

基于蒙特卡罗方法的波动水面对激光水下目标探测的影响

章 曦 李配军 吴方平 吴王杰 蒋 敏

(解放军理工大学理学院应用数学与物理系, 江苏 南京 211101)

摘要 机载海洋激光雷达在探测水下目标时,水面波动会影响向下传输的激光光束质量。基于蒙特卡罗方法定量分析了光子在目标平面上的空间分布,以及光子返回海气界面的空间分布和时间分布。模拟结果表明,随着风速的增加,光子在目标平面上的空间分布越来越偏离高斯分布;而光子返回海气界面的空间分布则严重偏离高斯分布,且风速的影响已经不再占主导地位。根据计算获得的光子返回海气界面的时间分布,发现当风速较大时,激光雷达的探测深度降低。

关键词 测量;激光探测;光子分布;蒙特卡罗方法;波动水面

中图分类号 TN958.98 **文献标识码** A **doi**: 10.3788/CJL201239.0702003

Influence of Wavy Sea Surface on Laser Detection of Underwater Target with Monte Carlo Method

Zhang Xi Li Peijun Wu Fangping Wu Wangjie Jiang Min

(Department of Applied Mathematics and Physics, Science College, PLA University of Science and Technology, Nanjing, Jiangsu 211101, China)

Abstract When airborne lidar is detecting the underwater target, the laser beam will be influenced by the wavy sea surface. Based on Monte Carlo method, the space distribution of photons on the target surface is quantitatively analysed and the space distribution and time distribution of the photons return which the sea-air interface are analysed. Simulation results show that the space distribution of photons at the target surface gradually deviates from Gauss distribution as the velocity of wind increases and the space distribution badly of the photons which return the sea-air interface deviates from Gauss distribution. The influence of wind velocity is no longer important. By computing the time distribution of photons which return the sea-air interface, it is found that when the wind velocity increases, the detection depth of lidar decreases.

Key words measurement; laser detection; photon distribution; Monte Carlo method; wavy surface

OCIS codes 140.3430; 040.1880; 240.6690

1 引 言

机载海洋激光雷达是探测水下地形地貌和水下物体的重要遥测遥感方法,近几年来机载激光雷达的应用得到了较大的发展^[1,2]。研究水体以及海水空气界面对激光的散射对于激光探测水下目标有着极其重要的意义。海洋激光雷达的发射光束基本上都是高斯光束,在经过海水空气界面进入水体后,高斯光束的能量空间分布会发生变化,这一问题已经

成为研究的热点^[3~6]。研究激光探测的方法有理论研究、实验研究和数值模拟研究等。由于水下光子传输的模型极其复杂,很多情形下无法得到解析的数学表达式;实验研究最具有说服力,然而工作繁杂且耗费巨大。蒙特卡罗方法作为一种数值模拟方法,可以模拟所有不同的情况,避免了大量的实验,可以在一定程度上反映激光探测的真实情形^[7,8]。

海表风场引起海浪海面的法线方向随之改变,

收稿日期: 2012-01-05; **收到修改稿日期**: 2012-02-17

基金项目: 解放军理工大学青年预研基金(20110521)资助课题。

作者简介: 章 曦(1983—),男,硕士,讲师,主要从事混沌神经网络和激光探潜等方面的研究。

E-mail: zx_zx_zx_zx@tom.com

从而影响激光的反射和折射,导致水下光束漂移、光斑畸变和能量分布的变化,对激光探测影响较大。虽然海浪是十分复杂的随机现象,但也具有一定的规律性,可以进行数学建模分析^[9,10]。

激光脉冲在水下传输时会发生散射,导致光束在空间上的扩散^[5,6],并引入多路径效应使信号波形发生变化^[4,11]。脉冲信号的时域展宽,给信号的正确检测带来困难。因此,研究激光脉冲水下传输时域展宽对激光探测具有重要意义。

本文在现有文献对光子在目标平面上的空间分布^[5,6]和时间分布^[4,11]的分析基础上,进一步分析了光子返回海气界面的空间分布和时间分布。

2 理论分析

2.1 入水光束

根据激光谐振腔理论,稳定腔产生的自再现模服从高斯分布,光腔输出的即为高斯光束,在垂直于激光光束传输方向的平面上,其光强分布为^[12]

$$I(x, y) = \frac{1}{2\pi\sigma_s^2} \exp\left(-\frac{x^2 + y^2}{2\sigma_s^2}\right), \quad (1)$$

式中 σ_s 为激光光束的均方根半径,用来描述光束的径向分布, x 和 y 分别为垂直于激光光束传输方向平面上的横坐标和纵坐标。

在蒙特卡罗方法的源抽样处引入了高斯分布抽样模型,使发出光子的统计特性满足高斯光束的特性^[5]。

2.2 波动水面

Cox 等^[10]给出了海浪在一定风速下,俯仰角为 β 时的经验归一化概率密度公式

$$p(\beta) = \frac{2}{\sigma^2} \exp\left(-\frac{\tan^2 \beta}{\sigma^2}\right) \tan \beta \sec^2 \beta, \quad (2)$$

式中均方根表面速率 $\sigma = (0.003 + 0.00512v)^{1/2}$, v 为风速。选用舍选抽样法对其进行抽样,得到俯仰角 β 的值,从而确定海浪的法线方向 $\vec{n} = (n_x, n_y, n_z)$, 其中 n_x, n_y 和 n_z 分别为向量 \vec{n} 在 x, y, z 方向上的方向余弦。设入射方向 $\vec{r}_i = (u_x, u_y, u_z)$, 折射方向 $\vec{r}'_i = (u'_x, u'_y, u'_z)$, 入射平面的法线方向 $\vec{L} = (m_x, m_y, m_z)$, 其中 m_x, m_y 和 m_z 分别为向量 \vec{L} 在 x, y, z 方向上的方向余弦。利用解析几何,可得

$$\begin{cases} u'_x = \frac{m_y \cos \theta_2 - (m_y n_z - m_z n_y) u'_z}{m_y n_x - m_x n_y} \\ u'_y = \frac{m_x \cos \theta_2 - (m_x n_z - m_z n_x) u'_z}{m_x n_y - m_y n_x} \\ u'_z = \frac{-B \pm \sqrt{B^2 - 4AC}}{2A} \end{cases}, \quad (3)$$

式中 θ_2 为折射角, $A = (m_x^2 + m_y^2)q^2 + (m_x^2 + m_z^2) - 2m_y m_z q$, $B = 2m_y m_z p - 2pq(m_x^2 + m_y^2)$, $C = (m_x^2 + m_y^2)p^2 - m_x^2$; 而 $p = \frac{m_x \cos \theta_2}{m_x n_y - m_y n_x}$, $q = \frac{m_x n_z - m_z n_x}{m_x n_y - m_y n_x}$ 。

至于正负号的取舍,当 $\vec{r}'_i = (u'_x, u'_y, u'_z)$ 与 $\vec{r}_i = (u_x, u_y, u_z)$ 的夹角的绝对值较小时, $\vec{r}'_i = (u'_x, u'_y, u'_z)$ 为正确的折射方向^[4]。设光子的初始权值 $W = 1$, 光子发生折射后,权值减少为

$$W = W \cdot (1 - \rho_s), \quad (4)$$

式中 ρ_s 为海气界面反射率。

2.3 光子在海水中传输及与目标碰撞

设海水的体积衰减系数为 c , 则光子每一步的几何路径长度为 $L = -\ln(\gamma_{r1})/c$, 其中 γ_{r1} 为 $[0, 1]$ 区间内均匀分布的随机数。然后需要判断光子是被水体粒子吸收还是散射,可以依据水体的单次散射率 ω_0 来决定。取 $[0, 1]$ 区间内均匀分布的随机数 γ_{r2} , 如果 $\gamma_{r2} > \omega_0$, 则认为光子被吸收,终止对该光子的跟踪,反之则认为光子被散射。光子与水体粒子作用后,权值减少为

$$W = W \cdot \omega_0. \quad (5)$$

光子发生散射后,新的传播方向由散射相函数决定,可采用 Henyey-Greenstein 函数来近似表示其散射相位概率函数^[13,14]

$$p(\cos \theta) = \frac{1 - g^2}{4\pi(1 + g^2 - 2g \cos \theta)^{3/2}}, \quad (6)$$

式中 g 为非对称因子, θ 为散射角。散射方向 (φ, θ) 为相对于原入射方向的变化,其中 φ 可表示为

$$\varphi = 2\pi \cdot \gamma_{r3}, \quad (7)$$

式中 γ_{r3} 为 $[0, 1]$ 区间内均匀分布的随机数。散射后的方向余弦 (u'_x, u'_y, u'_z) 为

$$\begin{cases} u'_x = \frac{\sin \theta}{\sqrt{1 - u_z^2}} (u_x u_z \cos \varphi - u_y \sin \varphi) + u_x \cos \theta \\ u'_y = \frac{\sin \theta}{\sqrt{1 - u_z^2}} (u_y u_z \cos \varphi - u_x \sin \varphi) + u_y \cos \theta \\ u'_z = -\sin \theta \cos \varphi \sqrt{1 - u_z^2} + u_z \cos \theta \end{cases}, \quad (8)$$

当光子被目标反射时,权值减少为^[15]

$$W = W \cdot \rho. \quad (9)$$

式中 ρ 为目标反射率。当光子权值小于指定阈值(文中取 10^{-6})时,结束对光子的跟踪。

被目标反射后的光子方向余弦 (u'_x, u'_y, u'_z) 为

$$\begin{cases} u'_x = \sqrt{\gamma_{r4}} \sin \varphi \\ u'_y = \sqrt{\gamma_{r4}} \cos \varphi \\ u'_z = -\sqrt{1 - \gamma_{r4}} \end{cases}, \quad (10)$$

式中 γ_{ri} 为 $[0, 1]$ 区间内均匀分布的随机数。

3 模拟计算结果与分析

在目标平面处设置一个接收平面, 用来研究波动水面对高斯光束水下光场分布的影响; 在海气界面处设置另一个接收平面, 用来研究返回光子的

空间分布和时间分布。模拟发出的光子总数为 10^6 个, 初始高斯光束半径为 0.5 m。海水衰减系数 $c = 0.5$, 单次散射率 $\omega_0 = 0.6$, 目标反射率 $\rho = 0.7$, 非对称因子 $g = 0.5$ 。目标平面处和海气界面处接收到的光子空间分布模拟结果如图 1 所示, 其中目标半径 $R_t = 10$ m, 目标深度 $D_t = 5$ m。

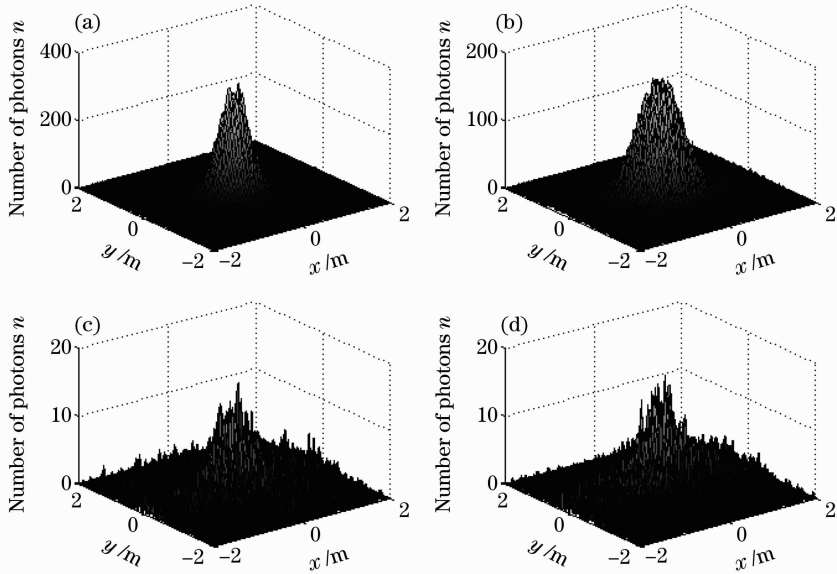


图 1 目标平面处和海气界面处接收到的光子空间分布。风速(a) 1 m/s 和(b) 20 m/s 时目标平面处的光子分布; 风速(c) 1 m/s 和(d) 20 m/s 时海气界面处的光子分布

Fig. 1 Space distribution of photons at the target surface and the sea-air interface. Photo distribution at the target surface with wind velocity of (a) 1 m/s and (b) 20 m/s; Photo distribution at the sea-air interface with wind velocity of (c) 1 m/s and (d) 20 m/s

由图 1 可知, 当风速为 1 m/s 时, 目标平面处接收到的光子空间分布仍然近似为高斯分布; 当风速为 20 m/s 时, 光子空间分布偏离高斯分布, 主要是峰值能量的减小和分布范围的扩大; 海气界面处接收到的光子空间分布严重偏离了高斯分布, 这是由于目标的漫反射和水体粒子的散射作用所导致的。当风速分别为 1 m/s 和 20 m/s 时, 光子的空间分布变化不大, 说明风速的影响已经不占主导地位。

为了进一步揭示光子的空间分布, 对目标平面和海气界面上以中心为圆心、不同半径 R 的圆内光子的归一化能量 E 进行了统计, 结果如图 2 所示。图 2(a) 中的插图表明, 当半径 R 比较小时, 目标平面上的光子能量分布规律明显。这一结论和文献 [5] 结果吻合。当半径 R 比较大时, 规律不明显, 说明光子能量分布的随机性开始体现。图 2(b) 表明, 当风速最小 (1 m/s) 时, 相同的光子能量所对应的半径 R 最小; 然而当风速增大时, 无明显规律, 主要原因是光子的能量分布已经严重偏离高斯分布, 风速

的影响已经不占主导地位。

改变相关参数, 取目标深度 $D_t = 10$ m, 目标半径 $R_t = 10$ m 不变。图 3(a) 中的插图表明, 当半径 R 比较小时, 目标平面上的光子能量分布规律很明显。这一结论和图 2(a) 的结论类似, 然而两者也有区别。图 2(a) 中这一规律在 $E \leq 0.45$ 范围内成立, 而图 3(a) 中这一规律只在 $E \leq 0.25$ 范围内成立。这是因为当目标越深, 水体粒子的散射作用导致光子的空间分布越偏离高斯分布。图 3(b) 对应海气界面上光子的能量分布, 其规律和图 2(b) 相似。

图 4 对应于光子返回海气界面的时间分布, 其中目标半径 $R_t = 10$ m。第一个峰对应于水体粒子的后向散射光子, 第二个峰对应于目标反射的光子, 关注重点为第二个峰。图 4(a) 中 $D_t = 6$ m 的第二个峰相对高度为 0.23, 而图 4(b) 中 $D_t = 6$ m 的第二个峰相对高度仅为 0.17。另外, 图 4(a) 中 $D_t = 7$ m 的第二个峰仍然比较明显, 而图 4(b) 中 $D_t = 7$ m 的第二个峰已经无法分辨。说明风速较大时,

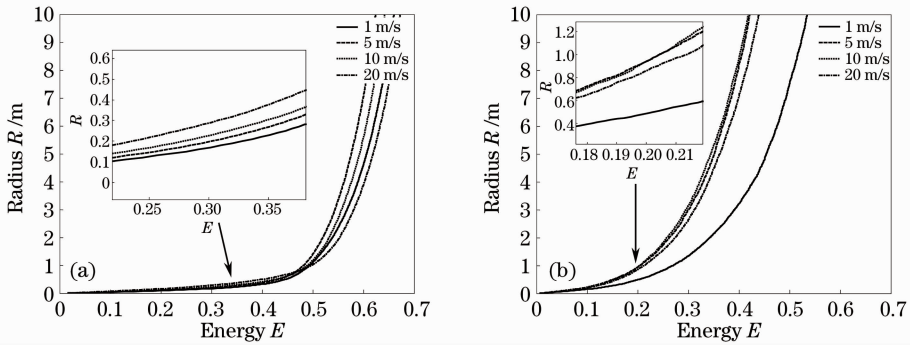


图 2 不同风速下(a)目标平面上和(b)海气界面上光子的相对能量径向分布

Fig. 2 Photo relative energy radial distribution at (a) the target surface and (b) the sea-air interface for different wind velocities

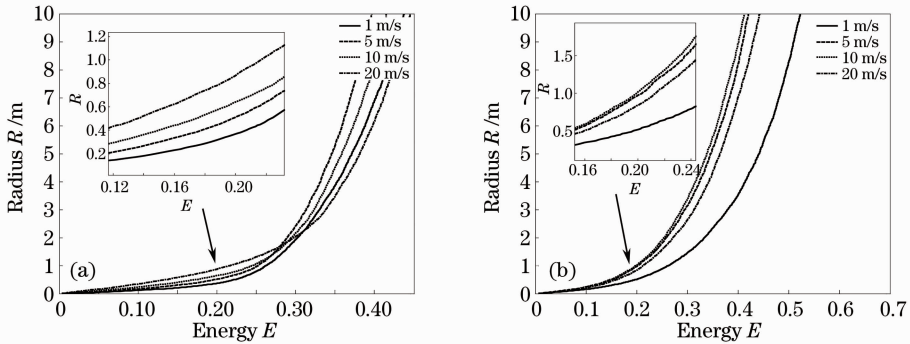


图 3 目标深度对光子能量径向分布的影响。(a)目标平面上和(b)海气界面上光子的相对能量分布

Fig. 3 Influence of target depths on photo energy radial distribution. Photo relative energy distribution at (a) the target surface and (b) the sea-air interface

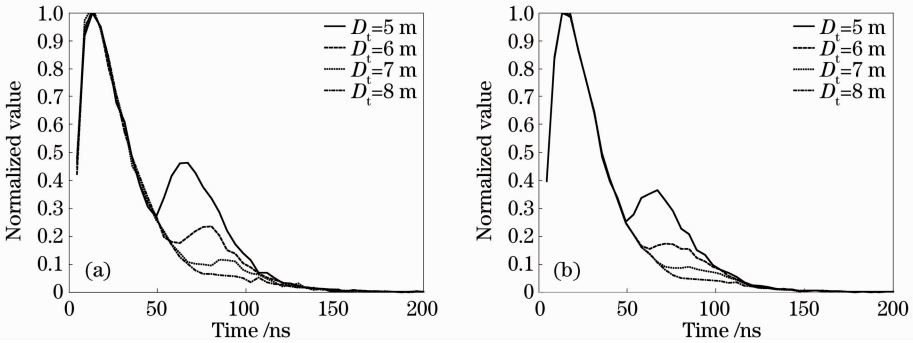


图 4 不同目标深度的光子时间分布。风速(a) 1 m/s 和(b) 20 m/s 时光子的时间分布

Fig. 4 Photo time distribution of different target depths. Photo time distribution with wind velocity of (a) 1 m/s and (b) 20 m/s

激光雷达的探测深度降低。

4 结 论

通过蒙特卡罗方法做数值模拟,发现波动水面具有使得水下高斯光束能量分布随机化的趋势。当风速较大时,目标平面处光子的空间分布偏离高斯分布,主要是峰值能量的减小和分布范围的扩大。对于返回海气界面的光子的空间分布严重偏离高斯分布,而风速对于其空间分布的影响已经不占主导

地位。当目标深度加深,由于水体粒子的散射作用,目标平面处光子的空间分布更加偏离高斯分布,而海气界面处光子的空间分布相对变化不大。

模拟结果表明,当风速为 1 m/s 时,探测深度可以达到 7 m;而当风速为 20 m/s 时,探测深度只能达到 6 m,即当风速较大时,激光雷达的探测深度降低。

参 考 文 献

1 Hu Shanjiang, He Yan, Zang Huaguo *et al.*. A new airborne

- laser bathymetry system and survey result [J]. *Chinese J. Lasers*, 2006, **33**(9): 1163~1167
- 胡善江, 贺岩, 臧华国等. 新型机载激光测深系统及其飞行实验结果[J]. 中国激光, 2006, **33**(9): 1163~1167
- 2 Zhu Jian, Zang Huaguo, He Yan *et al.*. Study on large dynamic range compression in airborne laser bathymetry[J]. *Acta Optica Sinica*, 2006, **26**(8): 1172~1176
- 朱坚, 臧华国, 贺岩等. 激光测深系统中大动态范围压缩技术的实验研究[J]. 光学学报, 2006, **26**(8): 1172~1176
- 3 Liu Jintao, Chen Weibiao. Feasibility study of laser communications from satellite to submerged platform[J]. *Acta Optica Sinica*, 2006, **26**(10): 1441~1446
- 刘金涛, 陈卫标. 星载激光对水下目标通信可行性研究[J]. 光学学报, 2006, **26**(10): 1441~1446
- 4 Liang Bo, Zhu Hai, Chen Weibiao. Simulation of laser communication channel from atmosphere to ocean [J]. *Acta Optica Sinica*, 2007, **27**(7): 1166~1172
- 梁波, 朱海, 陈卫标. 大气到海洋激光通信信道仿真[J]. 光学学报, 2007, **27**(7): 1166~1172
- 5 Xia Min, Yang Kecheng, Zheng Yi *et al.*. Influence of wavy sea surface on airborne lidar underwater beam quality with Monte Carlo method[J]. *Chinese J. Lasers*, 2008, **35**(2): 178~182
- 夏珉, 杨克成, 郑毅等. 用蒙特卡罗法研究波动水表面对机载海洋激光雷达水下光束质量的影响[J]. 中国激光, 2008, **35**(2): 178~182
- 6 Zhou Tianhua, Chen Weibiao, He Yan *et al.*. Beam spatial distribution of upward laser through sea-air interface[J]. *Chinese J. Lasers*, 2010, **37**(8): 1978~1982
- 周田华, 陈卫标, 贺岩等. 通过海气界面上行激光光场分布[J]. 中国激光, 2010, **37**(8): 1978~1982
- 7 F. Jaillon, H. S. Jalmes. Description and time reduction of a Monte Carlo code to simulate propagation of polarized light through scattering media [J]. *Appl. Opt.*, 2003, **42**(16): 3290~3296
- 8 H. M. Tulldahl, K. O. Steinvall. Simulation of sea surface wave influence on small target detection with airborne laser depth sounding[J]. *Appl. Opt.*, 2004, **43**(12): 2462~2483
- 9 C. S. Cox, X. Zhang. Optical methods for study of sea surface roughness and microscale turbulence [C]. *SPIE*, 1997, **3172**: 167~174
- 10 C. S. Cox, W. Munk. Measurement of the roughness of the sea surface from photographs of the sun's glitter[J]. *J. Opt. Soc. Am.*, 1954, **44**(11): 838~850
- 11 Zhou Yamin, Wu Keqi, Chen Jinlai *et al.*. Monte Carlo simulation of time-domain broadening of laser pulse propagating underwater[J]. *Laser & Infrared*, 2011, **41**(3): 259~263
- 周亚民, 吴克启, 陈金来等. 激光脉冲水下传输时域展宽的蒙特卡罗模拟[J]. 激光与红外, 2011, **41**(3): 259~263
- 12 Yang Qimin, Zhong Liyun, Lü Xiaoxu. *Laser Principle and Devices*[M]. Yunnan: Yunnan University Press, 2002. 34~36
- 杨齐民, 钟丽云, 吕晓旭. 激光原理与激光器件[M]. 云南: 云南大学出版社, 2002. 34~36
- 13 L. R. Poole, D. D. Venable, J. W. Campbell. Semianalytic Monte Carlo radiative transfer model for oceanographic lidar systems[J]. *Appl. Opt.*, 1981, **20**(20): 3653~3656
- 14 E. Tinet, S. Avriplier, J. M. Tualle. Fast semianalytical Monte Carlo simulation for time-resolved light propagation in turbid media[J]. *J. Opt. Soc. Am. A*, 1996, **13**(9): 1903~1915
- 15 Jiang Lu, Zhu Hai, Li Song. The Monte Carlo calculation of anti-lidar-detection for the underwater target[J]. *J. Projectiles, Rockets, Missiles and Guidance*, 2005, **25**(3): 250~253
- 姜璐, 朱海, 李松. 水下目标反激光雷达探测隐蔽深度的蒙特卡罗计算[J]. 弹箭与制导学报, 2005, **25**(3): 250~253