

InSAR 技术在地表沉降监测中的应用及误差校正方法

沈秀锋

四川省 成都市 610031

【摘要】：本研究面向城市工程场景的毫米级地表沉降监测，构建了一条融合物理建模与数据驱动校正的 InSAR 全流程。流程以复数 SLC 为起点，经配准、干涉成图、滤波与解缠后，引入三类关键误差抑制：一是利用 ERA5 再分析资料投影天顶干湿延迟，并在时序框架内对永久散射体网络进行分层回归与时空滤波以削弱对流层屏蔽；二是基于参考像元相位残差实施二维多项式长波拟合与状态向量精炼，联合稳定区与地面基准锁定零水平，剥离轨道几何相关斜坡；三是以 SRTM 高程与参考 DEM 逐像元差分并按干涉几何投影进行地形残差补偿。以上策略在上海浦东张江科学城至川沙段地铁走廊得到验证，反演结果揭示车站与盾构井周边形成多椭圆沉降洼地，区间隧道上方出现贯通低值带，施工期显著加速，运营期逐步减缓；软黏土厚层区与长期地下水开采区沉降更集中，河网与回灌区沉降相对减弱。精度评估显示，未校正时沉降速率的 RMSE 为 0.80 mm/a；叠加大气校正后降至 0.45 mm/a；引入轨道精炼后进一步降至 0.35 mm/a；并在地形残差补偿后收敛至 0.30 mm/a。结果表明，分层大气校正提供主要改善，轨道与地形校正提供稳健增益，所提方法能够在工程尺度上实现稳定可靠的毫米级沉降监测。

【关键词】：InSAR；地表沉降；大气延迟校正；轨道误差；地形残差补偿

0 引言

地表沉降是地下水敏感区与大规模地下工程集中的城市面临的关键地质灾害之一，影响轨道交通、管线与地表构筑物的安全和寿命。合成孔径雷达干涉测量具有长时序、全天候与大范围覆盖等优势，能够在区域尺度提供毫米量级的形变监测。然而，要在密集建成区稳定获取可解释的沉降信息，必须正视并处理差分干涉中的系统误差来源，包括对流层延迟造成的空间低频背景、轨道与几何误差诱发的长波斜坡以及参考 DEM 误差引起的地形残差。这些误差在空间频段与时间行为上相互耦合，若处理不当，将严重扭曲形变反演与工程解译。基于此研究需求，本研究提出一条面向沉降监测的 InSAR 误差分离与校正策略，强调将再分析资料驱动的分层延迟投影与永久散射体网络的时空滤波相结合，在时间上约束形变低秩特征，在空间上抽离大气屏蔽；同时把轨道长波作为几何项建模并在时序网络中与零水平绑定，以避免跨期漂移；进一步以像元级高程差投影补偿地形残差并抑制地形梯度耦合。通过在上海地铁走廊上的应用验证，旨在为城市工程提供更高可信度的沉降监测基础与风险识别依据。

1 InSAR技术在地表沉降监测中的应用原理

鉴于地表沉降呈现毫米级缓变特性，InSAR 把两景复数 SAR 影像在视线向的相位差当作形变指示量来使用，相位差由路径长度变化与散射体稳定性共同驱动。数据处理以 SLC 复数主辅影像为起点，先进行辐射定标、精密轨道更新与亚像素配准，见图 1。随后构建干涉图并计算相干性，以相干性掩膜抑制装配误差与散斑噪声，进而开展相位滤波与基线估计，把平地相位去除。差分干涉的关键在于把外部数字高程模型模拟的

地形相位从干涉相位中扣除，得到形变主导的差分相位，再进行网络约束的相位解缠，减少缝合断裂。面向沉降提取，还需对长波轨道残差进行多项式拟合校正，对对流层延迟实施外部气象模型或时空滤波校正，并对地形残差进行二次消解。为了提高时变形的表达能力，可开展时序 InSAR，把多时相干涉对组织为网络，采用永久散射体方法或小基线集方法估计视线向形变速率与时间序列；最终依据观测几何把视线向形变转换为垂向沉降，必要时融合 GNSS 地面基准站的高程变化以提升解译稳定性，输出沉降栅格结果与质量控制指标。

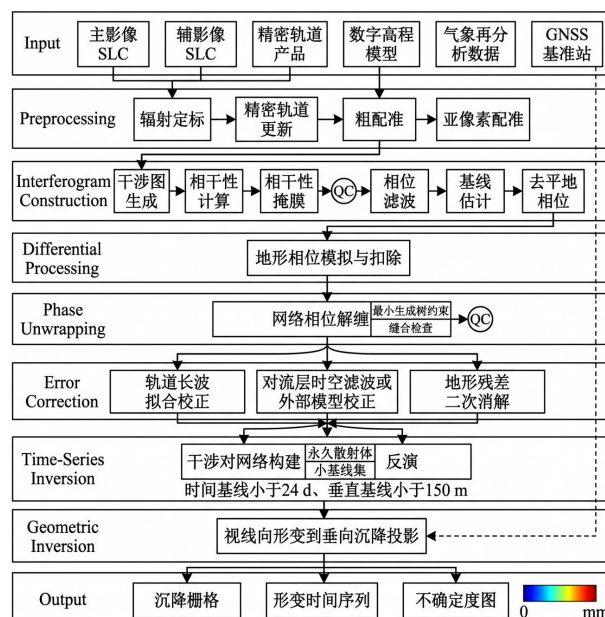


图1 InSAR地表沉降监测数据处理流程图

2 地表沉降监测中的InSAR误差校正方法

2.1 大气延迟误差校正方法

在差分干涉测量的形变解译中,大气延迟把视线向相位引入空间低频与时间相关的系统误差,其中对流层贡献由干延迟与湿延迟两部分叠加而成,干延迟主要受气压控制并表现出随高程单调分层的特性,湿延迟受水汽非均匀分布驱动且在水平尺度上变化更为剧烈;平流层延迟通常较为平滑,但在强温度梯度场中仍可能形成缓慢起伏的相位背景。基于地表沉降监测的毫米级灵敏度要求,需要把分层项与湍流项分离处置,从物理建模与数据驱动两条路径协同削弱大气相位屏蔽效应。

从物理建模角度来看,可把 ERA5 再分析资料当作外部约束来使用,按影像获取的具体时刻提取气压、温度与比湿等三维气象要素,先计算天顶干延迟与天顶湿延迟,并把其投影到传感器的视线方向。干延迟可由气压驱动的解析式获得,湿延迟则由水汽折射率积分得到;若研究区地形起伏显著,可进一步基于 ERA5 的等压面剖面完成沿路径的折射率积分,把近地层与平流层的贡献统一量化。为了减轻时次差异带来的误配,可对 ERA5 逐小时产品在影像观测时刻上进行线性内插,再把模型延迟场重采样到 SAR 几何网格,并依据主辅影像的观测几何计算差分延迟。该步骤把对流层分层主导的背景项提前剔除,为后续的网络约束相位解缠与形变反演提供更稳定的相位基面。

$$\phi_{\text{corr}}(x, t_i, t_j) = \phi_{\text{obs}}(x, t_i, t_j) - \frac{4\pi}{\lambda} [m_h(\theta) \Delta ZHD(x, t_i, t_j) + m_w(\theta) \Delta ZWD(x, t_i, t_j) + \alpha h(x)]$$

其中, ϕ_{corr} 表示经大气校正后的差分相位(单位: rad), ϕ_{obs} 为原始差分相位观测量(单位: rad), λ 为雷达工作波长(单位: m), $m_h(\theta)$ 与 $m_w(\theta)$ 分别为干分量与湿分量的映射函数,依赖于入射角 θ (无量纲), ΔZHD 与 ΔZWD 分别为主辅时刻的天顶干延迟与天顶湿延迟差值(单位: m), $h(x)$ 为像元的正射高程(单位: m), α 为相位对高程的线性分层系数,用于吸收残余的地形相关大气梯度(单位: rad · m⁻¹)。

从数据驱动角度来看,可在时序 InSAR 框架内构建永久散射体像元网络,把具有稳定散射特性的像元在多时相上进行联合估计,并且对每个时次提取空间低频的残余大气屏蔽。具体做法是把几何基线严格受限的小基线干涉对作为观测方程,采用时空分解来约束形变信号的低秩特征,同时把大气相位视作空间上低通而时间上相对高频的扰动项进行分离;在此基础上,对每个干涉历元开展局地高程相关回归,迭代估计并更新式中分层系数,从而补偿 ERA5 在近地面水汽细结构与地形遮挡条件下的不足。依靠外部物理模型与 PS 网络滤波的叠加策略,可把分层项与湍流项在不同尺度上加以削弱,使差分干涉相位更贴近真实的形变响应,并且为后续的轨道长波项拟合与地形

残差二次消解提供更干净的相位输入。

2.2 轨道误差校正方法

鉴于重复轨道 InSAR 对毫米级沉降的灵敏度要求,轨道星历的微小偏差会被放大为主导的长波干扰源。其主要原因囊括动力学模型的简化、测轨站链路延迟的时间漂移、姿态与时间基准解算误差的累积,进而在干涉域表现为沿距离和方位缓慢变化的相位坡度与条带,同时扭曲外轨基线估计,使地形相位扣除与差分相位解译产生系统偏移。从误差机理出发,轨道误差具有低频、几何相关和跨时相一致的特性,这为后续基于参考点相位残差的轨道精炼提供了可辨识的参数空间。

围绕该特性,本研究把轨道精炼算法嵌入差分链路,以参考点相位残差作为代价函数来更新主辅状态向量。具体而言,依靠相干性阈值与时序稳定性筛选出的永久散射体构建参考集,先在影像几何中剔除地形项并削弱对流层分层背景,再在距离与方位的二维平面上拟合低阶多项式轨道斜坡与弯曲项,借助迭代再加权最小二乘设置稳健权重,把散射异常或局部形变像元的影响压低。考虑视线向敏感性随入射角的变化,拟合过程中把距离向权因子按轨道高度与入射角函数进行设定,并对公共轨道段的条带进行交叉比对以检验参数稳定性。拟合得到的修正量被回写至主辅状态向量,生成轨道校正后的干涉相位场。面向时序网络,为防止跨期漂移,把每个干涉历元的长波轨道项作为独立参数在共同主影像约束下联立求解,并依靠稳定区或 GNSS 基准点锁定零水平,避免把区域性沉降误吸收到轨道斜坡内。为进一步减弱与地形残差的耦合,采用基线再估计与外部控制点的联合约束,把轨道项限定为观测几何误差的表征。由此推导的轨道精炼流程在空间上分离长波斜坡,在时间上维持参数一致性,从而把轨道误差对沉降反演基面的影响降至可接受水平。

2.3 地形残差误差校正方法

面向沉降反演的高灵敏度约束,地形残差的主要来源指向参考 DEM 精度不足以及雷达几何与地形几何的不一致。进一步观察发现,垂直基准与大地基准未统一、栅格分辨率与雷达采样格网不匹配、空洞填补与平滑造成的坡面细节丢失,以及坡陡与叠掩区的投影畸变,都会把未能完全扣除的地形项残留到差分相位中,并且在空间上呈现与地形梯度耦合的低频起伏。由此推导,需把更高质量的外部高程与雷达几何严格对齐,构建可在像元级实施的地形残差补偿策略。本研究选用 SRTM 1 弧秒高精度 DEM 作为高程控制,把其转换至椭球高体系并与传感器轨道参数和入射角场联合求解,在大地坐标下完成一体化几何约束;再把高程场重投影至距离与方位坐标,采用保持坡折特征的三次卷积进行重采样,以降低边缘平滑带来的坡度偏

差；随后与差分链路中原参考 DEM 进行逐像元差分，得到高程误差项 Δh_{SRTM} ，按干涉几何灵敏度计算地形相位补偿量并从干涉相位中直接扣除。面向时序网络，把 Δh_{SRTM} 在全部干涉对中保持一致以避免跨期漂移；对低相干、遮蔽与叠掩区设置严格掩膜，防止错误补偿传播；对山前带等高梯度区域，叠加小窗口的局地斜率约束来抑制重采样引入的别名，从而把地形残差的空间系统予以削弱。

$$\Delta\phi_{\text{topo}}(x) = \frac{4\pi}{\lambda} \frac{B_{\perp}(x)}{r(x)\sin\theta(x)} \Delta h_{\text{SRTM}}(x)$$

其中， $\Delta\phi_{\text{topo}}(x)$ 表示需从干涉相位中扣除的地形相位补偿量（单位：rad）， λ 为雷达工作波长（单位：m）， $B_{\perp}(x)$ 为像元的垂直基线投影长度（单位：m）， $r(x)$ 为斜距（单位：m）， $\theta(x)$ 为入射角（单位：rad）， $\Delta h_{\text{SRTM}}(x)$ 为 SRTM 1 弧秒 DEM 与差分步骤中参考 DEM 的像元高程差（单位：m）。

把上述补偿纳入差分链路后，可在源头上削弱由 DEM 误差引发的长波与中波地形残差，为后续的轨道长波拟合以及大气分层回归提供更干净的相位基面。

3 InSAR沉降监测及误差校正的应用效果评估

3.1 实际监测区域的沉降结果分析

在上海市浦东新区张江科学城至川沙段地铁 16 号线及其与 11 号线交会周边，选取沿线两侧连续带状建成区作为监测范围，依托时序 InSAR 反演结果对沉降的时空格局开展解释。处理链把对流层分层、轨道长波以及地形残差做了联合削弱后，沿线呈现以车站和盾构始发接收井为核心的多椭圆形沉降洼地，区间隧道上方表现为贯通的狭长低值带，并且在施工强度较高的时间段出现明显加速，进入运营后沉降速率逐步趋缓。从空间耦合关系来看，厚层软黏土分布的张江高科与唐镇片区沉降更为集中，施工期间的深基坑降水把周边地下水位拉低，诱发土体固结与渗流再分配，形成环向梯度突出的沉降圈层；

工业园南侧老井群周边则出现独立沉降斑块，其形态与承压含水层开采边界相契合，体现长期抽采背景的叠加效应；邻近河网与回灌点的路段沉降相对减弱，反映局地补给对有效应力场的调节作用。进一步观察发现，车辆段集中堆载以及上覆市政荷载会把短期附加变形叠加到既有背景中，地层中粉细砂透镜体的局部发育又让带状沉降呈现分段性与间断性。由此推导，该区域沉降的主导机制由施工期基坑降水及盾构扰动引发的固结压缩与长期地下水开采共同驱动，本研究把时序演化特征与工程台账及水位记录进行交叉比对后，为沿线高风险站区与区间提出更高时效性的监测与维护建议。

3.2 误差校正前后的精度对比

基于张江科学城至川沙段沿线永久散射体网络的时序反演，本研究把均方根误差 RMSE 当作精度评价量，并在 GNSS 高程变化与稳定区共同约束下，对比差分链路在不同误差校正阶段的表现。对比结果表明，未做系统校正时 RMSE 维持在 0.80mm/a，这一水平受对流层分层与湍流项共同驱动的空间低频项主导；叠加再分析资料约束与 PS 网络的时空滤波后，RMSE 降至 0.45mm/a，说明分层项的削弱在沿江沿河与高湿区表现尤为显著；在大气校正的基础上引入二维轨道长波拟合与状态向量精炼，RMSE 进一步降至 0.35 mm/a，轨道几何相关斜坡被稳定剥离，并且未出现跨期零水平漂移；把 SRTM 像元级地形相位补偿纳入全链路后，RMSE 收敛至 0.30 mm/a，地形梯度耦合项得到额外抑制，山前带与遮蔽边缘的中波起伏明显收敛。由此推导，对流层校正提供了主要的误差削减份额，轨道精炼在大气背景已被压制的前提下贡献次级幅度，地形残差补偿在高梯度与叠掩邻域发挥边际增益。需要强调的是，这一序贯策略把不同误差源的空间频段与时间行为加以分离，维持了时序网络的稳定性，并把沉降速率从工程解释角度推进到毫米级判读的可用范围，见表 1。

表1 误差校正前后沉降监测精度对比表

校正情形	RMSE (mm/a)	相对改善幅度	主要控制项说明
未校正	0.80	0%	未开展系统误差校正
大气校正	0.45	43.8%	ERA5分层项投影与PS网络时空滤波联合削弱
大气校正 + 轨道精炼	0.35	56.3%	二维多项式长波拟合与状态向量更新
大气校正 + 轨道精炼 + 地形残差补偿	0.30	62.5%	SRTM像元级高程差补偿与基线再估计联合约束

结语

本文面向城市轨道走廊的沉降监测，构建并验证了集大气分层削弱、轨道长波精炼与地形残差补偿于一体的 InSAR 误差校正框架。以再分析资料与时序网络相结合的策略有效剥离对流层分层与湍流项，二维长波拟合与状态向量更新稳定消除几何相关斜坡，像元级高程差投影抑制地形梯度耦合，三者在不同尺度上协调作用，使时序解算的基面显著净化。在上海张江至川沙段的应用表明，该框架不仅将沉降速率的不确定度压缩

至毫米级水平，还揭示了与施工扰动、软土分布、地下水位变动及局部荷载相关的多源驱动机制，为站区与区间的差异化监测与维护提供了依据。需要指出的是，近地层水汽的细尺度变化与复杂建筑环境仍可能引入局地残差，参考高程与雷达几何对齐的误差也会在坡陡与遮蔽区放大，未来可引入更高时空分辨率的大气场与地面 GNSS 网、气象辐射计联合约束，或采用数值天气模式与同化技术提升湿延迟刻画；在几何侧，可引入激光雷达与摄影测量高程细化叠掩区建模，并融合升降轨观测



分离方位向与垂向形变；在业务侧，面向施工高峰期构建近实时处理链，联动工程台账与水位数据实现早期预警。总体而言，所提方法具备良好的可迁移性，可推广至城市地铁沿线、地下水漏斗区及地面堆载区的持续监测。

参考文献

- [1] 国计鑫, 张建阳, 施光虎, 仇勇, 范洪冬. 铁路沿线地表形变时序InSAR监测与预测方法研究[J]. 测绘科学, 2025, 50(05): 124-132.
- [2] 杨德志. 时序InSAR技术在矿区沉降监测中的应用研究[J]. 测绘与空间地理信息, 2025, 48(11): 214-216.
- [3] 谷海波, 李敏. 基于InSAR的矿山变形监测与参数反演研究进展分析[J]. 中国矿业, 2025, 34(06): 233-243.
- [4] 朱董, 徐良骥, 刘潇鹏, 曹宗友. SBAS-InSAR技术融合SOA-BP模型的矿区地表大范围沉降预测模型[J]. 矿业研究与开发, 2025, 45(06): 94-102.
- [5] 周亦, 高树志, 张守林, 孙紫坚, 陈自然, 戚麒. InSAR技术在辽宁某露天矿山地质灾害监测中应用研究[J]. 矿产勘查, 2025, 16(05): 1155-1161.
- [6] 田家奇, 梁维斌, 钱方明, 陈刚, 林梓. 干涉合成孔径雷达干涉参数定标技术研究进展[J]. 现代雷达, 2025, 47(05): 1-15.
- [7] 黄平平, 谭维贤, 汤江文, 乞耀龙, 刘浩楠, 李允亨, 冯怀超. 地基InSAR实测场景成像及形变提取数据集[J]. 信号处理,
- [8] 李新宇, 殷坤龙, 梁鑫, 谢小旭, 廖映雪, 王诺娜, 尹昊. 基于PS-SBAS-InSAR的藕塘滑坡灾害时序变形特征分析[J]. 安全与环境工程, 2025, 32(03): 216-229.
- [9] 李素敏, 聂晗, 袁利伟, 钟阳, 易恒. 综合时序InSAR与NDWPSO-SVR的穿岩洞矿段地表形变安全监测及预测[J]. 安全与环境学报,
- [10] 陈鑫, 童啄时, 刁鑫鹏, 唐中华, 陈冉丽, 李东旭. 地铁沿线地表形变MT-InSAR精细化监测与预测[J]. 测绘科学, 2025, 50(04): 38-49.

作者简介：沈秀锋（1979—），男，汉族，本科，研究方向为工程测量。