

# 水下轨道角动量态传输特性的实验研究

潘孙翔<sup>1</sup>, 赵生妹<sup>1,2</sup>, 王乐<sup>1</sup>, 姚浩<sup>1</sup>, 李威<sup>1</sup>

<sup>1</sup>南京邮电大学信号处理与传输研究院, 江苏 南京 210003;

<sup>2</sup>南京邮电大学宽带无线通信与传感网技术教育部重点实验室, 江苏 南京 210003

**摘要** 通过实验方法研究轨道角动量(OAM)态水下传输特性。首先搭建 OAM 态水下光通信系统, 然后通过 OAM 态展开谱和接收到的初始及其相邻 OAM 态概率变化曲线来研究其水下传输能力。实验结果表明: 随着盐度的增加, 初始 OAM 态的概率明显降低; 相邻 OAM 态的传输概率随着拓扑荷间隔的增加而减少。

**关键词** 光通信; 轨道角动量态; 水下光通信; 水下传输特性

中图分类号 TN929.3

文献标识码 A

doi: 10.3788/AOS201838.0606004

## Experimental Investigation of Underwater Propagation Characteristics of Orbital Angular Momentum

Pan Sunxiang<sup>1</sup>, Zhao Shengmei<sup>1,2</sup>, Wang Le<sup>1</sup>, Yao Hao<sup>1</sup>, Li Wei<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Institute of Signal Processing and Transmission, Nanjing University of Posts and Telecommunications, Nanjing, Jiangsu 210003, China;

<sup>2</sup>Key Lab of Broadband Wireless Communication and Sensor Network Technology, Ministry of Education, Nanjing University of Posts and Telecommunications, Nanjing, Jiangsu 210003, China

**Abstract** We study the underwater propagation characteristics of orbital angular momentum (OAM) states by experimental method. We build an underwater optical communication system of OAM states, and then discuss the underwater transmission capacity of OAM states by the spread spectra and the probability curves of the original and adjacent OAM states. The experimental results show that the probability of original OAM state decreases significantly with the increasing of salinity, and the propagation probability decreases with the increasing of topological charge interval.

**Key words** optical communication; orbital angular momentum state; underwater optical communication; underwater propagation characteristics

**OCIS codes** 060.4510; 010.4450; 010.4455; 270.5585

## 1 引 言

涡旋光是一种具有螺旋相位波前的光束<sup>[1]</sup>。Allen 等<sup>[2]</sup>首次发现拉盖尔-高斯(LG)模的光场是涡旋光,它具有  $\exp(i\ell\varphi)$  式相位结构,且每个光子的轨道角动量(OAM)为  $\ell\hbar$ ,其中  $\ell$  为拓扑荷数或角向指数, $\hbar$  为普朗克常数, $\varphi$  为方位角。OAM 态的拓扑荷可以取  $(-\infty, +\infty)$  内的任意整数值,并且不同阶次的 OAM 态模式函数在相应的希尔伯特空间中

相互正交。由于这种特殊的波前结构<sup>[3]</sup>,OAM 涡旋光已广泛应用于光通信、量子通信、微粒波导等领域<sup>[4-7]</sup>。

OAM 的复用极大地提高了通信系统的容量。Wang 等<sup>[8]</sup>通过正交幅度调制(16QAM)来实现 4 路不同 OAM 态调制光信号的传输,每路信号的传输速率为 12.7 Gbit/s,总速率可达到 1.37 Tbit/s; Ren 等<sup>[9]</sup>在自由空间光通信(FSO)系统中通过 OAM 复用实现 120 m 范围内总速率为 400 Gbit/s

收稿日期: 2017-11-27; 收到修改稿日期: 2018-01-03

基金项目: 国家自然科学基金(61475075, 61271238)、教育部“宽带无线通信与传感网技术”重点实验室开放课题(NYKL2015011)

作者简介: 潘孙翔(1995—),男,硕士研究生,主要从事轨道角动量通信方面的研究。E-mail: pansx1995@qq.com

导师简介: 赵生妹(1968—),女,教授,博士生导师,主要从事量子信息处理、无线网络中的信号处理等方面研究。

E-mail: zhaosm@njupt.edu.cn(通信联系人)

的通信,并且误码率小于  $3.8 \times 10^{-3}$ 。鉴于 FSO 系统中大气湍流对 OAM 态信息传输能力的影响,张磊等<sup>[10]</sup>仿真研究了不同大气湍流强度对相邻 OAM 模式的串扰;赵生妹等<sup>[11]</sup>提出两种 OAM 模式串扰的差错校正方法,并通过实验验证该校正法的可行性。

蓝绿光(450~550 nm 波段)在水下的衰减比其他光波段小得多,水下光通信存在一个透光窗口<sup>[12]</sup>。随着水下通信技术的需求越来越多,高速、有效的水下 OAM 光通信技术受到人们的广泛关注。彭波等<sup>[13]</sup>对比研究了大量不同拓扑荷数值的 LG 光束在不同浑浊程度水体中的能量密度,发现拓扑荷数值较大的 LG 光具有更强的水下传输能力;Morgan 等<sup>[14]</sup>研究了 OAM 态光束在水下传输的衰减情况,发现 OAM 态光束与高斯光束在弹道及其扩散区域具有相同的衰减量;Baghdady 等<sup>[15]</sup>采用空间复用方式传送两路传输速率均为 1.5 Gbit/s 的 OAM 态光信号,实现了水下 OAM 态无线光通信,总传输速率可达 3 Gbit/s,平均误码率为  $2.073 \times 10^{-4}$ 。然而,上述研究并未考虑经过水下信道后,相邻 OAM 态之间的串扰以及 OAM 态的展开情况。

尽管水下 OAM 态光通信速率已经达到 Gbit/s 量级,但是与大气 FSO 相比,水下 OAM 态光通信仍然存在通信速率过低、通信距离过短等问题<sup>[16-18]</sup>。水下 OAM 态传输特性是研究速率高、距离长的水下 OAM 通信技术的基础。本文采用实验方法研究水下 OAM 态传输特性,分析水下环境对 OAM 态传输的影响,以及水体环境的盐度对 OAM 态通信的影响,计算 OAM 态展开谱,同时测量初始态及其相邻 OAM 态的概率随着水体盐度的变化曲线。

## 2 实验设置

图 1 是 OAM 态在水下环境中进行通信系统性能分析的实验装置示意图。本实验采用 LG 光束表征 OAM 态<sup>[2]</sup>。激光器输出的高斯光束垂直入射到空间光调制器 SLM1 上,其中实验所用激光器件为准直激光二极管模块,波长为 532 nm,功率为 4.5 mW;SLM1 为 Holoeye 的 PLUTO-VIS-006A 型纯相位反射式空间光调制器,像素为 1920 pixel $\times$ 1080 pixel。文献[19-20]的研究结果表明,在空间光调制器上加载不同的螺旋相位全息图(相位掩模),可实现对光束从高斯态到 OAM 态的调制。在实验

中,在 SLM1 上加载 OAM 拓扑荷值为 5 的相位掩模,以完成  $\ell=5$  的 OAM 态调制。小孔 A1 的作用是获得清晰的 OAM 态一级衍射图。将透镜 L1、L2 组成  $2f$  系统,以减小光束半径,避免 LG 光束在水下出现严重的散射现象。L1 和 L2 焦距分别设为 150 mm 和 50 mm,且它们之间的距离等于其焦距之和。实验所用的水箱尺寸为 1.0 m $\times$ 0.4 m $\times$ 0.4 m,水箱壁的厚度为 10 mm。为了模拟较为复杂的水下环境,实验中通过在水中添加不同质量的 NaCl 晶体来模拟不同盐度的水体。反射镜是镀银反光镜,可改变实验光路,其波长范围为 400~750 nm。小孔 A2 的作用是滤除杂散光,同时保证 OAM 态不发生小孔衍射。透镜 L3、L4 的作用是汇聚 OAM 态光束,使其全部入射到 SLM2 的中心位置,其中 L3 和 L4 的焦距分别为 200 mm 和 50 mm。SLM2 为 Holoeye 的 PLUTO-VIS-006A 型纯相位反射式空间光调制器,其像素为 1920 pixel $\times$ 1080 pixel。通过在 SLM2 上分别加载拓扑荷为  $\ell'$  ( $\ell'=1,2,\dots$ ) 的相位掩模,可测得入射 OAM 态在  $\ell'$  上的展开谱。小孔 A3 的作用是保证探测器只探到高斯模,该可变光阑的型号为 IDA15-P5 (IDA15/M-P5),最小半径为 0.8 mm。实验所用光探测器型号为 Thorlabs 的 PM100USB 光功率计,功率测量范围为 100 pW~250 W,能量测量范围为 3  $\mu$ J~15 J。使用的 CCD 的型号为 Thorlabs 公司的 BC106N-VIS/M。因为反射式空间光调制器、反射镜都将输入的 OAM 拓扑荷从  $\ell$  转换为  $-\ell$ ,因此 SLM2 上应设置相反于 SLM1 的相位掩模。

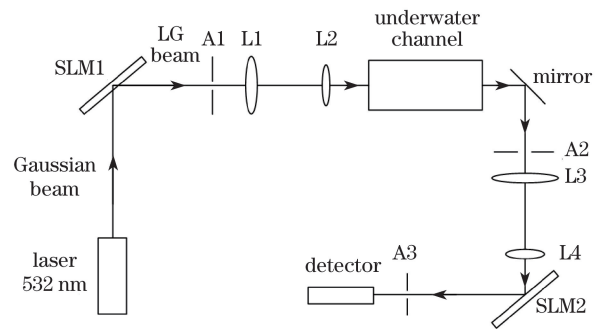


图 1 OAM 态水下通信系统的实验装置示意图  
Fig. 1 Experimental schematic of an underwater communication system using OAM state

激光器产生的高斯模在经过 SLM1 上产生的相位掩模反射后转化成 LG 模。在柱坐标下, LG 光束的光场强度分布为

$$u_{\ell}(r, \varphi, z) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}} R_{\ell, p}(r, z) \exp(i\ell\varphi), \quad (1)$$

$$R_{\ell,p}(r,z) = \sqrt{\frac{2p!}{\pi(p+|\ell|)!}} \times \frac{1}{\omega(z)} \left[ \frac{r\sqrt{2}}{\omega^2(z)} \right]^{|\ell|} \times L_{\ell,p} \left[ \frac{2r^2}{\omega^2(z)} \right] \exp \left[ \frac{-r^2}{\omega^2(z)} \right] \exp \left[ \frac{-ikr^2z}{2(z^2+z_R^2)} \right] \times \exp \left[ i(2p+|\ell|+1) \tan^{-1} \left( \frac{z}{z_R} \right) \right], \quad (2)$$

式中： $r$ 为传播的径向半径； $z$ 为传输距离； $p$ 为 OAM 态径向指标； $\omega(z) = \omega_0 \sqrt{1+(z/z_R)^2}$ ， $\omega_0$ 为束腰半径， $z_R = \pi\omega_0^2/\lambda$ 为瑞利距离； $k = 2\pi/\lambda$ 为波数， $\lambda$ 为波长； $L_{\ell,p}(\cdot)$ 为拉盖尔多项式。

当 LG 光束在水下信道传输时，由于温度、盐度以及湍流等因素的影响，LG 模的相位和幅度发生改变<sup>[21-22]</sup>，OAM 态的模式发生串扰。由于不同拓扑荷的 OAM 态间相互正交，接收端的 OAM 模式可展开为各种 OAM 态的叠加<sup>[10]</sup>：

$$u'(r,\varphi,z) = \sum_m a_m u_m(r,\varphi,z), \quad (3)$$

式中： $a_m$ 拓扑荷值为  $m$  的 OAM 态的展开系数； $u_m(r,\varphi,z)$ 拓扑荷值为  $m$  的 OAM 态的光强分布； $u'(r,\varphi,z)$ 接收到的 OAM 叠加态。随着盐度、温度的变化，OAM 态经过水下环境后，不同 OAM 态的展开系数  $a_m$  会发生改变。利用高斯模与 LG 模 ( $\ell \neq 0$ ) 的正交性，可以从多个叠加的 OAM 态中提取出各 OAM 态的展开系数。除改变光路外，反射镜还可将输入的 OAM 态拓扑荷取反：

$$u''(r,\varphi,z) = \sum_m a_m u_{-m}(r,\varphi,z). \quad (4)$$

当光束通过相位掩模为  $\ell'$  的 SLM2 时，输出的 LG 模为

$$u'''(r,\varphi,z) = u''(r,\varphi,z) \exp(i\ell'\varphi) = \sum_m a_m u_{-m}(r,\varphi,z) \exp(i\ell'\varphi) = \sum_m a_m \frac{1}{\sqrt{2\pi}} R_{m,p}(r,z) \times \exp[i(\ell' - m)\varphi]. \quad (5)$$

由此可见，当  $\ell' \neq m$  时，接收态仍是  $\ell' - m$  的 OAM 态，相应的能量呈环状分布；而当  $\ell' = m$  时，OAM 态退回到高斯态，其能量聚集于光轴中心。因此可通过单模光纤或者小孔区分高斯态和 OAM 态。通过小孔 A3 过滤后的光束强度为

$$E_m = \left| \frac{1}{\sqrt{2\pi}} a_m \int_0^R R_{m,p}(r,z) dr \right|^2, \quad (6)$$

同时，定义  $\ell' = m$  的 OAM 态的传输概率  $p_m$  为

$$p_m = E_m / \sum_{\ell} E_{\ell}. \quad (7)$$

当 SLM2 上加载不同的相位掩模时，可得到发送 OAM 态在接收端的展开谱。

在实验过程中，通过在水中添加不同质量的 NaCl 晶体模拟不同盐度的水体环境，因此水体的盐度定义为

$$s = \frac{m_{\text{NaCl}}}{m_{\text{solu}}} \times 100\%, \quad (8)$$

式中： $m_{\text{NaCl}}$ 为 NaCl 的质量； $m_{\text{solu}}$ 为溶液的质量。

海水折射率的起伏主要由温度变化和盐度变化引起，并且盐度变化引起的光学湍流对光束的影响比温度变化引起的影 响大得多<sup>[23]</sup>。折射率  $n$  的变化值可表示为温度起伏  $T'$  和盐度起伏  $S'$  的线性近似<sup>[23]</sup>： $\delta_n = -AT' + BS'$ ，其中  $A = 2.6 \times 10^{-4} \text{ L}/(^{\circ})$ ， $B = 1.75 \times 10^{-4} \text{ L}/(^{\circ})$ 。Nikishov 等<sup>[24]</sup>将海洋湍流介质折射率起伏空间标量谱表示为

$$E_n(\kappa) = C_0 \chi_n \epsilon^{-\frac{1}{3}} \kappa^{-\frac{5}{3}} [1 + C_1 (\kappa\eta)^{\frac{2}{3}}] \times \frac{\omega^2\theta \exp(-A_T\delta) + \exp(-A_T\delta) - \omega(1+\theta)\exp(-A_{TS}\delta)}{\omega^2\theta + 1 - \omega(1+\theta)}, \quad (9)$$

式中：Obukhov-Corrsin 常数  $C_0 = 0.7$ ； $C_1 = 2.35$ ； $\eta$ 为Kolmogorov 内尺寸； $\omega$ 为温度与盐度导致的海洋光学湍流的比值，且  $\omega \in [-5, 0]$ ； $\theta = \kappa_T/\kappa_S$ ， $\kappa_T$ 为湍流热量扩散系数， $\kappa_S$ 为湍流盐度扩散系数； $\chi_n = \alpha^2 \chi_T + \frac{\alpha^2}{\omega^2} \chi_T - \frac{2\alpha^2}{\omega} \chi_T$ ， $\alpha = 2.6 \times 10^{-4} \text{ L}/(^{\circ})$ ， $\chi_T$ 为均方温度耗散率； $\epsilon$ 为单位海水的动能耗散率； $\delta = 8.284(\kappa\eta)^{\frac{4}{3}} + 1.978(\kappa\eta)^2$ ， $A_T = 1.863 \times 10^{-2}$ ， $A_S = 1.9 \times 10^{-4}$ ， $A_{TS} = 9.41 \times 10^{-3}$ 。

由此可见，在温度等条件保持不变时，盐度越高，水下折射率变化越大，光学湍流的空间标量谱变化越大。

### 3 结果与分析

为了验证水下 OAM 态的传输特性，首先在 SLM1 上加载  $\ell = 5$  的相位掩模时，此时 SLM2 接收到的不同相位掩模如图 2 所示。对于  $\ell' = -1, -2, \dots, -9$ ，相位从 0 变化到  $2\pi$  分别出现了 1 至 9 次，且变化方向为反向。图 3 所示为  $\ell = 5, \ell' = -1, -2, \dots, -9$  时，光束分析仪拍摄的接收光斑图案。

OAM 态经过 SLM2 的反向相位掩模后生成如图 3 的光斑图案。从图 3 可以看出：当  $\ell' = -5$  时，接收到的光斑中心光强呈现点状； $\ell' \neq -5$  时，光斑能量呈现环状，并且随着  $\ell'$  与  $-5$  的差值越大，光斑中心光强越小，环状半径越大。这说明，仅当  $\ell'$  与发

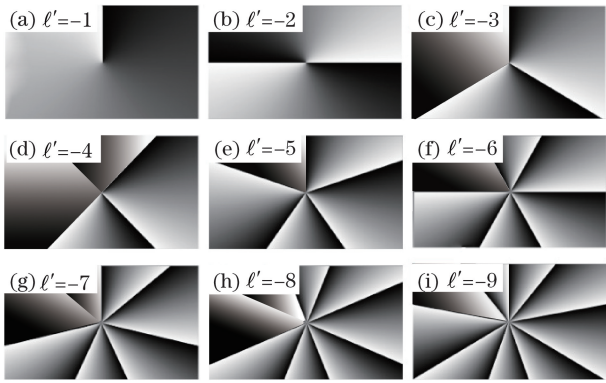


图 2 相位掩模

Fig. 2 Phase masks

送端  $\ell$  值相反时, OAM 态才会退回高斯态; 其余的  $\ell'$  生成光斑为  $\ell + \ell'$  的 OAM 态, 结果图案呈环状, 且环半径随着  $|\ell + \ell'|$  增大而增大。这表明不同 OAM 态接收时光斑的中心能量有明显区别, OAM 态水下传输是可行的。

水下环境影响着 OAM 态的传输。图 4 所示为不同盐度水体的 LG 光束展开谱, 其中发送端拓扑

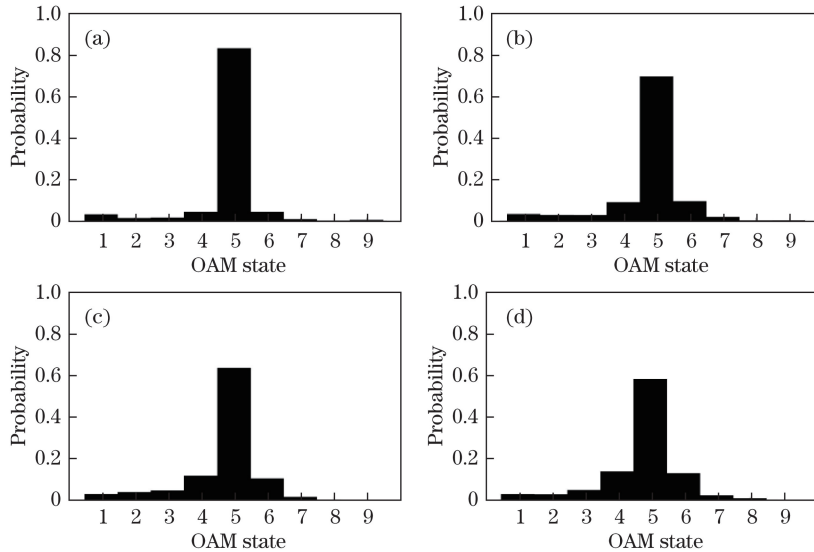


图 4  $\ell=5$  的 LG 光束在不同盐度下的展开谱。(a)  $s=0\%$ ; (b)  $s=5.22\%$ ; (c)  $s=9.92\%$ ; (d)  $s=12.80\%$

Fig. 4 Spread spectra of LG beam with  $\ell=5$  in different salinities. (a)  $s=0\%$ ;

(b)  $s=5.22\%$ ; (c)  $s=9.92\%$ ; (d)  $s=12.80\%$

将  $\ell' = -1, -2, \dots, -9$  的全息相位图接收产生的各光斑中心光强归一化, 计算接收到各 OAM 态的概率, 从而测得  $\ell=5$  在不同盐度的水下环境的展开谱。从图 4 可以看出: 随着盐度的增加,  $\ell=5$  的 LG 模的展开谱明显由“陡”变“缓”, 接收到初始 OAM 态的概率明显下降; 与  $\ell=5$  拓扑荷值间隔越远, OAM 态的概率越低。

图 5 所示为不同盐度下相邻 OAM 态 ( $\Delta = -2, -1, 1, 2$ ) 间串扰率的分布曲线。从图 5 可以看

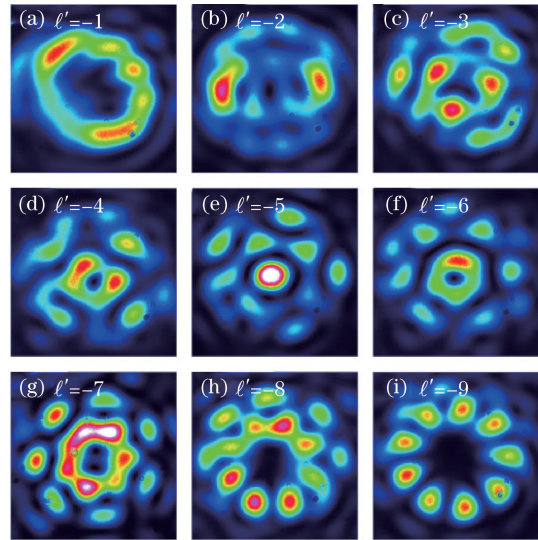


图 3 相位掩模产生的光斑图案

Fig. 3 Light spot patterns with phase mask

荷值  $\ell=5$ , 接收端全息相位图的 OAM 态为  $\ell' = -1, -2, \dots, -9$ 。实验时, 在水中添加不同质量的 NaCl 晶体, 模拟不同盐度的水下环境。

出: 随着盐度的增加, OAM 态串扰越明显; 当盐度增大到 12% 时, OAM 态的串扰率已由原来 16.77% 上升到 41.51%; 相邻 OAM 态 ( $\Delta = \pm 1$ ) 比  $\Delta = \pm 2$  或间隔更大的 OAM 态的串扰率大;  $\ell$  间隔相同时, 拓扑荷值较大的 OAM 态接收到的相对概率越小。

## 4 结 论

通过实验研究 OAM 态的水下传输特性, 通过测量接收图案中心光强, 获得 OAM 态在水下环境



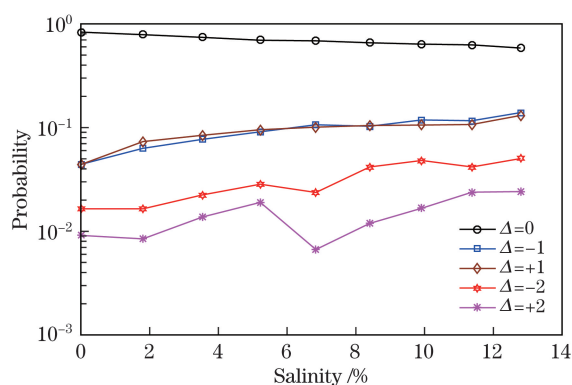


图 5 不同盐度下接收到 OAM 态的概率

Fig. 5 Probability of receiving OAM states in different salinities

传输时的展开谱。分析了不同盐度对 OAM 态展开谱及 OAM 态间串扰影响。实验结果表明:盐度对 OAM 态展开谱具有重要影响;随着盐度增加,接收端测得初始 OAM 态的概率显著下降,OAM 态串扰也越明显, $\Delta = \pm 1$  的相邻 OAM 态比  $\Delta = \pm 2$  的 OAM 态的串扰率大。

## 参 考 文 献

- [1] Soskin M S, Vasnetsov M V. Singular optics[J]. Progress in Optics, 2001, 42: 219-276.
- [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]. Physical Review A, 1992, 45(11): 8185-8189.
- [3] Ge X L, Wang B Y, Guo C S. Beambroadening 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.
- [4] Molina-Terriza G, Vaziri A, Reháček J, *et al.* Triggered qutrits for quantum communication protocols[J]. Physical Review Letters, 2004, 92(16): 167903.
- [5] Paterson C. Atmospheric turbulence and orbital angular momentum of single photons for optical communication[J]. Physical Review Letters, 2005, 94(15): 153901.
- [6] Luo W, Cheng S B, Yuan Z Z, *et al.* Power-exponent-phase vortices for manipulating particles[J]. Acta Optica Sinica, 2014, 34(11): 1109001.  
罗伟, 程书博, 袁战忠, 等. 幂指数相位涡旋光束用于微粒操控[J]. 光学学报, 2014, 34(11): 1109001.
- [7] Mair A, Vaziri A, Weihs G, *et al.* Entanglement of the orbital angular momentum states of photons[J]. Nature, 2001, 412(6844): 313-316.
- [8] 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.
- [9] Ren Y, Wang Z, Liao P, *et al.* Experimental characterization of a 400 Gbit/s orbital angular momentum multiplexed free-space optical link over 120 m[J]. Optics Letters, 2016, 41(3): 622-625.
- [10] Zhang L, Su X F, Zhang X, *et al.* Study of orbital angular momentum mode crosstalk caused by atmospheric turbulence based on Kolmogorov model in free space optical communication[J]. Acta Optica Sinica, 2014, 34(s2): s201004.  
张磊, 宿晓飞, 张霞, 等. 基于 Kolmogorov 模型的大气湍流对于空间光通信轨道角动量模式间串扰影响的研究[J]. 光学学报, 2014, 34(s2): s201004.
- [11] Zhao S M, Jiang X C, Gong L Y, *et al.* Communications using orbital angular momentum multiplexing[J]. Journal of Nanjing University of Posts and Telecommunications (Natural Science Edition), 2015, 35(6): 1-13.  
赵生妹, 蒋欣成, 巩龙延, 等. 轨道角动量态复用通信研究[J]. 南京邮电大学学报(自然科学版), 2015, 35(6): 1-13.
- [12] Duntley S Q. Light in the Sea[J]. Journal of the Optical Society of America, 1963, 53(2): 214-233.
- [13] 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.  
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.
- [14] Morgan K S, Johnson E G, Cochenour B M. Attenuation of beams with orbital angular momentum for underwater communication systems[C]. Proceedings of IEEE, 2016: 15798898.
- [15] 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.
- [16] Oubei H M, Li C, Park K H, *et al.* 2.3 Gbit/s underwater wireless optical communications using directly modulated 520 nm laser diode[J]. Optics Express, 2015, 23(16): 20743-20748.
- [17] Shen C, Guo Y, Oubei H M, *et al.* 20-meter underwater wireless optical communication link with 1.5 Gbps data rate[J]. Optics Express, 2016, 24(22): 25502-25509.
- [18] Oubei H M, Duran J R, Janjua B, *et al.* 4.8 Gbit/s 16-QAM-OFDM transmission based on compact 450-nm

- laser for underwater wireless optical communication[J]. Optics Express, 2015, 23(18): 23302-23309.
- [19] Curtis J E, Grier D G. Modulated optical vortices[J]. Optics Letters, 2003, 28(11): 872-874.
- [20] 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.
- [21] Cheng M, Zhang Y, Zhu Y, *et al.* Effects of non-Kolmogorov turbulence on the orbital angular momentum of Hankel-Bessel-Schell beams[J]. Optics & Laser Technology, 2015, 67: 20-24.
- [22] Zhu Y, Zhang L C, Zhang Y X. Spiral spectrum of Airy-Schell beams through non-Kolmogorov turbulence[J]. Chinese Optics Letters, 2016, 14(4): 042101-042105.
- [23] Lu W, Liu L, Sun J. Influence of temperature and salinity fluctuations on propagation behaviour of partially coherent beams in oceanic turbulence[J]. Journal of Optics A, 2006, 8(12): 1052-1058.
- [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.