

## 基于自然地表的星载光子计数激光雷达在轨标定

赵朴凡, 马 跃, 伍 煜, 余诗哲, 李 松

(武汉大学电子信息学院, 湖北 武汉 430072)

**摘要:** 在轨标定技术是影响星载激光雷达光斑定位精度的核心技术之一。介绍了目前国内外星载激光雷达的在轨标定技术发展现状,分析了各类在轨标定技术的特点。针对新型的光子计数模式星载激光雷达的特性,提出了一种基于自然地表的星载光子计数激光雷达在轨标定新方法,使用仿真点云对标定算法的正确性进行了验证,并分别使用南极麦克莫多干谷和中国连云港地区的地表数据和美国 ICESat-2 卫星数据进行了交叉验证实验,实验结果表明:算法标定后的点云相对美国国家航空航天局提供的官方点云坐标平面偏移在 3 m 左右,高程偏移在厘米量级。文中还利用地面人工建筑等特征点对比了算法标定后的点云与官方点云之间的差异,最后对基于自然地表的在轨标定方法的精度以及标定场地形的影响进行了讨论。

**关键词:** 光子计数激光雷达; 自然地表; 在轨标定; 卫星激光测高

**中图分类号:** TN958.98      **文献标志码:** A      **DOI:** 10.3788/IRLA20200214

## Spaceborne photon-counting LiDAR on-orbit calibration based on natural surface

Zhao Pufan, Ma Yue, Wu Yu, Yu Shizhe, Li Song

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

**Abstract:** On-orbit calibration technique is a key factor which affects the photon geolocation accuracy of spaceborne LiDAR. The current status of spaceborne LiDAR on-orbit calibration technique was introduced, and the characteristics of various spaceborne LiDAR on-orbit calibration technique were analyzed. Aiming at the characteristics of the photon counting mode spaceborne LiDAR, a new on-orbit calibration method based on the natural surface was derived, simulated point cloud was used to verify the correctness of the calibration algorithm, and a cross validation experiment was made with the surface data of the Antarctic McMudro Dry Valleys and China Lianyungang areas and ICESat-2 point cloud data, the experimental results show that the plane offset between the point cloud calibrated by proposed algorithm and point cloud provided by National Aeronautics and Space Administration is about 3 m, elevation offset is in centimeter scale. The differences between the point cloud calibrated by the algorithm and the point cloud provided by National Aeronautics and Space Administration were also compared by using the feature points of artificial construction on the ground. Finally, the accuracy of the on-orbit calibration method based on natural surface and the influence of the calibration field topography were discussed.

**Key words:** photon-counting LiDAR; natural surface; on-orbit calibration; spaceborne laser altimetry

收稿日期:2020-05-28; 修订日期:2020-06-29

基金项目:国家自然科学基金(41801261);对地高分国家科技重大专项(11-Y20A12-9001-17/18,42-Y20A11-9001-17/18);中国博士后科学基金(2016M600612,20170034)

作者简介:赵朴凡(1996-),男,博士生,主要从事激光标定理论与方法方面的研究工作。Email: p.f.zhao@whu.edu.cn

导师简介:李松(1965-),女,教授,博士生导师,博士,主要从事卫星激光遥感技术与设备方面的研究工作。Email: ls@whu.edu.cn

## 0 引言

星载激光雷达是一种主动式的激光测量设备,它根据激光脉冲的渡越时间 (Time of Flight, ToF) 获得卫星与地表目标间的精确距离值,结合卫星平台的精确姿态、位置信息以及激光指向信息后可以获得目标的精确三维坐标。这种对全球尺度的地表高精度三维信息的获取能力,使得星载激光测高在极地冰盖及海冰检测、陆地高程测量、植被高度及生物量估计以及全球三维控制点获取等方面能够发挥重要作用<sup>[1]</sup>。

对于星载激光雷达,测距精度<sup>[2-3]</sup>以及激光光束指向的精度是影响目标的三维坐标定位精度的两个重要因素,其中光束指向精度尤为重要<sup>[4-5]</sup>;以 600 km 的轨道高度以及 1°坡度的地表为例,在激光光束近似沿天底方向发射的情况下,30"的指向误差将会使激光光斑坐标在平面方向产生 87 m 的误差,并在高程方向产生 1.5 m 的误差<sup>[6]</sup>。

可见,激光光束指向信息对地表光斑坐标的精确解算有着极为重要的意义。一般来说,卫星发射前会在地面对包括激光光束指向、测距零点在内的各项参数进行精确测量。然而,在发射过程中以及在空间中运行时的恶劣环境将不可避免地使激光光束指向以及测距零点产生一定的系统误差。因此,在这种情况下,对激光光束指向的系统误差以及测距系统误差进行在轨标定就显得十分有必要。美国国家航空航天局(National Aeronautics and Space Administration, NASA)在 2003 年发射 ICESat 卫星 (Ice, Cloud, and Land Elevation Satellite) 后,对其各项系统误差开展了细致的在轨标定及检校工作,从而实现了 GLAS (Geoscience Laser Altimeter System) 数据测距 5 cm、指向(包含横滚和俯仰项)1.5"(1σ)的精度<sup>[7-8]</sup>。我国的在资源三号 02 星发射后,也使用地面探测器对其搭载的激光测高实验载荷开展了在轨误差标定和检校工作,使得激光测高实验载荷的高程测量精度从标定前的 6.3 m 提高到了标定后的 1.6 m<sup>[9-12]</sup>。

近年来星载激光遥感技术得到了快速发展,光子计数星载激光雷达有微脉冲、高重复频率、多波束、小光斑等显著优点,成为星载激光雷达发展的新趋势<sup>[13-14]</sup>。目前我国针对线性体制激光雷达提出的使用地面探测器进行在轨标定和检校的方法<sup>[9-11]</sup>,在光

子计数星载激光雷达的在轨标定中存在诸多不便之处。例如,光子计数星载激光雷达极高的重复频率要求与之配合的地面探测器要具有极高的时间同步精度,极低的能量密度要求大幅提升探测器的灵敏度,多波束和小光斑的特点会使得地面探测器的布设范围和布设密度大大增加<sup>[15]</sup>。因此,对于光子计数星载激光雷达,有必要寻找一种新的在轨标定方法。文中将结合 NASA 所采用的海面姿态机动扫描的在轨标定技术,提出一种基于自然地表的在轨标定新方法,根据对两个实验场地的标定试验结果,对标定地形对在轨标定结果的影响进行分析和讨论。

## 1 星载激光雷达在轨标定的目的

星载激光雷达在轨标定的目的是剔除测量过程中的系统误差,从而提高获得的地面光斑坐标的精度。在星载激光测高中,地面激光脚点如公式 (1) 所示。

$$\vec{P}_g^{ECEF} = \vec{r}_s^{ECEF} + \mathbf{R}_{SBF2ECEF} \Delta \vec{X}^{SBF} + \mathbf{R}_{SBF2ECEF} \mathbf{R}_{laser2SBF} \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ \rho' - \Delta\rho \end{bmatrix} \quad (1)$$

式中:  $\mathbf{P}_g^{ECEF}$  为地面激光脚点在地心地固坐标系 (Earth-Centered Earth-Fixed, ECEF) 下的坐标;  $\mathbf{r}_s^{ECEF}$  为卫星位置数据;  $\mathbf{R}_{SBF2ECEF}$  为由卫星本体坐标系 (Satellite Body Frame, SBF) 到 ECEF 坐标系的变换矩阵,这一矩阵表示卫星姿态;  $\Delta \mathbf{X}^{SBF}$  为激光器相对于 SBF 原点的偏移量;  $\mathbf{R}_{laser2SBF}$  为激光器在 SBF 下的安置姿态,一般情况下可以用俯仰 (pitch) 和横滚 (roll) 两个欧拉角所对应的旋转矩阵表示  $\mathbf{R}_{laser2SBF}$ ;  $\rho'$  为星载激光雷达实际测距数据;  $\Delta\rho$  为测距零点的系统误差。

可见在 ECEF 坐标系下的激光指向受  $\mathbf{r}_s^{ECEF}$ 、 $\mathbf{R}_{SBF2ECEF}$ 、 $\Delta \mathbf{X}^{SBF}$ 、 $\mathbf{R}_{laser2SBF}$  的影响;由于经后处理后的卫星姿态与位置数据 ( $\mathbf{R}_{SBF2ECEF}$ 、 $\mathbf{r}_s^{ECEF}$ ) 能够达到很高的精度,并且由于  $\Delta \mathbf{X}^{SBF}$  远小于测距值  $\rho$ ,由  $\Delta \mathbf{X}^{SBF}$  的误差所导致的光斑定位误差极小,因此在对星载激光雷达进行在轨标定时,主要关注的是对  $\mathbf{R}_{laser2SBF}$  这一旋转矩阵以及测距值  $\rho$  的标定。其中,  $\mathbf{R}_{laser2SBF}$  可进一步分解为以俯仰和横滚两个方向的欧拉角所表示的旋转矩阵之积,  $\rho$  可以分解为实测数据  $\rho'$  与测距

零点的系统误差  $\Delta\rho$  之和。因此,在星载激光雷达的在轨标定中,激光器在卫星平台中的俯仰角、横滚角以及测距系统误差 ( $\Delta\rho$ ) 就是需要计算的 3 个基本参数。

基于地面探测器的在轨标定技术直接通过地面探测器捕获激光光束在地表形成的光斑,然后根据公式 (1) 做间接平差得到系统误差参数。基于海面姿态机动扫描的在轨标定技术是利用海面平均高程这一先验信息,根据测距残差解算系统误差参数。基于自然地表地形匹配的在轨标定技术则是以地表高精度的高程数据为先验信息,根据回波波形相关系数或高程残差解算系统误差参数。

## 2 基于海面姿态机动扫描的在轨标定方法

2003 年美国 ICESat 卫星发射后, NASA 使用基于姿态机动和海洋表面扫描的方法对激光载荷进行了在轨标定。这一方法将海洋表面假设为具有一定粗糙度的理想平面,在已知卫星精确轨道位置以及海洋表面高程后,利用实际星载激光雷达的测距值与理论测距值之间的残差对系统误差进行解算。

图 1 所示为海洋表面激光测距几何原理的简单示意图,图中  $\theta$  表示光束指向,  $\sigma_\theta$  为指向角变化量,  $s$  表示表面坡度,  $\sigma_\rho$  为测距值变化量。测距值关于指向的导数  $\sigma_\rho/\sigma_\theta$  是一个关于  $\theta$  和  $s$  的函数。在卫星进行姿态机动时  $\sigma_\rho/\sigma_\theta$  会随卫星姿态发生改变,从而使得分别由指向系统误差和测距系统误差导致的测距值的误差彼此分离;再利用由海面高程计算得到的理论测距值与星载激光雷达的实际测距值之间的残差对系统误差参数进行迭代逼近。

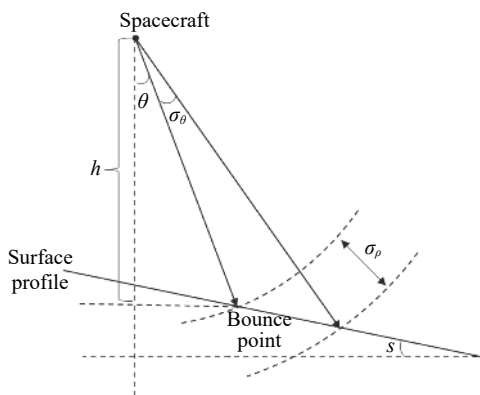


图 1 海洋表面激光测距几何原理示意图

Fig.1 Ocean surface laser ranging geometry principle

以姿态机动的方式对海面进行扫描的在轨标定方法,对标定场的要求较低、可选区域范围广,因而可以在卫星运行轨道的较大弧段内进行标定工作,这使得系统参数迭代解算中的样本数量可以达到很大的量级,对于有效估计系统误差十分有利。并且,这一标定方案只需要低分辨率的海面平均高程和海面平均浪高数据,这些数据大都已有成熟的数据库,获取难度和获取成本也很低。

该方法不仅适用于以 GLAS 为代表的线性体制星载激光雷达,也同样适用于星载光子计数激光雷达。2018 年美国发射的 ICESat-2 卫星中搭载了世界首个光子计数星载激光雷达 ATLAS (Advanced Topographic Laser Altimeter System),该系统也采用了基于姿态机动和海洋表面扫描的方法对指向与测距系统误差进行在轨标定<sup>[16]</sup>。然而该方案中,卫星在进行姿态机动时可能会引入额外的误差从而对系统误差的计算产生影响,这就要求卫星平台的姿态测量和姿态控制必须达到极高的精度<sup>[17]</sup>。这一特点导致基于海面姿态机动扫描的在轨标定方案不适用于我国的大平台、三轴姿态稳定卫星平台。

## 3 基于自然地表的在轨标定方法

基于自然地表的在轨标定方法是一种利用先验的地表地形数据,如数字高程模型 (Digital Elevation Model, DEM) 或数字表面模型 (Digital Surface Model, DSM) 进行在轨标定的方法。其基本原理是通过寻找地表 DEM 或 DSM 与卫星下传测量结果之间的高程残差、或波形残差 (针对线性体制激光雷达) 的最小值点,求解星载激光雷达的各项系统误差参数。

在对线性体制的星载激光雷达在轨标定方面,唐新明等人提出了一种针对资源三号 02 星的利用大范围 DSM 进行指向角粗标定的方法<sup>[12]</sup>,该方法利用经地表 DSM (ALOS 全球数字表面模型 ALOS World 3D-30 m),将星载激光雷达的高程测量精度由几十米提高到了 3 m 以内。唐新明、谢俊峰等人还提出了一种利用金字塔搜索的地形匹配在轨标定方法<sup>[18]</sup>,该方法根据卫星实测数据与 DSM 之间的高程残差,利用金字塔搜索的方法,成功地将高程误差由 100 m 降低到了 3 m 左右。张文豪、李松等人提出了一种针对具备波形记录功能的线性体制星载激光雷达的在轨标定

方法<sup>[19]</sup>,该方法根据由 DSM 得到的仿真波形与卫星实测波形之间的相关系数求解系统误差参数,在使用 GLAS 数据验证时,实现了约 2 m 的平面定位精度。易洪、李松等人提出了一种基于自然地表测距残差的在轨标定法思路<sup>[20]</sup>,并使用 GLAS 数据进行了仿真验证。

对于星载光子计数激光雷达,其更小的光斑间距使得在同样的标定场内能够获得更多的数据,这有利于系统误差参数的精确计算。Yaming Nan 等人根据卫星实测数据与 DEM 之间的高程残差,通过最小二乘法求解其最小值点,实现对系统误差参数的解算<sup>[21]</sup>。在利用人为加入坐标偏移后的 ICESat-2 点云做验证时,该方法得到的点云坐标与 ICESat-2 ATL03 数据中提供的官方点云坐标之间的平面误差约为 3 m,这符合 ICESat-2 卫星 6.4 m 的平面定位精度。然而,该方法还存在一定问题:在对表示激光光束指向的两个角量的标定中,只有一个角量标定的较为精确,而另一个角量仍存在较大的误差。

$$f(\vec{\alpha}) = \int_{-Y_0}^{Y_0} \int_{-X_0}^{X_0} H(X+u, Y+v) L(X+u, Y+v) dudv + \Delta\rho \quad (2)$$

$$H(X+u, Y+v) = \kappa \cos \langle n_g, n_l \rangle \frac{1}{\sqrt{2\pi}\sigma_B} \exp\left(-\frac{u^2+v^2}{\sigma_B^2}\right) \frac{1}{L^2(X+u, Y+v)} \quad (3)$$

根据前人的工作经验,结合光子计数星载激光雷达技术的工作特点,笔者提出了以测距残差为代价函数,通过最小二乘法求解星载激光雷达系统误差的新方法。

笔者使用公式 (2) 所示函数近似表示星载激光雷达对光斑范围 ( $X \pm X_0, Y \pm Y_0$ ) 内目标的测距结果,其中,  $\vec{\alpha}$  表示待估的系统误差参数,  $L(X+u, Y+v)$  表示星载激光雷达发射天线与地表微面元之间的距离,公式 (3) 所示  $H(X+u, Y+v)$  表示激光雷达接收孔径接收到的能量大小,  $\kappa$  为一个受地表反射率、大气透过率、激光雷达光学系统效率影响的常数,  $n_g$  和  $n_l$  分别表示地表面元的法向量和激光指向向量,  $\sigma_B$  表示地表光斑的  $1\sigma$  半径。考虑到各种因素导致的测距随机误差后,构建了公式 (4) 所示的星载激光雷达测距值的观测函数;然后利用最小二乘估计的得到系统误差参数

的估计结果,最小二乘递推公式如公式 (5) 所示。

$$\vec{p}' = f(\vec{\alpha}) + \vec{\sigma} \quad (4)$$

$$\vec{\alpha}_{n+1} = \vec{\alpha}_n + (B^T B)^{-1} B^T [\vec{p}' - f(\vec{\alpha}_n)]$$

$$B = \left. \frac{\partial f}{\partial \vec{\alpha}} \right|_{\vec{\alpha}_n} \quad (5)$$

受篇幅限制,该方法详细的理论模型和实现算法将另文介绍。目前,使用仿真点云数据和 ICESat-2 数据进行验证试验并取得了初步的结果。

首先,使用仿真点云数据对标定算法进行验证。验证过程中,首先根据卫星姿态、轨道数据求得指向  $\vec{n}$ ,然后在  $\vec{n}$  的基础上人为地加入指向误差后(包括系统误差及随机误差)的得到  $\vec{n}_0$ ,并根据  $\vec{n}_0$  计算出实际地表光斑中心坐标,然后依据对应区域的地表 DEM 数据,按照参考文献 [22] 中所示方法对激光雷达所接收的光子进行仿真,得到每一个接收光子所对应的飞行时间 (Time of Flight, ToF) 真值  $t_0$ ,并在  $t_0$  的基础上加入测距随机误差与测距系统误差后得到飞行时间  $t$ ,作为接收光子飞行时间的实测值。将结合  $\vec{n}$ 、 $t$  以及卫星的姿态、轨道数据计算得到的单光子点云坐标  $\vec{P}$  作为仿真得到的带有误差的“实测结果”。仿真所使用的相关参数及误差大小见表 1,在仿真过程中,笔者在激光指向角中加入了 200" 量级系统误差与 2" 的随机误差,并在测距结果中加入了 10 m 的系统误差与 1 m 的随机误差。

表 1 仿真所使用参数一览表

Tab.1 Parameters used in simulation

Parameter	Value
Laser wavelength/nm	532
Footprint diameter/m	17.5
Laser pulse energy/mJ	0.12
Transmitting off-nadir angle/(°)	1
Laser pointing random error/(")	2
Ranging random error/m	1
Laser pointing bias/(")	200
Ranging bias/m	10

在通过仿真得到单光子点云坐标  $\vec{P}$  后,将  $\vec{P}$  输入标定算法,将经算法解算出的系统误差参数与表 1 中设置的真实系统误差参数进行对比,评估标定精度。

图 2 及图 3 是给定不同迭代初值时,标定结果与

仿真预设参数之间的误差变化。从图中可以看到,指向角系统误差的迭代初值与表 1 所示的真实系统误差参数相差在  $-200'' \sim +200''$  的范围内时 (500 km 轨道高度下对应约  $\pm 500$  m 的平面误差), 由不同初值得到的标定结果与表 1 所示真值之间的残差基本稳定在  $0.2''$  (指向角) 及 1 cm (测距) 以内, 这表明, 该标定算法对于不同的初始值都能得到较为稳定的标定结果。

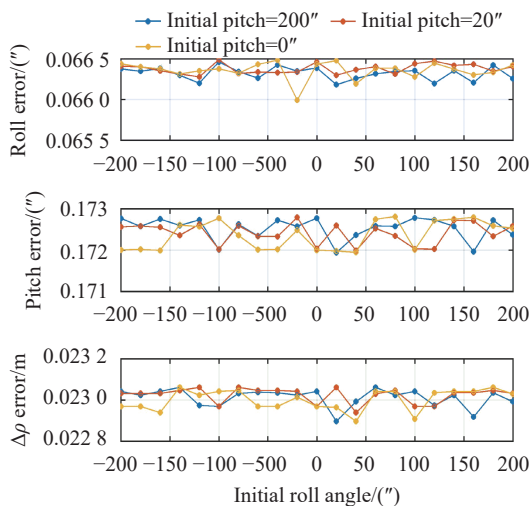


图 2 不同初始 Roll 值下的标定结果

Fig.2 Calibration results with different initial Roll values

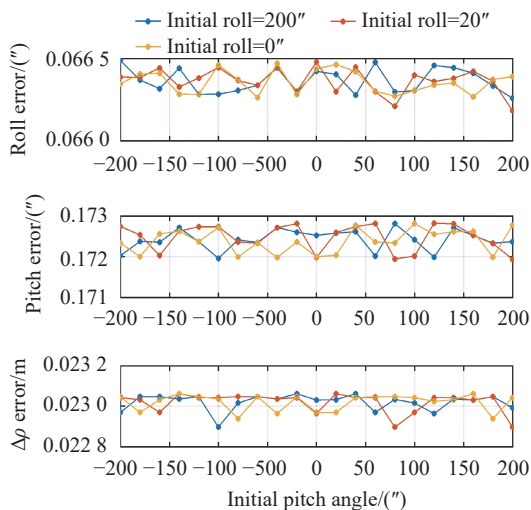


图 3 不同初始 Pitch 值下的标定结果

Fig.3 Calibration results with different initial Pitch values

图 4 所示为使用不同长度的数据进行标定时, 标定结果与表 1 所示的真实系统误差参数之间的残差的变化, 用于验证不同样本大小对标定结果的影响。可以看到在数据长度达到 2~3 km 以上时, 标定结果

中指向角的精度基本可以达到  $0.5''$ , 测距系统误差  $\Delta\rho$  的标定精度可以达到分米量级。仿真验证试验证明了新标定算法的正确性。

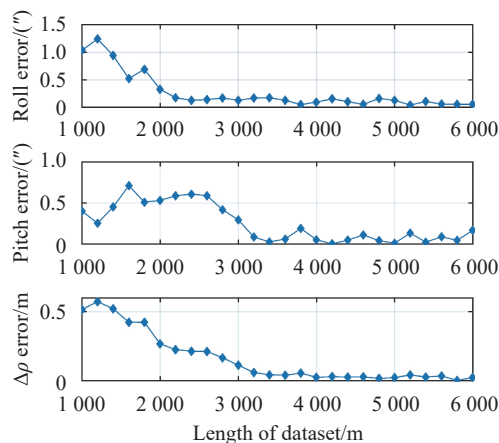


图 4 使用不同数据长度的标定结果

Fig.4 Calibration results with different length of datasets

除了使用仿真点云进行标定算法验证外, 还使用了 ICESat-2 的实测数据进行了验证试验。

由于 ICESat-2 本身所提供的点云坐标数据是经过标定改正后的点云坐标, 因此, 笔者认为这一数据中包含了实际物理过程中产生的随机误差以及标定后残余的部分系统误差, 为了尽可能地还原标定前数据中存在较大系统误差的情况, 首先利用 NASA 所提供的点云坐标  $\vec{P}$  以及卫星姿态、位置数据, 根据公式 (1) 所示的激光脚点定位方程, 反推出激光器在卫星本体坐标系下的安置姿态矩阵  $R_{\text{laser}2\text{SBF}}$  以及测距值  $\rho$ , 并加入  $200''$  的指向系统误差以及 10 m 的测距系统误差, 从而得到一组新的带有较大系统误差的点云坐标  $\vec{P}'$ 。然后将  $\vec{P}'$  输入标定算法进行改正得到  $\vec{P}'_0$ , 通过将  $\vec{P}'_0$  与 NASA 官方提供的标定改正后的点云坐标  $\vec{P}$  进行对比, 对标定算法进行验证和评估。

$N$  折交叉验证是一种广泛应用于数学建模和机器学习中的一种模型评估方法, 其基本原理是将数据集分为训练集和评估集两个相互独立的部分, 使用训练集对模型中的关键参数进行求解, 并使用求解出的参数进行预报, 然后通过预报结果与评估集中的数据之间的对比对模型性能进行评估。

在此, 笔者也是用交叉验证的方法对标定算法进行评估。交叉验证中, 首先将数据集分为  $N$  段, 任取其中 1 段作为验证数据, 剩余  $N-1$  段作为输入标定算

法的训练数据,这样便得到了  $N$  组相互独立的验证数据与训练数据。使用交叉验证的方式保证了验证数据与训练数据之间的独立性,使用训练数据通过标定算法得到系统误差参数后,将系统误差参数带入激光脚点定位方程中对验证数据进行改正,并将改正后的数据与 NASA 提供的 ATL03 数据中的点云坐标进行对比,从而对标定算法进行评估。

表 2 为使用南极麦克莫多干谷地区的 DEM 数据及对应的 ICESat-2 实测数据 (ATL03 数据中陆地类型置信度大于 3 的点云数据) 对标定算法进行交叉验证试验的结果。试验中,将 6 km 的 ICESat-2 数据平均分为 6 段,然后从中取 5 段作为标定算法的输入数据,再利用标定算法输出的系统误差参数解算剩下 1 段数据的点云坐标并与 NASA 的 ATL03 数据中自带的点云坐标进行比较。

表 2 南极麦克莫多干谷地区交叉验证结果

Tab.2 Cross validation results in Antarctic McMudro

Dry Valleys

Segments	$\Delta x/m$	$\Delta y/m$	$\Delta z/mm$
Segment1	-2.852	-0.528	-1.23
Segment2	-3.035	-0.447	-0.17
Segment3	-2.953	-0.463	-0.46
Segment4	-2.961	-0.467	-0.49
Segment5	-3.148	-0.659	-2.14
Segment6	-2.889	-0.371	-0.38
Average	-2.973	-0.489	-0.69
Standard deviation	0.107	0.097	-0.89

表 2 中,  $\Delta x$ 、 $\Delta y$  表示由算法标定校正后的点云与 NASA ATL03 数据中自带的点云在局地坐标系 (此处使用站心地平坐标系) 的  $x$  轴、 $y$  轴方向上的差异,用来表示平面方向的偏差;  $\Delta z$  表示由算法标定校正后的点云与 NASA ATL03 数据中自带的点云在局地坐标系 (此处使用站心地平坐标系) 的  $z$  轴方向上的差异,用来表示高程偏差。可见平面方向相对于 ATL03 提供的点云坐标偏差大约在 3 m 左右,这符合 NASA 公布 ICESat-2 的 6.4 m 平面定位精度的设计指标,也与参考文献 [21] 中的得到的结论一致。文中的标定算法改正后的点云与 NASA 公布的点云坐标之间仍然存在一定偏差,这是由多种因素导致的,包括文中的标定算法改正后的系统误差残差、NASA 所提供的

官方点云数据中的系统误差残差以及部分的随机误差,但是二者之间 3 m 的偏差小于 NASA 设计指标中 6.4 m 的平面定位精度可以说明笔者所提出的标定算法的标定精度与 NASA 所使用的标定算法的标定精度是处于同一量级上的。

此外,为了更进一步地检验标定算法的效果,文中还使用了连云港附近的高程变化较大、地形特征较为丰富的地区进行标定实验;与南极麦克莫多干谷不同,连云港地区存在一定的植被以及人工建筑。因此,需要首先对解算系统误差参数过程中使用的 ICESat-2 数据和地表高程数据进行一定的处理。对于 ICESat-2 数据,结合 ATL08 数据中对光子点云的分类标签 (分类标签包括:“噪声”、“地表”、“冠层”和“冠层顶”),去除 ATL03 数据中来自噪声和植被冠层反射的光子点云,只保留地表反射的光子点云。对于地表高程数据,通过点云处理软件对机载 LiDAR 点云进行分类,去除植被冠层点云,只保留地面点云数据,并依据地面的机载点云生成不含植被冠层的 DEM。标定中使用去除植被冠层影响后的 ICESat-2 数据和 DEM 数据作为输入,求解系统误差参数。利用标定得到的系统误差参数对 ICESat-2 点云改正后,将人工建筑作为特征点,通过对比改正后的 ICESat-2 数据中人工建筑反射的光子点云与地面 DSM 数据 (为了确保 DSM 中包含人工建筑顶部的高程,该 DSM 数据与前文解算系统误差参数过程中使用的 DEM 数据不同,该 DSM 数据是直接由包含植被冠层数据在内的未分类的机载 LiDAR 数据生成的),可以直观地判断在轨标定的效果。

表 3 为使用连云港云台山地区的 DSM 数据及对应的 ICESat-2 实测数据对标定算法进行交叉验证试验的结果。图 5 与图 6 分别是文中标定算法改正后的点云以及 NASA 提供的官方点云与对应平面坐标处的 DSM 高程的对比;图 5 中,标定后的点云是在对 ATL03 点云数据使用 DBSCAN 算法滤波后 (DBSCAN 算法搜索直径为 3 m,为了防止错误地去掉建筑物顶部反射的光子点云,这里并没有像前文解算系统误差参数过程中所使用的数据一样利用 ATL08 数据对植被冠层反射的光子点云进行滤除),结合标定得到的系统误差参数后改正的结果。其中,图 5 所示数据中,经过文中的标定方法改正后的点云与对应平面

坐标处的 DSM 高程之间的均方根误差为 2.22 m; 图 6 所示数据中, NASA 官方提供的点云与对应平面坐标处的高程之间的均方根误差为 2.94 m, 相较之下, 经文中标定方法改正的点云数据与用 DSM 表示的地表“真值”之间的误差更小。同时在图 5、图 6 中, 可以明显地看出, 对于黑色圆圈所框的四处目标,

文中标定算法改正后的点云与 DSM 的重合程度要好于 NASA 官方提供的点云与 DSM 的重合程度。这表明标定算法得到了一个正确的匹配结果。

### 4 分析

由表 2、表 3 所示结果可以看出: 使用文中提出的标定方法校准后的点云坐标相较于 NASA 提供的 ATL03 数据中的点云坐标的平面偏差分别为 3 m 和 3.5 m, 对应的指向角偏差约为 1.23" 和 1.44"。需要说明的是, 对于 ICESat-2 卫星来说, 笔者无法知道地表光斑的真实位置, 并且 NASA 提供的 ATL03 数据中的点云坐标本身也存在一定误差 (ICESat-2 平面定位精度的设计指标为不低于 6.4 m), 因此, 对于表 2、表 3 中所提供的结果, 其相对于 ATL03 的点云坐标平面偏差不大于 6.4 m, 就可以认为文中的标定算法已经基本达到了 ATL03 数据的精度水平。

图 5 与图 6 使用点云高程与 DSM 的对比, 定性比较 ATL03 数据与使用文中标定算法校正后的点云数据之间的精确度。图 5、图 6 中所示 4 个目标处, 可以看到: 由文中所提出的标定算法校正后的点云与 DSM 的重合程度要明显好于 ATL03 数据所提供的点云与 DSM 的重合程度。从这一点可定性的确认, 在该标定场范围内, 由文中所提出的标定算法校正后的点云坐标要比 ATL03 数据所提供的点云坐标有更好的平面精度。

另一方面, 对于基于自然地表的标定方法来说, 标定场本身的地形也是影响标定精度的重要因素。对于标定场地形对标定精度的影响, 比较表 2 和表 3, 可以发现南极麦克莫多干谷地区的标定结果的稳定度 (以交叉验证试验结果的标准差衡量) 要好于连云港地区的标定结果。对于测距精度来说, 图 7 与图 8 分别为连云港地区和麦克莫多干谷地区标定后测距值的残差 (标定后的测距值与由 DSM 得到的测距值之差), 可以看到南极麦克莫多干谷地区的测距残差要明显小于连云港地区的测距残差。

受模型的非线性性以及标定场复杂地形的影响, 定量地描述标定精度与各因素之间的关系是一个很困难的问题。影响标定精度的因素不仅有作为输入数据的卫星姿态、轨道、测距值的误差大小, 标定场地表类型 (如植被、人工建筑等) 以及坡度、坡向、地

表 3 连云港地区交叉验证结果

Tab.3 Cross validation results in Lianyungang

Segments	$\Delta x/m$	$\Delta y/m$	$\Delta z/mm$
Segment1	0.856	3.098	3.20
Segment2	1.673	2.808	-20.63
Segment3	1.251	3.130	-6.88
Segment4	1.832	3.246	-21.38
Segment5	1.553	3.676	-10.55
Average	1.433	3.192	-11.24
Standard deviation	0.387	0.315	10.24

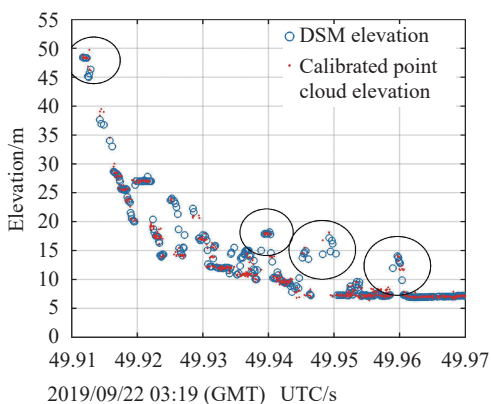


图 5 标定后点云与对应 DSM 高程的对比

Fig.5 Comparison of calibrated point cloud with DSM elevation

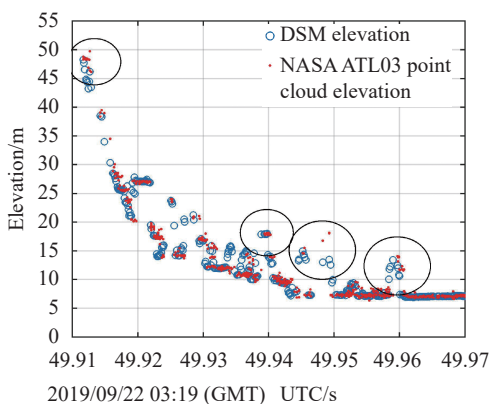


图 6 NASA 官方点云与对应 DSM 高程的对比

Fig.6 Comparison of NASA official point cloud with DSM elevation

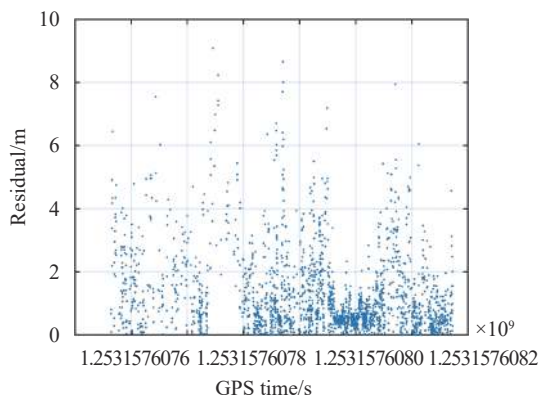


图 7 连云港地区标定后测距残差

Fig.7 Ranging residual after calibration in Lianyungang

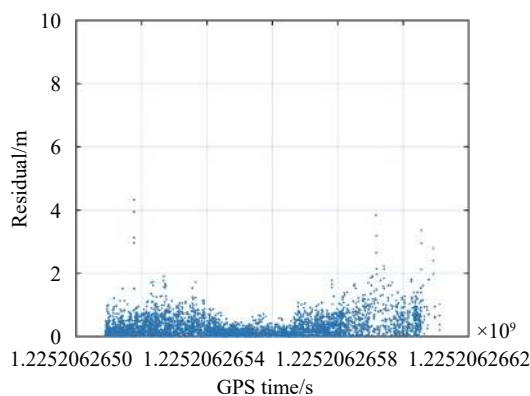


图 8 南极麦克莫多干谷地区标定后测距残差

Fig.8 Ranging residual after calibration in Antarctic McMudro Dry Valleys

形的复杂程度等因素同样会影响基于自然地表的在轨标定方法的标定精度。笔者将在之后的工作中对标定精度与各影响因素(包括输入数据噪声、标定场地形地貌等)之间的关系进行更进一步的深入研究。

## 5 结论

在轨标定是一项影响星载激光雷达光斑定位精度的重要技术,文中对星载激光雷达在轨标定的主要目标和核心理论模型进行了阐述,对现有主要在轨标定工作的基本原理、实现方法和技术特点进行了较为深入的分析。文中对基于自然地表的在轨标定方法进行了重点讨论。基于自然地表的在轨标定,利用地表已知先验地形数据与卫星激光雷达下传测量结果之间的高程残差、或波形残差求解星载激光雷达的各项系统误差结果。相较于其他类型的星载激光雷达在轨标定方法,基于自然地表的在轨标定方法实施成

本较低,不需要在地面布设大规模探测器等辅助标定设备,同时对卫星平台本身没有特殊要求,是一种具有较好推广价值的在轨标定技术。

文中在目前已有的在轨标定方法的基础上提出了一种新的基于自然地表的地形匹配在轨标定方法,其适用于光子计数星载激光雷达的高精度在轨标定。文中使用 ICESat-2 数据,以南极麦克莫多干谷地区和中国连云港地区为例,通过对标定后平面偏差和高程偏差的统计,证明了标定理论和方法的可行性和正确性。同时,对文中所示结果的精度进行了更进一步的分析,指出了标定场地形会对基于自然地表的在轨标定方法的精度产生影响。文中对现有星载激光雷达在轨标定方法进行了梳理和总结,并提出了一种新的基于自然地表的在轨标定方法,对我国未来光子计数型激光测高卫星的在轨标定工作具有重要参考意义。

## 参考文献:

- [1] Schutz B E, Zwally H J, Shuman C A, et al. Overview of the ICESat Mission [J]. *Geophysical Research Letters*, 2005, 32(21): 10.1029/2005GL02400.
- [2] Zhang Zhiyu, Wang Hong, Zhang Wenhao, et al. Semi-analytical model of the waveform of plantation target for a satellite laser altimeter [J]. *Acta Geodaetica et Cartographica Sinica*, 2018, 47(2): 142-152. (in Chinese)  
张智宇, 王虹, 张文豪, 等. 卫星激光测高植被目标回波的半解析仿真模型[J]. *测绘学报*, 2018, 47(2): 142-152.
- [3] Zhang Zhiyu, Ma Yue, Li Song, et al. Ranging performance model considering the pulse pileup effect for PMT-based photon-counting lidars [J]. *Optics Express*, 2020, 28(9): 13586.
- [4] Ma Yue, Yang Fanlin, Lu Xiushan, et al. Elevation error analysis of spaceborne laser altimeter for earth observation [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2015, 44(3): 1042-1047. (in Chinese)  
马跃, 阳凡林, 卢秀山, 等. 对地观测星载激光测高系统高程误差分析[J]. *红外与激光工程*, 2015, 44(3): 1042-1047.
- [5] Ma Yue. The data processing and error analysis for satellite laser altimeter[D]. Wuhan: Wuhan University, 2013. (in Chinese)  
马跃. 星载激光测高系统数据处理和误差分析[D]. 武汉: 武汉大学, 2013.
- [6] Luthcke S B, Rowlands D D, McCarthy J J, et al. Spaceborne laser-altimeter-pointing bias calibration from range residual analysis [J]. *Journal of Spacecraft and Rockets*, 2000, 37(3): 374-384.
- [7] Sirota J M, Bae S, Millar P, et al. The transmitter pointing



- determination in the Geoscience Laser Altimeter System [J]. *Geophysical Research Letters*, 2005, 32(22): 10.1029/2005GL024005.
- [8] Shuman C A, Zwally H J, Schutz B E, et al. ICESat Antarctic elevation data: Preliminary precision and accuracy assessment [J]. *Geophysical Research Letters*, 2006, 33(7): L7501.
- [9] Tang Xinming, Xie Junfeng, Fu Xingke, et al. ZY3-02 laser altimeter on-orbit geometrical calibration and test [J]. *Acta Geodaetica et Cartographica Sinica*, 2017, 46(6): 714-723. (in Chinese)  
唐新明, 谢俊峰, 付兴科, 等. 资源三号02星激光测高仪在轨几何检校与试验验证[J]. *测绘学报*, 2017, 46(6): 714-723.
- [10] Li Guoyuan, Tang Xinming, Fan Wenfeng, et al. On-orbit geometric calibration of satellite laser altimeter using ground-based IR detectors [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2017, 46(11): 1117004. (in Chinese)  
李国元, 唐新明, 樊文锋, 等. 基于地面红外探测器的星载激光测高仪在轨几何定标[J]. *红外与激光工程*, 2017, 46(11): 1117004.
- [11] Yi Hong, Li Song, Ma Yue, et al. On-orbit calibration of satellite laser altimeters based on footprint detection [J]. *Acta Physica Sinica*, 2017, 66(13): 126-135. (in Chinese)  
易洪, 李松, 马跃, 等. 基于足印探测的激光测高仪在轨标定[J]. *物理学报*, 2017, 66(13): 126-135.
- [12] Tang Xinming, Chen Jiyi, Li Guoyuan, et al. Error analysis and preliminary pointing angle calibration of laser altimeter on Ziyuan-3 02 Satellite [J]. *Geomatics and Information Science of Wuhan University*, 2018, 43(11): 1611-1619. (in Chinese)  
唐新明, 陈继溢, 李国元, 等. 资源三号02星激光测高误差分析与指向角粗标定[J]. *武汉大学学报·信息科学版*, 2018, 43(11): 1611-1619.
- [13] Tang Xinming, Li Guoyuan. Thoughts about land and sea satellite laser altimetry [J]. *Aerospace Shanghai*, 2019, 36(3): 15-19. (in Chinese)  
唐新明, 李国元. 陆海激光卫星高程测量的思考[J]. *上海航天*, 2019, 36(3): 15-19.
- [14] Tang Xinming, Li Guoyuan. Development and prospect of laser altimetry satellite [J]. *Space International*, 2017(11): 13-18. (in Chinese)  
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.
- [15] Yi Hong. Earth observation satellite laser altimeter footprint position and on-orbit calibration[D]. Wuhan: Wuhan University, 2017. (in Chinese)  
易洪. 对地观测星载激光测高仪足印定位与在轨标定[D]. 武汉: 武汉大学, 2017.
- [16] Bae S, Magruder L, Smith N, et al. Algorithm theoretical basis document for precision pointing determination[R]. USA: Goddard Space Flight Center, 2019.
- [17] Luthcke S B, Pennington T, Rebold T, et al. Algorithm Theoretical Basis Document (ATBD) for ATL03g ICESat-2 Receive Photon Geolocation[R]. 2019.
- [18] Tang Xinming, Xie Junfeng, Gao Xiaoming, et al. The in-orbit calibration method based on terrain matching with pyramid-search for the spaceborne laser altimeter [J]. *IEEE Journal of Selected Topics in Applied Earth Observations and Remote Sensing*, 2019, 12(3): 1053-1062.
- [19] Zhang Wenhao, Li Song, Zhang Zhiyu, et al. Using waveform matching to precisely locate footprints of a satellite laser altimeter [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2018, 47(11): 1117007. (in Chinese)  
张文豪, 李松, 张智宇, 等. 利用波形匹配实现卫星激光测高脚点精确定位的方法[J]. *红外与激光工程*, 2018, 47(11): 1117007.
- [20] Yi Hong, Li Song, Weng Yikan, et al. On-orbit calibration of spaceborne laser altimeter using natural surface range residuals [J]. *J Huazhong Univ of Sci & Tech(Natural Science Edition)*, 2016, 44(8): 58-61. (in Chinese)  
易洪, 李松, 翁寅侃, 等. 自然地表面测距残差对激光测高系统的在轨检校[J]. *华中科技大学学报(自然科学版)*, 2016, 44(8): 58-61.
- [21] Nan Yaming, Feng Zhihui, Liu Enhai, et al. Iterative pointing angle calibration method for the spaceborne photon-counting laser altimeter based on small-range terrain matching [J]. *Remote Sensing*, 2019, 11(18): 2158.
- [22] Yin Tiangang, Lauret N, Gastellu-Etchegorry J. Simulation of satellite, airborne and terrestrial LiDAR with DART (II): ALS and TLS multi-pulse acquisitions, photon counting, and solar noise [J]. *Remote Sensing of Environment*, 2016, 184: 454-468.