引文格式:谌一夫,李帅,张东方,等.自适应空间密度滤波的ICESat-2激光雷达测深[J].武汉大学学报(信息科学版),2025,50(1):83-96.DOI:10.13203/j.whugis20220453

Citation:CHEN Yifu,LI Shuai,ZHANG Dongfang,et al.ICESat-2 LiDAR Bathymetry Based on Adaptive Spatial Density Filtering[J].Geomatics and Information Science of Wuhan University,2025,50(1):83-96.DOI:10.13203/j.whugis20220453

自适应空间密度滤波的ICESat-2激光雷达测深

谌一夫[1,2] 李 帅[2] 张东方[2] 乐 源[1,3] 王力哲[1,2]

1 湖北珞珈实验室,湖北 武汉,430079

2 中国地质大学(武汉)计算机学院,湖北 武汉,430074

3 中国地质大学(武汉)地理与信息工程学院,湖北 武汉,430074

摘 要:冰、云和陆地高程卫星2号(ice, cloud and land elevation satellite-2, ICESat-2)搭载了先进地形激光测高系统(advanced topographic laser altimeter system,ATLAS),该系统采用光子计数探测模式,可获取高精度的地表高程信息。ATLAS使用532 nm波段激光器,具备一定的水深探测能力,为星载数据近岸水深探测提供了新手段。利用ICESat-2 ATLAS数据进行测深,关键问题是如何实现不同区域、不同环境、不同密度分布条件下信号光子的自动探测与提取。为解决此问题,提出了一种基于自适应空间滤波的ICESat-2数据测深方法,该方法首先将水面以上、水面和水下区域的原始光子进行分离,随后基于可变椭圆密度滤波核精确提取水面与水底光子,椭圆密度滤波核参数根据不同水深下光子密度的分布特点自适应确定,最终实现浅海水深测量。实验结果表明,所提方法获取的ICESat-2测深结果与机载激光雷达测深结果的相关系数达到0.93,均方根误差为0.51 m,具有较高的测深精度。

关键词:ICESat-2;ATLAS;光子计数;测深;自适应;空间密度滤波

中图分类号:P237 **文献标识码**:A **收稿日期**:2023-03-09

DOI:10.13203/j.whugis20220453 **文章编号**:1671-8860(2025)01-0083-14

ICESat-2 LiDAR Bathymetry Based on Adaptive Spatial Density Filtering

CHEN Yifu[1,2] *LI Shuai*[2] *ZHANG Dongfang*[2] *LE Yuan*[1,3] *WANG Lizhe*[1,2]

1 Hubei Luojia Laboratory, Wuhan 430079, China

2 School of Computer Science, China University of Geosciences (Wuhan), Wuhan 430074, China

3 School of Geography and Information Engineering, China University of Geosciences (Wuhan), Wuhan 430074, China

Abstract: **Objectives**: The ice, cloud, and land elevation satellite-2 (ICESat-2), equipped with the advanced topographic laser altimeter system (ATLAS), is a new measurement strategy with a photon-counting technique to obtain the high-accuracy elevation information in the surface of the Earth. ATLAS uses a 532 nm band laser to emit three pairs of scanning laser beams, each pair containing one strong and one weak sub-beam. The receiver collects millions of return photons from the echo, and each received photon is recorded. In the field of bathymetry, photon counting LiDAR has great advantages. For traditional LiDAR with linear detection regime, the only way to achieve high signal-to-noise ratio requirement is to increase the emitted laser energy, which results in a very bulky and huge system and high design power consumption. Photon counting LiDAR is no longer confined to the detection of clear high signal-to-noise ratio echo waveform. It uses statistical optics theory to achieve effective ranging, and maximizes the use of each photon energy in the laser echo, which can greatly improve the detection efficiency of bathymetry detection while reducing the system complexity, providing new opportunities for near-shore bathymetry detection.

基金项目:湖北珞珈实验室专项基金(220100035);国家自然科学基金(42171373);东海实验室开放基金(DH-2022KF01003);智能地学信息处理湖北省重点实验室开放基金(KLIGIP-2022-C01,KLIGIP-2022-B04)。

第一作者:谌一夫,博士,副教授,研究方向为卫星遥感对地观测、激光海洋测量、遥感信息工程。stein_syf@foxmail.com

通信作者:张东方,博士。zhangdongfang@cug.edu.cn

Based on ICESat-2 ATLAS data for bathymetry, the main problem is how to achieve automatic detection and extraction of signal photons for raw photons in different regions, different environments and different density distributions. **Methods:** To overcome these existing problems, an adaptive spatial filtering bathymetric method based on photon density distribution is proposed. The method first separate the photons into above the water, water-surface, and underwater photons. The filter parameters can be automatically determined by the photon density distribution generated based on the optical characteristics of different water bodies and water depth distribution, so that the signal photons of the water surface and bottom can be precisely extracted to achieve bathymetry. In order to verify the bathymetric accuracy of the method, experiments were conducted using ATLAS datasets obtained in different areas of the South China Sea, and finally the experimental results were verified by using high-precision bathymetric data acquired by airborne LiDAR. **Results:** The validation results show that the coefficient of determination between the ICESat-2 bathymetric results and the airborne LiDAR bathymetric results reaches 0.93, and the correspond root mean square error is 0.51 m, which illustrate the bathymetric potential of the method proposed in this research. In addition, when using photonic data for bathymetry, it is influenced by the refraction of the water body, which mainly exists in the vertical direction and increases with the increase of depth. **Conclusions:** Due to the complex diversity of water body environment, the photon bathymetry accuracy will show a certain decreasing trend with the increase of water depth. In future research, bathymetric experiments will be conducted using the method of this paper and the ATLAS dataset to investigate a more accurate refraction correction model in order to explore the bathymetric potential of the satellite-based photon counting LiDAR in different water environments.

Key words: ICESat-2; ATLAS; photon counting; bathymetry; adaptive; spatial density filtering

中国是海洋大国,海岸线绵长,总计3.2万余千米;岛礁众多,面积500 m^{2}以上的岛礁有6 500余座。仅中国南海区域就有岛屿、礁、滩和沙洲200多个,岛礁之间间隔紧密,浅海区域多、暗礁密布、潮差大,海洋环境极为复杂[1-2]。海岸带与岛礁周边浅水海域是人类活动最频繁的区域,因此浅海水深与地形数据是海洋科学、海洋工程、浅海环境治理、资源开发利用、浅海航行、海洋军事等应用所需的关键基础地理空间信息。传统测深方式效率低、成本高、难度大、风险高,浅海测深一直是中国海洋测绘的难点之一[3-5]。

光子计数激光雷达使用高重复频率、低脉冲能量的激光器与灵敏度极高的单光子探测器,采用对回波信号进行光子事件计数的测量机制,实现低信噪比下目标物体的探测[6-7]。与传统的全波形激光雷达不同,光子计数激光雷达具有精度高、体积小、激光能量低等特点,是下一代星载激光雷达的发展方向[8-9]。冰、云和陆地高程卫星2号(ice, cloud and land elevation satellite-2, ICESat-2)上搭载的先进地形激光测高系统(advanced topographic laser altimeter system, ATLAS)是全球范围内第一个星载光子计数测高系统[10]。该系统采用多波束线性推扫方式采集数据,沿轨道距离方向分辨率为0.7 m,在冰盖区域测高精度达到10 cm[11-12]。目前国际上比较典型的星载激光雷达有地球科学激光测高仪系统、云与气溶胶偏振激光雷达、星载多普勒激光雷达[13-15]。以上星载激光探测器是为不同探测目的而设计的,并没有直接针对浅海测深应用的激光器。ATLAS采用了能够穿透水体的532 nm波长绿激光,能够获取浅水区域的水底信号,因此它也是第一个实现测深的星载光子计数激光雷达,为快速、高效地获取全球范围内的浅海水深与地形数据提供了新的契机。

随着ICESat-2的在轨运行及相关测量技术研究的开展,其测深能力与精度已在部分区域得到了验证[16-17]。研究表明ICESat-2在一类海洋水域中的可测深度高达38 m[18]。受到大气、光照与水体环境影响,不同轨迹数据中信号光子空间分布差异通常较大。如图1所示,原始光子数据中水面光子一般集中分布在某一小段高程区间,光子密度无明显差异,除非数据噪声水平发生显著变化[19]。由于激光能量随水深增加而持续衰减,水下光子密度会随水深增加而减小,且随地形的起伏呈现出显著的空间差异性。目前针对光子信号的滤波方法并不成熟[20]:文献[21]提出了一种自适应参数选择的去噪方法,可以检测并去除地面微小噪声光子,但受森林水汽、云层等复杂

自然环境因素影响，该方法可能造成地面光子严重缺失或冠顶识别失败从而极大影响滤波结果精度。文献[22]基于改进的含有噪声应用的密度空间聚类方法(density-based spatial clustering of applications with noise，DBSCAN)提取浅海区域信号光子，但由于水下信号点空间分布不均匀，大量接近水面和水底的离群噪声光子被错分为信号光子。文献[23]将基于密度的聚类方法用于光子数据去噪，并将滤波核由圆形改进为椭圆形，取得了较好的去噪效果，但该方法参数无法自适应，需尝试不同的参数组合来提升去噪效果。文献[24]针对不同的地貌提出了一种用于光子计数激光雷达点云的自适应去噪方法，但靠近信号点的噪声点有较大概率被误识别为信号点，需其他先验知识来进一步提升去噪效果。以上滤波方法已在非水体目标中进行应用，可较好地提取水面信号光子。但水下光子密度空间分布差异性显著，且受水下地形起伏的影响，导致常规方法难以提取。因此，ICESat-2数据测深的重点与难点是如何实现自适应、高可靠性、高精度的目标信号(水面与水底)光子提取。

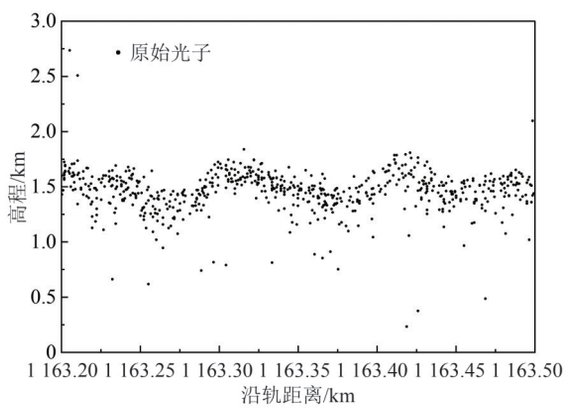


图1　水面光子局部放大示意图

Fig. 1　Diagram of Local Amplification of Water Surface Photons

基于ATLAS的探测机理与扫描结构特征及信号光子在水体中的密度空间分布特点，本文提出了一种自适应空间密度滤波的ICESat-2数据测深方法。该方法能够准确识别和分离水面以上、水面和水下区域中的光子；根据水下光子随水深增加而密度发生变化的特性自动检测出描述水底地形的信号光子；根据光子在水气界面和水中的传输过程，实现水底信号光子折射校正与高精度测深。为验证本文方法的可靠性与精度，使用在中国南海不同区域获得的ATLAS数据集进行实验，并利用机载激光雷达测深数据进行了验证。

1　ICESat-2数据测深方法

本文构建的基于自适应空间滤波的ICESat-2数据测深方法总体流程如图2所示，该方法主要包括3个部分：区域光子分离、自适应空间密度滤波的信号光子滤波以及水底光子折射校正。区域光子分离首先确定初始的水面光子上下边界，随后将原始光子初步分类为水面以上、水面与水下光子。ICESat-2数据沿轨距离分辨率为0.7 m，即每个激光脉冲的信号光子在沿轨距离方向上有0.7 m的间隔(图3)。对于地物目标，在高程方向上信号光子上下浮动范围通常低于沿轨距离分辨率0.7 m。因此，椭圆滤波核更符合光子数据沿轨分布特点，可以更好地获取信号光子的密度特征，传统的圆形滤波核处理光子信号时必然引入更多的噪声光子，滤波效果较差。滤波参数确定包括对以每个光子点为中心的椭圆滤波器参数的自适应确定。最后，针对每个检测到的水底信号光子，进行沿轨方向和高程方向上的坐标校正。

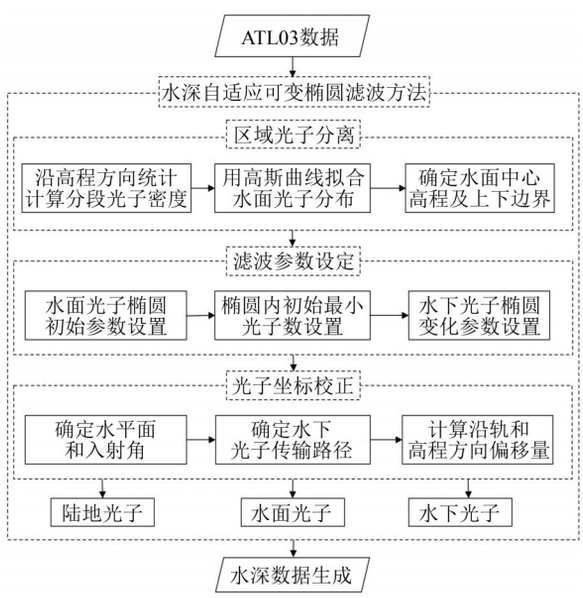


图2　光子计数测深数据提取流程

Fig. 2　Flowchart of Photon-Counting Bathymetry Data Extraction

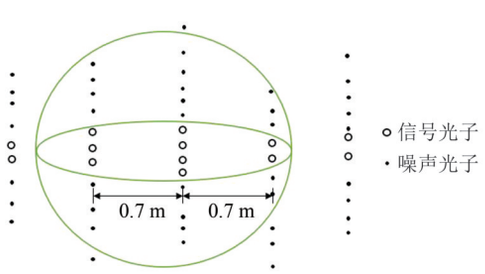


图3　椭圆滤波器示意图

Fig. 3　Diagram of Elliptic Filter

1)区域光子分离。首先,沿高程方向将光子数据切分为一系列空间分段,如图4所示。第j个分段的中心高程表示为g_j,计算公式为:

$$g_j=\min(G_i)+\frac{2j-1}{2}\Delta g,j\in[1,n] \quad (1)$$

式中,G_i为第i个光子的高程值;Δg表示每个分段的宽度,为了适应不同区域水面宽度的变化,段宽均被设为0.05 m;总段数n为光子数据集的最大高程与最小高程的差值除以段宽。

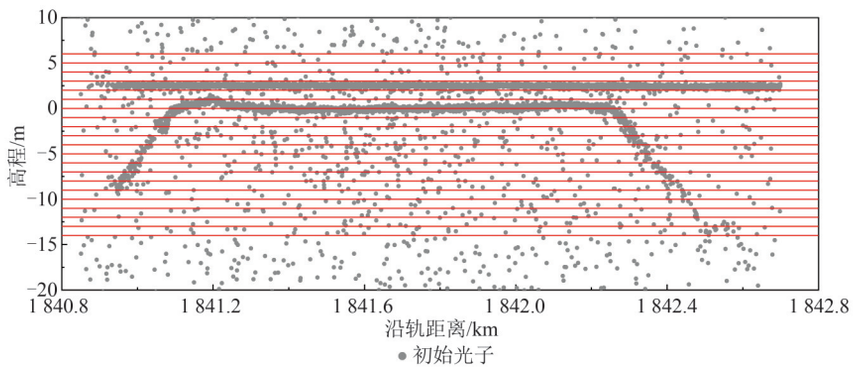


图4 初始光子数据在高程方向上的分段示意图

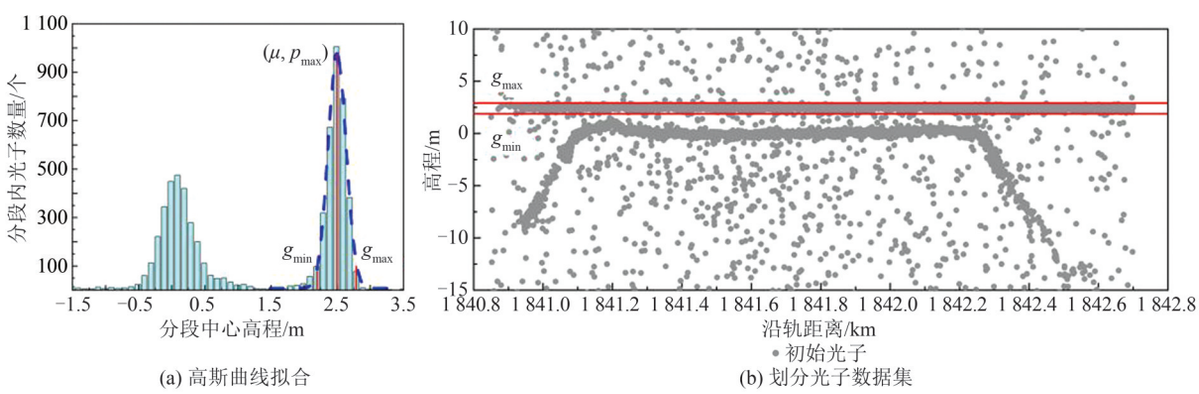
Fig. 4 Segment Diagram of Raw Photon Data Along Elevation Direction

随后统计每个分段单元中的光子数量,形成以每个分段中心高程g_j为横轴、分段单元中的光子数量为纵轴的分布直方图,采用高斯曲线对该直方图进行拟合,高斯拟合函数表示为$f(x)$,计算公式为:

$$f(x)=p_{\max}\exp\left(-\frac{(x-\mu)^2}{2\sigma^2}\right) \quad (2)$$

式中,x表示每个分段的中心高程;$p_{\max}$表示包含光子最多的分段中的光子数量;μ表示包含光子最多的分段的中心高程;σ为高斯标准差。

拟合结果如图5(a)所示。以μ为中心,考虑高斯置信度区间内的数据的可靠性,以2σ作为宽度阈值来确定初始水面光子的上下边界,以确保该阈值范围内的光子全部为水面光子,以更大倍数的高斯标准差会引入上下边界边缘的噪点。图5中,$g_{\max}$为水面光子的上边界,$g_{\min}$为水面光子的下边界,原始光子数据被划分为水面以上、水面和水下光子。水面上下边界之间的光子构成初始水面光子数据集SP,相应地,初始水上和水下光子数据集由AP和WP表示。



(a) 高斯曲线拟合 (b) 划分光子数据集

图5 基于高斯曲线的水面光子自动识别与提取

Fig. 5 Automatic Identification and Extraction of Water Surface Photons Based on Gaussian Curve

2)椭圆滤波器参数自适应确定。椭圆密度滤波核的短半轴初始值b_{initial}由$g_{\max}$和$g_{\min}$确定,计算公式为:

$$\begin{cases} b_{\text{initial}}=|g_{\max}-g_{\min}| \\ a_{\text{initial}}=b_{\text{initial}}\times\alpha_{\text{ratio}} \\ \alpha_{\text{ratio}}=\dfrac{1}{s}\displaystyle\sum_{k=1}^{s}(\Delta d/\Delta g_k) \end{cases} \quad (3)$$

式中,Δd为光子沿轨距离分辨率,即单个脉冲获取的信号光子沿轨距离间隔0.7 m;Δg_k为所有激光脉冲内水面光子高度差值的平均值;α_{ratio}为椭圆滤波核的扁率;a_{initial}为长半轴初始值;s表示沿轨道方向的分割段数,即原始数据沿轨距离最大值与最小值的差值除以每段的长度,该参数也代表了在该段数据中存在多少个激光脉冲。

在水面光子集SP中，利用椭圆滤波器及其初始参数对每个光子进行统计搜索，计算初始水面数据集中每个水面光子的邻域密度p_i，将平均邻域密度作为最小光子数的初始值p_{initial}，计算公式为：

$$p_{\text{initial}}=\frac{\sum_{i=1}^{n_{sp}}p_i}{n_{\text{sp}}} \tag{4}$$

式中，n_{sp}为SP中的光子数量。

下一步构造椭圆滤波器参数与水下光子密度变化之间的关系（图6），对于不同水深的水下光子，光子密度的分布变化与椭圆滤波器参数之间的关系为：

$$\begin{cases} a_i=a_{\text{initail}}+2\left|G_i-g_{\min}\right| \\ b_i=b_{\text{initial}}+\lambda\left|G_i-g_{\min}\right| \\ X_i=p_{\text{initial}}-\left\lfloor\dfrac{\left|G_i-g_{\min}\right|}{3}\right\rfloor \end{cases} \tag{5}$$

式中，a_i表示第i个光子的椭圆滤波器的长半轴；b_i表示第i个光子的椭圆滤波器的短半轴；X_i表示第i个光子的邻域内最小光子数；λ表示椭圆滤波器系数。

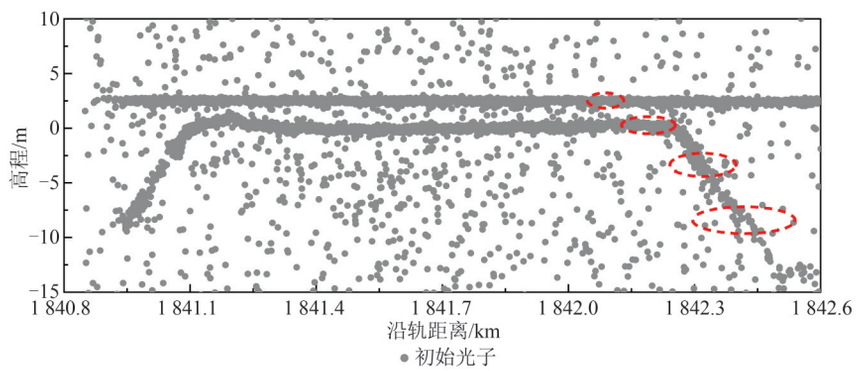


图6　随水深变化的椭圆滤波器

Fig. 6　Elliptical Filters that Vary with Water Depth

最后，对于光子数据集AP和SP使用固定大小的椭圆滤波器分别提取陆地和水面光子，椭圆参数由式（3）和式（4）确定。对于光子数据集WP使用变化大小的椭圆滤波器提取水底信号光子，椭圆参数由式（5）确定。基于椭圆密度滤波器遍历所有光子，统计以每个光子为中心的椭圆滤波核内的光子点数，当椭圆内点数大于最小阈值时，视当前点为信号光子，否则视为噪声光子。由于光子的离散特性，水下信号光子会出现缺失的现象，尤其是在水深较大时，而水下地形是连续的，本文通过B样条[25]分别拟合水面信号光子和折射校正后的水下信号光子，进而得到连续的水底地形和水深数据。

3）水底信号光子折射与坐标校正。ATLAS激光脉冲在水气界面时发生折射，传输方向与距离发生变化，导致水下光子的坐标位置发生偏移。为保证测深的准确性，必须对每个水底信号光子进行折射与坐标校正[26]。通过提取的水面信号光子计算数据采集时刻的平均海平面高程[27]。通过光子传输的空间几何结构关系及折射定律（图7），构建折射校正模型对每个水底信号光子进行坐标校正，计算公式为：

$$\begin{cases} \Delta x=S_2\sin\beta-S_1\cos\alpha=\dfrac{\Delta h}{\cos\alpha}\left(\dfrac{\sin\beta}{n_w}-\sin\alpha\right) \\ \Delta y=S_1\cos\alpha-S_2\cos\beta=\dfrac{\Delta h}{\cos\alpha}\left(\cos\alpha-\dfrac{\cos\beta}{n_w}\right) \end{cases} \tag{6}$$

式中，Δx和Δy分别表示水体折射导致的沿轨和高程方向的偏移量；S_1和S_2分别表示折射校正前后水底光子在水中的传输距离；α表示激光脉冲的指向角（入射角）；β为折射角；Δh为折射校正前的水深值；n_w为折射率，设为1.33。

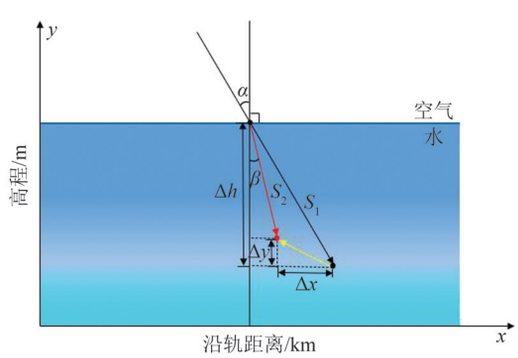


图7　光子在水中发生折射后的偏移量计算模型

Fig. 7　Model for Calculating the Deflection of Photons After Refraction in Water

由于激光发射器的入射角α和水下光子的坐标即沿轨距离和高程值是已知的,因而可以确定光子的直线传播路径。通过平均海平面高程值和光子路径直线方程可以求得它们的交点o,也即水下光子所对应的水面入射位置。基于水下光子坐标和入射点坐标可以计算出S_1。根据折射定律,S_1和S_2的关系为:

$$n_w=\frac{c_a t/2}{c_w t/2}=\frac{S_1}{S_2} \tag{7}$$

式中,c_a为光在大气中的传播速度;c_w为光在水体中的传播速度;t为光子在水体中的传播时间。

2 研究区及实验数据

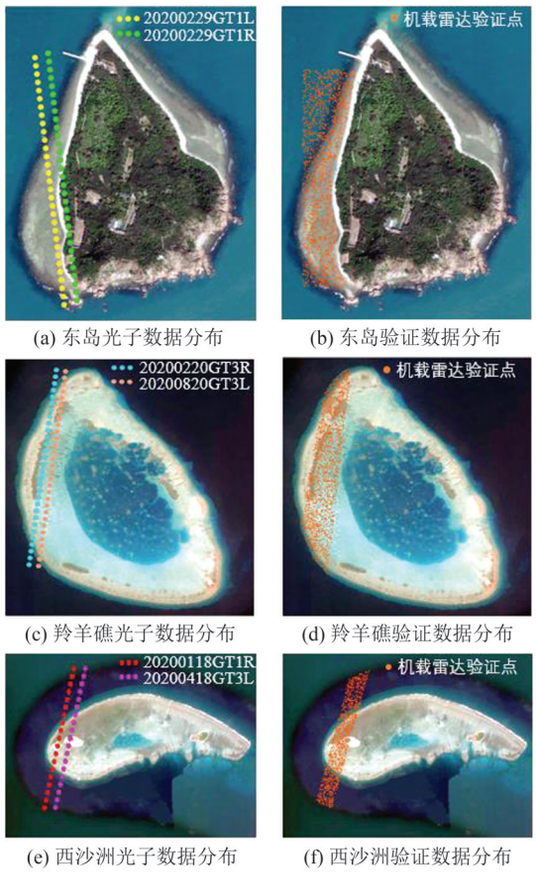
2.1 研究区

研究区域(图8和图9)包括中国海南省三亚市西南部的东岛(109.411°E,18.216°N)、永乐环礁西南部的羚羊礁(111.588°E,16.465°N)、七连屿群岛西北部的西沙洲(112.208°E,16.985°N)以及南沙的贡士礁(114.392°E,11.466°N)和鸿庥岛(114.359°E,10.181°N)5个区域。这些岛礁都是沙质与珊瑚礁混合的底质,自然状态保护较好,属于热带海洋气候,受人类活动影响较小,因此研究区周边海域水质清澈,较适合于研究数据的获取。

2.2 实验数据

ICESat-2 ATLAS在沿轨道方向上共有6条激光扫描光束,分为3组,每组一强一弱,弱激光光束能量约为强激光光束的1/4。同组的强弱激光光束扫描轨迹水平距离为90 m,相邻的两组激光光束水平距离为3.3 km。ICESat-2 ATLAS官方发布了包含原始数据、光子定位数据、冰川与冰盖高度、海冰高度、植被冠层高度和内陆水体高程数据等在内的20余种标准数据产品。其中,ATL03数据为原始光子地理定位数据,该数据将光子往返时间、激光器位置和姿态数据结合,以确定光子数据的大地测量位置(即经纬度和高程)。每条ATL03数据包含6条激光光束中每个原始光子在WGS84坐标系(ITRF2014参考框架)下的经纬度、高程、采集时间、置信度等信息[28]。

本文共选取了10条ATL03数据的地面轨迹(https://nsidc.org/data/icesat-2/data-sets)。有机载验证数据的6条地面轨迹采用不同的虚线标示于图8(a)、8(c)、8(e)中,其中20200229GT1L与20200229GT1R位于东岛,为一组强弱光束。



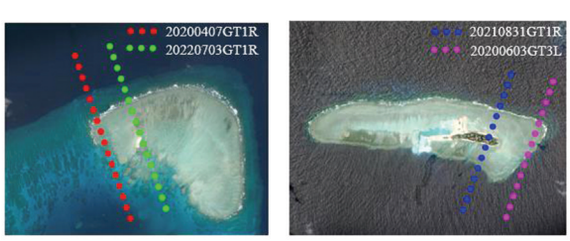
(a) 东岛光子数据分布 (b) 东岛验证数据分布

(c) 羚羊礁光子数据分布 (d) 羚羊礁验证数据分布

(e) 西沙洲光子数据分布 (f) 西沙洲验证数据分布

图8 研究区域内的ATL03数据集和验证数据

Fig. 8 ATL03 Datasets Obtained for the Study Areas and Corresponding In-Situ Data



(a) 贡士礁光子数据分布 (b) 鸿庥岛光子数据分布

图9 位于南沙区域的光子轨迹数据

Fig. 9 Photon Tracks Data in Nansha Area

20200220GT3R和20200820GT3L、20200118GT1R和20200418GT3L分别为不同日期经过羚羊礁与西沙洲的两条强光束。验证数据使用机载激光雷达(Mapper 5000)获取,该数据激光脉冲重复频率为5 000 Hz,最大测深深度为51 m。坐标系及参考框架与ICESat-2一致,标称测深精度为0.23 m(均方根误差)。东岛验证数据获取于2020-08-23,羚羊礁与西沙洲验证数据获取于2020-08-28,飞行高度约550 m。ICESat-2为线状剖面光子点云数据,Mapper 5000为点云数据,因此基于ICESat-2测深点坐标查找Mapper 5000激光点云,通过搜索以ICESat-2光子数据为中心、

2.5 m半径球体内的Mapper 5000激光点云数据，内插与ICESat-2数据进行对比验证。图8(b)、8(d)、8(f)分别展示了不同区域的验证数据分布情况。使用NAO.99b潮汐模型将光子数据校正到验证数据获取时刻的瞬时潮位面，保障光子测深精度验证的可靠性。位于南沙的4条光子轨迹数据如图9所示，由于缺乏南沙区域的验证数据，将仅展示该区域数据的滤波结果，以体现本文方法的鲁棒性和泛化性。表1为上述10轨光子数据地面轨迹的详细信息。

表1　ATLAS数据集分布信息

Table 1　Distribution Information of ATLAS Datasets

经过岛屿	ATLAS数据集	世界标准时间	地面轨迹	大地坐标范围
东岛	20200229	08:08:00	GT1L	(109.412°E,18.214°N)—(109.411°E,18.218°N)
			GT1R	(109.412°E,18.217°N)—(109.411°E,18.220°N)
羚羊礁	20200220	20:31:00	GT3R	(111.577°E,16.490°N)—(111.574°E,16.459°N)
	20200820	11:50:00	GT3L	(111.578°E,16.491°N)—(111.574°E,16.450°N)
西沙洲	20200118	22:03:00	GT1R	(112.208°E,16.989°N)—(112.205°E,16.962°N)
	20200418	17:43:00	GT3L	(112.213°E,16.991°N)—(112.211°E,16.962°N)
贡士礁	20200407	06:02:00	GT1R	(114.388°E,11.456°N)—(114.386°E,11.471°N)
	20220703	15:01:00	GT1R	(114.391°E,11.427°N)—(114.386°E,11.469°N)
鸿庥岛	20210831	17:39:00	GT1R	(114.367°E,10.184°N)—(114.366°E,10.174°N)
	20200603	15:20:00	GT3L	(114.374°E, 10.182°N)—(114.374°E,10.177°N)

3　实验结果与测深精度

3.1　区域光子分离与信号光子滤波结果

本文使用的10轨光子数据中，由于贡士礁和鸿庥岛暂无实测验证数据，因此该区域的4轨数据(贡士礁：20200407GT1R，20220703GT1R；鸿庥岛：20210831GT1R，20200603GT3L)仅展示滤波提取结果，并与传统的自适应可变椭圆滤波测深方法(adaptive variable ellipse filtering bathymetric method，AVEBM)[27]、改进的DBSCAN[22]进行了比较(图10)。图10中结果表明，对于不同激光能量、不同噪声与信号分布情况下的数据集，本文方法均能够有效提取水面光子的上下边界，获取陆地、水面、水底的信号光子。如图10中绿色矩形框中光子所示：相较于AVEBM，本文方法在地形起伏较大的区域效果更好；相较于改进的DBSCAN方法，本文方法基于可变椭圆与曲线拟合的滤波方式，即便在水深较大时也能准确提取低密度的水底信号，且不引入噪点。

采用的10轨光子数据中，海南岛东岛与西沙群岛的6轨光子数据集用于验证本文方法的精度。该6轨数据的滤波结果见图11，图11(b)、11(e)、11(f)中水面光子和水底光子较为连续，而图11(c)、11(d)中位于羚羊礁的两条地面轨迹数据中都存在部分不连续区域，可能是该区域天空中存在较厚云层遮挡。为分析本文方法的信号光子探测能力，表2中计算了陆地、水面和水底信号光子占各地面轨道数据集总光子数的百分比。6轨数据集中，由于激光能量的显著差异，位于东岛的弱激光束地面轨迹20200229GT1L探测到的信号光子数量显著少于强激光束地面轨迹20200229GT1R。此外，东岛的两条数据获取于当地时间16:08:00，原始数据中存在大量环境光导致背景噪声光子增加，因此这两条地面轨道数据中噪声光子占比分别为73%和44%，显著高于西沙洲以及羚羊礁区域。除东岛的两条数据外，其余4条数据中水面与水底光子的占比较为接近，均在40%以上，并且噪声光子占比均少于10%，西沙洲区域的地面轨迹数据20200418GT3L中含有陆地区域，占比为9%。

3.2　光子坐标校正与测深结果

图12展示了水底信号光子校正前后的空间分布和连续陆地、水面和水底地形拟合曲线。表3列出了在研究区域获得的6轨数据折射校正前后的最小和最大水深及高程和沿轨方向上的最小和最大折射位移。经折射校正后，对于位于东岛的两条数据20200229GT1L与20200229GT1R，由于该研究区域较为平缓，所以ICESat-2测量的最大水深都低于1.5 m。在羚羊礁与西沙洲区域，ICESat-2测量的最大水深约7～13 m，优于东岛，能探测到的最大水深为20200118GT1R数据的13.18 m。在高程方向，折射偏移量级从厘米到米不等，在最大和最小的水深处，高程偏移量分别为4.75 m和0.02 m。在沿轨方向，6轨数据

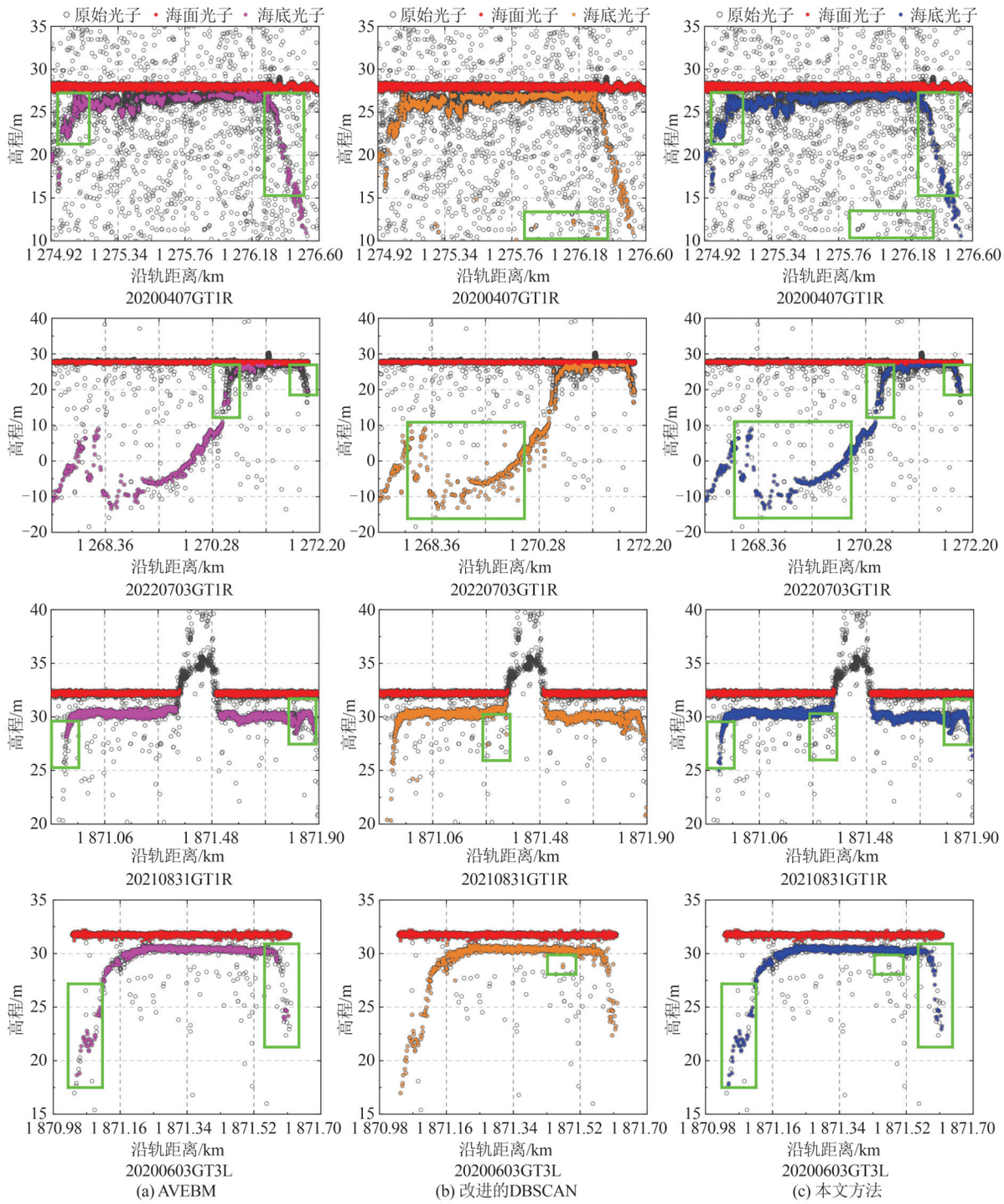


图10 本文光子滤波方法与传统方法(AVEBM、改进的DBSCAN)比较

Fig. 10 Comparison of Filtering Results Among AVEBM, Improved DBSCAN and the Proposed Method

的最大偏移量为20200418GT3L的0.065 0 m,最小偏移量接近于零。沿轨方向由折射效应导致的偏移量较小,主要是由于ICESat-2激光脉冲指向角较小。以上结果表明,随水深的增加,折射效应导致的高程方向和沿轨方向的偏移量都在增大,且高程方向的偏移量达到米级。因此,在利用ICESat-2数据进行近岸水深测量时,必须对水体折射引起的高程偏移进行校正。

3.3 测深精度验证

为验证ICESat-2数据测深精度,将ICESat-2测深结果与机载激光雷达验证数据进行对比,计算数据集之间的斜率K_{Slope}、决定系数R^2和均方根误差S_{RMSE},结果如图13与表4所示。本文方法获取的ICESat-2测深结果与机载激光雷达验证数据有较强的相关性(R^2:0.88~0.96,S_{RMSE}:0.34~0.59 m)。6条地面轨迹测深结果与验证数据的

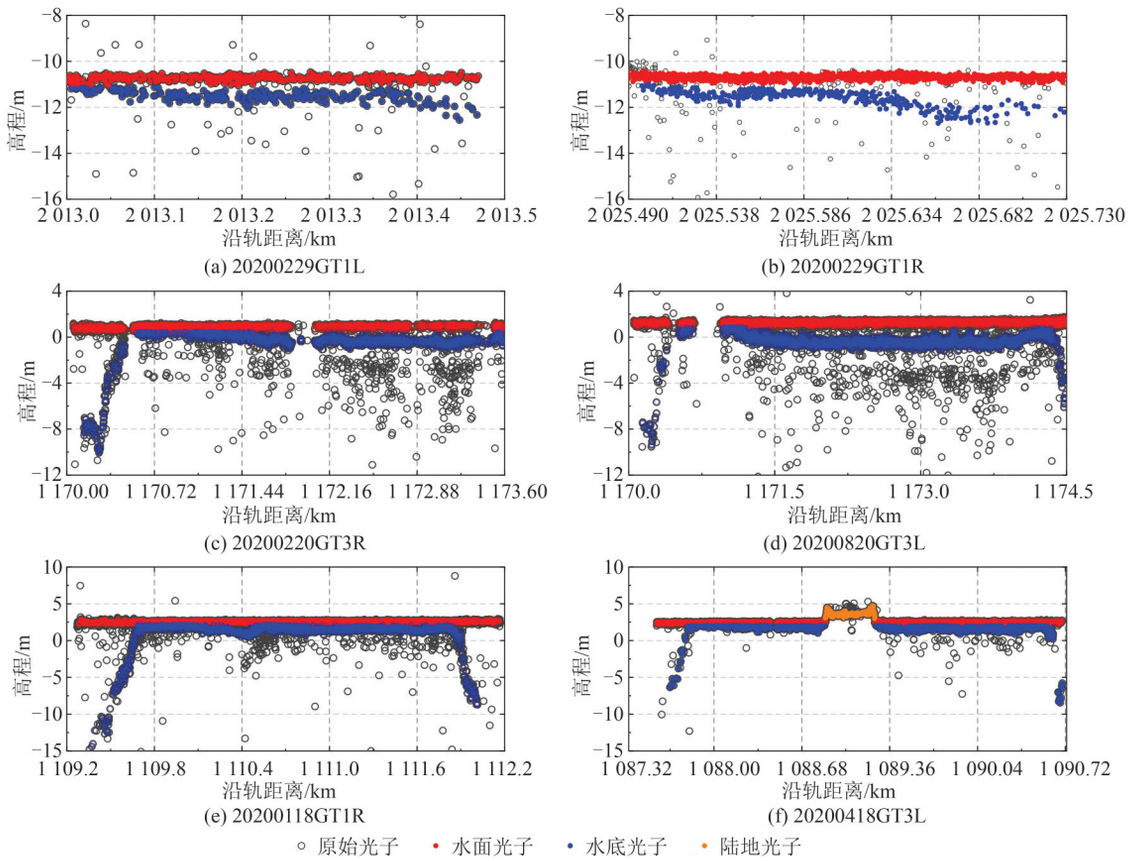


图 11　光子数据集的陆地、水面和水底信号光子自动分离与提取结果

Fig. 11　Results of Automatic Separation and Extraction of Signal Photons from Land, Water Surface and Water Bottom for Different Photon Datasets

表 2　使用本文方法滤波后不同类型的光子(陆地、水面和水底)在每轨数据集的总光子数中的占比

Table 2　Percentage of Different Types of Photons (Land, Surface and Bottom) in Total Number of Photons for Each Dataset After Using the Proposed Method

ATLAS数据	总光子数/个	水面光子数/个	水面光子数占比/%	水底光子数/个	水底光子数占比/%	陆地光子数/个	陆地光子数占比/%	噪声光子数/个	噪声光子数占比/%
20200229GT1L	2 676	439	16	298	11			1 939	73
20200229GT1R	2 724	1 164	43	365	13			1 195	44
20200220GT3R	12 866	8 873	69	3 403	26			590	5
20200820GT3L	13 430	6 300	47	6 404	48			726	5
20200118GT1R	12 797	5 514	43	6 281	49			1 002	8
20200418GT3L	5 166	2 122	41	2 295	44	451	9	298	6

R^2都大于0.88，相关性最高为羚羊礁区域的20200220GT3R，R^2达到0.96。整体上，6条地面轨迹测深结果与验证数据的S_{RMSE}均小于0.6 m，其中位于西沙洲的20200418GT3L数据的S_{RMSE}最高，为0.59 m。合并3个研究区域的6条地面轨迹数据时，整体R^2仍高达0.93，K_{Slope}为1.05，S_{RMSE}为0.51 m，以上分析表明ICESat-2测深结果具有较高的准确性和可靠性。

为了分析折射对测深结果精度的影响，表4中也列出了未进行折射校正的ICESat-2测深结果与验证数据之间的关系。与折射校正前相比，折射校正后的测深精度明显提高，验证模型斜率接近于1。由于激光入射角度较小，折射校正过程可以看作是校正前水深的线性减小，因此折射前后的R^2变化较小，但校正后S_{RMSE}明显减小。合并3个研究区域数据时，验证模型的整体K_{Slope}从1.33降低到了1.05，S_{RMSE}从1.14 m提高到了0.51 m。

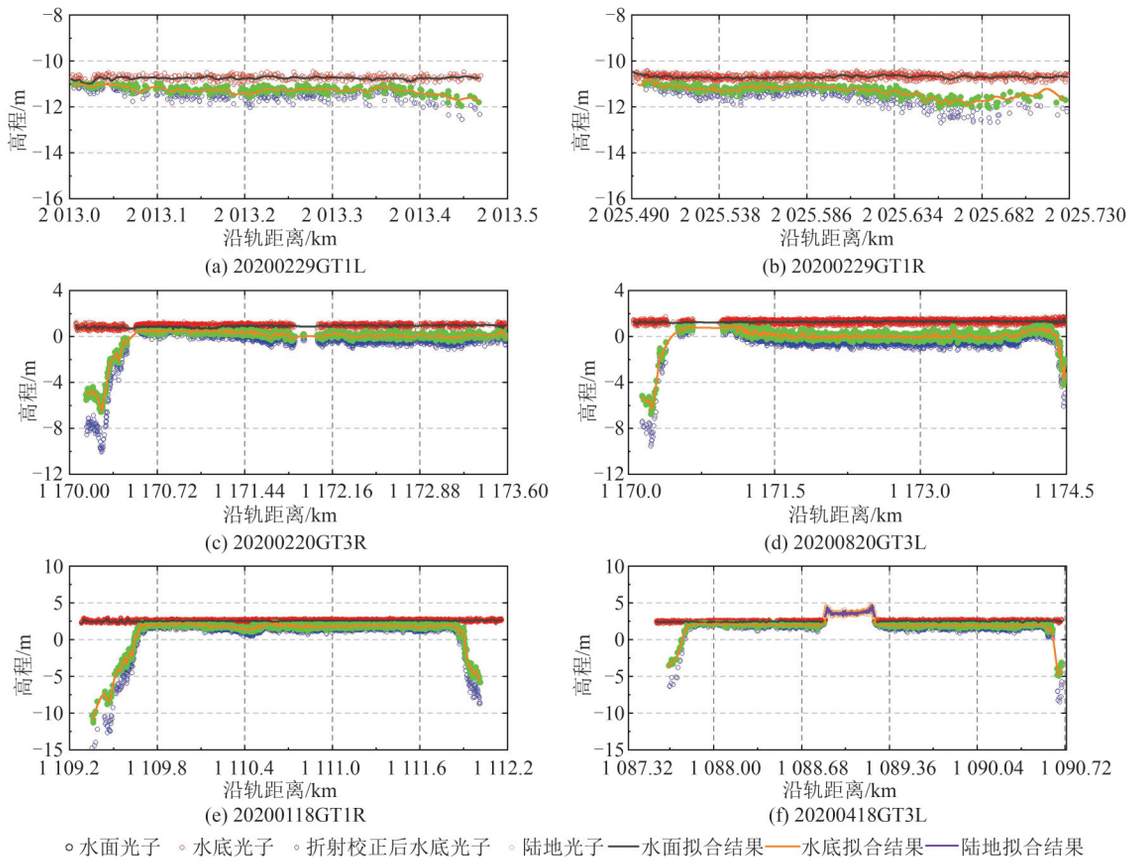


图12 折射校正前后的水底信号光子及陆地、水面和水底的拟合曲线

Fig. 12 Underwater Signal Photons Before and After Refraction Correction and Fitted Curves of Land, Water Surface and Underwater

表3 折射校正前后6轨数据的最小和最大测深结果以及相应的高程和沿轨方向的折射偏移量/m

Table 3 Minimum and Maximum Bathymetric Results for Six-Track Data Before and After Refraction Correction, and Corresponding Refraction Displacements in the Elevation and Along-Track Directions/m

ATLAS数据	校正前深度		校正后深度		高程偏移		沿轨方向偏移	
	最小	最大	最小	最大	最小	最大	最小	最大
20200229GT1L	0.03	1.36	0.03	1.02	0.02	0.66	0.003 1	0.033 5
20200229GT1R	0.40	1.64	0.30	1.24	0.14	0.73	0.002 0	0.035 0
20200220GT3R	0.27	11.75	0.20	8.76	0.07	2.99	0.001 2	0.027 0
20200820GT3L	0.24	10.04	0.20	7.60	0.11	2.76	0.000 1	0.038 0
20200118GT1R	0.12	17.57	0.10	13.18	0.09	4.75	0.000 2	0.064 0
20200418GT3L	0.07	9.61	0.06	7.28	0.06	3.49	0.021 0	0.065 0

本文方法测深精度和其他方法的结果对比如表5所示。结果表明,最小的K_{Slope}为0.92,来自于改进的DBSCAN的20200418GT3L数据集,最大的K_{Slope},为1.18,来自AVEBM方法的20200220GT3R数据集,基于本文方法的各数据集的K_{Slope}都比较接近于1,且整体上也最接近1,为1.05。3种方法的最小R^2均来自数据集20200229GT1R,分别为0.84、0.84和0.88,最大的R^2来自于本文方法的2020-02-20GT3R数据,为0.96,且整体上本文方法的R^2也最大,为0.93,AVEBM次之,为0.90,改进的DBSCAN R^2最小,为0.88,说明本文方法与验证数据的一致性较高。本文方法在20200229GT1L数据验证上的最小,为0.34 m,改进的DBSCAN和AVEBM最小分别为0.42 m和0.39 m,最大的S_{RMSE}为AVEBM的20200418GT3L数据,达0.62 m,总体上3种方法的S_{RMSE}都比较小,本文方法的精度最高,为0.51 m,AVEBM和改进的DBSCAN存在着一些

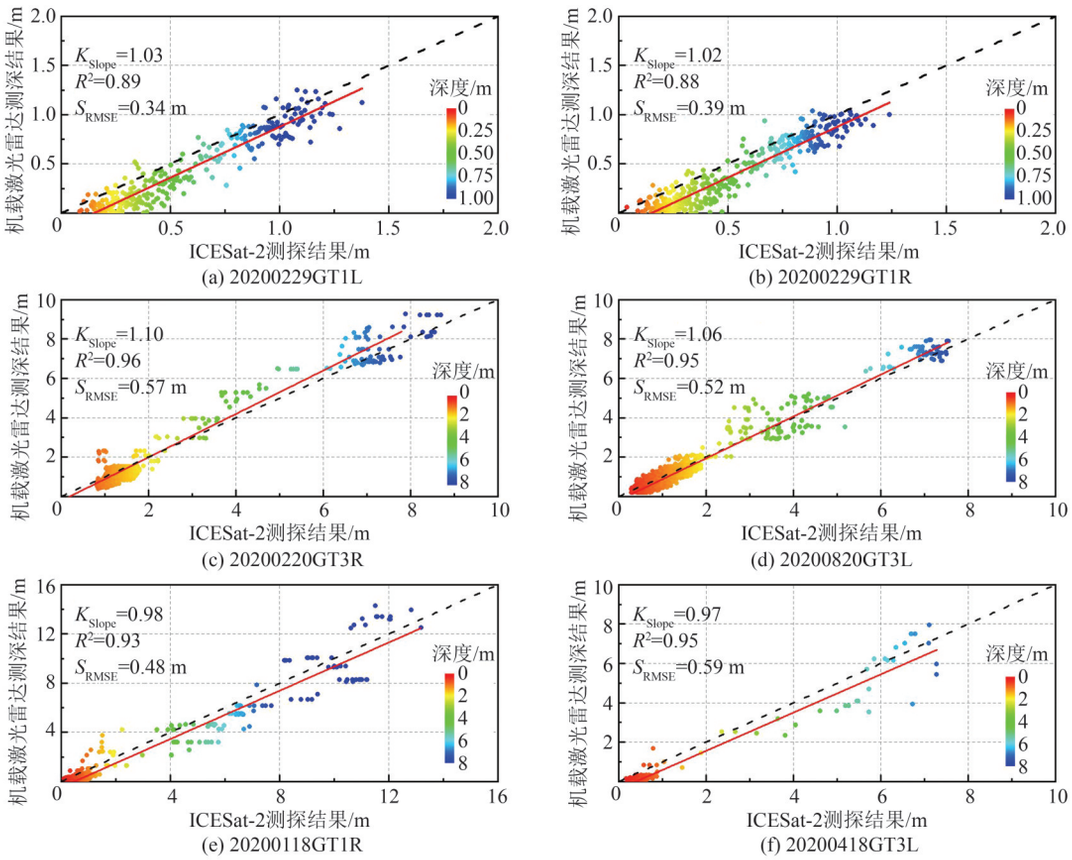


图 13　ATLAS 测深结果和验证数据对比

Fig. 13　Comparison of ATLAS Bathymetry Results and Validation Data

表 4　折射校正前后光子计数测深精度验证

Table 4　Validation of Photon-Counting Bathymetry Accuracy After Refraction Correction

ATLAS数据	折射校正前			折射校正后		
	K_{Slope}	R^2	S_{RMSE}/m	K_{Slope}	R^2	S_{RMSE}/m
20200229GT1L	1.31	0.90	0.96	1.03	0.89	0.34
20200229GT1R	1.33	0.88	1.02	1.02	0.88	0.39
20200220GT3R	1.40	0.96	1.24	1.10	0.96	0.57
20200820GT3L	1.34	0.95	1.20	1.06	0.95	0.52
20200118GT1R	1.22	0.94	1.05	0.98	0.93	0.48
20200418GT3L	1.20	0.95	1.31	0.97	0.95	0.59
总体	1.33	0.93	1.14	1.05	0.93	0.51

差距，分别为 0.53 m 和 0.56 m。

为进一步分析 ICESat-2 在不同水深段的测深能力，按照 2 m 的水深间隔将数据进行分组，统计每个区间内 ICESat-2 测深结果和机载激光雷达测深结果的 S_{RMSE}，结果如表 6 所示。整体上，随着水深的增加，S_{RMSE} 逐渐增大。在[0，2) m 的水深范围内，3 个区域的 6 轨数据的 S_{RMSE} 均为 0.3 m 左右，说明 ICESat-2 在极浅区域的测深能力比较稳定。随着水深的增加，羚羊礁以及西沙洲区域的测深结果 S_{RMSE} 逐渐增大，由于西沙洲区域的 20200118GT1R 数据最大深度达到 13.18 m，因此该条数据的 S_{RMSE} 在大于或等于 8 m 的水深区间内达到最大值 1.25 m。

光子计数激光雷达测深中，本文提出的滤波方法能高效地实现区域光子分离和自适应信号光子精确提取，实现高精度的水深探测。受到水体折射的影响，光子在垂直方向的偏移随深度增加而增大，13.18 m 深度的折射偏差就达到了 4.75 m，属于测深的主要误差源之一；由于激光脉冲指向角很小，水体折射导致光子在沿轨方向的偏移很小，最大数值属于厘米级。由表 6 可以发现，光子测深精度会随深度的增加而呈现一定的下降趋势。由于激光在水体中传输过程极为复杂，不同深度的海水存在不同的温盐密度，水色等要素也不同，导致不同深度存在分层现象，故而水体内部可能存在多次折射现象，光子路径的几何结构十分复杂，使得光子的实际传输路径与校正后的路径还存在一定差异，随着深度的增加，光子测深精度出现一定的下降。

表5 3种方法的测深精度对比

Table 5 Comparison of Bathymetry Accuracy of 3 Methods

ATLAS数据	改进的DBSCAN			AVEBM			本文方法		
	K_{Slope}	R^2	S_{RMSE}/m	K_{Slope}	R^2	S_{RMSE}/m	K_{Slope}	R^2	S_{RMSE}/m
20200229GT1L	1.12	0.85	0.45	1.11	0.87	0.39	1.03	0.89	0.34
20200229GT1R	1.11	0.84	0.42	1.05	0.84	0.40	1.02	0.88	0.39
20200220GT3R	1.15	0.93	0.59	1.18	0.94	0.59	1.10	0.96	0.57
20200820GT3L	1.17	0.91	0.55	1.14	0.93	0.53	1.06	0.95	0.52
20200118GT1R	0.95	0.90	0.54	0.97	0.91	0.49	0.98	0.93	0.48
20200418GT3L	0.92	0.92	0.61	0.95	0.93	0.62	0.97	0.95	0.59
总体	1.13	0.88	0.56	1.10	0.90	0.53	1.05	0.93	0.51

表6 不同水深分区下ICESat-2的测深精度/m

Table 6 Bathymetry Accuracy for Different Intervals of Water Depth/m

ATLAS数据	水深分区				
	[0,2)	[2,4)	[4,6)	[6,8)	⩾8
20200229GT1L	0.34				
20200229GT1R	0.39				
20200220GT3R	0.32	0.51	0.59	0.62	0.74
20200820GT3L	0.30	0.67	0.66	0.71	
20200118GT1R	0.28	0.84	0.62	0.88	1.25
20200418GT3L	0.25	0.61	0.58	0.66	1.04
总体	0.29	0.64	0.63	0.75	0.97

4 结 语

本文提出了一种基于自适应空间密度滤波的ICESat-2数据测深方法,该方法能够根据光子在水面和水下的密度分布自动确定滤波参数,分别对水面和水底的信号光子进行精确探测与提取,获取精确的水深测量结果。实验结果表明,本文方法获取的ICESat-2测深数据和机载激光雷达验证数据有强相关性,整体R^2达到0.93,S_{RMSE}为0.51 m,具有较高的信号光子探测和水深测量精度。光子测深受水体折射的影响较大,主要存在于在垂直方向,且随深度的增加而增加。由于水体环境的复杂多样性,随着水深的增加,光子测深精度会呈现一定的下降趋势。和其他方法的滤波结果对比表明,本文方法对不同地理位置、污染程度、深度、时间等实验区域数据的处理精度和泛化能力更强。

星载光子计数激光雷达测深是一项新型的激光探测技术,在海岸带与岛礁等浅海区域应用中展现出巨大的潜力。由于浅水测量任务的复杂性,本文分析了光子信号在不同水体中随水深的变化情况,但并未量化大气对于光子计数激光雷达数据传输的影响。另外,在水下地形变化剧烈的区域,本文采用的水平椭圆滤波核可能无法准确反映信号光子的密度特征,将影响光子滤波方法的精度,需要设计更加精准的适应地形变化的滤波方法[29]。因此,在未来的研究中,需进一步加强光子测深理论模型的研究,结合水底地形的变化情况,实现泛化能力更强的光子滤波方法,为研制中国的星载光子计数激光雷达提供技术与数据支持。

参 考 文 献

[1] 刘焱雄,郭锴,何秀凤,等. 机载激光测深技术及其研究进展[J]. 武汉大学学报(信息科学版),2017,42(9):1185-1194.
LIU Yanxiong, GUO Kai, HE Xiufeng, et al. Research Progress of Airborne Laser Bathymetry Technology[J]. *Geomatics and Information Science of Wuhan University*, 2017, 42(9): 1185-1194.

[2] 申家双,葛忠孝,陈长林. 我国海洋测绘研究进展[J]. 海洋测绘,2018,38(4):1-10.
SHEN Jiashuang, GE Zhongxiao, CHEN Changlin. Research Progress of China's Hydrographic Surveying and Charting[J]. *Hydrographic Surveying and Charting*, 2018, 38(4): 1-10.

[3] KIM M, FEYGELS V, KOPILEVICH Y, et al. Estimation of Inherent Optical Properties from CZMIL LiDAR[C]//LiDAR Remote Sensing for Environmental Monitoring, Beijing, China, 2014.

[4] LUDENO G, REALE F, DENTALE F, et al. An X-band Radar System for Bathymetry and Wave Field Analysis in a Harbour Area[J]. *Sensors*,

2015, 15(1): 1691-1707.

[5] 孙和平, 李倩倩, 鲍李峰, 等. 全球海底地形精细建模进展与发展趋势[J]. 武汉大学学报(信息科学版), 2022, 47(10): 1555-1567.
SUN Heping, LI Qianqian, BAO Lifeng, et al. Progress and Development Trend of Global Refined Seafloor Topography Modeling[J]. *Geomatics and Information Science of Wuhan University*, 2022, 47(10): 1555-1567.

[6] 邵禹, 王德江, 张迪, 等. 单光子激光测距技术研究进展[J]. 激光与光电子学进展, 2021, 58(10): 258-266.
SHAO Yu, WANG Dejiang, ZHANG Di, et al. Research Progress of Single Photon Laser Ranging Technology[J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2021, 58(10): 258-266.

[7] LI Q H, DEGNAN J, BARRETT T, et al. First Evaluation on Single Photon-Sensitive LiDAR Data [J]. *Photogrammetric Engineering & Remote Sensing*, 2016, 82(7): 455-463.

[8] 魏婷婷, 杨家志, 周国清, 等. 基于改进EWT的浅水激光雷达回波信号降噪[J]. 中国激光, 2021, 48(11): 158-169.
WEI Tingting, YANG Jiazhi, ZHOU Guoqing, et al. Shallow-Water LiDAR Echo Signal Denoising Based on Improved EWT[J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2021, 48(11):158-169.

[9] DEGNAN J,MACHAN R,LEVENTHAL E,et al. Inflight Performance of a Second-Generation Photon-Counting 3D Imaging LiDAR[C]//Laser Radar Technology and Applications XIII, Orlando, FL, 2008.

[10] 王密, 韦钰, 杨博, 等. ICESat-2/ATLAS全球高程控制点提取与分析[J]. 武汉大学学报(信息科学版), 2021, 46(2): 184-192.
WANG Mi, WEI Yu, YANG Bo, et al. Extraction and Analysis of Global Elevation Control Points from ICESat-2/ATLAS Data[J]. *Geomatics and Information Science of Wuhan University*, 2021, 46(2): 184-192.

[11] 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.

[12] 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.

[13] 王虹, 张智宇, 周辉, 等. 面向森林植被的星载大光斑激光雷达回波仿真[J]. 武汉大学学报(信息科学版), 2018, 43(5): 711-718.
WANG Hong, ZHANG Zhiyu, ZHOU Hui, et al. Simulation of Forest Vegetation Return Waveform for Satellite Large-Footprint LiDAR[J]. *Geomatics and Information Science of Wuhan University*, 2018, 43(5): 711-718.

[14] 田礼乔, 陈晓玲, 邱凤, 等. 星载激光雷达气溶胶数据辅助的近岸浑浊水体大气校正研究[J]. 武汉大学学报(信息科学版), 2011, 36(8): 960-963.
TIAN Liqiao, CHEN Xiaoling, QIU Feng, et al. Atmospheric Correction over Coastal Turbid Waters Based on Space-Borne LiDAR Aerosol Data[J]. *Geomatics and Information Science of Wuhan University*, 2011, 36(8): 960-963.

[15] 张扬, 黄卫东, 董长哲, 等. 海洋激光雷达探测卫星技术发展研究[J]. 红外与激光工程, 2020, 49(11):3788/IRLA20201045.
ZHANG Yang, HUANG Weidong, DONG Changzhe, et al. Research on the Development of the Detection Satellite Technology in Oceanographic LiDAR[J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2020, 49(11): 3788/IRLA20201045.

[16] 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.

[17] WANG X, GLENNIE C, PAN Z G. Weak Echo Detection from Single Photon LiDAR Data Using a Rigorous Adaptive Ellipsoid Searching Algorithm [J]. *Remote Sensing*, 2018, 10(7): 1035.

[18] ALBRIGHT A, GLENNIE C. Nearshore Bathymetry from Fusion of Sentinel-2 and ICESat-2 Observations[J]. *IEEE Geoscience and Remote Sensing Letters*, 2021, 18(5): 900-904.

[19] ZHANG D F, CHEN Y F, LE Y, et al. Refraction and Coordinate Correction with the JONSWAP Model for ICESat-2 Bathymetry[J]. *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*, 2022, 186: 285-300.

[20] ZHU X X, NIE S, WANG C, et al. A Ground Elevation and Vegetation Height Retrieval Algorithm Using Micro-pulse Photon-Counting LiDAR Data [J]. *Remote Sensing*, 2018, 10(12): 1962.

[21] 秦磊, 邢艳秋, 黄佳鹏, 等. ICESat-2机载实验光子云数据自适应去噪及分类算法[J]. 遥感学报, 2020, 24(12): 1476-1487.
QIN Lei, XING Yanqiu, HUANG Jiapeng, et al.

Adaptive Denoising and Classification Algorithms for ICESat-2 Airborne Experimental Photon Cloud Data [J]. *Journal of Remote Sensing*, 2020, 24(12): 1476-1487.

[22] 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.

[23] ZHANG J S, KEREKES J, CSATHO B, et al. A Clustering Approach for Detection of Ground in Micropulse Photon-Counting LiDAR Altimeter Data [C]//IEEE Geoscience and Remote Sensing Symposium, Quebec City, Canada, 2014.

[24] 王春辉, 王遨游, 荣微, 等. 光子计数激光雷达点云的自适应去噪算法[J]. 激光与光电子学进展, 2021, 58(14): 482-489.
WANG Chunhui, WANG Aoyou, RONG Wei, et al. Adaptive Denoising Algorithm for Photon-Counting LiDAR Point Clouds[J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2021, 58(14): 482-489.

[25] YEH R, NASHED Y S G, PETERKA T, et al. Fast Automatic Knot Placement Method for Accurate B-spline Curve Fitting [J]. *Computer-Aided Design*, 2020, 128: 102905.

[26] YANG F L, SU D P, MA Y, et al. Refraction Correction of Airborne LiDAR Bathymetry Based on Sea Surface Profile and Ray Tracing [J]. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 2017, 55(11): 6141-6149.

[27] CHEN Y F, LE Y, ZHANG D F, et al. A Photon-Counting LiDAR Bathymetric Method Based on Adaptive Variable Ellipse Filtering[J]. *Remote Sensing of Environment*, 2021, 256: 112326.

[28] NEUMANN T A, BRENNER A, HANCOCK D, et al. ATLAS/ICESat-2 L2A Global Geolocated Photon Data, Version 5[R]. Boulder, CO: NASA National Snow and Ice Data Center Distributed Active Archive Center, 2021.

[29] 李雨佳, 周晓青, 李国元, 等. 星载单光子激光雷达浅水测深技术研究进展和展望[J]. 红外与激光工程, 2022, 51(10): 107-116.
LI Yujia, ZHOU Xiaoqing, LI Guoyuan, et al. Progress and Prospect of Space-Borne Photon-Counting LiDAR Shallow Water Bathymetry Technology[J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2022, 51(10): 107-116.