光电技术及应用

DOI：10.16818/j.issn1001－5868.2022051703

水下激光通信系统接收机倾角及位置对接收光功率的影响研究

任彦儒，宗思光*，梁善永，李　斌

（海军工程大学 电子工程学院，武汉 430033）

摘　要： 采用蒙特卡洛方法建立了水下高斯光束传输仿真模型，基于该模型重点研究了接收机倾角和接收机位置对接收光功率的影响规律。仿真结果表明：在水下信道中，当接收机探测器阵面与激光出射角垂直时，接收光功率最大，随着接收机探测器阵面倾斜角度的增加，接收光功率逐渐减小；当接收机沿着 Y 轴方向正向移动时，且接收机在激光束的直径范围内时，接收光功率不变；当接收机在激光束的直径范围外时，接收光功率随着接收机偏离原点距离的增加而减小。仿真结果可为水下激光通信工程实践提供参考依据。

关键词： 水下激光通信；蒙特卡洛模型；接收机倾角；接收机位置；接收光功率

中图分类号： TN929　**文章编号：** 1001－5868(2022)06－1184－06

Study on the Influence of Receiver Tilt Angle and Position on the Received Optical Power in Underwater Laser Communication Systems

REN Yanru, ZONG Siguang, LIANG Shangyong, LI Bin

(School of Electronic Engineering, Naval University of Engineering, Wuhan 430033, CHN)

Abstract: A simulation model of underwater Gaussian beam transmission by Monte Carlo method was established, and the influence of receiver tilt angle and receiver position on the attenuation of received optical power based on this model was emphatically studied. The simulation results show that in the underwater channel, the received optical power reaches the maximum when the receiver array is correctly aligned the laser beam, and the received optical power gradually decreases with the increase of the receiver tilt angle. When the receiver moves forward along the Y-axis, the received optical power remains unchanged when the receiver is within the diameter of the laser beam. When the receiver is outside the diameter range of the laser beam, the received optical power decreases with the increase of the distance from the origin of the receiver. The simulation results can provide reference for the practice of underwater laser communication engineering.

Key words: underwater laser communication; Monte Carlo model; receiver tilt angle; receiver position; received optical power

0　引言

对于复杂海水信道中的光传输特性研究，大多采用蒙特卡洛方法来模拟光子的传输过程。2019年，西安光机所在三亚开展了水下无线光通信性能测试，通信距离为 20 m，传输速率为 20 Mb/s，采用蓝光大功率发光二极管（LED）和大面积光电倍增管探测器（PMT），设计出了“大角度发射-宽视场接收”的 LED 传输系统[1]。阴亚芳等利用蒙特卡洛统计方法，仿真了激光冲激信号在近海海水中的时域

收稿日期：2022－05－17.

*通信作者：宗思光　E-mail：41119749@qq.com

展宽特性，得到了近海海水中无线光传输的时域展宽模型[2]。在工程实践中，由于水下信道的环境复杂，理想的海水信道模型尚未建立，使得水下激光传输特性的理论研究和工程应用受到限制。因此本文基于蒙特卡洛方法仿真研究了接收机参数对水下光通信接收功率的影响。

蒙特卡洛方法可以模拟光子在水下介质中的传输过程和运动状态，从而验证水下激光通信系统的信道模型和通信效能分析方法的准确性和可行性[3]。本文采用蒙特卡洛方法水下光通信信道特性，通过模拟大量光子的运动过程并记录光子状态来仿真水下激光的传输过程，重点研究了接收机倾角、接收机位置对接收光功率的影响。

1　蒙特卡洛仿真模型及流程

蒙特卡洛方法(Monte Carlo Method，MCM)是一种随机抽样方法，仿真中使用的采样数量越多，仿真结果越准确[4]。本文采用蒙特卡洛模型对水下激光通信信道进行仿真，通过追踪大量光子的路径以及光子被接收阵面接收到的情况进行统计，进而对水下信道的特性进行分析。

具体流程如下：首先产生 10^7 个光子并发射到水下信道中，每个光子的初始权重设为 1，每个光子在水中的传输是独立的，且服从相同的统计规律[5]。然后，生成每个光子的随机传输步长。由于水中粒子的吸收和散射，光子的权重在碰撞到粒子后会降低，光子的传播方向也会发生改变，记录每个光子的运动过程，最后计算到达接收机的光子的总权重。水下激光通信仿真流程如图 1 所示。

仿真模型使用笛卡尔坐标系来确定光子的初始位置，初始位置设为 (x_0, y_0, z_0)，光束宽度 $D=5$ cm，最大初始发散角 $\theta=1$ mrad，光子的初始权重 ω_0 设为 1，光子的存活阈值 ω_{PD} 为 10^{-5}，设置阈值用来兼顾计算准确率和计算速度，当光子权重小于存活阈值时，认为光子消亡[6]。

光子的初始位置确定后，光子开始运动，光子的位置更新取决于光子的步长和方位角和散射角。光子碰撞到粒子后产生散射，散射后的步长由公式 $s=-\ln(\text{rand}s)/(a+b)$ 确定，a，b 分别是海水的吸收系数和散射系数，rand$s$ 为[0，1]的随机数，如此重复上述过程，记录光子的运动过程[7]。光子在运动过程中碰撞到粒子会产生散射和吸收，碰撞后光子的权重下降，碰撞前后的光子权重为：$W_{post}=W_{pre}\cdot W_{th}$，式中 $W_{th}=b/c$ 为散射反照率，即散射与总衰减之比[8]。

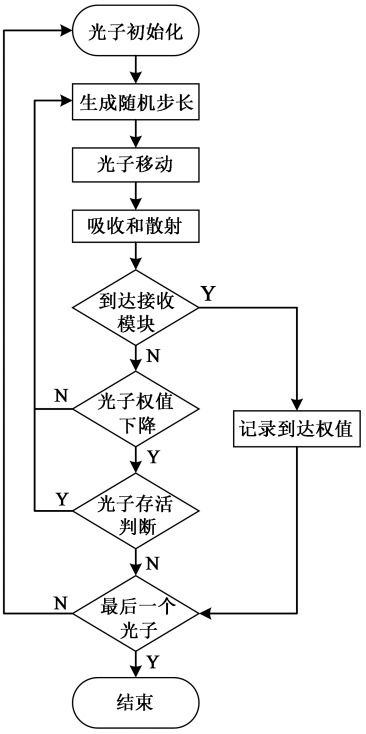


图 1　水下激光通信仿真流程图

碰撞后光子的新坐标为

$$\begin{cases} x_1=x_0+\mu_{x0}\cdot s \\ y_1=y_0+\mu_{y0}\cdot s \\ z_1=z_0+\mu_{z0}\cdot s \end{cases} \tag{1}$$

当$|\mu_z|\leqslant 0.99$ 时，即光子运动方向偏离 z 轴，需要将光子新的方向投射到全局坐标系上，新的方向余弦可以表示为[9]

$$\begin{cases} \mu'_x=\dfrac{\sin\theta(\mu_{x1}\cdot\mu_{z1}\cdot\cos\phi-\mu_{y1}\cdot\sin\phi)}{\sqrt{1-\mu_{z1}^2}}+\mu_{x1}\cdot\cos\theta \\ \mu'_y=\dfrac{\sin\theta(\mu_{y1}\cdot\mu_{z1}\cdot\cos\phi+\mu_{x1}\cdot\sin\phi)}{\sqrt{1-\mu_{z1}^2}}+\mu_{y1}\cdot\cos\theta \\ \mu'_z=-\sin\theta\cos\phi/\sqrt{1-\mu_{z1}^2}+\mu_{z1}\cdot\cos\theta \end{cases} \tag{2}$$

当$|\mu_z|>0.99$ 时，即光子几乎沿着 z 轴运动，光子新方向的全局方向余弦则为

$$\begin{cases} \mu'_x=\sin\theta\cdot\cos\phi \\ \mu'_y=\sin\theta\cdot\sin\phi \\ \mu'_z=\text{sign}(\mu_{z1})\cos\theta_m \end{cases} \tag{3}$$

ϕ 和 θ 分别是散射方向的方位角和散射角。其中方位角 ϕ 服从均匀分布，可以表示为

$$\phi=2\pi\cdot\text{rand}\phi_0 \tag{4}$$

式中，randϕ_0 为[0,1]的随机数。

散射角 θ 由体积散射函数决定，利用 HG 函数计算散射角，其表达式为[10]

$$P_{\mathrm{HG}}(\theta,g)=\frac{1-g^2}{2(1+g^2-2g\cos\theta)^{3/2}} \tag{5}$$

在本文中取 $g=0.924$，此时散射角可以从下式中得到：

$$\theta=\cos^{-1}\left[1+g^2-\left(\frac{1-g^2}{1-g+2g\cdot\mathrm{rand}\theta}\right)^2/2g\right] \tag{6}$$

接收机的坐标设为(0,0,S)，设接收视场角为30°，接收孔径为 50 cm。当光子的权重小于存活阈值 ω_{PD} 时，判定光子消亡，不再记录该光子的状态。当光子到达接收平面后，对此时光子是否被接收进行判断。当光子的坐标和方向满足如下公式时，认为光子被接收机接收。公式(7)表示光子到达接收机，并且其入射角在接收机的视场角内[11]。

$$\begin{aligned}&\frac{\sqrt{\mu_{x1}^2+\mu_{y1}^2}}{|\mu_{z1}|}\leqslant\tan\frac{\psi}{2}\\&X_1^2+Y_1^2\leqslant\left(\frac{d}{2}\right)^2\end{aligned} \tag{7}$$

水下激光通信系统示意图如图 2 所示，激光器在笛卡尔坐标系原点处，接收机与激光器的距离为 S，激光束沿着 Z 轴出射，光子在水下信道中经过散射和吸收到达接收机。

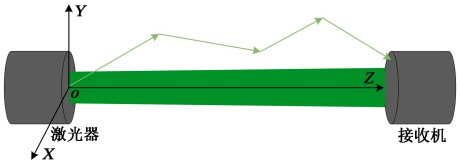


图 2 水下激光通信系统示意图

2 结果分析

基于上述光子传输模型，仿真研究和分析了接收机倾角、接收机位置、接收孔径对接收光功率的影响规律。接收光功率 P_{r} 为接收到的光子权重和光子总数之比，即

$$P_{\mathrm{r}}=\sum_{i=0}^{N_{\mathrm{r}}}W_i/N \tag{8}$$

式中，N 是发射的总光子数，N_{r} 是接收到的光子数，W_i 是光子的剩余权重。接收光功率和初始参数有关系，包括海水水质、发散角、传输距离、视场角、接收孔径等，仿真参数如表 1 所示。

表 1 仿真参数设置

仿真参数	数值	仿真参数	数值
光子数	10^7	最大碰撞次数	1 000
光束宽度/m	0.05	接收视场角/(°)	30
光束发散角/rad	10^{-3}	存活阈值	10^{-4}
接收孔径/cm	50	传输距离/m	5

2.1 接收机倾角对接收光功率的影响

根据表 1 的仿真参数研究接收机倾角对接收光功率的影响，在仿真中接收机倾角为接收机探测器阵面与激光发射机平面(XOY 平面)的夹角，当接收机倾角为 θ_{re} 时，接收光功率为 $P_{\mathrm{r}}=\cos\theta_{\mathrm{re}}\cdot\sum_{i=0}^{N_{\mathrm{r}}}W_i/N$。仿真中将传输距离设为 5 m，在纯净海水、远海海水、沿岸海水和港口海水中，接收光功率随接收机倾角的变化曲线如图 3 所示。

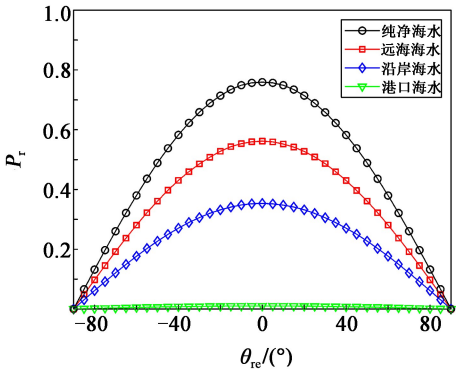


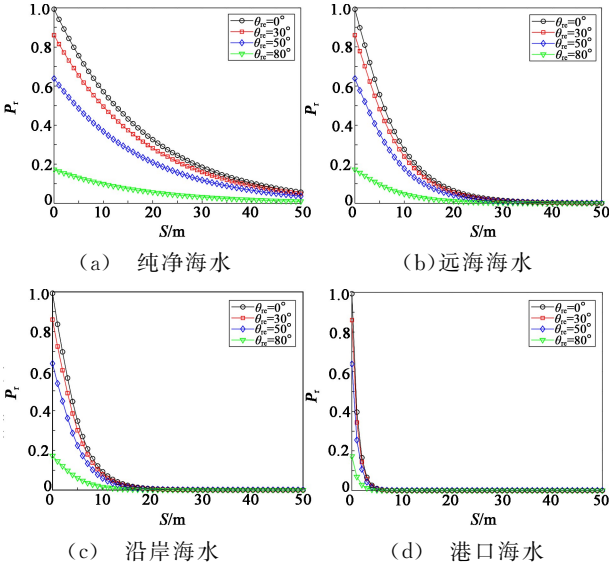
图 3 不同海水水质下接收光功率随接收机倾角的变化

由图 3 的仿真结果可知，在四种不同的海水水质中，在接收机倾角为 0°时，即接收机阵面与激光传输方向垂直时，接收光功率最大；随着接收机探测器的倾斜，即接收机倾角的增大，接收光功率逐渐减小；到达 90°时，接收光功率最小，降为零。这是由于当接收探测器阵面正对激光束时，探测器接收到的有效光子数较多，当接收机探测器倾斜角逐渐增加时，探测器接收到的有效光子数减少，接收光功率下降。因此，为获得更高的接收光功率，应尽可能将探测器阵面调整至与光束传输方向垂直。

在仿真中接收机倾角分别设为 0°，30°，50°和80°，在不同浑浊程度的海水中，接收光功率随距离的变化如图 4 所示。

在表 1 给定的初始条件下，由图 4 的仿真结果可知，在四种浑浊程度的海水中，随着接收机倾角的增大接收光功率逐渐减小。在纯净海水中激光的有效传输距离比在沿岸海水中远，这是由于海水水质越浑浊，光子在水中受到的吸收和散射越严重，光子

权重下降得越快，接收到的有效光子数越少，接收光功率衰减越严重。当传输距离 5 m 时，不同接收机倾角的接收光功率衰减如表 2 所示。



(a)　纯净海水　　(b)远海海水

(c)　沿岸海水　　(d)　港口海水

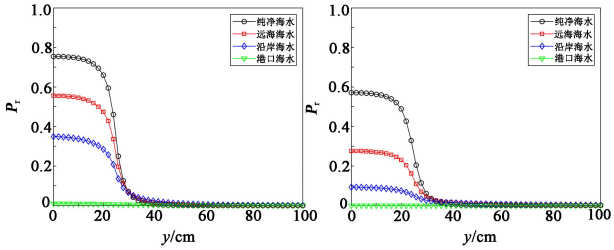
图 4　不同接收机倾角情况下水质和传输距离对接收光功率的影响

表 2　传输距离 5 m 时不同接收机倾角的接收光功率

海水水质	接收机倾角/(°)	接收光功率
纯净海水	0	0.759 3
纯净海水	30	0.658 3
纯净海水	50	0.488 9
远海海水	0	0.561 8
远海海水	30	0.486 6
远海海水	50	0.361
沿岸海水	0	0.353 4
沿岸海水	30	0.305 3
沿岸海水	50	0.227 2
港口海水	0	0.01
港口海水	30	0.008 7
港口海水	50	0.006 4

2.2　接收机位置对接收光功率的影响

根据表 1 的仿真参数研究接收机偏离原点距离对接收光功率的影响，接收孔径设为 0.5 m，传输距离设为 5 m 和 10 m，接收机偏离原点距离范围设为 0～100 cm，研究在不同浑浊程度的海水中接收机偏离原点距离的变化对接收光功率衰减的影响，仿真结果如图 5 所示。由图 5 的仿真结果可知，光信号传输距离为 5 m 时，在港口海水中，接收机偏离原点距离在 0～100 cm 时，接收光功率随着接收机偏离原点距离的增大而减小，由 0.009 8 逐渐减少到 0.000 2。在其他三种水体中，接收机偏离原点在 0～10 cm 时，接收光功率缓慢减小，分别为 0.755，0.556 和 0.349；接收机偏离原点为 20 cm 时，三种水体的接收光功率为 0.661，0.474 和 0.285 开始急剧下降；接收机偏离原点超过 40 cm 时，接收光功率随着偏离原点距离的增加而缓慢减小至 0。传输距离为 10 m 时，在港口海水中，接收机偏离原点距离在 0～100 cm 时，接收光功率随着接收机偏离原点距离的增加而减小，由 5×10^{-5} 逐渐减少到 0。在纯净海水、远海海水和沿岸海水中，接收机偏离原点在 0～10 cm 时，接收光功率保持不变，分别为 0.572，0.276 和 0.093；接收机偏离原点距离为 20 cm 时，纯净海水、远海海水、沿岸海水和港口海水的接收光功率为 0.489，0.232 和 0.075；接收机偏离原点在 20～100 cm 范围时，接收光功率随着偏离原点距离的增加而缓慢减小至 0。



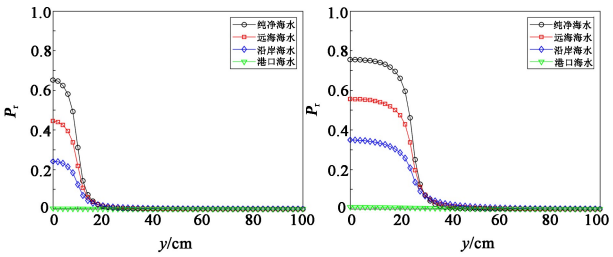
(a)　S=5 m　　(b)　S=10 m

图 5　不同海水水质、不同传输距离下接收光功率随接收机偏离原点距离的变化

由于纯净海水、远海海水和沿岸海水对光子的散射作用较弱，激光束的光束直径较小，当接收机偏离原点距离增加，即接收机逐渐远离激光束 Z 轴时，在偏离原点距离为 0～10 cm 的范围内，接收机仍在光束范围内，接收光功率不变；偏离原点距离为 10～100 cm 时，接收机的位置在激光束的直径之外，接收机接收到的有效光子数减少，接收光功率随着接收机偏离原点距离的增加而减小。由仿真结果可知，在纯净海水、远海海水和沿岸海水中，水质越清澈，接收光功率受到接收机偏离原点距离变化的影响越大，这是由于光子在清澈的水质中受到的散射作用较弱，激光束的发散直径小，接收光功率受到接收机偏离原点距离的影响更大，光子在浑浊的水质中受到的散射为多次散射，激光束的直径更大，接收光功率受到接收机偏离原点距离的影响更小。

根据表 1 的仿真参数研究接收机偏离原点距离对接收光功率的影响，接收机孔径 d 设为 0.2 m 和 0.5 m，传输距离设为 5 m，接收机偏离原点距离范围设为 0～100 cm，研究在不同海水水质中接收机偏离原点距离的变化对接收光功率衰减的影响，仿

真结果如图 6 所示。



(a) $d=0.2$ m (b) $d=0.5$ m

图 6 不同海水水质、不同接收孔径下接收光功率随接收机偏离原点距离的变化

由图 6 的仿真结果可知，当接收孔径为 0.2 m 时，在港口海水中，接收机偏离原点距离在 0～100 cm 时，接收光功率随着接收机偏离原点距离的增加而减小，由 0.002 3 逐渐减少到 2.9×10^{-5}。在纯净海水、远海海水和沿岸海水中，接收机偏离原点距离在 0～5 cm 时，接收光功率保持不变，分别为 0.652，0.445 和 0.241；接收机偏离原点距离为 10 cm 时，纯净海水、远海海水、沿岸海水和港口海水的接收光功率分别为 0.311，0.218 和 0.124；接收机偏离原点距离在 5～100 cm 范围时，接收光功率随着接收机偏离原点距离的增加而减小至 0。

当接收孔径为 0.5 m 时，在港口海水中，接收机偏离原点距离在 0～100 cm 时，接收光功率随着接收机偏离原点距离的增加而减小，由 0.009 8 逐渐减少到 0.000 2。在纯净海水、远海海水和沿岸海水中，接收机偏离原点距离在 0～10 cm 时，接收光功率保持不变，分别为 0.755，0.556 和 0.349；接收机偏离原点距离为 20 cm 时，纯净海水、远海海水、沿岸海水和港口海水的接收光功率分别为 0.661，0.474 和 0.285，接收机偏离原点距离在 20～100 cm 范围时，接收光功率随着接收机偏离原点距离的增加而减小至 0。

由于纯净海水、远海海水和沿岸海水对光子的散射作用较弱，激光束的直径较小，接收机探测器在激光束的直径范围内时，接收光功率不变，接收机在激光束的直径范围外时，接收光功率随着接收机偏离原点距离的增加而减小。接收孔径为 0.2 m，偏离原点距离在 0～5 cm 的范围内时，接收机探测器仍在激光束的范围内，接收光功率不变；当偏离原点距离为 5～100 cm 范围时，由于接收机的位置远离激光束的直径范围，当接收机探测器逐渐远离激光束出射方向的光束时，接收阵面接收到的有效光子数减少，接收光功率随着接收机偏离原点距离的增加而减小。接收孔径为 0.5 m，偏离原点距离为 0～20 cm 的范围内时，接收机仍在激光束的范围内，接收光功率不变，当偏离原点距离为 20～100 cm 时，接收光功率随着接收机偏离原点距离的增加而减小至 0。在不同接收机参数下，接收光功率衰减如表 3 所示。

表 3 纯净海水中不同接收机位置的接收光功率

y/cm	d/m	S/m	P_r
0	0.2	5	0.652
10	0.2	5	0.311
20	0.2	5	0.014
0	0.5	5	0.755
20	0.5	5	0.661
50	0.5	5	0.001
0	0.5	10	0.572
20	0.5	10	0.489
50	0.5	10	0.001

3 结论

本文基于蒙特卡洛方法建立了复杂水质环境下水下无线光通信系统的仿真模型，重点研究了接收机相对于发射系统的倾角、接收机与激光束的相对位置变化对接收光功率的影响。仿真结果表明：在水下信道中，接收机探测器阵面正对激光束时，接收光功率最大，随着接收机倾角度的增加，接收光功率逐渐减小。当接收机沿着光束方向正向移动时，接收机在激光束的直径范围内时，接收光功率不变；接收机在激光束的直径范围外时，接收光功率随着接收机偏离原点距离的增加而减小。仿真结果可为水下激光通信工程实践提供参考依据。

参考文献：

[1] 韩 彪. 面向深海应用的水下双向无线光通信研究[D]. 西安：中国科学院大学(中国科学院西安光学精密机械研究所)，2018.
Han Biao. Study on the bi-directional underwater wireless optical communication for deep sea application[D]. Xi'an: University of Chinese Academy of Sciences (Xi'an Institute of Optics & Precision Mechanics), 2018.

[2] 阴亚芳，郭秋平，段作梁，等. 水下无线光信号的时域展宽特性分析[J]. 半导体光电，2018，39(4)：578-581，585.
Yin Yafang, Guo Qiuping, Duan Zuoliang, et al. Analysis on time-domain broadening characteristics of underwater wireless optical signal[J]. Semiconductor Optoelectronics, 2018, 39(4): 578-581, 585.

[3] 黄爱萍，张莹珞，陶林伟. 蒙特卡洛仿真的水下激光通信信道

特性[J]. 红外与激光工程，2017，46(4)：226-231.
Huang Aiping，Zhang Yingluo，Tao Linwei. Monte Carlo simulation on channel characteristics of underwater laser communications[J]. Infrared and Laser Engin.，2017，46(4)：226-231.

[4] 刘陕陕，谭跃跃. 基于蒙特卡洛仿真的水下光通信信道的三种相函数比较[J]. 电子测量技术，2020，43(10)：139-142.
Liu Shanshan，Tan Yueyue. Comparison of three phase functions of underwater optical communication channel based on Monte Carlo simulation [J]. Electronic Measurement Technology，2020，43(10)：139-142.

[5] Mao Y，Wu X，Huang W，et al. Monte Carlo-based performance analysis for underwater continuous-variable quantum key distribution[J]. Appl. Sciences，2020，10(17)：5744.

[6] 吴　琼. 基于 520 nm 激光的水下无线光传输特性研究[D]. 重庆师范大学，2021.
Wu Qiong. Research on underwater wireless optical transmission characteristics based on 520 nm laser [D]. Chongqing Normal University，2021.

[7] Vali Z，Gholami A，Ghassemlooy Z，et al. Modeling turbulence in underwater wireless optical communications based on Monte Carlo simulation[J]. J. Optical Society of America A：Optics Image Science and Vision，2017，34(7)：1187-1193.

[8] Dong F，Xu L，Jiang D，et al. Monte-Carlo-based impulse response modeling for underwater wireless optical communication[J]. Progress in Electromagnetics Research M，2017，54：137-144.

[9] Huang A，Tao L. Monte Carlo based channel characteristics for underwater optical wireless communications[J]. IEICE Trans. on Communications，2017，100(4)：612-618.

[10] 谭跃跃，刘陕陕. 基于 PIN 和 APD 的水下光通信信道误码率的研究[J]. 电子测量技术，2020，43(10)：143-147.
Tan Yueyue，Liu Shanshan. Research of BER for underwater optical communication based on PIN and APD[J]. Electronic Measurement Technol.，2020，43(10)：143-147.

[11] Gabriel C，Khalighi M，Bourennane S，et al. Monte-Carlo-based channel characterization for underwater optical communication systems[J]. J. of Optical Communications and Networking，2013，5(1)：1-12.

作者简介：

任彦儒(1994－)，男，河南省驻马店市人，硕士研究生，研究方向为水下光通信；

宗思光(1979－)，男，河南省开封市人，博士，副教授，研究方向为激光通信、激光探测。