



激光在水下信道中的后向散射特性研究

葛文敏¹, 陈宝康¹, 徐敬^{1,2}

(1. 浙江大学海洋学院光通信实验室, 浙江 舟山 316021;

2. 浙江大学海南研究院, 海南 三亚 572024)

摘 要: 双向水下无线光通信 (UWOC) 系统中存在的后向散射光子会干扰正常的光通信信号, 降低接收信号信噪比 (SNR), 甚至导致接收机内部探测器的光学饱和。因此, 深入研究后向散射光子的功率空间分布特性和到达角分布规律对水下双向无线光通信系统具有重要意义。提出了一种改进的蒙特卡罗 (MC) 仿真方法, 不直接增大探测器靶面面积, 而通过统计面积更大的圆环内的光子特性来代替探测器靶面内的光子特性, 可缩减仿真时间 58% 以上。仿真综合考虑了典型水质参数以及不同光源发散角下后向散射光功率分布和光子到达角分布情况, 同时搭建了实验平台进行验证。仿真结果表明, 光源发散角小于 60° 时, 后向散射光功率分布以及光子到达角分布情况均没有明显区别。实验结果表明, 随着氢氧化镁浓度上升, 其后向散射光功率相对更高。光源发散角分别为 3° 和 48° 时, 两者的后向散射光功率分布曲线基本重合, 与仿真结果类似。通过仿真和实验方法证实了水体参数是影响后向散射光分布的主要因素, 而光源发散角的变化对系统后向散射特性影响有限。该发现可为双向 UWOC 系统接收端设计提供参考。

关键词: 双向水下无线光通信; Monte Carlo 方法; 后向散射; 光功率分布; 光子到达角分布

中图分类号: TN929

文献标志码: A

doi: 10.11959/j.issn.1000-0801.2025230

Study on the backscattering characteristics of laser in the underwater channel

GE Wenmin¹, CHEN Baokang¹, XU Jing^{1,2}

1. Optical Communications Laboratory, Ocean College, Zhejiang University, Zhoushan 316021, China

2. Hainan Institute of Zhejiang University, Sanya 572024, China

Abstract: Backscattered photons in bidirectional underwater wireless optical communication (UWOC) systems can interfere with optical signals, reduce the signal-to-noise ratio (SNR) at the receiver, and even cause optical saturation in the detector. Therefore, in-depth research on the power distribution and arrival angle distribution of backscattered photons holds significant importance for bidirectional UWOC systems. An improved Monte Carlo (MC) simulation method was proposed. Instead of directly enlarging the detector's target area, photon characteristics within a larger an-

收稿日期: 2025-06-29; 修回日期: 2025-09-12

通信作者: 徐敬, jxu-optics@zju.edu.cn

基金项目: 国家重点研发计划项目 (No.2022YFC2808100)

Foundation Item: The National Key Research and Development Program of China (No.2022YFC2808100)



nular region were statistically analyzed to approximate those within the detector's target area. This approach was capable of reducing the simulation time by more than 58%. The power distribution and photon arrival angle distribution of backscattered photons for different water types and light source divergence angles were comprehensively analyzed. An experimental platform was also established for validation. Simulation results demonstrate that when the light source divergence angle is below 60° , there is no significant difference in the backscattered light power distribution or photon arrival angle distribution. Experimental results indicate that as magnesium hydroxide concentration increases, the backscattered light power becomes relatively higher. When the light source divergence angles are 3° and 48° , their backscattered light power distribution curves nearly overlap, aligning with simulation results. Through simulations and experiments, this study confirms that water types are the primary factor influencing backscattered light distribution, while the light source divergence angle has limited impact on system backscattering characteristics. This finding provides valuable references for the design of receivers in bidirectional UWOC systems.

Key words: bidirectional UWOC, MC method, backscattering, optical power distribution, photon arrival angle distribution

0 引言

随着人们对海洋资源开发和水下环境监测需求的不断提升,海洋观测技术得到了长足的发展^[1-2]。而海洋观测技术的发展进一步推动了水下通信技术的发展。水下无线光通信(underwater wireless optical communication, UWOC)以光波作为载波,通信时延小,通信速率高,可用于传输海量的海洋观测数据,其低时延特性也可保障水下作业的实时性^[3-6]。

目前,对UWOC的研究主要集中在单向传输。在实际应用中,通信系统通常需要具备双向传输能力^[7-8],以便更好地接入以太网系统。双向传输可通过反馈重传机制显著提升数据传输的可靠性。在双向传输场景中,通信终端的接收机可能接收到来自同侧相邻发射机的后向散射光信号。这种后向散射光信号会作为一种背景噪声,干扰正常的光通信。当后向散射光强度达到一定水平时,不仅会引起信号严重失真,还可能导致接收机内部探测器的光学饱和。因此,深入研究后向散射对水下双向无线光通信系统的影响具有重要意义。

目前已有研究者对双向UWOC系统的后向散射问题进行了研究。2018年Han等^[9]基于蒙特卡

罗(Monte Carlo, MC)方法提出了UWOC系统的后向散射仿真模型;同年,Sahu等^[10]基于Sahu-Shanmugam散射相函数分析了散射效应对UWOC系统性能的影响;2023年Wang等^[11]采用蒙特卡罗方法对全双工UWOC系统的自干扰问题进行了数值模拟。但上述研究均以仿真为主。本文基于蒙特卡罗方法,对后向散射光在发射平面的光功率分布和光子到达角分布情况进行了分析,同时通过实验对仿真结果进行了验证,为设计UWOC系统提供参考。

1 仿真模型

在光束传播过程中,海水中的浮游植物以及碎石、岩屑等微粒会与光子发生弹性散射,进而改变光子的传播方向。由于光子经散射后在各方向上的散射角随机分布,通常借助散射相函数 $\tilde{\beta}(\theta, \lambda)$ 描述散射角的概率分布特性^[12]:

$$\tilde{\beta}(\theta, g) = \frac{\beta(\theta, g)}{b(\lambda)} \quad (1)$$

其中, θ 为散射角, $b(\lambda)$ 为单一波长 λ 的光在水中传输的散射系数, $\beta(\theta, \lambda)$ 为体散射函数,反映光子被散射后在空间上的强度分布。对于逼近实际相函数的分析计算式,目前使用广泛的是Henyey-Greenstein(HG)函数,其形式如下^[13-14]:

$$\tilde{\beta}(\theta, g) = \frac{1}{4\pi} \frac{1-g^2}{(1+g^2-2g\cos\theta)^{1.5}} \quad (2)$$

其中, g 是用来调整前向散射与后向散射相对大小的因子, g 越接近 1 则光子更有可能向前散射, g 越接近 -1 则更有可能向后散射。但 HG 散射相函数的缺点是其在小角度散射角的数值与实测值相差过大, 后续将基于 1972 年 Theodore^[15] 在不同水体中的实际测量结果分析光束的后向散射特性。

MC 方法是一种基于概率和统计理论的计算方法, 其通过计算机模拟大量重复的试验并对结果进行统计, 从而获得问题的近似解^[16-18]。具体到 UWOC 系统中, 首先, MC 仿真根据光源的光照强度模型随机产生大量光子; 然后, 根据设置的海水吸收、散射系数以及散射相函数, 模拟光子在水下信道的传输过程, 跟踪并记录每个光子的属性参数变化; 最后, 在给定距离处, 设置探测器接收这些光子, 统计光子能量、位置、经历路径、到达角等属性。通过设定不同的发射端和接收端参数, 如光源的尺寸、光照强度概率密度分布、波长、发散角、接收端口径以及水下信道的吸收、衰减系数和散射相函数等, MC 仿真可以分析到达接收端光子的能量密度分布、光子到达角分布以及水下信道的脉冲响应, 从而为设计 UWOC 系统提供依据。MC 仿真流程如图 1 所示。

光子后向散射传输示意图如图 2 所示, 系统包含一个发射端 TX 和一个接收端 RX, 两者都位于 $Z=0$ 平面, 且两者之间的偏移距离为 L 。发射机光源为实际中常用的半导体激光二极管 (laser diode, LD), LD 所发出的光束为高斯光束, 光强的横截面满足高斯分布。接收端 RX 的半径为 r , 接收视场角为 $\pm 90^\circ$ 。仿真主要分析不同水质和不同光源发散角下光子的后向散射传输状态。不同水质主要分为清洁海水、沿岸海水和港口海水, 其对应的吸收、散射、衰减系数以及散射相

函数采用 Theodore 利用波长为 530 nm 的光束测得的数据。光源发散全角依次设置为 1° 、 20° 、 40° 、 60° 、 120° 。

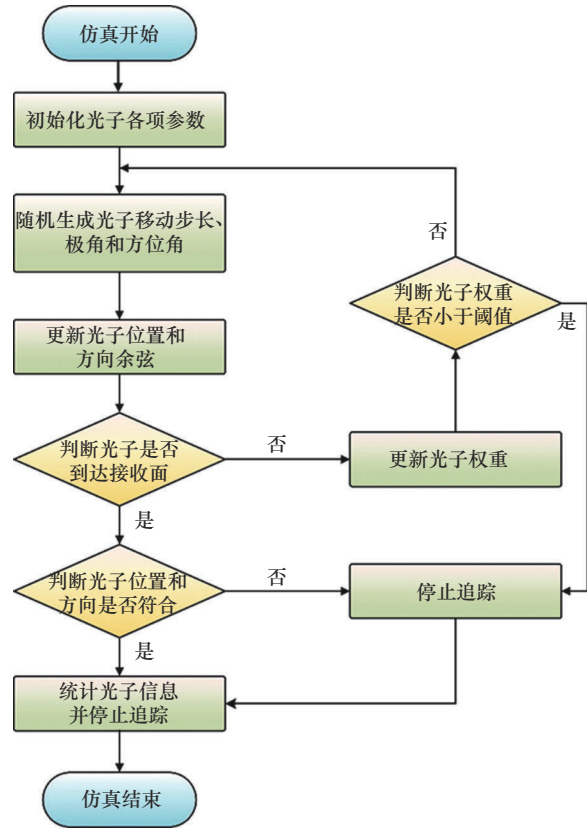


图1 MC 仿真流程

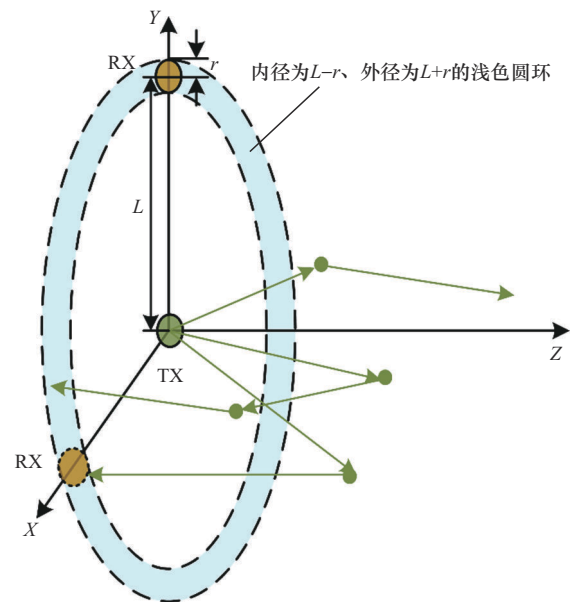


图2 光子后向散射传输示意图



根据实测的3种典型水质的散射相函数数据可以发现,当发生散射时,散射角在 $0^{\circ}\sim 90^{\circ}$ 的概率高于95%,散射角在 $90^{\circ}\sim 180^{\circ}$ 的概率低于5%,这意味着光子发生后向散射的概率较低,能够落在探测器靶面上的光子个数也相对较少。MC方法是一种基于概率和统计理论的计算方法,当接收光子个数较少时,其结果往往具有偶然性。只有当光子个数达到一定数量时,其结果才较为可靠。为了让探测器靶面上接收到足够多的光子,一方面可以增加发送的总光子个数,另一方面可以增大接收端靶面面积。增加发送的总光子个数会导致仿真时间变长。一般探测器的靶面都在毫米量级,受限于水压和体积等因素,即便添加光学透镜,接收端靶面也不会太大。为了让仿真尽可能贴近实际且不大幅增加仿真时间,本文对仿真流程进行了改善。考虑光源初始方位角在 $0^{\circ}\sim 360^{\circ}$ 内是均匀分布的,所以光子落在图2中内径为 $L-r$ 、外径为 $L+r$ 的浅色圆环内任意靶面上的统计特性是一样的。因此可以通过统计落在浅色圆环内的光子统计特性再乘上比例系数来代表落在半径为 r 的圆形探测靶面上的光子统计特性,比例系数为两者面积比,即 $r/4L$ 。不直接增大探测器靶面面积,而通过统计面积更大的圆环内的光子特性来代替探测器靶面内的光子特性,该方法有效缩短了仿真时间。

2 结果与分析

首先,分析不同水质条件下光子的后向散射

传输情况。发散角为 1° 时光源平面处后向散射光功率的空间分布如图3所示,展示了在清洁海水、沿岸海水和港口海水3种典型海水条件下,当光源发散角为 1° 时,在光源平面处光斑的空间分布情况。通过观察仿真数据中到达光源平面处后向散射光子所经历的散射次数和路径长度可以发现,大部分后向散射光子到达探测面时,散射次数较少,前向传输距离也较短,反向到达探测面后其偏移距离也较小,都集中在原点附近,导致图3中原点附近光功率较高。少部分后向散射光子到达探测面时,散射次数稍多,前向传输距离也较长,反向到达探测面后其偏移距离也较大,在空间中弥散开来。由于清洁海水发生散射的概率相对更低,其中发生后向散射的光子前向传输距离更长,光功率分布相对港口海水更加分散。但总体上来说,港口海水中光子发生后向散射的概率更大,接收光功率也更高。

发散角为 1° 时光源平面处不同水质后向散射光子光功率分布和光子到达角分布情况如图4所示。光功率的变化情况和图3相对应。港口海水中散射最为严重,发生后向散射的概率较大,因此其光功率会高于清澈海水和沿岸海水的后向散射光功率。至于光子到达角,其分布情况主要与不同水质的散射相函数息息相关,这3种水质的散射相函数在 $90^{\circ}\sim 180^{\circ}$ 的概率分布在归一化之后差异较小。

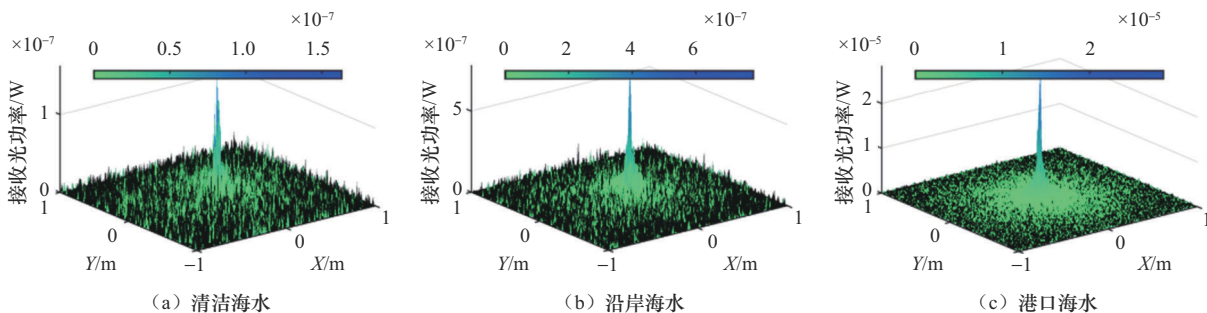
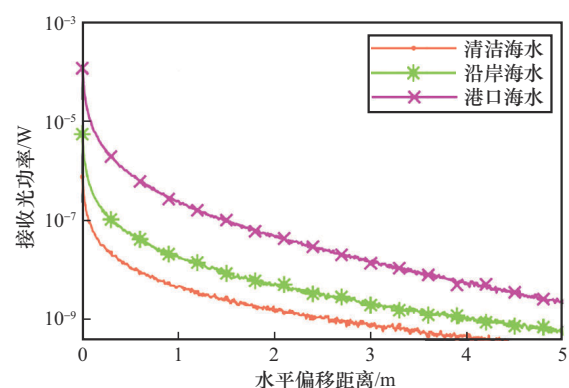
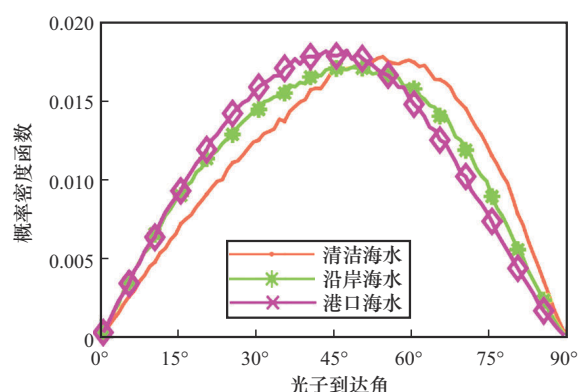


图3 发散角为 1° 时光源平面处后向散射光功率的空间分布



(a) 接收光功率随偏移距离的变化关系



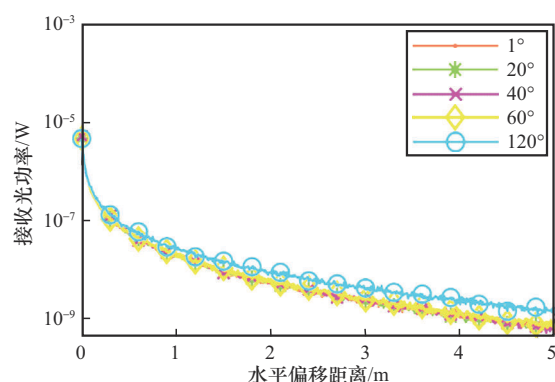
(b) 光子到达角概率密度函数

图4 发散角为1°时光源平面处不同水质后向散射光子光功率分布和光子到达角分布情况

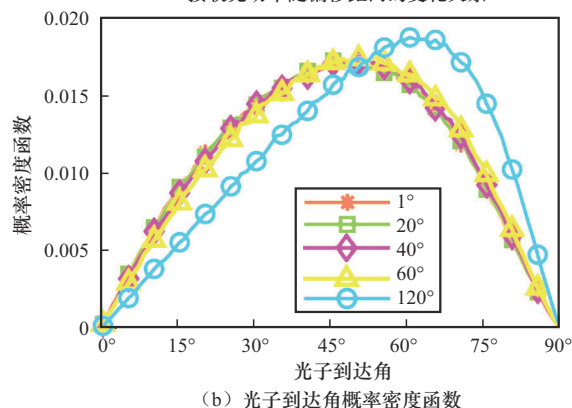
发散角依次为1°、20°、40°、60°、120°时，沿岸海水光源平面处不同发散角下后向散射光子光功率分布和光子到达角分布情况如图5所示。从图5中可以看出，光源发散角对后向散射光功率的分布情况以及光子到达角的分布情况影响不明显。

最后，分析本文提出的改进MC仿真方法的时间增益。仿真时间增益如图6所示，展示了沿岸海水条件下，分别采用本文方法和传统MC方法，光源平面处到达相同数量的后向散射光子所需的仿真时间对比。从结果可以看出，当两种仿真方法的初始参数相同，在探测器靶面接收光子数基本相同（相差不超过光子数的0.1%）的条件下，采用统计圆环内的光子特性可显著缩短仿真时间。此外，图6还展示了本文方法的仿真时间

增益，即传统MC方法所需时间相较于本文改进方法的倍数。随着仿真光子数量的增加，本文算法的时间增益也呈现上升趋势。具体而言，在仿真中通过统计探测器所在圆环内的光子特性可达到3.7倍的时间增益，即使接收光子数仅为 4×10^4 时，本文改进算法的时间增益均达到了2.4倍，即至少降低了58%的仿真时间。



(a) 接收光功率随偏移距离的变化关系



(b) 光子到达角概率密度函数

图5 沿岸海水光源平面处不同发散角下后向散射光子光功率分布和光子到达角分布情况

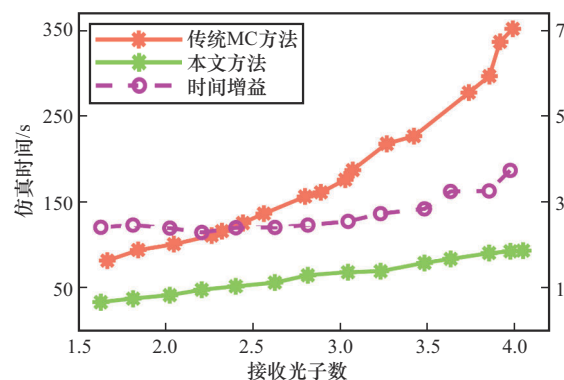


图6 仿真时间增益



为了验证上述后向散射传输特性仿真的正确性,在 $1\text{ m}\times 0.6\text{ m}\times 0.6\text{ m}$ 的水箱中测量了后向散射光斑的分布情况,光源采用 450 nm 的蓝光激光器(NDB7875),探测器采用光功率计(Thorlabs, PM400),后向散射水平偏移光功率测量场景如图7所示。水箱中加入自来水 180 L ,依次添加 0 g 、 5 g 、 10 g 氢氧化镁来模拟不同的浑浊度,对应氢氧化镁浓度分别为 0 mg/L 、 27.8 mg/L 、 55.6 mg/L ,测量结果与仿真类似。

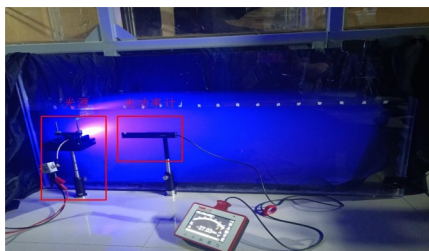


图7 后向散射水平偏移光功率测量场景

不同发散角、不同氢氧化镁浓度下光源后向散射光功率随水平偏移距离的变化关系如图8所示。从图8中可以看出,不同光源发散角的两条曲线基本重合,光源发散角对后向散射光功率的分布情况影响较小。另外随着氢氧化镁浓度上升,水体变得越来越浑浊,后向散射更加严重,其光功率也相对更高一些。这些结果与前面MC仿真结果近似。

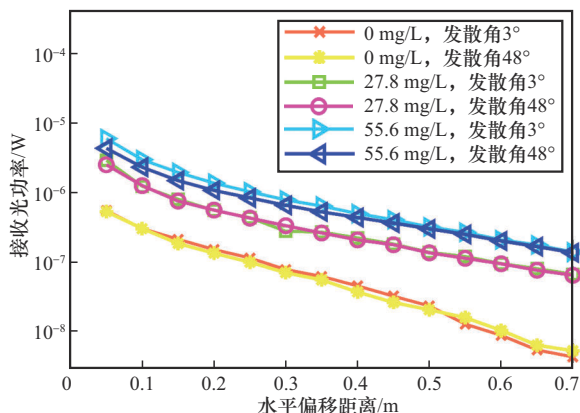


图8 不同发散角、不同氢氧化镁浓度下光源后向散射光功率随水平偏移距离的变化关系

3 结束语

本文针对后向散射光子数较少的问题,考虑光源初始方位角在 $0^\circ\sim 360^\circ$ 内是均匀分布的,提出了一种蒙特卡罗仿真改进方法,可有效减少系统仿真时间。接下来利用改进的MC仿真方法,研究了不同水质和不同光源发散角下的后向散射光功率分布和光子到达角分布情况,以及相较于传统MC仿真方法的时间增益,最后通过实验验证了后向散射光功率分布随水质和光源发散角的变化情况。上述结果可以为双向UWOC系统中接收机的空间布局和视场角的设计提供参考。

值得提出的是,在对激光在水下信道中的后向散射特性的研究中,本文仅考虑了静态水体环境中微小颗粒对光子的散射作用,对于由温度和盐度梯度引起的湍流效应对后向散射特性的影响并未研究,后续将在此方面进一步开展研究。

参考文献:

- [1] 徐文,李建龙,李一平,等.无人潜水器组网观测探测技术进展与展望[J]. 前瞻科技, 2022, 1(2): 60-78.
- [2] XU W, LI J L, LI Y P, et al. Networks of unmanned underwater vehicles for ocean exploration: advances and prospects[J]. Science and Technology Foresight, 2022, 1(2): 60-78.
- [3] ANSA SHERMIN S, DHONGDI S C. Review of underwater mobile sensor network for ocean phenomena monitoring[J]. Journal of Network and Computer Applications, 2022, 205: 103418.
- [4] XU J. Underwater wireless optical communication: why, what, and how?[J]. Chinese Optics Letters, 2019, 17(10): 100007.
- [5] ZHU S J, CHEN X W, LIU X Y, et al. Recent progress in and perspectives of underwater wireless optical communication[J]. Progress in Quantum Electronics, 2020, 73: 100274.
- [6] AL-ZHRANI S, BEDAIWI N M, et al. Underwater optical communications: a brief overview and recent developments[J]. Engineered Science, 2021, 16:146-186.
- [7] SCHIRRIPIA SPAGNOLO G, COZZELLA L, LECCESE F. Underwater optical wireless communications: overview[J]. Sensors, 2020, 20(8): 2261.

- [7] KHAN I U, IQBAL B, LIU S Z, et al. Full-duplex underwater optical communication systems: a review[C]//Proceedings of the 2021 International Bhurban Conference on Applied Sciences and Technologies (IBCAST). Piscataway: IEEE Press, 2021: 886-893.
- [8] LI J J, YANG B, YE D M, et al. A real-time, full-duplex system for underwater wireless optical communication: hardware structure and optical link model[J]. IEEE Access, 2020(8): 109372-109387.
- [9] HAN B, ZHAO W, MENG J C, et al. Study on the backscattering disturbance in duplex underwater wireless optical communication systems[J]. Applied Optics, 2018, 57(29): 8478-8486.
- [10] 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.
- [11] 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.
- [12] ZONG S G, CHEN B, ZHANG X, et al. Laser forward and backward scattering characteristics and experimental study of bubbles in ship wake[J]. Applied Optics, 2024, 63(7): 1795-1810.
- [13] ZONG S G, YANG S P, LIANG S Y, et al. Predictive mechanisms for underwater laser backward detection channel in bubble-induced turbulence[J]. Optics and Lasers in Engineering, 2025, 189: 108929.
- [14] LI C Y, ZHOU G Q, ZHANG D J. Analysis of affecting factors for laser underwater transmission echo signals based on semi-analytic Monte Carlo[J]. International Journal of Remote Sensing, 2024, 45(19/20): 7185-7211.
- [15] THEODORE J P. Volume scattering functions for selected ocean waters[R]. 1972.
- [16] 韩笑天, 廖佩璇, 李鹏, 等. 蒙特卡罗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.
HAN X T, LIAO P X, LI P, et al. Monte Carlo simulation on laser transmission characteristics in an underwater channel[J]. Study on Optical Communications, 2023(4): 53-59.
- [17] 吴琼, 王博, 王涛, 等. 基于蒙特卡罗法的水下无线光传输特性分析[J]. 光子学报, 2021, 50(4): 30-39.
WU Q, WANG B, WANG T, et al. Analysis of underwater wireless optical transmission characteristics based on Monte Carlo method[J]. Acta Photonica Sinica, 2021, 50(4): 30-39.
- [18] GABRIEL C, KHALIGHI M A, BOURENNANE S, et al. Monte-Carlo-based channel characterization for underwater optical communication systems[J]. Journal of Optical Communications and Networking, 2013, 5(1): 1-12.

[作者简介]



葛文敏 (1995-), 男, 浙江大学海洋学院光通信实验室博士生, 主要研究方向为水下无线光通信。



陈宝康 (2002-), 男, 浙江大学海洋学院光通信实验室博士生, 主要研究方向为水下无线光通信。



徐敬 (1982-), 男, 博士, 浙江大学海洋学院光通信实验室教授、海洋传感与网络研究所所长, 主要研究方向为水下无线光通信。