

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

傅玉青^{1,2}, 段 琦³, 周 林³

(1. 华侨大学 工学院,福建 泉州 362021;
2. 华侨大学 工业智能化技术与系统福建省高校工程研究中心,福建 泉州 362021;
3. 华侨大学 信息科学与工程学院,福建 厦门 361021)

摘要: 采用外差式差分相移键控 (Differential phase-shift keying, DPSK) 调制的水下无线光通信 (Underwater wireless optical communication, UWOC) 系统经过 Gamma Gamma 强海洋湍流信道传输, 当接收端与发送端之间存在瞄准误差并采用孔径接收方式时, 分析了湍流效应和瞄准误差对接收光强的抖动影响, 推导了 UWOC 系统的平均误码率(Bit error rate, BER) 和中断概率(Outage probability, OP) 的解析表达式。数值模拟研究了不同的瞄准误差、束宽、接收孔径和海洋湍流参数对平均 BER 和 OP 性能的影响。结果表明, 在相同的束宽和信道环境下, 瞄准误差越大, 系统性能越差; 光束束宽与孔径半径之比越大, 接收孔径直径越大, 系统性能越好; 另外, 选择较小的温度和盐度波动对海洋湍流贡献的比值 ω 和均方温度耗散率 χ_T , 以及较大的湍流动能耗散率 ε 和动力粘度 u 的海洋湍流环境也有利于获得较好的系统性能。

关键词: 水下无线光通信; 强海洋湍流; 瞄准误差; 误码率; 中断概率

中图分类号: TN929.1 文献标志码: A DOI: 10.3788/IRLA202049.0203013

Performance of underwater wireless optical communication system in Gamma Gamma strong oceanic turbulence with pointing error

Fu Yuqing^{1,2}, Duan Qi³, Zhou Lin³

(1. College of Engineering, Huaqiao University, Quanzhou 362021, China;
2. Fujian Provincial Academic Engineering Research Centre in Industrial Intellectual Techniques and Systems,
Huaqiao University, Quanzhou 362021, China;
3. College of Information Science and Engineering, Huaqiao University, Xiamen 361021, China)

Abstract: The impact of Gamma Gamma strong oceanic turbulence and pointing error on the average bit error rate (BER) and outage probability of a heterodyne differential phase-shift keying (DPSK) underwater wireless optical communication (UWOC) system with an aperture receiver was investigated. The optical intensity fluctuation due to the combined effects of oceanic turbulence and pointing error was

收稿日期: 2019-10-07; 修訂日期: 2019-11-10

基金项目: 国家自然科学基金(61605048); 福建省自然科学基金(2018J05105); 泉州市科技计划(2018C108R)

作者简介: 傅玉青(1984-), 女, 讲师, 博士, 主要从事水下光通信、信道编码方面的研究。Email:fuyq@hqu.edu.cn

derived. The close-form expressions for the average BER and outage probability were derived. Then the average BER performance and the outage probability performance versus signal to noise ratio (SNR) of the considered UWOC system were investigated with different point errors, source beam widths, receiver aperture sizes and oceanic turbulence parameters. The results indicate that the larger the aiming error is, the worse the system performance is, under the same beam width and channel environment. Choosing a larger ratio of source beam width to aperture radius or a bigger aperture receiver can help to improve the system performance. In addition, the system shows a better performance over the strong oceanic turbulence with a smaller ratio of temperature to salinity contributions to the refractive index spectrum ω and the rate of dissipation of mean-squared temperature χ_T or a larger rate of dissipation of kinetic energy per unit mass of fluid ε and the kinetic viscosity u . This work will provide reference for the construction and performance estimation of UWOC system on strong oceanic turbulence when taking pointing error into consideration.

Key words: underwater wireless optical communication; strong oceanic turbulence; pointing error; bit error rate; outage probability

0 引言

水下无线光通信(Underwater wireless optical communication, UWOC)相较于水下声通信和水下射频通信具有较低的时间延迟、较高的安全性、较高的速率、较低的成本以及易安装等优点。这些特性使得 UWOC 系统非常适合于商业性的海洋资源探测、潜水员之间的通信、无人潜水器、潜艇、船舶、水下无线传感器网络和军事应用^[1-3]。

然而, UWOC 系统在水下传输时会受到一系列的干扰,如吸收、散射和湍流效应,这些会限制 UWOC 系统性能的提升^[4]。其中,由于海水的温度梯度和盐度梯度引起的湍流会导致光信号的衰落(称为闪烁),从而造成接收光信号的强度抖动和相位变化,导致接收误码率的增加。近年来,研究人员提出了很多种湍流信道模型来研究不同强度的海洋湍流对 UWOC 系统的影响,主要有 Log-normal 湍流模型^[5], Gamma Gamma 湍流模型^[6-8],负指数湍流模型^[9],和广义 Gamma 分布模型^[10]。可以采用多种技术来减轻闪烁对 UWOC 系统性能的恶化,如空间分集^[4,11]、信道编码^[12]、光束整形^[13-14]、调制技术^[6,15]和孔径接收^[6,16]。此外,由于海水的流动现象,发射端和接收端之间的失调会导致瞄准误差,也会限制 UWOC

系统的性能。在自由空间光通信中,瞄准误差(抖动)的影响已经被广泛地研究^[17-19]。为了研究瞄准误差对光通信系统性能的影响,提出了多种统计瞄准误差模型,主要有瑞利分布^[18],伯克曼分布^[19]和 Rician 分布^[20]。此外,相对于 OOK 调制,DPSK 调制可以提供 3 dB 的灵敏度优势,并且降低峰值功率,从而减轻非线性效应^[21]。目前,综合考虑湍流和瞄准误差对 DPSK 调制的 UWOC 系统的平均误码率(Bit error rate, BER)和中断概率(Outage probability, OP)影响的相关研究还未见报道。

文中建立了一个包含传输损耗、Gamma Gamma 海洋湍流分布和瞄准误差的信道传输模型,推导了 DPSK 调制的 UWOC 系统的平均 BER 和 OP 的解析表达式,观察了瞄准误差、束宽、孔径接收直径和海洋湍流强度等参数对 DPSK 调制的 UWOC 系统性能的影响,探讨了提升强湍流环境下的 UWOC 系统性能的方式。

1 理论分析

UWOC 系统采用 DPSK 调制,具体的框图可参考文献[7]所述。首先,信号被 DPSK 调制后驱动 LED 或 LD 发光,光信号沿着 Gamma Gamma 湍流信道水平传输后,到达接收端被一直径为 D 的透镜所接

收，在透镜的焦点处放一个光电探测器将光信号转成电信号后，被 DPSK 解调成输出信号。由于海水流动、湍流等因素，接收端与发送端之间存在瞄准误差。此时，信道响应参数包含三个分量：

$$h=h_t h_a h_p \quad (1)$$

式中： h_t 为路径传输损耗； h_a 为由于湍流效应引起的信号衰落； h_p 为由瞄准误差引起的损耗。假设上面这些效应是独立的，下面分别介绍这三个分量。

1.1 传输损耗

光信号在海洋中传输受到的损耗符合比尔-朗伯定律，如下式所示^[1]：

$$h_t(z)=\exp(-cL) \quad (2)$$

式中： L 为发送端到接收端的路径距离； c 为由于吸收和散射引起的衰减系数。

1.2 海洋湍流

光信号经过强海洋湍流传输后，其辐照度功率密度函数(Power density function, PDF) 遵循 Gamma Gamma 统计分布模型^[5,8]：

$$f_{h_a}(h_a)=\frac{2(\alpha\beta)^{(\alpha+\beta)/2}}{\Gamma(\alpha)\Gamma(\beta)}(h_a)^{(\alpha+\beta)/2-1}\times K_{\alpha-\beta}[2\sqrt{\alpha\beta h_a}], h_a\geq 0 \quad (3)$$

式中： h_a 为归一化辐照度； $K_m(x)$ 为 m 阶第二类修正的贝塞尔函数； $\Gamma(x)$ 为 Gamma 函数； α 和 β 为描述光波闪烁的大尺度和小尺度参量，其大小与闪烁系数有关。当采用高斯光束传输，接收端采用孔径接收时， α 和 β 由下式得到^[7,22]：

$$\begin{aligned} \alpha &= \left[\exp\left(\frac{0.196\sigma_l^2}{(1+0.18d^2+0.186\sigma_l^{12/5})^{7/6}}\right)-1 \right]^{-1} \\ \beta &= \left[\exp\left(\frac{0.204\sigma_l^2(1+0.23\sigma_l^{12/5})^{-5/6}}{1+0.9d^2+0.207d^2\sigma_l^{12/5}}\right)-1 \right]^{-1} \end{aligned} \quad (4)$$

式中： $d=\sqrt{kD^2/4L}$ ， $\sigma_l^2=1.23C_n^2k^{7/6}L^{11/6}$ 是强湍流下的 Rytov 方差。其中， $k=2\pi/\lambda$ 为波数， λ 为光波长， D 为接收孔径尺寸， C_n^2 为折射率结构常数^[23]：

$$\begin{aligned} C_n^2 &= 16\pi^2 k^{-7/6} L^{-11/6} \int_0^L \int_0^\infty \kappa \Phi_n(\kappa) \cdot \\ &\quad \{1-\cos[\kappa^2 \zeta(L-\zeta)/(Lk)]\} d\kappa d\zeta \end{aligned} \quad (5)$$

式中： ζ 为光束传输的位置距离发送端的距离，取值范围为 $[0, L]$ ； κ 为空间频率幅度； $\Phi_n(\kappa)$ 为功率谱，在各向同性均匀湍流的海洋中， $\Phi_n(\kappa)$ 由下式给出^[23]：

$$\begin{aligned} \Phi_n(\kappa) &= 0.388 \times 10^{-8} \varepsilon^{-1/3} \kappa^{-11/3} (1+2.35\kappa^{2/3} u^{1/2} \varepsilon^{-1/6}) \times \\ &\quad \omega^{-2} \chi_T (\omega^2 e^{-A_r \delta} + e^{-A_s \delta} - 2\omega e^{-A_{ts} \delta}) \end{aligned} \quad (6)$$

式中： χ_T 为均方温度耗散率，其取值范围可以从 $10^{-4} \sim 10^{-10} \text{ K}^2/\text{s}$ ； ε 为单位质量液体中的湍流动能耗散率，其数值可从 $10^{-1} \text{ m}^2/\text{s}^3$ 变化到 $10^{-10} \text{ m}^2/\text{s}^3$ ； v 为动力粘度； ω 为温度和盐度波动对海洋湍流贡献的比值，为无量纲参数， $\omega=-5$ 表示海洋湍流完全由温度引起， $\omega=0$ 表示海洋湍流完全由盐度引起； $A_{ts}=9.41 \times 10^{-3}$ ， $A_s=1.9 \times 10^{-4}$ ， $A_r=1.863 \times 10^{-2}$ ， $\delta=8.28\kappa^{4/3} u \varepsilon^{-1/3} + 12.978\kappa^2 u^{3/2} \varepsilon^{-1/2}$ 。

1.3 瞄准误差

假设一个束宽为 w_z 的光束到达距离发送端 z 处的接收端，接收孔径半径为 $R=D/2$ ，如图 1 所示，此时由瞄准误差引起的衰减系数可以表示成^[17]：

$$h_p(r, z) = A_0 \exp\left(-\frac{2r^2}{w_{z_{eq}}^2}\right) \quad (7)$$

式中： r 为径向偏离； $A_0=[\text{erf}(v)]^2$ 为 $r=0$ 处接收到的功率分量； $\text{erf}(\cdot)$ 为误差函数， $v=\sqrt{\pi} R / \sqrt{2} w_z$ ， $w_{z_{eq}}^2=w_z^2 \sqrt{\pi} \text{erf}(v) / 2v \exp(-v^2)$ 是等效束宽。 r 符合瑞利分布^[18]，因此， h_p 的 PDF 为：

$$f_{h_p}(h_p) = \frac{\gamma^2}{A_0} h_p^{\gamma^2-1}, 0 \leq h_p \leq A_0 \quad (8)$$

式中： $\gamma=w_{z_{eq}}/2\sigma_s$ 为接收端等效波束半径与接收端瞄准误差位移标准差(抖动)之比； σ_s^2 为接收处的等效方差。

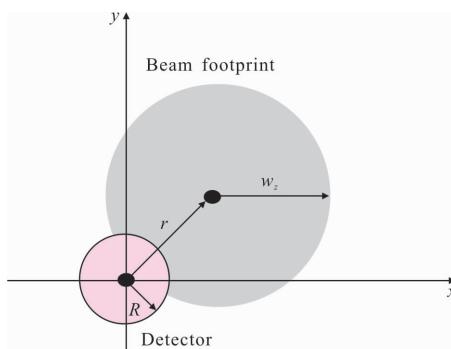


图 1 探测器和光束在接收平面上的偏移

Fig.1 Detector and beam footprint with misalignment on the receiver plane

1.4 联合衰减

将前面介绍的湍流和瞄准误差综合考虑，可得

到 h 的 PDF 为^[18]:

$$f_h(h) = \frac{2\gamma^2(\alpha\beta)^{(\alpha+\beta)/2}h^{\gamma^2-1}}{(A_0h_l)^\gamma \Gamma(\alpha)\Gamma(\beta)} \int_{h/A_0h_l}^{\infty} h_a^{(\alpha+\beta)/2-1-\gamma^2} K_{\alpha-\beta}(2\sqrt{\alpha\beta h_a}) dh_a \quad (9)$$

将 $K_m(x)$ 写成 Meijer G 函数形式^[24]:

$$K_m(x) = \frac{1}{2} G_{0,2}^{2,0} \left[\begin{matrix} - \\ m/2, m/2 \end{matrix} \mid \frac{x^2}{4} \right] \quad (10)$$

并使用参考文献[25]中公式(14)和参考文献[26]中公式(9.31.5), 可以得到公式(9)的解析表达式为:

$$f_h(h) = \frac{\alpha\beta\gamma^2}{A_0h_l\Gamma(\alpha)\Gamma(\beta)} G_{1,3}^{3,0} \left[\begin{matrix} \gamma^2 \\ \gamma^2-1, \alpha-1, \beta-1 \end{matrix} \mid \frac{\alpha\beta}{A_0h_l} h \right] \quad (11)$$

2 平均误码率和中断概率

2.1 平均 BER 分析

当选用 DPSK 调制 UWOC 系统时, 其条件 BER 为^[8]:

$$P(e|h) = 0.5[-\xi(h)] \quad (12)$$

式中: $\xi(h)$ 为信噪比(Signal noise ratio, SNR), 为:

$$\xi(h) = \frac{\eta_e A T_s}{h_B v} h \quad (13)$$

式中: η_e 为光电检测器的量子效率; A 为检测面积; T_s 为 DPSK 符号宽度; h_B 为普朗克常数; v 为接收信号频率。

由公式(13)和公式(11), 可以得到平均 BER, $P(e)$:

$$P(e) = \int_0^{\infty} P(e|h)f_h(h)dh = \frac{\alpha\beta\gamma^2}{2A_0h_l\Gamma(\alpha)\Gamma(\beta)} \int_0^{\infty} \exp[-\xi(h)] G_{1,3}^{3,0} \left[\begin{matrix} \gamma^2 \\ \gamma^2-1, \alpha-1, \beta-1 \end{matrix} \mid \frac{\alpha\beta}{A_0h_l} h \right] dh \quad (14)$$

该平均 BER 可以变换为与平均 SNR 有关, 其中平均 SNR 定义为:

$$\mu = E[\xi(h)] = \frac{\eta_e A T_s}{h_B v} E(h) \quad (15)$$

式中: $E[\cdot]$ 表示数学期望。

2.1.1 考虑瞄准误差

若瞄准误差不可忽略时, 使用公式(11)可得到:

$$E[h] = \frac{A_0h_l\gamma^2}{\gamma^2+1} \quad (16)$$

为了得到公式(14)的解析表达式, 将 $\exp(x)$ 函数表示成形式^[24]:

$$\exp(-x) = G_{0,1}^{1,0} \left[\begin{matrix} - \\ 0 \end{matrix} \mid x \right] \quad (17)$$

利用参考文献[26] 中公式(7.813.1)和(9.31.5)的形式, 可推导得到平均 BER 的解析表达式为:

$$P(e) = \frac{\gamma^2}{2\Gamma(\alpha)\Gamma(\beta)} G_{2,3}^{3,1} \left[\begin{matrix} 1, \gamma^2+1 \\ \gamma^2, \alpha, \beta \end{matrix} \mid \frac{\alpha\beta\gamma^2}{\mu(\gamma^2+1)} \right] \quad (18)$$

2.1.2 忽略瞄准误差

若瞄准误差可忽略, 即只考虑湍流影响, 公式(15)可以简化为 $E[h]=1$, 因此 $\mu=E[\xi(h)]=\frac{\eta_e A T_s}{h_B v}$ 。此时平均 BER 为:

$$P(e) = \frac{1}{2\Gamma(\alpha)\Gamma(\beta)} G_{1,2}^{2,1} \left[\begin{matrix} 1 \\ \alpha, \beta \end{matrix} \mid \frac{\alpha\beta}{\mu} \right] \quad (19)$$

2.2 中断概率分析

DPSK 调制的 UWOC 系统在强湍流中传输后的中断概率可以通过下式计算得到:

$$P_{\text{out}} = P_r(\xi < \xi_{\text{th}}) \quad (20)$$

2.2.1 考虑瞄准误差

当瞄准误差不可忽略时, 将公式(11)和公式(15)代入公式(20), 可以得到 OP:

$$P_{\text{out}} = P_r \left(\mu \frac{\gamma^2+1}{A_0h_l\gamma^2} h < \xi_{\text{th}} \right) = \int_0^{\frac{\xi_{\text{th}} A_0 h_l \gamma^2}{\mu(\gamma^2+1)}} f_h(h) dh \quad (21)$$

使用参考文献[25]中公式(26)和参考文献[26]中公式(9.31.5), 可以得到 OP 的解析式:

$$P_{\text{out}} = \frac{\gamma^2}{\Gamma(\alpha)\Gamma(\beta)} G_{2,4}^{3,1} \left[\begin{matrix} 1, \gamma^2+1 \\ \gamma^2, \alpha, \beta, 0 \end{matrix} \mid \frac{\alpha\beta\xi_{\text{th}}\gamma^2}{\mu(\gamma^2+1)} \right] \quad (22)$$

2.2.2 忽略瞄准误差

同样地, 如果瞄准误差可忽略, 则 $E[h]=1$, 此时 OP^[8]:

$$P_{\text{out}} = \frac{1}{\Gamma(\alpha)\Gamma(\beta)} G_{1,3}^{2,1} \left[\begin{matrix} 1 \\ \alpha, \beta, 0 \end{matrix} \mid \frac{\alpha\beta\xi_{\text{th}}}{\mu} \right] \quad (23)$$

3 仿真结果和分析

此节将对第 2 节中推导的关于 UWOC 系统在强湍流中传输存在与忽略瞄准误差两种情况的平均 BER 和 OP 的表达式进行仿真分析。仿真使用的参数见表 1 所示。利用表 1 中的湍流参数数值可以计算出 Rytov 方差 $\sigma_l^2=2.43$, 该值意味着 UWOC 系统处于强的湍流环境^[16]。另外, 选择光源波长为 532 nm 是因为在水中蓝绿波段的光信号受到的吸收和散射最小^[11], 有利于提升 UWOC 系统性能。

表 1 仿真所用参数

Tab.1 Parameters used for simulation

Coefficient	Value
Source wavelength, λ/nm	532
Propagation distance, L/m	10
Receiver aperture diameter, $D=2R/\text{mm}$	3
Ratio of beam width to aperture radius, w_z/R	8
Ratio of jitter standard deviation variance to aperture radius, σ_s/R	2
Rate of dissipation of kinetic energy per unit mass of fluid, $\varepsilon/\text{m}^2 \cdot \text{s}^{-3}$	10^{-3}
Rate of dissipation of mean-squared temperature, $\chi_T/\text{K}^2 \cdot \text{s}^{-1}$	10^{-4}
Kinetic viscosity, $\mu/\text{m}^2 \cdot \text{s}^{-1}$	10^{-4}
Ratio of temperature to salinity contributions to the refractive index spectrum, ω	-2

图 2 为 DPSK 调制的 UWOC 系统通过强湍流传输, 利用直径为 3 mm 的孔径进行平均接收, 在瞄准误差分别为 $\sigma_s/R=2, 3, 4$ 的平均 BER 和 OP 随平均 SNR 的变化。为了验证第 3 节推导的解析式的正确性, 将平均 BER 和 OP 的解析公式(18)和(22)的仿真结果(图 2 中用“Ana.”标志)与相应的数值表达式(14)和公式(21)(图 2 中用“Num.”标志)的结果进行比较。从图 2 中可以看出, 这两种方法得到的结

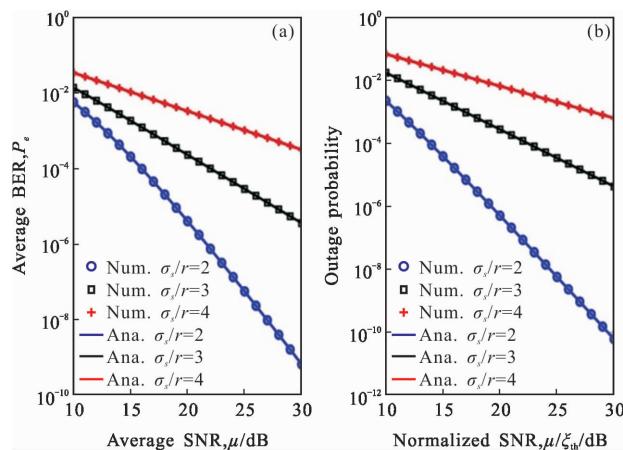


图 2 不同瞄准误差下(a)平均 BER 随平均 SNR 变化曲线和(b)OP 随归一化 SNR 的变化曲线

Fig.2 Effect of pointing error on (a) the average BER versus average SNR and (b) the outage probability versus normalized SNR

果非常接近, 说明了推导出的平均 BER 和 OP 的解析式是正确可行的。为了简便分析, 在后面的仿真中都将用解析表达式进行分析。另外, 从图 2 还可以看出, 随着瞄准误差的增加, 平均 BER 和 OP 的性能逐渐恶化。如 SNR 为 20 dB 时, 当 $\sigma_s/R=2, 3, 4$ 时, 平均 BER 分别为 $3.99 \times 10^{-6}, 2.29 \times 10^{-4}, 3.27 \times 10^{-3}$ 。

图 3 观察了 DPSK 调制的 UWOC 系统通过强湍流传输并存在瞄准误差时, 在不同的束宽与孔径半径比值 $w_z/R=8, 9, 10$ 时的平均 BER 和 OP 随平均 SNR 的变化。仿真用的其他参数同表 1 所示。从图 3 中可以发现, 加大束宽与孔径半径比值能减轻瞄准误差的影响, 从而改善 UWOC 系统的性能。如在 SNR 为 20 dB 时, 当 w_z/R 从 8 增加到 10 时, 平均 BER 从 1.08×10^{-4} 降到 1.19×10^{-5} 。这一结果符合这样一个原理: 光束宽度与孔径半径之比越大, 随机折射效应就越小(光束漂移越小)。因此, 当为 UWOC 链路设计发射机时, 需要对其波束宽度进行精确控制, 因为通过适当选择 w_z/R , 能得到比较好的系统性能。

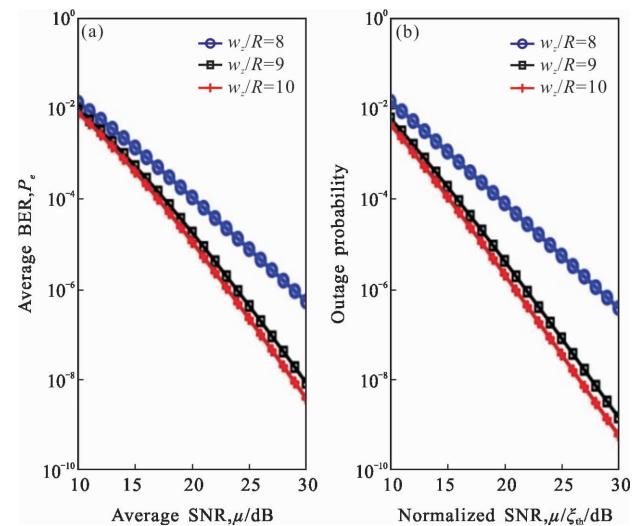


图 3 不同光束束宽与孔径半径比值下(a)平均 BER 随平均 SNR 和(b)OP 随归一化 SNR 的变化

Fig.3 Effect of various ratios of beam width to aperture radius on (a) the average BER versus average SNR and (b) the outage probability versus normalized SNR

为了观察 DPSK 调制的 UWOC 系统在存在瞄准误差(with PE)和忽略瞄准误差(without PE)两种情况下, 孔径平均技术对平均 BER 和 OP 性能的影响, 在图 4 仿真中选取了不同的孔径直径, 即 $D=1, 3, 5\text{ mm}$ 进行仿真, 其余参数同表 1。从图 4 可以观察到, 在

同样的条件下,相较于忽略瞄准误差情况的平均 BER 和 OP,当考虑瞄准误差时 UWOC 性能会较差。进一步地,不论是否考虑瞄准误差,随着接收孔径直径 D 的增加,平均 BER 和 OP 都有所改善。如当存在瞄准误差且平均 SNR 为 20 dB 时,当 D 从 1 mm 增加到 5 mm,平均 BER 从 9.88×10^{-5} 降到 4.08×10^{-7} 。这是由于孔径接收可平均光强的抖动,从而改善了系统性能^[16]。

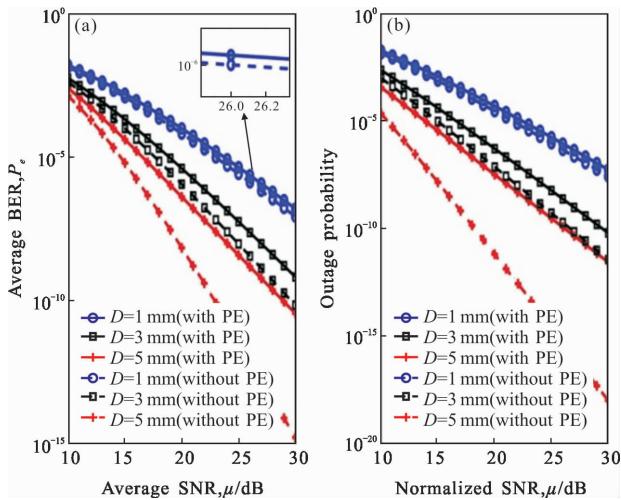


图 4 不同孔径直径下(a)平均 BER 随平均 SNR 和(b)OP 随归一化 SNR 的变化

Fig.4 Effect of aperture diameters on (a) the average BER versus average SNR and (b) the outage probability versus normalized SNR

为了更深入地观察湍流对 DPSK 调制的 UWOC 系统的影响,在图 5~8 给出了 UWOC 系统在不同湍流参数,即温度和盐度波动对海洋湍流贡献的比值 ω 、湍流动能耗散率 ε 、均方温度耗散率 χ_T 和动力粘度 u 下的平均 BER 和 OP 随平均 SNR 的变化。除了每个图中所列的湍流参数取值不同外,其余所用的参数同表 1。图 5 中,当 $\omega=-3, -2.5, -2$ 时,Rytov 方差 σ_t^2 为 1.10, 1.57, 2.43。图 6 中,当 $\varepsilon=0.001, 0.005, 0.01 \text{ m}^2/\text{s}^3$ 时,Rytov 方差 σ_t^2 为 2.43, 1.88, 1.58。图 7 中,当 $\chi_T=6 \times 10^{-5}, 7 \times 10^{-5}, 10^{-4} \text{ K}^2/\text{s}$ 时,Rytov 方差 σ_t^2 为 1.46, 1.70, 2.43。图 8 中,当 $u=6 \times 10^{-5}, 10^{-4}, 1.4 \times 10^{-4} \text{ m}^2/\text{s}$ 时,Rytov 方差 σ_t^2 为 3.17, 2.43, 1.81。这些参数取值可以确保 UWOC 系统在强湍流信道中传输。与图 4 的结果类似,可以看到从图 5~图 8 中,在同样的条件下,相较于忽略瞄准误差(without PE)的情况,UWOC 系统的性能在有考虑瞄准误差(with PE)时性能要差得

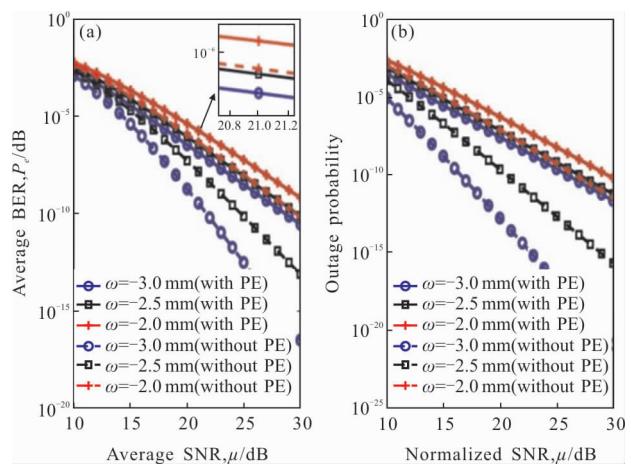


图 5 不同温度和盐度波动对海洋湍流贡献的比值 ω 下(a)平均 BER 随平均 SNR 和(b)OP 随归一化 SNR 的变化

Fig.5 Effect of the ratio of temperature to salinity contributions to the refractive index spectrum ω on (a) the average BER versus average SNR and (b) the outage probability versus normalized SNR

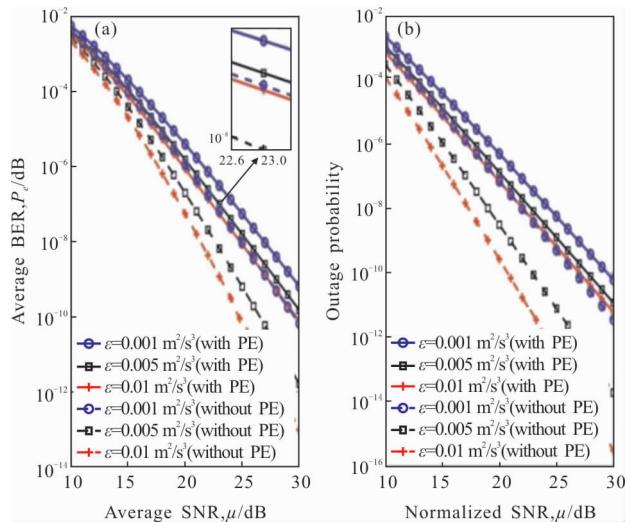


图 6 不同湍流动能耗散率 ε 下(a)平均 BER 随平均 SNR 和(b)OP 随归一化 SNR 的变化

Fig.6 Effect of the rate of dissipation of kinetic energy per unit mass of fluid ε on (a) the average BER versus average SNR and (b) the outage probability versus normalized SNR

多。另外,从图 5 和图 8 可看出,随着湍流强度的增加,UWOC 系统的性能在降低^[23]。下面对各具体情况加以分析。从图 5 中,不论是否存在瞄准误差,可以看到随着温度和盐度波动对海洋湍流贡献的比值 ω 的增加,系统的平均 BER 和 OP 性能在恶化。这个意味着 UWOC 系统不适合在主要由盐度波动引起的海洋

湍流中传输。从图 6 可以看出, 不论是否存在瞄准误差, 当湍流动能耗散率 ε 增加时, 系统性能也随着改善。这是因为 ε 的增加意味着湍流强度的降低, 因此性能会有所改善。从图 7 中可看出, 不论是否存在瞄准误差, UWOC 系统的性能随着均方温度耗散率 χ_T 的增加而降低。这是因为较大的 χ_T 意味着较强的湍流强度。在图 8 中, 系统性能的提升可在较大的动力粘度 u 中观察到。这是因为较大的 u 表示较小的湍流强度。

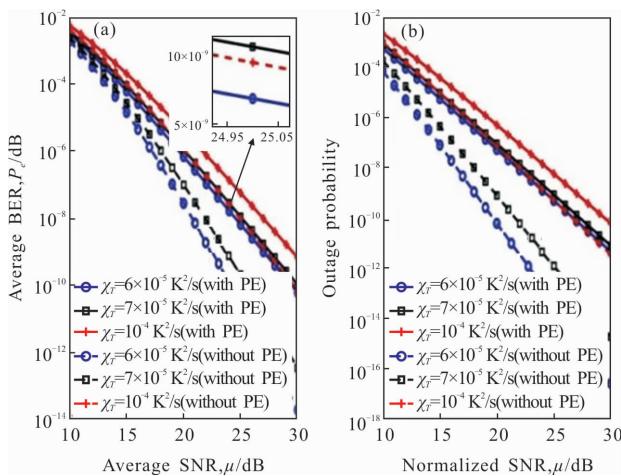


图 7 不同均方温度耗散率 χ_T 下(a)平均 BER 随平均 SNR 和(b)OP 随归一化 SNR 的变化

Fig.7 Effect of the rate of dissipation of mean-squared temperature χ_T on (a) the average BER versus average SNR and (b) the outage probability versus normalized SNR

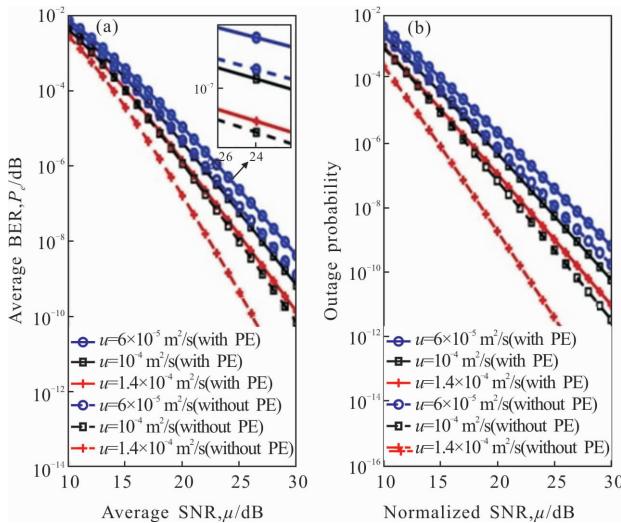


图 8 不同动力粘度 u 下(a)平均 BER 随平均 SNR 和(b)OP 随归一化 SNR 的变化

Fig.8 Effect of the kinetic viscosity u on (a) the average BER versus average SNR and (b) the outage probability versus normalized SNR

4 结 论

建立了一个包含路径损耗、海洋湍流效应和瞄准误差的信号衰落模型。推导了在考虑瞄准误差和忽略瞄准误差两种情况下的平均 BER 和 OP 的解析表达式。基于这些表达式, 观察了不同条件下的 DPSK 调制的 UWOC 系统的平均 BER 和中断概率 OP 性能。研究结果表明较大的瞄准偏差会恶化 UWOC 系统性能, 通过增大孔径尺寸或光束束宽与孔径半径之比可以有效地提升系统性能。还观察了海洋湍流参数对 UWOC 系统平均 BER 和 OP 性能的影响。发现温度和盐度波动对海洋湍流贡献的比值 ω 和均方温度耗散率 χ_T 对系统性能的影响类似, 即增加 ω 或 χ_T 会恶化系统性能。而湍流动能耗散率 ε 和动力粘度 u 的影响相反, 即增加 ε 或 u 可以提升系统性能。笔者的研究工作对于在强湍流传输时存在瞄准误差下要设计出性能较好的 UWOC 系统有一定的理论参考价值。

参 考 文 献 :

- [1] Kaushal H, Kaddoum G. Underwater optical wireless communication [J]. *IEEE Access*, 2016, 4: 1518–1547.
- [2] Shen J, Wang J, Zhang C, et al. Towards power-efficient long-reach underwater wireless optical communication using a multi-pixel photon counter [J]. *Optics Express*, 2018, 26(18): 23565–23571.
- [3] He Fengtao, Du Ying, Zhang Jianlei, 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)
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): 236–244.
- [4] Ye Demao, Liu Yuan, Wang Yantao, et al. Underwater LED optical communication technology of real-time error detection [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2019, 48(9): 0918001. (in Chinese)
叶德茂, 刘圆, 王彦涛, 等. 误差实时检测的水下 LED 光通信技术 [J]. 红外与激光工程, 2019, 48(9): 0918001.
- [5] 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.

- [6] Gökce 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.
- [7] Fu Y, Huang C, Du Y. Effect of aperture averaging on mean bit error rate for UWOC system over moderate to strong oceanic turbulence [J]. *Optics Communications*, 2019, 451: 6–12.
- [8] Fu Y, Du Y. 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.
- [9] 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.
- [10] Jamali M V, Mirani A, Parsay A, et al. Statistical studies of fading in underwater wireless optical channels in the presence of air bubble, temperature, and salinity random variations[J]. *IEEE Transactions on Communications*, 2018, 66(99): 4706–4723.
- [11] Liu W, Xu Z, Yang L. SIMO detection schemes for underwater optical wireless communication under turbulence [J]. *Photonics Research*, 2015, 3(3): 48–53.
- [12] Xu F, Khalighi A, Causs Pé, et al. Channel coding and time-diversity for optical wireless links [J]. *Optics Express*, 2009, 17(2): 872–887.
- [13] Ye F, Zhang J, Xie J, et al. Propagation properties of the rotating elliptical chirped Gaussian vortex beam in the oceanic turbulence [J]. *Optics Communications*, 2018, 426: 456–462.
- [14] Ata Y, Baykal Y. Effect of anisotropy on bit error rate for an asymmetrical Gaussian beam in a turbulent ocean [J]. *Applied Optics*, 2018, 57(9): 2258–2262.
- [15] Wang X, Yang Z, Zhao S. Influence of oceanic turbulence on propagation of Airy vortex beam carrying orbital angular momentum [J]. *Optik*, 2019, 176: 49–55.
- [16] Gökce M C, Baykal Y. Aperture averaging in strong oceanic turbulence [J]. *Optics Communications*, 2018, 413: 196–199.
- [17] Farid A A, Hranilovic S. Outage capacity optimization for free-space optical links with pointing errors [J]. *Journal of Lightwave Technology*, 2007, 25(7): 1702–1710.
- [18] Sandalidis H G, Tsiftsis T A, Karagiannidis G K, Optical wireless communications with heterodyne detection over turbulence channels with pointing errors [J]. *Journal of Lightwave Technology*, 2009, 27(20): 4440–4445.
- [19] Yu S, Ding J, Fu Y, et al. Novel approximate and asymptotic expressions of the outage probability and BER in gamma–gamma fading FSO links with generalized pointing errors [J]. *Optics Communications*, 2019, 435: 289–296.
- [20] Yang F, Cheng J, Tsiftsis T A. Free-space optical communication with nonzero boresight pointing errors [J]. *IEEE Transactions on Communications*, 2014, 62(2): 713–725.
- [21] Caplan D O. Laser communication transmitter and receiver design [J]. *Journal of Optical and Fiber Communications Reports*, 2007, 4(4–5): 225–362.
- [22] Andrews L C, Phillips R L, Hopen C Y. Aperture averaging of optical scintillations: power fluctuations and the temporal spectrum [J]. *Waves in Random Media*, 2000, 10(1): 53–70.
- [23] Baykal Y. Scintillation index in strong oceanic turbulence[J]. *Optics Communications*, 2016, 375: 15–18.
- [24] Prudnikov A P, Brychkov Y A, Marichev O I. Integrals and Series. More Special Functions [M]. London: Gordon and Breach, 1992.
- [25] Adamchik V S, Marichev O I. The algorithm for calculating integrals of hypergeometric type functions and its realization in REDUCE system [C]//Proceedings of the International Symposium on Symbolic and Algebraic Computation, 1990: 212–224.
- [26] Gradshteyn I S, Ryzhik I M. Table of Integrals, Series, and Products [M]. 7th ed. New York: Academic, 2008.