

星载单光子激光雷达水体散射测深误差 修正方法分析

赵原强¹, 张宸¹, 张一衡¹, 杨坚^{1*}, 王凯鑫², 李少辉², 周辉^{1,3}, 马跃^{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 100094;

3. 武汉量子技术研究院, 湖北武汉 430206)

摘要: 水体前向散射误差是激光测深的主要误差源之一, 单项误差可能超过海道测量规范的水深精度要求。传统机载激光测深雷达利用回波波形拟合的散射误差抑制方式无法适用于单光子激光雷达的光子点云数据。基于蒙特卡罗方法, 文章建立了星载单光子激光雷达前向散射误差修正经验公式, 定量分析了基于模型仿真、公式拟合的散射误差修正算法的可靠性。利用ICESat-2测深误差初步修正后的水深数据、MODIS全球范围的531 nm水体后向散射系数作为输入, 修正经验公式可以代替模型仿真过程实现水体散射误差的快速修正。文章对修正公式的输入参数的灵敏度分析表明, 散射误差修正残差主要受水体后向散射系数的不确定度影响。若输入的后向散射系数误差在20%以内, 所推导的经验公式可将散射误差修正残差降至水深的0.45%以下, 在四种典型水体条件下, 所推导的经验公式平均降低了72%的水体散射误差, 能够有效剔除绝大部分的水体散射误差。文章进一步分析了不同系统参数对前向散射误差及修正公式的影响, 考虑了在地表位置的接收视场半径, 可将所推导的ICESat-2修正经验公式推广到未来可能的星载单光子激光测深雷达系统。

关键词: 海洋测绘; 测深误差修正; 蒙特卡罗仿真; 水体前向散射; 卫星激光测深; 单光子激光雷达

中图分类号: TN958.98

文献标识码: A

Analysis of water scattering correction methods for spaceborne photon-counting bathymetric lidar

ZHAO Yuan-Qiang¹, ZHANG Chen¹, ZHANG Yi-Heng¹, YANG Jian^{1*},

WANG Kai-Xin², LI Shao-Hui², ZHOU Hui^{1,3}, MA Yue^{1,3}

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

2. China Academy of Space Technology, Beijing 100094, China;

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

Abstract: The forward scattering error in water bodies is one of the primary error sources in spaceborne laser bathymetry, with individual errors potentially exceeding the depth accuracy requirements of hydrographic surveying standards. However, traditional scattering correction methods developed based on waveform information cannot be applied to the discrete photons from photon-counting lidars. In this study, a Monte Carlo simulation is used to estimate the forward scattering errors in the water column for spaceborne photon-counting lidars and an empirical formula is derived for its rapid error correction. The quantitative analysis on this correction method demonstrates that the rapid scattering error correction is practicable and reliable using the initially corrected bathymetry data of ICESat-2 and the MODIS global water backscattering coefficient at 531 nm as inputs. Further sensitivity analysis indicates that the method performance

收稿日期: 2025-05-19, 修回日期: 2025-11-12

Received date: 2025-05-19, Revised date: 2025-11-12

基金项目: 国家自然科学基金(42371440); 湖北省自然科学基金(2025AFB128); 国家资助博士后研究人员计划(GZB20240563); 中国博士后科学基金资助项目(2025M770249)

Foundation items: Supported by the National Natural Science Foundation of China (42371440); the Hubei Provincial Natural Science Foundation of China (2025AFB128); the Postdoctoral Fellowship Program of China Postdoctoral Science Foundation (GZB20240563); the China Postdoctoral Science Foundation (2025M770249)

作者简介(Biography): 赵原强(2002—), 男, 河南新郑人, 硕士研究生, 主要研究领域为星载激光雷达与海洋测绘. E-mail: yuanqiang.zhao@whu.edu.cn

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

mainly depends on the uncertainty of water backscattering coefficients. With the backscattering coefficients error constrained within 20%, the empirical formula reduces the scattering error residuals to less than 0.45% of the water depth. Under four typical water conditions, the empirical formula demonstrates an average 72% reduction in water forward scattering errors, effectively eliminating the majority of scattering-induced inaccuracies. The analysis of system parameters indicates that the derived ICESat-2 correction formula can be extended to other spaceborne photon-counting bathymetric lidars through considering the receiver field-of-view radius.

Key words: marine geodesy and cartography, bathymetric error correction, Monte Carlo simulation, water forward scattering, satellite laser bathymetry, photon-counting lidar

引言

精确的水下地形数据可为航道规划、水下电缆敷设、湖泊水量估算等工程应用提供关键的地理信息数据支撑^[1]。海岸带浅水测绘一直是一项基础且重要的工作,传统基于船载平台的单波束、多波束声学测深技术可以获取深水区域的高精度水下地形信息^[2];基于机载平台的全波形激光雷达测深技术可以对复杂海岸带浅水地形进行高效探测^[3]。然而,受限于传感器性能、覆盖范围、气候条件等挑战,传统船载或机载平台难以在偏远或敏感的区域执行作业任务,难以满足全球范围的浅水地形测绘需求。近些年来,我国星载激光雷达领域发展迅速,成功发射了资源三号02卫星、高分七号卫星、陆地生态碳卫星和大气环境监测卫星等搭载激光载荷的卫星,显著提升了我国空间对地观测能力^[4-6]。然而,我国目前还没有在轨运行可用于浅水测绘的星载激光雷达,星载海洋激光雷达的发展落后于上述大气和陆地探测激光雷达。

美国国家航空航天局(National Aeronautics and Space Administration, NASA)于2018年成功发射了ICESat-2(Ice, Cloud, and land Elevation Satellite-2)卫星,其上搭载了首个基于星载平台的单光子激光雷达-先进地形激光高度计系统(Advanced Topographic Laser Altimeter System, ATLAS),主要任务是监测陆冰高程变化、海冰厚度演变以及全球植被冠层结构^[7]。尽管水深探测并非ICESat-2的主要设计目标,但ATLAS凭借532 nm波长的水体穿透力及单光子探测器的超高灵敏度,已被证实在非常清澈的大洋开阔水域拥有约40 m的最大水深探测能力^[8]。当ICESat-2与具有大幅宽探测能力的多光谱图像数据融合后,可以实现不依赖现场水深数据的星载平台水深测量与反演,有望为全球浅水地形测绘提供一种新的技术手段^[9]。

在目前ICESat-2标准数据处理流程中,包括器件漂移、大气延迟、固体潮汐等在内的各项误差已

经被研究人员充分建模与分析,经标定后测量地面/水面高程精度可优于10~15 cm,但水气界面及水体传输链路引入的几何误差仍待进一步建模与修正^[10-12]。为进一步提升ICESat-2测深精度,Parrish等首先对ICESat-2测深误差中的最大项——水面折射误差进行了精确的建模和分析^[8]。随后,国内外专家对波浪与潮汐引起的水气界面起伏、温度与盐度变化引起的水体折射率波动等误差进行了逐项研究,将水面波动、水体折射等各项误差控制在5 cm@30 m^[13-15]。然而,激光在水体传输过程中由粒子散射效应引入的测深误差未得到充分修正,仅水体散射引入的单项误差可超50 cm@30 m^[16]。水体散射作为当前ICESat-2测深的最大不确定项,已成为制约单光子激光雷达精度进一步提升的关键因素。由于单光子激光雷达不具有回波波形,传统基于波形分解与拟合的前向散射误差抑制方法无法应用于单光子系统,而基于噪声光子点云滤除的方法也无法有效剔除前向散射光子,因此亟需探索新的适用于单光子测深激光雷达的散射误差建模与修正方法^[17]。Yang等和Shangguan等采用蒙特卡罗仿真方法,从物理端建模分析单光子激光雷达在不同水体环境参数下的水体散射误差^[16,18]。然而,这些模型在工程可行性、输入参数误差敏感性等方面仍需进一步研究和探索。

本研究基于蒙特卡罗仿真方法,综合考虑水体分子、悬浮粒子的散射效应,建立水体前向散射误差与单光子激光雷达系统硬件参数、水体光学参数、水深条件的定量映射关系,并基于仿真结果拟合前向散射测深误差的修正经验公式。针对典型水体环境(纯净水体、Ⅰ类水体和Ⅱ类水体),论文定量评估了包括水深(z)、水体后向散射系数(b_b)、吸收系数(a)在内的关键输入参数对所建立修正经验公式的影响。在此基础上,论文讨论与分析了系统器件参数对测深前向散射的定量影响,并通过考虑接收视场半径(R),扩展修正经验公式至其他可

能的星载单光子激光雷达系统。研究结果可为星载单光子测深误差修正及其测深精度预测提供理论依据,并为星载单光子海洋测绘激光雷达系统的指标论证与参数优化设计提供参考。

1 水体前向散射的几何误差模型

1.1 水体前向散射测深误差的成因及仿真方法

在激光雷达水深探测场景中,部分光子会被水分子或者颗粒物散射而改变传播路径。如图1所示,假定水面平静、水底平坦且激光雷达垂直入射,在无散射场景(绿色线),激光雷达信号自水面 p_1 点入射后直达水底 p_2 点,经水底反射后从水面 p_1 点射出,最终被传感器接收。此时,基于回波信号计算水深无散射误差。但在实际海洋测绘场景(红色线),激光脉冲可能会在 p_3 ~ p_6 等位置经过多次散射过程。对于轨道高度为数百公里的星载激光雷达,即使接收视场角仅有几十微弧度,经历多次散射后的大部分光子仍在接收视场内(field of view, FOV),有概率回到接收望远镜。此时,经过散射过程的光子传输路径延长,导致测量的水深结果大于无散射场景的真实水深。

基于蒙特卡罗仿真方法,论文首先仿真ICESat-2系统硬件参数、不同水体环境参数下的前向散

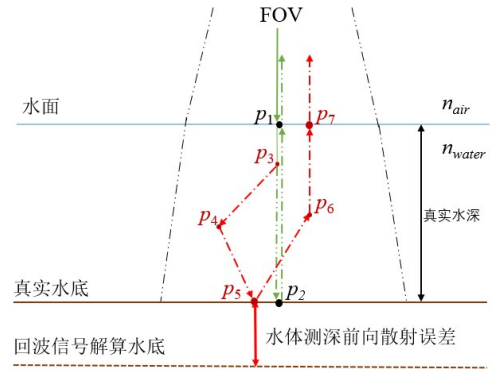


图1 水体前向散射导致的几何误差产生原理

Fig. 1 Generation principle of forward scattering error in water column

射误差,为后续散射误差修正提供理论依据,具体仿真步骤可参考文献[16]。在蒙特卡罗模拟的具体实施中,关键步骤之一为获取每次散射后的相位角(φ)与散射角(θ)。 φ 一般被认为满足 $[0, 2\pi)$ 的均匀分布,而 θ 则需符合体积散射函数(volume scattering function, VSF)的概率分布特征。针对水体环境的特性,本研究将散射过程分为粒子散射与纯水散射两种类型进行处理。对于粒子散射,其散射相位函数(归一化的体积散射函数)采用Fourier-Forand(FF)相函数模型^[19-20],具体数学表达式为:

$$\tilde{\beta}_{FF}(\theta) = \frac{1}{4\pi(1-\delta)^2\delta^v} \left\{ v(1-\delta) - (1-\delta^v) + [\delta(1-\delta^v) - v(1-\delta^v)] \sin^2\left(\frac{\theta}{2}\right) \right\} + \frac{1-\delta_{180}^v}{16\pi(\delta_{180}-1)\delta_{180}^v} [3\cos^2(\theta) - 1] \quad (1)$$

式(1)中, $v = (3-u)/2$; $\delta = 4 \cdot \sin^2(\theta/2) / [3 \cdot (n-1)^2]$, δ_{180} 为 δ 在 $\theta=180^\circ$ 时的取值; n 为粒子折射率; u 为粒径谱斜率参数。对于纯水散射过程,其散射相位函数参考Zhang等人^[21]提出的公式:

$$\tilde{\beta}_w(\theta) = 150/767 \cdot [1 + 0.835 \cdot \cos(\theta)^2] / \pi \quad (2)$$

进一步地,将式(1)与式(2)按水体分子和粒子的散射系数比例叠加,即可构建水体的散射相位函数:

$$\tilde{\beta}(\theta) = [b_p \tilde{\beta}_{FF}(\theta) + b_w \tilde{\beta}_w(\theta)] / b \quad (3)$$

式(3)中, b_p 为水体的粒子散射系数; b_w 为纯水散射系数,在532 nm波长下的取值为 $2.232 \times 10^{-3} \text{ m}^{-1}$ ^[22];水体总散射系数 b 满足 $b = b_p + b_w$ 。本研究所用 B_p 为Petzold推荐的平均粒子后向散射比0.018 3^[23],则水体颗粒散射系数 b_p 可由后向散射系数估计:

$$b_p = b_{bp} / B_p \quad (4)$$

使用蒙特卡罗方法仿真ICESat-2卫星在不同

水体光学参数下的水底回波期望波形,前向散射效应引入的测深误差 f_{se} 可以表示为:

$$f_{se} = \frac{1}{2} c_w \left[\frac{\int_{-4\sigma}^{4\sigma} t f_{bot}(t) dt}{\int_{-4\sigma}^{4\sigma} f_{bot}(t) dt} - \frac{\int_{-4\sigma}^{4\sigma} t f_s(t) dt}{\int_{-4\sigma}^{4\sigma} f_s(t) dt} \right] \cos \theta_0 \quad (5)$$

式(5)中, c_w 是光子在水体中的传播速度; θ_0 是光子在水体中的入射天顶角, σ 是水底回波波形脉宽, $f_{bot}(t)$ 为仿真得到的激光雷达水底回波信号, $f_s(t)$ 为忽略水体散射效应时的水底回波信号。

1.2 典型水体环境ICESat-2前向散射误差仿真分析

对于给定的星载单光子激光雷达系统(如ICESat-2),由于系统硬件参数为已知值,其水体散射误差主要取决于水体光学参数(主要为水体后向散射系数、吸收系数)和目标水深,这些参数也是水体前

向散射误差修正的必要输入参数。Morel 等^[24]根据光学性质的不同,将海水划分为主要受浮游植物(叶绿素浓度)影响的 I 类水体(Case 1 Waters),以及主要受悬浮物与有色可溶性有机物影响的 II 类水体(Case 2 Waters)。前者主要代表开阔的大洋水体,而后者主要代表受排放污染影响较为严重的近岸、河口等区域。表 1 描述了本文所使用的典型水体光学参数,其中纯净水体代表不考虑水中悬浮物的纯水(参考 Lee 等与 Morel 等学者^[22,25]),I 类水体-1 与 I 类水体-2 分别相当于叶绿素浓度为 0.1 mg/m^3 、 0.5 mg/m^3 的较为清澈水体环境(参考 Shangguan 等学者^[18]),II 类水体代表较为浑浊的水体环境(参考 Morel 等学者^[25])。

表 1 典型水体的固有光学参数

Table 1 Inherent optical parameters of typical water bodies

参数类型	水体类型			
	纯净水体	I 类水体 I-1	I 类水体 I-2	II 类水体
吸收系数(a)/ m^{-1}	0.045	0.052	0.065	0.179
散射系数(b)/ m^{-1}	0.002	0.072	0.200	0.398
后向散射系数(b_b)/ m^{-1}	0.001	0.002 4	0.004 7	0.005 2
前向散射系数(b_f)/ m^{-1}	0.001	0.069 6	0.195 3	0.392 8

将表 1 中典型水体光学参数带入式(3),计算获得对应水体环境蒙特卡罗模型的水体散射相位函数 $\tilde{\beta}(\theta)$,其与 $\tilde{\beta}_{\text{FF}}(\theta)$ 、 $\tilde{\beta}_{\text{w}}(\theta)$ 的对比情况如图 2 所示。由图 2 可以看出, $\tilde{\beta}_{\text{w}}(\theta)$ 在 $[0, 180^\circ)$ 区间呈现近似均匀分布的特征; $\tilde{\beta}_{\text{FF}}(\theta)$ 表现出典型的前向散射强而后向散射弱的特性。

以 ICESat-2 系统参数及表 1 典型水体的光学参数作为输入,通过蒙特卡罗仿真模拟不同水深条件下的前向散射误差,模拟结果如图 3 所示。图 3 呈现了表 1 中各类水体散射误差随水深变化的规律,II 类水体(具有较高的 b_b)的散射误差高于 I 类水体和纯净水体,而 I 类水体的误差又显著高于纯净水体。总体来说,水体越浑浊,目标水深越大,光子事件经过多次散射的概率越大,对应的水体散射误差越大。

本文在拟合修正公式时仅拟合了最大测深范围内的前向散射误差结果,其中 ICESat-2 的最大测深能力(h_{max})基于 Parrish 等提出的估计方法得到^[8],即 $h_{\text{max}} \approx 1.82/K_d$, K_d 为水体漫射衰减系数。ICESat-2

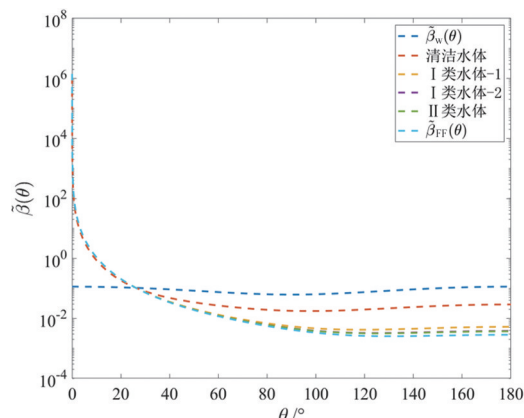


图 2 典型水体蒙特卡罗模型的水体散射相位函数

Fig. 2 Volume scattering functions of the MC simulation in typical water bodies

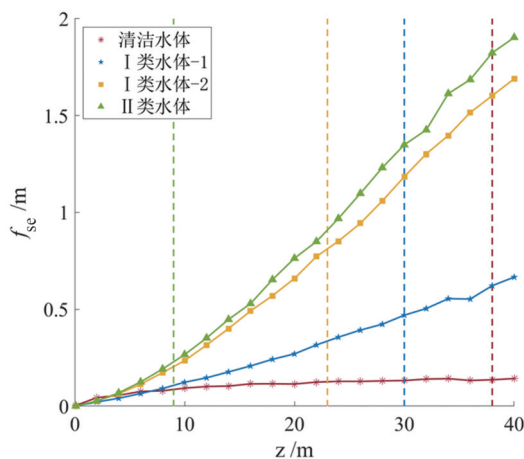


图 3 典型水体的前向散射误差随水深变化曲线

Fig. 3 The variations of forward scattering bathymetric errors with different water depths in typical water bodies

单光子激光雷达在纯净水体、I 类水体-1、I 类水体-2 及 II 类水体中的 h_{max} 分别为 38 m、30 m、23 m 和 9 m(图 3 中对应颜色的竖直虚线所在位置)。在对应最大测深深度下,通过蒙特卡罗仿真获得的各水体的前向散射误差分别为:纯净水体误差 0.15 m, I 类水体-1 误差 0.48 m, I 类水体-2 误差 0.81 m, II 类水体误差 0.23 m,该误差值占最大测深的比值依次为 0.4%、1.6%、3.5% 和 2.6%。具体而言,当测深能力达到 20 m 时,较清澈水体的前向散射误差已达到数十厘米量级,仅由水体前向散射造成的单一误差可能超过海道测量规范的精度指标要求^[26]。这一现象充分表明,在 20 m 以上的深水区域,水体前向散射误差必须进行误差补偿,以确保星载激光雷达测深数据的准确性。

1.3 ICESat-2 水体前向散射误差修正公式

本节以水体后向散射系数及水深为输入,运用 1.1 节讨论的散射相位函数和仿真方法,基于蒙特卡罗仿真数据拟合水体散射测深误差的修正经验公式,拟合结果如式(6)所示。蒙特卡罗仿真的具体参数范围为水深 $z \in (0, 40]$ m, 步长 2 m, 后向散射系数 $b_b \in [10^{-3}, 10^{-2}] \text{ m}^{-1}$, 步长 10^{-3} m^{-1} , 涵盖绝大部分海域的 b_b 范围^[27]。考虑到工程适用性,式(6)仅拟合 $h_{\max}$ 内的蒙特卡罗仿真结果,拟合结果与仿真数据均方根误差(root mean square error, RMSE)小于 1.4 cm, 决定系数(R^2)达 0.998 6, 这表明两者在数值上高度吻合。

$$f_{\text{sc}}(b_b, z) = \begin{bmatrix} b_b \\ b_b^2 \\ b_b^3 \end{bmatrix}^T \begin{bmatrix} 7.317 & -0.1771 & 7.005 \times 10^{-4} \\ -1318 & 119.8 & -0.3715 \\ 7.074 \times 10^4 & -4953 & -81.52 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} z \\ z^2 \\ z^3 \end{bmatrix}. \quad (6)$$

图 4 通过等高线图直观呈现了不同 z 与 b_b 组合下 $f_{\text{sc}}(b_b, z)$ 的分布特征,图中红色实线表示 ICESat-2 的最大探测深度阈值($h_{\max}$)。从图中可以清晰观察到:在激光雷达有效探测范围内(红线以左和以下区域),前向散射误差与水深及后向散射系数呈显著正相关。图 5 绘制了表 1 中的典型水体散射误差蒙特卡罗仿真结果与修正经验公式计算结果的对比。结果表明,修正经验公式可以很好地替代复杂的蒙特卡罗过程实现 $h_{\max}$ 内的散射误差的快速估计和修正。修正经验公式本身引起小于 2 cm 的误差,相对于当前星载单光子激光雷达的测深精度水平可忽略不计。若能获取较为精确的 b_b 与 z 数据,即可对全球不同位置水体环境的前向散射误差水平进行精确估算。

2 散射误差修正的影响因素定量分析

在实际工程应用中,为使得水体散射误差修正经验公式可在全球范围的不同海域使用,需要获得覆盖全球的精确水深与散射数据。目前,星载单光子激光雷达已可以实现数十厘米的测深精度,可以用于代替真实水深作为输入,具体分析可见 2.1 节。而水体光学参数需要依赖外部数据源,例如:海洋水色卫星(Moderate-resolution Imaging Spectroradiometer, MODIS)提供的全球尺度、4 km 空间分辨率、531 nm 波长的水体 b_b 、 a 与 K_d 数据^[28]。因为 ICESat-2 提供的初步水深值和 MODIS 提供的后向散射系数均存在一定误差^[27],两者的输入不确定度也会部分影响散射误差估计的不确定性,进而产生一定

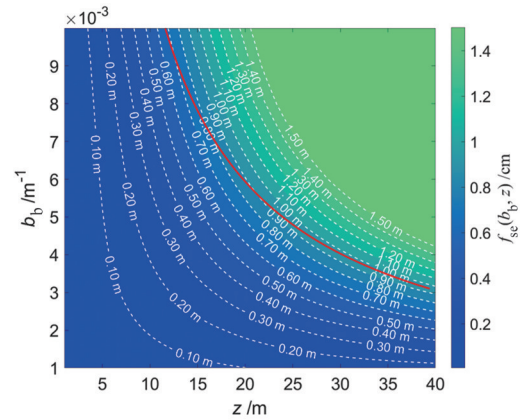


图 4 水体前向散射误差经验公式拟合结果,红线为最大测深深度,等高线为式 $f_{\text{sc}}(b_b, z)$ 计算结果

Fig. 4 Fitting results of the forward scattering bathymetric error in the water column, the red curve represents the maximum measured depth, and the contour lines represent the calculation results of the formula $f_{\text{sc}}(b_b, z)$

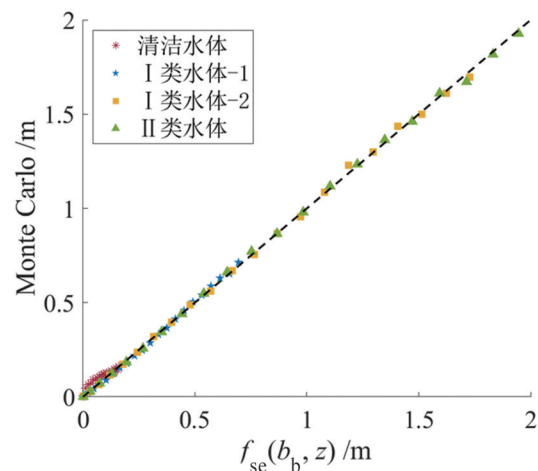


图 5 典型水体前向散射误差蒙特卡罗仿真与修正经验公式 $f_{\text{sc}}(b_b, z)$ 计算结果对比

Fig. 5 Comparison of the forward scattering error results between Monte Carlo simulations and the empirical formula $f_{\text{sc}}(b_b, z)$ in typical water bodies

的修正残差。该修正残差直接影响修正经验公式的工程可用性,并决定该方法能否有效提升单光子水深测量精度。本节将以 ICESat-2 系统参数、表 1 所示的典型水体环境作为输入,定量分析输入参数的不确定性对前向散射误差估计的定量影响。

2.1 水深灵敏度分析

本研究推荐在实施单光子散射误差修正前,先依据已发展的星载单光子激光测深方法,对水面折射、水体折射及水面起伏等误差进行逐项修正。当前研究表明,经上述误差修正后,星载单光子激光

雷达残余测深误差为几十厘米量级,且由散射误差主导。本研究采用经上述校正后的水深值作为散射修正公式的水深输入,记真实水深为 z_0 ,则此时输入的水深值可以近似表示为 $z_0 + f_{sc}(b_b, z_0)$,其带来的影响可由式(7)描述。基于上述假设,表1中典型水体环境下前向散射误差的修正残差($\Delta f_{sc}(\Delta z)$)随水深的变化规律如图6所示。

$$\Delta f_{sc}(\Delta z) = \frac{\partial f_{sc}(b_b, z)}{\partial z} \cdot \Delta z \quad (7)$$

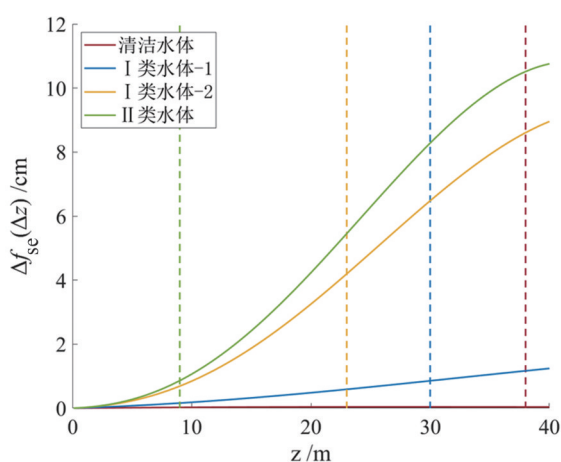


图6 典型水体前向散射误差的修正残差 $\Delta f_{sc}(\Delta z)$ 随水深变化曲线

Fig. 6 The variations of forward scattering error correction residuals $\Delta f_{sc}(\Delta z)$ with different water depths in typical water bodies

图6展示了经多项误差校正后的水深替代真实水深作为 $f_{sc}(b_b, z)$ 输入时,由于水深深度的不确定性引起的前向散射误差修正残差随水深的变化。结合最大探测深度限制进行分析(图6中对应颜色的竖直虚线所在位置),四类典型水体的 $\Delta f_{sc}(\Delta z)$ 分别为: <0.10 cm、0.85 cm、4.20 cm 和 0.86 cm,其相较于最大探测深度的比值依次为 0.002%、0.028%、0.183% 和 0.096%,均显著低于星载单光子激光雷达的测深误差要求。图6的结果表明,上述水深替代方案在工程上具有较高可行性。

在实际工程应用中,水面折射、水体折射及水面起伏等误差难以实现完全校正,理论上 Δz 应略大于 $f_{sc}(b_b, z_0)$ 。目前,经多项误差校正后的ICESat-2测深数据可以保障优于1 m的精度。以 $\Delta z=1$ m作为输入,四类典型水体在最大探测深度限制下的 $\Delta f_{sc}(\Delta z)$ 分别为: 0.24 cm、1.85 cm、5.15 cm 和 3.83 cm,其相较于最大探测深度的比值依次为 0.006%、0.062%、0.224% 和 0.426%,仍处于可接

受范围,该水深替代方案仍能有效保障前向散射误差修正的精度要求。

2.2 后向散射系数灵敏度分析

后向散射系数通过影响光子在水体中发生散射的概率,对散射误差水平影响较大。参考式(8)的分析表明,输入后向散射系数的微小偏差(Δb_b)可能引发较为显著的前向散射误差修正残差($\Delta f_{sc}(\Delta b_b)$)。参照2.1节的分析方式,假设 z 为真实值输入, b_b 以MODIS数据产品作为输入,相关分析结果如图7所示。

$$\Delta f_{sc}(\Delta b_b) = \frac{\partial f_{sc}(b_b, z)}{\partial b_b} \cdot \Delta b_b \quad (8)$$

图7呈现了四类典型水体在引入最大30%的 b_b 输入误差时的前向散射误差修正残差分布特征。结合最大探测深度限制进行分析,若在工程上提供20%精度的 b_b 作为输入(MODIS的 b_b 精度水平),四类水体的 $\Delta f_{sc}(\Delta b_b)$ 表现为:纯净水体为5.00 cm, I类水体-1为13.61 cm, I类水体-2为20.43 cm, II类水体为4.10 cm。修正后的残差值相较最大探测深度的比值依次为 0.13%、0.45%、0.89% 和 0.46%。这一结果表明,即使存在20%的 b_b 输入误差,应用前向散射误差修正公式 $f_{sc}(b_b, z)$ 仍能在MODIS水体固有光学参数误差较大的极端情况下将散射误差从大于50 cm降低至20 cm以内,有效提升现有单光子激光雷达测深精度。

2.3 吸收系数灵敏度分析

尽管前向散射误差由水体散射过程主导,吸收效应仍可以通过降低运动路径长的光子所对应的能量权重,从而部分降低散射误差。当外部数据源可以提供吸收系数 a 时(例如MODIS数据集),可对式(6)的形式进一步优化,表示为:

$$f_{sc}(a, b_b, z) = f_{sc}(b_b, z) \cdot \exp[-(a - a_0) \cdot f_{sc}(b_b, z)], \quad (9)$$

式(9)中,指数项 $\exp[-(a - a_0) \cdot f_{sc}(b_b, z)]$ 表征吸收系数的影响, a_0 为仿真过程中设定的默认吸收系数值。本研究以表1中典型水体环境为对象,定量评估 a 对前向散射误差修正结果的影响($\Delta f_{sc}(a)$)。假定 a 、 b_b 及 z 均为真实值输入,对比分析式(6)与式(9)的结果,即可得到图8。

图8绘制了在最大探测深度范围内,当 a 、 b_b 及 z 均为真实值输入时, a 对前向散射误差估计结果的影响。由于式(6)未包含 a 的作用,其前向散射误差估计值相较于式(9)在典型水体中呈现出不同程度的高估。纯净水体高估0.10 cm, I类水体-1高估0.79 cm, I类水体-2高估1.84 cm, II类水体高估

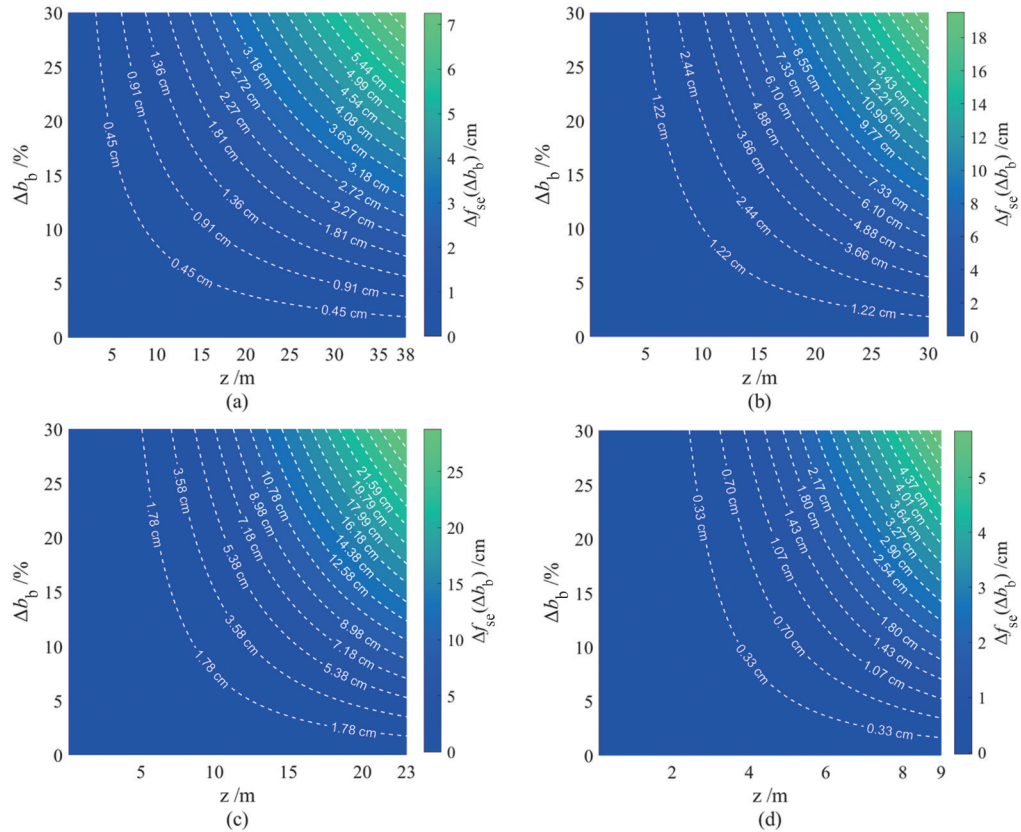


图7 典型水体30%的 b_b 输入误差造成的前向散射误差修正残差 $\Delta f_{sc}(\Delta b_b)$ 随水深变化:(a) 纯净水体;(b) I类水体-1;(c) I类水体-2;(d) II类水体

Fig. 7 The variations of forward scattering error correction residuals $\Delta f_{sc}(\Delta b_b)$ caused by 30% input errors in b_b with different water depths in typical water bodies: (a) pure waters; (b) class I-1 waters; (c) class I-2 waters; (d) class II waters

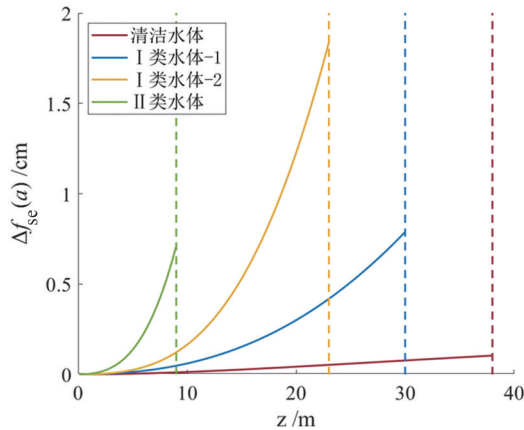


图8 典型水体前向散射误差修正残差 $\Delta f_{sc}(a)$ 随水深变化

Fig. 8 The variations of forward scattering error correction residuals $\Delta f_{sc}(a)$ with different water depths in typical water bodies

0.71 cm, 误差值相较最大探测深度的占比分别为0.002 6%、0.026 3%、0.080 0%和0.078 9%。由于输入吸收系数对散射误差修正影响较小,因此本文考虑参数获取复杂度及公式的简洁性,推荐使用式

(6)进行测深散射误差修正。

2.4 激光雷达接收视场影响及修正公式可拓展性分析

在星载单光子激光雷达的蒙特卡罗仿真模型中,接收视场(FOV)是影响水体前向散射误差的最核心硬件参数,接收视场通常用角度表示(微弧度至毫弧度量级)。由于星载、机载激光雷达的飞行高度 Z 覆盖范围广,为不失一般性,使用更通用的地表接收视场半径参数($R=FOV \times Z$),其直接决定经过多次散射的光子能否返回接收系统,其余如发射能量、各器件的光学效率、量子效率等硬件参数不改变光子包接收的能量权重分布,主要影响回波能量大小,因此主要影响最大测深能力,而对前向散射误差影响较小。前序小节的式(6)与式(9)均依据ICESat-2系统硬件参数拟合得出,ICESat-2运行轨道高度为500 km,接收视角 $83.5 \mu\text{rad}$ (全角),对应地面视场直径约42 m^[7]。若令ICESat-2接收视场半径为 R_0 ,在表1所示的典型水体环境及最大探测深度限制下,利用蒙特卡罗仿真不同接收视场的前向

散射误差,并与修正公式 $f_{sc}(b_b, z)$ 的计算结果对比,对比如图9(a)所示。

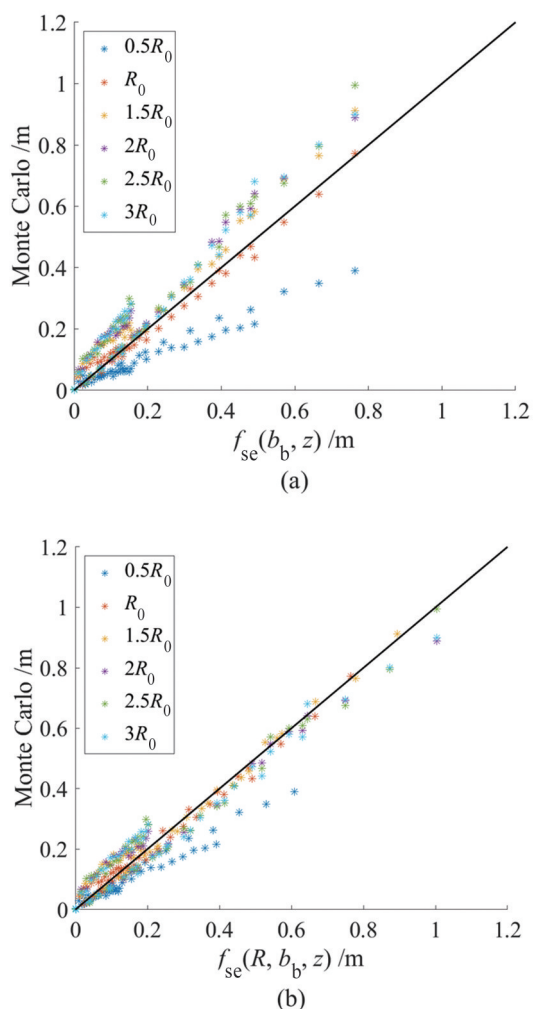


图9 典型水体不同接收视场下的前向散射误差蒙特卡罗仿真结果与修正经验公式计算结果对比:(a) $f_{sc}(b_b, z)$;(b) $f_{sc}(R, b_b, z)$

Fig. 9 Comparison of the forward scattering error results between Monte Carlo simulations and the empirical formula in typical water bodies with different receiver fields of view: (a) $f_{sc}(b_b, z)$;(b) $f_{sc}(R, b_b, z)$

如图9(a)所示,与蒙特卡罗仿真的水体前向散射结果相比,修正经验公式计算结果在较小接收视场($0.5R_0$)对前向散射误差呈现高估,在 $f_{sc}(b_b, z)$ 计算结果为0.8 m时高估达到0.4 m。这是因为,较小的接收视场能使激光雷达接收子系统屏蔽经历过多次散射而偏离接收视场中心的光子,使得所接收到的信号主要由单次散射光子组成,减小前向散射误差。然而,较小的接收视场对收发系统的对准精度提出了更高要求,尤其对于接收视场仅为数十微

弧度量级的星载激光雷达;并且,较小的接收视场在减小散射误差的同时舍弃大量信号光子,将很大程度降低激光雷达的最大测深能力。

相反,修正经验公式计算结果在较大接收视场($1.5R_0 \sim 3R_0$)对前向散射误差呈现低估,低估水平最高达0.3 m。这是由于较大的接收视场能够接收更大范围的光子信号(包括经历多次散射而偏离接收视场中心的光子),尽管这提升了激光雷达的最大测深能力,但会大幅度引入太阳背景噪声,不仅为后续信号提取与数据处理带来困难,同时大幅度增加的噪声光子数量为星上硬件系统引入额外负担。依据蒙特卡罗仿真方法,可分析不同接收视场半径 R 对散射误差的影响,将散射误差修正公式扩展到未来其他单光子测深激光雷达,将式(6)修正为式(10)的形式:

$$f_{sc}(R, b_b, z) = f_{sc}(b_b, z) \cdot \ln(e - 1 + R/R_0), R/R_0 \leq 2, (10)$$

式(10)中, $\ln(e - 1 + R/R_0)$ 代表激光雷达接收视场的影响, R 为任意激光雷达系统在地表对应的接收视场半径, R_0 为ICESat-2的接收视场半径,即21 m。

由图9(a)可以看出,前向散射误差在较大接收视场的 $2R_0 \sim 3R_0$ 范围分布一致,这意味着该项误差在 $2R_0$ 时已达到最大值,因此,当式(10)中 $R/R_0 > 2$ 时应当带入2进行修正。该现象也表明,在当前水体环境条件下,绝大多数或近乎全部的多次散射光子都位于 $2R_0$ 范围内。如图9(b)所示,通过考虑接收视场带来的影响,利用式(10)将绝大部分前向散射误差的修正残差降低至0.1 m以内,有效提升了论文方法对不同星载单光子激光雷达系统水体散射误差修正的适用性。

2.5 前向散射误差修正的有效性分析

表1中典型水体的前向散射误差修正精度分析结果汇总于表2,该汇总数据系统呈现了修正经验公式在各类水体环境下的前向散射误差补偿效能。其中,在纯净水体、I类水体-1、I类水体-2、II类水体的最大测深能力条件下,修正前的水体前向散射误差占最大测深的比例为0.39%、1.60%、3.52%和2.56%;修正后的残余误差占最大测深的比例下降为0.15%、0.45%、0.91%和0.51%。分析表明,四种水体条件的水体散射误差平均降低了72%,有效修正了大部分的水体散射误差。对于不同的水体,单光子激光雷达最大测深能力也不同。由于激光在水体中呈指数衰减,在II类水体中激光穿透能

力随水深快速下降,最大测深能力也随之快速下降。综合考虑最大测深能力和水体散射系数,可能出现Ⅱ类水体散射误差在最大测深处小于Ⅰ类水体,且修正后的残余误差也小于Ⅰ类水体的情况。同时,表2中所示的散射误差修正残差是在测深极限条件下的修正后结果,随着水深增加,有效光子点云个数急剧减小,实际测量中大部分光子点云的散射误差修正残差将显著低于该极限值。具体而言,按照平均测量深度位于最大测深一半处估算,绝大部分散射误差修正残差将不超过水深的0.45%,即30 m水深环境下的修正残差不超过13.5 cm。若未来可提供更高精度的水体光学参数,则在实际工程中可以得到更好的散射误差修正结果。

表2 典型水体的前向散射误差修正精度分析
Table 2 Analysis of the correction accuracy of forward scattering errors in typical water environments

参数类型	参数名称	水体类型			
		纯净水体	Ⅰ类水体		Ⅱ类水体
前向散射误差	最大探测深度 $[h_{\max}]/\text{m}$	38	30	23	9
	前向散射误差 $[f_{\text{se}}(b_b, h_{\max})]/\text{cm}$	15	48	81	23
	前向散射误差占比 $[f_{\text{se}}(b_b, h_{\max})/h_{\max}]/\%$	0.39	1.60	3.52	2.56
	z 输入修正残差 $[\Delta f_{\text{se}}(\Delta z)]/\text{cm}$	0.1	0.9	4.2	0.9
参数输入影响分析	20% b_b 输入误差修正残差 $[\Delta f_{\text{se}}(\Delta b_b)]/\text{cm}$	5.0	13.6	20.4	4.1
	a 修正残差 $[\Delta f_{\text{se}}(a)]/\text{cm}$	0.1	0.8	1.8	0.7
	修正公式拟合偏差 $/\text{cm}$	2.4	1.0	1.3	1.7
综合修正残差	修正残差 $[\Delta f_{\text{se}}]/\text{cm}$	5.6	13.7	21.0	4.6
	修正残差占比 $[\Delta f_{\text{se}}/h_{\max}]/\%$	0.15	0.45	0.91	0.51

3 结论

本研究首先基于蒙特卡罗方法,建立了ICESat-2系统在不同水体环境和水深条件下的水体前向散射误差估计模型,模型显示ICESat-2系统在测深能力范围内的散射误差可达数十厘米。本研究建立的散射误差修正经验公式,与蒙特卡罗仿真结果的均方根误差(RMSE)小于1.4 cm,可以很好地替代复杂的蒙特卡罗过程实现ICESat-2散射误差的快速估计和修正。其次,论文系统性分析了水深、后向散射系数及吸收系数的输入精度对修正效果的影响,该灵敏度分析表明,散射误差修正残差

主要取决于水体光学参数的精度水平,其中后向散射系数的影响远大于吸收系数。若在工程上提供20%精度后向散射系数作为输入(MODIS的数据精度),可以将水体散射误差修正残差降至当前水深的0.45%以下。即使考虑水体后向散射系数、水深输入误差最大的情况,在纯净水体、Ⅰ类水体-1、Ⅰ类水体-2、Ⅱ类水体四种条件下,所推导的修正经验公式仍可以降低约72%的水体散射误差,能够有效修正绝大部分的水体散射误差。此外,论文在ICESat-2系统参数基础上讨论与分析了接收视场半径对修正经验公式的影响,提升该方法对不同星载单光子激光雷达系统散射误差修正的适用性。本研究为评估星载单光子激光雷达散射误差大小、探索可靠且快速的修正方法提供了参考,未来有望用于工程上进一步提升现有单光子激光雷达测深精度。

References

[1] Westfeld P, Maas H G, Richter K. Analysis and correction of ocean wave pattern induced systematic coordinate errors in airborne LiDAR bathymetry[J]. ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing, 2017, 128 (Jun.): 314-325.

[2] Yang Fan Lin, Bao Jing Yang, Hu Xing Shu. Oceanic surveying and mapping [M]. Wuhan: Wuhan University Press, 2017.

阳凡林, 暴景阳, 胡兴树. 水下地形测量[M]. 武汉: 武汉大学出版社, 2017.

[3] He Yan, Tao Bang Yi, Yu Jia Yong, et al. Development of airborne LiDAR bathymetric technology and application [J]. Chinese Journal of Lasers, 2024, 51(11): 284-314.

贺岩, 陶邦一, 俞家勇, 等. 机载激光测深技术及应用[J]. 中国激光, 2024, 51(11): 284-314.

[4] Li Guo Yuan, Tang Xin Ming, Zhou Ping, et al. Laser altimetry data processing and combined surveying application of ZY3-03 satellite [J]. Infrared and Laser Engineering, 2022, 51(5): 441-449.

李国元, 唐新明, 周平, 等. 资源三号03星激光测高数据处理与复合测绘应用[J]. 红外与激光工程, 2022, 51(5): 441-449.

[5] Tang Xin Ming, Li Guo Yuan. Thoughts about land and sea satellite laser altimetry[J]. Aerospace Shanghai, 2019, 36(3): 15-19.

唐新明, 李国元. 陆海激光卫星高程测量的思考[J]. 上海航天, 2019, 36(3): 15-19.

[6] Chen Wei Biao, Liu Ji Qiao, Hou Xia, et al. Lidar technology for atmosphere environment monitoring satellite [J]. Aerospace Shanghai, 2023, 40(3): 13-20.

陈卫标, 刘继桥, 侯霞, 等. 大气环境监测卫星激光雷达技术[J]. 上海航天, 2023, 40(3): 13-20.

[7] Markus T, Neumann T, Martino A, et al. The Ice, Cloud, and land Elevation Satellite-2 (ICESat-2): Science requirements, concept, and implementation [J]. Remote

- Sensing of Environment, 2017, 190: 260–273.
- [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] Buzzanga B, Heijkoop E, Hamlington B D, et al. An assessment of regional ICESat-2 sea-level trends [J]. Geophysical Research Letters, 2021, 48(9): e2020GL092327.
- [10] Li Y, Gao H, Jasinski M F, et al. Deriving high-resolution reservoir bathymetry from ICESat-2 prototype photon-counting Lidar and landsat imagery [J]. IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing, 2019, 57(10): 7883–7893.
- [11] Tang Jun Wu, Chen Ge, Chen Wei Biao, et al. Three-dimensional remote sensing for oceanography and the Guanlan ocean profiling Lidar [J]. National Remote Sensing Bulletin, 2021, 25(1): 460–500.
唐军武, 陈戈, 陈卫标, 等. 海洋三维遥感与海洋剖面激光雷达[J]. 遥感学报, 2021, 25(1): 460–500.
- [12] Zhang Wen Hao, Li Song, Ma Yue, et al. Photon-counting lidar simulation method based on three-dimensional sea surface [J]. Journal of Infrared and Millimeter Waves, 2020, 39(4): 483–490.
张文豪, 李松, 马跃, 等. 星载光子计数激光雷达海面点云仿真方法[J]. 红外与毫米波学报, 2020, 39(4): 483–490.
- [13] 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(1): 112047.
- [14] Chen Y F, Zhu Z, Le Y, et al. Refraction correction and coordinate displacement compensation in nearshore bathymetry using ICESat-2 lidar data and remote-sensing images[J]. Optics express, 29(2): 2411–2430.
- [15] Dietrich J. T, Parrish C E. Development and analysis of a global refractive index of water data layer for spaceborne and airborne bathymetric Lidar [J]. Earth and Space Science, 2025, 12(3): e2024EA004106.
- [16] Yang J, Ma Y, Zheng H, et al. Analysis and correction of water forward-scattering-induced bathymetric bias for spaceborne photon-counting Lidar [J]. Remote. Sens., 2023, 15(4): 931.
- [17] Lai Xu Dong, Yuan Yi Fei, Xu Jing Zhong, et al. LiDAR waveform decomposition based on modified differential evolution algorithm[J]. Journal of Infrared and Millimeter Waves, 2021, 40(3): 381–390.
- 赖旭东, 袁逸飞, 徐景中, 等. 基于改进差分进化算法的机载激光雷达波形分解[J]. 红外与毫米波学报, 2021, 40(3): 381–390.
- [18] Shangguan M, Liao Z, Guo Y, et al. Seabed backscattered signal peak shift and broadening induced by multiple scattering in bathymetric Lidar [J]. IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing, 2025, 63: 1–14.
- [19] Fournier G R, Forand J L. Analytic phase function for ocean water [J]. Proceedings of SPIE – The International Society for Optical Engineering, 1994, 2258: 194–201.
- [20] Fournier G R, Jonasz M. Computer-based underwater imaging analysis [J]. Proceedings of SPIE – The International Society for Optical Engineering, 1999, 3761: 62–70.
- [21] Zhang X, Hu L, He M X. Scattering by pure seawater: Effect of salinity [J]. Optics Express, 2009, 17(7): 5698–5710.
- [22] Lee Z, Wei J, Voss K, et al. Hyperspectral absorption coefficient of "pure" seawater in the range of 350 – 550 nm inverted from remote sensing reflectance [J]. Applied Optics, 2015, 54(3): 546–558.
- [23] Petzold T J. Volume scattering functions for selected ocean waters [J]. Scripps Institution of Oceanography La Jolla Ca Visibility Lab, 1972, 3: 72–78.
- [24] Morel A, Prieur L. Analysis of variations in ocean color [J]. Limnology and Oceanography, 1977, 22(4): 709–722.
- [25] Morel A. Optical properties of pure water and pure sea water [J]. Optical Aspects of Oceanography, 1974: 1–24.
- [26] GB 12327–2022, Specifications for hydrographic survey [S]. Beijing: Standards Press of China, 2022.
GB 12327–2022, 海道测量规范 [S]. 北京: 中国标准出版社, 2022.
- [27] Bisson K M, Boss E, Werdell P J, et al. Particulate backscattering in the global ocean: a comparison of independent assessments [J]. Geophysical Research Letters, 2020, 48(2): e2020GL090909.
- [28] Werdell P J, Franz B A, Bailey S W, et al. Generalized ocean color inversion model for retrieving marine inherent optical properties [J]. Applied Optics, 2013, 52(10): 2019–2037.
- [29] Cao B, Liu H, Cao B. Making satellite-derived empirical bathymetry independent of high-quality in-situ depth data: An assessment of four possible model calibration data [J]. ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing, 2024, 211: 336–355.