

## 浑浊水体激光后向散射特性仿真与实验研究

张 鑫<sup>1</sup>, 宗思光<sup>1</sup>, 李 斌<sup>1</sup>, 余 扬<sup>2</sup>

(1. 海军工程大学 电子工程学院, 湖北 武汉 430034;  
2. 武汉大学, 湖北 武汉 430070)

**摘要:** 由于水体的吸收和散射作用, 光束能量在传播的过程中会产生衰减, 激光脉冲会被展宽, 制约着水下激光雷达的探测范围和探测精度。文中以浑浊水体环境下水下弱小目标探测为应用背景, 建立了水下光子传播的蒙特卡洛仿真模型, 模拟了不同衰减系数和散射率的水体后向散射回波信号, 并对相应的水体后向散射回波信号变化趋势进行了分析。仿真结果表明: 随水体衰减系数的增加, 近场水体激光回波信号接收光子数逐渐增多; 随水体散射率的增加, 回波信号光子消亡速度逐渐降低。开展了不同浊度下的激光雷达回波信号的测试实验, 实验结果表明: 随水体衰减系数的增加, 水体激光后向散射回波幅度逐渐增高, 脉冲宽度逐渐展宽。在进行浑浊水体水下弱小目标探测时, 随水体衰减系数的增加, 应通过逐渐减小激光器能量或接收系统增益来增强水体回波与目标回波之间的差异, 以此提高浑浊水体水下弱小目标探测的信噪比。实验验证了理论与仿真结果, 为浑浊水体环境下水下弱小目标激光探测系统在不同水质下的激光能量选取、接收系统增益设计等提供理论支撑。

**关键词:** 蒙特卡洛; 激光雷达; 后向散射; 浑浊水体

**中图分类号:** TN249 **文献标志码:** A **DOI:** 10.3788/IRLA20220280

## Simulation and experimental study on laser backscattering characteristics in turbid water

Zhang Xin<sup>1</sup>, Zong Siguang<sup>1</sup>, Li Bin<sup>1</sup>, Yu Yang<sup>2</sup>

(1. College of Electronic Engineering, Naval University of Engineering, Wuhan 430034, China;  
2. Wuhan University, Wuhan 430070, China)

**Abstract:** Due to the absorption and scattering of water, the beam energy will attenuate in the process of propagation, and the laser pulse will be widened, which restricts the detection range and accuracy of underwater lidar. Based on the application background of underwater weak and small target detection in turbid water environment, this paper establishes the Monte Carlo simulation model of underwater photon propagation, simulates the backscattering echo signal of water body with different attenuation coefficients and scattering rates, and analyzes the variation trend of the corresponding backscattering echo signal of water body. The simulation results show that the number of photons received by the laser echo signal of near-field water body gradually increases with the increase of attenuation coefficient of water body; With the increase of water scattering rate, the photon extinction speed of echo signal gradually decreases. The lidar echo signal test experiments under different turbidity are carried out. The experimental results show that with the increase of water attenuation coefficient, the

收稿日期: 2022-04-21; 修订日期: 2022-05-16

基金项目: 国防科研基金 (2019-JCJQ-JJ-056)

作者简介: 张鑫, 男, 硕士生, 主要从事水下激光探测等方面的研究。

导师简介: 宗思光, 男, 副教授, 博士, 主要从事水下激光探测、激光通信、激光致声等方面的研究。

laser backscattering echo amplitude of water gradually increases and the pulse width gradually widens. When detecting dim and small underwater targets in turbid water, with the increase of attenuation coefficient of water, the difference between water echo and target echo should be enhanced by gradually reducing laser energy or receiving system gain, so as to improve the signal-to-noise ratio of dim and small underwater targets in turbid water. The experimental results verify the theory and simulation results, and provide theoretical support for the laser energy selection and the gain design of the receiving system of the underwater weak and small target laser detection system under different water qualities in the turbid water environment.

**Key words:** Monte Carlo; lidar; backscattering; turbid waters

## 0 引言

激光在水中传播的过程中,水中的各种成分会对光束产生吸收和散射作用,导致激光光束自身特性发生改变,光束能量在传播的过程中会产生衰减,激光脉冲会被展宽,制约着水下激光雷达的探测范围和探测精度<sup>[1]</sup>。水体后向散射信号是复杂水体环境下水下弱小目标探测的系统背景,无法消除。在远海、近海、港口等不同海域,由于水体对激光消光性能的差异直接影响着激光雷达的探测性能。在控制激光器能量和接收系统增益不变的情况下,若水质浑浊,水体后向散射回波信号强,系统近场强水体信号极易导致接收系统信号饱和,系统远场目标回波信号极易淹没在水体后向散射背景信号中<sup>[2]</sup>。因此,在光学系统不变的情况下,激光水下系统目标检测能力与激光发射能量、接收系统增益密切相关,理想化的水下弱小目标激光探测系统应具备自适应增益调节功能,根据不同的水质背景选取匹配的激光发射能量、接收系统增益以及信号处理方法等<sup>[3]</sup>。因此开展不同的水质的激光后向散射特性研究具有重要的理论和应用价值<sup>[4]</sup>。

一般的水体中包括纯水、溶解物质、悬浮粒子和复杂多样的活性有机物,其中对 532 nm 激光的光学性质产生影响的主要有纯水、黄色物质、溶解的无机盐悬浮粒子<sup>[5]</sup>。纯水在可见光范围内,对蓝绿波段吸收最小,散射特性属于瑞利散射,但纯水本身引起的光散射损耗占总损耗的比例很小。同时,其体积散射函数不具有明显的方向选择性,可将其看作类似于吸收的衰减特性<sup>[6]</sup>。黄色物质仅对光有吸收作用,在短波内会急剧增加,使其呈现黄色。无机盐和悬浮粒子的吸收、散射特性较为复杂,与光波长、粒子浓度、尺寸、形状均密切相关<sup>[7]</sup>。比入射光波长小很多的无吸

收粒子的散射遵循瑞利散射定律,接近入射光波长大小的散射粒子的散射遵循米氏散射定律<sup>[8]</sup>。

文中采用蒙特卡洛方法,建立了针对水下弱小目标探测的水体激光后向散射模型,可模拟不同水质下的水体后向散射回波信号。仿真结果表明:随水体衰减系数的增加,近场水体回波信号接收光子数逐渐增多;随水体散射率增加,回波信号光子消亡速度逐渐降低。搭建了水体后向散射回波信号系统,开展了不同浊度下的激光雷达回波信号测试实验,对不同情况下的激光雷达回波信号进行了验证分析。实验结果表明:随水体衰减系数的增加,水体激光后向散射回波幅度逐渐增高,脉冲宽度逐渐展宽。

## 1 蒙特卡洛模拟

在研究激光在水体中的传播问题时,将光束看作大量光子组成的光子束,于是可以将激光在水体中的传播问题转换成光子束在水体中的传播问题。海水中的粒子具有随机性,光子在水体传播时,会随机地与介质发生碰撞<sup>[9]</sup>。蒙特卡洛仿真基于计算机的统计实验方法,可模拟大量光子的运动过程并记录光子的状态,不需要过多的近似,可以模拟不同衰减系数情况下水体的吸收和散射特性<sup>[10-12]</sup>。

文中考虑水体介质多次散射的情况,即水中散射粒子很稠密,同时考虑单次、二次、及更高次的散射和路径上的衰减<sup>[13]</sup>。水体介质多次散射如图 1 所示,能适用于绝大多数的海域。

模拟光子在水体中的传播,可以分为六个步骤。(1) 发射条件: 波长,能量的确定;(2) 运动轨迹(自由程): 传输 $l$ 距离后,发生碰撞;(3) 散射过程: 散射角计算;(4) 碰撞后的运动方向;(5) 新的自由程;(6) 终止条件: 接收或消亡。

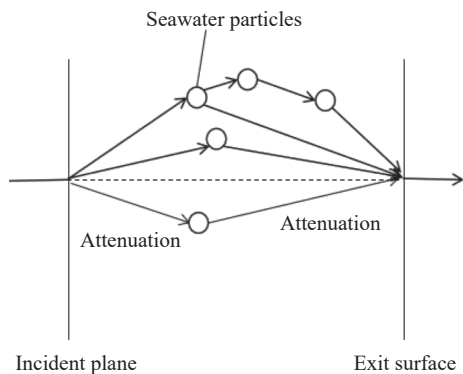


图 1 激光在水中的多次散射

Fig.1 Multiple scattering of laser in water

(1) 自由程及新的自由程确定

准直光束在介质传播的朗伯-比尔定律<sup>[14]</sup>:

$$E_l = E_0 \cdot e^{-cl} \quad (1)$$

由公式 (1) 可推导

$$l = -\frac{\ln \xi}{N^{1/3} \ln(1 - \pi r^2 \cdot N^{1/3})} \quad (2)$$

新的自由程为:

$$l_{m+1} = -\frac{\ln \xi_{m+1}}{N^{1/3} \ln(1 - \pi r^2 \cdot N^{1/3})} \quad (3)$$

式中:  $c$  为介质光学衰减系数;  $l$  为光束传播距离;  $l_{m+1}$  碰撞  $m$  次后新的光束传播距离;  $E_0$  为光束的初始能量;  $E_l$  为准直光束传播  $l$  距离之后的剩余能量;  $r$  为粒子半径;  $N$  为关于  $C$  的对数密度;  $\xi, \xi_{m+1}$  为  $(0, 1)$  间均匀分布的随机数。

(2) 散射角及新的运动方向确定

图 2 是单个光子两次碰撞散射坐标系示意图。光子的初始位置为坐标原点, 光子的初始运动方向为  $X$  轴正向, 发生碰撞后改变方向。光子的初始位置矢量采用直角坐标系, 只需要确定转角  $\varphi$  和散射角  $\theta$  即可。

$I_0$  为初始方向, 以入射方向为  $x$  轴建立坐标系  $Oxyz$ , 三个方向余弦分别为  $\cos\alpha = 1, \cos\beta = 0, \cos\gamma = 0$ 。第一次碰撞引起散射过程后, 光子运动方向变为  $I_1$ , 以  $I_1$  方向为  $x$  轴建立坐标系  $O'x_1y_1z_1$ , 那么在坐标系  $Oxyz$  中的方向余弦变为  $\cos\alpha_1, \cos\beta_1, \cos\gamma_1$ , 其中  $\alpha_1 = \theta_1, \theta_1$  为第一次散射角。

设  $\varphi_1$  为第一次偏转角,  $\Delta X'OY$  中,  $OY = 1$ , 则  $XO' = \csc\varphi_1$ ;  $\Delta X'OO'$  中,  $\sin\theta_1 = \frac{OX'}{OO'} = \frac{\csc\varphi_1}{OO'}$ ,  $OO' = \csc\varphi_1 \cdot \csc\theta_1$ ;  $\Delta YOO'$  中,  $\cos\beta_1 = \frac{1}{OO'} = \sin\varphi_1 \cdot \sin\theta_1$ 。再求  $\gamma_1$ ,

$\cos\gamma_1 = \cos\varphi_2 \cdot \cos\theta_2$ , 那么  $I_1$  在坐标系  $Oxyz$  的方向余弦为  $(\cos\theta_1, \sin\varphi_1 \cdot \sin\theta_1, \cos\varphi_1 \cdot \cos\theta_1)$ 。第二次碰撞引起散射过程后, 光子运动方向变为  $I_2$ , 以  $I_2$  方向为  $x$  轴建立坐标系  $O''x_2y_2z_2$ , 散射角为  $\theta_2$ , 偏转角为  $\varphi_2$ , 那么在相对系  $O'x_1y_1z_1$  中方向余弦为  $(\cos\alpha_2, \cos\beta_2, \cos\gamma_2) = (\cos\theta_2, \sin\varphi_2 \cdot \sin\theta_2, \cos\varphi_2 \cdot \cos\theta_2)$ , 需将该方向余弦转换为  $Oxyz$  中的方向余弦, 经过坐标系转换后,  $I_2$  在坐标系  $Oxyz$  中的方向余弦变为:

$$\begin{cases} \cos\alpha_2 = \cos\theta_1 \cos\theta_2 - \sin\varphi_2 \sin\theta_2 \sin\theta_1 \\ \cos\beta_2 = \cos\varphi_1 \sin\theta_1 \cos\theta_2 + \cos\varphi_1 \cos\theta_1 \sin\varphi_2 \sin\theta_2 + \sin\varphi_1 \cos\varphi_2 \sin\theta_2 \\ \cos\gamma_2 = -\sin\varphi_1 \sin\theta_1 \cos\theta_2 - \sin\varphi_1 \cos\theta_1 \sin\varphi_2 \sin\theta_2 + \cos\varphi_1 \cos\varphi_2 \sin\theta_2 \end{cases} \quad (4)$$

光子在第  $m$  次碰撞后, 其出射方向相对于前次坐标系为  $(\alpha_m, \beta_m, \gamma_m)$ , 在第  $m+1$  次碰撞后, 出射方向相对于第  $m$  坐标系为  $(\alpha_{m+1}, \beta_{m+1}, \gamma_{m+1})$ 。其中:

$$\begin{cases} \cos\alpha_{m+1} = \frac{\sin\theta_{m+1}(\cos\gamma_m \cdot \cos\varphi_{m+1} - \sin\varphi_{m+1} \cdot \cos\beta_m)}{\sqrt{\cos\alpha_m^2 + \cos\beta_m^2 + \cos\alpha_m^2 \cdot \cos\theta_{m+1}}} \\ \cos\beta_{m+1} = \frac{\sin\theta_{m+1}(\cos\beta_m \cdot \cos\gamma_m \cdot \cos\varphi_{m+1} - \sin\varphi_{m+1} \cdot \cos\varphi_m)}{\sqrt{\cos\alpha_m^2 + \cos\beta_m^2 + \cos\beta_m^2 \cdot \cos\theta_{m+1}}} \\ \cos\gamma_{m+1} = \frac{-\sin\theta_m \cdot \cos\varphi_m \cdot \sqrt{\cos\alpha_m^2 + \cos\beta_m^2} + \cos\gamma_m \cdot \cos\theta_m}{\cos\gamma_m \cdot \cos\theta_m} \end{cases} \quad (5)$$

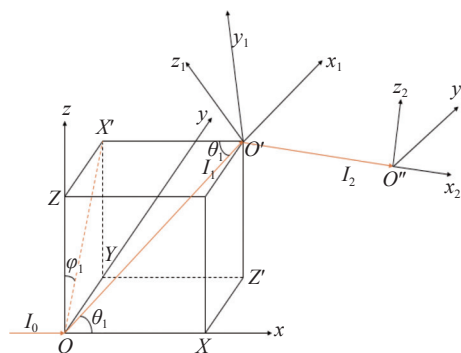


图 2 单个光子两次碰撞散射坐标系示意图

Fig.2 Schematic diagram of double collision scattering coordinate system of a single photon

(3) 光子生存确定

设置光子生存权值阈值为  $w_Y$ , 单次散射率为  $w_D$ , 第  $m+1$  次碰撞后光子权值  $w_{m+1}$  为:

$$w_{m+1} = w_m \cdot w_D \quad (6)$$

若  $w_{m+1} < w_Y$ , 光子继续运动, 若  $w_{m+1} \geq w_Y$ , 光子被吸收。蒙特卡洛光子模拟运动程序图如图 3 所示。

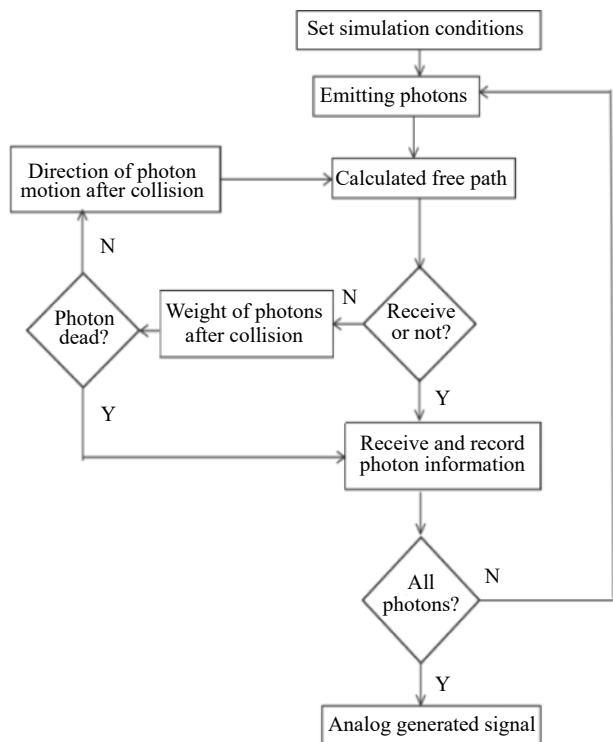


图 3 光子模拟运动程序图

Fig.3 Program diagram of photon simulated motion

### 2 浑浊水体后向散射光信号仿真

根据上述过程利用蒙特卡洛模拟对不同水质的后向散射光信号进行了仿真,仿真条件设置为水中无目标物,改变水的衰减系数,实验光子数为 $10^6$ ,水体散射率为0.9,在模拟中进行了几点假设,(1)不考虑湍流影响。(2)一个光子与介质微粒发生相邻两次碰撞之间存在一个自由运动过程,可视为匀速直线运动。(3)光子与介质或微粒的相互作用只在碰撞点发生,即光子与介质或微粒只发生碰撞,包括吸收和散射过程。

图 4 分别展示了衰减系数为 0.01、0.05、0.1、0.5、 $1\sim 10\text{ m}^{-1}$  的接收光子图,图 5 为不同衰减系数下水体后向散射峰值的光子数变化图。由图 4、5 可以看出峰值光子数在  $3\times 10^5$  以下,在衰减系数为  $5\sim 10\text{ m}^{-1}$  时,水体回波基本接近一致。随衰减系数的增加,接收曲线由凸变凹,光子完全消亡的时间在减小,其原因是随衰减系数的增加,光子碰撞的概率增加,其对比衰减系数小的时候,吸收和散射的概率增加,接收光子的自由程减小,但吸收和散射次数增加,近场水体散射增强,光子完全消亡的时间减小。随水体衰减系数的增加,接收光子的总数及峰值光子数在逐渐缓

慢增多。原因是衰减系数越大,光子的自由程减小,近场水体散射增强,以接收一次散射光子为例,光子与镜头的距离越近,进入镜头的概率越大,造成接收光子总数及峰值光子数增多。

设置水体衰减系数为  $0.2\text{ m}^{-1}$ ,水体散射率设置

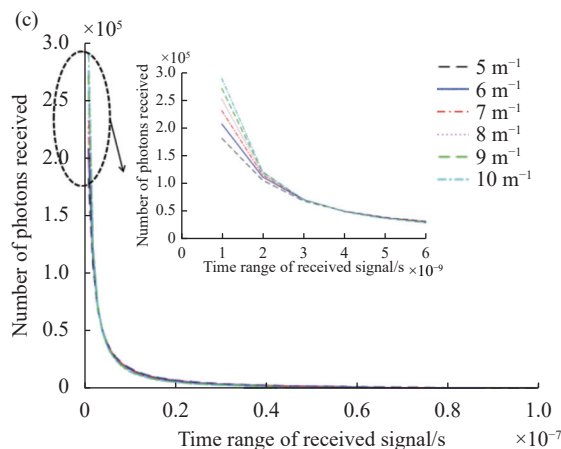
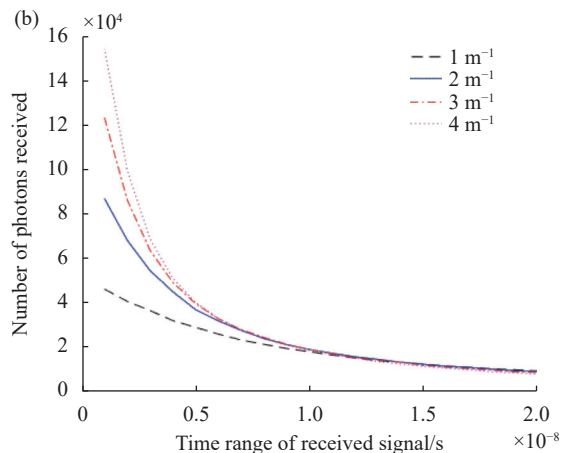
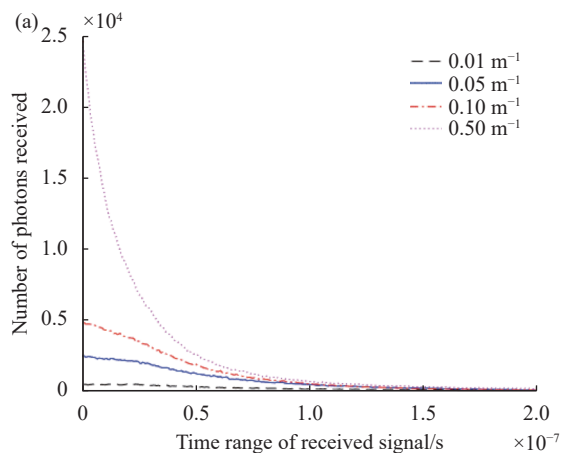


图 4 不同衰减系数的水体后向散射回波光信号仿真

Fig.4 Simulation of pure water backscattering echo light signal with different attenuation coefficients

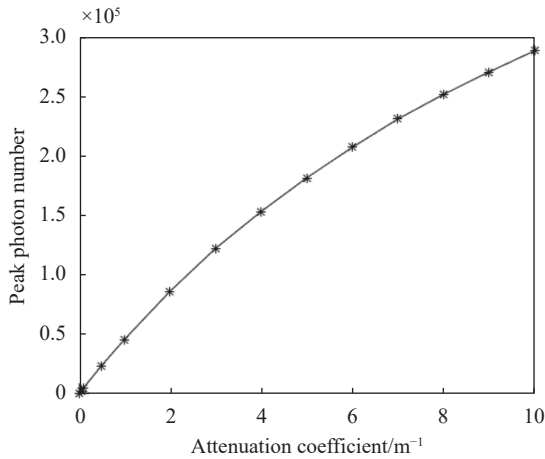


图 5 不同衰减系数水体后向散射峰值光子数变化图

Fig.5 Variation of peak photon number of pure water backscattering with different attenuation coefficients

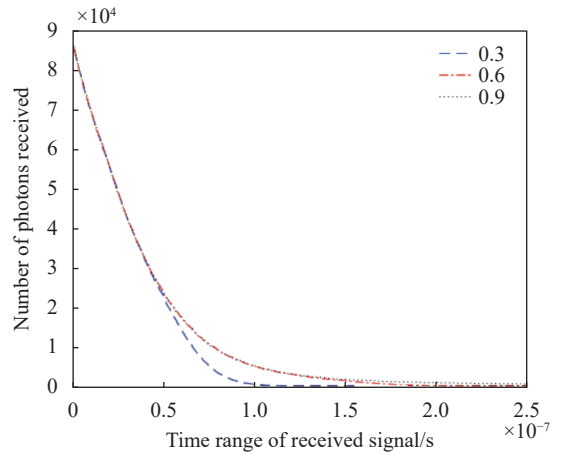


图 6 不同散射率水体后向散射仿真

Fig.6 Backscattering simulation of pure water with different scattering rates

为 0.3、0.6、0.9, 不同水体散射率后向散射图如图 6 所示, 由图可以看出: 水体散射率为 0.3 时, 水体回波信号衰减较快, 散射率为 0.6 和 0.9 时的水体回波信号大致相同, 但散射率为 0.6 时的水体回波信号要比散射率为 0.9 时衰减得快。随水体散射率的增加, 光子数消亡速度降低, 原因是随着水体散射率的增加, 吸收率降低, 光子发生吸收的概率降低, 发生散射概率的增加, 光子传播自由程次数增加, 消亡概率减小, 导致光子消亡速度降低。从某种程度上反映了随水体散射率的增加, 脉冲宽度会展宽。

仿真结果表明: 随水体衰减系数的增加, 接收峰值光子数在逐渐增多, 上升速率较为缓慢; 随水体散射率的增加, 光子数消亡速度降低, 从某种程度上反映激光脉冲宽度会展宽。

### 3 浑浊水体后向散射回波实验及分析

实验水池尺度为 16 m × 1.5 m × 1 m, 将泥土粉尘加入水体中来模拟浑浊水体, 粉尘颗粒可在水中悬浮, 进而模拟水体的浊度。利用水质检测仪检测水质的浊度, 通过水体浊度等效模拟水体衰减系数的变化<sup>[15]</sup>。

激光器发射波长为 532 nm, 脉冲宽度为 8~10 ns, 重复频率在 1~20 Hz 范围内可调, 激光器能量在 1~20 mJ 之间可调, 接收增益可调。在进行实验时, 采取固定的激光脉冲能量和接收系统增益, 采集多组数据进行统计分析, 避免由于激光器稳定性、测量误差带来的随机误差。实验系统设计图如图 7 所示。

利用水质检测仪检测水质起始浊度为 0.09 NTU, 加入泥土粉尘后水质浊度分别为 0.65、2.23、5.57、

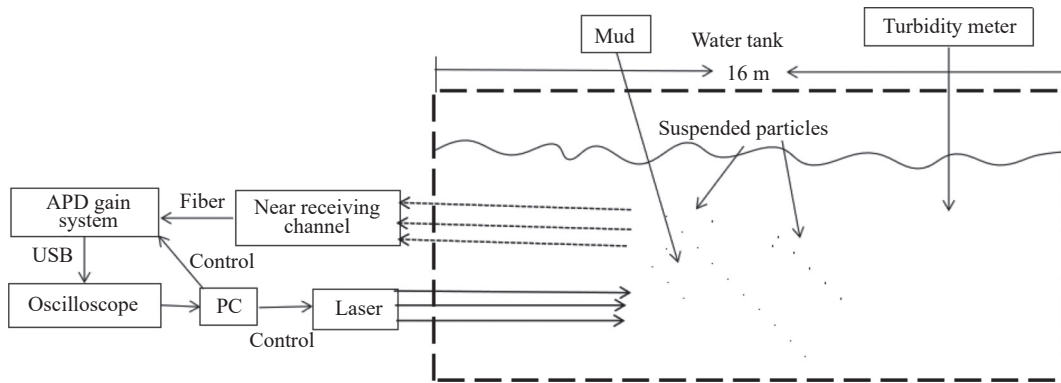


图 7 实验系统图

Fig.7 Experimental system diagram

9.13、15.69、18.32、22.78 NTU。水体后向散射回波信号图如图 8 所示, 峰值信号幅度随浊度变化图如图 9 所示, 水体回波脉冲宽度随浊度变化图如图 10 所示。如图 8(a)、图 9 所示, 随浊度变大, 即衰减系数变大, 水体后向散射回波幅度缓慢增加, 且在浊度为 18.32 NTU 时信号饱和; 随水体浊度的增加, 即水体衰减系数的增加, 在浊度为 0.09~2.23 NTU 时, 脉冲宽度先快速展宽, 展宽约为 10 ns, 在浊度为 2.23~18.32 NTU 时, 信号缓慢展宽, 展宽约为 7 ns, 在浊度为 18.32 NTU 之后快速展宽, 展宽约为 14 ns。主要原因是由于水体中的悬浮粒子增加, 水体散射率增加, 悬浮粒子对激光主要产生散射作用, 近场水体悬浮粒子散射增强, 回到接收系统的光子增加, 导致回

波信号幅度及峰值幅度逐渐增加。将仿真与实验进行对比, 水体后向散射图基本吻合, 且峰值变化趋势相同, 脉冲宽度变化趋势也相同, 仿真与实验得到了相互验证。

实验结果表明: 随水体中悬浮粒子的增加, 即水体衰减系数的增加, 水体激光后向散射回波幅度逐渐增高, 脉冲宽度逐渐展宽。水中悬浮粒子主要对激光产生散射作用。且随水体衰减系数的增加, 近场水体散射逐渐增强, 在进行浑浊水体弱小目标探测时, 应尽可能地屏蔽近场水体散射, 应通过减小激光器能量及接收系统增益来增强水体回波与目标回波之间的差异, 以此提高浑浊水体水下弱小目标探测的信噪比。

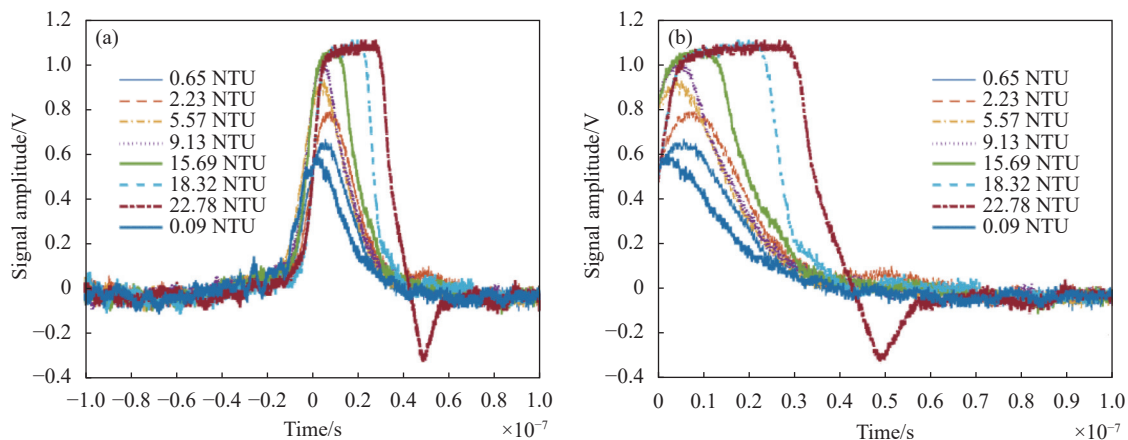


图 8 水体后向散射信号回波图。(a) 完整回波信号图; (b) 正向时间回波信号图

Fig.8 Echo diagram of backscattered signal of water body. (a) Diagram of complete echo signal; (b) Diagram of forward time echo signal

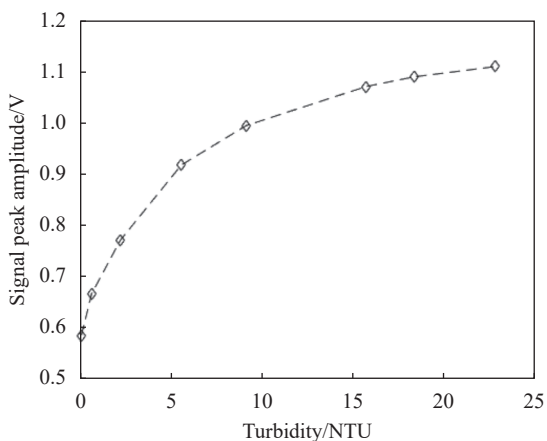


图 9 峰值信号幅度随浊度变化图

Fig.9 Variation diagram of peak signal amplitude with turbid

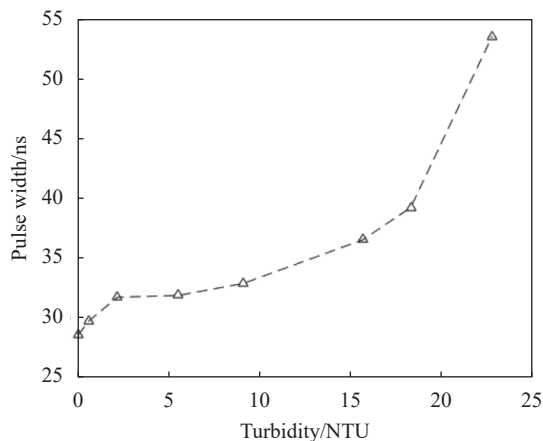


图 10 脉冲宽度随浊度变化图

Fig.10 Diagram of pulse width with turbidity

## 4 结束语

文中针对浑浊水体环境下弱小目标探测的应用背景,利用蒙特卡洛方法对光子传播过程进行仿真,建立了水下光子传播的蒙特卡洛仿真模型,模拟不同水质下的水体后向散射回波信号,对不同衰减系数下的水体后向散射回波信号进行了分析。仿真结果表明:随水体衰减系数的增加,近场水体回波信号接收光子数逐渐增多;随水体散射率的增加,光子消亡速率逐渐降低,可与理论互相验证。开展了不同浊度下的激光雷达回波信号测试实验。结果表明:随水体衰减系数的增加,水体激光后向散射回波幅度逐渐增高,脉冲宽度逐渐展宽。在进行水下弱小目标探测时,若水质清澈应增大激光能量或接收系统增益,若水质浑浊应减小激光能量或接收增益。实验验证了理论与仿真结果,为浑浊水体环境下水下弱小目标激光探测系统在不同水质下的激光能量选取、接收系统增益设计等提供理论支撑,增强了水体回波与目标回波之间的差异,提高了浑浊水体水下弱小目标探测的信噪比。

### 参考文献:

- [1] Wei Zhen, Shen Na, Zhang Xiangjin. Experimental research and improved algorithm in attenuation model of rain transmission of laser at 532 nm [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2018, 47(11): 1106004. (in Chinese)
- [2] Kang Wenyun, Song Xiaoquan, Wei Zhen. Weak signal detecting method of laser ranging for space target in daytime [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2014, 43(9): 3026-3029. (in Chinese)
- [3] Yang Chaoxiong, Jiang Haibo, Sun Xiuhui, et al. Fabrication of holographic diffuser with large scattering angle realized by multi-angle speckle exposure [J]. *Acta Optica Sinica*, 2021, 41(16): 1609001. (in Chinese)
- [4] Cui Xiaoyu, Tao Yuting, Liu Qun, et al. Software to simulate spaceborne oceanic lidar returns using semianalytic Monte Carlo technique [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2020, 49(2): 0203009. (in Chinese)
- [5] Zhang Yingluo, Wang Yingmin, Huang Aiping. Influence of suspended particles based on mie theory on underwater laser transmission [J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2018, 45(5): 0505002. (in Chinese)
- [6] Shen Fahua, Zhuang Peng, Wang Bangxin, et al. Research on retrieval method of low-altitude wind field for rayleigh-mie scattering doppler lidar [J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2021, 48(11): 1110005. (in Chinese)
- [7] Zhao Qiaohua, Wang Xin, Li Junsheng, et al. Characteristic analysis of the fluctuation of the downwelling diffuse attenuation coefficient in meiliang bay of Taihu Lake [J]. *Journal of Remote Sensing*, 2008(1): 128-134. (in Chinese)
- [8] Chen Huimin, Ma Chao, Qi Bin, et al. Study on backscattering characteristics of pulsed laser fuze in smoke [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2020, 49(4): 0403005. (in Chinese)
- [9] Li Jing. Research on carrier modulated underwater laser communication based on analytical Monte Carlo method. [D]. Wuhan: Huazhong University of science and technology, 2013. (in Chinese)
- [10] Shi Shengwei, Wang Jiang'an, Jiang Xingzhou, et al. Analysis of scattering phase function and backscattering signal characteristic of bubble films in ship wake [J]. *Acta Optica Sinica*, 2008, 28(10): 1861. (in Chinese)
- [11] Chen Xingsu, Wang Xuefeng, Gao Canguan. Analysis of diffuse light field based on Monte Carlo simulation [J]. *Laser Journal*, 2016, 37(4): 50-53. (in Chinese)
- [12] Xu Qirui, Yin Fuchang. Monte Carlo simulation of laser propagation in underwater multipath [J]. *Journal of Changchun University of Science and Technology (Natural Science Edition)*, 2008, 31(1): 81-84. (in Chinese)
- [13] Kong Xiaojuan, Liu Bingyi, Yang Qian, et al. Simulation of water optical property measurement with shipborne lidar [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2020, 49(2): 0205010. (in Chinese)
- [14] Yang Yu, Fan Linlin, Zhang Feng, et al. Interventional monitoring method of hemoglobin concentration based on Lambert-Beer law [J]. *Journal of Optoelectronics · Laser*, 2020, 31(4): 447-452. (in Chinese)
- [15] Ding Kun, Huang Youwei, Jin Weiqi, et al. Experimental study on the relationship between attenuation coefficient of blue-green laser transmission and the water turbidity [J]. *Infrared Technology*, 2013, 35(8): 467-471. (in Chinese)