引文格式: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),2026,51(5):1004-1013.DOI:10.13203/j.whugis20240148

Citation: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,2026,51(5):1004-1013.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[1] 朱建军[1] 万阿芳[2] 王 烽[2] 邹明普[2] 付海强[1]

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测量(interferometric synthetic aperture radar,InSAR)技术生成数字高程模型(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。提出一种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,选取西班牙4个具有不同地形条件和地表覆盖类型的实验区进行测试。实验结果表明,配准后4个实验区的高程向均方根误差分别达到0.931 m、1.381 m、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%。实验结果验证了所提方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

中图分类号:P237 **文献标识码**:A **收稿日期**:2025-01-14

DOI:10.13203/j.whugis20240148 **文章编号**:1671-8860(2026)05-1004-10

Terrain-Considerate Registration Method of Spaceborne LiDAR with InSAR DEM

ZHANG Jinrui[1] *ZHU Jianjun*[1] *WAN Afang*[2] *WANG Feng*[2] *ZOU Mingpu*[2] *FU Haiqiang*[1]

1 School of Geosciences and Info-Physics,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 interferometric synthetic aperture radar (InSAR) is widely used in understory terrain estimation, tree height inversion, digital elevation model (DEM) accuracy evaluation and correction, etc. However, due to limitations in onboard platforms, imaging technology and data processing, the deviations still exist in plane position and height measurement of InSAR DEM. Therefore, the effective registration of spaceborne LiDAR and InSAR DEM is the key premise of the fusion application. **Methods**: We propose an improved registration model which fully considers the changes in plane offset and elevation variation under different topographic factors. The proposed model 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 by the registration model with the 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 are selected for testing. **Results**:

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

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

通信作者:朱建军,博士,教授。zjj@csu.edu.cn

The experimental results show that root mean square error (RMSE) of height difference after registration in these four test areas reach 0.931 m, 1.381 m, 1.034 m and 4.526 m, respectively. Compared with the accuracy before registration, the accuracy after registration is improved by 33.02%, 8.78%, 37.67% and 10.00%, respectively. For a canopy height of 15 m compared to 5 m, the contribution of slope greater than 45° to the overall registration of elevation changes in these four test areas reach 72%-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. **Conclusions:** The proposed method weakens the systematic error variation of height deviation caused by plane offset under the influence of terrain slope and aspect. The experimental results verify the effectiveness of the proposed model for the registration of spaceborne LiDAR and InSAR DEM in complex terrains.

Key words: registration; digital elevation model (DEM); 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[1-3]。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[4-6]。合成孔径雷达干涉测量(interferometric synthetic aperture radar, InSAR)技术因其全天时、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[6],需要借助外部控制点进行校正。ICESat-2(ice, cloud and land elevation satellite-2)、全球生态系统动态调查(global ecosystem dynamics investigation, GEDI)和句芒号等星载激光雷达(light detection and ranging, LiDAR)可在全球范围内采集测高点[7-11],具有较高的平面与高程精度,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。如基于最小二乘的最近点迭代(iterative closest point, ICP)算法[12]和最小高程差(least Z-difference, LZD)算法[13],两种算法的逻辑框架是共通的[14],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。文献[15]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;文献[16]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;文献[17]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[18-21],但在模型参数求解时引入局部坡度代替实际坡度,导致其在坡度较小的区域高程改善欠缺,而在坡度较大的区域高程改善过度[22]。

因此,本文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;然后,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进行归一化处理,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,流程如图1所示。具体分为3个步骤:(1)数据预处理。考虑到激光点云返回信号质量,以及在植被覆盖区域激光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[23-26],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

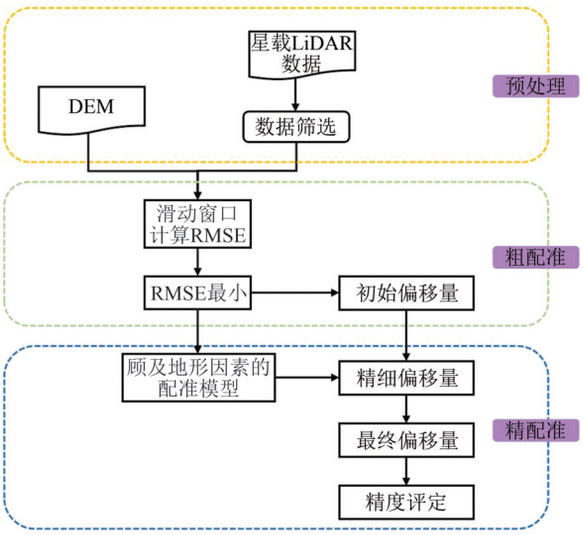


图1 星载LiDAR数据与DEM配准流程

Fig. 1 Registration Process of Spaceborne LiDAR Data and DEM

据为基准,在DEM上进行滑动窗口搜索,其中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,搜索到整体高程差均方根误差(root mean square error,RMSE)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。

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[17]。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,计算式为:

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

式中,Δh为DEM与星载LiDAR数据的高程差;α、ϕ分别为坡度、坡向;s、β分别为偏移矢量的水平距离和偏移方向;$\Delta\bar{h}$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、β和$\Delta\bar{h}$,一般当两次计算出的水平位移矢量长度小于0.5 m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、纬度方向上的偏移量x、y,计算式为:

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

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α,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,s、Δh与α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,s也会相应地改变为s'。

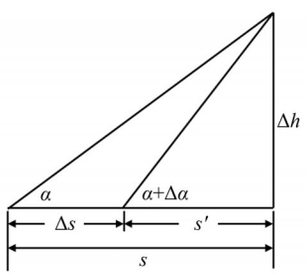


图2 相同高程改变量下坡度改变与平面偏移量改变关系

Fig. 2 Relationship Between Slope Change and Plane Offset Change Under the Same Elevation Change

改变量Δs的计算式为:

$$\Delta s=s-s'=\frac{\Delta h}{\tan\alpha}-\frac{\Delta h}{\tan(\alpha+\Delta\alpha)}=\Delta h\left(\frac{1}{\tan\alpha}-\frac{1}{\tan(\alpha+\Delta\alpha)}\right) \tag{3}$$

化简后可得:

$$\Delta s=\Delta h\cdot\frac{\sin\Delta\alpha}{\sin\alpha\cdot\sin(\alpha+\Delta\alpha)} \tag{4}$$

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:

$$p_i=\frac{\dfrac{1}{\sin\alpha_i}}{\displaystyle\sum_{i=1}^{n}\frac{1}{\sin\alpha_i}} \tag{5}$$

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,其配准模型是非线性的,将其中的$\cos(\beta-\phi)$利用积化和差公式展开后,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,计算式为:

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

结合式(2)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,计算式为:

$$\frac{\Delta h}{\tan\alpha}=y\cdot\cos\phi+x\cdot\sin\phi+\frac{\Delta\bar{h}}{\tan\bar{\alpha}} \tag{7}$$

联合式(5)、式(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:

$$\begin{cases}\boldsymbol{V}=\hat{\boldsymbol{y}}\cdot\cos\phi+\hat{\boldsymbol{x}}\cdot\sin\phi-\boldsymbol{L}\\ \left|\boldsymbol{V}^{\mathrm{T}}\boldsymbol{P}\boldsymbol{V}\right|=\min\end{cases} \tag{8}$$

式中,$\boldsymbol{V}$为偏移量的残差矩阵;$\hat{x}$和$\hat{y}$为待求参数,分别代表平面位置在经度和纬度方向的偏移量的估计值;$\boldsymbol{L}$为配准的观测值;$\boldsymbol{P}$为式(5)所得的权矩阵。

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　实验区域与数据集

2.1　实验区域

实验区域位于西班牙北部和中部,该区域植被覆盖类型丰富,高度在 5～30 m,同时分布有裸地和城镇;实验区内地形起伏明显,高程变化在 300～2 000 m,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 与 TerraSAR-X 卫星组成了姊妹卫星编队[27],主要任务是通过 InSAR 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 12 m 分辨率的全球 DEM[28]。

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(advanced topographic laser altimeter system,ATLAS),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[29]。ICESat-2 数据产品分为 L1、L2、L3A、L4B 4 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

本文选用了两景 TanDEM-X 干涉对影像用于生成 InSAR DEM,详细参数见表 1,生成后的 DEM 经纬度分辨率均约 10 m。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、地面高程不确定性与冠层高度不确定性等信息对 ATL08 数据进行筛选,经过筛选后的 ATL08 数据在 4 个研究区分别获取了 2 882、1 321、668、1 366 个控制点。研究区内 InSAR DEM 及 ATL08 分布如图 3 所示,利用 InSAR DEM 直接生成坡度和坡向数据如图 4 所示。

表 1　TanDEM-X 影像参数

Table 1　Parameters of TanDEM-X Images

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

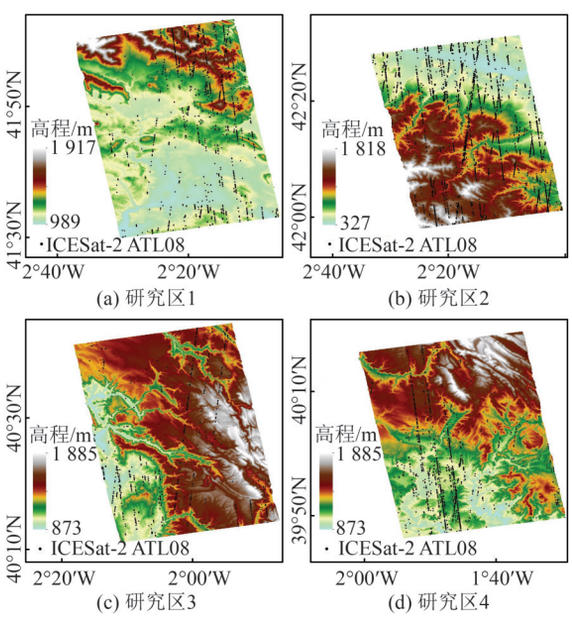


图 3　研究区 InSAR DEM 与 ICESat-2 ATL08 分布

Fig. 3　Distribution of ICESat-2 ATL08 with InSAR DEM in the Study Areas

3　数据处理和结果

3.1　整体精度评价

图 5 是 4 个研究区高程差与坡度的归一化比值与坡向之间的分布散点图及中心线拟合方程。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

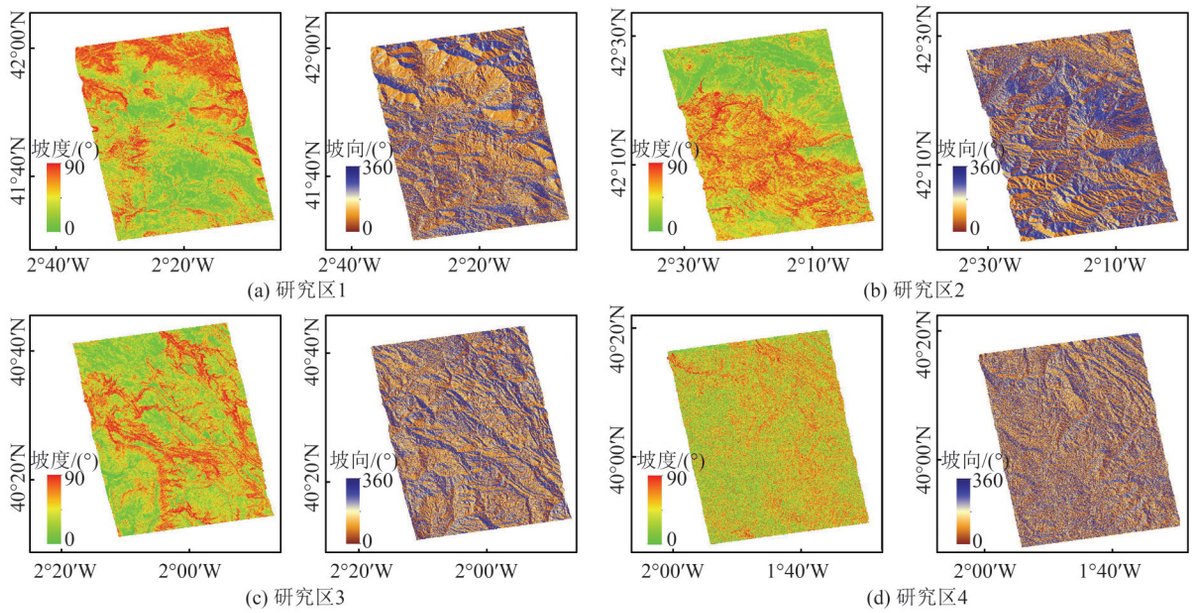


图4 地形坡度和地形坡向

Fig. 4 Terrain Slope and Aspect

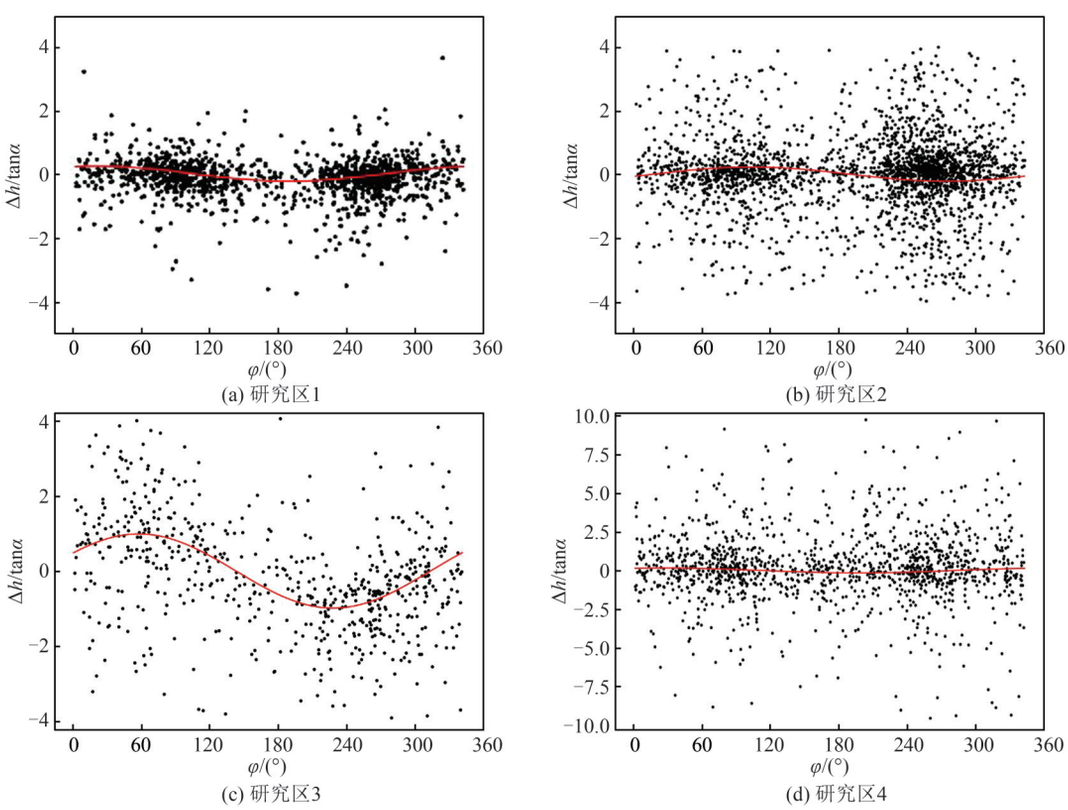


图5 配准前ATL08与InSAR DEM的归一化高程差与坡向之间的散点图

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

散点图中心线的拟合方程表征,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(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。

在研究区内分别应用传统迭代配准方法和坡度加权最小二乘平差配准方法得到DEM在x、y方向的偏移量,同时计算了两种方法在配准前后的高程差RMSE,统计结果见表2。

表 2　研究区内应用两种方法配准结果对比

Table 2　Comparison of Registration Results of Two Methods in the Study Areas

研究区	方法	偏移量/m		RMSE/m	
		x方向	y方向	配准前	配准后
1	传统方法	8.282	8.479	1.390	1.274
	本文方法	6.437	6.371		0.931
2	传统方法	8.216	−0.070	1.514	1.567
	本文方法	5.790	1.314		1.381
3	传统方法	−6.072	9.250	1.659	1.321
	本文方法	−16.378	8.262		1.034
4	传统方法	−11.359	−24.582	5.029	4.693
	本文方法	−4.939	13.240		4.526

由表 2 可以看出,在应用传统配准方法时,研究区 1、3、4 的高程差 RMSE 分别由 1.390 m、1.659 m、5.029 m 降至 1.274 m、1.321 m、4.693 m,而研究区 2 的高程差 RMSE 则增大了 0.053 m,表明配准效果变差。相比配准前和应用传统配准方法,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,最优精度分别达到了 0.931 m、1.381 m、1.034 m、4.526 m,精度较配准前分别提升了 33.02%、8.78%、37.67%、10.00%。

配准前后高程差的直方图统计分布如图 6 所示。为了定量评估实验结果,分别计算配准前后高程差的 RMSE 和标准差(standard deviation, STD)。由图 6 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 STD 均有不同程度的减小。

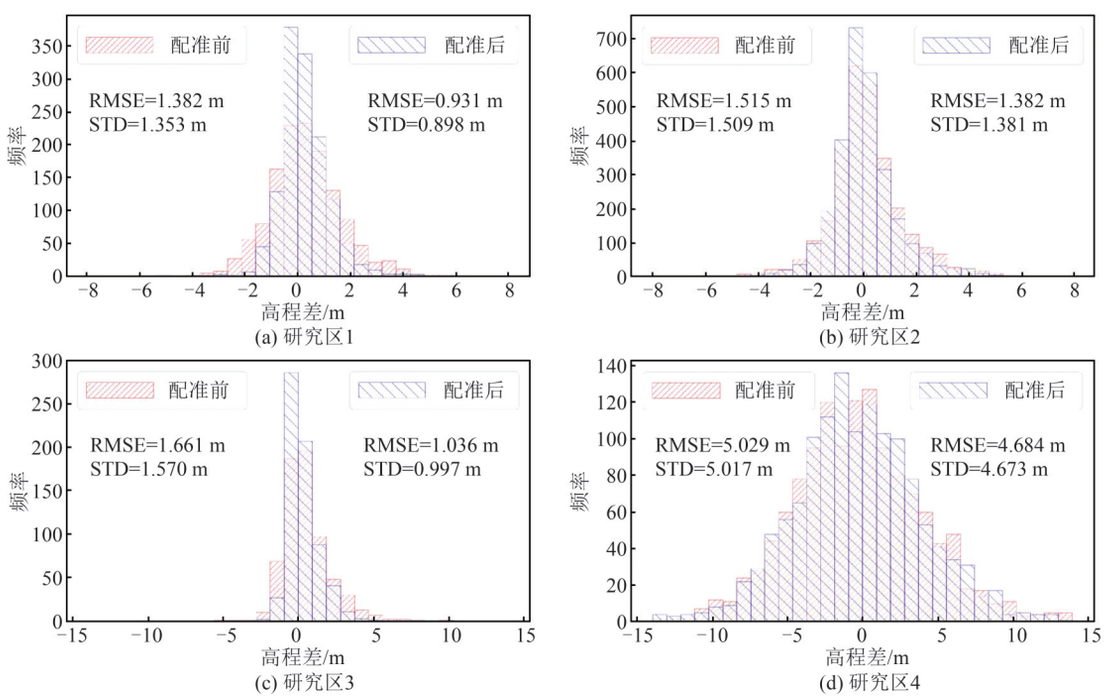


图 6　配准前后 ATL08 数据与 InSAR DEM 高程差直方图

Fig. 6　Histogram of Elevation Difference Between ATL08 Data and InSAR DEM Before and After Registration

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 坡度重分类为 4 个区间,分别是(0,15°]、(15°,30°]、(30°,45°]和>45°,研究区配准按坡度分带精度统计见表 3。本文的 ATL08 数据主要分布在坡度较大的区域,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>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%。计算式为:

$$W=\frac{(E^{\mathrm{pre}}_{>45^\circ}-E^{\mathrm{post}}_{>45^\circ})\times N_{>45^\circ}}{\sum_{i=1}^{4}(E^{\mathrm{pre}}_{i}-E^{\mathrm{post}}_{i})\times N_i} \tag{1}$$

式中,W 为贡献程度;E^{pre} 和 E^{post} 分别为配准前、配准后的 RMSE;N 为点数;i 为坡度分区序号,对应研究区的 4 个坡度等级:i=1 对应(0,15°]坡度区间,i=2 对应(15°,30°]坡度区间,i=3 对应(30°,45°]坡度区间,i=4 对应>45°坡度区间。

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,在部分坡度分带下,配准前后的效果相差不大,但在其他坡度分带和整体上,配准效果都有明显的改善。

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,

表3 研究区配准坡度分带精度统计

Table 3 Statistics on Registration Accuracy of Slope Zoning in the Study Areas

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	2 326	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	1 160	5.169	4.524

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5 m、10 m、15 m 3个等级,对应于不同程度的植被覆盖,4个研究区内配准前后的精度结果见表4。由表4可以看出,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降低,分别从33.02%、8.78%、37.67%、10.00%降低至20.60%、−0.27%、35.89%、4.62%。

表4 不同冠层高度阈值配准精度评价

Table 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

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,传统方法的缺点就更加明显。图7是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,利用本文方法拟合的曲线较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RMSE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。

由于InSAR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[30-31],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对坡度分带统计结果显示,RMSE基本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。但是从其他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,本文方法均对4个研究区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,造成这样的现象的原因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个研究区配准的精度均有所下降,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。

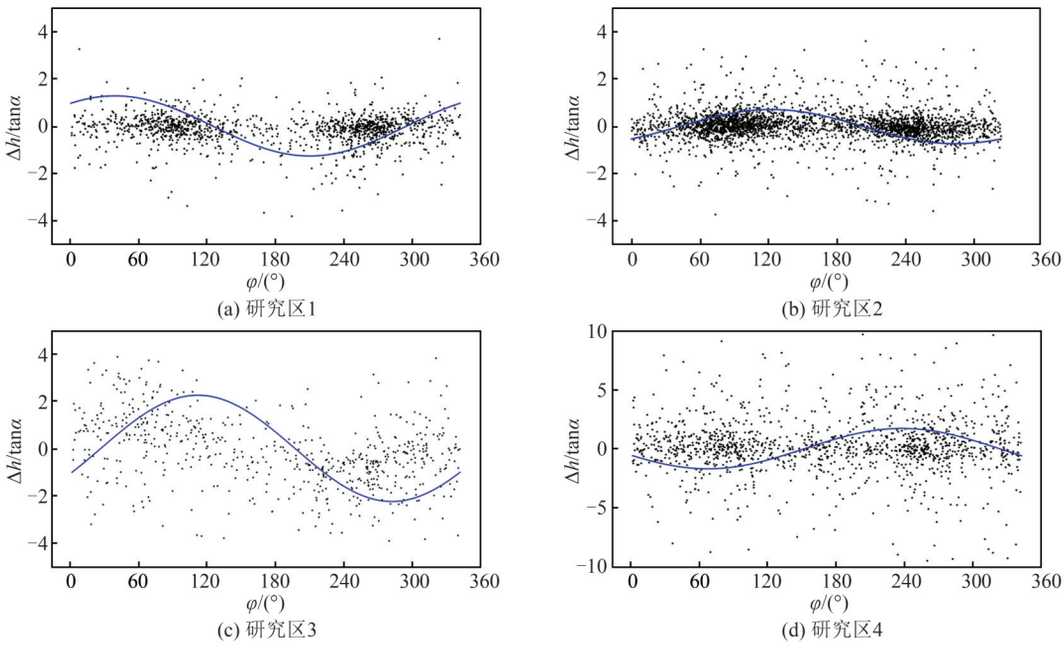


图 7　本文方法配准参数拟合归一化高程差与坡向曲线

Fig. 7　Normalized Elevation Difference Related to Terrain Aspect Curve from Registration Parameters of the Proposed Method

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,选取了位于西班牙北部和中部共 4 个研究区的 TanDEM-X InSAR 数据生成 DEM,并对其范围内 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。与传统方法相比,本文方法的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 ICESat-2 乃至其他星载 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,能为精化其他应用提供方法支撑。

参　考　文　献

[1] 罗莉, 王斌, 周立鹏. 基于多源数据的广域滑坡隐患数字地形分析[J]. 北京测绘, 2024, 38(4): 596-602.
LUO Li, WANG Bin, ZHOU Lipeng. Digital Terrain Analysis of Wide-Area Landslide Hazards Based on Multisource Data[J]. Beijing Surveying and Mapping, 2024, 38(4): 596-602.

[2] 侯旭娟, 邓筱曈, 花卫华, 等. 基于自适应生成对抗网络的DEM超分辨率重建方法[J]. 武汉大学学报(信息科学版), 2026, 51(3): 557-566.
HOU Xujuan, DENG Xiaotong, HUA Weihua, et al. DEM Super-Resolution Reconstruction Method Based on Adaptive Generative Adversarial Network[J]. *Geomatics and Information Science of Wuhan University*, 2026, 51(3): 557-566.

[3] 张先慧, 杨飞. 森林场景下不同径向基函数插值DEM精度的分析[J]. 北京测绘, 2025, 39(4): 522-527.
ZHANG Xianhui, YANG Fei. Analysis of DEM Accuracy Using Different Radial Basis Function Interpolation in Forest Scenarios[J]. *Beijing Surveying and Mapping*, 2025, 39(4): 522-527.

[4] 郑志. 基于亚米级立体卫星影像的三维地形智能提取[J]. 武汉大学学报(信息科学版), 2025, 50(3): 616.
ZHENG Zhi. Intelligent Extraction of 3D Terrain Based on Sub-Meter Satellite Stereos[J]. *Geomatics and Information Science of Wuhan University*, 2025, 50(3): 616.

[5] 张双成, 王杰, 李涛, 等. 陆地探测一号卫星用于干涉测量精度验证与分析:以大同市为例[J]. 武汉大学学报(信息科学版), 2025, 50(11): 2187-2197.

ZHANG Shuangcheng, WANG Jie, LI Tao, et al. Accuracy Verification and Analysis of the Interferometry of Lutan-1 Satellite: A Case Study of Datong [J]. *Geomatics and Information Science of Wuhan University*, 2025, 50(11): 2187-2197.

[6] 吴福,廖泽源,何娜,等.面向茂密植被山区地质灾害调查的LiDAR点云密度优化[J].武汉大学学报(信息科学版),2026,51(4):751-761.
WU Fu, LIAO Zeyuan, HE Na, et al. LiDAR Point-Cloud Density Optimization for Geohazard Surveys in Densely Vegetated Mountainous Areas [J]. *Geomatics and Information Science of Wuhan University*, 2026, 51(4): 751-761.

[7] 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),2025,50(1):83-96.
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*, 2025, 50(1): 83-96.

[8] 朱本鑫,张胜凯,肖峰,等.基于ICESat-2卫星测高数据的东南极Totten冰川流域高程变化研究[J].测绘地理信息,2025,50(4):48-53.
ZHU Benxin, ZHANG Shengkai, XIAO Feng, et al. Research on Elevation Change of the Totten Glacier Drainage Basin in East Antarctica Based on ICESat-2 Satellite Altimetry[J]. *Journal of Geomatics*, 2025, 50(4): 48-53.

[9] 尹飞,张西步,张悦,等.ICESat-2数据在煤矿塌陷区水深测量中的应用[J].北京测绘,2025,39(9):1245-1250.
YIN Fei, ZHANG Xibu, ZHANG Yue, et al. Application of ICESat-2 Data in Water Depth Measurement of Coal Mine Subsidence Areas [J]. *Beijing Surveying and Mapping*, 2025, 39(9): 1245-1250.

[10] 席梦丹,张永洪.基于GF-3精细条带数据生产DEM的精度分析[J].测绘标准化,2024,40(2):101-106.
XI Mengdan, ZHANG Yonghong. Accuracy Analysis of DEM Producing from GF-3 Fine Stripmap Data[J]. *Standardization of Surveying and Mapping*, 2024, 40(2): 101-106.

[11] 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(6):142-149.
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(6): 142-149.

[12] BESL P J, MCKAY N D. A Method for Registration of 3-D Shapes[J]. *IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence*, 1992, 14(2): 239-256.

[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] 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(5):714-719.
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(5): 714-719.

[15] 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(6):70-73.
CHEN Bohang, ZHU Qing, HU Han. ZY-3 Global DEM Accuracy Evaluation Method Based on GLAS Laser Altimetry Data[J]. *Geomatics World*, 2019, 26(6): 70-73.

[16] WEI S D, JIANG Y H, DU B, 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.

[17] NUTH C, KÄÄB 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] 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:兰州交通大学,2023.
DING Xiameng. Research on Elevation Accuracy Evaluation of Resource-3 Overseas DEM Based on Open Source Data[D]. Lanzhou: Lanzhou Jiaotong University, 2023.

[19] 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(5):869-881.
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.

[20] 赵羲,霍瑞,陈亦卓,等.ICESat-2高程信息辅助

下的北极冰区航线规划[J]. 武汉大学学报(信息科学版), 2024, 49(9): 1610-1620.
ZHAO Xi, HUO Rui, CHEN Yizhuo, et al. Route Planning in the Arctic Ice Region Assisted by ICESat-2 Elevation Information[J]. *Geomatics and Information Science of Wuhan University*, 2024, 49(9): 1610-1620.

[21] XU W F, LI J, PENG D L, 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): 2391036.

[22] 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(4): 72.
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(4): 72.

[23] HUESO GONZALEZ J, 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] 高志良, 解明礼, 巨能攀, 等. 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.
GAO Zhiliang, XIE Mingli, JU Nengpan, et al. Multi-Source Remote Sensing Dynamic Deformation Monitoring of Accumulation Landslide[J]. *Geomatics and Information Science of Wuhan University*, 2024, 49(8): 1482-1491.

[26] 李圣雨. 无靶标 LiDAR/IMU/Camera 时空标定关键技术研究[J]. 武汉大学学报(信息科学版), 2025, 50(11): 2400.
LI Shengyu. Key Technologies for Targetless LiDAR/IMU/Camera Spatiotemporal Calibration[J]. *Geomatics and Information Science of Wuhan University*, 2025, 50(11): 2400.

[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, WASOWSKI J. Investigating Landslides with Space-Borne Synthetic Aperture Radar (SAR) Interferometry[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): 2186-2214.