

文章编号: 1674-9669(2024)03-0432-08 DOI: 10.13264/j.cnki.yjskx.2024.03.013

引文格式: 陈淑婷, 夏益强, 陈兰兰, 等. 多源参考数据下的边坡DEM提取与精度分析[J]. 有色金属科学与工程, 2024, 15(3): 432-439.

## 多源参考数据下的边坡DEM提取与精度分析

陈淑婷<sup>1</sup>, 夏益强<sup>1</sup>, 陈兰兰<sup>\*2</sup>, 肖海平<sup>1</sup>

(1. 江西理工大学土木与测绘工程学院; 2. 赣南科技学院资源与土木工程学院, 江西 赣州 341000)

**摘要:** 参考DEM是InSAR DEM提取精度分析中不可或缺的重要数据。考虑到当前可供使用的DEM数据层出不穷, 如何选择可靠的参考DEM以解决不同地形DEM提取精度的需求, 是DEM提取中一个亟待解决的问题。本文分别选择12.5 m的ALOS DEM、30 m的STRM DEM、90 m的STRM DEM作为参考DEM, 依据2020年两景Sentinel-1A影像对德兴市部分地区边坡进行DEM数据提取, 利用InSAR技术提取实验区的S1A DEM数据, 并以ASTGTM DEM数据为参考, 使用检测点法随机选择约300个检测点, 选择相应的评价指标, 分别对不同参考DEM下提取得到的S1A DEM进行精度检验。研究结果显示, 使用12.5 m分辨率的ALOS DEM作为外部DEM, 提取得到的S1A DEM精度更高, 其在实验区A的RMSE为9.412 m, 使用90 m的STRM DEM, 提取得到的S1A DEM精度更低, 其在实验区A的RMSE为10.293 m。该实验为不同地形提取DEM提供了指导, 能够帮助学者们在进行InSAR实验时更好地选择参考DEM, 研究成果可为边坡灾害及预警提供重要的技术支持。

**关键词:** 多源参考数据; InSAR技术; DEM提取; 精度分析

**中图分类号:** TD176 **文献标志码:** A

## Slope DEM extraction and accuracy analysis based on multi-source reference data

CHEN Shuting<sup>1</sup>, XIA Yiqiang<sup>1</sup>, CHEN Lanlan<sup>\*2</sup>, XIAO Haiping<sup>1</sup>

(1. School of Civil and Surveying & Mapping Engineering, Jiangxi University of Science and Technology, Ganzhou 341000, Jiangxi, China; 2. School of Resources and Civil Engineering, Gannan University of Science and Technology, Ganzhou 341000, Jiangxi, China)

**Abstract:** Reference DEM is indispensable and important data in the accuracy analysis of InSAR DEM extraction. Considering the abundance of available DEM data, how to choose reliable reference DEMs to meet the accuracy requirements of DEM extraction for different terrains is an urgent problem in DEM extraction. In this article, ALOS DEM of 12.5 m, STRM DEM of 30 m, and STRM DEM of 90 m were selected as reference DEMs. Based on two Sentinel-1A images from 2020, DEM data on slopes in some areas of Dexing City was extracted. InSAR technology was used to extract S1A DEM data from the experimental area, and ASTGTM DEM data as a reference. About 300 detection points were randomly selected using the detection point method, the corresponding evaluation indicators were selected, and accuracy checks on S1A DEMs extracted from different reference DEMs were performed. The research results show that the extracted S1A DEM has a higher accuracy when ALOS DEM with a resolution of 12.5 m is used as the external DEM, with its RMSE in experimental area A of 9.412 m. The extracted S1A DEM has a relatively lower accuracy when ALOS DEM with a resolution of 90 m is used as the external DEM, with its RMSE

收稿日期: 2023-04-19; 修回日期: 2023-05-23

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(42361012); 江西省自然科学基金项目(20212BAB204030); 江西省教育厅科技项目(GJJ2203602)

通信作者: 陈兰兰(1981—), 副教授, 主要研究方向为边坡稳定性评估和处理、变形监测和数据处理。E-mail: 707598180@qq.com

in experimental area A of 10.293 m. This experiment guides extracting DEM from different terrains and can help scholars better choose reference DEM when conducting InSAR experiments. The research results can provide important technical support for slope disasters and early warning.

**Keywords:** multiple source reference data; InSAR technology; DEM extraction; precision analysis

数字高程模型 (DEM, Digital Elevation Model) 作为地面高程的重要描述手段,是地理数据库的核心数据,在地形分析、土方计算、蓄洪计算、自然灾害等领域具有广泛的应用。大面积的 DEM 制作途径主要包括合成孔径雷达 (InSAR) 技术、立体光学影像对、激光雷达 (Lidar) 技术、无人机倾斜摄影测量技术等,由于 InSAR 技术具有全天候、主动成像、可穿透云雾等特点很快成为大范围获取 DEM 的研究热点。近些年来,国内外学者基于 InSAR 技术获取 DEM 做出了大量研究。从研究区域上看,学者们主要对高寒高海拔地区<sup>[1]</sup>、沼泽湿地<sup>[2]</sup>、矿区<sup>[3-4]</sup>、沿海丘陵地区<sup>[5]</sup>、极地冰盖<sup>[6]</sup>、森林覆盖区<sup>[7]</sup>等区域获取 DEM 的可行性展开了研究;从使用的数据源上看,学者们主要使用的卫星数据包括: Sentinel-1A<sup>[8]</sup>、高分三号<sup>[9]</sup>、COSMO-SkyMed<sup>[10]</sup>、ALOS PALSAR<sup>[11]</sup>、Envisat ASAR<sup>[12]</sup>等卫星数据。学者们尝试对不同地区 DEM 的精度进行对比分析和评价,并取得了一定的成果<sup>[13]</sup>。赵尚民等<sup>[14]</sup>利用高精度激光点云数据的方法生成 DEM,并将其作为参考数据,对比分析了资源三号卫星影像生成的 DEM 数据及全球典型的开放 DEM 数据 (AW3D30、SRTM1 和 ASTER GDEM) 的精度;於佳宁等<sup>[15]</sup>以 ICESat/GLAS 卫星测高数据作为参考数据, SRTM-3 DEM 和 AW3D30 DEM 作为对比数据,分析了 TanDEM-X 90 在中国主要陆地区域的误差统计特征和空间分布规律;丁夏萌等<sup>[16]</sup>以高精度 ICESat-2 ATLAS 测高数据为评价数据,利用 GIS 统计分析、误差相关分析及数理统计的方法,对比分析了 DEM 的高程精度。而目前,以参考 DEM 为基础实现 InSAR 技术的 DEM 提取实验精度影响的研究还相对较少。

但实际上,无论是在基于 InSAR 技术的 DEM 重建实验中,还是在利用 InSAR 技术观测地表微小形变的实验中,采用何种研究数据、何种研究方法,参考 DEM 都是一种不可或缺的重要数据。时至今日,各种公开可供使用的 DEM 数据层出不穷,如 NASA 公司的 STRM DEM、ASTER\_GDEM, JAXA 的 ALOS DEM, USGS 的 GTOPO30、GMTED2010 等。他们之间尽管采用的坐标系和高程基准相同,但是

实验过程中应该使用何种 DEM,使用哪种分辨率的参考 DEM 数据提取的 DEM 质量更好,精度更高并没有相关文献明确指明。本文分别使用 12.5 m 的 ALOS DEM、30 m 的 STRM DEM、90 m 的 STRM DEM 分别对德兴市某区域的 DEM 数据进行提取,并以 ASTGTM DEM 数据为参考按照地形特征分别对其进行精度评定,以此探究不同分辨率参考 DEM 对 InSAR 提取 DEM 精度的影响。

## 1 实验部分

### 1.1 实验区概况

德兴市位于江西省东北部,经度范围:117°22'49" ~ 118°06'15", 纬度范围:28°38'25" ~ 29°17'13"。与乐平市、婺源县、玉山县等地接壤,属亚热带季风气候区,年平均温度 17 °C,最低气温零下 9 °C,最高达 42 °C,年平均降水毫升雨量丰富,植被茂盛。德兴市属多雨区,为全省的暴雨中心区域,每年的 5—7 月多为切变锋面气旋雨,7—9 月为热雷雨和台风雨。境内降雨量分布以东南、中部山区偏多,西北丘陵地区偏少,年雨量变差。德兴市地处中低山区,境内岗陵起伏延展,怀玉山脉从东部入境,纵贯中部伸向西南,形成东、南两面高峻,西、北渐次低平,向内侧倾斜的地形。德兴市大致山地占 44%,丘陵占 33%,低丘岗地占 23%。

由于不同地形的植被覆盖情况不同,进行 DEM 重建时的相干性差异较大。为更加科学地对比不同分辨率参考 DEM 对 InSAR 提取 DEM 精度影响,本文在德兴市境内划分 3 个实验区,每个实验区的面积约 112 km<sup>2</sup>。实验区 A:以缓斜坡为主,坡度范围为 0 ~ 10%;实验区 B:以陡坡为主,坡度范围为 10% ~ 20%;实验区 C:以峭坡为主,坡度范围为 20% ~ 45%。具体实验区及德兴市境内坡度分布如图 1 所示。

实验区 A、B、C 的具体地貌如图 2 所示。

### 1.2 研究数据

本实验过程中使用的数据包括:两景 Sentinel-1A 升轨影像组成干涉像对,对应的精密轨道文件,参考 DEM 数据 (12.5 m 分辨率的 ALOS DEM, 30 m、90 m 分辨率的 STRM DEM), 精度验证 DEM 数据 (ASTER\_

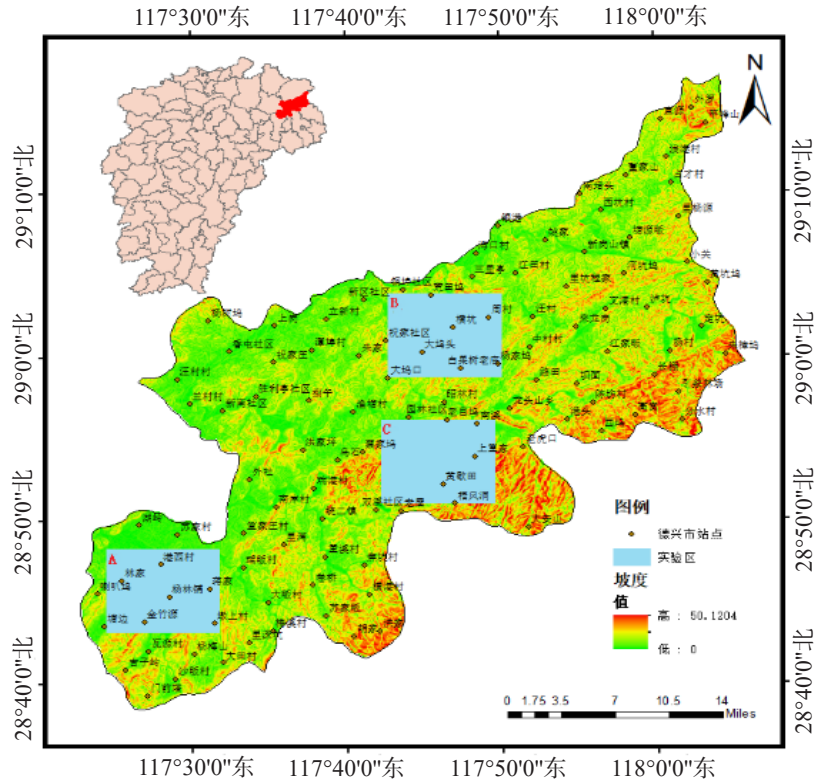


图1 实验区及德兴市境内坡度分布

Fig.1 Gradient distribution in experimental area and Deying

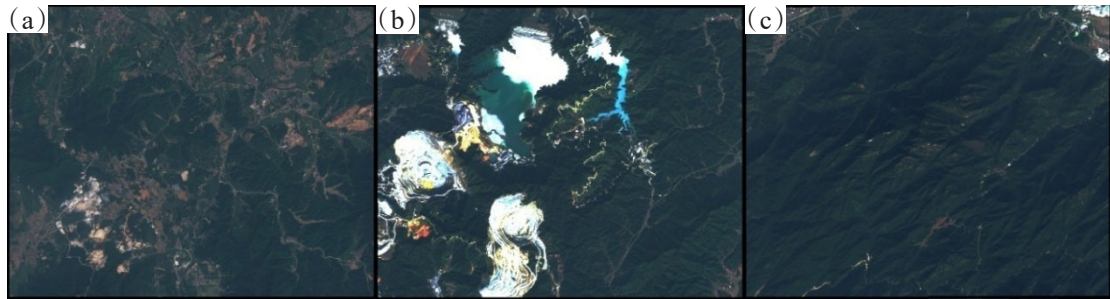


图2 实验区地貌情况:(a) 实验区A; (b) 实验区B; (c) 实验区C

Fig.2 Landform of experimental area:(a)experimental zone A; (b)experimental zone B;(c)experimental zone C

GDEM 30m)。具体的数据参数及介绍如下:

1)SAR数据。本文选取的两景 Sentinel-1A 升轨

影像下载自 Copernicus Open Access Hub,其基本数据参数如表1所列。

表1 实验所用的 Sentinel-1A 影像对参数

Table 1 Sentinel-1A image pair parameters used in experiments

卫星	成像模式	成像时间	波段	极化方式	升轨/降轨	入射角/(°)	时间基线/d	空间基线/m
Sentinel-1A	IW	2020-10-31	C	VV	升轨	39.086 77	12	48.985
Sentinel-1A	IW	2020-11-12	C	VV	升轨	39.087 81		

所用的两景 Sentinel-1A 影像对成像时间间隔为 12 天,较短的时间基线保证实验区内的地形变化较

小,进行干涉实验时相干性较大,有利于实验的顺利进行。

2)精密轨道文件。本次实验所用的精密轨道文件均可从 [https://s1qc.asf.alaska.edu/aux\\_poeorb](https://s1qc.asf.alaska.edu/aux_poeorb) 处下载,精密轨道文件的使用,可对处理过程中涉及的轨道参数进行修正,降低轨道误差引起的系统错误,从而提高实验精度。

3)DEM 数据。实验过程中分别使用 12.5 m 分

辨率的 ALOS DEM, 30、90 m 分辨率的 STRM DEM 作为参考 DEM 数据,进行 DEM 提取实验,分别提取出实验区 15 m×15 m 分辨率的 DEM,并将 ASTER\_GDEM 30 m DEM 重采样 15 m×15 m 作为验证数据,以检验提取后的 DEM 数据精度。实验过程中使用到的相关 DEM 数据参数如表 2 所列。

表 2 实验所用到的 DEM 数据参数

Table 2 DEM data parameters used in experiments

DEM 数据类型	分辨率/m	发布机构	投影	绝对高程误差
12.5 m ALOS DEM	12.5	JAXA	UTM/WGS84	<16 m
30 m STRM DEM	30	NASA 与 NIMA	UTM/WGS84	<16 m
90 m STRM DEM	90	NASA 与 NIMA	UTM/WGS84	<16 m
ASTER_G DEM	30	LP DAAC	UTM/WGS84	<12.1 m(日本)

## 2 InSAR 提取 DEM 基本原理及实验流程

### 2.1 InSAR 提取 DEM 的基本原理

InSAR 技术是对前后两组干涉对进行差分处理,并从干涉相位信息中去除各类因素造成相位变化的一种方法<sup>[7]</sup>。而使用 InSAR 技术提取实验区的 DEM 时,首先获取覆盖实验区的两幅 SAR 影像做相位干涉差分,经过影像裁剪、相位解缠、地理编码等一系列进行操作后去除其余相位和噪声后,将剩下的相位转换为高程,即可完成实验区的 DEM 提取工作。

其具体原理如下:假设获取地面点 P 的相位信息时,传感器的位置分别为  $S_1$ 、 $S_2$ (此信息可从卫星精密轨道数据中获取), $S_1$  到参考椭球面的高度  $H$  也可从精密轨道中获取, $S_1$  的视线与竖直面的夹角为  $\theta$ ,此时计算出  $S_1$ 、 $S_2$  之间的距离为基线  $B$ ,基线与水平面夹角为  $\alpha$ , $S_1$ 、 $S_2$  至观测点 P 的斜距分别为  $R$ 、 $R+\Delta R$ ,传感器雷达波长为  $\lambda$ ,如图 3 所示。

此时,雷达在  $S_1$  处观测目标点的相位如式(1):

$$\phi_1 = -\frac{4\pi}{\lambda} R \quad (1)$$

雷达在  $S_2$  处观测目标点的相位如式(2):

$$\phi_2 = -\frac{4\pi}{\lambda} (R + \Delta R) \quad (2)$$

雷达天线两次接收的信号相位差如式(3):

$$\phi = \phi_1 - \phi_2 = \frac{4\pi}{\lambda} \Delta R \quad (3)$$

在  $\triangle S_1S_2P$  中,根据余弦定理,构建出式(4):

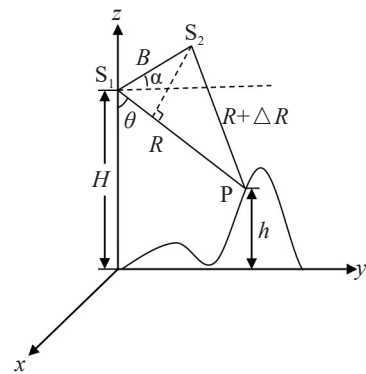


图 3 InSAR 获取某点原理示意

Fig.3 Schematic diagram of InSAR obtaining a certain point principle

$$(R + \Delta R)^2 = B^2 + R^2 - 2 \times B \times R \times \cos\left(\frac{\pi}{2} - \theta + \alpha\right) \quad (4)$$

同时,考虑到  $R \gg B$ , 且  $R \gg \Delta R$ , 则联立式(3)、式(4)解算得到式(5):

$$\cos\left(\frac{\pi}{2} - \theta + \alpha\right) = \sin(\theta - \alpha) = \frac{B}{2R} - \frac{(2R + \Delta R)\Delta R}{2BR} \approx -\frac{\Delta R}{B} = \frac{\lambda\phi}{4\pi B} \quad (5)$$

由反三角函数可以得到式(6):

$$\theta = \sin^{-1}\left(\frac{\lambda\phi}{4\pi B}\right) + \alpha \quad (6)$$

因此,依据式(7)计算出 P 点的高程,即 DEM 在 P 点处的值为:

$$h = H - R \cdot \cos \theta = H - \cos\left[\sin^{-1}\left(\frac{\lambda\phi}{4\pi B}\right) + \alpha\right] \quad (7)$$

## 2.2 多源参考数据下的DEM提取实验流程

使用多源参考数据提取DEM的实验流程主要包括:基线估算、影像配准、干涉图生成和干涉去平、自适应滤波和相干计算、相位解缠、轨道精炼和重去平,相位转高程与地理编码,生成数字高程模型。具体实验流程如图4所示。

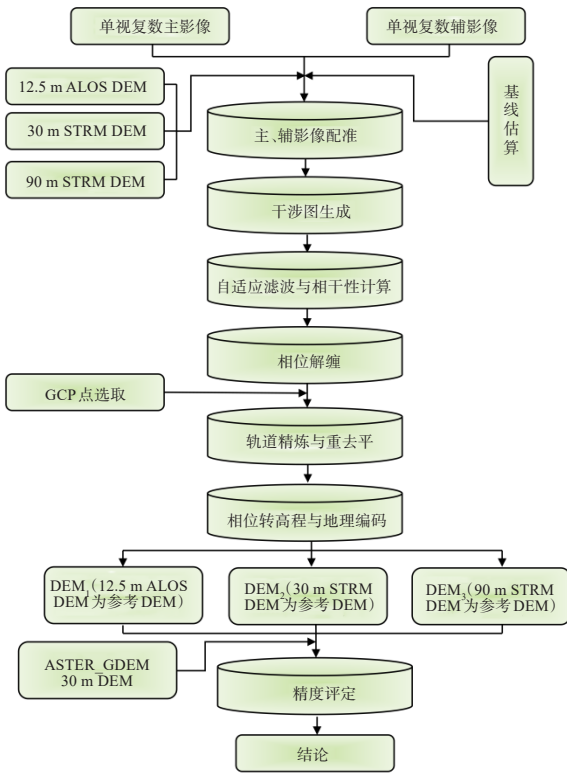


图4 多源参考数据下的DEM提取实验流程

Fig.4 DEM extraction experimental process under multi-source reference data

1)基线估算。实验过程中,本文选取2020年10月31日获取的影像为主影像,2020年11月12日的为辅影像。基线估算结果显示,两景影像之间的时间基线为12 d,  $2\pi$ 模糊高程为288.400 m,空

间基线为48.985 m,远小于临界基线5 700.692 m的十分之一,符合InSAR技术提取DEM的要求。

2)干涉图生成。基线估算检验合格的影像经过影像配准、1:3多视、干涉去平、相干处理后即可得到实验区的差分干涉图(以实验区A为例)。具体结果如图5所示。

3)自适应滤波与相干性计算。进干涉去平的差分干涉图仍存在一定的相位噪声,因此,在进行相干性计算之前,需要进行滤波去噪,本文选用Goldstein滤波方法,以减少相位噪声对实验结果的影像,提高干涉条纹的清晰度。

4)相位解缠。完成干涉去平、自适应滤波后得到位于 $(-\pi, \pi)$ 之间的相位数据,这样的相位数据丢失了 $2n\pi$ 的整周部分。因此,需要通过相位解缠找回丢失的部分,以得到实验区的真实相位值。实验中,本文选择最小费用流(Minimum Cost Flow)法进行相位解缠,这种方法可以获得全局最优的解缠结果,同时避免了相位误差从低质量区域传递到高质量区域<sup>[18]</sup>。

5)轨道精炼与重去平。轨道精炼与重去平主要是通过输入控制点(GCP)文件对轨道卫星的相位和轨道的偏移进行纠正。因此,在选取控制点时,应选择相干性高、高程变化小的区域,且控制点应该尽量分布于整个图像上,本文在选取控制点时,每个实验区各选择75个控制点。

6)相位转高程与地理编码。在地表未发生形变的平地区域,选择高相干性地面控制点,选择二次式 $y=k_0+k_1 \cdot rg+k_2 \cdot az$ ,求取轨道参数改正数,将InSAR得到的相位信息通过地理编码转换到高程信息并投影到指定地理坐标系下,最终结果生成分辨率为的DEM。

最终提取出实验区A、B、C处的分辨率DEM,考虑到采用不同参考DEM所提取得到的S1A DEM数据整体趋势相同,本文仅展示以30 m STRM DEM为外部DEM参考数据的S1A DEM如图6所示。

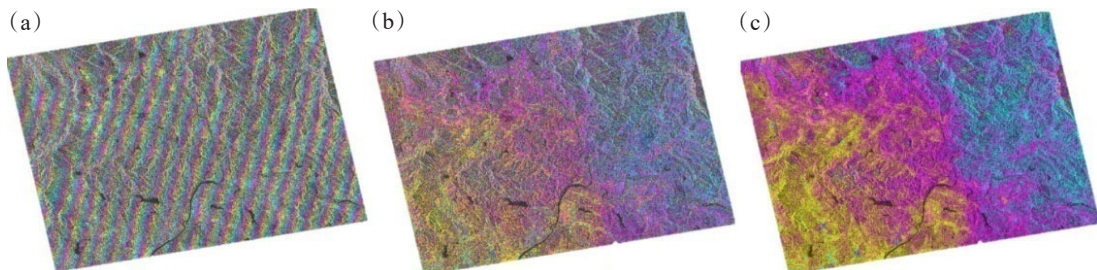


图5 实验区的差分干涉图:(a)差分干涉图;(b)去平后的差分干涉图;(c)滤波后的差分干涉图

Fig.5 Differential interferogram of experimental area: (a)differential interferogram; (b)differential interferogram after flattening; (c)differential interferogram after filtering

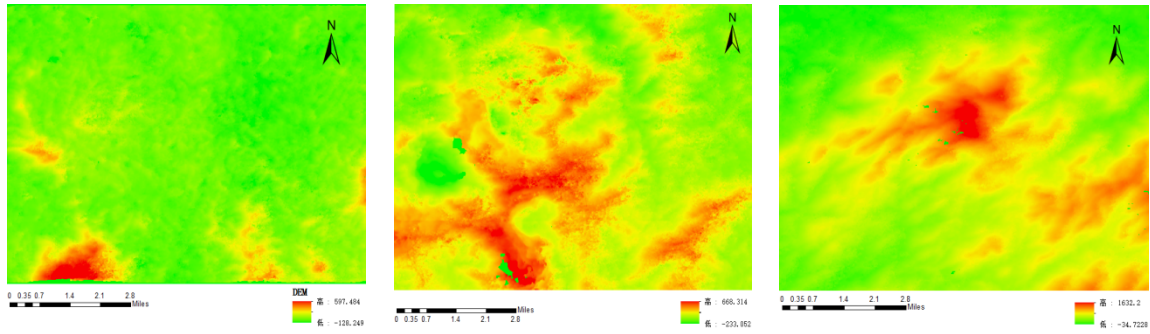


图 6 实验区 A、B、C 提取得到的 S1A DEM

Fig.6 S1A DEM extracted from experimental areas A, B, and C

### 3 DEM 的提取精度分析

为分析多源参考数据对 DEM 提取精度的影响, 本文采用检测点法对 DEM 提取结果进行分析, 并选择标准误差 (*Std*)、平均绝对误差 (*MAE*) 和均方根误差 (*RMSE*)、误差中值 (*Median*)、误差最大值 (*Max*)、误差最小值 (*Min*) 作为评价指标来衡量提取结果的精度。

如图 7 所示, 分别在实验区 A、B、C 所在的 DEM 上随机选取约 300 个检测点, 实验区 B、C 处由于部分监测点位于 DEM 空值或边缘处 (部分相距太近的监测点被舍弃), 最终提取研究区 A、B、C 处保留的检测点个数分别为 300、297、296。提取检测点处的高程值并与 ASTER\_GDEM 高程值作差, 计算出高程差值, 并依据式 (8) — 式 (10) 计算 DEM 提取的 *Std*、

*MAE*、*RMSE*、*Median*、*Max*、*Min*。经计算, 实验区 A、B、C 3 处的提取精度见表 3—表 5。

$$Std = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^N (H'_i - H_i)^2}{N - 1}} \quad (8)$$

$$MAE = \frac{\sum_{i=1}^N |H'_i - H_i|}{N} \quad (9)$$

$$RMSE = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^N (H'_i - H_i)^2}{N}} \quad (10)$$

式 (8) — 式 (10) 中:  $H'_i$  为提取到的 DEM 上检测点处的高程值;  $H_i$  为 ASTER\_GDEM 对应点处的高程值;  $N$  为实验区检测点总数; 误差中值即误差中位数, 即为检测点高程差排序后处于序列中间的数值; 误差最大最小值, 即检测点高程差中的最大最小值。

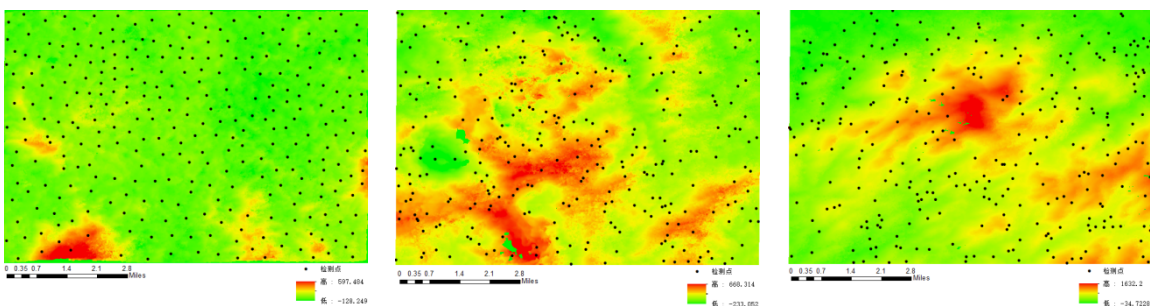


图 7 实验区 A、B、C 检测点所在位置

Fig.7 Location of detection points A, B, and C in experimental area

根据表 3—表 5 提取精度结果可知:

1) 根据实验区 A、B、C 处的实验结果, 使用 12.5 m 的 ALOS DEM 作为外源数据时, DEM 提取的均方根误差分别为 9.412、12.442、24.412 m, 而使用

90 m STRM DEM 时, DEM 提取的均方根误差 (*RMSE*) 分别为 10.293、13.152、25.293 m, 提取精度明显下降。由此可见, InSAR 提取 DEM 的精度受外源数据分辨率的影响, 参考 DEM 的分辨率越高,

表3 实验区A的提取精度

Table 3 Extraction accuracy of experimental area A

参考数据	Std/m	RMSE/m	MAE/m	Median/m	Max/m	Min/m
12.5 m ALOS DEM	10.350	9.412	8.713	0.916	44.998	-47.742
30 m STRM DEM	10.481	9.708	8.782	2.778	47.187	-48.016
90 m STRM DEM	10.751	10.293	9.284	3.508	48.062	-44.908

表4 实验区B的提取精度

Table 4 Extraction accuracy of experimental area B

参考数据	Std/m	RMSE/m	MAE/m	Median/m	Max/m	Min/m
12.5 m ALOS DEM	13.578	12.442	11.425	0.916	51.475	-52.586
30 m STRM DEM	13.784	12.708	11.522	1.899	52.257	-51.157
90 m STRM DEM	14.247	13.152	12.075	2.475	56.047	-57.257

表5 实验区C的提取精度

Table 5 Extraction accuracy of experimental area C

参考数据	Std/m	RMSE/m	MAE/m	Median/m	Max/m	Min/m
12.5 m ALOS DEM	20.350	24.412	16.713	1.257	60.047	-60.145
30 m STRM DEM	20.481	24.708	16.782	2.478	60.187	-61.578
90 m STRM DEM	20.751	25.293	17.284	3.568	61.462	-61.486

DEM的提取精度越高。

2)使用同一外源数据进行实验时,如使用12.5 m的ALOS DEM作为外源数据时,由于实验区A、B、C的地形分布(主要表现为坡度的差异)不同,在实验区A、B、C处的DEM提取的均方根误差分别为9.412、12.442、24.412 m,随着实验区坡度增大,提取精度也在不断降低,主要原因是在坡度较高的地区,激光雷达的回波宽波峰值降低,地面回波减少,这与前人的研究结论一致<sup>[19-20]</sup>。

## 4 结论

论文以3种不同分辨率的外源数据为基础,采用InSAR技术对不同地形进行边坡DEM提取,以ASTGTM DEM数据为参考,利用检测点法对DEM提取精度进行分析,可以得出以下结论:

1)基于InSAR技术提取得到的DEM,其精度与

外源数据的分辨率有较大关系,外源数据的分辨率越高,DEM提取精度越高;外源数据的分辨率越低,DEM提取精度越低。

2)DEM提取精度与地形特征有显著关系,且主要具有受坡度变化影响较大,监测区内地形坡度越大,DEM提取精度越低;地形坡度越小,DEM提取精度越高。

3)根据实验结果,在利用InSAR技术进行边坡DEM提取时,应在选择较高分辨率外源数据的基础上进行实地高程测量,以建立相应的误差改正模型,在保证提取结果精度的同时尽可能减少工作量。

## 参考文献:

- [1] 杜青松, 李国玉, 彭万林, 等. 利用InSAR技术获取高寒高海拔地区高精度DEM[J]. 测绘通报, 2021(3):44-49.
- [2] 付波霖, 耿仁方, 李颖, 等. 多频率InSAR提取沼泽湿地DEM精度对比分析[J]. 测绘通报, 2019(10):1-7.

- [3] 王利娟,李恒凯. 基于 InSAR 技术的离子型稀土矿区 DEM 提取分析[J]. 稀土, 2021, 42(2):56-64.
- [4] 李金超,高飞,陶庭叶,等. 基于 InSAR 技术的淮南矿区 DEM 重建及精度分析[J]. 地球物理学进展, 2019, 34(2): 435-441.
- [5] 李东,侯西勇. 沿海低山丘陵区 DEM 提取及精度分析[J]. 测绘通报,2021(增刊1):61-64.
- [6] 万雷,周春霞,鄂栋臣,等. 基于 InSAR 和 ICESat 的南极冰盖地区 DEM 提取和精度分析[J]. 冰川冻土,2015,37(5):1160-1167.
- [7] XIE Y Z, ZHU J J, FU H. Q, et al. A review of underlying topography estimation over forest areas by InSAR: theory, advances, challenges and perspectives[J]. Journal of Central South University, 2020, 27(4): 997-1011.
- [8] KARABÖRK H, MAKINECI H B, ORHAN O, et al. Accuracy assessment of DEMs derived from multiple SAR data using the InSAR technique[J]. Arabian Journal for Science and Engineering, 2021(46): 5755-5765.
- [9] 杨珍,孙鹏超,谢青,等. 高分三号卫星影像制作 DEM 的实验[J]. 测绘科学,2020, 45(3): 53-60.
- [10] 蒋厚军,廖明生,张路,等. 高分辨率雷达卫星 COSMO-SkyMed 干涉测量生成 DEM 的实验研究[J]. 武汉大学学报(信息科学版),2011,36(9):1055-1058.
- [11] 周伟,陈尔学,刘国林,等. 基于 ALOS 极化干涉 SAR 数据的 DEM 提取方法研究[J]. 遥感技术与应用,2013,28(1): 44-51.
- [12] 李新武,郭华东,李震. ENVISAT/ASAR 多角度干涉雷达数据山区 DEM 生成及精度分析[J]. 遥感学报, 2009, 13(2): 276-281.
- [13] 吴艳兰,胡海,胡鹏,等. 数字高程模型误差及其评价的问题综述[J]. 武汉大学学报(信息科学版), 2011, 36(5): 568-574.
- [14] 赵尚民,程维明,蒋经天,等. 资源三号卫星 DEM 数据与全球开放 DEM 数据的误差对比[J]. 地球信息科学学报, 2020,22(3):370-378.
- [15] 於佳宁,刘凯,张冰玥,等. 中国区域 TanDEM-X 90mDEM 高程精度评价及其适用性分析[J]. 地球信息科学学报, 2021,23(4):646-657.
- [16] 丁夏萌,张继贤,郭婧,等. 基于 ICESat-2 ATLAS 数据的 DEM 高程精度评价[J]. 测绘通报, 2022(12):84-90.
- [17] 王少特,张耀平,刘书瑶,等. 某矿山地表移动及岩层监测稳定性研究[J]. 有色金属科学与工程, 2023, 14(4): 543-552.
- [18] 郭乐萍,岳建平,岳顺. 基于 SARscape 的 InSAR 数据相位解缠方法研究[J]. 地理空间信息, 2018, 16(3):20-22.
- [19] 武文娇,章诗芳,赵尚民. SRTM1 DEM 与 ASTERGDEM V2 数据的对比分析[J]. 地球信息科学学报, 2017, 19(8): 1108-1115.
- [20] DAI Y Q, REN J W, SHEN X H, et al. Precision estimation and geomorphological analysis based on the DEM generated by InSAR: taking Damxung-Yangbajain area as an example[J]. Earth Quake Science, 2009, 22(3):263-269.

(责任编辑:王庆龙)