

光子体制激光测高卫星大气探测算法分析

么嘉祺^{1,2}, 翟浩然^{2,3*}, 刘仁^{2,4}, 朱红⁵, 胡柳茹⁶, 唐新明^{1,2,4}¹山东科技大学测绘与空间信息学院, 山东 青岛 266590;²自然资源部国土卫星遥感应用中心, 北京 100048;³首都师范大学资源环境与旅游学院, 北京 100048;⁴河海大学地球科学与工程学院, 江苏 南京 211100;⁵防灾科技学院生态环境学院, 河北 廊坊 065201;⁶自然资源部第一地形测量队, 陕西 西安 710054

摘要 作为新一代激光测高卫星,光子体制激光测高卫星具备更高的数据覆盖密度、测高精度。云气溶胶、吹雪效应引起的前向散射,对最终测高数据精度有较大的影响。而光子体制激光测高卫星大气探测算法与传统激光测高卫星有较大区别,聚焦光子体制激光测高卫星大气探测相关技术,主要梳理了云气溶胶传输系统、冰星2两颗光子体制卫星关于系统参数、大气探测技术、大气相关参数反演算法等方面内容,分析现有光子体制激光测高卫星在大气探测技术上面临的难点。关于光子体制卫星大气探测技术的调研分析,对我国光子计数激光雷达相关研究可起到一定的推动作用。

关键词 遥感; 光子体制; 激光测高卫星; 大气探测; 多波束; ICESat-2; 云气溶胶传输系统

中图分类号 O436

文献标志码 A

DOI: 10.3788/LOP202259.2228002

Analysis of Atmospheric Detection Algorithm by
Photon-Counting Laser Altimeter SatelliteYao Jiaqi^{1,2}, Zhai Haoran^{2,3*}, Liu Ren^{2,4}, Zhu Hong⁵, Hu Liuru⁶, Tang Xinming^{1,2,4}¹College of Geomatics, Shandong University of Science and Technology, Qingdao 266590, Shandong, China;²Land Satellite Remote Sensing Application Center, Ministry of Natural Resources of P.R.China, Beijing 100048, China;³College of Resource Environment and Tourism, Capital Normal University, Beijing 100048, China;⁴School of Earth Sciences and Engineering, Hohai University, Nanjing 211100, Jiangsu, China;⁵College of Ecology and Environment, Institute of Disaster Prevention, Langfang 065201, Hebei, China;⁶The First Topographic Surveying Brigade, Ministry of Natural Resources of P.R.China, Xi'an 710054, Shaanxi, China

Abstract As a new generation of laser altimetry satellite, photon-counting laser altimetry satellite has better data coverage density and altimetry accuracy. The final altimeter data's accuracy is greatly influenced by forward scattering caused by cloud, aerosol layers, and snow blowing. The atmospheric detection algorithm of the photon-counting laser altimeter satellite is considerably different from that of the traditional laser altimeter satellite. This study focuses on the related technologies of photon-counting laser altimetry satellite atmospheric detection and summarizes two photon-counting satellites cloud aerosol transmission system and ICESat-2 from the aspects of system parameters, atmospheric detection technology, and inversion of atmospheric-related parameters, and the difficulties in atmospheric detection technology of existing photon-counting laser altimetry satellites are examined. The research on photon-counting satellite atmospheric detection technology in this study will promote the research on photon-counting lidars in China.

Key words remote sensing; photon-counting; laser altimetry satellite; atmospheric detection; multi-beam; ICESat-2; cloud-aerosol transport system

收稿日期: 2021-07-29; 修回日期: 2021-09-14; 录用日期: 2021-10-11

基金项目: 中国博士后科学基金面上项目(2021M693782)、国防科工局重大专项高分遥感测绘应用示范系统二期项目(42-Y30B04-9001-19/21)、国家自然科学基金(41971425, 41871382)

通信作者: *2@by2studio.cn

1 引言

激光测高卫星是指通过激光主动获取全球亚米级甚至厘米级高程的遥感卫星,其逐渐发展为一种新型对地观测技术,并成为星载激光雷达的重要组成部分^[1-2]。随着理论、仪器技术的不断发展,激光测高卫星呈现由线性体制到光子体制、单波束到多波束、低重复频率到高重复频率的发展趋势。线性体制激光测高卫星通过波形数字化仪将激光光斑范围内反射的多个光子记录下来,并使用复杂的算法去卷积,以获得激光测距值^[3-4]。由于这种设计模式,仪器功率被限制在较低水平,同时沿轨空间采样被限制在数百米左右,提高光子利用效率成为研究人员的关注热点。有别于线性体制卫星接收多个光子作为一次完整的测量,光子体制卫星通过每个光子独立获取地表高程,极大地提升了能量利用效率。2015年,美国国家航空航天局(NASA)将云气溶胶传输系统(CATS)发射到空间站上,是全球首颗针对云、气溶胶探测的单光子激光测高卫星,主要用于获取热带和中纬度地区大气垂直结构分布、光学厚度、粒子相态等方面内容^[5-6]。2018年,NASA成功发射了全球首颗多波束、光子体制激光测高卫星 ICESat-2,装备载荷为“先进地形激光测高系统”(ATLAS)^[7],采用了高重复频率激光器、高沿轨采样率和高灵敏度光电倍增管(PMT)技术,提高了数据覆盖密度和高程精度,其主要目的是继续执行 ICESat 未完成的观测任务^[8]。2020年,美国国家科学研究委员会在高精度激光测量表面地形计划的基础上,提出了人工智能光谱测量和自适应激光雷达项目(CASALS),设想通过多波束光子体制激光雷达、高光栅相机实现跨轨立体测量^[9]。在卫星激光测高领域,尽管我国起步较晚,但围绕高精度高程控制点获取、森林生物量估算、浅海地形测绘、“三极”区域高程变化监测等方面,我国将发展属于自己的单光子卫星激光测高核心技术^[10]。

实现大气探测对激光测高卫星有重要意义,这主要体现在两个方面:1)大气中云、气溶胶等粒子及吹雪现象引起的前向散射效应,对激光测高卫星产品精度有不可忽视的影响^[11-13],实现大气探测可为大气散射误差改正提供基础;2)大气探测获取到的大气垂直分布数据,是大气微物理特性反演、气-地相互作用分析的前提,且极大拓展了激光测高数据的应用场景。清洁大气区域内所接收的整体后向散射信号强度远远小于大气粒子区域,基于这一性质,可以通过阈值法实现大气探测。ICESat 将大气范围数据以固定长度 76.8 m 划分为若干区间,通过动态阈值判断区间内信号是否受到云、气溶胶层影响,可以较为精确地估计云、气溶胶层高度^[13]。云-气溶胶激光雷达与红外探路者卫星(CALIPSO)大气探测方法与 ICESat 略有不同,在不同高度区间采用不同数据采样频率,结合高度

区间内的信号对初始阈值进行校正,通过阈值判断信号是否受到大气散射影响,实现大气探测^[14]。全球生态系统调查卫星借助波形灵敏度、回波能量、土地覆盖类型等多个参数判断信号强度是否受到大气散射影响而衰减,之后结合波形高度数据作为约束条件,实现大气探测^[15-16]。

由于光子体制激光测高卫星独特的数据特性,大气探测相关算法有别于现有线性体制的 ICESat 及 CALIPSO 等卫星采用的算法,本文就光子体制 CATS、ICESat-2 数据所采用的大气相关参数反演算法及其质量控制标识进行了全面介绍,对我国后续光子体制卫星数据处理具有一定的借鉴意义。

2 数据介绍

2.1 CATS 卫星数据

CATS 卫星于 2015 年发射至国际空间站,并于 2017 年退役。国际空间站轨道是一个 51° 倾角轨道,高度约 405 km。与太阳同步轨道传感器相比,这一轨道提供了对热带和中纬度地区更全面的覆盖,其重复周期接近 3 天。CATS 有效载荷对云、气溶胶的测量,主要用于 3 个科学目标:1) 扩大全球激光雷达气候观测范围,包括在不同时间的观测,并促进对云和气溶胶日尺度变化的研究;2) 提供近实时的观测数据,以改进气溶胶的业务预报模式;3) 支撑未来天基激光雷达任务先进、关键技术的研发,如高重复频率、光子计数探测、高光栅分辨率激光雷达(HSRL)和 355 nm 波长探测能力。为了实现以上 3 个科学目标,CATS 以 3 种不同模式运行,具体如图 1 所示。

1) 多波束模式:主要以 532、1064 nm 及对应的偏振通道进行后向散射探测,激光输出被分成两束,一束向左 0.5°,一束向右 0.5°,可有效在地球表面形成两条相距 7 km 的足印轨迹。但由于激光器 2 出现故障,此操作模式无法再使用。

2) HSRL 模式:主要用于气溶胶垂直结构探测及微物理特性反演。主要通过 532 nm 高分辨率光谱数据、双通道后向散射廓线数据进行大气气溶胶探测,但是由于激光器频率不稳定,卫星工作后期并没有继续进行数据收集。

3) 紫外测试模式:主要用于探索紫外波长 355 nm 探测大气的可行性,但是由于激光器 2 出现故障,此操作模式无法再使用。

由于探测器单元出现故障,模式 3 无法正常采集数据,模式 1、2 可以在一定程度上正常运转采集大气后向散射廓线数据,卫星相关参数如表 1 所示。

CATS 卫星接收到的大气廓线数据垂直、水平分辨率分别为 60、350 m,通过国际空间站提供近乎实时的数据下传,但是存在一定的信号丢失(LOS),大多数情况下在 1~50 min 之间。2015 年 2 月开始处理模式 1 中的 CATS 数据产品,包括 Level 1B 和 Level 2。

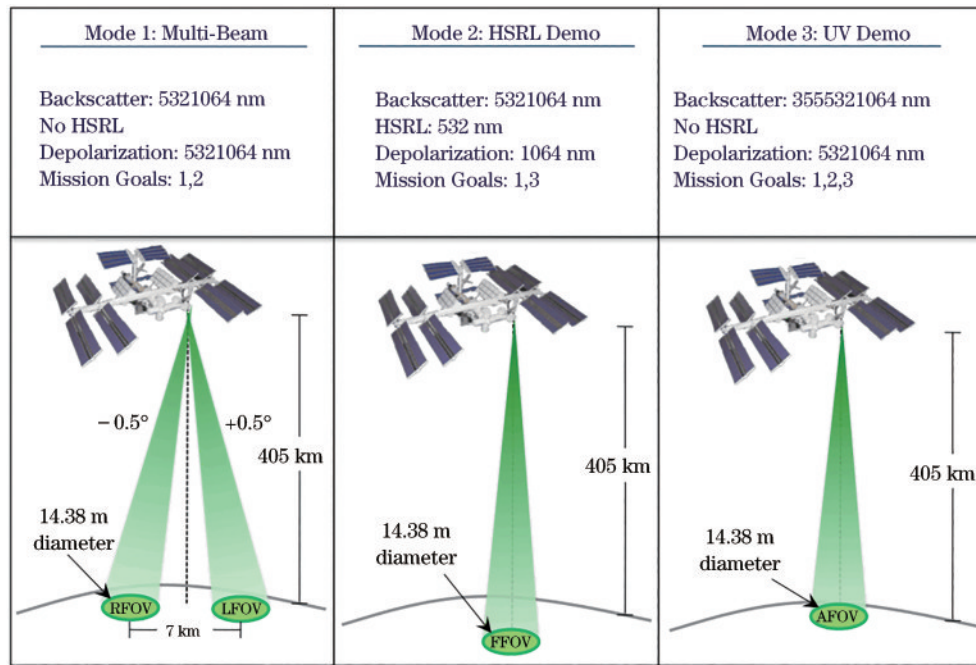


图 1 CATS 卫星的 3 种工作模式
Fig. 1 Three working modes of CATS satellite

表 1 CATS 卫星参数
Table 1 Parameters of CATS satellite

Project	Value
Wavelength of laser 1 /nm	5321064
Repetition frequency of laser 1 /Hz	5000
Output energy of laser 1 /mJ	~1
Wavelength of laser 2 /nm	3555321064
Repetition frequency of laser 2 /Hz	4000
Output energy of laser 2 /mJ	~2
The time of starting work	2015. 01
Aperture of telescope /cm	60
Inclined angle of laser emission /($^{\circ}$)	0. 5
Receiving field of view / μ rad	110
Orbit inclination /($^{\circ}$)	51
Orbit height /km	405
Atmospheric vertical resolution /m	60
Atmospheric horizontal resolution /m	350

Level 1B 是由原始数据经过校准、结合气象等辅助数据生产的面向用户使用的产品,包含总后向散射数据以及对应的偏振通道信息。Level 2 是基于 1 级产品数据反演的地球物理、大气环境等参数,如垂直特征掩模、云和气溶胶廓线数据(包含消光、粒子后向散射)及层综合参数(包含激光雷达比、光学厚度等)。

2.2 ICESat-2 卫星数据

ICESat-2 卫星于 2018 年发射,如图 2 所示,其上搭载的有效载荷 ATLAS 可以同时发射 6 个波束,其中强激光束用于获取大气廓线数据,记录为 ATL04 产品。ICESat-2 大气廓线数据垂直分辨率为 30 m、水平

分辨率为 280 m,在海拔高度[-1 km, 20 km]内布置了 700 个采样节点作为数据框架。尽管设置了数据框架,但是云、气溶胶及边界层往往出现在海拔高度 14 km 以下,因此 ICESat-2 获取海拔高度[-0.25 km, 14.75 km]范围内共 467 个采样节点的大气廓线数据,并根据后向散射强度在数据框架内自适应调整采样范围。在数据框架中获取的垂直长度为 15 km 的大气廓线数据保存在 ATL04 中,其余节点取值为无效值,其他卫星参数如表 2 所示。

ICESat-2 将数据产品划分为 Level 0~3B 等 5 个级别,大气产品主要被包含在 ATL04 未校正后向散射廓线数据(Level 2A)、ATL09 已校正后向散射廓线数据(Level 3A)中。图 3 是大气产品生产流程图,除输入原始光子数据、辅助数据外,还需要第三方数据源提供的地表反射率数据集。由于激光脉冲混合效应^[12],光子数据中携带的云、气溶胶粒子散射、高度信息被模糊在某一个高度范围,仅仅依赖激光数据本身无法实现层高度信息精准定位,因此 ATLAS 结合第三方数据实现了大气探测、相关参数反演。因为第三方地表反射率数据集的使用,ICESat-2 无法像 CATS 那样获取较为精确的云、气溶胶层高度信息,尽管通过反射率仍然可以反演光学厚度等参数,为用户使用数据产品提供参考。

3 原 理

线性体制激光雷达,例如 ICESat/GLAS、CALIPSO 等卫星是通过动态阈值法判断所接收的大气廓线信号是否受到云散射影响的^[18],这对 CATS 有一定的参考

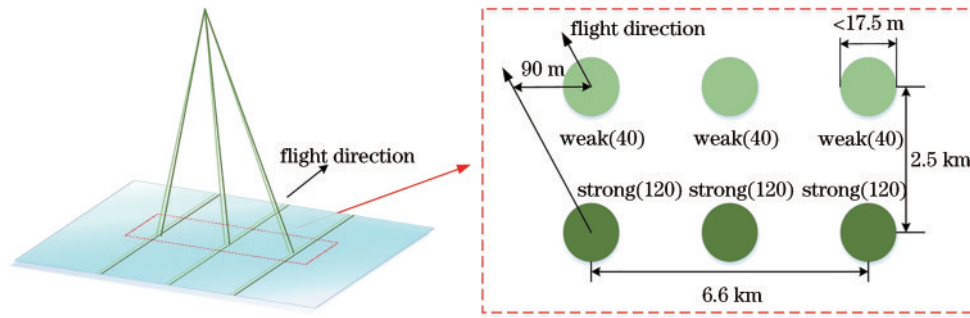


图 2 ICESat-2 卫星激光点足印分布^[17]

Fig. 2 Distribution of laser points on ICESat-2 satellite^[17]

表 2 ICESat-2 卫星参数

Table 2 Parameters of ICESat-2 satellite

Project	Value
Orbit height /km	500
Orbit inclination /($^{\circ}$)	92
Orbit type	Non-solar synchronization
Orbital period /d	91
Time of starting work	2018. 09
Wavelength /nm	532
Number of beams	6
Repetition frequency of laser /Hz	10000
Laser spot diameter /m	~17
Output energy of laser /mJ	Strong beam : 0. 17 Weak beam : 0. 04 Along-track : 0. 09
Distance between spots /km	Cross-track (strong beam and Strong beam) : 3. 3 Cross-track (strong beam and weak beam) : 2. 5
Repetition period /d	91
Elevation measurement accuracy /m	0. 1
Atmospheric vertical resolution /m	30
Atmospheric horizontal resolution /m	280

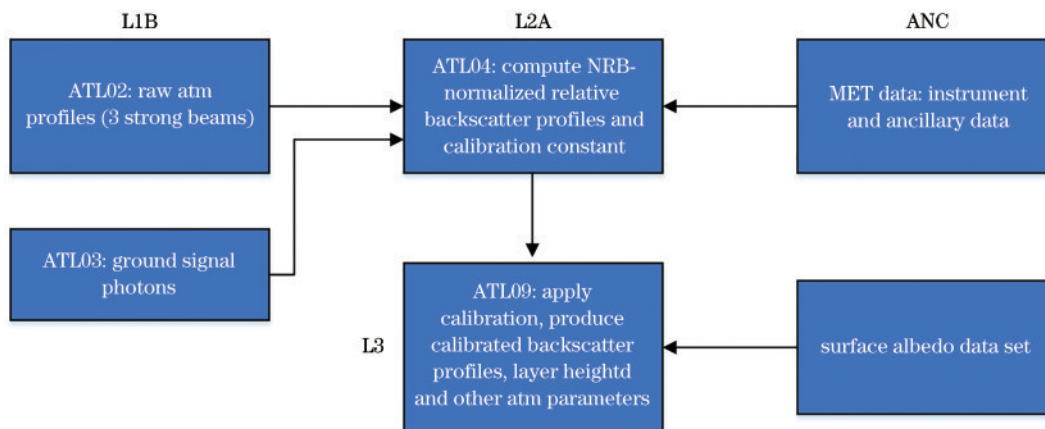


图 3 ATL04、ATL09 产品流程图

Fig. 3 Production flow chart of ATL04, ATL09

价值。但是对于 ICESat-2 而言,激光重复频率过高 (10 kHz),会引起激光脉冲混合现象,通过传统算法难以准确估计层高度信息,所以 ICESat-2 采用两种大气探测方案^[19]:方案 1 基于 ICESat-2 大气廓线数据,提出了一种密度维算法 (DDA),通过数据在空间密度分布上与背景噪声的显著差异,实现云、气溶胶、地面探测,但是由于脉冲折叠效应的影响,该方案存在潜在的不确定性;2) 方案 1 基于其他数据反演的表观反射率数据集,当光子受到散射影响时,所获取的表观地表反射率数据与晴空时有较为明显的区别,基于此,通过设置合理阈值可以实现大气探测,但是表观反射率不能反映环境因素对激光的影响,其算法精度仍有待评价。文献^[17]对方案 2 进行了详细阐述,本小节仅对方案 1 的算法进行梳理。

3.1 CATS 卫星大气探测算法

CATS 的 1B 级和 2 级数据处理算法在很大程度上参考了现有星载激光雷达系统的算法,如 CALIPSO、云雷达 (CPL) 等卫星。本小节主要介绍由 CATS L1B 数据生成 L2 数据的算法流程,主要包含大气探测、云与气溶胶分类算法。CALIPSO 通过动态阈值法实现云、气溶胶层高度检测,通过范围内信号是否超过“清洁大气条件”下所测得信号最大值判断是否

受到大气粒子的干扰,实现大气探测。指定某一搜索高度 Z_n , 获得衰减散射比 R'_n 及计算得到的阈值 T_n [也可写为 $R'_{\text{Threshold}}(Z)$]^[15], 长宽比 R_A 为衰减散射系数峰值与层几何厚度之比,用来描述衰减散射信号的形状。动态阈值算法流程如下^[15]:

- 1) 数据初始化。将 CATS 大气探测范围以 60 m 为梯度划分为若干个高度区间,记区间编号为 n 、最大高度为 Z_{max} 、最低高度为 Z_{min} 。
- 2) 动态阈值计算。计算当前节点空间 (编号为 n) 内的可变噪声 [RBV(Z)]、不变噪声 [MBV(Z)] 等参数,并在此基础上得到阈值 T_n 。
- 3) 云/气溶胶判断。判断当前高度区间是否存在衰减散射比 R'_n 大于阈值 T_n 的节点。如果存在,则判断当前节点存在云/气溶胶;如果不存在,则当前节点不存在云/气溶胶,进入下一个节点。
- 4) 廓线搜索参数初始化。算法中涉及最小层次厚度 (ΔZ_{cloud})、最小尖峰厚度 (ΔZ_{spike}) 等参数,如图 4 所示。在确定当前连续空间节点中存在大气信号后,必须保证所探测的层厚度信息大于传感器可探测的最小层厚度, ΔZ_{cloud} 根据 CATS 传感器状态在 300~500 m 之间取值。 $R_{A, \text{spike}}$ 为尖峰长宽比,为衰减散射系数峰值与最小层次厚度之比。对于几何厚度的薄云而言,虽

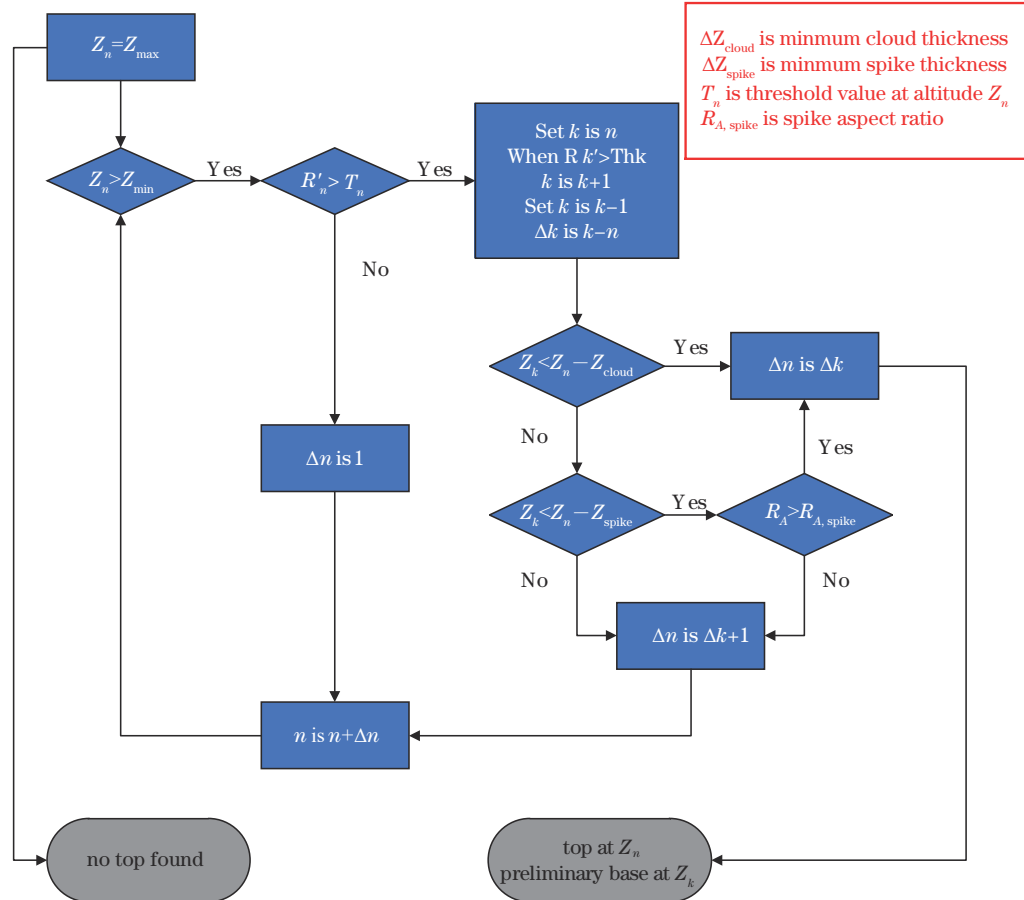


图 4 大气探测算法

Fig. 4 Atmospheric detection algorithm of CATS

然垂直向距离较小、超过阈值的点数量较少,但是其衰减散射比峰值远远大于阈值。基于这种性质, $0 < \Delta Z_{\text{spike}} < \Delta Z_{\text{cloud}}, \Delta Z_{\text{spike}}$ 内的采样点必须均大于阈值,且至少存在一个采样点,其强度大于阈值与尖峰因子的乘积,对于CATS而言,尖峰因子取值在 8 ± 2 。

5) 层高度搜索。搜索时从高度 Z_{max} 开始,到 Z_{min} 结束。首先进行层顶高度搜索。条件 a) 节点窗口内的所有采样点均大于阈值; 条件 b) 至少存在一个采样点,其强度超过衰减散射比阈值与尖峰因子乘积。当满足条件 a) 但是不满足条件 b) 时,判断 $R_A > R_{A,\text{spike}}$ 是否成立,成立时将当前采样点高度视为层顶高度(采样点编号为 Δk)。在得到层顶高度的基础上,进行层底高度搜索工作。检索节点窗口内首个强度小于阈值的采样点,以这个采样点为起点,重新设定窗口,若窗口内 50% 的采样点小于阈值,则设定其为层底高度,若不满足则继续向下检索。

衰减散射比 $R'(Z)$ 的表达式为

$$R'(Z) = \frac{\beta'_{\text{Total}}(Z)}{\beta'_{\text{air}}(Z)}, \quad (1)$$

$$\beta'_{\text{air}}(Z) = \beta_m(Z) \times T_m^2(Z) \times T_{O_3}^2(Z), \quad (2)$$

式中: $\beta'_{\text{Total}}(Z)$ 和 $\beta'_{\text{air}}(Z)$ 为当前高度 Z 处总的后向散射系数和清洁大气后向散射系数; $\beta_m(Z)$ 、 $T_m(Z)$ 、

$T_{O_3}(Z)$ 分别是气象数据中获取的大气分子后向散射系数、大气分子密度、臭氧密度。

高度 Z 处的衰减散射比阈值 $R'_{\text{Threshold}}(Z)$ 的表达式为

$$R'_{\text{Threshold}}(Z) = 1 + \frac{T_0 \times \text{MBV}(Z) + T_1 \times \text{RBV}(Z)}{\beta'_{\text{air}}(Z)}, \quad (3)$$

$$\text{MBV}(Z) = \sqrt{\sum_{Z=30.1}^{Z=40} [\beta'(Z) - \bar{\beta}'] / (N-1)}, \quad (4)$$

$$\text{RBV}(Z) = \sqrt{\beta'_{\text{air}}(Z) \times \beta'_{\text{air}}(Z_{\text{max}})}, \quad (5)$$

式中: T_0 、 T_1 表示常数,白天时取值为 1.5、1.75,夜晚时取值为 1.5、2.5。

3.2 CATS 卫星云/气溶胶分类算法

CATS 采用的大气分类算法如图 5 所示,基于多个筛选条件及 CPL 数据集实现后向散射信号大气探测及云、气溶胶的分类,其中 γ_{1064} 表示 1064 nm 通道后向散射廓线数据, χ 表示基于偏振通道计算的层整体后向散射颜色比, T_{mid} 表示中层温度, δ 表示基于偏振通道计算的层整体后向散射退偏比。云-气溶胶描述(CAD)指数是 CATS 针对数据特性提出的量化参数,是基于 CALIPSO 算法提出的概率密度函数。

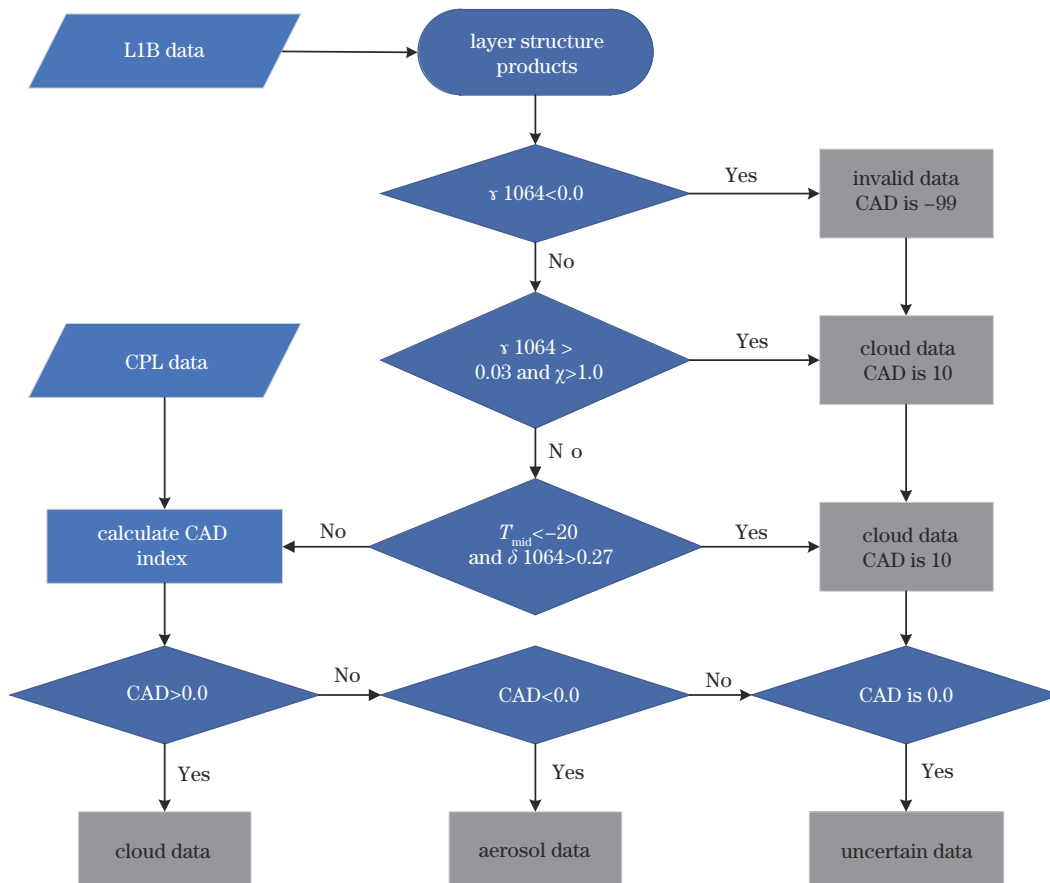


图 5 CATS 数据云、气溶胶分类算法

Fig. 5 Classification algorithm for cloud, aerosol in CATS data

CAD 的表达式为

$$V_{CAD} = \frac{\frac{P^{PDF1}}{100} \cdot T^{PDF1} + \frac{P^{PDF2}}{100} \cdot T^{PDF2} + \frac{P^{PDF3}}{100} \cdot T^{PDF3}}{T^{PDF1} + T^{PDF2} + T^{PDF3}}, \quad (6)$$

$$P^{PDFi} = \frac{P_C^{PDFi} - P_A^{PDFi}}{P_C^{PDFi} + P_A^{PDFi}} \times 100, \quad (7)$$

式中： P_C^{PDFi} 、 P_A^{PDFi} 分别表示信号为云、气溶胶的概率密度函数，该参数主要基于 CATS 前期收集的云、气溶胶相关属性，将各层次参数代入模型可计算对应的 P^{PDFi} ，取值在 0~100；3 种模式同时工作时的比重不同， T^{PDFi} 表示各个数据获取方式在总体中的权重系数。根据后向散射信号的 CAD 指数将层类型划分为云、气溶胶、不确定、无效等 4 类，如表 3 所示。

表 3 基于 CAD 指数的大气层次分类

Table 3 Atmospheric hierarchical classification based on CAD index

Layer type	CAD
Cloud	1-10
Aerosol	-10--1
Uncertain data	0
Invalid data	-999

3.3 ICESat-2 卫星大气探测算法

ICESat-2 记录了海拔高度 14 km 以下的大气廓线数据，这部分数据中包含云、气溶胶、吹雪等层结构及地面信息，为了将这些反射体与噪声区域（例如背景噪声、伪像和探测器暗计数等）分开，要求算法能够在背景条件变化（例如表面反射率变化、时间引起的噪声变化）时自适应确定反射体密度和噪声密度之间的阈值。基于上述要求，ICESat-2 提出一种在密度维度空间搜索最佳阈值的算法，即上文提到的 DDA 算法。

结合目前 ICESat-2/ATLAS 所获取的数据来看，光子数可能相对较低，通常不会超过背景值太多，因此光学薄云或气溶胶层与周围大气之间的密度梯度可能

非常小。对于光学薄层而言，大气探测算法需要在较大邻域内聚集数据，以检索足以从大气层中分离噪声的密度阈值。对于光学厚云、且空间上分布较为密集的条带，大气探测算法不需要在大邻域上进行数据聚集，以较小的数据窗口就能较好的效果，过大的窗口反而会因为聚集过多的光子而引起拖尾效应。这对 DDA 算法提出了两个亟须解决的难点：1) 探测与周围密度区域仅存在较小梯度差别的大气层，即探测算法不能丢失光学薄云；2) 尽可能精确地确定大气边界层，特别是光学厚度较大且空间分布上较为细窄的层。

DDA 算法流程如图 6 所示，主要通过不同的参数计算两次密度维阈值 (Step 0~5) 实现大气探测。第 1 次密度计算采用较小的窗口，目的是去除背景噪声、探测光学上密集的且空间上狭窄的云层；第 2 次密度计算前，首先移除第 1 次探测到的密集云层，之后采用较大的窗口计算密度阈值，目的是探测稀薄的云层和气溶胶。具体流程如下：

Step 0 掩膜处理。首先，自动识别大气廓线数据、掩膜数据中无效值的位置，将其填充为统一格式。其次，将第 1 次 DDA 输出的云掩膜结果保存在缓冲区中，待第 2 次 DDA 完成后，将两次云掩膜数据的并集作为最终输出结果。

Step 1 参数和加载数据设置。加载各项参数与初始化的数据，输入数据主要涉及格式转换问题。

Step 2 密度计算。结合径向基函数 (RBF)、各向异性范数构建新密度函数。

Step 3 基于 DDA 的自适应去噪。旨在在不同背景下，基于 Step 2 结果自动计算密度阈值矩阵，实现去除噪声。

Step 4 小团簇数据的移除。在 Step 3 实现去噪后，数据中仍存在簇状非云、噪声点数据，当点簇内数量小于 300 时，将其作为噪声移除。

Step 5 云掩膜输出。根据 Step 4 判断云区域数据，然后提取轮廓，将数据矩阵转换为二值栅格、数组。

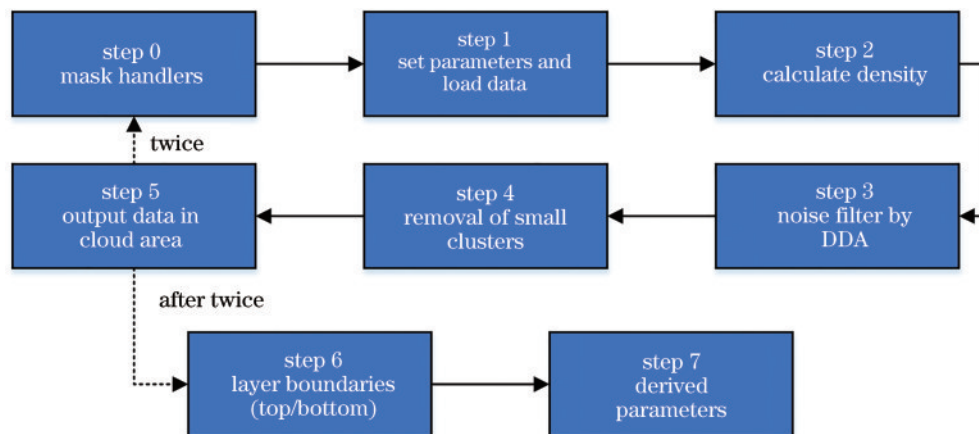


图 6 DDA 算法流程

Fig. 6 Flow chart of DDA algorithm

Step 6 边界层检测。将 Step 5 结果作为输入,每层在垂直方向应该至少有 3 个采样节点厚度,两个层之间的间隔应该至少有 3 个采样节点厚度,以每个廓线数据为单位,统计层之间间隙的数量,必须小于阈值,否则改变参数,重新寻找边界层高度,依次完成强激光束每一个廓线数据的边界层识别。

Step 7 参数导出。输出大气参数,例如层高度、层密度、廓线密度总和等。

前文已对 DDA 大气探测算法进行简要描述,但 Step 2 密度计算是一个较为复杂的过程,需要进一步梳理、讨论。

RBF 是为了解决密度计算、数据聚合等问题而提出的数学函数。RBF 对于光子激光测高数据聚合、去噪有非常显著的效果,靠近中心的点被赋予了较高的权重,并且权重向搜索窗口的外部逐渐减小,符合高斯函数分布。RBF 是一个实值函数,其值依赖于区域 D 中所有 x 距中心 $c \in D$ 的距离。

$$\varphi(\mathbf{x}, \mathbf{c}) = \varphi \|\mathbf{x} - \mathbf{c}\|, \quad (8)$$

$$\varphi(\mathbf{r}) = \exp \left[- \left(\frac{\mathbf{r}}{\sqrt{2} s} \right)^2 \right], \quad (9)$$

式中: $\|\cdot\|$ 表示范数; $\mathbf{r} = \mathbf{x} - \mathbf{c}$; $s \in \mathbf{R}$ 。

在光子数据分析中, RBF 可视为三维空间绕二维平面中心的高斯曲线拟合函数。因此,将其推广到密度维,可视为在第四维空间的结果,则式(9)可结合高斯概率密度函数进行改写,概率密度函数的表达式为

$$f_{\text{normpdf}} = \frac{1}{\sqrt{2\pi}\sigma^2} \exp \left[- \left(\frac{\mathbf{x} - \boldsymbol{\mu}}{\sqrt{2}\sigma} \right)^2 \right]. \quad (10)$$

将式(10)中标准差 σ 替换为 s , 将均值 $\boldsymbol{\mu}$ 替换为 0, 则式(9)引入高斯核函数的 RBF 可以表示为

$$\varphi(\mathbf{r}) = \sigma \sqrt{2\pi} f_{\text{normpdf}}. \quad (11)$$

使用各向异性范数的起因是云层在光子数据水平方向上比在垂直方向上延伸得更多,空间分布联系更强。当各向异性范数与 RBF 相结合时,令从中心点在水平方向找到的点比在垂直方向找到的点加权更高。各向异性范数的表达式为

$$\|\mathbf{v}\|_a = \|\mathbf{A}\mathbf{v}\|_2, \quad (12)$$

$$\mathbf{A} = \begin{bmatrix} \frac{1}{a} & 0 & 0 \\ 0 & \frac{1}{a} & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}. \quad (13)$$

将式(13)推广到密度中心及其临近点,则式(12)可改写为

$$\|\mathbf{x} - \mathbf{c}\|_a = \|\mathbf{A}(\mathbf{x} - \mathbf{c})\|_2. \quad (14)$$

云或其他大气特征内的光子识别,是由云作为漫反射体影响下的空间密度检索实现的,但是部分光子很可能位于其他噪声簇内。为了识别位于具有较高密度噪声点簇中的光子,引入了 RBF、各向异性范数

概念。

将窗口内所有数据定义为数据集 D , 对于每一个光子 $c \in D$, 其密度值 $f_d(c)$ 为以点 c 为中心、 r 为半径作为邻域的所有点的 RBF 之和, 距离中心点 c 越近, 其权重越大。权重矩阵的表达式为

$$\mathbf{W}(\mathbf{c}, \mathbf{x}) = \mathbf{W}_c(\mathbf{x}) = \varphi \|\mathbf{x} - \mathbf{c}\|_a. \quad (15)$$

在式(15)的基础上,可以推出中心点密度值:

$$f_d(\mathbf{c}) = \sum_{x \in D_c} \mathbf{W}_c(\mathbf{x}) Z(\mathbf{x}), \quad (16)$$

式中: D_c 为以点 c 为中心、 r 为半径内所有光子构成的数据集; $\mathbf{W}_c(\mathbf{x})$ 表示数据集内光子的权重; $Z(\mathbf{x})$ 表示当前光子在廓线数据中的节点编号。归一化密度值的表达式为

$$f_d^{\text{norm}}(\mathbf{c}) = \frac{\sum_{x \in D_c} \mathbf{W}_c(\mathbf{x}) Z(\mathbf{x})}{\sum_{x \in D_c} \mathbf{W}_c(\mathbf{x})}. \quad (17)$$

4 案例分析

正如前文所言,由于脉冲混合效应,ICESat-2 大气反演算法具有一定的不确定性。本小节将北京区域作为实验区域,结合全球气溶胶自动观测网(AERONET)验证数据^[20],评价 ATL09 中大气光学厚度反演精度。AERONET 北京观测站位于 39.93333° N, 116.31667° E, 目前由中科院大气物理研究所负责运行维护。选取 2019 年 7 月 14 日、18 日两轨 ATL09 数据作为实验数据,图中红色圆圈为地面观测站位置,如图 7(a) 所示。图 7(b) 为对应的 MODIS 影像,图 7(c) 为对应的大气廓线数据。从图中可以看出,有明显的云、气溶胶集聚现象。

大气中的云、气溶胶层往往以千米级较大规模出现,因此将 AERONET 太阳光度计所获取的数据视为半径 10 km 范围内的光学厚度真实值。在这一范围内,共有 194 个廓线数据。每个点的光学厚度值为对应廓线数据中多个层光学厚度之和,取地面观测时刻最接近的值作为真实值。由于 ICESat-2、AERONET 对大气光学厚度的探测波长存在一定的差异,需要对 AERONET 数据进行一定的预处理才能将其作为参考数据。AERONET 太阳高度计探测波长依次为 340、380、440、500、675、870、1020、1640 nm, 利用 675、500 nm 数据插值得到近似于 532 nm 波长探测的光学厚度^[21-23]。

图 8 是本小节实验精度验证结果。从图中可以看出,约 52% 的点反演精度在 0.2 以内。正如前文所言,脉冲混合效应直接使用激光能量可能会造成云层信息的误判。目前 ATL09 产品中的结果是结合 DDA 算法、第三方数据集得到的,经验证目前的算法距离大气定量应用标准有较大的差距,仅能为激光测高数据提供质量控制参考。如何解决这一问题,仍需要进一步探讨。

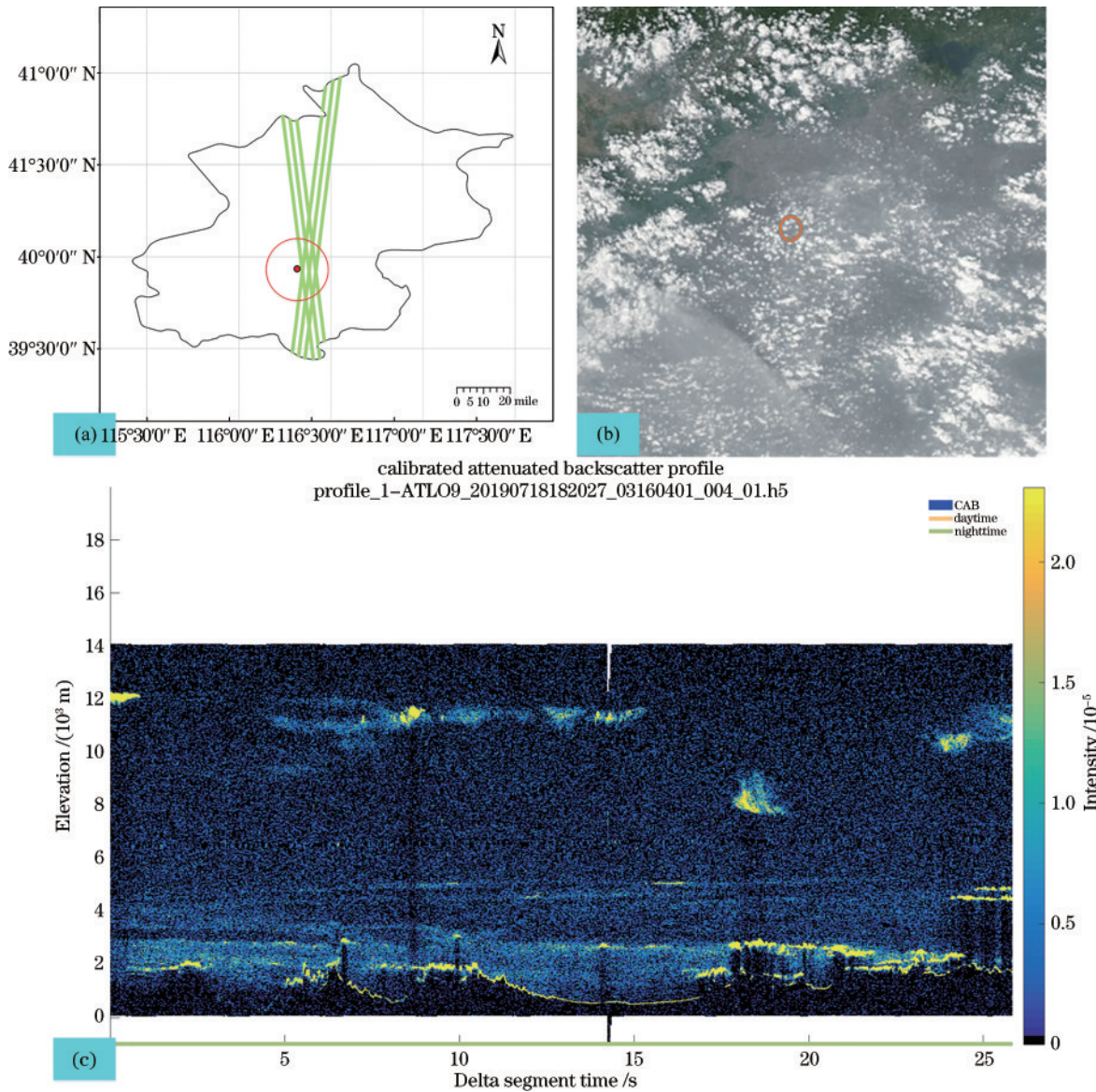


图7 实验区域数据分布

Fig. 7 Data distribution in experimental area

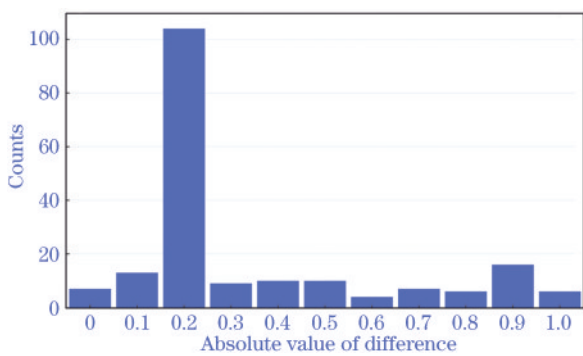


图8 实验数据误差分析

Fig. 8 Error analysis of experimental data.

5 结 论

作为新一代激光测高卫星,光子体制激光卫星在数据覆盖密度、精度上都远远超过线性体制激光测高卫

星,在三维地形探测领域上显现了无可比拟的优势。大气散射引起的测高偏差不容忽视,对光子体制数据的影响,比线性体制更为复杂。基于现有米氏散射理论,很难消除脉冲混合效应下大气散射影响,这可能需要进一步结合载荷配置和新的理论模型,才能妥善解决。发展新模式下的理论模型,不仅要解决单个光子在单次散射条件下的理论建模,还要能解决多个光子在复杂多次散射条件下的仿真模拟,尽量消除真实条件下大气多次散射引起的测距偏差。大气探测相关理论进一步完善,对光子体制激光测高卫星具有重要意义。

对于激光测高卫星而言,多光束、光子计数体制是目前激光雷达技术发展的趋势。目前,我国还处于起步阶段,发射光子体制卫星仍面临重重技术关卡。希望关于光子体制卫星大气探测技术的调研归纳,对我国光子体制激光雷达相关研究起到一定的推动作用。

参 考 文 献

- [1] 李国元, 唐新明, 张重阳, 等. 多准则约束的 ICESat/GLAS 高程控制点筛选[J]. 遥感学报, 2017, 21(1): 96-104.
Li G Y, Tang X M, Zhang C Y, et al. Multi-criteria constraint algorithm for selecting ICESat/GLAS data as elevation control points[J]. Journal of Remote Sensing, 2017, 21(1): 96-104.
- [2] 唐新明, 李国元. 激光测高卫星的发展与展望[J]. 国际太空, 2017(11): 13-18.
Tang X M, Li G Y. Development and Prospect of laser altimetry satellite[J]. Space International, 2017(11): 13-18.
- [3] Zwally H J, Schutz B, Abdalati W, et al. ICESat's laser measurements of polar ice, atmosphere, ocean, and land [J]. Journal of Geodynamics, 2002, 34(3/4): 405-445.
- [4] Wang X W, Cheng X, Gong P, et al. Earth science applications of ICESat/GLAS: a review[J]. International Journal of Remote Sensing, 2011, 32(23): 8837-8864.
- [5] McGill M J, Yorks J E, Scott V S, et al. The cloud-aerosol transport system (CATS): a technology demonstration on the international space station[J]. Proceedings of SPIE, 2015, 9612: 96120A.
- [6] Yorks J E, McGill M J, Scott V S, et al. The airborne cloud-aerosol transport system: overview and description of the instrument and retrieval algorithms[J]. Journal of Atmospheric and Oceanic Technology, 2014, 31(11): 2482-2497.
- [7] Yu A W, Stephen M A, Li S X, et al. Space laser transmitter development for ICESat-2 mission[J]. Proceedings of SPIE, 2010, 7578: 757809.
- [8] 杨帆, 温家洪. ICESat 与 ICESat-2 应用进展与展望[J]. 极地研究, 2011, 23(2): 138-148.
Yang F, Wen J H. ICESat and ICESat-2 applications: progress and prospect[J]. Chinese Journal of Polar Research, 2011, 23(2): 138-148.
- [9] Yu A W, Krainak M A, Harding D J, et al. Development effort of the airborne lidar simulator for the lidar surface topography (LIST) mission[J]. Proceedings of SPIE, 2011, 8182: 818207.
- [10] 李国元, 唐新明, 陈继溢, 等. 高分七号卫星激光测高数据处理与精度初步验证[J]. 测绘学报, 2021, 50(10): 1338-1348.
Li G Y, Tang X M, Chen J Y, et al. Processing and preliminary accuracy validation of the GF-7 satellite laser altimetry data[J]. Acta Geodaetica et Cartographica Sinica, 2021, 50(10): 1338-1348.
- [11] Tang X M, Yao J Q, Li G Y, et al. Cloud scattering influence on satellite laser altimetry data and its correction [J]. Applied Optics, 2020, 59(13): 4064-4075.
- [12] Yang Y K, Marshak A, Palm S P, et al. Cloud impact on surface altimetry from a spaceborne 532-nm micropulse photon-counting lidar: system modeling for cloudy and clear atmospheres[J]. IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing, 2011, 49(12): 4910-4919.
- [13] Yang Y K, Marshak A, Palm S P, et al. Assessment of cloud screening with apparent surface reflectance in support of the ICESat-2 mission[J]. IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing, 2012, 51(2): 1037-1045.
- [14] Abshire J B, Sun X L, Riris H, et al. Geoscience laser altimeter system (GLAS) on the ICESat mission: pre-launch and on-orbit measurement performance[C]// IGARSS 2003. 2003 IEEE International Geoscience and Remote Sensing Symposium. Proceedings, July 21-25, 2003, Toulouse, France. New York: IEEE Press, 2003: 1534-1536.
- [15] Liu Z Y, Vaughan M, Winker D, et al. The CALIPSO lidar cloud and aerosol discrimination: version 2 algorithm and initial assessment of performance[J]. Journal of Atmospheric and Oceanic Technology, 2009, 26(7): 1198-1213.
- [16] 谢栋平, 李国元, 赵严铭, 等. 美国 GEDI 天基激光测高系统及其应用[J]. 国际太空, 2018(12): 39-44.
Xie D P, Li G Y, Zhao Y M, et al. U.S. GEDI space-based laser altimetry system and its application[J]. Space International, 2018(12): 39-44.
- [17] Story S, Michelle H, Yi D. Algorithm Theoretical basis document for GEDI transmit and receive waveform processing for L1 and L2 products[EB/OL]. (2022-04-26) [2022-05-06]. <https://gedi.umd.edu/>.
- [18] 么嘉祺, 唐新明, 李国元, 等. 激光测高卫星 ICESat-2 云检测及其相关算法[J]. 激光与光电子学进展, 2020, 57(13): 131408.
Yao J Q, Tang X M, Li G Y, et al. Cloud detection of laser altimetry satellite ICESat-2 and the related algorithm [J]. Laser & Optoelectronics Progress, 2020, 57(13): 131408.
- [19] 毛飞跃, 龚威, 李俊, 等. 基于改进微分零交叉法的米氏散射激光雷达云检测与参数反演[J]. 光学学报, 2010, 30(11): 3097-3102.
Mao F Y, Gong W, Li J, et al. Cloud detection and parameter retrieval based on improved differential zero-crossing method for Mie lidar[J]. Acta Optica Sinica, 2010, 30(11): 3097-3102.
- [20] Palm S P, Yang Y, Herzfeld U C, et al. ATLAS/ICESat-2 L3A calibrated backscatter profiles and atmospheric layer characteristics, version1[EB/OL]. [2021-05-04]. <https://doi.org/10.5067/ATLAS/ATL09.001>.
- [21] Smirnov A, Holben B N, Eck T F, et al. Cloud-screening and quality control algorithms for the AERONET database[J]. Remote Sensing of Environment, 2000, 73(3): 337-349.
- [22] 李加恒, 刘厚凤, 赵丹婷. 基于 MODIS 的气溶胶光学厚度反演算法及应用进展[J]. 绿色科技, 2012(2): 108-111.
Li J H, Liu H F, Zhao D T. Inversion algorithm of aerosol optical depth based on MODIS data and its application[J]. Journal of Green Science and Technology, 2012(2): 108-111.
- [23] 张文豪, 李松, 马跃, 等. 利用境内气象站观测数据的激光测高仪大气延迟改进算法[J]. 红外与激光工程, 2018, 47(2): 0206004.
Zhang W H, Li S, Ma Y, et al. Improved method of atmospheric delay correction using China meteorological station data for a laser altimeter[J]. Infrared and Laser Engineering, 2018, 47(2): 0206004.