

引用格式: 沈富强, 刘飞, 张骏骁. 多平台国产 SAR 在复杂山区地形测绘中的精度对比与适用性[J]. 山地学报, 2025, 43(5): 776-786.
SHEN Fuqiang, LIU Fei, ZHANG Junxiao. Accuracy comparison and applicability of domestic SAR in different platforms for topographic mapping in complex mountain areas [J]. Mountain Research, 2025, 43(5): 776-786.

多平台国产 SAR 在复杂山区地形 测绘中的精度对比与适用性

沈富强^{1,2}, 刘飞^{2*}, 张骏骁³

(1. 四川大学 电子信息学院, 成都 610065; 2. 四川测绘地理信息局测绘技术服务中心, 成都 610083;
3. 齐鲁空天信息研究院, 济南 250101)

摘要: 中国西部复杂山区常年雨雾遮蔽, 光学影像获取困难, 严重制约 DEM (Digital Elevation Model) 获取与建模。国产机载、星载 SAR (Synthetic Aperture Radar) 凭借高重访、强穿透优势, 在地表形变监测与地形测绘中应用前景广阔, 但针对大高差山区的系统性测图研究仍属空白。本文分别采用高分三号、陆探一号卫星 SAR 与国产机载毫米波 SAR, 基于合成孔径雷达干涉测量技术 (Interferometric Synthetic Aperture Radar, InSAR) 生成试验区数字高程模型 (Digital Elevation Model, DEM) 并开展精度评定, 对比分析不同波段、不同平台 SAR 在复杂山区的测图能力。结果表明: (1) 机载毫米波 SAR DEM 中误差 2.292 m, 精度最高; 高分三号 UFS 模式次之, 中误差 4.677 m, 满足 1:10 000 地形图测绘规范; (2) 陆探一号因垂直基线偏小, 中误差 46.559 m, 精度受限。本研究首次实现多平台国产 SAR 生成 DEM 系统对比, 可以为国产 SAR 在复杂山区大比例尺测图中的应用提供技术依据与决策参考。

关键词: 数字高程模型 (DEM); 国产 SAR; 干涉测量; 复杂山区

中图分类号: P237

文献标志码: A

数字高程模型 (Digital Elevation Model, DEM) 是地表三维信息的数字化表达, 广泛应用于地形分析、环境监测、自然灾害评估等领域^[1-2]。DEM 获取主要依赖光学立体像对捕捉、激光雷达三维建模、合成孔径雷达干涉测量 (Interferometric Synthetic Aperture Radar, InSAR) 及野外测量等手段^[3]。

中国西南山区地势陡峭、气候复杂, 常年多云多雾, 传统野外测量效率低、成本高, 光学影像和激光点云数据质量严重受限^[4-5], 极大地制约了地形数据的采集工作。InSAR 技术凭借其全天时、全天候、强穿透性的优势, 受到国内外广泛关注^[6]。近年来, 随着合成孔径雷达 (Synthetic Aperture Radar,

SAR) 系统性能的持续提升, 成像理论不断完善, 应用领域不断拓展, SAR 技术已进入多平台、多波段、高分辨率协同发展的新阶段^[7]。

在星载 SAR 方面, 全球相继发射了多颗高性能 SAR 卫星, 波段和极化方式不断丰富, 时空分辨率不断提升, 显著提升了观测能力。欧洲空间局于 2014 年发射的 Sentinel-1 为地表监测、灾害管理等提供了免费高质量的 C 波段 SAR 数据。德国的 TerraSAR-X 利用 X 波段 SAR 生成了高精度的全球数字高程模型。日本 ALOS-2 卫星搭载具有更强穿透性的 L 波段传感器, 在地形测绘和灾害评估方面发挥重要作用。中国近年来也加快了 SAR 卫星体

收稿日期 (Received date): 2025-03-15; 改回日期 (Accepted date): 2025-10-22

基金项目 (Foundation item): 国家自然科学基金 (42230102)。[National Natural Science Foundation of China (42230102)]

作者简介 (Biography): 沈富强 (1987-), 男, 山东枣庄人, 博士研究生, 高级工程师, 主要研究方向: InSAR、多源数据融合。[SHEN Fuqiang (1987-), male, born in Zaozhuang, Shandong Province, Ph. D. candidate, senior engineer, research on InSAR and Multi-source data fusion] E-mail: joeq2015@sina.com

* 通讯作者 (Corresponding author): 刘飞 (1985-), 男, 博士, 高级工程师, 主要研究方向: 机载 SAR 测图、应急测绘。[LIU Fei (1985-), male, Ph. D., senior engineer, research on airborne SAR surveying, emergency surveying and mapping] E-mail: scyjch@qq.com

系建设,陆续发射了高分三号(Gaofen-3, GF-3)、环境减灾二号 E 星(HJ-2E)等多颗 SAR 卫星,特别是 L 波段的陆探一号(Lutan-1, LT-1),为森林监测和地质灾害预警等提供了高分辨率数据支持^[8-9]。

机载 SAR 方面,2006 年国外先后研制并成功用于 DEM 生成与形变监测^[10-12]。例如,Reigber 等利用 TopoSAR(Terrain Observation by Progressive Scans Synthetic Aperture Radar)系统首次使用 P 波段重轨干涉 SAR 制作 DEM;2008 年 JPL 研发了全极化干涉 SAR 系统 UAVSAR(Unmanned Aerial Vehicle Synthetic Aperture Radar),并将其应用于地表形变监测。2009 年巴西研究人员利用 OrbiSAR(Orbis Synthetic Aperture Radar)系统通过多次重复轨道飞行的方式获取 X 和 P 波段 SAR 数据,并采用 3 轨差分干涉反演三维地表。2010 年德国航空航天中心(Deutsches Zentrum für Luft-und Raumfahrt, DLR)设计了 F-SAR 系统搭载 5 波段全极化天线接收器,应用于地形测绘、森林调查等多个领域。国内中国科学院电子学研究所、中国航天科工集团二十三所等先后研制了多款全极化 SAR 系统,并在四川、陕西等多地开展了地形图测绘试验。

当前,基于 Sentinel-1、TerraSAR-X、ALOS-2 等国外 SAR 卫星平台的复杂山区地形测绘研究已较为深入。国内方面,随着高分三号、陆探一号等国产 SAR 卫星的成功发射,利用国产 SAR 数据开展地形测绘的应用逐步展开。已有研究利用国产 C 波段 SAR 数据实现了复杂地形区的 DEM 重建^[13],并对差分干涉监测精度进行了对比分析,指出垂直基线长度与工作波段选择对高程敏感性具有显著影响^[14]。近期亦有学者开始关注多平台国产 SAR 系统在复杂山区的应用效果与精度表现^[15-16],但总体而言,仍缺乏系统性的星载与机载平台联合分析,跨波段、跨平台的综合精度评估研究仍显不足。

本文以西南山区地形图测绘成果为研究对象,分别选取了高分三号、陆探一号、机载毫米波 SAR 等 3 种数据,从数据覆盖度、整体精度等方面对 3 类数据效果进行评估;通过分别与已有 1:10 000 DEM 数据及野外像控数据进行对比,深入分析 3 类数据的成果质量。研究成果不仅有助于全面评估不同 SAR 平台在高起伏地形条件下的适用性与局限性,也可以为未来国产 SAR 数据在工程测绘、灾害应急等实际业务中的推广应用提供坚实的技术支撑与科

学依据。

1 InSAR 生成 DEM 原理

1.1 星载 InSAR 生成 DEM 基本原理

InSAR 主要是利用雷达接收到的电磁波回波信号经过聚焦成像处理,得到不同角度的主辅复数影像,再经过精密的几何运算,解求得到 DEM。星载 SAR 获取干涉复数影像的方式主要包括:一是对地面观测区域进行重复的过境数据采集,以获取不同时刻的复数影像,该方式易受不同时间地物本身变化及卫星与地物距离变化的影响,难以获取高精度的基线参数^[17];二是通过卫星携带双天线或双星伴飞的方式获取地表信息,该方式对平台及其飞行姿态要求较高,获取影像相干性质量较高,不易受时间及空间等因素的影响。具体原理如图 1 所示, S_1 和 S_2 分别为获取主辅影像时卫星天线相位中心。

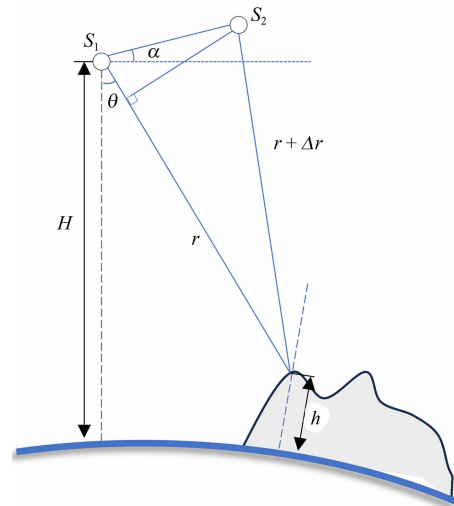


图 1 星载 InSAR 生成 DEM 原理图

Fig. 1 Schematic diagram of spaceborne InSAR DEM generation

根据几何空间关系可得知,地面点的高程 h 可表示为:

$$h = H - r \cos \theta \quad (1)$$

式中, H 为卫星高度; r 为主星天线相位中心到地面的斜距; θ 为卫星下视角。

由余弦定理可将式(1)转化为:

$$h = H - r \cos \left[90^\circ + \alpha - \arccos \left(\frac{\Delta r}{B} + \frac{B}{2r} - \frac{\Delta r^2}{2rB} \right) \right] \quad (2)$$

式中, α 为干涉基线水平方向的夹角; B 为干涉基线长度; Δr 为主星与辅星到达地面点的距离差^[18]。

星载 InSAR 获取 DEM 的处理技术流程主要包括 SAR 成像处理、主辅图像配准、干涉相位生成、去平地效应、干涉相位滤波、相位解缠和相高转换^[18-19], 具体如图 2 所示。

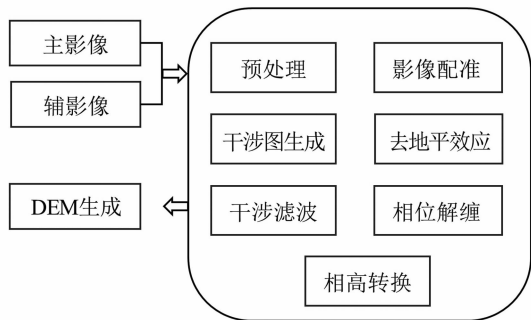


图 2 星载 InSAR 数据处理技术流程图

Fig. 2 Flowchart of spaceborne InSAR data processing

1.2 机载 InSAR 生成 DEM 基本原理

机载 InSAR 原理与星载类似, 主要通过一部天线不同时刻获取同一区域或两部天线同一时刻获取同一区域具有一定的视角差、具有强相干性的两幅复数影像。通过干涉处理解算出不同视角影像的相位差, 进而反算出观测区域的地形起伏。由于一部天线易受飞机空间位置精度的影响, 要求较高; 常用的机载 SAR 系统一般通过两部天线获取的视角差来实现相位差分效果。主要原理如图 3 所示, 其中 A_1 和 A_2 分别代表机载 SAR 两部天线的相位中心位置。

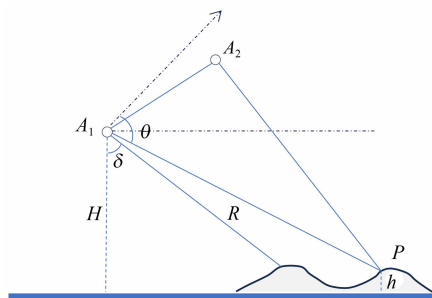


图 3 机载 InSAR 生成 DEM 原理图

Fig. 3 Schematic diagram of airborne InSAR DEM generation

地面点位置 P 可表示为:

$$P = [R \cos \theta, \sqrt{R^2 \sin^2 \theta - (H_A - h)^2}, H_A - h] \quad (3)$$

式中, H_A 为天线 A_1 的高度; h 为地面点 P 的高程; θ 为天线 1 的斜视角; B 为干涉基线长度; R 为 A_1 到地面点 P 之间的距离。

天线 A_2 至地面点 P 的距离可表示为:

$$|A_2 P|^2 = R^2 + B^2 - 2b_x R \cos \theta - 2b_z (H_A - h) - 2b_y \sqrt{R^2 \sin^2 \theta - (H_A - h)^2} \quad (4)$$

式中, (b_x, b_y, b_z) 为 A_2 相对 A_1 的矢量距离, 根据式 (3) 与式 (4) 可解算出 P 点的高度 h ^[14]。

机载 InSAR 获取 DEM 的技术流程主要包括影像预处理、粗配准和精配准、干涉处理、去地平效应、相位滤波、相位解纠缠, 并基于飞机 POS 文件进行干涉定标, 进一步进行相高转换等操作得到每个航线条带的 DEM 数据, 通过拼接的方式进行条带间的融合以得到区域的 DEM 数据^[20-21], 具体如图 4 所示。

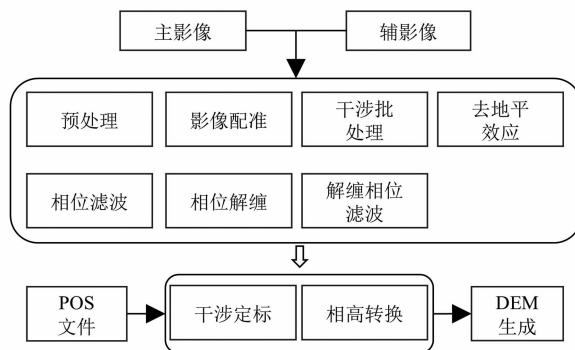


图 4 机载 InSAR 处理技术流程图

Fig. 4 Flowchart of airborne InSAR data processing

2 实验区与数据源

2.1 实验区概况

本文选取四川省甘孜藏族自治州泸定县海螺沟区域作为研究对象。该区域地形复杂, 最高海拔 7500 m, 最低海拔 1000 m, 为典型的高山峡谷地貌 (图 5)。地貌类型包括极高山、高山、峡谷、冰川及森林等, 区域垂直高差大、地形破碎、地物类型多样, 是中国西南典型复杂山地, 具有良好的研究代表性。该区域常年云雾覆盖, 经分析, 自 2021 年以来所获取的高分 7 号光学立体影像中, 满足 DSM/DEM 生产要求的有效影像仅有 1 幅, 但该幅影像仍存在局部云雾遮挡。长期的云雾天气限制了区域地形数据更新工作的开展。

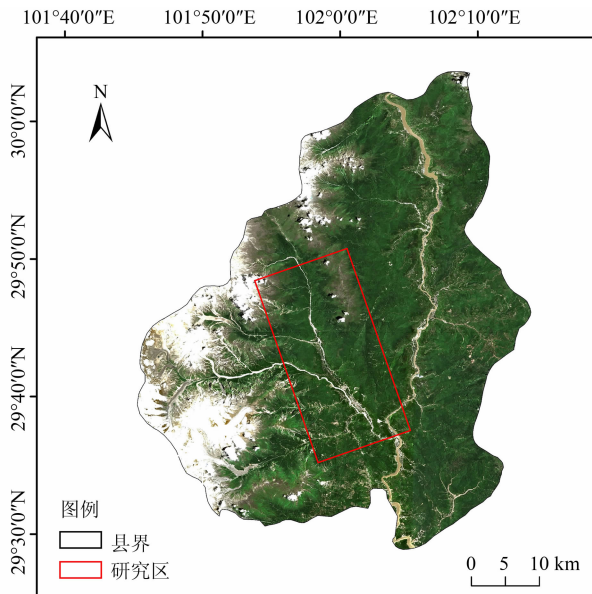


图5 实验区概况图

Fig. 5 Overview of study area

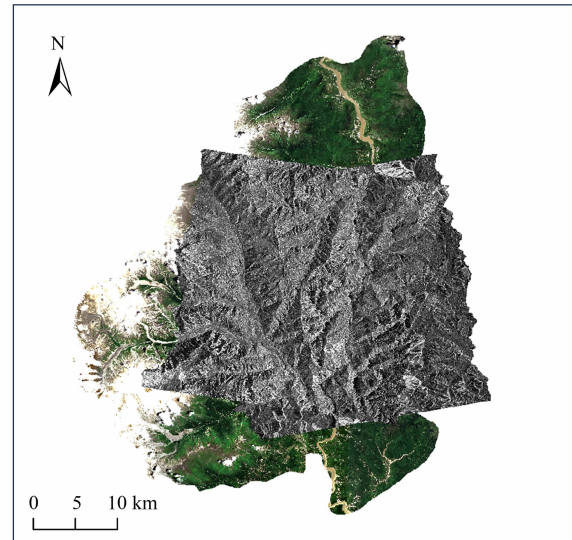


图6 高分三号 SAR 原始影像覆盖图

Fig. 6 Coverage of Gaofen-3 SAR original images

2.2 高分三号数据处理

高分三号卫星是中国自主研发的首颗民用 C 波段多极化合成孔径雷达的卫星,于 2016 年 8 月发射,轨道高度 755 km,平均重访周期小于 3 d^[22]。它是中国高分辨率对地观测系统重大专项(简称高分专项)民用领域中唯一的 SAR 卫星。具备 12 种成像模式,包括条带成像模式和扫描成像模式,是当前世界上成像模式最多的一颗卫星,具有高空间分辨率、高时间分辨率的优点^[23]。

本文选用 2023 年 1 月 26 日及 1 月 28 日 HH 极化方式下的 UFS 模式 SAR,分辨率为 3 m 的原始影像,垂直基线为 76.38 m,利用 SARscape 软件进行处理,采用最小费用流解缠方法,并利用 Frost 滤波,像素匹配优于 0.2 个像素,其原始数据具体分布及 DEM 结果如图 6、图 7 所示。

2.3 陆探一号卫星数据处理

陆探一号 SAR 卫星是中国第一组民用 L 波段干涉 SAR 卫星星座,它由一型两星组成,分别于 2022 年 1 月和 2 月发射升空。该星座以地表形变差分干涉测量任务为主,同时具备干涉测高和全极化影像获取功能。两颗卫星主要采用跟飞编队模式,平均轨道高度约 607 km。具有 6 种成像模式,空间分辨率范围为 3 ~ 30 m,单星轨道重访周期为 8 d,双星联合可以达到 4 d^[24]。L 波段 SAR 卫星可有效提升 InSAR 干涉的相干性,主要用于植被覆盖

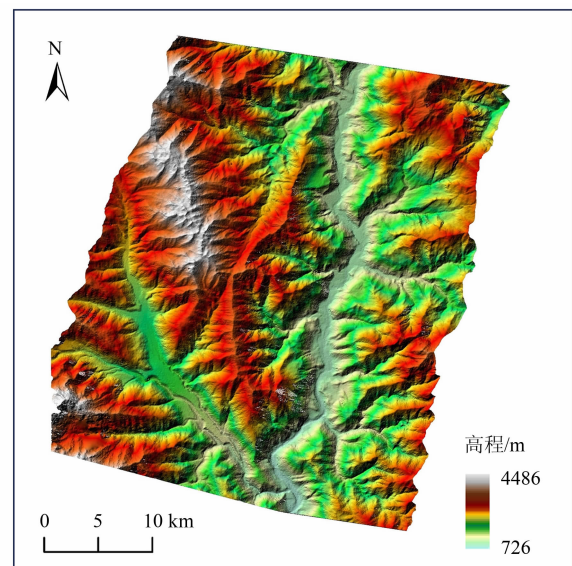


图7 高分三号 SAR 生成 DEM 效果图

Fig. 7 DEM generated by Gaofen-3 SAR

茂密区域的干涉测量,以及地震、地质等灾害形变监测场景。

本文选用 2024 年 1 月 1 日及 2024 年 1 月 29 日获取的条带 1 模式单极化 HH 的数据,分辨率为 3 m,垂直基线为 98.324 m,采用 SARscape 软件,并利用精密轨道数据对卫星轨道数据进行校正以提升干涉精度,选取 Delaunay MCF (Delaunay Minimum Cost Flow) 方法进行解缠,使用自适应滤波方法进行处理。其具体分布及 DEM 结果如图 8、图 9 所示。

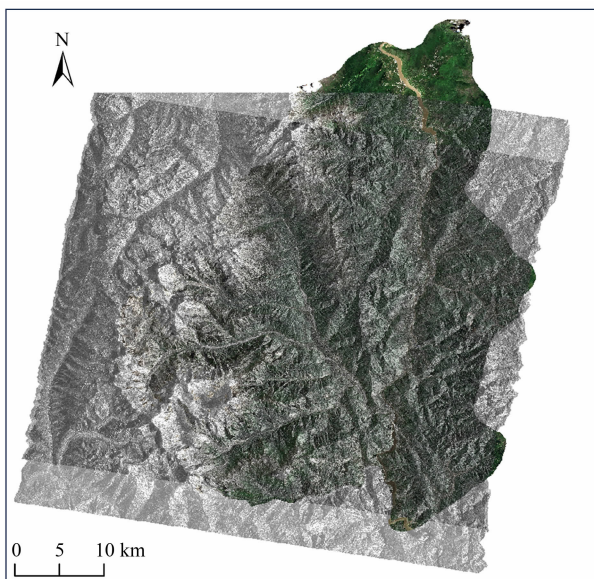


图8 陆探一号 SAR 原始影像覆盖图
Fig. 8 Coverage of LuTan-1 SAR original images

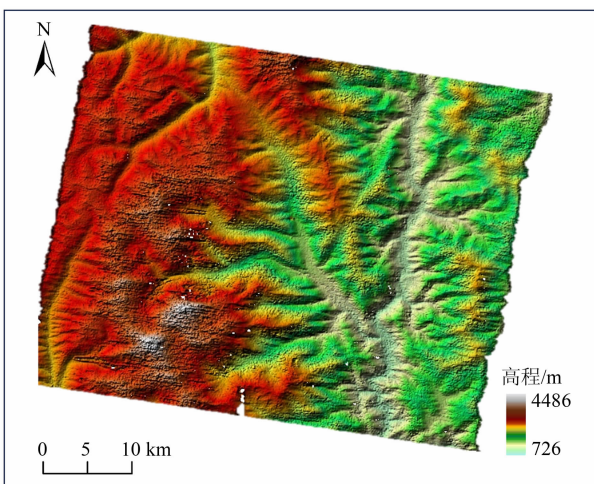


图9 陆探一号 SAR 生成 DEM 效果图
Fig. 9 DEM generated by LuTan-1 SAR

2.4 机载毫米波 SAR 数据处理

本文机载 SAR 采用毫米波 SAR 载荷系统,该系统由北京无线电测量研究所研制生产,高度集成了六条天线于一个天馈单元内,其采用水平极化和垂直极化交替发射,水平极化和垂直极化同时接收雷达回波信号,测量数据为极化散射矩阵^[19]。该系统采用 Ka 波段的电磁波,波长 0.008 m,中心频率 35 GHz。考虑到地形起伏对数据质量的影响,在航线规划时,先利用测区粗精度 DEM 数据计算测区的坡度和坡向,计算叠掩区域,通过不同航向的数据获取,并分别对数据进行处理后再开展数据融合,以

消除叠掩影响^[25-26]。

本文选用 2020 年 10 月 9 日至 10 日获取的机载毫米波数据作为原始数据,分辨率为 0.2 m,具体航线分布如图 10 所示。其中最长基线约 0.313 m,最短基线长约 0.031 m,最长、最短基线之比约为 10 倍,采用多基线解缠方法,利用 KinSAR 软件的自适应滤波方法进行地形提取。具体 DEM 效果如图 11 所示。



图10 机载毫米波 SAR 原始影像获取航线图
Fig. 10 Flight path of airborne millimeter-wave SAR original data acquisition

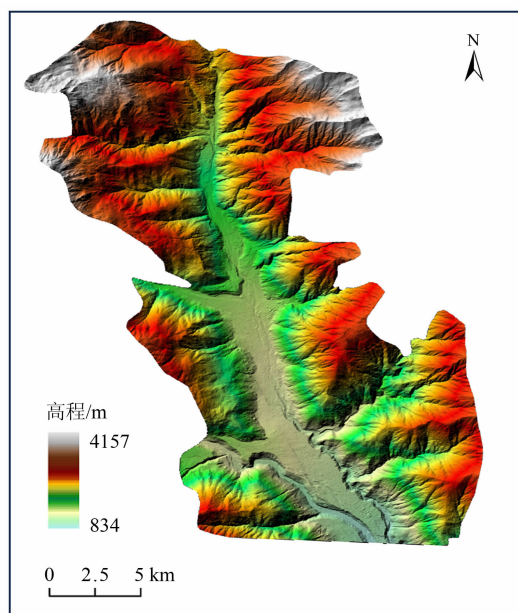


图11 机载毫米波 InSAR 生成 DEM 效果图
Fig. 11 DEM generated from airborne millimeter-wave InSAR

本文所使用的机载毫米波 SAR 数据采集于 2020 年,而星载高分三号与陆探一号数据分别采集于 2023—2024 年,时间跨度较大。考虑到海螺沟地

区地质稳定,研究区域在该时间尺度内未见显著地表改造与冰面迁移,且研究目的主要在于不同平台间系统精度比较而非绝对地形变化监测,因此可认为地表形态在该时间尺度内总体稳定。

2.5 开源 DEM 精度分析与选取

为确保所生产的 DEM 精度达到最优,在 InSAR 数据处理所用参考 DEM 的选取上比对了当前精度最优的开源 DEM 成果,具体如图 12 所示,主要包括 SRTM (Shuttle Radar Topography Mission) 和哥白尼数字高程模型(Copernicus DEM, COP-DEM)。

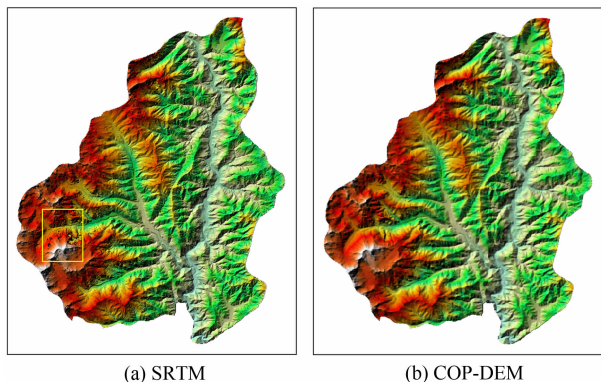


图 12 SRTM 与 COP-DEM 山体阴影图对比

Fig. 12 Comparison of SRTM and COP-DEM hillshade maps

SRTM 数字高程模型是由美国航空航天局 (NASA) 和美国国家地理空间情报局 (NGA) 联合实施的一项全球地形测绘任务。该任务于 2000 年完成,通过机载雷达干涉测量技术获取全球 $60^{\circ}\text{N} \sim 56^{\circ}\text{S}$ 范围内的地形数据。SRTM DEM 提供了 30 m 和 90 m 两种空间分辨率,垂直精度约为 16 m。

哥白尼数字高程模型是欧洲空间局 (ESA) 为欧洲联合地球观测计划 (Copernicus) 开发的一个全球数字高程模型项目,也被称为 COP-DEM。它是通过整合多源遥感数据(主要是 TanDEM-X 双星数据)生成的全球数字高程模型。其中, GLO-30 的空间分辨率为 30 m,覆盖全球陆地表面。该模型在高精度和一致性方面具有优势,并在极区、山区等复杂地形区域表现优异。

为验证以上两种 DEM 在复杂山区的精度,本文以区域 1:10 000 基础地形数据为参考,随机选取 100 个点与已有 DEM 成果对比,并利用高程中误差 σ 作为精度评价指标^[28-29]。公式如下:

$$\sigma = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{k=1}^n (Z_k - z_k)^2} \quad (5)$$

式中, n 为点数量; k 为点位号; Z_k 为观测值; z_k 为真值。

经分析,在部分区域 SRTM 存在区域噪点, COP-DEM 整体表现较好。在中误差上, COP-DEM 为 7.242 m, SRTM 为 7.937 m, COP-DEM 精度在西部复杂山区更高。因此,本文选用开源的 COP-DEM 进行 InSAR 处理结果更为可靠。

3 精度与比较分析

3.1 与已有 DEM 精度对比

为确保精度评定的准确性,本文选取已有 1:10 000 DEM 成果进行对比分析。本文验证区域所覆盖 6 幅 1:10 000 DEM 数据的现势性为 2021 年,避免了地表变迁造成的误差。依据样本点选取均匀分布的原则,随机选取共计 85 个点对数据进行对比分析,其主要分布如图 13 所示。

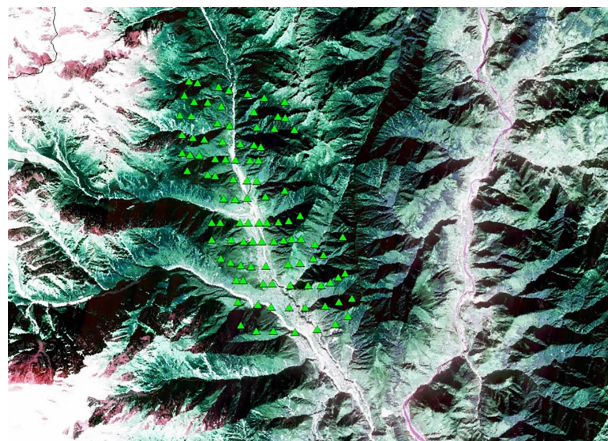


图 13 随机选取对比点分布图

Fig. 13 Distribution of randomly selected comparison points

经对比分析,三类国产 SAR 数据生产的 DEM 的中误差分别为:高分三号为 12.085 m, 陆探一号为 50.8 m, 机载毫米波为 6.119 m, 各点位高程如图 14 所示。

在此基础上,本文利用已有 DEM 数据生成坡度图数据,对不同坡度下三种成果的高程精度进行对比分析(图 15)。经分析,机载 SAR 数据表现较好,高分三号数据次之,陆探一号数据较差。

如表 1 所示,按坡度分级统计三种数据与已有

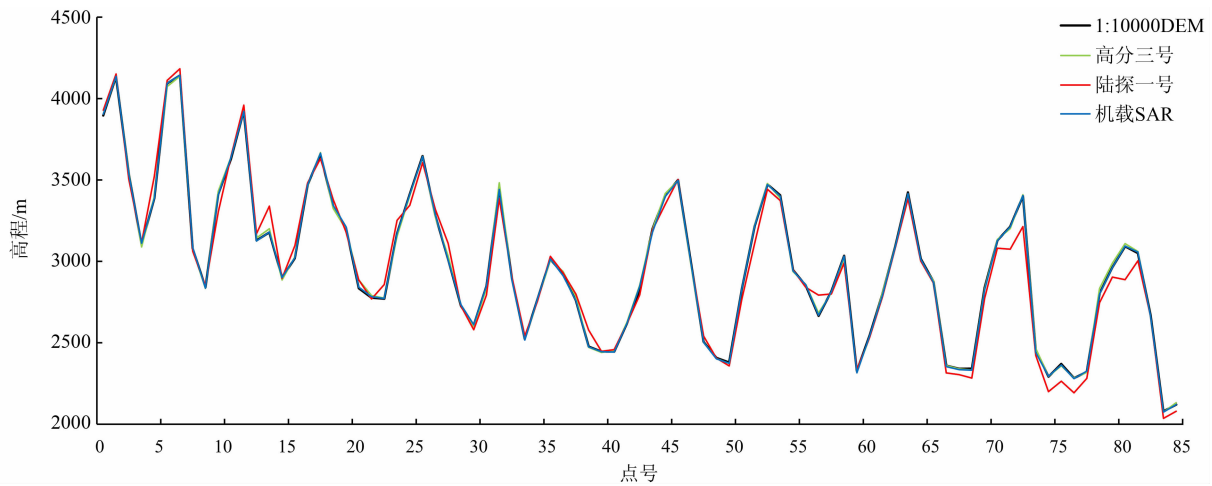


图 14 三种成果 DEM 与 1:10 000 成果对比图

Fig. 14 Three resultant DEMs vs. 1:10 000 reference DEM

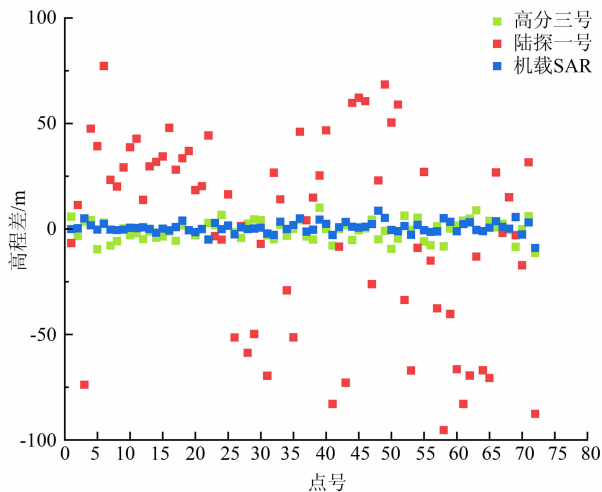


图 15 不同坡度下三种成果 DEM 高程差分析图

Fig. 15 Elevation difference analysis of three DEMs by slope gradient

表 1 不同坡度下三种成果高程中误差对比

Tab. 1 Comparison of elevation RMSE for the three results by slope gradient

坡度/(°)	高程中误差/m		
	高分三号	陆探一号	机载 SAR
<30	11.266	44.100	5.738
30~40	11.494	46.604	5.949
>40	16.083	62.077	6.909

DEM 的高程差值,并计算各坡度区间的高程中误差以评估坡度对精度的影响。分析对比发现,随着坡

度的增加,DEM 精度随之下降,坡度 $< 40^\circ$ 的情况下,精度影响较小,坡度增加到一定程度后对 DEM 的影响变大。

3.2 野外像控点对比

在以上对比的基础上,采用野外像控点的方式对成果 DEM 进行精度对比,野外像控点的分布具体如图 16 所示。

考虑到野外作业的通达性,像控点采集区域多分布于坡度较低区域。同时,由于像控点获取的高程值为大地高,本研究旨在分析数据总体质量,并未对其进行高程异常改正,主要分析各像控点与 DEM 成果的具体差值,具体如图 17 所示。

通过简单的常数改正后对比分析,机载毫米波 SAR 的中误差为 2.292 m,高分三号的为 4.677 m,陆探一号为 46.559 m。

在地物细节表达上,机载 SAR 的精细度明显优于高分三号数据(图 18)。对于西部山区地形平缓,植被覆盖度较低区域,Ka 波段毫米波 InSAR 数据处理得到的 DEM 精度较高,可满足 1:10 000 DEM 数据精度要求。在高海拔、大落差、高植被覆盖区域,机载 SAR 测图也具备良好的测图潜力。

3.3 分析讨论

对比分析表明,InSAR 生产的 DEM 精度受时间去相干、植被覆盖、基线设计及相位解缠算法等多因素共同影响。不同波段 SAR 的穿透能力与相干特性对 DEM 精度影响显著。机载 Ka 波段 SAR 波长极短、相位灵敏度高,对地表微小起伏响应显著,具



(a) 野外控制点布设图

(b) 野外控制点采集

图 16 野外像控点布设分布图

Fig. 16 Distribution of field ground control points (GCPs)

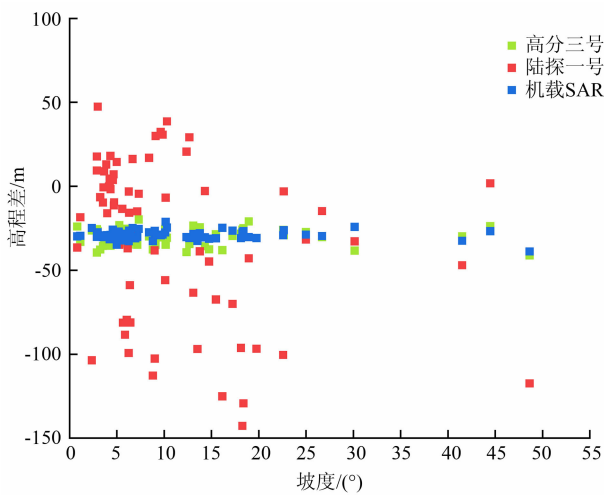
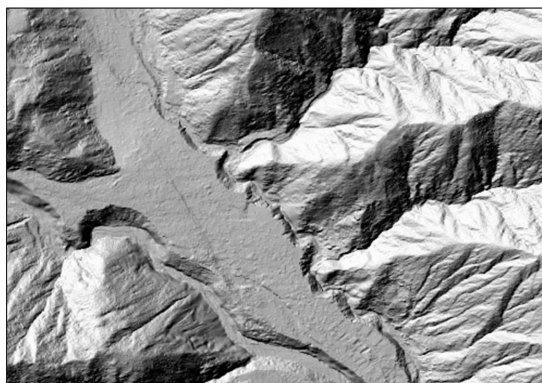


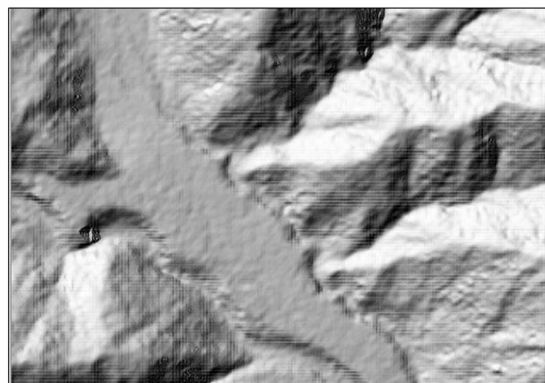
图 17 三种成果 DEM 与野外像控点对比图

Fig. 17 Comparison of three resultant DEMs with field Ground Control Points (GCPs)

备天然的高精度地形建模优势。其机动平台可灵活调整航向和视角,通过多角度成像有效减弱山区叠掩与阴影影响,有效保障了大高差区域的 DEM 精度,展现出在西南复杂山地高精度测绘中的应用潜力。高分三号 C 波段 SAR 虽相位灵敏度较低、穿透力有限,但 UFS 模式成像精细、几何稳定,且短时间基线有效抑制了时变失相干,在坡度 $< 40^\circ$ 的中低山区区域可稳定生成满足 1:10 000 测图精度的 DEM。陆探一号 L 波段 SAR 具较强穿透能力和相干性,本应适用于高植被覆盖区,但其当前跟飞模式垂直基线过小、波长较长,导致高程灵敏度不足、相位解缠易失稳,微小噪声即被放大为显著高程误差。因此, L 波段数据需通过算法改进,方能充分发挥其在复杂山区地形测绘中的潜力。



(a) 机载SAR生成DEM山体阴影图



(b) 高分三号生成DEM山体阴影图

图 18 机载 SAR 与高分三号生成 DEM 效果对比

Fig. 18 Comparison of DEMs generated by airborne SAR and Gaofen-3

本研究受到研究区域极端环境及数据资源的制约,在精度解读时存在一定的局限性。本文对比数据存在一定的时相差异,考虑到该区地质构造稳定,所以忽略了细微变化,故此比较可视为不同 SAR 系统潜力的横向评估,而非同一时点的绝对测量对比。本文随机检查点与野外像控点受通达性限制,多集中于低坡谷地和道路,缺乏高海拔、大坡度($>40^\circ$)、冰川及高植被区的代表性检验。

4 结论

本文对国产化 SAR 数据在西部山区数字高程模型(DEM)构建中的应用进行了深入研究。通过对国产星载、机载 SAR 在西部测图应用中的精度进行系统对比,评估了国产 SAR 在西部地形图生产中的适用性与应用潜力。

(1)高分三号 SAR 卫星 UFS 模式生成的 DEM 精度可以满足 1:10 000 测图的精度需求,在中低坡度($<40^\circ$)区域具有良好的应用稳定性,适用于基础地形数据更新。

(2)机载 SAR 生成的 DEM 中误差为 2.292 m,精度最高。考虑到短波长的高相位灵敏度优势,其在高海拔、起伏剧烈、植被覆盖复杂的地区表现优越,适合用于云雨复杂山区高精度测绘、地质灾害等场景。

(3)陆探一号 SAR 当前跟飞模式生成的 DEM 精度较差,垂直基线较小造成相位解缠中高程灵敏度过低,限制了其在地形测绘方面的能力,更适用于地表变化监测。

综上所述,国产 SAR 数据在西部山区地形图更新方面具有较大的应用潜力。特别是高分三号和机载毫米波 SAR 技术,能够为西部复杂山区的地形测绘提供高精度的 DEM 成果。本研究为进一步提高国产 SAR 数据在复杂地形条件下的应用效果奠定了基础,未来将继续探索优化测绘精度的方法,以推动国产 SAR 数据在地理信息领域的广泛应用。

参考文献(References)

[1] 李志林,朱庆,谢潇.数字高程模型[M].3版.北京:科学出版社,2017:2-10. [LI Zhilin, ZHU Qing, XIE Xiao. Digital elevation model [M]. 3rd ed. Beijing: Science Press, 2017: 2-10]

[2] 汤国安.我国数字高程模型与数字地形分析研究进展[J].地理学报,2014,69(9):1305-1325. [TANG Guoan. Progress of DEM and digital terrain analysis in China [J]. Acta Geographica Sinica, 2014, 69(9): 1305-1325] DOI: 10.11821/dlxb201409006

[3] 刘国祥,丁晓利,李志林,等.使用 InSAR 建立 DEM 的试验研究[J].测绘学报,2001,30(4):336-342. [LIU Guoxiang, DING Xiaoli, LI Zhilin, et al. Experimental investigation on DEM generation through InSAR [J]. Acta Geodaetica et Cartographica Sinica, 2001, 30(4): 336-342] DOI: 10.3321/j.issn:1001-1595.2001.04.012

[4] 毕瑞,甘淑,袁希平,等.复杂地貌无人机遥感 3D 场景构建[J].山地学报,2022,40(1):151-164. [BI Rui, GAN Shu, YUAN Xiping, et al. 3D scene construction of complex landforms based on UAV remote sensing [J]. Mountain Research, 2022, 40(1): 151-164] DOI: 10.3969/j.issn.1008-2786.2022.1.sdx202201012

[5] 梁志,师宇,丁伟宸,等.山地地形下激光雷达风速的精度验证与模拟[J].山地学报,2022,40(2):317-328. [LIANG Zhi, SHI Yu, DING Weichen, et al. Verification of LiDAR accuracy and wind simulation in mountainous terrain [J]. Mountain Research, 2022, 40(2): 317-328] DOI: 10.16089/j.cnki.1008-2786.000674

[6] 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. [DU Qingsong, LI Guoyu, PENG Wanlin, et al. Acquiring high-precision DEM in high altitude and cold area using InSAR technology [J]. Bulletin of Surveying and Mapping, 2021(3): 44-49] DOI: 10.13474/j.cnki.11-2246.2021.0076

[7] ZHANG Wenting, ZHU Wu, TIAN Xudong, et al. Improved DEM reconstruction method based on multibaseline InSAR [J]. IEEE Geoscience and Remote Sensing Letters, 2021, 19: 1-5. DOI: 10.1109/LGRS.2021.3069239

[8] KUGLER F, SCHULZE D, HAJNSEK I, et al. TanDEM-X Pol-InSAR performance for forest height estimation [J]. IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing, 2014, 52(10): 6404-6422. DOI: 10.1109/TGRS.2013.2296533

[9] WIMMER C, SIEGMUND R, SCHWABISCH M, et al. Generation of high precision DEMs of the Wadden Sea with airborne interferometric SAR [J]. IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing, 2000, 38(5): 2234-2245. DOI: 10.1109/36.868881

[10] LI Xinwu, GUO Huadong, LI Zhen. DEM generation and accuracy analysis on rugged terrain using ENVISAT/ASAR multi-angle InSAR data [J]. Journal of Remote Sensing, 2009, 13(2): 276-281. DOI: 10.3321/j.issn:1007-4619.2009.02.015

[11] BAUMGARTNER S, GABELE M, GEBERT N, et al. Digital beamforming and traffic monitoring using the new F-SAR system of DLR [C]//Proceedings of International Radar Symposium (IRS). Cologne, Germany, 2007: 5

- [12] SURI S, REINARTZ P. Mutual-information-based registration of TerraSAR-X and ikonos imagery in urban areas [J]. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 2010, **48**(2): 939–949. DOI: 10.1109/TGRS.2009.2034842
- [13] 丁赤飏, 刘佳音, 雷斌, 等. 高分三号 SAR 卫星系统级几何定位精度初探[J]. *雷达学报*, 2017, **6**(1): 11–16. [DING Chibiao, LIU Jiayin, LEI Bin, et al. Preliminary exploration of systematic geolocation accuracy of GF-3 SAR satellite system [J]. *Journal of Radars*, 2017, **6**(1): 11–16] DOI: 10.12000/JR17024
- [14] 肖儒雅, 王迅, 孙静怡, 等. 国产 SAR 卫星差分干涉测量地表面形变监测比较[J]. *武汉大学学报(信息科学版)*, 2025, **50**(8): 1517–1526. [XIAO Ruya, WANG Xun, SUN Jingyi, et al. Comparisons of differential interferometry of Chinese SAR satellites in ground deformation monitoring [J]. *Geomatics and Information Science of Wuhan University*, 2025, **50**(8): 1517–1526] DOI: 10.13203/j.whugis20240468
- [15] 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 interferometric of Lutan-1 satellite: A case study of Datong [J]. *Geomatics and Information Science of Wuhan University*, 2025, **50**(11): 2187–2197] DOI: 10.13203/j.whugis20240424
- [16] 宋鑫友, 张磊, 李涛, 等. 陆探一号干涉 SAR 在轨测试阶段基线精化与 DEM 精度分析[J]. *测绘学报*, 2024, **53**(10): 1920–1929. [SONG Xinyou, ZHANG Lei, LI Tao, et al. Baseline refinement and DEM accuracy analysis during the in-orbit test phase of LT-1 SAR [J]. *Acta Geodaetica et Cartographica Sinica*, 2024, **53**(10): 1920–1929] DOI: 10.11947/j. AGCS. 2024. 20230540
- [17] ZHANG Wenjun, WANG Weihong, CHEN Luwan. Constructing DEM based on InSAR and the relationship between InSAR DEM's precision and terrain factors [J]. *Energy Procedia*, 2012, **16**: 184–189. DOI: 10.1016/j.egypro.2012.01.031
- [18] 刘国祥, 陈强, 罗小军, 等. InSAR 原理与应用[M]. 北京: 科学出版社, 2019: 70–79. [LIU Guoxiang, CHEN Qiang, LUO Xiaojun, et al. InSAR principle and applications [M]. Beijing: Science Press, 2019: 70–79]
- [19] 胡东明, 隋立春, 丁明涛. 困难地区 InSAR 技术和加权融合的 DEM 生成[J]. *测绘通报*, 2020(2): 142–146. [HU Dongming, SUI Lichun, DING Mingtao. DEM generation in difficult areas based on InSAR and weighted fusion [J]. *Bulletin of Surveying and Mapping*, 2020(2): 142–146] DOI: 10.13474/j.cnki.11-2246.2020.0061
- [20] 丁赤飏, 李芳芳, 胡东辉, 等. 机载干涉合成孔径雷达数据处理技术[M]. 北京: 科学出版社, 2017: 227–252. [DING Chibiao, LI Fangfang, HU Donghui, et al. Airborne interferometric synthetic aperture radar data processing technology [M]. Beijing: Science Press, 2017: 227–252]
- [21] 李永杰. 机载毫米波 InSAR 生成高精度 DEM/DOM 方法研究[D]. 北京: 中国地质大学(北京), 2020: 9–17. [LI Yongjie. Research on DEM/DOM generation method for airborne millimeter-wave InSAR [D]. Beijing: China University of Geosciences (Beijing), 2020: 9–17] DOI: 10.27493/d.cnki.gzdzy.2020.000617
- [22] 杨珍, 孙鹏超, 谢青, 等. 高分三号卫星影像制作 DEM 的试验[J]. *测绘科学*, 2020, **45**(3): 53–60. [YANG Zhen, SUN Pengchao, XIE Qing, et al. The experiment of making DEM by GF3 satellite images [J]. *Science of Surveying and Mapping*, 2020, **45**(3): 53–60] DOI: 10.16251/j.cnki.1009-2307.2020.03.009
- [23] SHE Zhishun, GRAY D A, BOGNER R E, et al. Three-dimensional space-borne synthetic aperture radar (SAR) imaging with multiple pass processing [J]. *International Journal of Remote Sensing*, 2002, **23**(20): 4357–4382. DOI: 10.1080/01431160210153075
- [24] 余海坤, 王微, 王晓娜. 多源参考数据下陆探一号 DEM 精度分析——以河南某区域为例[J]. *有色金属(矿山部分)*, 2024, **76**(4): 191–198. [YU Haikun, WANG Wei, WANG Xiaona. Analyze the accuracy of DEM generated from LT-1 satellite imagery in the context of multiple reference data sources: A certain region in Henan Province as an example [J]. *Nonferrous Metals (Mining Section)*, 2024, **76**(4): 191–198] DOI: 10.3969/j.issn.1671-4172.2024.04.025
- [25] 李爽, 王栋, 王立程, 等. 基于机载多角度 InSAR 技术的复杂地形高精度 DEM 重建方法[J]. *信号处理*, 2024, **40**(3): 460–470. [LI Shuang, WANG Dong, WANG Licheng, et al. High precision DEM generation of complex terrain based on airborne multi-angle InSAR [J]. *Journal of Signal Processing*, 2024, **40**(3): 460–470] DOI: 10.16798/j.issn.1003-0530.2024.03.005
- [26] LIU Fei, LI Shuang, JING Yaoquan, et al. Precision terrain modeling approach in complex mountainous areas based on compact UAV Ka-InSAR data [J]. *IEEE Journal on Miniaturization for Air and Space Systems*, 2023, **4**(3): 257–266. DOI: 10.1109/JMASS.2023.3276949
- [27] 高延东, 郑南山, 张艳锁, 等. 基于相位质量融合估计与信息滤波的相位解缠方法[J]. *测绘学报*, 2024, **53**(10): 1910–1919. [GAO Yandong, ZHENG Nanshan, ZHANG Yansuo, et al. A phase unwrapping method based on phase quality fusion estimation and information filtering [J]. *Acta Geodaetica et Cartographica Sinica*, 2024, **53**(10): 1910–1919] DOI: 10.11947/j. AGCS. 2024. 20230247
- [28] 潘紫阳, 万阿芳, 王烽, 等. 基于时变多项式的 InSAR 轨道误差去除和 DEM 估计[J]. *测绘通报*, 2024(8): 145–150. [PAN Ziyang, WAN Afang, WANG Feng, et al. Modeling for InSAR orbit error based on time-varying polynomials to estimate

- DEM [J]. *Bulletin of Surveying and Mapping*, 2024(8): 145 – 150] DOI: 10.13474/j.cnki.11-2246.2024.0825
- [29] 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. [WU Yanlan, HU Hai, HU Peng, et al. A review on the issues in DEM error and DEM quality assessment [J]. *Geomatics and Information Science of Wuhan University*, 2011, **36**(5): 568 – 574] DOI: 10.13203/j.whugis2011.05.018
- [30] 张双成, 王铭辉, 杨娜, 等. 国产航天宏图一号 SAR 卫星数据干涉测量重建 DEM 精度验证与分析[J]. *遥感学报*, 2025, **29**(5): 1290 – 1304. [ZHANG Shuangcheng, WANG Minghui, YANG Na, et al. SAR satellite data from domestic PIESAT-1 interferometric reconstruction: DEM accuracy verification and analysis [J]. *National Remote Sensing Bulletin*, 2025, **29**(5): 1290 – 1304] DOI: 10.11834/jrs.20254548

Accuracy Comparison and Applicability of Domestic SAR in Different Platforms for Topographic Mapping in Complex Mountain Areas

SHEN Fuqiang^{1,2}, LIU Fei^{1*}, ZHANG Junxiao³

(1. *School of Electronic Information, Sichuan University, Chengdu 610065, China;*

2. *Surveying and Mapping Technology Service Center, Sichuan Bureau of Surveying, Mapping and Geoinformation, Chengdu 610083, China;*

3. *Qilu Institute of Aerospace Information, Jinan 250101, China)*

Abstract: Persistent rain and fog in the complex mountainous regions of western China severely hinder the acquisition of optical imagery, thereby restricting the generation and modeling of digital elevation models (DEMs). Domestic airborne and spaceborne Synthetic Aperture Radar (SAR) systems, with their advantages of high revisit frequency and strong penetration capability, offer broad application prospects in topographic mapping and surface deformation monitoring. However, their systematic mapping research in high-relief mountainous areas remained largely unexplored.

In this study, GF-3, LuTan-1 satellite SAR and domestic airborne millimeter-wave SAR were used to generate DEMs of the test area, and their accuracies were evaluated by comparison of the mapping capabilities with different bands and platforms in complex mountainous terrain.

(1) It found the DEM derived from airborne millimeter-wave SAR achieved the highest accuracy with a root mean square error (RMSE) of 2.292 m, followed by GF-3 in UFS mode with an RMSE of 4.677 m, meeting the specifications for 1:10 000 topographic mapping.

(2) Due to its small perpendicular baseline, LuTan-1 had a lower accuracy with an RMSE of 46.559 m.

This study presents the first systematic comparison of DEMs derived from multiple domestic SAR platforms, providing technical support and decision-making references for the application of domestic SAR in large-scale topographic mapping within complex mountainous regions.

Key words: Digital Elevation Model (DEM); domestic SAR; Interferometric Synthetic Aperture Radar(InSAR); complex mountainous area

(责任编辑 朱颖彦 李嵘)