

## 激光与光电子学进展

## ICESat-2 卫星激光雷达系统脉冲响应与海洋光学参数反演研究

赵正<sup>1</sup>, 张智宇<sup>1\*</sup>, 吴松华<sup>1,2</sup><sup>1</sup>中国海洋大学信息科学与工程学部, 山东 青岛 266100;<sup>2</sup>崂山实验室, 山东 青岛 266237

**摘要** ICESat-2 卫星搭载了全球首个光子计数体制激光雷达系统 ATLAS (Advanced topographic laser altimeter system), 该系统高重复频率、多波束的设计可以提供空间分辨率更高的水体剖面数据。但 ATLAS 系统获取的水体剖面信号存在“后脉冲”现象, 制约了观测数据的应用, 需要通过反卷积算法进行校正, 而合适的系统脉冲响应函数是反卷积算法的核心。首先, 确定“后脉冲”的可能来源, 在此基础上, 通过理论推导明确反卷积算法中系统脉冲响应函数的要求, 并据此提出数据质量控制算法, 使用盐沼和沙漠数据建立系统脉冲响应函数, 通过分析 ex-Gaussian 拟合结果发现, 使用沙漠和盐沼数据建立的系统脉冲响应函数脉宽分别为 0.095 和 0.142, 相差 0.047, 该差异可以通过质量控制方法降低到 0.002; 然后, 分别利用盐沼和沙漠两种数据生成的系统脉冲响应函数对水体信号进行反卷积, 并反演水体的后向散射系数和颗粒物后向散射系数; 最后, 反演结果表明, 在黑海水域, 如果不进行质量控制, 利用盐沼数据建立的系统脉冲响应函数的反演结果误差更小, 而经过质量控制后, 利用沙漠和盐沼数据建立的系统脉冲响应函数的反演结果误差接近。

**关键词** 星载激光雷达; 系统脉冲响应; 数据质量控制; 海洋光学参数

中图分类号 P714<sup>+</sup>.1

文献标志码 A

DOI: 10.3788/LOP241108

## Impulse Response of ICESat-2 Satellite LiDAR System and Inversion Study of Ocean Optical Parameters

Zhao Zheng<sup>1</sup>, Zhang Zhiyu<sup>1\*</sup>, Wu Songhua<sup>1,2</sup><sup>1</sup>Faculty of Information Science and Engineering, Ocean University of China, Qingdao 266100, Shandong, China;<sup>2</sup>Laoshan Laboratory, Qingdao 266237, Shandong, China

**Abstract** The ICESat-2 satellite carries the world's first photon-counting system LiDAR system, i. e., the advanced topographic laser altimeter system (ATLAS), whose high repetition frequency and multibeam design can provide water-profile data with high spatial resolutions. However, the water-profile signals acquired by the ATLAS exhibits “after pulse” which restricts the application of the observation data and must be corrected using an inverse convolution algorithm, where an appropriate system impulse-response function is the core of the inverse convolution algorithm. In this study, the possible sources of “after pulse” are first identified, based on which the requirements of the system impulse-response function in the deconvolution are clarified through theoretical derivation, and a data-quality control algorithm is proposed on this basis, and the system impulse-response function is established using salt-marsh and desert data. Based on an analysis of ex-Gaussian fitting results, the pulse widths of the system impulse-response functions established using the desert and salt-marsh data are 0.095 and 0.142, a difference of 0.047, which can be reduced to 0.002 using quality-control methods. Subsequently, the system impulse-response functions generated from the two types of surface data are used to back-convolute the water body signals and invert the backward scattering coefficients of the water body and particulate matter. Finally, the inversion results show that in the Black Sea waters, without quality control, the inversion error of the system impulse-response function based on salt-marsh data is smaller, whereas after

收稿日期: 2024-01-31; 修回日期: 2024-04-17; 录用日期: 2024-04-28; 网络首发日期: 2024-05-06

基金项目: 国家自然科学基金青年科学基金(42206181)、国家自然科学基金联合基金(U2106210)、山东省自然科学基金(ZR2022QD125)、中国博士后科学基金(2021TQ0313)、“观澜一号”(GL-1)地面系统(LSKJ202201202)、中央高校基本科研业务费(202213049)

通信作者: \*zhangzhiyu@ouc.edu.cn

quality control, the inversion results using desert and salt-marsh data as the system impulse response-function indicate similar errors.

**Key words** spaceborne LiDAR; system impulse response; data quality control; ocean optical parameters

## 1 引言

针对海洋水体光学性质的变化及其影响机制的研究对于建立高精度的水色遥感反演方法、利用光学手段监测悬浮颗粒物的动态变化、预测水下能见度的变化以及利用光学手段研究短时间尺度下的海洋和天气变化过程对水体的影响具有重要意义。星载激光雷达可以实现全天时、高分辨率的全球观测,为遥感测绘及海洋科学等多个研究领域提供了大量全球观测数据<sup>[1]</sup>。Churnside 等学者<sup>[2]</sup>使用线性模式星载激光雷达系统 CALIOP (Cloud-aerosol lidar with orthogonal polarization) 获取观测数据,并据此反演了太平洋和印度洋海域中的叶绿素浓度,与 MODIS (Moderate resolution imaging spectroradiometer) 参考值的相关系数不超过 50%,推测海洋次表层散射信号可能与平均叶绿素浓度和叶绿素浓度随深度的分布相关。但 CALIOP 仅可获取层积分的海洋光学参数,无法获取高分辨率水体剖面信号<sup>[3]</sup>。

为监测海陆冰高程变化、测量全球植被冠层高度,美国国家航空航天局(NASA)于2018年11月发射了首颗搭载光子计数激光雷达系统 ATLAS (Advanced topographic laser altimeter system) 的卫星 ICESat-2 (Ice, cloud and land elevation satellite-2)<sup>[4]</sup>。ATLAS 发射系统采用 532 nm 波长微脉冲、10 kHz 高重复频率和三强三弱 6 个波束的设计,接收系统使用高灵敏度的光电倍增管作为单光子探测器,获取到了具有高时空分辨率的全球观测点云数据。由于 532 nm 波长激光可以穿透海水次表层,ATLAS 系统还可以获取水体剖面信号,其接收系统最高有 50 ps 的分辨率,为实现垂直方向高分辨率水体光学参数的反演提供了可能<sup>[5]</sup>。

与线性模式激光雷达的数据处理方法不同,光子计数制激光雷达需要累积一定长度的光子事件来获取水体剖面信号。将直接累积的水体剖面信号用于水体地球生物化学特征的研究存在问题:NASA 的 Lu 等<sup>[6]</sup>在研究中发现,ATL03 系统获取的水体剖面信号在对数轴上存在明显的“后脉冲”(After-pulse)现象,通过对比沙漠、冰、融水池和水体剖面信号,确定了地表以下 2.25、4.20、6.45、8.40 m 处存在 4 个后脉冲;此后,Lu 等<sup>[7]</sup>仿照处理 CALIOP 回波信号中“后脉冲”现象的方法,使用反卷积方法对 ATL03 系统的水体剖面信号进行了后脉冲修正,将修正后的剖面信号用于反演水体漫射衰减系数、后向散射系数和遥感反射比,与 MODIS 数据相比,6 轨 ATL03 数据反演的平均误

差不超过 30%,将后脉冲修正结果进一步应用,计算了极地地区浮游植物生物量,在南极冰缘水下 15 m 深度范围内观测到了生物量超过 250 mg/m<sup>3</sup> 的赤潮现象,为研究极地地区生态环境提供了数据支撑<sup>[8]</sup>。为提高反演结果的准确性,中国海洋大学的俄相颖及其科研团队<sup>[9]</sup>提出了水体信号的质量控制方法,利用基于沙漠地区数据建立的系统脉冲响应函数修正质量控制后的水体剖面信号,反演了 2019 年全年西北太平洋大范围海域的漫射衰减系数、遥感反射比等多个水体光学参数,与 MODIS 数据的平均相对误差不超过 30%,具有较好的一致性。为评估反演过程中各步骤对反演结果的影响,俄勒冈州立大学的 Eidam 等<sup>[10]</sup>对使用不同方法得到的水体漫射衰减系数反演结果进行评估,明确了噪声去除、分组累积及海表信号剔除等过程分别对反演结果造成的误差在 6%~17% 之间。除了水体数据本身外,反卷积算法也会影响反演精度,山东科技大学的 Zheng 等<sup>[11]</sup>及武汉大学科研团队使用 Richardson-Lucy 反卷积方法对传统反卷积算法进行优化,反演了水体叶绿素浓度,与 MODIS 数据比对,平均绝对百分比误差低于 15%,与 BGC-Argo 比对的相关系数  $R^2$  大于 85%,取得了较好的一致性。为获取 ATLAS 系统脉冲响应特性,建立合理的系统脉冲响应函数,NASA 的 Christopher 及其科研团队<sup>[12]</sup>通过 ATLAS 系统开展了零距离靶标的地面定标实验,证实了光纤端面反射对回波信号的影响,并通过团队中 Adam 使用的 ex-Gaussian 拟合方法得到了每个通道的拟合参数<sup>[13]</sup>,为后续研究提供了 ATLAS 系统脉冲响应参考值。

不同团队使用不同的地表信号数据建立系统响应脉冲函数进行反卷积,由于所采用的质量控制方法和地表类型等因素存在差异,不利于结果的横向比较和定量分析误差来源。为明确地表类型和质量控制方法对建立系统脉冲响应函数和后续反演结果的影响,本文采用前人研究中使用的沙漠和盐沼两种类型地表数据作为建立系统脉冲响应函数的数据源,通过分析后脉冲产生原因并确定统一的数据质量控制方法,对沙漠和盐沼数据进行质量控制,建立系统脉冲响应函数。在结果评估中,将建立的系统脉冲响应函数和对水体信号反卷积后的水体光学参数反演结果作为评估依据,以地面定标实验结果和 MODIS、BGC-Argo 提供的数据作为参考真值,对使用沙漠和盐沼数据引入的不确定度及使用进行质量控制后的沙漠和盐沼数据引入的不确定度进行定量评估。

## 2 系统脉冲响应函数理论模型

### 2.1 后脉冲形成原因

图 1(a)是 ICESat-2 卫星于 2019 年 10 月 16 日在当地时间 20 时 16 分飞跃大西洋海域上空时(gt3r 强波束)测得的光子点云数据,图 1(c)是 ICESat-2 卫星于 2018 年 12 月 17 日在当地时间 00 时 54 分飞跃乌尤尼盐沼上空时(gt3r 强波束)测得的光子点云数据,两图中横轴表示相对沿轨距离,纵轴表示光子事件的椭球高,每个离散点表示一个光子事件。图 1(b)是图 1(a)中光子事件的累积直方图,图 1(d)是图 1(c)中光子事件的累积直方图,两图中横轴表示 1 ns 时间内的光子事件数,纵轴表示相对海洋表面的椭球高,其中图 1(b)对水下部分光子点云的高程进行了折射率校正。图 1(a)中,黄色箭头指示的点云层位于海洋表面,红色箭头指示的点云层位于海表以下,分别对应图 1(b)中红色箭头指示的  $-1.67\text{ m}$  ( $15\text{ ns}$ ) 和  $-3.11\text{ m}$  ( $28\text{ ns}$ ) 两个信

号峰;图 1(c)中,黄色箭头指示的点云层位于盐沼表面,红色箭头指示的点云层和红色框内的光子点云层位于地表以下,分别对应图 1(d)中红色箭头指示的  $-2.25\text{ m}$  ( $15\text{ ns}$ ) 和  $-4.20\text{ m}$  ( $28\text{ ns}$ ) 两个信号峰及图 1(d)中红色框线内的信号峰。正常情况下,对于水体信号,经过水体的吸收和散射,光子事件的密度应随着水深增加呈指数衰减,但水下  $1.67\text{ m}$  和  $3.11\text{ m}$  两处光子事件的密度显著高于上层水体光子事件的密度,目前的研究将此现象称为“后脉冲”。陆地信号中在地表以下  $2.25\text{ m}$  和  $4.20\text{ m}$  两处也存在相似的“后脉冲”,且地表以下  $10\sim 40\text{ m}$  之间还存在一个与其他信号脉宽不同的“后脉冲”。“后脉冲”的存在虽然不影响陆地地表高程的测量,但会对水体光学参数的反演结果产生显著影响。目前的研究中,将“后脉冲”的形成过程近似为线性系统响应,通过反卷积的方法进行校正。为了验证该近似算法的合理性,需要分析“后脉冲”的形成原因。

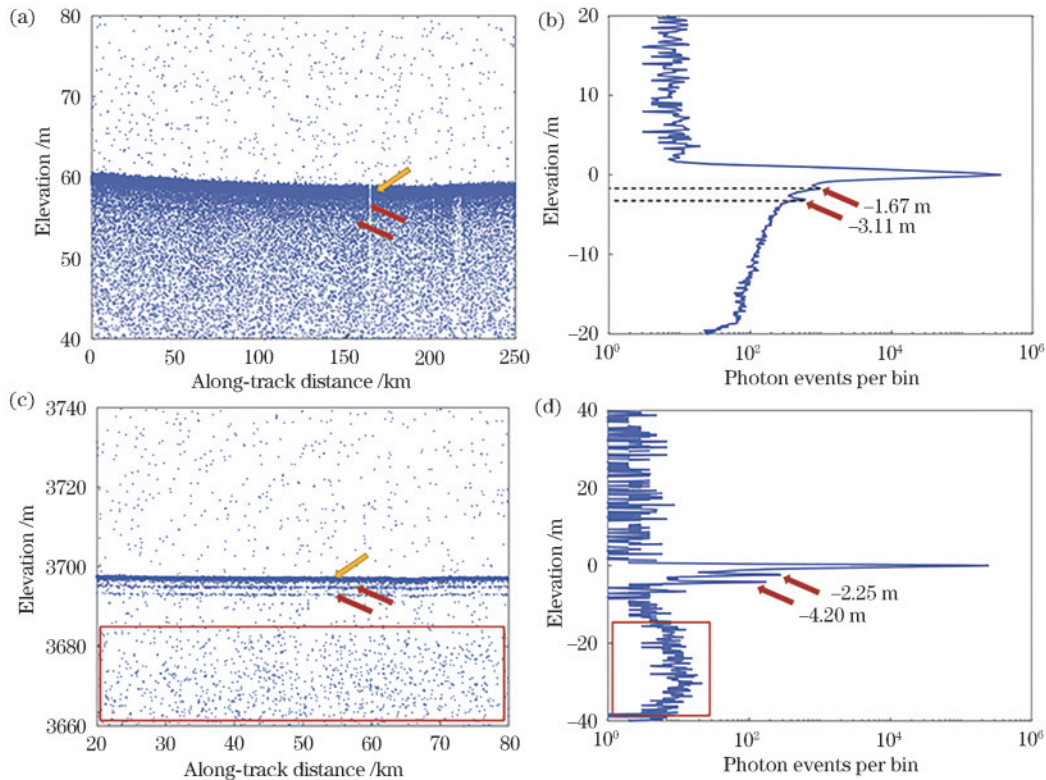


图 1 ATLAS 系统大西洋和乌尤尼盐沼地区夜间数据。(a)大西洋海域光子点云;(b)大西洋海域光子事件累积直方图;(c)乌尤尼盐沼地区光子点云;(d)乌尤尼盐沼地区光子事件累积直方图

Fig. 1 ATLAS nighttime data for the Atlantic and the Uyuni Salt Marsh region. (a) Atlantic photon point cloud; (b) Atlantic histogram of photon event accumulation; (c) Uyuni salt marsh region photon point cloud; (d) Uyuni salt marsh region histogram of photon event accumulation

根据脉宽的不同,“后脉冲”现象可分为脉宽与表面信号脉宽相近的 I 类“后脉冲”和脉宽与表面信号存在明显差异的 II 类“后脉冲”。其中, I 类“后脉冲”强度普遍高于水体信号, II 类“后脉冲”强度普遍低于水体信号。

不同信号中的 I 类“后脉冲”现象如图 2 所示,是 ATLAS 系统在不同目标表面测得光子信号的累积直

方图按峰值强度的归一化结果,图中横轴表示光子事件相对地面位置的飞行时间,纵轴表示归一化后单个时间片段内的相对强度。图 2(a)为 ATLAS 系统在发射前利用硬靶目标进行系统脉冲响应测试得到的 Beam 1 通道强波束光子事件累积直方图,按峰值位置的强度进行归一化,其中 AP0<sub>c</sub> 表示硬靶目标产生的回波信号,可以

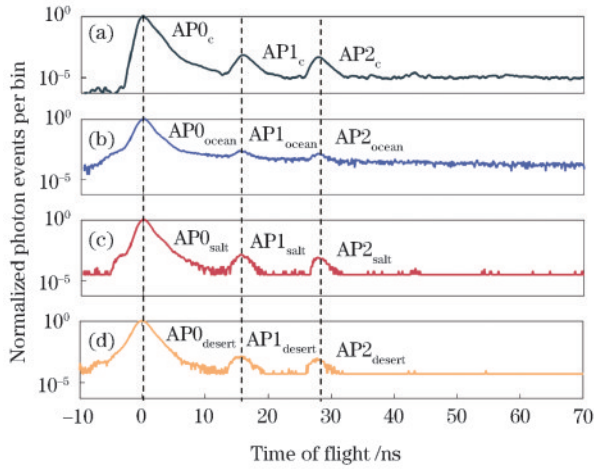


图 2 不同表面光子事件累积直方图。(a)地面实验数据累积结果；(b)在轨大洋数据累积结果；(c)在轨盐沼数据累积结果；(d)在轨沙漠数据累积结果

Fig. 2 Accumulation histogram of photon events on different surfaces. (a) Accumulation of ground experiment data; (b) accumulation of on-orbit ocean data; (c) accumulation of on-orbit salt marsh data; (d) accumulation of on-orbit desert data

表 1 AP1、AP2 与 AP0 的相对位置及相对强度对比

Table 1 Comparison of relative positions and relative intensities of AP1, AP2, and AP0

Surface type	POS <sub>AP1</sub> /ns	POS <sub>AP2</sub> /ns	AP1 /AP0	AP2 /AP0	$\sigma_{AP0}$
Test hard target	15.47	27.91	$1.300 \times 10^{-3}$	$7.600 \times 10^{-4}$	$6.100 \times 10^{-2}$
Ocean	15.35	27.85	$2.455 \times 10^{-3}$	$1.405 \times 10^{-3}$	$2.452 \times 10^{-1}$
Salt marsh	15.45	27.75	$1.226 \times 10^{-3}$	$7.933 \times 10^{-4}$	$1.250 \times 10^{-1}$
Desert	15.50	27.70	$1.368 \times 10^{-3}$	$8.521 \times 10^{-4}$	$2.334 \times 10^{-1}$

对比表 1 中 AP1 和 AP2 位置可知,水体、盐沼和沙漠信号的 AP1 和 AP2 峰值位置与地面实验结果的相对误差不超过 1%。对比表 1 中 AP1/AP0 和 AP2/AP0 的比值可以发现,盐沼和沙漠地表的 AP1 和 AP2 与接收信号的比值与地表实验结果基本一致,相对误差小于 10%。而海洋的 AP1 和 AP2 与接收信号之比与其他地表实验结果存在显著差异。造成该现象的原因可能是 532 nm 激光可以穿透水面,海洋水体的“后脉冲”中叠加了部分水体散射信号,导致其 I 类“后脉冲”幅值偏高。AP0<sub>ocean</sub>、AP0<sub>salt</sub> 和 AP0<sub>desert</sub> 的拟合结果中脉宽  $\sigma$  均显著大于地面实验结果,表明在轨数据累积结果相对于硬靶目标的回波信号存在明显展宽。

NASA 在 ATLAS 数据的 ATBD 中将图 2(a)至 (d) 中 15 ns 和 28 ns 处的两个“后脉冲”归因于信号饱和或接近饱和<sup>[15]</sup>; Christopher 通过光线追击的方法对 AP1<sub>c</sub>、AP2<sub>c</sub> 产生原因进行分析,推测 AP1<sub>c</sub> 和 AP2<sub>c</sub> 可能是接收信号在光纤端面多次反射延迟进入单光子探测器产生的信号峰<sup>[12]</sup>。本文对“后脉冲”的分析可以与 Christopher 的结果相互印证,因此可以推测图 2(b)、(c) 和 (d) 中 I 类“后脉冲”AP1 和 AP2 的来源是接收信号在光学系统内的多次反射。

根据滨松光子提供的光电倍增管(PMT)白皮书,

观察到除了硬靶目标的反射信号外,探测器还探测到了 AP1<sub>c</sub> 和 AP2<sub>c</sub> 两个脉冲信号。图 2(b) 为 ATLAS 系统在大西洋地区获取的夜间光子点云数据沿轨累积 200 km 得到的光子事件累积直方图。图 2(b) 中 AP0<sub>ocean</sub> 为海洋表面产生的回波信号,同样可以在主脉冲后观察到两个“后脉冲”(AP1<sub>ocean</sub> 和 AP2<sub>ocean</sub>)。图 2(c) 和 (d) 分别为 ATLAS 系统在乌尤尼盐沼和撒哈拉沙漠获取的夜间光子点云数据累积直方图,其中 AP0<sub>salt</sub> 为盐沼表面产生的回波信号,AP0<sub>desert</sub> 为沙漠表面产生的回波信号。

对比图 2(a)、(b)、(c) 和 (d) 可知,3 种地形的 AP1 和 AP2 峰值位置均与地面定标实验中对应的峰值位置接近。AP1<sub>salt</sub> 和 AP1<sub>desert</sub> 的强度与 AP1<sub>c</sub> 接近,AP2<sub>salt</sub> 和 AP2<sub>desert</sub> 的强度与 AP2<sub>c</sub> 接近。对比 ATLAS 系统在不同地表获取的光子事件累积直方图可以发现,在多种地表信号中均存在“后脉冲”,且它们产生的位置基本相同,幅值与接收信号脉冲存在相关性。为对“后脉冲”进行定量分析,利用 ex-Gaussian 函数对图 2 中的光子事件累积直方图进行拟合<sup>[14]</sup>,拟合结果如表 1 所示,其中  $\sigma_{AP0}$  为回波信号经 ex-Gaussian 拟合后的脉宽。

PMT 接收信号后会导致管内气体发生电离,电离气体中的阳离子可能被光阴极捕捉,形成后脉冲,PMT 后脉冲与接收信号时间相差几十至几百纳秒,波形与接收信号呈非线性关系<sup>[16]</sup>。II 类“后脉冲”与目标表面后向散射信号的时间间隔在 60~300 ns 之间,且波形与目标表面后向散射信号的波形存在明显差异。II 类“后脉冲”的时间和波形特性与 PMT 后脉冲的特性相符,有较大可能性是 PMT 后脉冲<sup>[17]</sup>。

## 2.2 建立系统脉冲响应函数的数据要求

ATLAS 系统测得的水体信号可以近似为来自海水表面和水体的信号经接收光学系统后的响应。如果将 PMT 和接收光学系统对接收信号的响应近似为线性系统,则可以在已知系统响应函数的情况下,通过反卷积求解实际的接收信号,达到消除“后脉冲”的目的<sup>[18]</sup>。根据经典信号分析理论,一个线性系统的系统脉冲响应函数可以通过系统对单位脉冲信号的响应进行求解。当进入接收光学系统的激光脉冲脉宽极窄时,可以近似为单位脉冲信号,因此,ATLAS 系统在地面测试时获得的接收光学系统的系统脉冲响应可以近似为接收光学系统的系统脉冲响应函数。但 Christopher 在论文中提供的 AP0<sub>c</sub> 信号后的时间窗长度仅有 70 ns<sup>[12]</sup>,而 ATLAS 系统的极限测深能力可

达约 40 m (约 360 ns)<sup>[19]</sup>, 无法满足 8 m 以下水体光学参数反演的要求, 因此需要寻找其他手段获取系统脉冲响应函数。根据图 2(a)、(c) 和 (d) 的对比结果可知, 如果 ATLAS 系统的地表反射信号展宽足够小, 也可以将其近似作为接收光学系统的系统脉冲响应函数。

根据 Gardner<sup>[20]</sup> 的理论, 星载激光雷达接收地表反射信号的展宽主要受到地表粗糙度  $V_{var}(\xi)$  和地表坡度  $\theta$  的影响, 接收信号的均方根脉宽的期望可以表示为

$$\langle \sigma_s^2 \rangle = \sigma_n^2 + \sigma_i^2 + \frac{4V_{var}(\xi)}{c^2 \cos^2 \phi} + \frac{4z^2}{c^2 \cos \phi} \times (\tan^4 \theta_T + \tan^2 \theta_T \tan^2 \theta) \quad (1)$$

式中:  $\sigma_i$  为发射光均方根脉宽;  $\sigma_n$  为冲激响应的均方根脉宽;  $c$  为光速;  $z$  为卫星高度;  $\xi$  为光斑内地形函数;  $\theta_T$  为激光发散角;  $\phi$  为天底角。对于 ATLAS 系统,  $\sigma_i = 1.5$  ns, 将  $\sigma_n$  近似为 0,  $\theta_T = 35 \mu\text{rad}$ ,  $\phi = 0.3$  由系统决定, 在仿真时假定  $z$  为 500 km, 在选定数据位置时已经确定,  $c = 3 \times 10^8$  m/s 为常数, 故脉冲展宽的期望主要受到地表粗糙度  $V_{var}(\xi)$  和地表坡度  $\theta$  影响, 不同地表粗糙度和地表坡度对脉宽期望的影响如图 3 所示。

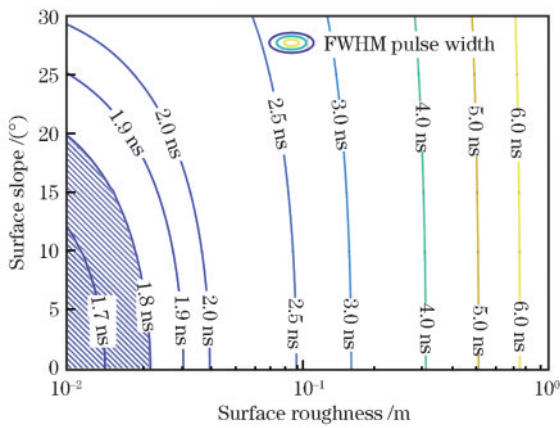


图 3 不同地表粗糙度和地表坡度时的 ATLAS 系统脉冲展宽理论值

Fig. 3 Theoretical values of pulse broadening of ATLAS system for different surface roughness and surface slope

图 3 中横轴表示地表粗糙度, 纵轴表示地面坡度, 等高线表示接收信号均方根脉宽的期望, 右下角标注了 ATLAS 系统参数, 阴影区域表示脉冲展宽与 ATLAS 地面系统相近时, 目标的粗糙度和斜率范围。由于 ATLAS 系统地面光斑直径仅有 15 m, 相对于其他星载激光雷达, 光斑尺寸较小, 地面坡度对脉冲展宽的影响相对较小, 而地表粗糙度对脉冲展宽的影响更显著。当地表的斜率和粗糙度满足图 3 中阴影区域的要求时, 在清洁大气的条件下, 接收回波脉冲的展宽不超过发射脉冲的 10%。

综合图 3 结论, 为使用在轨陆地数据建立脉冲展宽较小的系统脉冲响应函数, 处理在轨陆地点云数据时需选取不可透射的地表类型, 对地表上空有云、地表粗糙度大和地表坡度大的光子点云数据进行控制, 筛选后的累积结果可以近似作为系统脉冲响应函数。

### 3 ATLAS 系统脉冲响应函数的生成与评估

在轨陆地数据的初始光子点云中存在大气透过率低、地表粗糙度高及地表坡度大等特殊地区的光子, 此外, 盐沼区域在雨季可能存在地表积水。由于以上自然条件的干扰通过直接累计初始点云数据提取的光子事件累积直方图可能会对建立的 ATLAS 系统脉冲响应函数精度产生影响, 处理数据前应首先对初始光子点云进行质量控制。

#### 3.1 数据质量控制

为了保证测试区域大气条件影响的一致性, 本文选取 ATL09 数据对光子点云数据进行质量控制。ATL09 数据产品提供了 Cloud\_Flag\_ASR 作为数据的云层标记, 使用 Cloud\_Flag\_ASR 参数作为数据的质量控制依据, 后续简称为  $n_{CFA}$ , 将 ATL03 中每个光子的时间信息 delta\_time 与 ATL09 中  $n_{CFA}$  对应的时间标签 delta\_time 进行匹配, 确定每个区域中光子点云对应的云层信息。

图 4 是本文的数据质量控制流程图。首先, 将 ATL03 中的点云数据按沿轨方向  $10^{-2}$  s (100 次脉冲),

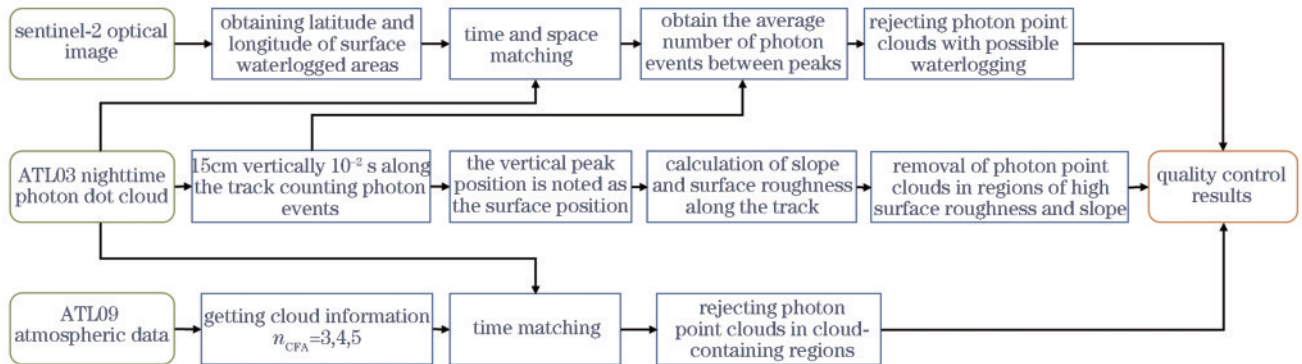


图 4 数据质量控制流程

Fig. 4 Data quality control process

垂直方向每 0.15 m 累积一次,获取光子事件累积直方图。将累积直方图中的峰值位置作为地表位置,计算沿轨方向地面斜率及地表粗糙度,作为地表粗糙度和地表坡度质量控制的依据。

然后,将 ATL03 和 ATL09 数据产品依据 delta\_time 标签进行匹配,保留清洁大气和低气溶胶区域的数据,即  $n_{\text{CFA}}=0,1,2$  的区域<sup>[21]</sup>。

在此基础上,还必须剔除地表积水的影响。虽然,利用 Sentinel-2 提供的光学影像可以有效识别地表积水区,但 Sentinel-2 的重访周期为 5 d,大部分 ATL03 数据都难以获取时空高度匹配度的光学影像数据。将 ATL03 数据和当天的 Sentinel-2 光学影像进行匹配,剔除地表积水处的光子点云。

最后,由于 PMT 后脉冲幅值与信号强度相关<sup>[22]</sup>,

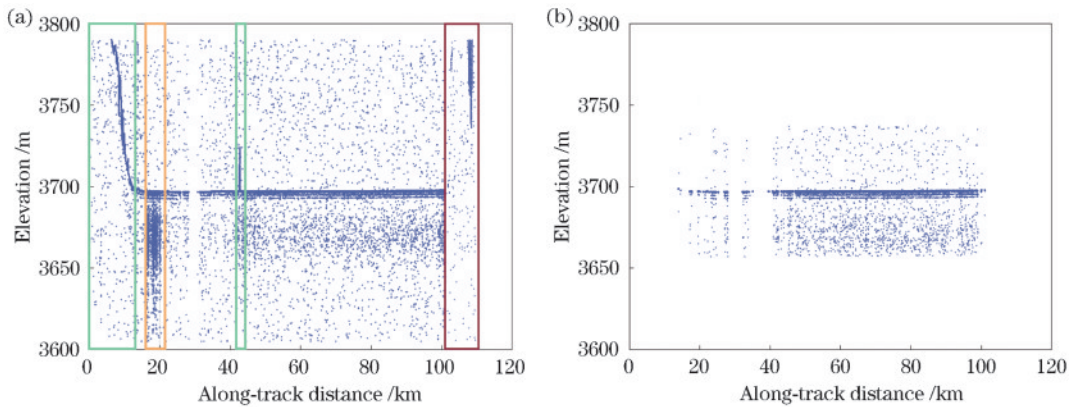


图 5 乌尤尼盐沼数据及其质量控制结果。(a)乌尤尼盐沼初始点云数据;(b)质量控制结果

Fig. 5 Uyuni salt marsh data and its quality control results. (a) Initial point cloud data of Uyuni salt marsh; (b) quality control results

### 3.2 建立系统脉冲响应函数

光子计数激光雷达需要累积足够的探测次数才能获取光子事件累积直方图,进而进行信号提取和反演<sup>[23]</sup>。而星载光子计数激光雷达在工作时能相对地表快速运动,即使地表的反射特性相同,地表回波信号的峰值位置也会随地表高程的变化而变化。为消除地表高程起伏引起的展宽差异,需将地表反射信号的峰值进行对齐。

生成系统脉冲响应函数算法首先将通过数据质量控制得到的地表高程作为沿轨方向每个小格的地表高程,每个小格内光子事件的高程分别与地表高程作差,得到光子事件的相对高程,删除结果中相对高程绝对值大于 40 m 的光子事件;然后,将光子事件在垂直方向上以 0.15 m 为 1 个时间组进行累积,得到剖面信号;最后,将单个研究区域的多组剖面信号累积并进行归一化,获取当前地区的系统脉冲响应函数。

图 6 是将图 5(b)的质量控制结果进行峰值对齐后的结果,其中图 6(a)为质量控制结果,图 6(b)为质量控制结果的光子事件累积直方图,图 6(c)为高程峰值对齐结果,图 6(d)为高程峰值对齐的光子事件累积直方图。对比图 6(a)和(c)可知,质量控制后的盐沼数据仍存在

当海水表面信号明显高于或低于一般海表信号强度时,II类“后脉冲”会和一般水体信号的II类“后脉冲”存在显著差异。参考 Lu 等<sup>[7]</sup>将整个脉冲内的平均光子数控制在一定范围内的方法,将海表和地表平均光子数控制在 $[0.4,1.5]$ 的范围内,得到数据质量控制结果。

图 5(a)是 ICESat-2 卫星于 2021 年 1 月 18 日在当地时间 0 时 38 分飞越乌尤尼盐沼上空时(gt3r 强波束)测得的光子点云数据,本文截取了其中 120 km 的数据进行质量控制测试,图 5(b)为该段数据经质量控制后的结果。图 5(a)中从左往右第 4 个框内表示有云层的区域,第 1、3 个框内表示地表坡度和粗糙度大的区域,第 2 个框内表示地表存在积水区域。对比图 5(a)、(b)可知,质量控制后的光子点云已剔除可能引起展宽的区域数据。

地表起伏,高程峰值对齐则消除了地表起伏。图 6(b)中直接累积的剖面信号脉宽为 2.45 ns,图 6(d)中高程去趋势化后累积的剖面信号脉宽为 1.61 ns,满足图 3 结论中对质量控制的要求。

### 3.3 系统脉冲响应函数的评估算法

为探究使用沙漠和盐沼数据建立的系统脉冲响应函数修正的水体剖面数据对反演结果的影响,方便后续比对,首先,参考陆地剖面数据建立过程,对沿轨方向 9 km 的水体信号进行累积,获取多个水体剖面数据;然后,使用系统脉冲响应函数建立的矩阵对水体剖面数据进行反卷积,获取真实的水体剖面信号;最后,通过激光雷达方程计算颗粒物水体后向散射系数 $[b_{\text{bp}}(z)]$ 及层积分水体后向散射系数 $(b_{\text{b}})$ 。将反演结果与 BGC-Argo 同期现场光学数据及 MODIS 遥感数据进行比对分析<sup>[24]</sup>。颗粒物水体后向散射系数及层积分水体后向散射系数可表示为

$$b_{\text{bp}} = \frac{m^2 S_c(z)}{\beta(\pi) C t^2} e^{2\alpha z} - b_{\text{bw}} \quad (2)$$

$$b_{\text{b}} = \frac{2m^2 \alpha \int_{-15}^{-3} \frac{S_c(z)}{C} dz}{\beta(\pi) t^2} \quad (3)$$

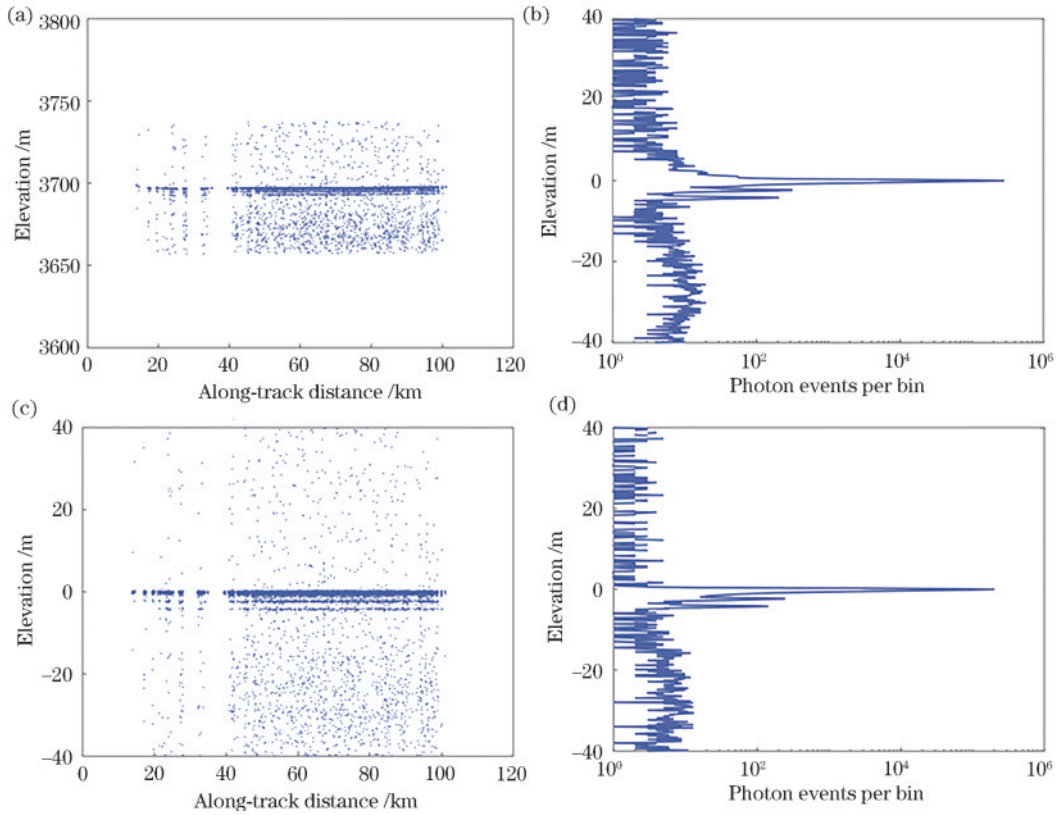


图6 乌尤尼盐沼 ATL03 数据峰值对齐前后对比结果及其剖面信号。(a)未进行峰值对齐的光子点云;(b)未进行峰值对齐的累积直方图;(c)峰值对齐的光子点云;(d)峰值对齐的累积直方图

Fig. 6 Comparison results of Uyuni salt marsh ATL03 data before and after peak alignment and its profile signal. (a) Photon point cloud without peak alignment; (b) accumulation histogram without peak alignment; (c) photon point cloud after peak alignment; (d) accumulation histogram after peak alignment

式中; $m$ 为海水折射率; $\alpha$ 为衰减系数; $\beta(\pi)$ 为 $180^\circ$ 的散射相函数; $t$ 为 $532\text{ nm}$ 波长激光的海气透过率; $b_{\text{bw}}$ 为水体后向散射系数; $C$ 为校准常数,由菲涅耳反射率、激光入射角及海表波面斜率计算得到,海表波面斜率可由风速近似计算; $S_c(z)$ 为“后脉冲”修正后的水体剖面信号。衰减系数具体可表示为

$$\alpha = -\frac{1}{2} \frac{d \ln[S_c(z)]}{dz} \quad (4)$$

## 4 结果与讨论

### 4.1 数据与实验地点

本文将 ATL03 夜间数据作为主要数据源, ATL09 数据和 Sentinel-2 提供的光学影像数据作为数据质量控制依据,将 MODIS 和 BGC-Argo 数据作为反演结果的参考值。

全球地理定位光子点云 ATL03 数据由 ICESat-2 卫星搭载的 ATLAS 系统获取。ATL03 数据产品由美国冰雪数据中心(NSIDC)发布,在 Level-1 科学单元转换后的遥感数据 ATL02 的基础上,经过卫星姿态和轨道校正,属于 Level-2 数据产品。本文使用了 3 个强光束的光子飞行时间、经纬度、高程等信息。

后向散射和云层特征经校准的 ATL09 数据同样

由 ICESat-2 卫星搭载的 ATLAS 系统获取。在 Level-2 归一化后向散射系数数据 ATL04 的基础上,ATL09 数据主要包含经过大气校正后的后向散射剖面、层积分衰减后向散射及通过密度质量算法(DDA)获取的云层高度和大气特征等其他参数,属于 Level-3 数据产品。本文将 ATL09 沿轨方向的云层数据作为质量控制依据。

Sentinel-2 光学影像数据来自 Sentinel-2A 和 Sentinel-2B 卫星搭载的高分辨率多光谱成像仪。数据由欧洲航天局(ESA)发布,包括从可见光到近红外波段的 12 个光谱波段数据,不同波段的分辨率在 $10\sim 60\text{ m}$ 之间,可用于监测地表覆盖类型、植被生长情况、土地利用变化等方面。本文使用经过大气校正、大气层底层反射率正射校正后 Level-2A 数据,将由中心波长分别为 $492\text{ nm}$ 、 $559\text{ nm}$ 、 $664\text{ nm}$ 的数据合成的真彩色图像作为数据质量控制依据。

MODIS 采用被动遥感方法提供大气和海洋水色遥感数据,共有 36 个波段数据,数据处理方法成熟,数据产品分为 5 个等级,可以通过 NASA 的戈达德航天中心 LAADS 网站下载。本文将 L3 数据产品中空间分辨率为 $9\text{ km}$ 的水体后向散射系数 $b_{\text{b531}}$ 作为反演结果的参考值。

通过在 Argo 浮标上安装生物地球化学传感器 BGC-Argo (Biogeochemical-Argo) 实现了全球海洋上层 2000 m 范围内包括叶绿素浓度、硝酸盐浓度、溶解氧含量、颗粒物后向散射系数等生物地球化学参数的获取。BGC-Argo 数据可在杭州全球海洋 Argo 系统野外科学观测研究站官网下载, 本文将数据产品中的颗粒物后向散射系数作为反演结果的参考值。

为比较沙漠和盐沼数据建立系统脉冲响应函数的差异, 本文选用地表植被覆盖率低的盐沼、沙漠两种类型地表数据建立脉冲响应函数。盐沼数据选取位于南美洲玻利维亚的乌尤尼盐沼 (20°S, 60°W) 和位于北非突尼斯的杰里德大盐湖 (33°N, 8°E), 其中乌尤尼盐沼面积较大, 且地表极为平坦, 坡度低于 1°, 是较为理想的用于生成系统脉冲响应函数的地表特征。沙漠数据选取位于撒哈拉沙漠中部分别位于阿尔及利亚 (25°N, 1°S) 和利比亚 (26°N, 18°E) 境内两地区作为研究区域。水体数据选取携带测量  $b_{bp}$  传感器 BGC-Argo 浮标分布的黑海海域 (43E, 33N) 作为研究区域。

#### 4.2 沙漠和盐沼数据建立的系统脉冲响应函数

为比较基于不同类型地表数据建立的系统脉冲响应函数之间的差异, 并验证数据质量控制效果, 将选定

的盐沼区域和沙漠区域及其辅助数据进行时空匹配, 参考陆地信号的质量控制方法进行质量控制并获取利用两种类型地表数据建立的系统脉冲响应函数。将质量控制前后盐沼和沙漠地区数据建立的脉冲响应函数进行对比, 对比结果如图 7 所示, 其中图 7(a) 为质量控制后建立的系统脉冲响应函数, 图 7(b) 为未进行质量控制数据建立的系统脉冲响应函数, 其中图 7(a) 的实线表示质量控制后盐沼数据建立的系统脉冲响应函数 ( $SIR_{qcs}$ ), 虚线表示质量控制后沙漠数据建立的系统脉冲响应函数 ( $SIR_{qcd}$ ), 图 7(b) 的实线表示使用未经质量控制的盐沼数据建立的系统脉冲响应函数 ( $SIR_{qus}$ ), 虚线表示使用未经质量控制的沙漠数据建立的系统脉冲响应函数 ( $SIR_{qud}$ ), 点划线表示地面实验结果 ( $SIR_g$ )。

如图 7 所示, 未经质量控制的  $SIR_{qud}$  和  $SIR_{qus}$  相比  $SIR_g$  存在明显展宽。质量控制后的  $SIR_{qcd}$  和  $SIR_{qcs}$  脉冲展宽相对较小且接近, 表明质量控制后, 使用沙漠和盐沼数据建立系统脉冲响应函数的差异不明显。其中, 质量控制后的  $SIR_{qcs}$  在 5 m 高度以下存在抖动, 其原因是经数据质量控制后盐沼区域点云数据长度不足, 信号光子的数值受到随机分布的影响。

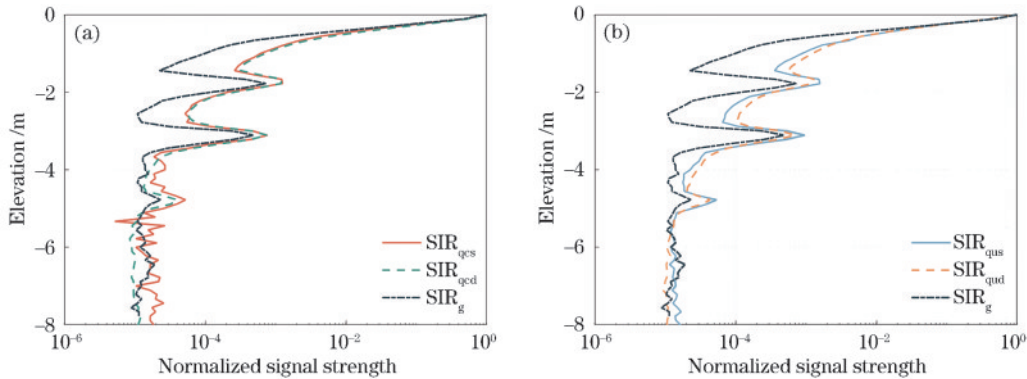


图 7 系统脉冲响应函数对比结果图。(a) 质量控制后建立的系统脉冲响应函数; (b) 直接建立的系统脉冲响应函数  
Fig. 7 Comparison result of system impulse response function. (a) System impulse response function of system established after quality control; (b) system impulse response function of system established directly

#### 4.3 系统脉冲响应函数评估结果

为评估基于沙漠和盐沼数据建立的系统脉冲响应函数中波形展宽和“后脉冲”位置的差异, 对图 7 中不同数据建立的系统脉冲响应函数进行 ex-Gaussian 拟合。以地面实验结果给定的主峰处拟合参数  $\mu$ 、 $\sigma$ 、 $\tau$  值及“后脉冲”与目标信号峰间距  $\Delta\mu_1$ 、 $\Delta\mu_2$  作为参考值, 与在轨数据建立的系统脉冲响应函数拟合结果进行比较。以 Beam 1 强波束拟合结果为例, ex-Gaussian 拟合得到的  $\mu$ 、 $\sigma$ 、 $\tau$  3 个参数及  $\Delta\mu_1$ 、 $\Delta\mu_2$  与参考值对比结果如表 2 所示, 其中  $\mu$  为平均数、 $\sigma$  为标准差、 $\tau$  为与正态分布  $X \sim N(\mu, \sigma^2)$  相比的偏度。

比较表 2 拟合结果可知, 所有系统脉冲响应函数的  $\Delta\mu_1$ 、 $\Delta\mu_2$  拟合结果与参考值的相对误差均不超过 1%,

表 2 ex-Gaussian 分布参数拟合结果

Table 2 Parameter fitting results for ex-Gaussian distribution

Parameter	$SIR_{qcs}$	$SIR_{qus}$	$SIR_{qcd}$	$SIR_{qud}$	$SIR_g$
$\mu$	-0.023	-0.035	-0.024	-0.044	-0.127
$\sigma$	0.087	0.095	0.089	0.142	0.061
$\tau$	0.135	0.149	0.139	0.148	0.113
$\Delta\mu_1$	14.71	14.76	15.10	14.96	15.47
$\Delta\mu_2$	28.08	28.17	28.20	28.60	27.91

说明系统脉冲响应函数中“后脉冲”位置保持稳定。 $SIR_{qus}$  和  $SIR_{qud}$  脉宽的拟合结果与地面实验结果的相对误差分别为 55.7% 和 132.8%, 相差 77.1 百分点; 而  $SIR_{qcs}$  和  $SIR_{qcd}$  脉宽的拟合结果与地面实验结果的相对误差分别为 42.6% 和 45.9%, 仅相差 3.3 百分点, 且更

接近参考值。 $SIR_{qed}$ 的脉宽仅占 $SIR_{qud}$ 脉宽的62.7%，表明质量控制过程可以明显减小沙漠数据的展宽。

为评估沙漠和盐沼数据及质量控制方法在反演海洋光学参数过程中对反演结果的影响,通过式(2)和(3),计算黑海海域的水体光学参数 $b_{bp}$ 和 $b_b$ 。结果比表中,将10 d内与目标位置最接近,且距离小于50 km的BGC-Argo提供的 $b_{bp}$ 剖面数据,和10 d内MODIS提供的 $b_b$ 数据作为参考值进行比较。ICESat-2卫星与

黑海区域BGC-Argo 7900592号浮标同时运行时间自2018年11月起至2020年2月止,共有116组ATL03数据部分位于黑海内。经数据质量控制后低云量、低海表粗糙度的数据共有53组,其中,有24组数据可以与参考数据时空匹配,以2019年8月6日当地时间2时12分的Beam 1通道数据反演结果为例,反演的 $b_{bp}$ 结果如图8所示,其中横轴表示沿轨距离,纵轴表示相对海洋表面深度,结果经过了折射率校正。

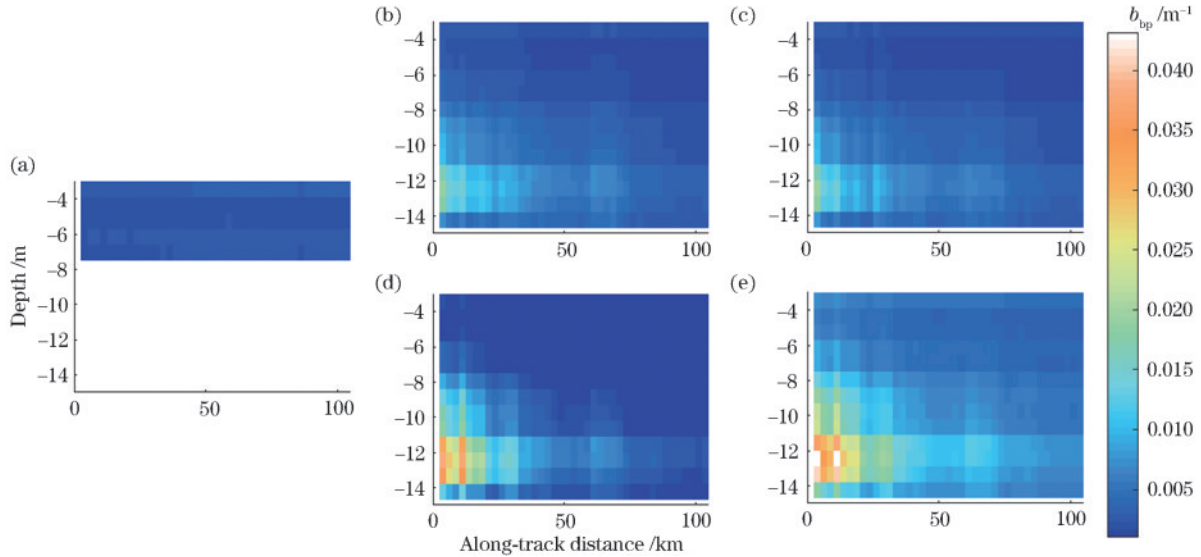


图8 黑海海域中基于不同系统脉冲响应函数的 $b_{bp}$ 反演结果对比图。(a)  $SIR_g$ ; (b)  $SIR_{qcs}$ ; (c)  $SIR_{qcd}$ ; (d)  $SIR_{qus}$ ; (e)  $SIR_{qud}$   
Fig. 8 Comparison of  $b_{bp}$  inversion results in the Black Sea area based on different system impulse response functions. (a)  $SIR_g$ ; (b)  $SIR_{qcs}$ ; (c)  $SIR_{qcd}$ ; (d)  $SIR_{qus}$ ; (e)  $SIR_{qud}$

对比图8(a)、(b)、(c)、(d)和(e)可知,由于反卷积校正结果可反演水体光学参数的深度大小取决于系统脉冲响应函数的长度<sup>[24]</sup>,地面测试结果( $SIR_g$ )仅有70 ns的数据,使用地面测试结果进行海洋光学参数反演仅有水下7.7 m以上反演结果,而在轨数据可以建立持续时间更长的系统脉冲响应函数,使用在轨数据可以实现更深水体的海洋光学参数反演。使用沙漠和盐沼数据[如图8(d)和(e)]的反演结果存在明显差异,而质量控制后的反演结果[如图8(b)和(c)]接近,且水下8 m以上部分更接近使用地面定标数据反演的结果[如图8(a)],这表明了沙漠和盐沼数据在反演时的差异不可忽略,且数据质量控制过程在建立系统脉冲响应函数时具有一定必要性。

BGC-Argo在卫星过顶的时间内只能探测一条剖面信号,在图8中反演的多条剖面结果中选取和BGC-Argo在地理位置上最接近的一条剖面,与使用未经质量控制的不同类型地表数据进行反演的 $b_{bp}$ 对比,同时将 $b_b$ 的反演结果与MODIS数据进行对比,对比结果如图9所示。图9中三角虚线表示使用经质量控制后的 $SIR_{qcs}$ 进行反演的结果,虚线、三角、菱形和圆形分别表示使用未经质量控制的 $SIR_{qus}$ 、经质量控制后的 $SIR_{qcd}$ 、未经质量控制的 $SIR_{qud}$ 和 $SIR_g$ 作为系统脉冲响

应函数进行反演的结果。星形实线表示BGC-Argo或MODIS数据提供的参考真值。

如果将图9中ATLAS地面测试结果作为参考真值,使用未经质量控制的 $SIR_{qus}$ 的 $b_{bp}$ 和 $b_b$ 反演相对误差分别为139.1%和77.5%,经质量控制后反演的相对误差分别减小为11.0%和31.1%;使用未经质量控制的 $SIR_{qud}$ 的 $b_{bp}$ 和 $b_b$ 反演的相对误差分别为153.5%和146.8%,经质量控制后的 $b_{bp}$ 和 $b_b$ 反演的相对误差分别减小为10.6%和20.4%。如果以BGC-Argo和MODIS传感器提供的测量数据作为真值,使用未经质量控制的 $SIR_{qus}$ 的 $b_{bp}$ 和 $b_b$ 反演相对误差分别为125.0%和32.4%,经质量控制后反演的相对误差分别减小为45.7%和9.5%;使用未经质量控制的 $SIR_{qud}$ 的 $b_{bp}$ 和 $b_b$ 反演的相对误差分别为120.5%和86.0%,经质量控制后的 $b_{bp}$ 和 $b_b$ 反演的相对误差分别减小为43.3%和10.4%。沙漠和盐沼数据的 $b_{bp}$ 和 $b_b$ 反演结果相差39.0百分点、32.5百分点,经质量控制后反演结果相差2.1百分点、3.2百分点。

图9中反演结果表明,基于沙漠和盐沼信号建立的系统脉冲响应函数进行反卷积后的反演结果之间无论相对测量真值的误差还是相对经地面实验结果修正的参考真值的差异都大于经质量控制后的反演结果,

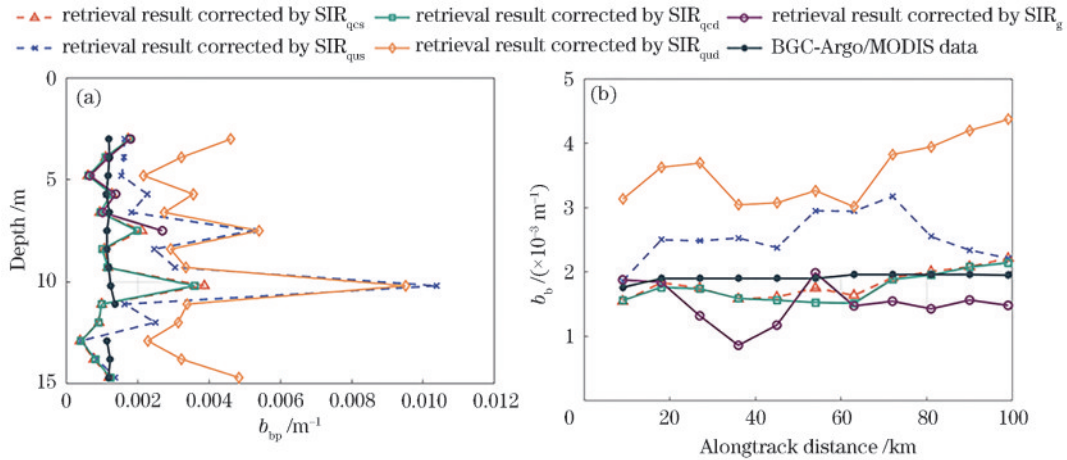


图9 黑海海域  $b_b$  和  $b_{bp}$  反演结果对比图。(a)  $b_{bp}$  反演结果; (b)  $b_b$  反演结果

Fig. 9 Comparison of  $b_b$  and  $b_{bp}$  inversion results for Black Sea area. (a) Inversion results of  $b_{bp}$ ; (b) inversion results of  $b_b$

质量控制过程甚至可以将部分反演结果与 MODIS 和 BGC-Argo 的相对误差降低 100%。

表 3 是 ATLAS 强波束通道 (Beam 1、Beam 3、Beam 5) 的反演结果相对 BGC-Argo 和 MODIS 的反演误差。

表 3 不同数据建立的系统脉冲响应函数修正后的反演结果对比  
Table 3 Comparison of inversion results of corrected impulse response function of system built with different data

Response function	$b_{bp} / \%$		$b_b / \%$	
	SIR <sub>g</sub>	BGC-Argo	SIR <sub>g</sub>	MODIS
SIR <sub>qcd</sub> Beam 1	22.5	66.2	43.5	42.3
SIR <sub>qcd</sub> Beam 3	26.3	71.3	36.8	48.5
SIR <sub>qcd</sub> Beam 5	19.2	70.5	44.3	39.3
SIR <sub>qcs</sub> Beam 1	18.3	66.5	40.0	38.2
SIR <sub>qus</sub> Beam 1	84.7	156.5	133.7	121.2
SIR <sub>qud</sub> Beam 1	112.6	188.0	158.6	150.3

由表 3 可知,与 ATLAS 地面实验结果相比,沙漠和盐沼数据的  $b_{bp}$  和  $b_b$  的反演结果差异超过地面实验结果的 80%,多数超过 100%,而经质量控制后  $b_{bp}$  的反演结果差异小于地面实验结果的 30%, $b_b$  的反演结果差异小于地面实验结果的 50%。如果以 BGC-Argo 提供的  $b_{bp}$  作为真值,未经质量控制时沙漠和盐沼生成的系统脉冲响应函数反演结果的相对误差可达 156.5% 和 188.0%,沙漠和盐沼的结果相差 30% 左右。经质量控制后反演结果的相对误差降低到 70% 左右,表明经过质量控制,沙漠和盐沼生成的系统响应函数的反演结果基本一致,符合前文对两种地表生成的系统响应函数的量化分析结果。与 MODIS 对比的结果和与 BGC-Argo 对比的结果具有一致性。

## 5 结 论

针对 ATLAS 系统“后脉冲”现象的产生原因进行

了分析,认为剖面信号中 I 类“后脉冲”来源于接收光信号在光学系统中的多次反射,II 类“后脉冲”来源于 PMT 自身的后脉冲效应。在线性系统假设条件下,确定了使用陆地信号建立 ATLAS 系统脉冲响应函数过程中信号脉宽的要求,并提出了获取 ATLAS 系统脉冲响应函数的质量控制方法。将 ATL09、Sentinel-2 作为辅助数据,对 ATL03 陆地数据进行质量控制及预处理,建立了系统脉冲响应函数。

本文对利用沙漠和盐沼数据建立的系统脉冲响应函数进行了定量分析,两者的脉宽分别为 0.095 和 0.142,该差异经质量控制后降低到 0.002。实验结果表明,如果不进行质量控制,基于沙漠和盐沼地表数据建立的系统脉冲响应函数存在较大区别,经所提质量控制算法处理后的两种地表生成的系统脉冲响应函数基本一致,且展宽与地面定标结果测得的展宽接近。

使用未经质量控制的沙漠和盐沼数据建立的系统脉冲响应函数进行反卷积和海洋光学参数反演结果与 MODIS 进行对比时,相对误差分别为 121.2% 和 150.3%。与 BGC-Argo 对比的相对误差分别为 156.5% 和 188.0%。结果表明在黑海区域,如果不进行质量控制,使用沙漠和盐沼信号生成的系统脉冲响应函数的反演结果有显著差异,使用盐沼数据可以获得更好的反演结果。

经质量控制后,使用沙漠和盐沼生成的系统脉冲响应函数的反演结果,与 MODIS 的相对误差下降为 38.2% 和 42.3%,与 BGC-Argo 的相对误差下降为 66.5% 和 66.2%,两者基本相当。此外,经质量控制后,ATLAS 3 个强波束 (Beam 1、Beam 3、Beam 5) 通道的海洋剖面光学参数反演结果具有较好的一致性,通道间差异小于 5%,能够实现内符合。

本文结果明确了在满足线性系统近似条件下,利用自然地表生成反卷积系统响应函数所需的质量控制要求,分析了使用沙漠和盐沼生成的系统脉冲响应函数和使用系统脉冲响应函数对水体信号修正的过程中

可能导致的差异,为后续海洋剖面光学参数的高精度反演提供了基础。但对于目标表面调制作用可能对反演结果造成的影响,未进行讨论。在不满足线性系统假设的情况下,如何进行海洋剖面信号的校正和光学参数的反演还有待进一步研究。

## 参 考 文 献

- [1] Hostetler C A, Behrenfeld M J, Hu Y X, et al. *Spaceborne lidar in the study of marine systems*[J]. *Annual Review of Marine Science*, 2018, 10: 121-147.
- [2] Churnside J, McCarty B, Lu X M. *Subsurface ocean signals from an orbiting polarization lidar*[J]. *Remote Sensing*, 2013, 5(7): 3457-3475.
- [3] Lu X M, Hu Y X, Trepte C, et al. *Ocean subsurface studies with the CALIPSO spaceborne lidar*[J]. *Journal of Geophysical Research (Oceans)*, 2014, 119(7): 4305-4317.
- [4] 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.
- [5] Altmann Y, Ren X M, McCarthy A, et al. *Target detection for depth imaging using sparse single-photon data*[C]//2016 IEEE International Conference on Acoustics, Speech and Signal Processing (ICASSP), March 20-25, 2016, Shanghai, China. New York: IEEE Press, 2016: 3256-3260.
- [6] Lu X M, Hu Y X, Vaughan M, et al. *New attenuated backscatter profile by removing the CALIOP receiver's transient response*[J]. *Journal of Quantitative Spectroscopy and Radiative Transfer*, 2020, 255: 107244.
- [7] Lu X M, Hu Y X, Yang Y K, et al. *Enabling value added scientific applications of ICESat-2 data with effective removal of afterpulses*[J]. *Earth and Space Science*, 2021, 8(6): EA001729.
- [8] Lu X M, Hu Y X, Yang Y K, et al. *Antarctic spring ice-edge blooms observed from space by ICESat-2*[J]. *Remote Sensing of Environment*, 2020, 245: 111827.
- [9] E X Y, Dai G Y, Wu S H. *ICESat-2 ATL03 data preprocessing and correction method*[J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2021, 50(6): 20211032.
- [10] Eidam E, Bisson K, Wang C, et al. *ICESat-2 and ocean particulates: building a roadmap for calculating  $K_d$  from space-based lidar photon profiles*[J]. *Remote Sensing of Environment*, 2024, 311: 114222.
- [11] Zheng H Y, Ma Y, Huang J, et al. *Deriving vertical profiles of chlorophyll-a concentration in the upper layer of seawaters using ICESat-2 photon-counting lidar*[J]. *Optics Express*, 2022, 30(18): 33320-33336.
- [12] Martino A, Field C T, Ramos-Izquierdo L. *ICESat-2/ATLAS instrument linear system impulse response*[EB/OL]. [2024-05-06]. [https://d197for5662m48.cloudfront.net/documents/publicationstatus/112530/preprint\\_pdf/4f00280d662156d762ecf6a063071456.pdf](https://d197for5662m48.cloudfront.net/documents/publicationstatus/112530/preprint_pdf/4f00280d662156d762ecf6a063071456.pdf).
- [13] Greeley A P, Neumann T A, Kurtz N T, et al. *Characterizing the system impulse response function from photon-counting LiDAR data*[J]. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 2019, 57(9): 6542-6551.
- [14] Wang L, Xu L S, Feng S T, et al. *Multi-Gaussian fitting for pulse waveform using weighted least squares and multi-criteria decision making method*[J]. *Computers in Biology and Medicine*, 2013, 43(11): 1661-1672.
- [15] Neumann T, Brenner A, Hancock D, et al. *Ice, cloud, and land elevation Satellite-2 (ICESat-2) project, algorithm theoretical basis document (ATBD) for global geolocated photons ATL03*[EB/OL]. [2024-05-06]. <https://eosppo.nasa.gov/missions/ice-cloud-and-land-elevation-satellite-2>.
- [16] *Photomultiplier tubes: basics and applications*[M]. Japan: Hamamatsu Photonics, 2017, 54: 92-93.
- [17] Lu X M, Hu Y X, Yang Y K. *Ocean subsurface study from ICESat-2 mission*[C]//2019 Photonics & Electromagnetics Research Symposium-Fall (PIERS-Fall), December 17-20, 2019, Xiamen, China. New York: IEEE Press, 2019: 910-918.
- [18] Crilly P B. *A quantitative evaluation of various iterative deconvolution algorithms*[J]. *IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement*, 1991, 40(3): 558-562.
- [19] Zhang W H, 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.
- [20] Gardner C S. *Ranging performance of satellite laser altimeters*[J]. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 1992, 30(5): 1061-1072.
- [21] Palm S, Yang Y, Herzfeld U. *ICESat-2 algorithm theoretical basis document for the atmosphere, Part I: level 2 and 3 data products*[EB/OL]. [2024-05-06]. [https://icesat-2.gsfc.nasa.gov/sites/default/files/page\\_files/ICESat2\\_ATL04\\_ATL09\\_ATBD\\_r003.pdf](https://icesat-2.gsfc.nasa.gov/sites/default/files/page_files/ICESat2_ATL04_ATL09_ATBD_r003.pdf).
- [22] 涂云波, 刘夏林, 强佳, 等. *单光子测距雷达系统的强光感生噪声影响探究*[J]. *激光与光电子学进展*, 2024, 61(4): 0428011.
- [23] Tu Y B, Liu X L, Qiang J, et al. *Study of signal-induced noise in single-photon ranging lidar systems*[J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2024, 61(4): 0428011.
- [24] Degnan J J. *Photon-counting multikilohertz microlaser altimeters for airborne and spaceborne topographic measurements*[J]. *Journal of Geodynamics*, 2002, 34(3/4): 503-549.
- [24] 俄相颖, 吴松华. *ICESat-2 海洋观测数据质量控制与水体光学参数反演研究*[D]. 青岛:中国海洋大学, 2021.
- [24] E X Y, Wu S H. *ICESat-2 study on quality control of ocean observation data and inversion of optical parameters of water body*[D]. Qingdao: Ocean University of China, 2021.