

## 水下拉盖尔-高斯涡旋光束及其叠加态传输特性

王明军<sup>1,2,3\*</sup>, 余文辉<sup>1</sup>, 黄朝军<sup>2</sup><sup>1</sup>西安理工大学自动化与信息工程学院, 陕西 西安 710048;<sup>2</sup>陕西理工大学物理与电信工程学院, 陕西 汉中 723001;<sup>3</sup>陕西省智能协同网络军民共建重点实验室, 陕西 西安 710126

**摘要** 通过实验研究了拉盖尔-高斯涡旋光束及其叠加态在水下湍流中的传输特性,充分考虑了不同温度差和盐度差的水流扩散产生的湍流对4种光束(高斯光束,阶数为0、拓扑荷数为6的拉盖尔-高斯涡旋光束,阶数为1、拓扑荷数为2与阶数为0、拓扑荷数为6的拉盖尔-高斯涡旋光叠加,阶数为1、拓扑荷数为2与阶数为0、拓扑荷数为10的拉盖尔-高斯涡旋光叠加)传输的影响,并对4种光束的漂移方差和闪烁指数进行深入讨论与分析。实验结果表明:随着湍流强度的增大,4种光束的漂移方差和闪烁指数都增大,相比其他3种光束,拉盖尔-高斯涡旋光束的漂移方差和闪烁指数较小;在较弱的湍流强度下,两种涡旋光叠加态的漂移方差和闪烁指数与拉盖尔-高斯涡旋光束相近。

**关键词** 物理光学; 拉盖尔-高斯涡旋光束; 涡旋光叠加态; 水下湍流; 闪烁指数

中图分类号 P733.3

文献标志码 A

DOI: 10.3788/AOS220992

## 1 引言

海洋覆盖了地球表面的71%,它调节着气候,拥有大量未被开发的资源<sup>[1]</sup>。利用先进的物理传感器和无人潜水器获取的海洋资源数据也需要进行传输。与水声通信相比,水下无线光通信技术具有更高的速率和更好的安全性,已成为水下环境监测、水下无线传感器网络、海上勘探、船舶、潜艇之间通信的关键<sup>[2-3]</sup>。1992年,Allen等<sup>[4]</sup>证明了拉盖尔-高斯(LG)涡旋光束携带轨道角动量,随后研究人员对LG涡旋光束在量子通信<sup>[5]</sup>、空间光通信<sup>[6-10]</sup>、目标探测<sup>[11]</sup>、微粒控制<sup>[12]</sup>等领域展开了广泛的研究。由于涡旋光束所有的涡旋模式都是正交的,可通过涡旋光的复用来进一步提高通信容量和频谱效率<sup>[13]</sup>。研究LG涡旋光束及其叠加态在水下湍流中的传输特性对水下涡旋光复用通信系统具有重要的意义。

近年来,LG涡旋光束在水下湍流中的传输特性受到了广泛关注。2016年,Wang等<sup>[14]</sup>对比研究了拓扑荷数为4和8时的LG涡旋光束与高斯光束在不同浑浊介质中的传输能力,结果表明LG涡旋光束在扩散区域的传输更有优势。彭波等<sup>[15]</sup>通过实验分析了具有不同拓扑荷数的LG涡旋光束在不同浑浊介质中的传输能力,并与高斯光束进行对比分析。潘孙翔等<sup>[16]</sup>

通过实验研究轨道角动量态在不同盐度的水下的传输特性,结果表明盐度越高,接收到的初始轨道角动量态的概率越低,并且轨道角动量态的串扰也越明显。卢腾飞等<sup>[17]</sup>利用循环泵控制水槽内的湍流强度,研究了拓扑荷数分别为2、4、6的LG涡旋光束在5.4 m和12.6 m传输距离下的闪烁指数变化。Zhang等<sup>[18]</sup>通过实验分析了拓扑荷数、温度梯度和盐度对分数阶LG涡旋光束在水下湍流中传输的影响,讨论了用于分数阶LG涡旋光束通信的最佳拓扑荷数的间隔及其对提高系统容量的帮助。孙艳玲等<sup>[19]</sup>搭建实验平台研究了不同拓扑荷数涡旋光束在经过湍流后与高斯光束进行干涉得到干涉条纹的偏移特性,结果表明,在较强湍流情况下,涡旋光束的传输能力随着拓扑荷数增大而增强。

综上所述,目前研究学者对LG涡旋光束叠加态在水下湍流信道中传输特性的研究较少。本文针对LG涡旋光束及其两种叠加态在水下湍流中的传输特性进行了研究,通过加入不同温度差和盐度差的水流来模拟温度和盐度随机扩散引起的水下湍流,对比研究了不同温度差和盐度差产生的湍流对高斯光束、LG涡旋光束及其两种叠加态光束的漂移和闪烁指数的影响。

## 2 基础理论

涡旋光叠加态是由具有不同阶数、不同拓扑荷数

收稿日期: 2022-04-19; 修回日期: 2022-06-28; 录用日期: 2022-08-01; 网络首发日期: 2022-08-10

基金项目: 国家自然科学基金重大研究计划培育项目(92052106)、国家自然科学基金(61771385,62101313)、陕西省杰出青年科学基金(2020JC-42)、固体激光技术重点实验室开放基金(6142404190301)、西安市高校人才服务企业工程项目(GXYD14.26)

通信作者: \*wangmingjun@xaut.edu.cn

的两束 LG 涡旋光束同轴叠加形成的, LG 涡旋光束的光场表达式<sup>[4]</sup>为

$$U_{p,l}(r, \varphi, z) = \sqrt{\frac{2p!}{\pi(p+|l|)!}} \times \frac{1}{\omega(z)} \left[ \frac{\sqrt{2}r}{\omega(z)} \right]^{|l|} \times \exp\left[ \frac{-r^2}{\omega^2(z)} \right] L_p^{|l|} \left[ \frac{2r^2}{\omega^2(z)} \right] \exp(il\varphi) \times \exp\left[ \frac{ik_0 r^2 z}{2(z^2 + z_R^2)} \right] \exp\left[ -i(2p + |l| + 1) \arctan\left( \frac{z}{z_R} \right) \right], \quad (1)$$

式中:  $p$  为阶数;  $l$  为拓扑荷数;  $r$  为柱坐标系下的半径;  $\varphi$  为柱坐标系下的角度; 瑞利长度  $z_R = (\pi\omega^2)/\lambda$ ,  $\lambda$  为光束的波长; 波数  $k_0 = 2\pi/\lambda$ ;  $\omega(z) = \omega_0 \sqrt{1 + (z/z_R)^2}$ ,  $\omega_0$  为高斯光束的束腰半径;  $L_p^{|l|}$  为拉盖尔多项式。

本文主要使用易于实验产生的阶数  $p=0$  和  $p=1$  的 LG 涡旋光束形成涡旋光叠加态。当  $z=0$  时, 式(1)可描述为

$$U_{1,l}(r, \varphi, 0) = \sqrt{\frac{2}{\pi(1+|l|)!}} \times \frac{1}{\omega_0} \left( \frac{\sqrt{2}r}{\omega_0} \right)^{|l|} \times \exp\left( \frac{-r^2}{\omega_0^2} \right) L_1^{|l|} \left( \frac{2r^2}{\omega_0^2} \right) \exp(il\varphi), \quad (2)$$

$$U_{0,l}(r, \varphi, 0) = \sqrt{\frac{2}{\pi(|l|)!}} \times \frac{1}{\omega_0} \left( \frac{\sqrt{2}r}{\omega_0} \right)^{|l|} \times \exp\left( \frac{-r^2}{\omega_0^2} \right) L_0^{|l|} \left( \frac{2r^2}{\omega_0^2} \right) \exp(il\varphi). \quad (3)$$

两束 LG 涡旋光束相干叠加<sup>[20]</sup>可以表示为

$$U_{p_1, l_1, p_2, l_2}(r, \varphi, z) = U_{p_1, l_1}(r, \varphi, z) + U_{p_2, l_2}(r, \varphi, z). \quad (4)$$

本次实验所选取的 4 种光束分别为高斯光束, 阶数为 0、拓扑荷数为 6 的 LG 涡旋光束  $U_{0,6}$ , 阶数为 1 与 0、拓扑荷数为 2 与 6 的 LG 涡旋光叠加态  $U_{1,2,0,6}$  和阶数为 1 与 0、拓扑荷数为 2 与 10 的 LG 涡旋光叠加态  $U_{1,2,0,10}$ 。为了方便区分, 以下将这 4 种光束称为高斯光束、LG 涡旋光束、涡旋光叠加态 1 和涡旋光叠加态 2。将高斯光束作为参考光束, LG 涡旋光束与  $U_{1,2}$  叠加形成涡旋光叠加态 1, 涡旋光叠加态 2 是由 LG 涡旋光束拓扑荷数增加到 10 后与  $U_{1,2}$  叠加形成的。对 4 种光束的光强分布进行仿真, 取光束波长  $\lambda = 532 \text{ nm}$ , 束腰半径  $\omega_0 = 5 \text{ mm}$ , 传输距离  $z = 0$ , 结果如图 1 所示。图 1(a)~(d) 所示分别为高斯光束、LG 涡旋光束、涡旋光叠加态 1 和涡旋光叠加态 2 在  $z = 0$  时的光强分布数值仿真结果。

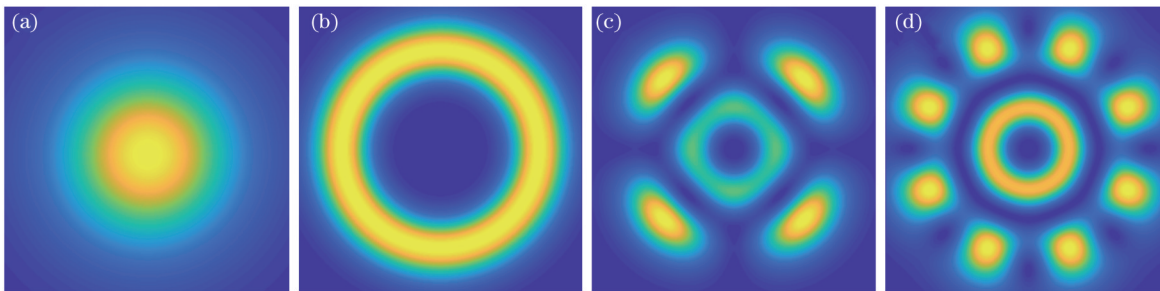


图 1 4 种光束的光强分布仿真结果。(a)高斯光束;(b) LG 涡旋光束;(c)涡旋光叠加态 1;(d)涡旋光叠加态 2

Fig. 1 Simulation results of light intensity distribution of four beams. (a) Gaussian beam; (b) LG vortex beam; (c) vortex light superposition state 1; (d) vortex light superposition state 2

温度和盐度的不均匀性造成水体折射率非均匀分布, 光束在水下信道中传输时, 会发生光斑畸变和光束漂移<sup>[21]</sup>。通常使用光斑质心位置的变化程度来反映光束漂移的大小, 光斑的质心<sup>[22]</sup>定义为

$$\rho_c = \frac{\iint \rho I(\rho) d\rho}{\iint I(\rho) d\rho}, \quad (5)$$

式中:  $I$  为  $\rho$  处的功率密度;  $\rho_c$  为光斑的质心坐标;  $\rho$  为光斑图像上任意像素点的坐标。质心的漂移方差为

$$\sigma_\rho^2 = \langle \rho_c \rangle^2 = \frac{\iint \iint (\rho_1 \cdot \rho_2) I(\rho_1) I(\rho_2) d\rho_1 d\rho_2}{\left[ \iint I(\rho) d\rho \right]^2}, \quad (6)$$

在  $x$  和  $y$  方向的光束漂移独立统计的情况下, 光束质心的漂移方差可以表示为

$$\sigma_\rho^2 = \sigma_x^2 + \sigma_y^2. \quad (7)$$

通常使用闪烁指数大小来反映激光在水下湍流传输后功率的随机起伏程度<sup>[23]</sup>, 可以表示为

$$\sigma^2(z) = \frac{\langle P^2(z) \rangle - \langle P(z) \rangle^2}{\langle P(z) \rangle^2}, \quad (8)$$

$$P(z) = \iint I(x, y, z) dx dy, \quad (9)$$

式中:  $P$  为接收到的光功率;  $z$  为传输距离;  $\langle \cdot \rangle$  表示统计平均;  $x$  和  $y$  表示光斑图像像素点的坐标。

### 3 实验方案设计

在海洋介质中, 折射率波动受到温度和盐度波动影响<sup>[24]</sup>。本文通过加入一定温度差和盐度差的水来模拟水下湍流, 研究湍流对光斑造成的影响。热水在冷水中扩散, 使得水体折射率非均匀分布, 以此模拟由温度差引起的水下湍流。热水被泵入冷水中会发生扩散

现象, 使得水体折射率呈非均匀分布。当温度差增大时, 由热水与冷水之间的扩散产生的温度不均匀程度增大, 水体折射率非均匀分布程度也会增强, 湍流强度增大。同理, 通过盐水的扩散使得水体折射率呈非均匀分布, 以此模拟盐度差引起的水下湍流。

图 2 为实验装置示意图。本实验发射端所使用的激光器工作波长为 532 nm, 光斑模式为 TEM<sub>00</sub>; SLM 为纯相位反射式空间光调制器, 其入射角小于 10°, 分辨率为 1920 pixel × 1080 pixel; 水缸长 1 m、宽 0.5 m、高 0.5 m, 水缸壁厚 1 cm, 水缸内水量为 159.9 L; 用来制造湍流的小水箱长 0.2 m、宽 0.2 m、高 0.35 m, 小水箱内水量为 6.2 L; 所使用的水泵流量为 23 mL/s; 接收端 CCD 的分辨率为 4096 pixel × 3000 pixel。

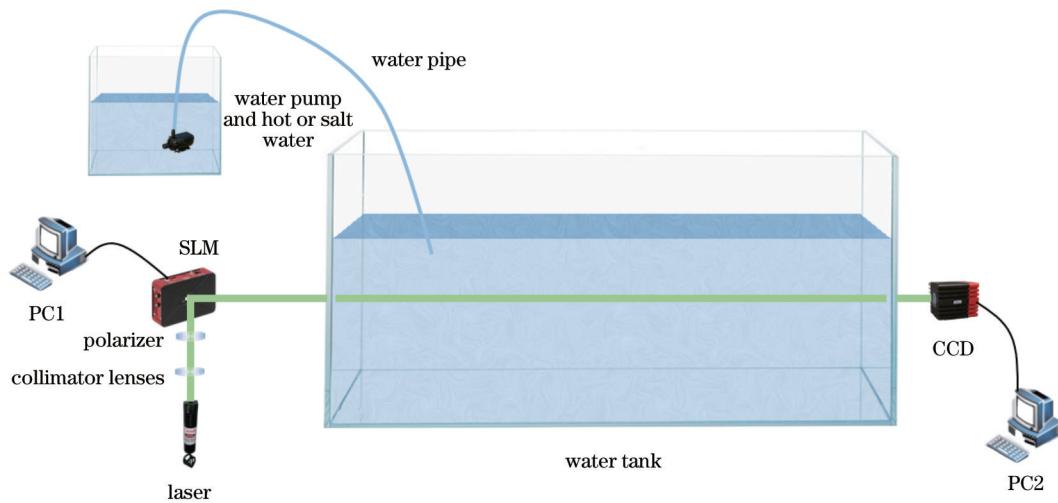


图 2 模拟水下湍流环境实验示意图

Fig. 2 Schematic of the experiment for simulating underwater turbulence environment

激光器输出的高斯光束经过准直镜和偏振镜后到达 SLM, 个人计算机 PC1 将全息图加载到空间光调制器上, 用来产生 LG 涡旋光束及其叠加态, 光束经 SLM 反射后通过模拟水下湍流环境到达接收端, 接收端 CCD 导出光强图像到 PC2。在由温度差引起的水下湍流实验中, 先往水缸中注入 20 °C 的清水, 温度差以 5 °C 为间隔, 在 0~15 °C 温度差设置 4 组实验, 将清水加热至实验所需的温度, 并将特定温度的清水通过水泵泵入水缸中; 在由盐度差引起的水下湍流实验中, 先在水缸中注入 20 °C 的清水, 盐度差以 1‰ 为间隔, 在 0~3‰ 盐度差设置 4 组实验, 依次计算 4 组实验盐水所需食用盐的质量, 将食用盐加到一定量的清水中配成特定盐度的盐水, 并泵入 20 °C 的清水中。将热水或盐水通过水泵泵入水缸后, 待 CCD 接收到的光斑开始发生变化时记录光强图像数据。为了减小实验误差, 每组实验持续测量 100 s, 记录 2000 个数据, 并重复进行多次实验。将 CCD 接收到的光强图像进行灰度化处理, 并计算每幅光强图像的灰度值来反映光功率大小, 从而计算出闪烁指数。

## 4 实验结果数据处理与分析

### 4.1 光斑图对比

图 3 所示为 4 种光束通过不同强度的湍流后的光斑变化。图 3(a)~(d) 所示为在无湍流情况下高斯光束、LG 涡旋光束、涡旋光叠加态 1 和涡旋光叠加态 2 的光斑; 图 3(e)~(h) 所示为在 10 °C 温度差情况下高斯光束、LG 涡旋光束、涡旋光叠加态 1 和涡旋光叠加态 2 的光斑; 图 3(i)~(l) 所示为在 2‰ 盐度差情况下高斯光束、LG 涡旋光束、涡旋光叠加态 1 和涡旋光叠加态 2 的光斑。从图 3 可以看出, 4 种光束经过由温度差和盐度差引起的湍流后都产生了不同程度的畸变, 相较于其他 3 种光束, LG 涡旋光束的光斑变化程度较小, 这是因为 LG 涡旋光束的光强都集中在环上, 中心暗核比较大, 湍流对其影响较小。

### 4.2 光束漂移对比

每组实验开始前先在水槽中加入清水, 采集 1000 幅没有产生畸变的光斑图来标定无湍流时光斑质心的位置。使用 CCD 采集一次实验中 8 组 16000 幅光强图

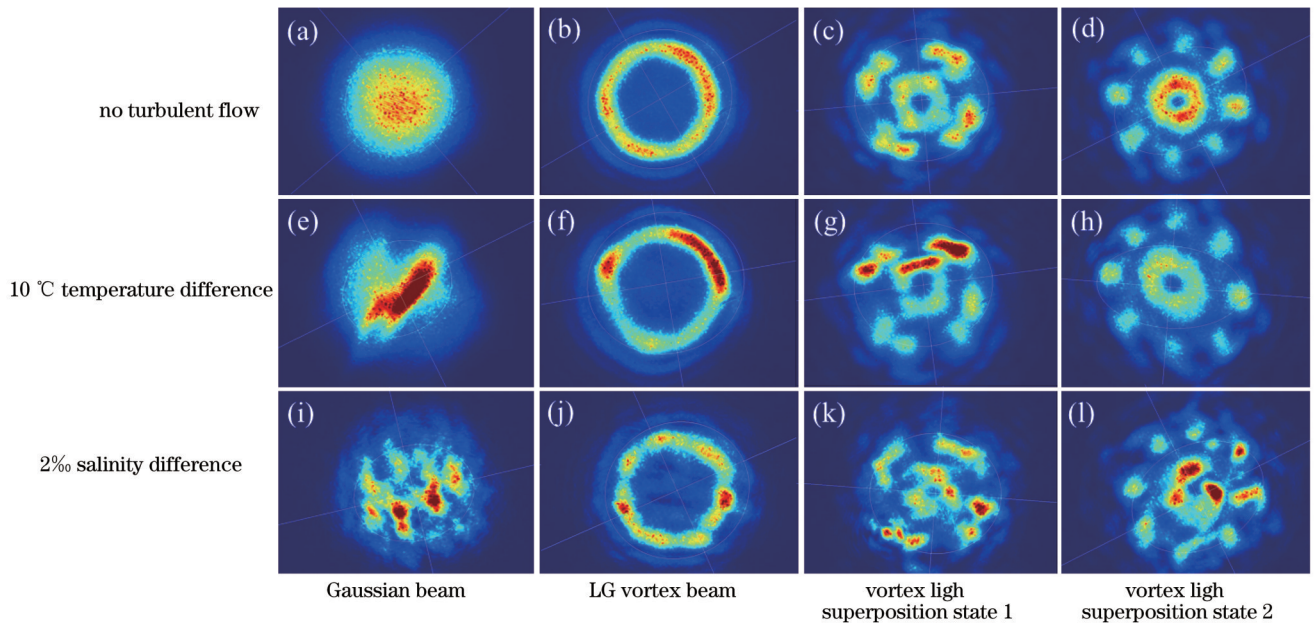


图 3 4 种光束通过不同强度的湍流后的光斑图

Fig. 3 Spot diagrams of four beams passing through turbulent flow with different intensities

像数据,并根据式(5)计算每组实验的光斑质心位置。  
图 4 所示为 4 种光束通过不同强度的湍流后光束质心

偏离标定位置的分布情况。为了避免偶然因素对光束  
漂移结果的影响,图 4 中每幅图将一组实验 2000 个数

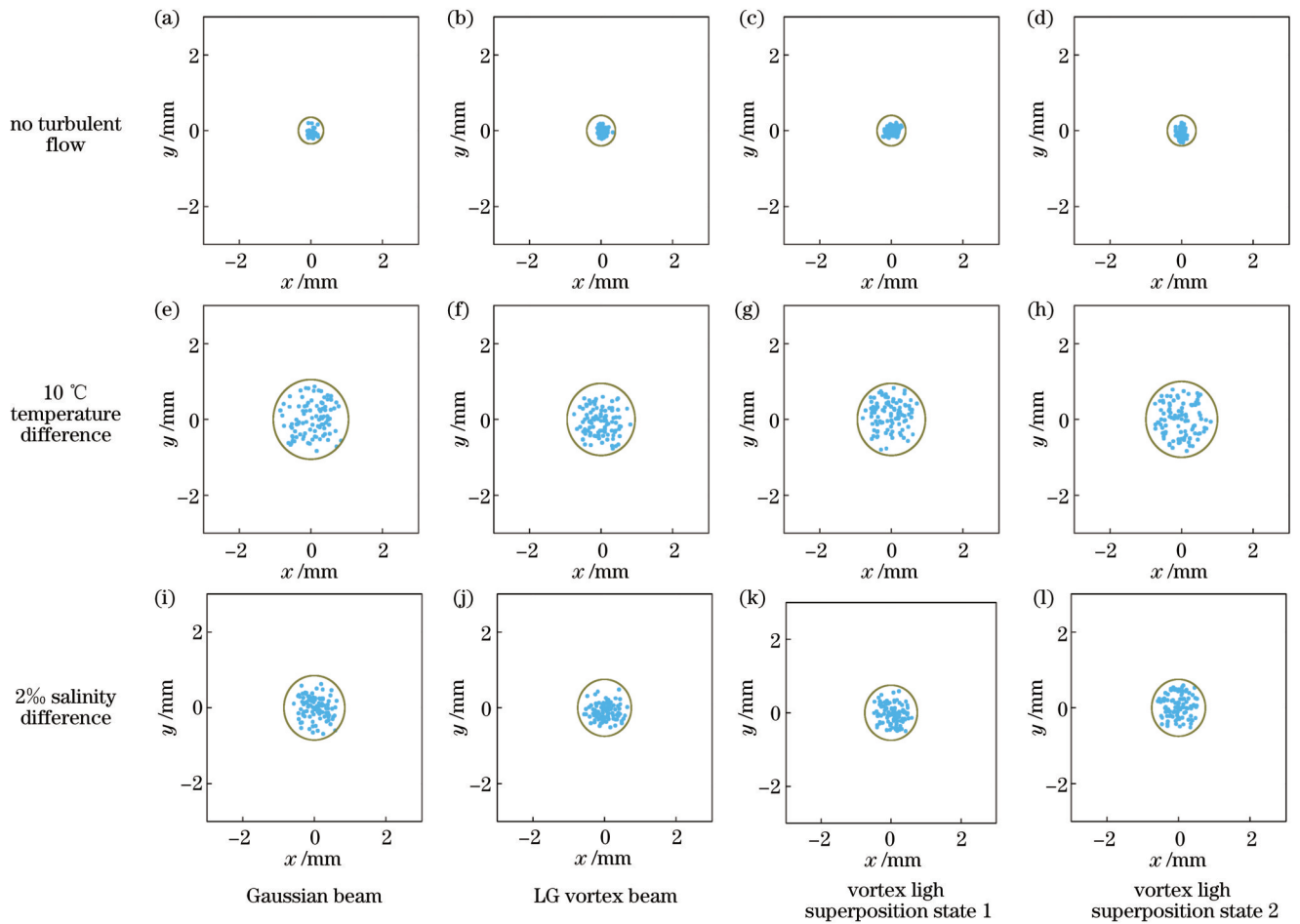


图 4 4 种光束通过不同强度的湍流后的光束漂移

Fig. 4 Beam drift of four beams after passing through turbulent flow of different intensities

据的每 20 个平均为 1 个数据点。图 4(a)~(d)所示为在无湍流情况下高斯光束、LG 涡旋光束、涡旋光叠加态 1 和涡旋光叠加态 2 的光束漂移情况；图 4(e)~(h)所示为在 10 °C 温度差情况下高斯光束、LG 涡旋光束、涡旋光叠加态 1 和涡旋光叠加态 2 的光束漂移情况；图 4(i)~(l)所示为在 2‰ 盐度差情况下高斯光束、LG 涡旋光束、涡旋光叠加态 1 和涡旋光叠加态 2 的光束漂移情况。从图 4 可以看出,4 种光束经过由温度差和盐度差引起的湍流后在标定位置中心附近出现的概率减小,而在远离标定位置中心出现的概率增大。在相同的模拟湍流环境下,高斯光束的质心偏移标定位置中心的分布程度最强, LG 涡旋光束质心偏移标定位置中心的分布程度最弱,两种涡旋光叠加态的质心偏移

程度居于二者之间。

为了更直观地说明 4 种光束通过不同强度的湍流后的光束漂移变化,根据式(6)和式(7)计算 4 种光束通过不同强度的湍流后的光束漂移方差,结果如图 5 所示。从实验结果可以看出:随着温度差的增加,4 种光束的漂移方差都呈现上升趋势,这是因为随着温度差的增加,湍流强度增大;随着盐度差的增加,4 种光束的漂移方差都呈现上升趋势,这是因为随着盐度差的增加,湍流强度增大。当温度差或盐度差一定时,高斯光束的漂移方差较大, LG 涡旋光束的漂移方差较小,两种涡旋光叠加态的漂移方差居于二者之间,并且涡旋光叠加态 1 的光束漂移方差小于涡旋光叠加态 2 的光束漂移方差。

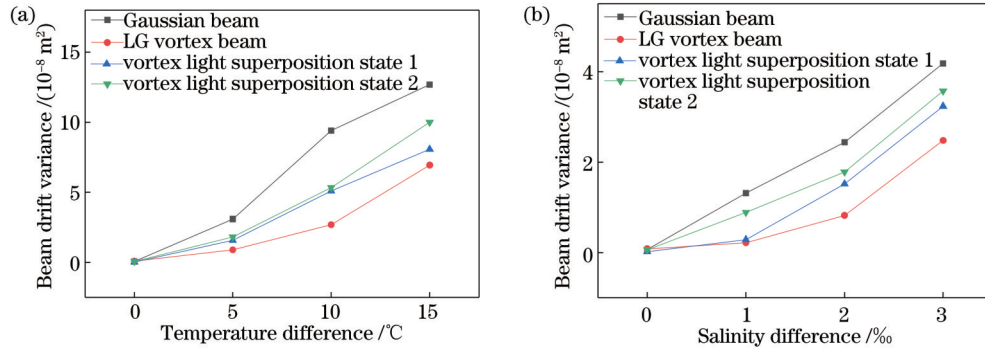


图 5 4 种光束通过不同强度的湍流后的光束漂移方差。(a)不同温度差;(b)不同盐度差

Fig. 5 Beam drift variance of four beams passing through turbulent flow with different intensities. (a) Different temperature differences; (b) different salinity differences

### 4.3 闪烁指数对比

先将一次实验所得的 8 组 16000 幅光强图像进行灰度化处理,并计算每幅光强图的灰度值来反映光功率大小;再对得到的功率进行归一化处理,得到 4 种光

束通过不同湍流强度后的归一化功率。图 6 所示为阶数为 0、拓扑荷数为 6 的 LG 涡旋光束通过不同强度的湍流后的功率抖动。当温度差为 10 °C 和盐度差为 2‰ 时, LG 涡旋光束在接收端的功率抖动幅度明显增大。

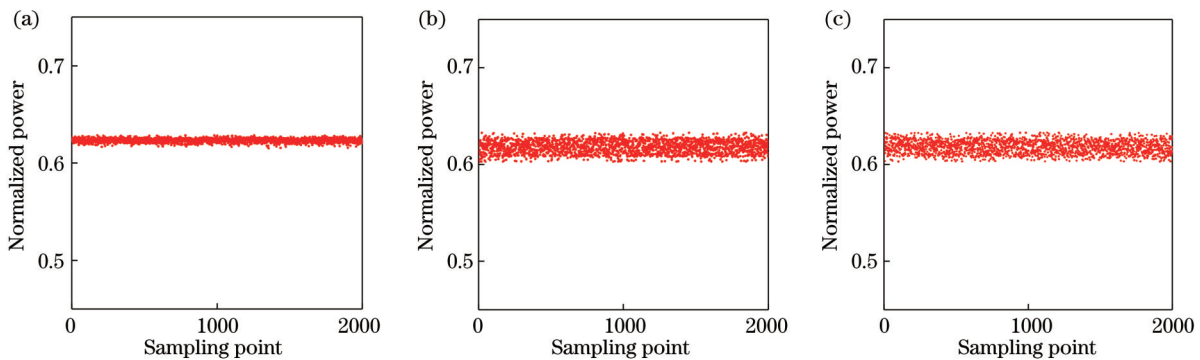


图 6 阶数为 0、拓扑荷数为 6 的 LG 涡旋光束通过不同强度的湍流后的功率抖动。(a)无湍流;(b) 10 °C 温度差;(c) 2‰ 盐度差

Fig. 6 Power jitter of an LG vortex beam with order 0 and topological charge 6 after passing through turbulent flow with different intensities. (a) No turbulent flow; (b) 10 °C temperature difference; (c) 2‰ salinity difference

根据式(8)分别计算 10 次实验中 4 种光束在不同温度差引起的湍流情况下的闪烁指数,结果如图 7 所示。从图 7 可以看出,10 次实验中 4 种光束的闪烁指数均随着温度差的增加而增大,而 LG 涡旋光束相较于其他 3 种光束保持较小的闪烁指数。

为说明 4 种光束通过由不同温度差引起的水下湍流后的闪烁指数变化,综合 10 次实验数据计算 4 种光束在不同温度差引起的湍流情况下的闪烁指数,结果如图 8 所示。从图 8 可以看出,随着温度差的增加,4 种光束的闪烁指数都呈现上升趋势。当温度差一定

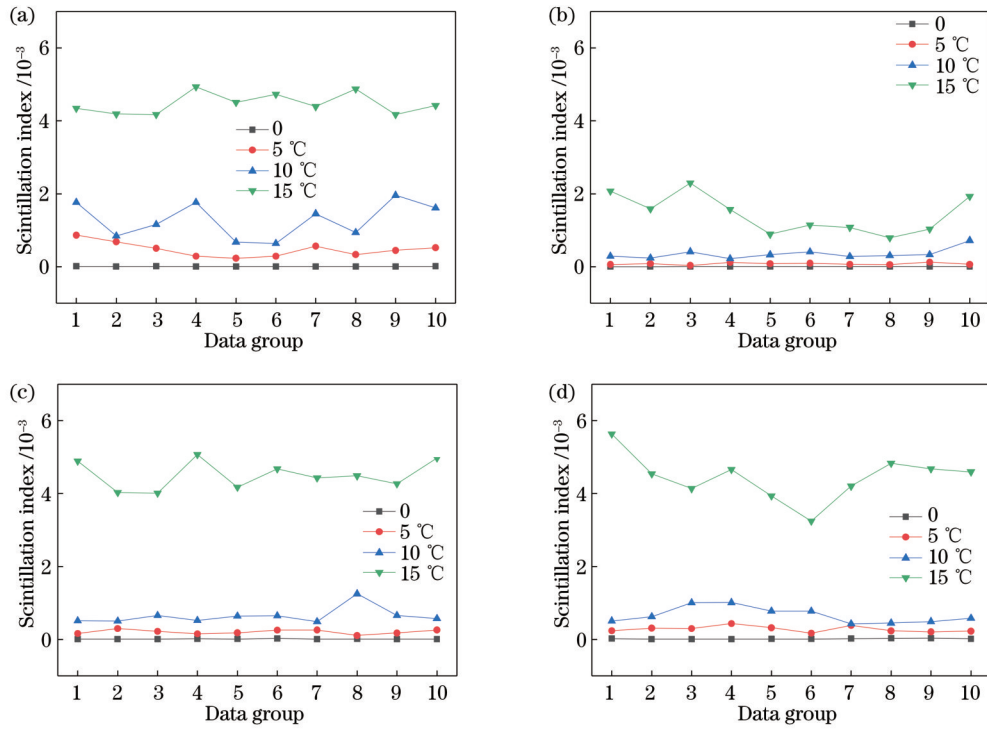


图 7 多次实验中 4 种光束通过不同温度差引起的湍流后的闪烁指数。(a)高斯光束;(b) LG 涡旋光束;(c) 涡旋光叠加态 1;(d) 涡旋光叠加态 2

Fig. 7 Scintillation indices of four beams after passing through turbulent flow caused by different temperature differences in multiple experiments. (a) Gaussian beam; (b) LG vortex beam; (c) vortex light superposition state 1; (d) vortex light superposition state 2

时,高斯光束的闪烁指数较大, LG 涡旋光束的闪烁指数较小,两种涡旋光叠加态的闪烁指数居于二者之间,并且涡旋光叠加态 1 的闪烁指数小于涡旋光叠加态 2 的闪烁指数。在温度差为 0、5、10 °C 时,两种涡旋光叠加态与 LG 涡旋光束的闪烁指数比较接近。

的闪烁指数变化,综合 10 次实验数据计算 4 种光束在不同盐度差引起的湍流情况下的闪烁指数,结果如图 10 所示。从图 10 可以看出,随着盐度差的增加,4 种光束的闪烁指数都呈现上升趋势。当盐度差一定时,高斯光束的闪烁指数较大, LG 涡旋光束的闪烁指数较小,两种涡旋光叠加态的闪烁指数居于二者之间,并且涡旋光叠加态 1 的闪烁指数小于涡旋光叠加态 2 的闪烁指数。当盐度差为 0 和 1‰ 时,两种涡旋光叠加态与 LG 涡旋光束的闪烁指数比较接近。

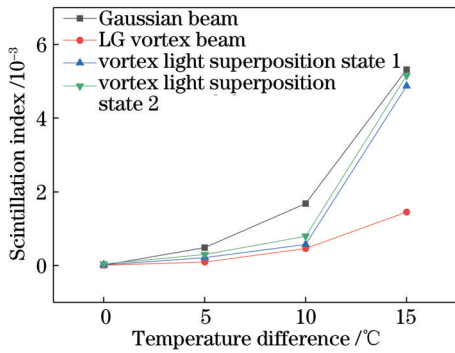


图 8 4 种光束通过由不同温度差引起的湍流后的闪烁指数  
Fig. 8 Scintillation indices of four beams passing through turbulent flow caused by different temperature differences

根据式(8)分别计算 10 次实验中 4 种光束在不同盐度差引起的湍流情况下的闪烁指数,结果如图 9 所示。从图 9 可以看出,10 次实验中 4 种光束的闪烁指数均随着盐度差的增加而增大,而高斯光束相较于其他 3 种光束有较大的闪烁指数。

### 5 结 论

通过实验研究了高斯光束、LG 涡旋光束、涡旋光叠加态 1、涡旋光叠加态 2 通过由不同温度差和盐度差引起的水下湍流后的光束漂移和闪烁指数变化。实验结果表明:随着温度差和盐度差的增加,湍流强度增大,4 种光束的漂移方差和闪烁指数均增大,相较于其他 3 种光束, LG 涡旋光束的漂移方差和闪烁指数较小;当温度差或盐度差相同时,涡旋光叠加态 1 的漂移方差和闪烁指数都小于涡旋光叠加态 2 的漂移方差和闪烁指数;当温度差为 0 和 5 °C 时,两种涡旋光叠加态与 LG 涡旋光束的漂移方差比较接近;当温度差为 0、5、10 °C,两种涡旋光叠加态与 LG 涡旋光束的闪烁指数比较接近;当盐度差为 0 和 1‰ 时,两种涡旋光叠加态与 LG 涡旋光束的闪烁指数比较接近。综合分析:在水下湍流较弱的情况下,使用涡旋光叠加态通信可

为说明 4 种光束通过由不同盐度差引起的湍流后

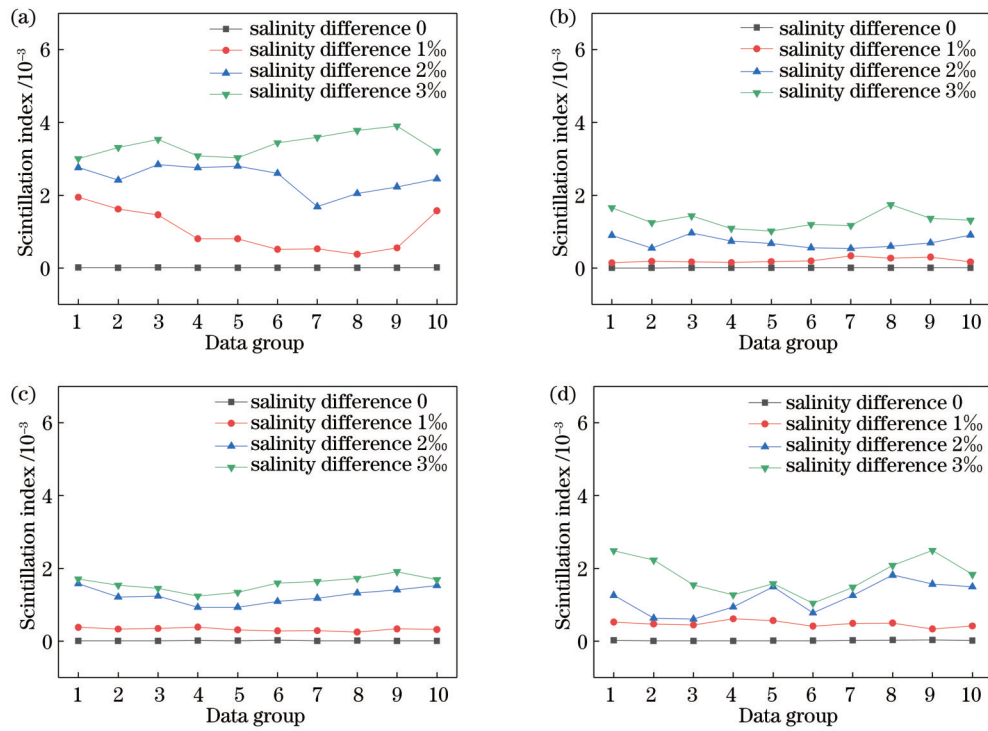


图 9 多次实验中 4 种光束通过不同盐度差引起的湍流后的闪烁指数。(a)高斯光束;(b)LG 涡旋光束;(c)涡旋光叠加态 1;(d)涡旋光叠加态 2

Fig. 9 Scintillation indices of four beams after passing through turbulent flow caused by different salinity differences in multiple experiments. (a) Gaussian beam; (b) LG vortex beam; (c) vortex light superposition state 1; (d) vortex light superposition state 2

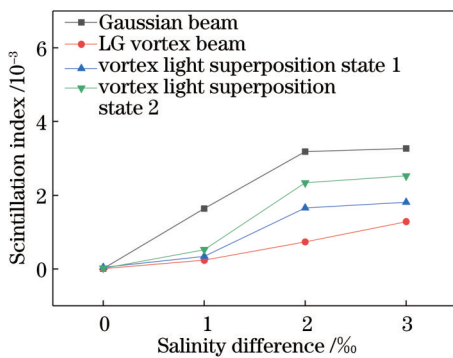


图 10 4 种光束通过不同盐度差湍流后的闪烁指数

Fig. 10 Scintillation indices of four beams passing through turbulent flow caused by different salinity differences

以提高通信容量和频谱效率;在水下湍流较强的情况下,使用 LG 涡旋光束可获得更好的传输质量。本文通过设计实验研究了 4 种光束在不同盐度、温度模拟水下湍流环境下的传输特性,为开展海洋水下光通信提供预先信道传输数据。

参 考 文 献

[1] Visbeck M. Ocean science research is key for a sustainable future [J]. Nature Communications, 2018, 9: 690.  
 [2] Zeng Z Q, Fu S, Zhang H H, et al. A survey of underwater optical wireless communications[J]. IEEE Communications Surveys & Tutorials, 2017, 19(1): 204-238.  
 [3] Liu L B, Zhou S L, Cui J H. Prospects and problems of

wireless communication for underwater sensor networks[J]. Wireless Communications and Mobile Computing, 2008, 8(8): 977-994.  
 [4] 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.  
 [5] Nagali E, Sciarrino F, de Martini F, et al. Quantum information transfer from spin to orbital angular momentum of photons[J]. Physical Review Letters, 2009, 103(1): 013601.  
 [6] 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.  
 Lü 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.  
 [7] 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.  
 [8] Kai C H, Huang P, Shen F, et al. Orbital angular momentum shift keying based optical communication system[J]. IEEE Photonics Journal, 2017, 9(2): 7902510.  
 [9] 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.  
 [10] 南久航, 韩一平. 双路多进制涡旋光通信[J]. 光学学报, 2021, 41(12): 1206001.  
 Nan J H, Han Y P. Dual-channel multiband vortex optical communication[J]. Acta Optica Sinica, 2021, 41(12): 1206001.  
 [11] Lin M T, Liu P G, Gao Y, et al. Super-resolution orbital angular momentum based radar targets detection[J]. Electronics

- Letters, 2016, 52(13): 1168-1170.
- [12] Prentice P, MacDonald M P, Frank T G, et al. Manipulation and filtration of low index particles with holographic Laguerre-Gaussian optical trap arrays[J]. Optics Express, 2004, 12(4): 593-600.
- [13] 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.
- [14] Wang W B, Gozali R, Shi L Y, et al. Deep transmission of Laguerre-Gaussian vortex beams through turbid scattering media[J]. Optics Letters, 2016, 41(9): 2069-2072.
- [15] 彭波, 钟昆, 李中云. 拓扑荷数对拉盖尔-高斯涡旋光浑浊水下传输的影响[J]. 光学学报, 2017, 37(6): 0601005.  
Peng B, Zhong K, Li Z Y. Influence of topological charge on turbid underwater propagation of Laguerre-Gaussian vortex beams[J]. Acta Optica Sinica, 2017, 37(6): 0601005.
- [16] 潘孙翔, 赵生妹, 王乐, 等. 水下轨道角动量态传输特性的实验研究[J]. 光学学报, 2018, 38(6): 0606004.  
Pan S X, Zhao S M, Wang L, et al. Experimental investigation of underwater propagation characteristics of orbital angular momentum[J]. Acta Optica Sinica, 2018, 38(6): 0606004.
- [17] 卢腾飞, 刘永欣, 蒲继雄. 涡旋光束在水下湍流中传输的闪烁因子的实验研究[J]. 光子学报, 2019, 48(12): 1214004.  
Lu T F, Liu Y X, Pu J X. Experimental study on scintillation index of vortex beam propagation in underwater turbulence[J]. Acta Photonica Sinica, 2019, 48(12): 1214004.
- [18] Zhang W H, Wang L, Wang W N, et al. Propagation property of Laguerre-Gaussian beams carrying fractional orbital angular momentum in an underwater channel[J]. OSA Continuum, 2019, 2(11): 3281-3287.
- [19] 孙艳玲, 张家瑞, 鲁振中. 拉盖尔-高斯涡旋光束在水下湍流中的传输特性[J]. 光学学报, 2019, 39(10): 1001005.  
Sun Y L, Zhang J R, Lu Z Z. Propagation characteristics of Laguerre-Gaussian vortex beams in underwater turbulence[J]. Acta Optica Sinica, 2019, 39(10): 1001005.
- [20] Anguita J A, Herreros J, Djordjevic I B. Coherent multimode OAM superpositions for multidimensional modulation[J]. IEEE Photonics Journal, 2014, 6(2): 7900811.
- [21] Guo Y J, Trichili A, Alkhazragi O, et al. On the reciprocity of underwater turbulent channels[J]. IEEE Photonics Journal, 2019, 11(2): 7901909.
- [22] 饶瑞中. 现代大气光学[M]. 北京: 科学出版社, 2012: 57-108.  
Rao R Z. Modern atmospheric optics[M]. Beijing: Science Press, 2012: 57-108.
- [23] Eyyuboglu H T. Estimation of aperture averaged scintillations in weak turbulence regime for annular, sinusoidal and hyperbolic Gaussian beams using random phase screen[J]. Optics & Laser Technology, 2013, 52: 96-102.
- [24] Nikishov V V, Nikishov V I. Spectrum of turbulent fluctuations of the sea-water refraction index[J]. International Journal of Fluid Mechanics Research, 2000, 27(1): 82-98.

## Transmission Characteristics of Underwater Laguerre-Gaussian Vortex Beam and Its Superposition States

Wang Mingjun<sup>1,2,3\*</sup>, Yu Wenhui<sup>1</sup>, Huang Chaojun<sup>2</sup>

<sup>1</sup>School of Automation and Information Engineering, Xi'an University of Technology, Xi'an 710048, Shaanxi, China;

<sup>2</sup>School of Physics and Telecommunication Engineering, Shaanxi University of Technology, Hanzhong 723001, Shaanxi, China;

<sup>3</sup>Shaanxi Civil-Military Integration Key Laboratory of Intelligence Collaborative Networks, Xi'an 710126, Shaanxi, China

### Abstract

**Objective** Underwater wireless optical communication technology has higher speed and better security than underwater acoustic communication technology, and it has become a key tool to realize the communication between underwater environment monitoring, underwater wireless sensor networks, marine exploration, ships, and submarines. Since all vortex modes of vortex beams are orthogonal, the multiplexing of the vortex beams can further improve the communication capacity and spectral efficiency. Underwater vortex optical transmission can provide a new way to realize ultra-wideband and high-speed underwater wireless optical information transmission. In this paper, the transmission characteristics of the Laguerre-Gaussian (LG) vortex beam and its two superposition states in underwater turbulence are studied. The underwater turbulence caused by random diffusion of temperature and salinity is simulated by adding water with different temperature and salinity differences. The effects of turbulence generated by different temperature and salinity differences on the beam drift and scintillation index of the Gaussian beam, LG vortex beam, and the two superposition states are investigated. The research results can provide an important reference for the research on the transmission of vortex beams and their superposition states in underwater channels.

**Methods** In marine media, refractive index fluctuations are controlled by temperature and salinity fluctuations. This paper uses a constant flow pump to add water with a certain temperature and salinity differences to simulate underwater turbulence and studies the influence of underwater turbulence on the light spot. In the experiment on underwater turbulence



caused by the temperature difference, this paper first adds 20 °C clean water into the water tank, sets up four experimental groups with a temperature difference ranging from 0 to 15 °C (an interval of 5 °C), then heats the clean water to the temperature required in the experiment, and finally pours the water with a specific temperature into the water tank through a water pump. In the experiment on underwater turbulence caused by salinity difference, the paper first adds 20 °C clear water into the water tank, sets up four experimental groups with a salinity difference ranging from 0 to 3‰ (an interval of 1‰), and then calculates the quality of edible salt used for the experimental salt water in the four groups. In addition, the paper adds edible salt to a certain amount of clear water to prepare salt water with a specific concentration and then pumps it into 20 °C clear water. After the hot water or salt water is added to the water tank through the water pump, the paper records the light intensity image data when the light spot received by the CCD begins to change. In order to reduce the experimental error, each group of experiments continuously measures and records 2000 data and is repeated for many times. The light intensity image received by CCD is grayed, and the gray value of each light intensity image is calculated to reflect the light power, so as to calculate the scintillation index.

**Results and Discussions** Gaussian beam, LG vortex beam with order 0 and topological charge 6, vortex light superposition state 1, and vortex light superposition state 2 all produce different distortions after turbulence caused by temperature and salinity differences. Compared with the other three beams, the LG vortex beam has a slight spot variation (Fig. 3). After the turbulence caused by temperature and salinity differences, the probability of the four beams appearing near the center of the calibration position decreases, while that appearing far away from the center of the calibration position increases. In the same simulated turbulent environment, the distribution degree of the centroid offset of the Gaussian beam from the center of the calibration position is the largest, while that of the LG vortex beam from the center of the calibration position is the smallest, with the centroid offset degree of the two vortex light superposition states falling in the middle (Fig. 4). When the temperature difference or salinity difference is constant, the beam drift variance of Gaussian beam is large, and that of LG vortex beam is small. In addition, the beam drift variance of vortex light superposition state 1 is smaller than that of vortex light superposition state 2 (Fig. 5). When the temperature difference is constant, the scintillation index of the Gaussian beam is larger, and that of the LG vortex beam is smaller. The scintillation index of vortex light superposition state 1 is smaller than that of vortex light superposition state 2. When the temperature difference is 0, 5, and 10 °C, the scintillation index of the two vortex light superposition states is close to that of the LG vortex beam (Fig. 8). When the salinity difference is constant, the scintillation index of the Gaussian beam is larger, and that of the LG vortex beam is smaller. The scintillation index of vortex light superposition state 1 is smaller than that of vortex light superposition state 2. When the salinity difference is 0 and 1‰, the scintillation index of the two vortex light superposition states is close to that of the LG vortex beam (Fig. 10).

**Conclusions** In this paper, the beam drift and scintillation index changes of Gaussian beam, LG vortex beam with order 0 and topological charge 6, vortex light superposition state 1, and vortex light superposition state 2 after underwater turbulence caused by different temperature and salinity differences are experimentally studied. The experimental results show that with the increase in temperature and salinity differences, the turbulence intensity increases, and the beam drift variance and scintillation index of the four beams rise. Compared with those of the other three beams, the beam drift variance and scintillation index of the LG vortex beam are smaller. When the temperature difference or salinity difference is the same, the beam drift variance and scintillation index of vortex light superposition state 1 are smaller than those of vortex light superposition state 2. When the temperature difference is 0 and 5 °C, the beam drift variance of the two vortex light superposition states is close to that of the LG vortex beam. When the temperature difference is 0, 5, and 10 °C, the scintillation index of the two vortex light superposition states is close to that of the LG vortex beam. When the salinity difference is 0 and 1‰, the scintillation index of the two vortex light superposition states is close to that of the LG vortex beam. According to the comprehensive analysis, under weak underwater turbulence, the use of vortex optical superposition state communication can improve communication capacity and spectral efficiency. Furthermore, under strong underwater turbulence, the LG vortex beam has better transmission quality.

**Key words** physical optics; Laguerre-Gaussian vortex beam; vortex light superposition state; underwater turbulence; scintillation index