

星载单光子激光雷达海面回波信号模型

周鑫, 杨坚, 李松*

武汉大学电子信息学院, 湖北 武汉 430072

摘要 过去几十年中激光雷达的发展对于海洋监测有着重大意义, 而星载单光子激光雷达以更高的分辨率和测量精度展现了其在海洋遥感中的优势地位。结合单光子探测器的响应特性, 依据海面反射模型, 提出了一个定量计算海面回波信号强度的理论模型。使用 ICESat-2(The Ice, Cloud, and land Elevation Satellite 2)对地观测激光测高卫星搭载的先进地形激光测高系统(ATLAS)的参数作为输入, 采用 ICESat-2 获取的 ATL03 数据统计回波信号强度和全球风场数据验证模型, 模型在菲律宾海域统计的多轨数据较好, 在海面风速为 4~10 m/s 的情况下, 其均值误差为 0.0037 个光子/脉冲, 均方根误差为 0.153 个光子/脉冲。分析得出了星载单光子海洋测高仪回波强度和海平面上方平均风速的关系, 该结论对海平面上方风速反演提供了重要的理论依据。

关键词 传感器; ICESat-2; 单光子探测器; 激光雷达; 海面回波信号

中图分类号 TP732

文献标志码 A

doi: 10.3788/AOS202141.1928002

Model of Sea Surface Echos from Spaceborne Single Photon Lidar

Zhou Xin, Yang Jian, Li Song*

Electronic Information School, Wuhan University, Wuhan, Hubei 430072, China

Abstract Over the past few decades, the development of lidars has great significance for ocean monitoring. The spaceborne single photon lidar shows its advantage in marine remote sensing because of high resolution and precision. In this paper, based on the response characteristics of single photon detectors and the sea surface reflection model, a theoretical model for quantitatively calculating the intensity of sea surface returns was proposed. Inputting the system parameters of the advanced topographic laser altimeter system (ATLAS) carried by ICESat-2 (the Ice, Cloud, and land Elevation Satellite 2), we verified the model with the echo intensity based on the measured point cloud data ATL03 from ICESat-2 and the global wind field data. The results show that this model performs well according to many tracks' data above the Philippine Sea. When the sea surface wind speed is in the range of 4–10 m/s, the mean error is 0.0037 count/pulse, and the root mean square error is 0.153 count/pulse. The relationship between the echo intensity of the spaceborne single-photon ocean altimeter and the average wind speed above the sea level was analyzed. The conclusion provides an important theoretical basis for the wind speed inversion above the sea level.

Key words sensors; ICESat-2; single-photon detector; lidar; sea surface echo

OCIS codes 280.3400; 140.3430; 200.4560

1 引言

星载激光雷达在海面上的回波特性对于海洋动力学参数反演具有重要意义, 第一代星载激光雷达 ICESat(The Ice, Cloud, and land Elevation

Satellite)搭载的 GLAS(Geoscience Laster Altimeter System)测高系统接收的是来自目标反射的全波形回波信号, 通过提取波形的峰值、重心和脉冲宽度等信息来反演目标表面特性, 对信号波形积分可以获得回波信号的强度, 马跃等^[1-2]的研究推导

收稿日期: 2021-03-04; 修回日期: 2021-04-01; 录用日期: 2021-04-21

基金项目: 对地高分国家科技重大专项(11-Y20A12-9001-17/18, 42-Y20A119001-17/18)

通信作者: *ls@whu.edu.cn

了近天顶方向入射时星载激光测高仪探测器输出信号的波形解析表达式并通过计算得到均方脉宽,该研究表明海面回波信号强度很大程度上与海上风速相关;江丹等^[3]结合 GLAS 参数及大气数据研究发现,卫星高度角在 90° 左右时对高程测量精度的影响最小;Hu 等^[4]通过对云-气溶胶激光雷达和红外探测器观测卫星(CALIPSO)数据的分析,提出了新的风速-海面均方斜率三段关系式,细化了不同风速条件下海浪斜率的分布概率,这些研究都为星载激光雷达在海洋遥感中的技术应用提供了基础。

随着单光子探测器件灵敏度的提高,星载单光子激光雷达系统降低了对激光器能量的要求,在平均功率不变的情况下大大提高了激光器重复频率,从而提高了海面高程测量的分辨率,并且从遥感数据中能够观测到海浪的细微结构^[5-6]。当前唯一搭载单光子激光雷达测高系统的卫星是由美国国家航空航天局(NASA)于 2018 年 9 月发射的 ICESat-2,其主要目的是继续执行 ICESat 未完成的观测任务,对极地冰盖、海冰、森林冠层、湿地等进行长期观测研究。该卫星搭载的“先进地形激光测高系统(ATLAS)”,采用光子计数的形式获取表面回波信号,其测高精度可达 2.3 cm ^[7]。目前 ICESat-2 数据在冰盖高程提取、海冰识别、大气参数反演等方面都取得了良好的效果^[8-11]。针对光子计数点云数据的研究主要集中在点云去噪、信号提取等方面^[12-13],但单光子体制的星载激光雷达在海面上的回波信号强度很少被研究。

本文提出的星载单光子海面回波信号强度理论模型充分讨论了单光子探测器件的响应特性,同时进一步讨论了海面白沫漫反射的影响,使用 ATLAS 获取的 ATL03 数据以及欧洲中期天气预报中心(ECMWF)发布的 ERA5 (ECMWF Re-Analysis 5) 风速数据对模型进行了验证,实测回波信号强度与细化之后的理论模型较好地吻合。

ATL03 数据包括 ATLAS 工作过程中的位置信息、发射脉冲脉宽及能量以及捕获的每个光子事件的经纬度、椭球高度、置信度等信息。通过对数据集中光子事件的分类、信号提取,计算平均信号光子数并对比相应风速条件下的激光雷达理论模型,可以验证该模型与海面风速在 $4\sim 10 \text{ m/s}$ 时的回波信号强度较好地吻合。该理论模型可以用于指导海面风速的反演。

2 海面探测理论模型

2.1 海面回波信号模型

激光雷达探测原理如图 1 所示,发射激光脉冲经过一次菲涅耳衍射入射到地球表面,并经目标反射,再经过一次菲涅耳衍射到达接收望远镜视场。星载单光子激光雷达在海面的回波信号来自海面的反射,主要包括脚点内镜面点的镜面反射以及在海面白沫上的朗伯反射。

在没有白沫的区域,激光雷达的有效回波信号主要来自海面镜面点对激光的反射,海面反射点的法线方向与激光的入射方向近似相同时产生的镜面反射信号才能返回激光雷达。

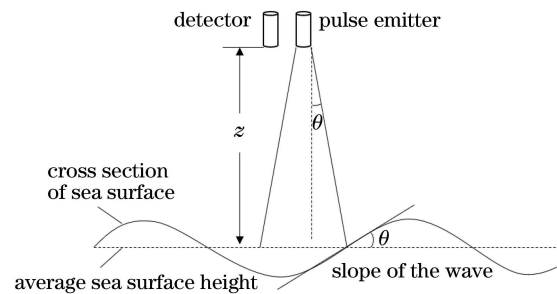


图 1 星载激光雷达探测原理

Fig. 1 Detection principle of spaceborne lidar

根据 Gardner 理论,望远镜接收到的回波功率可表示为^[14]

$$P(t) = \frac{A_r T_a^2}{z^2} \iint_{\Sigma} \beta(l) |a(l, z)|^2 \cdot \left| f \left[t - \frac{2z}{c} - \frac{l^2}{cz} + \frac{2\xi(l)}{c} \right] \right|^2 d^2 l, \quad (1)$$

式中: $a(l, z)$ 为归一化的强度分布; f 为高斯函数; l 为目标点与光斑中心的水平距离; $\beta(l)$ 为光斑内目标反射率; $\xi(l)$ 为目标表面高程轮廓; T_a 为大气透过率; A_r 为接收望远镜面积; z 为星载激光雷达轨道高度; c 为真空光速; Σ 为目标光斑照射区域。激光发射脉冲在空域的横截面分布通常近似用二维高斯函数描述,其归一化的强度分布为

$$|a(l, z)|^2 = \frac{1}{2\pi(z \tan \theta_i)^2} \exp\left(-\frac{l^2}{2z^2 \tan^2 \theta_i}\right), \quad (2)$$

式中: θ_i 为光束发散角。时域波形同样用高斯函数表示为

$$|f(t)|^2 = \frac{1}{\sqrt{2\pi}\sigma_f} \exp\left(-\frac{t^2}{2\sigma_f^2}\right), \quad (3)$$

式中: σ_f 为发射脉冲均方根宽度。由于激光光束的

横截面强度和水表面需要达到镜面反射要求的斜率都与 l 相关,则海面镜面反射引起的平均信号光子数可以通过在光斑面积内对 l 积分求得。

依据 Hu 等^[4]的推导,海面的后向散射系数 $\delta_{\lambda}^{(w)}$ 可以表示为

$$\delta_{\lambda}^{(w)} = \frac{\rho_{532}}{4\pi s^2 \cos^4 \theta_p} \exp\left(\frac{-\tan^2 \theta_p}{2s^2}\right), \quad (4)$$

式中: ρ_{532} 为激光在海面大气之间的镜面点反射率; s^2 为海浪斜率的方差; θ_p 为探测器天顶角。则目标脚点内整体漫反射率可表示为

$$\rho_{\lambda}^{(w)} = \frac{\rho_{532}}{4s^2 \cos^4 \theta_p} \exp\left(\frac{-\tan^2 \theta_p}{2s^2}\right)。 \quad (5)$$

在近天顶入射条件下,532 nm 的激光在海面大气之间的镜面点反射率 $\rho_{532} \approx 0.0209$, θ_p 为探测器天顶角, s^2 为海浪斜率的方差,与风速有关,可表示为^[4]

$$s^2 = \begin{cases} 0.0146 \sqrt{U} & U < 7 \\ 0.003 + 0.00512U & 7 \leq U < 13.3 \\ 0.138 \lg U - 0.084 & U \geq 13.3 \end{cases}, \quad (6)$$

式中: U 为海面 10 m 高处的风速。

由激光雷达方程可得,由海面白沫朗伯反射的回波信号光子数可以表示为

$$N_{s, \text{foam}} = \frac{\eta E_t}{h\nu} \cdot \frac{\rho_l \cos \theta_p}{\pi} \frac{A_r W}{z^2} T_a^2, \quad (7)$$

式中: ρ_l 是白沫的反射率; $h\nu$ 是单个光子的能量; E_t 是发射系统的脉冲能量; W 是白沫区域的覆盖比例。依据 Monahan 等^[15-16]的统计分析, W 与风速密切相关,可以表示为

$$W = \begin{cases} 0 & U < 3.70 \\ 3.18 \times 10^{-5} (U - 3.70)^3 & 3.70 \leq U < 10.1874 \\ 4.82 \times 10^{-6} (U + 1.98)^3 & U \geq 10.1874 \end{cases} \quad (8)$$

综上所述,由海面镜面反射引起的回波信号光子数可表示为

$$N_{s, \text{specular}} = \frac{\eta E_t A_r (1 - W) T_a^{2 \sec \theta_p}}{h\nu z^2} \frac{\rho_{532}}{4\pi (sz \tan \theta_t)^2} \times \int_0^{z\theta_t} \left(1 + \frac{l^2}{z^2}\right)^2 \exp\left(\frac{-l^2}{2z^2 \tan^2 \theta_t}\right) \exp\left[\frac{-\left(\frac{l}{z} + \theta_p\right)^2}{s^2}\right] l dl, \quad (9)$$

式中: R_h 为卫星高度。对于星载激光测高仪,激光发散角 θ_t 通常很小(几十微弧度),可以认为单一出射脉冲在海面上的入射角相等,对于 ATLAS 近天

顶入射条件下($\theta_p < 1^\circ$),由海面镜面反射引起的信号光子数可以近似表示为

$$N_{s, \text{specular}} = \frac{\eta E_t \rho_{532} A_r (1 - W) T_a^2}{4h\nu \pi z^2 (s^2 + 2 \tan^2 \theta_t)}。 \quad (10)$$

从(10)式可以看出,当系统参数一定时,单光子激光雷达回波强度与风速相关。随着海面风速的增大,一方面海面粗糙度增大,经海面镜面点反射的回波信号强度减小,另一方面,海面白沫区也随风速的增加而扩大,白沫漫反射进一步削弱了回波信号的强度。

2.2 单光子探测器模型

全波形激光雷达正常工作状态下对于回波信号的响应为线性模式,而单光子激光雷达在单次探测中,只能探测信号的有无,而不能探测信号的大小。一定时间内接收的平均光子数通常为单光子量级,此时光信号以量子特性为主,因此更适合用统计学的分析方法对一段时间 τ 内探测到信号光子的概率进行分析。

根据统计光学理论,对于直接探测激光雷达,目标表面散射回来的平均信号光子数可以用泊松分布近似表示。对于单光子探测器件,目标的探测概率可以表示为^[17]

$$P_{sn}(k > 0) = \exp(-f_n \tau_d) [1 - \exp(-N_s - f_n \tau_t)], \quad (11)$$

式中: n 代表探测器的个数; k 代表探测器实际捕获的光子数; τ_d 代表探测器的死区时间,(11)式中 $\exp(-f_n \tau_d)$ 代表信号光子到达的前一个死区时间内,探测器没有探测到噪声光子的概率,其中 f_n 为噪声率。 $1 - \exp(-N_s - f_n \tau_t)$ 代表探测器处于工作状态下探测到信号或者噪声的概率, τ_t 代表信号的脉宽。

ATLAS 强波束有 16 个探测通道,每个通道捕获其中的一部分能量,对于在接收视场内激光回波能量近似分布均匀的情况,每个探测通道的探测概率可以表示为

$$P_{sn}(k > 0) = \exp\left(-\frac{f_n \tau_d}{n}\right) \left[1 - \exp\left(\frac{-N_s - f_n \tau_t}{n}\right)\right]。 \quad (12)$$

n 个探测器总共捕获的平均信号光子数($m = P_{sn} \times n$)可以表示为

$$m = n \exp\left(-\frac{f_n \tau_d}{n}\right) \left[1 - \exp\left(\frac{-N_s - f_n \tau_t}{n}\right)\right]。 \quad (13)$$

基于(13)式,图 2 描述了死区时间为 3 ns 时平

均信号光子数 N_s 和实际接收信号光子数 k 的关系。图中直线代表 1:1 的线性响应,其余 4 条曲线分别代表了不同探测器个数时的单光子探测器响应。可以看出,基于 ATLAS 弱波束的 4 通道探测接收到的光子数与线性体制激光雷达差距较大,而对于强波束的 16 通道探测器,平均回波信号光子数在 2 个以下时对接收到的光子数的影响很小,此时不需要对模型进行修正。

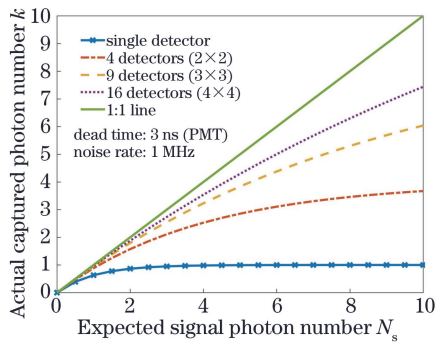


图 2 单光子激光雷达探测概率模型

Fig. 2 Model of detection probability of single photon lidar

3 基于 ATLAS 数据的模型验证

3.1 数据来源

本文中主要利用 NASA 发布的 ATL03 数据进行模型验证分析。ATL03 数据为 ICESat-2 经过地理位置校正的 2 级数据包,数据包中提供了探测器工作时的太阳高度角、天顶角,发射脉冲能量、频率、噪声率,探测器获取的光子事件的产生时间、经纬度、椭球高度及置信度等信息。

利用 Matlab 对数据进行可视化处理,可以看到 ATL03 数据表现为光子点云,其中每个点代表探测器响应的光子事件。在海洋表面回波信号中,由于背景光噪声以及 532 nm 激光穿透海面经水体散射,光子点云中包含大量的噪声光子,虽然 ATL03 数据集将光子事件初步分为了信号点与噪声点,但仍存在许多误判噪声点,尤其是天光背景噪声,因此选用夜晚的数据能够减弱背景噪声的影响,有利于提高信号光子数统计准确率。根据噪声光子呈泊松分布,信号光子集中分布在目标表面剖面的特性,可以利用基于空间密度的聚类算法进一步剔除噪声^[12]。

本文研究中选取了菲律宾海域 $10^{\circ}\text{N}\sim 25^{\circ}\text{N}$, $130^{\circ}\text{W}\sim 140^{\circ}\text{W}$ 范围 2019 年全年的夜间数据进行统计并用部分 2020 年数据进行验证。菲律宾海海域位于太平洋西部,海区平均水深为 6000 m,最大

水深约为 10496 m,是亚洲国家水路通往美洲、大洋洲的主要通道,具有重要的经济、军事地位。在 2019 年 4—5 月该区域风速主要分布在 $4\sim 6\text{ m/s}$ 范围内,2019 年 6—8 月夏季风时期风速为 $5\sim 6\text{ m/s}$,2019 年 9 月风速开始加大,大部分海区风速为 $6\sim 7\text{ m/s}$,2019 年 10 月到 2020 年 3 月为冬季风时期,该海区风速可达 9 m/s ^[18]。菲律宾海海面风速较为稳定,极端值较少,研究表明该海域回波信号强度与本文提出的理论模型适用区间较为符合。

3.1.2 ERA5 风速数据

ERA5 数据是欧洲中期天气预报中心 (ECMWF) 发布的全球大气再分析数据,其中给出了海面上空 10 m 高处风速。将全球风场按照经纬度划分为 $0.25^{\circ}\times 0.25^{\circ}$ 的网格,每 1 h 记录网格内的平均风速^[19]。

ATL03 轨道位置及测量时间无法精确地与 ERA5 数据的位置和时间相对应,因此根据 ATL03 数据集中的轨道经纬度及探测时间信息,通过空间双线性内插法在 ERA5 数据集中找到对应的海面 10 m 高处风速数据,可以得到信号光子数在不同风速条件下的分布情况。

3.2 模型验证

将表 1 的 ATLAS 参数代入 (10) 式,可以计算出风速与实际平均接收信号光子数的关系。采用 ATL03 在菲律宾海域的多轨数据,以 7 km 的距离划分,统计实际接收的平均信号光子数和相应的 ECMWF 风速之间的关系,将其以密度热力图的形式表现,如图 3 所示。由于 ATLAS 发射脉冲能量存在微小的波动,分别统计了 2019 年和 2020 年所有数据对应的脉冲能量均值 E_{aver} 及其标准差 σ_E ,图中实线为 $E_t = E_{\text{aver}}$ 对应的理论模型曲线,虚线对应能量为 $E_t = E_{\text{aver}} + \sigma_E$,点划线对应能量为 $E_t = E_{\text{aver}} - \sigma_E$ 。图 3(a) 为理论模型曲线与 2019 年 ATL03 数据对比,图 3(b) 为理论模型曲线与 2020 年 ATL03 数据对比。可以看到在 $4\sim 10\text{ m/s}$ 的风速区间内,越接近理论模型曲线,数据点密度越大。

图 4 中光滑曲线为第 1 节中推算的海洋表面回波光子数与风速的理论关系曲线,误差棒线中心表明在每个 1 m/s 的风速间隔内实测平均信号光子数的均值,上下界为对应的标准差。可以看到当风速为 $4\sim 10\text{ m/s}$ 时,理论模型曲线对应的值始终在实测平均信号光子数的 1 倍标准差范围内。均值误差 (MAE) 为 0.0037 个光子/脉冲,均方根误差 (RMSE) 为 0.153 个光子/脉冲。

表 1 ATLAS 参数

Table 1 Parameters of ATLAS

Parameter name	Value	Parameter name	Value
Efficiency of receiving system η	0.06	Filter bandwidth / μm	38
Pulse divergence angle $\theta_t / \mu\text{rad}$	24	Orbital altitude z / km	500
Field of view angle / μrad	83.5	Effective receiver aperture A_r / m^2	0.41

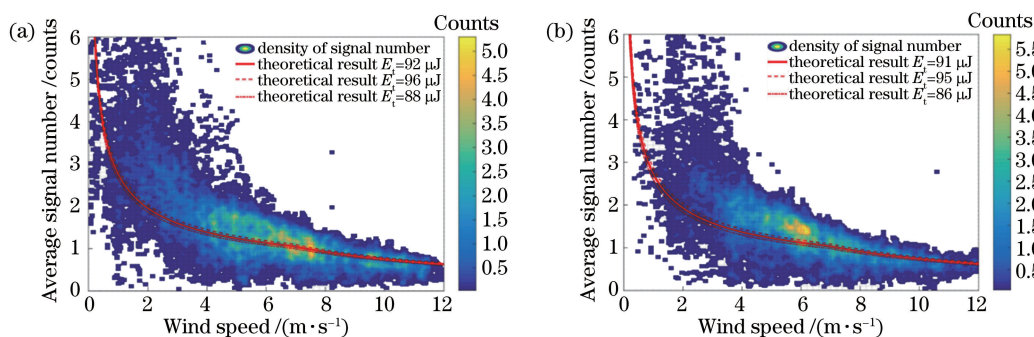


图 3 实测数据与理论模型曲线对比。(a) 2019 年数据对比;(b) 2020 年数据对比

Fig. 3 Comparison of observed data and theoretical model curve. (a) Comparison of data of 2019; (b) comparison of data of 2020

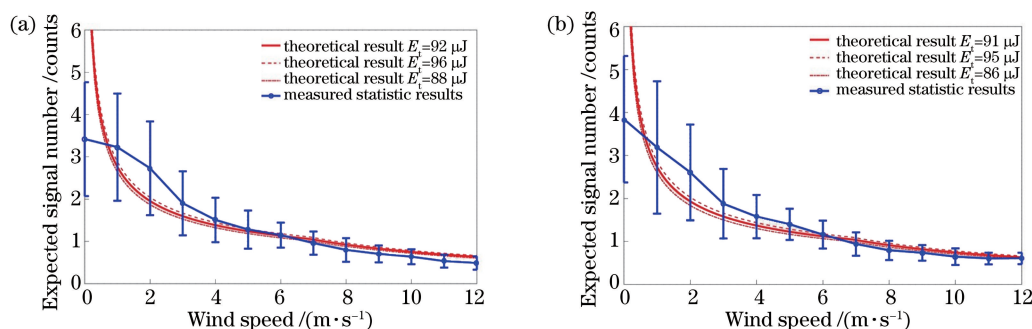


图 4 实测结果统计参数与理论模型曲线对比。(a) 2019 年数据对比;(b) 2020 年数据对比

Fig. 4 Comparison of observed data and theoretical model curve. (a) Comparison of data of 2019; (b) comparison of data of 2020

为了更好地描述理论模型与实测数据的相关性,以 2020 年部分数据验证模型,将实际探测过程中每段数据的平均激光发射脉冲能量及风速代入(10)式,计算得到平均信号光子数理论值,统计海面风速在 4~10 m/s 时,实测平均信号光子数 N_s 与理论模型计算得到的平均信号光子数 $N_{s,specular}$ 之比的分布情况,画出直方图,结果如图 5 所示。从图中可以看到,在 4~10 m/s 风速条件下的信号光子数比值近似为正态分布,其峰值处 $N_s/N_{s,specular} = 1.19$,方差 $\sigma^2 = 0.11$,说明将实际风速与发射脉冲能量代入理论模型中计算得到的平均信号光子数与实测值较为符合。

当风速小于 4 m/s 时,实测信号光子数与模型有较大偏差,其 RMSE 为 0.9780 个光子/脉冲,这是因为低风速条件下 ERA5 数据存在 1.5 m/s 的

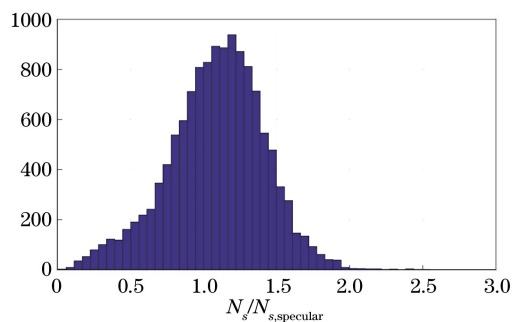


图 5 2020 年 4~10 m/s 风速区间内实测平均信号光子数与理论模型计算光子数之比

Fig. 5 Ratio of measured average photon number to theoretical model photon number calculated from data of 2020 in range of 4-10 m/s

误差,且时间空间双线性插值获取的风速数据不确定度较大,故本文提出的海面回波信号理论模型不

适用于海面风速小于 4 m/s 的情况。

4 结 论

从星载激光测高仪海洋表面回波模型出发,推导了星载单光子激光雷达的海洋表面回波模型,在计算海面对激光光束的反射率时,不仅考虑了风速对激光脚点内镜面反射点数量的影响,也考虑了在风速较大的情况下产生的海面白沫对激光光束的漫反射。根据探测器的探测模型,推导出信号光子数与探测器表面接收的光子数的关系。

将获得的海洋表面回波信号理论模型结果与 ICESat-2 实际测量得到的不同风速下的单脉冲平均信号光子数进行对比,证明单光子激光雷达在海洋探测中的回波信号强度与风速高度相关,风速越大,其回波信号光子数越少。在风速小于 4 m/s 时,单光子激光雷达测得的回波信号信噪比高,平均信号光子数多,但其与理论模型符合程度较差,这是由于低风速对回波信号光子数的影响较小,且风速数据存在 1.5 m/s 的误差,探测器输出的信号光子数与其他因素关联更大;当风速在 4~10 m/s 时,单光子激光雷达测得的平均信号光子数与理论模型的符合程度更好,将发射脉冲能量及风速实测值代入模型中,计算得到的信号光子数与实测平均信号光子数的比值呈正态分布,方差约为 0.11 个光子/脉冲。由于在风速大于 10 m/s 的情况下,海面均方斜率增大,经镜面反射到达雷达接收面的光子数急剧减少,回波数据较少,因此所提出的单光子激光雷达海面回波信号模型主要用海面上方 10 m 处风速在 4~10 m/s 的情况进行检验。

参 考 文 献

- [1] Ma Y, Li S, Zhou H, et al. Received waveform model for satellite laser altimeter measuring ocean surface [J]. Chinese Journal of Lasers, 2012, 39(12): 1214005.
马跃, 李松, 周辉, 等. 星载激光测高仪海洋表面回波计算的理论模型 [J]. 中国激光, 2012, 39(12): 1214005.
- [2] Tsai B M, Gardner C S. Remote sensing of sea state using laser altimeters [J]. Applied Optics, 1982, 21(21): 3932-3940.
- [3] Jiang D, Qin Y C, Wang X P. Sensitivity analysis of atmospheric delay corrections for satellite-borne laser altimeter [J]. Laser & Optoelectronics Progress, 2019, 56(23): 230101.
江丹, 覃驭楚, 王小平. 星载激光测高仪大气延迟校正的敏感性分析 [J]. 激光与光电子学进展, 2019, 56(23): 230101.
- [4] Hu Y, Stamnes K, Vaughan M, et al. Sea surface wind speed estimation from space-based lidar measurements [J]. Atmospheric Chemistry and Physics, 2008, 8(13): 3593-3601.
- [5] Liu Y X, Fan Q, Li X Y, et al. Realization of silicon single-photon detector with ultra-low dark count rate [J]. Acta Optica Sinica, 2020, 40(10): 1004001.
刘岩鑫, 范青, 李翔艳, 等. 超低暗计数率硅单光子探测器的实现 [J]. 光学学报, 2020, 40(10): 1004001.
- [6] Huang K. Research on key technologies of data processing for photon-counting spaceborne altimeter [D]. Wuhan: Wuhan University, 2018: 12-25.
黄科. 光子计数星载激光测高仪数据处理关键技术研究 [D]. 武汉: 武汉大学, 2018: 12-25.
- [7] An D L, Yang J, Wu Y B, et al. Current research progress and applications of ICESat-2 laser altimetry satellite [J]. Hydrographic Surveying and Charting, 2019, 39(6): 9-15.
安德笼, 杨进, 武永斌, 等. ICESat-2 激光测高卫星应用研究进展 [J]. 海洋测绘, 2019, 39(6): 9-15.
- [8] Horvat C, Blanchard-Wrigglesworth E, Petty A. Observing waves in sea ice with ICESat-2 [J]. Geophysical Research Letters, 2020, 47(10): GL087629.
- [9] Kwok R, Cunningham G F, Hoffmann J, et al. Testing the ice-water discrimination and freeboard retrieval algorithms for the ICESat-2 mission [J]. Remote Sensing of Environment, 2016, 183: 13-25.
- [10] Klotz B W, Neuenschwander A, Magruder L A. High-resolution ocean wave and wind characteristics determined by the ICESat-2 land surface algorithm [J]. Geophysical Research Letters, 2020, 47(1): GL085907.
- [11] Yao J Q, Tang X M, Li G Y, et al. Cloud detection of laser altimetry satellite ICESat-2 and the related algorithm [J]. Laser & Optoelectronics Progress, 2020, 57(13): 131408.
么嘉棋, 唐新明, 李国元, 等. 激光测高卫星 ICESat-2 云检测及其相关算法 [J]. 激光与光电子学进展, 2020, 57(13): 131408.
- [12] Zhang J S, Kerekes J. An adaptive density-based model for extracting surface returns from photon-counting laser altimeter data [J]. IEEE Geoscience and Remote Sensing Letters, 2015, 12(4): 726-730.
- [13] Smith B, Fricker H A, Holschuh N, et al. Land ice height-retrieval algorithm for NASA's ICESat-2 photon-counting laser altimeter [J]. Remote Sensing of Environment, 2019, 233: 111352.

- [14] Gardner C S. Target signatures for laser altimeters: an analysis[J]. *Applied Optics*, 1982, 21(3): 448-453.
- [15] Monahan E C. Oceanic whitecaps [J]. *Journal of Physical Oceanography*, 1971, 1(2): 139-144.
- [16] Anguelova M D, Bettenhausen M H. Whitecap fraction from satellite measurements: algorithm description [J]. *Journal of Geophysical Research: Oceans*, 2019, 124(3): 1827-1857.
- [17] Johnson S, Gatt P, Nichols T. Analysis of Geiger-mode APD laser radars [J]. *Proceedings of SPIE*, 2003, 5086: 359-368.
- [18] Sun S X, Teng J. Climate character of the Philippine sea [J]. *Marine Forecasts*, 2003, 20(3): 31-39.
孙守勋, 滕军. 菲律宾海的气候特征 [J]. *海洋预报*, 2003, 20(3): 31-39.
- [19] Hersbach H, Bell B, Berrisford P, et al. ERA5 hourly data on single levels from 1979 to present [EB/OL]. (2018-06-14) [2021-03-19]. <https://cds.climate.copernicus.eu/cdsapp#!/dataset/reanalysis-era5-single-levels>.