

引用格式: LU Teng-fei, LIU Yong-xin, PU Ji-xiong. Experimental Study on Scintillation Index of Vortex Beam Propagation in Underwater Turbulence[J]. *Acta Photonica Sinica*, 2019, **48**(12): 1214004

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

# 涡旋光束在水下湍流中传输的闪烁因子的实验研究

卢腾飞, 刘永欣, 蒲继雄

(华侨大学 信息科学与工程学院, 福建省光传输与变换重点实验室, 福建 厦门 361021)

**摘 要:** 为了研究涡旋光束和高斯光束在水下湍流中的闪烁特性, 搭建了一套含有水下湍流的实验系统, 利用循环泵控制水槽内湍流的强弱, 使用闪烁仪测量光束的闪烁因子. 利用这套实验系统, 详细研究了涡旋光束和高斯光束在水下传输时的闪烁因子. 研究表明, 涡旋光束和高斯光束的闪烁因子随着传输距离的增大而增大, 并且随着水下湍流强度增大, 涡旋光束和高斯光束对应的闪烁因子也越大. 在 12.6 m 的传播距离内, 拓扑电荷  $m=2$  的涡旋光束的闪烁因子远大于高斯光束的闪烁因子. 另外, 在不同强度的水下湍流中, 拓扑荷数  $m=6$  的涡旋光束传播到 5.4 m 时, 其径向闪烁因子都先减小然后再增大. 此外, 拓扑荷数  $m=6$  的涡旋光束经过一定距离的传播后, 其闪烁因子低于拓扑荷数  $m=4$  的涡旋光束的闪烁因子. 本文研究结果对探索涡旋光束在海洋湍流中的应用具有重要价值.

**关键词:** 涡旋光束; 水下湍流; 闪烁因子; 拓扑荷数; 光强分布

中图分类号: O436

文献标识码: A

doi: 10.3788/gzxb20194812.1214004

## Experimental Study on Scintillation Index of Vortex Beam Propagation in Underwater Turbulence

LU Teng-fei, LIU Yong-xin, PU Ji-xiong

(Fujian Provincial Key Laboratory of Light Propagation and Transformation,

College of Information Science and Engineering, Huaqiao University, Xiamen, Fujian 361021, China)

**Abstract:** In order to study the scintillation characteristics of vortex beam and Gaussian beam in underwater turbulence, an experimental system consisting of water turbulence have been set up. In the water tank, the intensity of turbulence is controlled by using a circulating pump, and the scintillation index of the beam is measured by using a scintilloscope. Using this experimental system, the scintillation index of vortex beams and Gaussian beams propagating in underwater turbulence are investigated in detail. It is found that the scintillation indices of vortex beams and Gaussian beams are getting bigger with the increasing of the transmission distance, as well as with the increase of the intensity of underwater turbulence. Within the propagation distance 12.6 meters, the scintillation index of vortex beam with topological charge  $m=2$  is much bigger than that of Gaussian beam. At 5.4 meters, the radial scintillation index of vortex beam with  $m=6$  decreases firstly and then increases in underwater turbulence. In addition, the scintillation index of a topological vortex beam with topological charge  $m=6$  is lower than that of a topological vortex beam with topological charge  $m=4$  after a certain distance of propagation. The research results obtained by our experiments have important value in exploring the application of vortex beam in oceanic turbulence.

**Key words:** Vortex beam; Underwater turbulence; Scintillation index; Topological charge; Light

基金项目: 国家自然科学基金(Nos. 61505059, 61575070, 61275203), 华侨大学研究生科研创新基金

第一作者: 卢腾飞(1994-), 男, 硕士研究生, 主要研究方向为激光传输与变换. Email: 1805440176@qq.com

导师(通讯作者): 刘永欣(1979-), 女, 副教授, 博士, 主要研究方向为激光传输与变换. Email: yongxin@hqu.edu.cn

收稿日期: 2019-08-08; 录用日期: 2019-09-16

intensity distribution

OCIS Codes: 140.3259; 080.4865; 260.1960; 260.5430; 050.1940; 350.5500

## 0 引言

近年来,随着水下光通信、成像和水下传感等<sup>[1-4]</sup>应用的兴起,深入研究激光束在水下湍流中传输的湍流效应就显得尤为重要,取得了研究者的广泛关注.激光在水下湍流中传输时,会引起光强波动也就是闪烁<sup>[5]</sup>.这些光闪烁是由湍流引起的波场相位结构畸变引起的,在实际应用中会降低激光束的性能.在某些应用中,减少激光束在海洋湍流中的光强波动是至关重要的.

对于海洋湍流的研究工作从上个世纪中叶就已经开始,1968年 KAJIURA K 研究了海洋湍流层的摩擦系数<sup>[6]</sup>.NIKISHOV V V 在 2000 年提出一种综合考虑海水盐度、温度等因素并适用于各向同性的海水介质的海洋湍流功率谱,有利于深入研究海水介质对激光束传输的影响<sup>[7]</sup>.随后国内外的研究者逐渐展开了光束在海洋湍流中的传输的研究<sup>[8-16]</sup>.2017 年,赵生妹等使用功率谱反演法构造了基于海洋湍流波动谱的随机相位屏模型用以模拟海洋湍流对光束传输的影响<sup>[8]</sup>.四川师范大学季小玲等研究了海洋湍流对高斯阵列光束以及部分相干环状偏心光束的传输特性的影响<sup>[9-10]</sup>.2015 年浙江大学赵道木等推导了随机电磁涡旋光束在海洋湍流中传输的交叉谱密度矩阵的表达式,数值模拟了电磁涡旋光束在海洋湍流中的传输特性<sup>[11]</sup>.2016 年 KASHANI F D 等基于广义惠更斯-菲涅尔原理研究了部分相干平顶光束阵列通过海洋湍流的平均光强,均方束宽以及轴上闪烁指数<sup>[12]</sup>.

虽然激光水下传输具有极大的挑战性,但研究激光束在水下湍流中的传输特性对于水下光通信的发展十分必要,因此研究激光光束在水下湍流中的传输变化规律势在必行.涡旋光束中每个光子都携带轨道角动量,利用轨道角动量可以对信息进行编码与传输,从而应用于光通信等领域.本文通过实验研究了涡旋光束和高斯光束在不同强度的水下湍流中传输时的闪烁特性,并且研究了拓扑荷数  $m=6$  的涡旋光束在 5.4 m 时的径向闪烁因子.

## 1 基本原理

涡旋光束在水下湍流中传输并测量其强度波动的实验装置图如图 1 所示.利用一个望远镜系统对波长为 532 nm 的激光进行扩束,该望远镜系统由两个凸透镜  $L_1$  和  $L_2$  组成,它们的焦距分别为 5 cm 和 15 cm.扩束后的光束经过螺旋相位板(Spiral Phase Plate, SPP)进而产生涡旋光束(模式为拉盖尔高斯光束),其拓扑荷数由螺旋相位板的结构而决定.另外,由于实验条件的限制本文只产生了拓扑荷数为 2、4、6 的涡旋光束.将产生的涡旋光束通过湍流强度可调节的实验装置(Underwater Turbulence Simulator),其中水下湍流的强弱是通过控制循环泵水的流量大小来进行调控的.由于水下湍流模拟装置长度为 1.8 m,为了让光束能够较长距离的传输,使用反射镜对光束进行反射,其中  $M_1$ ,  $M_2$  为高反镜.之后,用光电探测器件将光信号转化为电信号,再利用闪烁仪收集电信号,进而测量闪烁因子.图 2 为  $m=2$  的涡旋光束在强水下湍流中传输到 10.8 m 处的闪烁,横坐标为时间单位为秒,纵坐标为实时测量的闪烁因子.实验时采样时间设置为 1 ms,采样频率设置为 1 000 次,从图 2 也可以看出光强存在一定幅度的涨落,导致闪烁因子不断改变,本文随机选取 20 个测量的闪烁数值,求取平均值作为该位置处的闪烁因子.

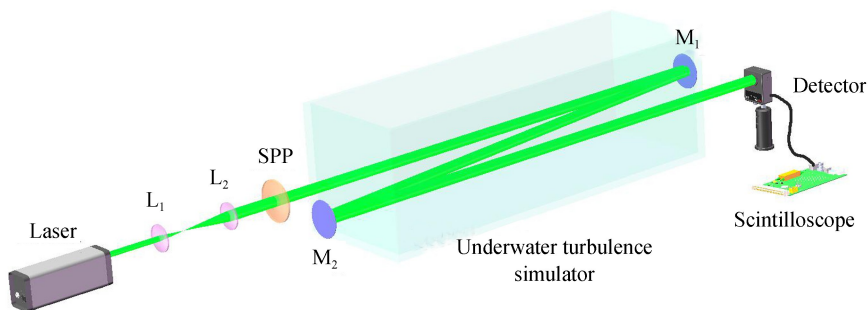


图 1 涡旋光束在水下湍流中传输的实验装置

Fig.1 Experimental device of vortex beam propagation in underwater turbulence

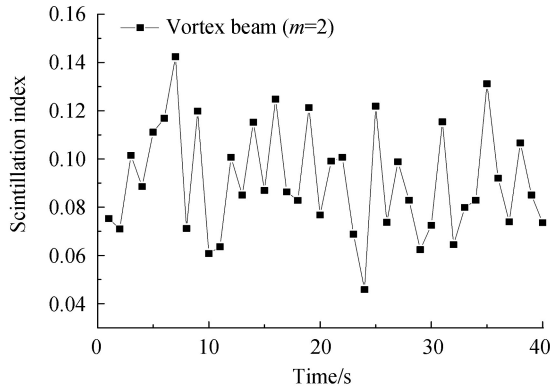


图2  $m=2$  的涡旋光束在强水下湍流中传输到 10.8 m 处的闪烁

Fig.2 The scintillation of the vortex beam with  $m=2$  transmitted to 10.8 meters in strong underwater turbulence

调整光学系统和光电探测器,使光电探测器位于光束的中心.由于光电探测器具有一定尺寸,得到的闪烁因子实际为直径为 5 mm 的圆孔内的光强的波动.近年来,孔径平均闪烁被提出用于研究某一区域内的闪烁,定义为<sup>[17]</sup>

$$\sigma^2(z) = \frac{\langle P^2(z) \rangle - \langle P(z) \rangle^2}{\langle P(z) \rangle^2} \quad (1)$$

式中,

$$P(z) = \iint I(x, y, z) dx dy \quad (2)$$

## 2 实验结果与分析

### 2.1 水下湍流强弱对光斑的影响

图 3 为  $m=2$  的涡旋光束在不同强度的水下湍流中传输到 5.4 m 时的光斑图.利用光束分析仪拍摄光斑,在拍摄时为了避免出现过曝现象,使用衰减片对光强进行衰减,导致光斑的少许细节丢失.但是,从图 3 可以看出水下湍流强度越大对光束影响越大,如,水下湍流为强湍流时光斑明显发生弥散,说明光束抖动比较厉害.

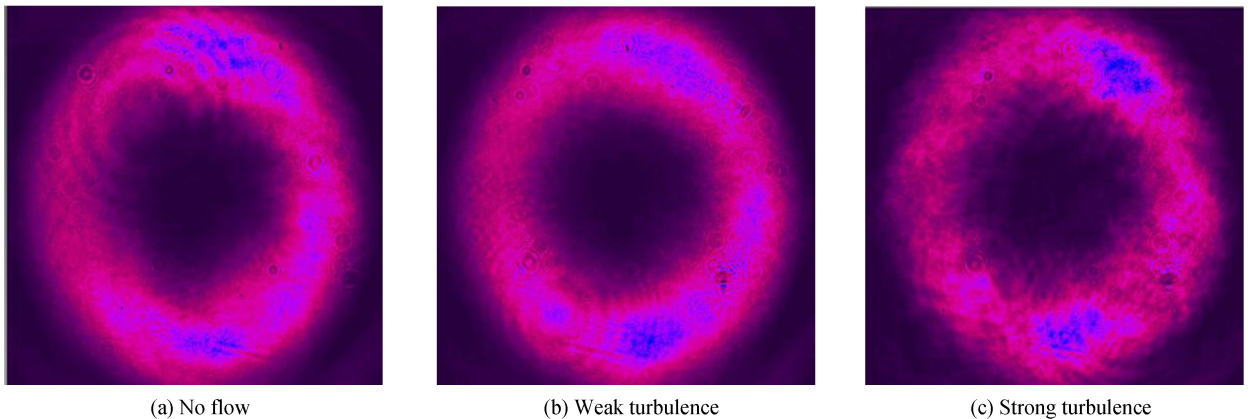


图 3  $m=2$  的涡旋光束在不同强度的水下湍流中传输到 5.4 m 时的光斑图

Fig.3 Spot pattern of vortex beam with  $m=2$  transmitted to 5.4 m in underwater with different turbulence

### 2.2 水下湍流大小对闪烁因子的影响

实验研究了涡旋光束和高斯光束在水下湍流中的闪烁因子.实验时,我们是测量光束轴上区域的光强的起伏,又因光电探测器件的探测灵敏度有限,拓扑荷数  $m=4$  和  $m=6$  的涡旋光束传播 5.4 m 后所测得的光电压变化还比较明显,若再继续传播 1.8 m 后所测得的光电压变化不再明显,而拓扑荷数  $m=2$  的涡旋光束传播 12.6 m 后所测得的光电压变化还比较明显.所以,光束最远传输距离为 12.6 m.

图 4 为涡旋光束和高斯光束在不同强度的水下湍流中的闪烁因子随传输距离的变化情况.从图 4 可以看出,在 12.6 m 的传输距离内,涡旋光束和高斯光束的闪烁因子都随传输距离的增大而增大.另外,在相同传输距离处,涡旋光束的闪烁因子高于高斯光束的闪烁因子.

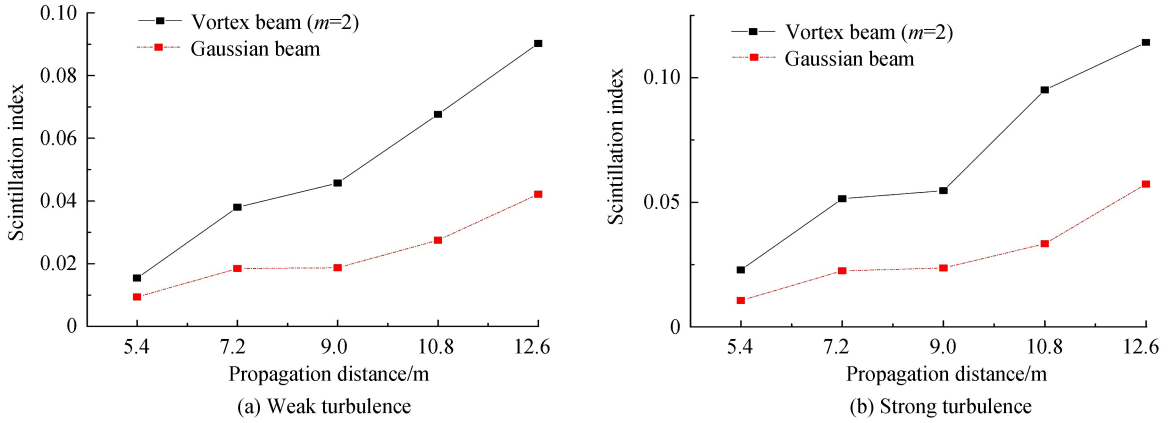


图 4 涡旋光束和高斯光束在不同强度的水下湍流中的闪烁因子随传输距离的变化情况

Fig.4 Variation of scintillation index of vortex beam and Gaussian beam in the underwater with different turbulence versus propagation distance

图 5 为  $m=4$  和  $m=6$  的涡旋光束在不同强度的水下湍流中的闪烁因子对比.由图 5 可知,刚开始一段距离, $m=6$  的涡旋光束的闪烁因子高于  $m=4$  的涡旋光束的闪烁因子,然而传输一段距离后, $m=6$  的涡旋光束的闪烁因子会低于  $m=4$  的涡旋光束的闪烁因子.这是因为涡旋光束的拓扑荷数越大,它的暗核就会越大,湍流对光束的影响就会越小.

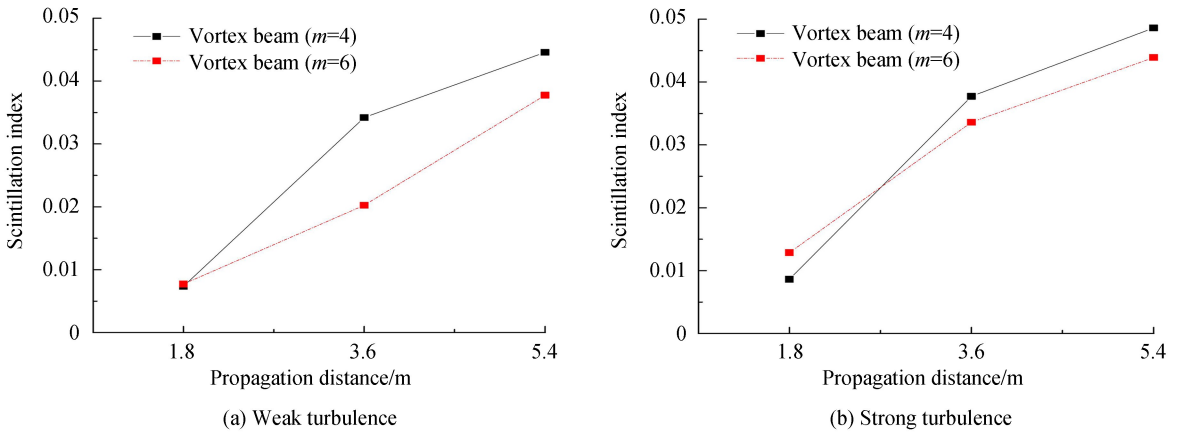


图 5  $m=4$  及  $m=6$  的涡旋光束在不同强度的水下湍流中的闪烁因子对比

Fig.5 Comparison of scintillation index of vortex beams  $m=4$  and  $m=6$  in the underwater with different turbulence

图 6 为不同拓扑荷数的涡旋光束的闪烁因子随传输距离的变化情况.由图 6 可以看出,涡旋光束在弱湍

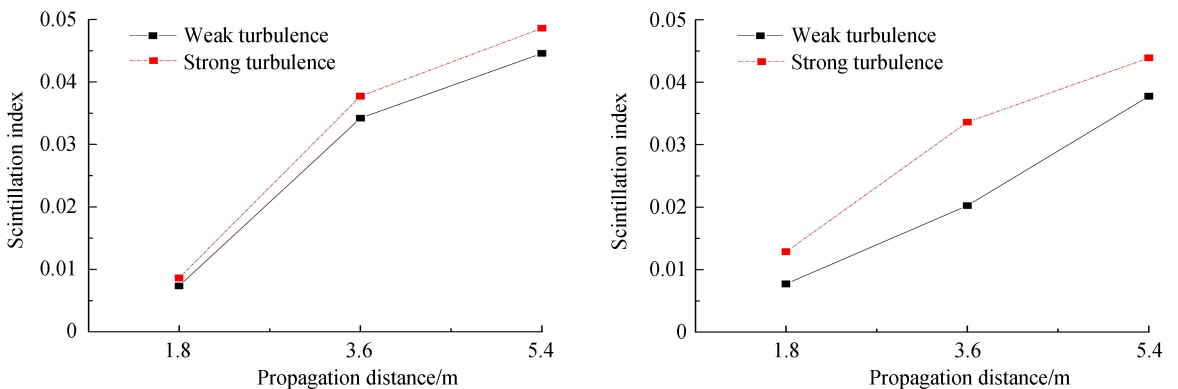


图 6 不同拓扑荷数的涡旋光束的闪烁因子随传输距离的变化情况

Fig.6 Changes of scintillation index of vortex beams with different topological charges along with the transmission distance

流下的闪烁因子低于强湍流下的闪烁因子,这是因为湍流越大,光束抖动的越厉害,相应的闪烁因子越大.

图 7 为  $m=6$  的涡旋光束传输距离为 5.4 m 时,其径向闪烁因子示意图.由图可以看出,涡旋光束径向的闪烁因子先减小后增大.这是因为涡旋光束中心为暗核,周围环绕着亮环,随着径向距离的增大,涡旋光束径向不同位置处的光强的大小先增大然后逐渐减少.

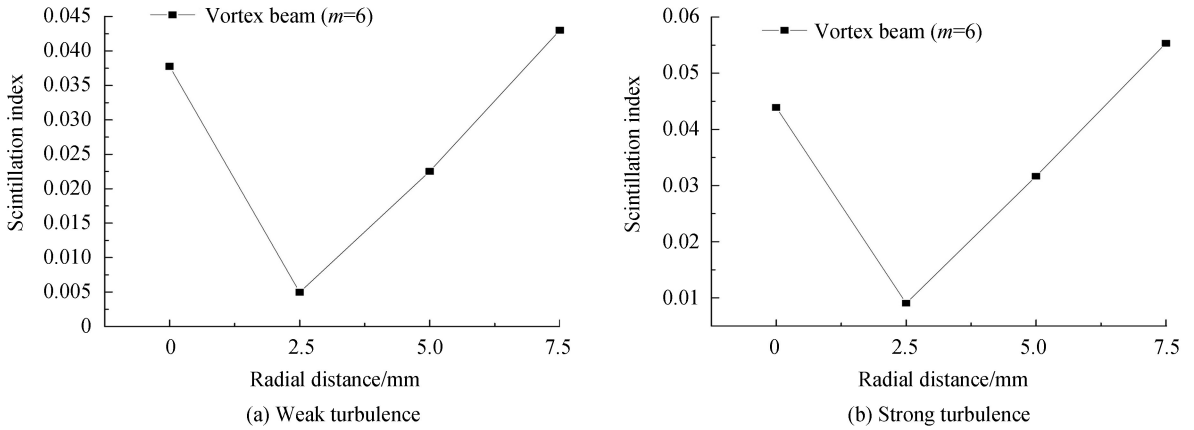


图 7 拓扑荷数  $m=6$  的涡旋光束传输距离为 5.4 m 时,其径向闪烁因子的变化情况

Fig.7 Schematic diagram of radial scintillation index of vortex beam with topological charge  $m=6$  when the propagation distance  $z=5.4$  m

### 3 结论

本文实验研究了涡旋光束和高斯光束通过不同强度的水下湍流后的闪烁因子.实验结果表明,水下湍流越强对光束的影响就会越大,随着传输距离的增大,涡旋光束和高斯光束的闪烁因子越大,并且,水下湍流强度越大,光束对应的闪烁因子越大.在 12.6 m 的传输距离内,拓扑荷数  $m=2$  的涡旋光束的闪烁因子高于高斯光束的闪烁因子.同时也发现,拓扑荷数  $m=6$  和  $m=4$  的涡旋光束在水下湍流中传输一段距离后,拓扑荷数  $m=6$  的涡旋光束的闪烁因子低于拓扑荷数  $m=4$  的涡旋光束的闪烁因子.另外,在不同强度的水下湍流中,拓扑荷数  $m=6$  的涡旋光束传播到 5.4m 时,其径向闪烁因子都先减小然后再增大.

### 参考文献

- [1] PU Huan, JI Xiao-ling. Problems of optical imaging in oceanic turbulence[J]. *Acta Optica Sinica*, 2016, **36**(10): 1026014.  
蒲欢, 季小玲. 海洋湍流中光学成像相关问题研究[J]. *光学学报*, 2016, **36**(10): 1026014.
- [2] YI Xiang, LI Zan, LIU Zeng-ji. Underwater optical communication performance for laser beam propagation through weak oceanic turbulence[J]. *Applied Optics*, 2015, **54**(6): 1273-1278.
- [3] HOU Wei-lin. A simple underwater imaging model[J]. *Optics Letters*, 2009, **34**(17): 2688-2690.
- [4] HANSON F, LASHER M. Effects of underwater turbulence on laser beam propagation and coupling into single-mode optical fiber[J]. *Applied Optics*, 2010, **49**(16): 3224-3230.
- [5] WANG Fei, LIU Xian-long, LIU Lin, et al. Experimental study of the scintillation index of a radially polarized beam with controllable spatial coherence[J]. *Applied Physics Letters*, 2013, **103**(9): 091102.
- [6] KAJIURA K. A model of the bottom boundary layer in water waves[J]. *Bulletin of the Earthquake Research Institute*, 1968, **46**: 75-123.
- [7] 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.
- [8] YANG Tian-xing, ZHAO Sheng-mei. 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.
- [9] LU Lu, JI Xiao-ling, LI Xiao-qing, et al. Influence of oceanic turbulence on propagation characteristics of Gaussian array beams[J]. *Optik-International Journal for Light and Electron Optics*, 2014, **125**(24): 7154-7161.
- [10] YANG Ting, JI Xiao-ling, LI Xiao-qing. Propagation characteristics of partially coherent decentred annular beams propagating through oceanic turbulence[J]. *Acta Physica Sinica*, 2015, **64**(20): 212-220.  
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): 212-220.
- [11] DING Chao-liang, LIAO La-mei, WANG Hai-xia, et al. Effect of oceanic turbulence on the propagation of cosine-



- Gaussian-correlated Schell-model beam[J]. *Journal of Optics*, 2015, **17**(3): 035615.
- [12] KASHANI F D, YOUSEFI M. Analyzing the propagation behavior of coherence and polarization degrees of a phase-locked partially coherent radial flat-topped array laser beam in underwater turbulence[J]. *Applied Optics*, 2016, **55**(23): 6311-6320.
- [13] SUN Ri-dong, GUO Li-xin, CHENG Ming-jian, *et al.* Propagation characteristics of Bessel-Gaussian beam in anisotropic atmosphere[J]. *Acta Photonica Sinica*, 2018, **47**(12): 1201002.  
孙日东, 郭立新, 程明建, 等. 贝塞尔高斯光束在各向异性湍流中的传输特性[J]. 光子学报, 2018, **47**(12): 1201002.
- [14] YIN Xiao-li, SUN Zhi-wen, CUI Xiao-zhou, *et al.* Performance of oceanic wireless optical communication systems based on orbital angular momentum multiplexing with spatial diversity[J]. *Acta Photonica Sinica*, 2018, **47**(11): 1106003.  
尹霄丽, 孙志雯, 崔小舟, 等. 基于空间分集的海洋无线光通信轨道角动量复用系统的性能[J]. 光子学报, 2018, **47**(11): 1106003.
- [15] LIU Yong-xin, CHEN Zi-yang, PU Ji-xiong. Propagation of stochastic electromagnetic high-order Bessel-Gaussian beams in the oceanic turbulence[J]. *Acta Physica Sinica*, 2017, **66**(12): 199-205.  
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): 199-205.
- [16] LIU Yong-xin, ZHANG Kai-ning, CHEN Zi-yang, *et al.* Scintillation index of double vortex beams in turbulent atmosphere[J]. *Optik*, 2019, **181**(12): 571-574.
- [17] CHEN Zi-yang, CUI Sheng-wei, ZHANG Lei, *et al.* Measuring the intensity fluctuation of partially coherent radially polarized beams in atmospheric turbulence[J]. *Optics Express*, 2014, **22**(15): 141-144.