

激光测高约束卫星立体影像的复杂 海岸带地形三维重建

曾旭平¹,高映龙²,亓超²,马鑫程¹,阳凡林²

(1. 中交公路规划设计院有限公司,北京 100010;

2. 山东科技大学 测绘与空间信息学院,山东 青岛 266590)

摘要: 三维地形信息是海岸带开发与生态保护的重要基础。卫星立体影像可高效获取海岸带三维信息,但受控制点不足及成像误差等影响,生成的数字表面模型(DSM)精度受限。为此,提出一种激光测高约束卫星立体影像的三维重建方法,采用“大范围控制-海岸带提取”策略。具体地,以覆盖海岸带及其毗邻陆域的区域作为测图范围,利用激光测高点作为高程控制,结合有理函数模型(RFM)几何优化与半全局匹配(SGM)生成初始DSM,并通过最小高差法实现精配准与高程校正,最终提取目标海岸带的高精度DSM。实验结果表明,GF-7 DSM的整体均方根误差(RMSE)由21.41 m降至3.67 m,精度提升82.8%;ZY-3 DSM的整体RMSE由5.21 m降至3.13 m,精度提升40%,平均误差(ME)接近零。有效抑制了卫星立体测图中的系统性高程偏差,在复杂海岸带地形下可满足1:25 000比例尺制图的精度要求。

关键词: 海岸带地形测绘;有理函数模型;立体测图;数字表面模型;激光测高

中图分类号:P229

文献标志码:A

Three-dimensional reconstruction of complex coastal terrain using laser altimetry-constrained satellite stereo imagery

ZENG Xuping¹, GAO Yinglong², QI Chao², MA Xincheng¹, YANG Fanlin²

(1. China Communications Highway Planning and Design, Beijing 100010, China;

2. College of Geodesy and Geomatics, Shandong University of Science and Technology, Qingdao 266590, China)

Abstract: Three-dimensional terrain information is fundamental to coastal development and ecological protection. Satellite stereo imagery can capture coastal 3D information efficiently, but digital surface model (DSM) accuracy is limited by sparse ground control and imaging errors. To address this issue, this study proposes a 3D reconstruction method using laser altimetry-constrained satellite stereo imagery, adopting a “large-area control and coastal-zone extraction” strategy. Specifically, a mapping region covering both the coastal zone and its adjacent land is defined, where laser altimetry footprints are used as elevation controls. An initial DSM is produced through rational function model (RFM) geometric optimization and semi-global matching (SGM), followed by precise co-registration and elevation correction using the minimum elevation-difference method. The final high-accuracy DSM of the target coastal zone is extracted thereafter. Experimental results show that the overall root mean square error (RMSE) of the GF-7 DSM is reduced from 21.41 m to 3.67 m, representing an accuracy improvement of 82%; the overall RMSE of the ZY-3 DSM decreases from 5.21 m to 3.13 m, improving by 40% in accuracy, with the mean error (ME) approaching zero. The proposed method effectively

收稿日期:2025-08-15

基金项目:青岛市自然科学基金重点项目(28-8-4-zrjj-2-jch)

作者简介:曾旭平(1967—),男,湖北武汉人,教授级高级工程师,博士,主要从事大地测量数据处理及研究。

高映龙(2001—),男,陕西渭南人,硕士研究生,主要从事海洋测绘方面的研究,本文通信作者。

E-mail: Gaoylong2025@163.com

suppresses systematic elevation biases in satellite stereo mapping and can meet the accuracy requirements for 1 : 25 000-scale mapping in complex coastal terrains.

Key words: coastal terrain mapping; rational function model; stereo mapping; digital surface model; laser altimetry

海岸带是陆海交互关键区,三维地形信息对侵蚀监测、生境评估与灾害预警至关重要^[1]。当前,海岸带地形获取主要依赖航空摄影测量、机载激光雷达等手段,但在大范围周期性监测任务中仍面临时效性受限、覆盖能力不足等挑战^[2]。近年来,卫星立体影像凭借高分辨率、广覆盖与较高时效性,在复杂地貌区域的三维重建中展现出显著优势,逐渐成为海岸带地形信息获取的重要数据来源^[3-4]。然而,受成像几何系统误差及狭长海岸带控制点分布不均影响,影像几何优化常存在残余误差,使得生成的数字表面模型(digital surface model, DSM)存在显著系统性偏差^[5]。具体而言,海岸带呈狭长条带状,受陆海交界曲折复杂以及潮汐、水体干扰和交通不便的制约,实地布设地面控制点(ground control point, GCP)难度大,导致控制点多集中于易达陆域或港口,无法均匀分布,会削弱几何模型的鲁棒性,使得沿岸系统高程存在偏差,尤其在地形剧变的滨海台地或沙滩区,进一步影响三维重建的绝对精度和可靠性。因此,如何有效抑制海岸带卫星立体测图的系统性偏差,提升其绝对高程精度,成为当前海岸带高精度三维重建面临的关键挑战之一。

目前,针对卫星立体测图高程精度问题,国内外学者相继提出多种改进策略,主要分为几何模型优化、多源数据融合两类^[6-7]。几何模型优化主要聚焦影像成像模型的误差修正,尤其是对有理函数模型(rational function model, RFM)的精细化。常见手段包括在 RFM 投影方程中引入仿射补偿项,通过立体像对平差联合估计几何畸变参数与地面点修正量,从而消除系统性误差,提升影像间的配准精度^[8]。其中,立体像对平差的核心在于影像间同名点的匹配质量及其空间分布,而为提升模型的绝对定位精度,通常还需引入实测 GCP 提供高精度外部约束^[9]。但此类方法对高质量、均匀分布的地面控制点依赖较强,且 GCP 的实测采集在海岸带等区域往往难以实现,尤其在狭长地貌中,控制点的不足不仅源于采集成本高,还受限于地形线性延伸特性,从而难以全面覆盖海陆交界区域,导致模型中残余误差的持续存在。多源数据融合则侧重于引入外部高程信息,以辅助提升 DSM 的绝对定位精度和区域一致性^[10]。例如,借助公开数字高程模型(digital elevation model, DEM)为连接点提供初始高程值或直接进行结果融合,可在一定程度上改善模型整体一致性^[11]。然而,此类 DEM 数据在分辨率、更新时效及高程精度方面仍存在局限,尤其在地形起伏剧烈或植被密集区域表现不佳^[12]。近年来,冰、云和陆地高程卫星二号(ice, cloud, and land elevation satellite-2, ICESat-2)可提供高精度陆地高程信息^[13],为提升 DSM 精度提供了新途径。然而,其沿轨采样稀疏、分布不连续,若直接插值构建高程控制面,易受地形复杂性影响,无法满足高精度 DSM 模型构建要求。综上,通过狭长地貌中均匀控制点难以获取与地形复杂性并存的海岸带区域,现有几何优化与多源融合方法在系统性高程偏差的稳定修正方面仍面临明显瓶颈,亟需引入更高精度、空间分布更合理的控制信息以提升 DSM 建模的整体可靠性。

针对上述问题,提出一种激光测高约束卫星立体影像的三维重建方法。该方法以覆盖海岸带及毗邻陆域的大范围测图为基础,引入均匀分布的 ICESat-2 激光测高点作为外部高程控制,以缓解狭长区域控制点不足对 DSM 精度的制约。通过 RFM 与仿射补偿的联合几何优化提升影像间的配准精度,再结合半全局密集匹配(semi global matching, SGM)算法生成初始 DSM,并利用最小高差法实现激光剖面与 DSM 的精确匹配,对系统性偏差进行修正,最终提取目标海岸带的高精度 DSM。

1 基于激光测高的海岸带地形重建方法

针对当前海岸带区域卫星 DSM 高程精度受限、狭长型区域难以获取空间分布均匀的控制点等问题,提出一种激光测高约束卫星立体影像的三维重建方法。该方法的创新在于设计了“大范围控制-海岸带提取”策略:首先扩展测图范围至覆盖海岸带及其毗邻陆域,利用 ICESat-2 激光测高点作为外部高程控制,缓解狭长区域 GCP 不足的问题;然后通过 RFM 几何优化和 SGM 密集匹配生成初始 DSM;最后基于最小高差法的激光剖面匹配模型实现 DSM 精确配准与高程校正,最终提取目标海岸带的高精度 DSM。激

光测高约束卫星立体影像三维重建技术流程如图 1 所示。

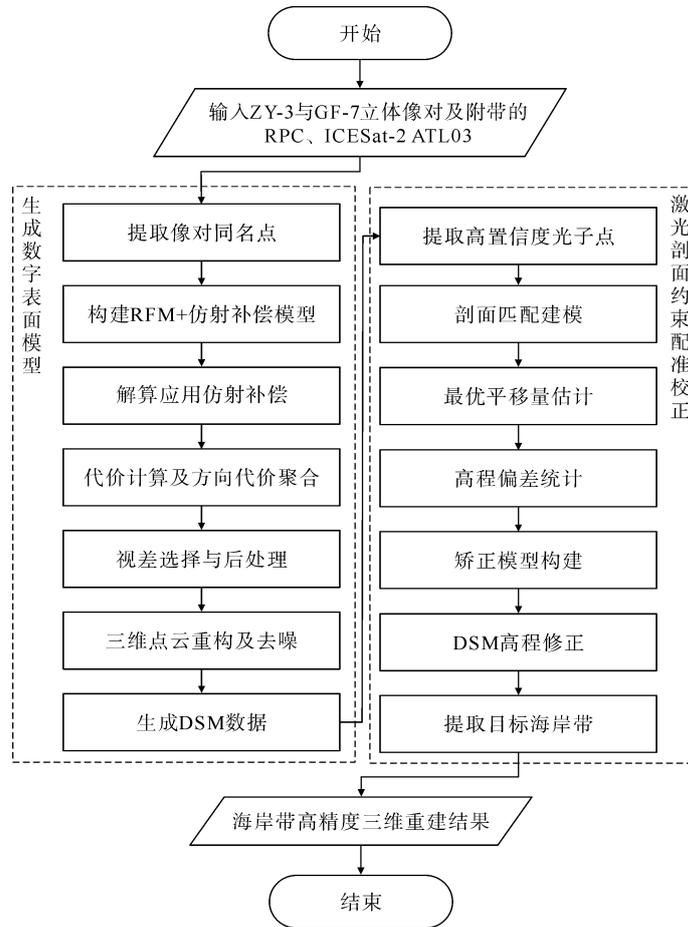


图 1 激光测高约束卫星立体影像三维重建技术流程图

Fig. 1 Workflow of 3D reconstruction using satellite stereo imagery constrained by laser altimetry

1.1 基于几何优化与密集匹配的 DSM 生成方法

1.1.1 基于仿射补偿的 RFM 影像几何优化

目前高分辨率卫星影像的成像模型一般采用 RFM,该成像模型具有简单性与通用性的优点。然而,由于轨道、姿态及传感器等系统误差,原始 RFM 往往在像方空间存在零阶或一阶的偏差,不同视角影像间产生残余几何畸变,导致配准失准,使得后续匹配精度存在不确定性。为消除这种残余几何畸变,可在 RFM 投影方程中引入仿射补偿项,通过立体像对平差的方式联合估计仿射系数与地面点坐标修正值,从而在无现场控制点的条件下提高像对配准精度。

RFM 通过有理函数的形式可同时刻画影像几何畸变与传感器成像系统误差,其核心是将归一化的地面点 n 的坐标 (X_n, Y_n, Z_n) 映射到影像像素坐标 (r_n, c_n) :

$$\begin{cases} r_n = \frac{p_1(X_n, Y_n, Z_n)}{p_2(X_n, Y_n, Z_n)}, \\ c_n = \frac{p_3(X_n, Y_n, Z_n)}{p_4(X_n, Y_n, Z_n)}. \end{cases} \quad (1)$$

式中, p_1, p_2, p_3, p_4 表示多项式系数,分别构成分子和分母。

为消除不同量纲与量级带来的数值不稳定性,需先对原始地面点坐标 (X, Y, Z) 和像面坐标 (r, c) 进行线性归一化:

$$\begin{cases} r_n = \frac{r - r_0}{r_s}, \\ c_n = \frac{c - c_0}{c_s}, \\ X_n = \frac{X - X_0}{X_s}, \\ Y_n = \frac{Y - Y_0}{Y_s}, \\ Z_n = \frac{Z - Z_0}{Z_s}. \end{cases} \quad (2)$$

式中: $(X_0, Y_0, Z_0, r_0, c_0)$ 表示标准化平移参数; $(X_s, Y_s, Z_s, r_s, c_s)$ 表示标准化比例参数。

为提升高分辨率卫星影像的几何定位精度,需对 RFM 中因成像系统误差引起的定位偏差进行校正。为此,引入像方空间坐标补偿量 $(\Delta r, \Delta c)$,通过构建仿射变换模型对系统误差进行参数化建模。该方法在 RFM 基础上叠加线性误差项,实现立体像对的整体误差补偿。

基于 RFM 补偿方程的立体像对平差模型为:

$$\begin{cases} r_n = \frac{p_1(X_n, Y_n, Z_n)}{p_2(X_n, Y_n, Z_n)} \cdot r_s + r_0 + \Delta r, \\ c_n = \frac{p_3(X_n, Y_n, Z_n)}{p_4(X_n, Y_n, Z_n)} \cdot c_s + c_0 + \Delta c. \end{cases} \quad (3)$$

仿射变换模型为:

$$\begin{cases} \Delta r = a_0 + a_1 c + a_2 r, \\ \Delta c = b_0 + b_1 c + b_2 r. \end{cases} \quad (4)$$

式中, $a_0, a_1, a_2, b_0, b_1, b_2$ 为像方坐标补偿的仿射变换系数。

对式(3)进行线性化,可得平差误差方程式:

$$\mathbf{V} = \mathbf{A}\mathbf{P} + \mathbf{B}\mathbf{Q} - \mathbf{l}. \quad (5)$$

式中: \mathbf{V} 为 RFM 补偿方程的残差向量; $\mathbf{P} = [\Delta a_0 \ \Delta a_1 \ \Delta a_2 \ \Delta b_0 \ \Delta b_1 \ \Delta b_2]^T$ 为像方仿射变换参数改正数; $\mathbf{Q} = [\Delta X \ \Delta Y \ \Delta Z]^T$ 为同名点物方坐标改正数; \mathbf{A}, \mathbf{B} 为对应系数矩阵; \mathbf{l} 为初值计算的常量。

通过最小二乘解算误差方程式得到仿射参数,可用于修正原始 RFM 投影结果,以抑制影像间的几何偏差,提高配准精度,为后续的立体匹配与三维重建任务提供高质量的初始几何基础。

1.1.2 半全局匹配密集立体重建与点云重构

为获得高精度、高连续性的视差图并生成高质量的初始 DSM,基于 Hirschmüller^[14]提出的 SGM 算法进行密集立体匹配。其核心思想是在多个方向通过一维动态规划累积匹配代价,进而综合各方向结果近似全局最优,适用于复杂地形下的高分辨率影像处理。

匹配过程包括代价计算、多方向代价聚合以及视差选择与后处理。具体而言,首先计算像素间的匹配代价(如基于 Census 变换的汉明距离),然后沿多个路径动态规划聚合代价,最后采用赢家通吃策略选定视差,并通过子像素拟合、一致性检查等优化生成最终视差图。

基于视差图,利用 RFM 反投影将二维信息转换为三维点云,再采用统计滤波与空间半径滤波相结合的方式剔除孤立噪声,并通过邻域一致性校验移除高度异常点,以获得既平滑又保留地形细节的高质量三维点云,经过表面重建后即可得到初始 DSM。

1.2 基于激光剖面约束的 DSM 配准与高程校正

1.2.1 基于最小高差法的激光点云与 DSM 剖面地形配准

1.1 节得到的 DSM 精度较低,其与星载激光测高点云(即 ICESat-2)通常存在系统性几何偏移。这主要源于传感器定位误差、时间基准差异及坐标系转换残差。为充分利用激光点云的高精度优势对初始 DSM 实施空间约束,需建立两者之间的严格空间对应关系。采用最小高差法^[15]进行激光剖面点云与 DSM

的配准,其核心是利用高程作为匹配特征,解算激光点云与 DSM 之间存在的系统性平面偏移量。ICESat-2 点云与初始 DSM 剖面匹配原理如图 2 所示,底图为研究区生成的 DSM,反映了地形的高程分布。其中,黄色轨迹表示初始坐标下 ICESat-2 激光点云位置;红色轨迹为通过最小高差法配准后的激光点云位置;虚线框区域则为设定的平移搜索范围。具体实现步骤如下。

1) 数据预处理

为提取高精度、可靠的地面激光测高点,基于目视判别,人工提取 ICESat-2 ATL03 产品的光子剖面点云,ICESat-2 原始点云与去噪点云如图 3 所示。剔除水体与低置信度噪声点,最终获得用于配准与校正的有效激光控制点 6 992 个,并通过坐标转换统一至 DSM 投影坐标系下,为后续地形配准与高程校正提供稳定的数据基础。

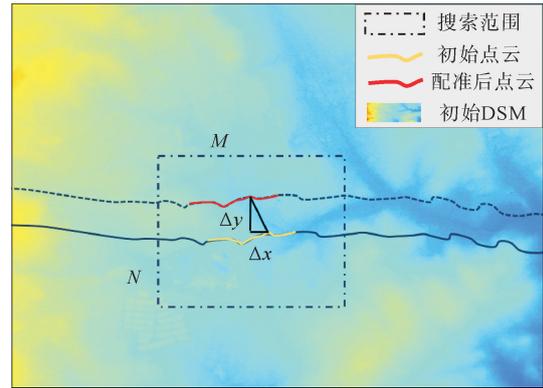


图 2 ICESat-2 点云与初始 DSM 剖面匹配原理示意图
Fig. 2 Schematic diagram of ICESat-2 point cloud registration with initial DSM profiles

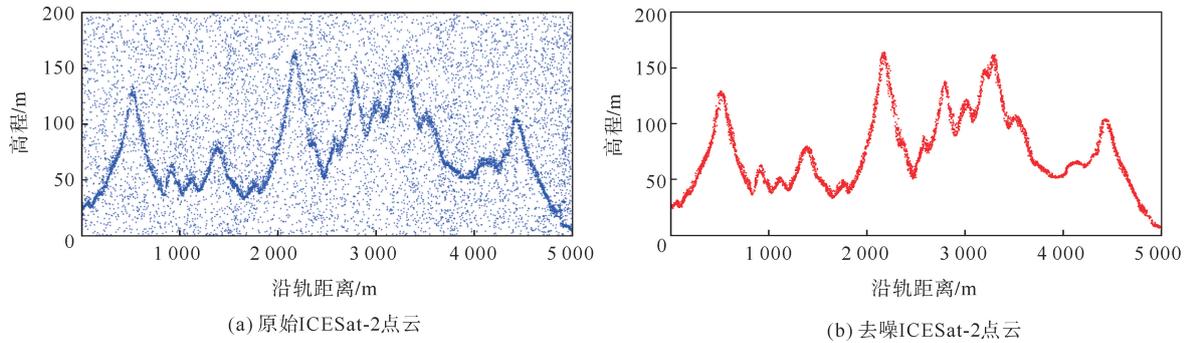


图 3 ICESat-2 原始点云与去噪点云

Fig. 3 Raw and denoised ICESat-2 point clouds

2) 剖面匹配建模

以实验区激光轨迹为配准单元,在 DSM 上构建与其对应的地形剖面。定义平移参数 $(\Delta x, \Delta y)$ 在搜索范围 $[-M, M] \sim [-N, N]$ 内移动的激光剖面点云,搜索边界 M, N 由立体测图生成的 DSM 与 ICESat-2 的平面定位精度共同确定,通常设为两者平面精度中误差的若干倍,以确保覆盖可能的系统性偏差范围。则在平移条件下,整轨激光点与 DSM 之间的平均绝对高差为:

$$E(\Delta x, \Delta y) = \frac{1}{N_v} \sum_{i=1}^N |Z_i - Z_{\text{DSM}}(x_i + \Delta x, y_i + \Delta y)| \quad (6)$$

式中: $E(\Delta x, \Delta y)$ 为激光点与 DSM 之间的平均绝对高差; N_v 为在当前平移条件下有效采样点数(剔除 DSM 空洞区域); x_i, y_i 为轨迹点的平面坐标; Z_i 为 ICESat-2 第 i 个激光脚点的高程值; Z_{DSM} 为 DSM 在平移后的位置高程。

3) 最优平移参数求解

在剖面匹配模型基础上,遍历预设搜索空间内的平移参数组合,通过最小化整轨高程残差,实现激光点云与 DSM 的全局配准,确定最优平移偏移量:

$$(\hat{\Delta x}, \hat{\Delta y}) = \operatorname{argmin}_{\Delta x, \Delta y} E(\Delta x, \Delta y) \quad (7)$$

式中, $(\hat{\Delta x}, \hat{\Delta y})$ 为所求解的最优平移偏移量,反映了激光点云与 DSM 间的系统性平面位置偏差。

1.2.2 激光高程约束融合校正

在实现激光轨迹与卫星 DSM 剖面配准的基础上,进一步利用空间分布均衡、高程精度优良的激光测

高点,作为全局高程的控制信息,对 DSM 进行系统性高程偏差修正。考虑到激光点覆盖区域有限,难以支撑完整的面状误差建模,本研究采用一种简约有效的平移模型,计算全局高程改正量并进行整体性高程校正。

具体而言,首先选取覆盖区域的若干条 ICESat-2 轨迹中分布均匀的高质量地面激光点,提取其对应位置的 DSM 高程值,并计算二者的平均残差作为全局系统偏差估计。设激光控制点集合为 $\{(x_i, y_i, Z_{Li})\}, i=1, 2, \dots, N$, 在 DSM 中的对应高程值为 Z_{DSM_i} , 则全局高程改正量 Δh 可表示为:

$$\Delta h = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (Z_{Li} - Z_{DSM_i})。 \quad (8)$$

式中: Z_{Li} 为第 i 个激光控制点的高程; N 为激光控制点数量。

尽管海岸带地形起伏显著,但激光控制点在空间上的代表性分布以及高程误差的系统性偏移的特点,为模型简化提供了依据。因此,上述方法以固定偏移代替局部复杂误差场,在整体建模精度可接受的前提下,能有效提升 DSM 的高程一致性和参考基准统一性。

随后,将改正量 Δh 应用于 DSM 全域,即可得到精确的 DSM 数据,对 DSM 每个栅格高程执行如下修正:

$$Z_{DSM}^{corr}(x, y) = Z_{DSM}(x, y) + \Delta h。 \quad (9)$$

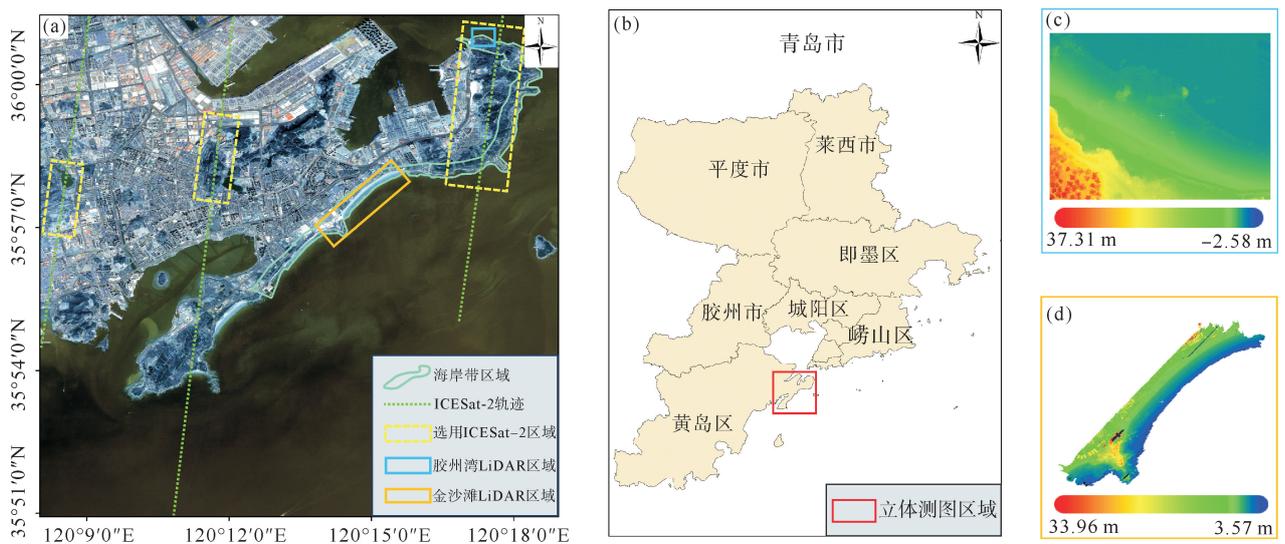
综上所述,该方法流程在理论上对狭长海岸带区域具有良好适应性。其核心设计在于通过“大范围控制-海岸带提取”策略,将测图范围扩展至包含海岸带及其毗邻陆域,在大范围获取均匀分布的激光测高点,从而有效缓解狭长地貌中控制约束薄弱引起的高程精度下降问题。

2 结果与分析

2.1 实验概况

2.1.1 研究区概况

为验证方法的有效性,选择山东省青岛市黄岛区沿海区域作为研究对象,研究区及 ICESat-2 激光轨迹与验证数据分布如图 4 所示。该区域位于山东半岛南部沿海,涵盖胶州湾与金沙滩两个典型海岸带地貌区。此处将“毗邻陆域”定义为研究区长宽各外扩 1~2 倍范围,并在其中选取均匀分布的 ICESat-2 点,以提高校正稳健性。



(a) 研究区域; (b) 研究区地理位置; (c) 胶州湾 LiDAR 点云; (d) 金沙滩 LiDAR 点云

图 4 研究区概况及 ICESat-2 激光轨迹与验证数据分布

Fig. 4 Study area overview and distribution of ICESat-2 tracks and validation data

2.1.2 多源卫星遥感数据

ZY-3 与 GF-7 作为高分辨率立体测图卫星,均附带有理函数模型(rational polynomial coefficients, RPC)参数。ZY-3 为三线阵相机布局,GF-7 为双线阵并具测高能力,两者均有三维地形重建能力^[16-17]。本研究选取两组立体像对开展对比实验(表 1)。

表 1 立体影像数据参数
Table 1 Parameters of stereo image data

卫星参数	ZY-3	GF-7
数据类型	BWD/MUX/FWD/NAD	BWD/MUX/FWD
采集时间	2021-03-16 10 : 59 : 43	2024-08-13 10 : 51 : 55
中心经纬度	35.834 448°, 120.086 372°	36.037 515°, 120.260 376°
云覆盖率	0%	1%
产品格式	GEOTIFF	GEOTIFF
产品级别	1A	1A
产品分辨率	正视图,2.1 m;前视/后视图,2.5 m	后视图,0.65 m,前视图,0.8 m

ICESat-2 具备高精度全球高程观测能力,凭借其优于传统雷达的分米级垂向精度,成为 DSM 误差修正的理想约束源。本研究选取覆盖测区的 ATL03 数据(表 2),并筛选 3 条跨越典型丘陵与台地的激光轨迹(图 4 黄框)用于配准与校正,以确保地形对比的代表性。尽管 GF-7 自带测高仪,但采用独立 ICESat-2 作为约束,以避免同源误差并客观评估 DSM 偏差。

表 2 卫星测高数据参数
Table 2 Parameters of satellite altimetry data

名称	采集时间	所用轨道
ATL03_20250207052007_08112606_006_01	2025-02-07 05 : 20 : 11	2l
ATL03_20240209224118_08112206_006_01	2024-02-09 22 : 41 : 17	1r
ATL03_20241108094010_08112506_006_01	2024-11-08 09 : 40 : 13	2l

2.1.3 验证数据

为了有效评估所提方法的性能,结合海岸带狭长地形的特点,选取胶州湾与金沙滩的机载激光雷达(light detection and ranging, LiDAR)数据作为验证基准(图 4 中的蓝色、橙色框)。该数据的垂直精度达 ± 0.10 m,覆盖典型海岸地貌;为兼顾计算效率,经适度抽稀处理后用于 DSM 高程精度评估。

为确保空间一致性,所有实验数据统一转换至 WGS84 椭球坐标系下的 UTM Zone 51N 投影坐标系,同时高程基准采用 WGS84 椭球高。

2.2 实验结果

2.2.1 初始 DSM 重建结果分析

为了验证所提方法的有效性,并评估不同卫星影像在海岸带复杂地形中的建模情况,选取 ZY-3 与 GF-7 获取的高分辨率立体像对进行相应处理,以生成研究区的初始 DSM。该流程旨在构建海岸带区域的基础三维地形,但受限于成像系统误差及控制点稀缺,初始 DSM 存在显著的系统性高程偏差。ZY-3 与 GF-7 立体像对及其生成的初始 DSM 对比如图 5 所示。

图 5 分别展示了 ZY-3 和 GF-7 的立体像对及其生成的 DSM。两者均能有效重构海岸带区域的地表形态,包括沙地、山丘和滨海台地等特征。ZY-3 利用其三视角的特点可将两两像对生成的点云进行多次叠加,使得空洞区域较少;而 GF-7 得益于更高的分辨率,DSM 在细节上优于 ZY-3,可更清晰地刻画建筑物的边缘、道路和小型地形起伏,表明 GF-7 在精细特征重建方面更具潜力。

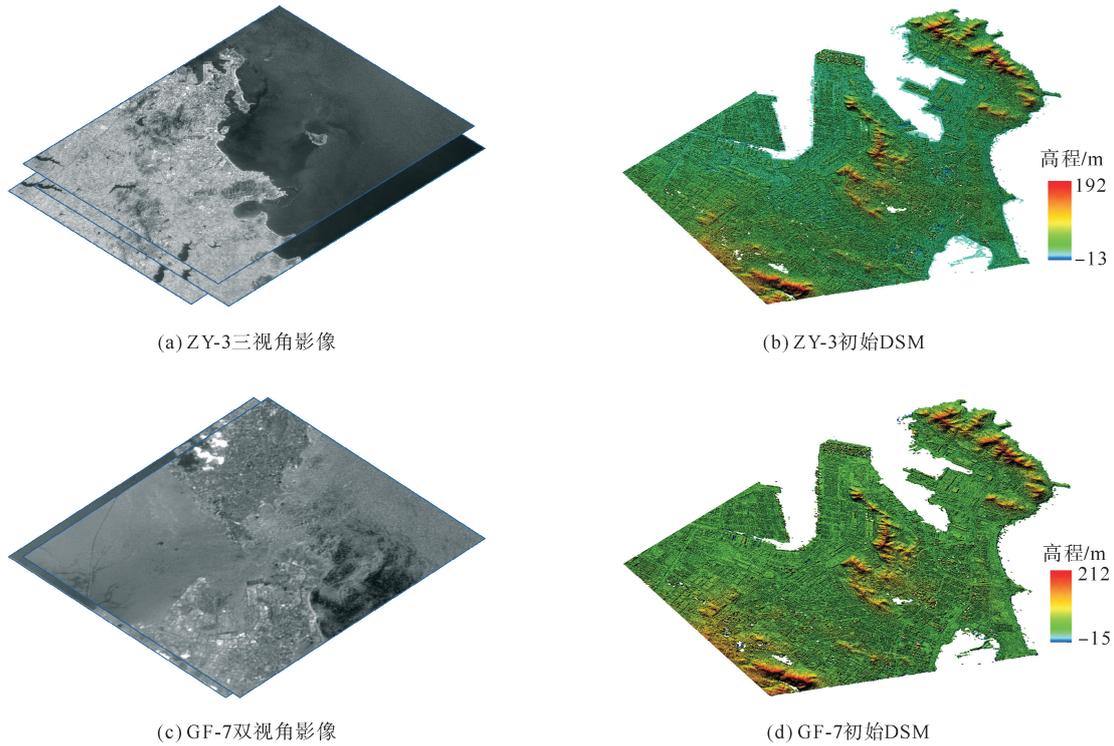


图5 ZY-3与GF-7立体像对及其生成的初始DSM对比图

Fig. 5 Comparison of ZY-3 and GF-7 stereo pairs and their initial DSMs

2.2.2 激光剖面与DSM配准效果分析

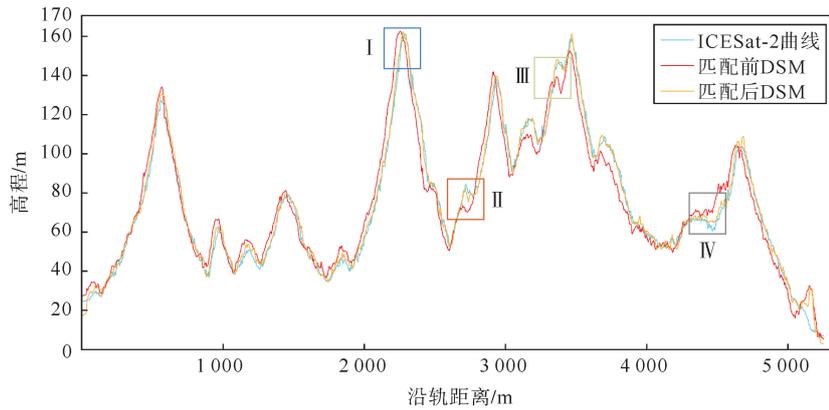
为消除初始DSM与ICESat-2点云之间的系统性几何偏移,采用ICESat-2激光测高数据与DSM进行配准,基于最小高差法计算最优平移参数。此处将搜索范围设置为X和Y方向各±50 m(即M=N=50),以覆盖可能的系统性平面偏差,并将步长设为0.5 m。通过网格搜索方法遍历所有可能的Δx和Δy组合,对于每个组合计算整轨激光点与DSM之间的平均绝对高差,并选取最小高差对应的参数作为最优平移偏移量。Z方向偏移则由配准后激光点与DSM的高程残差平均值得出。表3为ICESat-2与DSM地形匹配结果,包括X、Y、Z方向的偏移量。

表3 ICESat-2与DSM地形匹配结果

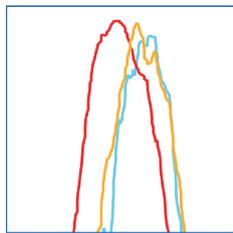
Table 3 Results of terrain matching between ICESat-2 and DSM

ICESat-2 数据	卫星	X	Y	Z	m
ATL03_20250207052007_08112606_006_01	ZY-3	8.5	-5.0	3.2	
	GF-7	-13.5	12.0	22.0	
ATL03_20240209224118_08112206_006_01	ZY-3	9.0	-7.0	2.1	
	GF-7	-9.5	8.5	20.7	
ATL03_20241108094010_08112506_006_01	ZY-3	12.0	-7.0	1.6	
	GF-7	-10.5	9.5	17.3	

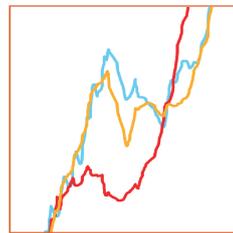
如表3所示,对于ZY-3,X偏移量为8.5~12.0 m,Y偏移量为-7.0~-5.0 m,Z偏移量为1.6~3.2 m;对于GF-7,X偏移量为-13.5~-9.5 m,Y偏移量为8.5~12.0 m,Z偏移量为17.3~22.0 m。结果表明,GF-7 DSM的初始平面和高程偏差均大于ZY-3,配准过程有效揭示了两者系统性偏移的差异,其中激光剖面点云与DSM匹配前后对比见图6。如图6所示,配准后激光轨迹与DSM剖面曲线高度一致,尤其在坡度变化连续区域呈良好耦合关系,验证了平移校正策略的有效性与稳定性。



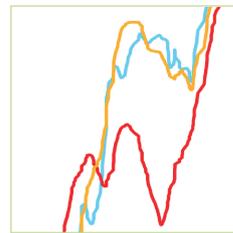
(a) 激光剖面点云与DSM整体匹配效果



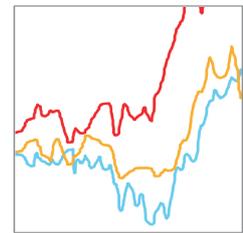
(b) 局部对比 I



(c) 局部对比 II



(d) 局部对比 III



(e) 局部对比 IV

图 6 激光剖面点云与 DSM 匹配前后对比图

Fig. 6 Comparison of laser profile point clouds and DSM before and after matching

2.2.3 DSM 校正效果与精度评估

基于配准后的 ICESat-2 激光控制点,计算全域高程改正量并对 DSM 进行整体校正。激光测高数据辅助约束后的 DSM 及提取的目标海岸带地形如图 7 所示。为验证校正效果,在研究区选取两处典型的海岸带机载 LiDAR 数据作为验证基准分别进行精度评估,二者共同构成整体验证数据集,用于评估校正前后的海岸带 DSM 高程精度。评估指标包括均方根误差(root mean square error, RMSE)和平均误差(mean error, ME),分别反映 DSM 高程的整体精度与系统偏差,精度统计结果如表 4 所示。

由表 4 显示,ZY-3 依托三线阵多像对叠加生成的初始 DSM 偏差较小(胶州湾、金沙滩以及整体的 RMSE 分别为 6.71、3.94、5.21 m),然而,激光约束方法仍能进一步提高精度,精度提升范围为 21%~53%。这表明,即便在中低偏差场景下,ICESat-2 提供的亚米级控制信息也能有效减少 RFM+仿射补偿模型在低频畸变校正中的剩余误差。

相较之下,GF-7 DSM 在校正前普遍存在大尺度高程偏差(胶州湾、金沙滩以及整体的 RMSE 分别为 23.19、20.16、21.41 m),这可能与其双线阵相机对立体几何畸变的较高敏感性有关。通过最小高差法引入 ICESat-2 剖面点云并进行高程校正,GF-7 的 RMSE 降至 3.60~3.79 m,ME 收敛至接近零的水平,提升幅度均在 83%左右,验证了高精度激光测高数据在大偏差环境下提供“强信号”纠偏的能力。

上述两种数据实验结果差异的原因可能源于相机布局和分辨率的区别:ZY-3 采用三线阵相机布局,能够通过多像对叠加减少初始 DSM 偏差,确保初始一致性更好;相比之下,GF-7 的双线阵结构对立体几何畸变更敏感,导致初始高程偏差较大。此外,GF-7 具有更高分辨率,虽然在 DSM 细节(如建筑物边缘、道路和小型地形起伏)重建上优于 ZY-3,但也放大了成像系统误差,使初始偏差更显著。

由表 4 可知,当与参考数据进行严格对比时,ZY-3 和 GF-7 生成的初始 DSM 均存在明显的系统性高程误差,表现为 DSM 整体高程值高于真实地表。为了更直观地展示,将 ZY-3 与 GF-7 DSM 校正前后相

对于 LiDAR 的高程误差在图 8 中进行量化。

由图 8(a)、8(b)可以看出,校正前误差为负值,表明两种初始 DSM 均存在系统性高程高估现象。其中,ZY-3 误差拟合曲线的峰值位于-3 m 处,大部分误差为-10~5 m,偏差较小;而 GF-7 的误差曲线峰值位于-22 m 处,表现出更明显的系统性偏差。经校正后,GF-7 和 ZY-3 的高程误差显著减小,误差分布更集中且峰值均趋于零,两者与参考数据的一致性显著提升。综上,通过利用激光测高数据在垂直精度和轨迹分布方面的优势,方法不受数据源初始几何误差特性的限制,在处理 GF-7 和 ZY-3 海岸带数据时均表现出良好适应性,为海岸带测绘提供了一种新思路。

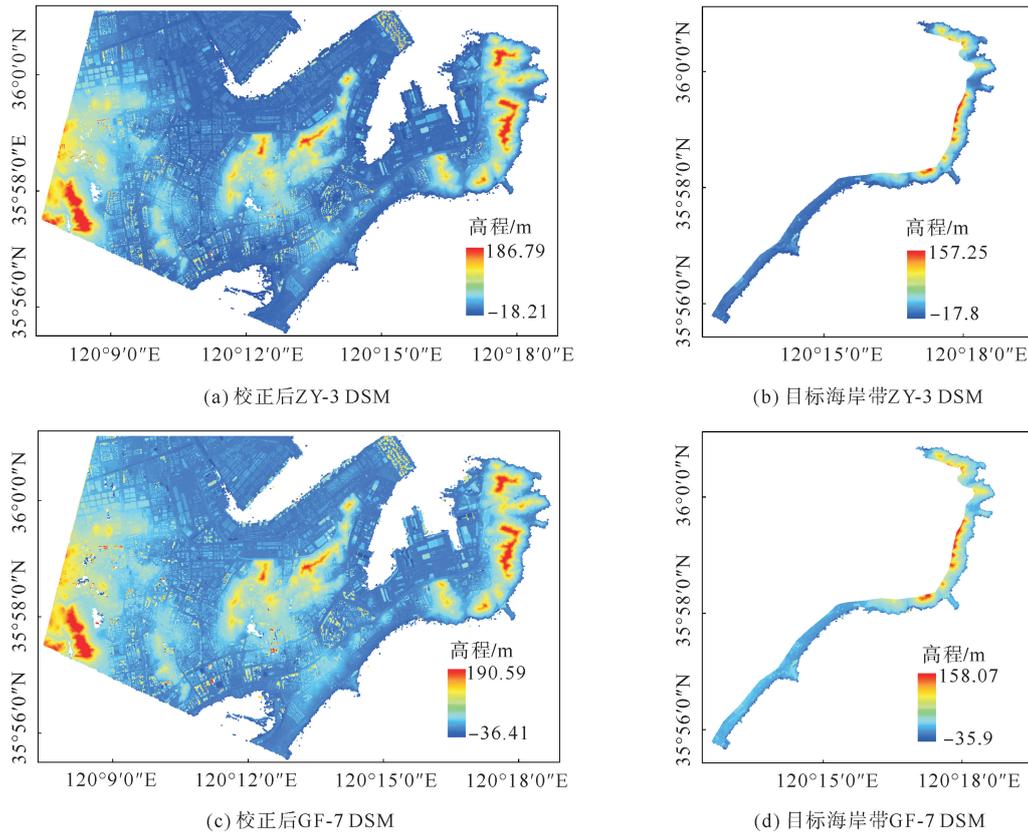


图 7 激光测高数据辅助约束后的 DSM 及提取的目标海岸带地形

Fig. 7 DSM after correction with laser altimetry constraints and extracted target coastal terrain

表 4 激光测高约束校正前后精度统计结果

Table 4 Accuracy statistics of DSM before and after correction with laser altimetry constraints

区域	验证数据	影像源	RMSE/m		ME/m		提升幅度/%
			校正前	校正后	校正前	校正后	
胶州湾	LiDAR	ZY-3	6.71	3.19	-5.19	-0.33	52.5
		GF-7	23.19	3.79	-22.93	-1.46	83.6
金沙滩	LiDAR	ZY-3	3.94	3.11	-0.32	0.37	21.1
		GF-7	20.16	3.60	-19.89	1.53	82.1
整体	LiDAR	ZY-3	5.21	3.13	-2.24	-0.14	39.9
		GF-7	21.41	3.67	-21.09	0.34	82.8

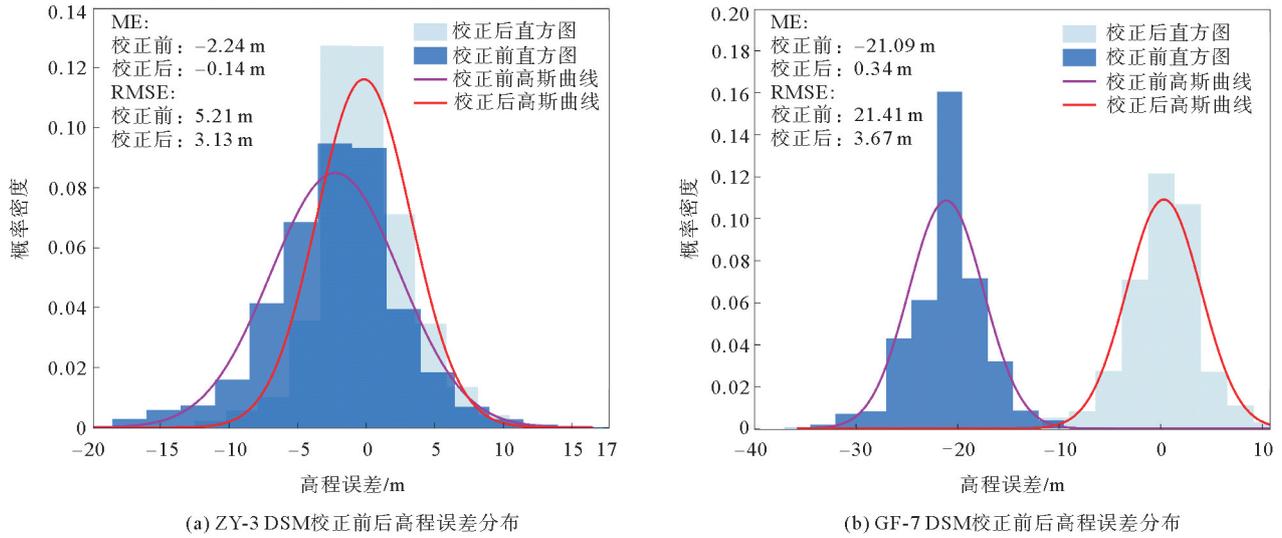


图 8 ZY-3 与 GF-7 DSM 校正前后相对于 LiDAR 的高程误差直方图

Fig. 8 Elevation error histograms of ZY-3 and GF-7 DSMs before and after correction compared with LiDAR

3 结论

针对狭长海岸带区域控制点稀缺及成像系统的几何误差导致的卫星立体测图高程精度不足的问题,提出一种激光测高约束的三维重建方法,并通过覆盖海岸带及其毗邻陆域的大范围立体测图验证了其有效性。

1) 本研究显著提升了 DSM 高程精度,在胶州湾与金沙滩组合验证数据集上,GF-7 DSM 的整体 RMSE 由 21.41 m 降至 3.67 m,精度提升 82.8%;ZY-3 DSM 的整体 RMSE 由 5.21 m 降至 3.13 m,精度提升 40%,平均误差接近零。

2) 本研究有效抑制了系统性偏差,基于最小高差法的激光剖面匹配模型能稳定消除大范围立体测图中的系统高程偏移,提升不同地貌类型下的绝对定位一致性。

3) 所提方法适用于大尺度海岸带测绘,在控制信息稀缺且地形复杂的狭长海岸带场景中表现稳定,满足 1:25 000 比例尺地形图绘制的精度要求。

未来,可进一步探索基于分段或分区域的局部高程校正策略,例如针对海岸带不同地貌单元(如沙滩、岩礁或丘陵)进行针对性误差建模与校正,以实现 DSM 精度的进一步优化,提升方法在复杂地形下的鲁棒性和适用性。

参考文献:

[1] 程玉璐,于孝林,王贤昆,等.基于三角面元的海岸带机载/船载 LiDAR 点云配准方法研究[J].山东科技大学学报(自然科学版),2024,43(3):41-50.
CHENG Yulu, YU Xiaolin, WANG Xiankun, et al. Research on coastal zone airborne/shipborne LiDAR point cloud registration method based on triangular facet[J]. Journal of Shandong University of Science and Technology(Natural Science), 2024, 43(3): 41-50.

[2] NEX F, REMONDINO F. UAV for 3D mapping applications: A review[J]. Applied Geomatics, 2014, 6(1): 1-15.

[3] VITOUSEK S, BUSCOMBE D, VOS K, et al. The future of coastal monitoring through satellite remote sensing[J/OL]. Cambridge Prisms: Coastal Futures, 2023, 1. DOI:10.1017/cft.2022.4.

[4] YE J, QIANG Y X, ZHANG R, et al. High-precision digital surface model extraction from satellite stereo images fused with ICESat-2 data[J/OL]. Remote Sensing, 2021, 14(1). DOI:10.3390/rs14010142.

[5] FISHER P F, TATE N J. Causes and consequences of error in digital elevation models[J]. Progress in Physical Geography, 2006, 30(4): 467-489.

- [6] 龙腾飞,焦伟利,何国全,等. 国产光学卫星正射影像产品及自动生成算法[J]. 遥感学报,2023,27(3):635-650.
LONG Tengfei, JIAO Weili, HE Guojin, et al. Digital orthophoto map products and automated generation algorithms of Chinese optical satellites[J]. National Remote Sensing Bulletin, 2023, 27(3): 635-650.
- [7] LOGHIN A-M, OTEPKA-SCHREMMER J, RESSL C, et al. Improvement of VHR satellite image geometry with high resolution elevation models[J/OL]. Remote Sensing, 2022, 14(10). DOI:10.3390/rs14102303.
- [8] BAN S, KIM T. Rational-function-model-based rigorous bundle adjustment for improving the relative geometric positioning accuracy of multiple Korea Multi-Purpose Satellite-3A images [J/OL]. Remote Sensing, 2024, 16(16). DOI: 10.3390/rs16162890.
- [9] 曹宁,周平,王霞,等. 激光测高数据辅助卫星成像几何模型精化处理[J]. 遥感学报,2018,22(4):599-610.
CAO Ning, ZHOU Ping, WANG Xia, et al. Refined processing of laser altimeter data-aided satellite geometry model[J]. Journal of Remote Sensing, 2018, 22(4): 599-610.
- [10] PAN H B, HUANG T, ZHOU P, et al. Self-calibration dense bundle adjustment of multi-view Worldview-3 basic images[J]. ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing, 2021, 176: 127-138.
- [11] ZHANG Y J, WAN Y, HUANG X H, et al. DEM-assisted RFM block adjustment of pushbroom nadir viewing HRS imagery[J]. IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing, 2015, 54(2): 1025-1034.
- [12] 蔡士雪,岳林蔚,尹超,等. 顾及林区植被穿透率的多源 DEM 数据精度评价[J]. 遥感学报, 2022, 26(11): 2268-2281.
CAI Shixue, YUE Linwei, YIN Chao, et al. Accuracy evaluation of multi-source DEM data based on the analysis of vegetation-induced penetration rate in the forest area[J]. National Remote Sensing Bulletin, 2022, 26(11): 2268-2281.
- [13] 刘新,回桂华,周爱民,等. 基于多波束激光测高卫星 ICESat-2 观测的垂线偏差解算[J]. 山东科技大学学报(自然科学版), 2023, 42(5): 1-11.
LIU Xin, HUI Guihua, ZHOU Aimin, et al. Deflections of the vertical determination based on multi-beam laser altimetry satellite ICESat-2 data[J]. Journal of Shandong University of Science and Technology (Natural Science), 2023, 42(5): 1-11.
- [14] HIRSCHMÜLLER H. Stereo processing by semiglobal matching and mutual information[J]. IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence, 2007, 30(2): 328-341.
- [15] 张同刚,岑敏仪,冯义从,等. 采用截尾最小二乘估计的 DEM 匹配方法[J]. 测绘学报, 2009, 38(2): 144-151.
ZHANG Tonggang, CEN Minyi, FENG Yicong, et al. DEM matching algorithm using least trimmed squares estimator [J]. Acta Geodaetica et Cartographica Sinica, 2009, 38(2): 144-151.
- [16] 周平,唐新明,李丹丹,等. 资源三号 03 星立体影像与激光测高点联合区域网平差处理及精度验证[J]. 遥感学报, 2024, 28(4): 1089-1100.
ZHOU Ping, TANG Xinming, LI Dandan, et al. Combined adjustment of the stereo imagery and laser altimetry points of the ZY3-03 Satellite and its accuracy verification[J]. National Remote Sensing Bulletin, 2024, 28(4): 1089-1100.
- [17] 曹海翔,刘付强,赵晨光,等. 高分辨率立体测绘卫星技术研究[J]. 遥感学报, 2021, 25(7): 1400-1410.
CAO Haiyi, LIU Fuqiang, ZHAO Chenguang, et al. The study of high resolution stereo mapping satellite[J]. National Remote Sensing Bulletin, 2021, 25(7): 1400-1410.

(责任编辑:高丽华)