



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: 复杂地形条件下星载 LiDAR 与 InSAR DEM 平面位置校正  
作者: 张锦瑞, 朱建军, 万阿芳, 王烽, 邹明普, 付海强  
DOI: 10.13203/j.whugis20240148  
收稿日期: 2025-01-14  
网络首发日期: 2025-01-26  
引用格式: 张锦瑞, 朱建军, 万阿芳, 王烽, 邹明普, 付海强. 复杂地形条件下星载 LiDAR 与 InSAR DEM 平面位置校正[J/OL]. 武汉大学学报(信息科学版).  
<https://doi.org/10.13203/j.whugis20240148>



**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.whugis20240148

引用格式：

张锦瑞, 朱建军, 万阿芳, 等. 复杂地形条件下星载 LiDAR 与 InSAR DEM 平面位置校正[J]. 武汉大学学报(信息科学版), 2025, DOI:10.13203/J.whugis20240148 (ZHANG Jinrui, ZHU Jianjun, WAN Afang, et al. Terrain-Considerate Registration Method of spaceborne LiDAR with InSAR DEM[J]. Geomatics and Information Science of Wuhan University, 2025, DOI:10.13203/J.whugis20240148)

# 复杂地形条件下星载 LiDAR 与 InSAR DEM 平面位置校正

张锦瑞<sup>1</sup>, 朱建军<sup>1</sup>, 万阿芳<sup>2</sup>, 王烽<sup>2</sup>, 邹明普<sup>2</sup>, 付海强<sup>1</sup>

1 中南大学地球科学与信息物理学院, 湖南 长沙, 410083

2 湖南省第一测绘院, 湖南 长沙, 410114

**摘要：**星载激光雷达(Light Detection And Ranging, LiDAR)与合成孔径雷达干涉(Interferometric Synthetic Aperture Radar Digital, InSAR)数字高程模型(Digital Elevation model, DEM)的融合在林下地形估计、树高反演、DEM 精度评价及修正等方面均有广泛的应用, 实现二者的有效配准是融合应用的关键前提。现有的配准模型并未充分考虑不同地形因素影响下的平面偏移量与高程改变量变化情况。本文提出基于地形坡度的定权模型, 并将现有配准模型线性化, 利用最小二乘平差的方法求解偏移量。为验证配准方法的有效性, 选用了西班牙地区四个具有不同地形条件和地表覆盖类型的试验区进行了测试, 实验结果表明, 配准后四个试验区的高程向均方根误差(root mean square error, RMSE)分别达到 0.931m、1.381m、1.034 m、4.526 m, 与配准前相比, 精度分别提升 33.02%、8.78%、37.67%、10.00%。实验结果验证了本文算法对复杂地形下星载 LiDAR 与 InSAR DEM 配准的有效性。

**关键词：**配准; 数字高程模型; 星载 LiDAR; 地形坡度; 最小二乘平差

## Terrain-Considerate Registration Method of spaceborne LiDAR with InSAR DEM

ZHANG Jinrui<sup>1</sup>, ZHU Jianjun<sup>1</sup>, WAN Afang<sup>2</sup>, WANG Feng<sup>2</sup>, ZOU Mingpu<sup>2</sup>, FU Haiqiang<sup>1</sup>

1.School of Geosciences and Info-Physics of Central South University, Changsha 410083, China

2. The First Surveying and Mapping Institute of Hunan Province, Changsha 410114, China

**Abstract: Objectives:** The fusion of spaceborne Light Detection And Ranging(LiDAR) and InSAR(Interferometric Synthetic Aperture Radar Digital) Digital Elevation model(DEM) is widely used in understory terrain estimation, tree height inversion, DEM accuracy evaluation and

收稿日期: 2025-01-14

基金项目: 国家自然科学基金项目(42227801); 湖南省自然资源厅科技项目(湘自资科 20240109CH)

第一作者: 张锦瑞, 硕士生, 主要从事 InSAR DEM 数据处理。zhangjr@csu.edu.cn

通讯作者: 朱建军, 博士, 教授。zjj@csu.edu.cn

correction, etc. However, due to limitations in onboard platforms, imaging technology, and data processing, There exist deviations in plane position and height measurement in the InSAR DEM. Therefore, the effective registration of spaceborne LiDAR and InSAR DEM is the key premise of the fusion application. **Methods:** An improved registration model that fully considers the changes in plane offset and elevation variation under different topographic factors has been proposed, which includes a stochastic model and a functional model. The stochastic model is proposed based on the relationship between changes in terrain slope and plane offset, while the functional model linearizes the original registration model. Finally, The plane offset can be solved using the registration model through least squares adjustment method. In order to verify the validity of the registration method, four test areas with different terrain conditions and land cover types in Spain were selected for testing. **Results:** The experimental results showed that the RMSE of height difference in the four test areas reached 0.931m, 1.381m, 1.034m and 4.526m respectively after registration, and the accuracy was improved by 33.02%, 8.78%, 37.67% and 10.00% compared with that before registration. Among them, the contribution of slope greater than 45° to the overall registration of elevation changes in the 4 study areas reached 72% to 99%, while the registration accuracy decreases from 33.02%, 8.78%, 37.67%, 10.00% to 20.60%, 0.27%, 35.89%, 4.62% respectively for a canopy height of 15m compared to 5m. **Conclusions:** This method weakens the systematic error variation of height deviation caused by plane offset under the influence of terrain slope and aspect. The experimental results have verified the effectiveness of the model proposed in this paper for the registration of spaceborne LiDAR and InSAR DEM in complex terrains.

**Key words:** Registration; digital elevation model; spaceborne LiDAR; terrain slope; least square adjustment

数字高程模型(Digital Elevation model, DEM)在基础工程建设、灾害监测、农林业等领域均有重要应用<sup>[1-4]</sup>。目前,生产全球 DEM 的技术手段主要有光学摄影测量方法、合成孔径雷达技术、激光测高技术等<sup>[5]</sup>。合成孔径雷达干涉 (Interferometric Synthetic Aperture Radar Digital, InSAR)因其全天候、大范围、高分辨率的成像特点,已成为 DEM 生产的主要技术手段。然而,斜距误差、轨道误差、传感器误差、数据处理误差等会导致 InSAR DEM 存在平面位置偏差及测高系统偏差<sup>[6]</sup>,需要借助外部控制点进行校正。以 ICESat-2(Ice, Cloud and land Elevation Satellite -2)、全球生态系统动态调查(Global Ecosystem Dynamics Investigation,GEDI)及句芒号为代表的星载激光雷达(Light Detection And Ranging, LiDAR)可在全球范围内采集测高点<sup>[7-10]</sup>,具有较高的平面与高程精度<sup>[11]</sup>,已被广泛应用于 InSAR DEM 控制数据。因此,实现星载 LiDAR 数据与 InSAR DEM 的高精度配准,是利用 LiDAR 数据作为控制数据的必要前提。

针对星载 LiDAR 与 DEM 配准问题,现有研究重点关注两者之间三维距离向或高程向的相近程度。例如基于最小二乘的最近点迭代(Iterative Closest Point, ICP)算法<sup>[12]</sup>和最小高程差(least Z-difference, LZD)算法<sup>[13]</sup>,两种算法的逻辑框架是共通的<sup>[14]</sup>,即根据匹配与待匹配模型之间的相同部分求出其变换关系。陈柏行<sup>[15]</sup>提出离散滑动窗口最小二乘配准算法,以离散地球科学激光测高系统(Geoscience Laser Altimeter System, GLAS)数据为参考遍历设定范围,按照该范围设定滑动窗口大小,对窗口内 DEM 高程取平均值,以最小二乘搜索为基准寻找高程差平方和最小值实现配准。Wei 等<sup>[16]</sup>利用 ICESat-2 数据与 DEM 的地形剖面高程序列相似性为准则,增强了二者水平位置的配准。Nuth 等<sup>[17]</sup>发现由平面偏移导致的高程偏差与地形坡度和坡向之间存在特征关系,提出基于 ICESat 与 DEM 的高程差与地形坡度归一化垂直偏差的方法。目前该方法在星载 LiDAR 数据与 DEM 的配准问题中的应用较为广泛,且均取得了较好的效果<sup>[18-21]</sup>。但是该方法在模型参数求解时,引入了局部坡度代替实际坡度,导致在坡度较小的区域高程改善欠缺,而坡度较大的地方高程改善过度<sup>[22]</sup>。

鉴于此,本文主要对已有的归一化垂直偏差计算偏移量提出一种改正方法。首先,对 InSAR DEM 与星

载 LiDAR 数据的平面位置按照高差最小准则进行粗配准；之后，将目前已有的非线性化函数模型进行线性化处理，并基于每个星载 LiDAR 数据所在位置的坡度因子进行定权处理，通过最小二乘平差的方法求取二者的平面偏移量；最后，选取典型实验区进行算法验证。

## 1 DEM 偏移校正的原理与方法

现有的函数模型将高程差与坡度归一化处理，以地形方向表征平面偏移量，但是并没有充分考虑不同坡度下高程改变量不一的问题。针对此问题，本文提出了考虑地形坡度的数据配准方法。具体分为四个步骤（图 1）：①数据预处理。考虑到光子点云返回信号质量以及在植被覆盖区域光子点云记录的可能是非地表高程信息，因此需对星载 LiDAR 数据进行筛选。星载 LiDAR 数据筛选的方法可以根据属性参数、参考高程信息、LiDAR 波形特征或密度分布特征进行筛选<sup>[23-26]</sup>，本文采用的是基于属性参数筛选的方法；②粗配准。以星载 LiDAR 数据为基准，在 DEM 上通过滑动窗口搜索（窗口大小综合考虑星载 LiDAR 和 DEM 的平面定位精度，本文采用 5×5 像素大小的滑动窗口）整体高程差均方根误差最小的水平偏移量作为初始偏移量；③精配准。在初始偏移量的基础上，解算配准数学模型，得到精细偏移量；④精度评价。

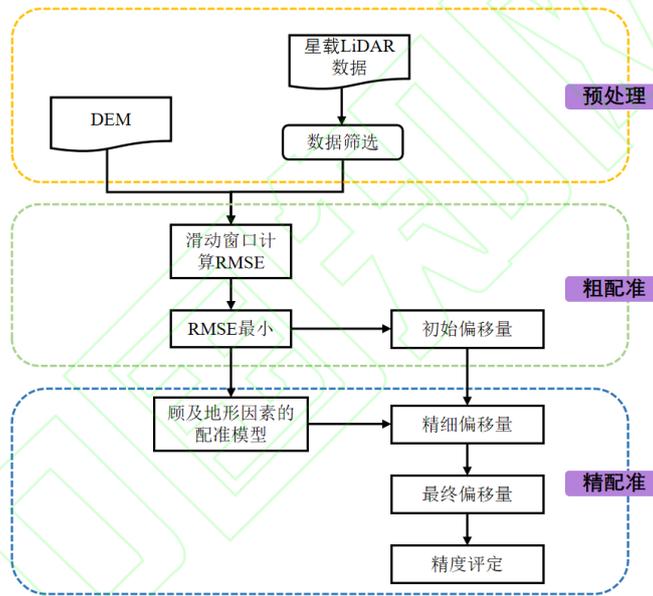


图 1 星载 LiDAR 数据与 DEM 配准流程

Fig.1 Registration Process of Spaceborne LiDAR Data and DEM

### 1.1 DEM 偏移校正方法

DEM 与星载 LiDAR 的高程偏差与地形坡度相关。当局部地形发生偏移时，真实坡面与偏移坡面之间会形成垂直偏差，该垂直偏差的正负与坡向存在严密的几何关系<sup>[17]</sup>。同时，将垂直偏差除以该位置坡度切线的斜率即可得到平面偏移矢量。因此，若将高程差除以该像素斜率进行垂直偏差归一化，就可以将高程差、平面位置偏移与地形坡度、坡向联系起来，以削弱不同坡度下平面偏移导致的高程偏差，将星载 LiDAR 数据与 DEM 配准到同一位置。计算公式为：

$$\frac{\Delta h}{\tan \alpha} = s \cdot \cos(\beta - \phi) + \frac{\Delta \bar{h}}{\tan \bar{\alpha}} \quad (1)$$

$\Delta h$  为 DEM 与星载 LiDAR 数据的高程差， $\alpha$  为坡度， $\phi$  为坡向， $s$  为偏移矢量的水平距离， $\beta$  为偏移矢量的偏移方向， $\Delta \bar{h}$  为高差的平均值， $\bar{\alpha}$  为坡度的平均值。此时归一化高程差与坡向之间呈现正弦函数关系，在确定该函数关系后，利用迭代法求解参数  $s$ ， $\beta$  和  $\Delta \bar{h}$ ，一般当两次计算出的水平位移矢量长度小于 0.5m 或标准差小于 2% 时终止迭代。

最终通过偏移矢量的长度和方向分别求平面位置在经度(x)和纬度(y)方向上的偏移量，表示为：

$$\begin{cases} x = s \cdot \sin\beta \\ y = s \cdot \cos\beta \end{cases} \quad (2)$$

## 1.2 改进 DEM 偏移校正方法

在利用迭代法求解偏移量参数时，认为所有待配准点对于整体偏移量的贡献是等权的。然而，式(1)引入了平均坡度 $\bar{\alpha}$ 代替整体坡度 $\alpha$ ，会导致高程值改善度与坡度呈正比。事实上，对于相同高程改变量来说，坡度大小与水平偏移量的贡献呈反比，如图 2 所示，平面偏移长度 $s$ ，由平面偏移引起的高程改变量 $\Delta h$ 及坡度 $\alpha$ 之间存在几何关系，在高程改变量相同的情况下，当坡度改变 $\Delta\alpha$ 时，平面偏移量也会相应地改变为 $s'$ ，其中改变量为 $\Delta s$ 。

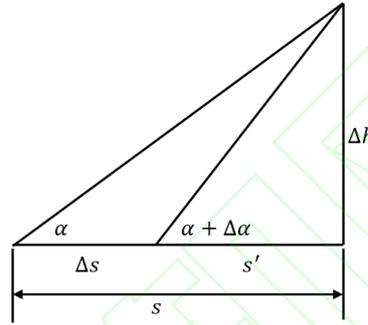


图 2 相同高程改变量下坡度改变与平面偏移量改变关系

Fig.2 The relationship between slope change and plane offset change under the same elevation change

由图 2 可以发现，平面偏移改变量 $\Delta s$ 可表示为：

$$\begin{aligned} \Delta s &= s - s' \\ &= \frac{\Delta h}{\tan\alpha} - \frac{\Delta h}{\tan(\alpha + \Delta\alpha)} \\ &= \Delta h \left( \frac{1}{\tan\alpha} - \frac{1}{\tan(\alpha + \Delta\alpha)} \right) \end{aligned} \quad (3)$$

将式(3)进行化简后可得：

$$\Delta s = \Delta h \left( \frac{\sin \Delta\alpha}{\sin\alpha \sin(\alpha + \Delta\alpha)} \right) \quad (4)$$

由式(4)可见，由坡度变化引起的平面位置偏移量的变化与正弦函数严格相关，且正弦函数的单调递增性满足修正较大坡度对整体偏移量的贡献的条件。因此，可以引入反坡度定权的随机模型，修正由平均坡度代替局部坡度带来的误差，即：

$$p_i = \frac{\frac{1}{\sin\alpha_i}}{\sum_{i=1}^n \frac{1}{\sin\alpha_i}} \quad (5)$$

式中， $p$ 为依照坡度确定的权；下标 $i$ 表示样本数据。

由式(1)可知，式(1)的配准模型是非线性的。事实上，若将式(1)中的 $\cos(\beta - \phi)$ 利用积化和差的公式展开后就可以得到其线性化的表达形式，更利于模型参数的最小二乘求解，如式(6)所示。结合式(2)即可将待求参数推导为平面位置在经、纬度方向上的偏移量 $x, y$ ，如式(7)所示。

$$\frac{\Delta h}{\tan\alpha} = s \cdot \cos\beta \cos\phi + s \cdot \sin\beta \sin\phi + \frac{\Delta \bar{h}}{\tan\bar{\alpha}} \quad (6)$$

$$\frac{\Delta h}{\tan\alpha} = y \cos\phi + x \sin\phi + \frac{\Delta \bar{h}}{\tan\bar{\alpha}} \quad (7)$$

联合式(5)、(7)可得最终的参数估计表达式，利用最小二乘准则解算模型参数：

$$\begin{cases} V = \hat{y}\cos\phi + \hat{x}\sin\phi - L \\ |V^T P V| = \min \end{cases} \quad (8)$$

其中， $V$ 为偏移量的残差阵， $T$ 为转置， $\hat{y}$ 和 $\hat{x}$ 为待求参数，分别代表平面位置在纬度和经度方向的偏移量的估计量， $L$ 为配准的观测值， $P$ 为式(5)所示的权阵。

本文选取了一定数量的星载 LiDAR 数据参与模型解算。首先选取星载 LiDAR 数据与 DEM 的高程差、对应位置的坡度和坡向作为观测值；然后根据坡度进行定权处理；最后依照最小二乘平差准则求解模型参数  $x$ 、 $y$ 、 $\Delta\bar{h}$ 。

## 2 试验区域与数据集

### 2.1 试验区域

试验区域位于西班牙北部和中部，其地理位置如图 3 所示。该区域植被覆盖类型丰富，高度分布在 5~30m 之间，同时分布有裸地和城镇；试验区内地形起伏明显，高程变化在 300 到 2000m 之间，适合验证本文方法精度。

### 2.2 数据集

#### 2.2.1 TanDEM-X

2010 年，德国宇航局发射的 TanDEM-X(TerraSAR-X add-on for Digital Elevation Measurements)与陆地合成孔径雷达-X(TerraSAR-X)组成了姊妹卫星编队<sup>[27]</sup>，主要任务是通过合成孔径雷达技术生成全球高精度 DEM。合理的基线配置与单发双收的任务模式，使其已经可以生成 12m 分辨率的全球数字高程模型<sup>[28]</sup>。

#### 2.2.2 ICESat-2

2018 年，美国宇航局发布了 ICESat-2 卫星，搭载了先进地形激光测高系统 ATLAS(Advanced Topographic Laser Altimeter System)，以其更小的激光足印和更高的精度成为广泛应用的星载 LiDAR 技术产品之一<sup>[29]</sup>。ICESat-2 数据产品分为 L1、L2、L3A、L4B 四个等级，依次命名为 ATL00~ATL21，其中 ATL08 数据包含了陆地高程与植被冠层高度。

#### 2.2.3 本文数据

本文在两块试验区分别选用了两景 TanDEM-X 干涉对用以生成 InSAR DEM，干涉对影像详细参数如表 1 所示，生成后的 DEM 经纬度分辨率均约 10m。在影像范围内选用了 ICESat-2 ATL08 数据进行实验，通过 ATL08 数据字典中的冠层高度(h\_canopy)、地面高程不确定性(h\_te\_uncertainty)与冠层高度不确定性(h\_canopy\_uncertainty)等信息对 ATL08 数据进行筛选，经过筛选后的 ATL08 数据在四个研究区分别获取了 2882、1321、668、1366 个控制点。试验区地理位置和生产后的四幅 InSAR DEM 及其区域内的 ATL08 数据分布如图 3 所示。

除此之外，本文利用 InSAR DEM 直接生成坡度、坡向数据，如图 4 所示。

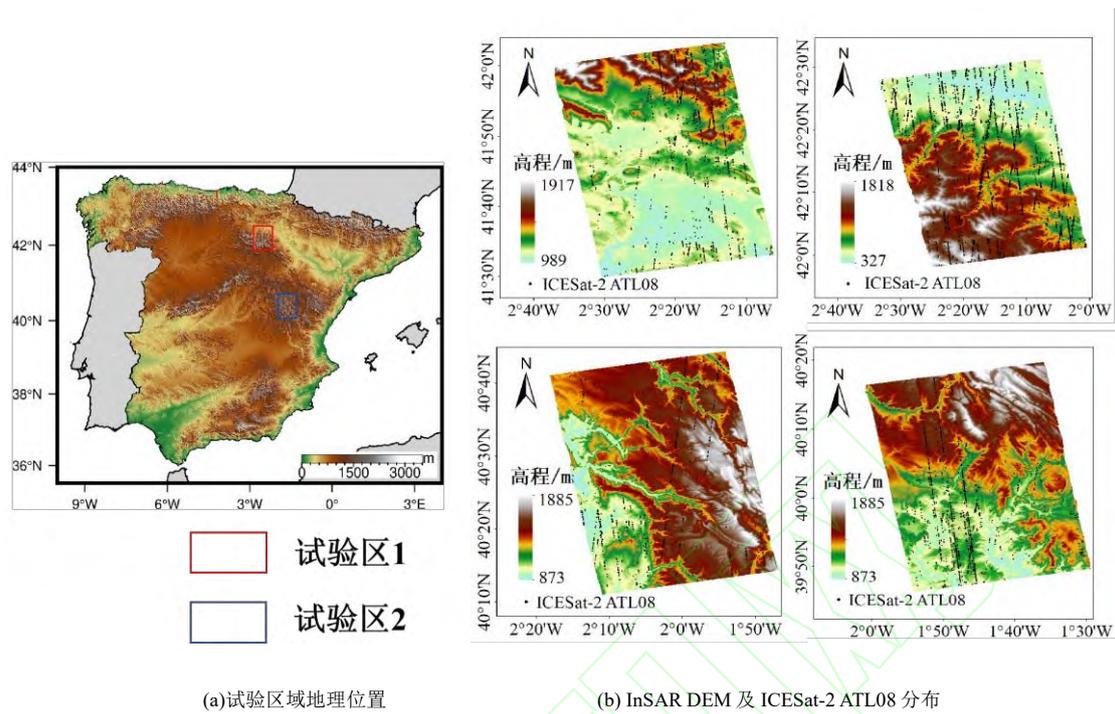


图3 试验区区域地理位置及 InSAR DEM 区域内 ICESat-2 ATL08 分布

Fig.3 Geographical Location of Experimental Areas and Distribution of ICESat-2 ATL08 Within The InSAR DEM Area

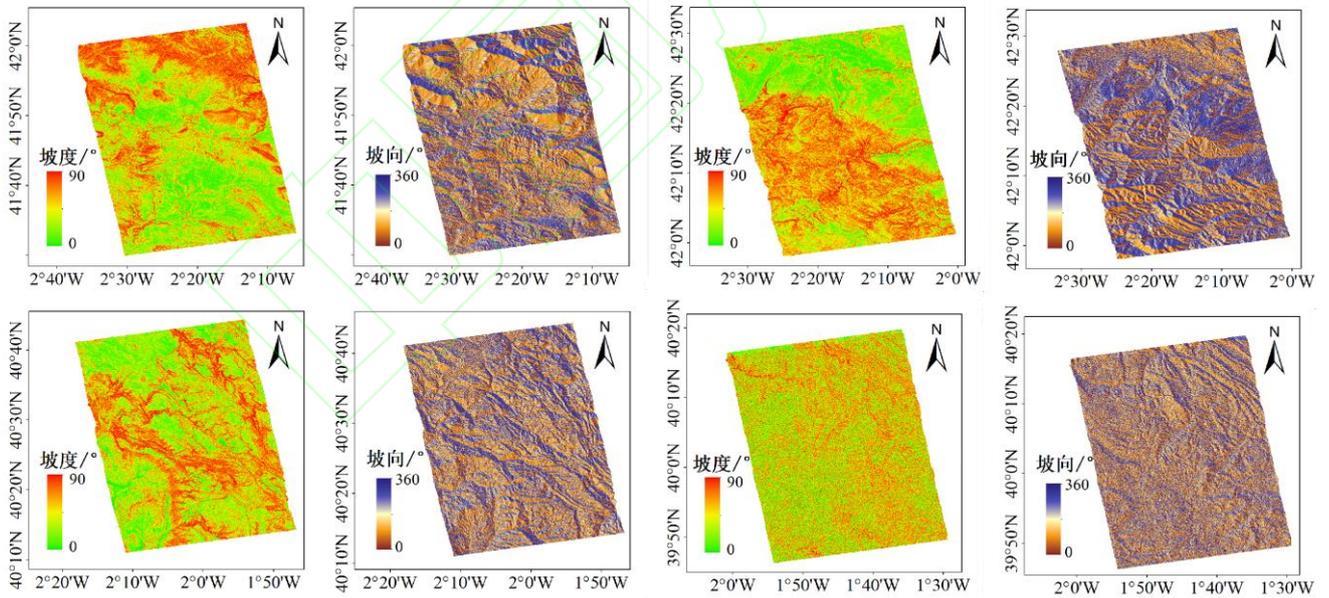


图4 地形坡度和地形坡向

Fig.4 Terrain Slope and Aspect

表1 本文使用的 TanDEM-X 影像

Tab.1 The TanDEM-X image used in this article

ID	影像时间	垂直基线/m	入射角/°	地距向×方位向分辨率
1	2012-12-28	148.83	34.76	1.4m×2.0m
2	2012-02-13	82.81	36.09	1.4m×2.0m
3	2012-12-28	153.45	34.86	1.4m×2.0m
4	2011-12-20	106.15	36.23	1.4m×2.0m

### 3 数据处理和结果

#### 3.1 整体精度评价

高程差与坡度的归一化比值和坡向之间的散点图呈现正弦函数关系，其数学公式可以由散点图中心线的拟合方程表征（图 5），利用传统迭代方法进行模型系数求解的本质是求解拟合方程的参数。值得注意的是，该正弦函数关系越明显，配准的效果会越好，而当 DEM 中存在几何畸变或其与 ATL08 数据本身的平面偏移较小时，会导致该散点图呈现的正弦函数关系并不明显，如图 5(b)、图 5(d)，这种情况下应用传统的配准方法对偏移量纠正并不理想。

表 2 给出了在研究区内分别应用传统迭代配准方法以及坡度加权最小二乘平差配准方法得到的 DEM 在 x,y 方向的偏移量大小，同时，为了定量评估实验结果，本文计算了两种方法在配准前、后的高程差的 RMSE 以及标准差(standard deviation, STD)。在应用传统配准方法时，研究区 1、研究区 3 和研究区 4 的 RMSE 分别由 1.390m、1.659m 和 5.029m 提升至 1.274m、1.321m、4.693m，而研究区 2 的配准效果则变差了 0.053m。相比配准前以及应用传统配准方法，4 个研究区内应用本文方法后得到的高程差 RMSE 均有明显改善，分别达到了 0.931m、1.381m、1.034 m、4.256 m，精度分别提升了 33%，14%，45%，10%。图 6 显示了配准前、后高程差的直方图统计分布特征，对比直方图可以发现，配准后高程差的分布更加趋近于均值为 0 的正态分布，且标准差均有不同程度的减小。

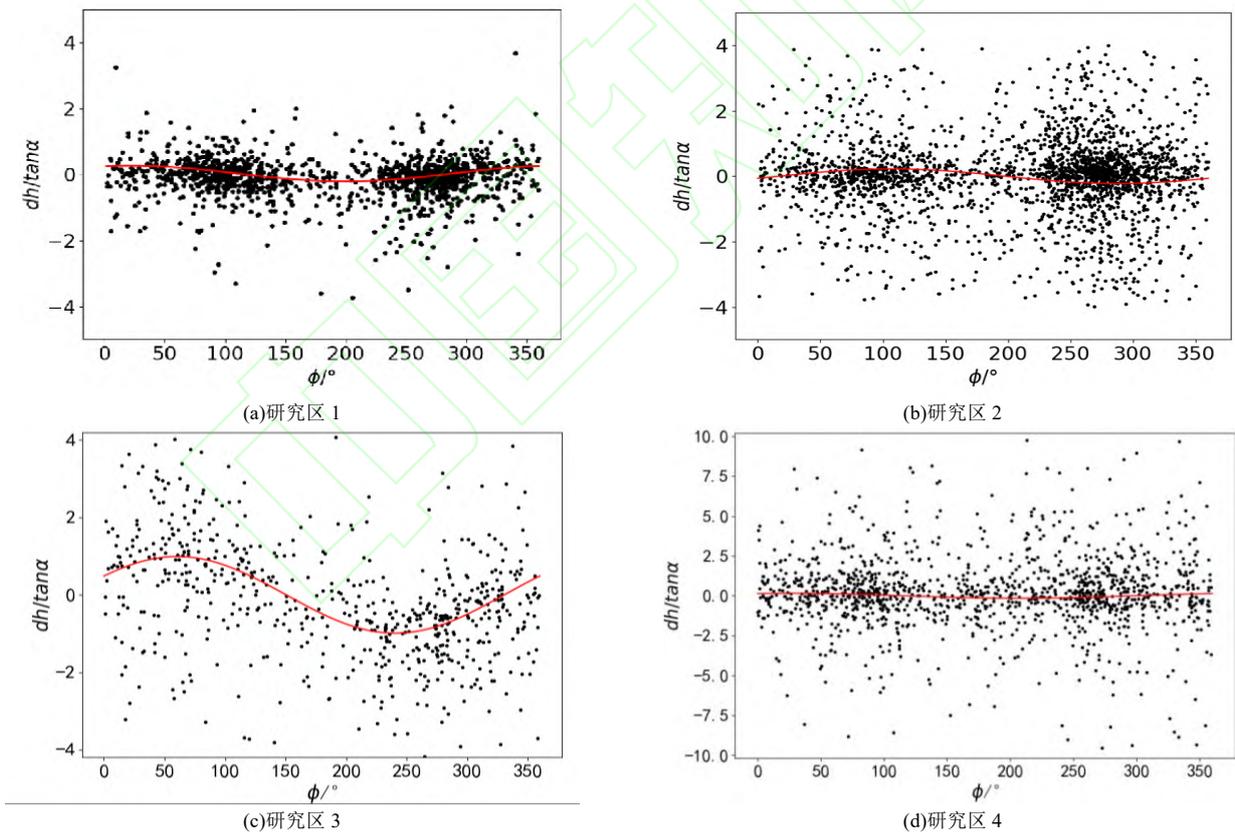


图 5 配准前 ATL08 与 InSAR DEM 的归一化高程差与坡向之间的散点图

Fig.5 Scatter Plot of Normalized Elevation Difference Related to Terrain Aspect Between ATL08 and InSAR DEM Before Registration

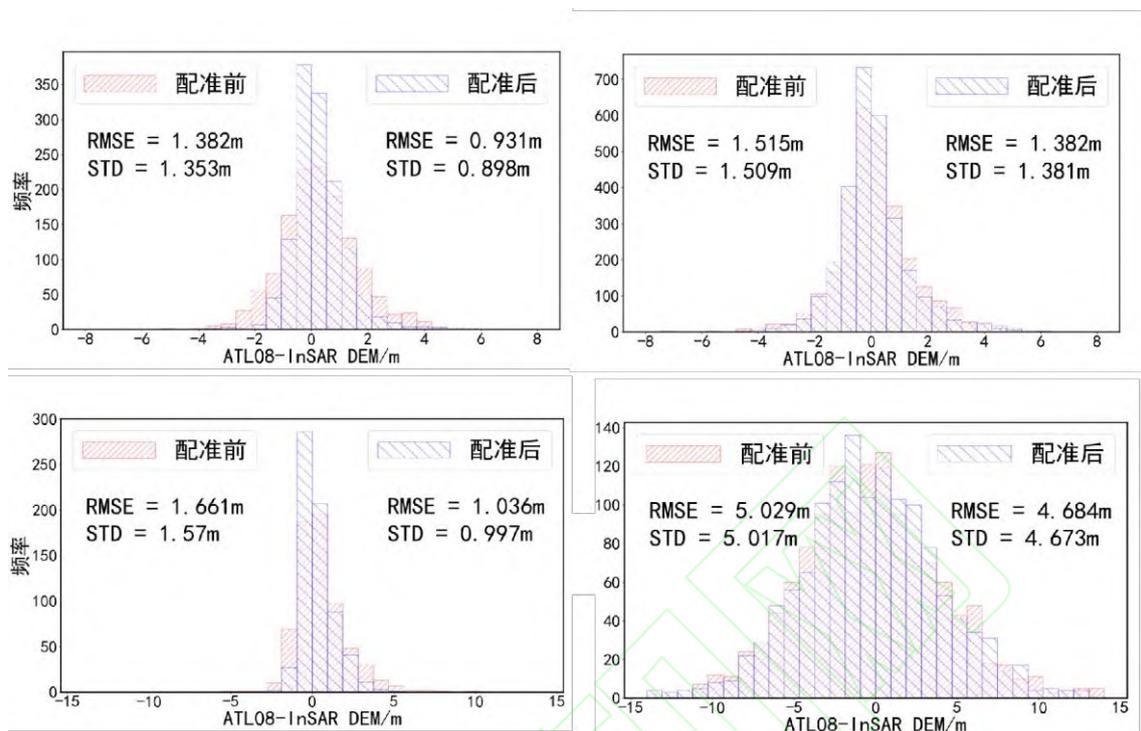


图 6 配准前后 ATL08 数据与 InSAR DEM 高程差直方图

Fig6 Histogram of Elevation Difference Between ATL08 Data and InSAR DEM Before and After Registration

表2 研究区内应用两种方法配准结果对比

Tab.2 Comparison of Registration Results Using Two Methods Within The Research Area

影像	方法	偏移量/m		RMSE/m	
		x方向	y方向	配准前	配准后
1	原有方法	8.282	8.479	1.390	1.274
	本文方法	6.437	6.371		
2	原有方法	8.216	-0.070	1.514	1.567
	本文方法	5.790	1.314		
3	原有方法	-6.0721	9.250	1.659	1.321
	本文方法	-16.378	8.262		
4	原有方法	-11.359	-24.582	5.029	4.693
	本文方法	-4.939	13.240		

### 3.2 不同坡度条件下的配准精度评价

为了分析不同等级的坡度对配准效果的影响，本文将 InSAR DEM 坡度重分类如下：0~15°、15°~30°、30°~45°及>45°。配准按坡度分带精度统计如表 3 所示。本文的 ATL08 数据主要分布在了坡度较大的区域，该区域的配准精度对整体配准精度提升的贡献也最大，坡度大于 45°的位置对 4 个研究区整体配准的高程向改变的贡献达到了 72%~99%。对于配准前本身归一化高程与坡向的正弦函数关系不明显的区域（研究区 2）而言，表 3 显示在部分坡度分带下，配准效果与配准前相比相差无几，但其它坡度分带和整体配准效果都有明显的改善。

表 3 研究区配准坡度分带精度统计

Tab 3. Statistics on the accuracy of slope zoning in research area registration

研究区	坡度/°	点数/个	RMSE/m	
			配准前	配准后
1	0~15	103	1.426	1.460
	15~30	201	0.587	0.575
	30~45	252	0.703	0.667
	>45	2326	1.633	1.392

2	0~15	52	0.674	0.631
	15~30	120	0.944	0.868
	30~45	208	0.952	0.768
	>45	941	1.530	0.984
3	0~15	41	0.800	0.597
	15~30	120	0.880	0.841
	30~45	191	1.203	0.873
	>45	325	2.123	1.214
4	0~15	16	4.086	2.801
	15~30	42	4.391	3.707
	30~45	112	3.737	3.694
	>45	1160	5.169	4.524

### 3.3 不同植被覆盖下的配准精度评价

在计算 ICESat-2 ATL08 数据与 DEM 的高程差时，会一定程度上包含了植被高度，因此，分析不同植被覆盖对配准精度的影响是必要的。本文将筛选 ATL08 数据的冠层高度的阈值分为 5m, 10m, 15m 三个等级，对应于不同程度的植被覆盖，分别对 4 个研究区进行实验。实验结果如表 4 所示。

表 4 不同冠层高度阈值配准精度评价

Tab 4. Evaluation of registration accuracy for different canopy height thresholds

研究区	冠层高度阈值/m	RMSE/m		精度提升
		配准前	配准后	
1	5	1.390	0.931	33.02%
	10	1.546	1.189	23.09%
	15	1.573	1.249	20.60%
2	5	1.514	1.381	8.78%
	10	2.978	2.989	-0.37%
	15	2.980	2.988	-0.27%
3	5	1.659	1.034	37.67%
	10	1.720	1.099	36.10%
	15	1.828	1.172	35.89%
4	5	5.029	4.526	10.00%
	10	5.048	4.809	4.73%
	15	5.059	4.825	4.62%

随着冠层高度的阈值增加，4 个研究区的配准精度均有不同程度的减小，分别从 33.02%、8.78%、37.67%、10.00%减小至 20.60%、-0.27%、35.89%、4.62%。

## 4 结果分析与讨论

结合表 2 和图 5 可以看出，应用传统迭代的配准方法在地形复杂的区域效果并不明显，尤其是当归一化高程差与坡向的正弦函数关系并不清晰时，该方法的缺点就更加明显。图 7 显示了通过本文方法求解参数拟合出的归一化高程差与坡向间的正弦函数曲线，结合图 5 与图 7 可以发现，利用本文配准方法拟合的曲线相比传统方法拟合的曲线在 4 个研究区内都更加明显，同时结合表 2 数据表明，配准前归一化高程差与地形坡向的正弦函数关系越清晰，配准效果越好。结合表 2 和图 6 可以看出，当顾及地形坡度对每个 ATL08 数据进行定权处理后，4 个研究区配准后的精度均有明显改善。同时，图 6 表明配准后的高程差更符合正态分布情况，且中误差明显减小，证明应用该方法削弱了平面偏移在地形坡度和坡向影响下导致的垂直偏差的系统误差变化，使之更接近于偶然误差因素。

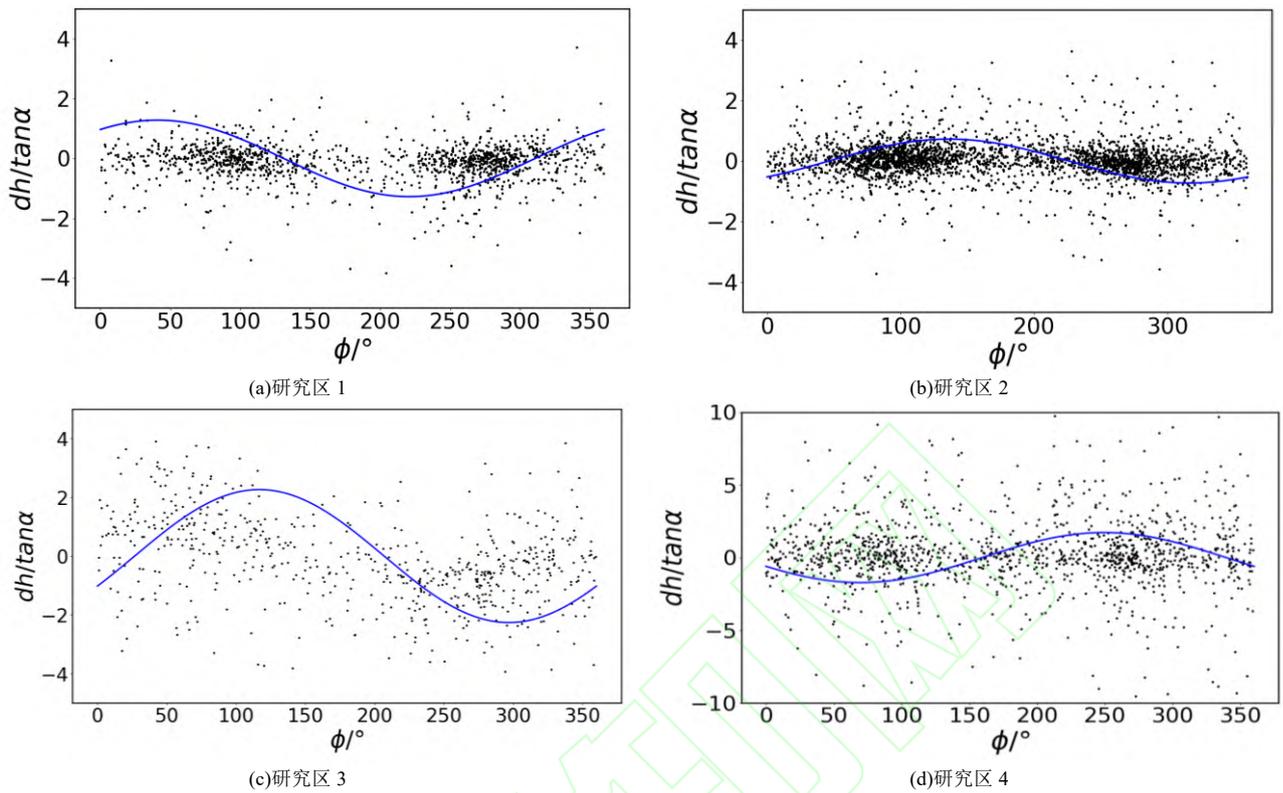


图7 本文方法配准参数拟合归一化高程差与坡向曲线

Fig 7. The normalized elevation difference and slope curve of the registration parameter fitting method in this article

由于 SAR 侧视成像原理，InSAR DEM 产生的几何畸变与地形坡度的关系密切<sup>[30-32]</sup>，对地形坡度分带的精度统计反映了 DEM 几何畸变对配准效果的影响。表 3 对坡度分带统计的结果显示，RMSE 基本均与坡度大小呈现正相关关系，因为对于相同的平面偏移而言，坡度越大的地方高程改变量越大。由于研究区 2、3 的坡度变化较大，ATL08 数据对应的 DEM 像素坡度与高程并未正确反映真实地形情况，使其在部分坡度区间内配准效果并不明显。但是从其它坡度分带尤其是大于 45° 的崎岖地区以及整体配准精度而言，本文提出的方法均对 4 个研究区的 ATL08 高程数据和 InSAR DEM 作了有效配准。表 3 显示研究区 1 在 0~15° 的分带区间内 RMSE 较大，在地势平坦区域造成这样的现象是因为该区域存在茂密的植被覆盖，计算高程差差异时包含了一定的植被高度。同时，表 4 显示，随着筛选 ATL08 数据的冠层高度增大，4 个研究区配准的效果均有所下降，说明若观测数据中含有的冠层高度信息过多会影响到本文配准方法的精度，因此选择观测数据时应充分考虑区域地表覆盖类型，以植被低矮稀疏的区域或裸地点为宜。定量评估结果表明：物理意义上，本文配准方法的精度与地表覆盖类型、InSAR DEM 几何畸变及 ATL08 控制点可靠性有关；几何意义上，配准前归一化高程差与地形坡向构成正弦函数关系的准确性表征了配准效果。

## 5 结语

针对传统配准模型引入平均坡度替代局部坡度使高程改变量与坡度呈正比这一问题，本文提出了反坡度定权并线性化配准模型的最小二乘平差方法，并选取了位于西班牙北、中部两个试验区共四个 TanDEM-X InSAR 数据生成 DEM，及其范围内 ICESat-2 ATL08 数据进行验证和分析，得出以下结论：

(1) 使用等权模型配准难以区分不同坡度下平面偏移量对高程改变量的影响，反坡度定权的随机模型与线性化函数模型更好地实现了 ICESat-2 数据与 InSAR DEM 的配准问题。与现有方法相比，本文方法配准精度有显著提升。

(2) InSAR DEM 的几何畸变与 ICESat-2 数据质量是制约配准精度的主要原因。实验结果表明，在模型需要满足的函数关系并不明显的区域，配准精度也有所提升，但与源数据质量较高的区域相比仍有改善的空间，如何提高配准源数据的质量也值得进一步研究。

(3) 本文方法的实际意义在于提升了 ICESat-2 乃至其它星载 LiDAR 数据作为高质量高程控制点的平面位置精度,且适用于控制点稀疏的地形复杂区域,能为精化其它应用提供方法支撑。

## 参考文献:

- [1]Cheng Xiang. Research on 3D Building Modeling Method Based on GF-7 Satellite Data[D].Beijing University of Civil Engineering and Architecture, 2024(程向. 基于 GF-7 卫星数据的建筑物三维建模方法研究[D].北京建筑大学,2024.)
- [2]Yu Zhonghai, Yan Libo, Liu Qian, et al. Research and application of Lutan-1 SAR satellite in survey and monitoring of catastrophic geohazards[J]. Bulletin of Surveying and Mapping, 2024, 0(11): 97-101,176. (于忠海,闫立波,刘茜,等.基于陆探一号 SAR 卫星的地质灾害普查监测技术研究及应用[J].测绘通报,2024,(11):97-101,176.)
- [3]Zhong Guoxiong, Zhu Zhengping. Comparison of Spatial Interpolation Methods of Temperature in Jiangxi Province Based on DEM[J].Geospatial Information, 2023,21(07):53-56+85.(钟国雄,朱正平.基于 DEM 的江西省气温空间插值方法比较[J].地理空间信息,2023,21(07):53-56+85.)
- [4]ZHU Jianjun, FU Haiqiang, WANG Changcheng. Methods and Research Progress of Underlying Topography Estimation over Forest Areas by InSAR[J]. Geomatics and Information Science of Wuhan University, 2018, 43(12): 2030-2038. (朱建军, 付海强, 汪长城.InSAR 林下地形测绘方法与研究进展[J].武汉大学学报(信息科学版),2018,43(12):2030-2038.)
- [5]Chen C F, Liu F Y, Li Y Y, et al. A robust interpolation method for constructing digital elevation models from remote sensing data[J]. Geomorphology, 2016,268(sep.1): 275-287
- [6]LI Tao, TANG Xinming, GAO Xiaoming, et al. Spaceborne InSAR Topographic Surveying and Mapping Error Sources Analysis. Bulletin of Surveying and Mapping, 2017(11): 37-41, 50. (李涛,唐新明,高小明,等.星载 InSAR 在地形测绘中的误差来源分析[J].测绘通报,2017(11):37-41+50.)
- [7] Magruder L., Brunt K., Neumann, T., et al. Passive ground-based optical techniques for monitoring the on-orbit ICESat-2 altimeter geolocation and footprint diameter[J]. Earth and Space Science, 2021(8):e2020EA001414.
- [8] Dietrich J T, Rackley R A,Gibbons, et al. Analysis of ICESat - 2 Data Acquisition Algorithm Parameter Enhancements to Improve Worldwide Bathymetric Coverage[J].Earth & Space Science, 2024, 11(2).DOI:10.1029/2023EA003270.
- [9]Design and Implementation of Key Technology of GF-7 Satellite Laser Altimeter Subsystem[J]. Spacecraft Engineering,2020,29(03):68-73.(黄庚华,丁宇星,吴金才等.高分七号卫星激光测高仪分系统关键技术设计与实现[J].航天器工程,2020,29(03):68-73.)
- [10]Jing Yazhou, Duan Pengfei, Li Bicen, et al. Design and verification of the spectrometer on “Gou Mang” satellite[J].Chinese Space Science and Technology,2023,43(06):142-149.(井亚舟,段鹏飞,李碧岑,等.“句芒”号卫星超光谱探测仪设计与系统验证[J].中国空间科学技术,2023,43(06):142-149.)
- [11]LI Guoyuan, TANG Xinming, ZHANG Chongyang, et al. Multi-criteria constraint algorithm for selecting ICESat/GLAS data as elevation control points[J]. Journal of Remote Sensing, 2017,21(1):96-104.(李国元,唐新明,张重阳,等.多准则约束的 ICESat/GLAS 高程控制点筛选[J].遥感学报,2017,21(01):96-104.)
- [12]Besl P J, McKay N D. Method for registration of 3-D shapes[C]//Sensor fusion IV: control paradigms and data structures. Spie, 1992, 1611: 586-606.
- [13]Rosenholm D A N, TORLEGARD K. Three-dimensional absolute orientation of stereo models using digital elevation models[J]. Photogrammetric engineering and remote sensing, 1988, 54(10): 1385-1389.
- [14]Zhang Tonggang, Cen Minyi, Feng Yicong. Comparison of LZD and ICP Algorithms in DEM Matching without Control Points[J].Journal of Image and Graphics, 2006(05):714-719.(张同刚, 岑敏仪, 冯义从.用于无控制 DEM 匹配的 LZD 和 ICP 算法的比较[J].中国图象图形学报,2006(05):714-719.)
- [15]Chen Boxing, Zhu Qing, Hu Hang. ZY-3 Global DEM Accuracy Evaluation Method Based on GLAS Laser Altimetry Data[J].Journal of Spatio-temporal Informatio, 2019,26(06):70-73(陈柏行, 朱庆, 胡翰.基于 GLAS 激光测高数据的 ZY-3 全球 DEM 精度评估方法[J].地理信息世界,2019,26(06):70-73)
- [16]Wei Shaodong, Jiang Yonghua, Du Bin, et al. Large-Scale Combined Adjustment of Optical Satellite Imagery and ICESat-2 Data

---

Through Terrain Profile Elevation Sequence Similarity Matching[J]. IEEE Journal of Selected Topics in Applied Earth Observations and Remote Sensing, 2024, 17: 19771-19785. DOI: 10.1109/JSTARS.2024.3481449.

[17]Nuth C, Kaab A. Co-registration and bias corrections of satellite elevation data sets for quantifying glacier thickness change[J]. The Cryosphere, 2011,5(1):271-290.

[18]Ding Xiameng. Research on Elevation Accuracy Evaluation of Resource-3 Overseas DEM Based on Open Source Data[D].Lanzhou Jiaotong University,2023.(丁夏萌. 基于开源数据的资源三号境外 DEM 高程精度评价研究[D].兰州交通大学,2023.)

[19]Li Tao, Li Chao, SHEN Xiang, et al. Monitoring glacier mass balance of the West Kunlun Mountains over the past 20 years by bistatic InSAR and ICESat-2 altimetry measurements. Acta Geodaetica et Cartographica Sinica, 2023, 52(6): 917-931.(李涛, 李超, 沈翔, 等. 双站 InSAR 和 ICESat-2 测高相结合的西昆仑山近 20 年冰川物质平衡变化监测[J].测绘学报,2023,52(06):917-931.)

[20]Yang Shuai, Yang Na, Chen Chuanfa, et al. Accuracy Assessment and Improvement of SRTM DEM based on ICESat/GLAS under the Consideration of Data Coregistration over Jiangxi Province[J]. Journal of Geo-information Science, 2021, 23(5): 869-881.(杨帅, 杨娜, 陈传法, 等.顾及数据配准的江西省 SRTM DEM 精度评价和修正[J].地球信息科学学报,2021,23(05):869-881.)

[21]Xu Weifeng, Li Jun, Peng Dailiang, et al. Comparison of five methods for improving the accuracy of SRTM3 DEM and TanDEM-X DEM in the Qinghai-Tibet Plateau using ICESat-2 data[J]. International Journal of Digital Earth, 2024, 17(1): 1-12.

[22]LIU Zhuo, LI Jia, ZHANG Xiang, et al. Obtaining high-precision digital elevation model in Antarctica based on TanDEM-X images and ICESat-2 data[J]. Bulletin of Surveying and Mapping, 2022, 0(4): 72-76.(刘卓, 李佳, 张翔等.利用 TanDEM-X 影像和 ICESat-2 高程数据获取南极高精度数字高程模型[J].测绘通报,2022(04):72-76.)

[23]González J H, Bachmann M, Scheiber R, et al. Definition of ICESat Selection Criteria for Their Use as Height References for TanDEM-X[J]. IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing, 2010, 48(6):2750-2757

[24]Duong H, Lindenbergh R, Pfeifer N, et al. ICESat Full-Waveform Altimetry Compared to Airborne Laser Scanning Altimetry over the Netherlands[J]. IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing, 2009, 47(10):3365-3378

[25] GAO Zhiliang, XIE Mingli, JU Nengpan, HUANG Xichao, PENG Tao, HE Chaoyang. Multi-source Remote Sensing Dynamic Deformation Monitoring of Accumulation Landslide[J]. Geomatics and Information Science of Wuhan University, 2024, 49(8): 1482-1491. (高志良, 解明礼, 巨能攀, 黄细超, 彭涛, 何朝阳. 堆积层滑坡多源遥感动态演变特征分析研究[J]. 武汉大学学报(信息科学版), 2024, 49(8): 1482-1491.)

[26]Chen Yifu, Li Shuai, Zhang Dongfang, et al. ICESat-2 lidar bathymetry based on adaptive spatial density filtering[J]. Geomatics and Information Science of Wuhan University. DOI: 10.13203/j.whugis20220453(谌一夫, 李帅, 张东方, 等. 自适应空间密度滤波的 ICESat-2 激光雷达测深[J]. 武汉大学学报 (信息科学版). DOI: 10.13203/j.whugis20220453)

[27]Gruber A, Wessel B, Huber M, et al. Operational TanDEM-X DEM calibration and first validation results[J]. ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing, 2012(73):39-49

[28]Rizzoli P, Martone M, Gonzalez C, et al. Generation and performance assessment of the global TanDEM-X digital elevation model[J]. ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing, 2017(132):119-139

[29] Abdalati W, Zwally H J, Bindschadler R, et al. The ICESat-2 laser altimetry mission[J]. Proceedings of the IEEE, 2010, 98(5): 735-751.

[30]Colesanti C, Wasowaki J. Investigating Landslides with Space-Borne Synthetic Aperture Radar(SAR)Interferometry(InSAR)[J].Engineering Geology,2006,88(3/4):173-199

[31]Notti D,Herrera G,Bianchini S,et al. A Methodology for Improving Landslide PSI Data Analysis [J].International Journal of Remote Sensing,2014,35(6): 2 186-2 214

[32]Dai Keren,Zhang Lele,Song Chuang, et.al. Quantitative Analysis of Sentinel-1 Imagery Geometric Distortion and Their Suitability Along Qinghai-Tibet Plateau Traffic Corridor[J].Geomatics and Information Science of Wuhan University,2021,46(10):1450-1460.(戴可人,张乐乐,宋闯等.青藏高原交通廊道沿线 Sentinel-1 影像几何畸变与升降轨适宜性定量分析[J].武汉大学学报·信息科学版,2021,46(10):1450-1460.)

---

#### 网络首发:

标题: 复杂地形条件下星载 LiDAR 与 InSAR DEM 平面位置校正

作者: 张锦瑞, 朱建军, 万阿芳, 王烽, 邹明普, 付海强

收稿日期: 2025-01-14

DOI:10.13203/j.whugis20240148

#### 引用格式:

张锦瑞, 朱建军, 万阿芳, 等. 复杂地形条件下星载 LiDAR 与 InSAR DEM 平面位置校正[J]. 武汉大学学报(信息科学版), 2025, DOI:10.13203/J.whugis20240148 (ZHANG Jinrui, ZHU Jianjun, WAN Afang, et al. Terrain-Considerate Registration Method of spaceborne LiDAR with InSAR DEM[J]. Geomatics and Information Science of Wuhan University, 2025, DOI:10.13203/J.whugis20240148)

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:

##### 一种基于 ResUNet 的晕渲图生成方法

尹广志, 李少梅, 马京振, 吕东许, 卞成琳

武汉大学学报(信息科学版), 2025, 50(1): 197-206.

<http://ch.whu.edu.cn/article/doi/10.13203/j.whugis20220532>

##### 利用机载 LiDAR 数据的开放 DEM 产品精度评估

雷秋佳, 刘婧, 曹新运

武汉大学学报(信息科学版), 2025, 50(1): 153-163.

<http://ch.whu.edu.cn/article/doi/10.13203/j.whugis20220421>

##### 高精度 DEM 建模的加权径向基函数插值方法

高原, 朱娅男, 陈传法, 胡占占, 胡保健

武汉大学学报(信息科学版), 2023, 48(8): 1373-1379.

<http://ch.whu.edu.cn/article/doi/10.13203/j.whugis20210100>