

激光与光电子学进展

各向异性海洋湍流对外差式 DPSK 无线光通信系统的性能研究

贺锋涛^{1*}, 王妮^{1**}, 张建磊^{1***}, 杨祎¹, 王清杰¹, 李碧丽²

¹西安邮电大学电子工程学院, 陕西 西安 710121;

²中国船舶重工集团第 705 研究所水下信息与控制重点实验室, 陕西 西安 710077

摘要 应用广义的惠更斯-菲涅耳原理及改进的 Rytov 方法, 采用基于 Gamma-Gamma 光强概率分布的海洋湍流信道模型, 得到了中断概率解析式。并在此基础上对各向异性海洋湍流高斯光束外差式差分相移键控(DPSK)调制的中断概率性能进行了研究。仿真分析了不同的各向异性海洋湍流下各种海洋湍流参数(温度与盐度波动对功率谱变化贡献之比、单位质量流体动能耗散率、均方温度耗散率)、传输距离、DPSK 调制的数据传输速率对中断概率的影响。为降低高斯光束 DPSK 调制下的中断概率、提高通信质量及可靠性提供了理论依据。

关键词 海洋光学; 水下无线光通信; 各向异性海洋湍流; 高斯光束; 外差式差分相移键控; Gamma-Gamma 信道模型

中图分类号 O437; P733.3

文献标志码 A

doi: 10.3788/LOP202158.1901004

Performance of Heterodyne DPSK Wireless Optical Communication System Under Anisotropic Ocean Turbulence

He Fengtao^{1*}, Wang Ni^{1**}, Zhang Jianlei^{1***}, Yang Yi¹, Wang Qingjie¹, Li Bili²

¹*School of Electronic Engineering, Xi'an University of Posts and Telecommunications, Xi'an, Shaanxi 710121, China;*

²*Key Laboratory of Underwater Information and Control, China Shipbuilding Industry Corporation 705 Research Institute, Xi'an, Shaanxi 710077, China*

Abstract In this study, using the extended Huygens-Fresnel principle and the improved Rytov method, a turbulence channel model based on the Gamma-Gamma intensity probability distribution is used to obtain the analytical expression of outage probability. On this basis, the outage probability characteristics of the heterodyne differential phase-shift keying (DPSK) modulation of Gaussian beam waves are studied in anisotropic turbulence. A performance study under different anisotropic ocean turbulence conditions is conducted. The effects of various turbulence parameters, i. e., the contributions of temperature and salinity to the power spectrum, the dissipation rate of kinetic energy per unit mass fluid, and the dissipation rate of mean-squared temperature, are investigated, and the transmission distance and data transmission rate on outage probability are analyzed. The analysis provides a theoretical basis for reducing the outage probability of Gaussian beam DPSK modulation and improving communication quality and reliability.

收稿日期: 2020-10-29; 修回日期: 2020-12-11; 录用日期: 2020-12-22

基金项目: 国家自然科学基金(61805199)、国家基础科研计划实验室稳定支持专项项目(JCKY2020207CD02)、水下信息与控制国家重点实验室项目(XK-01-61-KS-0176)、陕西省技术创新引导专项基金(2020TG-001)

通信作者: *hefengtao@xupt.edu.cn; **1041637116@qq.com; ***zhangjianlei@xupt.edu.cn

Key words oceanic optics; underwater wireless optical communication; anisotropic oceanic turbulence; Gaussian beam; heterodyne phase-shift-keying (DPSK); Gamma-Gamma channel model

OCIS codes 010.4450; 010.7060; 060.4510

1 引言

海洋新能源的开发与利用是人类维持自身发展、扩展生存空间的有效途径。因此,水下无线光通信在水下传感领域中的应用前景较为广泛,主要包括商业海洋资源勘探、无人潜水器之间的通信、潜艇与船舶之间的通信、水下无线传感网络以及军舰与潜艇之间的通信等^[1-2]。水下无线光通信通过无线载波进行数据传输。而无线载波有声波、射频和光波三种形式。声波通信有高频衰减、调制带宽窄等缺陷,数据的传输速率只能达到 $\text{kb}\cdot\text{s}^{-1}$ 。射频通信在水下的传输速率可达 MHz,高于声波数据传输速率,但射频通信在水中的衰减系数较大,数据的传输速率和传输距离会受到限制。水下无线光通信(UWOC)选用 450~550 nm 的低损耗蓝绿光波段作为无线载波来实现数据的通信传输^[3-4],数据传输速率可达 $\text{G}\cdot\text{bit}\cdot\text{s}^{-1}$,是目前较新颖的研究方向。

光信号在海洋中传输时,会受到海水吸收、散射及湍流的影响,使光信号的传输性能降低^[5-6]。海洋湍流是由海水盐度和温度变化引起的折射率随机波动,是影响无线光通信系统性能的关键因素。光束经过海洋湍流信道后会导致光强闪烁^[7-8]、信噪比^[9]、误码率^[10]等通信性能指标发生变化,这些湍流效应严重影响了光在海水信道中的传输,从而导致无线光通信系统性能恶化。

海洋湍流对无线光通信信道性能影响的研究模型主要包括对数正态分布模型、k分布模型、负指数分布模型、Gamma-Gamma 分布模型^[11]。对数正态分布模型较简单,适用于弱湍流区;k分布和负指数分布模型,适应于强湍流区;Gamma-Gamma 分布模型的尾端部分与仿真模拟及实验结果更为吻合,适用于弱、中和强海洋湍流区^[12-14]。近年来,为了提高 UWOC 系统的通信性能指标,研究人员提出了瞄准误差^[15-16]、孔径接收^[17]、MIMO 接收^[18-19]等技术。张慧颖等^[20]研究大气湍流和瞄准误差下差分相移键控(DPSK)调制的光通信系统的性能。Fu等^[21]研究各向同性海洋湍流外差 DPSK 水下无线光通信误码率和中断概率的影响。Zou等^[22]研究部分相干高斯光束在弱湍流二进制启闭键控(OOK)调制下

无线光通信系统的平均容量。Gökçe等^[23]研究了海洋湍流对脉冲调位(PPM)调制的无线光通信性能的影响。上述研究者在大气湍流和海洋湍流环境下,采用不同的调制方式来提升无线光通信系统性能,为通信科研做出了巨大的贡献。但上述研究者只针对湍流是各向同性的情况,即湍流涡旋的运动在足够小的运动尺度上的随机特性是各向同性,且平均特征呈球形对称,而实际情况下满足各向同性的条件比较苛刻。因此,高斯光通信 DPSK 调制下 UWOC 系统的中断概率在各向异性海洋湍流中的研究尚未报道。

本研究以 Gamma-Gamma 光强概率分布模型为基础,采用 DPSK 和外差检测接收技术,搭建了各向异性海洋湍流高斯光束外差 DPSK 无线光通信系统。无线光通信系统通常采用 OOK 调制,但 OOK 调制具有抗噪声性能差的缺点。而 DPSK 调制的通信容量大,接收灵敏度高,可以消除背景噪声,有较好的频谱利用率,故采用 DPSK 调制能够有效地提升通信系统的性能。对于相干光通信而言,零差检测要求本地振荡光信号的频率、相位与接收信号的频率、相位完全相同,实现起来较为困难,外差检测的信噪比虽比零差检测的信噪比低 3 dB,但是容易实现。考虑到海洋涡旋运动的不对称性以及涡旋的水平尺度远大于垂直尺度的情况,在各向异性海洋湍流环境中,通过不断增大各向异性因子的值,仿真分析了各种海洋湍流参数、传输距离、DPSK 调制的数据传输速率对中断概率的影响,为目前水下无线光通信系统面临的主要技术问题提供了较高的应用价值。

2 基本原理

2.1 外差 DPSK UWOC 系统原理

2.1.1 DPSK 调制

DPSK 是一种相对相位的调制方式,DPSK 调制是利用前后相邻码元的载波的相对相位变化传送数字信息的调制技术。载波的相对相位是指当前码元与前一码元的载波相位差。而相移键控(PSK)调制则是利用载波相位的绝对值来传送数字信息。相比于 PSK 调制,DPSK 在解调过程中避

免了“反向工作”或“倒π”的现象。

2.1.2 外差检测接收技术

水下无线光通信中需考虑的一大影响因素是背景噪声,为了更好地抑制背景光的干扰,接收端采用外差检测接收技术。外差检测是指本地振荡光和被调制的信号光频率不相同,产生一个差频。由于本地振荡光的引入,本地振荡光功率引起的噪声超过其他噪声。外差检测接收技术具有更窄的接收带宽,对背景光有良好的滤波性能^[24]。

图 1 为各向异性海洋湍流高斯光束外差 DPSK 无线光通信系统框图。发送端通过 DPSK 调制将信号相位信息载入光载波中,驱动 LD 光源发光,以高斯形式作为发射光束,经过透镜调整光束出射范围并聚集光束,沿着 Gamma-Gamma 各向异性海洋湍流信道发送。接收端光信号被孔径为 D 的高斯透镜接收,接收到的光信号与本地激光产生的本地光振荡信号进行混频,混频产生的信号经过滤波放大后,被 DPSK 解调恢复出原始信号,最后输出信号。

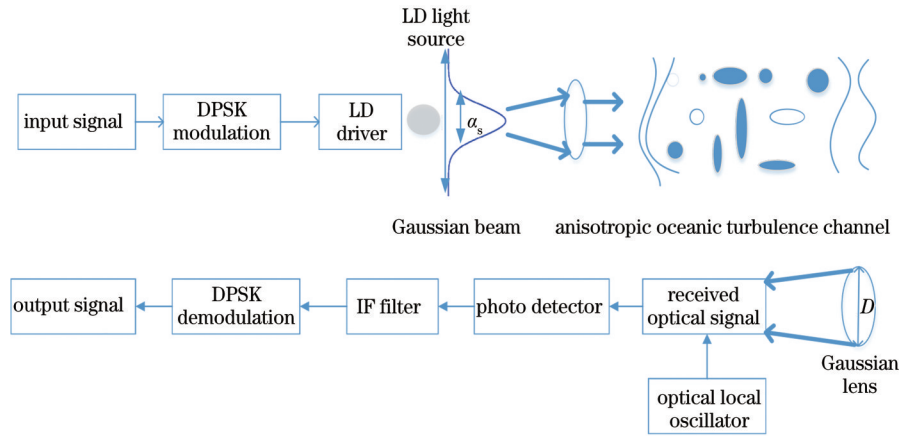


图 1 各向异性海洋湍流高斯光束外差 DPSK 无线光通信系统框图

Fig. 1 Block diagram of heterodyne DPSK wireless optical communication system with Gaussian beam propagating in anisotropic ocean turbulence

2.2 接收端的平均接收光功率

高斯光束在发射端的光强为^[23]

$$u(\mathbf{s}) = A \exp\left(-\frac{\mathbf{s}^2}{2\alpha_s^2}\right), \quad (1)$$

式中: A 是高斯光束振幅; $\mathbf{s} = (s_x, s_y)$ 是发射端光源的平面坐标; α_s^2 是高斯光源尺寸。

大气湍流信道中,应用广义的惠更斯-菲涅耳原理推导出高斯光束到达接收端的平均光强^[25],表达式为

$$\langle I(\mathbf{p}, z=L) \rangle = \frac{1}{(\lambda L)^2} \int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} d\mathbf{s}_1^2 d\mathbf{s}_2^2 u(\mathbf{s}_1) u^*(\mathbf{s}_2) \times \exp\left\{\frac{jk}{2L} [(\mathbf{p}-\mathbf{s}_1)^2 - (\mathbf{p}-\mathbf{s}_2)^2] - 0.5D_\Psi(\mathbf{s}_1, \mathbf{s}_2)\right\}, \quad (2)$$

式中, k 为光波数, $k = 2\pi/\lambda$; λ 是光的波长; L 为激光在湍流信道中的传播距离; $\mathbf{p} = (p_x, p_y)$ 是接收端平面的空间坐标; $*$ 表示复共轭, j 为虚数; $D_\Psi(\mathbf{s}_1, \mathbf{s}_2)$ 是波结构函数, 即 $D_\Psi(\mathbf{s}_1, \mathbf{s}_2) \approx 2\rho_0^{-2}(\mathbf{s}_1 - \mathbf{s}_2)^2$, ρ_0 是湍流中球面

波的相干长度, $\rho_0 = (0.546C_n^2 k^2 L)^{-3/5}$, C_n^2 是大气湍流的等效结构常数。本文研究的是各向异性海洋湍流, 即 C_n^2 为各向异性海洋湍流中的等效结构常数。

将(1)式代入(2)式中,接收端的平均光强^[23]为

$$\langle I(\mathbf{p}, z=L) \rangle = \frac{\left(\frac{k\alpha_s}{2L}\right)^2}{\left(\frac{1}{4\alpha_s^2} + \frac{1}{\rho_0^2} + \frac{k^2\alpha_s^2}{4L^2}\right)} \times \exp\left\{-\frac{\left(\frac{k\alpha_s}{L}\right)^2 (p_x^2 + p_y^2)}{\left[1 + \left(\frac{2\alpha_s}{\rho_0}\right)^2 + \left(\frac{k\alpha_s}{L}\right)^2\right]}\right\}, \quad (3)$$

高斯光束到达接收端的平均光功率^[23]为

$$\langle P_r \rangle = \int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} \langle I(\mathbf{p}, z=L) \rangle h(\mathbf{p}) d\mathbf{p}, \quad (4)$$

式中, $h(\mathbf{p})$ 是接收端孔径函数, 即 $h(\mathbf{p}) = \exp\left[-\frac{8}{D^2}(p_x^2 + p_y^2)\right]$, D 为接收透镜的孔径大小。

2.3 各向异性海洋湍流的等效结构常数

各向异性海洋湍流的等效结构常数^[26]的表达式为

$$C_n^2 = 7.845\pi k^{-7/6} L^{-11/6} \times \operatorname{Re} \left\{ \int_0^L dz \int_0^{\infty} d\kappa_x \int_{-\infty}^{\infty} d\kappa_y [P(z, \kappa_x, \kappa_y)P(z, -\kappa_x, -\kappa_y) + |P(z, \kappa_x, \kappa_y)|^2 \Phi_n(\kappa_x, \kappa_y)] \right\}, \quad (5)$$

式中: κ_x, κ_y 分别是空间频率在 x 方向和 y 方向的分量; Re 表示实部; z 表示光束的传播方向。 $P(z, \kappa_x, \kappa_y)$ 为^[26]

$$P(z, \kappa_x, \kappa_y) = jk \exp[-0.5(kL)^{-1} jz(L-z)(\kappa_x^2 + \kappa_y^2)], \quad (6)$$

$\Phi_n(\kappa_x, \kappa_y)$ 表示各向异性海洋湍流功率谱^[27-28], 其表达式为

$$\Phi_n(\kappa_x, \kappa_y) = 0.388 \times 10^{-8} \mu_x \mu_y \epsilon^{-1/3} [(\mu_x \kappa_x)^2 + (\mu_y \kappa_y)^2]^{-11/6} \times \left\{ 1 + 2.35 [(\mu_x \kappa_x)^2 + (\mu_y \kappa_y)^2]^{-11/6} \nu^{1/2} \epsilon^{-1/6} \right\} \times \left\{ \omega^{-2} X_T \left\{ \omega^2 \exp[-A_T \delta(\kappa_x, \kappa_y, \epsilon)] + \exp[-A_S \delta(\kappa_x, \kappa_y, \epsilon)] - 2\omega \exp[-A_{TS} \delta(\kappa_x, \kappa_y, \epsilon)] \right\} \right\}, \quad (7)$$

式中: μ_x, μ_y 分别是在 x 方向和 y 方向上的各向异性因子, μ_x, μ_y 的取值大于 1, 表示各向异性海洋湍流, μ_x, μ_y 的取值等于 1, 表示各向同性海洋湍流; X_T 是均方温度耗散率, 取值范围为 $10^{-4} \sim 10^{-10} \text{ K}^2/\text{s}$; ϵ 是单位质量流体动能耗散率, 取值范围为 $10^{-1} \sim 10^{-10} \text{ m}^2/\text{s}^3$; ν 是运动黏度系数, 取值范围 $0 \sim 10^{-5} \text{ m}^2/\text{s}$; $\nu = l_0^{4/3} \epsilon^{1/3}$, l_0

是 Kolmogorov 内尺度; ω 为无单位参数, 表示温度与盐度波动对功率谱变化贡献之比, 取值范围为 $-5 \sim 0$, -5 代表温度变化引起的湍流占主导作用, 0 代表盐度变化引起的湍流占主导作用; $A_S = 1.9 \times 10^{-4}$, $A_T = 1.863 \times 10^{-2}$, $A_{TS} = 9.41 \times 10^{-3}$ 。其中 $\delta(\kappa_x, \kappa_y, \epsilon)$ 的表达式为

$$\delta(\kappa_x, \kappa_y, \epsilon) = 8.284\nu\epsilon^{-1/3} [(\mu_x \kappa_x)^2 + (\mu_y \kappa_y)^2]^{2/3} + 12.978\nu^{3/2}\epsilon^{-1/2} [(\mu_x \kappa_x)^2 + (\mu_y \kappa_y)^2]. \quad (8)$$

2.4 Gamma-Gamma 海洋湍流信道模型

张逸新等^[13]与 Andrews 等^[12]提出接收到的光强起伏是受小尺度湍流衍射和大尺度湍流衍射的共同影响所致。考虑上述影响, 他们提出 Gamma-

Gamma 光强概率分布模型。Gamma-Gamma 光强概率分布是一个双参数模型, 适用于弱、中和强海洋湍流。Gamma-Gamma 光强概率分布模型^[21]的表达式为

$$f(\xi) = \frac{2(\alpha\beta)^{(\alpha+\beta)/2}}{\Gamma(\alpha)\Gamma(\beta)\bar{\xi}^{\alpha+\beta}} \left(\frac{\xi}{\bar{\xi}}\right)^{(\alpha+\beta)/2-1} K_{\alpha-\beta} \left(2\sqrt{\alpha\beta\frac{\xi}{\bar{\xi}}}\right), \quad \xi \geq 0, \quad (9)$$

式中: $\alpha = \frac{1}{\exp[\sigma_{\ln x}^2(D)] - 1}$ 是大尺度散射系数,

$\beta = \frac{1}{\exp[\sigma_{\ln y}^2(D)] - 1}$ 是小尺度散射系数, $K_{\alpha-\beta}(\cdot)$

是 $\alpha - \beta$ 阶第二类修正贝塞尔函数, ξ 表示光信号强度的信噪比, $\bar{\xi}$ 表示光信号强度的平均信噪比。未考虑相位噪声的影响, 也就是在两个连续的相位间隔内忽略相位噪声的积累。外差 DPSK 无线光通信系统的平均信噪比为^[29]

$\sigma_{\ln x}^2(D)$ 和 $\sigma_{\ln y}^2(D)$ 分别表示高斯光束下大尺度、小尺度的对数辐照度通量方差^[30], 其表达式为

$$\bar{\xi} = \frac{\eta A T_b}{hf'} \bar{I} = \frac{\eta \lambda \langle P_r \rangle T_b}{hc}, \quad (10)$$

式中: η 是光电探测器的量子效率; A 是接收器的面积; T_b 是 DPSK 调制的符号持续时间, $T_b = 1/R_b$, R_b 为 DPSK 调制的数据传输速率; \bar{I} 是 Gaussian 光束到达接收端的平均光强; h 是普朗克常数; f' 是接收的光信号频率, 即 $f' = \frac{c}{\lambda}$, c 是光速, λ 是光波长; $\langle P_r \rangle$ 是接收端的平均光功率, 即 $\langle P_r \rangle = A\bar{I}$, 其表达式见(4)式。

$$\sigma_{\ln x}^2(D) = \frac{0.49 \left(\frac{\Omega_G - \Lambda_1}{\Omega_G + \Lambda_1} \right)^2 \sigma_B^2}{\left[1 + \frac{0.4(2 - \bar{\Theta}_1)(\sigma_B/\sigma_R)^{12/7}}{(\Omega_G + \Lambda_1) \left(\frac{1}{3} - \frac{1}{2}\bar{\Theta}_1 + \frac{1}{5}\bar{\Theta}_1^2 \right)^{6/7}} + 0.56(1 + \bar{\Theta}_1)\sigma_B^{12/5} \right]^{7/6}}, \quad (11)$$

$$\sigma_{\ln y}^2(D) = \frac{0.51\sigma_B^2/(1 + 0.69\sigma_B^{12/5})^{5/6}}{1 + \left[1.20(\sigma_R/\sigma_B)^{12/5} + 0.83\sigma_R^{12/5} \right]/(\Omega_G + \Lambda_1)}, \quad (12)$$

其中高斯光束的 Rytov 的方差 σ_B^2 表示为^[30]

$$\sigma_B^2 \simeq 3.86\sigma_R^2 \left\{ 0.40 [(1 + 2\Theta_1)^2 + 4\Lambda_1^2]^{5/12} \times \cos \left[\frac{5}{6} \arctan \left(\frac{1 + 2\Theta_1}{2\Lambda_1} \right) - \frac{11}{16} \Lambda_1^{5/6} \right] \right\}, \quad (13)$$

式中： F_0 为波前曲率半径； α_n 为束腰半径； σ_R^2 是平面波 Rytov 的方差^[22]， $\sigma_R^2 = 1.23C_n^2 k^{7/6} L^{11/6}$ ； Ω_G 表示接收端透镜大小的无量纲参数， $\Omega_G = 16L/kD^2$ ； Λ_0 和 Θ_0 表示输入平面光束参数，曲率参数 $\Lambda_0 = L/k\alpha_n^2$ ，菲涅耳比 $\Theta_0 = 1 - L/F_0$ ； Θ_1 和 Λ_1 表示高斯光束在自由空间的输出函数和输入平面光束参数之间的关系： $\Theta_1 = \Theta_0/(\Theta_0^2 + \Lambda_0^2)$ ； $\Lambda_1 = \Lambda_0/(\Theta_0^2 + \Lambda_0^2)$ ； $\bar{\Theta}_1 = 1 - \Theta_1$ 。

2.5 外差 DPSK 的中断概率

中断概率是在海洋湍流信道下量化通信系统性能的一个重要指标，中断概率是指接收端的信噪比低于阈值信噪比的概率。外差 DPSK 无线光通信系统的中断概率^[15]为

$$P_{\text{out}} = P_r(\xi < \xi_{\text{th}}) = \int_0^{\xi_{\text{th}}} f(\xi) d\xi, \quad (14)$$

式中， ξ_{th} 表示阈值信噪比，(9)式代入(14)式中，进一步得出中断概率^[21]为

$$P_{\text{out}} = \int_0^{\xi_{\text{th}}} f(\xi) d\xi = \int_0^{\xi_{\text{th}}} \frac{2(\alpha\beta)^{(\alpha+\beta)/2}}{\Gamma(\alpha)\Gamma(\beta)\xi^{\frac{\alpha+\beta}{2}}} \left(\frac{\xi}{\xi_{\text{th}}} \right)^{(\alpha+\beta)/2-1} K_{\alpha-\beta} \left(2\sqrt{\alpha\beta} \frac{\xi}{\xi_{\text{th}}} \right) d\xi. \quad (15)$$

通过 Meijer-G 函数将 $K_m(x)$ 表达为^[21]

$$K_m(x) = \frac{1}{2} G_{0,2}^{2,0} \left[\begin{matrix} - \\ m/2, -m/2 \end{matrix} \middle| \frac{x^2}{4} \right]. \quad (16)$$

根据参考文献[21]中的(25)~(27)式，可知外差 DPSK 无线光通信系统的中断概率为

$$P_{\text{out}} = \frac{(\alpha\beta)^{(\alpha+\beta)/2}}{\Gamma(\alpha)\Gamma(\beta)} \left(\frac{\xi_{\text{th}}}{\xi} \right)^{(\alpha+\beta)/2} \times G_{1,3}^{2,1} \left[\begin{matrix} 1 - (\alpha - \beta)/2 \\ (\alpha - \beta)/2, (\beta - \alpha)/2, -(\alpha - \beta)/2 \end{matrix} \middle| \frac{\alpha\beta}{\xi} \xi_{\text{th}} \right]. \quad (17)$$

3 仿真分析

基于上述理论，得出各向异性海洋湍流高斯光束外差 DPSK 无线光通信中断概率的表达式。数值仿真参数的设置如下：采用 $\lambda = 532 \text{ nm}$ 的绿光波长，高斯光源尺寸 $\alpha_s = 5 \text{ mm}$ ，接收端透镜的孔径 $D = 3 \text{ mm}$ ，传输距离 $L = 100 \text{ m}$ ，光电检测器的量子效率 $\eta = 0.8$ ，DPSK 调制的数据传输速率 $R_b = 1 \text{ Gbit/s}$ 。

图 2 给出不同的各向异性因子 μ_x, μ_y 下，高斯光束在各向异性海洋湍流中传输时的中断概率 P_{out} 随

ω 的变化情况。随着 ω 的增大，不论各向异性因子取何值，中断概率 P_{out} 逐渐增大， P_{out} 增长的趋势相似。这是因为在给定的海洋湍流参数下， ω 越大，盐度波动控制相对于温度波动控制对海洋湍流强弱的影响较大，海洋湍流的强度变强，通信性能下降，中断概率增大。当 $\omega = -1$ 时，随着各向异性因子增大，中断概率没有显著变化，此时海洋湍流强度变强，各向异性因子对中断概率的影响不大； $\omega = -5$ 时，各向异性因子增大时，中断概率变化幅度较明显，这表明海洋湍流受温度波动控制时，海洋湍流的强度相对较弱，各向异性因子的增加对中断概率

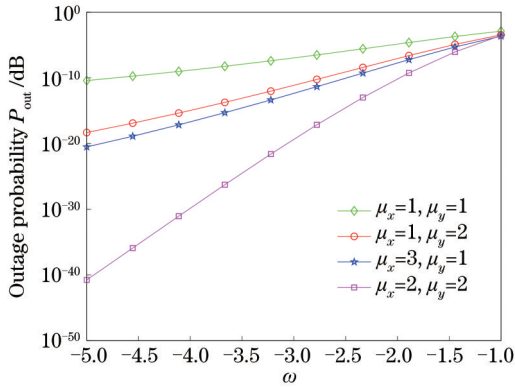


图 2 不同的各向异性因子 μ_x, μ_y 下, 高斯光束在各向异性海洋湍流中传输时的中断概率 P_{out} 随 ω 的变化图 ($\eta=0.8, X_T=10^{-6} \text{ K}^2/\text{s}, v=10^{-4} \text{ m}^2/\text{s}, R_b=1 \text{ Gbit/s}, \lambda=532 \text{ nm}, \epsilon=0.01 \text{ m}^2/\text{s}^3, \alpha_s=5 \text{ mm}, L=100 \text{ m}, D=3 \text{ mm}$)

Fig. 2 Outage probability P_{out} of a Gaussian beam propagating in anisotropic ocean turbulence versus ω for various anisotropic factors μ_x, μ_y at $\eta=0.8, X_T=10^{-6} \text{ K}^2/\text{s}, v=10^{-4} \text{ m}^2/\text{s}, R_b=1 \text{ Gbit/s}, \lambda=532 \text{ nm}, \epsilon=$

的影响较为明显。 ω 为固定值时, 随着各向异性因子的增大, 各向同性海洋湍流环境逐渐转变为各向异性海洋湍流环境, 中断概率的值变小。综上分析可知: 当海洋湍流受温度与盐度波动对功率谱变化贡献之比 ω 的影响时, 增加各向异性因子会对通信性能有所改善, 中断概率的值下降, 同时也可以看出各向异性海洋湍流环境比各向同性海洋湍流环境更有利于提升中断概率性能。

图 3 显示不同的各向异性因子 μ_x, μ_y 下, 高斯光束在各向异性海洋湍流中传输时的中断概率 P_{out} 随 ϵ 的变化曲线。随着 ϵ 的增大, 中断概率呈下降趋势, 与各向异性因子无关, 这说明单位质量流体动能耗散率 ϵ 越大, 海洋湍流能量转化成分子热量的速率越快, 使得海洋湍流的强度逐渐变弱, 闪烁指数变小, UWOC 系统的性能逐渐变好; ϵ 为固定值时, 各向异性因子越大, 中断概率越小, 从而优化了系统性能。处于同性海洋湍流环境 $\mu_x=1, \mu_y=1$ 时, 随着 ϵ 值不断增大, 中断概率的下降幅度变得平缓; 处于各向异性海洋湍流环境时, ϵ 值不断增大, 中断概率下降的幅度更平缓。相比于各向同性海洋湍流环境, 各向异性海洋湍流对中断概率的影响较大, 中断概率下降的趋势较快。

图 4 表示在不同的各向异性因子 μ_x, μ_y 的情况下, 高斯光束在各向异性海洋湍流中传输时的中断概率 P_{out} 随 X_T 的变化曲线。随着 X_T 的增加, 不论各

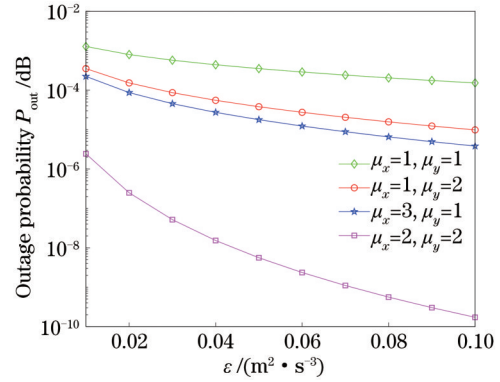


图 3 不同的各向异性因子 μ_x, μ_y 下, 高斯光束在各向异性海洋湍流中传输时的中断概率 P_{out} 随 ϵ 的变化图 ($\omega=-1, X_T=10^{-6} \text{ K}^2/\text{s}, v=10^{-4} \text{ m}^2/\text{s}, \eta=0.8, R_b=1 \text{ Gbit/s}, \lambda=532 \text{ nm}, \alpha_s=5 \text{ mm}, L=100 \text{ m}, D=3 \text{ mm}$)

Fig. 3 Outage probability P_{out} of a Gaussian beam propagating in anisotropic ocean turbulence versus ϵ for various anisotropic factors μ_x, μ_y at $\omega=-1, X_T=10^{-6} \text{ K}^2/\text{s}, v=10^{-4} \text{ m}^2/\text{s}, \eta=0.8, R_b=1 \text{ Gbit/s}, \lambda=532 \text{ nm}, \alpha_s=5 \text{ mm}, L=100 \text{ m}, D=3 \text{ mm}$

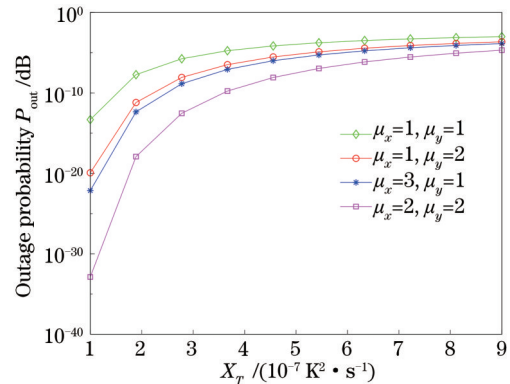


图 4 不同的各向异性因子 μ_x, μ_y , 高斯光束在各向异性海洋湍流中传输时的中断概率 P_{out} 随 X_T 的变化图 ($\epsilon=0.01 \text{ m}^2/\text{s}^3, v=10^{-4} \text{ m}^2/\text{s}, \eta=0.8, R_b=1 \text{ Gbit/s}, \lambda=532 \text{ nm}, \omega=-1, \alpha_s=5 \text{ mm}, L=100 \text{ m}, D=3 \text{ mm}$)

Fig. 4 Outage probability P_{out} of a Gaussian beam propagating in anisotropic ocean turbulence versus X_T for various anisotropic factors μ_x, μ_y at $\epsilon=0.01 \text{ m}^2/\text{s}^3, v=10^{-4} \text{ m}^2/\text{s}, \eta=0.8, R_b=1 \text{ Gbit/s}, \lambda=532 \text{ nm}, \omega=-1, \alpha_s=5 \text{ mm}, L=100 \text{ m}, D=3 \text{ mm}$

向异性因子如何变化, 中断概率都逐渐增大, 且增长的趋势相似。这是因为均方温度耗散率 X_T 可以表征湍流对流体温度场的影响, X_T 越大, 温度的波动受分子热传导作用的影响越大, 导致中断概率增大, 系统性能变差。当 X_T 逐渐增大到最大值时, 不同的各向异性因子下中断概率的值接近相等, 且保

持持平的状态,变化幅度很小。这是因为随着 X_T 的增加,海洋湍流强度变强,中断概率达到最大值,产生一个饱和值,系统性能指标达到极限,此时各向异性因子对中断概率的影响很小。当 X_T 取任意值时,随着各向异性因子的增大,中断概率反而越小。同理可得各向异性海洋湍流环境更适合水下无线高斯光通信的传输。

图 5 给出不同的传输距离下,高斯光束在各向异性海洋湍流中传输时的中断概率 P_{out} 随 μ_x 的变化曲线。 $L=60\text{ m}$ 时,随着各向异性因子 μ_x 的增加,中断概率 P_{out} 从 2.9335×10^{-6} 减少至 3.0472×10^{-18} ; $L=100\text{ m}$ 时,随着各向异性因子 μ_x 的增加,中断概率 P_{out} 从 0.0020 减少至 8.1872×10^{-7} 。随着 μ_x 的增加,不论传输距离为何值,中断概率都呈下降趋势。这是因为在各向异性海洋湍流中,随着各向异性因子的改变,不对称的涡旋会使涡旋结构密度降低,与相应的各向同性海洋湍流相比,各向异性海洋湍流显示出较弱的强度,从而导致折射率的波动和闪烁的减小,中断概率降低。 μ_x 取任意值时,传输距离越短,中断概率的值越小; $\mu_x=4$ 是中断概率幅度下降的一个转折点,各向异性因子小于 4 时,海洋湍流的强度较弱,中断概率下降的幅度较大,曲线更陡峭,传输距离对中断概率的影响很大;当 $\mu_x > 4$ 时,各向异性海洋湍流的强度变强,中断

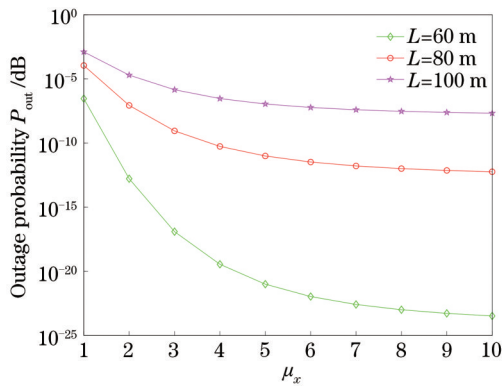


图 5 不同的传输距离下,高斯光束在各向异性海洋湍流中传输时的中断概率 P_{out} 随 μ_x 的变化图 ($X_T=10^{-6}\text{ K}^2/\text{s}$, $v=10^{-4}\text{ m}^2/\text{s}$, $\eta=0.8$, $R_b=1\text{ Gbit/s}$, $\lambda=532\text{ nm}$, $\epsilon=0.01\text{ m}^2/\text{s}^3$, $\omega=-1$, $\alpha_s=5\text{ mm}$, $\mu_y=2$, $D=3\text{ mm}$)

Fig. 5 Outage probability P_{out} of a Gaussian beam propagating in anisotropic ocean turbulence versus the anisotropic factor in x direction μ_x for various L at $X_T=10^{-6}\text{ K}^2/\text{s}$, $v=10^{-4}\text{ m}^2/\text{s}$, $\eta=0.8$, $R_b=1\text{ Gbit/s}$, $\lambda=532\text{ nm}$, $\epsilon=0.01\text{ m}^2/\text{s}^3$, $\omega=-1$, $\alpha_s=5\text{ mm}$, $\mu_y=2$, $D=3\text{ mm}$

概率下降的曲线逐渐变平缓,系统的性能指标达到一定的饱和值,传输距离对中断概率的影响很小。当 UWOC 系统受到各向异性海洋湍流负面的影响时,要保证系统的性能达到最优,传输距离就会受到一定的限制。

图 6 是仿真了不同的数据传输速率下,中断概率 P_{out} 随 μ_x 的变化曲线。 $R_b=1.5\text{ Gbit/s}$ 时,随着 μ_x 的增加,中断概率 P_{out} 从 0.0027 减少至 1.3410×10^{-7} ; $R_b=2.5\text{ Gbit/s}$ 时,中断概率 P_{out} 从 0.0066 减少至 1.7997×10^{-6} 。结果表明:随着各向异性因子 μ_x 的增加,不论数据传输速率取何值,中断概率 P_{out} 都逐渐下降;在各向异性因子 μ_x 刚开始增加时,中断概率下降的趋势最为明显;当系统的数据传输速率减小时,中断概率的值越小。在各向异性海洋湍流环境中,较低的数据传输速率可改善系统的性能指标。

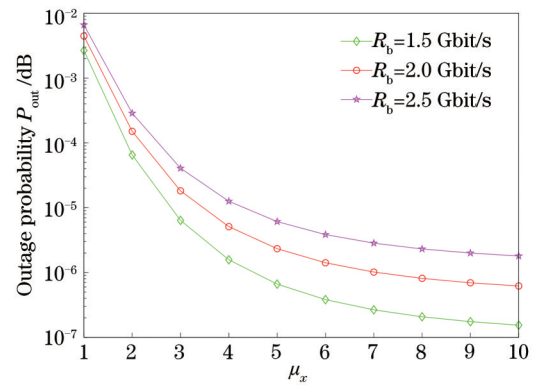


图 6 不同的数据传输速率下,高斯光束在各向异性海洋湍流中传输时的中断概率 P_{out} 随 μ_x 的变化图 ($X_T=10^{-6}\text{ K}^2/\text{s}$, $v=10^{-4}\text{ m}^2/\text{s}$, $\eta=0.8$, $\lambda=532\text{ nm}$, $\epsilon=0.01\text{ m}^2/\text{s}^3$, $\omega=-1$, $\alpha_s=5\text{ mm}$, $L=100\text{ m}$, $\mu_y=2$, $D=3\text{ mm}$)

Fig. 6 Outage probability P_{out} a Gaussian beam propagating in anisotropic ocean turbulence versus the anisotropic factor in x direction for various μ_x at $X_T=10^{-6}\text{ K}^2/\text{s}$, $v=10^{-4}\text{ m}^2/\text{s}$, $\eta=0.8$, $\lambda=532\text{ nm}$, $\epsilon=0.01\text{ m}^2/\text{s}^3$, $\omega=-1$, $\alpha_s=5\text{ mm}$, $L=100\text{ m}$, $\mu_y=2$, $D=3\text{ mm}$

4 结 论

在各向异性海洋湍流中,本研究采用 DPSK 调制和外差检测相结合的水下无线高斯光通信,分析了 Gamma-Gamma 分布模型下的通信性能。仿真分析了各种海洋湍流参数、传输距离、DPSK 调制的传输速率对中断概率的影响。研究发现:在不同的各向异性因子下,随着温度与盐度波动对功率谱变

化贡献之比 ω 、均方温度耗散率 X_T 的增大,海洋湍流强度变强,中断概率随之增大;随着单位质量流体动能耗散率 ϵ 的增大,海洋湍流强度变弱,中断概率随之减小;当 ω 、 X_T 、 ϵ 取任意值时,随着各向异性因子的增加,中断概率反而变小;在不同的传输距离、DPSK 调制的数据传输速率下,随着各向异性因子的增大,中断概率随之减小,这是由于传输距离和数据传输速率在各向异性海洋湍流的负面影响下,受到一定的限制。结果表明,在外差 DPSK 无线高斯光通信系统中,各向异性海洋湍流环境优于各向同性海洋湍流环境,增大各向异性因子、较短的传输距离、较低的传输速率可以有效降低通信系统的中断概率,为各向异性海洋湍流介质中无线光通信系统的性能研究提供一定的参考价值。

参 考 文 献

- [1] Kaushal H, Kaddoum G. Underwater optical wireless communication[J]. IEEE Access, 2016, 4: 1518-1547.
- [2] Zeng F J, Yang K J, Yan X, et al. Research progress on the underwater laser communication system[J]. Laser & Optoelectronics Progress, 2021, 58(3): 0300002.
曾凤娇, 杨康建, 晏旭, 等. 水下激光通信系统研究进展[J]. 激光与光电子学进展, 2021, 58(3): 0300002.
- [3] Hill R J. Optical propagation in turbulent water[J]. Journal of the Optical Society of America, 1978, 68(8): 1067-1072.
- [4] Yi X, Li Z, Liu Z. Underwater optical communication performance for laser beam propagation through weak oceanic turbulence[J]. Applied Optics, 2015, 54(6): 1273-1278.
- [5] Alipour A, Mir A. On the performance of blue-green waves propagation through underwater optical wireless communication system[J]. Photonic Network Communications, 2018, 36(3): 309-315.
- [6] Hanson F, Radic S. High bandwidth underwater optical communication[J]. Applied Optics, 2008, 47(2): 277-283.
- [7] Wang Z Q, Zhang P F, Qiao C H, et al. Scintillation index of Gaussian waves in weak turbulent ocean[J]. Optics Communications, 2016, 380: 79-86.
- [8] Luan X H, Yue P, Yi X. Scintillation index of an optical wave propagating through moderate-to-strong oceanic turbulence[J]. Journal of the Optical Society of America. A, Optics, Image Science, and Vision, 2019, 36(12): 2048-2059.
- [9] Baykal Y. Signal-to-noise ratio reduction due to oceanic turbulence in oceanic wireless optical communication links[J]. Optics Communications, 2018, 427: 44-47.
- [10] Charnotskii M. Bit error rate of focused Gaussian beams in weak oceanic turbulence: comment[J]. Journal of the Optical Society of America A, Optics, Image Science, and Vision, 2015, 32(7): 1247-1250.
- [11] Ke X Z, Deng L Q. Wireless optical communication [M]. Beijing: Science Press, 2016.
柯熙政, 邓莉君. 无线光通信[M]. 北京: 科学出版社, 2016.
- [12] Al-Habash A, Andrews L C, Phillips R L. Mathematical model for the irradiance probability density function of a laser beam propagating through turbulent media[J]. Optical Engineering, 2001, 40(8): 1554-1562.
- [13] Zhang Y X, Song Z F, Gong Z B. Recently viewed content[J]. Chinese Science Bulletin, 1988, 33(10): 747-750.
张逸新, 宋正方, 龚知本. 激光大气闪烁概率分布[J]. 科学通报, 1988, 33(10): 747-750.
- [14] Cao M H, Wu X, Wang H Q, et al. Performance of faster-than-Nyquist optical communication system under Gamma-Gamma atmospheric turbulence[J]. Chinese Journal of Lasers, 2020, 47(9): 0906003.
曹明华, 武鑫, 王惠琴, 等. Gamma-Gamma 大气湍流下超奈奎斯特光通信系统性能[J]. 中国激光, 2020, 47(9): 0906003.
- [15] Fu Y Q, Duan Q, Zhou L. Performance of underwater wireless optical communication system in Gamma-Gamma strong oceanic turbulence with pointing error[J]. Infrared and Laser Engineering, 2020, 49(2): 0203013.
傅玉青, 段琦, 周林. Gamma-Gamma 强海洋湍流和瞄准误差下水下无线光通信系统的性能研究[J]. 红外与激光工程, 2020, 49(2): 0203013.
- [16] Wan X F, Hao S Q, Zhang D, et al. Symbol error rate performance analysis of multi-pulse position modulation inter-satellite optical communication with pointing errors[J]. Laser & Optoelectronics Progress, 2019, 56(3): 030601.
宛雄丰, 郝士琦, 张岱, 等. 瞄准误差对多脉冲位置调制星间激光通信系统误符号率的影响[J]. 激光与光电子学进展, 2019, 56(3): 030601.
- [17] Gökçe M C, Baykal Y. Aperture averaging and BER for Gaussian beam in underwater oceanic turbulence [J]. Optics Communications, 2018, 410: 830-835.
- [18] Qin L, Zhang Y Q, Li B S, et al. LED visible light

- communication systems based on MIMO technology [J]. *Laser Technology*, 2019, 43(4): 103-109.
- 秦岭, 张玉鹤, 李宝山, 等. 基于 MIMO 技术的 LED 可见光通信系统[J]. *激光技术*, 2019, 43(4): 103-109.
- [19] Huang A P, Tao L W, Niu Y L. Underwater wireless optical MIMO system with spatial modulation and adaptive power allocation[J]. *Optics Communications*, 2018, 412: 21-27.
- [20] Zhang H Y, Li H Z, Xiao D Y, et al. Analysis of differential phase shift keying in free-space optical communication system over atmospheric turbulence and pointing errors[J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2015, 42(10): 1005004.
- 张慧颖, 李洪祚, 肖冬亚, 等. 大气湍流和瞄准误差下差分相移键控光通信系统的性能分析[J]. *中国激光*, 2015, 42(10): 1005004.
- [21] Fu Y Q, Du Y Z. Performance of heterodyne differential phase-shift-keying underwater wireless optical communication systems in Gamma-Gamma distributed turbulence[J]. *Applied Optics*, 2018, 57(9): 2057-2063.
- [22] Zou Z X, Wang P, Chen W W, et al. Average capacity of a UWOC system with partially coherent Gaussian beams propagating in weak oceanic turbulence[J]. *Journal of the Optical Society of America A, Optics, Image Science, and Vision*, 2019, 36(9): 1463-1474.
- [23] Gökçe M C, Baykal Y, Ata Y. Performance analysis of M -ary pulse position modulation in strong oceanic turbulence[J]. *Optics Communications*, 2018, 427: 573-577.
- [24] Wang H, Zhang T. A laser carrier heterodyne DPSK system's design in free space optical communications [J]. *Wireless Communication Technology*, 2011, 20(3): 38-41.
- 王涵, 张涛. FSO 中一种光载波外差 DPSK 系统的设计[J]. *无线通信技术*, 2011, 20(3): 38-41.
- [25] Gökçe M C, Baykal Y. Scintillation analysis of multiple-input single-output underwater optical links [J]. *Applied Optics*, 2016, 55(22): 6130-6137.
- [26] He F T, Du Y, Zhang J L, et al. Bit error rate of pulse position modulation wireless optical communication in Gamma-Gamma oceanic anisotropic turbulence[J]. *Acta Physica Sinica*, 2019, 68(16): 164206.
- 贺锋涛, 杜迎, 张建磊, 等. Gamma-Gamma 海洋各向异性湍流下脉冲位置调制无线光通信的误码率研究[J]. *物理学报*, 2019, 68(16): 164206.
- [27] Fu W, Zheng X R. Influence of anisotropic turbulence on the second-order statistics of a general-type partially coherent beam in the ocean[J]. *Optics Communications*, 2019, 438: 46-53.
- [28] Baykal Y. Anisotropy effect on performance of PPM optical wireless oceanic communication links[J]. *Journal of Quantitative Spectroscopy and Radiative Transfer*, 2019, 228: 73-78.
- [29] Kiasaleh K. Performance of coherent DPSK free-space optical communication systems in K -distributed turbulence[J]. *IEEE Transactions on Communications*, 2006, 54(4): 604-607.
- [30] Andrews L C, Phillips R L. *Laser beam propagation through random media*[M]. Bellingham: SPIE, 2005.