

文章编号: 0258-7025(2008)02-0178-05

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

夏 珉¹ 杨克成¹ 郑 毅¹ 饶炯辉²

(¹ 华中科技大学光电子科学与工程学院, 湖北 武汉 430074; ² 海军工程大学兵器工程系, 湖北 武汉 430033)

摘要 利用蒙特卡罗(Monte Carlo)方法对机载海洋激光雷达探测过程中,透过波动水表面向下传输的激光束质量受波动水表面影响的程度进行了模拟计算,并给出了定量结果和定性结论。为了获得水下传输的激光束质量相关数据,在传统的蒙特卡罗模型中引入了波动水表面影响模型和接收平面能量分布计算的功能。通过模拟计算,得到了不同海面风速条件下机载海洋激光雷达发出的高斯光束透过波动水表面后在接收平面上的能量分布,得出了随着海面风速的增加,高斯光束的光束质量不断下降,机载海洋激光雷达探测效果不断变差的结论。

关键词 激光技术;机载激光雷达;高斯光束;蒙特卡罗方法;波动水表面

中图分类号 TN 958.98 文献标识码 A

Influence of Wavy Sea Surface on Airborne Lidar Underwater Beam Quality with Monte Carlo Method

Xia Min¹ Yang Kecheng¹ Zheng Yi¹ Rao Jionghui²

¹ Institute of Optoelectronics Science and Engineering,

Huazhong University of Science and Technology, Wuhan, Hubei 430074, China

² Department of Weapon Engineering, Navy Engineering University, Wuhan, Hubei 430033, China

Abstract The influence of the wavy sea surface on the quality of airborne lidar's laser beam that transmitted through the wavy sea surface was studied with Monte Carlo method. Simulation results of laser beam energy distribution and the analytical conclusion were presented. In order to obtain the laser beam energy distribution, the classic Monte Carlo model was modified by adding the wavy surface model and the function to calculate the energy distribution of receiver plane. By Monte Carlo simulation, the laser beam energy distributions on certain depth with different sea-surface wind velocities were obtained. From these data, conclusion can be drawn that with the increase of sea surface wind velocity, the laser beam quality decreases, as well as the detection ability of the airborne lidar.

Key words laser technique; airborne lidar; Gaussian beam; Monte Carlo method; wavy surface

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重要遥测遥感手段,近几年来机载海洋激光雷达的应用得到了较大的发展^[1,2]。海洋激光雷达应用中,研究水体以及海水空气界面对激光的散射对于激光测深和水下目标探测研究有着极其重要的

意义。激光雷达的测量原理是从位于海面上方的激光器中发射激光,经过海水空气界面后进入海水中,当光束碰到水下目标(如海底)时,会发生反射,再次经过海水传输、海水空气界面透射回到接收器。从原理上可以看出,水下目标被探测光照射时,单位面积上探测激光的能量越强,其反射信号强度越强,接收器接收到的水下目标回波信号也越强,机载激光

收稿日期:2007-03-19;收到修改稿日期:2007-08-17

基金项目:国家 863 计划(2002AA633110)资助项目。

作者简介:夏 珉(1979—),男,湖北人,博士研究生,主要研究方向为散射介质中光散射的蒙特卡罗模拟和水下激光探测技术。E-mail:hadren@smail.hust.edu.cn

导师简介:杨克成(1963—),男,湖北人,教授,博士生导师,主要研究方向为光电探测、激光雷达技术和水下激光探测。E-mail:kcyang@hust.edu.cn

雷达的探测效果越好。海洋激光雷达发射的基本上都是高斯光束,在经过海水空气界面和水体的散射之后,在水中传播时光斑会不断扩散,同时高斯光束横模能量分布也会发生相应的变化。光斑扩散以及能量分布变化的程度与海水空气界面的性质密切相关,弄清扩散光斑半径及其能量分布随海水空气界面性质的变化规律对于激光水下目标探测系统的设计和应用都是必不可少的。

研究水下光束扩展的手段有三种:理论研究、实验研究和数值模拟研究。理论研究要求建立一套完善的光子水下传输的数学模型,然而水下光子传输的模型极其复杂,无法解析表示并且不能直观地解释现象^[3,4];实验研究的手段是最有说服力的,但是利用实验研究水下光束扩展需要对不同水质、不同深度的水下不同能量光斑分布情况进行抽样,实验量巨大而且繁杂;蒙特卡罗方法作为一种数值模拟实验方法,可以针对所有不同的情况进行模拟,避免了大量的实验,同时其准确性也得到了实验的验证,可以在一定程度上反映水下光束扩展的真实情况^[5~9]。本文采用蒙特卡罗方法研究不同海水空气界面性质对激光光束质量的影响。

2 高斯光束的描述

根据激光谐振腔理论,稳定腔产生的自再现模为厄米-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,其光强分布满足高斯分布^[10]

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

式中 σ_s 为激光光束的均方根半径,通常称为光斑尺寸,用来描述光束的径向分布。高斯光束的光斑能量集中分布在半径 σ_s 的圆内,其中大约集中了总能量的86.5%。

研究表明,高斯光束不仅其能量分布呈高斯特性,其方向分布也呈高斯特性^[11]。高斯光束传播时,存在一个发散角,其等相位面是一个半径和中心位置随光束的传播而不断变化的球面。当高斯光束的等相位面传播到距离其束腰 ω_0 的距离 z 远大于瑞利长度 z_0 时

$$z_0 = \omega_0 \pi / \lambda, \quad (2)$$

式中 λ 为激光波长, ω_0 为束腰半径。可将高斯光束近似为由束腰位置发出,半径为 z 的球面波,球面上每一点的法线方向,即为高斯光束能流线的方向。

3 海水空气界面性质的描述

当激光入射到海水空气界面时,会发生反射和折射,入射角 θ_i 、反射角 θ_{re} 和折射角 θ_r 的关系满足斯涅耳(Snell)定律

$$\begin{cases} \theta_{re} = \theta_i \\ n_2 \sin\theta_r = n_1 \sin\theta_i \end{cases}, \quad (3)$$

式中 n_1 为入射光线所处介质的折射率, n_2 为折射光线所处介质的折射率。

对于不同形式的偏振光,海水空气界面的透射率不同,由菲涅耳定律可以得到垂直偏振(ρ_{\perp})与平行偏振(ρ_{\parallel})光的折射率分别为

$$\begin{cases} \rho_{\perp} = \frac{\sin^2(\theta_i - \theta_r)}{\sin^2(\theta_i + \theta_r)} \\ \rho_{\parallel} = \frac{\tan^2(\theta_i - \theta_r)}{\tan^2(\theta_i + \theta_r)} \end{cases}, \quad (4)$$

在本文的模拟计算中,假设入射激光在垂直和平行于激光参考平面方向上的偏振分量强度相等,因此可得到总透射率为

$$T = \frac{1}{2}(\rho_{\perp} + \rho_{\parallel}). \quad (5)$$

海水空气界面的反射率为

$$R = 1 - T. \quad (6)$$

除了考虑反射率、透射率外,还要考虑到波动水表面对散射特性的影响。海面受到风的作用,会产生随机起伏,这种由风所产生的海面斜率的随机起伏服从二维高斯分布^[12]

$$p(m_x, m_y) = \frac{1}{2\pi\sigma_x\sigma_y} \exp\left[-\left(\frac{m_x^2}{2\sigma_x^2} + \frac{m_y^2}{2\sigma_y^2}\right)\right], \quad (7)$$

式中 m_x 和 m_y 分别为波动水表面斜率在 x, y 方向上的均值,而 σ_x 和 σ_y 分别为波动水表面斜率在 x, y 方向上的方差。Cox 等^[13]的研究可以求得波动水表面的方向方差为

$$\sigma_s = \begin{cases} 0.0403 v^{1/2} & \text{顺风} \\ 0.0315 v^{1/2} & \text{逆风} \end{cases}, \quad (8)$$

式中 v 为海面风速。在本文研究中,取 $\sigma_x = \sigma_y = \sigma_s = 0.03 v^{1/2}$ 来计算海面斜率的方差。利用这个模型,通过对(7)式进行抽样就能够得到有限范围内的海面上每一点的斜率与海面风速的关系。在具体计算中将有限范围的波动水表面划分为一系列的小平面元,对每个平面元可以求出其法线方向同绝对坐标系 z 方向的夹角(ϕ_x, ϕ_y),然后在计算海水空气界面的透射率和反射率时,将其替代原有的绝对坐标系的海水法线方向,即可通过蒙特卡罗方法来模拟和研究波动水表面对散射的影响。图1和图2分别为

斜率夹角示意图和本文所建立的蒙特卡罗模型计算得到海面风速为5 m/s情况下的波动水表面三维模型图。

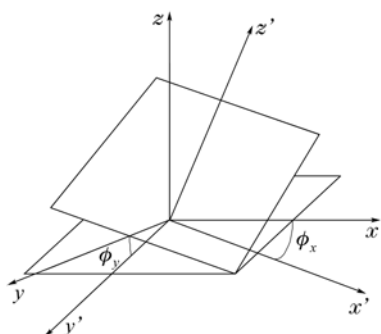


图1 波动水表面方向角度 ϕ_x 和 ϕ_y 的定义示意图。 z 为没有波动的水表面的法线方向, z' 为波动水表面的法线方向

Fig. 1 Definition of wavy surface's direction angle ϕ_x and ϕ_y . The z axis means normal direction of non-wavy surface and z' axis means normal direction of wavy surface

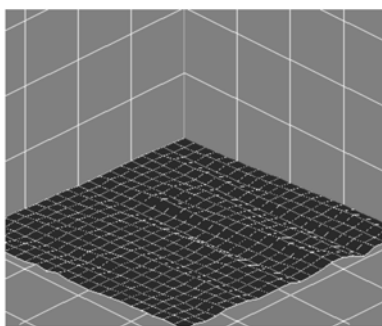


图2 风速为5 m/s时模拟的波动水表面三维模型图

Fig. 2 Simulated three-dimensional image of wavy surface modeling with the wind velocity of 5 m/s

4 对传统蒙特卡罗模型的改进

研究水下传输的激光光束质量, 必须要得到光子在探测器平面上的能量分布。因此将接收平面划分为小平元, 通过统计光子到达能量接收平面的位置就可以得到接收平面上的光强分布。图3为高斯光束扩展模拟系统的示意图。

由于本文研究的是高斯光束, 因此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。首先通过

$$r_G = \sigma_s \sqrt{-2\ln(1 - R_{nd1})}, \quad (9)$$

抽样得到满足(1)式的光子分布, 式中 r_G 为光子距离波动水表面中心点的距离, 随后通过

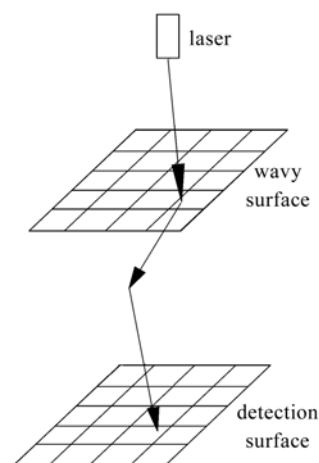


图3 高斯光束扩展的模拟系统示意图

Fig. 3 Simulation system for Gaussian beam spread expansion

$$\varphi = 2\pi R_{nd2}, \quad (10)$$

抽样得到光子的偏转角。(9), (10) 式中 R_{nd1} 和 R_{nd2} 表示由随即抽样算法得到的在 $[0, 1]$ 上均匀分布的伪随机数。随后可以得到光子在波动水表面上的位置

$$\begin{cases} x = r_G \cos \varphi \\ y = r_G \sin \varphi \\ z = 0 \end{cases} \quad (11)$$

本文的研究对象为机载海洋激光雷达, 激光的发射高度一般在几十至几百米的空中, 远远大于瑞利长度, 因此当高斯光束到达海面时, 可以将其等相位面视作一个球面, 球面上每一点的法线方向即为光子的初始方向

$$\begin{cases} u_x = \frac{x}{x^2 + y^2 + H^2} \\ u_y = \frac{y}{x^2 + y^2 + H^2} \\ u_z = \frac{H}{x^2 + y^2 + H^2} \end{cases} \quad (12)$$

式中 H 为激光的发射高度。

5 模拟计算结果与分析

针对海水空气界面性质对高斯光束水下光场分布的影响进行了研究。针对吸收系数 $a = 0.1$, 散射系数 $b = 0.1$, 接收平面固定在水下12 m, 海面风速1~22 m/s情况下的接收平面能量分布进行了蒙特卡罗模拟, 模拟中发出的光子数为 10^6 个, 模拟结果如图4所示。

图4中的接收平面范围为10 m, 发射的高斯光束初始截面半径为0.25 m。从图4中可以看出, 波

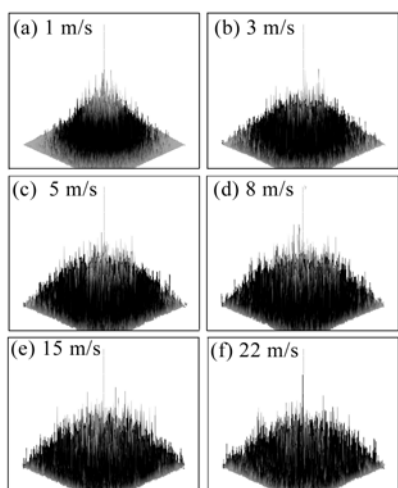


图 4 不同风速条件下接收平面上的能量分布
Fig. 4 Energy distribution at the receiver plane with different wind velocities

动水表面确实会对水下高斯光束的平面能量分布造成相当大的影响,海面风速不大时,其能量分布基本满足高斯光束的特性,只是在经过12 m的长距离传输后,由于水中散射介质的散射作用,能量分布出现随机化,表现在接收平面能量分布上就是在高斯光束的分布特性上叠加了许多类似毛刺的随机噪声。随着海面风速的变化,水下传播的高斯光束的能量分布会越来越体现出随机分布的特性。

对接收平面上以中心为圆心,包含总体接收能量 10%~90% 圆的半径进行了统计,其结果如图 5 所示。同时对蒙特卡罗模拟中抽样生成的理想高斯光束的能量分布进行了同样的统计,结果如图 6 所示。

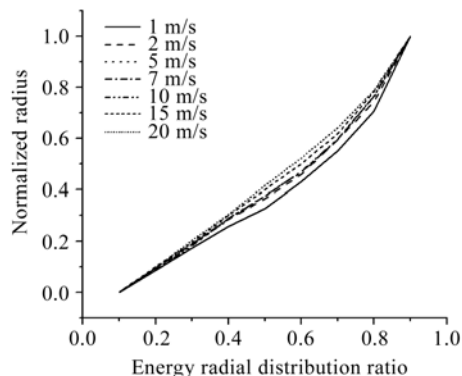


图 5 不同风速条件下不同能量径向分布的归一化半径曲线

Fig. 5 Normalized radius versus energy radial distribution ratio at different wind velocities

比较图 5 与图 6 可以看到,当海面风速较小时,平面能量分布与理想高斯光束分布较为类似,然而

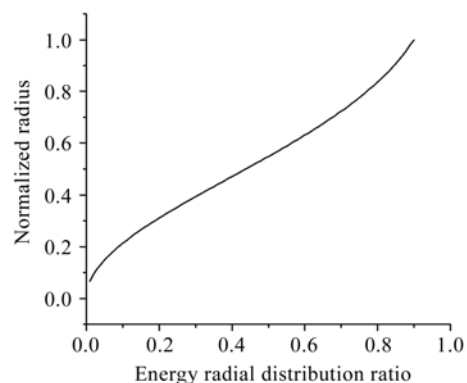


图 6 理想高斯光束的能量径向分布曲线
Fig. 6 Energy radial distribution ratio of theoretical Gaussian beam

随着风速的不断增大,接收平面上的径向能量分布越来越平均化,这一结果是由于随着海面风速的不断增大,波动水表面的斜率分布方差值变大,从而给穿过海水空气界面的高斯光束的能量分布带来更大的随机性,破坏高斯光束的能量分布,造成能量分布的均匀化。

为了进一步定量研究波动水表面对机载激光雷达水下光束扩展特性的影响,对水下一定深度的接收平面接收到的机载激光雷达探测信号的高斯光束半径进行了分析。通过分析得到的平面能量分布发现,无论其分布如何变化,能量中心始终保持在接收平面的正中心。因此设计算法,计算出以接收平面正中心为圆心,包含平面上接收到全部能量 90% 以上的圆的半径,作为该平面上的高斯光束半径。

通过计算,得到了不同风速条件下,位于水下不同深度处,接收范围 10 m 的接收平面上接收到的机载激光雷达探测激光信号的高斯光束分布,如图 7 所示。

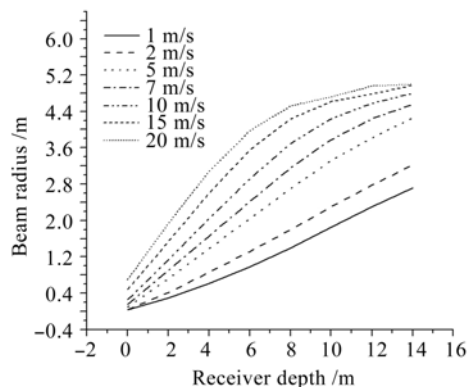


图 7 不同风速条件下光束半径随接收平面深度的变化曲线

Fig. 7 Beam radius versus receiver depth at different wind velocities

从图 7 可以看出,在其他条件不变的情况下,仅仅改变海面风速,从而造成波动水表面斜率分布的方差变大,会极大地影响水下传输的高斯光束的能量分布。随着风速的变大,相同深度处水下高斯光束的光束半径也在不断变大,这与我们从接收平面能量分布图(图 4)上得到的直观结论是一致的。同时随着风速的变大,高斯光束的光束半径变大的趋势也越来越快。

在典型的机载激光雷达应用中,水下目标单位面积上受到探测光照射能量越大,其探测效果越好,而海面风速的增加,水下传输过程中探测激光光斑半径不断变大,能量分布越来越趋于均匀化,造成单位面积上探测光能量的下降,从而极大影响了机载激光雷达的探测效果。

6 结 论

通过研究发现,波动水表面具有使水下高斯光束能量分布随机化的趋势,随着海面风速的增加,这种趋势越发明显。随着海面风速的增加,机载海洋激光雷达水下传输光束的光束半径不断增加,且能量分布不断趋于随机化,从而造成探测光光束质量的不断下降。由于一般机载海洋激光雷达接收光学系统的视场角都比较小,因此探测光光束质量的下降将会影响机载海洋激光雷达的探测效果。

波动水表面是机载激光雷达海洋探测应用环境中不可避免的不利因素,如何通过实验方式获得波动水表面对机载激光雷达探测光束质量以及探测能力的实际影响,以及如何尽可能减少波动水表面引起的机载激光雷达探测光束质量下降以及探测能力的下降,对于机载海洋激光雷达应用有着重要的实际意义。在未来的工作中,将在本文理论计算基础上,通过在水下一定传输距离上实际测量激光雷达探测光经过波动水表面后的光斑半径及能量分布情况,对波动水表面对机载激光雷达水下光束扩展的影响进行实验研究。

参 考 文 献

- 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
- 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
- Luc R. Bissonnette. Multiple-scattering lidar equation [J]. *Appl. Opt.*, 1996, **35**(33):6449~6454
- Giovanni Zaccanti, Piero Brusaglioni, Massimo Gurioli *et al.*. Laboratory simulations of lidar returns from clouds: experimental and numerical results [J]. *Appl. Opt.*, 1993, **32**(9):1590~1597
- Lihong V. Wang. Mechanisms of ultrasonic modulation of multiply scattered coherent light: a Monte Carlo model [J]. *Opt. Lett.*, 2001, **26**(15):1191~1193
- Yichang Song, Da Xing. Monte Carlo study of light absorption feature in multi-layered tissue [J]. *Acta Laser Biology Sinica*, 2002, **11**(1):10~14
- Wang Jiangang, Wang Guiying, Xu Zhizhan. Monte-Carlo method for research on imaging of inhomogeneity in the scattering medium [J]. *Chinese J. Lasers*, 2001, **A28**(2):169~172
王建岗,王桂英,徐至展. 用蒙特卡罗法研究高散射介质中的成像[J]. *中国激光*, 2001, **A28**(2):169~172
- Alexander P. Vasilkov, Yury A. Goldin, Boris A. Gureev *et al.*. Airborn polarized lidar detection of scattering layers in the ocean [J]. *Appl. Opt.*, 2001, **40**(24):4353~4360
- Franck Jaillon, Hervé Saint-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
- 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
- Yang Kecheng. Study on Wave Effect, Optical Filter and Polarization Compression in Airborne Laser Bathymetry [D]. Wuhan: Huazhong University of Science and Technology, 1999. 86~88
杨克成. 机载激光水下目标探测中波浪影响、光学滤波和偏振压缩的研究[D]. 武汉:华中科技大学, 1999. 86~88
- L. M. Zurk, L. Tsang, K. H. Ding *et al.*. Monte Carlo simulation of the extinction rate of densely packed spheres with clustered and nonclustered geometries [J]. *J. Opt. Soc. Am. A*, 1995, **12**(8):1772~1781
- Charles Cox, Walter 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