

【引用格式】王毓珏, 李燕龙, 蒙衍年, 等. 适用于多水质类型的水下光信道快速仿真分析[J]. 数字海洋与水下攻防, 2025, 8(4): 488-501.

# 适用于多水质类型的水下光信道快速仿真分析

王毓珏<sup>1</sup>, 李燕龙<sup>1, 2, \*</sup>, 蒙衍年<sup>1</sup>, 谷城雨<sup>1</sup>, 崔佳文<sup>1</sup>, 蔡春晓<sup>1, \*</sup>

(1. 桂林电子科技大学 信息与通信学院 教育部认知无线电与信息处理重点实验室, 广西 桂林 541004;  
2. 桂林电子科技大学 广西无线宽带通信与信号处理重点实验室, 广西 桂林 541004,)

**摘 要** 现阶段大多数基于蒙特卡洛仿真的水下光信道模型较为单一, 无法适用于多种水质类型, 且已有方法在水下光信道建模过程中计算量大、效率低, 迫切需要能提高计算效率的方法。针对不同水质类型、不同距离、不同接收视场等情况进行光子跟踪, 提出了一种快速基于蒙特卡洛的水下光信道仿真方法。该方法通过预加载光子数据空间, 并将光子运动轨迹信息顺序储存于数据空间, 同时结合比尔朗伯定律将吸收和散射造成的衰减纳入光子的非碰撞传播损耗中, 获取更精确的水下光传播衰减量, 再将数据进行处理形成光子传输的仿真结果, 提高了计算效率, 得到了多水质类型的水下光信道特性。

**关键词** 蒙特卡洛; 射线跟踪法; 水下光信道特性; 冲激响应

**中图分类号** TN929.3 **文献标识码** A **文章编号** 2096-5753(2025)04-0488-14  
**DOI** 10.19838/j.issn.2096-5753.2025.04.012

## Fast Simulation Analysis of Underwater Optical Channels Suitable for Multiple Water Quality Types

WANG Yujue<sup>1</sup>, LI Yanlong<sup>1, 2, \*</sup>, MENG Yannian<sup>1</sup>, GU Chengyu<sup>1</sup>, CUI Jiawen<sup>1</sup>, CAI Chunxiao<sup>1, \*</sup>

(1. Ministry of Education Key Laboratory of Cognitive Radio and Information Processing, School of Information and Communication, Guilin University of Electronic Technology, Guilin 541004, China; 2. Guangxi Wireless Broadband Communication and Signal Processing Key Laboratory, Guilin University of Electronic Technology, Guilin 541004, China)

**Abstract** At present, most of the underwater optical channel models based on Monte Carlo simulation are relatively single and cannot be applied to a variety of water quality types. Moreover, the existing methods require a large amount of calculation and have low efficiency in the process of underwater optical channel modeling. Therefore, there is an urgent need for methods that can improve the calculation efficiency. A fast underwater optical channel simulation method based on Monte Carlo is proposed for photon tracking in different water quality types, different distances and different receiving fields of view. In this method, the photon data space is preloaded, and the photon motion trajectory information is sequentially stored in the data space. At the same time, the attenuation caused by absorption and scattering is incorporated into the non-collision propagation loss of photons in combination

收稿日期: 2025-04-30

作者简介: 王毓珏 (2004-), 女, 本科生, 主要从事水下无线光通信研究。

\*共同第一作者: 李燕龙 (1989-), 男, 博士, 副教授, 主要从事水下无线光通信研究。

\*通信作者: 蔡春晓 (1980-), 男, 硕士, 高级实验师, 主要从事水下无线光通信研究。

基金项目: 大学生创新创业训练计划“基于单光子探测的无线光 MIMO 中继通信系统”(202410595043); 认知无线电与信息处理教育部重点实验室主任基金项目资助“跨空水介质的无线光信道建模与阵列通信技术研究”(CRKL230102)。

with Beer-Lambert's law to obtain more accurate underwater light propagation attenuation. Then, the data is processed to form the simulation results of photon transmission, which improves the computational efficiency. Underwater optical channel characteristics of multiple water quality types are obtained.

**Key words** Monte Carlo; ray tracing method; underwater optical channel characteristic; impulse response

## 0 引言

水下无线光通信技术是一种新兴的水下高速数据传输手段,有效地弥补了传统电磁波在水下衰减系数大以及传统水声通信传输速率低、时延大、易受环境影响等诸多缺陷<sup>[1]</sup>。其中,采用蒙特卡洛方法仿真分析光信号在水下信道的传输特性受到了众多研究学者的青睐,其应用已十分广泛。

文献[2]通过光子路径追踪分析了具有 1 Gbps 速率并多次散射的非视距通信系统路径损耗。文献[3]结合 Mie 理论量化了气泡参数对信道特性影响的关系。文献[4]通过利用 Snell 定律将基于电磁波的蒙特卡洛相位屏模型改进为基于射线的蒙特卡洛相位屏模型。文献[5]针对水下复杂信道下光通信信道估计与信号检测等难题,提出了基于机器学习的信道估计算法。文献[6]针对海洋港湾水的强吸收高散射特性,量化分析了水质参数和传输距离对脉冲响应的影响。针对计算复杂度高的问题,文献[7]提出增大探测器面积,文献[8]融合机器学习优化光子行为等加速策略,文献[9]将计算密集型部分移植到各线程并行计算的方式提高仿真计算效率。文献[10]实现湍流与吸收散射效应的多物理场耦合,文献[11]实验表明湍流可导致路径损耗增加 5 dB,在水下光信道中引入湍流因素,将显著提升水下光信道的模型精度。

现有研究中对光子传播模型较为理想化,无法适用于多种水质类型下,且蒙特卡洛方法在水下信道建模过程中计算量大、效率低,迫切需提高计算效率。本文提出一种快速蒙特卡洛的水下光信道仿真方法,通过预加载处理,同时结合比尔朗伯定律将吸收和散射造成的不同衰减加入到光子传播过程中,给出光子数据空间,提高了计算效率和仿真精确度。

## 1 基于蒙特卡洛的改进水下光信道模型

水下光信号传输较为复杂,海水的光学特性呈现出高度的复杂性和不确定性。海水的成分会因地

理位置、深度、季节等因素而发生显著变化,这直接导致海水对光的吸收和散射特性差异巨大。不同海域的海水,其所含的悬浮颗粒浓度、种类以及溶解物质的成分各不相同,这些因素都会对光信号的传输产生不同程度的影响<sup>[12]</sup>。在某些富含浮游生物的海域,光的散射会更为强烈,导致光信号的能量迅速分散;而在一些水质较为清澈的海域,光的吸收相对较弱,信号传输距离相对较远。此外,水下的复杂环境因素,如水流、温度梯度、盐度变化以及气泡等,都会对光信号的传播路径和强度产生干扰。水流的运动会使海水的折射率发生变化,从而导致光信号的传播路径发生扭曲;温度和盐度的变化也会引起海水光学性质的改变,进一步影响光信号的传输<sup>[13]</sup>。通过对大量光子的传播过程进行模拟和统计,可以得到接收端接收到的光子数量、能量分布、到达时间分布等信息。这些信息经过进一步的处理和分析,能够得出光信号在水下传输的衰减特性、散射特性、时延扩展等重要参数<sup>[14]</sup>。通过对这些参数的深入研究,可以全面了解水下光通信系统的性能,为系统的优化设计提供有力的支持。例如:若发现光信号的衰减过大,可考虑调整光源的发射功率、波长或选择更合适的传输介质;如果时延扩展严重影响通信质量,可以通过优化系统的编码和调制方式来提高抗干扰能力。

光波的衰减系数  $c(\lambda)$  是通过将吸收系数和散射系数结合而得<sup>[15]</sup>:

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

式中:  $a(\lambda)$  和  $B(\lambda)$  分别为吸收系数和散射系数,  $\text{m}^{-1}$ ;  $\lambda$  为光在真空中的波长,  $\text{nm}$ 。

在纯净水中,与传统模型不同,本模型考虑光子仅直射传播时也存在路径损耗,则在接收端收到的光信号功率可以改进表示为

$$P_{\text{纯}} = P_0 \cdot \exp^{-a(\lambda) \cdot s} \quad (2)$$

式中:  $P_0$  为发射端初始时携带的光峰值功率;  $s$  为光束在水中的移动距离,  $\text{m}$ 。

而实际上,无论在何种水质下,其光子传播过

程中均会受到吸收和散射造成的衰减影响。接收端接收到的总光信号功率  $P$ ，可以根据 Beer-lambert 定律描述，相关表达式为

$$P = P_0 \cdot \exp^{-c(\lambda) \cdot s} \quad (3)$$

基于上述水下光传输吸收和散射的分析，本文提出了一种改进的蒙特卡洛信道模型。首先是对光子的初始状态进行模拟构建<sup>[16]</sup>，假设光子是在沿着  $xoy$  平面沿着  $z$  轴进行传播，发射半径为  $R$ ，发散角为  $\theta$ ，光子的权重为  $w_0$ 。初始的光子发射坐标  $(x_0, y_0, z_0)$  和初始方向余弦  $(u_{x0}, u_{y0}, u_{z0})$  可以表示为

$$\begin{cases} x_0 = \rho_0 \cos \alpha_0 \\ y_0 = \rho_0 \sin \alpha_0 \\ z_0 = 0 \\ u_{x0} = \cos \varphi_0 \sin \theta_0 \\ u_{y0} = \sin \varphi_0 \sin \theta_0 \\ u_{z0} = \cos \theta_0 \end{cases} \quad (4)$$

式中： $(\rho_0, \alpha_0)$  为光子在  $xoy$  平面上的极坐标； $\varphi_0$  和  $\theta_0$  为光子在初始位置方向上的方位角和仰角。具体如图 1 所示。

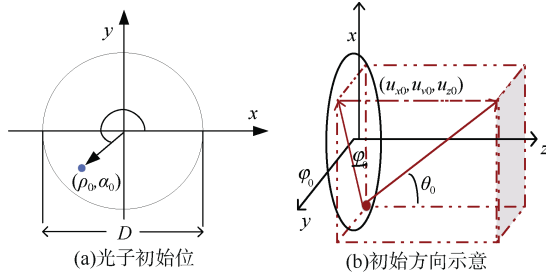


图 1 光子初始位和初始方向示意

Fig. 1 Schematic diagram of initial position and direction of photon

LD 和 LED 光源的光强服从高斯、均匀分布，因此，在  $xoy$  平面上其表达式为

$$\begin{cases} \rho_0 = R \cdot \sqrt{-\ln \xi_{\rho_0}} \\ \alpha_0 = 2\pi \cdot \xi_{\alpha_0} \\ \varphi_0 = 2\pi \cdot \xi_{\varphi_0} \\ \theta_0 = \frac{\theta}{2} (2 \cdot \xi_{\theta_0} - 1) \end{cases} \quad (5)$$

式中， $\xi_{\rho_0}$ ， $\xi_{\alpha_0}$ ， $\xi_{\varphi_0}$ ， $\xi_{\theta_0}$  都为在  $[0, 1]$  范围内相互独立的随机数。

因此，通过上面的式子即可求出光子的随机路

径坐标  $(x_1, y_1, z_1)$ ，以及新的光子权重  $w_1$ 。如果光子权重  $< 10^{-5}$  即可认为该光子湮灭。

$$\begin{cases} x_1 = x_0 + u_{x0} \cdot s \\ y_1 = y_0 + u_{y0} \cdot s \\ z_1 = z_0 + u_{z0} \cdot s \\ w_1 = w_0 \cdot W_{th} \end{cases} \quad (6)$$

式中： $s$  为随机步长； $W_{th}$  为散射反照率。

$$\begin{aligned} s &= -\frac{\ln(\xi)}{c} \\ W_{th} &= \frac{b}{c} \end{aligned} \quad (7)$$

式中： $\xi$  为  $[0, 1]$  范围的随机数； $b$  为散射系数； $c$  为衰减系数。若随机过程中， $[0, 1]$  范围内的随机数小于散射反照率，光子将被散射，反之光子不被散射。此时散射后的新的方向余弦变为

$$\begin{cases} u_{x1} = \frac{\sin \theta_1}{\sqrt{1-u_{z0}^2}} (u_{x0} u_{z0} \cos \varphi_1 - u_{y0} \sin \varphi_1) + u_{x0} \cos \theta_1 \\ u_{y1} = \frac{\sin \theta_1}{\sqrt{1-u_{z0}^2}} (u_{y0} u_{z0} \cos \varphi_1 - u_{x0} \sin \varphi_1) + u_{y0} \cos \theta_1 \quad |u_{z0}| \leq 0.99 \\ u_{z1} = -\sin \theta_1 \cos \varphi_1 \sqrt{1-u_{z0}^2} + u_{z0} \cos \theta_1 \\ u_{x1} = \cos \varphi_1 \sin \theta_1 \\ u_{y1} = \sin \varphi_1 \sin \theta_1 \quad |u_{z0}| > 0.99 \\ u_{z1} = \sin(u_{z0}) \cos \theta_1 \end{cases} \quad (8)$$

式中， $\varphi_1$  和  $\theta_1$  分别是散射方向的方位角和散射角。其中， $\varphi_1$  为  $[0, 2\pi]$  的随机值。新的散射角通过散射相函数  $p(\theta_1, g)$  来计算，即

$$p(\theta_1, g) = \frac{1-g^2}{2(1+g^2-2g \cdot \cos \theta_1)^{\frac{3}{2}}} \quad (9)$$

式中， $g$  为不对称因子。在 HG (Henyey-Greenstein) 函数模型中，认为这些微小差异对于光信道特性的影响可忽略不计，因此，通常取  $g = 0.924$  作为大多数实际情况的近似，此时散射角为

$$\cos \theta_1 = \frac{1}{2g} \left[ 1 + g^2 - \left( \frac{1-g^2}{1-g+2g \cdot r_{\theta_1}} \right)^2 \right] \quad (10)$$

式中， $r_{\theta_1}$  为  $[0, 1]$  范围内的随机数。

单次散射反照率 $\omega_0$ , 是散射系数与衰减系数的比值, 用来确定光子在传输过程中是被散射而不是被吸收的可能性, 进行散射判决。如果随机概率小于散射反照率, 则光子会发生散射。具体表达式如下:

$$\omega_0 = \frac{b(\lambda)}{c(\lambda)}$$

( 11 )

假设接收器的半径为 $r$ , 视场角为 $\theta$ , 则判断接收的判别式为<sup>[17]</sup>

$$\begin{cases} x_1^2 + y_1^2 \leq r^2 \\ \frac{\sqrt{(u_{x1})^2 + (u_{y1})^2}}{u_{z1}} \leq \tan \frac{\theta}{2} \end{cases}$$

( 12 )

记录并接收光子的信息, 并开始重复下一个光子, 直到所有光子计算完成。除了最常用的 HG 相位散射函数, 本模型还应用了水下无线光信道的其他相位散射函数, 如表 1 所示。

表 1 几种应用于水下无线光信道的相位散射函数

相位散射函数	适用场景	优点	局限性
Petzold 平均粒子相位函数	纯净海水	基于大量实测数据所得, 具有权威性	参数固定不可调, 无法适用于复杂水体
TTHG 相位函数 <sup>[18]</sup>	包含多种散射体的复杂介质	兼具多峰拟合能力与参数可调性, 显著提升后向散射精度	计算复杂度高, 依赖实测数据优化
Fournier-Forand 相位函数 <sup>[19]</sup>	多分散粒子体系	基于 Mie 理论物理推导, 明确关联粒子折射率与尺寸参数, 具有高理论精度	计算效率低, 需预先确定折射率和粒径分布参数
Sahu 和 Shanmugan 体积散射函数 <sup>[20]</sup>	浑浊水体	采用多项式近似显著降低计算复杂度, 便于快速分析接收光强分布	高散射角时精度不足

使用蒙特卡洛方法对水下无线光传播仿真, 可对大量光子进行水下随机传播状态追踪计算, 从而

估计计算出最终传播特性。图 2 为蒙特卡洛方法对光子传播进行模拟仿真的流程图。

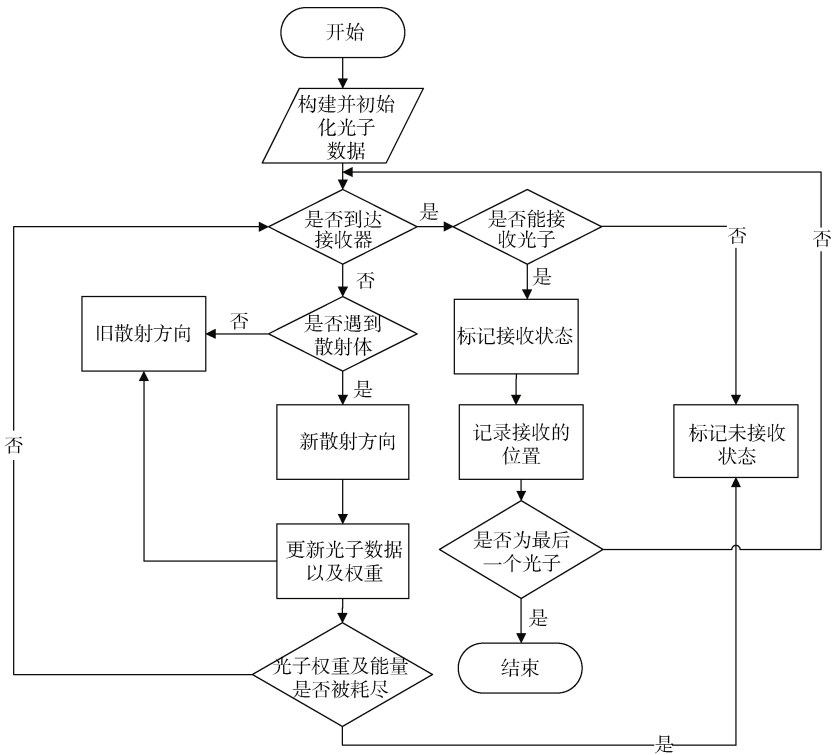


图 2 使用蒙特卡洛对光子进行模拟仿真流程图  
Fig. 2 Using Monte Carlo to simulate photons



## 2 水下光信道仿真实验与特性分析

### 2.1 快速蒙特卡洛仿真方法

蒙特卡洛方法是建立水下无线光信道模型的常用手段。不同水质类型情况复杂,跟踪光子数多,光子随各种衰减效应而发生泯灭或者散射等情况随机性较强,所需处理数据较多,对计算机性能要求高,且计算量大,所需时间较长。本文对蒙特卡洛方法计算进行了优化,有效降低建模仿真时间。

本文针对光子传播过程中运动轨迹复杂的问题,在仿真开始先进行预加载,给出光子数据存储空间,并设置光子能量阈值,再遍历每个光子运动轨迹,剔除能量低于所设阈值或者因碰撞散射出接收区域的光子后,将剩余光子运动轨迹数据依次储存在预加载的空间中,最后再将存储空间中的数据进行整合,得到仿真结果。

### 2.2 不同水质类型的水下光信道仿真分析

由于不同水域的水下物质和水质不同,为了便于研究水下无线光通信,大部分情况下通常将水质分为纯净水、海水、浑浊水和港口水。4 种水质类型的光子吸收、散射和衰减系数如表 2 所示。

表 2 不同水质下光子吸收、散射和衰减系数

Table 2 Photon absorption, scattering and attenuation coefficients under different water quality

海水类型	吸收系数 $a$	散射系数 $b$	衰减系数 $c$
纯净水	0.053	0.003	0.056
海水	0.114	0.037	0.151
浑浊水	0.179	0.219	0.398
港口水	0.295	1.875	2.17

根据表 2 中不同水质下光子吸收、散射和衰减系数,对纯净水、海水、浑浊水和港口水 4 种不同水质类型进行分析。本节将按照 4 种水质下不同发散角、水下不同距离等进行全面仿真分析。

#### 2.2.1 4 种水质下不同光源不同发散角的光源辐射分析

本文可选择 2 种不同光源,分别为发光二极管 (Light Emitting Diode, LED) 和激光器 (Laser Diode, LD),在固定距离为 5 m 时,采用发散角为  $10^\circ$ ,  $20^\circ$ ,  $30^\circ$ ,  $40^\circ$  的 LED 对 4 种水质类型下的光源辐射进行观测。如图 3 所示,由于 LED 的发散角较大,本文对发散角为  $40^\circ$  的 LED 在 4 种水质下的光源辐射情况进行了仿真分析。如图 4 所示,

由于激光器聚焦性更强,能量更大,光源辐射更集中,因此仿真分析了发散角为  $10^\circ$  的 4 种水质类型下的光源辐射。

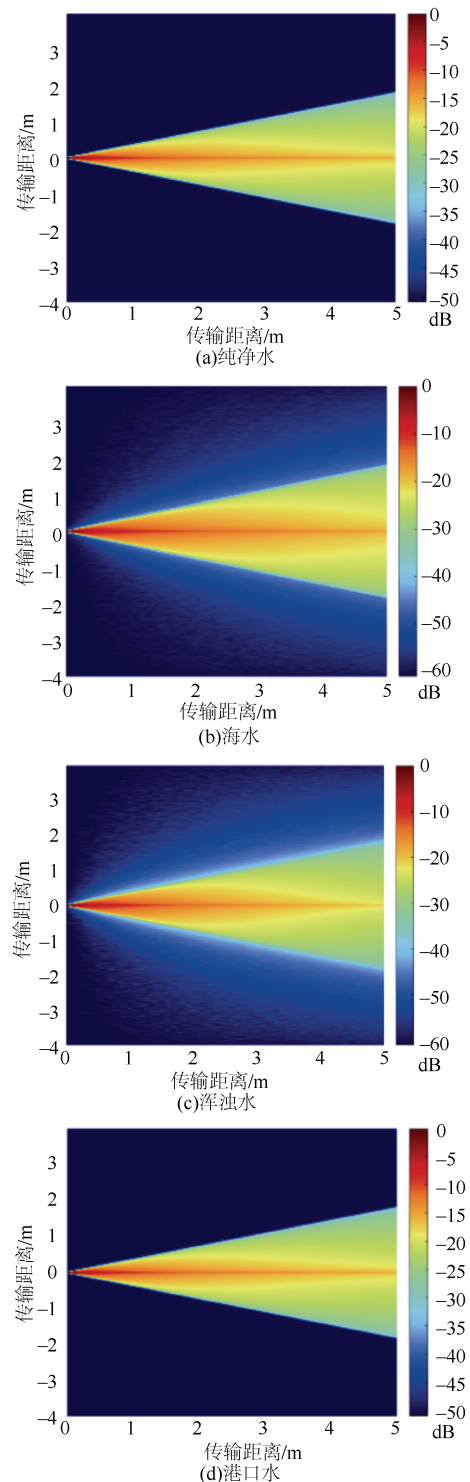


图 3 发散角为  $40^\circ$  的 LED 光源在不同水质下的辐射情况

Fig. 3 Radiation of LED light source at divergence angle of  $40^\circ$  under various water quality

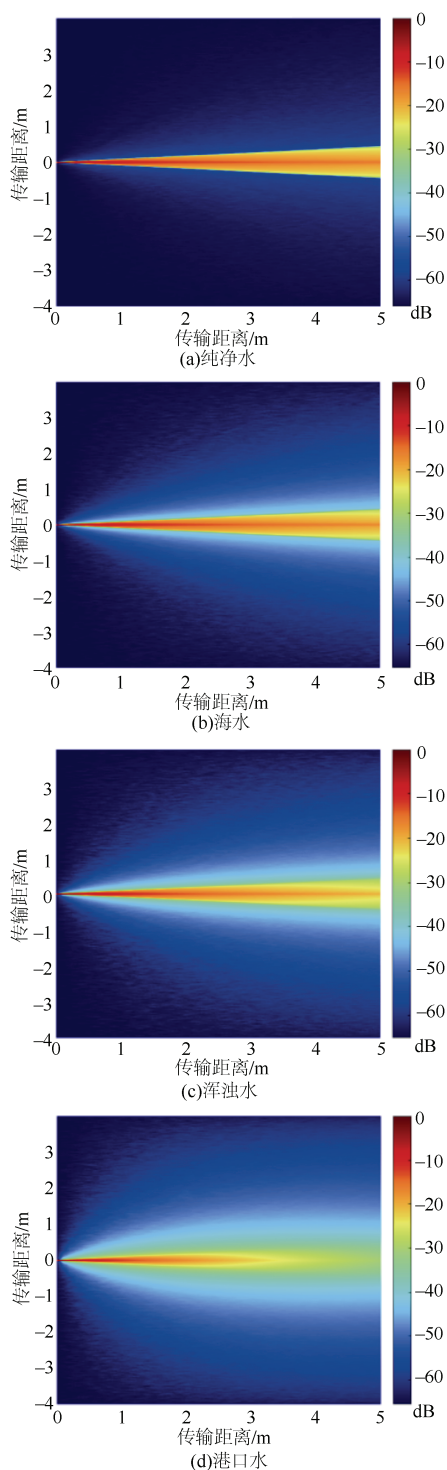


图4 发散角为 $10^\circ$ 的LD光源在不同水质下的辐射情况  
Fig. 4 Radiation of LD light source at divergence angle of  $10^\circ$  under various water quality

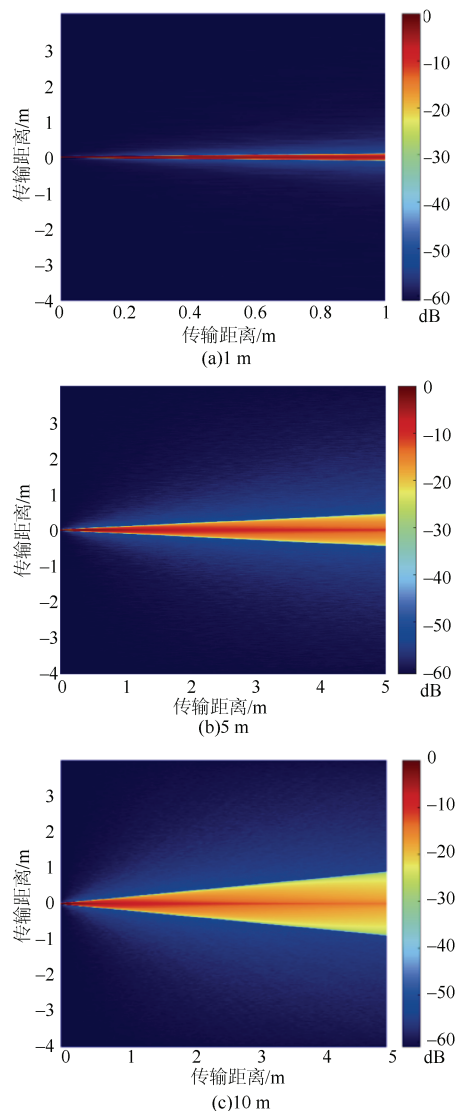
从上图可看出, LED 的辐射情况均随着发散角不断增大, 其光源辐射区域随之增大, 光功率密度随之减小。纯净水下, 由于没有光子传播障碍物的影响, 2 种不同光源其光功率密度较为集中, 海

水、浑浊水下光功率密度次之, 港口水中由于障碍物多, 且气泡、水流等影响较大, 其光功率密度最小。LD 因其聚焦性更强、能量更大和光源辐射较为集中, 在传播相同距离时, 所接收到的光功率较于 LED 会更大。

## 2.2.2 不同水质 LED、LD 不同距离的光源辐射分析

本节将发散角设置为  $10^\circ$ , 对 LED 和 LD 在 1 m, 5 m, 10 m, 20 m 时不同水质的光功率密度分布进行仿真, 选取纯净水和港口水作为典型水质, 得到以下结果。

图 5-6 为 LED 在 2 种典型水质下不同距离的光功率密度分布情况, 图 7-8 为 LD 在 2 种典型水质下不同距离的光功率密度分布情况。随着距离的增大, 可以看出港口水因其水质复杂而使得光功率密度更为分散。



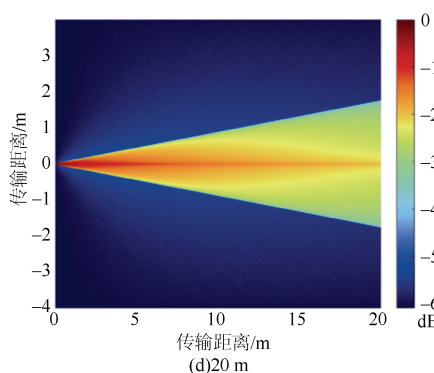


图 5 LED 在纯净水不同距离的光源辐射情况  
Fig. 5 Radiation of LED light source at different distances in pure water

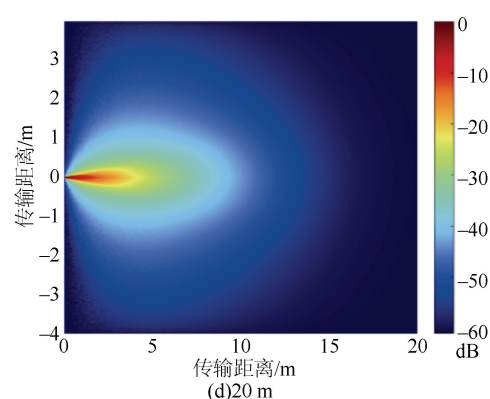
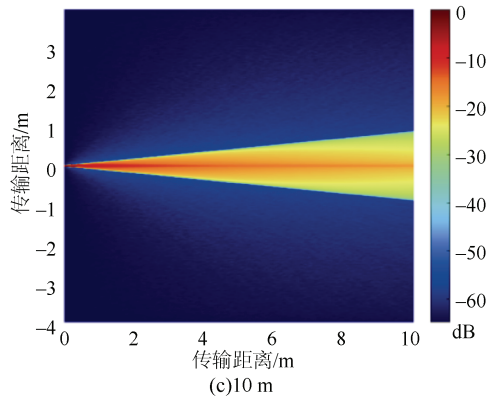
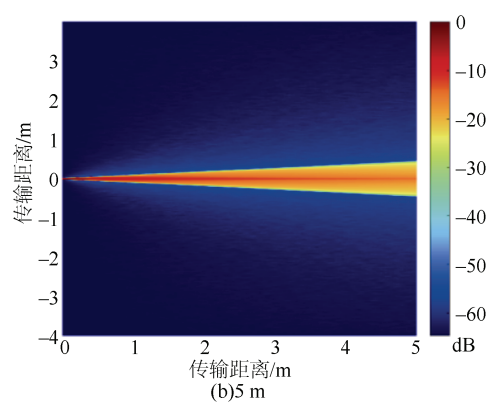
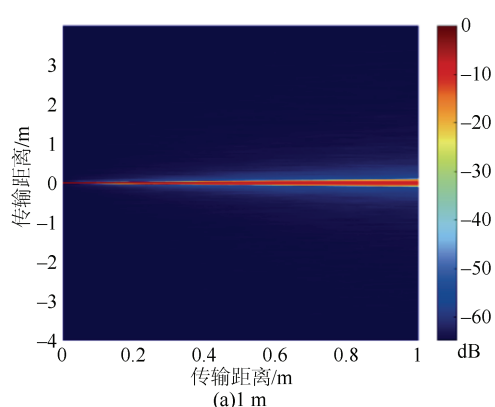
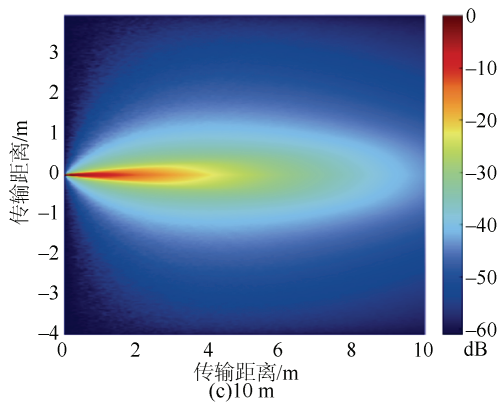
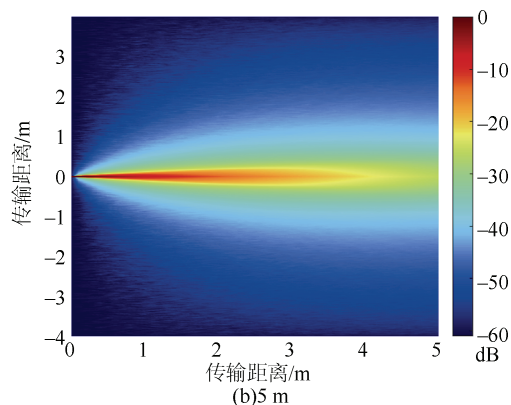
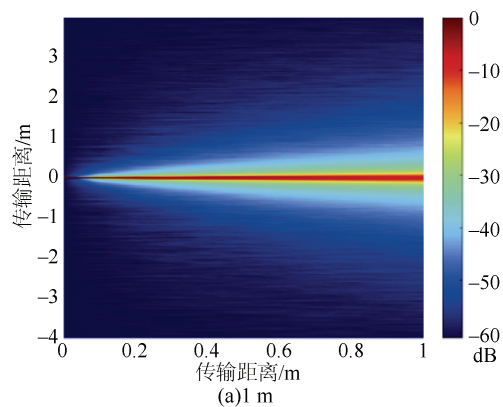


图 6 LED 在港口水不同距离的光源辐射情况  
Fig. 6 Radiation of LED light source at different distances in port water





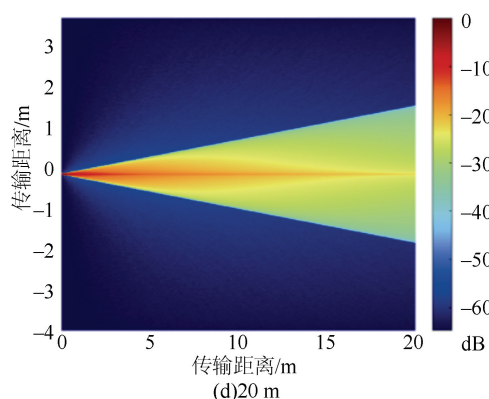


图7 LD在纯净水不同距离的光源辐射情况  
Fig. 7 Radiation of LD light source at different distances in pure water

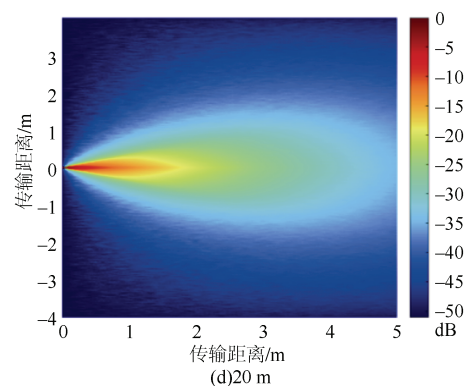
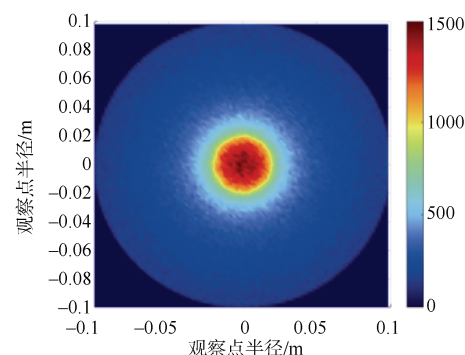
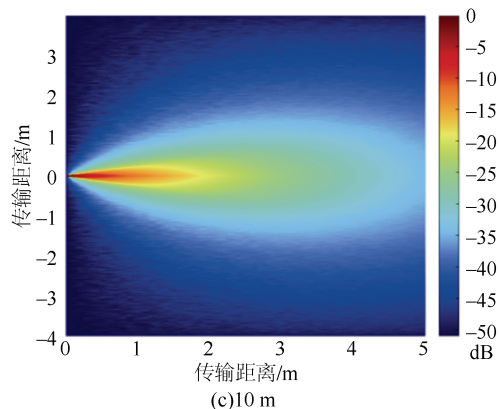
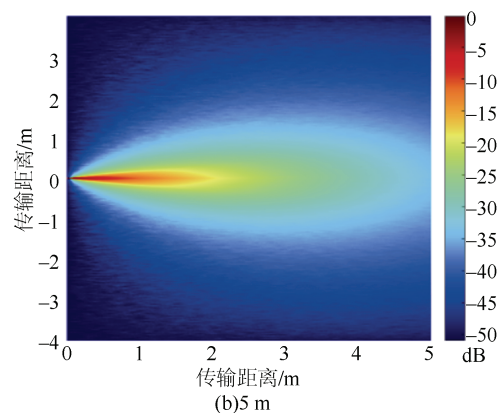
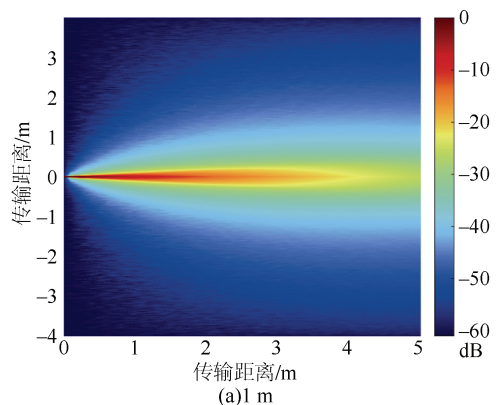


图8 LD在港口水不同距离的光源辐射情况  
Fig. 8 Radiation of LD light source at different distances in port water

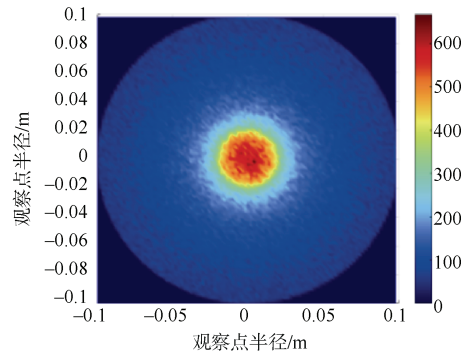
### 2.2.3 4种水质类型下LED光功率密度分布分析

LED与LD在4种不同水质中所表现的光功率密度分布较为相似,本节设置光源为LED,发射光子数为 $10^7$ ,发散角为 $10^\circ$ ,光源半径为20 mm,接收半径为0.1 m,距离为4 m, 8 m, 12 m, 16 m的4种不同水质类型下光功率密度分布情况,得到其接收的光子数。

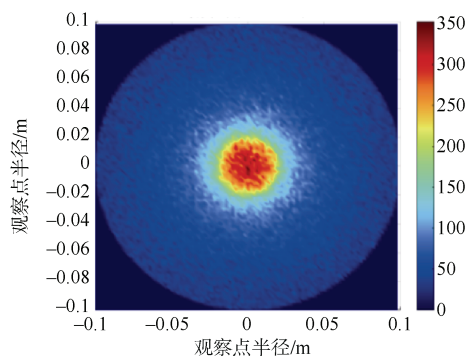
由图9~12可看出,在相同距离下,随着水质浑浊程度的增加,所接收到的光子数逐渐减小;在相同水质中,随着传输距离的增加,所接收到的光子数逐渐减小。



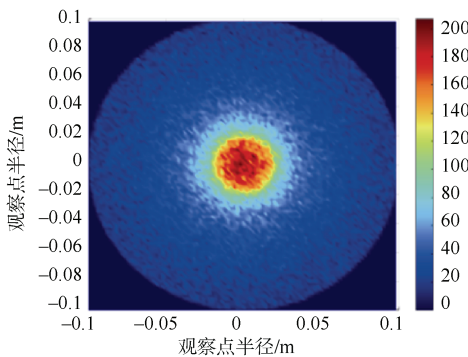
(a)观察点1: 半径0.1 m, 距离4 m, 接收光子数2 279 113个



(b)观察点2: 半径0.1 m, 距离8 m, 接收光子数910 225个



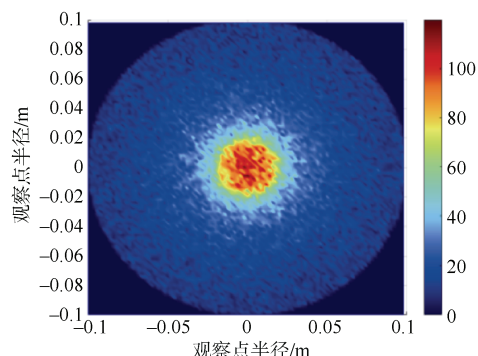
(c)观察点3: 半径0.1 m, 距离12 m,  
接收光子数486 226个



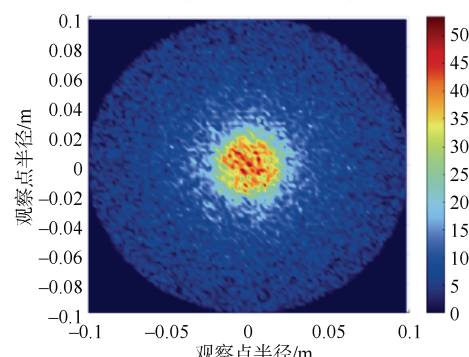
(d)观察点4: 半径0.1 m, 距离16 m,  
接收光子数291 310个

图9 LED在纯净水不同距离的光功率密度分布情况

Fig. 9 Distribution of optical power density of LED at different distances in pure water



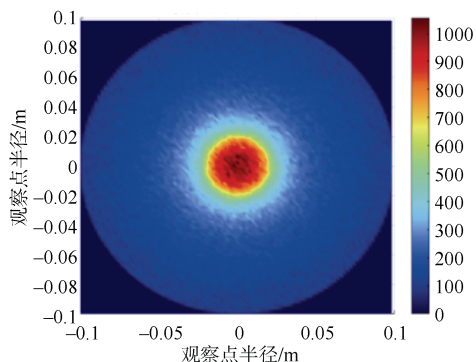
(c)观察点3: 半径0.1 m, 距离12 m,  
接收光子数: 169 994个



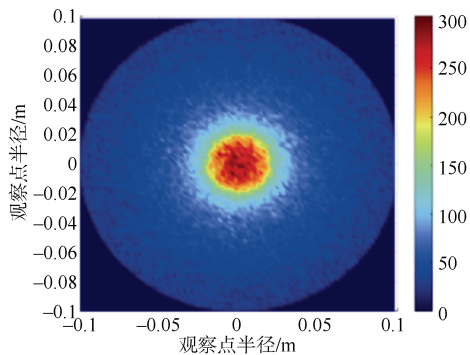
(d)观察点4: 半径0.1 m, 距离16 m,  
接收光子数70 018个

图10 LED在海水不同距离的光功率密度分布情况

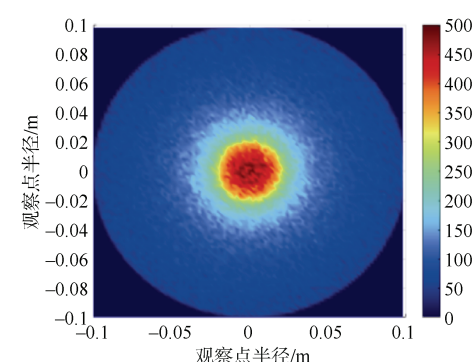
Fig. 10 Distribution of optical power density of LED at different distances in seawater



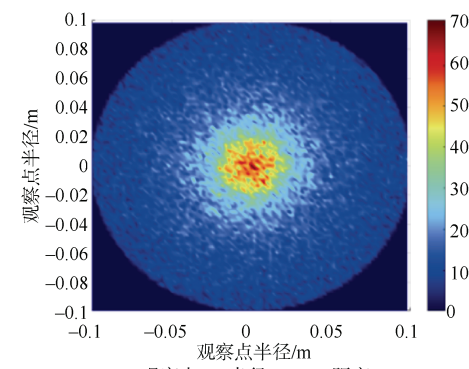
(a)观察点1: 半径0.1 m, 距离4 m,  
接收光子数1 650 573个



(b)观察点2: 半径0.1 m, 距离8 m,  
接收光子数460 475个



(a)观察点1: 半径0.1 m, 距离4 m,  
接收光子数1 125 791个



(b)观察点2: 半径0.1 m, 距离8 m,  
接收光子数189 798个



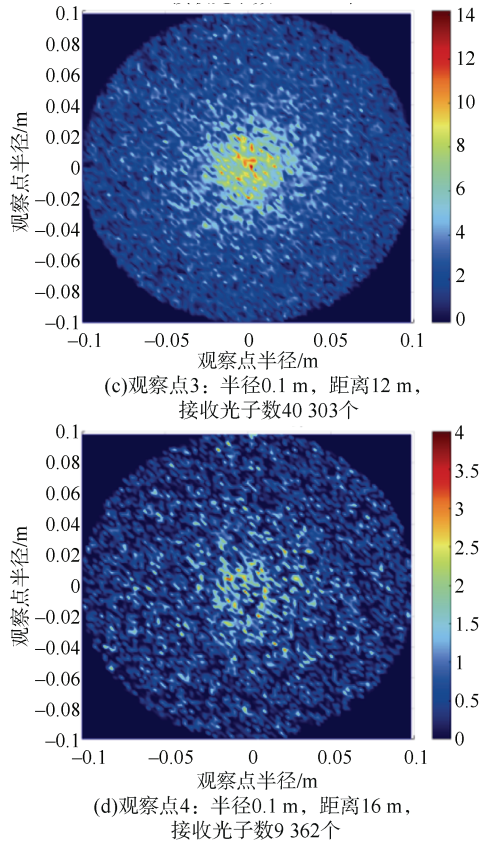


图 11 LED 在浑浊水不同距离的光功率密度分布情况  
Fig. 11 Distribution of optical power density of LED at different distances in turbid water

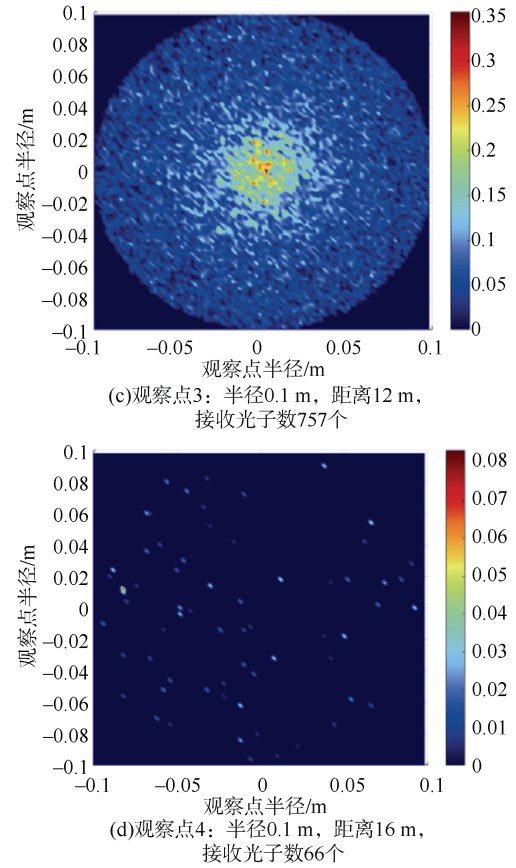
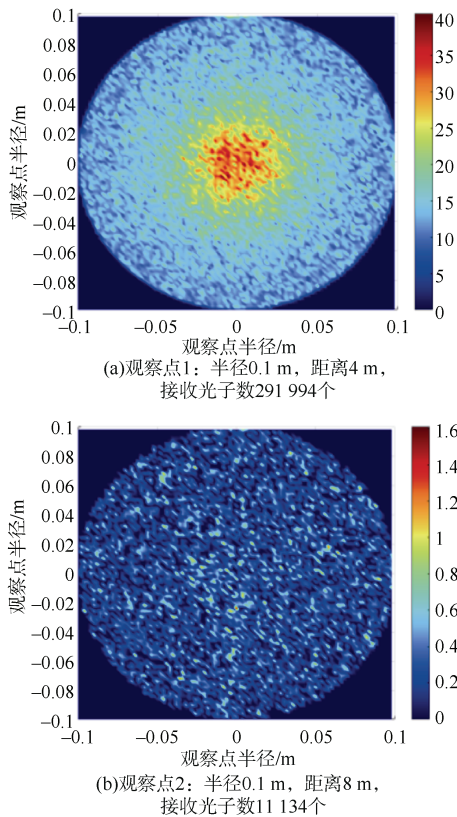
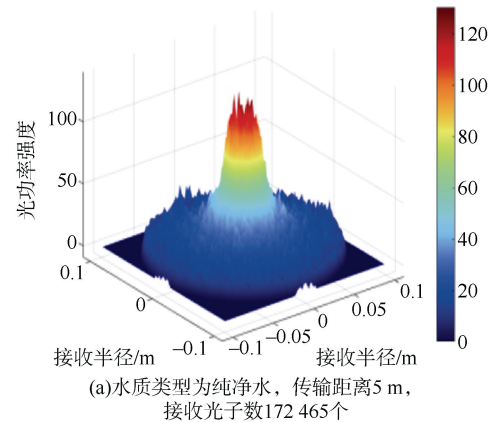


图 12 LED 在港口水不同距离的光功率密度分布情况  
Fig. 12 Distribution of optical power density of LED at different distances in port water



为更直观得到 4 种不同水质类型下光功率密度分布情况, 现将参数进行改变, 光源为 LED, 发射光子数为  $10^6$ , 发散角为  $10^\circ$ , 光源半径为 20 mm, 接收半径为 0.1 m。图 13 为 4 种不同水质类型下三维光功率密度分布情况, 图 14 为 4 种不同水质类型下光子散射次数情况, 随着水质浑浊程度的增加, 光子散射次数增加。



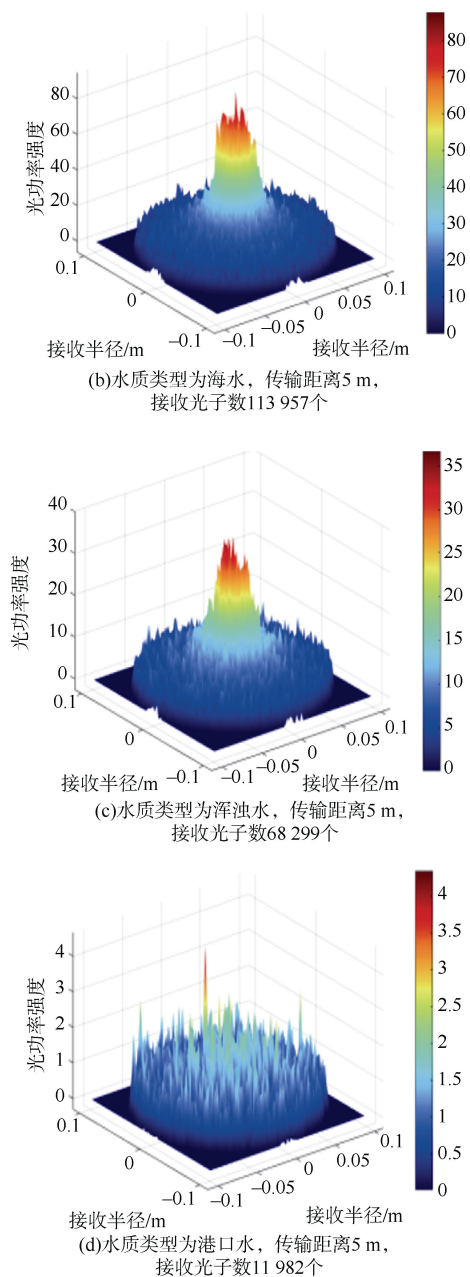


图 13 三维光功率密度分布情况  
Fig. 13 Three-dimensional optical power density distribution

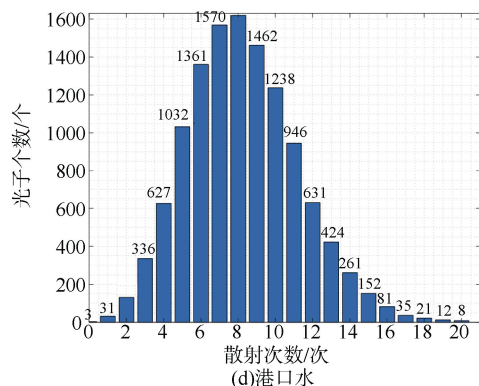
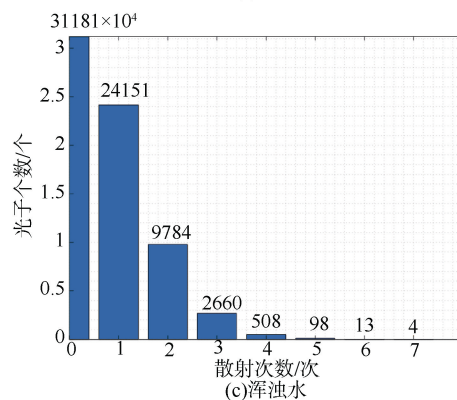
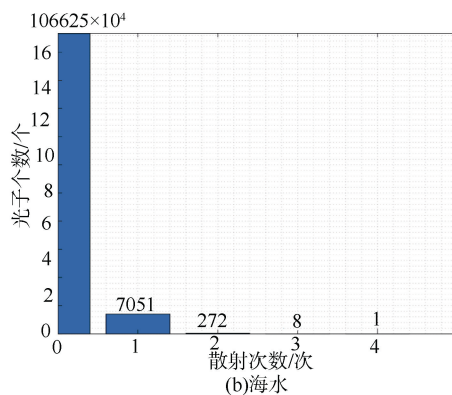
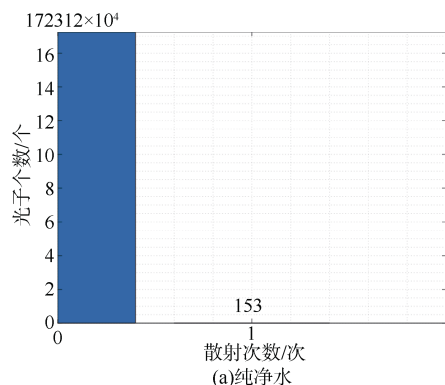


图 14 光子散射次数情况

Fig. 14 Number of photon scattering

#### 2.2.4 不同水质类型的信道特性仿真分析

基于蒙特卡洛方法和比尔-朗伯法, 对光子轨迹进行追踪, 其功率随发射功率变化曲线如图 15 和图 16 所示。可以看出, 基于蒙特卡洛的接收光功率与比尔朗伯定律理论解的光功率趋于一致。

蒙特卡洛方法通过有效模拟了海水吸收、悬浮颗粒散射等物理因素对光束传播的影响, 而比尔-朗伯定律则揭示了路径损耗与传输距离的指数关系。两者在数值解上的趋同性, 印证了此方法在复杂信道中的适用性, 为后续对水下无线光信道的研究奠定理论基础。

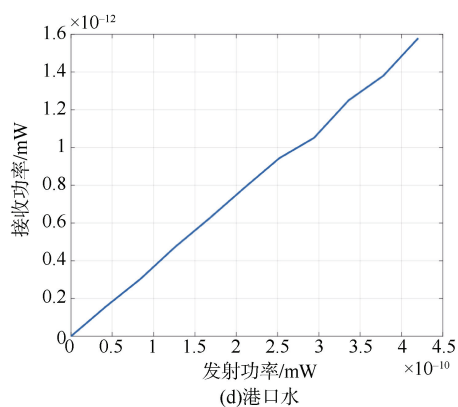
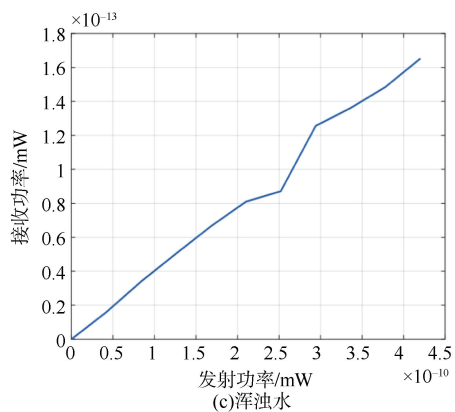
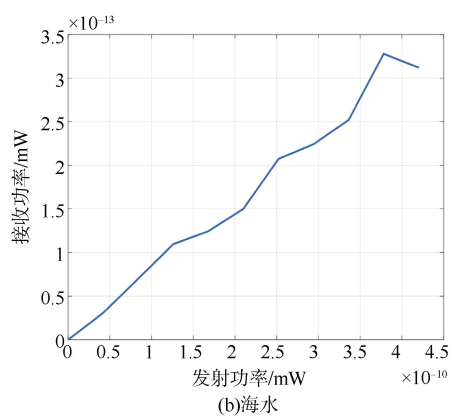
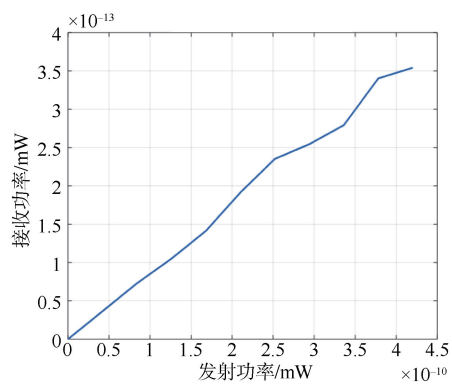


图 15 蒙特卡洛光子追踪接收光功率曲线  
Fig. 15 Optical power curve based on Monte Carlo method

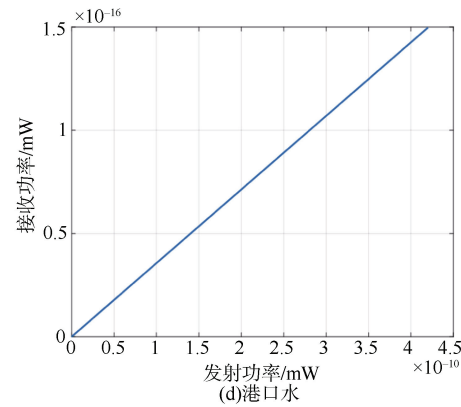
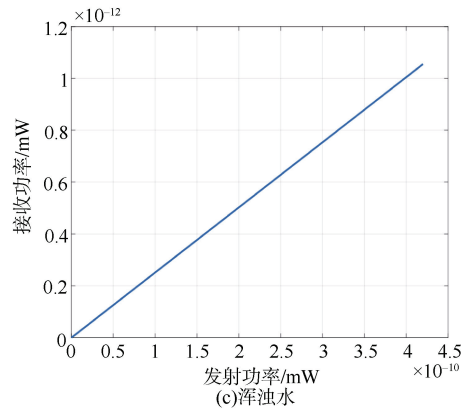
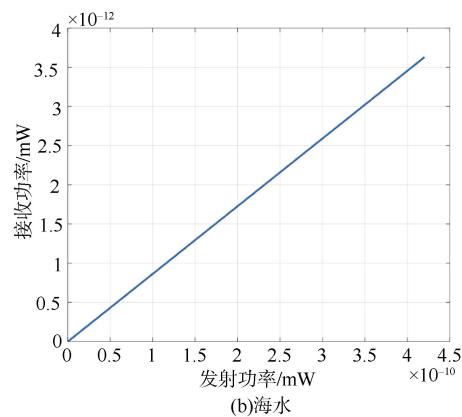
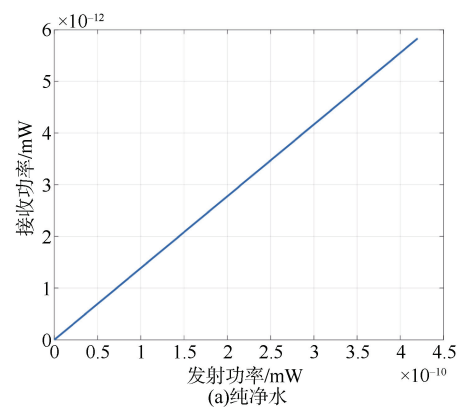


图 16 比尔-朗伯理论计算光功率曲线  
Fig. 16 Optical power curve calculated by Lambert-Beer theory

进一步对不同条件下的水下光信道冲激响应进行仿真。

图 17 为 LED 在海水传输距离 20 m、接收半径 100 mm 时不同接收视场角的冲激响应, 根据公式 (12) 的光子接收条件, 光子大多在视场角为  $20^\circ$  以内被接收, 视场角为  $20^\circ$ ,  $40^\circ$ ,  $180^\circ$  时的冲激响应变化不大。

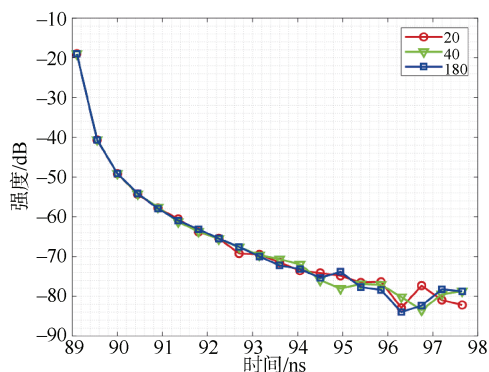


图 17 LED 在海水传输距离 20 m、接收半径 100 mm 时不同接收视场角的冲激响应

Fig. 17 Impulse response of LED at different receiving field angles when seawater transmission distance is 20 m and receiving radius is 100 mm

图 18 为 LED 在海水传输距离 20 m、视场角为  $180^\circ$  时不同接收半径的冲激响应, 接收半径为 100 mm 时, 只有部分光子被接收, 接收光强较小; 接收半径为 250 mm 时, 光子传输 20 m 后大多能被接收, 因此当接收半径增长到 500 mm 时接收光强变化较小。

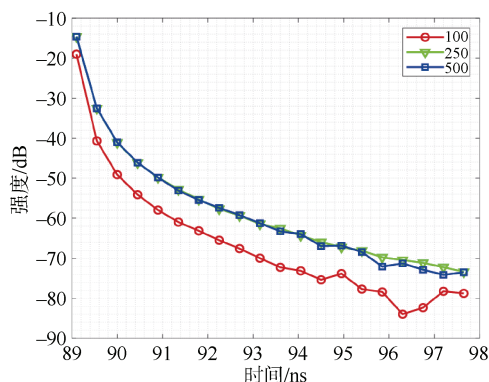


图 18 LED 在海水传输距离 20 m、视场角为  $180^\circ$  时不同接收半径的冲激响应

Fig. 18 Impulse response of LED with different receiving radii when seawater transmission distance is 20 m and field angle is  $180^\circ$

图 19 为 LED 在海水视场角为  $180^\circ$ 、接收半径为 100 mm 时不同传输距离的冲激响应, 传输距离越短, 接收光强越大, 因此相对时间较小时, 传输距离为 10 m 接收光强最大, 15 m 次之, 20 m 最小; 随着传输距离的增加, 散射次数也会增加, 实际传输距离则会更长, 因此相对时间较大时, 传输距离更远时接收光强更大。

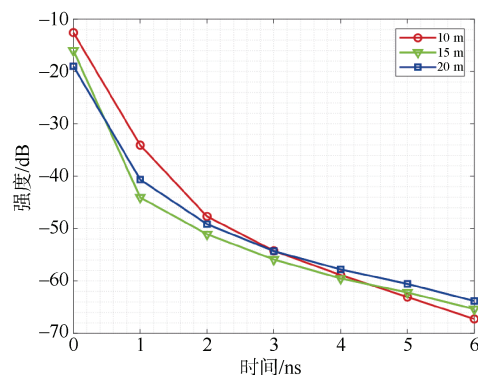


图 19 LED 在海水接收视场角为  $180^\circ$ 、接收半径为 100 mm 时不同传输距离的冲激响应

Fig. 19 Impulse response of LED at different transmission distances when receiving field angle of seawater is  $180^\circ$  and receiving radius is 100 mm

图 20 为 LED 在传输距离 5 m、视场角为  $180^\circ$ 、接收半径为 100 mm 时不同水质类型的冲激响应, 随着海水、浑浊水、港口水散射系数的增加, 光子的实际传输距离增大, 因此传输时间较长时, 港口水的接收光强大于浑浊水和海水; 而时间较短时, 由于港口水的吸收散射较大, 接收光强远小于海水和浑浊水。

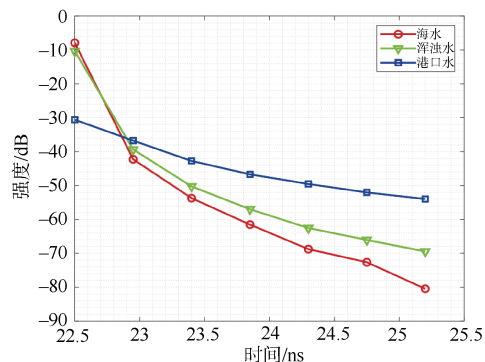


图 20 LED 在传输距离 5 m、视场角为  $180^\circ$ 、接收半径为 100 mm 时不同水质类型的冲激响应

Fig. 20 Impulse response of LED with different water quality types when transmission distance is 5 m, field angle is  $180^\circ$  and receiving radius is 100 mm



### 3 结束语

为解决蒙特卡洛方法计算量大、效率低的问题,本文基于蒙特卡洛仿真方法对水下无线光信道模型进行了改进,提出了一种快速蒙特卡洛水下光信道仿真方法。该方法通过预加载光子数据空间,并按顺序将光子运动轨迹信息储存于数据空间中,同时结合比尔朗伯定律将吸收和散射造成的衰减纳入到光子的非碰撞传播损耗中,得到了不同水质、湍流情况、盐度梯度、气泡水平、噪声干扰等方面影响下三维光功率密度分布、光子散射次数、光子运动轨迹等传播过程及结果。进一步分析了水下无线光信道特性及冲激响应。在下一步工作中,仍需在各种实际水下环境中进行模型验证,对不同类型情况的信道模型进行深度优化,为后续对水下无线光信道的研究奠定理论基础。

### 参考文献

- [1] 刘妹琴,韩学艳,张森林,等.基于水下传感器网络的目标跟踪技术研究现状与展望[J].自动化学报,2021,47(2):235-251.
- [2] CHOUDHARY A, JAGADEESH V K, MUTHUCHIDAMBARANATHAN P. Pathloss analysis of NLOS underwater wireless optical communication channel[C]// 2014 International Conference on Electronics and Communication Systems (ICECS). Coimbatore: IEEE, 2014.
- [3] KOU L L, ZHANG J L, ZHANG P W, et al. Composite channel modeling for underwater optical wireless communication and analysis of multiple scattering characteristics[J]. Optics Express, 2023, 31(7): 11320-11334.
- [4] CAI R J, ZHANG M, DAI D X, et al. Analysis of the underwater wireless optical communication channel based on a comprehensive multiparameter model[J]. Applied Sciences, 2021, 11(13): 11136051.
- [5] 叶鹏飞,张鹏,伍文韬,等.基于机器学习的水下光通信信道估计与信号解调算法仿真研究[J].光子·激光,2025,36(2):200-207.
- [6] 韩笑天,廖佩璇,李鹏,等.蒙特卡洛法仿真激光在水下信道中的传输特性[J].光通信研究,2023(4):53-59.
- [7] DU Z H, CHEN Q R, XU J. A fast Monte Carlo simulation method for underwater wireless optical channels with large attenuation length[C]// 2023 IEEE/CIC International Conference on Communications in China (ICCC Workshops). Dalian: IEEE, 2023.
- [8] PATRO S, GIRI R K. Monte Carlo simulation of underwater optical communication system with optimized coefficients[C]// 2024 IEEE 1st International Conference on Advances in Signal Processing, Power, Communication, and Computing (ASPCC). Bhubaneswar: IEEE, 2024.
- [9] 张建磊,寇琳琳,王洁,等.水下无线光信道并行仿真方法研究[J].激光与光电子学进展,2022,59(19):115-124.
- [10] 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.
- [11] 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.
- [12] LI Y L, LI S X, JIANG P C, et al. Controlled alignment imaging optical MIMO communication system based on light spot detection of arrayed light sources[J]. Optics Express, 2024, 32(17): 30393-30406.
- [13] CHEN F, YANG D S, MO S Q, et al. A method for estimating the direction of arrival without knowing the source number using acoustic vector sensor arrays[J]. IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing, 2024, 62: 1001016.
- [14] 陈聪.水下悬浮粒子对光的散射特性研究[D].黑龙江:哈尔滨工程大学,2011.
- [15] CHAUDHARY S. Performance investigation of a VLC-PDM based UWOC system under adverse underwater conditions with varying chlorophyll levels[J]. Optics Communications, 2024, 573: 131025.
- [16] REN R R, ZHU M, CUI K, et al. Simulation analysis of underwater wireless optical communication based on Monte Carlo method and experimental research in complex hydrological environment[J]. AIP Advances, 2023, 13(5): 055226.
- [17] 吴琼,王博,王涛,等.基于蒙特卡洛法的水下无线光传输特性分析[J].光子学报,2021,50(4):22-31.
- [18] 刘陕陕,李岳衡,黄平,等.散射相函数对水下无线光通信系统检测性能的影响[J].激光与光电子学进展,2021,58(21):344-355.
- [19] MARINYUK V V, SHEBERSTOV S V. Asymptotic optical attenuation in sea water[J]. Journal of Quantitative Spectroscopy and Radiative Transfer, 2023, 295: 108419.
- [20] SAHU S K, SHANMUGAM P. 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.

(责任编辑:曹晓霖)