

星载单光子激光雷达浅水测深技术研究进展和展望

李雨佳^{1,2}, 周晓青¹, 李国元^{1*}, 郭金权¹, 马跃³, 谌一夫⁴

- (1. 自然资源部国土卫星遥感应用中心, 北京 100048;
2. 华中科技大学光学与电子信息学院, 湖北武汉 430074;
3. 武汉大学电子信息学院, 湖北武汉 430072;
4. 中国地质大学(武汉)计算机学院, 湖北武汉 430074)

摘要: 在浅水测深技术中, 星载激光测量系统可以覆盖一些机载/舰载系统难以到达的偏远水域, 具有比被动光学影像水深测量精度更高、可全天时工作等独特的优势。以稀疏而少量的主动星载激光测量值为水深标定点, 融合被动星载遥感影像, 主被动融合的浅水测深是当前的趋势。本文首先介绍了星载单光子激光雷达的工作范围、物理参数和数据产品, 概述了测量原理, 综述了现有的星载单光子激光雷达测深的理论传输模型, 对比了不同的点云数据去噪处理算法的优劣, 归纳了星载融合测深反演技术在不同环境中的应用, 总结了当前存在的问题, 并对该技术未来的前景和发展方向进行了展望。

关键词: 单光子激光雷达; 星载激光测深; 浅水测深; ICESat-2; 主被动融合

中图分类号: P413 文献标志码: A DOI: 10.3788/IRLA20220003

Progress and prospect of space-borne photon-counting lidar shallow water bathymetry technology

Li Yujia^{1,2}, Zhou Xiaqing¹, Li Guoyuan^{1*}, Guo Jinqun¹, Ma Yue³, Chen Yifu⁴

- (1. Land Satellite Remote Sensing Application Center, Ministry of Natural Resources of P.R.China, Beijing 100048, China;
2. School of Optical and Electronic Information, Huazhong University of Science and Technology, Wuhan 430074, China;
3. School of Electronic Information, Wuhan University, Wuhan 430072, China;
4. School of Computer Science, China University of Geosciences (Wuhan), Wuhan 430074, China)

Abstract: As a shallow water bathymetry technology, the space-borne laser measurement system can cover some remote waters that are difficult to reach by airborne/shipborne systems. It has unique advantages such as high measurement accuracy, working day-and-night ect. Taking a few sparse active space-borne laser measurements as the water depth calibration points, integrating passive space-borne remote sensing images, active and passive fusion is the current frontiers and hotspots in the field of bathymetry. We first introduces the working range, physical parameters and data products of space-borne photon-counting lidar, followed by the summarization of the measurement principle and theoretical transmission models, as well as the comparison of the advantages and disadvantages of different point cloud data denoising algorithms. At last, this paper concludes the application of space-borne fusion bathymetry inversion technology in different environments, combs the process of technology development, summarizes the current problems, and looks forward to the future prospect and development direction of the technology.

收稿日期:2021-12-30; 修订日期:2022-02-04

基金项目:国家自然科学基金(41871382)

作者简介:李雨佳,女,硕士生,主要从事卫星激光测高、湖泊遥感监测相关方面的研究。

导师(通讯作者)简介:李国元,男,副研究员,博士,主要从事卫星激光测高、水资源遥感调查监测相关方面的研究。

Key words: photon-counting lidar; space-borne lidar bathymetry; shallow water bathymetry; ICESat-2; active and passive fusion

0 引言

浅水水域是指水面波浪明显受到底部地形影响的水域^[1],包括内陆的湖泊、水库、沿岸浅海以及远海的岛礁等。我国浅水资源丰富,有 8.23 万平方公里的内陆湖泊^[2]、近 10 万座河湖水库^[3]、31.17 万平方公里的浅海^[4]和近万个海洋岛礁^[5]。内陆和沿海地区的浅水为当地生态系统的可持续性和生物多样性提供了必要的物理环境^[6]。浅水高分辨率测深数据有助于监测与保护浅水资源,是供水、养殖、矿产勘探、水下电缆布线等水资源利用活动的基础数据集^[7]。

浅水测深数据可使用船载测量设备,例如测深杆、铅垂线等原始工具、或者多普勒回声仪^[8]和声呐等远程工具进行测量。然而测量船存在侧翻、搁浅等安全风险,且效率低下、耗费大量人力物力^[9],水深数据不仅更新慢,而且还存在大量空白的无图区;部分远海无人岛礁的沿岸,更是长期缺乏系统性的地形地貌资料和有效的常态化监管手段。机载激光雷达也常用于获取浅水区域精确的水深信息^[10],然而受制于气候环境、空域管理、地域位置等因素,可测的覆盖范围仍然有限。相比之下,卫星传感器可以周期性、大范围地获取水域光学信息,很多卫星遥感数据已被应用于浅水测深,例如高光谱、多光谱遥感图像^[11-13]和合成孔径雷达(SAR)数据^[14-17]等。但是,基于高光谱、多光谱遥感图像的测深技术依赖经验公式和水深标定点,经验公式在不同的水域有不同系数,水深标定点在一些区域或时段是无法或难以获取的;SAR 信号不能纵向穿透水体,只能根据水体表面的波纹特征来获取水底的信息,是一种间接的测量手段且不适合大范围推广,所以这两类星载测深技术获得的水深精度都有限。

星载单光子激光雷达作为一种新型的主动探测手段,在水深测量方面具有独特优势。2018 年,NASA 发射的 ICESat-2 卫星上搭载了单光子激光雷达(ATLAS)。ATLAS 是一种具有高灵敏度的光子计数激光雷达系统,采用 532 nm 波段的绿激光,能穿透水体,使得通过卫星平台直接获取水下地形反射的微弱信号成为可能。此外,高灵敏度的探测器也使得发射的激光脉

冲能量降低两三个数量级,更利于压缩激光发散角和提高重复频率,进而获取更密集的激光点云和更小的激光足印^[18-19]。对 ATLAS 测深能力进行研究,能为未来发射专用于测深的单光子激光雷达卫星提供波段选择、硬件参数、数据质量控制等方面的参考。由于 ATLAS 只能提供沿轨的高程(深度)剖面信息,使用主动的 ATLAS 测深数据和被动的多光谱卫星影像测深数据协同融合,能综合利用各自优势并在大范围内开展高精度的浅水测深工作。

文中收集整理了 ICESat-2 用于浅水测深的相关文献,从测量原理、技术流程和数据处理 3 个方面,对当前星载激光浅水测深的技术方法进行了梳理归纳,总结和分析了相关研究,指出了该技术当前存在的难点,并对星载激光雷达测深技术的发展趋势予以分析和展望。

1 ICESat-2/ATLAS 激光雷达载荷简介

ICESat-2 卫星轨道高度约 500 km,倾角为 92°,观测纬度为 88°S~88°N 的地球表面。平台上搭载了 ATLAS 单光子激光雷达和一些辅助系统(例如全球定位系统 GNSS 和恒星相机),通过测量光子往返时间来确定航天器与地球表面之间的距离。ICESat-2 激光系统示意图见图 1,左边(图 1(a))显示了 ICESat-2 的光束排列模式,而右边(图 1(b))显示了由 ATLAS 发射的每个激光脉冲产生的瞬时足迹。

ICESat-2/ATLAS 激光器以 10 kHz 的频率发射波

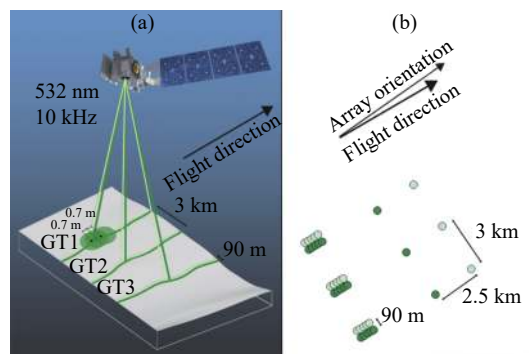


图 1 ICESat-2 卫星 ATLAS 激光雷达的地面激光足印分布^[20]

Fig.1 Ground laser footprint distribution of ATLAS lidar on ICESat-2^[20]

长为 532 nm、宽度为 1.5 ns 的激光脉冲,在地球表面形成沿轨道间隔约 0.7 m 的重叠光斑^[21-22]。在发射时,衍射光学元件 DOE 将每个脉冲分为 6 个光束,排列成 3 对(图 1(a))。每对光束由一弱一强两个单独的光束组成,能量比约为 4:1(图 1(b))^[20-21]。每个脉冲发射时包含有约 20 万亿个光子,但返回的信号根据地表面反射率的差别最高只有十几个光子。返回的光子被直径为 79 cm 的望远镜接收,该望远镜的方向通过激光参考系统,与发射激光的方向保持精确对齐。收集到的返回光子将经过窄带滤光片,过滤掉从大气和地表反射的太阳背景辐射,仅仅保留 532 nm 波长附近的光子。在光脉冲发射时,光子在经过分光器时触发计时器开始计,在光子返回后经过滤光片时,再次触发计时器,从而停止计时。每个返回光子的时间标记数据通过 ICESat-2 上的电子和通信系统发送到地面,通过计算航天器的位置和光子飞行的距离,从而确定对应地表的 WGS84 椭球高度^[1]。

ICESat-2/ATLAS 生产 25 种数据产品,可在 <https://icesat-2.gsfc.nasa.gov/science/data-products> 上下载,其中目前可以用于测深的是 ATLO3 产品^[20]。ATLO3 数据记录了光子的发射时间、高程、经纬度等参数信息。只需要识别海面和海底的光子,将其 WGS-84 椭球高程相减,并进行测深误差校正,就可得到水深信息。值得注意的是,在测深的研究中,由于 ATLO3 数据质量标记算法本身的限制,从水底返回的光子可能被误标记为低置信度、缓冲区和噪声光子。因此,通常需要将置信度标记为 0, 1, 2, 3, 4 的光子同时纳入水底地形的识别中。

2 星载激光雷达测深研究进展

2.1 理论模型

研究星载激光雷达测深的理论模型有利于测深精度的提高和指导卫星预研阶段硬件参数的设计。早在 ICESat-2 发射之前,就有研究学者利用多光束实验激光雷达(MABEL)数据,对机载单光子计数激光雷达的测深过程进行建模和理论推导。Jasinski 等利用信号光子密度、太阳背景噪声频率、探测器暗计数噪声、探测器死时间等参数定义了一种简单可用于表征激光穿透程度的方程^[23]。Forfinski-Sarkozi 等提出了对 MABEL 数据进行折射校正的完整模型,包括飞

机的飞行方向、每束激光的入射角和水位校正等,提出了用系统和相关数据处理中的参数,如观测角度校准和地理参考,来量化垂直不确定性和水平不确定性的方法^[24]。

在 ICESat-2 进入轨道后,Parrish 团队基于卫星预研阶段的成果,利用精确的 ATLAS 传感器参数和真实的产品数据,评估了 ICESat-2 的测深能力。该研究指出,由于介质变化,光线在水中的传播速度比在空气中的传播速度慢,而 ATLO3 产品数据中没有校正这种误差。通过对激光束穿过空气-水界面的折射过程进行几何推导分析,该研究指出需要对光子在垂直方向上进行几何偏差的校正,校正值为 0.25 倍的测量深度。该研究还发现 ICESat-2 在 $Kd(490)$ 为 0.05~0.12 m^{-1} 范围内的水域中测深能力接近 1 赛克盘深度,能测得的最大水深可达 38 m,与精确的机载 EAARL-B 雷达系统测得的水深相比, RMSE 仅为 0.43~0.60 m^[19]。Parrish 团队开创性地将折射校正应用于星载单光子数据,首次对 ICESat-2/ATLAS 的测深能力进行了经验性评估。但是,该研究假设海面光滑平坦,只有卫星运行高度会影响激光束在空气-海水界面的入射角,而在实际情况中,海面会有动态波动,入射角同时受到高度角和海面波动的影响。Xu 的研究指出,当强风吹过水面时,波浪引起的水面高程波动可能高达数十厘米,在这种情况下,波浪改正必不可少,于是提出了方法来纠正波浪对测深结果引入的误差^[25]。但是,该研究默认 ATLAS 的入射角对水深测量没有影响,并将其忽略,而实际上,在风速较大时,由于非垂直入射引起的测量误差也需要被改正。Liu 等开发了一种同时考虑海面波动和波束入射角的折射校正方法,该模型使用海面波动理论和斯涅尔定律确定光子在水中的传播距离,并通过几何关系进行位置校正(图 2)。该研究对提出的模型进行了实际验证,表明所提出的折射校正方法可以更准确有效地校正水深误差^[26]。但值得指出的是,该模型也没有严格意义上的基于海浪谱模型进行折射校正。

在测量精度的建模方面, Ma 等基于激光雷达方程和单光子激光雷达的统计特性,推导了带有多个探测器的光子计数激光雷达的理论测距性能模型,并通过该模型量化了探测器数量、平均接收光子数和平均脉冲宽度带来的测距漂移误差。该研究指出多个探

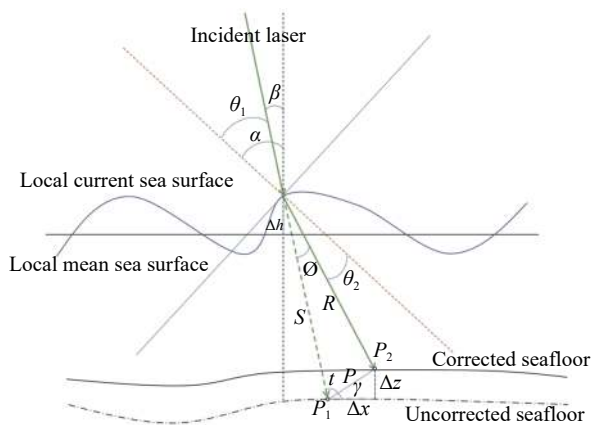


图 2 精确折射校正模型^[26]

Fig.2 Accurate refraction correction model^[26]

测器对于保持测距精度的一致性非常有用,并且通过多次、重复的测量可以实现厘米级测距精度^[27]。Zhang 等在 Ma 的研究基础上更进一步,使用噪声率方程和信噪比(SNR=1)的约束,定量评估了 ATLAS 的测深性能并计算了星载单光子激光雷达理论上可测得的最大水深。该研究借助 ICESat-2/ATLAS 的系统参数(发射脉冲能量、接收孔径面积、光学效率和量子效率、滤光片宽度、光束发散度、接收视场等)和 6 个地点的环境参数(大气、水柱、空气/水面和底面参数等),标记了 ATL03 中实际测得的最大水深,对模型做了做了验证。结果表明:模型预测深度与实测误差控制在 0.6 m,误差百分比小于 14%;对于 ICE-Sat2 的强光束,白天测得的清洁海水最大水深可达 19.5 m,夜间测得的清洁海水最大水深可达 42.7 m,白

天测得的沿海浑浊水体最大水深可达 7.5 m,夜间测得的浑浊水体最大水深可达 10.1 m;对于 ICESat-2 的弱光束,夜晚测得的清洁海水最大水深可达 35.2 m,白天测得的沿海浑浊水体最大水深仅可达 3.7 m^[28]。

总体来说,星载单光子的理论模型研究已经有了实质性进展,但是仍远低于机载激光雷达测深模型的细致程度和丰富程度,同时,模型验证点的选取全部位于沿海地区,没有提供所提出的模型对内陆浅水的测深精度评估的适应性。星载仪器和地面环境因素引入的水平不确定性、严格的折射校正、水体散射导致光斑扩大等问题仍需深入建模。

2.2 光子测深数据滤波

由于单光子激光雷达发射的脉冲是弱信号,受太阳背景噪声影响极大,接受数据中的信噪比极低(如图 3 所示)。虽然 ICESat-2 产品生产过程中内置了光子去噪算法,但是该算法只适合平坦地区^[29-30],对于地形复杂的区域,不少研究中都只能靠手动提取^[14]、目视识别^[19,29]来甄别信号。所以,光子测深数据自动滤波算法不仅有利于提高该领域的研究效率,更为后续数据产品的生产和业务化应用过程奠定了基础。

当前,用于检测海冰和森林表面的滤波去噪算法已经有了不少研究。一部分研究者将光子剖面数据转化为二维栅格数据,引入图像处理算法去噪。例如,Magruder 等的 Canny 边缘检测算法^[31]、Brunt 等的直方统计方法^[32],Chen 等的轮廓迭代的方法^[33]等。一部分研究者基于信号光子比噪声光子分布密集的

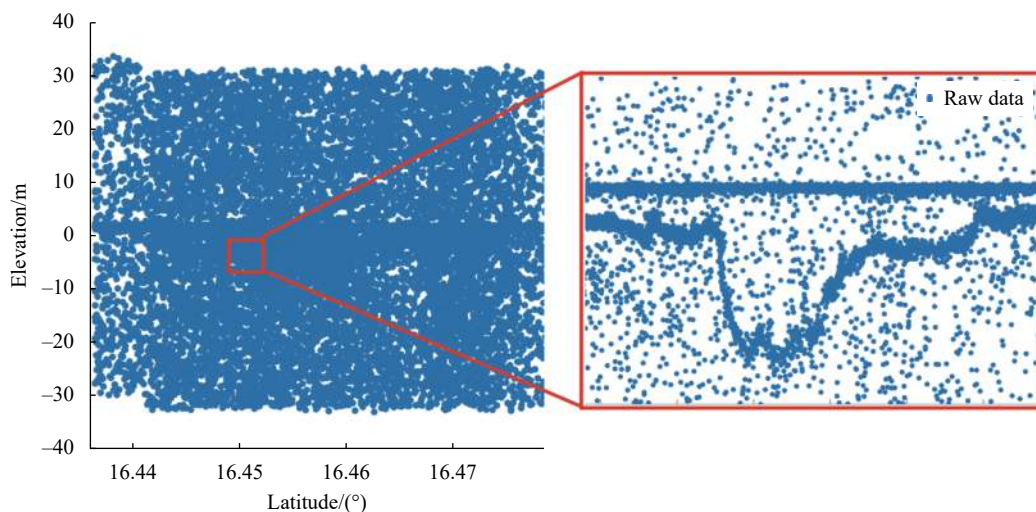


图 3 ATL03 原始数据

Fig.3 ATL03 raw data

假设,采用自适应的聚类模型滤波去噪。例如,Zhang 等根据光子周围的密度自动调整椭圆的大小计算椭圆内的光子数量提取信号^[34],Wang 等基于概率分布函数采用贝叶斯决策理论来提取信号^[35],Herzfeld 等使用大范围和小范围尺度统计相结合的方式,自适应地滤波去噪^[36]。随着研究深入,更复杂的算法也被提出,例如,Neuenschwander 等提出了差分、回归和高斯自适应最近邻(DRAGANN)算法,并用该算法生成了 ICESat-2 中的 ATL08 数据产品^[37]。

在浅水区域,检测水底地形的算法部分借鉴了检测海冰和森林表面去噪算法的思路,但是又有明显的差异^[38]。由于激光脉冲穿透水面到达底部,水面反射的光子密度要高于水柱和水底分布的光子密度,水柱中光子的密度在垂直方向上不均匀,且与水的清晰度、环境和位置相关^[30]。Ma 等采用了海冰和森林光子去噪算法中聚类的思想,基于 JONSWAP 波谱和 LM 非线性最小二乘拟合,以及带有自适应阈值的基于密度的噪声应用程序空间聚类(DBSCAN)算法,利用 MABEL 数据集分别提取了海面光子和地表光子^[39-40]。在 ICESat-2 发射之后,Ma 等进一步改进了之前的聚类算法,修改了局部统计范围和最小光子数阈值的计算过程,并且对日间和晚间的光子数据设置了不同的搜索邻域半径,提取了 ATL03 数据中海面和海底的光子信号,在主被动融合测深的应用中,均方根误差低于 10%^[14]。Chen 等借鉴了海冰和森林光子去噪算法中椭圆自适应调整大小的思想,根据浅水中光子的分布特性,提出了一种新的 AVEBM(自适应变量椭圆滤波)算法用于测深,滤波器参数可以根据光子的密度分布自动调整,精确识别和分离了水面、水柱和水底区域的光子,并对算法的可靠性进行了验证,均方根误差为 0.79 m^[30]。Xie 等改进了 DBSCAN(自适应空间密度空间聚类)算法用于提取海底光子,成功区分包含了信号和纯噪声的光子数据,并通过自适应迭代计算了海底光子检测的最佳参数。该研究还发现异常值对深水反演的精度有很大影响,并提出了算法来去除海底光子的异常光子点^[41]。Hsu 等首先获取 ICESat-2 沿轨剖面的高程分布的直方图,然后用二阶高斯分布来拟合直方图,从而分离海面和海底光子。在海底检测中采用了中值滤波器,多次迭代滤除了海底的噪声光子。最后经过折射校正和潮汐改

正后测得水深^[42]。

当前,学者们已经将各类去噪的思路引入单光子点云测深数据去噪算法中,实现了信号光子提取的半自动化。但是由于受到环境因素的影响,大气散射、太阳耀斑、海浪白沫等噪声分布不均匀,增加了信号光子提取的难度。现有的各类单光子激光点云去噪算法仍无法摆脱手动的、经验的阈值选取。总体来说,用于检测水底信号光子的去噪算法仍处在研究的探索阶段,其普适性和可靠性还有待进一步深入研究。

2.3 主被动融合测深应用

自 Lyzenga^[43] 和 Stumpf^[44] 分别提出经典的线性模型和比值模型以来,单纯通过被动遥感影像反演水深的技术得到了很快发展。特别是近年来,越来越多高空间分辨率遥感影像可以开源获取,被动的遥感影像已被用来反演不同浑浊度、叶绿素浓度的水深^[45-47]。被动反演测深的方法具有数据源丰富、覆盖范围广、时效性强等优势,但是其精度仍无法与主动测量相比。以精确的主动测量值为基础,结合光学遥感影像被动水深反演模型,主被动融合的反演浅水水深是当前的趋势。虽然,有很多研究者利用机载的雷达测深点进行了主被动融合浅水测深^[24,48-49],但机载的测深数据的覆盖范围有限,而星载单光子激光雷达的发射为纯星载、高精度、大范围的水深反演开辟了道路^[50]。

当前,多种遥感影像数据,例如 Landsat-8^[24,38,51]、WorldView-2^[52]、Sentinel-2^[42,53-54] 等,都被用来与 ICE-Sat2 数据融合测深。Forfinski 和 Parrish 用 Landsat-8 光学影像和对数比值模型反演了水深, RMSE 在 1.1 m 内,并结合 ICESat-2 的飞行轨迹和水质参数 Kd490 评估了适合星载反演测深的时间和水域位置^[38]。Thomas 等借助 Google earth engine(GEE) 云平台将 ICESat-2 数据与 Sentinel-2 数据融合,引入 Geyman 等人^[11] 的集群回归概念,使用对数模型、比值模型和支持向量机 3 种方法反演水深,指出云平台的使用有望使测深范围扩展到了地区级甚至国家级别^[55]。Xu 等在 GEE 上对多期 Sentinel-2 影像分别通过线性回归模型建立了与 ICESat-2 测深点之间的关系,并将其堆叠,避免了因云或太阳耀斑带来的测深数据的缺失,生成了高清无云的浅水测深图^[53]。该研究用机载激光雷达数据进行比较, RMSE 为 1.08 m,其精度高于

基于单期影像反演精度 1.46 m。Hsu 等结合 ICESat-2 和 Senital-2 光学数据的蓝绿波段,使用线性、多项式、指数 3 个半经验模型,得出南海 6 个岛屿和珊瑚礁的浅水深(深度<20 m)^[42]。Albrigh 和 Gennie 融合了 ICESat-2 测深数据和 Senital-2 图像,使用归一化的 NDVI 指数设置阈值来屏蔽非水像元,比较了 Lyzenga 的线性回归(LR)模型和支持向量回归(SVR)的非线性机器学习模型反演水深的算法,指出总体而言 SVR 的表现优于 LR 技术^[54]。Babbel 等^[56]建立和测试了 ICESat-2 和卫星图像融合反演测深的标准化方法流程,用 Senital-2 和 Landsat-8 做验证时, RMSE 分别为 0.96 m 和 1.54 m,并指出该工作流程是高效且可行的(处理时间为 17~37 min),能够为许多沿海科学应用提供足够的垂直精度水深。值得注意的是,在海域水深的反演中,由于主被动数据获取的时间不一致,海面的潮汐效应也会显著影响测深精度。已经有学者利用不同的模型进行了潮汐校正,例如, Ma 等使用 OTPS2 潮汐模型消除了潮汐效应^[14], Chen 等使用潮汐模型 NAO.99b 和全球海洋潮汐模型改正了潮汐影响^[57], Hsu 等参考 DTU16(丹麦技术大学潮汐模型)对潮汐进行了校正^[42],减少了浅水区的

测深误差。在最新的研究中, Nan 等利用 ICESat-2 ATL03/08 的沿轨光子高程轮廓数据,结合 GEE 中遥感影像(Sentinel-2)时间序列生成的潮滩地形淹没频率图,通过将淹没频率频率图与 ICESat-2 先验高程信息之间进行建模,不需要任何现场数据或其他辅助数据,即可推导出潮间带(潮汐淹没区域)的地形图,与测深数据合并,即可生成空间连续、全覆盖水底地形数据集^[58]。

除了用于反演海域地形,不少学者也用 ICESat-2 测量冰川地表上融化湖泊的水深。Fricker 等利用 ICESat-2 的单光子激光能穿透水体的特性,量化了冰川地表上融化湖泊的水储量。该研究比较了 8 种用于探测水深的方法,包括基于 ATL08 的算法、基于 ATL13 的算法和基于 ATL03 的算法等,将算法提取的结果与手工标记的数据作为对比,发现基于 ICESat-2 数据算法的精度普遍高于被动图像反演算法的精度^[51]。Fair 等提出了用 ICESat-2 测高数据检测冰川上湖泊深度的方法,结果表明,ATL03 数据可以测得深度为 7 m 的湖泊底部,建立了湖泊检测案例(图 4),探讨了湖泊底部提取算法自动化的难点和湖泊深度测量中存在的潜在问题^[59]。Datta 等提出了一种名为

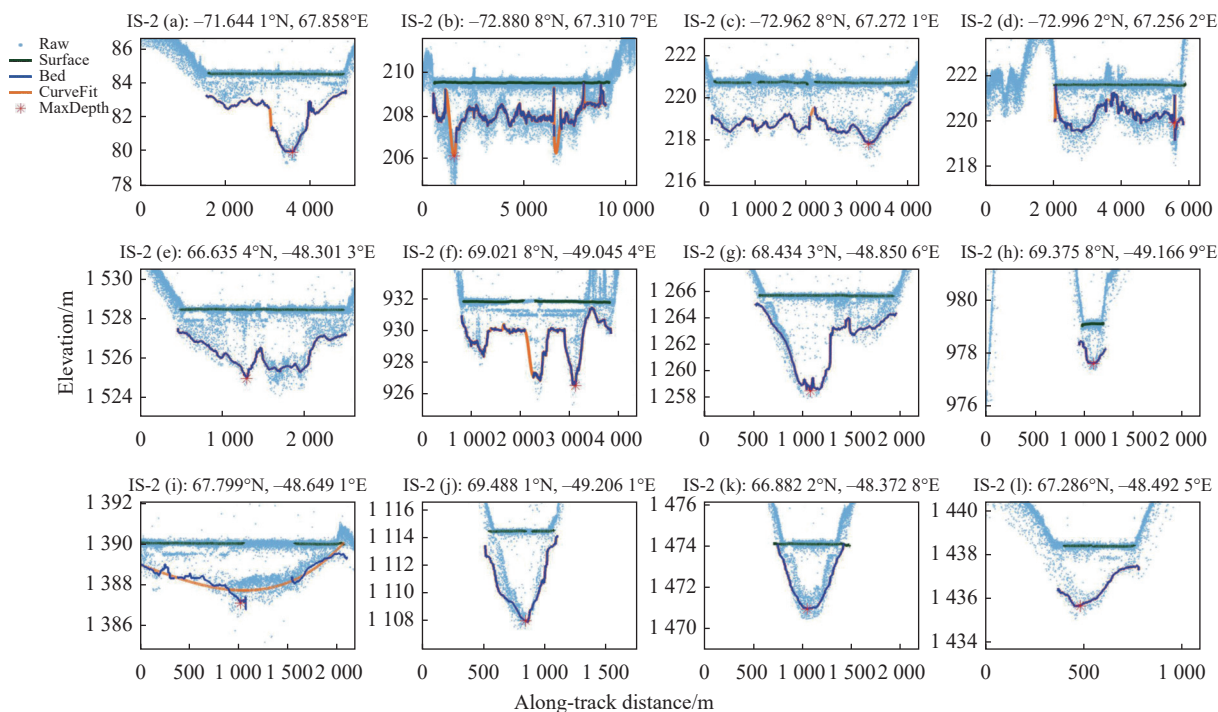


图 4 基于 ICESat-2 数据的冰川湖泊测深^[59]

Fig.4 Melt glacial lake bathymetry based on ICESat-2 Data^[59]

“Watta”的新算法,将 ICESat-2 数据和卫星影像数据结合提取了冰川湖泊表面、底部和深度,使用多个图像源 (SkySat、PlanetScope、Sentinel-2 和 Landsat OLI) 生成了湖泊体积,但是该算法在倾斜表面上识别狭窄的溪流特征仍然需要目视验证^[60]。

ICESat-2 数据在主被动融合测深的应用中展现了巨大的潜力,许多学者都对该技术抱有乐观的态度,并且认为随着 ICESat-2 在轨时间的延长和各类算法的改进,该技术用于测深的精度将越来越高,但是,当前融合测深在内陆的湖泊底部地形识别方面存在较大空白,内陆湖泊的环境因素 (包括植被、水底反射率、水质等) 都与冰川和海底不同,需要被纳入融合测深技术考虑的范围。融合测深数据保真的问题也需要被细致地研究,一方面是主动测量的数据与被动遥感成像数据的时间不同步会带来的反演误差,另一方面是主被动数据的精确几何校正也会影响测量精度,还有一方面是由于 ATLAS 接收器光学组件内的光纤引起了主信号表面以下 2.3 m 和 4.2 m 处产生了后脉冲,在主动数据中引入了异常值,影响了融合的精度^[61]。

3 总结与展望

综上所述,单光子激光雷达用于测深是一项新型的激光测量技术,在浅水测深的应用中展现出了巨大的潜力。该技术在理论模型方面正从粗略建模往精细建模发展,数据处理正从手动/半自动走向自动化,在应用方面也已经涉及浅海、冰面湖泊水深提取,海底、潮间带地形的推导等。但是,由于浅水测深任务本身的复杂性,现阶段还存在以下几个方面的问题:

(1) 理论建模的问题。在测深精度方面,由仪器和环境因素引入的垂直和水平不确定性需要进一步深入建模;在面向主被动融合测深的应用方面,激光水下控制点的空间分布、坡度、粗糙度对整体融合精度的影响还未被建模量化。

(2) 噪声滤除的问题。无论是主动激光雷达还是被动光学影像,接收的数据中均会包含大气、耀斑、白沫等多种分布不均匀的噪声。现有的光子点云去噪算法不能完全自动化,影响了融合测深技术的效率,而被动光学影像进行辐射校正过程也会影响测深的精度。

(3) 主被动数据融合保真的问题。对于水下地形在短时间内容易发生变化的区域,主动测量的数据与被动遥感成像的时间不同步,会影响融合数据产品的可靠性。同时,对不同数据源的精确几何校正也非常重要,较小位置偏离就会带来较大的地形测量误差,在同一平台同步获取主被动数据或许是降低这一误差的重要途径。还有由 ATLAS 接收器光学组件内的光纤原因引起的后脉冲产生的异常值,也需要被仔细甄别和剔除。

(4) 技术成熟度和认可度不够高的问题。由于缺少统一的数据处理流程规范,单光子激光雷达用于测深的技术当前还停留在研究阶段,对该技术的推广和应用力度还不够高,离大规模产业化的应用还有一定差距。

针对以上问题,建议未来的研究集中于以下几个方面:

(1) 加强测深理论模型研究。后续的理论模型应该进一步量化激光指向、海面波浪、水中折射等不确定性因素,细致考虑波浪变化、水质参数、潮汐变化等环境因素,研究水下控制点所需要满足的坡度、粗糙度、深度等限制条件,为数据后续融合测深的处理过程提供理论支撑。

(2) 改进光子滤波算法。算法的改进应侧重于摆脱经验阈值选取,增加聚类去噪算法的严密性和科学性;结合非线性的机器学习算法,将识别 ATL03 数据水底信号光子的步骤彻底自动化,开发信号光子提取软件,完善单光子激光信号数据处理的底层工具。

(3) 优化异源数据融合。在主被动融合测量中,如何量化水深测量数据的时效性、如何选取水深控制点的数量和空间分布、以及如何对测深数据进行潮汐校正、如何对不同测量源的几何误差进行校正等问题,都是重点研究的方向。

(4) 开展浅水测深卫星的专项论证。研究综合考虑器件、环境和目标参数的星载单光子激光雷达的理论模型和仿真技术,论证适合国产浅海水深探测的载荷硬件指标;研究针对水深测量的在轨定标方法,提高在轨的几何定标精度,增加检校参数解算的精度和稳定性,尽早发射国产的陆海激光测量卫星,实现浅水水下地形测量的重要突破,为内陆湖库、沿海和河口地区的水域监测提供常态化的管理手段。

(5) 建立统一规范标准。在加大科研的同时,要实现科研成果向业务化应用转化,尽快建立一套科学合理的数据处理流程和技术规范,指导规模化应用和数据产品的生产。

参考文献:

- [1] Simm J D, Brampton A H, Beech N W, et al. Beach Management Manual[M]. London: CIRIA London, 1996.
- [2] Zhang Guoqing. China lake dataset (1960s-2020)[EB/DB]. Beijing: National Tibetan Plateau Data Center, 2019. (in Chinese)
- [3] 智研咨询. 2019年中国共有98112座水库,湖南为水库数量最多的地区[EB/OL]. (2020-10-21)[2021-10-09]. https://www.sohu.com/a/426375019_775892.
- [4] Amante C, Eakins B W. ETOPO1 arc-minute global relief model: procedures, data sources and analysis. NOAA Technical Memorandum NESDIS NGDC-24[Z]. Boulder, Co.: National Geophysical Data Center, NOAA, 2009.
- [5] 誓言心语. 中国到底有多少个海岛?全球海岛最多国家,我国排第几?[EB/OL]. (2019-05-16)[2021-10-09]. https://www.sohu.com/a/314239427_120152440.
- [6] Nicholls R J, Cazenave A. Sea-level rise and its impact on coastal zones [J]. *Science*, 2010, 328(5985): 1517-1520.
- [7] Narayan S, Beck M W, Reguero B G, et al. The effectiveness, costs and coastal protection benefits of natural and nature-based defences [J]. *PloS One*, 2016, 11(5): e0154735.
- [8] Janowski L, Trzcinska K, Tegowski J, et al. Nearshore benthic habitat mapping based on multi-frequency, multibeam echosounder data using a combined object-based approach: A case study from the Rowy site in the southern Baltic sea [J]. *Remote Sensing*, 2018, 10(12): 1983.
- [9] Casal G, Harris P, Monteys X, et al. Understanding satellite-derived bathymetry using Sentinel 2 imagery and spatial prediction models [J]. *GIScience & Remote Sensing*, 2020, 57(3): 271-286.
- [10] Kim H, Lee S B, Min K S. Shoreline change analysis using airborne LiDAR bathymetry for coastal monitoring [J]. *Journal of Coastal Research*, 2017, 79(10079): 269-273.
- [11] Geyman E C, Maloof A C. A simple method for extracting water depth from multispectral satellite imagery in regions of variable bottom type [J]. *Earth and Space Science*, 2019, 6(3): 527-537.
- [12] Garcia R A, Mckinna L I, Hedley J D, et al. Improving the optimization solution for a semi-analytical shallow water inversion model in the presence of spectrally correlated noise [J]. *Limnology and Oceanography: Methods*, 2014, 12(10): 651-669.
- [13] Kutser T, Vahtmae E, Martin G. Assessing suitability of multi-spectral satellites for mapping benthic macroalgal cover in turbid coastal waters by means of model simulations [J]. *Estuarine, Coastal and Shelf Science*, 2006, 67(3): 521-529.
- [14] 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.
- [15] Kutser T, Hedley J, Giardino C, et al. Remote sensing of shallow waters—A 50 year retrospective and future directions [J]. *Remote Sensing of Environment*, 2020, 240: 111619.
- [16] Renga A, Rufino G, D'errico M, et al. SAR bathymetry in the Tyrrhenian sea by COSMO-SkyMed data: A novel approach [J]. *IEEE Journal of Selected Topics in Applied Earth Observations and Remote Sensing*, 2014, 7(7): 2834-2847.
- [17] Mishra M K, Ganguly D, Chauhan P. Estimation of coastal bathymetry using RISAT-1 C-band microwave SAR data [J]. *IEEE Geoscience and Remote Sensing Letters*, 2013, 11(3): 671-675.
- [18] Magruder L A, Brunt K M. Performance analysis of airborne photon-counting lidar data in preparation for the ICESat-2 mission [J]. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 2018, 56(5): 2911-2918.
- [19] 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.
- [20] Neumann T A, Brenner A, Hancock D, et al. ATLAS/ICESat-2 L2 A global geolocated photon data, version 3[Z]. Boulder, Co.: NASA National Snow and Ice Data Center Distributed Active Archive Center, 2020.
- [21] Magruder L, Neumann T, Kurtz N. ICESat-2 early mission synopsis and observatory performance [J]. *Earth and Space Science*, 2021, 8(5): e2020EA001555.
- [22] Magruder L, Brunt K, Neumann T, et al. Passive ground-based optical techniques for monitoring the on-orbit ICESat-2 altimeter geolocation and footprint diameter [J]. *Earth and Space Science*, 2021, 8(10): e2020EA001414.
- [23] Jasinski M F, Stoll J D, Cook W B, et al. Inland and near-shore water profiles derived from the high-altitude Multiple Altimeter Beam Experimental Lidar (MABEL) [J]. *Journal of Coastal Research*, 2016, 76(10076): 44-55.
- [24] Forfinski-sarkozi N A, Parrish C E. Analysis of MABEL bathymetry in Keweenaw Bay and implications for ICESat-2 ATLAS [J]. *Remote Sensing*, 2016, 8(9): 772.

- [25] Xu N, Ma Y, Zhang W, et al. Monitoring annual changes of lake water levels and volumes over 1984–2018 using landsat imagery and ICESat-2 data [J]. *Remote Sensing*, 2020, 12(23): 4004.
- [26] Liu C, Qi J, Li J, et al. Accurate refraction correction—assisted bathymetric inversion using ICESat-2 and multispectral data [J]. *Remote Sensing*, 2021, 13(21): 4355.
- [27] Ma Y, Li S, Zhang W, et al. Theoretical ranging performance model and range walk error correction for photon-counting lidars with multiple detectors [J]. *Optics express*, 2018, 26(12): 15924-15934.
- [28] Zhang W, Xu N, Ma Y, et al. A maximum bathymetric depth model to simulate satellite photon-counting lidar performance [J]. *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*, 2021, 174: 182-197.
- [29] Popescu S C, Zhou T, Nelson R, et al. Photon counting LiDAR: An adaptive ground and canopy height retrieval algorithm for ICESat-2 data [J]. *Remote Sensing of Environment*, 2018, 208: 154-170.
- [30] Chen Y, Le Y, Zhang D, et al. A photon-counting LiDAR bathymetric method based on adaptive variable ellipse filtering [J]. *Remote Sensing of Environment*, 2021, 256: 112326.
- [31] Magruder L A, Wharton III M E, Stout K D, et al. Noise filtering techniques for photon-counting lidar data[C]//Laser Radar Technology and Applications XVII. International Society for Optics and Photonics, 2012, 8379: 83790Q.
- [32] Brunt K M, Neumann T A, Walsh K M, et al. Determination of local slope on the greenland ice sheet using a multibeam photon-counting lidar in preparation for the ICESat-2 mission [J]. *IEEE Geoscience and Remote Sensing Letters*, 2013, 11(5): 935-939.
- [33] Chen B, Pang Y. A denoising approach for detection of canopy and ground from ICESat-2's airborne simulator data in Maryland, USA[C]//AOPC 2015: Advances in Laser Technology and Applications, 2015, 9671: 96711S.
- [34] Zhang J, Kerekes J, Csatho B, et al. A clustering approach for detection of ground in micropulse photon-counting LiDAR altimeter data[C]//2014 IEEE Geoscience and Remote Sensing Symposium, IEEE, 2014: 177–180.
- [35] Wang X, Pan Z, Glennie C. A novel noise filtering model for photon-counting laser altimeter data [J]. *IEEE Geoscience and Remote Sensing Letters*, 2016, 13(7): 947-951.
- [36] Herzfeld U C, Trantow T M, Harding D, et al. Surface-height determination of crevassed glaciers—Mathematical principles of an autoadaptive density-dimension algorithm and validation using ICESat-2 simulator (SIMPL) data [J]. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 2017, 55(4): 1874-1896.
- [37] Neuenschwander A, Pitts K. The ATL08 land and vegetation product for the ICESat-2 mission [J]. *Remote Sensing of Environment*, 2019, 221: 247-259.
- [38] Forfinski-sarkozi N A, Parrish C E. Active-passive spaceborne data fusion for mapping nearshore bathymetry [J]. *Photogrammetric Engineering & Remote Sensing*, 2019, 85(4): 281-295.
- [39] Ma Y, Zhang W, Sun J, et al. Photon-counting lidar: An adaptive signal detection method for different land cover types in coastal areas [J]. *Remote Sensing*, 2019, 11(4): 471.
- [40] Ma Y, Liu R, Li S, et al. Detecting the ocean surface from the raw data of the MABEL photon-counting lidar [J]. *Optics Express*, 2018, 26(19): 24752-24762.
- [41] Xie C, Chen P, Pan D, et al. Improved filtering of ICESat-2 lidar data for nearshore bathymetry estimation using Sentinel-2 imagery [J]. *Remote Sensing*, 2021, 13(21): 4303.
- [42] Hsu H J, Huang C Y, Jasinski M, et al. A semi-empirical scheme for bathymetric mapping in shallow water by ICESat-2 and Sentinel-2: A case study in the South China Sea [J]. *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*, 2021, 178: 1-19.
- [43] Lyzenga D R. Passive remote sensing techniques for mapping water depth and bottom features [J]. *Applied Optics*, 1978, 17(3): 379-383.
- [44] Stumpf R P, Holderied K, Sinclair M. Determination of water depth with high-resolution satellite imagery over variable bottom types [J]. *Limnology and Oceanography*, 2003, 48(1part2): 547-556.
- [45] Kerr J M, Purkis S. An algorithm for optically-deriving water depth from multispectral imagery in coral reef landscapes in the absence of ground-truth data [J]. *Remote Sensing of Environment*, 2018, 210: 307-324.
- [46] Jin Jianwen, Li Guoyuan, Sun Wei, et al. Application status and prospect on water resources investigation and monitoring by satellite remote sensing [J]. *Bulletin of Surveying and Mapping*, 2020(5): 7-10. (in Chinese)
- [47] Caballero I, Stumpf R P. Atmospheric correction for satellite-derived bathymetry in the Caribbean waters: from a single image to multi-temporal approaches using Sentinel-2 A/B [J]. *Optics Express*, 2020, 28(8): 11742-11766.
- [48] Pan Z, Glennie C L, Fernandez-diaz J C, et al. Fusion of LiDAR orthowaveforms and hyperspectral imagery for shallow river bathymetry and turbidity estimation [J]. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 2016, 54(7): 4165-4177.
- [49] Liu Yongming, Deng Ruru, Qin Yan, et al. Data processing

- methods and applications of airborne LiDAR bathymetry [J]. *National Remote Sensing Bulletin*, 2017, 21(6): 982-995. (in Chinese)
- [50] Caballero I, Stumpf R P. Towards routine mapping of shallow bathymetry in environments with variable turbidity: Contribution of Sentinel-2 A/B satellites mission [J]. *Remote Sensing*, 2020, 12(3): 451.
- [51] Fricker H A, Arnat P, Brunt K M, et al. ICESat-2 meltwater depth estimates: Application to surface melt on Amery Ice Shelf, East Antarctica [J]. *Geophysical Research Letters*, 2021, 48(8): e2020GL090550.
- [52] Cao B, Fang Y, Gao L, et al. An active-passive fusion strategy and accuracy evaluation for shallow water bathymetry based on ICESat-2 ATLAS laser point cloud and satellite remote sensing imagery [J]. *International Journal of Remote Sensing*, 2021, 42(8): 2783-2806.
- [53] Xu N, Ma X, Ma Y, et al. Deriving highly accurate shallow water bathymetry from Sentinel-2 and ICESat-2 datasets by a multitemporal stacking method [J]. *IEEE Journal of Selected Topics in Applied Earth Observations and Remote Sensing*, 2021, 14: 6677-6685.
- [54] Albright A, Glennie C. Nearshore bathymetry from fusion of sentinel-2 and ICESat-2 observations [J]. *IEEE Geoscience and Remote Sensing Letters*, 2020, 18(5): 900-904.
- [55] Thomas N, Pertiwi A P, Traganos D, et al. Space borne cloud-native satellite-derived bathymetry (SDB) models using ICESat-2 and Sentinel-2 [J]. *Geophysical Research Letters*, 2021, 48(6): e2020GL092170.
- [56] Babbel B J, Parrish C E, Magruder L A. ICESat-2 elevation retrievals in support of satellite-derived bathymetry for global science applications [J]. *Geophysical Research Letters*, 2021, 48(5): e2020GL090629.
- [57] Chen Y, 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*, 2021, 29(2): 2411-2430.
- [58] Xu N, Ma Y, Yang J, et al. Deriving tidal flat topography using ICESat-2 laser altimetry and Sentinel-2 imagery [J]. *Geophysical Research Letters*, 2022, 49(2): e2021GL096813.
- [59] Fair Z, Flanner M, Brunt K M, et al. Using ICESat-2 and operation IceBridge altimetry for supraglacial lake depth retrievals [J]. *The Cryosphere*, 2020, 14(11): 4253-4263.
- [60] Datta R T, Wouters B. Supraglacial lake bathymetry automatically derived from ICESat-2 constraining lake depth estimates from multi-source satellite imagery[EB/OL]. (2020-10-22)[2021-10-09]. <https://www.essoar.org/doi/10.1002/essoar.10504544.1>: 1-26.
- [61] Lu X, Hu Y, Yang Y, et al. Enabling value added scientific applications of ICESat-2 data with effective removal of afterpulses [J]. *Earth and Space Science*, 2021, 8(6): e2021-EA001729.