

# 非视距水下联合散射信道路径损耗特性研究

段小宇, 徐立君\*

长春理工大学物理学院, 吉林 长春

收稿日期: 2025年3月14日; 录用日期: 2025年4月7日; 发布日期: 2025年4月14日

## 摘要

目前, 非视距水下无线光通信的研究主要集中在水中粒子对光子的散射作用, 利用水中粒子的多次散射来实现传输。然而, 在近海面场景中, 粗糙海面对光子的散射作用同样不容忽视。文章充分考虑粗糙海面的散射作用, 提出建立激光水下联合散射信道, 利用粗糙海面和水中粒子共同散射进行传输, 并仿真分析了不同传输距离、海水环境、海面粗糙度以及收发机系统配置对联合散射信道路径损耗的影响。研究结果为非视距水下无线光通信系统的设计与优化提供了重要的理论支持。

## 关键词

非视距, 水下无线光通信, 信道模型, 蒙特卡洛, 路径损耗

# Path Loss Characterization of Non-Line-of-Sight Underwater Joint Scattering Channels

Xiaoyu Duan, Lijun Xu\*

School of Physics, Changchun University of Science and Technology, Changchun Jilin

Received: Mar. 14<sup>th</sup>, 2025; accepted: Apr. 7<sup>th</sup>, 2025; published: Apr. 14<sup>th</sup>, 2025

## Abstract

Currently, research on non-line-of-sight underwater wireless optical communication mainly focuses on the scattering effect of particles in the water on photons and utilizes the multiple scattering of particles in the water to realize transmission. However, in the near-sea surface scenario, the scattering effect of the rough sea surface on photons should not be neglected as well. In this paper, the scattering effect of rough sea surface is fully considered, and it is proposed to establish a laser

\*通讯作者。

**underwater joint scattering channel, which utilizes the joint scattering of rough sea surface and water particles for transmission. The effects of different transmission distances, seawater environment, sea surface roughness, and transceiver system configuration on the path loss of the joint scattering channel are simulated and analyzed. The results provide important theoretical support for the design and optimization of non-line-of-sight underwater wireless optical communication systems.**

## Keywords

**Non-Line of Sight, Underwater Wireless Optical Communication, Channel Model, Monte Carlo, Path Loss**

Copyright © 2025 by author(s) and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY 4.0).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

## 1. 引言

海洋覆盖面积达 70%，不仅蕴藏丰富的资源，还承担全球气候调节与碳汇功能。随着深海探测、资源开发和军事侦察需求的增加，水下通信技术成为海洋科学研究的核心。相比于水声通信和水下射频通信，水下无线光通信(UWOC)因其高带宽、低时延和对环境干扰低敏感性的显著优势，特别适用于高数据传输速率和低功耗的水下应用。

水下无线光通信(UWOC)技术主要包括视距(LOS)无线光通信(UWOC)和非视距(NLOS)无线光通信(UWOC)。由于海水中存在湍流、吸收和散射效应以及收发端之间堵塞等因素导致 LOS UWOC 系统通信性能下降。相较于 LOS UWOC 系统，NLOS UWOC 系统可以在障碍物众多的场景中仍具有较高的链路稳定性，能够很好地适应复杂的海洋环境。利用海水中微粒对光的散射法研究 NLOS UWOC 是进行 NLOS 传输的主要方法，近年来成为研究的主要热点。Gabriel [1]等人采用蒙特卡洛法对 UWOC 信道进行了建模，研究了水浊度、通信距离和接收机直径等因素对信道脉冲展宽效应的影响。Choudhary [2]等人基于蒙特卡洛法和 HG 模型，研究了不同海水环境、接收视角下的 NLOS UWOC 传输信道路径损耗。Jagadeesh [3]等人采用蒙特卡洛仿真法研究了多重散射效应对非视距水下无线光通信(NLOS UWOC)系统比特误码率(BER)性能的影响，分析了在不同浑浊度环境和接收视角条件下，误码率的变化趋势。Liu [4]等人选用 Rayleigh 相函数建立了基于粒子散射的 NLOS 水下无线光通信信道模型，并分析了波长、发射功率、收发机仰角、水体类型和传输距离等因素对路径损耗和信道脉冲响应(CIR)的影响。Umar [5]等人基于 NLOS UWOC 系统，提出了一种脉冲响应模型，分析了不同海洋环境条件下的信号传输特性。通过蒙特卡洛数值模拟，研究了水下光通信系统在多种环境中信号衰减、路径损耗以及多路径效应对通信质量的影响。徐立君[6]等人基于指向概率法改进的 NLOS UWOC 信道模型，研究了不同波长下四种海水环境传输信道路径损耗的影响。

上述 NLOS UWOC 的研究均只考虑了水中粒子对光子的散射作用。然而，在近海面场景中，海风扰动使得海面具有较强的粗糙性，这也会导致海面与光子发生散射。因此，单一考虑水中粒子散射的研究已无法全面描述信道特性。针对这一问题，本文充分考虑了粗糙海面对光信号的散射作用，建立了非视距激光水下联合散射信道模型。该模型将粗糙海面与水中粒子对光信号的联合散射作用考虑在内，并基于蒙特卡洛法的多次联合散射传输模型，仿真分析了不同海水环境、海面粗糙度、传输距离和收发机配置对联合散射信道路径损耗特性的影响。

## 2. 理论分析

### 2.1. 海水的光散射特性

激光在水下传输过程中受到海水介质的多重衰减效应影响, 主要包括吸收和散射两种效应。海水的吸收效应主要由水分子和溶解的有机物质引起, 尤其是黄色物质, 这些物质能够显著地将光能转化为热能, 从而导致光子能量的损失。特别是在近海区域, 黄色物质的吸收效应更为显著, 对光的传播产生较大影响。海水中的散射效应包括悬浮颗粒和海水本身的散射, 海水本身的散射通常表现为衰减性质且无明显方向选择性, 其散射强度主要取决于水体的透明度和溶解物质的浓度。而悬浮颗粒的散射效应则更加复杂, 散射强度受颗粒浓度、形状、尺寸及折射率等因素的影响。

光在水中传播时的总衰减可通过衰减系数  $c(\lambda)$  来表示, 这一系数是吸收系数  $a(\lambda)$  和散射系数  $b(\lambda)$  的总和, 且与波长  $\lambda$  有关:

$$c(\lambda) = a(\lambda) + b(\lambda) \quad (1)$$

该衰减系数用于衡量光在海水传播过程中由于吸收和散射作用而导致的能量损失。研究表明, 450~550 nm 波长的光被认为是水下的“蓝绿窗口”, 在该波段光的衰减较小, 因此在 UWOC 中广泛应用。表 1 给出了三种主要类型海水的吸收系数、散射系数和衰减系数的典型取值[7]。

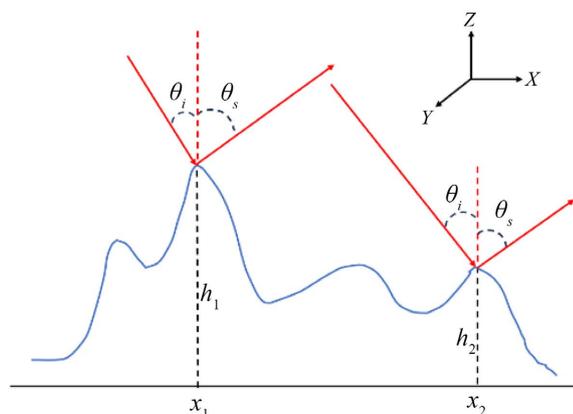
**Table 1.** Typical values of absorption, scattering and attenuation coefficients for the three main types of seawater  
**表 1.** 三种主要类型海水的吸收、散射和衰减系数典型取值

海水类型	吸收系数 $a(\lambda)/\text{m}^{-1}$	散射系数 $b(\lambda)/\text{m}^{-1}$	衰减系数 $c(\lambda)/\text{m}^{-1}$
清澈海水	0.069	0.080	0.149
沿岸海水	0.088	0.216	0.305
港口海水	0.295	1.875	2.170

### 2.2. 粗糙海面的光散射特性

自然界中大多数物体表面都有不同程度的微观粗糙性, 这种表面形态会显著改变光波的传播路径和散射规律。海气交界面作为典型的动态粗糙界面, 会使入射光波发生多方向散射, 导致光能量在空间中重新分布, 从而直接影响水下光通信链路的传输性能。

#### 2.2.1. 粗糙海面的判定



**Figure 1.** Schematic of the geometry of the Rayleigh criterion  
**图 1.** 瑞利判据几何示意图

海面的粗糙度表征是基于入射波波长与表面特征之间的比例关系进行统计的。因此, 在微波波段(毫米级), 由于波长较长, 相同的表面可能显得相对平滑, 导致镜面反射; 而在光波波段(纳米级), 波长较短, 相比于波长, 表面特征较为突出, 从而使得同一表面显得更加粗糙, 进而增强光波的散射, 在这种情况下, 必须通过数学方法判断表面的粗糙度。图 1 给出了 Rayleigh 判据示意图。

光束在粗糙面发生散射时, 两条散射线的相位差为:

$$\Delta\phi = k[(h_1 - h_2)(\cos\theta_i + \cos\theta_s) + (x_2 - x_1)(\sin\theta_i - \sin\theta_s)] \quad (2)$$

式中,  $k = 2\pi/\lambda$  为波数,  $\lambda$  为波长,  $\theta_i$  为入射角,  $\theta_s$  为散射角,  $x_1$ 、 $x_2$  为两个入射点位置,  $h_1$ 、 $h_2$  为两个入射点高度。

当发生镜反射时, 此时相位差为:

$$\Delta\phi = 2k\Delta h \cos\theta_i \quad (3)$$

式中  $\Delta h = h_1 - h_2$ 。

通过对相位差  $\Delta\phi$  的判断, 可以判定表面的粗糙度: 当  $\Delta\phi < \pi/2$  时, 判定为光滑面; 当  $\Delta\phi > \pi/2$  时, 判定为粗糙面, 这就是 Rayleigh 判据。

通过这一判定过程, 我们可以清晰地识别海面的粗糙特征。为了深入研究粗糙海面对激光散射特性的影响, 需要引入一些关键的统计参量, 这些参量能提供更精确的粗糙度量, 并有效描述海面波动的多样性。

### 2.2.2. 粗糙海面的统计参量

#### 1) 高度起伏均方根

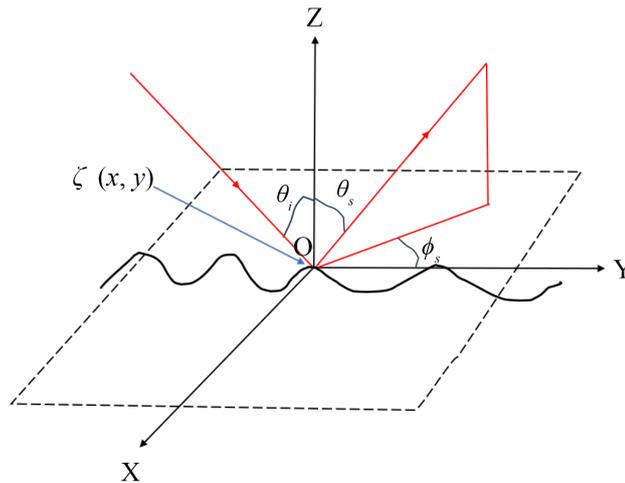


Figure 2. Schematic diagram of the incident rough surface of a light wave

图 2. 光波入射粗糙面示意图

该参量描述海面表面波动的平均高度起伏程度, 通常用于描述表面起伏的统计特征。图 2 给出了光波入射粗糙面的示意图。假设在光波入射到随机粗糙面上的某一点高度起伏为  $\zeta(x, y)$ , 我们在其表面取两个小面  $(L_x, L_y)$  来代表粗糙面的统计特性, 则表面的平均高度为:

$$\bar{\zeta} = \frac{1}{L_x L_y} \int_{\frac{L_x}{2}}^{\frac{L_x}{2}} \int_{\frac{L_y}{2}}^{\frac{L_y}{2}} \zeta(x, y) dx dy \quad (4)$$

其二阶矩为:

$$\overline{\zeta^2} = \frac{1}{L_x L_y} \int_{-\frac{L_x}{2}}^{\frac{L_x}{2}} \int_{-\frac{L_y}{2}}^{\frac{L_y}{2}} \zeta^2(x, y) dx dy \quad (5)$$

则表面起伏均方根  $\delta$  可表示为:

$$\delta = \left( \overline{\zeta^2} - \bar{\zeta}^2 \right)^{1/2} \quad (6)$$

### 2) 表面相关长度

表面相关长度指的是不同点之间表面起伏的相关性。它反映了海面波动在空间上的连续性与变化模式。在具有特定分布的粗糙面上, 对于粗糙面性质, 只使用高度起伏均方根值  $\delta$  无法进行唯一、确定的描述。粗糙面上任意两点的相关性可通过高斯分布形式的相关函数表示:

$$\rho(d_x) = \delta^2 \exp(-d_x^2/l^2) \quad (7)$$

式中,  $l$  为表面相关长度, 且当  $\rho(d_x)$  为  $1/e$  时, 距离  $d_x$  表示表面相关长度。当两点间的距离大于  $l$  时, 认为这两点的高度变化相互独立; 反之, 当距离小于  $l$  时, 两点的高度变化存在相关性。海面粗糙度与  $l$  成反比关系, 即  $l$  越小, 表面越粗糙导致的起伏越剧烈。

### 3) 功率谱密度函数

功率谱密度描述的是不同频率成分的能量分布, 是海面波动特性的重要统计工具。它提供了有关海面起伏在不同尺度上能量分布的详细信息。如果粗糙海面同时具备高斯分布的均方根高度和相关长度, 则海浪的功率谱密度可以通过高斯谱模型来描述为:

$$W(p, q) = \frac{\delta^2 (p^2 + q^2)}{\pi} \exp\left(-\frac{l^2 (p^2 + q^2)}{4}\right) \quad (8)$$

式中,  $p = k \sin \theta_s \cos \phi_s - k \sin \theta_i$ 、 $q = k \sin \theta_s \sin \phi_s$ , 表示空间波数  $k$  的分布。

服从指数分布的功率谱密度函数为:

$$W(p, q) = \sqrt{2\pi} \delta^2 l^2 (1 + k^2 l^2)^{3/2} \quad (9)$$

## 3. 非视距激光水下联合散射信道路径损耗特性研究

### 3.1. 非视距激光水下联合散射信道模型

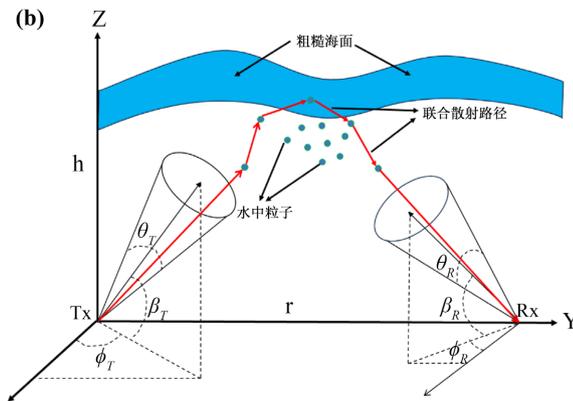


Figure 3. Modeling of non-line-of-sight laser underwater joint scattering channels  
图 3. 非视距激光水下联合散射信道模型

图 3 展示了结合粗糙海面和水中粒子共同散射的激光水下联合散射信道模型。在该模型中, 假设发射机和接收机位于相同水深  $h$ , 且发射机位于坐标系的原点, 接收机沿  $y$  轴设置, 距离发射机有一定距离  $r$ 。发射机的发散角为  $\theta_T$ , 接收机的视场角为  $\theta_R$ 。其中,  $\beta_R$  和  $\beta_T$  分别为收发机的仰角,  $\phi_R$  和  $\phi_T$  分别为收发机的偏转角。

### 3.2. 基于蒙特卡洛法的多次联合散射传输模型

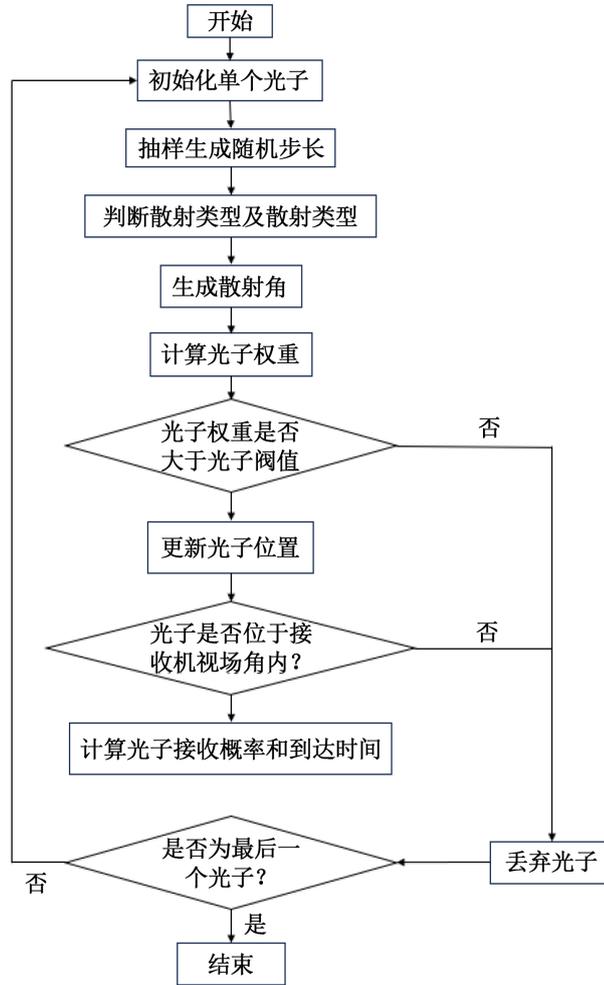


Figure 4. Monte Carlo simulation flowchart  
图 4. 蒙特卡洛仿真流程图

蒙特卡洛方法(Monte Carlo Method, MCM)是一种基于随机采样的数值计算方法, 广泛应用于物理、金融、工程和通信等领域。该方法特别适用于高维问题和随机过程的求解, 尤其在传统解析方法无法获得精确解时具有明显优势。

在 NLOS UWOC 系统中, 光信号的传播过程受到水体介质的散射与吸收特性的复杂影响, 传统解析方法难以准确描述 NLOS 条件下的信号传播。蒙特卡洛方法通过模拟光子在水中传播的随机路径, 考虑水中粒子和粗糙海面之间的多次散射效应, 有效地捕捉了信号传播的特性。通过蒙特卡洛仿真, 可以追踪光子与水体粒子及海面散射的相互作用, 从而获得关键的信道统计特性, 如路径损耗和脉冲响应。因此, 蒙特卡洛方法在 NLOS UWOC 信道建模中具有显著优势, 能够提供精确的信道特性分析, 进一步加

深对水下光通信传输过程的理解。

基于蒙特卡洛法的多次联合散射仿真模型包括四个关键步骤:

1) 光子初始参数配置: 在发射端生成约  $10^7$  个光子, 并根据仰角和方位角生成模型配置其初始参数, 确保光子分布符合发射光束的立体角约束。

2) 光子传输与散射迭代: 光子的传播过程通过计算步长、更新位置、衰减权重并设定终止条件来模拟其在水体中的传输。

3) 散射类型决策与方向更新: 根据光子的空间位置判断其是否发生海面或粒子散射, 并通过相应散射函数更新散射角和方向余弦。

4) 路径损耗统计模型: 根据传播过程中光子积累的衰减系数, 计算光子到达接收端的概率, 并统计多个光子的路径损耗以求得信道的总路径损耗。

图 4 展示了蒙特卡洛仿真流程图。接下来将详细介绍模拟联合散射传输过程中的核心关键步骤。

### 1) 光子初始参数配置

发射机生成大规模光子群( $10^7$ ), 其空间分布满足发射光束立体角约束。每个光子携带初始参数: 初始仰角  $\beta_0$  为[8]:

$$\beta_0 = \beta_T - \theta_T/2 + \theta_T \xi^{(1)} \quad (10)$$

式中,  $\xi^{(1)}$  为[0, 1]区间服从均匀分布的随机数, 该公式确保出射光子的初始仰角限制在了发射机的发散角内。

初始方位角  $\phi_0$  分段函数为[8]:

$$\phi_0 = \begin{cases} 2\pi\xi^{(2)}, & \beta_U > \pi/2 \\ \phi_T + \frac{1-|\beta_T-\theta_T|}{\theta_T/2} \left( -\frac{\theta_T}{2} + \theta_T \xi^{(3)} \right), & \beta_U \leq \pi/2 \end{cases} \quad (11)$$

式中,  $\xi^{(2)}$ 、 $\xi^{(3)}$  为[0, 1]区间服从均匀分布的随机数,  $\beta_U = \beta_T + \theta_T/2$  为发射机锥体光束的上边界, 通过该边界条件确定初始方位角的范围。

### 2) 光子传输与散射迭代

图 5 展示了联合散射信道中光子传播路径的示意图。在传输过程中, 光子会遭遇水中粒子和粗糙海面的散射, 这些散射过程决定了光子的传播轨迹。

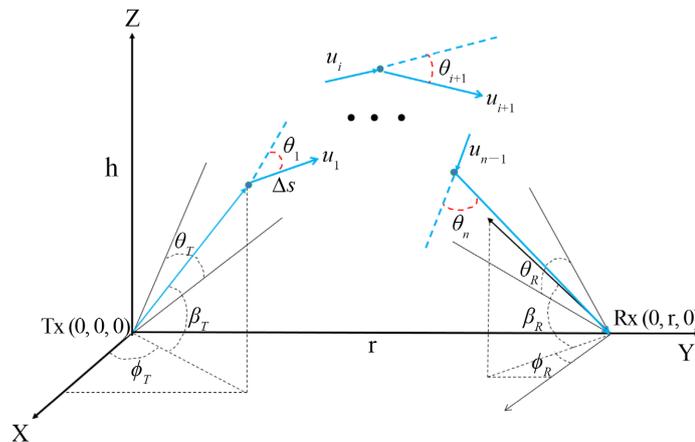


Figure 5. Photon joint scattering path diagram  
图 5. 光子联合散射路径图

光子散射移动的步长  $\Delta s$  为:

$$\Delta s = -\frac{\ln(\xi^4)}{b(\lambda)} \quad (12)$$

式中,  $\xi^{(4)}$  为  $[0, 1]$  区间服从均匀分布的随机数,  $b(\lambda)$  为不同类型海水的散射系数。

光子沿  $(\beta_0, \phi_0)$  出射后, 其初始方向余弦为:

$$\begin{bmatrix} u_{x0} \\ u_{y0} \\ u_{z0} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos \beta_0 \cos \phi_0 \\ \cos \beta_0 \sin \phi_0 \\ \sin \beta_0 \end{bmatrix} \quad (13)$$

则光子移动  $\Delta s$  后新的位置坐标  $(x', y', z')$  可表示为:

$$\begin{bmatrix} x' \\ y' \\ z' \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} u_{x0} \\ u_{y0} \\ u_{z0} \end{bmatrix} \cdot \Delta s = \begin{bmatrix} x + u_{x0} \Delta s \\ y + u_{y0} \Delta s \\ z + u_{z0} \Delta s \end{bmatrix} \quad (14)$$

光子在散射过程中, 海水吸收使光子权重减小, 散射后光子权重  $w'$  为:

$$w' = w \cdot (b(\lambda)/c(\lambda)) \quad (15)$$

式中,  $b(\lambda)$ 、 $c(\lambda)$  分别为不同海水类型的散射与衰减系数。

散射光子权重阈值判断条件为:

$$w' = \begin{cases} 0, & \xi^{(5)} > \frac{1}{m} \\ mw, & \xi^{(5)} \leq \frac{1}{m} \end{cases} \quad (16)$$

式中,  $m$  为散射光子阈值, 其值常取  $10^5$ ,  $\xi^{(5)}$  为  $[0, 1]$  区间服从均匀分布的随机数。

### 3) 散射类型决策与方向更新

在联合散射传输信道中, 光子可能遇到水中粒子散射或粗糙海面散射。根据光子散射后的位置, 判断其散射类型的过程可以分为以下几个步骤。

1) 首次散射: 若  $z \geq h$  (海面高度), 判断光子发生粗糙海面散射, 散射角由基尔霍夫近似法求解的散射截面决定; 否则, 发生粒子散射, 散射角由 HG 散射相函数决定。

2) 二次散射: 前次散射为粗糙海面散射且  $z \geq h$  时终止传输。

3) 高阶散射: 递归执行类型判断直至满足终止条件。

发生粗糙面散射时的散射角和方位角为:

$$\zeta^{(6)} = \int_0^{\theta_s} \int_0^{2\pi} F(\theta, \phi) d\theta d\phi \quad (17)$$

$$\zeta^{(7)} = \int_0^{\phi_s} \int_0^{\pi} F(\theta, \phi) d\theta d\phi \quad (18)$$

式中,  $\zeta^6$ 、 $\zeta^7$  为  $[0, 1]$  区间服从均匀分布的随机数,  $F(\theta, \phi)$  为表征粗糙海面散射的散射相位函数。

根据文献[9], 上式的  $F(\theta, \phi)$  通过归一化散射截面表示为:

$$F(\theta, \phi) = \sigma_s(\theta, \phi) / \int_0^{2\pi} \int_0^{\pi} \sigma_s(\theta, \phi) d\theta d\phi \quad (19)$$

发生水中粒子散射时的散射角和方位角为:

$$\xi^{(8)} = 2\pi \int_0^{\theta_s} P_{HG} \sin \theta d\theta \quad (20)$$

$$\phi = 2\pi \xi^{(9)} \quad (21)$$

其中,  $\xi^{(8)}$ 、 $\xi^{(9)}$ 为[0, 1]区间服从均匀分布的随机数,  $P_{HG}$ 是HG散射相函数。

不同类型散射后更新的方向余弦表达式为:

$$\begin{aligned} u_x^{n+1} &= \frac{\sin \theta}{\sqrt{1-(u_z^n)^2}} (u_x^n u_z^n \cos \phi - u_y^n \sin \phi) + u_x^n \cos \theta \\ u_y^{n+1} &= \frac{\sin \theta}{\sqrt{1-(u_z^n)^2}} (u_y^n u_z^n \cos \phi - u_x^n \sin \phi) + u_y^n \cos \theta \\ u_z^{n+1} &= -\sin \theta \cos \phi \sqrt{1-(u_z^n)^2} + u_z^n \cos \theta \end{aligned} \quad (22)$$

#### 4) 路径损耗统计模型

光子在传输中经过粗糙海面 and 水中粒子散射后分别能被接收机接收到的概率为:

$$P_{1n} = \int_{\Omega_n} F(\theta, \phi) d\Omega \quad (23)$$

$$P_{2n} = \int_{\Omega_n} P_{HG}(\theta, \phi) d\Omega \quad (24)$$

其中,  $\Omega_n$ 是沿光子散射方向上的立体角, 并且该立体角必须在接收机孔径面积的观察区域内。

对于  $n$  次散射后被接收机接收的单个光子, 第  $n$  次散射位置到接收机之间的传输损耗为:

$$p_{2n} = \exp(-c(\lambda)(r_n - r_{n-1})) \quad (25)$$

其中,  $c(\lambda)$ 为不同海水类型的衰减系数。

第  $n$  次散射后的光子权重为  $w_n$ , 设  $1 - p_{1n}$  为光子未能被接收机接收的概率、 $\exp((-a(\lambda)|r_n - r_{n-1}|))$  表示从第  $n-1$  个散射点到第  $n$  个散射点受海水吸收作用造成的能量衰减, 则此时光子的权重为[10]:

$$w_n = (1 - p_{1n}) \exp(-a(\lambda)|h_n - h_{n-1}|) w_{n-1} \quad (26)$$

其中,  $a(\lambda)$ 为不同海水类型海水的吸收系数。

联立公式(23)~(26), 可以得到单个光子经历  $n$  次散射后成功到达接收机的概率为:

$$P_n = p_{1n} p_{2n} w_n \quad (27)$$

则单个光子到达接收机的总概率, 即接收到的光子能量百分比, 可表示为:

$$P = \sum_{n=1}^N P_n = \sum_{n=1}^N w_n p_{1n} p_{2n} \quad (28)$$

通过对大量光子 ( $M = 10^7$ ) 进行统计模拟, 计算其总到达概率的平均值, 得到信道的路径损耗表达式为:

$$PL = -10 \lg \left( \frac{\sum_{m=1}^M \sum_{n=1}^{N_n} P_{mn}}{M} \right) \quad (29)$$

式中,  $N_n$  表示经历  $n$  次散射后, 光子到达接收机的数量, 考虑到不同光子可能经历不同的散射次数, 这一点在公式(3)~(18)中有所体现。

### 3.3. 路径损耗特性分析

路径损耗反映了光信号在海水传播过程中的衰减程度。较低的路径损耗意味着信号在传输过程中受到较小的吸收和散射影响, 从而改善信道性能, 延长通信距离。表 2 给出了本节的仿真参数。

Table 2. Path loss simulation parameters

表 2. 路径损耗仿真参数

参数	内容
波长	532 nm
表面起伏均方根	$0.8 \lambda$
相关长度	$4 \lambda$
传输距离	5 m
发射机发散角	$5^\circ$
接收机视场角	$180^\circ$
发射机偏转角	$90^\circ$
接收机偏转角	$-90^\circ$
发射机仰角	$45^\circ$
接收机仰角	$45^\circ$

#### 3.3.1. 传输距离和海水环境变化对路径损耗的影响

图 6 展示了传输距离和海水环境变化对联合散射传输信道路径损耗的影响。

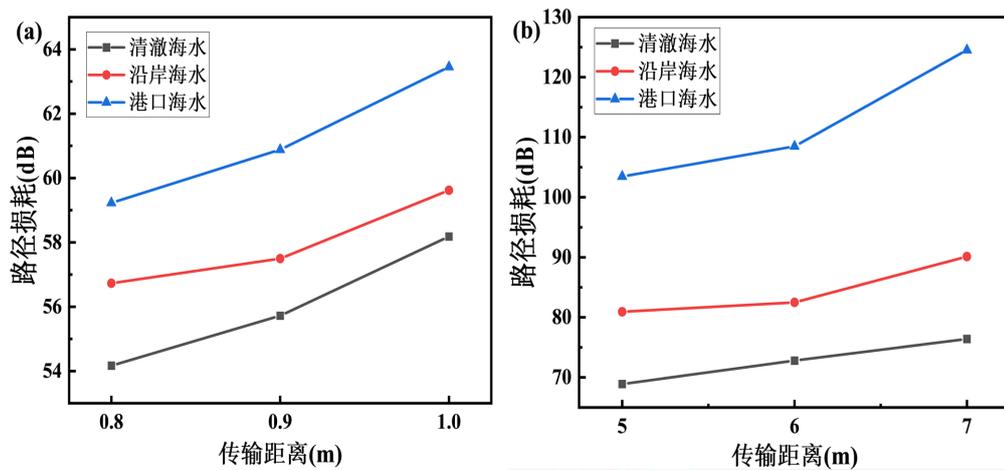


Figure 6. Impact of changes in the marine environment on path loss: (a) short distances; (b) long distances

图 6. 海水环境变化对路径损耗的影响: (a) 短距离; (b) 长距离

从图 6 中可以看出, 无论是短距离还是长距离传输, 路径损耗均随传输距离和海水浑浊度的增大而增加。尤其在水质最为浑浊的港口海水中, 路径损耗随着距离的增加呈现更为显著的增长趋势。其原因在于, 随着传输距离的增加, 联合散射光子在传输过程中受到海水中吸收和散射作用的共同影响, 导致

衰减效应加剧, 光子能量减少, 接收机接收到的光子能量下降, 从而引起路径损耗增大。特别是在远距离传输时, 海水浑浊度越高, 衰减效应越复杂且越剧烈, 路径损耗的变化也更加明显。

### 3.3.2. 收发机仰角变化对路径损耗的影响

图 7 展示了在清澈海水中, 收发机仰角变化对联合散射传输信道路径损耗的影响。

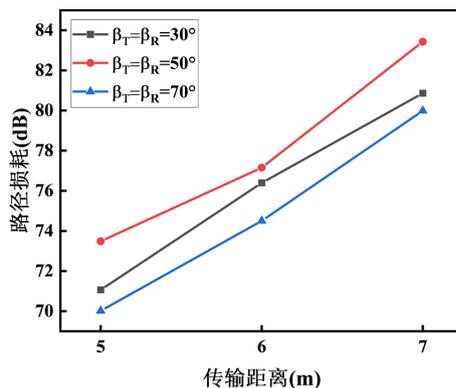


Figure 7. Effect of transceiver elevation angle variation on path loss

图 7. 收发机仰角变化对路径损耗的影响

从图 7 中可以看出, 当收发机仰角从  $30^\circ$  增加到  $50^\circ$  时, 信道中的光子主要与水体粒子发生散射, 路径损耗随仰角增大而增加。固定接收机仰角时, 发射机仰角增大会导致路径损耗增加; 同样, 固定发射机仰角时, 接收机仰角增大也会导致路径损耗增大。随着仰角的增大, 收发机之间的有效传输区域变小, 光子到达接收机的概率降低, 从而增大了路径损耗。然而, 当仰角增大至  $70^\circ$  时, 尽管有效传输区域进一步减小, 但光子与粗糙海面的散射作用增强, 使得联合散射光子能够通过更多的路径到达接收机, 从而减少了路径损耗。

### 3.3.3. 发射机偏转角变化对路径损耗的影响

图 8 展示了在清澈海水和沿岸海水中, 收发机仰角变化对联合散射传输信道路径损耗的影响。

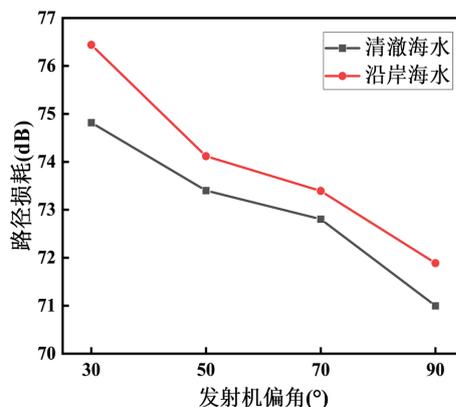


Figure 8. Effect of transmitter deflection angle variation on path loss

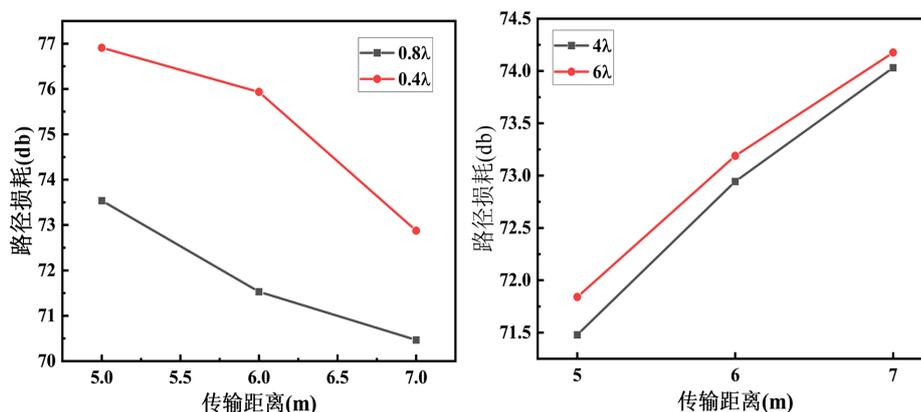
图 8. 发射机偏转角变化对路径损耗的影响

从图 8 中可以看出, 在清澈海水和沿岸海水环境下, 路径损耗随着偏转角的增大而减小。这是因为

偏转角较大时, 收发机的有效交集区域增大, 光子的传输路径变长, 导致光子在传播过程中经历更多的吸收和散射作用, 从而加剧了信号能量的衰减, 进一步增加了路径损耗。此外, 随着海水浑浊度的升高, 联合散射光子所受的衰减效应更加显著, 能量衰减越大, 路径损耗也越大。

### 3.3.4. 高度起伏均方根和表面相关长度对路径损耗的影响

图 9 展示了在清澈海水和沿岸海水中, 高度起伏均方根和表面相关长度对联合散射传输信道路径损耗的影响。



**Figure 9.** Effect of surface height fluctuation RMS and surface correlation length variation on path loss: (a) surface height fluctuation RMS; (b) surface correlation length

**图 9.** 表面高度起伏均方根和表面相关长度变化对路径损耗的影响: (a) 表面高度起伏均方根; (b) 表面相关长度

从图 9(a)中可以看出, 随着高度起伏均方根的增大, 路径损耗呈减小趋势。图 9(b)中则显示, 路径损耗随着表面相关长度的增加而减小。这是因为, 随着高度起伏均方根增大, 海面起伏变得更加剧烈; 同时, 表面相关长度的增加意味着海面变化较为平滑。两者共同作用下, 粗糙海面的散射效应增强, 尤其是在海面起伏较大的情况下, 光子可以通过更多的散射路径到达接收机。水中粒子与粗糙海面的联合散射作用使得光信号通过多个路径传播, 从而有效减小了路径损耗。

## 4. 总结

本文针对近海面场景中的 NLOS UWOC, 充分考虑粗糙海面对光信号的散射影响, 建立了非视距水下联合散射信道模型, 并基于蒙特卡洛法进行多次联合散射传输模型, 仿真分析了不同海水环境、传输距离及收发机系统配置对联合散射信道路径损耗的影响。结果表明, 路径损耗随传输距离的缩短、海水浑浊度的降低、海面粗糙性的增加以及收发机有效交集区域的扩大而减小。研究结果为 NLOS UWOC 系统的设计与优化提供了重要的理论依据。

## 参考文献

- [1] Gabriel, C., Khalighi, M., Bourenane, S., Leon, P. and Rigaud, V. (2011) Channel Modeling for Underwater Optical Communication. 2011 *IEEE GLOBECOM Workshops (GC Wkshps)*, Houston, 5-9 December 2011, 833-837. <https://doi.org/10.1109/glocomw.2011.6162571>
- [2] Choudhary, A., Jagadeesh, V.K. and Muthuchidambaranathan, P. (2014) Pathloss Analysis of NLOS Underwater Wireless Optical Communication Channel. 2014 *International Conference on Electronics and Communication Systems (ICECS)*, Coimbatore, 13-14 February 2014, 1-4. <https://doi.org/10.1109/ecs.2014.6892620>
- [3] Jagadeesh, V.K., Naveen, K.V. and Muthuchidambaranathan, P. (2015) BER Performance of NLOS Underwater Wireless Optical Communication with Multiple Scattering. *International Journal of Electronics and Communication Engineering*, **9**, 563-566.

- 
- [4] Liu, W., Zou, D., Xu, Z. and Yu, J. (2015) Non-Line-of-Sight Scattering Channel Modeling for Underwater Optical Wireless Communication. 2015 *IEEE International Conference on Cyber Technology in Automation, Control, and Intelligent Systems (CYBER)*, Shenyang, 8-12 June 2015, 1265-1268. <https://doi.org/10.1109/cyber.2015.7288125>
- [5] Umar, A.B., Leeson, M.S. and Abdullahi, I. (2019) Modelling Impulse Response for NLOS Underwater Optical Wireless Communications. 2019 *15th International Conference on Electronics, Computer and Computation (ICECCO)*, Abuja, 10-12 December 2019, 1-6. <https://doi.org/10.1109/icecco48375.2019.9043272>
- [6] Xu, L., Liu, X., Zhang, P. and Wang, X. (2022) Path-Loss of Violet-Light-Based Non-Line-of-Sight Underwater Optical Communication. *Journal of Optics*, **52**, 1109-1117. <https://doi.org/10.1007/s12596-022-00926-9>
- [7] Gabriel, C., Khalighi, M., Bourennane, S., Léon, P. and Rigaud, V. (2012) Monte-Carlo-Based Channel Characterization for Underwater Optical Communication Systems. *Journal of Optical Communications and Networking*, **5**, 1-12. <https://doi.org/10.1364/jocn.5.000001>
- [8] 李晗. 非视距水下无线光信道建模技术研究[D]: [硕士学位论文]. 西安: 西安电子科技大学, 2022.
- [9] 李昌泽, 童创明, 王童, 等. 非均匀不稳定表面粗糙目标的太赫兹波段散射特性分析[J]. *红外与毫米波学报*, 2016, 35(2): 234-242.
- [10] 刘显月. 非视距紫光水下散射传输特性研究[D]: [硕士学位论文]. 长春: 长春理工大学, 2022.