

doi:10.3788/gzxb20164512.1207002

基于双向反射函数的水下激光引信回波仿真方法

谭亚运, 张合, 查冰婷

(南京理工大学 智能弹药技术国防重点学科实验室, 南京 210094)

摘 要: 针对鱼雷激光近炸引信探测水下近场目标的需求, 开展了水下激光引信回波蒙特卡洛仿真方法研究. 结合水下激光引信探测特点建立水下目标回波的蒙特卡洛仿真模型. 为了提高水中非朗伯目标表面回波仿真的准确度, 推导了基于双向反射函数的光子反射方向概率分布, 根据概率分布随机抽样光子反射方向. 仿真了不同距离和入射角度条件下的水中目标回波信号. 仿真结果表明: 目标回波幅度随目标距离和入射角度的增大迅速下降, 目标距离在 6~12 m 内变化时, 信号峰值动态范围为 11.5 dB; 目标距离为 8 m, 激光入射角在 0~45° 内变化时, 信号峰值动态范围为 9.2 dB. 为验证仿真方法的正确性, 在水池中进行水中目标蓝绿激光探测实验, 实验结果和仿真结果一致. 研究成果可为解决传统蒙特卡洛方法在水中非朗伯面目标回波仿真中的适用性问题及水下激光引信优化设计提供参考.

关键词: 近炸引信; 水下激光; 蒙特卡洛; 目标回波; 双向反射函数

中图分类号: TJ43

文献标识码: A

文章编号: 1004-4213(2016)12-1207002-6

Simulation of Underwater Laser Fuze Echo Based on Bidirectional Reflectance Distribution Function

TAN Ya-yun, ZHANG He, ZHA Bing-ting

(ZNDY of Ministerial Key Laboratory, Nanjing University of Science and Technology, Nanjing 210094, China)

Abstract: Aiming at the necessity of torpedo laser proximity fuze detecting underwater near field target, study on Monte Carlo simulation of underwater laser fuze echo was carried out. The Monte Carlo simulation model of underwater target echo was developed based on the characteristics of underwater laser fuze detection. In order to improve the echo simulation accuracy of the underwater non-Lambertian target, The probability distribution of photon reflecting direction based on bidirectional reflectance function was derived. Then the direction of photon reflection was randomly sampled according to the probability distribution. The underwater target echo under the condition of different distances and the incident angle was simulated. The results show that target echo amplitude decreases rapidly with the increase of target distance and incident angle. The dynamic range of signal peak achieves 11.5 dB when target distance changes within 6~12 m; the dynamic range of signal peak achieves 9.2 dB when target distance is 8 m and incident angle changes within 0~45°. The experiment of underwater target laser detection was conducted in a water tank to verify the correctness of the simulation method. The experimental data have a good consistency with the simulation results. It improves the effectiveness of traditional Monte Carlo method in non-Lambertian underwater target echo simulation which provides a theoretical reference for underwater laser fuze design.

Key words: Fuze; Underwater laser; Monte Carlo; Target echo; Bidirectional reflectance distribution function

OCIS Codes: 070.1170; 070.7345; 010.3310; 290.1483

基金项目: 国家自然科学基金(No. 51275248)和总装备部预研基金资助项目(No. 9140A05020114BQ02063)

第一作者: 谭亚运(1990-), 男, 博士研究生, 主要研究方向为水下激光探测技术. Email: tyynjust@163.com

导师(通讯作者): 张合(1957-), 男, 教授, 博士, 主要研究方向为智能探测与控制技术、武器系统信息联接技术. Email: hezhangz@mail.njust.edu.cn

收稿日期: 2016-08-03; 录用日期: 2016-09-27

<http://www.photon.ac.cn>

0 引言

目前鱼雷近炸引信多数采用声探测和电磁探测技术. 宽带噪声干扰器、各种人工声诱饵、拖拽或自航式声诱饵以及消声敷瓦的应用会大大削弱声引信的探测性能. 电磁探测技术探测距离较近且难以精确分辨目标方位, 同时伴随材料技术的发展, 非铁磁性材料在水中武器装备上的应用也大大降低了电磁探测的性能^[1-2]. 海水中蓝绿透光窗口的发现, 为水下目标探测开辟了一条新的途径, 激光具有高亮度、高准直度和方向性好等优点, 用于水下目标的探测可以获得比声响更高的测距、定位和成像准确度, 开展水下激光引信研究对提高鱼雷对目标毁伤效能有重要意义^[3].

研究人员对激光在水中的传输特性、海水后向散射和目标回波方面开展了大量研究, 研究方法主要包括理论计算法^[4-5]、实验法^[6]和蒙特卡洛(Monte Carlo, MC)数值模拟法^[7-9]. 理论计算基于光的粒子特性的辐射传输理论, 由于光在水中的传输过程复杂且影响因素众多, 严格意义的水下激光传输方程解析形式难以得到, 精确解的计算繁琐耗时, 因此多采用单次散射近似和小角度散射近似法计算目标回波. 实验法获得的实验数据有限, 难以模拟多种复杂的海水环境, 且实验成本较高. 蒙特卡洛法是常用的激光在散射介质传输的模拟方法, 广泛应用在云雾、雨中和细水雾中的激光引信回波模拟. 目前对光传输蒙特卡洛法模拟的研究主要集中在光子散射方向的抽样方法改进和模拟结果方差消除等方面, 仿真时假设目标表面为朗伯反射面且与发射光束垂直, 未考虑目标反射特性和光束入射角对激光回波的影响^[10-11]. 为解决上述问题, 提高水下激光引信目标回波仿真准确度, 本文结合目标表面的反射特性对蒙特卡洛法中光子碰撞目标后的反射方向进行抽样, 仿真分析了利用 532nm 激光脉冲探测水中目标时的回波信号, 并对仿真结果进行了水池实验验证.

1 水下激光接收信号 MC 仿真方法

水下激光引信探测模型如图 1. S_1 、 S_2 分别为激光引信发射和接收系统, 发射中心与接收中心距离为 d_0 . 发射光束半径为 r_1 , 发散半角为 φ_1 ; 激光接收口径为 r_r , 视场半角为 φ_r . 发射和接收视场轴线平行, 目标表面与发射光束轴线夹角为 φ_s . 蒙特卡洛法将光脉冲在海水中的传输转化为大量光子在海水中的输运问题, 通过一系列 $[0, 1]$ 上均匀分布的随机数来追踪每个光子的运动状态. 统计光子经过海水散射和目标反射后, 激光接收系统探测到的海水后向散射和目标反射光能量. 建立仿真坐标系, 以激光器发射中心为坐标原点, 光束发射方向为 z 轴, 激光接收与发射连线为 x 轴, y 轴与 x 、 z 轴构成右手坐标系.

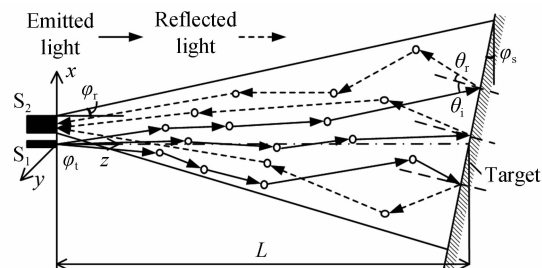


图 1 水下激光引信探测模型

Fig. 1 The detection model of underwater laser fuze

如图 1, 发射口径很小, 因此将光源作为点光源, 则发射光子初始位置为坐标系原点. 光子的初始散射角在 $[0, \varphi_1]$ 内均匀分布, 方位角在 $[0, 2\pi]$ 内均匀分布. 发射光脉冲峰值光子数为 N_0 , 将发射脉冲在时间上以 Δt 为间隔划分为光子包, 用每个光子包中光子的数量来表示该时刻的发射功率.

1.1 水中光子传输模型

根据 Lambert-Beer 定律, 光子在海水中自由步长为 $l = -\ln(\xi_1)/\mu$, 其中 μ 为海水衰减系数. 光子在海水中传输过程中与水中悬浮粒子发生碰撞后, 光子的运动方向会发生变化, 新的运动方向由碰撞后的散射角 θ 和方位角 φ 确定. 光子散射在方位角方向是各向同性的, 因此 $\varphi = 2\pi\xi_2$. 散射角 θ 由 Mie 散射相函数确定, 散射相函数表征的是光子与海水中悬浮粒子碰撞后在各个方向的散射强度. Mie 函数由于公式复杂且没有解析解, 通常用 HG 函数代替^[12], 即

$$H(\theta) = \frac{1-g^2}{2(1+g^2-2g\cos\theta)^{3/2}} \quad (1)$$

通过对 HG 函数抽样得到光子散射角为

$$\theta = \arccos \left\{ \frac{1}{2g} \left[(1+g^2) - \frac{(1-g^2)^2}{(1-g^2+2g\xi_3)^2} \right] \right\} \quad (2)$$

式中, g 为非对称因子, 海水中取 $g = 0.924$ ^[13]. 通过坐标变换, 散射后光子在水中的运动方向余弦为

$$\begin{cases} u'_x = \frac{\sin\theta}{\sqrt{1-u_z'^2}}(u_x u_z \cos\varphi - u_y \sin\varphi) + u_x \cos\theta \\ u'_y = \frac{\sin\theta}{\sqrt{1-u_z'^2}}(u_y u_z \cos\varphi - u_x \sin\varphi) + u_y \cos\theta \\ u'_z = -\sin\theta \cos\varphi \sqrt{1-u_z'^2} + u_z \cos\theta \end{cases} \quad (3)$$

式中, (u'_x, u'_y, u'_z) 和 (u_x, u_y, u_z) 分别为散射前后光子运动方向余弦. 由于水中目标体积较大, 可以看作扩展目标. 当光子某次散射位置的 z 坐标大于目标距离 L 时, 认为光子与目标表面碰撞(忽略目标倾斜对光子到达位置的影响).

1.2 光子接收与消亡

由于水下激光引信接收口径和视场很小, 通过直接统计返回光子数量来计算接收信号需要大量光子, 计算量大且有很大的统计方差. 因此为了加快计算收敛性, 当光子在接收视场内的每个散射位置时, 对光子

进行解析接收直至光子消亡^[14]. 光子返回接收系统的权重可以表示为

$$p_n = \frac{H(\theta')}{4\pi} (A/h^2) \exp(-ch)\omega_n \quad (4)$$

式中, A 为激光接收系统面积, h 为光子散射位置距接收系统中心的直线距离, θ' 为光子散射方向与接收轴线的夹角.

光子的初始权重 $\omega_0 = 1$, 每经历一次散射, 光子的权值逐渐衰减, 直至低于权重阈值 ω_c , 光子消亡. 每一次散射和解析接收后, 光子的权重为

$$\omega_{n+1} = \left(1 - \frac{H(\theta')}{4\pi} (A/h^2)\right) \omega_n \omega_s \quad (5)$$

式中, ω_s 为海水单次反射率. 按照发射顺序追踪每个光子运动轨迹, 通过对大量光子的模拟最终统计得到探测器接收信号波形.

2 基于 BRDF 的光子反射方向抽样

2.1 目标反射特性

对于非朗伯表面, 通常采用双向反射函数 (Bidirectional Reflectance Distribution Function, BRDF) 来表述不同入射角条件下目标表面在空间的反射特性. 为了减少目标在水中的航行阻力和提高隐蔽性, 通常会在表面涂减阻涂层和消声涂层, 目标表面高度均方根远远大于入射激光波长. 结合水中目标表面材料光学特性和激光引信单波长探测的特征, 选用实用的六参量 BRDF 模型, 经大量实验表明该模型能够准确地描述涂漆表面的反射特性^[15]. 六参量模型的表达形式为

$$f_r(\theta_i, \theta_r, \varphi_r) = f_{\text{spec}} + f_{\text{diff}} = \frac{k_b}{\pi \ln 2} \cdot \frac{k_r^2 \cos \alpha \exp[-|b|(1 - \cos \gamma)^a] \ln(1 + \cos \theta_i \cos \theta_r)}{1 + (k_r^2 - 1) \cos \alpha} + \frac{k_d}{\pi} (\cos \theta_i \cos \theta_r)^c \quad (6)$$

式中

$$\cos \alpha = \frac{\cos \theta_i + \cos \theta_r}{2 \cos \gamma} \quad (7)$$

$$\cos^2 \gamma = \frac{1}{2} (\cos \theta_i \cos \theta_r + \sin \theta_i \sin \theta_r \cos \varphi_r + 1) \quad (8)$$

式(6)中第一项代表镜面反射分量, 第二项代表漫反射分量. θ_i, θ_r 分别为入射光和反射光天顶角. 对于各向同性表面, 反射特性与入射方位角无关, φ_r 为反射光和入射光的相对方位角, k_b, k_r, b, a, k_d 和 c 为待定参量. 对于某一种目标表面的反射特性, 可以通过与标准漫反射板的对比试验测量的方法确定 BRDF 模型中的待定系数. 对于朗伯反射面, $c=0$ 且 k_d 为朗伯面的半球反射率. 目标坐标系以目标法线方向为 y' 轴, 将仿真坐标系 $oxyz$ 绕 y 轴方向逆时针旋转 $\pi/2 - \varphi_s$, 激光入射角和反射角的几何关系如图 2.

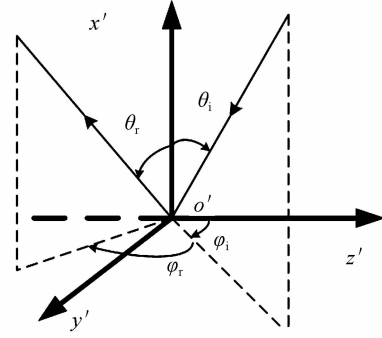


图 2 BRDF 的几何关系

Fig. 2 Geometry relation of BRDF

碰撞时光子入射天顶角和方位角为

$$\begin{cases} \theta_i = \arccos(\sin \varphi_s u_{x0} - \cos \varphi_s u_{z0}) \\ \varphi_i = \arccos\left(\frac{\cos \varphi_s u_{x0} + \sin \varphi_s u_{z0}}{\sqrt{u_{y0}^2 + (\cos \varphi_s u_{x0} + \sin \varphi_s u_{z0})^2}}\right) \end{cases} \quad (9)$$

式中, (u_{x0}, u_{y0}, u_{z0}) 为碰撞目标前一次散射后光子运动方向.

2.2 反射方向抽样方法

得到目标表面的反射特性后, 如果已知照射光入射角度, 则可以得到目标反射特性的解析形式. 目标表面半球方向反射率为

$$\rho(\theta_i) = \rho_{\text{spec}}(\theta_i) + \rho_{\text{diff}}(\theta_i) = \int_{2\pi} f_r(\theta_i, \theta_r, \varphi_r) \cdot \cos \theta_r d\Omega \quad (10)$$

反射光子反射方向概率密度函数为

$$p(\theta_i, \theta_r, \varphi_r) = f_r(\theta_i, \theta_r, \varphi_r) \cos \theta_r / \rho(\theta_i) \quad (11)$$

对概率密度函数在半球空间内积分即可得到反射光子方向的累积概率分布函数, 即

$$P(\theta_i, \theta_r, \varphi_r) = \int_{-\pi/2}^{\theta_i} \int_{-\pi/2}^{\varphi_r} p(\theta_i, \theta_r, \varphi_r) \sin \theta_r d\theta_r d\varphi_r \quad (12)$$

当入射光子方向确定时, 反射光方向的概率密度函数是反射光天顶角 θ_r 和相对方位角 φ_r 的二元函数. 概率密度函数中包含的 BRDF 表达式很复杂, 不能用解析的方法求出反射光子方向的规律分布, 而需要采用数值方法近似来随机抽样光子反射方向. 研究人员提出了多种对于复杂 BRDF 的重要性抽样方法, 这些方法具有很好的抽样准确度但是计算复杂^[16]. MC 仿真需对大量光子轨迹进行统计, 对单个光子的反射抽样计算如果十分复杂则会极大地增加仿真时间, 因此上述方法不适用于水下目标回波的 MC 仿真. 本文根据光子反射方向概率密度和水下激光引信探测的特点, 提出光子反射方向抽样简化方法:

1) 反射方式抽样

目标表面的 BRDF 包含镜面反射和漫反射两部分, 当入射角一定时, 镜面反射是关于 θ_r 和 φ_r 的二元函数, 且表达式复杂; 而漫反射部分是关于 θ_r 的一元函数, 形式简单. 因此, 光子反射方向的概率密度函数也可以分为镜面反射和漫反射两部分, 分别在半球空间

内对两者积分求得对应的概率值 W_1 和 W_2 , 显然 $W_1 + W_2 = 1$. 抽样时根据镜面反射和漫反射在总体反射中所占的权重来随机抽样确定光子的反射方式, 即在 $[0, 1]$ 上均匀抽样一个随机数 ξ_1 , 若 $\xi_1 \geq W_1$ 则认为光子发生漫反射, 反之光子发生镜面反射;

2) 漫反射方向抽样

当光子发生漫反射时, 式(11)舍去镜面反射部分, 漫反射部分的条件概率密度为

$$p_{\text{diff}}(\theta_i, \theta_r) = \frac{f_{\text{diff}}(\theta_i, \theta_r) \cos \theta_r}{\int_{-\pi/2}^{\pi/2} f_{\text{diff}}(\theta_i, \theta_r) \cos \theta_r d\Omega} \quad (13)$$

当入射方向已知, 式(13)是关于反射天顶角的一元函数, 且在积分区域内具有可逆的解析积分形式. 根据概率基本定律, 取 $[0, 1]$ 上均匀分布的随机数 ξ_5 , 使

$$\int_{-\pi/2}^{\pi/2} \int_{-\pi/2}^{\theta_r} p_{\text{diff}}(\theta_i, \theta_r) \sin \theta_r d\theta_r d\varphi_r = \xi_5 \quad (14)$$

积分求解式(14)即可求得对应的 θ_r , 从而实现反射光子天顶角的抽样, 反射光子方位角 φ_r 在 $[-\pi/2, \pi/2]$ 上均匀分布, 即 $\varphi_r = \pi \xi_6 - \pi/2$;

3) 镜面反射方向抽样

若光子为镜面反射时, 反射光能量主要分布在同入射方向同平面的方向上, 在方位角方向的散布较小. 另外, 由于水下激光探测系统发射和接收轴线平行且间距很小, 激光接收视场在目标方向可以近似为同轴的圆锥形视场, 光子的反射方位角对光子的接收概率影响较小. 因此为了简化计算, 认为镜面反射光子只与入射光子同平面反射. 舍去漫反射部分, 再令反射光子的相对方位角为 0° , 反射光子在天顶角方向的条件概率密度为

$$p_{\text{spec}}(\theta_i, \theta_r) = \frac{f_{\text{spec}}(\theta_i, \theta_r, \varphi_r = 0) \cos \theta_r}{\int_{-\pi/2}^{\pi/2} f_{\text{spec}}(\theta_i, \theta_r, \varphi_r = 0) \cos \theta_r \sin \theta_r d\theta_r} \quad (15)$$

简化后的镜面反射概率密度函数较为复杂, 其概率分布可以通过式(15)数值积分得到数值解, 但是没有可逆的解析形式, 不能采用求积分反函数的方法随机抽样光子反射方向. 因此, 采用离散的概率密度函数来设计累计概率分布, 进而对反射天顶角进行随机抽样. 将概率密度函数 $p_{\text{spec}}(\theta_i, \theta_r)$ 离散化, 在反射天顶角区间 $[-\pi/2, \pi/2]$ 均匀设置 N 个等分点, 每个等分点对应一个角度 $\theta_r(i)$, 则在第 i 个分割点处的概率密度值为 $p(i)$, 对 $p(i)$ 求和并归一化, 得到新的一组数据 $q(i)$ 为

$$q(i) = \frac{p(i)}{\sum_{i=1}^n p(i)} \quad (16)$$

根据概率基本定律, 随机抽样在 $[0, 1]$ 上均匀分布的随机数 ξ_7 , 相应地在 $[0, N]$ 上有且仅有一个正整数 x 使得

$$\sum_{i=1}^x q(i) < \xi_7 \leq \sum_{i=1}^{x+1} q(i) \quad (17)$$

与正整数 x 对应的角度 θ_r 即为反射光子的天顶角. N 的值越大, 抽样的准确度越高, 但计算量越大. 仿真中兼顾准确度与效率, 在 $[-\pi/2, \pi/2]$ 区间内, N 取 300, 则 θ_r 的抽样分辨率为 0.6° . 抽样得到 θ_r 和 φ_r 后, 反射光子在仿真坐标系中的运动方向可表示为

$$\begin{aligned} u_{xr} &= \sin \varphi_s + \sin \theta_r \cos(\varphi_r + \varphi_i) \cos \varphi_s \\ u_{yr} &= \sin \theta_r \sin(\varphi_r + \varphi_i) \\ u_{zr} &= -\cos \varphi_s \cos \theta_r + \sin \varphi_s \sin \theta_r \cos(\varphi_r + \varphi_i) \end{aligned} \quad (18)$$

2.3 光子入射方向简化

由光子反射方向抽样方法可知, 对每个光子的反射方向抽样需根据入射角来计算光子反射方向概率密度函数. 蒙特卡洛法仿真水中目标回波需要统计大量光子的传输过程, 若对每个光子都根据其入射方向计算其反射方向概率密度, 计算量较大. 根据目标的反射特性和探测系统的特点, 对到达目标的光子进行取舍来减少无用的计算.

水下激光引信探测水中近场目标, 探测距离一般在 3~5 个衰减长度. 发射光束到达目标时, 仍具有较好的准直性, 目标回波绝大部分由小角度散射光子和准直光子贡献. 大散射角的入射的光子本身经过了多次散射权重较低, 且由于接收视场很窄, 大散射角度的光子经过目标反射后再进入探测视场的概率很小. 因此, 计算目标面反射光子时只计算小角度散射的入射光子, 将入射光归类成准直(散射角小于 2°)和小角度(散射角度 $2^\circ \sim 5^\circ$)两类, 散射角度分别用 0° 和 3° 来近似. 分别计算这两种角度条件下光子的入射角度, 进一步计算其镜面和漫反射概率密度函数分布, 这样仿真时只需要计算两个入射角度下的光子反射概率密度, 计算每个光子的反射时可以直接调用, 极大地提高仿真效率.

3 仿真与实验

3.1 仿真与实验设置

为了验证模拟方法模拟目标回波的准确性, 在水池中开展水下目标激光探测实验, 水池实验设置如图 3. 水池长 15 m, 宽度和水深均为 1.5 m, 水池两端为高透射率光学玻璃, 壁面覆盖吸光材料. 水池中注入溶解了粗制海盐的自来水来模拟海水水质, 水体衰减系数为

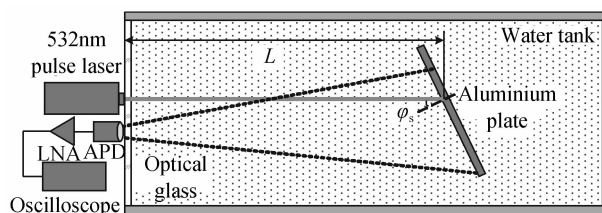


图 3 实验设置

Fig. 3 Layout of the experiment setup

0.22, 散射系数为 0.15. 发射光源采用 532 nm 泵浦蓝绿激光器, 峰值功率约 10 kW. 光电探测器采用 First sensor 公司的 AD500-8 型 APD, 光电探测模块电压灵敏度为 1.2×10^6 V/W, 带宽 80 MHz. 便于对比, 设置仿真参量与实验系统一致, 如表 1. 目标为涂白漆铝板, 实验室测定的六参量 BRDF 模型待定系数为 $k_b = 0.59$ 、 $k_r = 11.9$ 、 $b = -35.5$ 、 $a = 0.78$ 、 $k_d = 0.42$ 、 $c = 0.05$. 入射角为 30° 时, 目标表面 BRDF 如图 4.

表 1 系统参量
Table 1 System parameters

Parameters	Value	Parameters	Value
φ_t /mrad	2	d_0 /cm	8
φ_r /mrad	17	N_0	2 000
r_t /cm	1	τ /ns	10
r_r /cm	1.5	ω_e	10^{-6}

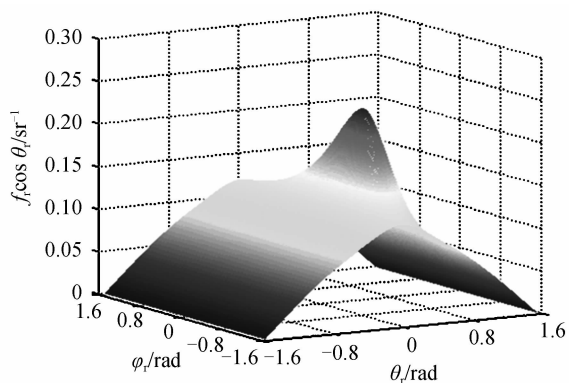


图 4 涂白漆铝板表面 BRDF
Fig. 4 BRDF of aluminium plate with white paint

在水池中距离探测系统不同位置处放置目标, 并通过转动目标板方向调整激光入射角度, 分别测试目标回波信号随目标距离和入射角度的变化.

3.2 结果分析

当发射光束垂直入射时, 目标在不同距离处的仿真和实验激光回波波形如图 5, 对仿真结果进行了数学平滑处理. 仿真波形为接收的回波功率波形, 实验波形是经过光电转换的电压信号. 实际应用中, 激光接收系统的响应度受到光学系统透过率、探测器偏置电压及环境温度等复杂因素影响, 因此通过仿真得到的回

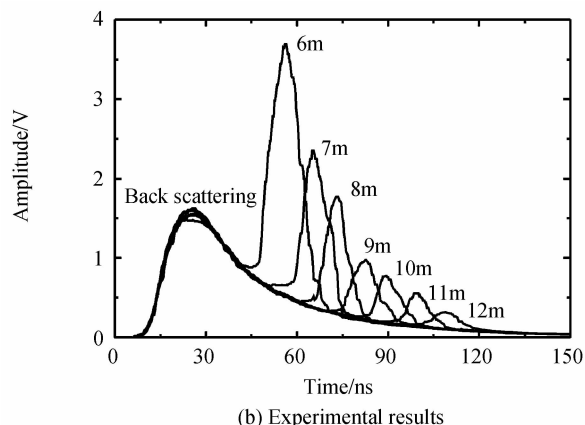
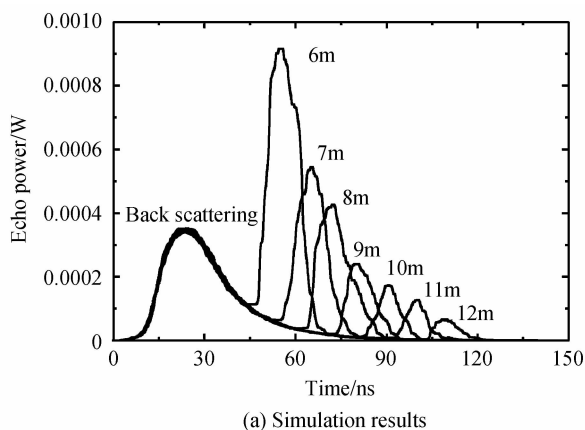


图 5 目标回波随距离变化
Fig. 5 Target echoes change with distance

波功率难以直接求得准确的回波电压波形, 但两者是正比例关系. 图 5 中, 信号的第一个峰值为水体后向散射信号, 第二个峰值为目标回波信号. 由图可知, 随着目标距离的增加, 激光回波幅度迅速下降, 而脉宽略有增大, 信号峰值动态范围达到 11.5 dB. 仿真得到的目标回波波形与实验结果形状相似, 且回波波形随目标距离的变化规律基本一致. 实验结果中海水后向散射相对目标回波的幅度和脉宽稍大于模拟结果, 这主要是由于 MC 仿真中采用 HG 函数在光子后向散射处有一定的误差造成的.

为了进一步验证仿真方法的正确性, 对同一距离处不同入射角时的目标回波进行仿真和实验. 将仿真结果与文献[11]中基于朗伯面反射抽样方法的仿真结果以及实验结果进行对比. 目标距离为 8 m, 入射角度变化范围 $0 \sim 45^\circ$. 两种方法仿真得到的目标回波功率对入射角度的变化如图 6, 入射角较小时本文仿真的目标回波强于基于朗伯面反射抽样的仿真结果, 但是随着入射角度的增大, 本文仿真结果下降很快, 当入射角大于 30° 时小于基于朗伯面反射抽样的仿真结果. 两种仿真方法与水池实验结果对比如图 7, 回波信号幅值经过归一化处理. 随着入射角度的变化, MC 仿真得

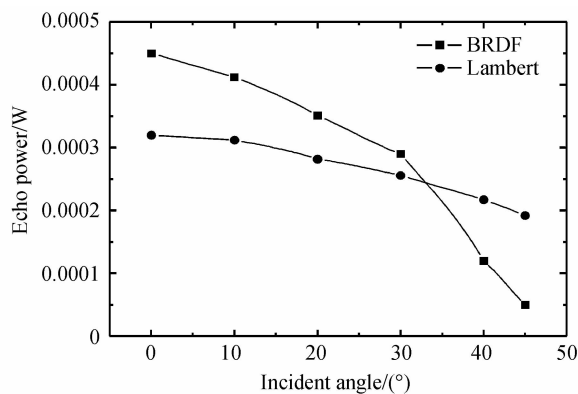


图 6 两种仿真方法目标回波功率随入射角的变化
Fig. 6 Target echo power of two simulation methods change with incident angle

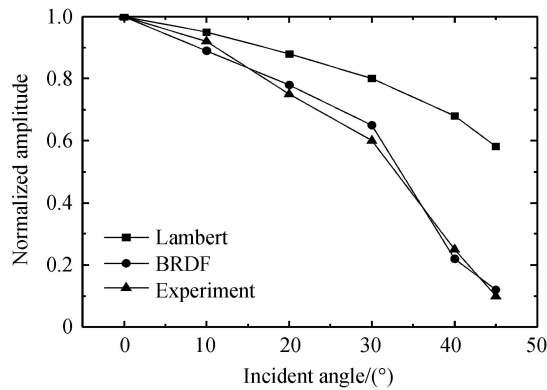


图 7 两种仿真方法与实验结果对比

Fig. 7 Comparison of simulated results of two methods and experiment

到的目标回波幅值变化规律与实验结果基本一致,信号动态范围约 9.2 dB,而基于朗伯面反射的目标回波随入射角增大下降缓慢.这是由于目标表面具有一定的镜面反射特性且激光接收系统与发射同方向,导致入射角较大时绝大部分镜面反射光子不会被接收,接收的光子数随入射角增大下降迅速;而朗伯面的漫反射光子方向在半球空间的概率分布与入射光方向无关,随着入射角度的变化接收到的光子随入射角度呈近似余弦规律变化.显然,基于 BRDF 的反射光子抽样方法比基于朗伯面的反射光子抽样方法具有更高的准确度.

4 结论

本文结合目标表面的反射特性和水下激光引信探测模型,提出了基于目标表面双向反射函数的反射光子方向抽样方法,提高了蒙特卡洛法仿真水中非朗伯表面激光回波的准确度.对不同距离和倾角的目标回波仿真结果进行了水池实验验证,实验结果与仿真结果吻合,且提出的仿真方法较基于朗伯面反射的仿真方法具有更高的准确度.针对不同的目标材料可以利用其它 BRDF 模型结合采用本文方法来精确模拟目标回波信号.研究成果可用于水下激光引信优化设计.

参考文献

[1] LUO Song. Study on application of blue-green laser in torpedo weapon[J]. *Optics & Optoelectronic Technology*, 2010, **8**(6): 52-54.
罗松. 蓝绿激光在鱼雷武器上的应用研究[J]. *光学与光电技术*, 2010, **8**(6): 52-54.

[2] PAN Shu-guang, DENG Jia-hao, QIU Zhi-liang. Characteristic analysis of detection of environment of underwater laser fuze [J]. *Journal of Detection & Control*, 2007, **29**(1): 44-47.
潘曙光, 邓甲昊, 裘之亮. 水下激光引信探测环境特性分析[J]. *探测与控制学报*, 2007, **29**(1): 44-47.

[3] ZHA Bing-ting, ZHANG He. Scanning frequency and pulse frequency of single-beam pulsed laser fuze[J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2014, **43**(7): 2081-2086.
查冰婷, 张合. 单光束脉冲激光引信扫描频率和脉冲频率研究[J]. *红外与激光工程*, 2014, **43**(7): 2081-2086.

[4] ZHONG Xiao-chun, JIANG Fei, YUAN Mao-qian. Analysis of echo signal of underwater object[J]. *Journal of University of Electronic Science and Technology of China*, 2009, **38**(1): 0802008.
钟晓春, 江飞, 袁茂钱. 水下探测中目标的回波信号研究与分析[J]. *电子科技大学学报*, 2009, **38**(1): 0802008.

[5] YU Xue-ping, HU Yun-an, LIU Liang, et al. Propagation characteristics of underwater laser based on multiple scattering and small scattering angles approximation[J]. *Acta Photonica Sinica*, 2015, **44**(11): 1101002.
俞雪平, 胡云安, 刘亮, 等. 基于多次散射和小散射角近似的水下激光传播特性[J]. *光子学报*, 2015, **44**(11): 1101002.

[6] HUANG You-wei, WANG Xia, JIN Wei-qi, et al. Temporal model of underwater laser range-gated imaging and pulse stretching[J]. *Acta Optica Sinica*, 2010, **30**(11): 3177-3183.
黄有为, 王霞, 金伟其, 等. 水下激光距离选通成像与脉冲展宽的时序模型[J]. *光学学报*, 2010, **30**(11): 3177-3183.

[7] CHEN Hui-min, LIU Yang, ZHU Xiong-wei, et al. Simulation of the characteristics of backscattering signals for frequency modulated continuous wave laser fuze [J]. *Acta Armamentarii*, 2015, **36**(12): 2247-2253.
陈慧敏, 刘洋, 朱雄伟, 等. 调频连续波激光引信回波特性仿真分析[J]. *兵工学报*, 2015, **36**(12): 2247-2253.

[8] GUO Jing, ZHANG He, WANG Xiao-feng. Beam spread characteristics of laser fuze in the rain[J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2012, **39**(1): 0113001.
郭婧, 张合, 王晓峰. 激光引信在降雨中的光束扩展特性[J]. *中国激光*, 2012, **39**(1): 0113001.

[9] SHEN Na, ZHANG Xiang-jing, GUO Jing. Attenuation of laser fuze through fog[J]. *Optics and Precision Engineering*, 2013, **21**(4): 864-869.
沈娜, 张祥金, 郭婧. 水雾对激光引信的衰减[J]. *光学精密工程*, 2013, **21**(4): 864-869.

[10] HU Shuai, GAO Taichang, LI Hao, et al. Laser transfer properties of aerosols at near-infrared waveband based on sectional-weighted sampling of scattering phase functions[J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2015, **42**(8): 0802008.
胡帅, 高太长, 李浩基, 等. 基于相函数分段加权采样的近红外激光传输特性[J]. *中国激光*, 2015, **42**(8): 0802008.

[11] DU Yong-cheng; YANG Li. Attenuation characters of laser used for guided weapons in fine water sprays[J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2013, **40**(4): 0402005.
杜永成, 杨立. 制导武器激光在细水雾中的衰减特性[J]. *中国激光*, 2013, **40**(4): 0402005.

[12] BINZONI T, LEUNG T. S, GANDJBAKHCHHE A. H, et al. The use of the Henyey-Greenstein phase function in Monte Carlo simulations in biomedical optics[J]. *Physics in Medicine and Biology*, 2006, **51**(17): 313-322.

[13] 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.

[14] DU Zhu-feng, HUANG Tie-xia, LU Yi-min, et al. Calculation of ocean laser radar signals based on Monte Carlo [J]. *Acta Electron*, 2003, **26**(1): 52-56.
杜竹峰, 黄铁侠, 卢益民, 等. 海洋激光雷达接收信号的 Monte Carlo 计算[J]. *电子学报*, 2003, **26**(1): 52-56.

[15] YANG Yu-feng, WU Zhen-sen, CAO Yun-hua. practical six-parameter bidirectional reflectance distribution function model for rough surface[J]. *Acta Optica Sinica*, 2012, **32**(2): 0229001.
杨玉峰, 吴振森, 曹运华. 一种实用型粗糙面六参量双向反射分布函数模型[J]. *光学学报*, 2012, **32**(2): 0229001.

[16] NEUMANN L, NEUMANN, A SZIRMAY-KALOS L. Reflectance models with fast importance sampling [J]. *Computer Graphics Forum*, 1999, **18**(4): 249-265.