



武汉大学学报(信息科学版)

Geomatics and Information Science of Wuhan University

ISSN 1671-8860,CN 42-1676/TN

《武汉大学学报(信息科学版)》网络首发论文

题目： 陆地生态系统碳监测卫星激光数据处理与精度验证
作者： 陈新阳, 龙小祥, 李庆鹏, 黎荆梅, 韩启金, 徐兆鹏, 姚薇源
DOI: 10.13203/j.whugis20230110
收稿日期: 2023-06-04
网络首发日期: 2023-07-18
引用格式: 陈新阳, 龙小祥, 李庆鹏, 黎荆梅, 韩启金, 徐兆鹏, 姚薇源. 陆地生态系统碳监测卫星激光数据处理与精度验证[J/OL]. 武汉大学学报(信息科学版). <https://doi.org/10.13203/j.whugis20230110>



网络首发: 在编辑部工作流程中,稿件从录用到出版要经历录用定稿、排版定稿、整期汇编定稿等阶段。录用定稿指内容已经确定,且通过同行评议、主编终审同意刊用的稿件。排版定稿指录用定稿按照期刊特定版式(包括网络呈现版式)排版后的稿件,可暂不确定出版年、卷、期和页码。整期汇编定稿指出版年、卷、期、页码均已确定的印刷或数字出版的整期汇编稿件。录用定稿网络首发稿件内容必须符合《出版管理条例》和《期刊出版管理规定》的有关规定;学术研究成果具有创新性、科学性和先进性,符合编辑部对刊文的录用要求,不存在学术不端行为及其他侵权行为;稿件内容应基本符合国家有关书刊编辑、出版的技术标准,正确使用和统一规范语言文字、符号、数字、外文字母、法定计量单位及地图标注等。为确保录用定稿网络首发的严肃性,录用定稿一经发布,不得修改论文题目、作者、机构名称和学术内容,只可基于编辑规范进行少量文字的修改。

出版确认: 纸质期刊编辑部通过与《中国学术期刊(光盘版)》电子杂志社有限公司签约,在《中国学术期刊(网络版)》出版传播平台上创办与纸质期刊内容一致的网络版,以单篇或整期出版形式,在印刷出版之前刊发论文的录用定稿、排版定稿、整期汇编定稿。因为《中国学术期刊(网络版)》是国家新闻出版广电总局批准的网络连续型出版物(ISSN 2096-4188, CN 11-6037/Z),所以签约期刊的网络版上网络首发论文视为正式出版。

DOI:10.13203/j.whugis20230110

引用格式：

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), 2023, DOI: 10.13203/j.whugis20230110 (Chen Xinyang, Long Xiaoxiang, Li Qingpeng, et al. Data Proccing and Accuracy Verification for Laser Altimeter of Terrestrial Ecosystem Carbon Inventory Satellite[J]. *Geomatics and Information Science of Wuhan University*, 2023, 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的遥感卫星，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，森林生物量的反演调查，通过计算激光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，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，首次实现了五波束激光雷达与光学相机主被动联合检校，并科学严谨的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0.7m，平面定位精度优于6m。激光数据与零度相机相对定位精度优于5m，激光数据与光轴监视相机配准精度优于6m。

关键词：陆地生态系统碳监测卫星；句芒号；激光雷达；几何定位；精度验证

Data Proccing 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 Jingmei³ Han Qijin² Xu Zhaopeng²
Yao Weiyuan³

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 Science, Beijing 100094, China

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。E-mail: 244647457@qq.com

通讯作者：李庆鹏，博士，研究员，长期从事卫星高精度测绘的理论方法与应用研究。E-mail: 626172666@qq.com

Abstract: Objectives: The terrestrial ecosystem carbon inventory satellite(TECIS) is the first satellite using for observation joint active and passive detectors of forest carbon sinks in China. Multi-beam 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:** This paper introduces the data processing method of multi-beam LiDAR system, proposes the joint calibration method for multi-beam LiDAR and optical cameras. What is more, this paper proposes 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 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 meters and the plane positioning accuracy is better than 6m; (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 4.14m, 4.42m, 3.90m, 4.27m and 4.30m, 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 true, 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 proposed in this paper can be used for accuracy verification of similar satellites in the future.

Key words: Terrestrial ecosystem carbon inventory satellite; Gou Mang ; Light detection and ranging(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四个载荷，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，森林生物量的反演调查，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激光-光轴监视相机定位精度验证方法，首次科学系统的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三部分构成。5波束激光探测器可获取五波束1064nm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进行森林树高、星地距离的测量成像。获取1064nm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 多波束激光雷达主要技术性能参数

Tab. 1 Performance Parameters of Multi-beam LiDAR(Vegetation)

指标	植被激光雷达	大气激光雷达
激光波束	5波束	2波束
激光重复频率	40Hz	20 Hz
激光器工作波长	1064nm	1064nm、532nm
激光波形采用频率	1.2GHz	10MHz
激光发射和回波量化位数	12bit	16bit
光轴监视相机分辨率	≤8m	—
光轴监视相机量化位数	12bit	—

多波束激光雷达（植被）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（Global Positioning System）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 下的三维空间坐标为 $(X, Y, Z)_{WGS84}^T$ [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]。

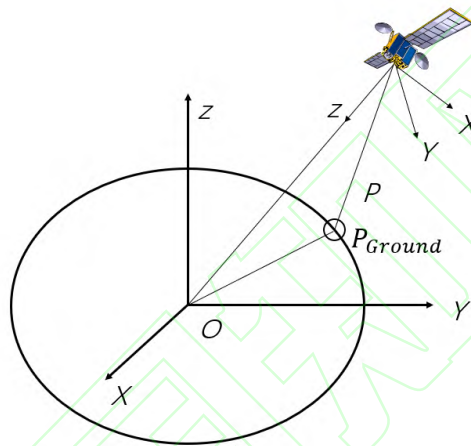


图 1 激光测高严密几何模型示意图

Fig.1 Diagram of laser altimetry geometric model

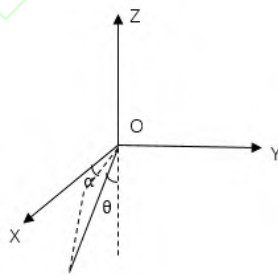


图 2 激光光束发射方向与本体坐标系夹角示意图

Fig.2 Angle between laser beam emission direction and body coordinate system

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：

$$\begin{bmatrix} X \\ Y \\ Z \end{bmatrix}_{WGS84} = \begin{bmatrix} X_{GPS} \\ Y_{GPS} \\ Z_{GPS} \end{bmatrix} + R_{J2000}^{WGS84} R_{Star}^{J2000} R_{Body}^{Star} \begin{bmatrix} L_x \\ L_y \\ L_z \end{bmatrix} + (\rho + \Delta\rho_1 + \Delta\rho_2) \begin{bmatrix} \sin(\theta) \cos(\alpha) \\ \sin(\theta) \sin(\alpha) \\ -\cos(\theta) \end{bmatrix}_{Body} - \begin{bmatrix} D_x \\ D_y \\ D_z \end{bmatrix} \quad (1)$$

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, 式 1 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; $\Delta L = [L_x \ L_y \ L_z]^T$ 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, $[X \ Y \ Z]_{WGS84}^T$ 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, $[X_{GPS} \ Y_{GPS} \ Z_{GPS}]_{WGS84}^T$ 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; $[D_x \ D_y \ D_z]^T$ 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; R_{body}^{star} 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, R_{star}^{J2000} 是陆地生态系统碳监测卫星本体到 J2000 坐标系的旋转矩阵, R_{J2000}^{WGS84} 是 J2000 坐标系到 ITRF(International Terrestrial Reference Frame)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)。

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, 选择了内蒙古自治区平坦的草原, 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, 一般选择在内蒙古平坦的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的捕获到的能量值, (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 RTK (Real-time kinematic) 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 为分别为 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, 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, 经过计算可以对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, 进行森林植被的联合反演应用。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, 选取探测器周围具备良好目视信息的特征点, 外业进行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进行联合定标, 可以通过控制影响几何定标精度的外界条件一致来提高激光与光学数据相对几何定位精度。

1.4 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

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, 本文提出了基于外业控制点与反投影联合激光-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。然后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, 基于 RPC 有理参数模型, 计算准确控制点理论的像点坐标 x_2, y_2

$$\begin{cases} x_2 = \frac{Num_L(U, V, W)}{Den_L(U, V, W)} \\ y_2 = \frac{Num_S(U, V, W)}{Den_S(U, V, W)} \end{cases} \quad (3)$$

U, V, W 分别代表控制点的经度、纬度和高程信息, 多项式分子、分母分别表示如下:

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

其中, $a_i, b_i, c_i, d_i (i=1,2 \dots 20)$ 为有理多项式系数 (Rational Polynomial Coefficients, RPCs)。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) 根据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

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

(8)

其中, σ_{LF} 为激光与光轴监视相机配准精度, 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配准精度。

2 实验及分析

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年9月26日至2022年10月16日, 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

Tab. 2 Experimental Data of Multi-beam LiDAR

序号	景号	数据采集日期	载荷
1	47647	20220926	CASAL_A
2	56197	20221001	CASAL_A
3	54429	20221006	CASAL_A
4	63496	20221016	CASAL_A
5	32867	20220908	CASAL_A
6	37957	20220913	CASAL_A

(2) 光学相机数据

为验证激光零度相机相对定位精度, 激光与光轴监视相机相对定位精度, 本实验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

Tab. 3 Experimental Data of Zero Degree Camera

序号	景号	数据采集日期	载荷
1	47689	20220926	零度相机
2	51295	20221001	零度相机
3	54511	20221006	零度相机
4	63567	20221016	零度相机
5	63568	20221016	零度相机
6	105172	20221126	零度相机
7	105171	20221126	零度相机

序号	景号	数据采集日期	载荷
8	109510	20221205	零度相机
9	109511	20221205	零度相机
10	103981	20221125	零度相机
11	103982	20221125	零度相机
12	113528	20221210	零度相机
13	113529	20221210	零度相机
14	93761	20221115	零度相机
15	93762	20221115	零度相机
16	114462	20221211	零度相机
17	114463	20221211	零度相机

(3) 野外测量数据

本文实验用到的数据源两类：一类是用于捕获激光光斑实际位置的红外探测器，卫星过境后，记录捕获到光斑能量和探测器精确到经纬度高程信息，用于准确判断激光光斑的实际位置。另一类是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 DSM(Digital Surface Model)数据

大连区域机载立体遥感数据生成的 0.5 米格网的 DSM 数据，平面和高程精度均为 0.3m。

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 年 9 月 26 日到 10 月 16 日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。

表 4 多波束激光雷达测高精度

Tab. 4 Height accuracy of Multi-beam LiDAR

波束	误差		
	B(m)	L(m)	H(m)
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

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

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 9 月 8 日和 9 月 13 日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 5 基于高精度 DSM 数据的多波束激光雷达测高精度

Tab. 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	20220908	3765	39.613999	121.891810	162.71	163.20	-0.50
	20220908	3803	39.554397	121.875121	69.18	69.12	0.06
	20220908	3818	39.530838	121.868623	103.06	102.97	0.09
	20220908	5245	39.524556	121.866888	109.66	109.66	0.00
	20220908	3847	39.485341	121.855953	69.46	68.72	0.75
	20220913	2403	39.609083	121.890142	145.77	145.61	0.16
	20220913	2404	39.607515	121.889701	141.71	141.05	0.66
	20220913	2405	39.605947	121.889258	136.21	137.20	-0.98
	20220913	2406	39.604375	121.888829	142.27	142.92	-0.64
	20220913	2407	39.602806	121.888391	140.48	140.42	0.06
2	20220908	3765	39.620798	121.848634	83.55	83.88	-0.33
	20220908	3854	39.485808	121.811282	120.59	121.26	-0.67
	20220908	3872	39.452866	121.802123	87.42	87.95	-0.53
	20220908	3877	39.444985	121.800067	175.43	175.15	0.28
	20220908	3919	39.379123	121.781640	9.23	8.80	0.43
	20220913	2478	39.496620	121.813883	57.59	58.31	-0.72
	20220913	2479	39.495050	121.813449	57.13	57.84	-0.71
	20220913	2480	39.493480	121.813018	59.94	60.17	-0.23
	20220913	2481	39.491906	121.812599	71.00	71.90	-0.89
	20220913	2482	39.490326	121.812202	98.76	98.90	-0.15
3	20220908	3918	39.388207	121.738732	9.56	9.02	0.54
	20220908	3919	39.386637	121.738299	9.50	8.99	0.51
	20220908	2920	39.385067	121.737867	9.40	8.97	0.43
	20220908	3921	39.383497	121.737435	9.57	8.97	0.59
	20220908	3926	39.375647	121.735272	8.73	8.98	-0.25
	20220913	2408	39.615578	121.801172	31.80	31.87	-0.08
	20220913	2409	39.614009	121.800738	31.69	31.23	0.46
	20220913	2410	39.612439	121.800304	31.92	31.35	0.57
	20220913	2411	39.610870	121.799870	31.82	31.27	0.55
	20220913	2412	39.609301	121.799433	29.77	29.64	0.13
4	20220908	3916	39.398686	121.697234	7.54	8.45	-0.91
	20220908	3918	39.395545	121.696373	8.82	7.89	0.93
	20220908	3919	39.393975	121.695940	7.88	7.50	0.38
	20220908	3921	39.390833	121.695083	11.87	11.02	0.84
	20220908	3922	39.389261	121.694657	15.54	15.84	-0.30
	20220913	2552	39.396932	121.696380	9.16	9.24	-0.08
	20220913	2554	39.393793	121.695517	8.77	8.69	0.08
	20220913	2556	39.390650	121.694666	16.14	16.76	-0.62
	20220913	2557	39.389080	121.694233	14.97	14.32	0.65
	20220913	2558	39.387505	121.693822	28.11	28.87	-0.76
5	20220908	3918	39.402896	121.653244	18.67	19.16	-0.49
	20220908	3919	39.401326	121.652810	16.23	16.15	0.09
	20220908	3920	39.399757	121.652376	14.51	15.14	-0.63
	20220908	3921	39.398187	121.651942	11.99	12.66	-0.67
	20220908	3922	39.396618	121.651509	10.09	10.18	-0.10
	20220913	2551	39.405860	121.653619	11.11	11.27	-0.16

20220913	2552	39.404289	121.653192	13.12	14.06	-0.95
20220913	2553	39.402717	121.652773	19.94	20.41	-0.47
20220913	2554	39.401149	121.652334	14.26	14.95	-0.69
20220913	2555	39.399579	121.651903	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，本文首先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 0.3m，平面定位精度优于 6m。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五个波束的高程精度均优于 0.7m。

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的精度高的特点，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。疫情因素、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 9 月 26 日到 10 月 16 日内蒙古激光外场定标实验捕获成功到的激光数据，以及同时在野外获取的控制点数据，利用 1.4 节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-表 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 与零度相机联合处理误差 (pix)

Tab. 6 Height accuracy between Multi-beam LiDAR Beam 1 and Zero Degree Camera (pix)

采集时间	影像产品									
	实际位置刺点法				rpc 参数计算法				误差	
	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	
20220926	5816.58	2208.68	10225.12	11493.2	5818.45	2209.57	10226.02	11492.37	-0.97	-1.72
	11896.1	3324.87	10225.12	11493.2	11899.16	3325.04	10226.02	11492.37	-2.16	-1
激光波束	6233.57	7257.63	10225.12	11493.2	6232.61	7258.53	10226.02	11492.37	1.86	-1.73
波束 1	10609.63	9707.77	10225.12	11493.2	10610.93	9709.26	10226.02	11492.37	-0.4	-2.32
激光景号	2418.02	11802.85	10225.12	11493.2	2417.89	11802.66	10226.02	11492.37	1.03	-0.64
47689	8551.77	11122.97	10225.12	11493.2	8552.7	11123.79	10226.02	11492.37	-0.03	-1.65
中误差/m									2.61	3.21
相对误差/m									4.14	

表 7 激光波束 2 与零度相机联合处理误差 (pix)

Tab. 7 Height accuracy between Multi-beam LiDAR Beam 2 and Zero Degree Camera (pix)

采集时间	影像产品								误差	
	实际位置刺点法				rpc 参数算法					
	控制点		激光		控制点		激光		列偏差	行偏差
列坐标	行坐标	列坐标	行坐标	列坐标	行坐标	列坐标	行坐标			
20220926	5816.58	2208.68	7911.93	12223.46	5818.45	2210.57	7911.98	12223.79	-1.82	-1.56
	11896.1	3324.87	7911.93	12223.46	11899.16	3325.04	7911.98	12223.79	-3.01	0.16
激光波束	6233.57	7257.63	7911.93	12223.46	6232.61	7258.53	7911.98	12223.79	1.01	-0.57
波束 2	10609.63	9707.77	7911.93	12223.46	10612.93	9709.26	7911.98	12223.79	-3.25	-1.16
激光景号	2418.02	11802.85	7911.93	12223.46	2417.89	11802.66	7911.98	12223.79	0.18	0.52
47689	8551.77	11122.97	7911.93	12223.46	8552.7	11123.79	7911.98	12223.79	-0.88	-0.49
	中误差/m								4.07	1.76
	误差/m									4.42

表 8 激光波束 3 与零度相机联合处理误差 (pix)

Tab. 8 Height accuracy between Multi-beam LiDAR Beam 3 and Zero Degree Camera (pix)

采集时间	影像产品								误差	
	实际位置刺点法				rpc 参数算法					
	控制点		激光		控制点		激光		列偏差	行偏差
列坐标	行坐标	列坐标	行坐标	列坐标	行坐标	列坐标	行坐标			
20221001	9158.44	2353.6	5835.91	12040.92	9158.32	2351.62	5834.42	12038.2	-1.37	-0.74
	10025.45	4269.47	5835.91	12040.92	10025.62	4268.88	5834.42	12038.2	-1.66	-2.13
激光波束	5772.7	11908.61	5835.91	12040.92	5770.59	11907.51	5834.42	12038.2	0.62	-1.62
波束 3	2077.03	9487.16	5835.91	12040.92	2073.45	9484.03	5834.42	12038.2	2.09	0.41
激光景号	5867.97	12057.01	5835.91	12040.92	5867.08	12055.43	5834.42	12038.2	-0.6	-1.14
51295	中误差/m								2.79	2.72
	误差/m									3.9

表 9 激光波束 4 与零度相机联合处理误差 (pix)

Tab. 9 Height accuracy between Multi-beam LiDAR Beam 4 and Zero Degree Camera (pix)

采集时间	影像产品								误差	
	实际位置刺点法				rpc 参数算法					
	控制点		激光		控制点		激光		列偏差	行偏差
列坐标	行坐标	列坐标	行坐标	列坐标	行坐标	列坐标	行坐标			
20221006	9702.56	11482.6	5684.66	4608.31	9703.33	11483.45	5684.96	4607.55	-0.47	-1.61
	10158	2652.94	5684.66	4608.31	10159.31	2652.42	5684.96	4607.55	-1.01	-0.24
激光波束	4286.48	9214.19	5684.66	4608.31	4288.82	9215.39	5684.96	4607.55	-2.04	-1.96
波束 4	3342.12	6563.93	5684.66	4608.31	3341.39	6564.81	5684.96	4607.55	1.03	-1.64
激光景号	5757.49	4515.45	5684.66	4608.31	5757.53	4517.31	5684.96	4607.55	0.26	-2.62
54511	中误差/m								2.29	3.6

表 10 激光波束 5 与零度相机联合处理误差 (pix)

Tab. 10 Height accuracy between Multi-beam LiDAR Beam 5 and Zero Degree Camera (pix)

采集时间	影像产品									
	实际位置刺点法				rpc 参数计算法				误差	
	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	
20221006	9957.25	3263.96	3618.04	4408.32	9958.98	3262.95	3617.61	4406.66	-2.16	-0.65
	10681.08	5367.91	3618.04	4408.32	10681.96	5368.13	3617.61	4406.66	-1.31	-1.88
激光波束	6745.38	11378.44	3618.04	4408.32	6746.22	11378.64	3617.61	4406.66	-1.27	-1.86
波束 5	9741.81	12492.88	3618.04	4408.32	9742.23	12493.3	3617.61	4406.66	-0.85	-2.08
激光景号	3621.97	4432.97	3618.04	4408.32	3620.4	4432.37	3617.61	4406.66	1.14	-1.06
63567	中误差/m								2.84	3.22
	误差/m								4.3	

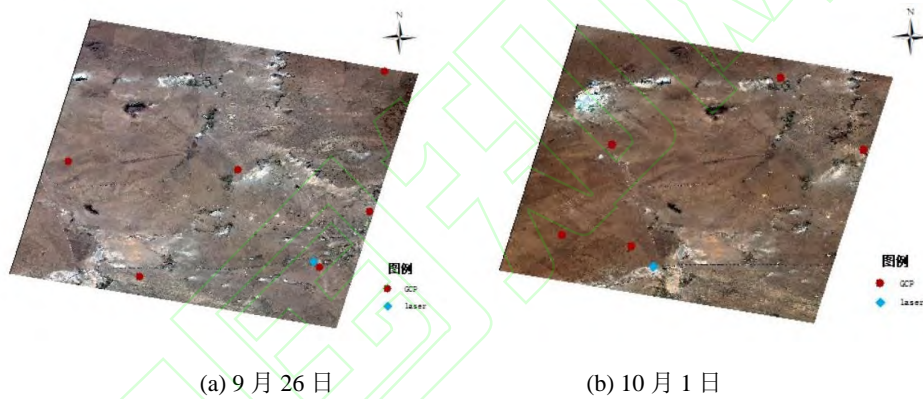


图 3 激光与控制点分布示意图

Fig.3 Distribution of laser point and control points

通过利用陆地生态系统碳监测卫星外场定标的四组激光光学数据, 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, 多波束激光雷达波束 1 至波束 5 与零度相机匹配误差分别为 4.14m、4.42m、3.90m、4.27m、4.30m, 陆地生态系统碳监测卫星多波束激光雷达与零度相机的相对定位精度均优于 5m, 为多波束激光雷达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 节激光与光轴监视相机相对定位精度验证原理, 和根据 2.3 节的多波束激光数据与零度相机相对定位精度, 选取了七轨多波束激光雷达数据, 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。

表 11 零度相机与光轴监视相机配准误差

Tab. 11 Height accuracy between Optical Axis Monitoring Camera and Zero Degree Camera

序号	采集时间	轨道号	零度相机景号	光轴监视相机产品号	dx/m	dy/m	匹配误差/m	匹配误差/像素
1	20221016	1112	63567	CM1_CASAL_B1_20221016_0000001 112_L20000209199-2189	-1.97	0.09	1.97	0.25
2	20221016	1112	63568	CM1_CASAL_B1_20221016_0000001 112_L20000209199-2336	-2.35	0.23	2.36	0.3
3	20221126	1736	105172	CM1_CASAL_B1_20221126_0000001 736_L10000207341-2657	2.52	0.03	2.52	0.32
4	20221126	1736	105171	CM1_CASAL_B1_20221126_0000001 736_L10000207341-2461	2.7	0.1	2.7	0.34
5	20221205	1872	109510	CM1_CASAL_B1_20221205_0000001 872_L20000209200-531	-3	-3.57	4.66	0.58
6	20221205	1872	109511	CM1_CASAL_B1_20221205_0000001 872_L20000209200-604	-2.37	-3.75	4.43	0.55
7	20221125	1720	103981	CM1_CASAL_B1_20221205_0000001 720_L20000209212-3401	3.93	-2.46	4.63	0.58
8	20221125	1720	103982	CM1_CASAL_B1_20221205_0000001 720_L20000209212-3561	3.35	-1.6	3.71	0.46
9	20221210	1948	113528	CM1_CASAL_B1_20221210_0000001 948_L20000209211-4339	-3.2	-2.05	3.8	0.48
10	20221210	1948	113529	CM1_CASAL_B1_20221210_0000001 948_L20000209211-4579	-1.92	-1.77	2.61	0.33
11	20221115	1568	93761	CM1_CASAL_B1_20221115_0000001 568_L20000237362-1978	2.71	-2.88	3.96	0.5
12	20221115	1568	93762	CM1_CASAL_B1_20221115_0000001 568_L20000237362-2201	2.71	-2.88	3.96	0.5
13	20221211	1964	114462	CM1_CASAL_B1_20221211_0000001 964_L20000239235-2541	-2.55	-4.38	5.06	0.63

14	20221211	1964	114463	CMI_CASAL_B1_20221211_0000001 964_L20000239235-2564	-2.98	-5.78	6.5	0.81
中误差/m					2.78	2.83	3.97	0.5

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 个光轴监视相机像元，符合载荷设计要求，可以进行多波束激光数据与足印相机数据联合使用。

3 结论

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) 多波束激光雷达数据的处理精度在平原地区，测高精度优于 0.7m，平面定位精度优于 6m，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，多波束激光雷达波束 1 至波束 5 与零度相机匹配误差分别为 4.14m、4.42m、3.90m、4.27m、4.30m，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 个光轴监视相机像元，即激光数据与光轴监视相机配准精度优于 6m，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。由于疫情和时间限制，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] 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. (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.)
- [2] ZHANG Xin, MENG Junqing, LIU Jingqi, et al. Design of Laser Transmitter for Terrestrial Ecosystem Carbon Inventory Satellite's Multi-beam Li DAR[J]. *Spacecraft Recovery & Remote Sensing*, 2022, 43(6): 59-67. (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.)
- [3] 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. (岳春宇, 周楠, 杨舒琪, 等. 陆地生态系统碳监测卫星植被测量量子系统无控定位方法[J]. *航天返回与遥感*, 2022, 43(6): 50-58.)
- [4] Reinhold S, Lars H, Rolf M, Jens-Uwe G, Ines T, Michael H, Michael P, Andrew O, Martin R. 2018. A climatology of polar stratospheric cloud composition between 2002 and 2012 based on MIPAS/Envisat observations[J]. *Atmospheric Chemistry and Physics*, 18(7):5089-5113.
- [5] Simard, M, Pinto N, Fisher, J. B, Baccini, A. .2011. Mapping forest canopy height globally with spaceborne lidar. *Journal of Geophysical Research: Biogeosciences*. 116(G4), 4021.
- [6] Tang Xinming, Liu Changru, Zhang Heng, et al. GF-7 Satellite Stereo Images Block Adjustment Assisted with Laser Altimetry Data[J]. *Geomatics and Information Science of Wuhan University*, 2021, 46(10):1423-1430 (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)
- [7] 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. (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.)
- [8] Li Guoyuan. Earth Observing Satellite Laser Altimeter Data Processing Method and Engineer Practice[D]. Wuhan: Wuhan University, 2017:33-39. (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, 2017:21-30.)
- [9] Lian W, Li S, Zhang G, et al. Accuracy verification of airborne large-footprint lidar based on terrain features[J]. *Remote Sensing*, 2020, 12(5):879.
- [10] Li Shangning. Research on Geometric Calibration of Earth Observation Satellite Laser Altimeter[D]. Wuhan: Wuhan University, 2017:32-47. (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, 2017:32-47)
- [11] Zhang Guo, Li Shangning, 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. (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.)
- [12] Tang Xinming, Xie Junfeng, Mo Fan, et al. GF-7 dualbeam laser altimeter on-orbit geometric calibration and test verification. [J]. *Acta Geodaetica et Cartographica Sinica*, 2021, 50(3):384-395. (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.)
- [13] Liu Y, Gao X, He Y, et al. Calibration and Validation of National Forest and Grassland Inventory Airborne Large-Footprint LiDAR[J]. *Forest Resources Mangement*. 2021(2):52-60. (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.)

- [14] Chen Xinyang, Long Xiaoxiang, Li Qingpeng, et al. Re-calibration and Optical Axis Stability Monitoring of Gaofen-7 Laser Altimeter.[C/OL]. China High Resolution Earth Observation Conference. 2022. (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/OL]. 第八届高分辨率对地观测学术年会, 2022)
- [15] Song Jiaxuan, Fan Dazhao, Ji Song, et al. Laser Spot Centroid Extraction of GF-7 Footprint Image[J]. Journal of Geomatics Science and Technology, 2021, 38(5):507-513. (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.)
- [16] Yao Jiaqi, Li Gguoyuan, 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):20210539-1-20210539-10. (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):20210539-1-20210539-10.)
- [17] Hu Liuru, Tang Xinming, Zhang Zhi, et al. Accuracy optimization and assessment of GF-7 satellite multi-source remote sensing data.[J/OL]. 2021. Infrared and Laser Engineering. (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/OL]. 2021. 红外与激光工程.)
- [18] Junfeng Xie, Genghua Huang, Ren Liu, Chenguang Zhao, et al. Design and Data Processing of China's First Spaceborne Laser Altimeter System for Earth Observation: GaoFen-7[J/OL]. 2020. IEEE Journal of Selected Topics in Applied Earth Observations and Remote Sensing,
- [19] Li Guoyan, Gao Xiaoming, Chen Jiyi, et al. Data quality analysis of ZY-3 02 satellite laser Altimeter[J]. Journal of Remote Sensing, 23(6): 1159–1166. (李国元, 高小明, 陈继溢等. 资源三号02星激光测高数据质量分析[J]. 2019. 遥感学报, 23(6): 1159–1166.)
- [20] Wang Mi, Wei Yu, Yang Bo, et al. Extraction and Analysis of Global Elevation Control Points from ICESat-2 /ATLAS Data [J]. Geomatics and Information Science of Wuhan University, 2021, 46(2):184-192. (王密, 韦钰, 杨博, 等. ICESat-2/ATLAS全球高程控制点提取与分析[J]. 武汉大学学报 信息科学版, 2021, 46(2):184-192.)

网络首发:

标题: 陆地生态系统碳监测卫星激光数据处理与精度验证

作者: 陈新阳, 龙小祥, 李庆鹏, 黎荆梅, 韩启金, 徐兆鹏, 姚薇源

DOI: 10.13203/j.whugis20230110

收稿日期: 2023-06-04

引用格式:

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), 2023, DOI: 10.13203/j.whugis20230110 (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*, 2023, DOI: 10.13203/j.whugis20230110)

网络首发文章内容和格式与正式出版会有细微差别, 请以正式出版文件为准!

您感兴趣的其他相关论文:

高分七号卫星立体影像与激光测高数据联合区域网平差

唐新明, 刘昌儒, 张恒, 王霞, 李国元, 莫凡, 李丰翔

武汉大学学报 (信息科学版), 2021, 46(10): 1423-1430

<http://ch.whu.edu.cn/article/doi/10.13203/j.whugis20210417>

