

引用格式: DIAO Luxin, WANG Mingjun, HUANG Chaojun, et al. Scintillation Index and Bit Error Rate of Double Laguerre-Gaussian Vortex Beams under Ocean Turbulence[J]. Acta Photonica Sinica, 2024, 53(2):0201002

刁鲁欣,王明军,黄朝军,等.海洋湍流下双拉盖尔-高斯涡旋光束的闪烁指数与误码率研究[J].光子学报,2024,53(2):0201002

海洋湍流下双拉盖尔-高斯涡旋光束的闪烁指数与误码率研究

刁鲁欣¹,王明军^{1,2,3},黄朝军³,吴小虎⁴,汪伟⁵

(1 西安理工大学 自动化与信息工程学院,西安 710048)

(2 西安市无线光通信和网络研究重点实验室,西安 710048)

(3 陕西理工大学 物理与电信工程学院,汉中 723001)

(4 山东高等技术研究院,济南 250100)

(5 中国科学院西安光学精密机械研究所,西安 710119)

摘要:采用功率谱反演法模拟了同轴叠加产生的双拉盖尔-高斯涡旋光束(Double Laguerre-Gaussian Vortex Beam, DLGVB)在海洋湍流中传输时的光强和相位分布,仿真分析了DLGVB光束在不同海洋湍流参数下的闪烁指数以及在基于开关键控调制的水下光通信系统中的通信误码率。结果表明,随着湍流动能耗散率的减小,盐度温度波动平衡参数、温度方差耗散率及传输距离的增加,闪烁指数逐渐增加;随着湍流动能耗散率以及拓扑电荷差值的增加,误码率减小。在海洋湍流环境下,使用DLGVB光束进行传输可以抑制海洋湍流带来的干扰,选择最佳的拓扑电荷差值,可以有效提高传输通信质量及通信系统容量。本文研究结果对涡旋光束及其叠加态在海洋湍流下传输特性研究及水下光通信系统持续扩容的发展需求方面具有重要的参考价值。

关键词:海洋湍流;双拉盖尔-高斯涡旋光束;拓扑电荷差值;闪烁指数;误码率

中图分类号:TN929.3

文献标识码:A

doi:10.3788/gzxb20245302.0201002

0 引言

涡旋光束是一类具有螺旋相位波前的光束,携带轨道角动量(Orbital Angular Momentum, OAM),由于其特定的螺旋相位结构和暗中空环光强分布,已广泛应用于光通信、遥感和超分辨率成像等领域^[1-3]。涡旋光束在海水环境中传输时会受到海洋湍流的干扰,从而产生光强闪烁、相位起伏与光斑漂移等现象,降低通信质量^[4]。伴随着人类活动从自由空间不断向海洋环境中延伸,对水下光通信系统通信容量的需求也在不断增加,因此亟需对涡旋光束在海洋湍流中的传输通信特性进行研究,进一步探索抑制海洋湍流对光束传输影响的方法,提高水下光通信系统容量。

1992年,ALLEN L等^[5]研究发现拉盖尔-高斯(Laguerre-Gaussian, LG)光束携带轨道角动量。1980年,WIENER T等^[6]基于蓝绿波段激光开展了海水环境下的无线光通信实验,实验最大传输距离为300 m,通信速率达100 Mbit/s。2000年,NIKISHOV V V^[7]提出了各向同性海水介质的海洋湍流功率谱,为此后针对海洋湍流的研究奠定了坚实的基础。GÖKÇE M C等^[8]对在弱海洋湍流中沿着水平方向传播的高斯光的功率波动、闪烁指数及光通信系统的平均误码率等进行了研究。2016年,BAGHDADY J等^[9]利用两路OAM复

基金项目:国家自然科学基金重大研究计划培育项目(No. 92052106),国家自然科学基金(No. 61771385),陕西省高等学校创新团队,西安市重点产业链关键核心技术攻关项目(No. 103-433023062),咸阳市重点研发计划(No. L2023-ZDYF-QYCX-025),河南省可见光通信重点实验室基金(No. HKLVLC2023-B05),陕西省科技创新团队(No. 2024RS-CXTD-12)

第一作者:刁鲁欣, diaoluxin0260@163.com

通讯作者:王明军, wangmingjun@xaut.edu.cn

收稿日期:2023-08-07; **录用日期:**2023-10-17

<http://www.photon.ac.cn>

用,实现了传输速率为3 Gbit/s,传输距离为2.96 m的水下OAM光通信。2017年,REN Yongxiong等^[10]将OAM复用与QAM-OFDM技术相结合,搭建了水下光通信实验。2018年,WILLNER A等^[11]对采取空分复用方式的基于OAM的水下光通信系统的通信性能及容量进行了研究。2016年,WANG Wenbin等^[12]研究了高斯光束与拓扑电荷数分别为4和8的LG光束在不同介质中的传输特性,结果表明LG光束具有更好的传输特性。涡旋光束及其叠加态在水下进行传输通信能够实现超宽带、高速率的水下无线光传输通信提供一种新的途径。在涡旋光束及其叠加态的研究中,2013年,HE Chunmeng等^[13]对径向指数为0且具有不同拓扑电荷值的LG光束叠加形成的复合涡旋光束进行研究,对其光强分布和透射特性进行了分析。KE Xizheng等^[14]对有相同的高阶径向指数和负OAM态的LG光束叠加形成的复合涡旋光束进行研究,并分析了光束参数和传输距离对复合涡旋光束的影响;同年,LU Tengfei等^[15]利用循环泵对水槽内湍流的强弱进行控制,研究了拓扑电荷数为2、4和6的LG涡旋光束在传输距离为5.4 m和12.6 m下的闪烁指数变化。2019年,ZHANG Wenhao等^[16]实验证明了分数阶LG涡旋光束在水下环境中的传播特性,并对不同拓扑电荷下LG-FOAM通信系统的信道容量进行了分析;同年,SUN Yanling等^[17]搭建了湍流环境下涡旋光与高斯光束的干涉实验,研究其干涉条纹的偏移特性。近年来,对涡旋光束复用与海洋湍流之间的相互作用机制的研究,为解决海水通道中的激光通信这一难题提供了参考。2021年,WILLNER A等^[18]提出了使用多路复用和多个OAM波束的同时传输来增强通信系统的容量。2022年,DENG Qingqing等^[19]通过随机相位屏对大气湍流进行模拟,分析了涡旋光束在湍流中传输时的光强、相位分布及闪烁指数;同年,WANG Mingjun等^[20]搭建了水下涡旋光传输实验装置,对不同温度差与盐度差下LG涡旋光束及其叠加态的传输特性进行了研究。

综上所述,涡旋光束及其叠加态在源场中可以携带更多的角动量模式^[21],目前人们关注的重点逐渐向多束涡旋光产生的涡旋光叠加态的传输与通信方面转移,但对于涡旋光束及其叠加态在海洋湍流中的传输与通信特性的研究还比较少。本文将带有不同拓扑电荷值的两个拉盖尔-高斯涡旋光束进行同轴叠加,产生双拉盖尔-高斯涡旋光束(Double Laguerre-Gaussian Vortex Beam, DLGVB),基于功率谱反演法搭建了DLGVB光束在海洋湍流中传输的物理模型,并对不同的海洋湍流参数以及拓扑电荷差值下的DLGVB光束传输时的闪烁指数及通信时的误码率进行了仿真研究。

1 DLGVB在海洋湍流中的传播理论

拉盖尔高斯涡旋光束携带轨道角动量,当沿 z 方向传输时,由拉盖尔多项式和 Gaussian 分布函数的组合描述为^[5]

$$\text{LG}(r, \varphi, z, m) = \frac{A}{\omega_0} \left(\frac{\sqrt{2}}{\omega(z)} \right)^m L_n^m \left(\frac{2r^2}{\omega^2(z)} \right) \exp \left(-\frac{r^2}{\omega^2(z)} \right) \exp(im\varphi) \exp(i\Phi) \quad (1)$$

式中, A 为常数, ω_0 为光束的束腰半径, φ 为柱坐标系下的方位角, m 为拓扑电荷数, n 为径向模数。 $\omega(z)$ 是光束在 z 处的半径,表示为 $\omega(z) = \omega_0 \sqrt{1 + (z/z_R)^2}$, z_R 是共焦参数,即瑞利半径, $\Phi = (n + 2m + 1) \arctan(z/z_R) - k(z + r^2/R)$, $R = z + z_R^2/z$ 。

对于径向模数 $n = 0$,两个具有不同拓扑电荷 m 的拉盖尔-高斯涡旋光束的同轴叠加生成双拉盖尔-高斯涡旋光束(Double Laguerre-Gaussian Vortex Beams, DLGVB),表示为^[19]

$$\text{LG}(r, \varphi, z, m_1, m_2) = \text{LG}(r, \varphi, z, m_1) + \text{LG}(r, \varphi, z, m_2) \exp(i\delta) \quad (2)$$

式中, δ 为其中一个涡旋光束的相位差, k 为任意整数。 m_1 和 m_2 为两个叠加的涡旋光束的拓扑电荷, $v = |m_1 - m_2|$ 为两束的拓扑电荷差作为DLGVB的模式。当 v 的值为0时,DLGVB退化为拉盖尔-高斯涡旋光束。

采用功率谱反演法产生随机相位屏的方式,对复杂海洋湍流环境进行模拟。相位功率谱 $\Phi_\phi(\kappa_x, \kappa_y)$ 与海洋湍流折射率功率谱 $\Phi_n(\kappa)$ 之间的关系为^[22]

$$\Phi_\phi(\kappa_x, \kappa_y) = 2\pi k^2 \Delta z \Phi_n(\kappa) \quad (3)$$

式中, Δz 为相邻相位屏之间的间距。海洋湍流折射率功率谱函数 $\Phi_n(\kappa)$ 可表示为^[7]

$$\Phi_n(k) = 0.388 \times 10^{-8} \epsilon^{-1/3} \kappa^{-11/3} [1 + 2.35(\kappa\eta)^{2/3}] \frac{\chi_T}{\omega^2} (\omega^2 \exp(-A_T \sigma) + \exp(-A_S \sigma) - 2\omega_1^2 \exp(-A_{TS} \sigma)) \quad (4)$$

式中, $\kappa = \sqrt{\kappa_z^2 + \zeta^2 \kappa_\rho^2}$, $\kappa_\rho = \sqrt{\kappa_x^2 + \kappa_y^2}$, κ 为湍流波动的空间频率, ϵ 为湍流动能耗散率, χ_T 为海洋湍流的温度

方差耗散率, ω 为海洋湍流盐度温度波动平衡参数, η 为 Kolmogorov 微尺度, $\sigma = 8.284 \times (\kappa\eta)^{4/3} + 12.978 \times (\kappa\eta)^2$, $A_T = 1.863 \times 10^{-2}$, $A_S = 1.9 \times 10^{-4}$, $A_{TS} = 9.41 \times 10^{-3}$ 。

在进行数值仿真时,一般采用离散矩阵的形式,对随机相位屏进行表示。初始设置湍流相位屏的尺寸为 $L_x = N_x \times \Delta x$, $L_y = N_y \times \Delta y$, 其中 N_x 和 N_y 表示在 x 和 y 方向上相位屏离散点的数量。相位屏上,点 (m, n) 处的相位 $\phi(m\Delta x, n\Delta y)$ 可以表示为^[22]

$$\phi(m\Delta x, n\Delta y) = \sum_{j=0}^{N_x} \sum_{l=0}^{N_y} [p(j, s) + iq(j, s)] \exp[2\pi i(ms/N_x + nj/N_y)] \quad (5)$$

式中, Δx 和 Δy 为空间上的采样间隔, $p(j, s)$ 和 $q(j, s)$ 是均值为 0、方差为 1 的高斯且不相关的随机矩阵, 表示为

$$\langle p^2(j, s) \rangle = \langle q^2(j, s) \rangle = \Delta k_x \Delta k_y \Phi_\phi(j\Delta k, s\Delta k_y) \quad (6)$$

式中, Δk_x 和 Δk_y 为频谱采样间隔, $\Delta k_x = 2\pi/L_x$, $\Delta k_y = 2\pi/L_y$ 。海洋湍流相位屏的二维、三维图如图 1。图 1 中设置的模拟海洋湍流参数为 $\epsilon = 10^{-2} \text{m}^2 \text{s}^{-1}$, $\chi_T = 10^{-8} \text{K}^2 \text{s}^{-1}$, $\omega = -2$, $\eta = 0.005$ 。

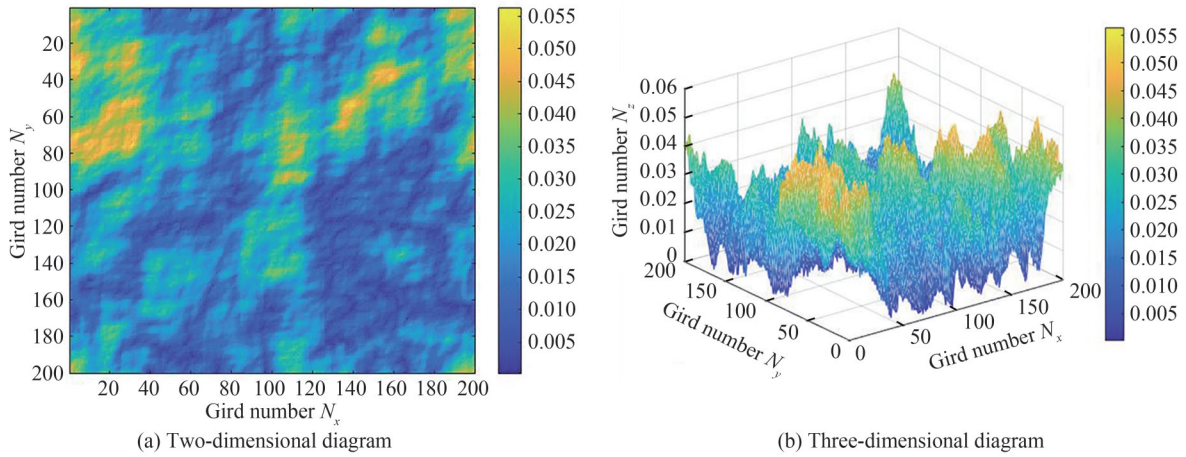


图 1 海洋湍流相位屏

Fig.1 Ocean turbulence phase screen

对式(5)进行多次运算会产生多层湍流相位屏,从而模拟复杂海洋湍流环境,因此可以通过计算 DLGVB 光束通过多层海洋湍流相位屏的方式,对 DLGVB 光束通过复杂海洋湍流环境进行模拟。

可得 DLGVB 光束通过每一层相位屏的表达式为

$$U_1 = \text{IFFT}[\text{FFT}[U_0] \cdot \exp[i\pi\Delta z \cdot (2/\lambda - \lambda k_r^2)]] \exp[i\phi_1(x, y)] \quad (7)$$

式中, U_0 为 DLGVB 光束的初始光场, U_1 为光束经过一层相位屏传输后的光场, $\phi_1(x, y)$ 表示第一个海洋湍流随机相位屏, IFFT 和 FFT 分别为傅里叶逆变换和傅里叶变换, k_r^2 为空间波数, 满足 $k_r^2 = k_x^2 + k_y^2$ 。

DLGVB 光束通过第二个海洋湍流相位屏后的光场表达式为

$$U_2 = \text{IFFT}[\text{FFT}[U_1] \cdot \exp[i\pi\Delta z \cdot (2/\lambda - \lambda k_r^2)]] \exp[i\phi_2(x, y)] \quad (8)$$

式中, U_2 为光束经过一层相位屏传输后的光场, $\phi_2(x, y)$ 表示第二个海洋湍流随机相位屏。类似地, 可以将 DLGVB 光束通过第 n 个海洋湍流相位屏后的光场表达式写为^[23]

$$U_n = \text{IFFT}[\text{FFT}[U_{n-1}] \cdot \exp[i\pi\Delta z \cdot (2/\lambda - \lambda k_r^2)]] \exp[i\phi_n(x, y)] \quad (9)$$

式中, U_{n-1} 为光束经过第 $n-1$ 层相位屏传输后的场强, $\phi_n(x, y)$ 为第 n 个随机相位屏。当 DLGVB 在海洋环境传输时, 考虑到海水对光束有散射和吸收, 式(9)仍需要进行改进, 纯海水的消光系数和光束波长有关, 具体关系可表示为

$$\tau(\lambda) = A_w(\lambda) + B_w(\lambda) \quad (10)$$

式中, $A_w(\lambda)$ 为海水分子吸收系数, $B_w(\lambda)$ 为海水水分子的散射系数。 $B_w(\lambda)$ 可由瑞利散射计算, 约为 1.9×10^{-3} , 当光束波长在蓝绿波段时 $A_w(\lambda)$ 相对其他波段而言最小。

DLGVB光束在海水中传输时,光束的衰减是呈指数下降的,因此DLGVB光束在海水中的光场表达式可写为

$$U_i = U_n \times \exp[-\tau(\lambda)z] \quad (11)$$

式中, U_n 为DLGVB光束通过海洋湍流后的光场, $\tau(\lambda)$ 为海水的消光系数, z 为DLGVB光束在海水中的传输距离。DLGVB光束通过海洋湍流相位屏的传输模拟图如图2。

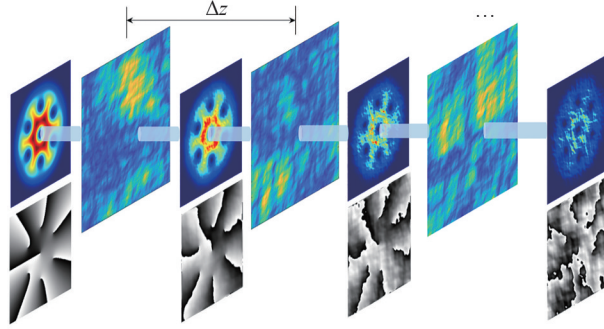


图2 DLGVB光束通过海洋湍流相位屏的传输模拟图

Fig.2 Simulation of DLGVB beam transmission through an ocean turbulent phase screen

在激光传输过程中,光强的分布由于海洋湍流的影响而发生变化。为了定量地描述波动程度,尽可能消除相位屏产生的随机性,可以取多次模拟的平均值计算光强的闪烁指数^[24]。

$$\sigma_I^2(r, \varphi, z) = \frac{\overline{I(r, \varphi, z)^2}}{\overline{I(r, \varphi, z)}^2} - 1 \quad (12)$$

在水下光通信系统中,误码率是对通信质量进行衡量的一个重要指标。采用开关键控OOK(On-Off Keying)调制方式对海洋湍流中的DLGVB光束的通信进行调制。在海洋湍流环境下,光强的概率密度函数可表示为

$$P_I(u) = \frac{1}{\sigma_I \sqrt{2\pi} u} \exp\left\{-\frac{[\ln(u) + 0.5\sigma_I^2]^2}{2\sigma_I^2}\right\} \quad I > 0 \quad (13)$$

接收端的平均误码率为^[25]

$$\langle \text{BER} \rangle = \frac{1}{\sqrt{\pi}} \sum_{i=1}^{\infty} Q\left\{\text{SNR}_0 \exp\left[\sqrt{2} \sigma_I x_i - \frac{\sigma_I^2}{2}\right]\right\} \quad (14)$$

式中, SNR_0 为归一化平均信噪比, x_i 为Hermite多项式 $H_n(x)$ 的根, $Q(x)$ 为高斯Q函数,表示为^[25]

$$Q(x) = \frac{1}{\pi} \int_0^{2\pi} \exp\left(-\frac{x^2}{2 \sin^2 \theta}\right) d\theta \quad (x > 0) \quad (15)$$

2 数值模拟

2.1 DLGVB光束光强相位模拟

对DLGVB光束的光强相位分布进行仿真,设置初始参数波长 $\lambda = 532 \text{ nm}$,温度盐度波动平衡参数 $\omega = -2$,Kolmogorov微尺度 $\eta = 0.005$,束腰半径 $\omega_0 = 0.003 \text{ m}$,传输距离 $L = 100 \text{ m}$,相位屏模型参数设置网格数 $N_x = 200, N_y = 200$,海洋湍流相位屏间距 $\Delta z = 5 \text{ m}$ 。图3展示了在无海洋湍流,海洋湍流强度 $\epsilon = 10^{-2} \text{ m}^2 \text{ s}^{-1}, \chi_T = 10^{-10} \text{ K}^2 \text{ s}^{-1}$,海洋湍流强度 $\epsilon = 10^{-5} \text{ m}^2 \text{ s}^{-1}, \chi_T = 10^{-8} \text{ K}^2 \text{ s}^{-1}$ 三种环境下,四种不同拓扑电荷差值 $v=0(m_1=1, m_2=1), v=2(m_1=1, m_2=3), v=4(m_1=1, m_2=5), v=6(m_1=1, m_2=7)$ 的DLGVB光束的相位、光强二维及三维分布图。由图3可知,DLGVB光束产生光斑分裂,分裂的光斑数量与拓扑电荷值的差值相同,且相位反映了叠加的两束光束的螺旋相位信息,互不干扰。当在海洋湍流中传输之后,光束的强度分布与相位分布模糊,伴随着湍流强度的增加,模糊程度增强,这是由于湍流强度反映了折射率的分布,波动越大表明光束的折射与能量衰减越强烈。

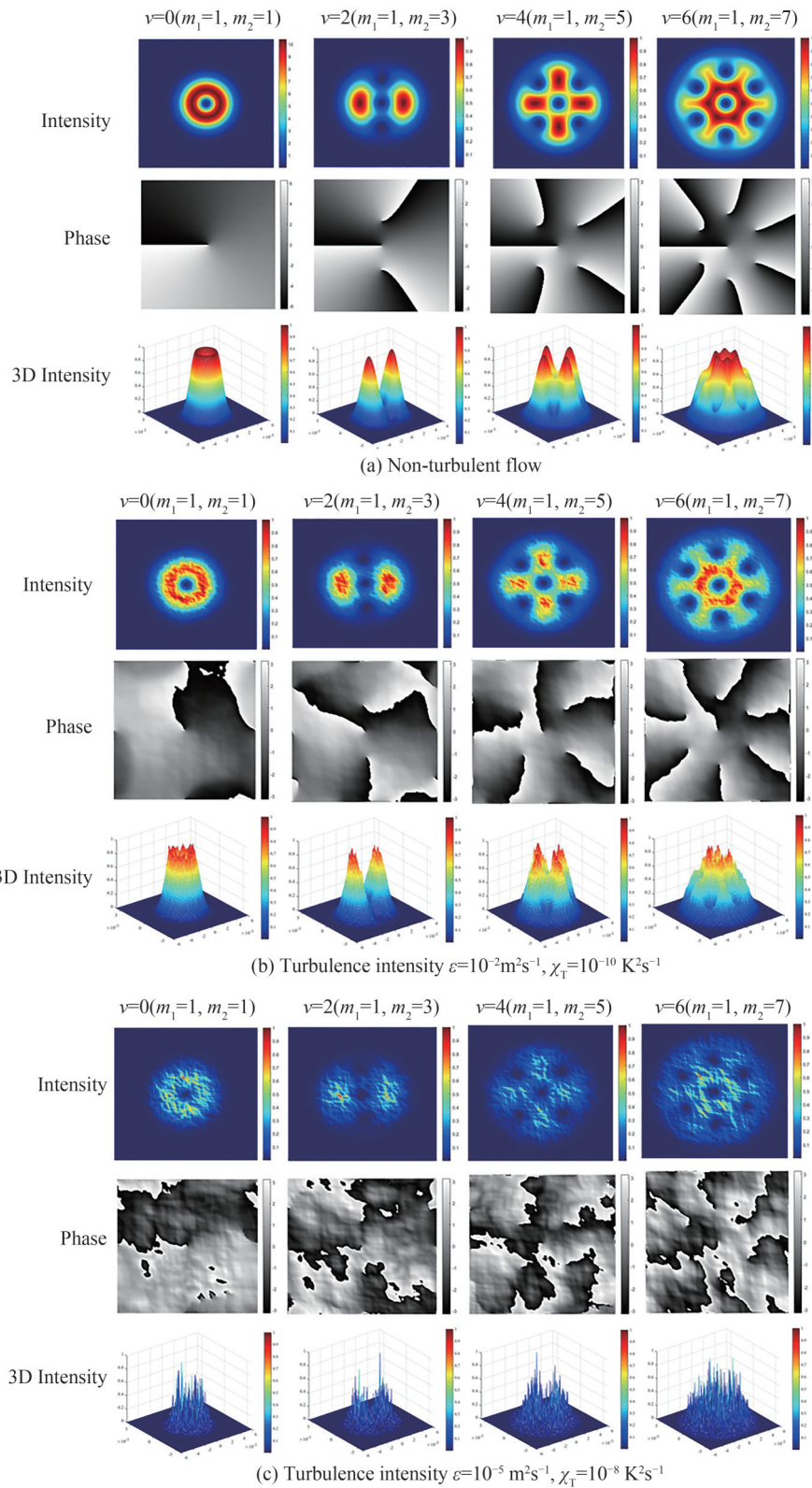


图3 海洋湍流下DLGVB光束传输的光强、相位与光强三维图

Fig.3 Three-dimensional diagram of light intensity, phase and intensity transmitted by DLGVB beam under ocean turbulence

2.2 DLGVB在海洋湍流中传输时的光强闪烁

根据湍流效应及多层相位屏理论,数值分析不同海洋湍流参数对DLGVB光束在海洋湍流湍流中传输影响,对每组叠加产生的DLGVB光束进行400次传输模拟,通过平均计算其光强闪烁系数,以减少相位屏产生的随机性。光束参数设置初始波长 $\lambda = 532 \text{ nm}$,束腰半径 $\omega_0 = 0.003 \text{ m}$,海洋湍流参数设置初始温度盐

度波动平衡参数 $\omega = -3$, 温度方差耗散率 $\chi_T = 10^{-6} \text{K}^2 \text{s}^{-1}$, 湍流动能耗散率 $\epsilon = 10^{-5} \text{m}^2 \text{s}^{-3}$, Kolmogorov 微尺度 $\eta = 0.005$, 传输距离 $L = 100 \text{m}$ 。

图4反映了DLGVB光束在不同海洋湍流参数下的闪烁指数随着拓扑电荷差的变化。图4(a)反映了DLGVB光束在不同湍流动能耗散率下的闪烁指数随着拓扑电荷差的变化,可以看出,随着海洋湍流参数湍流动能耗散率的减小,闪烁指数增加;图4(b)反映了DLGVB光束在不同温度方差耗散率下的闪烁指数随着拓扑电荷差的变化,可以看出,随着海洋湍流参数温度方差耗散率的增加,闪烁指数增加;图4(c)反映了DLGVB光束在不同盐度温度波动平衡参数下的闪烁指数随着拓扑电荷差的变化,可以看出,随着海洋湍流参数盐度温度波动平衡参数的增加,闪烁指数增加。其原因在于随着湍流动能耗散率的减小,温度方差耗散率与盐度温度波动平衡参数的增加,海洋湍流强度增大,因此DLGVB光束在海洋湍流中传输时光强更加闪烁。

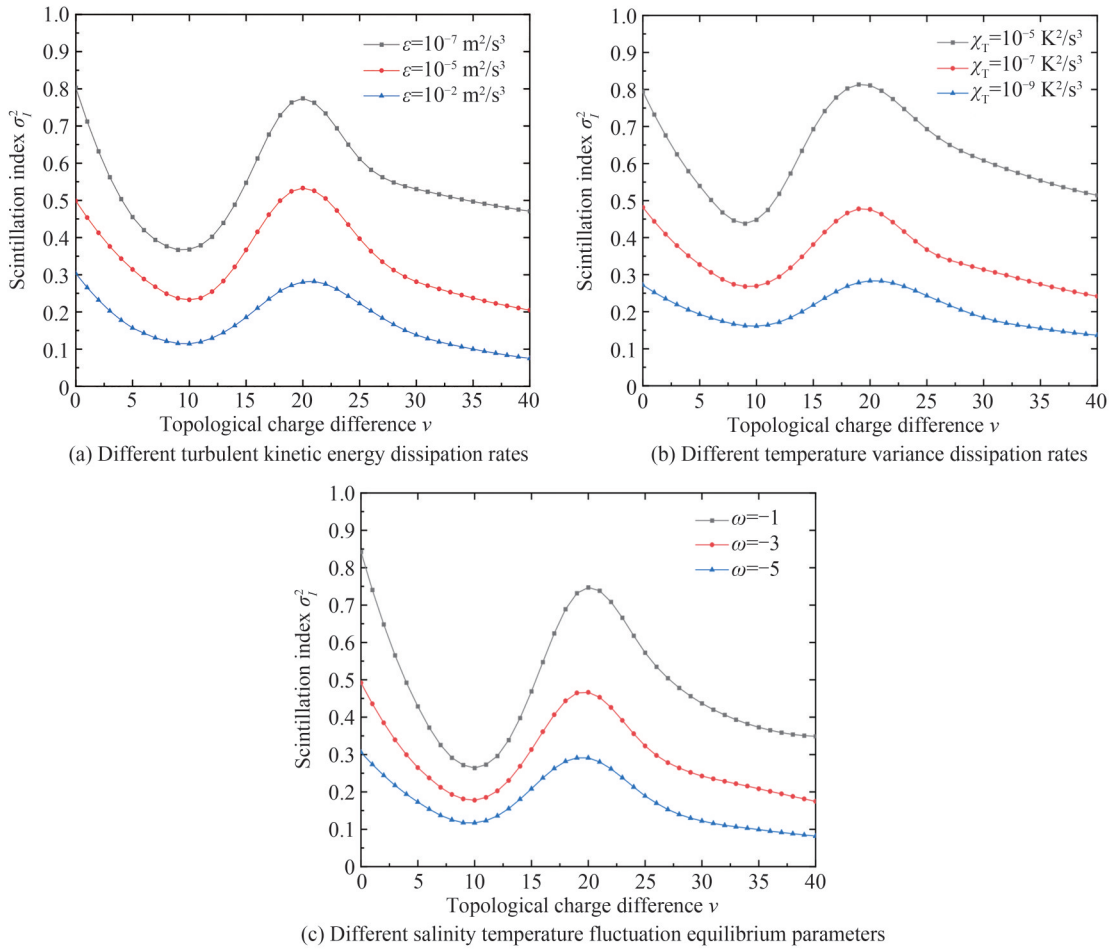


图4 DLGVB光束在不同海洋湍流参数下的闪烁指数随拓扑电荷差的变化

Fig.4 Scintillation index of DLGVB beam with topological charge difference under different ocean turbulence parameters

当DLGVB光束的拓扑电荷差 $\nu < 10$ 时, DLGVB光束通过海洋湍流后的闪烁指数低于的传统LGB($\nu = 0$)的闪烁指数, 闪烁指数随着拓扑电荷差的增加而降低, 其原因是当拓扑电荷差较小时, 点分裂的次数也较小, 单位点聚焦的能量密度较大, 湍流的穿透性能较好, 闪烁指数较低。当拓扑电荷差 $\nu > 10$ 时, 闪烁指数随着拓扑电荷差的增加而增加, 点分裂的数量增加时, 束能量分散, 当湍流强度较强时, 拓扑电荷差较小的涡旋光束具有更明显的能量聚焦特性。当拓扑电荷差 $\nu > 20$ 时, 闪烁指数随着拓扑电荷差的增加而降低, 其原因是由于点分裂次数过多, 单位点聚焦的能量密度减小, 束能量太过于分散, 因此DLGVB光束在海洋湍流中进行传输时, 闪烁指数逐渐降低。

图5反映了拓扑电荷差值 $v=2$ 的DLGVB光束在不同海洋湍流参数下的闪烁指数随传输距离的变化。图5(a)反映了DLGVB光束在不同湍流动能耗散率下的闪烁指数随着传输距离的变化;图5(b)反映了DLGVB光束在不同温度方差耗散率下的闪烁指数随着传输距离的变化;图5(c)反映了DLGVB光束在不同盐度温度波动平衡参数下的闪烁指数随着传输距离的变化。可以看出,随着海洋湍流参数湍流动能耗散率的减小,温度方差耗散率与盐度温度波动平衡参数的增加,闪烁指数增加;随着传输距离的增加,闪烁指数逐渐增大。产生这种现象的原因在于随着湍流动能耗散率的减小,温度方差耗散率与盐度温度波动平衡参数的增加,海洋湍流强度增大,且随着传输距离的增加,从发射端到接收端光经过相位屏的次数增多,湍流影响增强,因此DLGVB光束在海洋湍流中传输时光强更加闪烁。

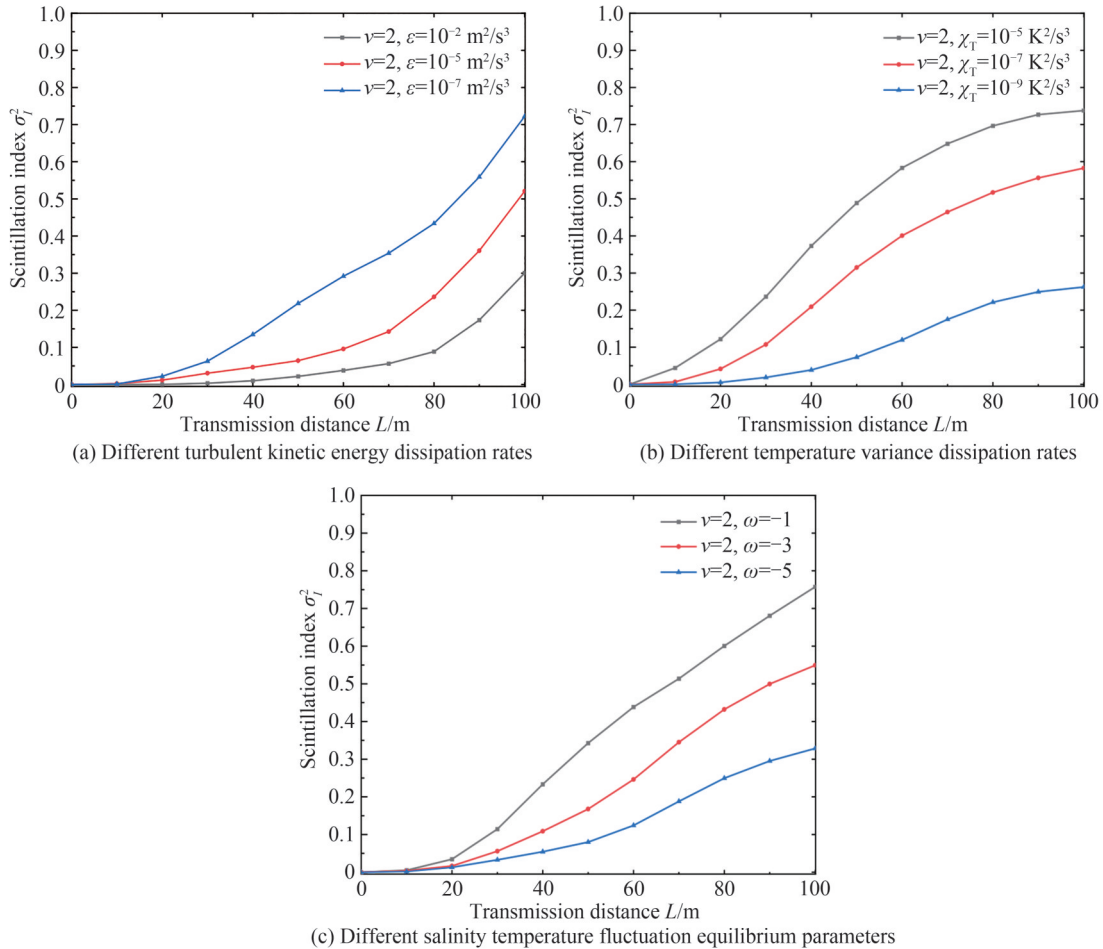


图5 DLGVB光束在不同海洋湍流参数下的闪烁指数随传输距离的变化

Fig.5 Scintillation index of DLGVB beam varies with the transmission distance under different ocean turbulence parameters

2.3 DLGVB在海洋湍流中传输时误码率变化

由2.2节可知,当拓扑电荷差值 $v < 10$ 时,DLGVB光束具有较好的湍流穿透特性,闪烁指数较小,因此进行误码率研究时,选取拓扑电荷差值为 $v=0$ 、 $v=2$ 、 $v=4$ 和 $v=6$ 的DLGVB光束。光束参数设置 $\lambda = 532 \text{ nm}$, $\omega_0 = 0.003 \text{ m}$,海洋湍流参数设置Kolmogorov微尺度 $\eta = 0.005$,传输距离 $L = 100 \text{ m}$ 。

图6反映了在不同湍流动能耗散率下,拓扑电荷差值 $v=0$ 、 $v=2$ 、 $v=4$ 和 $v=6$ 的DLGVB光束的误码率随信噪比之间的变化关系。可以看出,在信噪比较小时,通信误码率受到湍流动能耗散率的影响并不明显,较大信噪比情况下,误码率受到湍流动能耗散率的影响明显;随着海洋湍流参数湍流动能耗散率的增加,通信误码率逐渐减小,通信性能变好,产生这种现象的主要原因是随着湍流动能耗散率的减小,海洋湍流强度会逐渐增加。

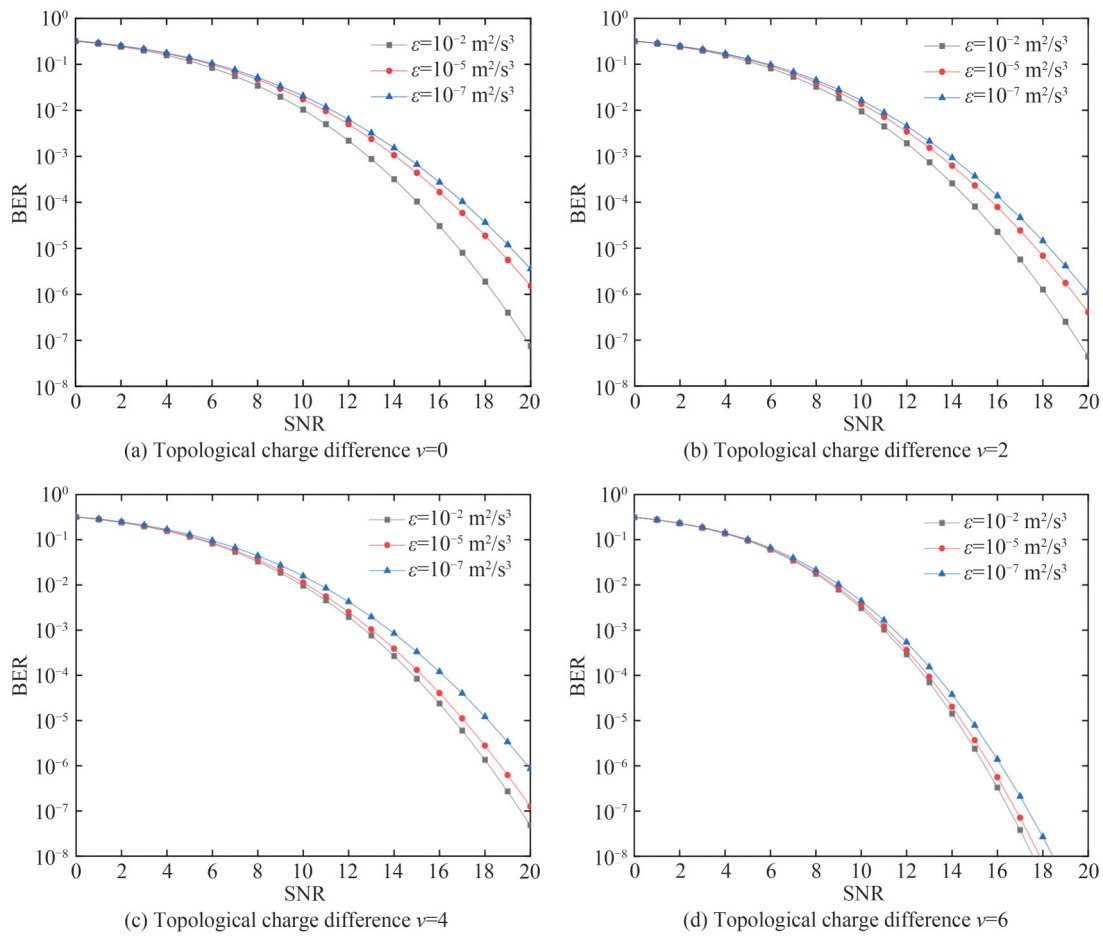
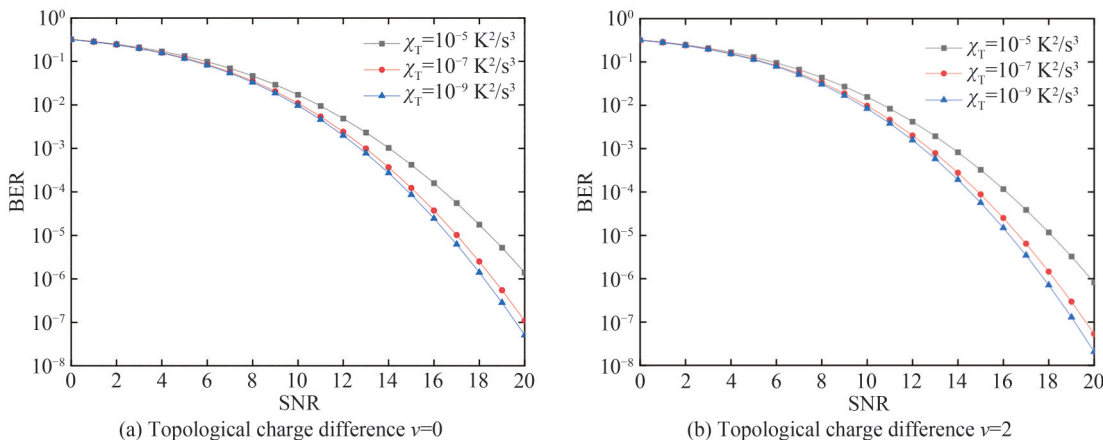


图6 DLGVB光束在不同湍流动能耗散率下的误码率随信噪比的变化

Fig.6 Change of bit error rate of DLGVB beam with SNR under different turbulent kinetic energy dissipation rates

图7反映了不同拓扑电荷差值 $v=0, v=2, v=4$ 和 $v=6$ 的 DLGVB 光束在不同温度方差耗散率下的误码率随信噪比的变化。可以看出,在信噪比较小时,通信误码率受到温度方差耗散率的影响并不明显,较大信噪比情况下,误码率受到温度方差耗散率的影响明显;随着海洋湍流参数温度方差耗散率的减小,误码率逐渐减小,通信性能变好。产生这种现象的主要原因是随着温度方差耗散率的增加,海洋湍流强度会逐渐增加。

图8反映了不同拓扑电荷差值 $v=0, v=2, v=4$ 和 $v=6$ 的 DLGVB 光束在不同盐度温度波动平衡参数下的误码率随信噪比的变化。可以看出,在信噪比较小时,通信误码率受到盐度温度波动平衡参数 ω 的影



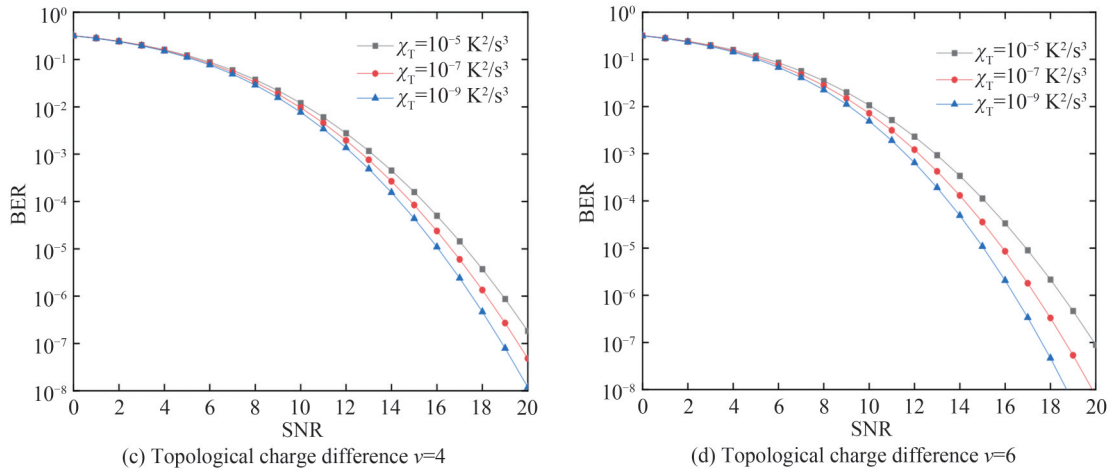


图7 DLGVB光束在不同温度方差耗散率下的误码率

Fig.7 Bit error rate of DLGVB beam at different temperature variance dissipation rates

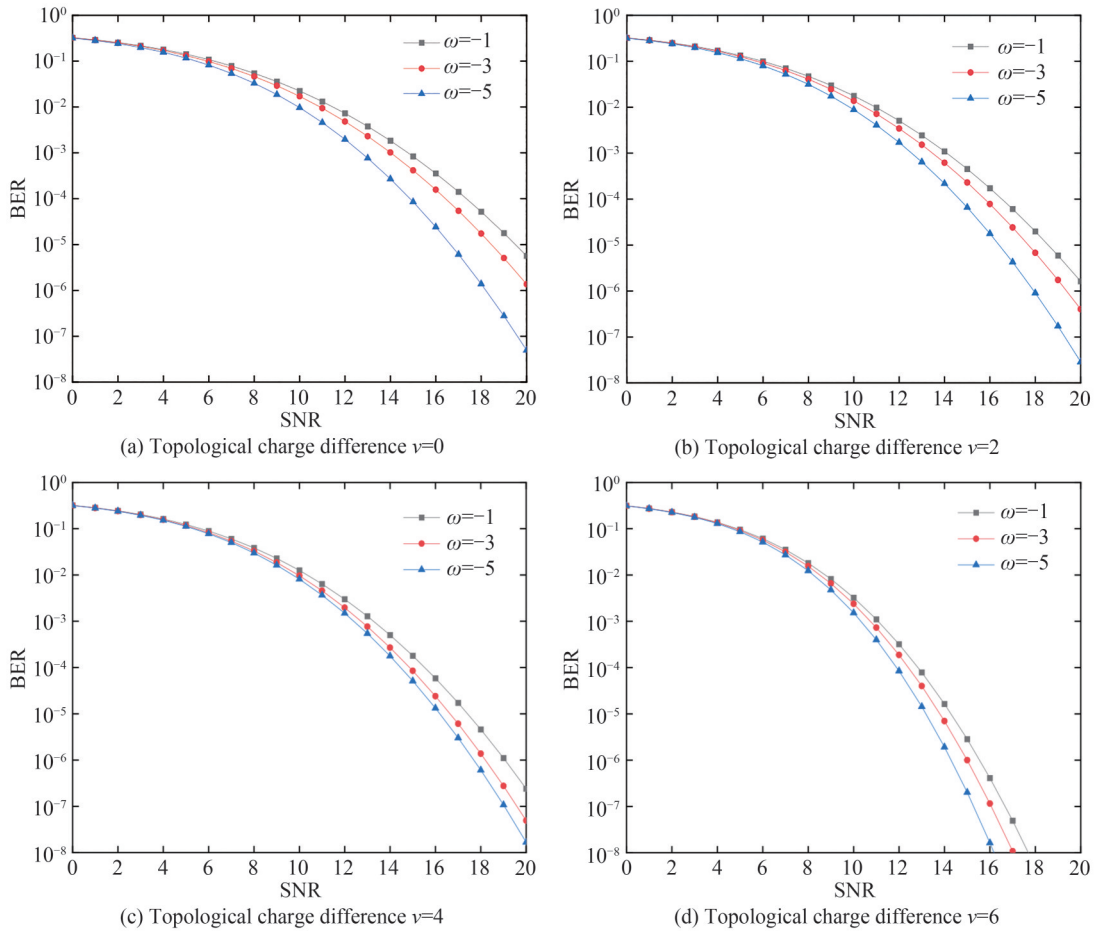


图8 DLGVB光束在不同盐度温度贡献比下的误码率

Fig.8 Bit error rate of DLGVB beam under different salinity temperature contribution ratio

响并不明显,随着信噪比的增加,误码率受到盐度温度波动平衡参数 ω 的影响逐渐明显,且随着盐度温度波动平衡参数的增加,通信误码率逐渐增大。由于 ω 代表的是湍流中温度和盐度所占比例,当 $\omega = -5$ 时误码率较低,即当温度占主导时误码率较低,而当盐度占主导时误码率较高,因此海洋湍流中当温度占主导时,通信性能更好。

为研究水下光通信系统中不同拓扑荷值差对通信误码率的影响,对不同拓扑电荷差值 $v < 10$ 的 DLGVB 光束在海洋湍流环境中传输通信时的误码率进行对比分析,设置初始波长 $\lambda = 532 \text{ nm}$, $\omega_0 = 0.003 \text{ m}$, $\epsilon = 10^{-2} \text{ m}^2 \text{ s}^{-1}$, $\chi_T = 10^{-10} \text{ K}^2 \text{ s}^{-1}$, $\omega = -2$, $\eta = 0.005$, $L = 100 \text{ m}$ 。图 9 反映了不同拓扑电荷差值 $v (v < 10)$ 下的 DLGVB 光束通信误码率随信噪比的变化。可以看出 DLGVB 光束的通信误码率随信噪比的增加而减小,在拓扑电荷差值 $v < 10$ 的情况下,拓扑电荷差大的 DLGVB 光束的误码率小于拓扑电荷差小的 DLGVB 涡旋光束的误码率,因此选取拓扑电荷差值较大的 DLGVB 光束具有更好的通信质量。

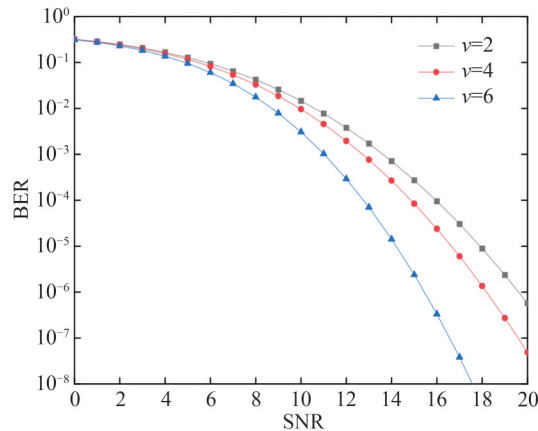


图9 不同拓扑电荷差值 $v (v < 10)$ 下的 DLGVB 光束通信误码率随信噪比的变化

Fig.9 Change of bit error rate of DLGVB beam communication with SNR under different topological charge difference $v (v < 10)$

3 结论

本文根据同轴叠加产生的 DLGVB 的光强特性和相位特性,采用功率谱反演法模拟了 DLGVB 光束的在海洋湍流中传输时的光强和相位分布,并仿真分析了 DLGVB 光束在不同海洋湍流参数下的闪烁指数,根据闪烁指数计算了水下光通信系统在 OOK 调制方式下的通信误码率。结果表明,随着湍流动能耗散率的减小,盐度温度波动平衡参数、温度方差耗散率及传输距离的增加,闪烁指数逐渐增加;与传统的 LGB 相比,在随海洋湍流增加的环境中,具有较低拓扑电荷差 ($v < 10$) 的 DLGVB 可以保持相对稳定和较低的闪烁指数,且闪烁指数随着 DLGVB 光束的拓扑电荷差呈现先减小后增大最终减小的趋势,该现象与光束分裂点的数量及能量分散有关。随着湍流动能耗散率的增加,温度方差耗散率与盐度温度波动平衡参数的减小,误码率逐渐减小;当温度占主导时误码率较低,而当盐度占主导时误码率则较高,因此海洋湍流中温度占主导时,通信性能更好。当低 v 值 ($v < 10$) 时,不同拓扑电荷差值 v 下的 DLGVB 光束的通信误码率随信噪比的增加而减小,拓扑电荷差大的 DLGVB 光束的误码率小于拓扑电荷差小的 DLGVB 光束的误码率,因此低 v 值 ($v < 10$) 时,选取拓扑电荷差值较大的 DLGVB 光束具有更好的通信质量。研究结果表明,在海洋湍流中,使用 DLGVB 光束进行传输可以有效抑制海洋湍流带来的干扰,在海洋湍流环境下对光通信系统进行分析设计时,将涡旋光束及其叠加态与基于 OOK 调制的水下光通信相结合,选择最佳的拓扑电荷差值,可以有效提高传输通信质量及通信系统容量。本文研究对涡旋光束及其叠加态在海洋湍流下传输特性研究及基于 OAM 的水下光通信系统持续扩容的发展需求方面具有重要的参考价值。

参考文献

- [1] WANG Xuewen, NIE Zhongquan, LIANG Yao, et al. Recent advances on optical vortex generation[J]. Nanophotonics, 2018, 7(9): 1533-1556.
- [2] SHEN Yijie, YANG Xilin, QI Ruoyang, et al. Recent advances on tunable vortex beam devices for biomedical applications [J]. Biomedical Journal of Scientific & Technical Research, 2018, 9: 5.
- [3] WANG Honggeng, SONG Qiying, CAI Yi, et al. Recent advances in generation of terahertz vortex beams and their applications[J]. Chinese Physics B, 2020, 29(9): 097404.
- [4] ZHANG Kuang, WANG Yuxiang, YUAN Yueyi, et al. A review of orbital angular momentum vortex beams generation:

- from traditional methods to metasurfaces[J]. *Applied Sciences*, 2020, 10(3): 1015.
- [5] ALLEN L, BEIJERSBERGEN M W, SPREEUW R J C, et al. Orbital angular momentum of light and transformation of Laguerre Gaussian Laser modes[J]. *Physical Review A*, 1992, 45(11): 8185-8189.
- [6] WIENER T, KARP S. The role of blue/green laser systems in strategic submarine communications[J]. *IEEE Transactions on Communications*, 1980, 28(9): 1602-1607.
- [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] GÖKÇE M C, BAYKAL Y. Aperture averaging and BER for Gaussian beam in underwater oceanic turbulence[J]. *Optics Communications*, 2018, 410: 830-835.
- [9] BAGHDADT 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.
- [10] REN Yongxiong, LI Long, WANG Zhe, et al. Orbital angular momentum-based space division multiplexing for high-capacity underwater optical communications[J]. *Scientific Reports*, 2016, 6(1): 33306.
- [11] WILLNER A, ZHAO Zhe, REN Yongxiong, et al. Underwater optical communications using orbital angular momentum-based spatial division multiplexing[J]. *Optics Communications*, 2017, 408(SI): 21-25.
- [12] WANG Wenbin, GOZALI R, SHI Lingyan, et al. Deep transmission of Laguerre-Gaussian vortex beams through turbid scattering media[J]. *Optics Letters*, 2016, 41(9): 2069-2072.
- [13] He Chunmeng, HUANG Shujie. A new-type composite vortex beam generated by coaxial superposition[J]. *Journal of Optoelectronics Laser*, 2013, 24(12): 2440-2445.
- [14] KE Xizheng, SHI Xinyu. Experimental study on the superposition of high-order radial Laguerre-Gaussian beams[J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2018, 47(12): 1207002.
柯熙政,石欣雨.高阶径向拉盖尔-高斯光束叠加态的实验研究[J].*红外与激光工程*, 2018, 47(12): 1207002.
- [15] LU Tengfei, LIU Yongxin, PU Jixiong. 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.
- [16] ZHANG Wenhao, WANG Le, WANG Wennai, et al. Propagation property of Laguerre-Gaussian beams carrying fractional orbital angular momentum in an underwater channel[J]. *OSA Continuum*, 2019, 2(11): 3281.
- [17] SUN Yanling, ZHANG Jiarui, LU Zhengzhong. Propagation characteristics of Laguerre-Gaussian vortex beams in underwater turbulence[J]. *Acta Optica Sinica*, 2019, 39(10): 1001005.
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.
- [18] WILLNER A, ZHAO Zhe, LIU Cong, et al. Perspectives on advances in high-capacity, free-space communications using multiplexing of orbital-angular-momentum beams[J]. *APL Photonics*, 2021, 6(3): 030901.
- [19] DENG Qingqing, CHEN Chaoxu, CHEN Wei, et al. Bit error rate analysis in atmospheric turbulence channel of synthetic double vortex beam[J]. *IEEE Photonics Journal*, 2022, 14(5): 1-5.
- [20] WANG Mingjun, YU Wenhui, HUANG Chaojun. Transmission characteristics of underwater laguerre-gaussian vortex beam and its superposition states[J]. *Acta Optica Sinica*, 2023, 43(6): 0626001.
王明军,余文辉,黄朝军.水下拉盖尔-高斯涡旋光束及其叠加态传输特性[J].*光学学报*, 2023, 43(6): 0626001.
- [21] LIU Yongxin, ZHANG Kaining, CHEN Ziyang, et al. Scintillation index of double vortex beams in turbulent atmosphere[J]. *Optik*, 2019, 181: 571-574.
- [22] WANG Xinguang, WANG Le, ZHAO Shengmei. Research on Hypergeometric-Gaussian vortex beam propagating under oceanic turbulence by theoretical derivation and numerical simulation[J]. *Journal of Marine Science and Engineering*, 2021, 9(4): 442.
- [23] WANG Mingjun, CHENG Qun, LI Jianqing, et al. Transmission characteristics of blue-green vortex beams in the lower atmosphere-upper ocean link[J]. *Journal of Quantitative Spectroscopy and Radiative Transfer*, 2022, 286: 108205.
- [24] EYYUBOĞLU 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.
- [25] HUANG Xuhong, LI Zhongyi, LU Haihan, et al. 6-m/10-Gbps underwater wireless red-light laser transmission system[J]. *Optical Engineering*, 2018, 57(6): 066110.
- [26] XU Dongling, YUE Peng, YI Xiang. A theoretical analysis method of OAM-based FSO error performance[J]. *Acta Electronica Sinica*, 2021, 49(10): 1934-1944.
徐东苓,岳鹏,易湘.一种基于OAM的FSO误码性能的理论分析方法[J].*电子学报*, 2021, 49(10): 1934-1944.

Scintillation Index and Bit Error Rate of Double Laguerre–Gaussian Vortex Beams under Ocean Turbulence

DIAO Luxin¹, WANG Mingjun^{1,2,3}, HUANG Chaojun³, WU Xiaohu⁴, WANG Wei⁵

(1 *School of Automation and Information Engineering, Xi'an University of Technology, Xi'an 710048, China*)

(2 *Xi'an Key Laboratory of Wireless Optical Communication and Network Research, Xi'an 710048, China*)

(3 *School of Physics and Telecommunications Engineering, Shaanxi University of Technology, Hanzhong 723001, China*)

(4 *Shandong Institute of Advanced Technology, Jinan 250100, China*)

(5 *Xi'an Institute of Optics and Precision Mechanics of Cas, Xi'an 710119, China*)

Abstract: The oceans have a large amount of unexplored resources, so the exploration area of human beings is moving towards the unknown ocean as land resources are getting scarce. Underwater wireless optical communication technology with higher rates and better security has become the key to underwater environmental monitoring, wireless sensor networks, offshore exploration and communication between submarines. Vortex beams are a class of beams with helical phase wavefront carrying Orbital Angular Momentum (OAM), which have been widely used in the fields of optical communication, remote sensing and super-resolution imaging due to their specific helical phase structure and dark hollow ring light intensity distribution. The transmission of vortex beams in seawater environments is interfered by ocean turbulence, which results in light intensity scintillation, phase undulation and spot drift, which can degrade the communication quality. However, as human activities extend from free space to the marine environment, the demand for the communication capacity of underwater optical communication systems is increasing, so it is of great significance to study the coded communication of underwater vortex beams and their superposition states, and to further explore methods to suppress the effect of ocean turbulence on the transmission of the beams, for the underwater vortex optical communication systems.

In this paper, power spectrum inversion method are used to establish a phase screen model of ocean turbulence, simulate real ocean turbulence, and study the light intensity and phase characteristics of Double Laguerre–Gaussian Vortex Beam (DLGVB) generated by coaxial superposition during transmission in ocean turbulence. The scintillation index of DLGVB beam under different ocean turbulence parameters and topological charge difference is simulated and analyzed. According to the scintillation index, the bit error rate of the underwater optical communication system based on On-off Keying (OOK) modulation under different ocean turbulence parameters is further calculated, and the bit error rate of the optical communication system under different topological charge difference is simulated and analyzed.

The results show that the scintillation index of Double Laguerre–Gaussian Vortex Beam (DLGVB) increases with the decrease of turbulent kinetic energy dissipation rate, the increase of transmission distance, salinity temperature fluctuation equilibrium parameter and temperature variance dissipation rate. The main reason is that the intensity of ocean turbulence will gradually increase with the decrease of turbulent kinetic energy dissipation rate and the increase of salinity temperature fluctuation equilibrium parameter and temperature variance dissipation rate. Compared with the traditional Laguerre Gaussian vortex beam, the DLGVB beam with lower topological charge difference ($v < 10$) can maintain relatively stable and low scintillation index in the environment with the increase of ocean turbulence intensity, and the scintillation index shows a trend of decreasing, then increasing and finally decreasing with the topological charge difference of the DLGVB beam, which is related to the number of splitting points of the beam and the dispersion of the energy; for the underwater vortex optical communication system, the BER decreases with the increase of turbulent kinetic energy dissipation rate and the decrease of temperature variance dissipation rate and salinity temperature fluctuation equilibrium parameter; the BER is lower when the temperature is dominant and higher when the salinity is dominant, so the communication performance is better when the temperature is dominant in the oceanic turbulence; when the topological charge difference is lower ($v < 10$), the communication performance of DLGVB beams with different topological charge differences is better. When the topological charge difference value ($v < 10$) is low, the communication BER of DLGVB beams with different topological charge difference values decreases with the increase of the signal-to-noise ratio, and the BER of DLGVB beams with a large topological charge difference value is

smaller than that of DLGVB beams with a small topological charge difference value, so that DLGVB beams with a large topological charge difference value are selected to have a better quality of communication when the topological charge difference value ($v < 10$) is low.

Under the ocean turbulence environment, the use of DLGVB beams for transmission can effectively suppress the interference caused by ocean turbulence; when analyzing and designing the underwater optical communication system, combining vortex beams and their superposition states with the underwater optical communication based on OOK modulation, and selecting the optimal topological charge difference, can effectively improve the transmission and communication quality as well as the capacity of the communication system. The research results of this paper have important reference value for the study of transmission characteristics of vortex beams and their superposition states under ocean turbulence, as well as for the development needs and applications of continuous capacity expansion of underwater optical communication systems based on orbital angular momentum.

Key words: Ocean turbulence; Double Laguerre–Gaussian vortex beams; Topological charge difference; Scintillation index; Bit error rate

OCIS Codes: 010.3310; 010.4450; 010.7060; 120.4820

Foundation item: The Cultivation Project of Major Research Program of the National Natural Science Foundation of China (No. 92052106), National Natural Science Foundation of China (No. 61771385), the Innovation Team of Higher Education Institutions in Shaanxi Province, the Key Core Technology Tackling Project of Key Industrial Chain of Xi'an Municipality (No. 103-433023062), the Key Research and Development Program of Xianyang Municipality (No. L2023-ZDYF-QYCX-025), the Key Laboratory Fund of Visible Optical Communication in Henan Province (No. HKLVLC2023-B05), Shaanxi Science and Technology Innovation Team (No. 2024RS-CXTD-12)