

doi: 10.11823/j.issn.1674-5795.2025.06.09

基于无人机与卫星遥感的多源DEM生成与融合方法研究

王丝雨^{1*}, 崔育国², 魏春风², 陈骥驰²

(1. 沈阳市勘察测绘研究院有限公司, 辽宁 沈阳 110004; 2. 沈阳工业大学机械工程学院, 辽宁 沈阳 110870)

摘要: 为了提升复杂地貌区域数字高程模型(Digital Elevation Model, DEM)的构建质量与生产效率, 提出一种融合高分辨力光学影像与合成孔径雷达(Synthetic Aperture Radar, SAR)干涉影像的多源DEM获取与融合方法。以无人机和卫星遥感系统为平台, 构建多视角数据获取链路, 分别生成光学影像DEM与干涉影像SAR-DEM, 并引入基于纹理与结构特征的点云分类算法以及区域自适应权重估计模型, 实现对多源高程数据的加权融合。融合过程中采用误差约束与接边控制策略, 解决了地貌遮挡、数据空洞及高程跳变等典型难题。在森林、冰川、沙漠、城市和水体等典型地貌区域开展实验, 结果表明: 该方法具备高程恢复精度高和边界连续性好的特点, 能够满足多种地貌类型的三维建模需求, 其中丘陵地区的相对高程中误差仅为0.5 m。该研究成果为高分辨力地形测图、地貌演化监测及灾害预警等领域提供了稳定可靠的技术支撑, 对推动遥感测绘的自动化与智能化具有重要意义。

关键词: 数字高程模型; 无人机遥感; 卫星遥感; 合成孔径雷达; 光学影像; 点云分类算法; 多源数据融合; 遥感测绘

中图分类号: TB9; P237; TP3

文献标志码: A

文章编号: 1674-5795 (2025) 06-0105-11

Research on multi-source DEM generation and fusion method based on unmanned aerial vehicle and satellite remote sensing

WANG Siyu^{1*}, CUI Yuguo², WEI Chunfeng², CHEN Jichi²

(1. Shenyang Geotechnical Investigation & Surveying Research Institute Co., Ltd., Shenyang 110004, China;

2. School of Mechanical Engineering, Shenyang University of Technology, Shenyang 110870, China)

Abstract: To improve the quality and efficiency of Digital Elevation Model (DEM) construction in complex terrain, this study proposes a multi-source DEM acquisition and fusion method that integrates high-resolution optical imagery and interferometric Synthetic Aperture Radar (SAR) imagery. Using an unmanned aerial vehicle and satellite remote sensing system as a platform, this method constructs a multi-view data acquisition chain to generate optical imagery DEM and interferometric imagery SAR-DEM, respectively. By introducing a point cloud classification algorithm based on texture and structural features and a regional adaptive weight estimation model, weighted fusion of multi-source elevation data has

收稿日期: 2025-08-07; 修回日期: 2025-09-05

基金项目: 中国博士后科学基金面上资助项目(2021M692228); 辽宁省科技计划联合计划技术攻关计划项目(2024JH2/102600218)

引用格式: 王丝雨, 崔育国, 魏春风, 等. 基于无人机与卫星遥感的多源DEM生成与融合方法研究[J]. 计测技术, 2025, 45(6):105-115.

Citation: WANG S Y, CUI Y G, WEI C F, et al. Research on multi-source DEM generation and fusion method based on unmanned aerial vehicle and satellite remote sensing[J]. Metrology & Measurement Technology, 2025, 45(6):105-115.



been achieved. The fusion process employs error constraints and seamline control strategies to address typical challenges such as terrain occlusion, data holes, and elevation jumps. Experiments in representative landforms, including forests, glaciers, deserts, cities, and water bodies, demonstrates that this method has the characteristics of high elevation restoration accuracy and good boundary continuity, and can meet the three dimensions modeling needs of various landform types. Among them, the relative elevation mean error in hilly areas is 0.5 m. The research findings provide stable and reliable technical support for fields such as high-resolution topographic mapping, landform evolution monitoring, and disaster early warning, and are of great significance for promoting the automation and intelligence of remote sensing mapping.

Key words: DEM; unmanned aerial vehicle remote sensing; satellite remote sensing; SAR; optical imagery; point cloud classification algorithm; multi-source data fusion; remote sensing mapping

0 引言

数字高程模型(Digital Elevation Model, DEM)是描述地表高程变化的重要空间数据模型,在资源环境监测、基础设施规划、地质灾害评估及三维地形建模等领域具有广泛应用价值^[1]。随着测绘需求向高精度、高时效与复杂地形适应性方向发展,通过单一传感器获取森林、冰川、沙漠及城市等复杂地貌区域的DEM,逐渐暴露出遮挡多、数据不连续等问题^[2]。尤其在地形起伏剧烈、地表类型复杂以及光照条件受限的地区,单一传感器难以满足测图精度与覆盖要求^[3]。亟须探索更高效、稳健的数据获取和融合策略,以提升复杂地形区域的DEM获取能力^[4]。

在遥感技术快速发展的推动下,光学影像与合成孔径雷达(Synthetic Aperture Radar, SAR)数据已成为DEM构建的两大主要数据来源,相关研究在国内外持续深入并取得了重要进展^[5]。在国际上,由美国国家航空航天局与日本经济产业省、日本航天局合作研发的先进星载热辐射与反射辐射计(Advanced Spaceborne Thermal Emission and Reflection Radiometer, ASTER)等高分辨力光学卫星传感器已在山区和城市实现了较高精度的立体测图^[6]。TanDEM-X(德国航空航天中心主导的地球观测雷达任务)等典型任务则展示了SAR技术在全球与区域DEM构建中的优势^[7]。在多源数据融合方面,欧美学者相继提出了统计建模、贝叶斯推断和深度学习等方法,在提升融合精度、边界连续性和时序稳定性方面取得了积极进展^[8]。

国内研究更加注重复杂地貌条件下的适应性探索:高分、天绘系列卫星在光学立体测图中展

现了较高精度,其中,高分三号在干涉SAR应用中逐渐成熟^[9];无人机遥感的兴起与发展,使低空高分辨力光学影像在小范围高精度DEM构建中得到广泛应用^[10]。然而,现有研究在多源DEM融合中仍面临接边区域“台阶效应”、不同传感器高程基准不统一以及动态地貌时序干扰等问题,显著制约了DEM的连续性和稳健性^[11]。

基于此,本研究团队依托无人机和卫星遥感平台,构建多源遥感数据驱动的DEM技术体系,系统研究光学影像与SAR数据的独立高程反演与接边区域控制等关键技术环节,并在典型复杂地貌区开展实证分析,旨在突破传统单源方法在复杂环境下的局限,实现多源高程信息的精准融合,为大规模高质量的DEM生成与时序地形变化监测提供理论与技术支撑。

1 理论基础

1.1 多源遥感DEM构建

在遥感测绘中,DEM的获取方式因传感器类型和数据解算路径不同而各具特征^[12]。光学遥感借助立体视觉与几何建模,通过图像间视差还原地表形态;SAR遥感则通过干涉测量技术,基于微波信号相位差反演目标高程^[13]。二者在获取机制、成像方式与误差结构上具有高度互补性,可分别用于不同地形与观测条件下的地形建模任务^[14]。

本研究提出的多源DEM构建方法遵循“分源独立解算+加权融合输出”的二阶段处理策略:第一阶段,对光学影像和SAR影像分别进行几何反演,获取各自独立的初级DEM成果;第二阶段,在统一基准系下进行加权融合,生成空间连续、

高精度 DEM。该融合策略来源于最小方差无偏估计理论，具有较强的数理依据和实践适应性。

在第一阶段，假设某一遥感源 i 所获取的影像为 I_i ，地面控制信息为 G_i ，平台姿态参数为 P_i ，误差为 ε_i ，则高程估值模型 $D_i(x, y)$ 可形式化为

$$D_i(x, y) = f_i(I_i, G_i, P_i, \varepsilon_i) \quad (1)$$

式中： (x, y) 为二维位置坐标；函数 $f_i(\cdot)$ 表征遥感影像到三维地面坐标的映射关系，其形式由影像类型决定，光学影像一般通过立体像对匹配与相对定向来计算视差。SAR 影像则通过主从图像相位差、基线几何与轨道参数进行高程反演。

在第二阶段，为使不同源 DEM 成果具备可比性与可融合性，需统一其坐标参考与高程系统，消除因系统误差、成像基准或控制点质量引起的系统偏差。在此基础上，构建融合高程模型 $D_i(x, y)$ 如式(2)所示。

$$D_i(x, y) = \frac{\sum_{i=1}^n \omega_i(x, y) \cdot D_i(x, y)}{\sum_{i=1}^n \omega_i(x, y)} \quad (2)$$

式中： n 为数据源数目， $\omega_i(x, y)$ 为各数据源高程的权重函数，通常采用误差反比形式进行估计，如式(3)所示。

$$\omega_i(x, y) = \frac{1}{\sigma_i(x, y)^2} \quad (3)$$

式中： $\sigma_i(x, y)$ 为第 i 个数据源在位置 (x, y) 的高程标准差。

1.2 多源 DEM 融合与拼接精度控制理论

随着高程数据获取手段的多样化，融合多源 DEM 以提升高程产品质量已成为研究热点。传统的融合方法多采用误差反比加权策略，而在 DEM 拼接处理上，则多通过高程拟合、边缘模糊、窗口平滑等方法减少接边突变。然而，这类方法普遍存在对地形变化敏感性不足、融合行为缺乏区域响应能力、边界控制精度有限等问题。尤其在地貌复杂或数据异质性较强的区域，易出现高程不连续、硬拼接或局部突变等现象^[15]。若不加以控制，将严重影响 DEM 在地形分析、模拟运算与工程设计中的可用性^[16]。

针对上述问题，本研究提出“融合前调整-融合中控制-融合后验证”的三阶段精度控制框架，以解决 DEM 接边处的一致性问题。

1) 拼接误差的控制约束条件

在重叠区域或拼接带 Ω 内，对任意 2 个数据源 i 和 j ，要求同名格网点的高程差不超过限差。

$$|D_i(x, y) - D_j(x, y)| \leq \tau, (x, y) \in \Omega \quad (4)$$

式中： τ 为融合容许误差上限，通常在参考数据标准差 σ_r 的 1.5 倍以内，若其超出该阈值，需返回源数据进行几何校正或模型重建。

2) 地貌区分导向的权重策略

不同地貌区域对传感器数据质量的敏感性不同，故权重应具有区域自适应性。

在低纹理或高反射区域，光学影像缺乏有效纹理特征，而 SAR 干涉影像的相干性相对较高。本研究采用干涉相干系数作为主要判据，其定义为

$$C = \frac{|\sum_{i=1}^N s_{1,i} s_{2,i}^*|}{\sqrt{\sum_{i=1}^N |s_{1,i}|^2 \cdot \sum_{i=1}^N |s_{2,i}|^2}} \quad (5)$$

式中： C 为干涉相干系数，取值范围为 $[0, 1]$ ，值越大说明主辅影像在像素级的相干性越高； $s_{1,i}$ 和 $s_{2,i}$ 分别为主影像与辅影像在像素 i 处的复数信号； N 为相干性计算窗口的像素数量。相干性较高时，优先采用 SAR 生成的 DEM 作为主融合源；相干性较差时，降低其权重甚至弃用。

在建筑密集区、农林区或城市街区等高纹理环境，光学影像具有更强的匹配能力。本研究引入影像灰度熵 H 衡量纹理复杂度。

$$H = -\sum_{k=1}^L p_k \log_2 p_k \quad (6)$$

式中： p_k 为灰度级 k 的概率， L 为灰度级数。若 $H \geq H_{th}$ (经验阈值)，则光学 DEM 被赋予更高的融合权重，以充分利用其优势。

在低相干、强遮挡或数据缺失区域，当 SAR 相干系数低于设定阈值或光学影像匹配置信度不足时，融合策略将自动降低该数据源权重，必要时剔除该数据，以减少不可靠信息对结果的影响。

3) 融合后的精度验证与闭环反馈

融合完成后，在典型区域设置地面检核点或利用已有 DEM 参考面，统计高程偏差均值等指标，绘制误差场分布图。如发现边界区域仍存在误差“集聚”或波动剧烈问题，可采用滑窗平滑、边界加权窗函数、DEM 二次调整等手段进一步修复。

通过上述“融合-控制-验证”的闭环机制，确保融合DEM成果不仅在数值上具备一致性，而且在空间上具备连续性与可信度。

1.3 地貌变化建模与动态DEM表达

静态DEM只能反映特定时刻的地形状态，而对于如冰川流动、沙丘迁移、河道冲刷等地貌变化活跃区域，其高程状态具有明显的时间相关性与动态变化特征^[17]。在遥感测绘中，引入时间序列DEM及其差分模型，可实现地表演化过程的定量建模与动态监测。在本研究中，构建多时相DEM模型如式(7)。

$$\Delta h_t(x, y) = D_t(x, y) - D_{t-1}(x, y) \quad (7)$$

式中： $\Delta h_t(x, y)$ 为点 (x, y) 的高程变化量， $D_t(x, y)$ 为 t 时刻的高程数据， $D_{t-1}(x, y)$ 为 $t-1$ 时刻的高程数据。该模型不仅可用于判断地貌类型是否发生变化，还可用于量化其强度与方向。

进一步地，对连续 n 个时相数据建立演化模型，有

$$h(x, y, t) = h_0(x, y) + \sum_{k=1}^t \Delta h_k(x, y) \quad (8)$$

式中： $h(x, y, t)$ 为高程随时间变化的函数， $h_0(x, y)$ 为初始高程状态， Δh_k 为第 k 时相的高程变化量。

通过分析 $h(x, y, t)$ 的时间趋势、空间梯度与异常变化区间，可实现对冰川退缩速度、沙丘迁移路径、水位变化规律等过程的动态建模与灾害预警，为动态地貌演变提供可量化的决策支撑。

2 复杂地貌的DEM测绘与多源融合

本研究方法的整体技术流程如图1所示，主要包括数据获取、DEM测制、多源数据融合和成果输出与验证。该流程实现了对光学与SAR数据优势的结构化利用，为复杂地貌区域的高精度DEM构建提供了系统化解决方案。

2.1 数据采集与处理平台集成

为适应森林、冰川、沙漠和平原城市等多类型复杂地貌区域的地形建模需求，本研究构建了一套面向多场景应用的高精度、多源融合DEM生产技术体系。该体系通过以多传感器集成的无人机遥感平台为核心，结合地面控制点的精确布设和卫星遥感数据的辅助支持，实现了对不同地貌

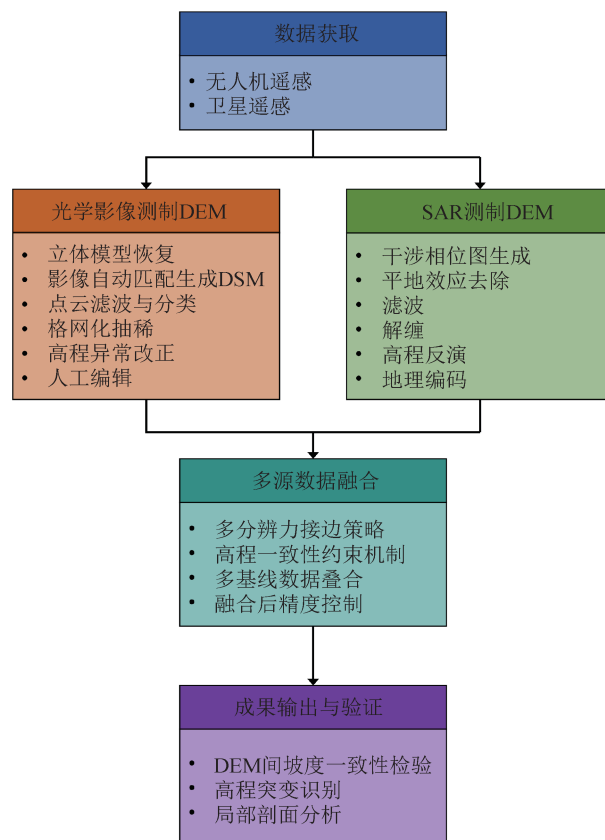


图1 研究方法的整体技术流程

Fig.1 The overall technical process of the research method

类型的高分辨率、高覆盖率三维地形信息的高效获取与处理。

本研究采用固定翼与多旋翼2类无人机系统开展摄影测量任务，分别满足大范围区域覆盖与局部精细地形建模的差异化需求。无人机平台均集成高分辨力倾斜摄影系统、GNSS/IMU惯性组合导航模块以及可变姿态控制单元，有效保障飞行过程的稳定性与获取影像的几何精度，为后续立体匹配与数字表面模型(Digital Surface Model, DSM)的提取奠定了数据基础。

针对局部区域存在的因云层遮挡、强反射干扰或极端地貌所导致的空洞与数据缺失问题，本研究引入星载遥感数据作为补充。其中，SAR影像能够穿透云雾并克服强反差地表的影响，适用于冰雪覆盖、沙尘干扰等典型复杂地貌区域的高程信息提取。部分区域还引入天绘三号、高分三号与高分七号等国产高分辨力卫星影像，用于辅助拼接，提升数据覆盖与DEM成果的质量稳定性。

在数据处理平台方面，本研究综合应用Inpho、

航天远景 MapMatrix 等软件系统, 分别完成立体模型构建、干涉相位解缠、地形滤波与高程重建等流程。其中, 光学影像处理路径以立体影像匹配为主, 以完成自动化 DSM 生成与 DEM 提取; SAR 数据则经由影像配准、相位滤波与高程反演处理, 生成高一一致性干涉 DEM 成果。

最终, 通过构建“光学 + SAR”双线并行与融合的数据处理路线, 形成了一套适应多种典型地貌环境的 DEM 快速构建技术体系, 该体系具备自动化、可控化、高精度特性, 为后续地形分析与工程应用提供了可靠数据支撑。

2.2 光学影像测制 DEM

本研究在多地貌区域的 DEM 构建中, 基于无人高分辨力影像开展光学影像 DEM 构建流程, 建立了完整的数据处理路径, 包括立体模型恢复、影像自动匹配生成 DSM、点云滤波与分类、格网化抽稀、高程异常改正及人工编辑等关键步骤, 具有较强的自动化能力, 并通过引入人工干预机制增强其对复杂地形与非规则地物的适应性。

在复杂地貌区域的高精度地形建模中, 光学影像 DEM 构建对影像的空间分辨力、几何稳定性与姿态精度具有较高要求。为保障 DEM 成果的建模精度与可靠性, 本研究采用无人机搭载可见光高分辨力相机获取影像数据, 飞行高度控制在 80 ~ 120 m, 并依据地形起伏与目标区域特征灵活调整。影像采集过程中设置重叠度不低于 80%, 并配合定位系统进行飞行姿态参数记录, 从源头上控制姿态误差与影像拼接误差, 为后续高精度 DEM 生成提供稳定可靠的光学数据基础。

处理流程起始于立体模型的恢复。在 MapMatrix Grid 2.1 模块进行立体模型恢复的基础上, 调用 Inpho 软件生成原始 DSM 数据。此阶段处理结果受地物类型、地表纹理及匹配精度影响显著, 易引入非地面目标及局部噪声。

为精准提取高质量地面高程信息, 需对 DSM 点云数据进行结构化分类与滤波处理。本研究采用基于三角网模型迭代算法对 DSM 点云进行初步分类, 将点云分为地面点与非地面点。针对植被覆盖密集或构筑物集中区域点云分布复杂, 自动分类结果易出现错判与遗漏, 进一步引入人工辅

助校验机制, 以提高点云分层的精确性和连贯性。

在点云分类后, 依据预设格网间距对地面点进行抽稀处理和格网化操作, 初步生成 DEM。在该过程中, 针对具有复杂结构物的城市区、高大树冠遮蔽的森林区、水体边缘波动区等区域, 通过人工指定控制点与模型约束, 对抽稀后地面格网进行高程修正, 以有效降低局部误差。

值得注意的是, DSM 构建阶段输出的高程值通常为大地高, 难以直接应用于大多数地图投影系统中。为实现成果的标准化, 本研究采用 PhotoMatrix-SAT 等工具模块将大地高转换为正常高, 确保高程数据与地形实体一致, 提升系统的跨平台应用能力。

为进一步保障成果质量, 对 DEM 进行立体模型加载与综合质量评估, 重点关注地形剧烈起伏区、分类疑难区及人工编辑区等。通过 DEM 与原始影像间立体匹配一致性检验, 评估高程面连贯性及剖面变化合理性。对于不连续高差、异常纹理畸变或格网错位等问题, 采用航天远景 MapMatrix Grid 平台进行逐点高程调整与边缘平滑处理, 修正高程断裂与“平台化”现象。

本研究的光学 DEM 构建流程不仅实现了从立体重建到标准高程产品的一体化处理, 还结合自动化算法与人工干预机制, 建立了稳定、高效、适应多样地貌的 DEM 生成模式。该流程特别适用于高分辨力无人机影像下的大比例尺地形建模任务, 为后续与 SAR 数据融合提供了精准可控的光学 DEM 基础支撑。

2.3 SAR 数据测制 DEM

SAR 干涉测量 (Interferometric Synthetic Aperture Radar, InSAR) 作为穿透性强、全天候观测的遥感手段, 已广泛应用于复杂地貌区域的 DEM 构建^[18]。针对研究区域在光学遥感条件受限 (如云层遮挡、强反射地表或极端地形) 的场景, SAR 影像提供了有效的高程信息补充途径。为确保结果的一致性与精度, 本研究构建了标准化 InSAR 流程, 包括干涉相位图生成、平地效应去除、相位滤波与解缠、高程反演与地理编码等关键步骤。

InSAR 对主从影像的获取几何、系统一致性与时间间隔具备高度敏感性, 干涉对选取的合理性

直接决定最终DEM的可用性。优质像对应满足以下条件：轨道接近、入射角差异小、时间间隔短、覆盖区域纹理稳定且无大面积失相干现象。

本研究选用时相数据，优先满足短基线与短时间间隔的原则，以抑制地物变化对相位稳定性的影响。在获取主从影像后，进行高精度影像配准；完成配准后，主影像与从影像对应像素进行复数共轭相乘，获得干涉相位差，并将该干涉相位归化到[0, 255]区间，生成干涉相位图。干涉图的相关系数 $\gamma(0 \sim 1)$ 反映其相干质量，高 γ 值区域表示条纹清晰、可解缠性强，如图2所示。

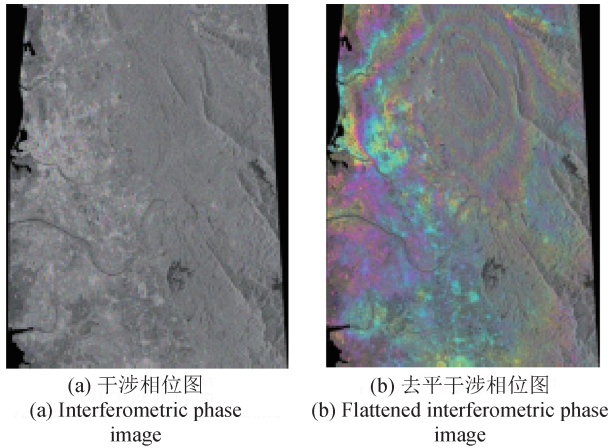


图2 干涉相位图与去平干涉相位图对比

Fig.2 Comparison of interferometric phase diagram and flattened interferometric phase diagram

干涉相位图中存在的周期性条纹部分源于平地效应，即理想水平地表在干涉测量中的规律性相位变化。这类背景干扰会掩盖实际地形起伏信息，影响相位解缠效果。为增强地形表达能力，采用理论地球椭球面模型计算并剔除平地干涉条纹，实现“去平”操作。

针对系统发热噪声、地物遮挡等导致的相位随机波动，对干涉相位图做滤波处理。与普通的光学影像滤波不同，干涉相位具有圆周性，噪声的分布也更为复杂，滤波时不仅要突出干涉条纹，且要减少相位跳跃和干涉图中的残差点。均值滤波是目前最常用的干涉SAR空间滤波方法之一，其原理是在干涉相位图中取一个滑动窗口，窗口内的中心像素取平均值，将窗口进行上下滑动，以达到平滑滤波的作用。这种滤波方式容易实现

且滤波效果较为明显。本研究引入均值滤波，并根据 γ 值分区设定滤波强度，保证高相干区保留细节，低相干区噪声压制，滤波效果如图3所示。

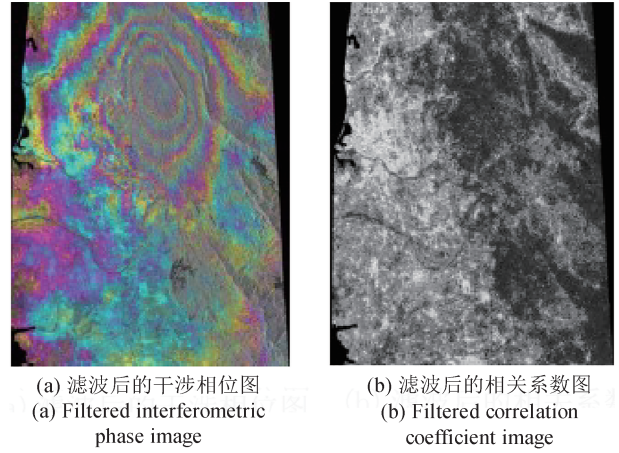


图3 滤波效果对比

Fig.3 Comparison of filtering effects

SAR干涉相位图的原始值限制在 $(-\pi, \pi)$ 区间，无法直接用于地形分析，需通过相位解缠还原连续的地形相位场。为提升解缠准确性，结合区域 γ 图与地形先验知识实现相位展开，如图4所示。该方法对破碎区域具有较好鲁棒性，确保整体解缠面连贯。

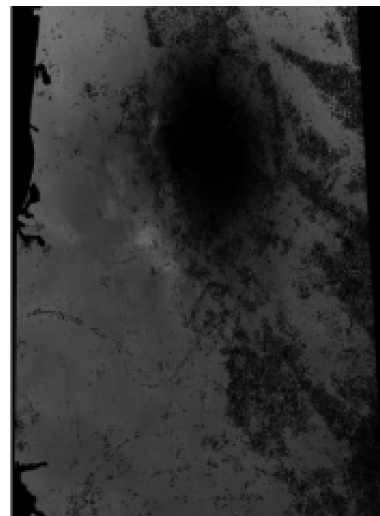


图4 解缠后的相位图

Fig.4 Phase image after unwrapping

解缠相位图结合干涉几何参数进行高程反演。高程反演得到的DEM需进行几何投影变换至地理坐标系，并融合多视角影像所产生的DEM子图，

生成完整区域的干涉 DEM 成果。为提升 DEM 质量, 引入粗 DEM 作为参考, 开展精细化处理操作, 包括多侧视方向融合、局部补漏、图幅之间拼接等处理步骤。在完成精度检测并满足技术指标要求后, 将干涉 SAR-DEM 与光学影像生成的 DEM 进行融合与拼接。融合后的 DEM 在高程连续性、空间一致性以及遮挡区域修复效果等方面表现良好, 尤其在森林、冰川等光学遥感难以获取高质量影像的区域, 展现出良好的高程补全能力和工程应用潜力。

2.4 多源数据融合

在复杂地貌区域, 单一传感器所得 DEM 往往因受制于成像条件、数据分辨率或地形遮挡等因素, 存在局部空洞、边缘跳变与精度不稳定等问题^[19]。为提升区域高程模型的完整性与一致性, 本研究建立了一套面向异源 DEM 产品融合的技术方法体系。该体系包括多分辨率接边策略、高程一致性约束机制、多基线数据叠合与融合后精度控制等关键环节, 适用于大范围、高异质性的多源高程数据整合场景。

1) 多分辨率 DEM 接边与限差控制

在同一区域存在不同空间分辨率 DEM 时, 为避免拼接过程中出现明显的“硬台阶”现象, 需严格控制相邻 DEM 的接边误差。根据测绘行业标准及工程精度要求, 本研究制定了接边误差的控制准则: 任意相邻影像之间的格网点高程差值不得超过低精度数据高程限差的 1.5 倍。

具体实施流程为: 首先对重叠区域进行同名格网点提取, 统计其高程差异分布。若其在误差容限范围内, 则采用加权平均策略融合接边, 高精度数据优先; 若差值超限, 则需溯源分析误差来源, 重新核查原始影像及立体模型, 完成整改后再行接边。通过这种“限差判断-偏差校正-融合执行”的策略, 可有效保障 DEM 边界的光滑过渡与数值连续性。

2) SAR-DEM 特性识别与多基线补偿策略

受 SAR 成像的几何特性与干涉机制影响, 山地、峡谷等起伏剧烈区域常出现遮挡与阴影效应, 导致单基线干涉 DEM 存在不规则空洞及边缘畸变。为解决此问题, 本研究引入多基线 SAR 数据融合

机制, 结合典型区域的地貌特征制定差异化处理策略, 以提升高程建模的适应性与鲁棒性: ① 在森林或热带雨林区域, 因常年云雾覆盖与降雨频繁, 光学影像质量难以保障, 采用多时相 SAR 影像开展 InSAR 处理, 通过冗余基线构建提高相位解缠成功率; ② 在沙漠区域, 考虑到地表形态随时间变化显著, 采用不同时序的 SAR 数据进行时序演化分析与验证, 识别稳定区并约束高程精度; ③ 在冰川区, 由于冰面变化快且缺乏稳定地物, 引入 ICESat 测高数据作为控制点优化干涉基线, 消除基线线性误差的影响; 此外, 并结合克里金插值法修正 InSAR 生成 DEM 的残余误差。此外, 通过引入多基线叠加与加权融合算法, 进一步削弱冰流引起的误差, 实现高精度 DEM 在冰雪地貌区的可靠构建。

该策略不仅提高了 SAR-DEM 在遮挡区域的覆盖率, 也增强了数据对地物变化的适应能力, 为后续与光学 DEM 的融合提供了更高精度的数据源。

3) 融合策略与高程一致性控制

光学影像与 SAR 数据在成像模式、数据表达与噪声特征方面存在本质差异, 直接融合可能引发高程不一致、边界不连续等问题。为统一多源数据体系, 本研究在融合环节引入“数据优先级+空间误差建模+加权配赋”三重约束机制。

融合后 DEM 需通过 DEM 间坡度一致性检验、高程突变识别与局部剖面分析等手段进行全面质量评估。对于局部未满足精度要求的区域, 将引入辅助控制点进行约束优化, 确保融合结果在空间连续性与数值精度方面达到设定标准。

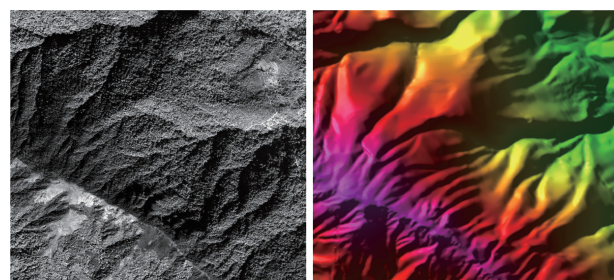
3 多地貌适应性验证

3.1 各类地貌实验结果

本研究基于光学影像与 SAR 数据, 构建了集自动化处理、模型校正与人工编辑于一体的高精度 DEM 构建流程, 针对森林、冰川、沙漠、城市及水体分布区等典型地貌区域进行了成果生产与适应性评估, 全面验证了所提方法的可行性与推广价值。

如图 5 所示, 森林覆盖区受限于树冠干扰, 自动生成的 DSM 常显著高于地表实际高程。为修正

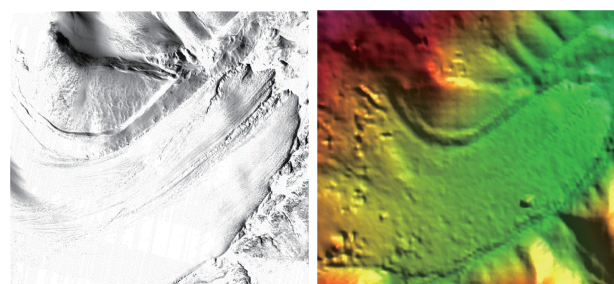
该误差，本研究基于平均树高模型与植被点自动分类方法对DSM进行“降高”处理，并结合样点调查与公开高程数据进行校正，通过人工校验进一步提升了DEM的准确性与稳定性，满足林区中等比例尺地形图制作的精度要求。



(a) 初始结果 (a) The original result (b) 处理后的结果 (b) The processed result

图5 森林地区的DEM
Fig.5 DEM of forest areas

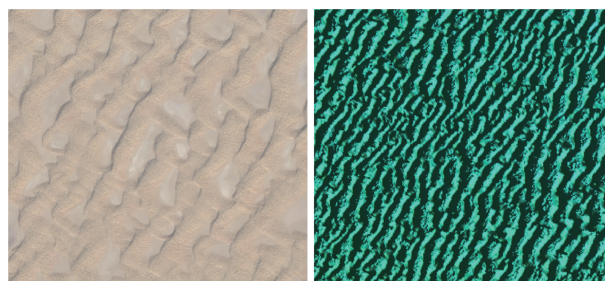
如图6所示，冰川区域因冰体流动、消融与积雪变化等动态变化因素，给高程建模带来较大挑战。研究中选用多时相SAR数据开展干涉处理，通过非缠绕相位图的变化分析冰川移动趋势，并辅以地表温度数据与光学影像进行综合解译，实现了对冰体变形的高时效性监测。结果表明：该方法在保持高程连续性与地貌真实还原方面，表现良好。



(a) 初始结果 (a) The original result (b) 处理后的结果 (b) The processed result

图6 冰川地区的DEM
Fig.6 DEM of glacial areas

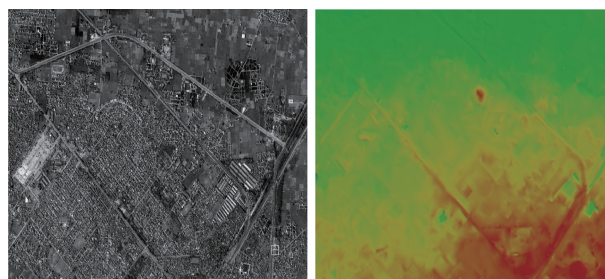
如图7所示，沙漠区域因其地表特征缺乏、地形起伏微弱以及流动性强，使得DEM构建难度较高。对此，本研究采用SAR数据进行反演，并引入历史地图等数据作为参考，应用特征保持滤波与区域斑块分析技术，有效区分流动沙丘与固定基底，显著提升了DEM的平滑性和几何保真度。



(a) 初始结果 (a) The original result (b) 处理后的结果 (b) The processed result

图7 沙漠地区的DEM
Fig.7 DEM of desert areas

如图8所示，城市区域受限于建筑物遮挡与地下空间结构复杂，DSM存在大量“虚高”现象。通过光学影像自动匹配法提取DSM，并结合建筑矢量图与三维模型数据进行人工编辑，重点对存在地下空间的建筑物进行了高程修正。处理结果显示：城区DEM具备良好的地表还原能力，为城市三维建模与空间规划提供了可靠支持。

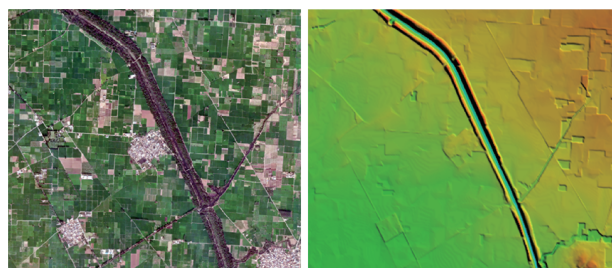


(a) 初始结果 (a) The original result (b) 处理后的结果 (b) The processed result

图8 平坦城区的DEM
Fig.8 DEM of flat urban areas

如图9~图11所示，对于大型沟渠、辫状河流、河流与水库复合区等复杂水体地貌，DEM制作面临岸线模糊、水面变化频繁等问题。本研究采用多时相光学影像叠加分析识别岸线边界，结合高程插值算法对水域区域进行填补，消除空洞并提升DEM连贯性；在辫状河流区域，局部高程补差算法有效消除干扰，增强了水域高程表达的真实度与完整性。

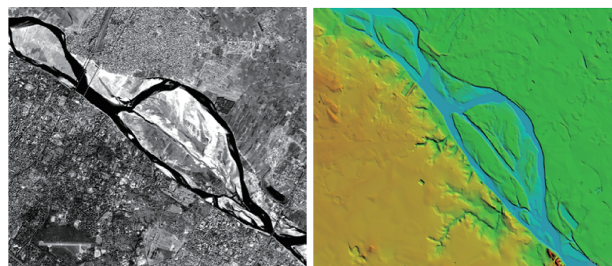
针对动态地貌区域(如沙漠、冰川与季节性湖泊)，本研究拟在后续工作中引入不同时序SAR数据进行演化分析。通过构建多时相DEM变化图层，可实现对地形形变趋势、沉降区域、冰体运动等



(a) 初始结果
(a) The original result (b) 处理后的结果
(b) The processed result

图9 大型沟渠的DEM

Fig.9 DEM of large ditches



(a) 初始结果
(a) The original result (b) 处理后的结果
(b) The processed result

图10 辫状河流区的DEM

Fig.10 DEM of braided river areas



(a) 初始结果
(a) The original result (b) 处理后的结果
(b) The processed result

图11 河流与水库的DEM

Fig.11 DEM of rivers and reservoirs

动态变化的精确识别，为地质灾害预警和生态监测提供数据支撑。

为保证结果的规范性与可比性，本研究依据表1所列的相对高程精度标准对DEM开展符合性检验。该精度标准充分参考行业内通行的数字高程模型精度分级规范，并结合研究团队在多类地貌区域测绘等工程实践中积累的经验指标体系制定，可反映实际应用场景下的精度控制要求。以像对为单位检查像对接边情况，测区内DEM接边，相邻像对接边的最大误差不大于表1所规定的

相对高程误差的1.5倍。对不同平差区的接边，最大误差控制在表1所规定的相对高程误差的2倍以内。与此同时，按照平地、丘陵、山地与高山4类地貌条件，对三级与四级产品分别进行高程误差核验。

表1 DEM产品相对高程精度标准

Table 1 Relative elevation accuracy standards for DEM products

产品级别	格网间距		高程中误差/m			
	地理坐标/s	投影坐标/m	平地	丘陵	山地	高山
三级	0.15	5	1.4	1.4	2.3	4.0
四级	0.06	2	0.9	1.4	1.9	2.5

检验结果表明：丘陵地区的相对高程中误差为0.5 m，平地、山地和高山区域也均满足或优于相应等级的精度阈值，且各测试区的像对接边和平差区接边连续、过渡平顺，无系统性趋势偏差，证明所提方法在多地貌条件下具有良好的精度可靠性与工程适用性。

3.2 实验结果讨论

分析实验结果可知：依赖单一数据源构建的DEM在复杂地貌条件下存在一定局限性。以光学立体像对为主要数据源的产品(如 ASTER GDEM)虽然具有较高的空间分辨力和几何精度，但在云雾覆盖、光照不足或地表纹理较弱的区域往往出现匹配困难和高程误差现象；而以InSAR为核心的产品(如SRTM、TanDEM-X)具备全天候观测优势，在低光照和高反射环境下表现稳定，但在植被覆盖和水体区域相干性不足，易产生条带噪声或局部不连续。单一数据源难以同时兼顾多样地貌环境下的精度与连续性。

相比之下，本文提出的光学与SAR数据融合方法有效发挥了2类传感器的互补优势，显著改善了低纹理区的匹配不足、植被区的相干性下降以及水体区的岸线模糊现象，在精度、稳定性和适应性方面表现更突出。

在各类地貌适应性实验中，地表覆盖特征外，样区面积、数据采集时间及气象条件(如云量、风速、冰雪覆盖率等)均对DEM结果的精度与稳定性

产生重要影响。①较大样区往往跨越多种环境和气候,易引入地表动态差异,导致光学影像匹配精度下降或SAR干涉相干性减弱;而小面积样区虽然观测一致性较好,但在代表性和推广性上存在不足。②数据采集时间的不一致会引起明显的时序差异,森林和城市区域在不同季节的植被覆盖与阴影分布差异显著;冰川在消融期与积雪期的表面状态差异也会削弱光学匹配精度或降低干涉相干性;在沙漠与冰川等动态地貌中,采集间隔过长可能导致地表形态变化,使DEM结果出现系统性偏差。③气象条件对遥感数据质量亦具有直接影响,森林和城市区的高云量与阴影会干扰光学影像纹理识别;冰川区的相干性依赖冰雪覆盖率和温度,高风速则削弱干涉条纹稳定性;沙漠区的强风会加剧沙丘迁移,造成不同时相数据几何对应性不足;水体区域则因水面扰动和岸线模糊,常出现DEM局部不连续或空洞。

综上所述,样区面积、采集时间和气象条件是影响多地貌DEM生产质量的关键外部因素,即使在观测条件相对适宜的情况下,这些因素仍可能对成果精度和稳定性造成潜在影响。在未来的工作中,可进一步考虑多时相和多气象条件数据的联合分析,结合时序变化建模与多源一致性控制方法,增强DEM在复杂地貌和多变环境中的适应性与普适性。

4 结论与展望

本研究面向复杂地貌区域多源遥感数据的高效融合与DEM精度提升需求,构建了光学影像与SAR数据协同测绘技术体系,并提出了一套具备可重构性与高自适应性的多源DEM构建方法。主要结论如下:

- 1) 构建了“分源独立解算-融合加权输出”的技术框架,充分发挥光学与SAR数据的互补优势,提升复杂环境下高程信息获取的鲁棒性与适应性;
- 2) 构建了面向复杂地形的InSAR流程,并引入滤波、解缠与多基线干涉补偿等处理机制,提升了干涉数据在地形起伏剧烈区域的处理稳定性;
- 3) 建立了权重估计与高程控制模型,有效支撑了多平台、多分辨率、多时相DEM数据的空间

连续性与一致性融合,并通过在森林、冰川、沙漠、城市和水体等典型地貌区的实证验证,证明该方法在高程精度、地貌特征保持及变化识别方面具有良好的工程适应性。

本研究为面向复杂地貌的三维地形建模提供了系统化解决路径,丰富了遥感测绘中多源数据协同处理的理论基础,为高质量DEM生产及其在地质灾害监测、空间规划管理等领域的推广应用提供了技术支撑。

但本研究所提方法在应用层面仍存在一些值得进一步研究的问题:①数据获取与处理过程往往伴随较高的成本,未来有必要在保证精度和效率的前提下,评估不同数据源的资源消耗并探索更具性价比的融合策略;②当前方法在实时性要求较高的应急测绘和灾害响应场景中仍存在局限,后续研究可结合并行计算与快速解算技术来提升实时处理能力;③尽管本研究覆盖了森林、冰川、沙漠、城市和水体等典型地貌,但现实环境往往更加复杂,亟须在极端或特殊地貌条件下开展进一步测试,以验证方法在更广泛场景下的适应性与稳健性;④随着点云分类方法和权重估计模型不断发展,未来将先进算法引入多源DEM融合流程,有望进一步提升成果的精度与效率;同时,遥感测绘技术不断演进,DEM构建已逐步扩展至包括激光雷达在内的多种数据。

未来可在本研究框架基础上引入激光雷达和ICESat-2光子点云等高程数据源,拓展融合方法的适用范围,提升DEM在复杂地貌条件下的精度、稳定性与物理真实性,增强其在大范围测图与极端环境建模中的应用潜力。这些方向将为本方法的工程化推广和大范围应用提供更坚实的支撑。

参考文献

- [1] AKHILA R, PRAMADA S K. Suitability of different digital elevation models in the estimation of LS factor and soil loss [J]. *Environmental Monitoring and Assessment*, 2025, 197(5): 511.
- [2] CAO B J, GAO Z Q, SHANG W T. Methodology for fine-scale seamless elevation model construction using unoccupied aerial and surface vehicles [J]. *Estuarine Coastal and Science*, 2023, 282: 108229.
- [3] YU C L, WANG Q S, ZHANG Z B, et al. Multi-source

- data joint processing framework for DEM calibration and fusion[J]. *International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation*, 2025, 139: 104484.
- [4] ZHANG X, GUO S C, MU H W, et al. Integrating optimal terrain representations from public DEMs using spaceborne LiDAR[J]. *International Journal of Digital Earth*, 2025, 18(1): 2505631.
- [5] 余翠琳, 王青松, 钟梓炫, 等. 利用全球开源数字高程模型的高程误差预测数据集[J]. *电子与信息学报*, 2024, 46(9): 3445-3455.
- YU C L, WANG Q S, ZHONG Z X, et al. Elevation error prediction dataset using global open-source digital elevation model[J]. *Journal of Electronics & Information Technology*, 2024, 46(9): 3445-3455. (in Chinese)
- [6] MOU J W, WANG Y, HONG J, et al. Baseline calibration of L-band spaceborne bistatic SAR twinSAR-L for DEM generation[J]. *Remote Sensing*, 2023, 15(12): 3024.
- [7] TAN J B, CHEN M Q, XIE X Y, et al. Riparian zone DEM generation from time-series sentinel-1 and corresponding water level: a novel waterline method[J]. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 2022, 60: 4207110.
- [8] IRWIN K, BEAULNE D, BRAUN A, et al. Fusion of SAR, optical imagery and airborne LiDAR for surface water detection[J]. *Remote Sensing*, 2017, 9(9): 890.
- [9] 马远征, 马新博, 员欣淼, 等. 分幅DEM接边高程一致性检查方案设计与实现[J]. *测绘技术装备*, 2024, 26(1): 59-63.
- MA Y Z, MA X B, YUAN X M, et al. Design and implementation of consistency inspection of framing DEM edge elevation [J]. *Geomatics Technology and Equipment*, 2024, 26(1): 59-63. (in Chinese)
- [10] HUANG C, CHEN Y, ZHANG S Q, et al. Detecting, extracting, and monitoring surface water from space using optical sensors: a review [J]. *Reviews of Geophysics*, 2018, 56(2): 333-360.
- [11] ALLEN T R, WANG Y, GORE B. Coastal wetland mapping combining multi-date SAR and LiDAR[J]. *Geocarto International*, 2013, 28(7): 616-631.
- [12] HU H, ZHANG G H, AO J F, et al. Multi-information PointNet plus plus fusion method for DEM construction from airborne LiDAR data [J]. *Geocarto International*, 2023, 38(1): 2153929.
- [13] 李和平, 杨坤, 吴猛, 等. 基于多基线 InSAR 的 ALOS-2 数字高程模型重建[J]. *测绘*, 2024, 47(3): 115-118.
- LI H P, YANG K, WU M, et al. Rebuilding ALOS-2 digital elevation model based on multi-baseline InSAR [J]. *Surveying and Mapping*, 2024, 47(3): 115-118. (in Chinese)
- [14] GUI R, QIN Y J, HU Z, et al. Neural network-based fusion of InSAR and optical digital elevation models with consideration of local terrain features [J]. *Remote Sensing*, 16(19): 3567.
- [15] CHEN X B, LIU C, WANG S, et al. LSI-YOLOv8: an improved rapid and high accuracy landslide identification model based on YOLOv8 from remote sensing images[J]. *IEEE Access*, 2024, 12: 97739-97751.
- [16] LI B B, XIE H, LIU S J, et al. Global digital elevation model (GDEM) product generation by correcting ASTER GDEM elevation with ICESat-2 altimeter data[J]. *Earth System Science Data*, 2025, 17(1): 205-220.
- [17] JOHNSON R D, SAMPLE D J, MCCOY K J. GIS-based method for estimating surficial groundwater levels in coastal Virginia using limited information [J]. *Journal of Irrigation and Drainage Engineering*, 2018, 144(7): 05018004.
- [18] RAHIMI Z, OTHMAN F, SHARIFF A R M, et al. Improving geometric construction of high resolution SAR images using Kriging-based surrogate modelling in mountainous terrain of Malaysia[J]. *International Journal of Remote Sensing*, 2021, 42(22): 8624-8639.
- [19] OKOLIE C L, SMIT J L. A systematic review and meta-analysis of Digital Elevation Model (DEM) fusion: pre-processing, methods and applications[J]. *Isprs Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*, 2022, 188: 1-29.

(本文编辑: 李成成)



第一/通信作者: 王丝雨(1991—), 女, 高级工程师, 注册测绘师, 主要研究方向为无人机测绘与遥感。