引文格式:陈新阳,龙小祥,李庆鹏,等.陆地生态系统碳监测卫星激光数据处理与精度验证[J].武汉大学学报(信息科学版),2025,50(7):1393-1403.DOI:10.13203/j.whugis20230110

Citation:CHEN Xinyang,LONG Xiaoxiang,LI Qingpeng,et al.Data Processing and Accuracy Verification for Laser Altimeter of Terrestrial Ecosystem Carbon Inventory Satellite[J].Geomatics and Information Science of Wuhan University,2025,50(7):1393-1403.DOI:10.13203/j.whugis20230110

陆地生态系统碳监测卫星激光数据处理与精度验证

陈新阳[1,2] 龙小祥[1,2] 李庆鹏[1,2] 黎荆梅[3] 韩启金[2]
徐兆鹏[2] 姚薇源[3]

1 中国四维测绘技术有限公司,北京,100094
2 中国资源卫星应用中心,北京,100094
3 中国科学院空天信息创新研究院,北京,100094

摘 要:陆地生态系统碳监测卫星是中国首颗森林碳汇主被动联合观测遥感卫星,多波束激光雷达是陆地生态系统碳监测卫星的主载荷,主要用于获取高精度的植被高度、反演调查森林生物量,通过计算激光到达树冠以及地面的时间差计算出高度等树木的特征信息。为实现主被动载荷一体化处理,从而实现生物量的精确反演,介绍了陆地生态系统碳监测卫星多波束激光雷达系统数据处理方法,提出了激光-光学主被动载荷联合检校方法,并提出了激光数据、光轴监视相机和零度相机相对位置关系验证方案,首次实现了5波束激光雷达与光学相机主被动联合检校,并验证了激光非成像载荷与光学相机的相对定位关系。结果表明,经过联合处理后,激光数据测高精度优于0.7 m,平面定位精度优于6 m。激光数据与零度相机相对定位精度优于5 m,激光数据与光轴监视相机配准精度优于6 m。

关键词:陆地生态系统碳监测卫星;多波束激光雷达;几何定位;精度验证

中图分类号:P237 **文献标识码**:A **收稿日期**:2023-07-17

DOI:10.13203/j.whugis20230110 **文章编号**:1671-8860(2025)07-1393-11

Data Processing and Accuracy Verification for Laser Altimeter of Terrestrial Ecosystem Carbon Inventory Satellite

CHEN Xinyang[1,2] *LONG Xiaoxiang*[1,2] *LI Qingpeng*[1,2] *LI Jingmei*[3] *HAN Qijin*[2]
XU Zhaopeng[2] *YAO Weiyuan*[3]

1 China Siwei Surveying and Mapping Technology Co. Ltd, Beijing 100094, China
2 China Centre for Resources Satellite Data and Application, Beijing 100094, China
3 Aerospace Information Research Institute, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100094, China

Abstract: **Objectives**: The terrestrial ecosystem carbon inventory satellite(TECIS) is the first satellite using for observation joint active and passive detectoras of forest carbon sinks in China. Multi-beam light detection and ranging (LiDAR) is the main payload of TECIS, which used to obtain high-precision vegetation height, forest biomass inversion survey and calculate characteristic information of trees such as height by calculating the time difference between reaching the canopy and the ground. It is important to achieve the integrated processing of active and passive loads and achieve accurate biomass inversion. **Methods**: We introduce the data processing method of multi-beam LiDAR system, and propose the joint calibration method for multi-beam LiDAR and optical cameras.What is more, we propose a verification method for the relative position relationship among multi-beam LiDAR, axis monitoring optical camera and zero degree optical camera. It is the first time for calibrating multi-beam LiDAR system and the zero degree camera in the

第一作者:陈新阳,硕士,工程师,主要从事星载光学、激光数据处理与应用等方面的研究。244647457@qq.com
通信作者:李庆鹏,博士,研究员。626172666@qq.com

same time and verified the relative positioning relationship between multi-beam LiDAR non imaging loads and optical cameras scientifically and rigorously. **Results:** (1) In plain areas, the height measurement accuracy of multi-beam LiDAR is better than 0.7 m and the plane positioning accuracy is better than 6 m. (2) By using the positioning accuracy verification method of laser data and zero degree optical camera data based on combination of field control points and back-projection points, the matching errors between beams 1 to 5 of the multi-beam LiDAR and the zero degree optical camera are 4.14 m, 4.42 m, 3.90 m, 4.27 m and 4.30 m, respectively, which can prove that it is possible that the laser data and optical camera data can be used together. (3) By using the positioning accuracy verification method of laser data and axis monitoring optical camera data based on zero degree optical camera, the matching errors between beams 1 to 5 of the multi beam LiDAR and axis monitoring optical camera is 0.72, 0.74, 0.70, 0.73 and 0.74 axis monitoring optical camera pixels, respectively. The data matching accuracy of the laser data and axis monitoring optical camera data is good. **Conclusions:** The experimental results show that the data processing method of TECIS and the verification method of laser data and optical camera data proposed are feasible. The target of high-precision processing and accuracy verification for the first forestry remote sensing satellite of China has come ture, which can use for monitoring of terrestrial ecosystem carbon storage, forest resources and forest productivity.It also can meet the requirements of subsequent scientific research and large-scale business applications. Meanwhile, the verification method of laser data and optical camera data can be used for accuracy verification of similar satellites in the future.

Key words: terrestrial ecosystem carbon inventory satellite; multi-beam LiDAR; geometric positioning; accuracy verification

“绿水青山就是金山银山”,生态环境保护是功在当代、利在千秋的事业。为满足新时代陆地生态系统碳储量监测、生态资源调查、国家重大生态工程监测评价等领域的需求,并为环保、测绘、气象、农业、减灾等领域提供业务支撑和研究服务,提高中国应对全球气候变化的话语权和主导权,世界首颗主被动联合森林碳汇观测的遥感卫星——陆地生态系统碳监测卫星于2022年8月4日在太原发射场成功发射[1]。

陆地生态系统碳监测卫星搭载了多波束激光雷达、多角度多光谱相机、超光谱探测仪、多角度偏振成像仪等4个载荷,以主被动相结合的测量方式实现对森林植被生物量、气溶胶分布、叶绿素荧光的高精度定量遥感测量,支撑陆地生态系统碳监测、陆地生态和资源调查监测、国家重大生态工程监测评价等工作[2-3]。其中,多波束激光雷达是陆地生态系统碳监测卫星的主载荷,主要用于获取高精度的植被高度和森林生物量的反演,通过计算激光到达树冠以及地面的时间差计算出高度等树木的特征信息[4-5],在测绘领域还可以用于高程控制点,提高立体卫星数据的高程精度[6]。

陆地生态系统碳监测卫星具有主被动载荷多、单一载荷探测器数量多的特点,如何实现不同载荷之间,以及单一载荷的不同探测间精度一致是一大挑战。为实现陆地生态系统碳监测卫星多波束激光雷达载荷的高精度处理,满足激光、光学数据联合使用的需求,本文介绍了陆地生态系统碳监测卫星多波束激光雷达系统数据处理方法,提出了基于外业控制数据的激光零度相机主被动联合定标方法,并提出了基于外业控制点与反投影联合的激光-光学定位精度验证方法和基于零度相机基准点的激光-光轴监视相机定位精度验证方法,首次科学系统验证了光学图像与激光点之间的相对精度,为陆地生态系统碳监测卫星多波束激光雷达载荷数据应用提供参考。

1 多波束激光雷达数据处理原理

1.1 多波束激光雷达系统

陆地生态系统碳监测卫星激光雷达主要用于林业生态探测,附带气溶胶和云探测,由植被激光雷达和大气激光雷达构成。其中,植被激光雷达系统由5波束激光探测器、光轴监视相机和零度相机3部分构成。5波束激光探测器可获取5波束1 064 nm波长的激光主波和回波数据,光轴监视相机可以记录激光光束的出射方向和地物影像,零度相机可以获取大面积高精度、高分辨率的植被图像数据。植被激光雷达系统用于

森林树高、星地距离的测量成像。获取 1 064 nm 波长的激光主波和回波波形数据,用于提取星地距离和森林树高。同时,通过光轴监视相机记录激光光束的出射方向和地物影像,用于确定激光地表足印的精确位置。获取地球表面的激光回波信息并记录激光的出射方向,继而获得卫星和地球表面精确的距离信息,用于测量植被树高。大气激光雷达通过后向散射的回波信息获取大气气溶胶的垂直分布。具体参数如表 1 所示。

表 1　多波束激光雷达技术性能参数

Table 1　Performance Parameters of Multi-beam LiDAR

指标	植被激光雷达	大气激光雷达
激光波束数	5 波束	2 波束
激光重复频率/Hz	40	20
激光器工作波长/nm	1 064	1 064、532
激光波形采用频率/ Hz	1.2×10^9	1×10^7
激光发射和回波量化位数/bit	12	16
光轴监视相机分辨率/m	≤8	
光轴监视相机量化位数	12	

多波束激光雷达是陆地生态系统碳监测卫星的主载荷,本文介绍的激光数据处理方法和提出的精度验证方案也是针对多波束激光雷达(植被)的,因此下文中提到的多波束激光雷达均为以植被探测为目的的多波束激光雷达。

1.2　星载激光测高几何定位模型

激光光斑的角点位置主要是利用卫星下传的原始数据中的时间、波形等信息,星敏感器记录的姿态数据和 GPS 记录的卫星轨道数据构建几何关系,得到激光点对应的地球表面上足印点的经纬度和高程坐标。激光测高严密几何模型如图 1 所示,定义陆地生态系统碳监测卫星激光发射的参考点为 P_{laser},GPS 天线的相位中心为 P_{GPS},陆地生态系统碳监测卫星质心为 O_{body},地面激光足印点为 P_{Ground}。激光单程传输距离为 ρ,地面足印点在地心地固坐标系 WGS84 下的三维空间坐标向量为 $[X\ Y\ Z]^{\text{T}}_{\text{WGS84}}$[7-9]。其中激光单程传输距离为 ρ 是由多波束激光雷达每个发射脉冲的发射波波形的峰值和对应的接收到的激光脉冲回波波形中对应的地表回波分量之间的时间差与光速的乘积计算得到的[10-11]。

根据激光单程传输距离值,再考虑由大气折射及硬件误差等因素构成的陆地生态系统碳监测卫星多波束激光雷达的测距改正值 $\Delta\rho$,可以得到每个激光脚点在卫星本体坐标系下的坐标,并进行坐标转化,使激光器 GPS 相位中心与卫星整星质心重合,就可以得到陆地生态系统碳监测卫星多波束激光雷达的严密几何定位公式:

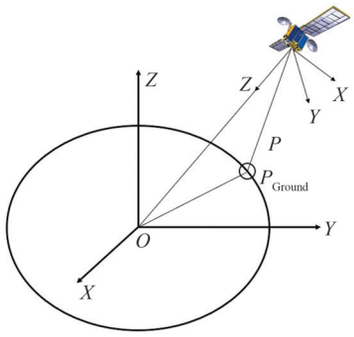


图 1　激光测高严密几何模型示意图

Fig. 1　Diagram of Laser Altimetry Geometric Model

$$\begin{bmatrix}X\\Y\\Z\end{bmatrix}_{\text{WGS84}}=\begin{bmatrix}X_{\text{GPS}}\\Y_{\text{GPS}}\\Z_{\text{GPS}}\end{bmatrix}+\boldsymbol{R}^{\text{WGS84}}_{\text{J2000}}\boldsymbol{R}^{\text{J2000}}_{\text{star}}\boldsymbol{R}^{\text{star}}_{body}\left(\begin{bmatrix}L_x\\L_y\\L_z\end{bmatrix}+\left(\rho+\Delta\rho_1+\Delta\rho_2\right)\begin{bmatrix}\sin\theta\cos\alpha\\\sin\theta\sin\alpha\\-\cos\theta\end{bmatrix}_{body}-\begin{bmatrix}D_x\\D_y\\D_z\end{bmatrix}\right)\tag{1}$$

式中,θ 表示激光光束指向与本体坐标系 Z 轴的负向夹角;α 表示在 XOY 平面上的投影与 X 轴正向夹角;$\Delta L=[L_x\ L_y\ L_z]^{\text{T}}$ 为陆地生态系统碳监测卫星多波束激光雷达参考点在本体坐标系中的坐标;$[X\ Y\ Z]^{\text{T}}_{\text{WGS84}}$ 是陆地生态系统碳监测卫星多波束激光雷达激光脚点在 WGS84 坐标系下的坐标,该数据为待求量;$[X_{\text{GPS}}\ Y_{\text{GPS}}\ Z_{\text{GPS}}]^{\text{T}}_{\text{WGS84}}$ 为多波束激光雷达在每次相应的激光脉冲发射时空间位置,由卫星搭载的 GPS 设备实时获取,并下传;$[D_x\ D_y\ D_z]^{\text{T}}$ 是陆地生态系统碳监测卫星搭载的 GPS 的相位中心在陆地生态系统碳监测卫星本体坐标系下的坐标;$\boldsymbol{R}^{\text{star}}_{\text{body}}$ 为陆地生态系统碳监测卫星搭载的星敏感器相对于陆地生态系统碳监测卫星本体坐标的旋转矩阵;$\boldsymbol{R}^{\text{J2000}}_{\text{star}}$ 是陆地生态系统碳监测卫星本体系到 J2000 坐标系的旋转矩阵;$\boldsymbol{R}^{\text{WGS84}}_{\text{J2000}}$ 是 J2000 坐标系到国际地球参考系(international terrestrial reference frame, ITRF)的坐标变换矩阵,这些转化矩阵均为已知量或标定后的确定参数。再引入潮汐改正模型,消除潮汐对定位的影响,$\Delta\rho_1$ 表示由大气折射及潮汐引起的测距距离改正,$\Delta\rho_2$ 表示待求的系统测距误差,$\Delta\rho_1$ 根据大气和潮汐改正模型计算获得[7],$\Delta\rho_2$ 通过定标获得准确的测距改正值(卫星发射前会进行地面测量,地面测量参数为测距改正参数初始值,在未进行定标前使用),得到的即为足印点的三维坐标,可根据需要转换为大地坐

标(B,L,H)。图2描述了陆地生态系统碳监测卫星多波束激光雷达激光光束发射方向与本体坐标系夹角示意。

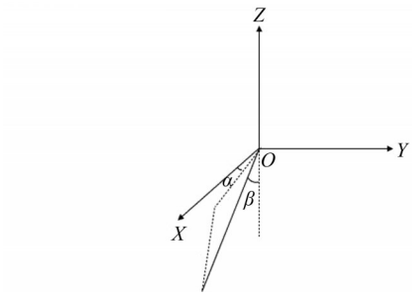


图2 激光光束发射方向与本体坐标系夹角示意图

Fig. 2 Diagram of Angle Between Laser Beam Emission Direction and Body Coordinate System

1.3 基于外业控制数据的激光零度相机主被动联合定标方法

在轨检校是提高星载激光数据产品定位精度的关键步骤之一,由于陆地生态系统碳监测卫星需要主被动探测器联合使用,因此不同探测器间的相对定位精度也至关重要。在卫星在轨检校时,选择了中国内蒙古自治区的平坦草原,在铺设红外探测器进行激光检校的同时,选取了道路交叉口、房屋角等在零度相机上也具有明显特征的点,测量其真实坐标位置,利用同一区域、同一时间的数据对不同探测器进行标定,相对于传统的激光雷达和光学相机在不同区域进行分别检校,本次数据处理过程中首次进行了激光-光学联合检校,不仅可以提高单一载荷的定位精度,同时还可以验证不同载荷间的相对定位精度。

对于激光数据而言,野外布设红外探测仪检校是最有效、最精确的方法[12-13]。野外布设红外探测仪检校验证需要在天气晴朗、无云、大面积平坦的区域进行实验,根据国内地理条件,一般选择在内蒙古的平坦草原地区进行野外实验验证。根据轨道信息预测卫星过境时间,以及预报激光雷达光斑的大致位置,并铺设红外探测器捕获光斑的实际探测位置[14-15]。卫星过境后,根据信号实际触发的探测器的位置和各探测器采集到的能量值,采用高斯曲面方程对触发的探测器进行拟合[14-16],拟合方程为:

$$f(x,y)=A\exp\left(-\frac{(x-x_0)^2}{2\sigma_x^2}-\frac{(y-y_0)^2}{2\sigma_y^2}\right) \quad (2)$$

式中,$f(x,y)$为每个探测器的能量值,卫星过境后,触发的探测器自动记录卫星捕获到的能量值;(x_0,y_0)为待求激光光斑质心地面坐标;(x,y)为被触发探测器的坐标,该数据使用实时动态定位(real-time kinematic,RTK)实际测量得到;A为高斯曲面的峰值,即拟合后最大的能量值;(σ_x,σ_y)分别为(x,y)方向能量分布的均方根,由探测器获取的实际能量值计算得到。

将由地面探测器捕获到的光斑实际位置(x_0,y_0),与根据严密几何模型计算得到的激光光斑位置作差,可以得到多波束激光雷达的平面误差,通过平面误差可以计算多波束激光雷达探测系统的指向角偏差,修正这一误差,即可提高多波束激光雷达数据处理的平面精度。同时,根据严密几何模型计算得到的激光光斑中心的高程值与探测器测得的实际高程作差,可以得到多波束激光雷达探测系统的测距误差,从而提高多波束激光雷达数据处理的高程精度。

由于陆地生态系统碳监测卫星在应用过程中需要光学-激光载荷主被动相结合,应用于森林植被的联合反演。为进一步提高同时获取的光学与激光数据的相对精度,本文提出了基于外业控制数据的激光零度相机主被动联合定标方法,在激光雷达外场定标的同时,先选取探测器周围具备良好目视信息的特征点,外业精确测量特征点的位置,再进行零度相机的内外方位元素定标。用同一区域、同一成像时间、同一方法和设备测量的外业数据进行激光与光学相机联合定标,可以通过控制影响几何定标精度的外界条件不变来提高激光与光学数据的相对几何定位精度。

1.4 外业控制点与反投影联合的激光-光学定位精度验证方法

激光-光学数据联合使用过程中,激光数据与光学数据的相对定位精度决定着激光和光学数据联合应用的精度。由于多波束激光雷达为非成像载荷,其获取数据的真实位置难以准确获得,为验证多波束激光雷达与零度相机的相对定位精度,本文提出了外业控制点与反投影联合的激光-光学联合验证方法。利用野外探测器捕获的激光实际位置,以及实地测量控制点的位置信息,结合反投影方法,获取激光与光学的相对定位精度,具体方法为:

1)利用与激光探测器同步外业测量的RTK点,进行激光雷达与多角度相机联合检校,并生产激光与零度相机产品。通过人工刺点的方式,获取控制点及激光产品中激光点在零度影像上的像点坐标,并计算两者在沿轨和垂轨方向的距

离值x_1、y_1。

2)根据控制点的经纬度和高程信息,根据有理参数模型,计算准确控制点理论的像点坐标(x_2,y_2):

$$\begin{cases} x_2=\dfrac{L_{\mathrm{Num}}(U,V,W)}{L_{\mathrm{Den}}(U,V,W)} \\ y_2=\dfrac{S_{\mathrm{Num}}(U,V,W)}{S_{\mathrm{Den}}(U,V,W)} \end{cases} \tag{3}$$

式中,U、V、W分别表示控制点的经度、纬度和高程信息;

$$\begin{cases} L_{\mathrm{Num}}(U,V,W)=a_1+a_2V+a_3U+a_4W+a_5VU+a_6VW+a_7UW+a_8V^2+a_9U^2+a_{10}W^2+ \\ \qquad a_{11}VUW+a_{12}V^3+a_{13}VU^2+a_{14}VW^2+a_{15}V^2U+a_{16}U^3+a_{17}UW^2+ \\ \qquad a_{18}V^2W+a_{19}U^2W+a_{20}W^3 \\ L_{\mathrm{Den}}(U,V,W)=b_1+b_2V+b_3U+b_4W+b_5VU+b_6VW+b_7UW+b_8V^2+b_9U^2+b_{10}W^2+ \\ \qquad b_{11}VUW+b_{12}V^3+b_{13}VU^2+b_{14}VW^2+b_{15}V^2U+b_{16}U^3+b_{17}UW^2+ \\ \qquad b_{18}V^2W+b_{19}U^2W+b_{20}W^3 \\ S_{\mathrm{Num}}(U,V,W)=c_1+c_2V+c_3U+c_4W+c_5VU+c_6VW+c_7UW+c_8V^2+c_9U^2+c_{10}W^2+ \\ \qquad c_{11}VUW+c_{12}V^3+c_{13}VU^2+c_{14}VW^2+c_{15}V^2U+c_{16}U^3+c_{17}UW^2+ \\ \qquad c_{18}V^2W+c_{19}U^2W+c_{20}W^3 \\ S_{\mathrm{Den}}(U,V,W)=d_1+d_2V+d_3U+d_4W+d_5VU+d_6VW+d_7UW+d_8V^2+d_9U^2+d_{10}W^2+ \\ \qquad d_{11}VUW+d_{12}V^3+d_{13}VU^2+d_{14}VW^2+d_{15}V^2U+d_{16}U^3+d_{17}UW^2+ \\ \qquad d_{18}V^2W+d_{19}U^2W+d_{20}W^3 \end{cases} \tag{4}$$

式中,a_i、b_i、c_i、d_i($i=1,2,\cdots,20$)为有理多项式系数(rational polynomial coefficients,RPC)。一般情况下,b_1、d_1均取值为1。

3)通过沿轨和垂轨两个方向上的距离值之差,可以得到单一检查点激光数据与零度相机图像在沿轨和垂轨方向的配准精度和整体配准精度:

$$\Delta x=x_1-x_2 \tag{5}$$

$$\Delta y=y_1-y_2 \tag{6}$$

$$s=\sqrt{\Delta x^2+\Delta y^2} \tag{7}$$

4)每幅影像选取多个检查点,重复该方法,多数据计算中误差,作为该景配准精度。

1.5　基于零度相机基准点的激光-光轴监视相机定位精度验证方法

陆地生态系统碳监测卫星多角度激光雷达系统还配备了光轴监视相机,用于监测激光光轴的稳定性,激光与光轴监视相机之间的定位精度也是激光-光学联合应用的重要指标之一。由于光轴监视相机分辨率较低,地面控制点误差较大,因此采用基于零度相机基准点的激光-光轴监视相机定位精度验证方法。具体方法为:

1)利用与激光探测器同步外业测量的RTK点,进行激光雷达与多角度相机联合检校,并生产激光与零度相机产品;

2)将激光数据与零度相机联合处理分析的结果作为零度相机与激光数据的配准精度;

3)计算零度相机与光轴监视相机的匹配精度;

4)根据零度相机与激光数据的配准精度,零度相机与光轴监视相机的匹配精度,利用误差传递公式,计算激光-光轴监视相机的相对定位精度:

$$\sigma_{\mathrm{LF}}=\sqrt{\sigma_{\mathrm{LN}}{}^2+\sigma_{\mathrm{NF}}{}^2} \tag{8}$$

式中,σ_{LF}为激光与光轴监视相机的配准精度;σ_{LN}为激光指向与零度相机的配准精度;σ_{NF}为零度相机与光轴监视相机的配准精度。

2　多波束激光雷达数据精度验证及分析

为满足陆地生态系统碳监测卫星在轨定标和数据精度验证的需要,2022-09-26—2022-10-16,相关单位在内蒙古锡林郭勒盟草原进行了陆地生态系统碳监测卫星野外实验,共成功完成实验4次,捕获光斑12个,获取了陆地生态系统碳监测卫星多波束激光雷达准确的光斑能量分布情况,并通过RTK测量了捕获光斑的实际位置,可以得到光斑的实际位置信息,用于在轨标定、精度验证。

2.1　实验数据

为实现多波束激光雷达高程精度、多波束激光雷达与零度相机定位精度和多波束激光雷达与光轴监视相机定位精度验证,从而全面评估陆地生态系统碳监测卫星多波束激光雷达数据处理系统的可靠性,以及验证主被动载荷的联合处

理精度,本文选取了陆地生态系统碳监测卫星在轨数据、外业测量数据和高精度地形数据进行实验。

1)多波束激光雷达数据。由于激光雷达不对地成像,仅从激光雷达产品中难以确定激光光斑的实际位置,因此,在进行精度验证时,选择定标时铺设红外探测器获得的多波束激光雷达数据,具体数据如表2所示。

表2 多波束激光雷达实验数据

Table 2 Experimental Data of Multi-beam LiDAR

景号	数据采集日期	载荷
47647	2022-09-26	CASAL_A
56197	2022-10-01	CASAL_A
54429	2022-10-06	CASAL_A
63496	2022-10-16	CASAL_A
32867	2022-09-08	CASAL_A
37957	2022-09-13	CASAL_A

2)光学相机数据。为验证激光零度相机的相对定位精度、激光与光轴监视相机的相对定位精度,选择了部分零度相机数据进行验证,具体信息如表3所示。

表3 零度相机实验数据

Table 3 Experimental Data of Zero Degree Camera

景号	数据采集日期	载荷
47689	2022-09-26	零度相机
51295	2022-10-01	零度相机
54511	2022-10-06	零度相机
63567	2022-10-16	零度相机
63568	2022-10-16	零度相机
105172	2022-11-26	零度相机
105171	2022-11-26	零度相机
109510	2022-12-05	零度相机
109511	2022-12-05	零度相机
103981	2022-11-25	零度相机
103982	2022-11-25	零度相机
113528	2022-12-10	零度相机
113529	2022-12-10	零度相机
93761	2022-11-15	零度相机
93762	2022-11-15	零度相机
114462	2022-12-11	零度相机
114463	2022-12-11	零度相机

3)野外测量数据。实验用到的数据源有两类:(1)用于捕获激光光斑实际位置的红外探测器,卫星过境后,记录捕获到的光斑能量和探测器精确的经纬度高程信息,用于准确判断激光光斑的实际位置;(2)量测的具有明显标志的控制点数据,用于光学相机检校和光学-激光相对定位精度验证。

4)高精度数字表面模型(digital surface model, DSM)数据。中国辽宁省大连区域机载立体遥感数据生成的0.5 m格网的DSM数据,平面和高程精度均为0.3 m。

2.2 多波束激光雷达数据测高精度验证

多波束激光雷达测高精度是激光数据重要的指标[17-19]。本文选择2023-09-26—2023-10-16内蒙古激光外场定标实验捕获成功到的激光数据,利用解算出的定标参数进行高程解算,与当日实测结果进行比对分析,具体结果如表4所示。

根据捕获的不同时间、不同轨道上7个野外探测点,多波束激光雷达在平地上的高程精度优于0.3 m,平面定位精度优于6 m。

为进一步验证多波束激光雷达在不同区域的高程精度,选择了中国四维测绘技术有限公司自有的大连区域高精度地形数据作为基准,评价2023-09-08和2023-09-13陆地生态系统碳监测卫星数据高程精度[20]。验证前对每个激光器的每个采样点进行了逐一筛选,确保每个验证数据均为在平坦区域的单一波峰数据,确保验证结果符合星载激光载荷数据高程精度验证要求,具体结果如表5所示。

表4 多波束激光雷达测高精度

Table 4 Height Accuracy of Multi-beam LiDAR

波束	误差/m		
	垂轨向	沿轨向	高程
1	1.518	1.643	−0.093
2	−0.613	0.082	0.149
3	5.011	−2.754	0.214
3	1.553	0.087	−0.036
4	1.411	0.551	0.044
5	3.087	−0.814	0.232
6	−0.166	0.068	−0.058

表5 基于高精度DSM数据的多波束激光雷达测高精度

Table 5 Height Accuracy of Multi-beam LiDAR Based on High Precision DSM Data

波束	日期	点号	B/(°)	L/(°)	H/m	参考高程/m	误差/m
1	2022-09-08	3765	39.613 999	121.891 810	162.71	163.20	−0.50
	2022-09-08	3803	39.554 397	121.875 121	69.18	69.12	0.06
	2022-09-08	3818	39.530 838	121.868 623	103.06	102.97	0.09

表5续

波束	日期	点号	B/(°)	L/(°)	H/m	参考高程/m	误差/m
1	2022-09-08	5245	39.524 556	121.866 888	109.66	109.66	0.00
	2022-09-08	3847	39.485 341	121.855 953	69.46	68.72	0.75
	2022-09-13	2403	39.609 083	121.890 142	145.77	145.61	0.16
	2022-09-13	2404	39.607 515	121.889 701	141.71	141.05	0.66
	2022-09-13	2405	39.605 947	121.889 258	136.21	137.20	−0.98
	2022-09-13	2406	39.604 375	121.888 829	142.27	142.92	−0.64
	2022-09-13	2407	39.602 806	121.888 391	140.48	140.42	0.06
2	2022-09-08	3765	39.620 798	121.848 634	83.55	83.88	−0.33
	2022-09-08	3854	39.485 808	121.811 282	120.59	121.26	−0.67
	2022-09-08	3872	39.452 866	121.802 123	87.42	87.95	−0.53
	2022-09-08	3877	39.444 985	121.800 067	175.43	175.15	0.28
	2022-09-08	3919	39.379 123	121.781 640	9.23	8.80	0.43
	2022-09-13	2478	39.496 620	121.813 883	57.59	58.31	−0.72
	2022-09-13	2479	39.495 050	121.813 449	57.13	57.84	−0.71
	2022-09-13	2480	39.493 480	121.813 018	59.94	60.17	−0.23
	2022-09-13	2481	39.491 906	121.812 599	71.00	71.90	−0.89
	2022-09-13	2482	39.490 326	121.812 202	98.76	98.90	−0.15
3	2022-09-08	3918	39.388 207	121.738 732	9.56	9.02	0.54
	2022-09-08	3919	39.386 637	121.738 299	9.50	8.99	0.51
	2022-09-08	2920	39.385 067	121.737 867	9.40	8.97	0.43
	2022-09-08	3921	39.383 497	121.737 435	9.57	8.97	0.59
	2022-09-08	3926	39.375 647	121.735 272	8.73	8.98	−0.25
	2022-09-13	2408	39.615 578	121.801 172	31.80	31.87	−0.08
	2022-09-13	2409	39.614 009	121.800 738	31.69	31.23	0.46
	2022-09-13	2410	39.612 439	121.800 304	31.92	31.35	0.57
	2022-09-13	2411	39.610 870	121.799 870	31.82	31.27	0.55
	2022-09-13	2412	39.609 301	121.799 433	29.77	29.64	0.13
4	2022-09-08	3916	39.398 686	121.697 234	7.54	8.45	−0.91
	2022-09-08	3918	39.395 545	121.696 373	8.82	7.89	0.93
	2022-09-08	3919	39.393 975	121.695 940	7.88	7.50	0.38
	2022-09-08	3921	39.390 833	121.695 083	11.87	11.02	0.84
	2022-09-08	3922	39.389 261	121.694 657	15.54	15.84	−0.30
	2022-09-13	2552	39.396 932	121.696 380	9.16	9.24	−0.08
	2022-09-13	2554	39.393 793	121.695 517	8.77	8.69	0.08
	2022-09-13	2556	39.390 650	121.694 666	16.14	16.76	−0.62
	2022-09-13	2557	39.389 080	121.694 233	14.97	14.32	0.65
	2022-09-13	2558	39.387 505	121.693 822	28.11	28.87	−0.76
5	2022-09-08	3918	39.402 896	121.653 244	18.67	19.16	−0.49
	2022-09-08	3919	39.401 326	121.652 810	16.23	16.15	0.09
	2022-09-08	3920	39.399 757	121.652 376	14.51	15.14	−0.63
	2022-09-08	3921	39.398 187	121.651 942	11.99	12.66	−0.67
	2022-09-08	3922	39.396 618	121.651 509	10.09	10.18	−0.10
	2022-09-13	2551	39.405 860	121.653 619	11.11	11.27	−0.16
	2022-09-13	2552	39.404 289	121.653 192	13.12	14.06	−0.95
	2022-09-13	2553	39.402 717	121.652 773	19.94	20.41	−0.47
	2022-09-13	2554	39.401 149	121.652 334	14.26	14.95	−0.69
	2022-09-13	2555	39.399 579	121.651 903	13.75	14.40	−0.65

利用过大连定标场的陆地生态碳监测卫星激光产品数据,与大连数字定标场平坦区域高精度DSM数据进行多波束激光雷达数据测高精度测试,波束1至波束5激光的高程精度分别为0.52 m、0.55 m、0.45 m、0.64 m、0.56 m。

为验证陆地生态系统碳监测卫星多波束激

光雷达数据精度,本文采用了铺设野外探测器的方式,根据捕获的不同时间、不同轨道上7个野外探测点的验证,得到多波束激光雷达在平地上的高程精度优于0.3 m,平面定位精度优于6 m。为进一步提高精度验证的可信度、普适度,选择了大连区域高精度地形数据作为基准,进一步验证激光数据的测高精度,根据实验结果,陆地生态系统碳监测卫星多波束激光雷达5个波束的高程精度均优于0.7 m。

根据两个实验的结果,陆地生态系统碳监测卫星数据符合载荷设计要求,数据处理方法准确可行。同时,由于激光载荷验证方法的特殊性和指标精度高的特点,野外探测器验证需要在不同区域铺设大量的激光探测器,基于高精度地形数据的高程精度验证也需要大面积平坦区域高精度的地形数据。时间限制和成本因素等多方面原因,陆地生态系统碳监测卫星验证区域和验证数据较少,没有进行长周期的验证与分析,后续会结合每年的年度定标任务进一步验证与完善。

2.3 多波束激光雷达(植被)数据与零度相机数据相对几何定位精度验证

在进行激光与零度相机联合定位测试时,本文选择2023-09-26—2023-10-16在内蒙古锡林郭勒盟定标场成功捕获到的激光数据,以及同时在野外获取的控制点数据,利用§1.4的方法进行了主被动载荷的定位精度验证,具体结果如表6~10所示,激光点和控制点分布图如图3所示。

表6 激光波束1与零度相机定位误差

Table 6 Accuracy Between LiDAR Beam 1 and Zero Degree Camera

采集日期及景号	实际位置刺点法/像素				RPC计算法/像素				误差/像素	
	控制点		激光		控制点		激光			
	列坐标	行坐标	列坐标	行坐标	列坐标	行坐标	列坐标	行坐标	列偏差	行偏差
2022-09-26 47689景	5 816.58	2 208.68	10 225.12	11 493.20	5 818.45	2 209.57	10 226.02	11 492.37	−0.97	−1.72
	11 896.10	3 324.87	10 225.12	11 493.20	11 899.16	3 325.04	10 226.02	11 492.37	−2.16	−1.00
	6 233.57	7 257.63	10 225.12	11 493.20	6 232.61	7 258.53	10 226.02	11 492.37	1.86	−1.73
	10 609.63	9 707.77	10 225.12	11 493.20	10 610.93	9 709.26	10 226.02	11 492.37	−0.40	−2.32
	2 418.02	11 802.85	10 225.12	11 493.20	2 417.89	11 802.66	10 226.02	11 492.37	1.03	−0.64
	8 551.77	11 122.97	10 225.12	11 493.20	8 552.70	11 123.79	10 226.02	11 492.37	−0.03	−1.65
中误差/m									2.61	3.21
整体误差/m									4.14	

表7 激光波束2与零度相机定位误差

Table 7 Accuracy Between LiDAR Beam 2 and Zero Degree Camera

采集日期及景号	实际位置刺点法/像素				RPC计算法/像素				误差/像素	
	控制点		激光		控制点		激光			
	列坐标	行坐标	列坐标	行坐标	列坐标	行坐标	列坐标	行坐标	列偏差	行偏差
2022-09-26 47689景	5 816.58	2 208.68	7 911.93	12 223.46	5 818.45	2 210.57	7 911.98	12 223.79	−1.82	−1.56
	11 896.10	3 324.87	7 911.93	12 223.46	11 899.16	3 325.04	7 911.98	12 223.79	−3.01	0.16
	6 233.57	7 257.63	7 911.93	12 223.46	6 232.61	7 258.53	7 911.98	12 223.79	1.01	−0.57
	10 609.63	9 707.77	7 911.93	12 223.46	10 612.93	9 709.26	7 911.98	12 223.79	−3.25	−1.16
	2 418.02	11 802.85	7 911.93	12 223.46	2 417.89	11 802.66	7 911.98	12 223.79	0.18	0.52
	8 551.77	11 122.97	7 911.93	12 223.46	8 552.70	11 123.79	7 911.98	12 223.79	−0.88	−0.49
中误差/m									4.07	1.76
整体误差/m									4.42	

通过利用陆地生态系统碳监测卫星外场定标的4组激光光学数据,结合外业实测控制点数据进行激光数据与零度相机数据匹配精度测试,多波束激光雷达(植被)波束1至波束5与零度相机匹配误差分别为4.14、4.42、3.90、4.27、4.30 m,陆地生态系统碳监测卫星多波束激光雷达(植被)与零度相机的相对定位精度均优于5 m,为多波束激光雷达(植被)与零度相机的联合应用奠定了几何精度基础。

2.4 多波束激光雷达(植被)数据与光轴监视相机数据相对几何定位精度验证

根据§1.5激光与光轴监视相机相对定位精

表 8　激光波束 3 与零度相机定位误差

Table 8　Accuracy Between LiDAR Beam 3 and Zero Degree Camera

采集日期及景号	实际位置刺点法/像素				RPC 参数计算法/像素				误差/像素	
	控制点		激光		控制点		激光			
	列坐标	行坐标	列坐标	行坐标	列坐标	行坐标	列坐标	行坐标	列偏差	行偏差
2022-10-01 51295 景	9 158.44	2 353.60	5 835.91	12 040.92	9 158.32	2 351.62	5 834.42	12 038.2	−1.37	−0.74
	10 025.45	4 269.47	5 835.91	12 040.92	10 025.62	4 268.88	5 834.42	12 038.2	−1.66	−2.13
	5 772.70	11 908.61	5 835.91	12 040.92	5 770.59	11 907.51	5 834.42	12 038.2	0.62	−1.62
	2077.03	9 487.16	5 835.91	12 040.92	2 073.45	9 484.03	5 834.42	12 038.2	2.09	0.41
	5 867.97	12 057.01	5 835.91	12 040.92	5 867.08	12 055.43	5 834.42	12 038.2	−0.60	−1.14
中误差/m									2.79	2.72
整体误差/m									3.90	

表 9　激光波束 4 与零度相机定位误差

Table 9　Accuracy Between LiDAR Beam 4 and Zero Degree Camera

采集日期及景号	实际位置刺点法/像素				RPC 参数计算法/像素				误差/像素	
	控制点		激光		控制点		激光			
	列坐标	行坐标	列坐标	行坐标	列坐标	行坐标	列坐标	行坐标	列偏差	行偏差
2022-10-06 54511 景	9 702.56	11 482.60	5 684.66	4 608.31	9 703.33	11 483.45	5 684.96	4 607.55	−0.47	−1.61
	10 158.00	2 652.94	5 684.66	4 608.31	10 159.31	2 652.42	5 684.96	4 607.55	−1.01	−0.24
	4 286.48	9 214.19	5 684.66	4 608.31	4 288.82	9 215.39	5 684.96	4 607.55	−2.04	−1.96
	3 342.12	6 563.93	5 684.66	4 608.31	3 341.39	6 564.81	5 684.96	4 607.55	1.03	−1.64
	5 757.49	4 515.45	5 684.66	4 608.31	5 757.53	4 517.31	5 684.96	4 607.55	0.26	−2.62
中误差/m									2.29	3.60
整体误差/m									4.27	

表 10　激光波束 5 与零度相机定位误差

Table 10　Accuracy Between LiDAR Beam 5 and Zero Degree Camera

采集日期及景号	实际位置刺点法/像素				RPC 参数计算法/像素				误差/像素	
	控制点		激光		控制点		激光			
	列坐标	行坐标	列坐标	行坐标	列坐标	行坐标	列坐标	行坐标	列偏差	行偏差
2022-10-06 63567 景	9 957.25	3 263.96	3 618.04	4 408.32	9 958.98	3 262.95	3 617.61	4 406.66	−2.16	−0.65
	10 681.08	5 367.91	3 618.04	4 408.32	10 681.96	5 368.13	3 617.61	4 406.66	−1.31	−1.88
	6 745.38	11 378.44	3 618.04	4 408.32	6 746.22	11 378.64	3 617.61	4 406.66	−1.27	−1.86
	9 741.81	12 492.88	3 618.04	4 408.32	9 742.23	12 493.30	3 617.61	4 406.66	−0.85	−2.08
	3 621.97	4 432.97	3 618.04	4 408.32	3 620.40	4 432.37	3 617.61	4 406.66	1.14	−1.06
中误差/m									2.84	3.22
整体误差/m									4.30	

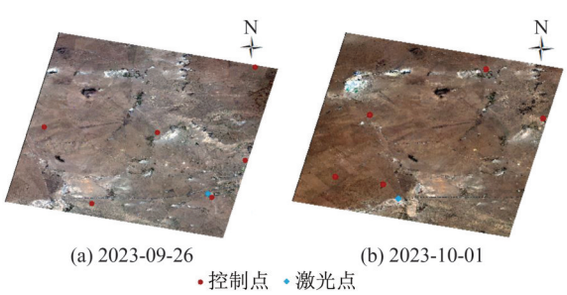


图 3　激光与控制点分布示意图

Fig. 3　Distribution of Laser Point and Control Points

度验证原理和§2.3的多波束激光数据与零度相机相对定位精度,选取了 7 轨多波束激光雷达(植被)数据,每轨数据与两景不同的零度相机进行匹配,计算零度相机与光轴监视相机配准误差,具体结果如表 11 所示。

根据多波束激光数据与零度相机配准精度和光轴监视相机数据与零度相机配准精度结果,利用误差传递公式,可以计算多波束激光雷达(植被)数据与光轴监视相机配准精度,波束 1 至波束 5 与光轴监视相机配准精度分别为光轴监视相机的 0.72、0.74、0.70、0.73、0.74 个像元,符合载荷设计要求,可以进行多波束激光数据与光轴监视相机数据联合使用。

表11 零度相机与光轴监视相机配准误差

Table 11 Accuracy Between Optical Axis Monitoring Camera and Zero Degree Camera

采集时间	轨道号	零度相机景号	光轴监视相机产品号	垂轨向误差/m	沿轨向误差/m	匹配误差/m	匹配误差/像素
2022-10-16	1112	63567	CM1_CASAL_B1_20 221 016_0 000 001 112_L20000209199-2189	−1.97	0.09	1.97	0.25
2022-10-16	1112	63568	CM1_CASAL_B1_20 221 016_0 000 001 112_L20000209199-2336	−2.35	0.23	2.36	0.30
2022-11-26	1736	105172	CM1_CASAL_B1_20 221 126_0 000 001 736_L10000207341-2657	2.52	0.03	2.52	0.32
2022-11-26	1736	105171	CM1_CASAL_B1_20 221 126_0 000 001 736_L10000207341-2461	2.70	0.10	2.70	0.34
2022-12-05	1872	109510	CM1_CASAL_B1_20 221 205_0 000 001 872_L20000209200-531	−3.00	−3.57	4.66	0.58
2022-12-05	1872	109511	CM1_CASAL_B1_20 221 205_0 000 001 872_L20000209200-604	−2.37	−3.75	4.43	0.55
2022-11-25	1720	103981	CM1_CASAL_B1_20 221 205_0 000 001 720_L20000209212-3401	3.93	−2.46	4.63	0.58
2022-11-25	1720	103982	CM1_CASAL_B1_20 221 205_0 000 001 720_L20000209212-3561	3.35	−1.60	3.71	0.46
2022-12-10	1948	113528	CM1_CASAL_B1_20 221 210_0 000 001 948_L20000209211-4339	−3.20	−2.05	3.80	0.48
2022-12-10	1948	113529	CM1_CASAL_B1_20 221 210_0 000 001 948_L20000209211-4579	−1.92	−1.77	2.61	0.33
2022-11-15	1568	93761	CM1_CASAL_B1_20 221 115_0 000 001 568_L20000237362-1978	2.71	−2.88	3.96	0.50
2022-11-15	1568	93762	CM1_CASAL_B1_20 221 115_0 000 001 568_L20000237362-2201	2.71	−2.88	3.96	0.50
2022-12-11	1964	114462	CM1_CASAL_B1_20 221 211_0 000 001 964_L20000239235-2541	−2.55	−4.38	5.06	0.63
2022-12-11	1964	114463	CM1_CASAL_B1_20 221 211_0 000 001 964_L20000239235-2564	−2.98	−5.78	6.50	0.81
均值				2.78	2.83	3.97	0.50

3 结 语

本文针对陆地生态系统碳监测卫星植被探测系统载荷种类数量多、主被动数据联合处理复杂的特点,介绍了陆地生态系统碳监测卫星多波束激光雷达(植被)系统数据处理方法,提出了基于外业控制数据的激光零度相机主被动联合定标方法,并提出了基于外业控制点与反投影联合的激光-光学定位精度验证方法和基于零度相机基准点的激光-光轴监视相机定位精度验证方法,首次科学系统地验证了光学图像与激光点之间的相对几何定位精度。得出了以下结论:

1)多波束激光雷达(植被)数据的处理精度在平原地区,测高精度优于0.7 m,平面定位精度优于6 m,达到载荷和地面处理系统设计的指标要求;

2)利用基于外业控制点与反投影联合的激光-光学定位精度验证方法和实测数据验证,多波束激光雷达(植被)波束1至波束5与零度相机匹配误差分别为4.14 m、4.42 m、3.90 m、4.27 m、4.30 m,可以进行激光-光学数据联合应用;

3)利用基于零度相机基准点的激光-光轴监视相机定位精度验证方法和实测数据验证,多波束激光雷达(植被)数据波束1至波束5与光轴监视相机配准精度分别为光轴监视相机的0.72、0.74、0.70、0.73、0.74个像元,即激光数据与光轴监视相机配准精度优于6 m,激光-光轴监视相机数据匹配精度好。

实验结果表明,陆地生态系统碳监测卫星数据处理方法,以及首次提出的主被动载荷相对精度联合验证方案可行,实现了中国首颗高精度监测陆地生态系统碳储量、森林资源和森林生产力的林业遥感卫星数据处理与精度验证,可以满足该卫星后续科学研究和大规模业务化应用的要求。同时,本文形成的非成像载荷与成像载荷联合验证方案可以用于未来卫星的精度验证。由于时间限制,对陆地生态系统碳监测卫星野外获取的真实数据较少,没有进行长周期的验证与分析,后续还需要结合每年的年度定标任务进一步探索与完善。

参 考 文 献

[1] 张新伟,黄缙,贺涛,等. 陆地生态系统碳监测卫星总体设计[J]. 航天返回与遥感,2022,43(6):16-26.
ZHANG Xinwei, HUANG Jin, HE Tao, et al. Overall Design of Terrestrial Ecosystem Carbon Inventory Satellite[J]. *Spacecraft Recovery & Remote Sensing*, 2022, 43(6): 16-26.

[2] 张鑫, 孟俊清, 刘经启,等. 陆地生态系统碳监测卫星多波束激光雷达激光器设计[J]. 航天返回与遥感, 2022, 43(6): 59-67.
ZHANG Xin, MENG Junqing, LIU Jingqi, et al. Design of Laser Transmitter for Terrestrial Ecosys-

tem Carbon Inventory Satellite's Multi-beam LiDAR[J]. *Spacecraft Recovery & Remote Sensing*, 2022, 43(6): 59-67.

[3] 岳春宇, 周楠, 杨舒琪,等. 陆地生态系统碳监测卫星植被测量子系统无控定位方法[J]. 航天返回与遥感, 2022, 43(6): 50-58.
YUE Chunyu, ZHOU Nan, YANG Shuqi, et al. Positioning Without Ground Control Points of Vegetation Measurement System on Terrestrial Ecosystem Carbon Inventory Satellite[J]. *Spacecraft Recovery & Remote Sensing*, 2022, 43(6): 50-58.

[4] SPANG R, HOFFMANN L, MULLER R, et al. A Climatology of Polar Stratospheric Cloud Composition Between 2002 and 2012 Based on MIPAS/Envisat Observations[J]. *Atmospheric Chemistry and Physics*, 2018, 18(7): 5089-5113.

[5] SIMARD M, PINTO N, FISHER B J, et al. Mapping Forest Canopy Height Globally with Spaceborne LiDAR[J]. *Journal of Geophysical Research (Biogeosciences)*, 2011, 116: G04201.

[6] 唐新明, 刘昌儒, 张恒,等. 高分七号卫星立体影像与激光测高数据联合区域网平差[J]. 武汉大学学报(信息科学版), 2021,46(10): 1423-1430.
TANG Xingming, LIU Changru, ZHANG Heng, et al. GF7 Satellite Stereo Images Block Adjustment Assisted with Laser Altimetry Data[J]. *Geomatics and Information Science of Wuhan University*, 2021,46(10): 1423-1430.

[7] 陈新阳,乔志远,龙小祥,等. 高分七号星载激光定位模型构建与验证[J]. 遥感学报, 2023,27(5): 1228-1237.
CHEN Xinyang, QIAO Zhiyuan, LONG Xiaoxiang, et al. Constructing Geo-location Model and Verification of Gaofen-7 Spaceborne Laser Altimetry[J]. *Journal of Remote Sensing*, 2023,27(5): 1228-1237.

[8] 李国元. 对地观测卫星激光测高数据处理方法与工程实践[D]. 武汉:武汉大学,2017.
LI Guoyuan. Earth Observing Satellite Laser Altimeter Data Processing Method and Engineer Practice[D]. Wuhan: Wuhan University, 2017.

[9] LIAN W Q, LI S N, ZHANG G, et al. Accuracy Verification of Airborne Large-Footprint LiDAR Based on Terrain Features[J]. *Remote Sensing*, 2020, 12(5): 879.

[10] 李少宁. 星载激光对地测高系统在轨几何定标研究[D]. 武汉: 武汉大学, 2017.
LI Shaoning. Research on Geometric Calibration of Earth Observation Satellite Laser Altimete[D]. Wuhan: Wuhan University, 2017.

[11] 张过, 李少宁, 黄文超,等. 资源三号02星对地激光测高系统几何检校及验证[J]. 武汉大学学报(信息科学版), 2017,42(11): 1589-1596.
ZHANG Guo, LI Shaoning, HUANG Wenchao, et al. Geometric Calibration and Validation of ZY3-02 Satellite Laser Altimeter System[J]. *Geomatics and Information Science of Wuhan University*, 2017, 42(11): 1589-1596.

[12] 唐新明, 谢俊峰, 莫凡, 等. 高分七号卫星双波束激光测高仪在轨几何检校与试验验证[J]. 测绘学报, 2021,50(3): 384-395.
TANG Xinming, XIE Junfeng, MO Fan, et al. GF-7 Dual-Beam Laser Altimeter On-Orbit Geometric Calibration and Test Verification[J]. *Acta Geodaetica et Cartographica Sinica*, 2021,50(3): 384-395.

[13] 刘迎春, 高显连, 贺岩,等. 全国林草资源调查机载大光斑激光雷达挂飞检校和验证[J]. 林业资源管理, 2021(2): 52-60.
LIU Yingchun, GAO Xianlian, HE Yan, et al. Calibration and Validation of National Forest and Grassland Inventory Airborne Large-Footprint LiDAR[J]. *Forest Resources Management*, 2021(2): 52-60.

[14] 陈新阳,龙小祥,李庆鹏,等. 高分七号激光测高仪再定标与光轴稳定性监测[C]//第八届高分辨率对地观测学术年会,中国北京,2022.
CHEN Xinyang, LONG Xiaoxiang, LI Qingpeng, et al. Re-calibration and Optical Axis Stability Monitoring of Gaofen-7 Laser Altimeter[C]//The 8th Annual Conference on High Resolution Earth Observation, Beijing, China, 2022.

[15] 宋佳璇, 范大昭, 纪松,等. 高分七号卫星足印影像激光光斑质心提取方法[J]. 测绘科学技术学报, 2021, 38(5): 507-513.
SONG Jiaxuan, FAN Dazhao, JI Song, et al. Laser Spot Centroid Extraction of GF-7 Footprint Images[J]. *Journal of Geomatics Science and Technology*, 2021,38(5): 507-513.

[16] 么嘉棋, 李国元, 陈继溢,等. 高分七号卫星激光测高仪光斑质心位置变化分析[J]. 红外与激光工程, 2021,50(S2): 20210539.
YAO Jiaqi, LI Guoyuan, CHEN Jiyi, et al. Analysis on the Change of GF-7 Satellite Laser Altimeter Spot Centroid Position[J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2021, 50(S2): 20210539.

[17] 胡柳茹,唐新明,张智,等. 高分七号卫星多源遥感数据精度优化与评估[J]. 红外与激光工程,2021, 50(3):384-395.

(下转第1434页)