

## 海洋湍流下波长分集无线光通信系统性能分析

贺锋涛, 李佳琪, 张建磊\*, 杨 祎, 王清杰, 王 妮

(西安邮电大学 电子工程学院, 陕西 西安 710121)

**摘要:** 由于海水的吸收、散射衰减以及海洋湍流效应会引起水下无线光通信 (Underwater wireless optical communication, UWOC) 系统接收端光信号的闪烁, 导致 UWOC 系统传输性能下降。基于 Gamma-gamma 分布的海洋湍流信道模型, 根据海洋湍流参数和各向异性因子表示的等效结构参数, 推导出波长分集 UWOC 系统中断概率 (Outage probability, OP) 与平均误码率 (Bit error rate, BER) 封闭表达式。研究分析随着各向异性因子的增加, 具有不同波长分集阶的水下无线光通信系统中断概率与平均误码率的变化, 比较接收端使用最佳组合 (Optimal combining, OC) 与等增益组合 (Equal gain combining, EGC) 技术的水下无线光通信系统平均误码率, 并仿真不同海洋湍流参数、传输距离对波长分集 UWOC 系统性能的影响。数值结果表明, 随着各向异性因子的增加, 海洋湍流对水下无线光通信系统产生的影响逐渐减弱, 使用波长分集技术的 UWOC 系统比无波长分集技术的 UWOC 系统中断概率与平均误码率明显改善。

**关键词:** 水下无线光通信; 海洋湍流; 波长分集; Gamma-gamma 分布; 中断概率; 平均误码率  
**中图分类号:** TN929.1 **文献标志码:** A **DOI:** 10.3788/IRLA20210131

## Performance analysis of wavelength diversity wireless optical communication system in ocean turbulence

He Fengtao, Li Jiaqi, Zhang Jianlei\*, Yang Yi, Wang Qingjie, Wang Ni

(College of Electronic Engineering, Xi'an University of Posts and Telecommunications, Xi'an 710121, China)

**Abstract:** Due to seawater absorption, scattering attenuation and ocean turbulence effects, the optical signal at the receiving end of the underwater wireless optical communication (UWOC) system will flicker. The flickering signal will result in a decrease in the transmission performance of the UWOC system. Based on the Gamma-gamma distribution of the ocean turbulence channel model, according to the equivalent structural parameters represented by ocean turbulence parameters and anisotropy factors, the closed expressions of the outage probability (OP) and the average bit error rate (BER) of the wavelength diversity UWOC system were derived. With the increase of the anisotropy factor, the changes in the outage probability and the average bit error rate of UWOC system with different wavelength diversity orders were analyzed. The average bit error rate difference of the UWOC system between the optimal combining (OC) and the equal gain combining (EGC) used at the receiving end technology were compared, and the influence of different ocean turbulence parameters and transmission distances on the performance of the wavelength diversity UWOC system was simulated. The

收稿日期:2021-07-10; 修订日期:2021-09-25

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

作者简介:贺锋涛,男,副教授,博士,主要从事水下无线光通信、激光高分辨成像及激光散斑传感检测等方面的研究。

通讯作者:张建磊,男,副教授,博士,主要研究方向为水下无线光信道建模与微弱信号接收技术,三维成像与显示技术。

numerical results show that the ocean turbulence effect on the UWOC system gradually weakens with the increase of the anisotropy factor. The UWOC system with wavelength diversity technology has significantly improved the outage probability and the average bit error rate than the UWOC system without wavelength diversity technology.

**Key words:** underwater wireless optical communication; ocean turbulence; wavelength diversity; Gamma-gamma distribution; outage probability; average bit error rate

## 0 引言

水下通信技术<sup>[1]</sup>已成为探索海洋的主要方式之一。相较于传统水声通信与水下射频通信,水下无线光通信(Underwater wireless optical communication, UWOC)具有高速率、低延迟、大带宽及高安全性等优势,成为海洋资源勘探、水下无线传感网络以及潜水员、无人潜水器、潜艇和船舶之间通信的关键技术<sup>[2-3]</sup>。然而,水下无线光通信系统的传输性能受到复杂海水环境的严重影响,其中吸收、散射效应和海洋湍流是主要影响因素。海水中的溶解物、悬浮颗粒以及一些有机物质对光具有衰减作用,并且这种作用与光波长具有密切联系<sup>[4-5]</sup>。海洋湍流是由于海水受到温度梯度、盐度梯度变化引起的折射率随机变化,从而使 UWOC 系统接收端光强度闪烁<sup>[6-7]</sup>,导致系统通信质量下降。

近年来,研究人员提出利用孔径平均<sup>[8-9]</sup>、分集技术<sup>[10-11]</sup>、信道编码<sup>[12-14]</sup>等技术来缓解湍流对于无线光通信系统的影响。其中分集技术包括波长分集、空间分集、时间分集等。波长分集技术利用不同工作波长发送相同数据,并由特定波长检测器接收<sup>[15]</sup>。空间分集技术使用多个发射机和接收机进行单波长的数据传输<sup>[16]</sup>。时间分集技术由单发射机-接收机在不同时隙内传输相同数据<sup>[17]</sup>。Dhaval Shah 等人<sup>[18]</sup>基于 K 分布模型来模拟强大气湍流信道条件,采用波长分集技术推导出自由空间光通信(Free space optical, FSO)系统接收端不同信号组合的误码率表达式。Kanchan Sharma 等人<sup>[19]</sup>研究分析了基于对数正态分布和 Gamma-gamma 分布信道模型的 FSO 系统在弱到强大气湍流强度下的波长分集和时间分集技术方案,并采用 PPM-BPSK-SIM 混合调制方式导出平均 BER 封闭表达式,结果表明合理使用分集技术对系统性能有所改善。Kostas P 等人<sup>[20]</sup>基于对数正态分布的各向同性弱海洋湍流信道,采用空间分集技术和多脉冲位置调制技术推导出 UWOC 系统平均误码率近似解析表

达式,仿真分析出不同设计参数下的系统性能。以上研究分别在大气湍流和各向同性海洋湍流条件下对具有分集技术的无线光通信系统性能进行分析,然而,在各向异性海洋湍流下采用波长分集技术的 UWOC 系统性能尚未报道。因此,文中考虑由吸收、散射效应引起的传输路径损耗和各向异性海洋湍流影响因素,对具有波长分集的水下无线光通信系统性能进行研究。

海洋湍流信道模型主要有对数正态湍流模型<sup>[21-22]</sup>、Gamma-gamma 湍流模型<sup>[23-24]</sup>、负指数分布模型等,基于以上分布模型,文中采用存在传输路径损耗和 Gamma-gamma 分布的海洋湍流信道传输模型,根据海洋湍流参数和各向异性因子表示的等效结构参数,推导出使用波长分集技术的 UWOC 系统中断概率和平均误码率的封闭表达式。通过改变各向异性因子得到不同海洋湍流强度下具有波长分集技术的 UWOC 系统性能变化。当接收端使用最佳组合(Optimal combining, OC)和等增益组合(Equal gain combining, EGC)技术时,比较不同波长分集阶的 UWOC 系统平均误码率的变化,并仿真分析不同海洋湍流参数、传输距离对波长分集 UWOC 系统性能的影响。

## 1 系统和信道模型

### 1.1 系统模型

如图 1 所示为具有波长分集的水下无线光通信系统框图,利用复合发射机在同一时刻发出不同工作波长的信号,经过存在传输路径损耗和海洋湍流效应的信道后,接收端的波长检测器接收相应波长信号。

文中采用强度调制/直接检测(IM/DD)与开关键控(OOK)调制的 UWOC 系统,假设复合发射机使用  $w = 1, 2, \dots, W$  个不同工作波长同时发出相同数据信号,经过具有加性高斯白噪声(Additive white Gaussian noise, AWGN)的湍流信道模型,由  $W$  个特定波长检测

器接收信号。此时,第 $w$ 个接收机接收到的信号可表示为<sup>[25-26]</sup>:

$$y_w = h_w \gamma x + n_0 \quad (1)$$

$$h = h_w \quad w = 1, 2, \dots, W \quad (2)$$

式中:  $y_w$ 为接收机 $w$ 接收到的信号;  $h$ 为第 $w$ 个信道的联合衰落状态;  $\gamma$ 为接收机响应度;  $x$ 为二进制传输信号;  $n_0$ 为均值为零且方差为 $\sigma_n^2$ 的独立加性高斯白噪声。

考虑 UWOC 系统具有 OOK 调制信道衰落特性,接收到的瞬时电信噪比 (Signal noise ratio, SNR) 受信道状态 $h$ 的影响,表示为:

$$SNR(h) = \frac{2P_0^2 \gamma^2 h^2}{\sigma_n^2} \quad (3)$$

式中:  $P_0$ 为平均发射光功率;  $\langle SNR \rangle$ 表示平均电信噪比。因此,可以表示为:

$$\langle SNR(h) \rangle = \frac{2P_0^2 \gamma^2 E^2[h]}{\sigma_n^2} \quad (4)$$

式中:  $E[\cdot]$ 表示归一化期望。

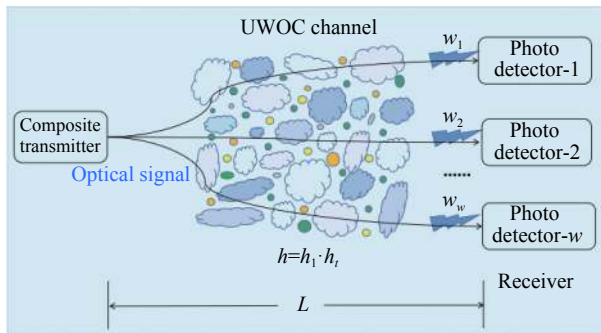


图 1 具有波长分集的 UWOC 系统示意图

Fig.1 Schematic diagram of UWOC system with wavelength diversity

### 1.2 海水信道传输路径损耗

海水中含有复杂的杂质成分,导致光信号与杂质分子相互碰撞作用发生吸收、散射效应,引起接收端光脉冲展宽及延迟效应。通常用比尔-朗伯定律<sup>[1]</sup>描述海水信道对光信号的传输路径损耗 $h_l$ ,可表示为:

$$h_l = \exp(-c(\lambda) \cdot L) \quad (5)$$

式中:  $L$ 为光信号在海水信道中的传输距离;  $c(\lambda)$ 为总衰减系数。

### 1.3 湍流信道

海洋湍流引起的信道衰落被认为是随机过程,由

Gamma-gamma 分布描述弱、中到强湍流条件。发射端光信号经过湍流后,接收端辐照度分布遵循 Gamma-gamma 统计分布,其概率密度函数 (Probability density function, PDF) 表达式<sup>[27]</sup>为:

$$f_{h_t}(h_t) = \frac{2(\alpha\beta)^{\frac{\alpha+\beta}{2}}}{\Gamma(\alpha)\Gamma(\beta)} h_t^{\frac{\alpha+\beta}{2}-1} K_{\alpha-\beta}(2\sqrt{\alpha\beta h_t}) \quad (6)$$

式中:  $K_\nu(\cdot)$ 为第二类 $\nu$ 阶修正贝塞尔函数;  $\Gamma(\cdot)$ 为伽马函数。利用 Meijer-G 函数积分性质<sup>[28]</sup>,公式 (6) 概率密度函数 (PDF) 可表示为:

$$f_{h_t}(h_t) = \frac{(\alpha\beta)^{\frac{\alpha+\beta}{2}}}{\Gamma(\alpha)\Gamma(\beta)} h_t^{\frac{\alpha+\beta}{2}-1} G_{0,2}^{2,0} \left( \alpha\beta h_t \middle| \frac{\alpha-\beta}{2}, \frac{\beta-\alpha}{2} \right) \quad (7)$$

其中,  $\alpha$ 和 $\beta$ 表示描述海洋湍流引起光束闪烁的尺度大小,  $\alpha$ 描述大尺度参量,  $\beta$ 描述小尺度参量,可表示为<sup>[23,29]</sup>:

$$\alpha = \frac{1}{\exp\left(\frac{0.196\sigma_R^2}{(1+0.18d^2+0.186\sigma_R^{12/5})^{7/6}}\right) - 1} \quad (8)$$

$$\beta = \frac{1}{\exp\left(\frac{0.204\sigma_R^2(1+0.23\sigma_R^{12/5})^{-5/6}}{1+0.9d^2+0.207d^2\sigma_R^{12/5}}\right) - 1} \quad (9)$$

式中:  $d = \sqrt{kD^2/4L}$ ,  $k = 2\pi/\lambda$ 为波矢量,  $D$ 为接收孔径大小,  $L$ 为链路距离。平面波 Rytov 方差表示为  $\sigma_R^2 = 1.23C_n^2 k^{7/6} L^{11/6}$ ,其中  $C_n^2$ 是海洋湍流参数和各向异性因子表示的等效结构参数,由下式表示<sup>[24]</sup>:

$$C_n^2 = 8\pi k^{-7/6} L^{-11/6} \text{Re} \left\{ \int_0^L dz \int_{-\infty}^{+\infty} d\kappa_x \int_{-\infty}^{+\infty} d\kappa_y \times [P(z, \kappa_x, \kappa_y) P(z, -\kappa_x, -\kappa_y) + |P(z, \kappa_x, \kappa_y)|^2 \Phi_n(\kappa)] \right\} \quad (10)$$

式中:  $z$ 为光束的传播方向;  $\kappa_x$ 和 $\kappa_y$ 分别表示在 $x$ 与 $y$ 方向的空间频率分量;  $P(z, \kappa_x, \kappa_y)$ 为  $ik \exp(-0.5(kL)^{-1} \times iz(L-z)(\kappa_x^2 + \kappa_y^2))$ ;  $\Phi_n(\kappa)$ 表示海洋湍流的折射率空间功率谱,其表达式为<sup>[7,30]</sup>:

$$\Phi_n(\kappa) = 0.388 \times 10^{-8} u_x u_y \omega^{-2} \varepsilon^{-1/3} \chi_T u^{-11/6} \times (1 + 2.35\nu^{1/2} \varepsilon^{-1/6} u^{1/3}) \times [\omega^2 \exp(-A_T \delta) + \exp(-A_S \delta) - 2\omega \exp(-A_{TS} \delta)] \quad (11)$$

式中:  $u_x$ 和 $u_y$ 分别表示海洋湍流中各向异性因子,  $u$ 表示为  $(u_x \kappa_x)^2 + (u_y \kappa_y)^2$ ,  $u_x = 1, u_y = 1$ 表示各向同性湍流环境,  $u_x > 1, u_y > 1$ 表示各向异性海洋湍流环境;  $\omega$ 表示温度与盐度对海洋湍流贡献的比值大小,取值范围为

[-5,0],当海洋湍流完全由温度梯度贡献时取值为-5,完全由盐度梯度贡献时取值为0;湍流单位动能耗散率 $\varepsilon$ 取值范围为 $[10^{-10}\text{m}^2/\text{s}^3, 10^{-1}\text{m}^2/\text{s}^3]$ ,当处于海洋深海时取值等于 $10^{-10}\text{m}^2/\text{s}^3$ ,处于海洋表层时取值等于 $10^{-1}\text{m}^2/\text{s}^3$ ;  $\chi_T$ 表示均方温度耗散率,取值范围从 $10^{-10}\sim 10^{-2}\text{K}^2/\text{s}$ ;  $\nu$ 表示动力粘度系数,取值范围为 $[0\text{m}^2/\text{s}, 10^{-5}\text{m}^2/\text{s}]$ ;  $A_T = 1.863 \times 10^{-2}$ ,  $A_S = 1.9 \times 10^{-4}$ ,  $A_{TS} = 9.41 \times 10^{-3}$ ,  $\delta = 8.284\nu\varepsilon^{-1/3}u^{2/3} + 12.978\nu^{3/2}\varepsilon^{-1/2}u$ 。

### 1.4 联合衰减模型

综合考虑 1.2、1.3 小节所介绍内容,光信号在海水中传输时,由于受到吸收、散射效应及海洋湍流影响,从而能量发生严重衰减。在波长分集 UWOC 系统中,信道联合衰减可表示为:

$$h = h_a h_t \quad (12)$$

式中:  $h_a$ 描述海水信道中由于吸收、散射引起的衰减效应;  $h_t$ 描述海洋湍流引起的信号衰落。因此, UWOC 系统信道联合衰落状态  $h$  的 PDF 可表示为:

$$f_h(h) = \left| \frac{d}{dh} \left( \frac{h}{h_t} \right) \right| f_{h_t}(h_t) \quad (13)$$

将 Gamma-gamma 分布海洋湍流引起的衰落 PDF 代入公式 (13), 得到以下表达式:

$$f_h(h) = \frac{\alpha\beta}{\Gamma(\alpha)\Gamma(\beta)h_t} G_{0,2}^{2,0} \left( \alpha\beta \frac{h}{h_t} \mid \alpha-1, \beta-1 \right) \quad (14)$$

## 2 中断概率

中断概率是衡量水下无线光通信系统性能的重要指标之一,其定义为接收端瞬时信噪比小于临界检测阈值  $SNR_{th}$  的概率,由下式表示为:

$$P_{out} = P_r(SNR(h) \leq SNR_{th}) = \int_h f_h(h) dh \quad (15)$$

根据 1.4 小节 Gamma-gamma 分布的 PDF, 推导出具有  $W$  个不同信道的波长分集 UWOC 系统中中断概率表达式。由于每个信道工作波长不同,假定  $W$  个信道彼此独立,得到对应  $W$  个信道的总中断概率表达式为:

$$P_{out,W} = \prod_{w=1}^W P_r(SNR(h_w) \leq SNR_{th}) = \prod_{w=1}^W \int_{h_w} f_{h_w}(h_w) dh_w \quad (16)$$

将公式 (14) 代入公式 (16) 得到具有波长分集的

UWOC 系统总中断概率表达式:

$$P_{out,W} = \prod_{w=1}^W \frac{1}{\Gamma(\alpha_w)\Gamma(\beta_w)} G_{1,3}^{2,1} \left( \alpha_w \beta_w \sqrt{\frac{SNR_{th}}{\langle SNR_w \rangle}} \mid \alpha_w, \beta_w, 0 \right) \quad (17)$$

## 3 平均 BER

描述水下无线光通信系统性能的另一个重要指标是平均误码率。考虑 AWGN 情况下,采用 IM/DD-OOK 的 UWOC 系统平均误码率表达式为:

$$P_e = P(1)P(e|1) + P(0)P(e|0) \quad (18)$$

式中:  $P(\cdot)$ 表示发送“0”或“1”的概率;  $P(\cdot)$ 表示条件概率。根据对称性得到  $P(0) = P(1) = 0.5$ ,  $P(e|0) = P(e|1)$ 。

### 3.1 最佳组合

对于具有波长分集的 UWOC 系统,采用复合发射机发射出  $W$  个波长信号对应多个特定波长检测机接收,假定每个信道链路发送相同的“0”和“1”概率。

在最佳组合<sup>[18]</sup>(OC)接收机方案中,根据信号强度对不同信道的信号副本进行同相加权得到具有波长分集的 UWOC 系统平均 BER 表达式为:

$$P_{e,OC} = \int_{h_w} f_{h_w}(h_w) Q \left( \frac{P_0}{\sqrt{W}\sigma_n} \sqrt{\sum_{w=1}^W (\gamma_w h_w)^2} \right) dh_w \quad (19)$$

式中:  $h_w$ 表示不同信道衰落状态;  $Q(\cdot)$ 表示高斯  $Q$  函数,根据其性质近似等于  $Q(x) \approx 1/12 \exp(-x^2/2) + 1/4 \exp(-2x^2/3)$ ,因此公式 (19) 可化简为:

$$P_{e,OC} = \frac{1}{12} \prod_{w=1}^W \int_0^\infty f_{h_w}(h_w) \exp \left( -\frac{P_0^2 \gamma_w^2 h_w^2}{2W\sigma_n^2} \right) dh_w + \frac{1}{4} \prod_{w=1}^W \int_0^\infty f_{h_w}(h_w) \exp \left( -\frac{2P_0^2 \gamma_w^2 h_w^2}{3W\sigma_n^2} \right) dh_w \quad (20)$$

将公式 (14) 代入公式 (20), 得到:

$$P_{e,OC} = \frac{1}{12} \prod_{w=1}^W \int_0^\infty \frac{\alpha_w \beta_w}{\Gamma(\alpha_w)\Gamma(\beta_w)h_t} \times G_{0,2}^{2,0} \left( \alpha_w \beta_w \frac{h_w}{h_t} \mid \alpha_w-1, \beta_w-1 \right) \exp \left( -\frac{P_0^2 \gamma_w^2 h_w^2}{2W\sigma_n^2} \right) dh_w + \frac{1}{4} \prod_{w=1}^W \int_0^\infty \frac{\alpha_w \beta_w}{\Gamma(\alpha_w)\Gamma(\beta_w)h_t} \times G_{0,2}^{2,0} \left( \alpha_w \beta_w \frac{h_w}{h_t} \mid \alpha_w-1, \beta_w-1 \right) \exp \left( -\frac{2P_0^2 \gamma_w^2 h_w^2}{3W\sigma_n^2} \right) dh_w \quad (21)$$

根据 Meijer-G 函数指数函数性质,  $\exp(\cdot)$  可表示为:

$$\exp(-x) = G_{0,1}^{1,0}(x | \bar{0}) \quad (22)$$

利用公式 (22) 代入公式 (21) 得到波长分集 UWOC 系统的平均 BER 简化表达式为:

$$P_{e,OC} = \frac{1}{12} \prod_{w=1}^W \frac{2^{\alpha_w + \beta_w - 2}}{\Gamma(\alpha_w)\Gamma(\beta_w)\pi} \times G_{4,1}^{1,4} \left( \frac{4\langle SNR_w \rangle}{W(\alpha_w \beta_w)^2} \middle| \frac{1-\alpha_w}{2}, \frac{2-\alpha_w}{2}, \frac{1-\beta_w}{2}, \frac{2-\beta_w}{2} \right) + \frac{1}{4} \prod_{w=1}^W \frac{2^{\alpha_w + \beta_w - 2}}{\Gamma(\alpha_w)\Gamma(\beta_w)\pi} \times G_{4,1}^{1,4} \left( \frac{16\langle SNR_w \rangle}{3W(\alpha_w \beta_w)^2} \middle| \frac{1-\alpha_w}{2}, \frac{2-\alpha_w}{2}, \frac{1-\beta_w}{2}, \frac{2-\beta_w}{2} \right) \quad (23)$$

### 3.2 等增益组合

在具有波长分集的 UWOC 系统接收端的不同组合方案中, 等增益组合<sup>[31]</sup>(EGC) 是将不同信道的接收端处得到的信号副本适当比例合并。与最佳组合 (OC) 相比, 在实际情况中等增益组合 (EGC) 具有较低的链路复杂度。根据 3.1 小节 OC 组合平均 BER 推导过程, 同理得到等增益组合 (EGC) 的平均 BER 表达式为:

$$P_{e,EGC} = \int_{h_w} f_{h_w}(h_w) Q \left( \frac{P_0}{W\sigma_n} \sum_{w=1}^W \gamma_w h_w \right) dh_w \quad (24)$$

对公式 (24) 化简得到 EGC 最终平均 BER 表达式为:

$$P_{e,EGC} = \frac{1}{12} \prod_{w=1}^W \frac{2^{\alpha_w + \beta_w - 2}}{\Gamma(\alpha_w)\Gamma(\beta_w)\pi} \times G_{4,1}^{1,4} \left( \frac{4\langle SNR_w \rangle}{W^2(\alpha_w \beta_w)^2} \middle| \frac{1-\alpha_w}{2}, \frac{2-\alpha_w}{2}, \frac{1-\beta_w}{2}, \frac{2-\beta_w}{2} \right) + \frac{1}{4} \prod_{w=1}^W \frac{2^{\alpha_w + \beta_w - 2}}{\Gamma(\alpha_w)\Gamma(\beta_w)\pi} \times G_{4,1}^{1,4} \left( \frac{16\langle SNR_w \rangle}{3W^2(\alpha_w \beta_w)^2} \middle| \frac{1-\alpha_w}{2}, \frac{2-\alpha_w}{2}, \frac{1-\beta_w}{2}, \frac{2-\beta_w}{2} \right) \quad (25)$$

## 4 数值结果

根据第 2、3 小节得到的中断概率与平均误码率封闭表达式, 本小节分析了基于波长分集的水下无线光通信系统受到传输路径损耗和各向异性海洋湍流影响下的性能变化。由水下无线光通信系统信道传输衰减特性可知<sup>[4,32]</sup>, 不同海水类型对光的衰减作用

有所差异, 图 2 所示为近海水质中不同波长光信号总衰减系数<sup>[33-34]</sup>, 在 550~590 nm 之间的光波衰减系数较小, 其中波长为 570 nm 的光信号在传输过程中受到的吸收、散射效应最小。因此, 文中选取受近海水质衰减影响较小的 560、570、580 nm 光波信号应用于 UWOC 系统波长分集方案。波长分集可由分集阶  $w=1, 2, \dots, W$  决定, 无波长分集 ( $W=1$ ) 采用 570 nm 波长工作, 2 阶分集 ( $W=2$ ) 工作波长为 570 nm 和 560 nm, 具有 3 阶分集 ( $W=3$ ) 时工作波长为 570、560、580 nm。仿真中所用到的参数如表 1 所示。

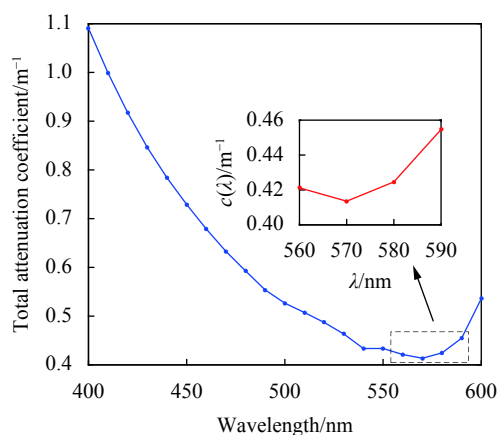


图 2 近海水质中不同波长光信号总衰减系数

Fig.2 Total attenuation coefficient of optical signals of different wavelengths in coastal ocean

表 1 仿真参数

Tab.1 Simulation parameters

Coefficient	Value
Ratio of temperature and salinity contribution to ocean turbulence, $\omega$	-1
Kinetic energy dissipation rate, $\varepsilon/m^2 \cdot s^{-3}$	$10^{-4}$
Mean square temperature dissipation rate, $\chi_T/K^2 \cdot s^{-1}$	$10^{-4}$
Dynamic viscosity coefficient, $\nu/m^2 \cdot s^{-1}$	$10^{-5}$
Receiver diameter, $D/mm$	1
Transmission distance, $L/m$	10

接收机对三种波长光信号的接收响应度不同。仿真中设置 560、570、580 nm 波长光信号对应的光子检测效率  $\eta$  分别为 32%、30%、29%。由公式  $\gamma = \frac{M\eta e}{h\nu}$  可得到接收机对不同光波长的响应度, 其中  $e$  表示电子电量,  $h$  表示普朗克常数,  $\nu$  表示光频,  $M$  表示雪崩光电二极管倍增系数。结合三种波长光信号在近海水质

中的衰减效应以及接收机的响应度,可以计算得到不同工作波长之间的平均信噪比关系。波长为 570 nm 的光信号在近海水水质中传输平均信噪比为  $\langle SNR_1 \rangle$ , 当传输距离为 10 m 时, 560 nm 和 580 nm 的波长信号平均信噪比  $\langle SNR_2 \rangle$ 、 $\langle SNR_3 \rangle$  分别为  $0.95 \langle SNR_1 \rangle$ 、 $0.78 \langle SNR_1 \rangle$ 。当传输距离等于 5 m 时, 560 nm 和 580 nm 的波长光信号平均信噪比关系分别为  $1.02 \langle SNR_1 \rangle$ 、 $0.87 \langle SNR_1 \rangle$ ; 在 15 m 的传输距离下, 560 nm 和 580 nm 的波长光信号平均信噪比关系分别为  $0.9 \langle SNR_1 \rangle$ 、 $0.7 \langle SNR_1 \rangle$ 。在进行波长分集 UWOC 系统性能仿真时, 每个图中平均 SNR 表示采用 570 nm 波长光信号在无波长分集系统中传输的平均信噪比  $\langle SNR_1 \rangle$ 。当  $W=2$  时, 570 nm 和 560 nm 的光信号在海水信道中传输受到的衰减效应有所差别, 此时得到系统中中断概率与平均误码率中包含经过两个不同衰减的平均信噪比。同样地, 在  $W=3$  的系统中, 海水信道对 570、560、580 nm 波长光信号的衰减效应不同, 传输过程中分别对应三个平均信噪比, 最终得到 3 阶波长分集下 UWOC 系统性能的变化。

根据公式 (10) 获得各向异性海洋湍流等效结构参数, 图 3(a)~(c) 绘制了在不同各向异性因子下波长分集 UWOC 系统的中断概率变化, 表 2 给出了平均信噪比 30 dB 时不同各向异性因子下无波长分集与 2、3 阶波长分集 UWOC 系统中中断概率的具体数值。随着各向异性因子  $u_x$ 、 $u_y$  分别在 x 和 y 方向上同时增加, 无波长分集和 2、3 阶波长分集的 UWOC 系统中中断概率明显降低。比如在  $W=3$  的波长分集 UWOC 系统中, 增加各向异性因子  $u_x$  和  $u_y$ , 系统中中断概率从  $3.819 \times 10^{-7}$  减小至  $3.347 \times 10^{-10}$ 。这是因为各向异性因子增大, 海洋湍流内部由于不对称性加剧导致结构密度降低, 相邻涡流单元层碰撞减少, 使湍流折射率变化起伏降低, 海洋湍流强度减小, 导致闪烁效应减弱, 使 UWOC 系统具有了较小的中断概率。当各向异性因子相等时, 相较于无波长分集 UWOC 系统, 使用波长分集的系统中断概率更低, 且  $W=3$  的波长分集 UWOC 系统比  $W=2$  的 UWOC 系统性能更好。比如在各向异性因子  $u_x = 1, u_y = 2$  时, 无波长分集 UWOC 系统中中断概率为  $2.798 \times 10^{-3}$ , 2、3 阶波长分集 UWOC 系统中中断概率分别为  $1.199 \times 10^{-5}$ 、 $1.749 \times 10^{-7}$ 。

图 4 给出在 10 m 的传输距离下接收端使用 OC 和 EGC 技术的波长分集 UWOC 系统平均 BER 变

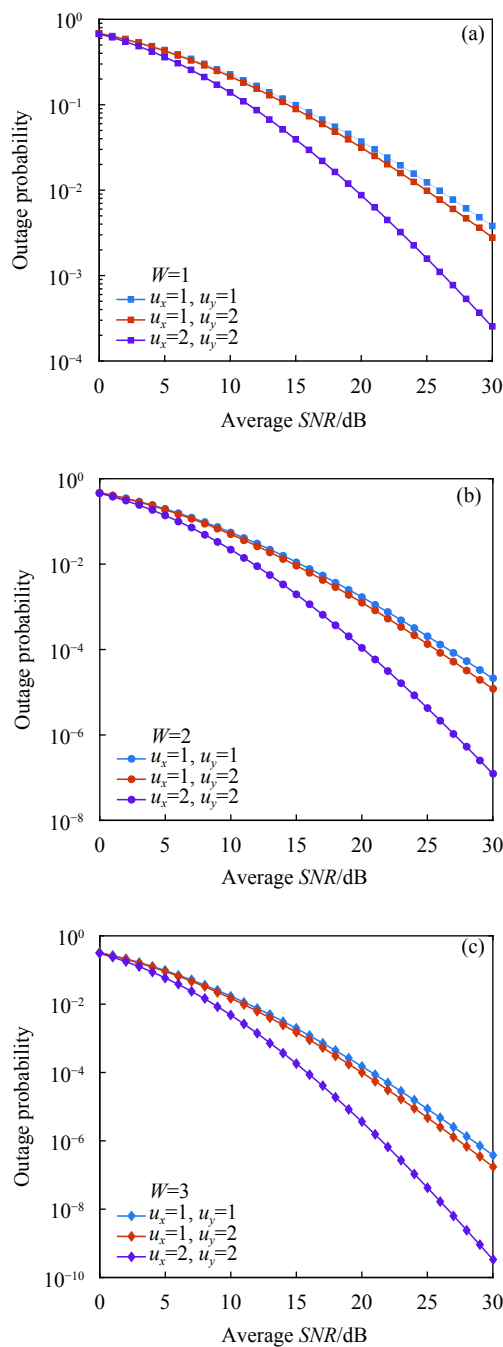


图 3 不同各向异性因子下波长分集 UWOC 系统的中断概率性能变化。(a) 无波长分集; (b) 2 阶波长分集; (c) 3 阶波长分集,  $L=10$  m

Fig.3 Outage probability performance of wavelength diversity UWOC system under different anisotropic factors. (a) No wavelength diversity; (b) Second-order wavelength diversity; (c) Third-order wavelength diversity,  $L=10$  m

表 2 不同各向异性因子下波长分集 UWOC 系统中断概率

Tab.2 Outage probability of wavelength diversity UWOC system under different anisotropy factors

Wavelength diversity	$u_x = 1, u_y = 1$	$u_x = 1, u_y = 2$	$u_x = 2, u_y = 2$
$W = 1$	$3.792 \times 10^{-3}$	$2.798 \times 10^{-3}$	$2.499 \times 10^{-4}$
$W = 2$	$2.097 \times 10^{-5}$	$1.199 \times 10^{-5}$	$1.228 \times 10^{-7}$
$W = 3$	$3.819 \times 10^{-7}$	$1.749 \times 10^{-7}$	$3.347 \times 10^{-10}$

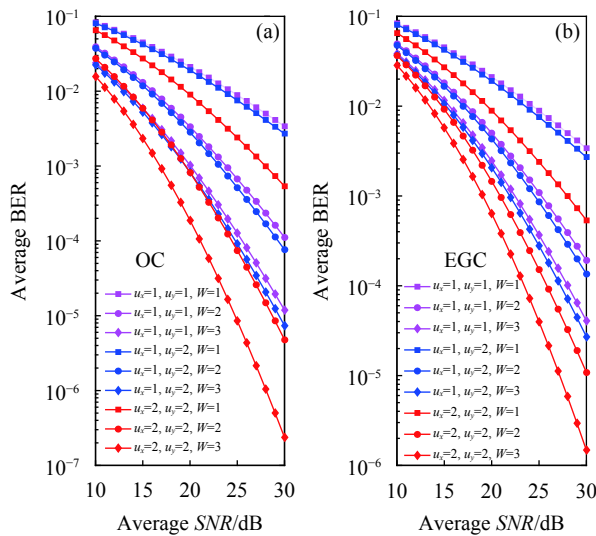


图 4 使用 OC 与 EGC 技术的波长分集 UWOC 系统在不同各向异性因子下的平均 BER 性能比较,  $L=10\text{ m}$

Fig.4 Comparison of the average BER performance of the UWOC system without wavelength diversity using OC and EGC technology under different anisotropic factors,  $L=10\text{ m}$

化。当各向异性因子  $u_x = 1, u_y = 2$ , 平均信噪比为 30 dB 时, 2 阶波长分集 UWOC 系统接收端使用 OC 和 EGC 的平均 BER 分别为  $7.634 \times 10^{-5}$ 、 $1.355 \times 10^{-4}$ , 3 阶波长分集 UWOC 系统接收端使用 OC 和 EGC 的平均 BER 分别等于  $7.375 \times 10^{-6}$ 、 $2.707 \times 10^{-5}$ 。根据数值结果表明, 相同阶数的波长分集 UWOC 系统接收端使用 OC 技术比 EGC 技术得到的平均误码率更低。

图 5 和图 6 更加详细地表明了使用波长分集的 UWOC 系统在不同海洋湍流参数下的性能变化。选取各向异性因子  $u_x = 1, u_y = 2$  时, 不同的动能耗散率  $\varepsilon$ 、均方温度耗散率  $\chi_T$ 、温度与盐度对海洋湍流贡献比值  $\omega$  对波长分集 UWOC 系统中断概率和平均误码率的影响。改变每个图所示变量, 给定其余海洋湍流参数。由图 5(a) 和图 6(a) 可知, 随着湍流中动能耗散率的增加, 波长分集 UWOC 系统的中断概率和平均

误码率逐渐降低。这是因为动能耗散率决定湍流中的能量转化, 单位流体质量的动能耗散率越大, 湍流中转化为分子热能的能量越快, 海洋湍流强度越弱, 此时系统性能受到的影响减小。从图 5(b) 和图 6(b) 中可以看出, 当均方温度耗散率减小时, 波长分集 UWOC 系统中断概率与平均误码率降低。这是因为均方温度耗散率描述湍流对流体温度场的影响, 当均方温度耗散率减小时, 分子热传导作用对温度的波动影响变小, 系统性能受湍流影响减弱。从图 5(c) 和图 6(c) 中可以发现, 波长分集 UWOC 系统的中断概率与平均误码率随着温度与盐度对海洋湍流贡献比值  $\omega$  的增大而增加。 $\omega$  越大, 表明盐度引起的海洋湍流的贡献越大, 湍流强度变大, 系统的通信系统性能恶化。

图 7 给出在近海水质和各向异性因子  $u_x = 1, u_y = 2$  的海洋湍流条件下, 波长分集 UWOC 系统经过不同传输距离时的平均 BER 变化曲线, 表 3 给出了平均信噪比 30 dB 时不同传输距离下无波长分集与 2、3 阶波长分集 UWOC 系统平均 BER 的具体数值。当传输距离从 5 m 增加到 15 m 时, 无波长分集 UWOC 系统平均 BER 从  $3.42 \times 10^{-5}$  变为  $4.308 \times 10^{-3}$ ; 2 阶波长分集 UWOC 系统平均 BER 从  $1.481 \times 10^{-8}$  变为  $2.198 \times 10^{-4}$ ; 同样地, 3 阶波长分集 UWOC 系统平均 BER 从  $8.761 \times 10^{-11}$  变为  $3.604 \times 10^{-5}$ 。随着传输距离的增加, 波长分集 UWOC 系统平均误码率变大。这是因为增加传输距离, 不同波长光信号传输时受到的海水衰减和海洋湍流效应影响逐渐加剧, 导致 UWOC 系统性能下降。当处于同一传输距离时, 使用波长分集的 UWOC 系统比无波长分集系统性能更好, 并且 3 阶波长分集比 2 阶波长分集的 UWOC 系统平均误码率明显改善。比如当传输距离等于 5 m 时, 无波长分集 UWOC 系统平均 BER 为  $3.42 \times 10^{-5}$ , 而  $W=2$  和  $W=3$  的波长分集 UWOC 系统平均 BER 分别为  $1.481 \times 10^{-8}$ 、 $8.761 \times 10^{-11}$ 。

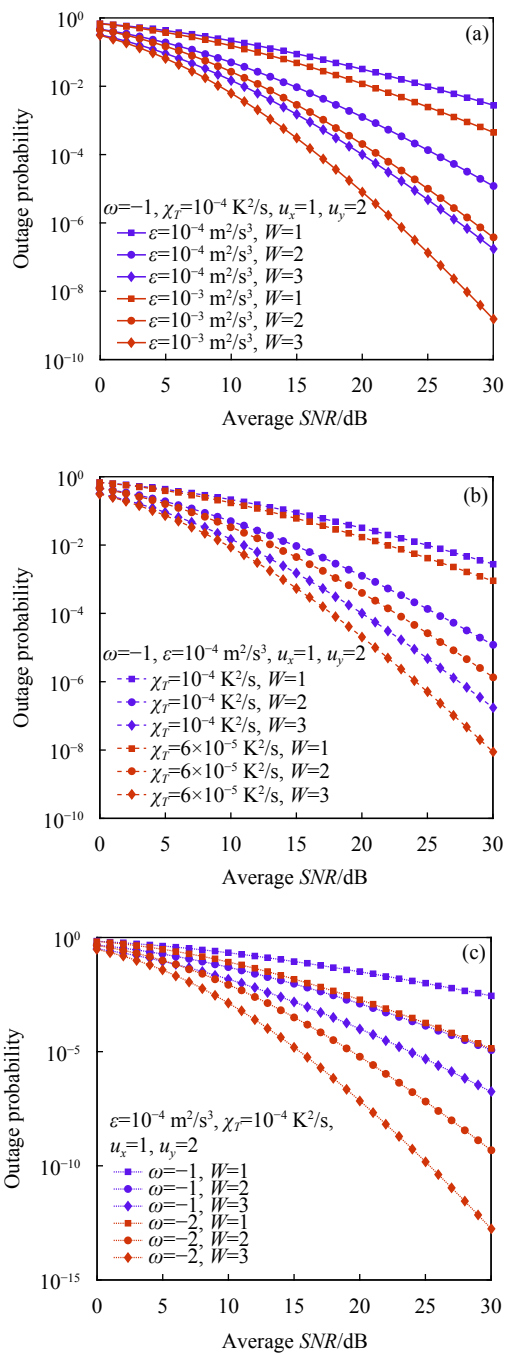


图 5 波长分集 UWOC 系统在不同海洋湍流参数, (a) 动能耗散率 $\epsilon$ , (b) 均方温度耗散率 $\chi_T$ , (c) 温度与盐度对海洋湍流贡献比值 $\omega$ 下的中断概率性能变化,  $L=10\text{ m}$

Fig.5 Outage probability performance of wavelength diversity UWOC system under different ocean turbulence parameters, (a) kinetic energy dissipation rate  $\epsilon$ , (b) mean square temperature dissipation rate  $\chi_T$ , (c) the ratio of temperature and salinity contribution to ocean turbulence  $\omega, L=10\text{ m}$

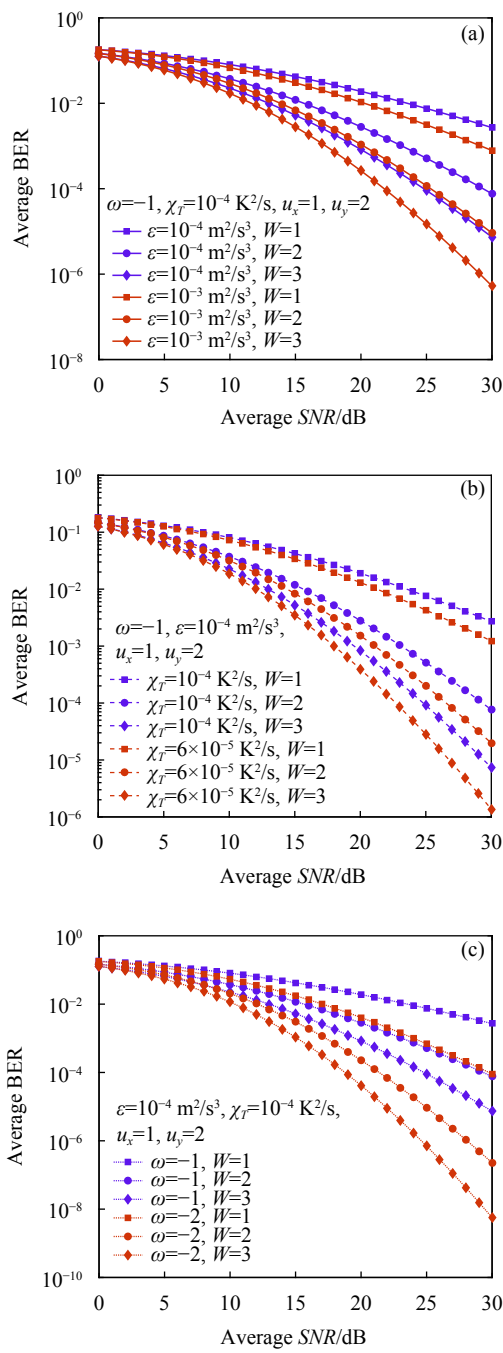


图 6 波长分集 UWOC 系统在不同海洋湍流参数, (a) 动能耗散率 $\epsilon$ , (b) 均方温度耗散率 $\chi_T$ , (c) 温度与盐度对海洋湍流贡献比值 $\omega$ 下的平均 BER 性能变化,  $L=10\text{ m}$

Fig.6 Average BER performance of wavelength diversity UWOC system under different ocean turbulence parameters, (a) kinetic energy dissipation rate  $\epsilon$ , (b) mean square temperature dissipation rate  $\chi_T$ , (c) the ratio of temperature and salinity contribution to ocean turbulence  $\omega, L=10\text{ m}$



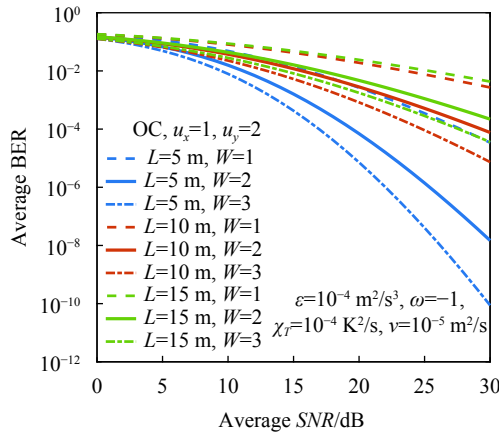


图 7 使用 OC 技术的波长分集 UWOC 系统在不同传输距离下的平均 BER 性能变化

Fig.7 Average BER performance of wavelength diversity UWOC system using OC technology under different transmission distances

表 3 使用 OC 技术的波长分集 UWOC 系统在不同传输距离下的平均 BER

Tab.3 Average BER of wavelength diversity UWOC system using OC technology under different transmission distances

Wavelength diversity	L=5 m	L= 10 m	L= 15 m
W= 1	$3.42 \times 10^{-5}$	$2.7 \times 10^{-3}$	$4.308 \times 10^{-3}$
W= 2	$1.481 \times 10^{-8}$	$7.634 \times 10^{-5}$	$2.198 \times 10^{-4}$
W= 3	$8.761 \times 10^{-11}$	$7.375 \times 10^{-6}$	$3.604 \times 10^{-5}$

## 5 结论

文中研究了存在传输路径损耗和 Gamma-gamma 分布海洋湍流信道模型, 利用海洋湍流参数和各向异性因子表示的等效结构参数, 根据 Meijer-G 函数推导出波长分集水下无线光通信系统中断概率与平均误码率封闭表达式。使用以上表达式进行数值仿真, 分析在近海水质和不同各向异性因子的海洋湍流条件下, 波长分集 UWOC 系统的中断概率性能, 比较接收端使用 OC 与 EGC 技术的系统平均误码率, 以及在不同海洋湍流参数、传输距离下波长分集无线光通信系统性能。结果表明: 考虑光信号在海水信道中的传输路径损耗, 随着各向异性因子的增加, 海洋湍流强度逐渐减弱, 相较于无波长分集 UWOC 系统, 使用波长分集的 UWOC 系统中断概率与平均误码率更低, 并

且处于相同阶数的波长分集下, 系统接收端使用 OC 技术比 EGC 技术具有更低的平均误码率。

## 参考文献:

- [1] Kaushal H, Kaddoum G. Underwater optical wireless communication [J]. *IEEE Access*, 2016, 4: 1518-1547.
- [2] Zeng Z, Shu F, Zhang H, et al. A survey of underwater optical wireless communications [J]. *IEEE Communications Surveys & Tutorials*, 2017, 19(1): 204-238.
- [3] Liu L, Zhou S, Cui J H. Prospects and problems of wireless communication for underwater sensor networks [J]. *Wireless Communications & Mobile Computing*, 2010, 8(8): 977-994.
- [4] Sui Meihong, Yu Xincheng, Liu Xifeng, et al. Research on the characteristics of underwater optical wireless communication channels in seawater [J]. *Marine Science*, 2009, 33(6): 80-85. (in Chinese)
- [5] Abbas A, Ali M. On the performance of blue-green waves propagation through underwater optical wireless communication system [J]. *Photonic Network Communications*, 2018, 36(3): 309-315.
- [6] Ata Y N, Baykal Y. Scintillations of optical plane and spherical waves in underwater turbulence [J]. *A Optics Image Science & Vision*, 2014, 31(7): 1552-1556.
- [7] Baykal, Yahya. Scintillation index in strong oceanic turbulence [J]. *Optics Communications*, 2016, 375: 15-18.
- [8] Gökce M C, Yahya Baykal b. Aperture averaging in strong oceanic turbulence [J]. *Optics Communications*, 2018, 413: 196-199.
- [9] 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.
- [10] Kaushik R, Khandelwal V, Jain R C. Effect of aperture averaging and spatial diversity on capacity of optical wireless communication systems over lognormal channels [J]. *Radioelectronics and Communications Systems*, 2016, 59(12): 527-535.
- [11] Huang A, Tao L, Wang C, et al. Error performance of underwater wireless optical communications with spatial diversity under turbulence channels [J]. *Applied Optics*, 2018, 57(26): 7600-7608.
- [12] Ramavath P N, Kumar A, Godkhindi S S, et al. Experimental studies on the performance of underwater optical communication link with channel coding and interleaving [J]. *Csi Transactions on Ict*, 2018, 6(1): 65-70.

- [13] Mattoussi F, Khalighi M A, Bourennane S. Improving the performance of underwater wireless optical communication links by channel coding [J]. *Applied Optics*, 2018, 57(9): 2115-2120.
- [14] Ramavath P N, Acharya Udipi S, Krishnan P. High-speed and reliable underwater wireless optical communication system using multiple-input multiple-output and channel coding techniques for IoT applications [J]. *Optics Communications*, 2020, 461: 125229.
- [15] Srivastava V, Mandloi A, Soni G G. Outage probability and average BER estimation of FSO system employing wavelength diversity [J]. *Optical and Quantum Electronics*, 2019, 51(7): 229.
- [16] Jiao W, Liu H, Yin J, et al. Performance of a QAM/FSO communication system employing spatial diversity in weak and saturation turbulence channels [J]. *Journal of Modern Optics*, 2019, 66(9): 965-975.
- [17] Prabu K, Cheepalli S, Kumar D S. Analysis of PolSK based FSO system using wavelength and time diversity over strong atmospheric turbulence with pointing errors [J]. *Optics Communications*, 2014, 324: 318-323.
- [18] Shah D, Kothari D, Ghosh A. Bit error rate analysis of the K channel using wavelength diversity [J]. *Optical Engineering*, 2017, 56(5): 056106.
- [19] Sharma K, Grewal S K. Performance assessment of hybrid PPM-BPSK-SIM based FSO communication system using time and wavelength diversity under variant atmospheric turbulence [J]. *Optical and Quantum Electronics*, 2020, 52(10): 430.
- [20] Peppas K P, Boucouvalas A C, Ghassemloy Z. Performance of underwater optical wireless communication with multi-pulse pulse-position modulation receivers and spatial diversity [J]. *IET Optoelectronics*, 2017, 11(5): 180-185.
- [21] Pearson B, Fox-Kemper B. Log-normal turbulence dissipation in global ocean models [J]. *Physical Review Letters*, 2018, 120(9): 094501.
- [22] Jiang Hongyan, Qiu Hongbing, He Ning, et al. Optical OFDM spatial diversity system in lognormal fading UVLC channels [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2020, 49(2): 0203008. (in Chinese)
- [23] Fu Yuqing, Duan Qi, Zhou Lin. 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. (in Chinese)
- [24] 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): 164206. (in Chinese)
- [25] 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.
- [26] Zou Z, Wang P, Chen 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*, 2019, 36(9): 1463-1474.
- [27] 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.
- [28] Adamchik V, Marichev O. The algorithm for calculating integrals of hypergeometric type functions and its realization in REDUCE system[C]//ISSAC '90 Proceedings of International Symposium on Symbolic and Algebraic Computation, 1990: 212-224.
- [29] 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.
- [30] 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.
- [31] Wang Y, Zhu L, Feng W. Performance study of wavelength diversity serial relay OFDM FSO system over exponentiated weibull channels [J]. *Optics Communications*, 2021, 478: 126470.
- [32] Sanjay Kumar Sahu, Palanisamy Shanmugam. A theoretical study on the impact of particle scattering on the channel characteristics of underwater optical communication system [J]. *Optics Communications*, 2018, 408: 3-14.
- [33] Wang Fei, Yang Yi, Duan Zuoliang, et al. Characteristic analysis of underwater laser transmission channel based on visible light [J]. *Optical Communication Technology*, 2016, 40(3): 26-28. (in Chinese)
- [34] Li Chen, Wang Fei. Analysis of the influence of seawater quality on laser receiving power [J]. *Application of Optoelectronic Technology*, 2017, 32(1): 44-49. (in Chinese)