

星载单光子激光雷达海洋噪声模型

杨 坚¹, 马 跃¹, 于文博¹, 李少辉², 余 婧², 王倩莹², 李 松^{1,3*}

(1. 武汉大学 电子信息学院, 湖北 武汉 430072;

2. 中国空间技术研究院 北京 100098;

3. 武汉量子技术研究院, 湖北 武汉 430206)

摘要: 星载单光子激光雷达以超高灵敏度和超高重频的优势, 在海洋探测领域展现了广泛的应用前景。雷达系统中的单光子探测器件具有极高的灵敏度, 可以探测光子量级的回波信号, 同时也极易受太阳背景光噪声影响。由于背景噪声直接影响激光雷达的工作性能, 还会对星上原始的数据量产生影响, 在卫星系统设计阶段, 对噪声强度的准确估计至关重要。本文综合考虑大气后向散射、水面反射及水体后向散射的贡献, 建立了一个星载单光子激光雷达海洋噪声的估计模型。以全球首个对地观测星载激光雷达 ATLAS 为例, 在输入系统参数和环境参数后, 模型估计的噪声与 ATLAS 实测噪声误差在 15% 以内, 证实了该噪声模型的正确性。

关键词: 光子计数; 激光雷达; 海洋探测; 噪声模型

中图分类号: TN958.98

文献标识码: A

Noise model of oceanic spaceborne photon counting Lidar

YANG Jian¹, MA Yue¹, YU Wen-Bo¹, LI Shao-Hui², YU Jing², WANG Qian-Yin², LI Song^{1,3*}

(1. School of Electronic Information, Wuhan University, Wuhan 430072, China;

2. China Academy of Space Technology, Beijing 100098, China;

3. Wuhan Institute of Quantum Technology, Wuhan 430206, China)

Abstract: With the advantage of high sensitivity and high repetition rate, spaceborne photon counting Lidar has shown great application in ocean areas. The photon counting detector can not only respond to the weak echo signal, but is also susceptible to solar radiation. Due to the great impact of background noise on the performance of Lidar systems, as well as the impact on the data volume, accurate estimation of noise level is crucial in the design of satellite Lidar systems. A noise model of oceanic spaceborne photon counting Lidar was proposed that considers the contribution of the atmosphere, water surface, and water column. By inputting the system parameters of the new generation photon counting Lidar ATLAS and the environmental parameters, the MAPEs (mean absolute percentage errors) between estimated noise and the ATLAS measured noise are within 15%, which confirms the effectiveness of the noise model.

Key words: photon counting, Lidar, application in marine systems, noise model

引言

星载激光雷达是一种通过主动发射激光脉冲并接收回波信号, 得到地表或海表精确高程信息的卫星遥感测量设备。随着国外第一代激光测高卫星 ICESat (The Ice, Cloud, and land Elevation Satellite) 以及国内的高分七号等卫星的发射^[1-2], 星载激光雷达技术已经在地形测绘、高分辨率对地观测、

水文检测、冰川监测、海洋探测等领域展现了广泛的应用前景^[3-6]。

受益于单光子探测器件极高的灵敏度, 星载单光子激光雷达可以发射远低于线性体制激光雷达单脉冲能量的激光脉冲, 从而在总能量受限的约束下极大地提高了激光器重复频率, 由此带来了极高的沿轨测量分辨率。2018 年底美国国家航空航天

收稿日期: 2023-7-13, 修回日期: 2023-12-13

基金项目: 湖北省重点研发计划 (2022BID016)

Foundation items: Support by Key Research Project of Hubei Province (2022BID016)

作者简介 (Biography): 杨坚 (1997—), 男, 湖北黄石人, 博士研究生, 主要研究领域为星载单光子雷达的海洋探测。E-mail: jianyang@whu.edu.cn

* 通讯作者 (Corresponding author): E-mail: ls@whu.edu.cn

Received date: 2023-7-13, Revised date: 2023-12-13

局(NASA, National Aeronautics and Space Administration)发射了搭载新一代单光子激光雷达ATLAS (Advanced Topographic Laser Altimeter System)系统的卫星ICESat-2(Ice, Cloud, and land Elevation Satellite-2),并在海面波浪信息提取、海洋水体参数获取、近岸测深等诸多应用领域取得了巨大的成功^[7-11]。星载单光子激光雷达接收回波信号强度仅为光子量级,水下平均回波信号光子数甚至小于1个光子,所以星载单光子激光雷达对太阳背景光噪声非常敏感^[12]。ATLAS系统白天的太阳背景光噪声率达数兆甚至超过十兆每秒,可能淹没微弱的回波信号^[13]。因此,一个精确的噪声模型对于评估目前卫星的海洋探测能力及优化卫星的设计至关重要。

目前,星载激光雷达的噪声估计主要采用经典的线性体制噪声模型^[12,14],这些模型建立于星载单光子激光雷达发射前,并做了大量的简化近似,对海洋区域没有单独建模,因而模型预估的噪声可能与实际实测噪声有较大偏差。如Degnan的模型中,将大气全部近似为瑞利散射,而忽略了气溶胶散射与瑞利散射的巨大差异,这在大气噪声占据主导地位的海洋区域带来了不可忽略的误差。本文建立了一个星载单光子激光雷达在海洋区域的噪声估计模型,该模型综合考虑了大气瑞利散射、气溶胶散射、海面反射及水体后向散射等多个太阳光引入噪声的环节。以ICESat-2系统参数,以及NCEP的风速、MODIS大气条件等环境参数作为输入,利用噪声模型预估了4轨ICESat-2海洋区域的噪声,并与ICESat-2实测噪声进行了对比,初步证明了星载单光子激光雷达海洋噪声估计模型的正确性。模型对于星载激光雷达噪声的进一步应用(例如应用于水陆分类、海冰分类等场景),以及对于未来的星载激光雷达系统的设计及优化有非常重大的意义。

1 噪声模型

ATLAS系统主动发射激光脉冲,并接收由地球表面反射回的激光信号,通过准确地记录发射脉冲时间和接收时间,可以准确地获取卫星与地球表面的距离。然而,在信号开窗的距离门内,太阳背景光将持续不断地进入激光雷达接收系统,并被单光子探测器响应,大大增加了信号识别和提取的难度。如图1所示,星载单光子激光雷达在海洋区域接收到的噪声主要由5项组成,分别为(1)大气小分子瑞利散射引入的噪声 f_r ; (2)大气中气溶胶粒子米

氏散射引入的噪声 f_a (来自云或各类较大粒子的后向散射); (3)海洋表面反射引入的噪声 f_s ; (4)水面以下水体颗粒(散射)及水底发射引入的噪声 f_w ; (5)探测器暗计数噪声 f_d 。对于星载激光雷达,噪声是均匀分布于距离窗之内,系统接收到的总噪声 f_{all} 可以表示为上述5项噪声之和。

$$f_{all} = f_r + f_a + f_s + f_w + f_d, \quad (1)$$

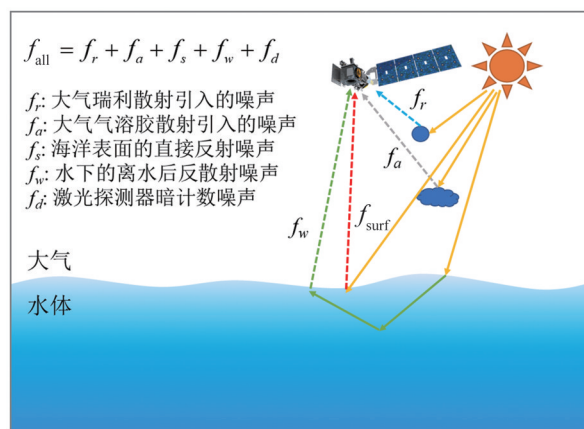


图1 星载激光雷达海洋区域噪声组成示意图

Fig 1 Schematic diagram of noise composition in oceanic spaceborne lidar

ICESat-2的单个探测器暗计数噪声率约为400 Hz^[15], 16个通道的总暗计数噪声 f_d 小于10 kHz, 相比于白天兆赫兹量级的噪声可以忽略不计。大气噪声主要可分为气体小分子的瑞利散射噪声以及气溶胶粒子的米氏散射噪声。两者的后向散射引起的噪声可以用单次散射来近似。这里需要强调的是,气溶胶散射与瑞利散射的散射相位函数有较大差别。瑞利散射的前向散射与后向散射强度大体相等,而气溶胶散射的前向散射远强于后向散射,所以在同等大气厚度条件下,瑞利散射引入的噪声会大于气溶胶散射引入的噪声。另外,在太阳高度角稳定时,瑞利散射噪声主要与大气压相关,卫星在海面上飞行期间瑞利散射噪声比较稳定,而气溶胶散射噪声可能随着云厚度的变化有较大变化。这里需要注意的是,对于信号而言,测量的是激光雷达脉冲的飞行时间,因此可以用距离选通模式判断和提取不同目标,而噪声在距离门内均匀分布,无法使用距离选通模式对不同的噪声项进行分离。ICESat-2海洋区域白天的噪声由太阳背景光和暗计数共同构成,可以用本文提出的噪声模型估计其量级,而夜晚的噪声主要由暗计数组成。在理

论建模阶段,可以将噪声项分解为瑞利散射噪声项、气溶胶散射噪声项以及暗计数噪声项等。但对于实际的光子点云数据,只能基于密度和连续性信息等方法来判断该点云为信号光子或噪声光子,对于响应的噪声光子信号,无法区分是由背景光引起还是由暗计数引起,也无法区分具体是由哪一项反射引起。因此本文在噪声模型验证阶段,使用模型获得的总噪声与 ICESat-2 实测数据统计出的总噪声进行对比。

1.1 瑞利散射噪声项

对于粒子大小远小于光波波长的气体分子,一般用瑞利散射近似描述其散射特征,可以用单次散射近似描述瑞利散射引入的噪声强度^[16]

$$f_r = F \frac{\eta N_\lambda (\Delta\lambda) \pi \theta_r^2 A_r \tau_r P_r(\theta_s, \theta_v)}{h\nu 4\pi \cos\theta_v}$$

$$P_r(\theta_s, \theta_v) = (P_r(\theta_-) + [r(\theta_s) + r(\theta_v)] P_r(\theta_+))$$

$$\cos\theta_\pm = \pm \cos\theta_s \cos\theta_v - \sin\theta_s \sin\theta_v \cos(\phi_v - \phi_s)$$

$$P_r(\theta) = 3/4 [1 + \cos^2\theta]$$

这里 F 是星载激光雷达系统标定系数, η 是系统整体接收效率,包含光学系统接收效率与探测器量子效率的影响, N_λ 是太阳在大气层外的平均辐照度, θ_r 是接收系统半视场角, A_r 是望远镜口径大小, $h\nu$ 是单个光子能量, $P_r(\theta)$ 为瑞利散射相位函数, θ 为瑞利散射角, 角度 θ_s 和 ϕ_s 分别是太阳所处位置的天顶角和方位角, θ_v 和 ϕ_v 分别是星载激光雷达系统的天顶角和方位角。对于接近正天顶发射激光的 ATLAS 系统, 有 $\theta_\pm = \pm\theta_s$, $r(\theta)$ 是入射角为 θ 时水气界面的菲涅耳反射系数。ICESat-2 ATL03 产品提供了卫星及太阳的天顶角和方位角。这里 $P_r(\theta_+)$ 和 $P_r(\theta_-)$ 分别代表散射角 θ 取 θ_+ 和 θ_- 时的散射相位函数。

这里 τ_r 为瑞利光学厚度, 主要取决于激光波长 λ 和海表大气压 P 。瑞利光学厚度与大气压 P 成正比关系, 在标准大气压和标准温度下 (1013.25 hPa, 288.15 K), 瑞利光学厚度 τ_{r0} 可以表示为^[17]

$$\tau_{r0}(\lambda) = \frac{2.1520}{1000} \times \left(\frac{1.0456 - 341.3\lambda^{-2} - 0.9023\lambda^2}{1 + 0.002706\lambda^{-2} - 85.97\lambda^2} \right) \quad (3)$$

任意大气压下的瑞利光学厚度 τ_r 可以从标准大气压瑞利光学厚度 τ_{r0} 转化

$$\tau_r(P, \lambda) = \frac{P}{P_0} \tau_{r0}(P_0, \lambda) \quad (4)$$

这里 P 是海平面大气压, P_0 是标准大气压。需要强调的是, 对于海洋区域, 海平面的大气压 P 很接近标准大气压 P_0 , 因此海洋区域瑞利光学厚度 τ_r 可

以近似为标准大气压下的光学厚度 τ_{r0} 。

1.2 气溶胶散射噪声项

对于较大的散射粒子, 如尘埃、烟雾、霾、云等, 一般用气溶胶散射(或米氏散射)描述其散射特征。同样地, 可以用单次散射近似描述气溶胶粒子散射引入的噪声强度^[18]

$$f_a = F \frac{\eta N_\lambda (\Delta\lambda) \pi \theta_r^2 A_r w_a \tau_a P_a(\theta_s, \theta_v)}{h\nu 4\pi \cos\theta_v}$$

$$P_a(\theta_s, \theta_v) = P_a(\theta_-) + [r(\theta_s) + r(\theta_v)] P_a(\theta_+)$$

$$\cos\theta_\pm = \pm \cos\theta_s \cos\theta_v - \sin\theta_s \sin\theta_v \cos(\phi_v - \phi_s)$$

$$P_a(\theta) = \alpha f(\theta, g_1) + (1 - \alpha) f(\theta, g_2) \quad (5)$$

$$f(\theta, g) = \frac{1 - g^2}{(1 + g^2 - 2g \cos\theta)^{\frac{3}{2}}}$$

$$\alpha = 0.9, g_1 = 0.82, g_2 = -0.55$$

这里气溶胶散射相位函数 $P_a(\theta)$ 可以用 TTHG (Two-Term Henyey-Greenstein) 函数表示, g_1 和 g_2 分别代表前向 HG 函数和后向 HG 函数的非对称因子。而 $f(\theta, g)$ 代表 HG 散射相位函数, g 大于 0 时为前向散射偏强, g 小于 0 时为后向散射偏强, 公式中的 $f(\theta, g_1)$ 和 $f(\theta, g_2)$ 分别代表 g 取 g_1 和 g_2 的 HG 函数。 w_a 是气溶胶单次散射比率, τ_a 是气溶胶光学厚度, 其中单次散射比率与气溶胶类型和湿度相关, 可以表示为^[19]

$$w_a = (-0.003 \text{ AM} + 0.972) * \exp(3.06 * 10^{-4} \text{ RH}) \quad (6)$$

这里 AM 是气溶胶类型, RH 为大气相对湿度。气溶胶散射与瑞利散射不同, 不同地方的云、雾的厚度会极大程度上影响气溶胶散射噪声大小, 一般可通过气象数据获得当地的各项气溶胶参数。

图 2 绘制了瑞利散射相位函数和气溶胶散射相位函数与散射角度的关系。可见瑞利散射的前向散射和后向散射基本均匀, 而气溶胶散射中前向散射远大于后向散射。对处于正天顶方向的卫星, 大气后向散射部分对噪声作主要贡献。

1.3 水面反射噪声项

水面反射噪声主要包括: 水面白沫反射产生的背景光噪声以及水面镜面反射产生的背景光噪声。由于海面存在风浪, 水面上部分区域会被泡沫覆盖, 一般来说, 水面泡沫部分反射特性可以视为漫反射, 当太阳天顶角为 θ_s , 星载激光雷达收到的白沫反射的噪声光子率可以表示为

$$f_{s, \text{foam}} = F \frac{\eta N_\lambda (\Delta\lambda) \theta_r^2 A_r t(\theta_s) t(\theta_v) W \rho_i \cos\theta_s}{h\nu} \quad (7)$$

这里 W 为白沫覆盖比例, 海洋表面白沫覆盖比

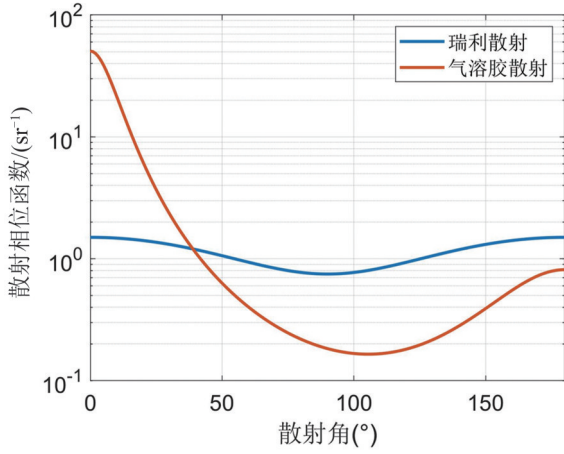


图2 瑞利散射与气溶胶散射相位函数

Fig 2 The phase function of Rayleigh scattering and aerosol scattering

例可以与风速之间建立关联 $W = 2.95 \times 10^{-6} U_{10}^{3.52 \pm 0.52[20]}$, ρ_l 是白沫反射率 (对于 532 nm 约为 0.22), $t(\theta_s)$ 与 $t(\theta_v)$ 分别代表从地面到卫星方向, 和从太阳到地面方向的大气漫射透过率。

在非白沫覆盖区域, 水表面反射主要由表面随机分布的各个小面元的镜面反射组成, 只有海面点刚好能将太阳入射光反射到卫星方向, 才能被接收系统接收。海洋反射截面与水面粗糙度密切相关。对于 ICESat-2 系统, 激光入射天底角 (也即接收系统天底角) 仅为 0.33° , 海表面反射的噪声可以近似表示为^[21-22]

$$f_{s,\text{specular}} = F \frac{\eta N_\lambda (\Delta\lambda) \theta_r^2 A_r \rho_s}{4s^2 h\nu \cos^4(\theta_s/2)} T_a^{\sec\theta_r + \sec\theta_s} (1 - W) \exp\left(-\frac{(-\tan(\theta_s/2))^2}{s^2}\right), \quad (8)$$

这里 ρ_s 是水面菲涅尔反射率, T_a 代表正天顶方向的大气直射透过率。 s^2 为海面均方根斜率, 与风速相关, 依据 Cox-Munk 谱^[21], $s^2 = 0.003 + 0.00512 U_{12.5}$, 这里 $U_{12.5}$ 为在海面上方 12.5 m 处的风速。综合式 (6)、(7), 水面的后向散射噪声可以表示为

$$f_s = f_{s,\text{foam}} + f_{s,\text{specular}}, \quad (9)$$

1.4 水体后向散射噪声项

在 532 nm 的光波波段, 太阳光可以穿过水面进入水体。由于水体的后向散射, 部分太阳光被再次反射出水面而被激光雷达探测器接收到。在被动遥感领域, 来自水面以下的水体太阳光反射被称为离水辐亮度, 一般用遥感反射率 R_{rs} 表示水面以下 (包括水体和水底) 反射太阳光的能力。遥感反射率 R_{rs} 要受水体光学参数及水深影响, 在大洋区域,

主要取决于水体后向散射系数和水体吸收系数, 本研究中不作详细讨论。遥感反射率 R_{rs} 可以用来表示 S 水体的反射能力, 该参数可以直接从被动卫星遥感数据源获取, 如 MODIS (Moderate Resolution Imaging Spectroradiometer)。水面以下的太阳光反射项可以表示为

$$f_w = F \frac{\eta N_\lambda (\Delta\lambda) \pi \theta_r^2 A_r}{h\nu} t(\theta_s) t(\theta_v) R_{rs} \cos \theta_s, \quad (10)$$

2 模型验证

ICESat-2 卫星发射 532 nm 波长的绿光, 在垂轨方向分成 3 个强波束和 3 个弱波束。在 500 km 的轨道高度上, 以 10 kHz 的重频产生约 0.7 m 的沿轨光斑间隔。如图 3 所示, 本文共选取了 4 条 ICESat-2 轨道, 用于比较星载激光雷达实测噪声率与理论建模计算得到的噪声率, 其中两条轨道位于澳大利亚北部附近, 一条轨道位于英国东部附近, 一条轨道位于印度西部附近对于 ICESat-2 数据。图 3 中的红色箭头代表卫星的运动方向, 红色实线的起止分别代表该段数据的初始和结束位置。系统参数是统一的, 而不同轨道中环境参数是变化的。ICESat-2 ATL03 数据提供了沿轨的太阳天底角 θ_s , NCEP (National Centers for Environmental Prediction) 数据提供沿轨大气压 P 、大气相对湿度 RH 以及海面上空风速 U , MODIS (Moderate Resolution Imaging Spectroradiometer) 数据提供沿轨气溶胶光学厚度 τ_a 以及遥感反射率 R_{rs} 。所有数据以经纬度和时间双线性插值与 ICESat-2 沿轨数据相匹配作为模型环境参数输入。用于实验的四个轨道分布在南纬 16° 到北纬 60° , 气溶胶光学厚度覆盖从 0 到 0.5, 太阳天底角分布分布范围为 20° 到 80° , 过境时星下海面风速分布范围从 3 m/s 到 13 m/s。这四条轨道对应了变化较大的环境因素, 可以用于验证噪声模型的准确性。

在输入激光雷达系统参数, 和对应的实测环境参数后, 模型估计了 ICESat-2 在运行时沿轨分布的噪声率。图 4 中, 蓝色实线代表 ICESat-2 沿轨实测的噪声率 (从 ATL03 数据中获取), 红色实线为代入系统参数与环境参数估计得到的理论总噪声, 各虚线代表不同的噪声项。使用平均百分比误差 (MAPE, mean absolute percentage error) 定量描述噪声模型与实测噪声的对比结果

$$\text{MAPE} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \left| \frac{f_{\text{theo}} - f_{\text{mea}}}{f_{\text{mea}}} \right|, \quad (11)$$

这里 f_{theo} 为理论总噪声, f_{mea} 为实测总噪声, n 为

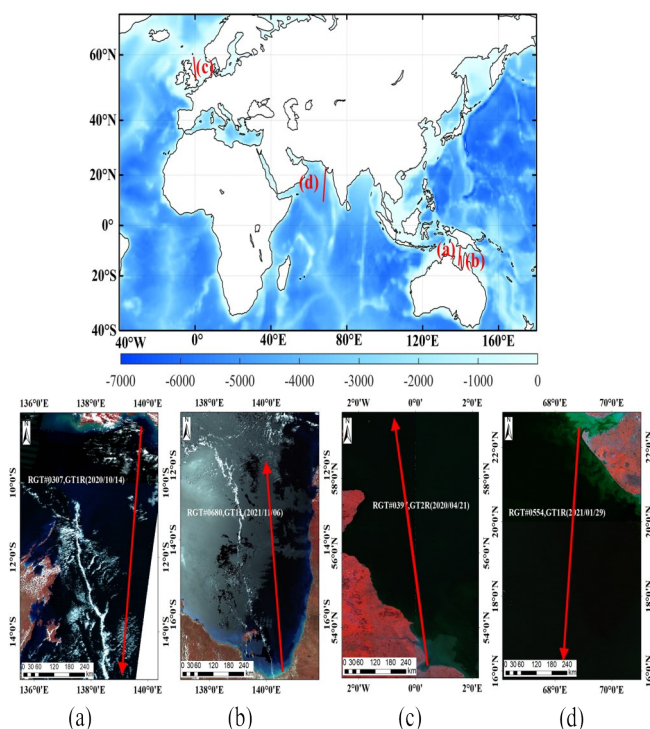


图3 研究区域与所选的四个ICESat-2轨道概览:(a)位于澳大利亚北部附近;(b)位于澳大利亚北部附近;(c)位于英国东部附近;(d)位于印度西部附近。红色线段代表ICESat-2轨道

Fig 3 Overview of the study areas and the corresponding four ICESat-2 tracks: (a) Near north Australia; (b) Near the north of Australia; (c) Near the eastern of the United Kingdom; (d) Near the Western of India. The red lines represent the location of the ICESat-2 tracks

每一个轨道的噪声样本数量。从图4中可见,模型预测值(理论总噪声)与实际噪声对应较好,在四个轨道估计的噪声与实测噪声的误差百分比分别为11%、4.7%、13%、5.8%,已经可以用于对海面噪声较为精确的计算,以及预估星载单光子激光雷达在不同环境下的噪声水平。

从图4中可以看出,黄色虚线代表的瑞利噪声在沿轨分布较为稳定,且在总噪声中占据较大影响。紫色虚线为气溶胶噪声,沿轨向的变化取决于海面上空的云和气溶胶光学厚度。由于气溶胶散射中前向散射为主体,所以在气溶胶光学厚度与瑞利光学厚度相当时,对噪声的贡献小于瑞利散射。绿色虚线为水体噪声,在大洋区域较为稳定,在总噪声中影响不大。但是在近岸区域,如图4(b-d)中,靠近左侧的近岸区域,随着水体的浑浊,水体后向散射引发的噪声可能超过大气影响,引起噪声总

量的增加。蓝色虚线为水面噪声,主要与太阳天底角、风速有关,对于正天底入射的激光雷达,在较小的太阳天底角和较小的风速条件下,海面反射引入的噪声也不可忽略。上述四轨ICESat-2数据覆盖了多种环境参数,总噪声率在不同情况下均吻合得很好,证明了该噪声模型良好的适应性和正确性。

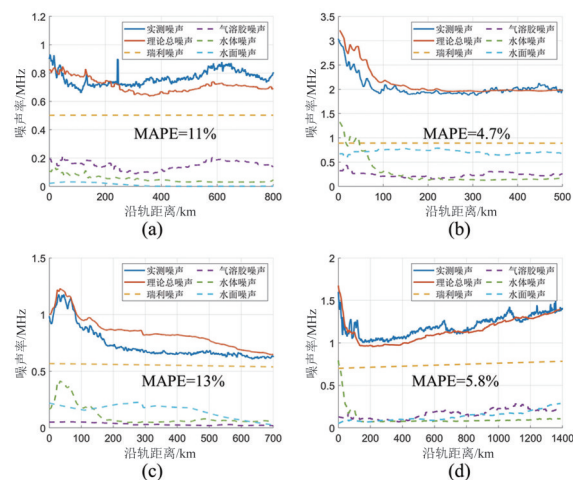


图4 海洋区域的噪声模型验证:(a-d)四个图的噪声率分别对应图3中(a-d)四条轨道的沿轨噪声率。图中蓝色实线代表ICESat-2实测噪声,红色实线代表理论总噪声,不同颜色的虚线分别代表理论不同噪声项

Fig 4 Validation of the noise model in ocean areas: (a-d) represent the result of the noise rates for four tracks in Fig 3 (a-d). The blue solid line represent the ICESat-2 measured noise rate, the red solid line represent the theoretical noise rate, and the dashed line represent the different contribution of the noise rate

3 结论

本文综合考虑了大气瑞利散射、气溶胶散射、海面镜面反射、海面白沫反射、水体后向散射等诸多太阳光反射项,较为准确地建立了星载单光子激光雷达海洋噪声模型。该模型综合考虑了太阳天底角、气溶胶厚度、海面风速、气压、湿度等环境因素的影响,通过输入系统参数和环境参数即可完成星载单光子激光雷达的噪声估计。

以ICESat-2卫星单光子激光雷达系统的实际参数以及NCEP和MODIS提供的环境参数为输入,对ICESat-2系统4个轨道的海面沿轨噪声进行了估计。在清澈的大洋区域,大气后向散射噪声占据噪声中的主体地位,瑞利散射引入的噪声较为稳定,气溶胶散射沿轨变化较大。在近岸区域,水体变得更加浑浊,水体后向散射噪声变强,对噪声水平产

生了较大影响。将模型估计的总噪声与 ICESat-2 卫星单光子激光雷达系统的海面实测总噪声进行了对比,实测结果与理论模型估计结果吻合较好,整体误差在 10% 左右,最大误差不超过 15%,验证了噪声估计模型的正确性。

本文提出的星载单光子激光雷达海洋噪声模型可以计算不同系统参数和环境条件下星载单光子激光雷达的海面噪声,进而可以分析不同环境下的信噪比,评估激光载荷的海洋探测能力。另外,该模型也可以用于估计星载单光子激光雷达的数据量,协助激光载荷参数的闭合论证及优化设计。

References

- [1] TANG Xin-Yue, XIE Jun-Feng, MO Fan, *et al.* GF-7 dual-beam laser altimeter on-orbit geometric calibration and test verification [J]. *Acta Geodaetica et Cartographica Sinica*. (唐新明, 谢俊峰, 莫凡, 等. 高分七号卫星双波束激光测高仪在轨几何检校与试验验证 [J]. *测绘学报*), 2021, **50**(03): 384-395.
- [2] TANG Xin-Yue, CHEN Ji-Yi, LI Guo-Yuan, *et al.* Error analysis and preliminary pointing angle calibration of laser altimeter on Ziyuan-3 02 satellite [J]. *Geomatics and Information Science of Wuhan University*. (唐新明, 陈继溢, 李国元, 等. 资源三号 02 星激光测高误差分析与指向角粗标定 [J]. *武汉大学学报: 信息科学版*), 2018, **43**(11): 9.
- [3] Ye L, Gu G, He W, *et al.* A Real-time restraint method for range walk error in 3-D imaging lidar via dual detection [J]. *IEEE Photonics Journal*, 2018, **10**(2): 1-1.
- [4] Lancaster R S, Spinhirne J D, Palm S P. Laser pulse reflectance of the ocean surface from the GLAS satellite lidar [J]. *Geophysical Research Letters*, 2005, **32**(22): L22S10.
- [5] Winker D M, Hunt W H, McGill M J. Initial performance assessment of CALIOP [J]. *Geophysical Research Letters*, 2007, **34**(19): 228-262.
- [6] Ma Y, Zhang W, Li S, *et al.* A new wind speed retrieval method for an ocean surface using the waveform width of a laser altimeter [J]. *Canadian Journal of Remote Sensing*, 2017, **43**(4): 309-317.
- [7] Neumann, Thomas A, Martino, *et al.* The ice, cloud, and land elevation satellite-2 mission: A global geolocated photon product derived from the advanced topographic laser altimeter system [J]. *Remote Sensing of Environment*, 2019, **233**: 111325.
- [8] Parrish C E, Magruder L A, Neuenschwander A L, *et al.* Validation of ICESat-2 ATLAS bathymetry and analysis of ATLAS's bathymetric mapping performance [J]. *Remote Sensing*, 2019, **11**(14): 1634.
- [9] Neuenschwander A, Guenther E, White J C, *et al.* Validation of ICESat-2 terrain and canopy heights in boreal forests [J]. *Remote Sensing of Environment*, 2020, **251**: 112110.
- [10] Lu X, Hu Y, Yang Y, *et al.* Antarctic spring ice-edge blooms observed from space by ICESat-2 [J]. *Remote Sensing of Environment*, 2020, **245**: 111827.
- [11] Ma Y, Xu N, Liu Z, *et al.* Satellite-derived bathymetry using the ICESat-2 lidar and Sentinel-2 imagery datasets [J]. *Remote Sensing of Environment*, 2020, **250**: 112047.
- [12] Degnan J. Photon-counting multikilohertz microlaser altimeters for airborne and spaceborne topographic measurements [J]. *Journal of Geodynamics*, 2002, **34**(3-4): 503-549.
- [13] Martino A J, Neumann T A, Kurtz N T, *et al.* ICESat-2 mission overview and early performance [C]. *Sensors, Systems, and Next-Generation Satellites XXIII*. SPIE, 2019.
- [14] Gardner C S. Target signatures for laser altimeters: An analysis [J]. *Applied Optics*, 1982, **21**(3): 448-453.
- [15] Yang G, Martino A J, Lu W, *et al.* IceSat-2 ATLAS photon-counting receiver: Initial on-orbit performance [C]. *Advanced Photon Counting Techniques XIII*. 2019.
- [16] Gordon H R, Brown J W, Evans R H. Exact Rayleigh scattering calculations for use with the Nimbus-7 Coastal Zone Color Scanner [J]. *Applied Optics*, 1988, **27**(5): 862.
- [17] Bodhaine B A, Wood N B, Dutton E G, *et al.* On Rayleigh optical depth calculations [J]. *Journal of Atmospheric and Oceanic Technology*, 1999, **16**(11): 1854.
- [18] Gordon H R, Wang M. Retrieval of water-leaving radiance and aerosol optical thickness over the oceans with SeaWiFS: a preliminary algorithm [J]. *Applied Optics*, 1994, **33**(3): 443.
- [19] Gregg W W, Carder K L. A simple spectral solar irradiance model for cloudless maritime atmospheres [J]. *Limnology and Oceanography*, 1990, **35**(8): 1657-1675.
- [20] Monahan E C, Muircheartaigh, Iognáidó. Optimal power-law description of oceanic whitecap coverage dependence on wind speed [J]. *Journal of Physical Oceanography*, 1980, **10**(12): 2094-2099.
- [21] Cox C, Munk W. Measurement of the roughness of the sea surface from photographs of the sun's glitter [J]. *Journal of the Optical Society of America* (1917-1983), 1954, **44**(11): 838.
- [22] And C R J, Alpers W. The role of the critical angle in brightness reversals on sunglint images of the sea surface [J]. *Journal of Geophysical Research: Oceans*, 2010, **115**(C9): C09019.