

基于道路矢量匹配的城市场景涪城一号SAR影像几何精校正

林霏开¹, 王茹¹, 董杰², 廖明生¹, 左世诚¹

1. 武汉大学 测绘遥感信息工程全国重点实验室, 武汉 430079;

2. 武汉大学 遥感信息工程学院, 武汉 430079

摘要: 城市安全是保障城市稳定与可持续发展的基石, 作为具备干涉测量能力的国产商业合成孔径雷达SAR (Synthetic Aperture Radar) 卫星, 涪城一号可在城市安全监测领域发挥重要作用, 几何校正则是其中关键步骤。高精度的几何校正结果有助于准确关联影像像元与真实地物, 对影像的语义分析、形变精准溯源和形变机理研究有着重要意义。几何校正的效果依赖于卫星自身的定位能力及精校正, 本文首先利用角反射器评定了涪城一号条带模式下的无控定位精度。另外, 针对当前几何精校正方法在城市场景成本高、精度低的问题, 本文基于公开的道路矢量数据, 提出了一种基于结构张量和相位一致性的粗-细双阶段匹配算法, 通过二维定位误差解耦、偏移量单向搜索、密度聚类以及局部精细匹配, 实现了涪城一号在城市地区的几何精校正。实验结果显示, 涪城一号无控定位精度优于50 m; 本文提出算法在与模拟SAR影像匹配方法、定位误差改正方法和光学-SAR影像匹配方法的对比中取得了最佳的效果, 将实验区域内涪城一号定位精度提升至6 m。本研究为改善涪城一号卫星几何定位精度提供了可参考的技术途径, 对于国产SAR卫星数据在城市地区的应用具有积极意义。

关键词: 合成孔径雷达, 涪城一号, 道路矢量匹配, 几何定位, 几何精校正, 城市监测, 结构张量, 相位一致性

中图分类号: P237/P2

引用格式: 林霏开, 王茹, 董杰, 廖明生, 左世诚. 2026. 基于道路矢量匹配的城市场景涪城一号SAR影像几何精校正. 遥感学报, 30(4): 984-996

Lin F K, Wang R, Dong J, Liao M S and Zuo S C. 2026. Precision geometric rectification of Fucheng-1 Synthetic Aperture Radar imagery in urban areas based on road-vector matching. National Remote Sensing Bulletin, 30(4): 984-996 [DOI: 10.11834/jrs.20265342]

1 引言

随着全球城市化进程的深入, 伴随出现的地面沉降、建筑变形、基础设施老化等风险给城市公共安全带来严重威胁。星载合成孔径雷达SAR (Synthetic Aperture Radar) 作为一种主动式成像的遥感对地观测技术, 具备全天时、全天候、非接触的特点, 在此基础上发展的合成孔径雷达干涉测量InSAR (Interferometric Synthetic Aperture Radar) 技术利用重轨影像间的相位差反演出地面物体的毫米级位移, 可为城市区域提供持续、精准、大范围的形变监测, 保障城市安全运行 (廖明生

等, 2020)。几何校正是指SAR影像从二维雷达坐标系转换至大地三维坐标系的过程, 通过还原SAR像元在物理世界的位置, 实现雷达信号与地物的准确对应 (魏晓红等, 2012; 仇晓兰等, 2013)。在城市区域InSAR形变监测中, 高精度的几何校正结果极为关键, 它为异常形变与具体基础设施关联提供了基础, 能有力支撑隐患目标的快速溯源与形变机理的深入解译 (杨梦诗等, 2023; 郭绍琨等, 2023)。

几何校正的准确性很大程度上依赖卫星的几何定位能力。目前国内外主流SAR卫星均有较高定位精度。国外发射的卫星中, 欧洲航天局的

收稿日期: 2025-09-11; 预印本: 2025-12-15

基金项目: 国家重点研发计划(编号:2023YFC3009400, 2023YFC3009404); 国家自然科学基金(编号:42374013, 42504033)

第一作者简介: 林霏开, 研究方向为InSAR城市基础设施监测。E-mail: feikai.lfk@whu.edu.cn

通信作者简介: 王茹, 研究方向为InSAR对地观测及应用。E-mail: wangr2017@whu.edu.cn

Sentinel-1 卫星具有米级的定位精度 (Gisinger 等, 2021); 德国宇航局的 TerraSAR-X 卫星, 在校正定位过程中的误差后, 绝对定位精度可达分米级 (Schwerdt 等, 2012)。对于国内 SAR 卫星而言, 经控制点校正后, 环境一号 C 卫星 (HJ-1C) 具有米级的定位精度 (Liu 等, 2014); 高分三号 SAR 卫星 (GF-3) 系统几何定位精度可以达到 3 m (丁赤飏等, 2017); 双星 SAR 系统陆探一号 01 组 (LT-1) 绝对定位精度优于 0.8 m (Mou 等, 2023)。

涪城一号是长沙天仪研究院研制的首颗具备干涉测量能力的国产商业 C 波段 SAR 卫星 (Feng 等, 2024), 最高分辨率达 1 m, 支持聚束、条带和扫描等多种成像模式, 性能达到国际先进水平。其重轨干涉与星座协同技术显著提升了重访能力, 可满足城市基础设施安全监测的高时效性需求。目前关于涪城一号卫星的定位能力, 尚未有研究进行定量描述。

在几何校正过程中, 由于传感器误差、轨道误差、大气传播误差、成像误差等因素的影响, 根据 SAR 系统参数计算获取的定位结果会与真实地物间存在偏差, 因此需要几何精校正进一步优化像元的定位结果 (陈继伟等, 2016)。该步骤通常需要外部观测或先验数据约束。常见的一种方法是在监测区域内获取多个坐标准确的控制点, 通过对控制点的坐标偏移量平差, 实现定位参数的优化。控制点来源可以是布设的角反射器 (Garthwaite, 2017; Gisinger 等, 2021), 或是经过实地测量的特征清晰的地物 (丁刘建等, 2020)。但二者都需投入较多人力与资金, 难以大范围应用。除此之外, LiDAR 点云由于其准确的地理位置和密集的采样点分布, 被一些学者用来与 SAR 点云匹配, 校正 SAR 影像的定位结果 (Yang 等, 2019; Wang 等, 2024), 但与控制点类似, LiDAR 也具有较高的采集成本, 无法广泛使用。

除了上述方法, 也有学者研究如何利用公开数据实现低成本几何精校正。张永红等 (2003) 利用数字高程模型 DEM (Digital Elevation Model) 生成模拟 SAR 影像, 通过匹配真实影像与模拟影像的同名点估算坐标偏移量, 以最小二乘拟合全局偏移实现几何精校正。该方法成本较低, 可在散射机制简单的区域取得良好效果。然而城市地区高楼众多, 散射机制复杂, 难以准确模拟; 此外, 公开的 DEM 分辨率较低、更新频次慢, 加剧

了模拟影像的失真。雷振坤等 (2025) 通过深度学习识别了公开光学影像中的风力发电机, 利用其强散射特性将其作为控制点, 显著提升了高分三号卫星的定位精度, 但在无风机分布的城市区域该方法无法应用; 向俞明等 (2024) 基于谷歌光学影像和开源海岸线矢量数据, 提出面向海岛场景的全局一局部双阶段异源影像匹配算法, 通过匹配光学与 SAR 影像中的特征点, 将高分三号和海丝一号的定位精度提升至米级, 但在城市中, 密集分布的高层建筑加剧了 SAR 斜视成像导致的几何畸变, SAR 与光学影像间的特征差异进一步放大, 二者同名点难以被正确识别与匹配, 限制了该算法的使用。另外, 还有学者详细分析了 SAR 影像几何定位过程中的误差, 利用公开数据对其中的大气传播误差、地球动力误差和成像误差进行改正, 最高能将卫星定位精度校正至分米级 (Montazeri 等, 2018; Gisinger 等, 2021), 但是该方法较大程度上依赖卫星自身的定位能力, 对传感器误差及轨道误差较大的卫星难以取得理想效果。

道路矢量数据作为一种能公开获取的数据源, 在城市地区 SAR 影像上纹理特征明显, 分布广泛, 适合作为几何精校正辅助数据。目前仅存在少量利用道路矢量数据进行 SAR 影像几何精校正的研究。吴戌等 (2018) 基于指数加权均值比率算子联合 OTSU 最大类间方差, 检测并提取 SAR 影像中的线特征, 与道路矢量匹配, 小范围内实现了 SAR 影像的定位精度提升。然而, 受方向、结构、材料、宽度等因素影响, 很多道路边界模糊, 缺乏明显边缘与亮线, 难以准确提取, 该情形下算法应用受限。

综上所述, 目前缺乏一种适用于城市场景高分辨 SAR 影像的低成本、高精度、适用性强的几何精校正手段。本研究利用公开的道路矢量数据, 提出一种基于结构张量和相位一致性的粗—细双阶段匹配算法, 利用道路的纹理特征实现道路矢量数据与 SAR 影像的精确配准。通过与模拟 SAR 影像匹配、定位误差改正、光学—SAR 影像匹配等 3 类方法的对比, 有效证实了本方法的有效性, 实现了低数据获取成本条件下的城市场景涪城一号影像几何精校正。同时, 针对现有研究在涪城一号几何定位能力描述上的缺失, 本研究通过角反射器布设与定位误差改正, 定量评估了该卫星

的无控定位精度。

2 研究方法

本节首先详细分析了涪城一号定位过程中的误差源，并建立“全局偏移量+局部误差项”的定位误差假设。然后提出一种基于道路矢量数据匹配的几何精校正方法，包括数据预处理、全局偏移量估算和局部精细匹配。首先，将道路矢量数据投影到雷达坐标系下，通过方向阈值和长度阈

值对道路进行筛选，保留与图像坐标方向近似的道路并进行掩膜。接下来，在搜索窗口内偏移道路掩膜，构造基于结构张量的匹配函数，对各道路的最佳偏移结果进行密度聚类，统计得到全局偏移量；最后，在原始图像上划分若干个子块，在各子块内构造基于相位一致性的匹配函数，估算每条道路的最佳偏移量，以多项式拟合出最优偏移量参数，实现几何精校正。算法流程如图1所示。

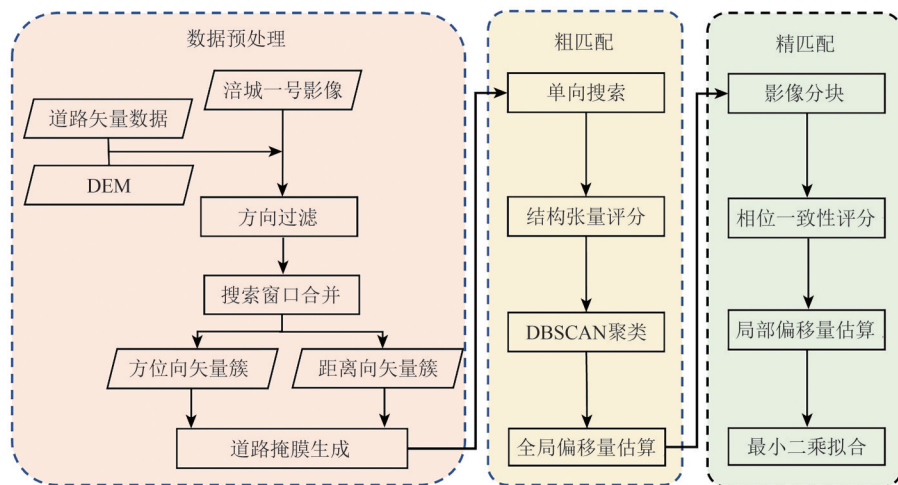


图1 算法流程图

Fig. 1 The flowchart of the proposed algorithm

2.1 定位误差分析

SAR几何定位的主要误差来源包括：传感器误差、轨道误差、大气传播误差、地球动力误差、成像误差和地面相对高程误差（丁赤飏等，2017；Mou等，2023）。其中轨道误差与卫星的轨道控制有关，涪城一号卫星具备可靠的轨道控制能力，在精密定轨后轨道精度优于10 cm，其误差在定位中可忽略不计。

大气传播误差是指由于大气折射、吸收、散射等因素产生的电磁波传播路径延迟，分为电离层延迟和对流层延迟。对于C波段的涪城一号而言，电离层延迟造成的误差可达米级。对流层延迟与大气中干燥气体及水汽含量有关，是SAR几何定位最主要的误差源，会造成高达数米的定位偏差。该部分误差可通过大气观测数据改正（Dong等，2019；Wang等，2022）。

地球动力误差是指在日月引力、地球潮汐、板块运动等因素作用下引起的地球表面变形，造

成静止目标的实际位置与在参考坐标系下的参考位置间出现偏移，其中由日月引力引起的固体潮汐影响最为重要，该项误差给定位造成的影响在分米量级。

地面相对高程误差与DEM误差有关，属于空间独立误差，可利用高精度外部高程数据校正。成像误差是指卫星采集到原始脉冲信号后，通过成像算法将信号聚焦为SAR影像的过程中产生的误差。涪城一号条带模式基于零多普勒时刻成像，在成像处理中采用了“停一走”近似，认为卫星在发射和接收脉冲信号时静止，但实际上卫星在持续运动，导致目标点标注的成像时间与其真实的零多普勒时刻间存在偏移，进而产生方位向上的定位误差。对于影像上坐标为 (i, k) 的目标点，其脉冲接收时间和距离向时间分别为

$$t_R(i, k) = t_0 + i \cdot \Delta t_{\text{PRI}} + \frac{k}{f_r} \quad (1)$$

$$\tau(k) = \tau_0 + \frac{k}{f_r} \quad (2)$$

式中, t_0 是第一次脉冲的接收时间, Δt_{PRI} 是脉冲重复时间, f_r 是距离向采样频率, τ_0 则表示接收窗口开启到开始接收回波的时间。

在涪城一号的成像过程中, 假设卫星开始接收脉冲时卫星静止, 此时刻可以表示为

$$t_{\text{stop-go}}(i, k) = t_R(i, k) - \frac{k}{f_r} \quad (3)$$

而目标点的零多普勒时刻为

$$t_{\text{zero-doppler}}(i, k) = t_R(i, k) - \frac{\tau(k)}{2} \quad (4)$$

因此, 方位向上的时间改正量为 $\Delta t_{\text{corr}}(i, k)$

$$\Delta t_{\text{corr}}(i, k) = t_{\text{zero-doppler}}(i, k) - t_{\text{stop-go}}(i, k) = \frac{k}{2f_r} - \frac{\tau_0}{2} \quad (5)$$

对于其他误差, 传感器误差包括系统时延误差、方位时间误差和脉冲重复频率误差等, 该部分误差通常为系统性偏差, 在一定范围内近似为常数项偏移, 可通过全局偏移量估算的方式校正。而大气传播误差、地球动力误差、成像误差在空间上局部相关, 因此定位误差可整体看作为常数项和局部误差项, 这也是本研究提出算法遵循的基本假设。

2.2 数据预处理

获取的道路数据通常以线矢量的形式表示,

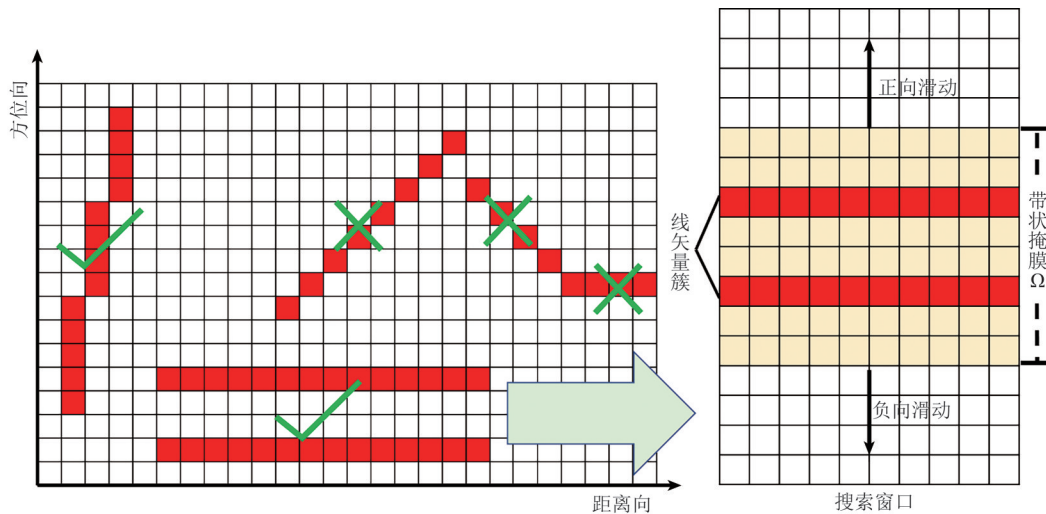


图2 数据预处理示意图

Fig. 2 The illustration of data pre-processing

2.3 基于结构张量的全局偏移量估算

在高分辨率城市SAR影像中, 受斑点噪声、建筑物叠掩效应以及多次散射的干扰, 基于单点特征的匹配方法难以在全局范围内获得稳定结果。为此, 本研究在全局偏移量估计阶段引入了基于

首先利用外部高程数据如DEM, 通过逆向距离—多普勒R-D (Range-Doppler) 方程将其由大地坐标系投影至雷达坐标系, 并保留其中与影像重合的部分。为了将SAR影像中不同方向的系统误差来源(如定标残差、脉冲压缩或运动补偿不完全)解耦, 需要对线矢量进行筛选和分组。分别计算每条线矢量与距离/方位向的夹角 θ_0 , 并设定最小长度约束, 仅保留与坐标轴近似平行的线矢量, 分别标记为近方位向线矢量和近距离向线矢量, 在每组线矢量上仅估算一维偏移量。由此将二维搜索简化为一维, 极大降低了搜索难度, 同时提升了运行效率。

接下来, 沿各线矢量法向构造搜索窗口, 方向相同且搜索窗口重叠的多条线矢量会合并为一个簇, 视作同一条道路, 对应的搜索窗口也随之扩张。合并完成后, 在搜索窗口内为每条线矢量沿法向生成半径为 ω 的带状掩膜 Ω , 作为计算结构张量的积分域。线矢量簇是偏移量估算的基本单元, 对同簇内各线段沿其法向施加同一候选偏移量并联合计分, 以获得该簇的最优偏移。数据预处理流程可参考图2。

结构张量的匹配函数。该方法通过对影像局部梯度的二阶矩进行计算, 能够有效捕捉区域内的主方向信息, 并通过邻域积分自然增强了线性结构的连贯性。这一特性在道路等具有明显方向一致性的目标中表现尤为突出。此外, 结构张量的空

间平滑特性使得其在处理长线性道路时能够更好地抑制局部异常点对整体偏移估计的影响（程江华等，2012）。

对于给定幅度影像 $I(x, y)$ ，提取任意搜索窗口中的局部梯度向量为

$$I_x = \frac{\partial I}{\partial x}, I_y = \frac{\partial I}{\partial y} \quad (6)$$

式中， I_x 和 I_y 分别表示影像在方位向与距离向的梯度分量。随后计算道路掩膜 Ω 上累积的二维结构张量 J

$$J = \begin{pmatrix} \sum_{\Omega} I_x^2 & \sum_{\Omega} I_x I_y \\ \sum_{\Omega} I_x I_y & \sum_{\Omega} I_y^2 \end{pmatrix} * G_{\sigma_0} \equiv \begin{pmatrix} J_{11} & J_{12} \\ J_{12} & J_{22} \end{pmatrix} \quad (7)$$

式中， $*$ 表示卷积运算， G_{σ_0} 为尺度为 σ_0 的高斯核。对矩阵 J 进行本征分解，提取出搜索窗口内道路对应的特征值 $\lambda_{1,2}$ 与道路方向 v_1, v_2

$$\lambda_{1,2} = \frac{1}{2} \left(\text{tr}(J) \pm \sqrt{(J_{11} - J_{22})^2 + 4J_{12}^2} \right) \quad (8)$$

$$v_1 = (\cos\theta, \sin\theta)^T, v_2 = (-\sin\theta, \cos\theta)^T \quad (9)$$

式中， $\text{tr}(J)$ 表示矩阵 J 的迹， v_1 表示窗口中道路的主方向， v_2 表示道路的法向，与主方向正交， θ 则为

$$\theta = \frac{1}{2} \arctan \frac{2J_{12}}{J_{11} - J_{22}} \quad (10)$$

各搜索窗口内矢量簇的线性结构显著度可由各向异性度量 A 表示：

$$A = \frac{\lambda_1 - \lambda_2}{\lambda_1 + \lambda_2 + \varepsilon} \quad (11)$$

式中， ε 是一个极小的扰动项，为了避免平滑区域或弱纹理场景中分母为零。对于任意矢量簇，其方向用 $u = (u_x, u_y)$ 表示，与窗口内道路张量的对齐度可表示为

$$D = \max(|u \cdot v_1|, |u \cdot v_2|) \in [0, 1] \quad (12)$$

当矢量方向与结构张量估计出的图像道路方向一致时， D 趋近于 1。

考虑到 SAR 乘性噪声导致的弱对比区域易产生虚高评分，进一步以掩膜内平均梯度强度构建矢量道路与图像道路匹配一致性的评分权重：

$$\bar{g} = \frac{1}{|\Omega|} \sum_{\Omega} \sqrt{I_x^2 + I_y^2}, \quad (13)$$

$$W(\bar{g}) = 1 - \alpha \exp(-\beta \bar{g}) \quad (14)$$

式中， $\alpha \in (0, 1]$ ，设定为弱纹理场景下的最低置信度， α 的取值范围在 $[0.6, 1.0]$ ， α 越低，对弱纹理道路的匹配更加严格，可有效抑制低对比噪声，但可能丢掉窄路/阴影区等真道路； α 越高，

越“宽松”，弱纹理也能留在候选集合里。 β 表示与平均梯度强度相关的上升速率， β 值越大，评分对梯度增强的响应更剧烈，能更快把清晰道路与背景拉开，但在局部对比不均一时也更易产生过分两极分化；值越小，响应更平缓，鲁棒但对强路段的区分度略降。该构造能有效评价是否存在足够梯度信息支撑道路方向判定，当道路纹理清晰时， $W(\bar{g})$ 接近 1，弱纹理条件下则被下调至 $1 - \alpha$ ，以此降低噪声驱动的伪高分。

最终，给定矢量簇在给定偏移量 $((\Delta x, 0)$ 或 $(0, \Delta y)$) 下的道路匹配度评分可以表示为

$$S(\Delta) = \max(0, A) \cdot D \cdot W(\bar{g}) \quad (15)$$

在搜索窗口中逐步移动道路掩膜，当道路匹配度评分 $S(\Delta)$ 最大时，对应的偏移量 Δ 即为该簇最佳偏移量。

城市场景散射机制复杂，道路分布密集，在偏移量搜索的过程中往往会出现误匹配，陷入局部最优解。如何过滤匹配结果，提取出置信度较高的偏移量也是算法的关键步骤。本研究采用 DBSCAN (Density-Based Spatial Clustering of Applications with Noise) 算法 (Ester 等, 1996)，基于密度对各道路簇的最佳偏移量进行聚类，选择其中最大聚类团进行加权平均得到最佳偏移量。

与多数研究采用的随机一致性采样 RANSAC (RANdom SAmple Consensus) 算法相比，DBSCAN 在城市 SAR 道路偏移量估计中更具鲁棒性。RANSAC 假设误差为随机噪声，而城市 SAR 影像中的误匹配点往往呈现结构化分布（如几何畸变、密集道路分布导致的误匹配）。在此情况下，RANSAC 易受局部异常团影响。相比之下，DBSCAN 在偏移量区间中搜索高密度团，从统计角度识别真实道路偏移量并剔除稀疏离群点，从而获得更稳定的全局偏移估计。

DBSCAN 算法以半径 r 的邻域与最小点数 m 定义密度，若某点的邻域包含至少 m 个样本，则标记为核心点；核心点通过密度可达关系不断扩张形成团，邻域内不足 m 而又与团相邻的为边界点，其余为噪声。其算法核心步骤为：依次遍历未访问的样本，查询其距离为 r 的邻域，若满足核心点条件则新建团并递归扩张，将所有密度可达的点并入；若不满足则临时标记为噪声。该算法无需预设团数，能发现任意形状的团并自然剔除离群点。

考虑到全局偏移是一项系统性误差, 各线矢量簇应具有相同的偏移方向, 可进一步优化算法, 在搜索过程中对每组簇分别进行单向偏移, 计算其在正向(距离/方位向)和负向的最佳偏移量和评分, 分别进行密度聚类后, 比较两个方向上最大聚类团的平均评分可确定总偏移量方向和大小。

2.4 基于相位一致性的局部偏移校正

精匹配是在全局偏移基础上, 将整幅影像分割为若干个子块, 进行局部空间相关误差精细化估计, 最后整合各子块的结果, 实现对整张影像的精校正。子块划分的本质是认为该区域内各定位误差的波动最小, 从而能以区域内道路的偏移量均值代表这块区域的总体偏移量。正如2.1节分析, 大气传播误差在所有空间相关误差具有最大的影响, 因此, 划分子块时需保证区域内各项定位误差, 尤其是大气传播误差, 具有较高的空间一致性。对于内陆平原区域, 大气波动平缓, 可以采用较大的子块范围; 而对于山区或者是沿海区域, 垂直分层大气和湍流大气使得大气变化剧烈, 适合采用更小的子块范围。

本阶段匹配评分函数采用相位一致性算法, 该算法以跨尺度、跨方向的相位对齐为核心, 具有在结构边缘与角点处呈尖锐响应的特点, 被不少研究被用于 SAR 影像与异源数据的匹配(叶沅鑫等, 2024)。

首先利用一组正交(偶/奇) Log-Gabor 滤波器对于每个子块进行卷积来生成多尺度和多方向的特征响应:

$$E_{s,o} = (I(x,y) * g_{s,o}^{\text{even}}), O_{s,o} = (I(x,y) * g_{s,o}^{\text{odd}}) \quad (16)$$

式中, $g_{s,o}^{\text{even}}$ 和 $g_{s,o}^{\text{odd}}$ 分别表示滤波器的偶/奇对称的空间域形式, o 表示滤波器的方向, s 表示滤波器的尺度。累加各尺度响应后, 任意像素 x 在方向 o 的局部能量 \mathcal{E}_o 和局部幅度 A_o 可以表示为

$$\mathcal{E}_o(x) = \sqrt{\left(\sum_s E_{s,o}\right)^2 + \left(\sum_s O_{s,o}\right)^2}, \quad (17)$$

$$A_o(x) = \sum_s \sqrt{E_{s,o}^2 + O_{s,o}^2}, \quad (18)$$

经噪声阈值与权重归一后, 与局部结构最匹配的相位一致性强度可以计算为

$$PC(x) = \max_o \frac{|\mathcal{E}_o(x) - T_o|}{A_o(x) + \varepsilon} W_o \quad (19)$$

式中, T_o 是噪声阈值, W_o 为频带覆盖权重, ε 是防

止分母为0的极小项。将最大响应方向对应的法向角记为 $\Theta(x)$, x 所属的线矢量簇 c 对应的道路线切向角记为 φ_c , 通过二者的拟合程度可构造方向权重:

$$\alpha_c(x) = \cos^2\left(\Theta(x) - \left(\varphi_c + \frac{\pi}{2}\right)\right) \in [0,1] \quad (20)$$

与粗匹配过程类似, 对于每个线矢量簇生成半径为 $\Delta\varepsilon$ 的搜索窗口, 并进行掩膜。在搜索窗口中, 偏移量为 Δd 时, 对应的匹配度评分可表示为

$$S_{pc}(\Delta d) = \sum_{x \in \Omega} PC(x) \alpha_{pc}(x) \quad (21)$$

当 $S_{pc}(\Delta d)$ 达到窗口内最大值时, 对应的 Δd 记为线矢量簇在子块中的最佳偏移量。

在每个子块最佳偏移 $\hat{\Delta}_p = (\hat{\Delta}_{x,p}, \hat{\Delta}_{y,p})$ 计算完成后, 将其视为残余位移场的离散采样点, 以块中心 (x_p, y_p) 为自变量进行最小二乘拟合, 得到全局的二阶偏移多项式, 完成对涪城一号 SAR 影像的几何精校正。

3 结果与分析

3.1 实验区域及数据

实验区域位于中国腹地的湖北省武汉市, 主要包括武汉市长江以南的重点区域, 该区域人口密集, 涵盖湖泊、农田、山丘等自然要素, 分布着道路、桥梁、隧道、高层建筑等城市基础设施, 属于典型的城市场景, 适合用于本算法的测试。

实验数据采用从 2024 年 3 月 31 日至 2024 年 11 月 6 日拍摄的 19 景条带模式降轨左视涪城一号影像数据, 其中, 2024 年 11 月 6 日的影像被选为主影像, 其余影像均与其配准。经过影像裁剪, 完整提取了实验区域对应的影像范围, 图像尺寸为 7000 像素×5000 像素(方位向×距离向), 方位向与距离向像素采样间隔分别为 1.67 m 和 1.25 m。

高程数据采用欧洲航天局 2019 年发布的 Copernicus DEM, 空间分辨率为 30 m。道路矢量数据来自开源数据集 OSM (OpenStreetMap) 在 2025 年 1 月更新的武汉市道路数据。OSM 是一款基于众包模式采集的开源地理基础信息数据集, 依托全球志愿者共同维护, 通过与多种来源(如 GPS 轨迹、卫星影像与本地知识)进行交叉验证, 在多数地区表现出了较高的空间准确性(Neis等, 2011)。考虑到算法实施需要特征明显, 具有一定长度的

道路, 从所有 OSM 道路矢量数据中筛选出了 927 条属性为 “primary” 和 “secondary” 的城市主要

道路用于实验。实验区覆盖及 SAR 平均强度图如图 3 所示。

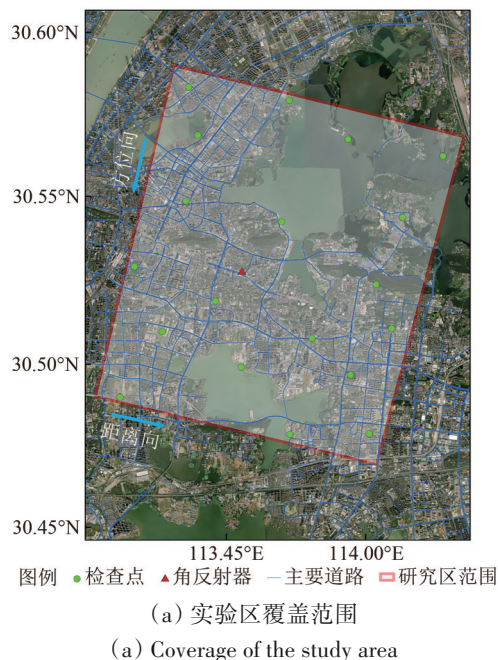


图 3 实验区域

Fig. 3 The study area

3.2 实验设置

进行几何精校正前, 本研究首先测试了卫星的无控定位精度, 分别于 2024 年 5 月 14 日及 11 月 6 日分两次在实验区域内相同地点布置了边长 1.2 m 的铝制角反射器。角反射器的相位中心与地面标记重合, 布置前已使用 GNSS 测量该标记在 WGS84 坐标系下的大地坐标。布置时进行了角度调节, 确保角反射器开口准确对准卫星视线方向。现场布置图如图 4 所示。

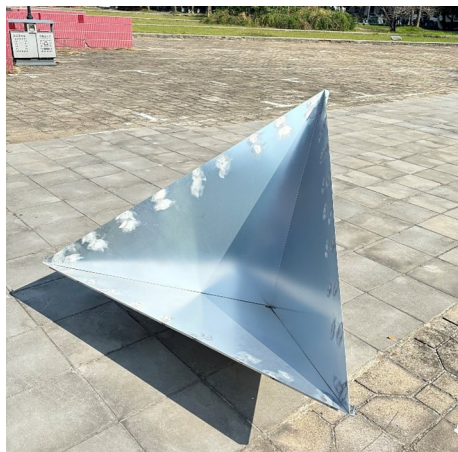


图 4 角反射器布设

Fig. 4 Deployment of the corner reflector

同时, 为了验证几何精校正后影像的定位精度, 另在实验区域人工选取了 19 个分布均匀的基准点作为检查点如图 3 (a) 中绿色圆点所示, 主要为特征明显的路灯、道路拐点、水体边缘清晰的角点等。

在本算法实施过程中, 首先从实验区所有道路中筛选出方向与 SAR 影像方位向与距离向一致且具有一定长度的线矢量, 为了保留尽可能多的矢量数据同时确保校正效果, 根据经验选择了大小适中的阈值参数, 其中方向阈值为 18° , 长度阈值为 100 m, 筛选后获取满足条件的 446 条线矢量, 重叠窗口合并后, 得到 229 组矢量簇, 其中方位向 96 组, 距离向 133 组。粗匹配过程中, 根据已评定的影像几何定位精度以及局部空间相关的误差量级, 设置每组簇的搜索窗口半径为 40 像素; 考虑到本数据集道路纹理整体较为清晰, 为避免过抑真样本, 评分参数 α 和 β 设置较为宽松, 分别为 1.0 和 3.0; 道路掩膜的本质是将没有宽度的线矢量进行扩张将其模拟为真实的道路, 根据城市主要支路的宽度 (14—18 m), 掩膜半径设置为 4 像素; DBSCAN 的参数值 m 在低维空间下的取值范围在 [3, 5], 本文取中间值 4, r 则是利用 k-distance 曲

线方法确定为拐点值3。在精匹配时, 将整个实验区分为4个子块, Log-Gabor滤波器的尺度和方向分别为4和6, 与已有研究一致(向俞明等,

2024); 设置搜索窗口半径为10像素, 图5展示了部分区域中道路矢量与SAR影像的匹配效果。

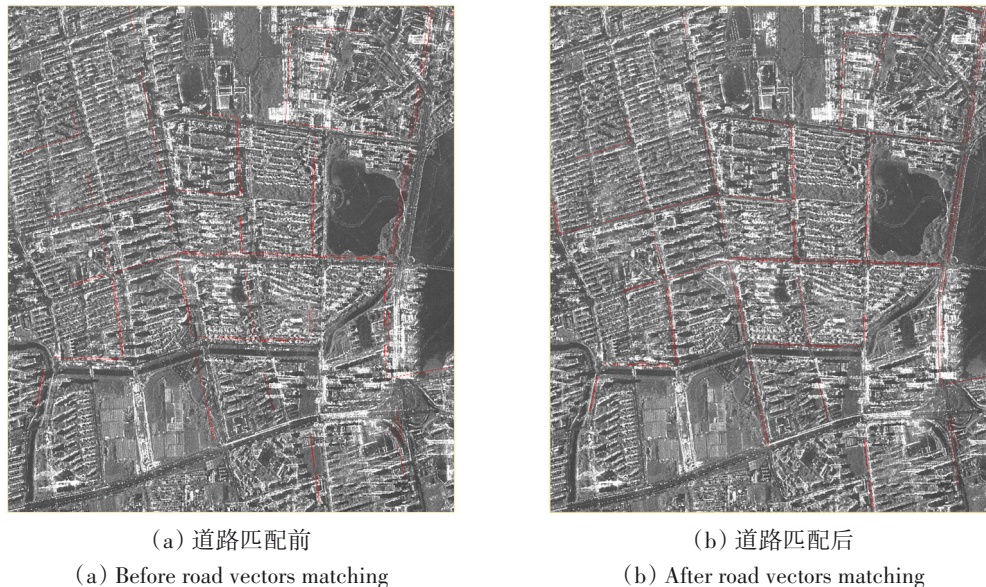


图5 道路矢量匹配结果

Fig. 5 The matching result of road vectors

为了验证提出算法的有效性, 本研究基于互联网上的公开数据, 另外选择了3种几何精校正方法作为对比, 分别是模拟SAR影像匹配、定位误差改正和光学-SAR影像匹配方法。

模拟SAR影像匹配方法利用GAMMA software实现, 其中匹配窗口大小设置为512像素, 拟合多项式阶数为2阶, 得到模拟SAR影像如图6所示。



图6 实验区模拟SAR影像

Fig. 6 The simulated SAR image of the study area

定位误差改正方法主要针对大气传播误差, 地球动力误差和成像误差进行改正。在本研究中, 对流层延迟采用了通用大气校正在线服务(<http://www.gacos.net/index.html>[2025-09-11]), 电离层延迟利用全球垂向总电子含量VTEC (Vertical Total

Electron Content) 数据(<http://ftp.aiub.unibe.ch/CODE/>[2025-09-11])改正, 地球动力误差利用固体潮数据(<https://geodesyworld.github.io/SOFTS/solid.htm>[2025-09-11])进行改正, 具体改正公式可参考已发表文献(Gisinger等, 2021)。

基于光学-SAR影像匹配的方法选择了3MRS (Matching Method for Multimodal Remote Sensing imagery) 算法(Fan等, 2022)。该算法也是一种利用相位一致性实现的全局-局部的双阶段匹配算法, 能有效克服异源影像间的辐射不变性, 已在其他研究中取得了较好效果(向俞明等, 2024)。算法基于Matlab源码实现, 输入光学影像为1 m空间分辨率的谷歌光学影像。

3.3 实验结果

获取SAR影像后, 通过目视解译获取角反射器在SAR影像上的大致位置, 对亮度最大像元进行点目标分析, 提取角反射器相位中心的亚像素级精细位置。分别进行大气传播误差、固体潮汐误差及成像误差改正后, 基于R-D方程计算真实坐标与理论坐标的距离, 即可初步评定涪城一号影像产品的无控几何定位精度, 两次实验的定位误差及均值如表1所示。

表1 涪城一号几何定位误差

Table 1 The geolocation error of Fucheng-1

日期	方位向误差/m	距离向误差/m	定位误差/m
2024-05-14	31.55	32.74	45.47
2024-11-06	29.01	35.7	45.99
平均值	30.28	34.22	45.73

利用各算法对原始影像进行几何精校正后,各检查点定位误差结果如表2所示。

从定位误差结果可以看出,本文提出算法在所有方法中具有最小的定位误差,而3MRS方法表现最差,在本实验条件下未能完成有效匹配。图7

展示了该算法在部分区域的匹配结果。目视解译可以发现,该范围内正确匹配了0个特征点。原因与第1节中提到的城市场景散射机制有关。

表2 不同算法下检查点定位误差

Table 2 The geolocation errors of all check points under different algorithms

校正方法	方位向误差/m	距离向误差/m	定位误差/m
本文算法	0.67 ± 1.53	1.92 ± 4.16	6.50 ± 4.37
模拟影像匹配	-0.37 ± 0.99	-10.41 ± 2.89	17.37 ± 4.79
定位误差改正	33.81 ± 3.67	39.06 ± 5.72	49.36 ± 3.62
3MRS	—	—	—

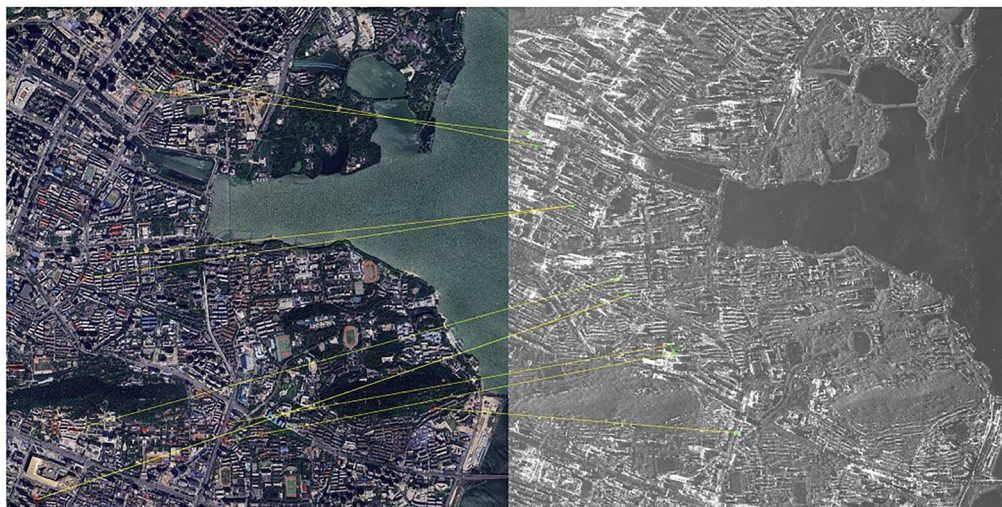


图7 部分区域光学-SAR影像匹配结果

Fig. 7 The matching result between optical and SAR images

除该算法外,定位误差改正方法效果最差,未能显著提升影像的定位效果。推测对于涪城一号卫星而言,传感器误差对于定位精度的影响更为显著。模拟SAR影像匹配方法在方位向上有着较好的改正效果,但是在距离向上表现较差,从图6可以观察到,由于DEM未能囊括城市的立体结构,模拟影像的大部分区域都不存在与真实影像匹配的散射信号,仅在部分桥梁与山丘上能观察到相似信号,导致匹配点数量稀少且分布不均,因此难以达到高精度的改正效果。除上述定量结果外,本研究基于高分辨率的谷歌影像生成了光学-SAR棋盘图,如图8所示,用于定性评估算法的改正效果。图9放大展示了图8中的框选区域,充分对比了各算法在不同地物上的校正效果。

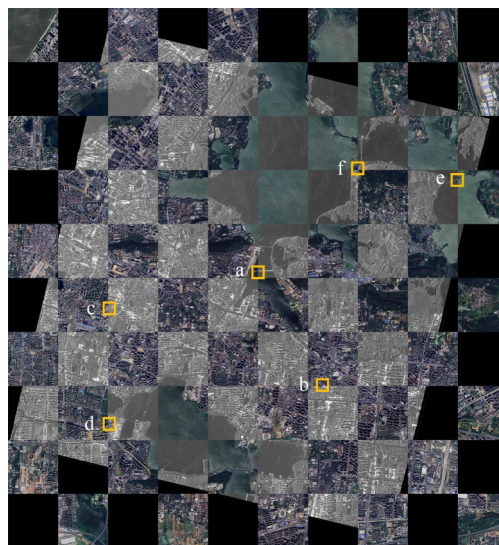
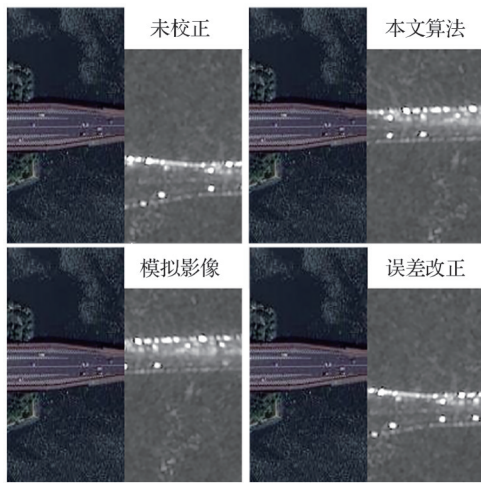


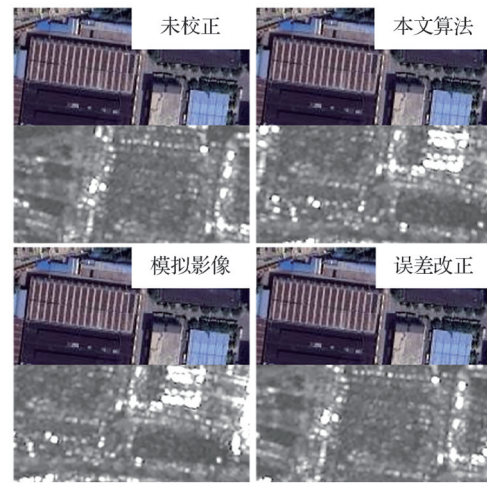
图8 本文算法校正结果展示

Fig. 8 The display of the precision rectification result from the proposed algorithm



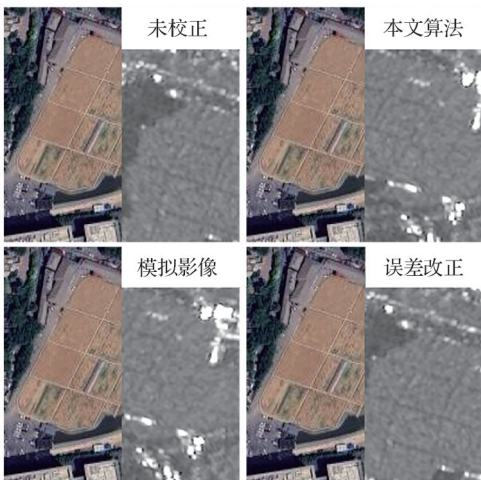
(a) 桥梁场景对比结果

(a) Comparison result in bridge scene



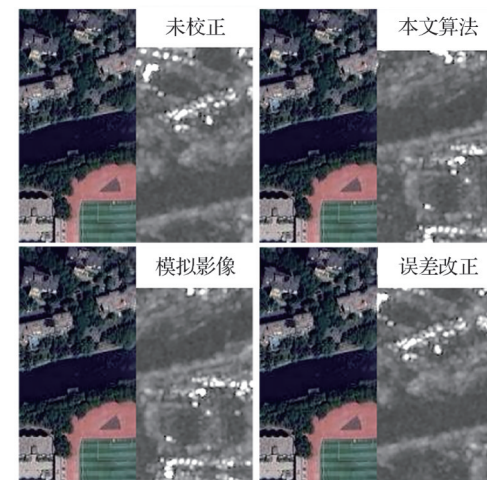
(b) 建筑场景对比结果

(b) Comparison result in building scene



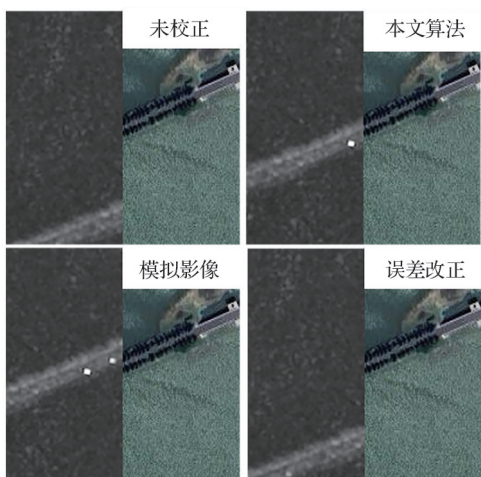
(c) 农田场景对比结果

(c) Comparison result in farmland scene



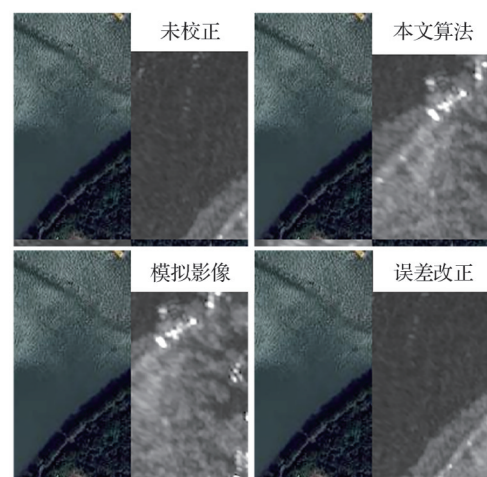
(d) 河流场景对比结果

(d) Comparison result in river scene



(e) 道路场景对比结果

(e) Comparison result in road scene



(f) 植被场景对比结果

(f) Comparison result in vegetationscene

图9 各算法校正结果展示

Fig. 9 The display of rectification results from all algorithms

从图9中可以发现,原始校正结果与光学底图间存在显著的系统性偏移,表现出较大定位误差,经本文算法校正后,SAR影像与光学影像吻合良好,局部放大图清晰地展示了匹配细节。相比之下,模拟SAR影像匹配方法在方位向上有较好的表现,距离向上则能观察到明显偏移;定位误差改正方法结果与未校正结果相似,无明显改正。以上结果均与定量的定位误差结果一致,证实了本文算法的有效性。

4 未来工作

通过在实验区内布设角反射器,本研究测试了涪城一号SAR影像的无控定位精度。然后基于道路矢量数据,通过搭建结构张量与相位一致性结合的粗—细配准框架,在城市场景高分辨SAR影像上实现了良好的几何精校正,但仍存在部分细节需进一步完善。

首先是受实验器材与场地的限制,本研究中的几何定位精度测试部分仅涵盖了两景影像,不能完全排除偶然因素对定位结果的影响。在未来研究团队将布设固定式角反射器作为控制点,在较大的时间范围内进一步评价涪城一号影像的定位精度。

其次,矢量道路匹配过程中忽视了不同道路的属性差异。道路之间由于用途、材质、大小等属性上的区别,在影像上往往会呈现不同的信号特征,例如,宽阔的城市马路中间通常存在用于分割道路的金属栅栏,在SAR影像中会表现为黯淡的条带中间出现一条明亮散射信号,而狭窄的人行道并不会出现该特征。反映到算法中,不同属性的道路间的参数设置可有所区别。在本研究中对所有道路设置了相同的搜索窗口和掩膜半径,设计匹配函数时对所有道路给予了相同的权重,忽略了道路本身的异质性。在下一步工作中,我们会设计改进参数策略,实现每条道路参数自适应适配,充分挖掘道路信息,进一步提高匹配精度。

最后是算法的鲁棒性验证。本研究利用线状地物的纹理特征,通过大量道路的偏移特征统计获取最佳偏移量,对局部的误匹配不敏感,具有较强的抗差性,适用于散射机制复杂的城市区域。受限于实验数据的获取,本研究仅在武汉市城区进行了测试,未来我们还需搜集更多城市区域高

分辨率SAR影像,在不同道路分布条件下进一步验证算法的精度。

5 结论

针对城市场景高分辨率SAR影像存在的几何定位误差问题,本研究提出一种基于道路矢量融合结构张量和相位一致性的双阶段几何精校正算法,通过道路分组将偏移量搜索从二维简化为一维,利用结构张量和密度聚类实现全局偏移估计,进一步在局部通过相位一致性对匹配结果细化。在低成本条件下,本文算法将涪城一号影像平均定位误差从40 m提升到6 m。与其他基于公开数据的几何精校正方法相比,本算法精度更高。

从原理上分析,本算法不仅适用于涪城一号SAR影像,也可应用于存在较大传感器误差或几何定标残差的SAR卫星生成的影像,有效提升其定位精度。此外,本文聚焦于高分辨SAR影像的城市场景,基于城市内广泛分布的道路实现了高精度的几何精校正;而在道路分布稀疏的其他场景,本算法具备一定的可拓展性,通过结合其他线状特征实现类似的几何约束,从而扩充在非城市场景中的适用范围。例如,水体由于其强反射特性,在SAR影像中亮度极低;因此在水体众多、河网密布的区域,可利用公开的湖泊/河流边界矢量数据来代替道路矢量数据进行特征匹配;对于沿海地区或岛屿,可在道路矢量数据的基础上,将海岸线/岛屿边界矢量数据作为补充,同时调整算法中道路掩膜的逻辑及优化关键参数,实现几何精校正。

本研究为改善涪城一号卫星几何定位精度提供了可参考的技术途径,能有效提高其在城市场景精细监测的应用潜力,有力支撑城市安全运行。

志 谢 感谢天仪研究院提供的影像数据!

参考文献(References)

- Chen J W, Zeng Q M, Jiao J, Ye F W and Zhu L J. 2016. Spaceborne SAR image geometric rectification method without ground control points using orbit parameters modulation. *Acta Geodaetica et Cartographica Sinica*, 45(12): 1434-1440 (陈继伟, 曾琪明, 焦健, 叶发旺, 朱黎江. 2016. 利用轨道参数修正的无控制点星载SAR图像几何校正方法. *测绘学报*, 45(12): 1434-1440) [DOI: 10.11947/j.AGCS.2016.20160182]

- Cheng J H, Guan Y F, Ku X S and Sun J X. 2012. Road center-point extraction from high resolution SAR images using double windows detection and particle filtering. *Journal of Electronics and Information Technology*, 34(5): 1109-1114 (程江华, 关永峰, 库锡树, 孙即祥. 2012. 利用双窗口检测和粒子滤波提取高分辨率 SAR 图像道路中心点. *电子与信息学报*, 34(5): 1109-1114) [DOI: 10.3724/SP.J.1146.2011.01062]
- Ding C B, Liu J Y, Lei B and Qiu X L. 2017. Preliminary exploration of systematic geolocation accuracy of GF-3 SAR satellite system. *Journal of Radars*, 6(1): 11-16 (丁赤飏, 刘佳音, 雷斌, 仇晓兰. 2017. 高分三号 SAR 卫星系统级几何定位精度初探. *雷达学报*, 6(1): 11-16) [DOI: 10.12000/JR17024]
- Ding L J, Tao Q X, Li T, Chen Q F and Chen Y. 2020. A joint geometric calibration technique for GF-3 SAR image in wide area. *Acta Geodaetica et Cartographica Sinica*, 49(5): 598-610 (丁刘建, 陶秋香, 李涛, 陈乾福, 陈洋. 2020. 高分三号 SAR 影像广域范围联合几何检校技术. *测绘学报*, 49(5): 598-610) [DOI: 10.11947/j. AGCS.2020.20190276]
- Dong J, Zhang L, Liao M S and Gong J Y. 2019. Improved correction of seasonal tropospheric delay in InSAR observations for landslide deformation monitoring. *Remote Sensing of Environment*, 233: 111370 [DOI: 10.1016/j.rse.2019.111370]
- Ester M, Kriegel H P, Sander J and Xu X W. 1996. A density-based algorithm for discovering clusters in large spatial databases with noise//*Proceedings of the Second International Conference on Knowledge Discovery and Data Mining*. Portland: AAAI Press: 226-231
- Fan Z L, Liu Y X, Liu Y X, Zhang L, Zhang J J, Sun Y S and Ai H B. 2022. 3MRS: an effective coarse-to-fine matching method for multimodal remote sensing imagery. *Remote Sensing*, 14(3): 478 [DOI: 10.3390/rs14030478]
- Feng S M, Dai K R, Sun T G, Deng J, Tang G M, Han Y K, Ren W J, Sang X R, Zhang C W and Wang H. 2024. Mini-satellite Fucheng 1 SAR: interferometry to monitor mining-induced subsidence and comparative analysis with sentinel-1. *Remote Sensing*, 16(18): 3457 [DOI: 10.3390/rs16183457]
- Garthwaite M. 2017. On the design of radar corner reflectors for deformation monitoring in multi-frequency InSAR. *Remote Sensing*, 9(7): 648 [DOI: 10.3390/rs9070648]
- Gisinger C, Schubert A, Breit H, Garthwaite M, Bals U, Willberg M, Small D, Eineder M and Miranda N. 2021. In-depth verification of sentinel-1 and TerraSAR-X geolocation accuracy using the Australian corner reflector array. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 59(2): 1154-1181 [DOI: 10.1109/TGRS.2019.2961248]
- Guo S K, Dong J, Zhang L and Liao M S. 2023. Web-based visualization and interpretation platform for massive InSAR point clouds. *National Remote Sensing Bulletin*, 27(7): 1744-1753 (郭绍琨, 董杰, 张路, 廖明生. 2023. 海量 InSAR 点云在线可视化与解译平台. *遥感学报*, 27(7): 1744-1753) [DOI: 10.11834/jrs.20232131]
- Lei Z K, Feng Y J, Xi M R, Wang J F and Tong X H. 2025. Initial geolocation accuracy monitoring and improvement of Gaofen-3 synthetic aperture radar images over multiple terrains. *Journal of Tongji University (Natural Science)*, 53(7): 1112-1123 (雷振坤, 冯永玖, 席梦镛, 王家丰, 童小华. 2025. 高分三号合成孔径雷达影像多类地形初始定位精度监测与提升. *同济大学学报(自然科学版)*, 53(7): 1112-1123) [DOI: 10.11908/j. issn. 0253-374x. 24036]
- Liao M S, Wang R, Yang M S, Wang N, Qin X Q and Yang T L. 2020. Techniques and applications of spaceborne time-series InSAR in urban dynamic monitoring. *Journal of Radars*, 9(3): 409-424 (廖明生, 王茹, 杨梦诗, 王楠, 秦晓琼, 杨天亮. 2020. 城市目标动态监测中的时序 InSAR 分析方法及应用. *雷达学报*, 9(3): 409-424) [DOI: 10.12000/JR20022]
- Liu J Y, Qiu X L, Hu Y X and Hong W. 2014. Geolocation of HJ-1C satellite image using one GCP//2014 IEEE Geoscience and Remote Sensing Symposium. Quebec City: IEEE: 4776-4779 [DOI: 10.1109/IGARSS.2014.6947562]
- Montazeri S, Rodríguez González F and Zhu X X. 2018. Geocoding error correction for InSAR point clouds. *Remote Sensing*, 10(10): 1523 [DOI: 10.3390/rs10101523]
- Mou J W, Wang Y, Hong J, Wang Y C, Wang A C, Sun S Y and Liu G K. 2023. First assessment of bistatic geometric calibration and geolocation accuracy of innovative spaceborne synthetic aperture radar LuTan-1. *Remote Sensing*, 15(22): 5280 [DOI: 10.3390/rs15225280]
- Neis P, Zielstra D and Zipf A. 2011. The street network evolution of crowdsourced maps: OpenStreetMap in Germany 2007-2011. *Future Internet*, 4(1): 1-21 [DOI: 10.3390/fi4010001]
- Qiu X L, Han C Z and Liu J Y. 2013. A method for spaceborne SAR geolocation based on continuously moving geometry. *Journal of Radars*, 2(1): 54-59 (仇晓兰, 韩传钊, 刘佳音. 2013. 一种基于持续运动模型的星载 SAR 几何校正方法. *雷达学报*, 2(1): 54-59) [DOI: 10.3724/SP.J.1300.2013.20072]
- Schwerdt M, Schrank D, Bachmann M, Gonzalez J H, Döring B J, Tous-Ramon N and Antony J W. 2012. Calibration of the TerraSAR-X and the TanDEM-X satellite for the TerraSAR-X mission//9th European Conference on Synthetic Aperture Radar. Nuremberg: VDE: 56-59
- Wang C S, Wei M X, Qin X Q, Li T, Chen S, Zhu C H, Liu P and Chang L. 2024. Three-dimensional lookup table for more precise SAR scatterers positioning in urban scenarios. *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*, 209: 133-149 [DOI: 10.1016/j.isprs.2024.01.028]
- Wang Y A, Dong J, Zhang L, Zhang L, Deng S H, Zhang G K, Liao M S and Gong J Y. 2022. Refined InSAR tropospheric delay correction for wide-area landslide identification and monitoring. *Remote Sensing of Environment*, 275: 113013 [DOI: 10.1016/j.rse.2022.113013]
- Wei X H, Zhang L, He X Y and Liao M S. 2012. Spaceborne SAR image geocoding with RFM model. *Journal of Remote Sensing (in Chinese)*, 16(5): 1089-1099 (魏晓红, 张路, 贺雪艳, 廖明生. 2012. 基于有理函数模型的星载 SAR 影像几何校正. *遥感学报*, 16(5): 1089-1099) [DOI: 10.11834/jrs.20121255]

- Wu X, Ye W and Lao G C. 2018. Geometric correction method of SAR image based on vector map. *Engineering of Surveying and Mapping*, 27(10): 52-57, 63 (吴戌, 叶伟, 劳国超. 2018. 一种基于矢量地图的SAR图像几何精校正方法. *测绘工程*, 27(10): 52-57, 63) [DOI: 10.19349/j.cnki.issn1006-7949.2018.10.010]
- Xiang Y M, Teng F, Wang L H, Jiao N G, Wang F and You H J. 2024. Orthorectification of high-resolution SAR images in island regions based on fast multimodal registration. *Journal of Radars*, 13(4): 866-884 (向俞明, 滕飞, 王林徽, 焦念刚, 王峰, 尤红建. 2024. 基于快速异源配准的高分辨率SAR影像海岛区域正射校正. *雷达学报*, 13(4): 866-884) [DOI: 10.12000/JR24022]
- Yang M S, Liao M S, Chang L and Hanssen R F. 2023. Interpretation of multi-epoch InSAR deformation for urban scenes: a problem analysis and literature review. *Geomatics and Information Science of Wuhan University*, 48(10): 1643-1660 (杨梦诗, 廖明生, 常玲, Hanssen R F. 2023. 城市场景时序InSAR形变解译: 问题分析与研究进展. *武汉大学学报(信息科学版)*, 48(10): 1643-1660) [DOI: 10.13203/j.whugis20230289]
- Yang M S, López-Dekker P, Dheenathayalan P, Liao M S and Hanssen R F. 2019. On the value of corner reflectors and surface models in InSAR precise point positioning. *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*, 158: 113-122 [DOI: 10.1016/j.isprsjprs.2019.10.006]
- Ye Y X, Wang M M, Yang C, Yu Z R and Ge X M. 2024. Multisensor remote sensing registration method and system based on dense feature of orientated phase. *National Remote Sensing Bulletin*, 28(6): 1525-1538 (叶沅鑫, 王蒙蒙, 杨超, 喻智睿, 葛旭明. 2024. 基于方向相位稠密特征的多传感器遥感影像配准方法和系统. *遥感学报*, 28(6): 1525-1538) [DOI: 10.11834/jrs.20221765]
- Zhang Y H, Zhang J X and Yang C Y. 2003. A quasi-automatic rectification method of SAR image based on image simulation. *Journal of Remote Sensing (in Chinese)*, 7(2): 106-111 (张永红, 张继贤, 杨崇源. 2003. 基于影像模拟的SAR几何校正自动方法. *遥感学报*, 7(2): 106-111) [DOI: 10.11834/jrs.20030205]

Precision geometric rectification of Fucheng-1 Synthetic Aperture Radar imagery in urban areas based on road-vector matching

LIN Feikai¹, WANG Ru¹, DONG Jie², LIAO Mingsheng¹, ZUO Shicheng¹

1. State Key Laboratory of Information Engineering in Surveying, Mapping and Remote Sensing, Wuhan University, Wuhan 430079, China;

2. School of Remote Sensing and Information Engineering, Wuhan University, Wuhan 430079, China

Abstract: Urban security is the essential foundation of stable and sustainably developing cities. Fucheng-1, a domestic commercial SAR satellite with interferometric capability, can play an important role in urban deformation monitoring, for which geometric rectification is a critical step. High-precision geometric rectification establishes accurate correspondence between image pixels and real-world objects. Such a correspondence is essential for the semantic analysis of imagery, attributing deformation anomalies, and understanding deformation mechanisms. Given that the performance of geometric rectification depends on the geolocation capability of satellites and efficacy of precision geometric rectification methods, this study first assesses the geolocation accuracy of Fucheng-1 in stripmap mode by deploying corner reflectors. This work proposes a two-stage road-vector matching algorithm that integrates structure-tensor features with phase congruency to address the high cost and limited accuracy of conventional geometric rectification methods in urban scenes. By decoupling range- and azimuth-direction errors, performing unidirectional offset searches, applying density-based clustering, and conducting local fine matching, the proposed method achieves the precise geometric rectification of Fucheng-1 imagery in urban areas. Results show that Fucheng-1's geolocation accuracy is greater than 50 m. Furthermore, compared with other methods, such as simulated SAR-image matching, model-based error correction, and optical-SAR matching, the proposed approach yields the best performance, improving geolocation accuracy to approximately 6 m in the study area. This work provides a practical approach to enhance the geolocation accuracy of Fucheng-1 and supports the application of domestic SAR data in urban environments.

Key words: SAR, Fucheng-1, road-vector matching, geolocation, precision geometric rectification, urban monitoring, structure-tensor, phase congruency

Supported by National Key Research and Development Program of China (No. 2023YFC3009400, 2023YFC3009404); National Natural Science Foundation of China (No. 42374013, 42504033)