

ICESat-2 ATL03 数据预处理及校正方法

俄相颖¹, 戴光耀¹, 吴松华^{1,2,3,4*}

1. 中国海洋大学 信息科学与工程学部 海洋技术学院, 山东 青岛 266100;
2. 中国海洋大学 海洋高等研究院, 山东 青岛 266100;
3. 中国海洋大学 海洋遥感研究所, 山东 青岛 266100;
4. 青岛海洋科学与技术试点国家实验室 区域海洋动力学与数值模拟功能实验室, 山东 青岛 266237)

摘要: 2018 年 9 月 15 日, 美国航空航天局成功发射了 ICESat-2 卫星, ICESat-2 搭载了地形激光测高仪系统 (ATLAS), 已经广泛应用于极地冰盖高程测量、海冰厚度估算、陆地高程测量、地表植被测量等多个研究领域。不同于 GLAS/ICESat, ATLAS 在信号探测系统中采用更为灵敏的单光子探测器, 每秒发射 10 000 个脉冲 (GLAS/ICESat 系统每秒发射 40 个脉冲), 可以获取到重复频率更高、光斑更小的高密度光子计数回波数据, 进而实现高精度全球观测。由于 ATLAS 采用的探测器光电倍增管 (PMT) after-pulse 的影响, 在回波信号脉冲输出后常会出现小幅度脉冲干扰, 不能准确反映原始信号波形, 所以在实际应用过程中, 必须对测量信号进行校正。首先基于 ATL03 产品, 对光子计数回波数据进行预处理, 获得了海冰、海洋、陆地和沙漠的廓线信息, 结果显示在主信号回波之后均存在两个小的脉冲回波 (约 2.3 m 和 4.2 m 处), 此外陆地和沙漠在 10~45 m 间存在一个更长时间延迟的脉冲回波, 证实了不同反射表面均会受到 PMT after-pulse 影响。然后利用 ICESat-2 卫星过境撒哈拉沙漠地区的夜间观测数据, 计算了不同波束下的脉冲响应函数, 6 个波束得到的脉冲响应函数整体形态相似, 在主信号回波后出现三个不同幅度的脉冲回波 (约 2.3 m、4.2 m 和 6.5 m 处)。最后利用 6 个波束的脉冲响应函数对同一海洋剖面进行校正, 结果显示除 ATLAS Beam2 外, 其余波束均可有效滤除主脉冲之后的小幅度脉冲, 校正得到真实的水下回波信号。

关键词: 星载激光雷达; ATLAS/ICESat-2; 脉冲响应函数; PMT after-pulse

中图分类号: P714^{+.1} **文献标志码:** A **DOI:** 10.3788/IRLA20211032

ICESat-2 ATL03 data preprocessing and correction method

E Xiangying¹, Dai Guangyao¹, Wu Songhua^{1,2,3,4*}

1. College of Marine Technology, Faculty of Information Science and Engineering, Ocean University of China, Qingdao 266100, China;
2. Institute for Advanced Ocean Study, Ocean University of China, Qingdao 266100, China;
3. Ocean Remote Sensing Institute, Ocean University of China, Qingdao 266100, China;
4. Laboratory for Regional Oceanography and Numerical Modeling, Pilot National Laboratory for Marine Science and Technology (Qingdao), Qingdao 266237, China)

Abstract: On September 15, 2018, NASA successfully launched the ICESat-2 satellite, which carries the Advanced Topographic Laser Altimeter System (ATLAS). ATLAS/ICESat-2 has been widely used in many

收稿日期: 2021-05-09; 修订日期: 2021-05-17

基金项目: 国家重点研发计划 (2016YFC1400904)

作者简介: 俄相颖, 女, 硕士生, 主要从事星载激光雷达数据处理及应用方面的研究工作。

通讯作者: 吴松华, 男, 教授, 博士, 主要从事大气海洋激光探测技术与应用研究。

research fields, such as polar ice-sheet elevation measurement, sea-ice thickness estimation, land elevation measurement, and vegetation measurement. Unlike GLAS/ICESat, ATLAS uses a more sensitive single-photon detector in the signal detection system. The system emits 10 000 pulses per second (GLAS/ICESat system emits 40 pulses per second), which enables high-density photon data with higher repetition frequency and smaller light spots, thus enabling high-precision global observation. Due to the influence of the detector photomultiplier tube (PMT) after-pulse used by ATLAS, small amplitude pulse interference often occurs after the output of echo signal pulse, which cannot accurately reflect the original signal waveform. Therefore, the measured signal must be corrected in the practical application process. Firstly, based on ATL03 product, the photon counting echo data were preprocessed to obtain the profiles of sea ice, ocean, land and desert. The results show that there are two small pulse echoes (about 2.3 m and 4.2 m) after the main signal echo, and there is a longer delay pulse echo between land and desert (about 10-45 m). It is confirmed that different reflective surfaces are affected by after-pulse of PMT. Secondly, the impulse response functions under different beams were calculated by using the night observation data of ICESat-2 over the Sahara Desert. The overall shape of the impulse response functions obtained from the six beams was similar. After the main signal echo, there were three pulse echoes of different amplitude (about 2.3 m, 4.2 m and 6.5 m). Finally, the impulse response functions under six beams were used to correct the same ocean profile. The results show that except ATLAS Beam2, all the other beams can effectively filter out the small amplitude pulse after the main pulse, and the real underwater echo signal can be picked up.

Key words: spaceborne lidar; ATLAS/ICESat-2; impulse response function; PMT after-pulse

0 引言

近些年来,星载激光雷达凭借其全天时、高空间分辨率以及覆盖范围广的特点,成为多个领域研究的有效工具。2003年1月,美国NASA发射激光测高仪系统 Geoscience Laser Altimeter System(GLAS),搭载于以冰、云和陆地高程卫星 (Ice, Cloud and Land Elevation Satellite, ICESat) 平台。该系统被用于测量冰被地形,同时也监测云层和大气的特性,提供云层高度和厚度,有助于提高短期天气及气候预报能力。2003年到2009年在轨期间,收集的测高数据促使科学家对格陵兰岛和南极冰盖的总体质量变化有了更为精确的估计^[1]。为了延续 ICESat 的后续观测任务,NASA于2018年9月15日发射了地形激光测高仪系统 (Advanced Topographic Laser Altimeter System, ATLAS),搭载于以冰、云和陆地高程卫星2号 (The Ice, Cloud, and Land Elevation Satellite-2, ICESat-2) 平台。ATLAS/ICESat-2将帮助科学家研究地球冰冻圈发生变化的原因和幅度;测量地球温带和热带区域的高程信息,并对全球森林植被信息进行评估^[2]。不同于 GLAS/ICESat 全波形记录, ATLAS/ICESat-2 采用更为灵敏的单光子探测器,以 10 kHz 的重复频率发射 532 nm 激光脉冲,通过获取高密度光子计数回波数据,实现高精度全球观测^[3]。

ATLAS/ICESat-2 已经广泛应用于多个研究领域^[4]。Brunt 等^[5]测试并验证了 ATL03 产品和 ATL06 产品获取冰盖高程的精度,利用强波束和弱波束结合可以估算冰盖的坡度变化^[6]; Kwok^[7]等研究表明 ATL07 产品测量海冰高程精度约 2 cm; Dandabathula 等^[8]利用差分全球定位系统评价了 ATL08 产品的地面高程精度; Horvat 等^[9]基于 ATLAS/ICESat-2 数据提出了观测海冰区域海洋表面波的新技术; Lu 等^[10]利用 ATL03 产品观测极地海洋的浮游生物垂直分布情况,有效补充了被动水色遥感所缺失的夜间数据,对于海洋浮游生物循环研究具有重要意义。ATLAS/ICESat-2 已经成为诸多领域研究的有效手段,展现出了强大的应用潜力,但在数据处理过程中发现,由于光电倍增管 (Photomultiplier Tube, PMT) after-pulse 的影响,会使得测量信号存在误差,所以在实际应用过程中,必须对原始测量信号进行校正。

ATLAS/ICESat-2 使用 PMT 作为探测器来进行光子计数,经不同表面反射的单个光子将被接收器接收并被标记时间和地理位置。然而由于 PMT after-pulse 影响,在主信号脉冲输出后常会出现小幅度脉冲回波,这会对大幅度信号情况下精确测量低电平信号产生干扰^[11]。信号强度更弱的海洋次表层信号会受到来自海面回波噪声拖尾的污染,不能准确反演水体光

学参数,所以研究系统的脉冲响应特性,对测量信号的校正及水下剖面信息的正确反演具有重要意义。

文中基于 ATLAS/ICESat-2 的二级产品 ATL03,对观测到的光子数据进行预处理,按照垂直方向上 15 cm 和沿轨道方向 0.001 s 的精度来统计,以获取不同反射表面(海冰、海洋、陆地和沙漠)的廓线信息,结果表明:不同反射表面的廓线均会受到 PMT after-pulse 影响。为了消除这种影响,必须了解 ATLAS/ICESat-2 的脉冲响应特性。文中使用撒哈拉沙漠地区夜间观测数据来研究不同波束下的脉冲响应函数,然后对同一海洋剖面信号进行退卷积处理,结果显示:除 Beam2 外,其余波束的退卷积结果差异较小,均可较好的校正 PMT after-pulse 影响,得到更加可靠的海洋次表层剖面信息。文章分为五部分内容,第一部分主要介绍文中的研究背景及研究意义;第二部分主要介绍 ATLAS/ICESat-2 的基本信息以及数据产品;第三部分主要介绍了信号预处理和校正的相关原理及处理方法,包括信号的预处理、脉冲响应函数的获取以及原始信号的校正;第四部分主要介绍了信号预处理及校正的结果,包括探究不同反射表面 PMT after-pulse 的影响、不同波束下脉冲响应函数的获取以及海洋水体信号的校正结果;第五部分是对全文的总结以及下步工作的展望。

1 ATLAS/ICESat-2 介绍

2018 年 9 月 15 日, NASA 在美国加州范登堡空军基地成功发射 ICESat-2 卫星, ICESat-2 仅搭载了地形激光测高仪系统 Advanced Topographic Laser Altimeter System (ATLAS), 为科学家提供全球高度测量数据,可以精确估计冰川、海冰以及陆地等地形的变化特征。其主要科学目标包括:定量评估冰盖融化对海平面上升的影响;量化冰盖和冰川变化的特征,研究引发变化的驱动机制并提高冰盖预测模型的精确性;估算海冰厚度,研究海冰/海洋/大气之间的物质能量交换;测量植被高度,研究大尺度生物量现状及变化规律^[2]。

ICESat-2 轨道高度约 500 km, 重复周期为 91 天, 每个周期包含 1387 个轨道。ATLAS 以 10 kHz 的重复频率发射 532 nm 激光脉冲, 可获取沿轨道方向间隔 0.7 m, 足印尺寸约 17 m 的光斑。ATLAS 发射的每个激光脉冲被光学元件分裂产生 6 束单独的脉冲, 排列成三对进行探测。每对包含一个强光束和一个弱光束(强弱能量比约 1 : 4), 在跨轨方向上相距 90 m, 沿轨方向强弱波束间距约 2.5 km, 跨轨方向波束对间距约为 3.3 km^[2]。表 1 给出了 ATLAS/ICESat-2 的关键参数。

表 1 ATLAS/ICESat-2 的关键参数^[2]

Tab.1 Configuration parameters of ATLAS/ICESat-2^[2]

Parameters	Values	Parameters	Values
Orbit inclination and coverage	92°; 88°S~88°N	Footprint size/m	~17
Altitude/km	500	Along-track separation/m	~0.7
Track repeat period/day	91	Telescope diameter/m	0.8
Nominal duration of mission/year	3	Number of beams	6 organized in 3 pairs
Laser wavelength/nm	532	Distance with a pair/m	90
Transmitted pulse width/ns	1.5	Distance between beam pairs/km	~3.3
Pulse repetition rate/kHz	10	Beam energy per pulse/μJ	175±17, 45±5

ATLAS/ICESat-2 数据分为 Level0、Level1、Level2 和 Level3 共四级, 包括 ATL00-ATL21 共 21 种产品, 数据产品分类详细描述见 <https://icesat-2.gsfc.nasa.gov/science/data-products>。ATL00 是 0 级产品, 提供原始测量数据; ATL01 与 ATL02 是 1 级产品, 在 ATL00 基础上进行了格式转换和仪器校正; ATL03 提供了接收光子的经纬度以及椭球高度, 并被作为生成其他产品

的基础数据, 如陆地冰 (ATL06)^[12], 海冰 (ATL07)^[13], 植被冠层高度 (ATL08)^[14]。公开数据产品均采用 HDF-5 格式通过美国冰雪数据中心提供, 文中使用全球定位光子数据 (ATL03 Version 3), 数据可由 <https://nsidc.org/data/atl03> 免费下载。

ATLAS/ICESat-2 基于光电倍增管探测光子, 并将其转换为电子信号, 然后计时、存储并遥测以确定地

面的高程信息。然而由于 PMT 存在非理想的 after-pulse 效应,当探测器接收到海表或者地表的信号时,测量信号总会大于实际信号^[15]。PMT after-pulse 包含有两种类型:一种是在主信号脉冲输出之后带有非常短的延迟(几纳秒到几十纳秒),另一种则表现为更长时间的延迟(几微秒)。延时较长的后脉冲是由 PMT 中残留气体的电离而产生的正离子引起,这些正离子返回到光电阴极并产生许多光电子,从而形成后脉冲^[11]。研究 ATLAS/ICESat-2 系统的瞬态响应特性,了解在某一典型信号输入下,其输出量从初始状态到稳定状态的过程,对于准确获取真实信号波形具

有重要意义。

2 ATL03 数据预处理及校正方法

文中基于 ATLAS/ICESat-2 的二级产品 ATL03 (其中接收光子高度为 WGS-84 椭球高度),对观测到的光子计数回波数据进行筛选、下载、预处理(按照垂直方向上 15 cm 和沿轨道方向 0.001 s 的精度统计)并通过研究其不同波束脉冲响应特性来校正海洋剖面原始观测数据,以消除 PMT after-pulse 影响(处理流程见图 1),进而获取到更为可靠的水下剖面信号。

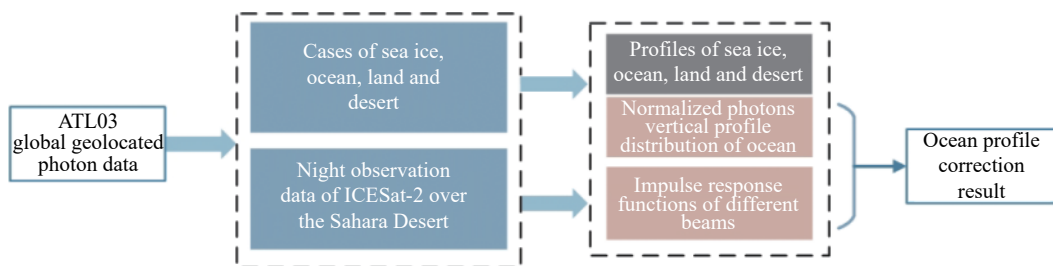


图 1 ATLAS/ICESat-2 数据预处理及校正流程图

Fig.1 Flow chart of ATLAS/ICESAT-2 data preprocessing and calibration

首先选取并下载了四种不同反射表面区域的数据个例,对四种表面类型的原始光子数据分别进行预处理,目的是统计原始的光子分布得到廓线信息。按照垂向 15 cm 和沿轨方向 0.001 s 的精度统计,统计过程中需要根据峰值 bin 的位置对齐。处理结果表明:不同反射表面的观测数据均会受到 PMT after-pulse 影响。实验为分析探测器系统脉冲响应函数影响,并考虑降低太阳背景光等其他噪声影响,文中选取了 2019 年 1 月 1 日至 2020 年 11 月 11 日卫星过境撒哈拉沙漠地区的夜间观测数据,将 6 个波束的数据分别进行预处理。对于每个波束来说,经预处理会得到若干条 20 m 以内的廓线,再按照公式(1)^[16]通过每条廓线的后向散射信号来计算脉冲响应曲线 $f(z)$,该波束下多条 $f(z)$ 沿垂直高度方向平均得到这一波束下的脉冲响应函数 $F(z)$ ^[16]。

$$f(z_j) = \frac{\beta(z_j)}{\sum_{i=p-1}^{i=p+133} \beta(z_i)} \quad (j = 1, 2, 3 \dots, 135) \quad (1)$$

式中: $\beta(z_j)$ 表示第 j 个 bin 后向散射值的大小; j 表示每个 bin 对应的位置; p 表示地面信号所在位置即峰值信号出现的位置。

在无风或者风速很小的情况下,海表会发生镜面反射,海面回波之后的信号被认为是海表信号缓慢衰减导致,此时水下的信号可以被忽略。文中不考虑镜面反射情况,选取了海表回波光子数在 8/bin~20/bin 间的数据^[17],对数据进行预处理,获取归一化回波信号剖面 $S(z)$,使用退卷积方法^[18]来校正 PMT 的不良响应,以获取可靠的海洋次表层信号(见公式(3))。

ICESat-2 观测到的后向散射信号为 $S(z)$,是正确的后向散射信号 $S_c(z)$ 与探测器的脉冲响应函数 $F(z)$ 的卷积,即 $S(z) = F(z) * S_c(z)$,可被表示为^[18]:

$$\begin{bmatrix} F(z_2), & F(z_1), & 0, & \dots & 0 \\ F(z_3), & F(z_2), & F(z_1), & \dots & 0 \\ \dots & \dots & \dots & \dots & \dots \\ F(z_{n+1}), & F(z_n), & F(z_{n-1}), & \dots & F(z_2) \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} S_c(z_1) \\ S_c(z_2) \\ \vdots \\ S_c(z_n) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} S(z_1) \\ S(z_2) \\ \vdots \\ S(z_n) \end{bmatrix} \quad (2)$$

所以可利用不同波束的脉冲响应函数经过退卷积处理获取正确的后向散射信号:

$$S_c(z) = [F]^{-1}S(z) \quad (3)$$

3 ATL03 数据预处理及校正结果与讨论

3.1 不同反射表面 PMT after-pulse 结果

研究选取了海冰、海洋、陆地和沙漠等不同下垫面观测数据个例, 对其进行预处理。图 2 使用了 2018 年 10 月 14 日观测到的海冰回波数据, 其中图 2(a) 给出了该数据记录的 250~270 s 的光子分布, 图 2(b) 给出了由 250~270 s 累加的归一化光子垂直剖面分布;

图 3 使用了 2018 年 10 月 16 日观测到的海洋回波数据, 其中图 3(a) 给出了该数据记录的 40~100 s 的光子分布, 图 3(b) 给出了由 40~100 s 累加的归一化光子垂直剖面分布; 图 4 使用了 2018 年 10 月 16 日观测到的陆地回波数据, 其中图 4(a) 给出了该数据记录的 220~240 s 的光子分布, 图 4(b) 给出了由 220~240 s 累加的归一化光子垂直剖面分布; 图 5 使用了 2019 年 7 月 24 日观测到的沙漠回波数据, 其中图 5(a) 给出了该数据记录的 280~310 s 的光子分布, 图 5(b) 给出了由 280~310 s 累加的归一化光子垂直剖面分布。

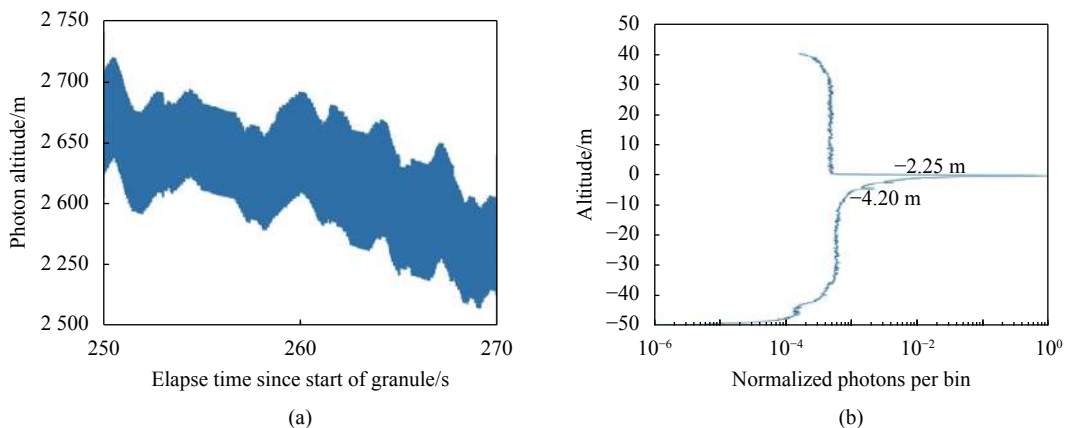


图 2 (a) 海冰表面光子分布 (高度为椭圆高); (b) 光子垂直剖面分布, 其中 x 轴表示每个 bin 的归一化光子数, y 轴表示高度, 将表面回波峰值处设置为 0 m

Fig.2 (a) Photon distribution from sea ice surface (Height of each received photon, relative to the WGS-84 ellipsoid); (b) The photons vertical profile distribution, x-axis is normalized photon counts per bin and y-axis is altitude in meter. The altitude of peak surface return is set to 0 meter in (b)

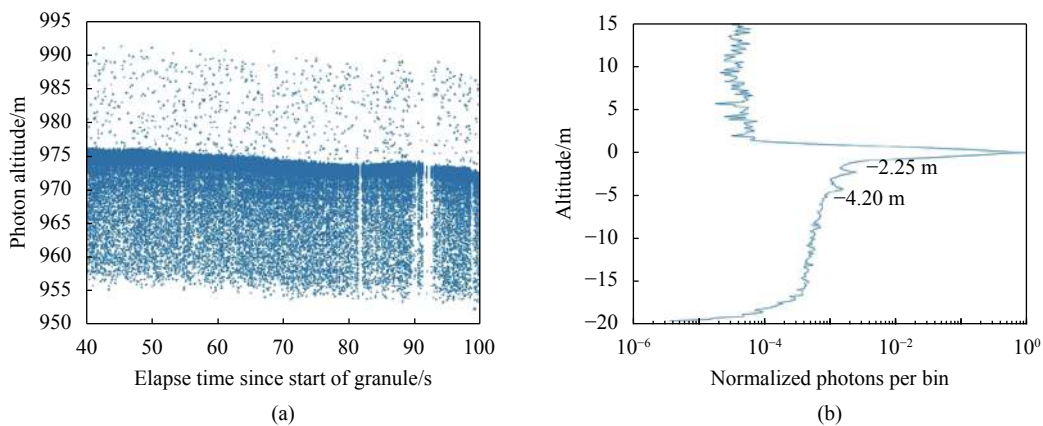


图 3 (a) 海表光子分布 (高度为椭圆高); (b) 光子垂直剖面分布, 其中 x 轴表示每个 bin 的归一化光子数, y 轴表示高度, 将表面回波峰值处设置为 0 m

Fig.3 (a) Photon distribution from ocean surface (Height of each received photon, relative to the WGS-84 ellipsoid); (b) The photons vertical profile distribution, x-axis is normalized photon counts per bin and y-axis is altitude in meter. The altitude of peak surface return is set to 0 meter in (b)

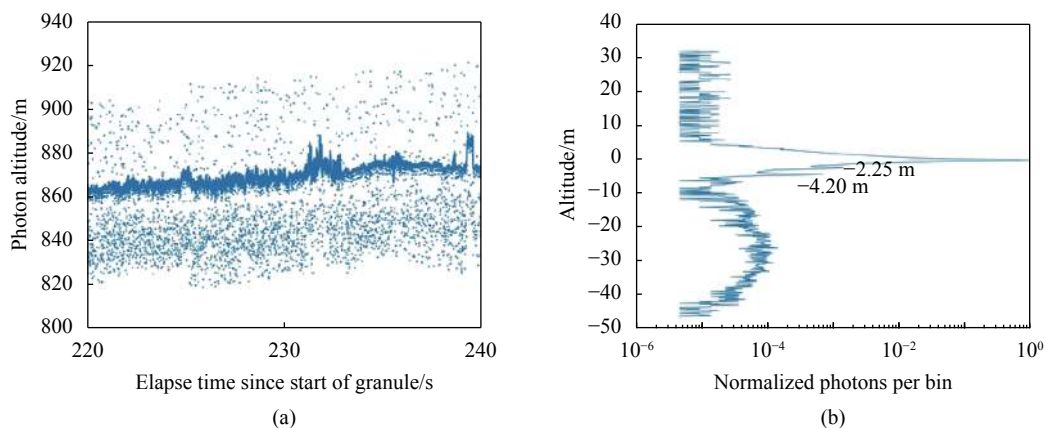


图 4 (a) 陆地表面光子分布 (高度为椭球高); (b) 光子垂直剖面分布, 其中 x 轴表示每个 bin 的归一化光子数, y 轴表示高度, 将表面回波峰值处设置为 0 m

Fig.4 (a) Photon distribution from land surface (Height of each received photon, relative to the WGS-84 ellipsoid); (b) The photons vertical profile distribution, x -axis is normalized photon counts per bin and y -axis is altitude in meter. The altitude of peak surface return is set to 0 meter in (b)

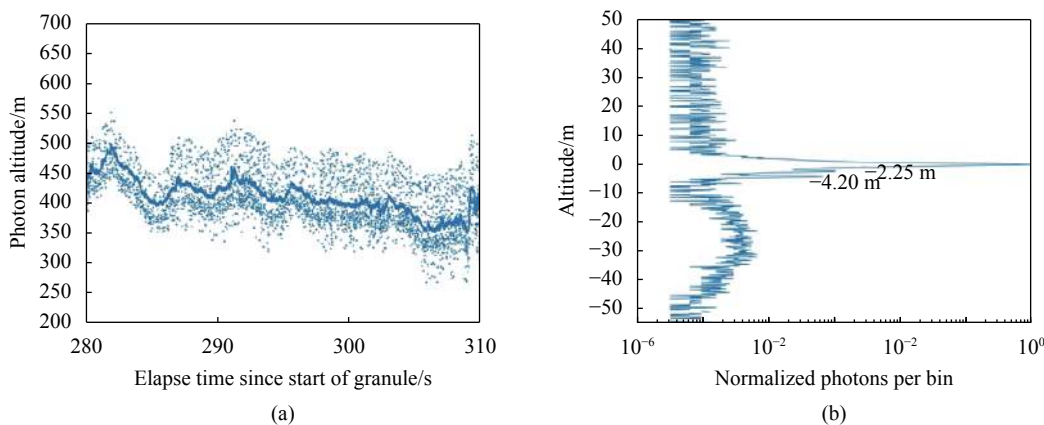


图 5 (a) 沙漠表面光子分布 (高度为椭球高); (b) 光子垂直剖面分布, 其中 x 轴表示每个 bin 的归一化光子数, y 轴表示高度, 将表面回波峰值处设置为 0 m

Fig.5 (a) Photon distribution from desert surface (Height of each received photon, relative to the WGS-84 ellipsoid); (b) The photons vertical profile distribution, x -axis is normalized photon counts per bin and y -axis is altitude in meter. The altitude of peak surface return is set to 0 meter in (b)

图 2~图 5 显示了四种反射表面 (海冰、海洋、陆地和沙漠) 的光子分布和归一化光子垂直剖面分布, 可以看出不同反射表面得到的垂直剖面在主回波后均会存在两个小的脉冲回波 (2.3 m 和 4.2 m 处), 冰面和海面之后的两个小回波数量级均在 $10^{-3} \sim 10^{-2}$ 间, 而陆地和沙漠地表主回波后的第二个小回波 (4.2 m) 在 $10^{-4} \sim 10^{-3}$ 间。此外从图 4(b) 和图 5(b) 中可以观察到, 对于陆地和沙漠来说, 主脉冲之后在 10~45 m 间存在一个更长时间延迟的脉冲回波。因此可以判断, 对于不同反射表面的观测数据来说, 均会受到 PMT after-pulse 影响。

3.2 ATLAS/ICESat-2 脉冲响应函数

由于 ATLAS/ICESat-2 PMT after-pulse 影响, 使得海洋次表层信号会受到来自海面回波噪声拖尾的污染。因此, 要想获取更加可靠的海洋次表层信号, 必须清楚系统的脉冲响应特性。由于 532 nm 的激光很难穿透地表, 理想情况下激光雷达的后向散射信号在地面强回波之后应该迅速衰减为零, 但从图 4(b) 和图 5(b) 中观察到在主脉冲之后约 2.3 m、4.2 m 以及 10~45 m 间存在有三个不同幅度的脉冲回波, 可以认为地面之后的后向散射信号是由接收系统本身 after-pulse 响应造成, 所以可使用地面回波信号对水体信

号进行校正。文中选取了撒哈拉沙漠地区夜间观测数据来研究不同波束下系统的脉冲响应函数。

ATLAS/ICESat-2 通过发射 3 对波束进行全球范围观测, 每对波束中强弱能量比约为 4 : 1 (强波束: Beam1、Beam3 以及 Beam5; 弱波束: Beam2、Beam4 以及 Beam6)。文中选取了 2019 年 1 月 1 日至 2020 年 11 月 11 日撒哈拉沙漠地区夜间观测数据, 筛选出高

置信度的地面回波光子数据。图 6(a)~(f) 给出了 6 个波束的脉冲响应函数 $F(z)$ (绿色曲线), 分别为该波束下多条脉冲响应曲线 $f(z)$ 沿垂直高度方向平均得到。Beam1-Beam6 的脉冲响应曲线对比如图 7 所示, 结果显示不同波束得到的脉冲响应函数整体形态相似, 均在主脉冲后出现三个不同幅度的脉冲回波, 三个小峰出现位置一致 (约 2.3 m、4.2 m 和 6.5 m), 前两个小峰

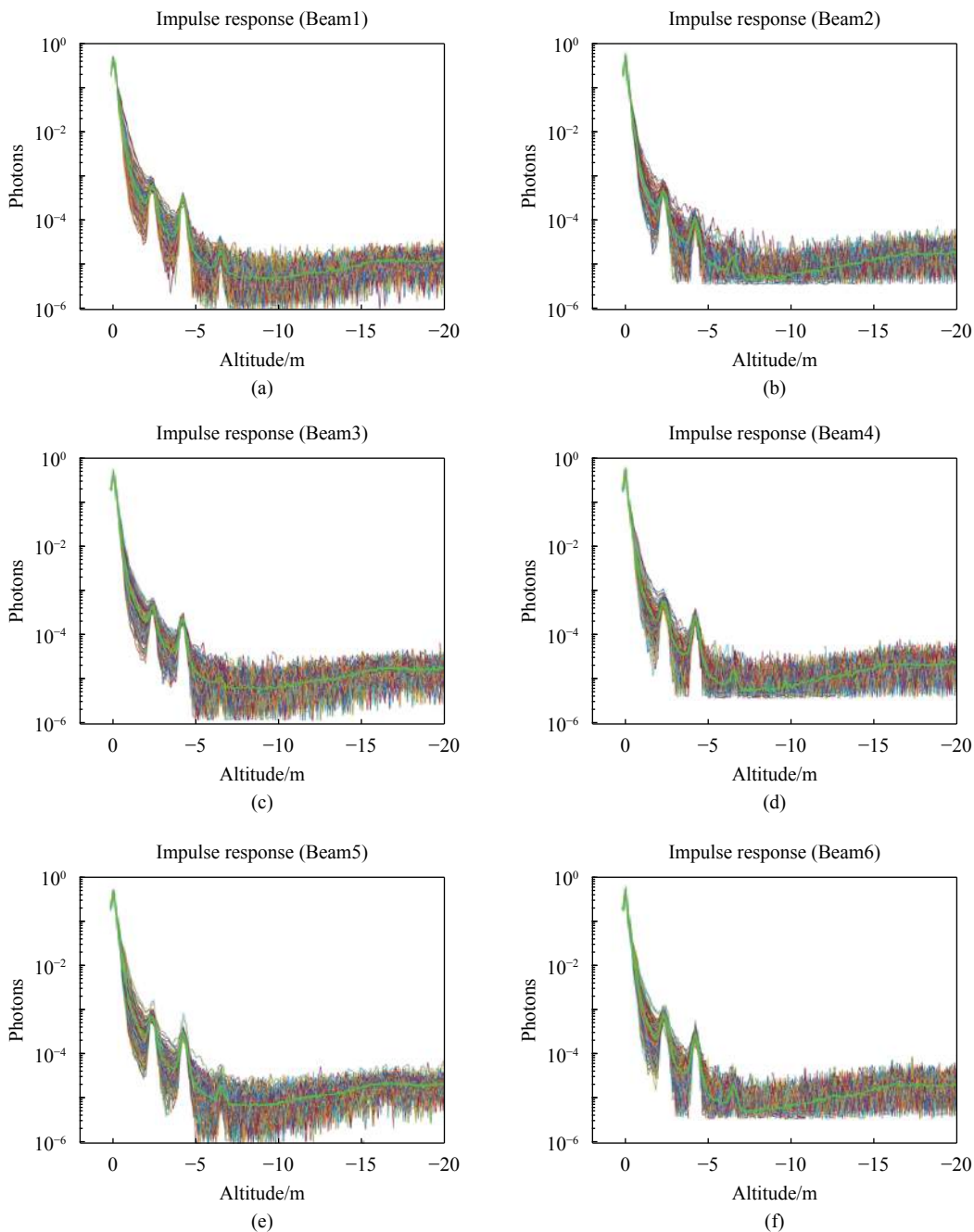


图 6 (a)~(f) Beam1~Beam6 脉冲响应曲线, 其中绿色曲线为该波束下的脉冲响应函数

Fig.6 Impulse response curves of six beams, in which the green curve is the impulse response function under the beam

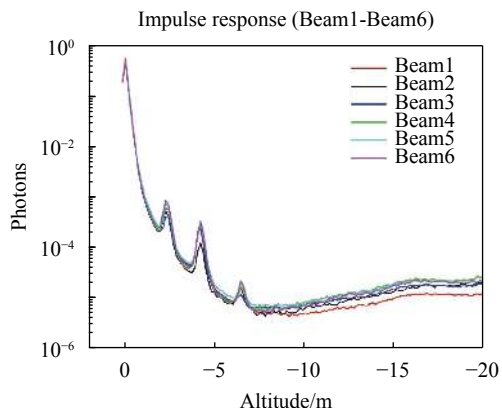


图 7 Beam1~Beam6 脉冲响应函数

Fig.7 Impulse response of six beams

峰值大小在 $10^{-4} \sim 10^{-3}$ 间 (其中 Beam2 第二个小峰略小, 与最大波束相差 2×10^{-4}), 第三个小峰数量级在 10^{-5} 。由此可知, 不同波束下脉冲响应函数出现的三

个小脉冲大小相近、位置一致, PMT after-pulse 影响普遍存在。

3.3 退卷积

由于 PMT after-pulse 的影响, 会使得水体的测量信号大于实际信号, 不能准确反映真实的剖面信息, 所以在反演工作之前必须对观测数据进行校正。文中选取了海表回波光子数在 8/bin-20/bin 间的数据, 所选数据地理位置如图 8 所示, 图 9 给出了所选数据的光子分布以及归一化回波信号垂直剖面。使用 3.2 节中由沙漠观测数据得到的 Beam1~Beam6 脉冲响应函数 $F(z)$, 对 2018 年 10 月 16 日观测到的同一海洋剖面 $S(z)$ 进行退卷积处理, 以获取正确的后向散射信号 $S_c(z)$ 。

对于同一海洋剖面选取水下 15 m 以内数据, 利用不同波束的脉冲响应函数进行退卷积, 处理结果如

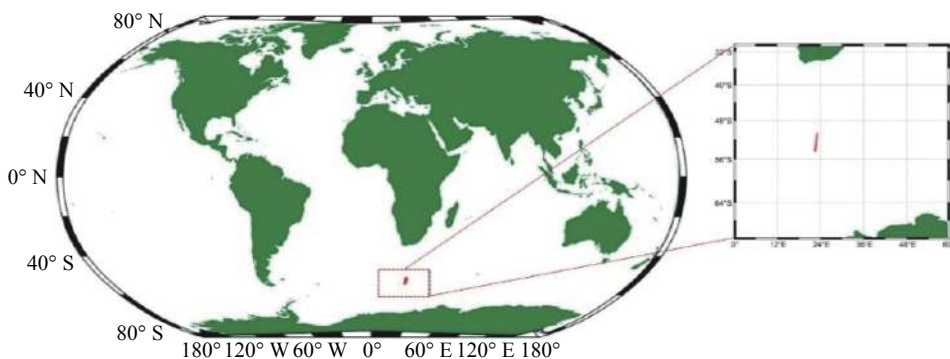


图 8 文中所用海洋数据位置示意图

Fig.8 Location of marine data used in this paper

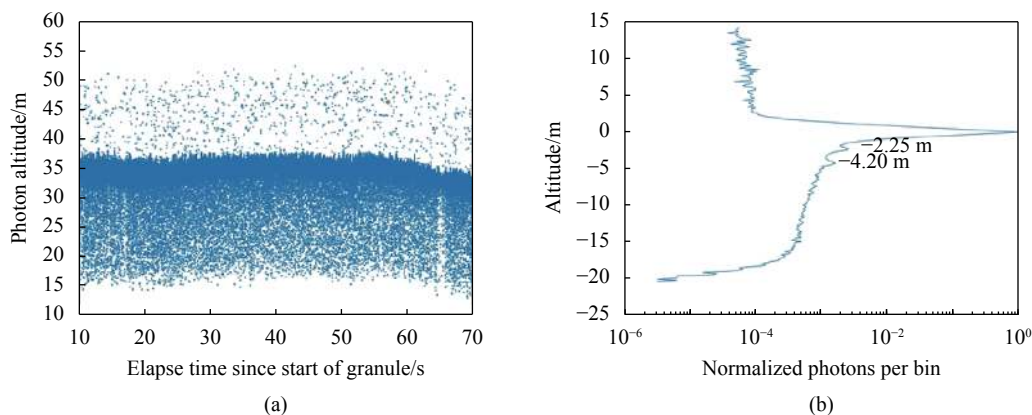


图 9 (a) 海表光子分布 (高度为 WGS-84 椭球高); (b) 光子垂直剖面分布, 其中 x 轴表示每个 bin 的归一化光子数, y 轴表示高度, 将表面回波峰值处设置为 0 m

Fig.9 (a) Photon distribution from ocean surface (Height of each received photon, relative to the WGS-84 ellipsoid); (b) The photons vertical profile distribution, x-axis is normalized photon counts per bin and y-axis is altitude in meter. The altitude of peak surface return is set to 0 meter in (b)

图 10 所示, 图 11 给出了 6 个波束的退卷积结果对比, 可以看出除 Beam2 外, 其余波束的退卷积结果差异较小, 均可有效退去主脉冲之后的回波小峰, 得到更加可靠的海洋次表层信号。Beam2 下脉冲响应函

数无法明显退掉水下信号的回波小峰, 推测由于其地面主回波后的第二个回波小峰数值稍小 (与其他波束最大相差 2×10^{-4}) 所致。

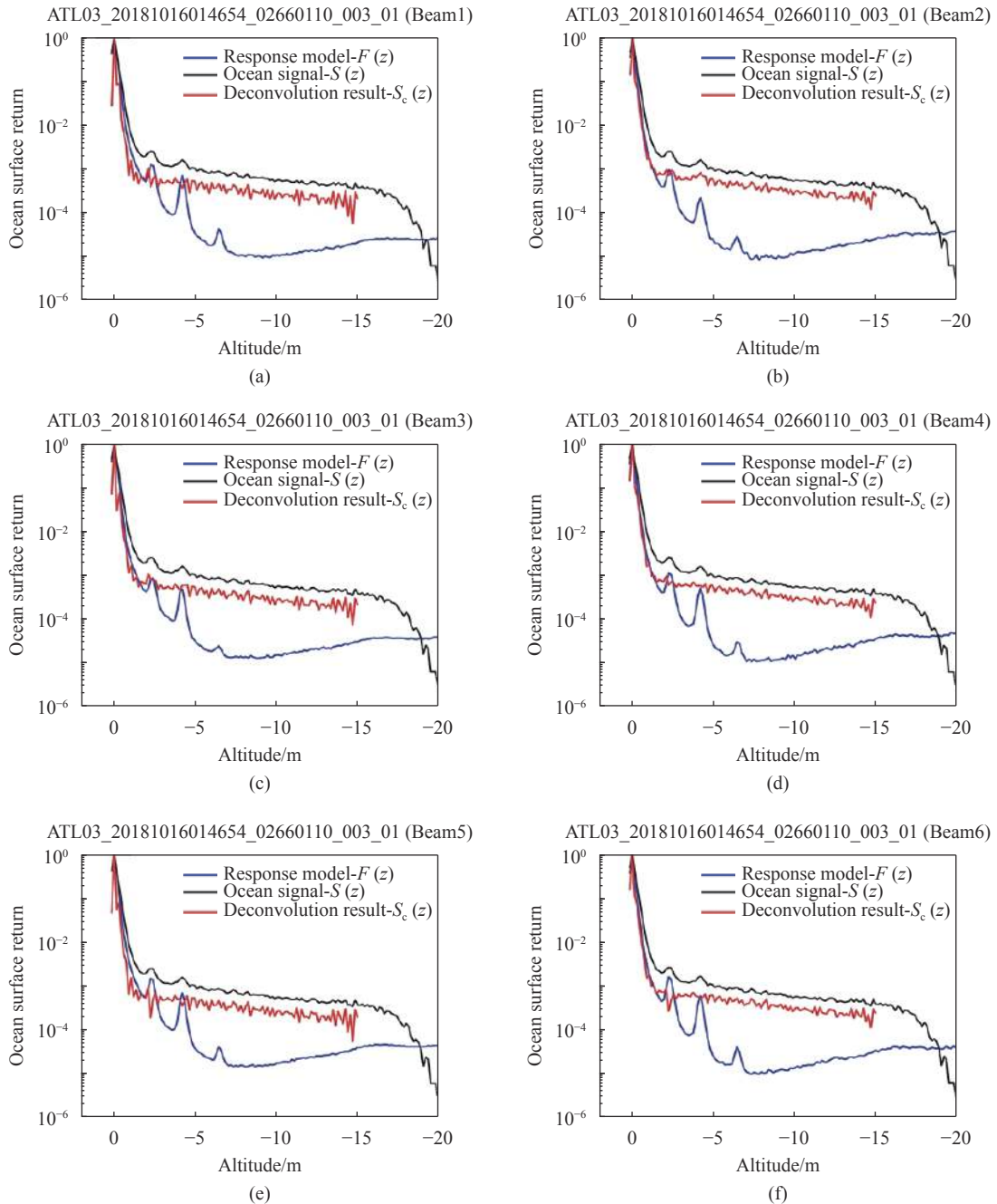


图 10 (a)~(f): 使用 Beam1~Beam6 脉冲响应函数的海洋剖面校正结果 (图中黑色曲线代表观测到的海洋剖面, 蓝色曲线代表脉冲响应函数, 红色曲线代表校正结果)

Fig.10 (a)-(f): Calibration results were obtained by using impulse response models under six beams, where the black curve represents the observed ocean profile, the blue curve represents the impulse response model, and the red curve represents the correction results

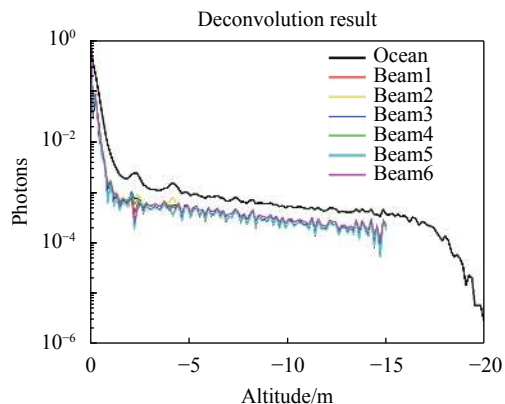


图 11 Beam1~Beam6 海洋剖面校正结果对比 (图中黑色曲线代表观测到的海洋剖面, 彩色曲线分别代表不同波束的退卷积结果)

Fig.11 The correction results of the observed ocean profile, where the black curve represents the observed ocean profile and the other color curve represents the deconvolution results of different beams

4 结 论

(1) 针对 ICESat-2 ATLAS 星载激光雷达高度计的海冰、海水、陆地以及沙漠的观测数据进行预处理, 结果显示不同反射表面的廓线均会在主回波后存在两个小的脉冲回波 (约 2.3 m 和 4.2 m 处)。此外, 陆地和沙漠在 10~45 m 间存在一个更长时间延迟的脉冲回波。因此可以判断, 对于不同反射表面的观测数据来说, PMT after-pulse 影响普遍存在。

(2) 选取了 ICESat-2 卫星过境撒哈拉沙漠的夜间观测数据, 经过预处理和模型计算, 获取到 6 个波束下的脉冲响应函数。对比发现 6 条曲线整体形态相似, 均在主脉冲后出现三个不同幅度的脉冲回波, 且出现位置一致 (约 2.3 m、4.2 m 和 6.5 m 处)、大小相近。系统脉冲响应函数的精确提取, 对提高海洋光学参数反演精度具有重要意义。

(3) 利用 6 个波束下得到的脉冲响应函数分别对同一水体后向散射信号进行退卷积处理, 结果显示除 Beam2 外 (推测由于其地面主信号回波后的第二个回波小峰数值过小所致), 其余 5 个波束均有效滤除了主脉冲之后的小幅度脉冲, 校正了 PMT after-pulse 影响。校正后的水体回波信号衰减趋势较好, 说明了利用沙漠地区回波数据得到的脉冲响应函数进行水体信号校正的有效性。

(4) 后续工作将进一步研究分析 Beam2 下脉冲响应函数在海洋水体信号校正中失效的原因, 并将基于校正后的海洋水体信号反演垂直剖面的多项光学参数 (漫射衰减系数 K_d 、后向散射系数 b_b 以及颗粒物后向散射系数 b_{bp} 等), 同时与生物地球化学剖面浮标 (Biogeochemical Argo float, BGC-Argo) 和中分辨率成像光谱仪 (Moderate Resolution Imaging Spectrometer, MODIS) 提供的光学参数进行交叉验证, 分析 ICESat-2 ATLAS 反演海洋浮游植物生物量的垂向分布特性的可行性。

参考文献:

- [1] Khan S A, Kjær K H, Bevis M, et al. Sustained mass loss of the northeast Greenland ice sheet triggered by regional warming [J]. *Nature Climate Change*, 2014, 4(4): 292-299.
- [2] 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.
- [3] Fang Yong, Cao Bincai, Gao Li, et al. Development and application of lidar mapping satellite [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2020, 49(11): 20201044. (in Chinese)
- [4] Zhu Xiaoxiao, Wang Cheng, Xi Xiaohuan, et al. Research progress of ICESat-2/ATLAS data processing and applications [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2020, 49(11): 20200259. (in Chinese)
- [5] Brunt K M, Neumann T A, Smith B E. Assessment of ICESat-2 ice sheet surface heights, based on comparisons over the interior of the antarctic ice sheet [J]. *Geophysical Research Letters*, 2019, 46(22): 13072-13078.
- [6] 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.
- [7] Kwok R, Markus T, Kurtz N T, et al. Surface height and sea ice freeboard of the Arctic Ocean from ICESat-2: Characteristics and early results [J]. *Journal of Geophysical Research: Oceans*, 2019, 124(10): 6942-6959.
- [8] Dandabathula G, Verma M, Sitiraju S R. Evaluation of best-fit terrain elevation of ICESat-2 ATL08 using DGPS surveyed points [J]. *Journal of Applied Geodesy*, 2020, 14(3): 285-293.
- [9] Horvat C, Blanchard - Wrigglesworth E, Petty A. Observing

- waves in sea ice with ICESat-2 [J]. *Geophysical Research Letters*, 2020, 47(10): e2020GL087629.
- [10] Lu X, Hu Y, Yang Y, et al. Antarctic spring ice-edge blooms observed from space by ICESat-2 [J]. *Remote Sensing of Environment*, 2020, 245: 111827.
- [11] Hamamatsu Photonics. Chapter 4 Characteristics of Photomultiplier Tubes in Photomultiplier Tubes Basics and Applications[M]. 3rd ed. Japan: Hamamatsu Publishing, 2006.
- [12] Smith B, Fricker H A, Holschuh N, et al. Land ice height-retrieval algorithm for NASA's ICESat-2 photon-counting laser altimeter [J]. *Remote Sensing of Environment*, 2019, 233(5): 111352.
- [13] Kwok R, Cunningham G F, Hoffmann J, et al. Testing the ice-water discrimination and freeboard retrieval algorithms for the ICESat-2 mission [J]. *Remote Sensing of Environment*, 2016, 183: 13-25.
- [14] Neuenschwander A, Pitts K. The ATL08 land and vegetation product for the ICESat-2 Mission [J]. *Remote Sensing of Environment*, 2019, 221: 247-259.
- [15] Hu Y, Vaughan M, Liu Z, et al. The depolarization-attenuated backscatter relation: CALIPSO lidar measurements vs. theory [J]. *Optics Express*, 2007, 15(9): 5327-5332.
- [16] Li J, Hu Y, Huang J, et al. A new method for retrieval of the extinction coefficient of water clouds by using the tail of the CALIOP signal [J]. *Atmospheric Chemistry and Physics*, 2011, 11(6): 2903-2916.
- [17] Lu X, Hu Y, Yang Y. Ocean subsurface study from ICESat-2 mission[C]//2019 Photonics & Electromagnetics Research Symposium-Fall (PIERS-Fall). IEEE, 2019.
- [18] Lu X, Hu Y, Trepte C, et al. Ocean subsurface studies with the CALIPSO spaceborne lidar [J]. *Journal of Geophysical Research: Oceans*, 2014, 119(7): 4305-4317.