

## ICESat-2 激光雷达海面信号提取和海浪要素计算

周智标, 周 辉, 马 跃, 宋 越, 李 松\*

(武汉大学电子信息学院, 湖北 武汉 430072)

**摘 要:** 美国 NASA 于 2018 年发射的 ICESat-2 (The Ice, Cloud, and land Elevation Satellite-2) 卫星上搭载的 ATLAS (Advanced Topographic Laser Altimeter System) 是目前为止全球唯一一个对地观测的星载光子计数激光雷达, 具有较高的轨向空间采样率, 为用遥感的方法探测海浪要素提供了可能。光子计数激光雷达用于海浪探测的前提是能够准确地提取来自海面的信号光子, 并确定瞬时的海面廓线。迄今为止, 用星载光子计数激光雷达探测海面形态和海浪要素的研究鲜见报道, 也缺少专门针对海面信号光子的提取方法。基于海面信号光子的分布特点, 文中提出了一种新的信号提取算法: 首先通过直方图统计及自适应的阈值选取完成对海面回波光子的粗去噪; 然后基于激光雷达光斑尺寸和海面波动特点, 选取合适的搜索邻域计算信号点和噪声点密度, 根据两者点密度差异对信号光子和噪声光子分类; 最后用高斯函数拟合的方法进一步去除密度较大的后向散射噪声光子, 最终得到来自海面反射的信号光子。利用上述算法提取了太平洋 7 个不同海况区域的海面信号光子和瞬时海面廓线并进一步计算出当地海浪的峰值波长和周期。将计算结果与同期欧洲中期天气预报中心 (European Centre for Medium-Range Weather Forecasts, ECMWF) 的全球大气再分析 ERA5 (ECMWF Re-Analysis5) 数据作对比, 在不同风速、水深的海域都获得了基本一致的结果, 超过半数区域的海浪周期误差在 5% 以内, 初步证明了星载光子计数激光雷达观测成果用于海浪要素计算的可行性。

**关键词:** 激光雷达遥感; ICESat-2/ATLAS; 海面信号去噪; 海浪要素计算

**中图分类号:** TP79 **文献标志码:** A **DOI:** 10.3788/IRLA20220366

## ICESat-2 lidar sea surface signal extraction and ocean wave element calculation

Zhou Zhibiao, Zhou Hui, Ma Yue, Song Yue, Li Song\*

(School of Electronic Information, Wuhan University, Wuhan 430072, China)

**Abstract:** The Advanced Topographic Laser Altimeter System (ATLAS) carried on the Ice, Cloud, and land Elevation Satellite-2 (ICESat-2) launched by NASA in 2018 is the only spaceborne photon counting lidar in the world so far. It has a high orbital spatial sampling rate, which makes it possible to detect ocean wave elements by remote sensing. The premise of photon counting lidar for wave detection is to accurately extract signal photons from the sea surface and determine the instantaneous sea surface profile. Up to now, there are few reports on the detection of sea surface morphology and wave elements by spaceborne photon counting lidar, and there is also a lack of extraction methods specifically for sea surface signal photons. Based on the distribution characteristics of

收稿日期: 2022-05-27; 修订日期: 2022-12-06

基金项目: 国家自然科学基金 (41971302)

作者简介: 周智标, 男, 博士生, 主要从事星载激光雷达遥感数据处理与应用方面的研究工作。

导师(通讯作者)简介: 李松, 女, 教授, 博士生导师, 主要从事激光雷达遥感和光电检测方面的研究。

signal photons on the sea surface, a new signal extraction algorithm is proposed in this paper. First, the rough denoising of sea surface echo photons is completed through histogram statistics and adaptive threshold selection; Then, based on the lidar spot size and sea surface fluctuation characteristics, an appropriate search neighborhood is selected to calculate the density of signal points and noise points. The point density difference is used to classify signal photons and noise photons; Finally, the backscattered noise photons with higher density are further removed by Gaussian function fitting, and the signal photons reflected from the sea surface are obtained. Using the above algorithm, the sea surface signal photons and instantaneous sea surface profiles of seven different sea state regions in the Pacific Ocean are extracted, and the peak wavelength and peak wave period of local ocean waves are further calculated. Comparing the calculation results with the global atmospheric reanalysis ECMWF Re-Analysis5 (ERA5) data of the European Centre for Medium-Range Weather Forecasts (ECMWF) during the same period, the results are basically consistent in sea areas with different wind speeds and water depths. As a result, the relative error of the wave period in more than half of the areas is within 5%, which preliminarily proves the feasibility of calculating ocean wave elements with the spaceborne photon counting lidar observation results.

**Key words:** lidar remote sensing; ICESat-2/ATLAS; sea surface signal denoising; calculation of ocean wave elements

## 0 引言

用卫星遥感的方法观测海洋具有全天候、大范围的特点,极大地深化了人们对各种海洋过程的认识<sup>[1]</sup>。目前卫星遥感海浪要素主要采用微波高度计和合成孔径雷达(SAR)等载荷,前者基于波浪周期和后向散射系数、有效波高的关系,用半经验方法<sup>[2]</sup>、神经网络方法<sup>[3]</sup>或者参数化方法<sup>[4]</sup>反演海浪周期;后者基于SAR所成图像反演海浪波长和周期信息<sup>[5]</sup>。这两种手段反演过程均较复杂。

2018年9月15日美国成功发射了ICESat-2卫星,卫星上搭载了光子计数体制的激光雷达系统ATLAS。有别于传统线性体制的激光雷达,ATLAS的探测器具有极高的灵敏度,能对单个光子进行响应,大大降低了对激光器能量的要求,保证了激光器能工作在高重频条件下。ATLAS系统的激光脉冲发射频率高达10 kHz,照射到地表的光斑直径约17 m,光斑中心间隔只有0.7 m<sup>[6]</sup>,在沿轨方向有极高的空间分辨率,可以直接获取更为精细的海面轮廓,为精细化海浪要素的探测提供了可能。ATLAS系统能提供从地表返回的每个光子的空间三维坐标信息(经度、纬度和相对于WGS84基准的高程值),其ATL03级数据直接给出了每个光子事件对应的发射时间和地球物理校正后的高程值(ATL03数据可以在美国冰雪数据中心网站<https://nsidc.org/data/icesat-2>下载)。ATLAS

激光在地表形成条带轨迹,一般将其数据可视化成沿轨的二维点云图,图中每个离散点代表一个光子事件,横坐标是相对沿轨距离(通过卫星飞行速度乘以激光相对发射时间得到),与光斑中心在地表的相对位置保持一致;纵坐标是光子事件对应的高程值。为了减少数据量,ATLAS在采集地表数据的时候根据地大致位置进行了时间“开窗”处理,即系统只对时间窗内的光子事件进行记录<sup>[7]</sup>,但是时间窗内的绝大多数光子事件仍然是噪声光子事件。由于ATLAS采用532 nm波长的探测激光,其对水体的强穿透性使得海面探测的事件中除了大气散射的噪声光子事件外,还存在水面以下水体后向散射的光子事件。以海面为观测对象,则水体后向散射的光子事件为噪声光子事件。水下接近水面的位置存在的大量后向散射噪声会直接影响到海面信号光子提取的准确度,且用传统方法难以剔除。相对于其他地表类型(陆地、陆冰、海冰),海面的反射率更低,准确提取出海面的信号光子事件具有更高的难度。

NASA官方基于统计的光子事件高程直方图给出了信号光子分布的高程区间,并且基于信噪比为每个光子事件贴上置信度标签,信号光子的置信度分“低/中/高”三个级别,标为“高”置信度的光子事件是信号光子事件的可能性最高<sup>[7]</sup>。该方法在不少区域获得了比较好的结果,但是在少数地区,特别是表面反射率比较低的区域或水下散射较强的区域存在把噪

声判定为信号光子的可能性,这种情况下需要新的针对性的海面信号提取方法。

近年来研究人员针对光子计数激光雷达的特点提出了一些信号提取算法。Neuenschwander 等人针对陆地地形和植被提出了一种称之为 DRAGANN 的算法,该方法计算每个点及其近邻点的距离,根据地表和植被信号光子之间的距离更小这一特点来区分信号和噪声,在陆地取得了比较好的去噪效果<sup>[8]</sup>。Herzfeld 等人利用径向基函数计算点密度,根据信号点和噪声点密度差别来提取地表和冠层光子,在选取密度阈值的时候部分依赖于经验<sup>[9]</sup>。Zhang 等人提出了一种修改的基于密度聚类的算法,选用了椭圆邻域,依赖预先选取的计算点密度的区域和经验参数来确定点密度阈值,适用于点云分布比较均匀的情况<sup>[10]</sup>。马跃基于 JONSWAP 海浪谱拟合廓线提出了一种海面信号光子提取算法,在选取的大尺度的开阔洋面的海平面高度计算方面得到了比较好的结果<sup>[11]</sup>。目前比较成熟的信号提取算法主要针对陆地目标,依赖经验确定阈值,没有考虑水下密度较大的后向散射光子;且海面波浪形态随海面风场有较大的变化,目前还缺少专门针对海浪形态研究的信号提取方法,上述方法直接用于海面信号光子的提取会造成较大误差。研究更具针对性的海面信号光子提取算法对光子计数体制星载激光雷达的海洋遥感应应用具有重要意义。

鉴于以上原因,文中提出了一种星载光子计数激光雷达海面信号提取方法,该方法在计算点密度以区分信号和噪声的时候实现了邻域和阈值的自适应,并且通过海面高程分布特点剔除水下后向散射噪声。文中还根据提取的信号光子计算了海浪波长和周期,证明了方法的有效性和探测海浪形态的可行性。

## 1 海面信号光子事件提取方法

### 1.1 算法概述

由于 ATLAS 的探测器能对单个光子进行响应并且记录下每个光子事件的三维空间坐标信息,所以 ATLAS 的数据量往往很大。图 1 所示为一段海面区域的 ATL03 级数据可视化后的点云图,这段沿轨距离为 3 km 的数据中有超过 2 万个光子事件,而且其中大部分为噪声光子事件。为了减少数据处理的计

算量,首先要对原始点云用简单的方法进行粗提取以确定信号光子和噪声光子大致所在的区间。海面高度随时间起伏变化,当海浪高度大于 1/7 波长的时候就会破碎<sup>[12]</sup>,所以海面廓线高度变化总体上比较平缓,海面信号光子集中在一定的高程范围内。ATLAS 每发脉冲间距极小,信号光子在某一方向上比较密集具有连续性,而海面噪声(包括太阳背景噪声和大气散射噪声以及水下后向散射噪声)则在整个空间内呈现随机分布特征<sup>[13]</sup>。鉴于上述特点,将点云按照高程进行直方图统计后,信号光子将集中在连续的几个高程片中,且这些高程片中的光子事件数量明显大于其他高程片。这样就可以确定信号光子和噪声光子各自所在的高程区间。

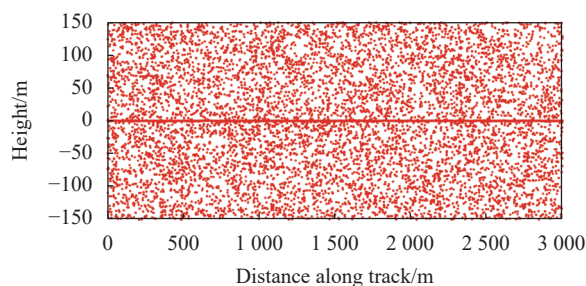


图 1 ATLAS 点云图

Fig.1 Point cloud diagram of ATLAS

考虑到经海面反射的信号光子密度要大于噪声,为进一步剔除靠近海面的噪声光子,选择基于点密度的方法去噪,这种方法涉及到邻域以及点密度阈值的选择。

虽然信号光子在一定方向上具有连续性,但是海面的随机波动导致无法提前预知海面局部起伏倾斜程度,也即无法确定信号光子连续性的方向,所以文中选择的计算点密度的邻域方法有别于传统方法。文中选用多个不同倾斜角度的椭圆邻域来计算邻域内的光子数量,并且将最大值作为该点的点密度值。图 2 所示的点云分布图中,两个不同方向的椭圆内“光子”数量分别为 1 和 3,则取最大值 3 作为椭圆中心光子点的密度值。噪声点在空间随机分布,不具有方向性,因此,在各个方向上计算的点密度值基本相同。用这种方法可以增加信号点和噪声点密度值的区分度。

由于海面高度总体上起伏比较平缓,而且倾斜度

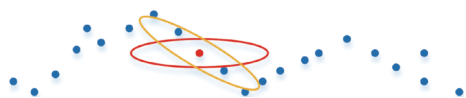


图 2 计算点密度的邻域示意图

Fig.2 Neighborhood diagram of calculating point density

较大的椭圆会让接近海面的噪声光子邻域中包含海面信号, 从而造成噪声光子密度较大, 将噪声光子误判为信号, 因此椭圆倾斜度不宜取值过大。另外, ATLAS 在海面上的光斑直径为十几米, 这一区间内的光子关联性较高, 所以将椭圆邻域的长轴设置为 20 m; ATLAS 的激光脉宽为 1.5 ns<sup>[14]</sup>, 对应高程值 0.23 m, 所以这里取椭圆邻域短轴长 0.4 m。分别计算粗提取后的噪声区间和信号区间的光子点密度值, 以噪声区间光子点中密度最大值作为区分信号点和噪

声点的阈值。

上述方法根据 ATLAS 系统特点设置了邻域尺寸, 并实现了搜索邻域和密度阈值的自适应。

粗提取和精提取过程已经可以剔除绝大部分环境噪声, 但是靠近水面的水体后向散射形成的噪声光子往往具有较大的点密度, 无法剔除干净。考虑到海面高程一般呈高斯分布或近高斯分布<sup>[15]</sup>, 对保留的光子事件再进行高程值的直方图统计, 并用高斯函数拟合直方图, 以确定最终的海面高程分布范围; 将范围外的点剔除后即可得到来自海面的信号光子事件。

### 1.2 海面信号光子提取流程

基于上述算法, 建立海面信号提取方法的流程图如图 3 所示。

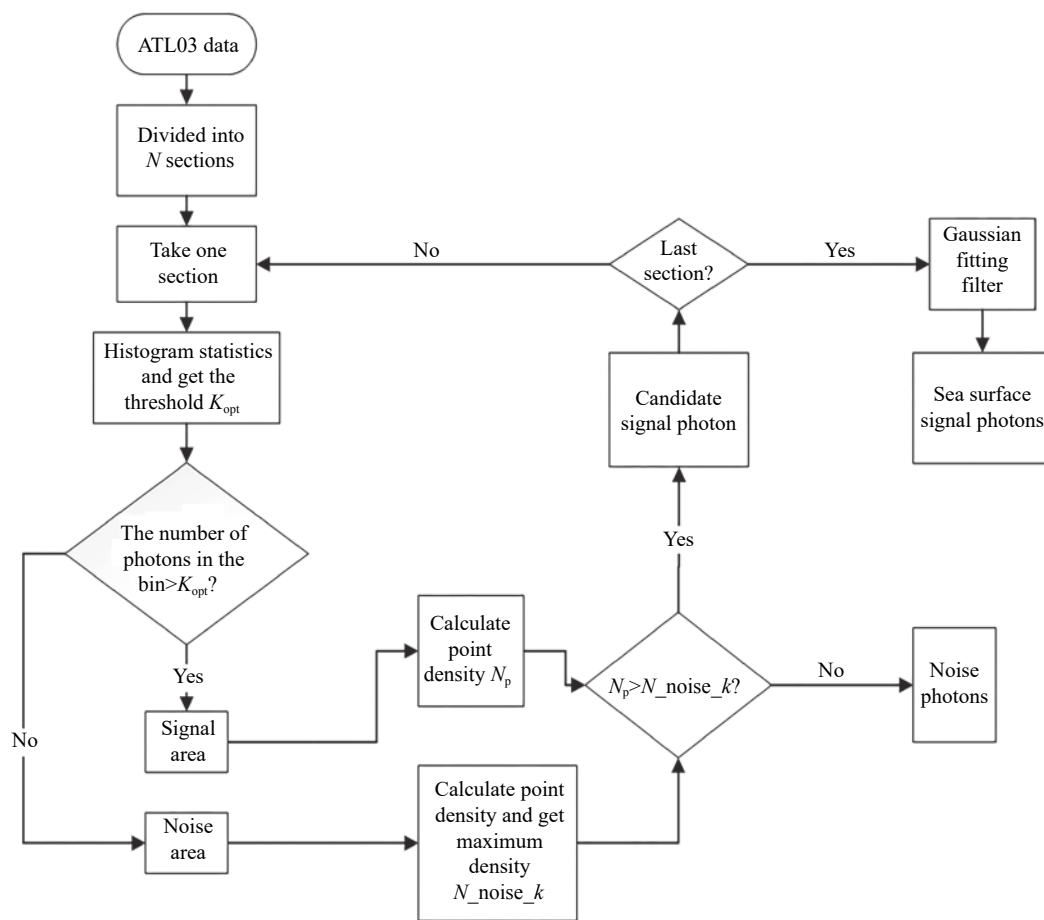


图 3 海面信号提取方法流程图

Fig.3 Flow chart of sea surface signal extraction

算法实现步骤如下:

按照沿轨距离分段进行处理, 300 m 为一段, 共分为

(1) 取研究区域 3 km 范围的 ATL03 数据, 将数据

10 段。



(2) 进行信号的粗提取。取一段数据,按照高程对数据进行直方图统计得到直方图  $N$ , 计算所有高程片中光子数的平均数,那么小于平均数的高程片就是噪声光子所在的高程片。计算噪声光子所在的高程片中离散点个数平均数  $N_{mean}$  及标准差  $N_{sigma}$ , 按照公式 (1) 得到阈值  $K_{opt}$ :

$$K_{opt} = N_{mean} + 3 \times N_{sigma} \quad (1)$$

考虑到水面位置的光子数是最多的,因此从直方图  $N$  最大值开始往两边按顺序依次查找,离散点数大于  $K_{opt}$  的高程片就是信号光子所在的高程片,以直方图  $N$  最大值所在高程片为中心的连续的信号光子所在的高程片组成信号光子所在高程区间,信号区间高程下限和上限分别为  $H_{min}$ 、 $H_{max}$ 。取噪声区间为  $[H_{max}, H_{max}+100]$ 。根据上面的描述,这一步中判定信号区间和噪声区间的阈值  $K_{opt}$  是基于数据自适应的。粗提取后在靠近海面的地方仍然掺杂着大量噪声光子,接下来需要将这部分噪声剔除。

这里用图 1 所示数据展示文中步骤处理结果,提取的信号光子如图 4 所示,为了看得更清楚,文中对纵坐标进行了缩放。

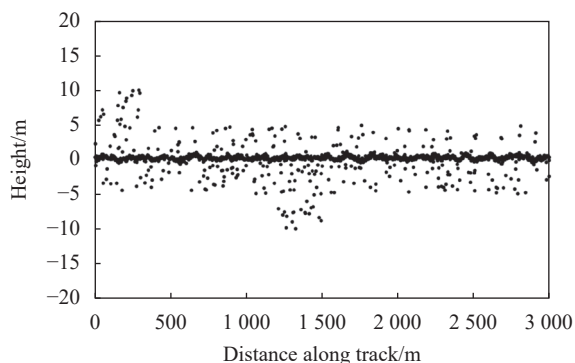


图 4 粗提取后的点云图

Fig.4 Point cloud diagram after rough extraction

(3) 选用不同倾斜角度的椭圆邻域来计算点密度值。每个点计算点密度的时候用倾斜度分别为  $-5, -4, -3, \dots, 3, 4, 5$  的椭圆邻域,计算邻域内的离散点个数,个数最大值作为该点的点密度值。其中倾斜度即椭圆长轴与水平方向的夹角。椭圆邻域的长轴长设置为 20 m,短轴长为 0.4 m。按照上述方法分别计算步骤 (2) 中得到的噪声区间的离散点密度值和信号区间的点密度值。

(4) 根据上一步计算得到的噪声区间的离散点密度值,取其最大值作为阈值  $P_{th}$ ,信号区间中密度值大于  $P_{th}$  的离散点判定为待选的信号光子,这一步中阈值  $P_{th}$  是自适应的。通过该步骤精处理后提取的信号光子如图 5 所示。

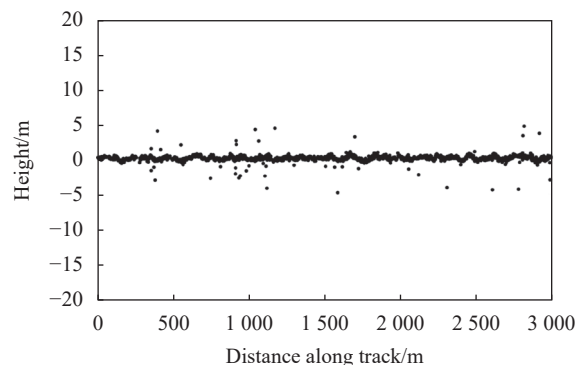


图 5 精提取后的点云图

Fig.5 Point cloud diagram after refined extraction

(5) 判断 10 段数据是否都已经处理完,如果是则接下来进行步骤 (6),否则取下一段数据重复步骤 (2)~(4)。

(6) 10 段数据都已经处理完后对所有的待选信号光子做直方图统计,得到直方图最大值  $HN_{max}$  及其对应的高程值  $H_{maxN}$ ,从直方图最大值位置开始向高程值较小的一侧查找,直至  $HN_{max}/2$  位置对应的高程值为  $H_{right}$ ,根据高斯函数的分布特征由公式 (2)

$$\sigma_{initial} = \frac{H_{maxN} - H_{right}}{\sqrt{2 \ln 2}} \quad (2)$$

计算得到高斯函数拟合的初始参数  $\mu = H_{maxN}$ ,  $\sigma = \sigma_{initial}$ 。对直方图进行高斯函数拟合,得到其均值  $\mu_{fit}$  和标准差  $\sigma_{fit}$ 。高程值在区间  $[\mu_{fit} - 3\sigma_{fit}, \mu_{fit} + 3\sigma_{fit}]$  内的信号光子为最终提取的海面信号光子。

文中用来展示的点云图均来自于 ICESat-2 的 ATL03 级数据,采集位置位于  $118.49^\circ\text{E}$ 、 $11.05^\circ\text{N}$  的太平洋海面。采集的白天数据对应的当地时间为 2020 年 12 月 11 日 13 时,点云图如图 6(a1) 所示,具有较低的信噪比,中间较密集的离散点是海面信号光子,海面上下都分布着大量噪声光子。采集的晚上数据对应的当地时间为 2020 年 3 月 14 日 2 时,如图 6(b1) 所示,海面上方大气散射噪声较少,噪声主要为海面以下的水体后向散射噪声。

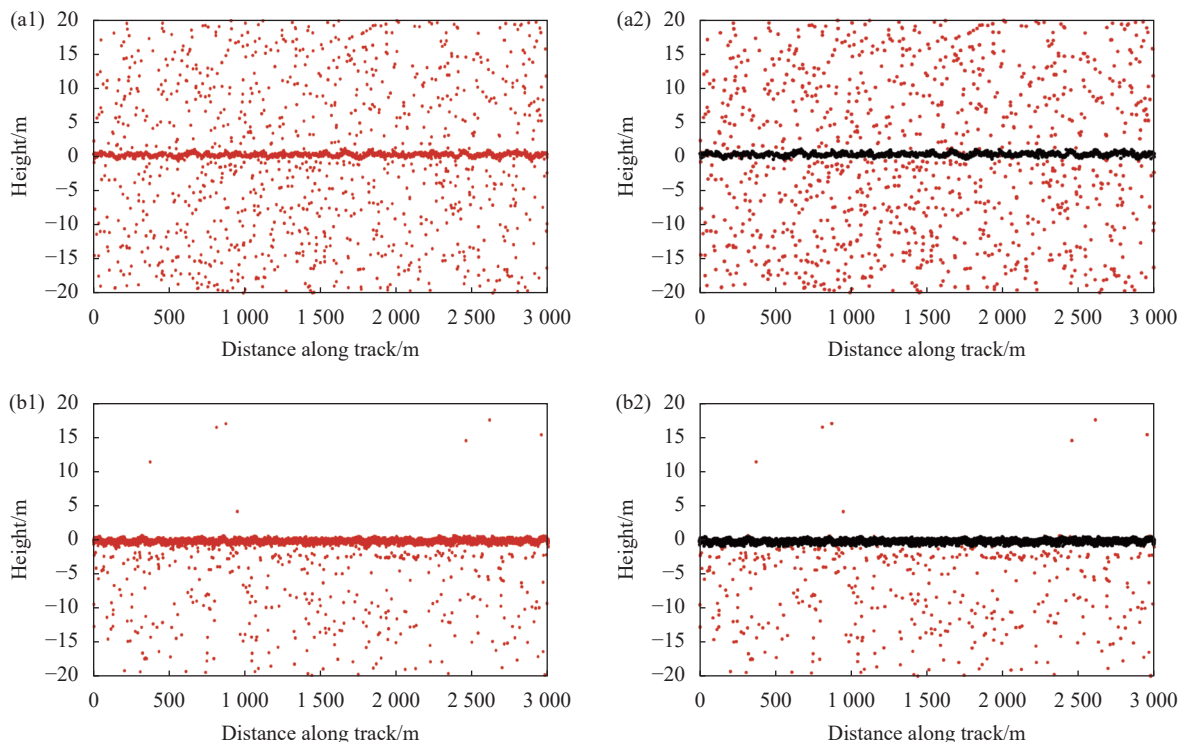


图 6 海面信号提取结果: 红色点为原始点云, 黑色点为用文中方法提取的海面信号点。(a1) 白天原始点云; (a2) 白天点云提取结果; (b1) 晚上原始点云; (b2) 晚上点云提取结果

Fig.6 The sea surface signal extraction results: the red points are the original point clouds, and the black points are the sea surface signal points extracted by the method in this paper. (a1) Daytime original point cloud; (a2) Extracted result of daytime point cloud; (b1) Nighttime original point cloud; (b2) Extracted result of nighttime point cloud

图 6(a1) 是图 1 按照纵坐标放大后的结果。结果显示: 无论白天和晚上数据, 水面上下的噪声都能通过文中的方法有效剔除。根据信号提取的结果可以得到图 6 白天点云的信噪比 (信号光子数与噪声光子数比值) 为 0.11, 图 6 晚上点云的信噪比为 47.03。

## 2 基于 ICESat-2 信号光子的海浪要素计算方法

基于上述的海面信号光子提取算法, 得到序列的海面信号光子, 以及轨向的海面廓线。因为单发激光脉冲平均海面回波信号光子数量极少, 往往不足 5 个<sup>[16]</sup>, 在风速较大或者大气透过率较低情况下甚至没有海面回波, 需要统计多发脉冲的高程值才能获得较为准确的海面高程。将去噪后的海面信号光子以 10 m (对应约 14 发脉冲) 为一段<sup>[17]</sup>, 统计段内光子事件的高程中值作为该段海面高程, 取段中心点位置为对应沿轨位置, 每段可以得到一个海面信号点, 连接所有海面信号点就得到了海面廓线。选择 10 m 为一段进行统

计是考虑要累计足够多的信号光子才能获取较准确的海面高程值, 所以累计长度不能太短; 同时段长越长则确定信号点所在的水平面位置的误差就越大, 从而导致计算海浪波长误差越大。ATLAS 光斑大小为十几米, 所以 10 m 内的光子关联度比较高。图 7(a) 所示为图 6 白天的 ATLAS 数据经过文中的方法提取的海面信号点云图, 其中黑色离散点为海面信号光子, 品红色曲线为得到的瞬时海面剖面廓线。

为了更清楚地看到海面廓线的细节, 图 7(a) 方框位置放大后得到图 7(b)。从图 7(b) 中可以明显看到海面由不同频率分量的波浪构成。

对提取的海面廓线做快速傅里叶变换 (FFT) 后得到幅频图, 如图 8 所示。海面廓线横坐标是沿轨距离, 做 FFT 之后对应的就是波数, 因此图 8 实际上是波浪幅度和对应波数的关系。图中峰值对应的波数取倒数得到峰值波长  $\lambda_0$ 。

ATLAS 激光在海面的轨迹与海浪传播方向有一个夹角  $\theta$ , 用公式 (3) 对波长  $\lambda_0$  进行修正, 可以得到更

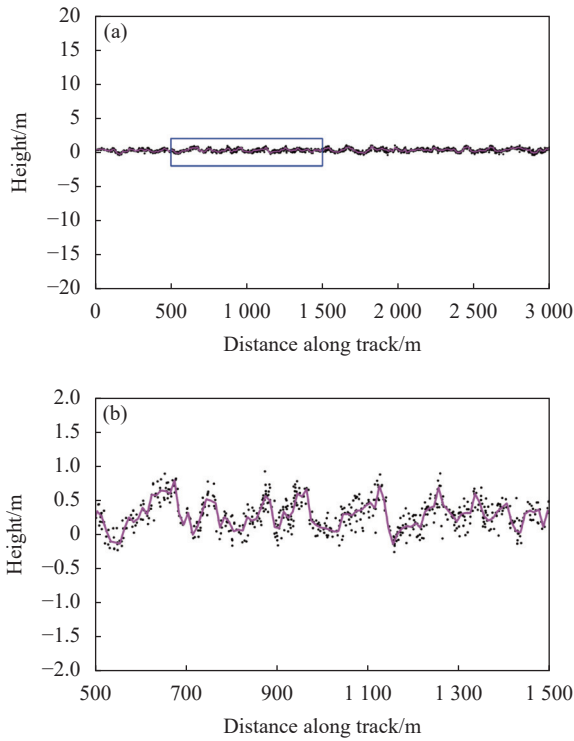


图 7 (a) 海面廓线获取结果图; (b) 海面廓线获取结果蓝色方框区域放大图

Fig.7 (a) Result of obtaining the sea surface profile; (b) Enlarged view of the blue box area of the obtained result of the sea surface profile

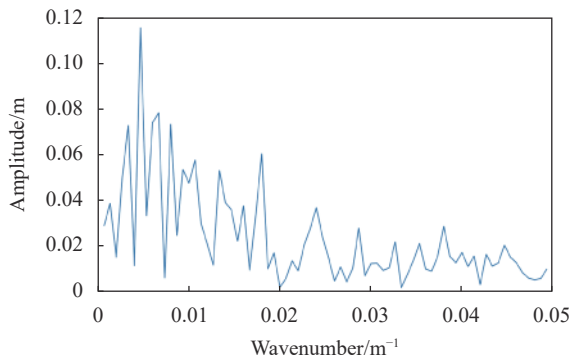


图 8 海面廓线 FFT 变换后的幅频图

Fig.8 Amplitude-frequency diagram of sea surface profile obtained by FFT transformation

为准确的峰值波长  $\lambda_{peak}$ :

$$\lambda_{peak} = \lambda_0 \cos \theta \quad (3)$$

海浪方向参考欧洲中期天气预报中心的再分析数据<sup>[18]</sup>。根据 ATLAS 的 03 级数据的经纬度值可以得到 ATLAS 照射到海面的轨迹,通过所研究区域轨迹起点和终点光子事件的经纬度可以计算出该区域

轨迹方向,海浪方向和 ATLAS 轨迹方向的夹角就是公式 (3) 中的  $\theta$ 。

根据线性波浪理论,海浪的波长  $\lambda_{peak}$ 、周期  $T_{peak}$ 、水深  $d$  满足以下频散关系公式 (4),其中  $g$  是重力加速度。在深水区  $\tanh\left(\frac{2\pi d}{\lambda_{peak}}\right) \approx 1$ ,公式 (4) 可以化简为公式 (5)。可见,深水区波周期只跟波长有关。将公式 (3) 计算得到的峰值波长代入公式 (5),就得到了峰值周期。

$$T_{peak} = \sqrt{\frac{2\pi\lambda_{peak}}{g \cdot \tanh\left(\frac{2\pi d}{\lambda_{peak}}\right)}} \quad (4)$$

$$T_{peak} = \sqrt{\frac{2\pi\lambda_{peak}}{g}} \quad (5)$$

用公式 (5) 计算峰值波周期的前提条件是  $\tanh\left(\frac{2\pi d}{\lambda_{peak}}\right) \approx 1$ ,容易证明当  $d > 0.4\lambda_{peak}$  的时候就可以满足条件,文中计算海浪峰值波长和周期就是在此条件下进行的,这样可以避免水深因素对计算结果的影响。因为海面廓线是每隔 10 m 取一个海面点得到的,文中的方法适用于计算较大尺度的峰值波长。

### 3 计算结果和验证

ECMWF 提供的 ERA5 海浪信息没有峰值波长信息只有峰值周期信息<sup>[19]</sup>,所以文中只选择用海浪峰值周期做验证。ERA5 数据时间粒度为 1 h,空间分辨率为 0.25°,考虑到较大尺度的海浪方向和周期对时空变化不敏感,在选取与 ATLAS 数据对应时空的 ERA5 数据的时候采取就近原则,即将 ATLAS 数据平均时间按照小时四舍五入得到需要的 ERA5 数据的时间,空间上取距离所研究的 ATLAS 数据中点位置经纬度最近的经纬度的 ERA5 数据。为了验证文中方法的普适性,在太平洋选择了不同轨道、不同时间、不同水深、不同风速条件下的多个海面位置,相应位置信息和环境参数如表 1 所示。

分别以这 7 个位置为中心选择一段沿轨距离长度为 3 km 的 ATL03 级数据,用文中第 1 部分所述的方法提取海面信号光子,然后将每段数据按照第 2 部分所述方法计算海浪峰值波长并且用公式 (5) 计算峰值波周期,最后将计算的峰值波周期与 ERA5 峰值波

表 1 研究区域对应的参数和计算结果

Tab.1 Parameters and calculation results of the study area

Parameters	Site 1	Site 2	Site 3	Site 4	Site 5	Site 6	Site 7
Longitude (°E)	110.79	110.63	110.59	110.66	109.72	109.75	109.79
Latitude (°N)	5.59	7.25	7.24	7.26	17.08	17.08	17.08
ATLAS beam number	gt2r	gt2r	gt1r	gt1r	gt1r	gt2r	gt3r
Time	Night	Night	Night	Day	Day	Day	Day
Water depth/m	470	1900	1850	1880	180	240	300
Wind speed/m·s <sup>-1</sup>	2.0	2.9	2.9	5.6	5.6	5.6	5.6
Peak period calculated in this paper/s	8.20	8.01	8.47	4.10	6.60	6.76	6.60
ERA5 peak period/s	8.10	8.07	8.07	4.48	6.56	6.56	6.56
Absolute error/s	0.1	0.06	0.40	0.38	0.04	0.2	0.04
Relative error	1.2%	-0.7%	4.9%	-8.4%	0.6%	3.0%	0.6%

周期进行比较。各个位置的数据采集对应的环境参数及计算结果如表 1 所示。从表 1 可以看到在不同的环境条件下,通过文中的方法计算的峰值波周期的误差均不超过 1 s,相对误差都在 10% 以内,超过半数的误差在 5% 以内,而一般波浪参数的测量精度在 5%~10%<sup>[20]</sup>。这一结果一方面验证了海面信号提取的准确性,另一方面也说明了用文中方法计算深水(水深大于 0.4 倍海浪峰值波长)海浪要素的可行性。另外,根据文献 [21] 的结论在风速大于 7 m/s 的时候,平均单脉冲海面回波信号光子数可能不足 1 个,在信噪

比较低的白天无法准确获取海面信号光子,所以在选择研究区域的时候风速都没有超过 7 m/s。

将用基于文中信号提取方法提取的海面信号光子计算的结果(方法 1)与用 ICESat-2 官方处理的置信度为“高”的信号光子计算的结果(方法 2)进行对比,二者计算的峰值波周期误差如表 2 所示。可以看到,方法 2 在晚上的误差比较小,但是白天的误差非常大,整个误差波动较大。整体上看,方法 1 的误差要明显小于方法 2,比方法 2 更可靠。

表 2 用文中的方法和官方 ATL03 数据高置信度提取的海面信号光子计算海浪峰值波周期误差对比

Tab.2 Comparison of peak wave period errors calculated by the method in this paper and the sea surface signal photons extracted with the official ATL03 high confidence data

Signal photon's source	Site 1	Site 2	Site 3	Site 4	Site 5	Site 6	Site 7
Data time	Night	Night	Night	Day	Day	Day	Day
Calculated by this paper's method	1.20%	-0.70%	4.90%	-8.40%	0.60%	3.00%	0.60%
Calculated based on ATL03 high confidence data	0.37%	-4.34%	4.96%	368.75%	0.61%	18.29%	9.15%

#### 4 结 论

针对目前星载光子计数激光雷达海面信号水平低,信号光子提取难的问题,文中提出了一种新的信号提取方法。有别于传统计算点密度的方法,文中考虑了海面起伏对信号提取的影响,为了更准确地提取海面信号采用了多个不同角度的椭圆邻域并取最大值的方法。文中还根据 ATLAS 激光雷达特点设置了邻域尺寸,并实现了密度阈值的自适应。针对靠近水

面密度较大的因水体后向散射形成的噪声光子难以用传统方法剔除的问题,文中根据海面高度分布特点采用了高斯函数拟合的方法。信号提取结果显示,在信噪比较低的白天和在水下后向散射较强的晚上,文中的方法都能取得较好的效果。基于文中提取出的海面信号光子序列得到了海面廓线,进一步计算海浪峰值波长和峰值周期,将计算结果与 ECMWF 的 ERA5 数据作对比,在水深大于 0.4 倍海浪峰值波长、海面风速不超过 7 m/s 的水域,两者的相对误差都在 10%



以内,超半数误差在 5% 以内,证明了文中提出的海面信号提取方法的准确性和稳定性,也初步证明了用星载光子计数激光雷达计算海浪峰值波长和峰值周期的可行性。文中的方法为用星载光子计数激光雷达探测海面以及计算海浪要素提供了参考。

#### 参考文献:

- [1] Liu Y G. Satellite Oceanography[M]. Beijing: Higher Education Press, 2009. (in Chinese)
- [2] Gommenginger C P, Srokosz M A, Challenor P G, et al. Measuring ocean wave period with satellite altimeters: A simple empirical model [J]. *Geophysical Research Letters*, 2003, 30(22): 2150.
- [3] Quilfen Y, Chapron B, Collard F, et al. Calibration/validation of an altimeter wave period model and application to TOPEX/Poseidon and Jason-1 altimeters [J]. *Marine Geodesy*, 2004, 27(3-4): 535-549.
- [4] Mackay E B L, Retzler C H, Challenor P G, et al. A parametric model for ocean wave period from Ku band altimeter data [J]. *Journal of Geophysical Research: Oceans*, 2008, 113(C3): C03029.
- [5] Yang J S. Synthetic Aperture Radar Remote Sensing Technology for Sea Surface Wind Field, Ocean Wave and Internal Wave[M]. Beijing: China Ocean Press, 2005. (in Chinese)
- [6] Neumann T A, Martino A J, Markus T, 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.
- [7] Neumann T, Brenner A, Hancock D, et al. Algorithm theoretical basis document (ATBD) for global geolocated photons[R]. Washington: National Aeronautics and Space Administration, 2021.
- [8] Neuenschwander A, Pitts K. The ATL08 land and vegetation product for the ICESat-2 Mission [J]. *Remote Sensing of Environment*, 2019, 221: 247-259.
- [9] Herzfeld U C, McDonald B W, Wallin B F, et al. Algorithm for detection of ground and canopy cover in micropulse photon-counting lidar altimeter data in preparation for the ICESat-2 mission [J]. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 2013, 52(4): 2109-2125.
- [10] Zhang J, Kerekes J. An adaptive density-based model for extracting surface returns from photon-counting laser altimeter data [J]. *IEEE Geoscience and Remote Sensing Letters*, 2014, 12(4): 726-730.
- [11] 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.
- [12] Trujillo A P, Thurman H V. Essentials of Oceanography[M]. 11st ed. Translated by Zhang Ronghua, Li Xinzheng, Li Anchun. Beijing: Publishing House of Electronics Industry, 2017. (in Chinese)
- [13] Morison J, Hancock D, Dickinson S, et al. Algorithm theoretical basis document (ATBD) for ocean surface height[R]. Maryland: Goddard Space Flight Center Greenbelt(NASA), 2021.
- [14] 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.
- [15] Zapevalov A, Pokazeev K, Chaplina T. Simulation of the Sea Surface for Remote Sensing[M]. Cham, Switzerland: Springer, 2021.
- [16] Zhang W H, Li S, Ma Y, 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. (in Chinese)
- [17] Nilsson B, Andersen O B, Ranndal H, et al. Consolidating ICESat-2 ocean wave characteristics with CryoSat-2 during the CRYO2 ICE campaign [J]. *Remote Sensing*, 2022, 14(6): 1300.
- [18] Klotz B W, Neuenschwander A, Magruder L A. High-resolution ocean wave and wind characteristics determined by the ICESat-2 land surface algorithm [J]. *Geophysical Research Letters*, 2020, 47(1): e2019GL085907.
- [19] Hersbach H, Bell B, Berrisford P, et al. ERA5 hourly data on single levels from 1979 to present[EB/OL]. (2018-06-14) [2021-12-03]. <https://cds.climate.copernicus.eu/cdsapp#!/dataset/reanalysis-era5-single-levels?tab=overview>.
- [20] He Y J, Qiu Z F, Zhang B, et al. Wave Observation Technology[M]. Beijing: Science Press, 2015. (in Chinese)
- [21] Zhou X, Yang J, Li S. Model of sea surface echos from spaceborne single photon lidar [J]. *Acta Optica Sinica*, 2021, 41(19): 1928002. (in Chinese)