

文章编号: 1001-3806(2021)06-0762-06

孔径接收下各向异性海洋湍流 UWOC 系统误码分析

贺锋涛¹, 王清杰¹, 张建磊¹, 杨 祎¹, 王 妮¹, 李碧丽²

(1. 西安邮电大学 电子工程学院, 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, 西安 710077)

摘要: 为了研究孔径接收对各向异性海洋湍流条件下水下无线光通信(UWOC)系统误比特率的影响,系统采用高斯光束传输,接收端通过孔径接收,在脉冲位置调制方式下通过各向异性海洋湍流信道。引入各向异性海洋湍流结构常数,通过对闪烁的形成原理和各向异性海洋湍流条件下闪烁系数的分析,数值模拟得到了在不同接收孔径和各向异性因子下,海洋湍流参量、传输距离、雪崩光电二极管(APD)平均增益和调制阶数对系统误比特率的影响。结果表明,相同各向异性因子和海洋湍流参量下,大孔径接收能有效提升系统误比特率性能;相同孔径直径和海洋湍流参量下,各向异性因子越大,系统通信性能越好;均方温度耗散率、温度和盐度对海洋功率谱变化贡献的比值较小,湍流动能耗散率、动力粘度较大以及传输距离越短,系统误码性能越好;APD增益为100或150时,系统通信性能最佳;调制阶数 $M=8$ 时,系统通信性能最佳, $M>64$ 时,系统误比特率变化程度几乎饱和。该研究为UWOC系统平台搭建和性能估计提供了参考。

关键词: 光通信;孔径接收;各向异性海洋湍流;高斯光束;误比特率

中图分类号: TN929.1 文献标志码: A doi:10.7510/jgjs.issn.1001-3806.2021.06.015

Bit error rate analysis of anisotropic ocean turbulence UWOC system with aperture reception

HE Fengtao¹, WANG Qingjie¹, ZHANG Jianlei¹, YANG Yi¹, WANG Ni¹, LI Bilin²

(1. School of Electronic Engineering, Xi'an University of Posts and Telecommunications, Xi'an 710121, China; 2. Key Laboratory of Underwater Information and Control, China Shipbuilding Industry Corporation 705 Research Institute, Xi'an 710077, China)

Abstract: In order to study the effect of aperture reception on the bit error rate of underwater wireless optical communication (UWOC) system under the condition of anisotropic ocean turbulence, Gaussian beam transmission was adopted to pass through an anisotropic ocean turbulence channel under pulse position modulation. The signal was then received through the aperture receiver, the effects of ocean turbulence parameters, transmission distance, average gain of avalanche photodiode (APD), and modulation order on the bit error rate of the system under different receiving aperture and anisotropy factor were numerically simulated by introducing the anisotropic ocean turbulence structure constant and analyzing the formation principle of scintillation and scintillation index under the condition of anisotropic ocean turbulence. The results show that under the same anisotropy factor and ocean turbulence parameters, the bit error rate performance of the system can be effectively improved by large aperture receiver. The larger the anisotropy factor, the better the system communication performance for the same aperture diameter and ocean turbulence parameters. The bit error rate performance of the system becomes better when the ratios of mean square temperature dissipation rate, temperature, and salinity contribution to the variation of ocean power spectrum are smaller, while the turbulent kinetic energy dissipation rate and kinetic viscosity are larger and the transmission distance is shorter. The performance of system communication is optimal when the APD gain is 100 or 150. The optimal system communication performance is achieved when the modulation order $M=8$, and the degree of system bit error rate variation is almost saturated when $M>64$. This study provides a reference for UWOC system platform construction and performance estimation.

Key words: optical communication; aperture receiving; anisotropic ocean turbulence; Gaussian beam; bit error rate

基金项目:国家自然科学基金资助项目(61805199);陕西省技术创新引导专项基金资助项目(2020TG-001);西安邮电大学研究生联合培养工作基地建设重点资助项目(YJGJ201905);水下信息与控制重点实验室资助项目(JCKY2020207CD02)

作者简介:贺锋涛(1974-),男,副教授,现主要从事水下无线光通信研究。

E-mail: hefengtao@xupt.edu.cn

收稿日期:2020-12-18;收到修改稿日期:2021-02-02

引言

水下监测、商业海洋资源开发、考古、传感器网络和军事应用等活动,对水下通信介质的高速率传输要求正在迅速增加。水下无线光通信(underwater wireless optical communication, UWOC)系统为此类应用提供了合适的解决方案,UWOC系统发送端的光源可以提供Gbit/s量级的传输速率^[1-5];传统的声学通信系统不能满足其巨大的数据速率要求,并且落后于

UWOC 系统同类产品。因此,近年来 UWOC 系统引起了研究人员极大地兴趣^[6-8]。

然而,由于水下吸收、散射和海洋湍流等影响因素,UWOC 系统性能会受到严重的干扰^[9-11]。其中,海洋湍流是影响光信号传播,引起光强波动的主要原因。海洋湍流是由温度、盐度和密度波动引起的,接收到的光信号因此产生强度波动,从而导致 UWOC 系统链路性能下降^[12]。接收强度的波动用闪烁指数来量化,而通过孔径接收技术可以减少闪烁,即扩大接收器孔径面积来实现孔径平均,接收器透镜会平均强度波动,进而提升系统性能。YI 等人在平面波和球面波的假设下已经研究了孔径平均的性能^[13]。GÖKÇE 等人详细研究了强海洋湍流传播的球面波的闪烁指数和孔径平均因子^[14]。FU 等人研究了孔径接收对强海洋湍流差分相移键控(differential phase-shift-keying, DPSK)调制的 UWOC 系统的误比特率(bit error rate, BER)^[15]。上述研究均基于各向同性海洋湍流,而各向异性海洋湍流条件下孔径接收对脉冲位置调制(pulse position modulation, PPM)的 UWOC 系统误比特率影响研究相对较少。

本文中在高斯光束通过各向异性海洋湍流信道的假设下,研究了孔径接收、传输距离、雪崩光电二极管(avalanche photodiode, APD)增益、调制阶数及各种海洋湍流参量对 UWOC 系统误比特率的影响。

1 理论分析

1.1 系统模型和闪烁的形成

基于孔径接收的 UWOC 系统模型如图 1 所示。发光光源和光电探测器(photodetector, PD)分别位于发送和接收平面。发送端信号被 PPM 调制后驱动激光二极管(laser diode, LD)发光,高斯光束的光源尺寸定义为 $\alpha_s, 2\alpha_s^2 = w_0^2, w_0$ 是由场振幅的 $1/e$ 点定义的光斑半径。光束经过各向异性海洋湍流信道到达接收端,接收端高斯透镜有效投射半径为 W_C , 焦距为 F_C , 高斯透镜孔径直径为 D 。光电检测器位于高斯透镜的

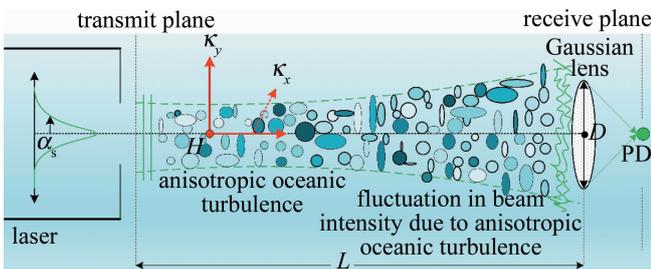


Fig. 1 UWOC system with aperture receiving

焦距处,激光光源和高斯透镜之间的距离为 L 。假设各向异性海洋湍流仅存在发送平面(接收平面)和高斯透镜之间,以保证高斯透镜前面的闪烁指数等于在透镜的光瞳平面上的闪烁指数。发送平面高斯光束的光场分布可表示为^[16]:

$$U_0(r, L=0) = \exp[-r^2/(2\alpha_s^2) - jkr^2/(2F_0)] \quad (1)$$

式中, r 为横向方向距光束中心线的距离, $j = \sqrt{-1}$, 波数 $k = 2\pi/\lambda$, λ 为波长, F_0 为曲率半径。

在水下传输介质中,海洋湍流主要由温度、盐度和密度波动引起。湍流产生的波动通过一个由湍流涡旋组成的频谱模型研究,湍流涡旋的内尺度湍流到外尺度湍流会引起透镜尺寸的连续随机变化,从而导致图 1 中透镜随机影响传播光束,引起波前畸变,进而使接收强度发生波动,亦称闪烁^[14]。

1.2 光信号在水下的传输损耗

海水为复杂传输介质,含有大量的盐、浮游生物、悬浮体以及溶解物质,是一个复杂的物理、化学、生物系统。因此光信号在海水中传播时会与各种成分相互作用,导致光信号的传播状态发生改变,这些海水成分最终会对光波造成吸收和散射。吸收和散射造成的能量总损失为:

$$J(\lambda) = a(\lambda) + b(\lambda) \quad (2)$$

式中, $a(\lambda)$ 为吸收系数, $b(\lambda)$ 为散射系数。光波能量损失会随光波长 λ 和海水类型变化而变化^[17], 当波长在 450nm ~ 550nm 之间时,吸收和散射效果最弱。因此,UWOC 系统采用蓝绿光发送和接收数据,本文中选取波长 $\lambda = 532\text{nm}$ 的绿光,以尽量降低海水环境对光信号的衰减。由于海水环境复杂多变,并且伴有水深和季节因素的影响,目前,一般用指数分布近似表达光波在海水中的能量衰减规律^[18], 假设 I_0 为初始光强,那么接收光强为:

$$I = I_0 \exp[-J(\lambda)L] \quad (3)$$

1.3 各向异性海洋湍流下的闪烁系数

根据修正的 Rytov 理论,光束经过海洋湍流后的闪烁系数为^[19]:

$$\sigma_0^2 = \exp[\sigma_{LS}^2(D) + \sigma_{SS}^2(D)] - 1 \quad (4)$$

式中, $\sigma_{LS}^2(D)$ 和 $\sigma_{SS}^2(D)$ 分别是大尺度和小尺度对数强度方差,可由(5)式、(6)式给出^[20]:

$$\sigma_{LS}^2(D) = 0.49 \left(\frac{\Omega_C - \Lambda_1}{\Omega_C + \Lambda_1} \right)^2 \sigma_1^2 \times \left[1 + \frac{0.4(2 - \bar{\Theta}_1)(\sigma_1/\sigma_R)^{12/7}}{(\Omega_C + \Lambda_1) \left(\frac{1}{3} - \frac{1}{2} \bar{\Theta}_1 + \frac{1}{5} \bar{\Theta}_1^2 \right)^{6/7}} + 0.56(1 + \bar{\Theta}_1) \sigma_1^{12/5} \right]^{-7/6} \quad (5)$$

$$\sigma_{ss}^2(D) = \frac{(0.51\sigma_1^2)/(1+0.69\sigma_1^{12/5})^{5/6}}{1 + \frac{1.20(\sigma_R/\sigma_1)^{12/5} + 0.83\sigma_R^{12/5}}{\Omega_C + \Lambda_1}} \quad (6)$$

式中, $\Omega_C = 16L/(kD^2)$ 为一个表征聚光镜光斑半径的无量纲参量; $\Lambda_1 = \Lambda_0/(\Theta_0^2 + \Lambda_0^2)$, $\Theta_1 = \Theta_0/(\Theta_0^2 + \Lambda_0^2)$, Θ_1 和 Λ_1 为高斯光束在自由空间的输出参量; $\Lambda_0 = L/(k\alpha_s^2)$, $\Theta_0 = 1 - L/F_0$, Θ_0 和 Λ_0 为高斯光束在自由空间的输入参量; $\bar{\Theta}_1 = 1 - \Theta_1$, 方差 σ_1^2 可以表示为^[20]:

$$\sigma_1^2 \approx 3.86\sigma_R^2 \left\{ 0.40[(1+2\Theta_1)^2 + 4\Lambda_1^2]^{12/5} \times \cos\left[\frac{5}{6}\arctan\left(\frac{1+2\Theta_1}{2\Lambda_1}\right) - \frac{11}{16}\Lambda_1^{5/6}\right] \right\} \quad (7)$$

式中, σ_R^2 为 Rytov 方差, $\sigma_R^2 = 1.23C_0^2 k^{7/6} L^{11/6}$ 。其中各向异性海洋湍流下的等效结构常数 C_0^2 可以表示为^[21]:

$$C_0^2 = \frac{3.044\pi \times 10^{-8} \mu_x \mu_y X}{\omega^2 \varepsilon^{1/3}} k^{-7/6} L^{-11/6} \times \text{Re} \left\{ \int_0^L dz \int_{-\infty}^{\infty} d\kappa_x \int_{-\infty}^{\infty} d\kappa_y [P(z, \kappa_x, \kappa_y) \times P(z, -\kappa_x, -\kappa_y) + |P(z, \kappa_x, \kappa_y)|^2] \times (\mu_x^2 \kappa_x^2 + \mu_y^2 \kappa_y^2)^{-11/6} [1 + 2.35v^{1/2} \varepsilon^{-11/6} \times (\mu_x^2 \kappa_x^2 + \mu_y^2 \kappa_y^2)^{1/3}] [\omega^2 \exp(-A_0\delta) + \exp(-A_1\delta) - 2\omega \exp(-A_2\delta)] \right\} \quad (8)$$

式中, 参量 $P(z, \kappa_x, \kappa_y)$ 表示为:

$$P(z, \kappa_x, \kappa_y) = \text{jk} \exp[-0.5(kL)^{-1} \text{j}z(L-z)(\kappa_x^2 + \kappa_y^2)] \quad (9)$$

式中, z 表示光束传播方向; κ_x, κ_y 是空间频率在图 1 中任意一点 H 处的 x, y 方向的分量; μ_x, μ_y 是海洋湍流分别在 x, y 方向上的各向异性因子; X 为均方温度耗散率, 取值范围为 $10^{-10} \text{K}^2/\text{s} \sim 10^{-4} \text{K}^2/\text{s}$; ε 为湍流动能耗散率, 数值范围为 $10^{-10} \text{m}^2/\text{s}^3 \sim 10^{-1} \text{m}^2/\text{s}^3$; v 为动力粘度, 范围为 $0 \text{m}^2/\text{s} \sim 10^{-5} \text{m}^2/\text{s}$; ω 为温度和盐度对海洋湍流功率谱变化贡献的比值, 无量纲, $\omega = 0$ 表示盐度诱导湍流, $\omega = -5$ 表示温度诱导湍流; 参量 $A_0 = 1.863 \times 10^{-2}$, $A_1 = 1.9 \times 10^{-4}$, $A_2 = 9.41 \times 10^{-3}$ 。(8) 式中的参量 δ 可以表示为:

$$\delta = 8.284v\varepsilon^{-1/3} [(\mu_x \kappa_x)^2 + (\mu_y \kappa_y)^2]^{2/3} + 12.978v^{3/2} \varepsilon^{-1/2} [(\mu_x \kappa_x)^2 + (\mu_y \kappa_y)^2] \quad (10)$$

1.4 gamma-gamma 湍流信道模型及 PPM 调制原理
光束在水下传播时, 海洋湍流会造成光信号强度

波动, 影响系统性能。由实验研究表明, 光信号在海洋湍流中传输时强度服从 gamma-gamma 统计分布模型^[20], 表示为:

$$f(K_s) = \frac{2(\alpha\beta)^{(\alpha+\beta)/2}}{\Gamma(\alpha)\Gamma(\beta)K_s} \left(\frac{K_s}{\bar{K}_s}\right)^{(\alpha+\beta)/2} \times K_{\alpha-\beta} \left(2\sqrt{\frac{\alpha\beta K_s}{\bar{K}_s}}\right), (K_s > 0) \quad (11)$$

式中, $\alpha = \{\exp[\sigma_{Is}^2(D)] - 1\}^{-1}$, $\beta = \{\exp[\sigma_{ss}^2(D)] - 1\}^{-1}$ 分别为大尺度和小尺度散射系数; $K_{\alpha-\beta}(\cdot)$ 为 $(\alpha-\beta)$ 阶第 2 类修正贝塞尔函数; $\Gamma(\cdot)$ 为伽马函数; \bar{K}_s 为每个 PPM 时隙的光子计数, $\bar{K}_s = \eta\lambda \langle P_{ave} \rangle T_1 / (hc)$, 其中 η 为探测器的量子效率, h 为普朗克常数, c 为真空光速, T_1 为时隙持续时间, $T_1 = (T_b \log_2 M) / M$, T_b 为位持续时间, $T_b = 1/R_b$, R_b 为光信号传输速率。

图 2 为 M 进制 PPM 示意图, 表示具有 2 位符号的数据序列时域波形以及 $M=4$ 时对应的 PPM 时域波形。PPM 作为一种正交调制技术, 有利于功率高效传输, 在 PPM 中, $\log_2 M$ 数据位的每个块被映射到 M 个可能的符号中的 1 个, 每个符号由 1 个时隙中出现的脉冲以及 $(M-1)$ 个空时隙组成, 脉冲的位置表示 $\log_2 M$ 数据位的十进制值, 通过出现在相应时隙中的脉冲位置对信息进行编码。 $\langle P_{ave} \rangle$ 为光信号通过海洋湍流时, 时隙持续时间内检测到的平均光功率^[20-22] 为:

$$\langle P_{ave} \rangle = \pi^3 (\lambda L)^{-2} / (t_1^2 t_2^2 t_3^2) \quad (12)$$

式中, 参量定义为: $t_1^2 = 0.5\alpha_s^{-2} - 0.5\text{j}kL^{-1} + \rho_0^{-2}$, $t_2^2 = 0.5\alpha_s^{-2} + 0.5\text{j}kL^{-1} + \rho_0^{-2} - t_1^{-2} \rho_0^{-4}$ 和 $t_3^2 = 8D^{-2} + 0.25kt_1^{-2} L^{-2} + 0.25kt_2^{-2} L^{-2} (1 - t_1^{-2} \rho_0^{-2})^2$; ρ_0 为海洋湍流中光波相干长度, $\rho_0 = (0.546C_0^2 k^2 L)^{-3/5}$ 。

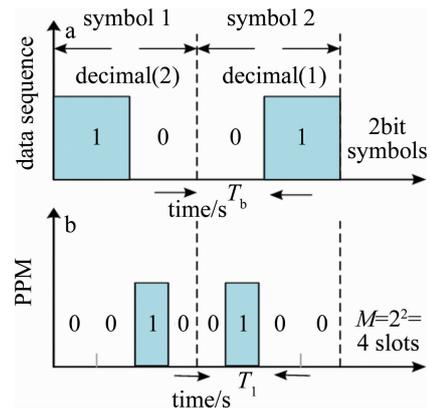


Fig. 2 Schematic diagram of M -ary PPM

1.5 脉冲位置调制下 UWOC 系统的误比特率

当 UWOC 系统采用 M 进制 PPM 调制, 经过湍流信道传输, 系统 BER 可以表示为^[20]:

$$P_e = \int_0^\infty Q(\sqrt{F(K_s)})f(K_s) dK_s \quad (13)$$

式中, $Q(\cdot)$ 为高斯 Q 函数, 其中 $Q(x) = (1/\sqrt{2\pi}) \times \int_x^\infty \exp(-0.5y^2) dy = 0.5\text{erfc}(x/\sqrt{2})$, $\Gamma(K_s)$ 定义为^[23]:

$$\Gamma(K_s) = (Gq)^2 K_s^2 \{ (Gq)^2 (2 + \zeta G) [K_s + 2\eta\lambda P_{bg} T_1 / (hc)] + 4k_B T_0 T_1 / R_0 \}^{-1} \quad (14)$$

式中, G 为 APD 平均增益; q 为电子电荷量; ζ 为 APD 电离因子; P_{bg} 背景辐射功率; k_B 为玻尔兹曼常数; T_0 为接收器开尔文温度; R_0 为等效负载电阻。

2 数值计算与分析

基于第 1 节中的理论分析, 在本节中, 将观察孔径接收时的系统性能, 分析讨论海洋湍流参量, 传输距离等对系统误比特率 BER 的影响, 初始仿真参量如表 1 所示, 调制初始阶数 $M = 8$, 背景辐射功率 P_{bg} 设置为 $\langle P_r \rangle$ 的 1%。

Table 1 Numerical simulation parameters

parameters	value	parameters	value
λ	532nm	v	$10^{-4} \text{m}^2/\text{s}$
L	70m	ω	-1
α_s	5mm	η	0.4
F_0	∞	ζ	0.028
ε	$10^{-2} \text{m}^2/\text{s}^3$	T_0	300K
X	$10^{-6} \text{K}^2/\text{s}$	R_0	50 Ω
R_b	2.4Gbit/s		

图 3 ~ 图 6 中给出了系统在不同接收孔径 D 和各向异性因子下 BER 随不同海洋湍流参量, 即湍流动能耗散率 ε 、均方温度耗散率 X 、温度和盐度对海洋湍流功率谱变化贡献的比值 ω 和动力粘度 v 的变化曲线。每幅图除改变相应参量外, 其它参量如表 1 所示。从图 3 ~ 图 6 可以看出, 固定湍流参量和各向异性因子, 增大孔径直径 D , 系统 BER 性能明显改善; 孔径相同 D 相同时, 随着各向异性因子增大, 系统 BER 性能也随之改善。

观察图 3 可以看到, ε 增大, 系统误比特率 BER 减小。湍流参量和各向异性因子相同时, 大孔径 3mm 接收比小孔径 1mm 接收 BER 性能更好。其次, 当各向异性因子 μ_x 和 μ_y 都增大到 2 时, 系统误比特率 BER 变化趋势为先上升后下降, 这是因为长期的光束

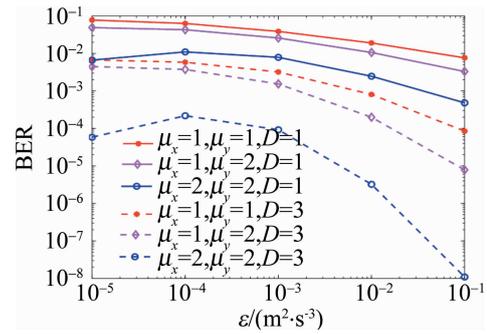


Fig. 3 BER vs. the rate of dissipation of kinetic energy per unit mass of fluid ε for different receive aperture diameters D and anisotropy factor

扩展造成的。同时, 从线距可以看出, 相比于其它两种各向异性因子情况, μ_x 和 μ_y 都为 2 时误比特率的改善情况更加明显。

从图 4 可知, 随着 X 增大, 误比特率随之增大。 X 较小时, 即 X 范围在 $10^{-7} \text{K}^2/\text{s} \sim 5 \times 10^{-7} \text{K}^2/\text{s}$ 时, 大孔径接收系统对系统 BER 改善非常明显。随后 X 增大, 大孔径接收系统对系统 BER 改善能力逐渐减弱。各向异性因子都增大到 2 时, 误比特率只在 $5 \times 10^{-7} \text{K}^2/\text{s} \sim 5 \times 10^{-5} \text{K}^2/\text{s}$ 之间存在有效值, 其余两种各向异性因子条件下, 在 $5 \times 10^{-5} \text{K}^2/\text{s}$ 之后无法找到有效值。

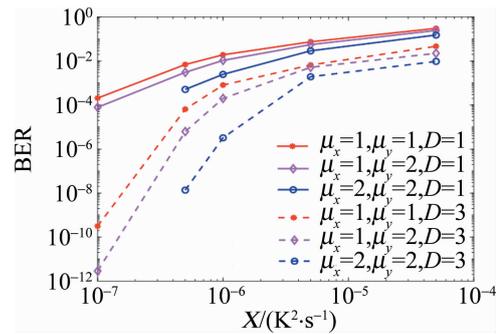


Fig. 4 BER vs. the rate of dissipation of mean-squared temperature X for different receive aperture diameters D and anisotropy factor

图 5 中, 随着 ω 增大, 系统误比特率随之增大。 ω 较小时, 大孔径接收系统能更好地降低系统 BER。各

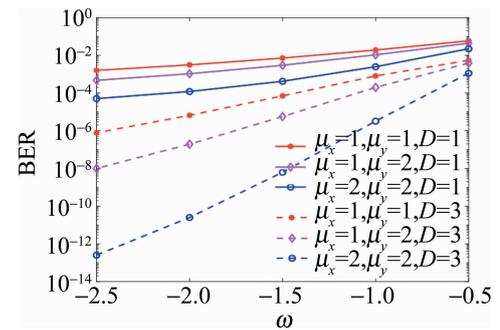


Fig. 5 BER vs. the rate of temperature to salinity contributions to the refractive index spectrum ω for different receive aperture diameters D and anisotropy factor

向异性因子越大,大孔径接收系统越能降低系统 BER,改善系统性能。 ω 增大到 -0.5 附近时,大孔径接收系统和更大的各向异性因子改善系统性能的能力都逐渐变弱,表明海洋湍流在由盐度波动起主导作用时,系统性能会变差,即使采用大孔径接收系统,系统 BER 改变不大。

图 6 说明,相同各向异性因子和孔径直径 D ,随着 v 增加,系统 BER 减小。相同 v 和孔径直径 D ,随着 μ_x 增大,系统 BER 减小,但 μ_y 增大到一定程度后,系统 BER 不再变化。当 v 分别为 $5 \times 10^{-5} \text{ m}^2/\text{s}$ 和 $1 \times 10^{-4} \text{ m}^2/\text{s}$ 时,误比特率的差距非常微小,几乎重合,以 $\mu_x = 6$ 为例,差距仅为 1.375×10^{-4} 。当 $v = 5 \times 10^{-4} \text{ m}^2/\text{s}$ 时,大孔径接收系统改善系统 BER 的能力非常明显,但在 $\mu_x = 5$ 以后,开始趋于平缓。

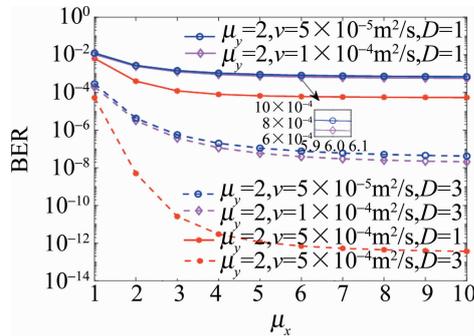


Fig. 6 BER vs. the rate of dissipation of μ_x for different receive aperture diameters D and the kinetic viscosity v

图 7 显示了系统误比特率随传输距离 L 变化的曲线,可以看到,传输距离越远,系统误比特率越大,因为随着距离增大,湍流对传输链路的干扰越强。相同各向异性因子下,大孔径接收系统的系统 BER 性能更好。孔径相同,各向异性因子越大,系统性能越好。但是,随着传输距离进一步增加,即 $L > 70\text{m}$ 后,系统 BER 持续增大,孔径和各向异性因子的变化无法有效改善系统性能。

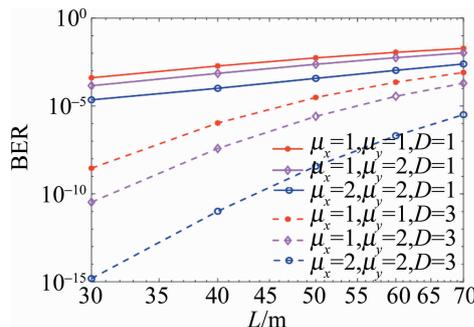


Fig. 7 BER vs. the rate of transmission distance L for different receive aperture diameters D and anisotropy factor

图 8 中给出了不同孔径直径 D 和各向异性因子

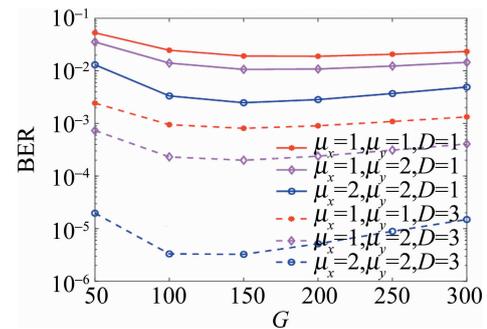


Fig. 8 BER vs. the rate of APD gain G for different receive aperture diameters D and anisotropy factor

下 BER 随 APD 增益 G 的变化曲线。可以看出,随着 APD 增益增大,系统误比特率先下降,之后基本趋于平缓或者出现增加的趋势,大孔径接收系统较好的改善了系统性能。当各向异性因子都为 2 时,无论是大孔径(3mm)还是小孔径(1mm),系统误比特率都先减小后增大,小孔径和大孔径分别在增益为 150 和 100 时,误比特率最小。而其它两种各向异性因子条件下,当增益大于 150 时,系统 BER 没有明显的增减趋势。

图 9 中仿真了不同孔径直径 D 和各向异性因子下 BER 随调制阶数 M 的变化曲线。可以看出,调制阶数越高,系统误比特率越大。从星座图角度理解,调制阶数越高,星座点越来越密,星座点的距离代表了译码的差错概率,判决时容易被判定为其它符号,导致系统 BER 增大。相同调制阶数和各向异性因子下,大孔径接收系统可以有效降低系统 BER,调制阶数越小,BER 改善越明显。相同孔径直径 D 和调制阶数下,各向异性因子越大,系统 BER 性能越好,大孔径接收系统改善系统 BER 的能力越强。但当调制阶数 $M > 64$ 时,系统误比特率变化程度逐渐饱和,改变调制阶数无法降低系统 BER。

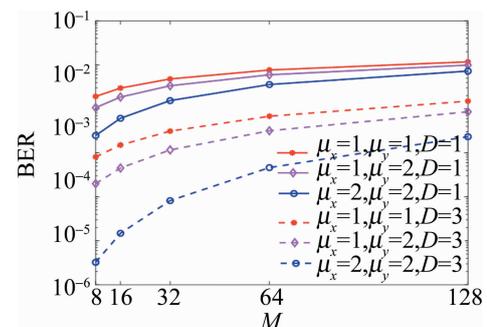


Fig. 9 BER vs. the rate of modulation order M for different receive aperture diameters D and anisotropy factor

3 结论

基于光强闪烁形成原理,假设湍流信道为各向异

性海洋湍流信道,引入各向异性海洋湍流结构常数,数值计算仿真分析了接收孔径直径、各向异性因子、海洋湍流参量、传输距离 L 、APD 增益和调制阶数 M 对系统误比特率的影响。由结果可知,在相同的各向异性因子和海洋湍流参量下,大孔径接收能有效地抑制湍流干扰;对于相同孔径直径和海洋湍流参量,各向异性因子越大,越有利于提升系统性能,即当海洋湍流参量和其它参量固定时,BER 的值会随着 x 方向和 y 方向上的各向异性因子的增加而降低。其物理解释为:相比于各向同性海洋湍流,在各向异性海洋湍流中,不对称的涡旋会使湍流涡旋结构密度降低,导致折射率波动和闪烁减少。其次,针对海洋湍流参量引起的传输介质的物理变化,从而影响系统传输性能,孔径接收系统也能有效降低其负面影响。另外,当系统的传输距离越远时,系统误比特率受湍流干扰越明显,孔径接收系统因此会受到距离限制,但是,选择合适的 APD 增益和调制阶数可以降低这种影响。本研究可以为 UWOC 系统平台的搭建和性能的估计提供一定参考价值。

参 考 文 献

- [1] GÖKÇE M C, BAYKAL Y, ATA Y. Effect of anisotropy on performance of M -ary phase shift keying subcarrier intensity-modulated optical wireless communication links operating in strong oceanic turbulence[J]. *Laser Physics Letters*, 2020, 17(5):056002.
- [2] GÖKÇE M C, BAYKAL Y. Aperture averaging and BER for Gaussian beam in underwater oceanic turbulence[J]. *Optics Communications*, 2018, 410:830-835.
- [3] QIN L, ZHANG Y Q, LI B Sh, *et al.* LED visible light communication systems based on MIMO technology [J]. *Laser Technology*, 2019, 43(4):103-109 (in Chinese).
- [4] FU Y Q, HUANG Ch T, DU Y Zh. Bit error rate analysis for underwater optical communication system through strong oceanic turbulence [J]. *Journal of Signal Processing*, 2019, 35(5):897-903 (in Chinese).
- [5] CHI N, CHEN H. Progress and prospect of high-speed visible light communication[J]. *Opto-Electronic Engineering*, 2020, 47(3):6-17 (in Chinese).
- [6] LIU W H, XU Zh Y, YANG L Q. SIMO detection schemes for underwater optical wireless communication under turbulence[J]. *Photonics Research*, 2015, 3(3):48-53.
- [7] LU H H, LI Ch Y, LIN H H, *et al.* A 5m/25Gbps underwater wireless optical communication system [J]. *IEEE Photonics Journal*, 2018, 10(3):1-9.
- [8] HUANG A P, TAO L W, WANG Ch, *et al.* Error performance of underwater wireless optical communications with spatial diversity under turbulence channels [J]. *Applied Optics*, 2018, 57(26):7600-7608.
- [9] JAMALI M V, SALEHI J A, AKHOUNDI F. Performance studies of underwater wireless optical communication systems with spatial diversity: MIMO scheme [J]. *IEEE Transactions on Communication*, 2017, 65(3):1176-1192.
- [10] FU Y Q, DUAN Q, HUANG Ch T, *et al.* Average BER performance of rectangular QAM-UWOC over strong oceanic turbulence channels with pointing error [J]. *Optics Communications*, 2020, 476:126362.
- [11] 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.
- [12] ZEDINI E, KAMMOUN A, SOURY H, *et al.* Performance analysis of dual-hop underwater wireless optical communication systems over mixture exponential-generalized gamma turbulence channels [J]. *IEEE Transactions on Communications*, 2020, 68(9):5718-5731.
- [13] YI X, LI Z, LIU Z J. Underwater optical communication performance for laser beam propagation through weak oceanic turbulence [J]. *Applied Optics*, 2015, 54(6):1273-1278.
- [14] GÖKÇE M C, BAYKAL Y. Aperture averaging in strong oceanic turbulence [J]. *Optics Communications*, 2018, 413:196-199.
- [15] FU Y Q, HUANG Ch T. Effect of aperture averaging on bit error rate for DPSK modulated UWOC system over strong oceanic turbulence [J]. *Journal of Signal Processing*, 2019, 35(9):1607-1612 (in Chinese).
- [16] KAMACIOCLU C, BAYKAL Y. Generalized expression for optical source fields [J]. *Optics & Laser Technology*, 2012, 44(6):1706-1712.
- [17] TANG Sh J, DONG Y H, ZHANG X D. Impulse response modeling for underwater wireless optical communication links [J]. *IEEE Transactions on Communications*, 2014, 62(1):226-234.
- [18] KAUSHAL H, KADDOUM G. Underwater optical wireless communication [J]. *IEEE Access*, 2016, 4(1):1518-1547.
- [19] ANDREWS L C, PHILLIPS R L, HOPEN C Y, *et al.* Theory of optical scintillation [J]. *Journal of the Optical Society of America*, 1999, A16(6):1417-1429.
- [20] ANDREWS L C, PHILLIPS R L. *Laser beam propagation through random media* [M]. 2nd ed. Bellingham Washington, USA: SPIE Press, 2005:450-454.
- [21] 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):236-244 (in Chinese).
- [22] WANG S J, BAYKAL Y, PLONUS M A. Receiver-aperture averaging effects for the intensity fluctuation of a beam wave in the turbulent atmosphere [J]. *Journal of the Optical Society of America*, 1983, 73(6):831-837.
- [23] KIASALEH K. Performance of APD-based, PPM free-space optical communication systems in atmospheric turbulence [J]. *IEEE Transactions on Communications*, 2005, 53(9):1455-1461.