

doi:10.13756/j.gtxyj.2025.250172.

专题:海洋通信与传感网络

吕晶晶,师庆,王冰洁,等. 联合信道下水下光子计数通信系统误码率分析[J]. 光通信研究, 2025(4): 250172.

Lü J J, Shi Q, Wang B J, et al. Bit Error Rate Analysis of Underwater Photon-counting Communication System based on Joint Channel [J]. Study on Optical Communications, 2025(4): 250172.

## 联合信道下水下光子计数通信系统误码率分析

吕晶晶,师庆,王冰洁,刘丽

(太原理工大学新型传感器与智能控制教育部重点实验室,太原 030024)

**摘要:**【目的】水下光子计数无线通信(UPCC)能够实现微弱信号探测,有效缓解复杂水下环境造成的光信号衰减影响,延长通信距离。水下信道对光的吸收和散射会造成信号衰减,湍流会引起信号幅度起伏变化,两者都会降低UPCC系统误码率(BER)性能。基于同时考虑吸收、散射和湍流效应的水下联合信道模型,合理评估这些因素对UPCC系统误码性能的综合影响至关重要。【方法】文章用随机相位屏模型模拟湍流效应对传输光束的影响,将湍流相位屏模型拓展至蒙特卡洛(MC)水下信道数值模拟框架中,构建海水环境影响更为全面的吸收散射湍流联合信道模型。并基于单光子雪崩二极管(SPAD)和开关键控(OOK)调制方式,搭建了UPCC系统。【结果】基于文章所构建的联合信道模型对UPCC系统在不同水质条件、链路距离和湍流强度等参数条件下的误码性能进行对比分析。【结论】仿真实验结果表明,在水质较好的纯净海水和干净海水环境下,湍流对系统通信性能的影响不可忽略,通信距离显著衰减,系统BER增加。例如,在纯净海水且无湍流的理想条件下,系统通信距离最远可达约500 m,弱湍流下缩减至约400 m,强湍流下进一步缩减至约200 m。随着水质的恶化,吸收和多重散射成为影响系统通信性能的主要因素。在水质最差的港口海水中,不同湍流强度下,系统通信距离最远均约为25~30 m,不同湍流强度对系统BER的影响几乎可以忽略不计。

**关键词:**水下光子计数无线通信;单光子探测器;联合信道;海洋湍流;误码率

**中图分类号:**TN929.1 **文献标志码:**A

### Bit Error Rate Analysis of Underwater Photon-counting Communication System based on Joint Channel

Lü Jingjing, SHI Qing, WANG Bingjie, LIU Li

(Key Laboratory of Advanced Transducers and Intelligent Control System, Ministry of Education, Taiyuan University of Technology, Taiyuan 030024, China)

**Abstract:** 【Objective】 Underwater Photon Counting Wireless Communication (UPCC) is capable of achieving weak signal detection. It can effectively mitigate the impact of optical signal attenuation induced by complex underwater environments and extend the communication range. The absorption and scattering of light in underwater channels lead to signal attenuation, while turbulence gives rise to fluctuations in signal amplitude. Both of these phenomena can degrade the Bit Error Rate (BER) of the UPCC systems. It is crucial to reasonably evaluate the comprehensive impact of these factors on the bit error performance of the UPCC system based on the underwater joint channel model that takes into account the effects of absorption, scattering and turbulence simultaneously. 【Methods】 In this study, the random phase screen model is employed to simulate the impact of turbulence effects on the transmitted beam. The turbulence phase screen model is further extended to the Monte Carlo (MC) numerical simulation framework for underwater channels. Subsequently, a more comprehensive joint channel model of absorption, scattering, and turbulence, incorporating the influence of the seawater environment, is constructed. Additionally, based on the Single-Photon Avalanche Diode (SPAD) and On-Off Keying (OOK) modulation methods, an UPCC system is developed. 【Results】 Utilizing the established joint channel model, a comparative analysis is conducted on the bit error performance of the UPCC system under diverse parameters, including water quality conditions, link distance, and turbulence intensity. 【Conclusion】 The results of the simulation indicate that in the environments of pure seawater and clean seawater with excellent water quality, the impact of turbulence on the communication performance of the system cannot be ignored. Specifically, the communication distance is significantly attenuated, and the BER of the system increases. For instance, under the ideal conditions of pure seawater and the absence of turbulence, the maximum communication distance of the system can reach approximately 500 m. Under weak turbulence, it reduces to about 400 m, and under strong turbulence, it further shrinks to approximately 200 m. As the water quality deteriorates, the absorption and multiple scattering effects emerge as the primary factors influencing the communication performance of the system. In the seawater of the port with the poorest water quality, the farthest communication distance of the system under different turbulence intensities ranges from approximately 25~30 m. Moreover, the influence of different turbulence intensities on the BER of the system is nearly negligible.

**Key words:** UPCC; single photon detector; joint channel; ocean turbulence; BER

收稿日期:2025-05-19; 修回日期:2025-06-20; 纸质出版日期:2025-08-10

基金项目:山西省基础研究计划资助项目(202203021221090)

作者简介:吕晶晶(2000-),女,河南信阳人。硕士,主要研究方向为水下无线光通信。

通信作者:王冰洁,教授。E-mail:wangbingjie@tyut.edu.cn

© Editorial Office of Study on Optical Communications. This is an open access article under the CC BY-NC-ND license.

## 0 引言

水下光子计数无线通信(Underwater Photon Counting Wireless Communication, UPCC)采用光子计数接收方式,可实现微弱信号的高灵敏度探测,能够有效缓解信号衰减影响,延长通信距离<sup>[1-3]</sup>。海水由水分子、浮游植物、溶解有机物和悬浮颗粒等多种成分组成,各种成分对光具有吸收和散射作用,导致水下光传输信号衰减,衰减程度与光波长和海水成分浓度有关。此外,温度或盐度变化引起的海水湍流导致传输信号光强闪烁。吸收、散射和湍流综合效应将大幅降低 UPCC 系统通信性能和传输距离<sup>[4]</sup>。合理评估这些因素对 UPCC 系统通信性能的综合影响至关重要。

目前大多数研究采用蒙特卡洛(Monte Carlo, MC)方法建立水下信道模型<sup>[5-7]</sup>,主要考虑吸收和多重散射对光束传播的影响。文献[8]基于 MC 数值仿真建立水下传输信道模型,分析了吸收和散射效应对水下无线通信系统误码率(Bit Error Rate, BER)的影响。但实际海水环境对光信号的影响是吸收、散射和湍流效应的综合,温度或盐度变化引起

的湍流影响不能被忽视。研究者开始将湍流模型扩展至 MC 数值模拟框架中,对水下信道吸收、散射和湍流的综合效应进行了联合建模研究<sup>[9-10]</sup>。本文基于吸收、散射和湍流效应同时存在的水下联合信道模型<sup>[11]</sup>搭建了 UPCC 系统,分析了不同水质条件和不同强度湍流条件下系统的传输与通信性能。

## 1 UPCC 系统模型

UPCC 系统结构如图 1 所示。在发射端,信源信号经编码和调制映射等步骤生成调制信号,再利用调制器将信号加载到系统发射光源上。光源发射的光信号经光学发射系统(准直透镜)进入水下联合信道传输。在接收端,为了提高信号接收功率,采用聚光透镜将激光二极管(Laser Diode, LD)发出的光信号汇聚到单光子雪崩二极管(Single Photon Avalanche Diode, SPAD)上。SPAD 对接收到的信号光进行检测,同时输出离散的单光子脉冲。输出的单光子脉冲经过解调和译码等过程后,还原出原始数据信号。假设 UPCC 系统在发射端与接收端已经实现了对准和时钟同步。

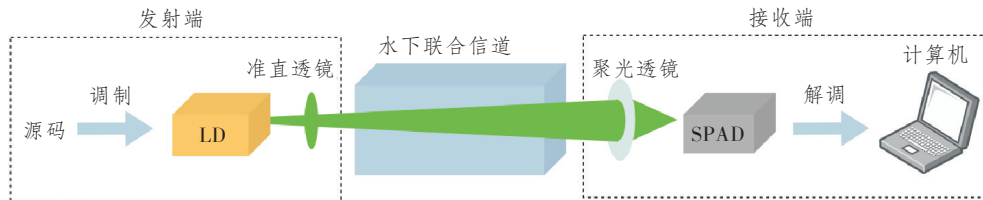


图 1 UPCC 系统结构

Figure 1 The block diagram of UPCC system

### 1.1 OOK 调制和 SPAD 光子计数接收模型

信号调制方式不同,会导致通信系统的 BER、传输速率和带宽利用率等都有明显差异。开关键控(On-Off Keying, OOK)调制由于简单和易于实现,被广泛应用于水下无线光通信系统。OOK 调制包括归零(Return-to-Zero, RZ)和不归零(Non-Return-to-Zero, NRZ)两种脉冲格式。本文选择 NRZ-OOK 调制方式。

设发射机平均光功率为  $P_b$ ,当传输比特“1”时,发射光功率为  $P_s = 2P_b$ ;当传输比特“0”时,发射光功率为  $P_s = 0$ 。总的光能量为  $E = P_b T_b$ ,式中,  $T_b$  为比特持续时间。

光信号经过水下信道传输后到达接收端, SPAD 在一个比特时间内检测到的光子数  $\lambda_s$  为<sup>[12]</sup>

$$\lambda_s = \begin{cases} \lambda_1 = C_p N_r + C_p N_a T_b + N_b T_b, \\ \lambda_0 = C_p N_a T_b + N_b T_b \end{cases}, \quad (1)$$

式中:  $N_r = P_s T_b h(L) o / E_p$  为 SPAD 检测到的信号光子数,  $h(L)$  为信道增益,  $L$  为通信距离,  $o$  为光学系统增益,  $E_p = h\nu / \lambda$  为单光子能量,  $\lambda$  为光波长,  $v$  为光速,  $h$  为普朗克常数;  $C_p$  为 SPAD 的光子探测效率;  $N_a$  为背景噪声光子计数率;  $N_b$  为 SPAD 的暗计数率;  $\lambda_1$  和  $\lambda_0$  分别为传输比特为“1”和“0”时的平均光子数。在 MC 仿真中,假设一个光子到达接收面就会被检测到。

接收端 SPAD 探测器由于自身物理特性,当探测器探测到一个光子后,会暂时失去对下一个光子的探测能力,等待探测器恢复探测能力的这段时间称为死时间。探测器的死时间效应导致光子探测的随机过程并不服从理想泊松分布。SPAD 输出的光子数可以建模为双随机泊松分布,在  $(0, T_b)$  时间内探测到  $y$  个光子的概率  $P(y, \lambda_s)$  可表示为<sup>[13]</sup>

$$P(y, \lambda_s) = \begin{cases} \sum_{i=0}^y \varphi(i, \lambda_{s(y)}) - \sum_{i=0}^{y-1} \varphi(i, \lambda_{s(y-1)}), & y < y_{\max} \\ 1 - \sum_{i=0}^{y-1} \varphi(i, \lambda_{s(y-1)}) & , y = y_{\max} \\ 0 & , y > y_{\max} \end{cases}, \quad (2)$$

式中： $\varphi(i, \lambda_{s(y)}) = \frac{\lambda_{s(y)}^i}{i!} \exp(-\lambda_{s(y)})$  为泊松分布函数； $\lambda_{s(y)} = \lambda_s \left(1 - \frac{y\tau}{T_b}\right)$ ； $\lambda_{s(y-1)} = \lambda_s \left(1 - \frac{(y-1)\tau}{T_b}\right)$ ， $\tau$  为探测器死区时间； $y_{\max} = 1 + \left\lfloor \frac{T_b}{\tau} \right\rfloor$  为  $T_b$  时间间隔内探测器输出的最大光子数， $\lfloor x \rfloor$  为小于  $x$  的最大整数。

## 1.2 BER 的计算

在 OOK 调制下，比特“1”和比特“0”出现的概率相等。输出系统 BER 为

$$BER_{\text{OOK}} = \frac{P(\lambda_0|0, N_{\text{th}}) + P(\lambda_1|1, N_{\text{th}})}{2}, \quad (3)$$

式中： $N_{\text{th}}$  为判定阈值； $P(\lambda_0|0, N_{\text{th}})$  为将比特“0”判定为比特“1”的概率； $P(\lambda_1|1, N_{\text{th}})$  为将比特“1”判定为比特“0”的概率。 $N_{\text{th}}$  成为影响系统 BER 的重要因素。

当比特“1”和“0”先验等概时，可以得到最大似然检测  $N_{\text{th}}$  为

$$N_{\text{th}} = \frac{\lambda_1 - \lambda_0}{(\lambda_1 - \lambda_0) \frac{\tau}{T_b} + \ln \frac{\lambda_1}{\lambda_0}}. \quad (4)$$

则系统 BER 为

$$\begin{aligned} BER_{\text{OOK}} &= \frac{P(\lambda_0|0, N_{\text{th}}) + P(\lambda_1|1, N_{\text{th}})}{2} \\ &= \frac{P(\lambda_0|0, y > N_{\text{th}}) + P(\lambda_1|1, y < N_{\text{th}})}{2}, \quad (5) \\ &= \frac{1}{2} + \frac{1}{2} \sum_{i=0}^{N_{\text{th}}} [\varphi(i, \lambda_{1N_{\text{th}}}) - \varphi(i, \lambda_{0N_{\text{th}}})] \end{aligned}$$

式中： $\lambda_{0N_{\text{th}}}$  为信号为 0 时， $y > N_{\text{th}}$  时的累积概率； $\lambda_{1N_{\text{th}}}$  为信号为 1 时， $y < N_{\text{th}}$  时的累积概率。

## 2 基于 MC 模拟的水下联合信道建模

光在水下传输过程中受到多种环境因素影响，水下光学信道模型非常复杂。MC 法将光信号在水中的传输转化为光子在水中运动轨迹的追踪问题。系统发射端发出大量光子，根据已知概率模型模拟每个光子的运动轨迹，最终的光传输模型通过统计结果得到。该模型可以准确模拟光子在水下运动的过程，能得到接近真实的实验结果。常规信道仿真模型大

多仅考虑粒子的吸收和散射，为了综合考虑水体中粒子对 UPCC 系统信号特性的影响，本文将湍流多相位屏模型纳入同一个 MC 框架，实现了包括吸收、散射、衰减效应和湍流效应的水下联合信道建模。

### 2.1 水下信道的吸收和散射

海水对光信号的衰减与海水纯度和海水成分等因素有关。海水成分复杂，包括水中浮游植物、溶解有机物和悬浮颗粒物等。光信号衰减系数  $c(\lambda)$  与光波长  $\lambda$ 、水深和水中生物含量等因素都有关系，可以表示为吸收系数  $a(\lambda)$  和散射系数  $b(\lambda)$  之和。其中， $a(\lambda)$  可以进一步表示为纯海水、浮游植物、悬浮颗粒以及有色溶解有机物的吸收系数之和； $b(\lambda)$  也可具体表示为纯海水、浮游植物和悬浮颗粒等的散射系数之和。由于各种海水成分对吸收散射的贡献难以分别计算，研究人员实测得到的 4 种典型海水水质的吸收、散射和衰减系数 ( $\lambda=532 \text{ nm}$ ) 如表 1 所示<sup>[14]</sup>。本文仿真中主要考虑这 4 种水质。

表 1 4 种水质类型的吸收、散射和衰减系数

Table 1 Absorption, scattering, and attenuation coefficients of four different types of water

水质类型	吸收系数/ $\text{m}^{-1}$	散射系数/ $\text{m}^{-1}$	衰减系数/ $\text{m}^{-1}$
纯净海水	0.040 5	0.002 5	0.043
干净海水	0.114 0	0.037 0	0.151
沿岸海水	0.179 0	0.219 0	0.398
港口海水	0.366 0	1.824 0	2.190

海水中含有浮游动植物等各种杂质成分，其尺寸大于入射波长，所以散射规律用米氏散射来描述。在米氏散射模型中，最常见的散射相位函数是 Henyey-Greenstein 函数<sup>[15]</sup>  $\beta_{\text{HG}}(\theta, g)$ ，其表达式为

$$\beta_{\text{HG}}(\theta, g) = \frac{1 - g^2}{(1 + g^2 - 2g \cos \theta)^{3/2}}, \quad (6)$$

式中： $\theta$  为散射角； $g$  为非对称因子，由海水的介质特性决定，大小约等于散射角余弦在所有方向上的平均值。散射相位函数描述了光被散射后散射角的概率分布，该函数在后文中用于选择 MC 仿真的散射角。本文仿真时，取平均值  $g=0.924$  进行计算。

### 2.2 海水湍流相位屏模型

海水中盐度和温度的不均匀导致了海洋湍流的产生，光波在折射率随机起伏的湍流介质中传播会受到相位扰动。随机相位屏法是对大气和海洋湍流等随机信道实现数值建模的重要方法。其基本思想是在光传输路径上设置多个相位屏，光波每传输到一个相位屏，就把对应的相位扰动叠加到光场上，接着传输至下一个相位屏，再叠加下一个相位屏对应

的相位扰动,直至终点。功率谱反演法是一种生成随机相位屏的常用方法。首先根据海水湍流的折射率功率谱函数计算湍流相位分布;然后利用傅里叶变换产生具有随机特性的相位屏;最后将相位屏作用于光束,从而将湍流引起的介质折射率变化对传输光产生的影响等效为随机相位屏对传输光的影响。

可以把相位屏看作是一个具有相位剖面的无限薄光学界面。当光线通过相位屏时,只有传播方向发生变化,振幅保持不变,其传输规律可用广义的斯涅尔定律来计算<sup>[10]</sup>。设光线到达相位屏前的方向矢量为 $(x_1, y_1, z_1)$ ,通过相位屏后,其方向矢量更新为 $(x_2, y_2, z_2)$ <sup>[16]</sup>:

$$\begin{cases} x_2 = x_1 + \frac{1}{k} \frac{\partial \psi(x, y)}{\partial x} \\ y_2 = y_1 + \frac{1}{k} \frac{\partial \psi(x, y)}{\partial y} \\ z_2 = \sqrt{1 - x_2^2 - y_2^2} \end{cases}, \quad (7)$$

$$\Phi_n(\kappa_x, \kappa_y) = 0.388 \times 10^{-8} \epsilon^{-1/3} \left( \sqrt{\kappa_x^2 + \kappa_y^2} \right)^{-11/3} \left[ 1 + 2.35 \left( \sqrt{\kappa_x^2 + \kappa_y^2} \cdot \eta \right)^{2/3} \right] \times \chi_T \left[ \exp(-A_T \delta) + \omega^{-2} \exp(-A_S \delta) - 2\omega^{-1} \exp(-A_{TS} \delta) \right], \quad (9)$$

式中: $\epsilon$ 为湍流动能耗散率; $\eta$ 为Kolmogorov微尺度; $\chi_T$ 为均方温度耗散率; $\omega$ 为温度梯度和盐度梯度的比值; $\delta$ 为归一化参数。这些参数综合反映了海水压力、温度、盐度以及流速等物理特性的变化,其取值以及对湍流强度的强弱影响如表2所示。其他参数取值分别为 $A_T=1.863 \times 10^{-2}$ 、 $A_S=1.9 \times 10^{-4}$ 、 $A_{TS}=9.41 \times 10^{-3}$ 和 $\delta=8.284 \left( \eta \sqrt{\kappa_x^2 + \kappa_y^2} \right)^{4/3} + 12.978 \left( \eta \sqrt{\kappa_x^2 + \kappa_y^2} \right)^2$ 。

表2 湍流参数取值范围以及对湍流强弱的影响

Table 2 Parameter values of turbulence and impact on the intensity level

湍流参数	符号	湍流强弱	取值范围
湍流动能耗散率/ $\text{m}^2\text{s}^{-3}$	$\epsilon$	↓	$10^{-10} \sim 10^{-1}$
均方温度耗散率/ $\text{k}^2\text{s}^{-1}$	$\chi_T$	↑	$10^{-4} \sim 10^{-10}$
Kolmogorov微尺度/m	$\eta$	↓	$6 \times 10^{-5} \sim 0.01$
温度梯度和盐度梯度的比值	$\omega$	↑	$-5 \sim 0$

海洋湍流的强弱由多个湍流参数共同来量化。根据上表中湍流参数对湍流强弱的影响,本文设置了固定的强弱湍流<sup>[19]</sup>,参数取值如表3所示。

本文中,设相位屏尺寸为 $1\text{m} \times 1\text{m}$ ,采样点为 $1\,000 \times 1\,000$ 。为了防止边缘化相位混叠<sup>[17]</sup>,相位屏的间距 $\Delta z$ 需要满足 $\Delta z = \frac{\partial \psi(x, y)}{\partial x / \partial y} < \pi$ 。因此本文

式中: $k=2\pi/\lambda$ 为光的波数; $\psi(x, y)$ 为使用功率谱反演法生成的单层随机相位屏。 $\psi(x, y)$ 的生成方法如下:首先在频域内生成一个复高斯随机矩阵 $\zeta(\kappa_x, \kappa_y)$ , $\kappa_x$ 和 $\kappa_y$ 分别为 $x$ 方向和 $y$ 方向的空间波数,该矩阵方差为1,均值为0;然后利用海洋湍流相位扰动的空间功率谱函数对该矩阵进行滤波;最后对滤波后的矩阵进行傅里叶逆变换处理,该过程得到的湍流相位屏 $\psi(x, y)$ 为<sup>[17]</sup>

$$\psi(x, y) = \sqrt{\frac{1}{L_x L_y}} \sum_{\kappa_x} \sum_{\kappa_y} \zeta(\kappa_x, \kappa_y) \sqrt{2\pi k^2 \Delta z \Phi_n(\kappa_x, \kappa_y)} \times \exp[i(\kappa_x x, \kappa_y y)], \quad (8)$$

式中: $L_x$ 和 $L_y$ 分别为 $x$ 和 $y$ 方向上相位屏的尺寸; $\Delta z$ 为相邻相位屏之间的距离; $\Phi_n(\kappa_x, \kappa_y)$ 为由Nikishov提出的均匀海洋湍流折射率谱<sup>[18]</sup>。 $\Phi_n(\kappa_x, \kappa_y)$ 的表达式为

相位屏之间的距离设置为 $\Delta z=2.5\text{m}$ 。

表3 强弱湍流的参数取值

Table 3 Parameter values of strong and weak turbulence

湍流类型	$\epsilon/\text{m}^2\text{s}^{-3}$	$\chi_T/\text{k}^2\text{s}^{-1}$	$\omega$	$\eta/\text{m}$
强湍流	$10^{-5}$	$10^{-7}$	-2.5	$10^{-3}$
弱湍流	$10^{-7}$	$10^{-5}$	-0.5	$10^{-3}$

### 2.3 水下联合信道MC建模

MC法水下联合信道建模所需参数已在前文中进行了理论分析。图2所示为发射光子在水中从发射端向接收端传播的轨迹示意图。发射端发射具有初始方向和位置的一定数量光子。光子在传输过程中受到包括吸收、散射和湍流效应在内的综合影响,导致光子能量损耗和路径偏离。光子与粒子相互作用时,光子失去其初始质量的一部分,并偏离其初始方向。通过相位屏后,光子偏离入射方向,重量不变。接收端设置一定的形状、位置和接收视场角等。水下联合信道模型就是通过追踪大量光子从发射端到接收端的路径偏离和能量损耗情况来模拟光子在联合信道中的传输过程。

根据对MC模拟仿真过程的分析与研究,得到本文同时考虑吸收、散射和湍流联合信道的MC模拟仿真流程图,如图3所示。在光束传输路径中插

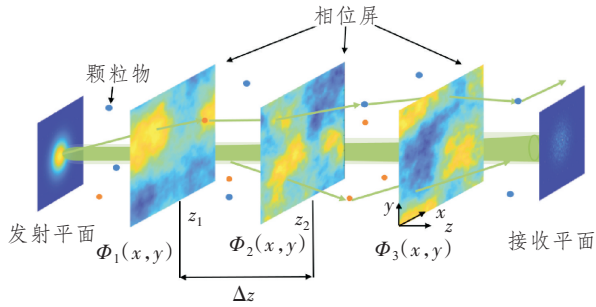


图2 光束经过水下联合信道传播示意图

Figure 2 Schematic diagram of light beam propagation through underwater joint channel

入功率谱反演法生成的相位屏来模拟湍流效应。光子在水中的传输过程具体可分为光子初始化、吸收、散射和湍流过程的计算,光子终止判决和统计处理3个步骤。初始时刻,根据光束发射角和光束类型,光子从特定位置沿特定方向入射到水中,在水中传播一定距离后,先对光子是否到达接收平面进行判断,若光子没有抵达接收平面,则会遇到散射体发生吸收和散射过程,遇到相位屏模拟的湍流效应;然后对光子的能量进行判断,若光子能量小于阈值,则判

定为终止,反之则计算新的位置和方向信息,让光子继续传播,直到光子到达接收平面或者“湮灭”为止;最后,通过统计接收光子数量、每个接收光子的权值、飞行时间和抵达接收平面的位置等信息对接收光束进行分析<sup>[10-11]</sup>。

本文在仿真过程中,每一例仿真实验均重复10次,最终数据处理时对模拟结果取均值,保证了数据的准确性、可靠性以及MC仿真的收敛性。

### 2.4 联合信道衰落模型

路径衰落通常用比尔定律来描述,然而比尔定律只考虑了水质吸收和散射引起的能量衰减,认为单次散射发生后,光子永久地离开了原光束的视角场,因此该定律忽略了多重散射的损耗,仅在简单清水环境和短距离传输下有效,在长距离信道下不精确<sup>[20]</sup>。与比尔定律模型相比,双项指数函数 $h(L)$ 可以更准确地近似水下联合信道衰落<sup>[21]</sup>:

$$h(L) = a_1 \exp(-c_1 L) + a_2 \exp(-c_2 L), \quad (10)$$

式中, $a_1, c_1, a_2$ 和 $c_2$ 为4个待拟合的参数。接收机通过一个特定的标准来确定光子是否被接收,设置接收孔径和视场角,经过大量光子发射和接收的独立重复试验,计算相同传播时间内总权重与初始总权重的比值,即UPCC水下联合信道的脉冲响应。然后,使用最小均方误差算法和双项指数函数来拟合MC结果,得到不同类型水质和不同湍流强度下的4个待拟合参数( $a_1, c_1, a_2, c_2$ ),如表4所示。图4所示为纯净和干净海水在不同湍流强度下的MC模拟和双项指数函数拟合归一化信道增益结果对比,在一定的误差内拟合效果较好。

表4 不同类型水质和不同类型湍流的参数

Table 4 Parameters for different types of water and different types of turbulence

水质类型	湍流强度	$a_1$	$c_1$	$a_2$	$c_2$
纯净海水	无	-0.002 70	0.562 20	1.002 90	0.042 80
	弱	-0.084 10	5.362 80	1.084 10	0.061 70
	强	0.533 86	0.106 61	0.533 80	0.106 62
干净海水	无	-0.091 40	0.504 80	1.091 30	0.147 40
	强	1.411 40	0.149 40	-0.400 30	0.147 00
沿岸海水	无	0.095 20	0.345 60	0.905 10	0.292 80
	强	-4.025 50	0.294 20	5.026 70	0.294 60
港口海水	无	0.509 45	0.795 84	0.509 46	0.795 80
	弱	0.509 39	0.795 34	0.509 41	0.795 31
	强	0.501 38	0.859 24	0.501 37	0.859 24

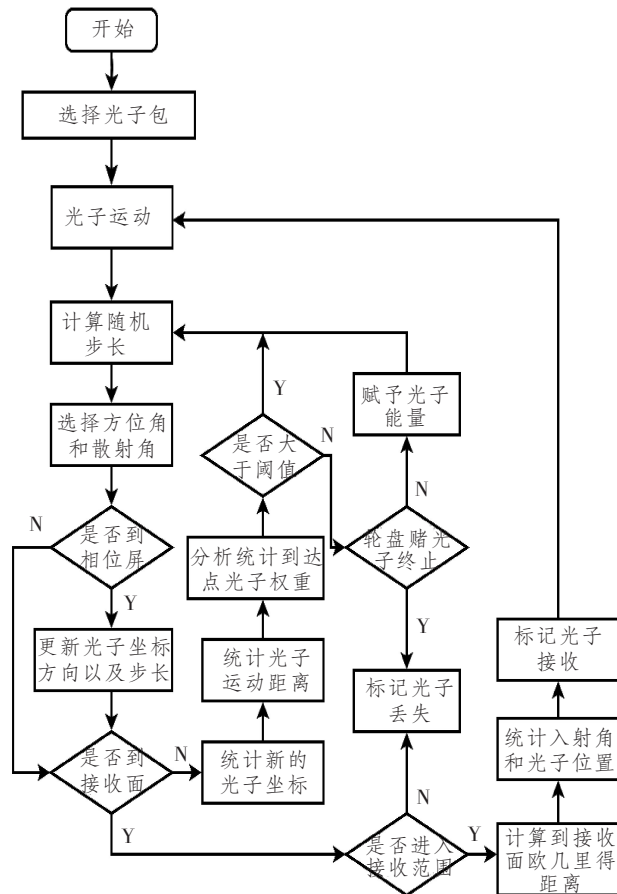


图3 水下联合信道的MC仿真流程图

Figure 3 Flowchart of the MC simulation of underwater joint channel

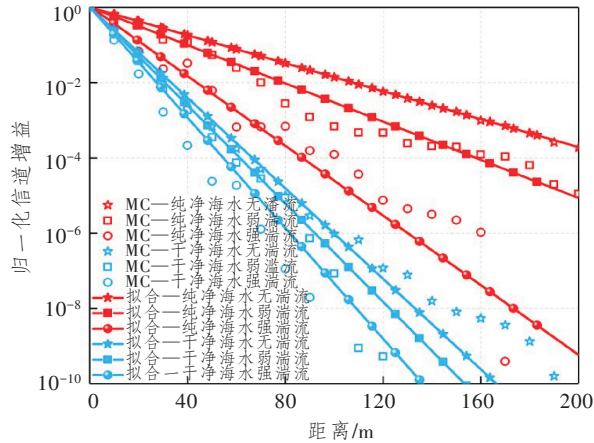


图4 不同水质和不同湍流强度下MC模拟和双项指数函数拟合归一化信道增益结果对比

Figure 4 Comparison of normalized channel gain results of MC and binomial exponential function fitting for different types of water and different turbulence intensities

### 3 结果分析与讨论

本节基于所搭建的UPCC系统模型和水下联合信道模型,讨论不同类型水质和不同湍流强度条件对系统BER性能的综合影响。仿真计算中采用的主要系统参数值如表5所示。图5~图8分别给出了4种不同海水水质中(纯净海水、干净海水、沿岸海水和港口海水)分别存在无湍流、弱湍流和强湍流效应时,对UPCC系统BER的影响。

表5 系统参数值

Table 5 System parameter values

参数	符号	取值	
比特率/Mbit/s	$R_b$	1	
发散角/mrad	$\theta$	2.25	
波束宽度/mm	$\omega$	5	
光子追踪样本量/个	/	$10^7$	
仿真实验重复次数/次	/	10	
数据传输速率/Mbit/s	$P_0$	1	
平均发射功率/W	$P_b$	1	
发射光学系统的透光率	$\eta$	0.8	
光子探测效率	$C_p$	0.35	
接收机孔径/m	$D$	0.5	
接收机视场角/°	$FOV$	180	
暗计数率/光子/次	$N_b$	50	
接收光学系统的透光率	$\eta_r$	0.7	
水质类型	/	纯净、干净、沿岸、港口海水	
信道参数	湍流强度	/	无、弱、强湍流
仿真实验重复次数/次	/	10	

由图5可知,在纯净海水中,无湍流时的理想条件下,系统通信距离最远可达约500 m,弱湍流条件下约400 m,强湍流条件下约200 m。验证了湍流效应会使BER升高,造成通信距离的衰减明显,并且湍流强度越强,衰减越强,影响越大。

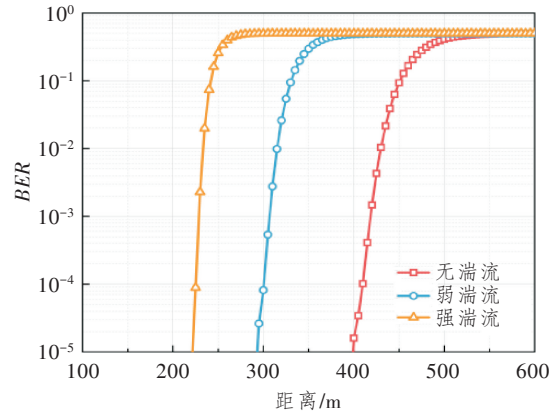


图5 纯净海水不同湍流强度BER曲线

Figure 5 BER curves for different turbulence intensities in pure seawater

由图6可知,在干净海水中,无湍流条件下的通信距离可达150 m,弱湍流条件下约为145 m,强湍流条件下约为130 m。结果表明,当水质条件变差,吸收散射效应增强时,较弱的湍流对BER的影响较小,几乎与无湍流条件下的通信距离相同;而较强的湍流仍造成系统BER的增加,表明吸收散射效应对通信质量的影响相对于湍流效应更严重。

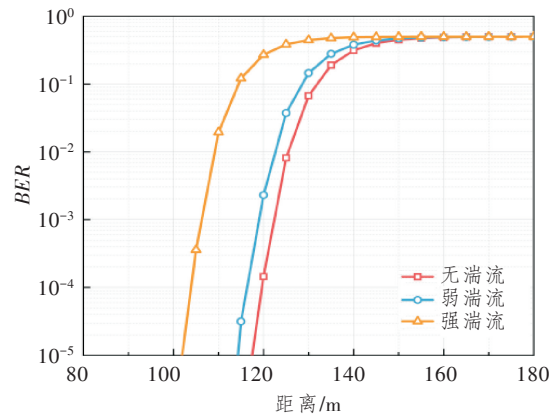


图6 干净海水不同湍流强度BER曲线

Figure 6 BER curves for different turbulence intensities in clean seawater

由图7可知,沿岸海水中,在无湍流和弱湍流条件下,通信距离最远约为80 m,强湍流条件下约为70 m。由图8可知,港口海水中,无湍流、弱湍流以及强湍流条件下通信距离最远均约为25~30 m,此时,湍流对于BER的影响比较微弱,几乎可以忽略不计。

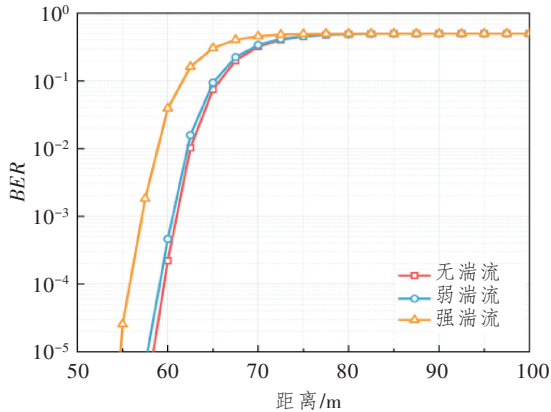


图7 沿岸海水不同湍流强度 BER 曲线

Figure 7 BER curves for different turbulence intensities in coastal seawater

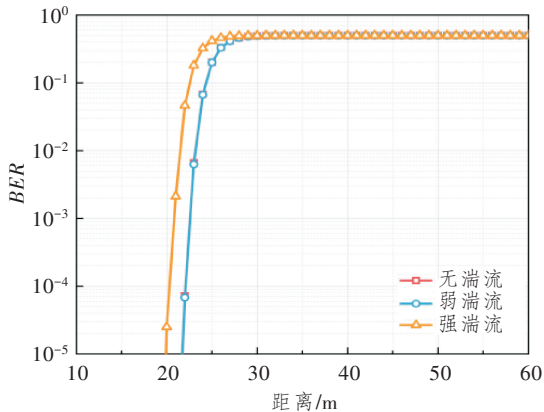


图8 港口海水不同湍流强度 BER 曲线

Figure 8 BER curves for different turbulence intensities in harbor seawater

综上所述,在水质较好的纯净海水中,湍流对于 BER 的影响最明显,较弱湍流使得通信距离缩短约 100 m,较强湍流使得通信距离缩短约 300 m,此时湍流效应对系统性能的影响显著。随着水质越来越差,湍流效应,尤其是弱湍流对于 BER 的影响逐渐降低,对通信距离的衰减在几十米甚至几米范围内。在水质较差的情况下,如沿岸海水中,弱湍流的影响几乎可以忽略不计,而在水质最差的港口海水中,弱湍流和强湍流效应均可忽略不计。

## 4 结束语

本文基于 MC 数值方法和湍流相位屏建立了包括吸收、散射和湍流效应同时存在的水下联合信道模型,并基于此模型,使用双项指数函数对仿真结果进行了拟合,获得不同类型水质和不同湍流强度下的水下联合信道增益模型。同时,本文基于 SPAD 和 OOK 调制方式构建了 UPCC 系统,对比分析了不同海水水质环境和湍流强度下 UPCC 系

统的误码性能。仿真结果表明:在水质较好的纯净和干净海水环境下,湍流对系统通信性能影响显著。湍流强度增加,导致通信距离明显衰减,系统 BER 增加。随着水质的恶化,吸收和多重散射成为影响系统通信性能的主要因素,湍流的影响减弱。在水质最差的港口海水中,弱湍流与无湍流的 BER 曲线重合。弱湍流对系统的影响几乎可以忽略不计,但强湍流始终明显降低通信质量和距离,对系统 BER 的影响不可忽略。

## 参考文献:

- [1] Chen Y K, Zhou X L, Ni W, et al. Optimal Power Allocation for Multiuser Photon-counting Underwater Optical Wireless Communications Under Poisson Shot Noise [J]. IEEE Transactions on Communications, 2023, 71(4): 2230–2245.
- [2] 刘润芃, 佟首峰, 张鹏, 等. 水下光通信技术研究[J]. 光通信研究, 2023(4): 11–13.  
Liu R P, Tong S F, Zhang P, et al. Research on Underwater Optical Communication Technology [J]. Study on Optical Communications, 2023(4): 11–13.
- [3] 陈庆瑞, 李燕龙, 吕伟超, 等. 水下无线光通信系统一般测试方法[J]. 光通信研究, 2023(4): 42–52.  
Chen Q R, Li Y L, Lü W C, et al. General Testing Methods for Underwater Wireless Optical Communication Systems [J]. Study on Optical Communications, 2023(4): 42–52.
- [4] 张立妍, 蒋锐, 张龙, 等. 水下无线光通信中MIMO技术研究现状[J]. 光通信研究, 2023(4): 14–20.  
Zhang L Y, Jiang R, Zhang L, et al. Research Status of MIMO Technology in Underwater Wireless Optical Communication [J]. Study on Optical Communications, 2023(4): 14–20.
- [5] 王杰, 范婷威, 申玲菲, 等. 全双工水下无线光通信系统自干扰问题研究[J]. 光通信研究, 2023(4): 28–33.  
Wang J, Fan T W, Shen L F, et al. Study on Self-interference Problem in Full-duplex Underwater Wireless Optical Communication System [J]. Study on Optical Communications, 2023(4): 28–33.
- [6] 孔美巍, 袁鹤翔, 王梦奇, 等. 非视距水下无线光通信技术的研究进展[J]. 光通信研究, 2023(4): 7–10.  
Kong M W, Yuan H X, Wang M Q, et al. Research Progress of Non-line-of-sight Underwater Wireless Optical Communication Technology [J]. Study on Optical Communications, 2023(4): 7–10.
- [7] Qadar R, Kasi M K, Ayub S, et al. Monte Carlo -

- based Channel Estimation and Performance Evaluation for UWOC Links under Geometric Losses[J]. *International Journal of Communication Systems*, 2018, 31(6): e3527.
- [8] Qadar R, Bin Q W, Nurmi J, et al. Effects of Multipath Attenuation in the Optical Communication-based Internet of Underwater Things[J]. *Sensors*, 2020, 20(21): 6201.
- [9] Enghiyad N, Ghorban Sabbagh A. Impulse Response of Underwater Optical Wireless Channel in the Presence of Turbulence, Absorption, and Scattering Employing Monte Carlo Simulation[J]. *Journal of the Optical Society of America A, Optics, Image Science, and Vision*, 2022, 39(1): 115–126.
- [10] Wen H, Yin H X, Ji X Y, et al. Modeling and Performance Analysis of Underwater Wireless Optical Absorption, Scattering, and Turbulence Channels Employing Monte Carlo-multiple Phase Screens [J]. *Applied Optics*, 2023, 62(26): 6883–6891.
- [11] Zhang J L, Kou L L, Yang Y, et al. Monte-Carlo-based Optical Wireless Underwater Channel Modeling with Oceanic Turbulence [J]. *Optics Communications*, 2020, 475: 126214.
- [12] Ji Y, Wu G, Zuo Y. Performance Analysis of SPAD-based Underwater Wireless Optical Communication Systems[J]. *Procedia Computer Science*, 2018, 131: 1134–1141.
- [13] Sarbazi E, Safari M, Haas H. Statistical Modeling of Single-photon Avalanche Diode Receivers for Optical Wireless Communications [J]. *IEEE Transactions on Communications*, 2018, 66(9): 4043–4058.
- [14] Deng B, Chen C, Huang H, et al. Three-dimensional Transmission based UOWC in Complex Underwater Environments [J]. *Journal of Lightwave Technology*, 2024, 42(24): 8748–8759.
- [15] Ali M F, Jayakody D N K, Li Y. Recent Trends in Underwater Visible Light Communication (UVLC) Systems[J]. *IEEE Access*, 2022, 10: 22169–22225.
- [16] Baykal Y, Gökçe M C, Ata Y. Anisotropy Effect on Performance of Subcarrier Intensity Modulated Binary Phase Shift Keying Optical Wireless Communication Links in Weakly Turbulent Underwater Channel [J]. *Journal of Modern Optics*, 2019, 66(19): 1871–1875.
- [17] Knepp D L. Multiple Phase-screen Calculation of the Temporal Behavior of Stochastic Waves [J]. *Proceedings of the IEEE*, 1983, 71(6): 722–737.
- [18] Nikishov V V, Nikishov V I. Spectrum of Turbulent Fluctuations of the Sea-water Refraction Index [J]. *Fluid Mechanics Research*, 2000, 27(1): 82–98.
- [19] Xu D L, Yue P, Yi X, et al. Improvement of a Monte-Carlo-simulation-based Turbulence-induced Attenuation Model for an Underwater Wireless Optical Communications Channel [J]. *Journal of the Optical Society of America A, Optics, Image Science, and Vision*, 2022, 39(8): 1330–1342.
- [20] Huang J, Wen G, Dai J, et al. Channel Model and Performance Analysis of Long-range Deep Sea Wireless Photon-counting Communication [J]. *Optics Communications*, 2020, 473: 125989.
- [21] Akhouni F, Salehi J A, Tashakori A. Cellular Underwater Wireless Optical CDMA Network: Performance Analysis and Implementation Concepts [J]. *IEEE Transactions on Communications*, 2015, 63(3): 882–891.