

# 拓扑荷数对拉盖尔-高斯涡旋光浑浊水下传输的影响

彭 波, 钟 昆, 李中云

中国工程物理研究院电子工程研究所, 四川 绵阳 621999

**摘要** 以高斯光作为参考光, 实验研究了携带不同拓扑荷数的拉盖尔-高斯(LG)涡旋光在浑浊水下的传输行为。结果表明, 水体较浑浊(衰减长度不大于 0.118 m)时, 拓扑荷数较大的 LG 光束具有更强的水下传输能力; 对于透射光束的能量密度分布而言, 传输距离决定最佳拓扑荷数, 与水体浑浊程度无关。该实验方法和测量结果对 LG 涡旋光在水下光通信和水下目标探测等领域的应用具有潜在的指导意义和工程价值。

**关键词** 海洋光学; 水下激光; 涡旋光; 浑浊水体; 拓扑荷数

**中图分类号** P733.3 **文献标识码** A

**doi:** 10.3788/AOS201737.0601005

## Influence of Topological Charge on Turbid Underwater Propagation of Laguerre-Gaussian Vortex Beams

Peng Bo, Zhong Kun, Li Zhongyun

*Institute of Electronic Engineering, China Academy of Engineering Physics, Mianyang, Sichuan 621999, China*

**Abstract** The turbid underwater propagation of Laguerre-Gaussian (LG) vortex beams is investigated experimentally with different topological charges, and Gaussian beams are used as the reference light. Results show that LG beams with large topological charge have strong underwater propagation capability when water is relatively turbid (the attenuation length is not higher than 0.118 m). With respect to the energy density distribution of the transmission beams, the transmission distance determines the optimal topological charge, and it is independent of the water turbidity. The experimental method and measured results have potential guiding significance and engineering value for the applications of LG vortex beams in underwater optical communication, underwater target detection and other fields.

**Key words** oceanic optics; underwater laser; vortex beams; turbid water; topological charge

**OCIS codes** 010.4450; 050.4865; 290.7050

## 1 引 言

涡旋光是一种具有相位奇点和螺旋波前的特殊光场, 在波前相位中含有与方位角  $\phi$  相关的相位因子  $\exp(-i l \phi)$ , 其中  $l$  为拓扑荷数或角向指数, 关联着每个光子的轨道角动量  $l \hbar$  ( $\hbar$  为约化普朗克常数)<sup>[1]</sup>。拉盖尔-高斯(LG)光束是一种典型的涡旋光<sup>[2]</sup>, 近年来在量子编码<sup>[3-4]</sup>、空间光通信<sup>[5-6]</sup>、粒子微操纵<sup>[7-8]</sup>等领域得到了广泛应用。与普通的高斯光束相比, 在大气光通信中, LG 涡旋光束不仅能够利用拓扑荷数增加数据容量、提高传输效率<sup>[9-10]</sup>, 还能有效减小大气湍流导致的光束畸变<sup>[5, 11]</sup>, 因而在大气远程光通信中倍受关注。

鉴于 LG 涡旋光束在大气远程光通信中的突出优点, 近年来国外学者开始尝试将其引入水下无线通信中, 以期提高水下光通信的传输效率<sup>[12-13]</sup>。与大气环境相比, 即使采用吸收衰减较小的蓝绿激光, 水体环境的散射影响也一直是水下光通信面临的最大挑战。为了研究涡旋光在散射环境中的传输特性, 孙存志等<sup>[14]</sup>实验研究了强聚焦 LG 涡旋光与非涡旋光经过散射介质的透射率问题, 并分析了数值孔径和拓扑荷数对 LG 光束散射传输能力的影响。Wang 等<sup>[15]</sup>对比研究了  $l$  为 4 和 8 时的 LG 涡旋光与高斯光在不同浑浊介质中

**收稿日期:** 2017-01-18; **收到修改稿日期:** 2017-02-08

**基金项目:** 国家自然科学基金(61505184)、装备预研基金(9140A05020115ZW05058)

**作者简介:** 彭 波(1983—), 男, 博士, 副研究员, 主要从事水下目标光电探测及散射介质超扩散成像方面的研究。

E-mail: pengb07@gmail.com

的传输能力,实验结果表明了 LG 光束在扩散区域的传输优势。Brandon 等<sup>[16]</sup>实验对比了浑浊可控的水箱中高斯光和携带不同拓扑荷数( $l=8,16$ )的 LG 光束的水下传输能力和通信调制深度,结果表明除了在多重散射区域高阶 LG 光束具有一定的传输优势外,二者在散射导致的时域扩散上并无差异。

目前,国内外学者已对 LG 光束的水下传输行为开展了一些研究,但由于拓扑荷数较少,难以准确揭示 LG 光束的水下传输特性,尤其是在浑浊的水下环境。本文对大量不同拓扑荷数的 LG 涡旋光在浑浊水体下的传输行为进行了深入研究。通过设置浑浊可控的水体环境,对比研究了高斯光和携带不同拓扑荷数的 LG 光束的散射传输能力,为水下光通信及水下激光雷达等领域确定 LG 光束拓扑荷数提供了研究方法和实验依据,具有潜在的指导意义和工程应用价值。

## 2 LG 涡旋光的产生

LG 光束主要由空间光调制器(SLM)、螺旋相位板及全息叉形光栅等产生,其中 SLM 具有分辨率高、空间带宽大和像素尺寸小的特点,可以对空间各像素进行实时控制,常用于产生拓扑荷数可变的 LG 光束<sup>[17]</sup>。

利用 SLM 产生 LG 涡旋光束的关键是相息图的生成。在传播距离  $z=0$  处, LG 光束的波前相位  $\varphi(r, \phi)$  由相位因子  $\exp(-il\phi)$  和缔合拉盖尔多项式  $L_p^l$  共同决定,可表示为

$$\varphi(r, \phi) = -l\phi + \pi\epsilon[-L_p^l(2r^2/\omega_0^2)], \quad (1)$$

式中  $\epsilon(\cdot)$  为阶跃函数。当  $p=0$  时,  $L_p^l$  恒为 1, (1) 式退化为  $\varphi(r, \phi) = -l\phi$ 。通过将波前相位在  $[0, 2\pi)$  内离散为相应的灰度值图样,可灵活生成拓扑荷数不同的相息图。图 1(a) 为  $l=24$  的 LG 涡旋光束相息图。由于像素表面的吸收散射、填充占比等因素的制约, SLM 并不能将入射光完全调制为 LG 光束。一般采用在相息图上添加闪耀光栅的方法,将完全调制的 LG 光束与其他未调制部分相互分离,图 1(b) 为添加光栅后的相息图(光栅常数对应的像素个数为 8)。实验研究了  $z \approx 2.3$  m 处  $l=24$  的 LG 光斑形态,结果如图 1(c) 所示,在传播方向上光强呈环状分布,并伴随衍射环。成像平面满足菲涅耳区距离条件 ( $z \gg \sqrt{[(x-x_0)^2 + (y-y_0)^2]_{\max}} \pi / (4\lambda) \approx 0.115$  m), 为了验证实验结果,利用菲涅耳衍射积分方法对  $l=24$  的 LG 光束传播 2.3 m 后的光强分布进行了仿真分析,结果如图 1(d) 所示。由图可知,实验结果与仿真结果具有很好的一致性。

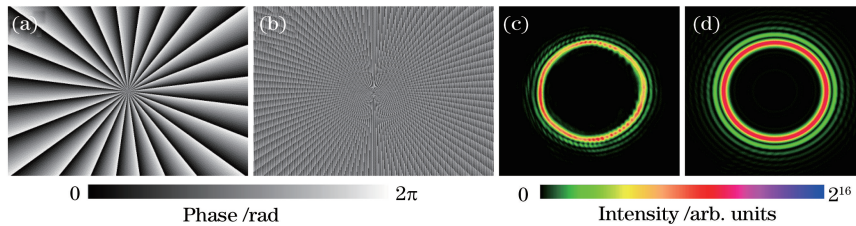


图 1 (a)  $l=24$  的 LG 涡旋光束相息图;(b)添加闪耀光栅后的相息图;(c)实测光斑;(d)仿真光斑

Fig. 1 (a) Phase hologram of LG beams when  $l=24$ ; (b) phase hologram after adding blazed grating;

(c) measured light spot; (d) simulated light spot

理论上,  $l=0$  时, LG 涡旋光将退化成高斯光。在近场情况下,这种退化足够精确<sup>[15]</sup>,但传播距离较远时,由于 SLM 像素尺寸、填充占比等物理因素的制约,  $l=0$  的 LG 涡旋光远场光斑与激光器直接输出的基模高斯光斑存在较大差异。图 2 对比了传播距离为 2.3 m 时  $l=0$  的 LG 涡旋光与高斯光的光斑差异。

由图 2(a)、(b) 中央位置的强度分布曲线可以看出,  $l=0$  的 LG 涡旋光的远场光斑已退化为近似点光斑,与激光器输出的基模高斯光存在显著差异。需要注意的是,光路中的寄生干涉和微失谐使得二者的光斑图像均有干涉背景。

## 3 实验方法

### 3.1 实验光路

为了避免光源波动、环境差异和探测效率等因素的影响,实验以高斯光束作为参照,利用成像相机同时采集 LG 光束和高斯光束的透射光强,以便对比评估 LG 涡旋光在浑浊水体下的传输能力。实验光路如图 3

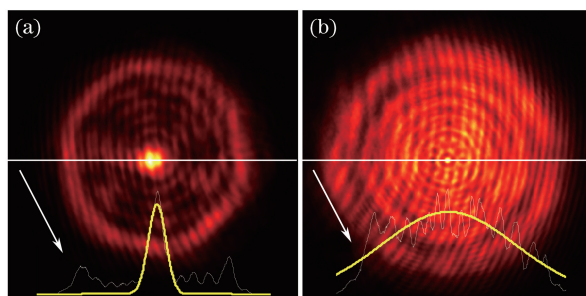


图 2 传播距离为 2.3 m 时 (a) LG 涡旋光 ( $l=0$ ) 和 (b) 高斯光的远场光斑 (黄线为拟合曲线)

Fig. 2 Far-field spots of (a) LG vortex beams with  $l=0$  and

(b) Gaussian beams with propagation distance of 2.3 m (yellow lines are fitting curves)

所示, L 为透镜, A 为光阑, BE 为扩束镜, BS 为分光棱镜, F 为中性密度滤光片, G 为高斯光, M 为反射镜, sCMOS 为无镜头相机。水箱尺寸为  $1.2\text{ m} \times 0.5\text{ m} \times 0.5\text{ m}$ , 壁厚为 12 mm。

鉴于  $l=0$  时 LG 涡旋光与高斯光的远场光斑具有较大差异, 以激光器输出的基模高斯光作为参考光束。为了同时产生 LG 光束和高斯光束, 如图 3 所示, 实验中先对波长为 532 nm 的连续激光进行扩束, 形成直径为 8 mm 的高斯光束, 再由  $BS_1$  将其分为两束, 其中一束光经 SLM 调制后形成 LG 涡旋光束。实验中, 在 SLM 上加载光栅优化的相息图 (CGH), 并采用  $2f$  ( $f$  为焦距) 空间滤波方法对 LG 光束中的未调制部分进行滤除。中性密度滤光片  $F_1$  的作用是平衡 LG 涡旋光和高斯光的能量, 使 sCMOS 接收到的两种光强尽可能接近。

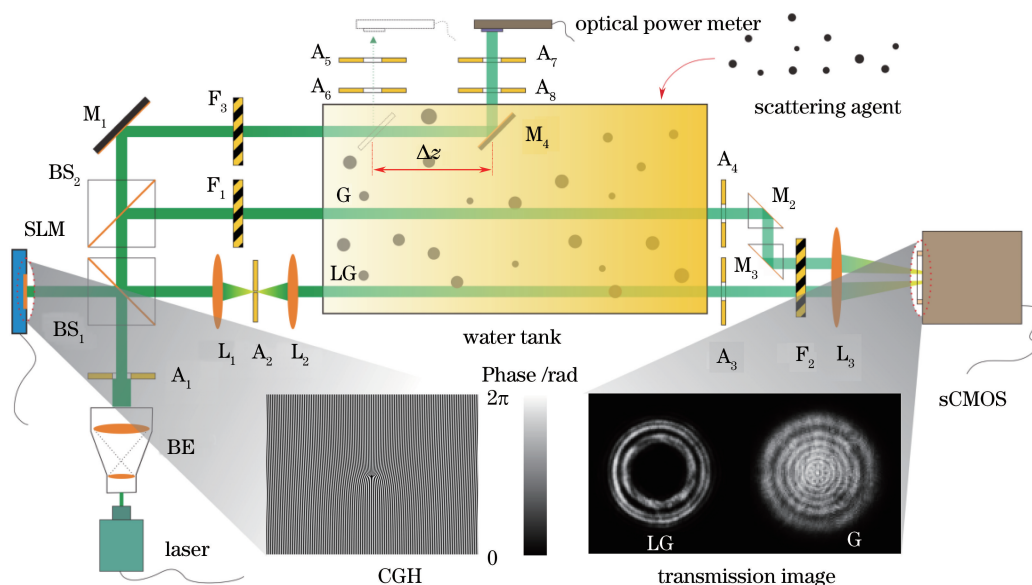


图 3 实验装置示意图

Fig. 3 Schematic of experimental setup

图 4 为实验水箱中无水时, sCMOS 采集到的高斯光束和 LG 光束 ( $l=2, 4, \dots, 64$ ) 的光斑图像。通过对比可以看出: 随着拓扑荷数的增大, LG 光束的空心暗区逐渐增大, 光斑面积则不断减小。当  $l \geq 20$ , 光环厚度没有发生显著变化, 但直径却不断增大。要得到圆度和均匀性较好的 LG 涡旋光束, 除了选择孔径合适的滤波小孔 (此处孔径  $\Phi \approx 0.6\text{ mm}$ ) 外, 还要仔细调整滤波小孔和  $2f$  消色差滤波透镜 ( $f=50\text{ mm}$ ) 的空间位置。

由于拓扑荷数对 LG 光束聚焦特性的影响, 采用闪耀光栅结合  $2f$  滤波的方法难以避免滤波小孔对高阶 LG 涡旋光的传输遮挡。如图 5 所示, 以高斯光为参考, 对图 4 中不同拓扑荷数 LG 光束的光强进行了比较。由图可见, 拓扑荷数越大, 滤波小孔的传输遮挡越严重, 滤波产生的高阶 LG 光束能量越小。例如,  $l=64$  的 LG 光束的能量仅为高斯光的  $1/5$ 。因此, 为了能够准确描述不同拓扑荷数 LG 光束的水下传输能力, 均以

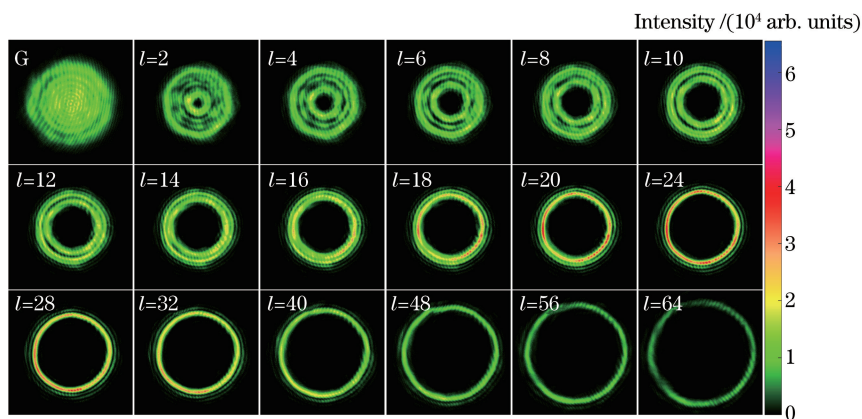


图 4 高斯光束与不同拓扑荷数的 LG 涡旋光束的实验光斑

Fig. 4 Experimental spots of Gaussian beam and LG vortex beams with different topological charges

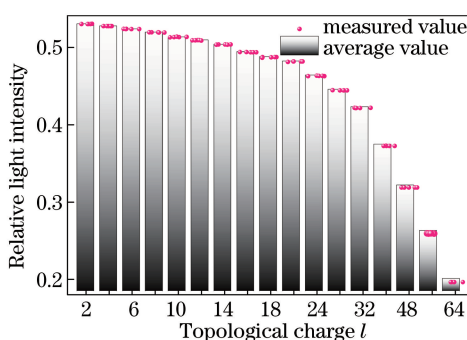


图 5 不同拓扑荷数的 LG 光束的相对光强

Fig. 5 Relative light intensity of LG beams with different topological charges

高斯光束作为参考光,测量 LG 涡旋光束的透射光斑及其相对光强。

为了能够在实验中同时测量水体的浑浊程度,采用光程差分方法,利用从分光棱镜  $BS_2$  透射的高斯光束测量水体的衰减长度,即  $L = \Delta z / [-\ln(P_1/P_2)]$ ,其中  $\Delta z \approx 283$  mm 为实验中两处测量位置之间的光程差, $P_1$ 、 $P_2$  分别为光功率计测得的相应光功率。

### 3.2 实验水体

将碳酸钙( $CaCO_3$ )粉末作为散射颗粒,通过在自来水中添加不同质量的粉末,模拟浑浊程度不同的水体。实验中也尝试使用氢氧化铝 $[Al(OH)_3]$ 粉末,但在其水体悬浊液中, $Al(OH)_3$  颗粒富集效应明显,经过数十分钟就团聚为尺寸较大的絮状沉淀物,从而影响实验测量。相比之下, $CaCO_3$  颗粒不会富集团聚,搅拌均匀后形成的水体悬浊液在数十分钟内都比较均匀、稳定。为了保证实验结果的有效性,用衰减长度标定实验水体,因为即使为其他水体(含有其他粒子),只要衰减长度相同,则水体对激光的传输衰减一致。

在实验水箱中注入深度约为 0.3 m 的自来水,用精度为毫克的计量天平称量 2~7 g  $CaCO_3$  粉末(逐次增量 0.5 g),加入水中并搅拌均匀,质量浓度如图 6 中横坐标所示。其中,质量浓度为 0 代表自来水。待水面稍微平静(内部颗粒仍处于快速运动状态)后,按照图 3 所示的光程差分方法测量实验水体的浑浊程度(衰减长度)。图 6 给出了  $CaCO_3$  质量浓度不同时相应水体衰减长度  $L$  的测量结果。由图可见,与均值相比,不同水体衰减长度的多次测量结果具有较好的一致性。

## 4 结果与分析

针对浑浊程度不同的水体,实验研究了拓扑荷数对 LG 光束水下传输能力的影响,部分结果如图 7 所示。水体浑浊程度差异较大,透射衰减的动态范围很大( $\exp[\Delta(z/L)] \approx e^{18}$ ),因而难以使用相同的光源功率、滤光设置(如图 3 中性滤光片  $F_2$ )和曝光参数完成实验。为此,针对不同浑浊程度的水体,采用了不同的实验条件,而浑浊程度(衰减长度)一致的同组实验则使用了相同的实验条件。



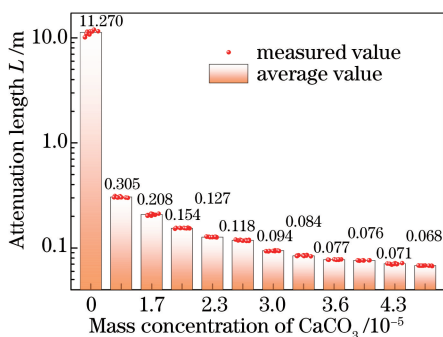


图 6 不同浓度  $\text{CaCO}_3$  悬浊液的衰减长度

Fig. 6 Attenuation lengths of  $\text{CaCO}_3$  turbid liquids with different mass concentrations

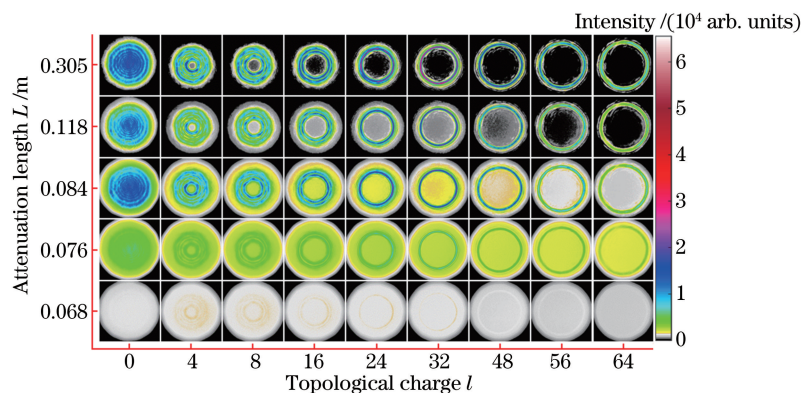


图 7 不同浑浊水体下 LG 光束透射光强随拓扑荷数的变化

Fig. 7 Variation in transmission light intensity of LG beam with topological charge in different turbid waters

由图 7 可以看出,对于衰减长度相同的水体,随着拓扑荷数的增大, LG 光束的光斑分布与自由空间传输时的情况一致(如图 4),光环面积均逐渐减小,之后略微增大。随着水体浑浊程度的加剧,相同拓扑荷数 LG 光束的光斑逐渐淹没于散射背景中,可见性逐步降低。总体而言,与高斯光相比,在水体较浑浊时, LG 涡旋光具有较强的传输能力。

以高斯光束的透射强度  $T_G$  作为参考,计算不同浑浊程度、不同拓扑荷数时 LG 光束的相对光强  $T_{LG}/T_G$ ,其中  $T_{LG}$  为 LG 光束的透射强度,结果如图 8 所示。由图可见,随着水体浑浊程度的增加, LG 光束的透射光强逐渐增大;水体浑浊程度相同时,透射光强随拓扑荷数的增加而增强。水体浑浊程度较小时, LG 光束与高斯光束的水下传输能力并无明显差异;水体较浑浊时, LG 光束较高斯光束具有更强的传输能力,且拓扑荷数越大,传输能力越强。

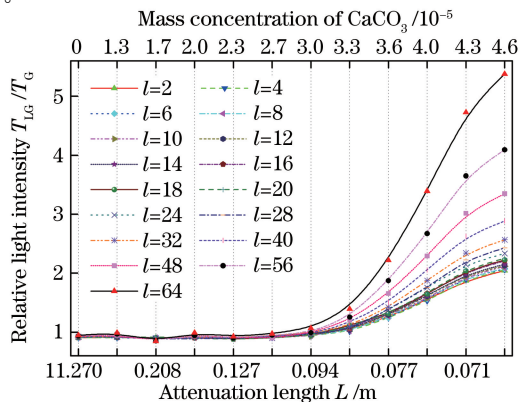


图 8 不同拓扑荷数的 LG 光束在不同浑浊水体下的相对光强曲线

Fig. 8 Curves of relative light intensity of LG beams with different topological charges in different turbid waters

分析可知, LG 光束的这一传输行为主要是因为光束中心存在相位奇点, 中心区域形成能量极少的暗区, 外围光环集中了绝大部分的光束能量。与高斯光束相比, 相同光束直径的 LG 光束在传播中受到的散射作用较弱, 故透射光强较强。LG 光束在传播过程中会出现向高阶光斑演化的特性, 具有外围光环逐渐扩大的特征, 受到的散射作用也将逐渐变弱, 从而有利于光束能量的传播。

图 8 中传输能力最强的  $l=64$  的 LG 光束并未在图 7 中体现出优势, 原因在于水体非常浑浊时 64 阶 LG 光束已退化为散射背景, 虽然透射能量较大, 但已经丢失了自身的光束特征。事实上, 在水下激光雷达和激光通信等领域, 除了透射光强, 人们更加关心的是透射光斑的能量密度, 因为这一指标直接影响回波强度和接收灵敏度。为此, 统计了 LG 光斑中光强下降到  $1/e$  时的相对能量密度, 即

$$\frac{D_{LG}}{D_G} = \frac{\left(\sum T_{LG}^i / \sum S_{LG}^i\right)_{T_{LG}^i \geq \max(T_{LG}^i)/e}}{\left(\sum T_G^i / \sum S_G^i\right)_{T_G^i \geq \max(T_G^i)/e}}, \quad (2)$$

式中  $\sum S_{LG}^i$ 、 $\sum S_G^i$  分别为 LG 光束和高斯光束的光强下降到  $1/e$  时对应的光斑像素面积,  $D_{LG}$ 、 $D_G$  分别为 LG 光束和高斯光束的能量密度。相对能量密度  $D_{LG}/D_G$  如图 9 所示。

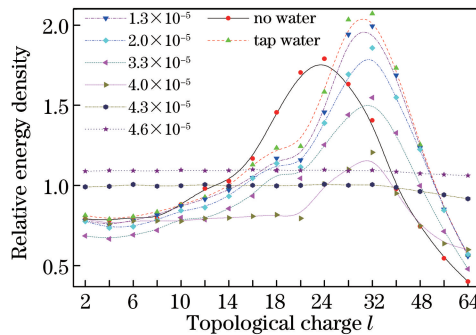


图 9 不同拓扑荷数的 LG 光束光斑的相对能量密度

Fig. 9 Relative energy density of LG beam spots with different topological charges

对比可见, 图 9 描述的传输行为与图 7 一致。对于严重浑浊的水体, 如  $\text{CaCO}_3$  质量浓度不低于 0.043%、相应衰减长度  $L \leq 0.071$  m 时, LG 光束均已退化为散射背景, 相对能量密度几乎不变。对于水体不太浑浊的情况, 与高斯光束相比,  $l=32$  的 LG 光束透射不同浑浊程度的水体后均有较高的能量密度; 然而在水无情况下,  $l=24$  时却对应着能量密度的最大值。产生这一现象的主要原因有两个: 1) 空气和水的折射率差异引入了光程差, LG 光束的传输演化特性使能量密度极值向低阶偏移; 2) 在相同传输距离时, LG 光束的光斑截面随拓扑荷数的增加先减小后缓慢增大, 即在该距离上, 某一拓扑荷数的 LG 光束具有能量密度极值, 这也是最为重要的原因。实验中, 与其他拓扑荷数相比,  $l=32$  的 LG 光束在成像透镜  $L_3$  物面处(光程约 2.67 m)聚集了最大的能量密度。

## 5 结 论

通过与高斯光束进行对比, 实验研究了 LG 涡旋光在浑浊水体下的传输特性。结果表明, 水体浑浊程度较小( $L > 0.118$  m)时, LG 光束与高斯光束的水下传输能力并无明显差异; 水体较浑浊( $L \leq 0.118$  m)时, 拓扑荷数越大, 光束截面越小, 受到的散射作用越弱, 故高阶 LG 光束具有更强的水下传输能力。但是, 对于严重浑浊的水体, LG 光束也将与高斯光束一样退化为散射背景, 丢失光束特征。LG 光束在传输过程中存在低阶光斑向高阶光斑演化的特性, 即光斑截面随拓扑荷数的增加先减小后缓慢增大, 因此在不同传输距离上均存在能够产生能量密度极值的最佳拓扑荷数。

实验中, 光程约为 2.67 m(水下传输距离为 1.176 m, 缸壁厚度为 24 mm)时,  $l=32$  的 LG 光束具有最高的光斑能量密度。后续可开展 LG 光束水下散射传输的仿真研究, 从理论上精确计算工程应用中所需的最佳拓扑荷数。

## 参 考 文 献

- [1] Allen L, Barnett S M, Padgett M J. Optical angular momentum[M]. Bristol: Institute of Physics Publishing, 2003: 31-35.
- [2] Allen L, Beijersbergen M W, Spreeuw R J, *et al.* Orbital angular momentum of light and the transformation of Laguerre-Gaussian laser modes[J]. Phys Rev A, 1992, 45(11): 8185-8189.
- [3] Mair A, Vaziri A, Weihs G, *et al.* Entanglement of the orbital angular-momentum states of photons[J]. Nature, 2001, 412(6844): 313-316.
- [4] Krenn M, Handsteiner J, Fink M, *et al.* Twisted photon entanglement through turbulent air across Vienna[J]. PNAS, 2015, 112(46): 14197-14201.
- [5] Paterson C. Atmospheric turbulence and orbital angular momentum of single photons for optical communication[J]. Phys Rev Lett, 2005, 94(15): 153901.
- [6] Willner A E, Huang H, Yan Y, *et al.* Optical communications using orbital angular momentum beams[J]. Adv Opt Photonics, 2015, 7(1): 66-106.
- [7] Lee W M, Yuan X C, Cheong W C. Optical vortex beam shaping by use of highly efficient irregular spiral phase plates for optical micromanipulation[J]. Opt Lett, 2004, 29(15): 1796-1798.
- [8] Liang Yansheng, Yao Baoli, Ma Baiheng, *et al.* Holographic optical trapping and manipulation based on phase-only liquid-crystal spatial light modulator[J]. Acta Optica Sinica, 2016, 36(3): 0309001.  
梁言生, 姚保利, 马百恒, 等. 基于纯相位液晶空间光调制器的全息光学捕获与微操纵[J]. 光学学报, 2016, 36(3): 0309001.
- [9] Lavery M P J, Robertson D J, Sponselli A, *et al.* Efficient measurement of an optical orbital-angular-momentum spectrum comprising more than 50 states[J]. New J Phys, 2013, 15(1): 013024.
- [10] Krenn M, Fickler R, Fink M, *et al.* Communication with spatially modulated light through turbulent air across Vienna[J]. New J Phys, 2014, 16(11): 113028.
- [11] Ge Xiaolu, Wang Benyi, Guo Chengshan. Beam broadening of vortex beams propagating in turbulent atmosphere[J]. Acta Optica Sinica, 2016, 36(3): 0301002.  
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.
- [12] Johnson E, Baghdady J, Byrd M, *et al.* Space division multiplexing of blue lasers for undersea communications[C]. IPC, 2015: 653-654.
- [13] Baghdady J, Miller K, Morgan K, *et al.* Multi-gigabit/s underwater optical communication link using orbital angular momentum multiplexing[J]. Opt Express, 2016, 24(9): 9794-9805.
- [14] Sun Cunzhi, Chen Ziyang, Pu Jixiong. Experimental study of tightly focused vortex beams through turbid media[J]. Acta Optica Sinica, 2014, 34(6): 0601002.  
孙存志, 陈子阳, 蒲继雄. 强聚焦涡旋光束经过散射介质的实验研究[J]. 光学学报, 2014, 34(6): 0601002.
- [15] Wang W B, Gozali R, Shi L, *et al.* Deep transmission of Laguerre-Gaussian vortex beams through turbid scattering media[J]. Opt Lett, 2016, 41(9): 2069-2072.
- [16] Brandon C, Kaitlyn M, Keith M, *et al.* Propagation of modulated optical beams carrying orbital angular momentum in turbid water[J]. Appl Opt, 2016, 55(31): C34-C38.
- [17] Guo Shuaifeng, Liu Kui, Sun Hengxin, *et al.* Generation of higher-order Laguerre-Gaussian beams by liquid crystal spatial light modulators[J]. Journal of Quantum Optics, 2015, 21(1): 86-92.  
郭帅凤, 刘 奎, 孙恒信, 等. 利用液晶空间光调制器产生高阶拉盖尔高斯光束[J]. 量子光学学报, 2015, 21(1): 86-92.