

拉盖尔-高斯涡旋光束在水下湍流中的传输特性

孙艳玲, 张家瑞, 鲁振中*

西安电子科技大学物理与光电工程学院, 陕西 西安 710071

摘要 提出了一种基于涡旋光干涉条纹偏移检测的水下湍流识别方法。利用随机相位屏法对拉盖尔-高斯光束在湍流中的传输及干涉特性进行理论模拟。在此基础上, 实验研究了不同拓扑荷数涡旋光束经湍流场后与高斯光束干涉所得条纹的偏移特性。实验及理论结果表明: 在较强湍流环境中, 拓扑荷数越大, 涡旋光束传输能力越强; 相同湍流强度下, 拓扑荷数越大, 干涉条纹位置偏移量越小; 相同拓扑荷数涡旋光的干涉条纹偏移量随湍流强度的增大而增大。这表明, 涡旋光干涉条纹偏移检测法可有效地检测湍流强度, 识别舰船尾流。

关键词 大气光学; 水下激光; 涡旋光束; 水下湍流; 干涉; 条纹偏移

中图分类号 P733.3

文献标识码 A

doi: 10.3788/AOS201939.1001005

Propagation Characteristics of Laguerre-Gaussian Vortex Beams in Underwater Turbulence

Sun Yanling, Zhang Jiarui, Lu Zhenzhong*

School of Physics and Optoelectronic Engineering, Xidian University, Xi'an, Shaanxi 710071, China

Abstract An underwater turbulence recognition method based on the detection of vortex interference stripe displacement is proposed. The transmission and interference characteristics of the Laguerre-Gaussian beam in underwater turbulence are simulated using the random phase screen method. The displacement characteristics of the stripes caused by the interference between vortex beams with different topological charges and Gauss beams in free space after turbulence are studied and experimentally analyzed. Experimental and theoretical results show that in a strong turbulent environment, the larger the topological charge, the better the transmission ability of the vortex beams propagating in the turbulence; under the same turbulence intensity, the larger the topological charge, the smaller the displacement of the position of interference stripes. The displacement of interference stripes increases with increasing turbulence intensity of vortex beams with similar topological charges. This indicates that the method for detecting the displacement of vortex interference stripes can effectively detect turbulence intensity and ship wake.

Key words atmospheric optics; underwater laser; vortex beam; underwater turbulence; interference; fringe displacement

OCIS codes 010.4450; 050.4865; 010.7060; 260.3160

1 引言

随着水下光通信、水下目标探测等领域的兴起, 激光束在水环境中的传输特性成为近几年的研究热点。2011 年迈阿密大学的 Korotkova 团队^[1]提出了由温度和盐度组成的共用海洋湍流模型, 研究了高斯光束在海洋湍流传输中的光强变化以及相干特性; 2013 年 Tang 等^[2]研究了径向极化环形光束在海洋湍流中的光谱密度和偏振特性; 2014 年 Anguita 等^[3]研究了湍流中涡旋光束传输的轨道角

动量特性; 2015 年四川师范大学的季小玲团队^[4]研究了部分相干环状偏心光束在海洋湍流传输中的光束质心位置以及最大光强位置的偏移情况; 2017 年华侨大学的蒲继雄团队^[5]研究了随机电磁高阶贝塞尔-高斯光束在海洋湍流传输中的归一化光谱强度及偏振度的变化情况。

迄今为止, 基于涡旋光束的研究大多应用在空间大气通信^[6-15]和水下通信领域^[16-20], 利用涡旋光束对水下湍流探测的研究不多。本文对拉盖尔-高斯涡旋光束在水下湍流中的传输特性进行了研究,

收稿日期: 2019-05-08; 修回日期: 2019-06-06; 录用日期: 2019-06-21

基金项目: 国家自然科学基金(61378709)、水下测控技术重点实验室基金(61424070303)

* E-mail: zzluxidian@126.com

基于涡旋光束与高斯光束的干涉图样,通过设置不同强弱的水下湍流环境,对比研究了不同强度湍流对涡旋光束与高斯光束的叉形干涉图样条纹位置的影响,为水下运动目标探测、舰船尾流追踪等领域提供了研究方法与依据。

2 理论模拟

涡旋光是一种带有螺旋相位波前和相位中心奇点的特殊光束,具有 $\exp(-il\theta)$ 螺旋相位因子,其中 l 是拓扑荷数,表征光场沿角向坐标 θ 的相位变化,是涡旋光束特有的重要参数。相对于普通高斯光束,涡旋光束具有更多的信息携带量、更高的传输效率、更好的稳定性以及更远的传输距离等特性,因而在水下目标探测方向具有很好的应用潜力。

本文采用的涡旋光束为拉盖尔-高斯光束。其在圆柱坐标系 (r, θ, z) 下的近似解为^[21]

$$E(r, \theta, z) = E_0(r, z) \cdot \exp\left\{-il\theta + \pi\epsilon\left[-L_p^{|l|}\left(\frac{2r^2}{w^2(z)}\right)\right]\right\} \exp(-ikz), \quad (1)$$

式中: $E_0(r, z)$ 为光场振幅因子; ϵ 为阶跃函数; $L_p^{|l|}$ 为拉盖尔多项式; w 为束腰半径; k 为波数。在径向模式指标 $p=0$ 时, $L_p^{|l|}$ 恒等于 1, (1) 式近似为基本涡旋光束表达式:

$$E = E_0 \exp(-il\theta) \exp(-ikz). \quad (2)$$

自由空间中的涡旋光束在传播方向上可进一步简化为

$$E_1 = A_1 \exp(-il\theta), \quad (3)$$

平面光波的表达式为

$$E_2 = A_2 \exp(-ikz), \quad (4)$$

涡旋光束与平面光波干涉后的光强分布为

$$I = |E_1 + E_2|^2 = A_1^2 + A_2^2 + 2|A_1 A_2| \cos(l\theta - kz), \quad (5)$$

式中: A_1 和 A_2 为振幅。两束光波振幅相同时, $A_1^2 = A_2^2 = E_0^2$, 光强分布可简化为

$$I = E_0^2 [2 + 2\cos(l\theta - kz)]. \quad (6)$$

对(6)式进行编程,模拟并计算不同拓扑荷数涡旋光束与平面光波的干涉情况,得到如图 1 所示的含有相互对应位错结构的叉形干涉条纹。

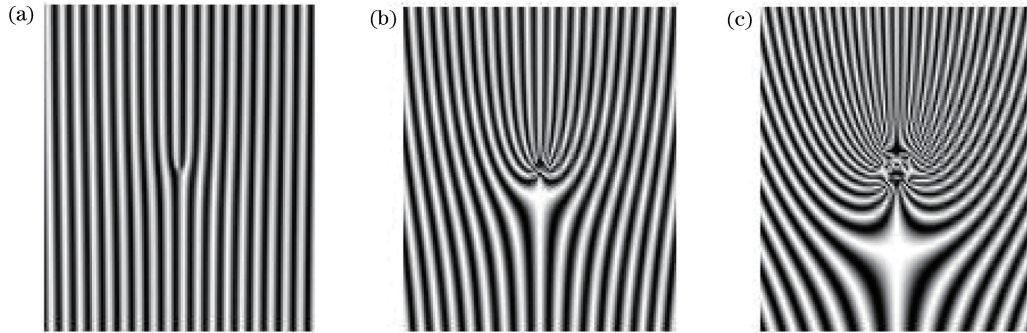


图 1 不同拓扑荷数的涡旋光束干涉条纹图。(a) $l=1$; (b) $l=10$; (c) $l=30$

Fig. 1 Interference patterns of vortex beams with different topological charges. (a) $l=1$; (b) $l=10$; (c) $l=30$

从图 1 中可以看出,干涉图样是一系列明暗相间的条纹,在中心处会有与拓扑荷数相互对应的分叉。湍流使水体折射率发生随机变化,使得透过湍流的光束光程改变,继而涡旋光束相位发生变化。可以预期,涡旋光经湍流场后,会直接影响干涉图样条纹的变动,在中心分叉区域的变化尤为明显。

水下湍流可以采用基于湍流相位扰动函数的随机相位屏法模拟^[22-23],基本步骤是先生成复高斯随机矩阵,再采用海洋湍流相位扰动函数进行滤波,最后将结果进行傅里叶逆变换,得到一层随机相位屏。

随机相位屏所用到的海洋湍流折射率波动函数^[1]为

$$\Phi_n(\kappa) = 0.388 \times 10^{-8} \alpha^{-1/3} \kappa^{-11/3} [1 + 2.35 (\kappa\eta)^{2/3}].$$

$$f(\kappa, \omega, \chi_T), \quad (7)$$

式中: α 是湍流动能耗散率,取值范围从 $10^{-10} \text{ m}^2/\text{s}^3$ 到 $10^{-4} \text{ m}^2/\text{s}^3$; κ 是折射率波动空间角频率; ω 是盐度与温度起伏影响湍流的相对强度,取值范围从 -5 到 0 , -5 表示海洋湍流由盐度主导, 0 表示海洋湍流由温度主导; χ_T 是温度方差耗散率; η 是 Kolmogorov 微尺度,取值为 10^{-3} m ; $f(\kappa, \omega, \chi_T)$ 为

$$f(\kappa, \omega, \chi_T) = \frac{\chi_T}{\omega^2} [\omega^2 \exp(-A_T \delta) + \exp(-A_S \delta) - 2\omega \exp(-A_{TS} \delta)], \quad (8)$$

式中: δ 为湍流动能衰减因子,与 κ 和 η 相关, $\delta = 8.284(\kappa\eta)^{4/3} + 12.978(\kappa\eta)^2$; A_T , A_S 和 A_{TS} 分别为与温度、盐度以及同时与温度和盐度相关的系数,

$A_T = 1.863 \times 10^{-2}$, $A_S = 1.9 \times 10^{-4}$, $A_{TS} = 9.41 \times 10^{-3}$ 。

拓扑荷数分别为 $l = 1, l = 10, l = 30$ 的涡旋光束经由随机相位屏后带有湍流信息,再与平面光波进行干涉,固定接收屏位置,模拟结果如图 2 所示。

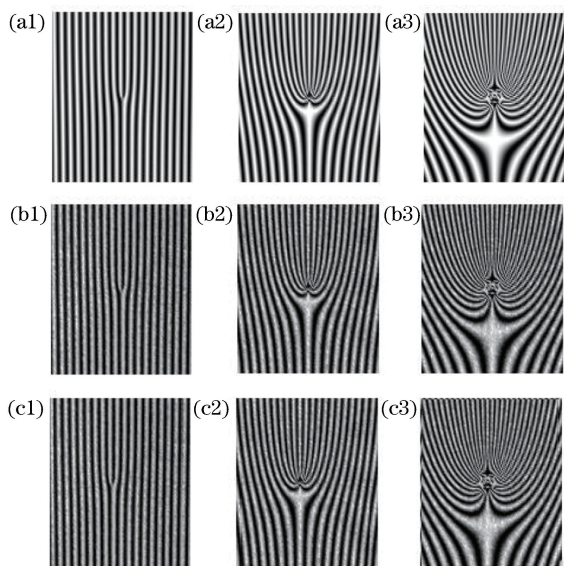


图 2 不同湍流下的干涉条纹位移。(a1) 静水, $l = 1$; (a2) 静水, $l = 10$; (a3) 静水, $l = 30$; (b1) 弱湍流, $l = 1$; (b2) 弱湍流, $l = 10$; (b3) 弱湍流, $l = 30$; (c1) 强湍流, $l = 1$; (c2) 强湍流, $l = 10$; (c3) 强湍流, $l = 30$

Fig. 2 Displacements of interference fringes under different turbulence intensities. (a1) Static water, $l = 1$; (a2) static water, $l = 10$; (a3) static water, $l = 30$; (b1) weak turbulence, $l = 1$; (b2) weak turbulence, $l = 10$; (b3) weak turbulence, $l = 30$; (c1) strong turbulence, $l = 1$; (c2) strong turbulence, $l = 10$; (c3) strong turbulence, $l = 30$

从图 2 可以看出,由于湍流造成折射率波动,光程差发生变化,因而在弱湍流环境中,干涉条纹位置和宽度存在偏移现象;同时,湍流噪声造成的背景灰度值增加。随着湍流的增强,干涉条纹的位置偏移更加明显。对比图 2(b)与图 2(c)中各自三幅图可以看出,在相同湍流强度下,拓扑荷数越大,条纹位移越小。

3 实验研究

3.1 实验系统

实验系统如图 3 所示,其中反射式空间光调制器(SLM)用来产生涡旋光,其允许最大反射角为 $\pm 5^\circ$,水槽壁厚为 5 mm。

实验中氦氖激光器输出的 632.8 nm 基模高斯

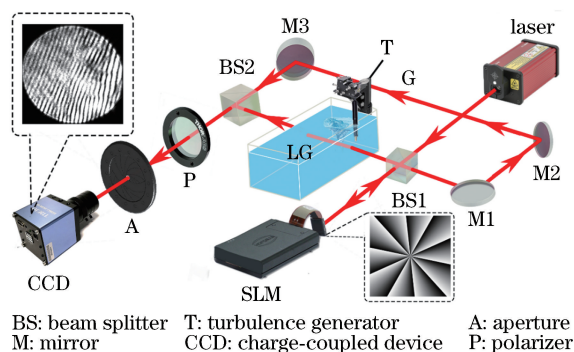


图 3 实验光路图

Fig. 3 Light path of experimental setup

光束经光束分束器(BS1)分成两束光:一束由 SLM 调制成 LG(拉盖尔-高斯光束),经 BS1 反射后通过水槽并携带水中湍流信息,经 BS2 反射后到达 CCD;另一束光保持高斯光束特性,作为参考光 G(高斯光束)经由反射镜 M1、M2 和 M3 反射到达 CCD,CCD 记录两束光的干涉条纹。

3.2 实验结果及分析

针对水体中不同强弱的湍流,实验研究了湍流强弱及拓扑荷数对涡旋光束与高斯光束干涉所得条纹的影响。实验中采用 3 W/220 V, 60 Hz 的旋钮式湍流产生器(ST22-06, 欧亚瑟, 中国)产生湍流,利用旋钮旋转角 α ($0^\circ \sim 90^\circ$) 表征湍流强弱,旋转角越大,湍流强度越强。图 4 是不同强度湍流下拓扑荷数为 10 的涡旋光束与高斯光束干涉所得的条纹图,图中实线是叉形中心条纹,可作为基准线条纹观测偏移量,可以明显看到条纹相对于图像边缘的偏移。

将实验所得的一系列干涉图样进行灰度化并计算每列条纹的灰度平均值,得到沿图 4 中虚线方向的图像灰度变化曲线并求其相对差值,结果如图 5 所示。

从图 5(a)可以看出,静水中条纹灰度差值大多集中在 0 附近,最大值为 -50,说明静水中干涉条纹位置偏移量较小。从图 5(b)可以看出强湍流中条纹灰度差值范围较大,起伏波动剧烈,位于 0 附近的数据很少,表明湍流作用下的干涉条纹位置偏移量相对较大。

图 6 给出的是湍流相对强度和拓扑荷数与图样条纹位置偏移量的关系。当拓扑荷数 $l = 0$ (即退化为普通高斯光束)时,随着湍流强度的增加,条纹偏移逐渐增大,当湍流过强($\alpha > 65^\circ$)时,图样条纹变得杂乱,无法测量。当拓扑荷数 $l = 10$ 和 $l = 30$ 时,可以看到条纹偏移量随着湍流强度的增加而增加,并

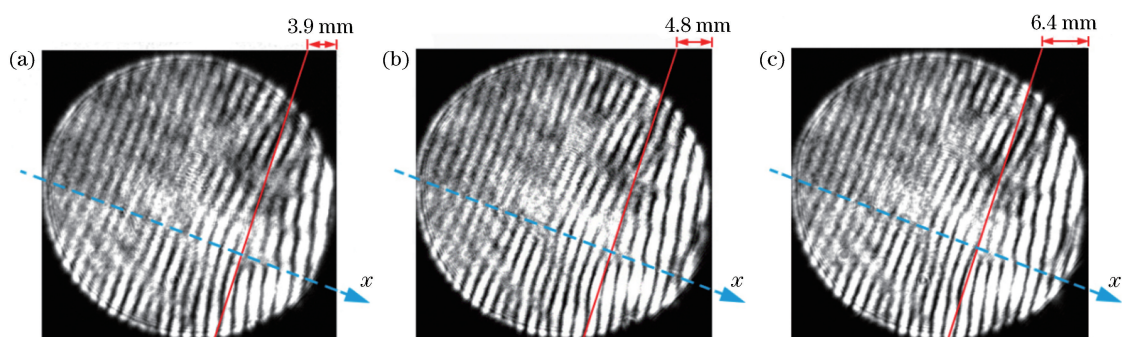


图 4 不同强度湍流下干涉条纹图。(a)静水, $\alpha=0^\circ$; (b)弱湍流, $\alpha=45^\circ$; (c)强湍流, $\alpha=90^\circ$
 Fig. 4 Interference fringes under different turbulence intensities. (a) Static water, $\alpha=0^\circ$;
 (b) weak turbulence, $\alpha=45^\circ$; (c) strong turbulence, $\alpha=90^\circ$

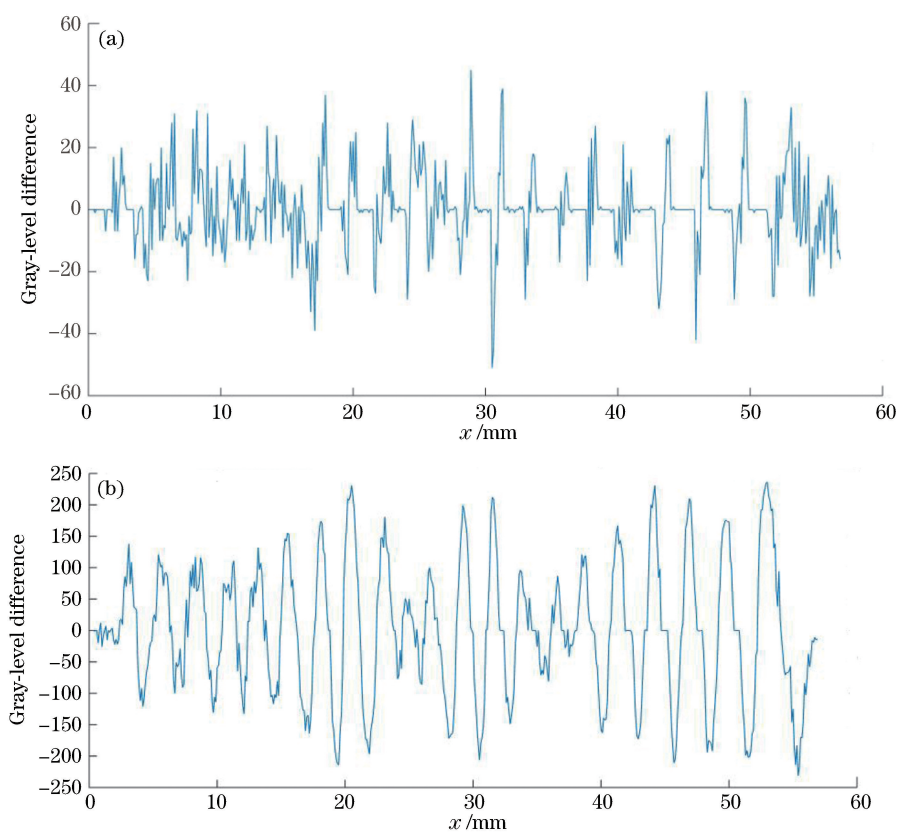


图 5 干涉条纹位移灰度差值。(a)静水, $\alpha=0^\circ$; (b)强湍流, $\alpha=90^\circ$
 Fig. 5 Gray-level difference in displacements of interference fringes. (a) Static water, $\alpha=0^\circ$;
 (b) strong turbulence, $\alpha=90^\circ$

且光束在强湍流中的传输依旧稳定。可知当拓扑荷数一定时,湍流越强,图样条纹位置偏移量越大。当湍流强度一定时,拓扑荷数越大,图样条纹位置偏移量越小。

4 结 论

基于涡旋光束与普通光束的干涉图样的偏移,研究了涡旋光束在湍流环境中的传输特性。结果表明:在湍流强度较小时,不同拓扑荷数的涡旋光束对

干涉条纹位置偏移影响不明显,当湍流强度较大时,拓扑荷数越大的涡旋光束对干涉条纹位置的偏移影响越小,即抗扰动能力越强,传输效率越高,故高阶涡旋光束在水下湍流环境中有很好的传输能力。同样拓扑荷数的涡旋光束,湍流越强,干涉条纹位置偏移量越大。可以利用条纹位置偏移量的范围判断湍流的强度,为水下运动目标尾流探测提供了依据。在本文中采用改变水中漩涡流速的方式改变湍流相对强度,并未进行定量探测,由(8)式可知温度也是

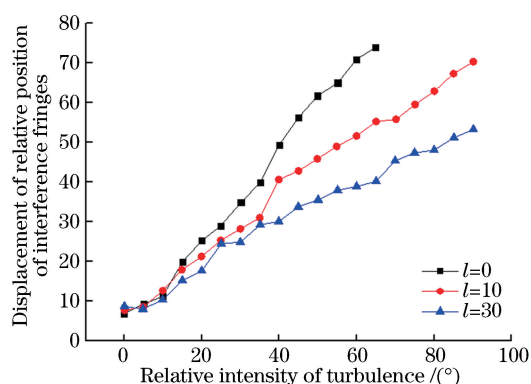


图 6 湍流相对强度和拓扑荷数对图样条纹相对位置偏移量的影响

Fig. 6 Influences of relative intensity of turbulence and topological charge on displacement of relative position of interference fringes

影响湍流强度的较大因素之一,后续可通过采用温度的逐次变化来改变湍流强度的方式实现定量探测。

参 考 文 献

- [1] Korotkova O, Farwell N. Effect of oceanic turbulence on polarization of stochastic beams [J]. Optics Communications, 2011, 284(7): 1740-1746.
- [2] Tang M M, Zhao D M. Propagation of radially polarized beams in the oceanic turbulence[J]. Applied Physics B, 2013, 111(4): 665-670.
- [3] Anguita J A, Rodriguez H, Quezada C. Experimental propagation of optical Laguerre-Gauss beams in turbulence [C]//2014 IEEE Aerospace Conference, March 1-8, 2014, Big Sky, MT, USA. New York: IEEE, 2014: 6836359.
- [4] Yang T, Ji X L, Li X Q. Propagation characteristics of partially coherent decentred annular beams propagating through oceanic turbulence [J]. Acta Physica Sinica, 2015, 64(20): 204206.
杨婷, 季小玲, 李晓庆. 部分相干环状偏心光束通过海洋湍流的传输特性[J]. 物理学报, 2015, 64(20): 204206.
- [5] Liu Y X, Chen Z Y, Pu J X. Propagation of stochastic electromagnetic high-order Bessel-Gaussian beams in the oceanic turbulence [J]. Acta Physica Sinica, 2017, 66(12): 124205.
刘永欣, 陈子阳, 蒲继雄. 随机电磁高阶 Bessel-Gaussian 光束在海洋湍流中的传输特性[J]. 物理学报, 2017, 66(12): 124205.
- [6] Qian X M, Rao R Z. Spatial distribution of Gaussian-beam scintillation in atmosphere by numerical simulation [J]. Chinese Journal of Quantum Electronics, 2006, 23(3): 320-324.
钱仙妹, 饶瑞中. 高斯光束大气闪烁空间分布的数值模拟研究 [J]. 量子电子学报, 2006, 23(3): 320-324.
- [7] 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.
- [8] Toselli I, Korotkova O. General scale-dependent anisotropic turbulence and its impact on free space optical communication system performance [J]. Journal of the Optical Society of America A, 2015, 32(6): 1017-1025.
- [9] Niu H H, Han Y P. Performance analysis of Bessel-Gaussian vortex beam's propagation in atmospheric turbulence [J]. Laser Technology, 2017, 41(3): 451-455.
牛化恒, 韩一平. 大气湍流中贝塞尔-高斯涡旋光束传播性能分析 [J]. 激光技术, 2017, 41(3): 451-455.
- [10] Wang H Y, Chen C L, Du J L, et al. Propagation of Bessel-Gaussian beam with optical vortices in turbulent atmosphere [J]. Acta Photonica Sinica, 2013, 42(5): 505-510.
王海燕, 陈川琳, 杜家磊, 等. 贝塞尔高斯涡旋光束在大气湍流中的传输特性 [J]. 光子学报, 2013, 42(5): 505-510.
- [11] Wu Z S, Li Y Q. Scattering of a partially coherent Gaussian-Schell beam from a diffuse target in slant atmospheric turbulence [J]. Journal of the Optical Society of America A, 2011, 28(7): 1531-1539.
- [12] Ge X L, Wang B Y, Guo C S. Evolution of phase singularities of vortex beams propagating in atmospheric turbulence [J]. Journal of the Optical Society of America A, 2015, 32(5): 837-842.
- [13] Zhu K C, Zhou G Q, Li X G, et al. Propagation of Bessel-Gaussian beams with optical vortices in turbulent atmosphere [J]. Optics Express, 2008, 16(26): 21315-21320.
- [14] Eyyuboğlu H T. Propagation of higher order Bessel-Gaussian beams in turbulence [J]. Applied Physics B, 2007, 88(2): 259-265.
- [15] 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.
- [16] 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.
- [17] Cheng M J, Guo L X, Li J T, et al. Propagation of an optical vortex carried by a partially coherent

- Laguerre-Gaussian beam in turbulent ocean [J]. Applied Optics, 2016, 55(17): 4642-4648.
- [18] Xu J, Tang M M, Zhao D M. Propagation of electromagnetic non-uniformly correlated beams in the oceanic turbulence[J]. Optics Communications, 2014, 331: 1-5.
- [19] Tang M M, Zhao D M. Spectral changes in stochastic anisotropic electromagnetic beams propagating through turbulent ocean [J]. Optics Communications, 2014, 312: 89-93.
- [20] Xu J, Zhao D M. Propagation of a stochastic electromagnetic vortex beam in the oceanic turbulence [J]. Optics & Laser Technology, 2014, 57: 189-193.
- [21] 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.
- [22] Yang T X, Zhao S M. Random phase screen model of ocean turbulence [J]. Acta Optica Sinica, 2017, 37(12): 1201001.
- 杨天星, 赵生妹. 海洋湍流随机相位屏模型 [J]. 光学学报, 2017, 37(12): 1201001.
- [23] Niu C J, Lu F, Han X E. Propagation properties of Gaussian array beams transmitted in oceanic turbulence simulated by phase screen method [J]. Acta Optica Sinica, 2018, 38(6): 0601004.
- 牛超君, 卢芳, 韩香娥. 相位屏法模拟高斯阵列光束海洋湍流传输特性 [J]. 光学学报, 2018, 38(6): 0601004.