式转换也是较早提出的一种产生 OAM 光束的方案,其通过利用象散光学系统可以完成厄米高斯光束和 LG 光束之间的转换. 1993 年,Beijersbergen 等人提出了一种由两个柱面透镜构成的模式转换器^[67]. 如图 2 所示,当两个柱面透镜相距 $\sqrt{2}f$ (f 为透镜焦距)时,入射光束通过这两个透镜,其相位可以完成 $\pi/2$ 的模式转换;当两个柱面透镜相距 $2f$ 时,入射光束的相位可以完成 π 的模式转换. 因此通过利用这种模式转换器可以实现厄米高斯光束到 LG 光束之间的转换.

由于组成模式转换器的柱面透镜是一种宏观无损的介质,因此利用模式转换器生成的 OAM 光束不仅纯度高,而且能量利用效率高. 但是由于该方案需要精确

的入射角,且组成的透镜系统极为复杂,因此该方案在实际中的应用受到了限制.

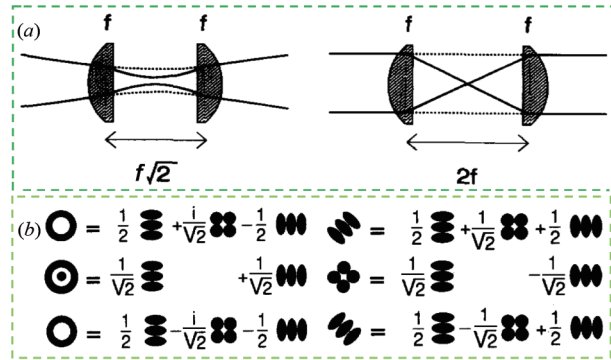


图 2 (a) $\pi/2$ 模式转换器及 π 模式转换器^[67]; (b) 2 阶厄米高斯模式和 LG 模式的分解^[67]

2.3 基于相位全息图的能量利用效率分析

利用相位全息图产生 OAM 光束是目前最常采用的方法之一, Curtis 等人于 2002 年首次提出利用 SLM 加载螺旋相位图来生成 OAM 光束^[68]. 该方案的装置图及生成涡旋光束的强度图如图 3(a) 所示, 高斯光束入射到一个加载了螺旋相位图的反射型 SLM 上, 在 532nm 的工作波长下, 该 SLM 在 0 到 2π 范围内提供 150 个相移, 通过调制输入光的相位可以在接收端得到 OAM 光束. 理论上该方法产生的 OAM 光束可以达到 80%~90% 的能效转换, 但由于其只是在空间上叠加了一个螺旋相位, 且受到 SLM 分辨率的影响, 此时生成的涡旋光束周围带有“旁瓣”, 生成的 OAM 光束截面也并非圆形, 且光强分布不均匀, 对入射光的能量利用效率远低于理想值.

为了得到更高的衍射效率, 2006 年, Lin 等人提出了一种利用纯相位单元产生多个 OAM 模式的迭代方案^[69]. 该方案利用傅里叶变换得到纯相位全息图与单一涡旋相位直接的关系, 通过自发交替幅值和相位的迭代优化算法成功生成了一个复合相位全息图, 该相位图及生成的复合涡旋光束如图 3(b) 所示. 受初始权重系数和迭代步长的影响, 该算法得到的复合涡旋仍与目标功率分布有一定的偏差, 其理论转换效率为 81.1%, 而实验衍射效率受现有衍射元件规格的限制, 实际转换效率更低, 因此通过提高优化迭代算法的性能来提高入射光的转换效率, 这对实际自由空间光通信系统非常重要.

为优化上述迭代算法的转换效率, 2015 年, Wang 等人在 Lin 算法的基础上提出了一种模式搜索辅助迭代算法^[70], 通过搜索一组优化的初始权重系数并将其应用在 Lin 算法上, 以此减少初始权重系数对 Lin 算法精度的影响, 生成的复合相位全息图及复合涡旋光束

的权重分布如图 3(c) 所示. 该方案不仅扩大了对 OAM 光束拓扑荷的利用, 而且具有较高的衍射效率, 其最高理论衍射效率可以大于 93%, 这为 OAM 光束在实际光通信中的应用打下了基础.

与之类似, 2017 年 Kai 等人同样对 Lin 算法进行了改进^[71], 通过改变步长来扩大 Lin 算法迭代过程中权重的选择范围, 同时对不同的步长使用 Lin 算法来进行迭代, 利用这种并行的算法来找出最优解. 该研究生成的复合相位全息图如图 3(d) 所示, 同时还给出了生成的复合涡旋的光强图及其权重分布. 该算法可以将绝大部分能量集中到目标拓扑荷上, 其最大能量利用效率能超过 96%, 有效避免了 OAM 光束在生成过程中造成的能量浪费.

利用相位全息图可以简单、快速地生成 OAM 光束, 因此该方法也是目前最常用的生成 OAM 光束的方法之一. 并且随着对 OAM 光束生成方法的进一步研究, 构建相位全息图的算法随之更新, 使得其在理论上的能量利用效率逐渐提高, 有效扩展了 OAM 光束在各个领域中的应用.

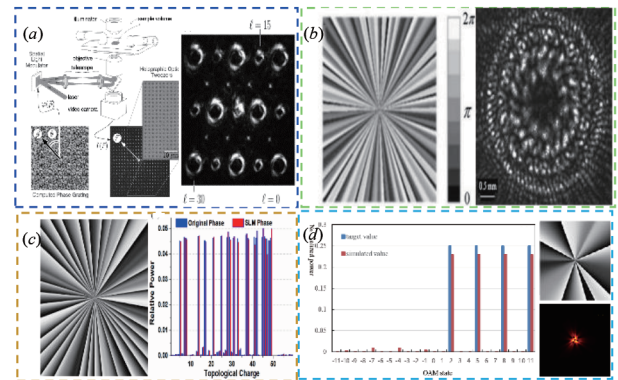


图 3 (a) 基于螺旋相位图的装置图及其生成涡旋光束的光强图^[68]; (b) 基于 Lin 算法的复合相位全息图及生成的复合涡旋光强图^[69]; (c) 基于改进的 Lin 算法的复合相位全息图及生成涡旋光束的权重分布^[70]; (d) 基于改进的 Lin 算法生成的复合涡旋光束及其对应的权重分布^[71]

2.4 基于全息光栅的能量利用效率分析

OAM 光束的产生还可以利用叉形光栅全息图来实现, 通过将涡旋光与平面波进行干涉可以得到叉形光栅全息图, 从而可以在不同衍射级上产生特定的 OAM 模式. 2004 年, Lee 等人提出了一种基于叉形光栅全息图的 OAM 光束生成方案^[72]. 当高斯光入射到加载了叉形光栅全息图的 SLM 上时, 光栅在不同衍射级产生了不同 OAM 模式的涡旋光束, 同时在光栅的作用下, 入射光的能量分布到不同的衍射级上, 但随着衍射级的增加, 生成的 OAM 光束的能量也随之降低. 上海大学 Shao 等人利用该方法生成 OAM 光束^[73], 并对其能量利

用效率进行了测试,叉形光栅及远场衍射图如图4(a)所示,通过实验证明,利用叉形光栅生成的OAM光束对入射光束的能量利用效率较低,主要能量集中在零阶衍射级上,在+1衍射级上的能量仅占入射能量的10%.因此,该方法产生的OAM光束很难在实际中被应用.

为了改变不同衍射级所占能量不同的缺点,研究人员采用了达曼光栅.通过将达曼光栅的相位突变点进行改变,就可以实现入射能量在各个衍射级的均匀分布.2010年,Zhang等人提出了一种5*5的二维达曼叉形光栅^[74],该光栅通过在特定的相位突变点设置透射率,可以实现不同衍射级能量的均匀分布,其总能量利用效率达到了77.4%.当高斯光通过达曼叉形光栅后,其达曼光栅及远场颜色结果如图4(b)所示,达曼光栅将高斯光转换成了OAM光束,且在高阶产生OAM光束的效率得到了提高.但是由于达曼叉形光栅在不同衍射级的OAM模式的大小被水平和垂直的错位数决定,因此限制了达曼叉形光栅在实际中的应用.

提高OAM光束生成方式的能量利用效率,还可通过抑制零阶衍射级上的能量来实现.2017年,Shao等人提出了一种基于闪耀光栅的OAM生成方案,同时还讨论了SLM对OAM光束生成效率的影响^[73].生成的闪耀光栅及远场衍射图样如图4(c)所示,闪耀光栅可以将光场中的大部分能量转移到+1阶衍射级上,有效提高了OAM光束的能量利用效率,同时通过实验证实了若需要产生能量效率高的OAM光束,则应该采用周期较大的光栅.此外,SLM的像素大小和分辨率也是影响系统性能重要的因素.

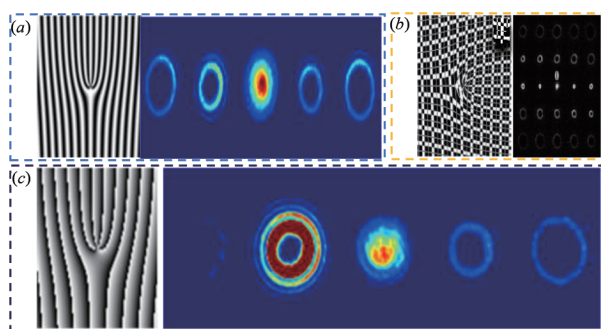


图4 (a)叉形光栅全息图及远场衍射图^[73]; (b)二维达曼叉形光栅及远场衍射图^[74]; (c)闪耀光栅及远场衍射图^[73]

目前,OAM光束的生成通常是利用光学器件将高斯光转换为OAM光束,此类方法实现简单、可控性强且实现方式多样,是实现OAM光通信系统极其重要的一部分.对于不同OAM模式生成方案的性能比较如表1所示,但是由于现有算法不能完全将能量集中到目标OAM模式上以及光学器件本身规格的限制,在OAM通信系统中实现OAM光束的高效生成仍是未来研究的重

中之重.

表1 不同OAM模式产生方案性能比较

	SPP	MC	PH	HG
Cost	Low	Low	Low	Low
Conversion Efficiency	High	High	Medium	Medium
Machining Precision	High	Low	High	High
System Complexity	Low	High	Low	Low

注:SPP(Spiral Phase Plate),螺旋相位板;MC(Mode Conversion),模式转换;PH(Phase hologram),相位全息图;HG(Holographic Grating),全息光栅;Cost,成本;Conversion Efficiency,转换效率;Machining Precision,加工精度;System Complexity,系统复杂度.

3 OAM检测器件能量利用效率分析

对于整个OAM光通信系统而言,在接收端对OAM模式进行有效的检测是保证通信质量的关键所在,到目前为止,已经发展出了许多测量OAM模式的方法.OAM通信系统的能量利用效率同样会受到检测方式的影响.如果OAM光束在接收端检测过程中,能量利用效率低下,能量不能集中到目标拓扑荷上,OAM模式将不能得到有效的利用,其通信质量也将得不到保障.

3.1 基于干涉仪的OAM检测系统能量利用效率分析

利用Mach-Zehnder干涉仪可以有效区分OAM模式,因此基于干涉仪法是OAM检测方案的常用方案之一.2002年,Leach等人提出了一种结合Mach-Zehnder干涉仪和Dove棱镜来区分不同OAM模式的方案^[75],其实验装置图如图5(a)所示,该方案在Mach-Zehnder干涉仪的两臂中插入两个Dove棱镜,通过控制两个棱镜间的夹角 α 造成两个干涉臂之间的相位差($\Delta\varphi=2l\alpha$),因而可以在不同输出端口处实现OAM模式的分离.该方案对于OAM模式的检测在理论上可以达到100%的效率,但由于该方案需要级联多个Mach-Zehnder干涉仪,因此对系统的精度要求极高,且装置中的部件效率也对系统整体效率造成了限制.

为了降低对系统精度的要求,2010年,Slussarenko等人提出了利用偏振Sagnac干涉仪结合单Dove棱镜来实现对OAM模式的检测^[76].实验装置图如图5(b)所示,该方案同样可以通过级联多个干涉仪来实现OAM模式的分离.由于Sagnac干涉仪具有比Mach-Zehnder干涉仪更高的稳定性,且易于校准,同时只采用了一个Dove棱镜,在理论上也具有100%的传输效率,因此该方法可以更高效、简便地实现OAM模式的检测.

为了进一步简化装置,降低实验复杂度,2019年,Cui等人利用改进的Fizeau干涉仪对OAM模式进行解调^[77].如图5(c)所示,该装置只需使用一个涂层平凹镜,当OAM光束通过时,在接收端会得到明显的干扰条

纹,即可以确定 OAM 模式的大小和符号. 该方案大大降低了系统复杂度,并且去除了其他光学元件对输入光束的能量损耗,但是器件本身折射、反射造成的能量损失无法避免.

基于干涉仪的 OAM 模式检测系统在理论上具有 100% 的效率,但由于 Dove 棱镜、偏振光分束器及棱镜会带来轻微的偏振变换,同时由于其他光学元件的散射、反射和吸收的影响,造成系统部分能量的损耗. 通过采用接近理想状态的光学器件可以降低这方面的损失,因此该方法在 OAM 模式检测方面具有较高的能量利用效率.

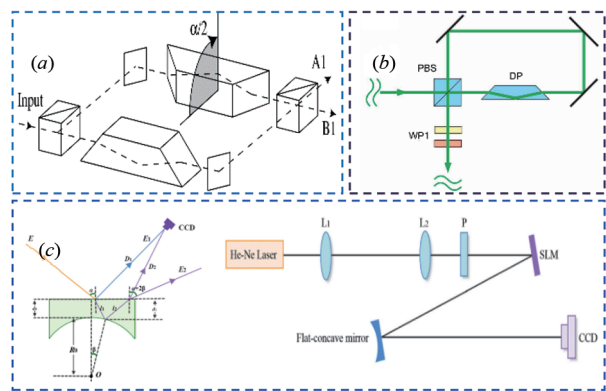


图 5 (a)两臂插入 Dove 棱镜的 Mach-Zehnder 干涉仪^[75]; (b)插入单 Dove 棱镜的偏振 Sagnac 干涉仪^[76]; (c)改进 Fizeau 干涉仪的原理图及实验装置图^[77]

3.2 基于光学几何变换的 OAM 检测系统能量利用效率分析

基于光学几何变换的方案也是 OAM 光束检测的常用方法之一,该方案由于其高效性受到了广泛关注. 2010 年, Berkhout 等人提出了一种利用两个光学元件对 OAM 模式进行有效分类的方案^[78], 两个光学元件可以完成 OAM 光束从笛卡尔坐标到极坐标下的梯度相位转变, 随后再经过一个透镜将每个输入的 OAM 模式聚焦到不同的横向位置上, 从而在横向位置实现了 OAM 模式的检测, 其结果图如图 6(a) 所示. 文章通过利用两个 SLM 来实现两个光学元件的作用, 但是两个 SLM 有着 70% 的能量损耗, 为降低入射光的能量损耗, 可以通过定制特定的相位元件来消除该损耗. 由于在通信系统中, 能量转换效率影响着信道传输的质量问题, 因此 2019 年, Minoofar 等人对基于几何变换的 OAM 模式分类器的能量转换效率进行了分析^[79]. 除了折射元件对入射光固有的折损外, 相邻的 OAM 模式间也存在着一一定的串扰, 随着使用的 OAM 模式间距离的逐渐增加, 其传输效率也随之增加, 最高可达到 96%.

由于 OAM 模式分类器难以克服相邻模式间的串扰, Feng 等人提出了一种将模式分类器与改进的 Mach-

Zehnder 干涉仪结合起来的方案^[80], 如图 6(b) 所示. 该方案在基于几何变换的模式分类器前放置一个能实现 OAM 模式奇偶分离的改进 Mach-Zehnder 干涉仪, 这样在分类器中检测的最小 OAM 模式间隔为 2, 因此很好地解决了模式分类器相邻 OAM 模式的串扰问题; 并且通过计算两输出端口的能量分布可知, 其能量利用效率可达 91%.

随着研究人员对基于光学几何变换的方法的进一步研究, 因光学器件和模式重叠造成的能量损耗逐渐被降低, 并且该方案具有检测精度高且串扰小的优点, 因此这类方案在 OAM 模式检测方面具有一定的潜力. 但是该方案对系统的精准度要求极高, 否则容易造成实验结果的误差, 从而影响整个检测系统的性能.

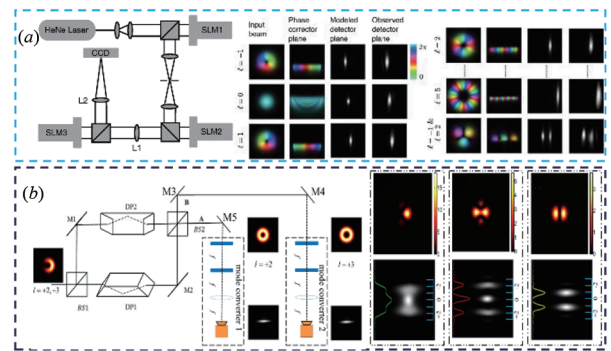


图 6 (a)基于光学几何变换的实验装置图^[78]; (b)基于模式分类器和改进的 Mach-Zehnder 干涉仪的高密度轨道角动量分析仪的原理图^[80]

3.3 基于计算全息图的 OAM 检测系统能量利用效率分析

以计算全息图为主的衍射元件不仅是产生 OAM 光束的常用方案, 同时也是 OAM 光通信系统中常见的检测方法之一. 其中, 叉形光栅可以在每个衍射级上生成特定的 OAM 光束, 但随着衍射级的增大, 生成的 OAM 光束能量将逐渐降低, 大部分能量都集中在第 0 阶衍射级, 能量利用效率低下. 2010 年, Zhang 等人利用实验实现了一维达曼叉形光栅对 OAM 模式的检测, 在期望衍射级上能量均匀分布^[81]. 采用的达曼光栅及结果如图 7(a) 所示, 当涡旋光束入射到达曼光栅上时, 通过观察对应衍射级有无高斯亮点来实现 OAM 模式的解调. 通过计算, 该系统的总衍射效率为 66.32%, 这是由于虽然该光栅在各个衍射级上的能量均等分布, 但是实际光学系统对能量有一定的损耗且光栅上存在大相位跳变, 因此实际衍射效率远低于理想衍射效率.

基于此, 达曼叉形光栅在实际应用中不能将入射光的所有能量集中到目标 OAM 模式上, 造成对其他衍射级的能量损失. 2019 年, Kai 等人通过利用改进的 Lin 算法设计了一种新型的解调相位全息图^[82]. 该算法可

以控制各个衍射级的能量取值,并且通过足够多的迭代次数,可以实现在目标 OAM 模式上高效的能量集中. 其检测的结果图如图 7(b)所示,而且该方法去除了中心第 0 阶衍射级,减少了无用衍射级的能量浪费,其能量利用效率较之达曼叉形光栅得到了一定的提升.

计算相位全息图往往需要将光束加载在 SLM 上来实现对 OAM 模式的检测,而 SLM 这类光学器件本身对入射光能量有一定限制,因此这种方法在实际应用中,能量利用效率与理论效率有一定的偏差.

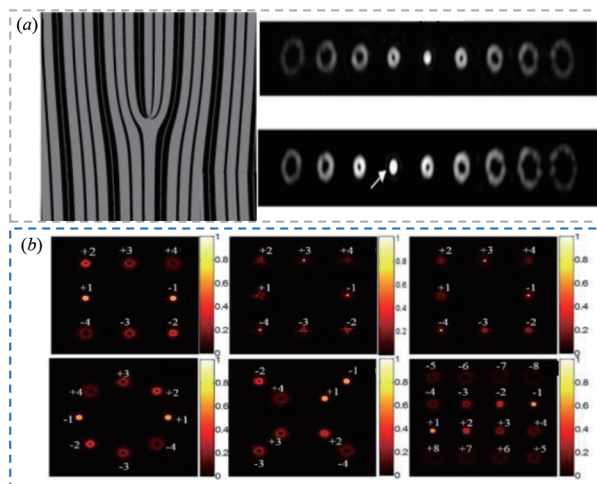


图 7 (a)生成的拓扑电荷为 1 的达曼涡旋光栅及对应的衍射图样和解调图样^[81]; (b)基于改进的 Lin 算法生成的新型解调相位全息图的衍射图样^[82]

在基于 OAM 的光通信系统中,除去光学器件本身对入射光固有的损耗,所使用的检测方法对入射光也有一定的折损,其不同 OAM 模式解调方案的性能对比如表 2 所示,因此,保证在接收端有一个高效的检测效率,关系着整个通信系统的通信质量. 随着近些年的发展,越来越多高效的 OAM 模式检测方案被提出, OAM 实际光通信系统也逐渐成为可能.

表 2 不同 OAM 模式解调方案的性能比较

	Interferometer	GT	CGH
Cost	Low	High	Low
Conversion Efficiency	Medium	High	Medium
Production of precision	Low	High	High
System Complexity	High	High	Low

注: Interferometer, 干涉仪; GT(Geometric Transformation), 几何变换; CGT(Computed Hologram), 计算全息图; Cost:成本; Conversion Efficiency, 转换效率; Production of precision, 制作精度; System Complexity, 系统复杂度.

4 基于 OAM 通信系统的利用效率分析

基于 OAM 的自由空间光通信系统,其发射端和接

收端通常利用上述的方案进行组合,在自由空间中构成一套完整的 OAM 光通信系统. 目前实验室常用的 OAM 通信系统,通常在发射端采用 SLM 加载相位全息图产生 OAM 光束,经过传输后,在接收端利用 SLM 加载计算全息图进行解调. 为了能详细了解 OAM 光束从产生到解调过程中的能量利用效率,2019 年,邵蔚分别采用螺旋相位图法和传统的叉形光栅来生成 OAM 光束,并将其代入自己搭建的自由空间光通信系统中进行试验^[83],其实验结果不太理想. 利用螺旋相位图产生的 OAM 光束具有严重的旁瓣,导致解调后的高斯亮点周围也存在旁瓣,且难以用光阑清除;采用叉形光栅在各个衍射级上生成的 OAM 光束,其能量主要被集中到零阶衍射级,导致对入射光的能量利用效率低下,光束再经过自由空间传输的损耗,最终到达接收端后,其能量几乎被耗尽. 因为在实际的 OAM 通信系统中,需要考虑各个方面的损耗. 这两种方法在实际光通信系统中很难被直接应用,需要进一步的优化和提升.

基于此,针对 OAM 光通信系统的利用效率问题,首先讨论 OAM 通信系统在理想空间中的能量利用效率. 一般认为 OAM 光束在理想空间的传输是无损的,但由于 OAM 光束随着 OAM 模式值和传输距离的增加,其光束半径也随之增加,而发送端和接收端光学器件的尺寸是有限的,因此在理想环境中,主要是发送端和接收端影响了入射光束的能量利用效率. 2019 年,Minoofoar 等人讨论了在理想环境中利用螺旋相位板生成和解调 OAM 模式的转换效率^[84]. 当螺旋相位板作为 OAM 生成器件时,高斯光大部分能量转移到设计生成的 OAM 模式中;但是由于螺旋相位板作为 OAM 模式转换器的固有低效,当 OAM 光束转换为高斯光时,即使螺旋相位板为无损介质, OAM 光束的能量依旧会转移到其他 OAM 模式上,并且其能量损失随 OAM 模式的增大而降低. 该研究表明,当输出 OAM 模式为 $l=\pm 1$ 的 OAM 模式时,在接收端得到的输出功率降低 21.5%,当生成的 OAM 模式增大时,其损失也随之增大.

同年,Zhao 等人探究了理想空间下基于 OAM 的量子通信的传输效率^[85]. 其实验装置图如图 8(a)所示,实验中利用在空间光调制器上加载计算全息图来生成和解调相应的 OAM 模式,随后利用实验数据研究了 OAM 模式在量子通信系统中的传输效率,分析了真空环境和不同孔径尺寸对 OAM 光束造成的模态损失,在实际的有限孔径尺寸和长距离传输下的自由空间通信链路中,高阶 OAM 模式传输时造成的损失更大. 在传输过程中,去除测量装置造成的误差,七种 OAM 模式下的平均传输效率为 97.1%.

在实际光通信系统中,除了发送端和接收端对入

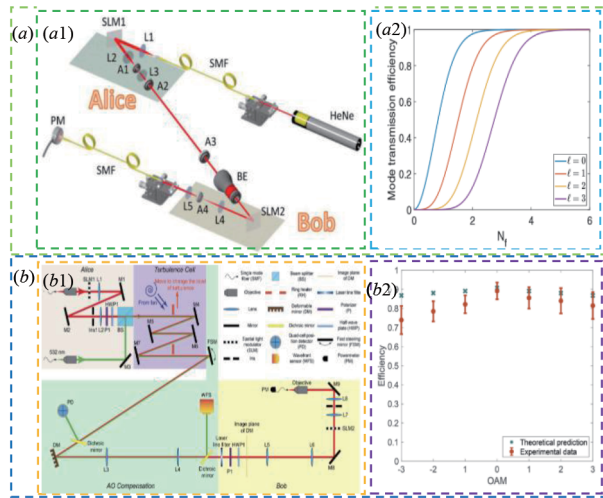


图8 (a)基于理想空间的OAM量子通信方案^[85]; (a1)OAM量子通信的实验装置图; (a2)不同OAM模式的理论传输效率; (b)基于实时大气湍流的OAM量子通信方案^[97]; (b1)OAM量子通信的实验装置图; (b2)对应的不同OAM模式理论传输效率和实验传输效率

射光束传输造成的损耗,还有一个重要影响因素就是大气湍流. 大气湍流会引起空气折射率的波动,极大地扰动了传输光束的相位波前,造成了OAM光束信道间的串扰,从而影响通信系统的质量^[86-96]. 2020年,Zhao等人探究了实时大气湍流对OAM通信系统的影响,并利用自适应光学补偿系统对通信链路进行了补偿^[97]. 其实验装置图及其传输效率如图8(b)所示,该装置同样利用空间光调制器加载全息图来生成和解调OAM模式,同时利用风扇、环状加热器和棱镜来模拟实时湍流,并据此测量实时湍流对不同OAM模式造成的损失,随着湍流强度的增加,OAM模式的保真度迅速下降,其传输效率也随之降低,并且高阶OAM模式与低阶OAM模式相比,传输效率下降得更快. 同时在实际测量中,由于实验装置光束跟踪的不精确,在接收端有可能造成光束的倾斜,并且随着传输距离的增加,高阶OAM模式的半径有可能大于接收端的接收孔径,这些误差都会引起通信链路传输的低效率,因此实际通信链路的测量值与理论数值都会存在一定的误差.

对于OAM光通信链路,其能量利用效率不仅受发送端和接收端实验装置的影响,而且在传输过程中实际环境也会对其造成散射、反射等损耗影响,同时上述提到的大气湍流更是会造成OAM光束相位畸变、光强闪烁等恶性后果. 为提升整个系统的能量利用效率,降低传输过程中对OAM模式造成的损耗,越来越多缓解大气湍流的方案被提出,系统的能量损耗也得到了大

幅降低,这为OAM光通信系统走向实际迈出了重要的一步.

5 总结

随着人们对大容量通信需求的逐日增加,基于OAM的光通信技术将会受到越来越多研究人员的关注. 对于理想的OAM光通信系统,可将OAM光束作为信息载体或多个OAM模式复用来提升信息传输容量,但在实际应用中,OAM光束在产生、传输和接收的过程中能量都会受到损耗,而系统的能量利用效率高是关乎整个系统能否被直接应用的重要指标之一. 本文对OAM光束在生成、检测以及传输过程中的能量利用效率进行了归纳研究,并且对OAM光束在不同位置造成损耗的原因进行了详细分析.

要想将OAM自由空间光通信应用到实际光通信中,需要提高通信系统整体的能量利用效率. 目前在OAM光通信的发送端和接收端,通常利用SLM和数字微镜等装置来充当通信系统的核心器件,但这些器件对入射光束的能量转换效率有着一定的影响,因此研发具有更高转换效率的器件,特别是可集成的高效转换器件,是未来OAM光通信走向实际的必然要求. 同时,高效的算法也是提高系统能量利用效率的有效途径之一. 现有的算法对于生成和检测多个OAM模式的转换还有一定的提升空间,对缓解在自由空间的湍流对OAM光束的影响更是需要持续、深入的研究.

总之,实现高效的OAM光通信系统已经吸引了国内外众多研究学者的关注,尽管目前依然存在许多问题需要去进一步完善和解决,但相信随着OAM光通信这一领域的不断发展,未来会有更多高效的算法和器件被研发问世,这将逐步推动OAM自由空间光通信甚至OAM光纤通信技术走向现实.

参考文献

- [1] Zhou X, Yu J. Multi-level, multi-dimensional coding for high-speed and high-spectral-efficiency optical transmission[J]. *Journal of Lightwave Technology*, 2009, 27(16): 3641 - 3653.
- [2] Zhou X, Yu J, Huang M, et al. 64-Tb/s, 8 b/s/Hz, PDM-36QAM transmission over 320 km using both pre- and post-transmission digital signal processing[J]. *Journal of Lightwave Technology*, 2011, 29(4): 571 - 577.
- [3] Gnauck A H, Winzer P J, Chandrasekhar S, et al. Spectral-

- ly efficient long-haul WDM transmission using 224-Gb/s polarization-multiplexed 16-QAM[J]. *Journal of Lightwave Technology*, 2011, 29(4): 373 – 377.
- [4] 郭忠义, 龚超凡, 刘洪郡, 等. OAM 光通信技术研究进展[J]. *光电工程*, 2020, 47(3): 190593.
Guo Z Y, Gong C F, Liu H J, et al. Research advances of orbital angular momentum based optical communication technology[J]. *Opto-Electronic Engineering*, 2020, 47(3): 190593. (in Chinese)
- [5] 王健, 陈诗. 基于传统光纤的涡旋光复用通信研究进展[J]. *应用科学学报*, 2020, 38(4): 559 – 578.
Wang J, Chen S. Progress in vortex-multiplexed communications based on conventional fibers[J]. *Journal of Applied Sciences*, 2020, 38(4): 559 – 578.
- [6] 郭忠义, 潘珍珍, 龚超凡, 等. OAM 光通信路由器件研究, *通信学报*, 2020, 41(11): 185 – 197.
Guo Z Y, Pan Z Z, Gong C F, et al. Research on router devices of OAM optical communication[J]. *Journal of Communication*, 2020, 41(11): 185 – 197. (in Chinese)
- [7] 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.
- [8] 郭忠义, 刘洪郡, 李晶晶, 等. 声涡旋信息应用研究进展[J]. *物理学报*, 2020, 69(24): 244301.
Guo Z Y, Liu H J, Li J J, et al. Research progress of applications of acoustic-vortex information[J]. *Acta Physica Sinica*, 2020, 69(24): 244301. (in Chinese)
- [9] 郭忠义, 汪彦哲, 郑群, 等. 涡旋电磁波天线技术研究进展[J]. *雷达学报*, 2019, 8(5): 631 – 655.
Guo Z Y, Wang Y Z, Zheng Q, et al. Research progress of vortex electromagnetic wave antenna technology [J]. *Journal of Radar*, 2019, 8(5): 631 – 655. (in Chinese)
- [10] Allen L, Beijersbergen M W, Spreeuw R J C, et al. Orbital angular momentum of light and transformation of Laguerre Gaussian laser modes[J]. *Physical Review A*, 1992, 45(11): 8185 – 8189.
- [11] Guo Z, Wang Z, Dedo M I, et al. The orbital angular momentum encoding system with radial indices of Laguerre – Gaussian beam[J]. *IEEE Photonics Journal*, 2018, 10(5): 1 – 11.
- [12] Ke X Z, Chen M. Recognition of orbital angular momentum vortex beam based on convolutional neural network [J]. *Microwave and Optical Technology Letters*, 2021, 63(7): 1960 – 1964.
- [13] Guo Z, Qu S, Sun Z, et al. Superposition of orbit angular momentum of photons by combined computer-generated hologram fabricated in silica glass with femtosecond laser pulses[J]. *Chinese Physics B*, 2008, 17(11): 4199 – 4205.
- [14] Zheng S, Wang J. Measuring orbital angular momentum (OAM) states of vortex beams with annular gratings[J]. *Scientific Reports*, 2017, 7(1): 8185 – 8189.
- [15] Dedo M I, Wang Z, Guo K, et al. Retrieving performances of vortex beams with GS algorithm after transmitting in different types of turbulences[J]. *Applied Sciences*, 2019, 9(11): 2269.
- [16] 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.
- [17] Wang Z, Dedo M I, Guo K, et al. Efficient recognition of the propagated orbital angular momentum modes in turbulences with the convolutional neural network[J]. *IEEE Photonics Journal*, 2019, 11(3): 1 – 14.
- [18] Wang J, Yang J Y, Fazal I M, et al. Terabit free-space data transmission employing orbital angular momentum multiplexing[J]. *Nature Photonics*, 2012, 6(7): 488 – 496.
- [19] 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. (in Chinese)
- [20] Gibson G, Courtial J, Padgett M J, et al. Free-space information transfer using light beams carrying orbital angular momentum[J]. *Optics Express*, 2004, 12(22): 5448 – 5456.
- [21] Zhou H, Li J, Gong C, et al. Measuring the orbital angular momentum of acoustic vortices by apertures[J]. *Journal of the Acoustical Society of America (JASA)*, 2020, DOI: 10.1121/10.0001521.
- [22] Zhou H, Li J, Guo K, et al. Generation of acoustic vortex beams with designed Fermat's spiral diffraction grating (FSDG)[J]. *Journal of the Acoustical Society of America*, 2019, 146(6): 4237 – 4243.
- [23] Gong C, Li J, Guo K, et al. Measuring the orbital angular momentum of acoustic vortices based on the Fraunhofer's diffraction[J]. *Chinese Physics B*, 2020, DOI: 10.1088/1674-1056/ab9c11.

- [24] Guo Z, Liu H, Zhou H, et al. High-order acoustic vortex field generation based on the metasurface[J]. *Physical Review E*, 2019, 100(5): 053315.
- [25] Wang L, Chen H, Guo K, et al. An inner and outer-fed dual-arm archimedean spiral antenna for generating multiple orbital angular momentum modes[J]. *Electronics*, 2019, 8(2): 251.
- [26] Yang Y, Wang Z, Wang S, et al. Designing a water-immersed rectangular horn antenna for generating underwater OAM waves[J]. *Electronics*, 2019, 8(11): 1224.
- [27] Yin Z, Zheng Q, Guo K, et al. Tunable beam steering, focusing and generating of orbital angular momentum vortex beams using high-order patch array[J]. *Applied Sciences*, 2019, 9(15): 2949.
- [28] Yang Y, Guo K, Shen F, et al. Generating multiple OAM based on a nested dual-arm spiral antenna[J]. *IEEE Access*, 2019, 7: 138541 – 138547.
- [29] Shen F, Mu J, Guo K, et al. Generating circularly polarized vortex electromagnetic waves by the conical conformal patch antenna[J]. *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*, 2019, 67(9): 5763 – 5771.
- [30] 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.
- [31] Guo K, Zheng Q, Yin Z, et al. Generation of mode-reconfigurable and frequency-adjustable OAM beams using dynamic reflective metasurface[J]. *IEEE Access*, 2020, 8: 75523 – 75529.
- [32] Li Y, Guo Z, Qu S. Living cell manipulation in microfluidic device by femtosecond optical tweezers [J]. *Optics and Lasers in Engineering*, 2014, 55: 150 – 154.
- [33] Ran L, Guo Z, Qu S. Rotation of optically trapped microscopic particles by vortex femtosecond laser[J]. *Chinese Physics B*, 2012, 21: 104206.
- [34] Liu C, Guo Z, Li Y, et al. Manipulating ellipsoid microparticles by femtosecond vortex tweezers[J]. *Journal of Optics*, 2015, 17(3): 035402.
- [35] Zhu L, Guo Z, Xu Q, et al. Calculating the torque of the optical vortex tweezer to the ellipsoidal microparticles[J]. *Optics Communications*, 2015, 354: 34 – 39.
- [36] Krenn M, Fickler R, Fink M, et al. Communication with spatially modulated light through turbulent air across Vienna[J]. *New Journal of Physics*, 2014, 16(11): 113028.
- [37] Li X K, Li Y, Zeng X N, et al. Perfect optical vortex array for optical communication based on orbital angular momentum shift keying[J]. *Journal of Optics*, 2018, 20(12): 125604.
- [38] Fu S Y, Zhai Y W, Yin C, et al. Mixed orbital angular momentum amplitude shift keying through a single hologram[J]. *OSA Continuum*, 2018, 1(2): 295 – 308.
- [39] Krenn M, Handsteiner J, Fink M, et al. Twisted light transmission over 143 km[J]. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, 2016, 113(48): 13648 – 13653.
- [40] Du J, Wang J. High-dimensional structured light coding/decoding for free-space optical communications free of obstructions[J]. *Optics Letters*, 2015, 40(21): 4827 – 4830.
- [41] Li S H, Wang J. Experimental demonstration of optical interconnects exploiting orbital angular momentum array[J]. *Optics Express*, 2017, 25(18): 21537 – 21547.
- [42] Willner A J, Ren Y X, Xie G D, et al. Experimental demonstration of 20 Gbit/s data encoding and 2 ns channel hopping using orbital angular momentum modes[J]. *Optics Letters*, 2015, 40(24): 5810 – 5813.
- [43] Wang A D, Zhu L, Zhao Y F, et al. Adaptive water-air-water data information transfer using orbital angular momentum[J]. *Optics Express*, 2018, 26(7): 8669 – 8678.
- [44] Wang W, Wang P, Cao T, et al. Performance investigation of underwater wireless optical communication system using M-ary OAMSK modulation over oceanic turbulence[J]. *IEEE Photonics Journal*, 2017, 9(5): 7905315.
- [45] Baghdady J, Miller K, Morgan K, et al. Multi-gigabit/s underwater optical communication link using orbital angular momentum multiplexing[J]. *Optics Express*, 2016, 24(9): 9794 – 9805.
- [46] Wang J, Liu J, Lv X, et al. Ultra-high 435-bit/s/Hz spectral efficiency using N-dimensional multiplexing and modulation link with pol-muxed 52 orbital angular momentum (OAM) modes carrying Nyquist 32-QAM signals [A]. 2015 European Conference on Optical Communication (ECOC)[C]. Valencia, Spain: IEEE, 2015. 1 – 3.
- [47] Huang H, Xie G D, Yan Y, et al. 100 Tbit/s free-space data link enabled by three-dimensional multiplexing of orbital angular momentum, polarization, and wavelength[J]. *Optics Letters*, 2014, 39(2): 197 – 200.
- [48] Huang H, Xie G D, Yan Y, et al. 100 Tbit/s free-space data link using orbital angular momentum mode division multiplexing combined with wavelength division multiplexing[A]. 2013 Optical Fiber Communication Confer-

- ence and Exposition and the National Fiber Optic Engineers Conference (OFC/NFOEC) [C]. Anaheim, CA, USA: IEEE, 2013. 1 – 3
- [49] Awaji Y, Wada N, Toda Y. Demonstration of spatial mode division multiplexing using Laguerre-Gaussian mode beam in telecom-wavelength[A]. 2010 23rd Annual Meeting of the IEEE Photonics Society[C]. Denver, CO, USA: IEEE, 2010. 551 – 552
- [50] Zhu Y X, Zou K H, Zheng Z N, et al. $1 \lambda \times 1.44$ Tb/s free-space IM-DD transmission employing OAM multiplexing and PDM[J]. Optics Express, 2016, 24(4): 3967 – 3980.
- [51] Zhao Y F, Xu J, Wang A D, et al. Demonstration of data-carrying orbital angular momentum-based underwater wireless optical multicasting link[J]. Optics Express, 2017, 25(23): 28743 – 28751.
- [52] Zhao Y F, Wang A D, Zhu L, et al. Performance evaluation of underwater optical communications using spatial modes subjected to bubbles and obstructions[J]. Optics Letters, 2017, 42(22): 4699 – 4702.
- [53] Turnbull G A, Robertson D A, Smith G M, et al. The generation of free-space Laguerre-Gaussian modes at millimetre-wave frequencies by use of a spiral phaseplate[J]. Optics Communications, 1996, 127(4 – 6): 183 – 188.
- [54] Sueda K, Miyaji G, Miyana N, et al. Laguerre-Gaussian beam generated with a multilevel spiral phase plate for high intensity laser pulses[J]. Optics Express, 2004, 12(15): 3548 – 3553.
- [55] Rafighdoost J, Sabatyan A. Spirally phase-shifted zone plate for generating and manipulating multiple spiral beams[J]. Journal of the Optical Society of America B, 2017, 34(3): 608 – 612.
- [56] Oemrawsingh S S R, Van Houwelingen J A W, Eliel E R, et al. Production and characterization of spiral phase plates for optical wavelengths[J]. Applied Optics, 2004, 43(3): 688 – 694.
- [57] Lin J, Yuan X C, Tao S H, et al. Synthesis of multiple collinear helical modes generated by a phase-only element [J]. Journal of the Optical Society of America A, 2006, 23(5): 1214 – 1218.
- [58] Wei S B, Wang D P, Lin J, et al. Demonstration of orbital angular momentum channel healing using a Fabry-Pérot cavity[J]. Opto-Electronic Advances, 2018, 1(5): 180006.
- [59] Mirhosseini M, Magaña-Loaiza O S, Chen C C, et al. Rapid generation of light beams carrying orbital angular momentum[J]. Optics Express, 2013, 21(25): 30196 – 30203.
- [60] Guo Z, Zhu L, Guo K, et al. High-order dielectric metasurfaces for high-efficiency polarization beam splitters and optical vortex generators[J]. Nanoscale Research Letters, 2017, 12(1): 1 – 8.
- [61] Ma Z J, Li Y, Li Y, et al. All-dielectric planar chiral metasurface with gradient geometric phase[J]. Optics Express, 2018, 26(5): 6067 – 6078.
- [62] Zhao Y F, Du J, Zhang J R, et al. Generating structured light with phase helix and intplasmonic metasurface at $2 \mu\text{m}$ [J]. Applied Physics Letters, 2018, 112(17): 171103.
- [63] Du J, Wang J. Dielectric metasurfaces enabling twisted light generation/detection/(de) multiplexing for data information transfer[J]. Optics Express, 2018, 26(10): 13183 – 13194.
- [64] Karimi E, Schulz S A, De Leon I, et al. Generating optical orbital angular momentum at visible wavelengths using a plasmonic metasurface[J]. Light: Science & Applications, 2014, 3(5): e167.
- [65] Ruffato G, Massari M, Romanato F. Generation of high-order Laguerre – Gaussian modes by means of spiral phase plates[J]. Optics Letters, 2014, 39(17): 5094 – 5097.
- [66] Longman A, F Ed Osejevs R. Mode conversion efficiency to Laguerre-Gaussian OAM modes using spiral phase optics[J]. Optics Express, 2017, 25(15): 17382 – 17392.
- [67] Beijersbergen M W, Allen L, van der Veen H.E.L.O., et al. Astigmatic laser mode converters and transfer of orbital angular momentum[J]. Optics Communications, 1993, 96(1-3): 123 – 132.
- [68] Curtis J E, Koss B A, Grier D G. Dynamic holographic optical tweezers[J]. Optics Communications, 2002, 207(1-6): 169 – 175.
- [69] Lin J, Yuan X, Tao S H, et al. Synthesis of multiple collinear helical modes generated by a phase-only element [J]. Journal of the Optical Society of America A Optics Image nce & Vision, 2006, 23(5): 1214 – 1218.
- [70] 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.
- [71] Kai C, Huang P, Shen F, et al. Orbital angular momentum shift keying based optical communication system[J]. IEEE Photonics Journal, 2017, PP(2): 1 – 10.
- [72] Lee W M, Yuan X C, Dholakia K. Experimental observation of optical vortex evolution in a Gaussian beam with an embedded fractional phase step[J]. Optics Communica-

- tions, 2004, 239(1-3): 129 – 135.
- [73] Shao W, Huang S J, Chen M S, et al. Research of optical vortex's energy efficiency and diffraction angle based on spatial light modulator[J]. *Optical Engineering*, 2017, 56(8): 086113
- [74] Zhang N, Yuan X C, Burge R E. Extending the detection range of optical vortices by Dammann vortex gratings. 2010, 35(20): 3495 – 3497.
- [75] 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
- [76] Slussarenko S, D' Ambrosio V, Piccirillo B, et al. The polarizing sagnac interferometer: a tool for light orbital angular momentum sorting and spin-orbit photon processing [J]. *Optics Express*, 2010, 18(26): 27205 – 27216.
- [77] Cui S W, Xu B, Luo S Y, et al. Determining topological charge based on an improved Fizeau interferometer [J]. *Optics express*, 2019, 27(9): 12774 – 12779.
- [78] Berkhout G C G, Lavery R P J, Courtial R, et al. Efficient Sorting of Orbital Angular Momentum States of Light[J]. *Physical Review Letters*, 2010, 105(15): 153601.
- [79] Minoofar A, Askarpour A, Abdipour A. Efficiency and crosstalk in demultiplexing orbital angular momentum modes using a geometrical transformation-based mode sorter[A]. 2019 Iran Workshop on Communication and Information Theory (IWCIT)[C]. Tehran, Iran: IEEE, 2019. 1 – 5.
- [80] Feng Z, Wang X, Dedo M I, et al. High-density orbital angular momentum mode analyzer based on the mode converters combining with the modified Mach – Zehnder interferometer[J]. *Optics Communications*, 2019, 435: 441 – 448.
- [81] Zhang N, Davis J A, Moreno I, et al. Analysis of multilevel spiral phase plates using a Dammann vortex sensing grating[J]. *Optics Express*, 2010, 18(25): 25987 – 25992.
- [82] Kai C, Feng, Z, Dedo M I, et al. The performances of different OAM encoding systems[J]. *Optics Communications*, 2019, 430: 151 – 157.
- [83] 邵蔚. 基于轨道角动量复用的空间光通信关键技术研究[D]. 上海大学, 2019.
- [84] Minoofar A, Askarpour A N, Abdipour A. Efficiency and crosstalk in demultiplexing orbital angular momentum modes using a spiral phase plate[A]. West Asian Colloquium on Optical Wireless Communications[C]. Tehran, Iran: IEEE, 2019.
- [85] Zhao J, Mirhosseini M, Braverman B, et al. Performance analysis of d-dimensional quantum cryptography under state-dependent diffraction[J]. *Phys Rev A*, 2019, 100(3): 032319.
- [86] Dedo M I, Wang Z, Guo K, et al. OAM mode recognition based on joint scheme of combining the Gerchberg – Saxton (GS) algorithm and convolutional neural network (CNN)[J]. *Optics Communications*, 2020, 456: 124696.
- [87] Wang Z, Guo Z. Adaptive demodulation technique for efficiently detecting orbital angular momentum (OAM) modes based on the improved convolutional neural network[J]. *IEEE Access*, 2019, 7: 163633 – 163643
- [88] 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.
- [89] Rodenburg B, Lavery M P J, Malik M, et al. Influence of atmospheric turbulence on states of light carrying orbital angular momentum[J]. *Optics Letters*, 2012, 37(17): 3735 – 3737.
- [90] Malik M, O' Sullivan M, Rodenburg B, et al. Influence of atmospheric turbulence on optical communications using orbital angular momentum for encoding[J]. *Optics Express*, 2012, 20(12): 13195 – 13200.
- [91] 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.
- [92] Ren Y X, Huang H, Xie G D, et al. Atmospheric turbulence effects on the performance of a free space optical link employing orbital angular momentum multiplexing [J]. *Optics Letters*, 2013, 38(20): 4062 – 4065.
- [93] Ke X Z, Wang J, Wang M J. Evolution of degree of polarization of partially coherent beams propagation in slant and horizontal atmospheric turbulence[J]. *Indian Journal of Physics*, 2019, 93(6): 691 – 699.
- [94] Ke X Z, Cui N M. Experimental research on phase diversity method for correcting vortex beam distortion wavefront[J]. *Applied Physics B: Lasers and Optics*, 2020, 126(11): 8185 – 8189.
- [95] Ke X Z, Li J. Using MCMA-MUK algorithm to suppress crosstalk in orbital angular momentum multiplexing communication system[J]. *Optical Review*, 2021, 28: 331 – 341.
- [96] Li S, Chen S, Gao C, et al. Atmospheric turbulence compensation in orbital angular momentum communications:

Advances and perspectives[J]. Optics Communications, 2018, 408: 68 – 81.

- [97] Zhao J, Zhou Y, Braverman B, et al. Performance of real-time adaptive optics compensation in a turbulent channel with high-dimensional spatial-mode encoding[J]. Optics Express, 2020,28(10): 15376 – 15391.

作者简介



周红平 女,1975年生,江苏海门人,博士,合肥工业大学副研究员、硕士生导师.主要研究方向为先进光通信技术、雷达信号处理、干扰识别等.



潘珍珍 女,1997年生,安徽芜湖人,合肥工业大学硕士生.主要研究方向为OAM光通信技术.



郭凯 1987年生,安徽界首市人,博士,合肥工业大学副教授、硕士生导师.主要研究方向为先进光通信技术、纳米光子学等.



雷艺 1990年生,重庆人,博士,合肥工业大学讲师、硕士生导师.主要研究方向为光纤通信技术、无线通信技术等.



郭忠义(通信作者) 1981年生,安徽阜南人,博士,合肥工业大学教授、博士生导师.主要研究方向为先进光通信技术、偏振智能信息处理、涡旋雷达系统、纳米光子学、智能传感系统等.