顾及影像重叠率的广域陆探1号数据处理方法：以三峡库区重庆段滑坡监测为例

王文昕[1]，冯光财[1]，纪元法[2]，王海艳[3]，熊志强[1]，陈鹤升[1]，蒋泓波[1]，贺礼家[4]

1. 中南大学 地球科学与信息物理学院, 长沙 410083;
2. 桂林电子科技大学 广西精密导航技术与应用重点实验室, 桂林 541004;
3. 重庆市二零八地质环境研究院有限公司, 重庆 400700;
4. 新加坡南洋理工大学 新加坡地球观测所, 新加坡 639798

摘 要：陆地探测1号（LuTan-1，LT-1）卫星作为中国首个L波段干涉测量卫星星座，凭借其长波长穿透性强和高时空分辨率的优势，为广域地质灾害监测提供了新的机遇。然而，卫星运行初期存在的实时轨道精度不足、影像分幅不规则以及影像间有效重叠率低等问题，制约了其在广域尺度的应用潜力。针对上述问题，本研究提出了一种顾及影像重叠率的广域LT-1卫星数据处理方法。首先，将影像按轨道分类，在时空基线约束的基础上，引入影像间重叠率约束，以优化同一轨道内不同分幅影像的干涉网络构建。随后，利用干涉图堆叠（Stacking）技术获取形变速率，并通过区域网平差技术实现不同轨道形变结果的无缝拼接。在此基础上，针对形变显著的重点区域，进一步采用小基线子集（SBAS-InSAR）技术进行精细化时序形变反演。并以三峡库区重庆段（包括云阳、奉节、巫山）为例的验证结果表明该方法的影像利用率较传统分幅分类构网策略提高62%，形变监测精度达到6.1 mm/a，显著优于传统策略中精度最优覆盖的10.7 mm/a。滑坡探测结果显示，LT-1升轨和降轨数据分别比Sentinel-1多识别57处和63处疑似滑坡隐患点，充分展现了L波段SAR卫星在复杂地表环境下的独特优势。综上，本研究提出的方法有效解决了广域LT-1数据处理中的效率与精度难题，显著提升了该卫星数据在广域地质灾害监测中的应用价值。

关键词：广域InSAR，陆探1号，重叠率约束，形变监测，滑坡识别，三峡库区，干涉图堆叠，L波段

中图分类号：P237/P2

引用格式：王文昕,冯光财,纪元法,王海艳,熊志强,陈鹤升,蒋泓波,贺礼家.2026.顾及影像重叠率的广域陆探1号数据处理方法:以三峡库区重庆段滑坡监测为例.遥感学报,30(4):848-860

Wang W X, Feng G C, Ji Y F, Wang H Y, Xiong Z Q, Chen H S, Jiang H B and He L J. 2026. A wide-area LuTan-1 data processing method considering image overlap rate: A case study of landslide monitoring in the Chongqing section of the Three Gorges Reservoir area. National Remote Sensing Bulletin, 30(4):848-860[DOI:10.11834/jrs.20255300]

1 引 言

陆地探测1号（LuTan-1，LT-1）合成孔径雷达（SAR）卫星作为中国首个以干涉测量为核心任务的L波段全极化卫星星座（李涛 等，2023），其技术特性为广域地质灾害监测带来了新的机遇。该星座由两颗参数相同的A、B卫星组成，分别于2022年1月和2月成功发射，并于2023年12月正式投入使用（唐新明 等，2024）。LT-1卫星最高空间分辨率达3 m，具备地形测绘和地表形变监测能力（Wang等，2025），已广泛应用于地震（李永生 等，2024）、冰川（Li等，2023）、冻土（Zhang等，2023）、交通运输线路（Li等，2024）、矿区（Hu等，2024）等领域的形变监测研究。其L波段

收稿日期：2025-08-14；**预印本：**2025-12-02

基金项目：广西精密导航技术与应用重点实验室项目(编号:DHKL2415);广西科技计划项目(编号:桂科AD25069103,桂科AA24206043);自然资源部和重庆市重点合作研发项目(编号:2023ZRBSHZ052);重庆市科技局技术创新与应用发展项目

第一作者简介：王文昕,研究方向为InSAR技术滑坡识别与监测。E-mail：wangwx@csu.edu.cn

通信作者简介：冯光财,研究方向为广域InSAR数据处理与参数反演。E-mail:fredgps@csu.edu.cn

信号具有强穿透能力，结合较高的空间分辨率和较短的重返周期，在西南山区等地形复杂、植被茂密区域的广域地质灾害监测中具有独特优势（韩静 等，2024；Chen等，2025）。目前利用L波段SAR卫星进行大范围形变监测已有很多例子，如日本的ALOS-2卫星已被广泛用于全球的地质灾害探测（Cai等，2023；Liang等，2025）与监测（Xia等，2024）中，其接续任务ALOS-4卫星也已于2024年发射并逐步投入使用（Ohki等，2025）。但是，这些商业卫星数据获取成本高，且在中国部分关键区域（如西南山区）的数据覆盖密度与重访能力有限，同时获取升降轨双几何观测数据存在困难，制约了其在中国复杂地质条件下形变监测的系统性应用。相比之下，LT-1卫星凭借其在国内的广泛覆盖和常态化的升降轨数据获取能力，为中国广域地质灾害监测提供了前所未有的机遇。然而，LT-1数据在实际处理中面临若干技术挑战。首先，卫星运行初期实时轨道精度不足，直接影响干涉处理精度；其次，影像分幅不规则导致影像间有效重叠率较低，严重影响广域数据处理效果。具体表现为：（1）传统时空构网过程中，低重叠率造成有效数据覆盖不足，影像利用率降低；（2）广域InSAR形变监测时，低重叠率显著增加数据拼接难度，影响最终形变结果精度。具体而言，LT-1卫星部分轨道在部分观测时相上存在数据缺失，导致影像覆盖不连续，这从根本上限制了传统拼接方法的全自动化和普适性。此外，拼接也会引入复杂的相位偏差，导致数据处理的复杂度增加。因此，研究LT-1广域数据处理中存在的问题，对于提升其数据利用率、数据处理效率和精度、充分发挥其在广域形变监测中的潜力具有重要意义。

现有研究已初步验证了LT-1卫星数据在地表形变监测中的应用价值。在单个覆盖（frame）的小范围监测研究中，Yang等（2024）基于差分合成孔径雷达干涉测量（D-InSAR）技术（Achache等，1996），利用单景的LT-1数据监测了陕西省神木市矿区沉降。许兵等（2024）采用小基线子集（SBAS-InSAR）技术（Berardino等，2002）和永久散射体（PS-InSAR）技术（Ferretti等，2001），基于单个覆盖的LT-1数据对山西大同矿区进行时序监测，结果与GPS数据高度一致。刘斌等（2024）利用D-InSAR、SBAS-InSAR技术，基于单个覆盖的LT-1数据监测了舟曲泄流坡滑坡的形变。这些研究虽证实了LT-1数据的监测能力，但均局限于单个覆盖的小范围监测。基于多个覆盖的中等空间尺度形变监测中，Li等（2024）基于多个覆盖的15景LT-1降轨数据，利用D-InSAR技术监测了山东省济南至枣庄段高铁沿线形变。杨隽等（2024）基于6个升轨覆盖及5个降轨覆盖共计22景LT-1影像，利用D-InSAR技术获取了贵州省盘州市的地表形变。于忠海等（2024）基于多个覆盖的LT-1影像，探测了济南市南部的地质灾害隐患点。但是，这些研究仅通过简单叠加多个覆盖的D-InSAR结果，未解决不同轨道数据间的拼接问题，尚未实现真正意义上的广域形变监测。

针对上述问题，本研究提出了顾及影像重叠率的广域LT-1数据处理方法。以三峡库区重庆段为实验区，通过引入重叠率以改进构网策略，并进行区域网平差拼接处理，从而显著提升数据利用率和形变监测精度，以期为充分发挥LT-1卫星在广域地质灾害监测中的潜力提供技术支撑。

2 顾及影像重叠率的广域LT-1卫星数据处理方法

本研究提出的顾及影像重叠率的广域LT-1 SAR卫星数据处理方法，主要包括：（1）LT-1数据分类及重叠率计算；（2）LT-1数据干涉构网策略与差分干涉处理；（3）广域LT-1数据Stacking处理，区域网平差拼接及重点形变区域时序SBAS-InSAR精处理。具体流程如图1所示。

2.1 LT-1数据分类及重叠率计算

在广域SAR数据处理中，具备精密轨道数据的影像通常表现出良好的轨道状态矢量一致性，这使得同一轨道（path）内不同覆盖区域可直接拼接并进行整体配准（Pepe和Lanari，2006），从而显著减少配准次数并提升处理效率（Hanssen，2001）。然而，LT-1卫星的实时轨道数据精度不足，导致同一轨道内不同覆盖区域之间存在一定的轨道状态矢量差异（李楠 等，2024），加之影像分幅不规则，部分成像时间的影像也存在缺失，导致传统的整体拼接处理方法难以适用。针对上述问题，本研究提出了一种改进的数据处理方法。首先，基于影像的中心入射角、航向角、角点坐标以及中心经纬度等信息，将研究区影像按轨道进行分类，不再进行传统的分幅细分。其次，利用各影像的

角点坐标数据，精确计算同一轨道内任意两景影像之间的几何重叠率，并将该参数作为后续差分干涉构网的关键约束条件。这一方法有效解决了因轨道精度不足和分幅不规则导致的广域数据处理难题。其中，精确计算的重叠率为后续构建高质量的干涉网络提供了关键的量化指标。

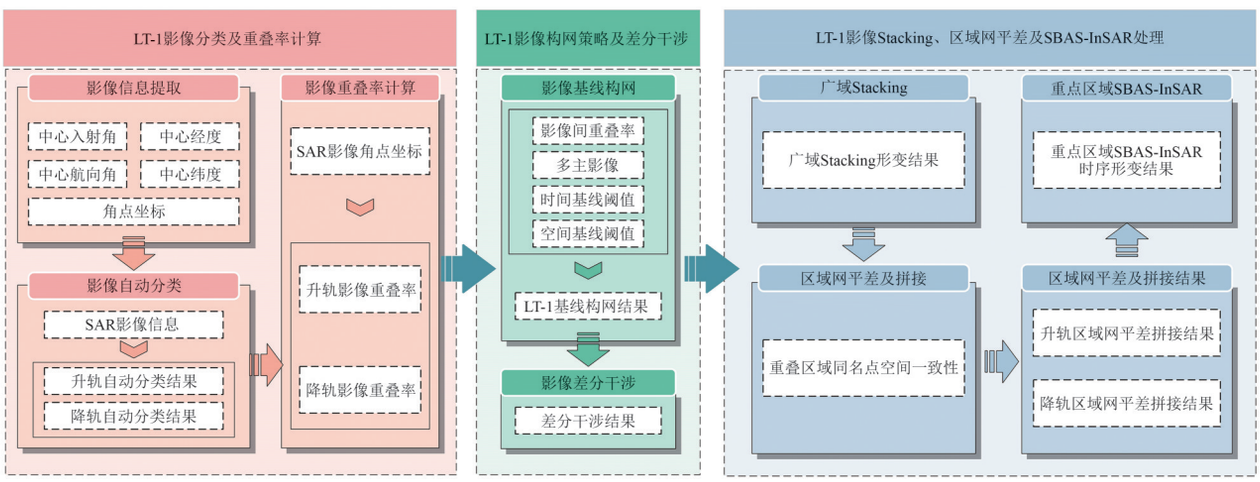


图1 顾及影像重叠率的广域LT-1数据处理流程图

Fig. 1 Wide-area LT-1 data processing flowchart with consideration of image overlap ratio

2.2 顾及影像重叠率的干涉时空构网及差分干涉处理

针对LT-1卫星SAR影像的特点，本研究提出了顾及影像重叠率的干涉时空构网与差分干涉处理方法。在构网策略选择方面，考虑到LT-1影像数量有限、分幅不规则且同一轨道下的影像无法进一步细分为不同覆盖的实际情况，本研究未采用传统的单主影像构网策略（Ferretti等，2001），而是采用多主影像构网策略。主要依据多主影像构网策略能够更好地适应影像重叠率低的特点，从而显著提高影像利用率（Berardino等，2002）。在传统时空基线约束的基础上，创新性地引入影像重叠率作为关键优化参数，通过对同一轨道内任意两景影像的时间基线、空间基线和重叠率进行综合考虑，以实现不同覆盖间干涉对构网结果的优化。其具体实现流程如下：（1）首先，该策略依据2.1节所述方法，精确计算同一轨道内任意两景影像间的几何重叠率。（2）其次，通过设定时间基线、空间基线和重叠率的阈值范围，对所有潜在的干涉对进行初步筛选。将重叠率作为一个硬性约束条件，剔除因影像间有效重叠不足而不具备干涉处理价值的影像对，在此基础上，依据时空基线相近的情况下优先选择重叠率更高的干涉对，重叠率相差不大的情况下优先选择时空基线更优的干涉对，对候选干涉对进行评估。（3）最后，依据上述评估结果，系统地构建最终的干涉网络，以最大化所有干涉对的整体质量。需要说明的是，人为分幅构建相邻覆盖间干涉对的策略不会引入系统性相位偏差，可以将不同覆盖间的重叠区域视为一致性观测进行处理。

完成干涉对构网后，需对每个构网影像进行配准处理。针对LT-1卫星实时轨道精度不足导致的初始配准精度不高问题，本研究采用王文昕等（2025）提出的类尺度不变特征变换SIFT-Like（Scale Invariant Feature Transform Like）的LT-1 SAR影像初配准方法完成LT-1影像的初配准，进一步实现精配准，显著提升了后续处理的可靠性。将同一轨道内的所有干涉对批量自动配准后，对每个干涉对进行批量差分干涉处理（Gabriel等，1989）。包括：利用基线文件和轨道参数去除参考椭球面相位，基于外部高精度DEM模拟SAR影像后，利用SIFT-Like算法将其与主SAR影像进行配准，并以此去除地形相位；再利用Goldstein自适应算法进行滤波处理，利用最小费用流MCF（Minimum Cost Flow）方法进行相位解缠，基于多项式曲面拟合去除轨道误差，利用时空滤波去除大气延迟相位，提取形变相位，并进行地理编码。

2.3 LT-1数据Stacking、区域网平差及SBAS-InSAR处理

在InSAR数据处理过程中，本研究先利用

Stacking技术获得广域的形变速率结果，从而识别出形变显著的重点形变区域，再利用SBAS-InSAR技术对这些重点形变区域进行精细化时序处理。具体流程如下：

为获得同一个轨道的形变速率，针对广域数据处理，本研究采用效率较高的Stacking技术获取初始形变速率。Stacking技术假设地表形变为线性形变，且每景SAR影像获取时刻大气延迟误差是随机分布的，通过在时间域对多时相差分干涉结果进行线性最小二乘估计，可以将大气延迟误差有效消除（Sandwell和Price，1998）。对于同一轨道下的N个干涉对，形变相位可表示为

$$\bar{\phi} = \sum_{i=1}^{N} \phi_i \cdot \Delta t_i \Big/ \sum_{i=1}^{N} \Delta t_i^2 \tag{1}$$

式中，$\bar{\phi}$代表形变速率相位，ϕ_i和Δt_i分别代表第i个D-InSAR干涉对的干涉相位以及影像获取的时间间隔。

再将形变速率相位转换为形变速率，即：

$$V_{\text{def}} = \lambda \cdot \bar{\phi} / 4\pi \tag{2}$$

式中，λ为SAR卫星传感器的波长。

通过Stacking技术处理获得不同轨道的形变速率后，由于各轨道形变结果的参考点不一致，导致相邻轨道形变结果间存在参考基准差异，引起形变结果间的不连续性，影响整体精度。为解决这一问题，本研究采用区域网平差改正方法（Wang等，2022，2024），以消除不同轨道间的参考基准差异，确保形变结果的空间一致性和连续性，最终实现研究区域Stacking形变结果的整体拼接。

此外，针对目前LT-1影像存档数据有限，影像间的有效重叠率不高，本研究只对形变量级较大的重点区域采用SBAS-InSAR技术（Berardino等，2002）进行精细化处理，以获得时序形变结果。具体而言，首先，基于Stacking形变结果，识别出形变量级较大的重点区域。其次，根据重点区域的地理范围，筛选出所有覆盖该区域的原始SAR影像。随后采用“单一主影像”策略，选择一景影像作为公共主影像，将所有筛选出的其余影像（无论其处于何种覆盖范围内）在雷达坐标系下精确配准到该主影像中。接着，将配准后的影像统一裁剪至该区域范围，从而获得了一个空间范围一致的局部影像数据集。基于这个裁剪后的数据子集，进行差分干涉、滤波、相位解缠，生成一系列的差分干涉图。若存在位于相邻覆盖间重叠区域的重点区域，则在相位解缠时选取重叠区域的高相干点作为公共参考点以统一相位基准，再逐像元对重叠区域内代表同一时相的两个解缠差分干涉相位取平均值，作为该时相在该像元位置的唯一有效观测值。最后，再联合所有处理后的差分干涉对进行SBAS-InSAR时序解算，在此过程中估算并去除残余轨道相位和大气延迟相位，从而获得整体雷达坐标系下的时序形变结果，并进行地理编码以得到最终地理坐标系下的时序形变结果。

3 实验区域与数据处理

3.1 实验区域及数据集

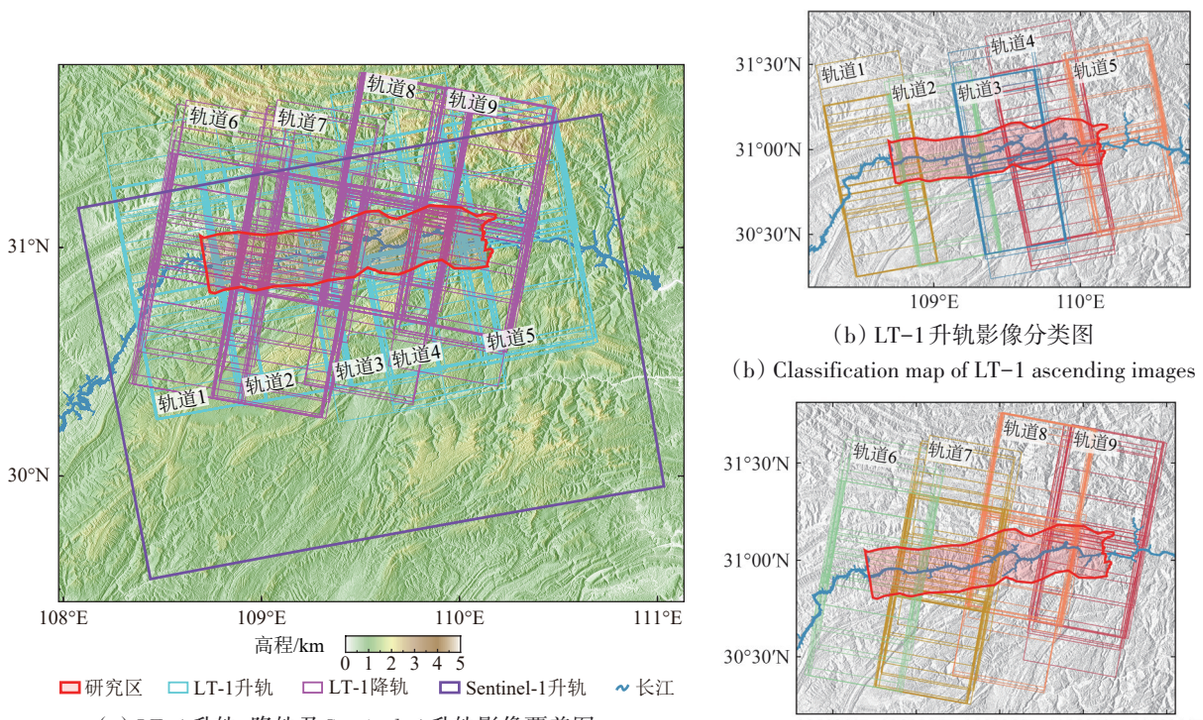
为验证本研究提出的广域LT-1数据处理方法的有效性，选择地形复杂、植被茂密以及滑坡密集的西南山区重庆市东北部（渝东北）三峡库区重庆段（Tang等，2019）作为研究区域（图2（a））。该区域处于三峡库区中游河段，位于108.68°E—110.20°E，30.78°N—31.20°N，距长江两岸约13 km，包括重庆市云阳县、巫山县和奉节县。该区域地处四川盆地东部，位于山地与丘陵过渡带，地质构造复杂，涵盖大巴山弧、渝东褶皱带和渝鄂湘黔隆起褶皱带3大构造单元（郑岳泽，2019）。在研究区特殊的地形地貌特征、降水条件、水文条件以及水位调度模式的共同作用下（彭凤友，2020），显著增加了库岸边坡失稳的风险，进而诱发滑坡灾害。

为了验证LT-1的精度水平和滑坡监测能力，本研究不仅收集了2023年6月—2024年8月的LT-1卫星数据，包括347景LT-1升轨数据和310景降轨数据，还收集了同时期覆盖该区域的C波段Sentinel-1升轨数据，用于结果的交叉验证。由于Sentinel-1降轨数据在此区域缺失，因此未纳入分析。影像覆盖见图2（a），具体的影像参数信息见表1。此外，还收集了覆盖研究区域的30 m分辨率Copernicus DEM数据、Google Earth™平台提供的光学影像和三维地形模型数据。

3.2 数据处理流程

首先对研究区的LT-1卫星数据利用GAMMA软件进行D-InSAR处理。基于第2节提出的顾及影像重叠率的广域LT-1卫星数据处理方法，对升、降轨影像进行自动分类处理，其中升轨影像划分为5个轨道（图2（b）），降轨影像划分为4个轨道

（图2（c））。在构网过程中，设置空间基线不超过300 m，时间基线不小于84 d作为约束条件，并创新性地引入最低0.6的重叠率阈值作为附加约束，显著提高了干涉对的有效观测区域。采用SIFT-Like算法（王文昕 等，2025）对构网后的影像完成配准后，进行距离向：方位向为5∶5的多视处理。对每对影像生成干涉图，去除平地相位，利用30 m分辨率的Copernicus DEM模拟SAR影像，并再次采用SIFT-Like算法将其与主SAR影像配准，并以此进行地形相位改正，从而获得差分干涉图。随后，采用Goldstein滤波算法进行自适应滤波，并利用MCF算法进行相位解缠。通过多项式拟合去除轨道误差，结合时空滤波去除大气相位获得形变相位。再利用Stacking技术获得各轨道的形变速率，最后将SAR坐标系转为地理坐标系，获得最终的形变结果。为获得研究区域的整体形变结果，采用区域网平差方法（Wang等，2022，2024）对不同轨道的形变结果进行拼接，得到研究区LT-1升轨和降轨的整体形变结果，分别如图3（a）和图3（b）所示。



（a）LT-1升轨、降轨及Sentinel-1升轨影像覆盖图

（a）Coverage map of LT-1 ascending, descending, and Sentinel-1 ascending images

（b）LT-1升轨影像分类图

（b）Classification map of LT-1 ascending images

（c）LT-1降轨影像分类图

（c）Classification map of LT-1 descending images

图2 研究区域影像覆盖图及影像分类图

Fig. 2 Image coverage map and image classification map of the study area

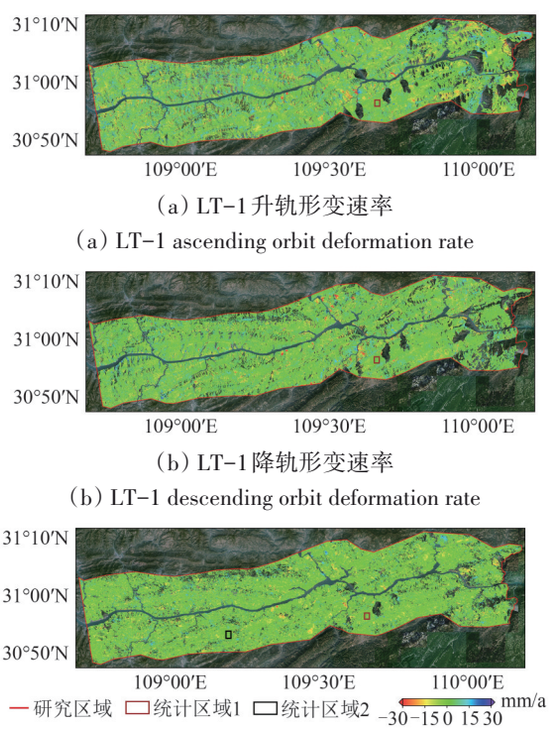
表1 LT-1与Sentinel-1卫星影像参数表

Table 1 Parameters of LT-1 and Sentinel-1 satellite images

指标	LT-1 A/B	Sentinel-1 A/B
波段	L波段	C波段
入射角/(°)	20—53	20—46
数据模式	条带模式1	干涉宽幅模式
空间分辨率/m	3	5×20
极化方式	单极化	双极化
重访周期/d	28	12
轨道方向	升轨和降轨	升轨
影像数量	347和310	23
起止时间	2023-06-04—2024-08-09和2023-06-25—2024-08-18	2023-06-02—2024-09-24

作为对比验证，本研究采用SBAS-InSAR技术对Sentinel-1数据进行时序处理。首先将一景影像作为主影像，其余影像配准至该影像，配准精度优于0.001个像素。将每景影像与其后相邻时间获取的两景影像构网生成干涉对。并按距离向：方位向为5∶1进行多视处理。利用轨道参数去除平地相位，结合Copernicus DEM去除地形相位，获得差分干涉相位。采用Goldstein滤波，并通过MCF算法进行相位解缠。利用多项式拟合去除轨道误差，利用奇异值分解法SVD（Singular Value Decomposition）法计算初始形变序列和地形残差。对初始形变序

列进行时间序列的线性回归分析，获得线性形变，并从初始形变序列中减去线性形变得到残余相位。对残余相位进行时空滤波以去除大气延迟相位，获得非线性形变。最终将线性形变与非线性形变相加，再进行地理编码得到地理坐标系下的Sentinel-1形变结果（图3（c））。在整个处理过程中，严格保持与LT-1数据处理相同的参数设置，以确保两类数据结果的可比性。



（a）LT-1升轨形变速率

（a）LT-1 ascending orbit deformation rate

（b）LT-1降轨形变速率

（b）LT-1 descending orbit deformation rate

（c）Sentinel-1升轨形变速率

（c）Sentinel-1 ascending orbit deformation rate

图3 LT-1升轨、降轨及Sentinel-1升轨年平均形变速率结果

Fig. 3 Annual mean deformation rate results of LT-1 ascending, descending, and Sentinel-1 ascending orbits

4 形变结果分析与滑坡识别

4.1 LT-1升、降轨和Sentinel-1升轨形变结果分析及精度对比

基于2023年6月—2024年8月的监测数据，LT-1升轨监测结果见图3（a）。可见研究区整体形变幅度较小，速率分布在−30—30 mm/a；局部形变区域主要沿长江两岸分布，其中沉降区域的数量高于抬升区域；降轨数据呈现相似的空间分布特征，也从沉降信号为主。与LT-1观测结果相比，Sentinel-1升轨数据虽然也显示长江沿岸的局部形变特征，但其整体形变量级较小且局部形变区域的数量也较少。

为定量评估形变结果的精度，本研究在形变速率图中选取一块无形变的统计区域1进行直方图统计，结果见图4。可见3种数据集的形变速率均值均趋近于0，验证了数据处理流程的可靠性；从标准差可以看出，L波段的LT-1降轨数据及C波段的Sentinel-1升轨数据精度水平略低于LT-1升轨数据。综合分析表明，LT-1影像获取的形变结果具有可靠的精度水平，能够有效进行区域地表形变监测。

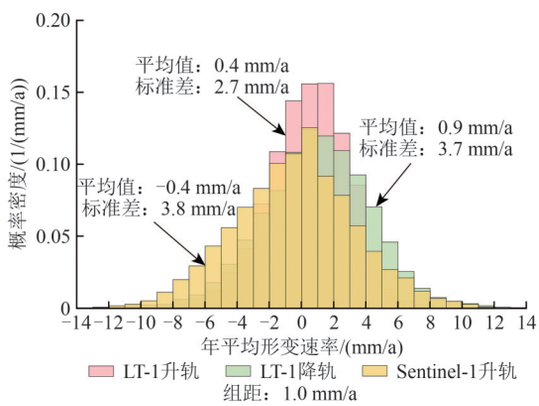


图4 LT-1升降轨与Sentinel-1升轨无形变区域年平均形变速率的概率密度分布直方图

Fig. 4 Probability density distribution histograms of the annual average deformation rate in the deformation-free areas of LT-1 ascending and descending orbits and Sentinel-1 ascending orbit

4.2 LT-1升、降轨及Sentinel-1升轨滑坡识别

通过综合分析LT-1升轨、降轨以及Sentinel-1升轨的形变速率监测结果，结合Google Earth™光学影像和三维地形模型数据，对研究区内的疑似滑坡隐患点进行了系统识别，结果如图5所示。可见LT-1升轨数据共识别出89处疑似滑坡隐患点，降轨数据识别出82处，这一结果显著优于Sentinel-1升轨数据识别的41处。具体而言，LT-1升轨和降轨数据分别较Sentinel-1新增识别出57处和63处隐患点，展现出更强的滑坡探测能力。联合使用LT-1升轨和降轨数据时，仅漏测6处Sentinel-1识别的隐患点。通过整合3种数据源的识别结果，本研究共识别144处疑似滑坡隐患点。

4.3 典型滑坡时序监测及分析

在获取三峡库区重庆段全域LT-1广域形变速率结果后，基于4.2节识别的滑坡结果，裁剪出重点

形变区域的SAR影像进行SBAS-InSAR时序处理，用于三峡库区滑坡的精细时序监测。本研究选取位于重庆市奉节县安坪镇新铺村长江南岸的新铺滑坡、奉节县永乐镇永乐村徐家屋场滑坡、奉节县永乐镇高粱溪滑坡为例进行介绍。其中新铺滑坡分别采用7景LT-1升轨（2024-02-23—2024-10-01）、6景LT-1降轨（2023-12-14—2024-06-27）及11景Sentinel-1升轨（2023-12-11—2024-09-24）影像，徐家屋场滑坡分别采用6景LT-1升轨（2024-02-23—2024-10-04）、7景LT-1降轨（2024-01-07—2024-06-23）及9景Sentinel-1升轨（2023-12-11—2024-07-26）影像、高粱溪滑坡分别采用6景LT-1升轨（2024-02-23—2024-10-04）、7景LT-1降轨（2024-01-07—2024-06-23）及9景Sentinel-1升轨（2023-12-11—2024-07-26）影像，分别获取了各时段内3个滑坡LT-1升轨、降轨及Sentinel-1升轨的时序形变结果，如图6所示。

分别在新铺滑坡、徐家屋场滑坡、高粱溪滑坡的形变结果中分别选择典型时序点P1、P2及P3进行分析。对于新铺滑坡而言，其为北向滑坡，3种数据都能监测到量级较大的形变，但Sentinel-1的形变量级小于LT-1升降轨（图6（a）），P1点的3种时序形变序列都表明在监测时段内该滑坡具有初期缓慢沉降，中期加速沉降，后期再减缓沉降的趋势（图6（a））。徐家屋场滑坡为东向滑坡，其中LT-1升轨结果的形变量级略高于Sentinel-1升轨（图6（b））。P2点的3种时序形变序列都表明该滑坡在监测时段内正在发生持续形变（图6（b）），需对其进行密切监测，以免发生堵江风险。高粱溪滑坡地表植被茂密，LT-1降轨成功监测到明显的持续形变（图6（c）），而LT-1升轨和C波段的Sentinel-1升轨数据则均未能有效捕捉到形变信号，其时序结果表现为无明显趋势的噪声（图6（c））。其原因可能主要在于：一方面，升降轨的观测几何差异导致升轨对该滑坡的形变不敏感；另一方面，Sentinel-1的C波段信号受植被茂密影响严重，产生了失相干。该结果表明在植被茂密的复杂山区，LT-1的长波长数据具有显著的监测优势。此外，需结合不同观测几何的结果以弥补单一SAR卫星视线向形变监测的不足，从而减少滑坡的漏测。

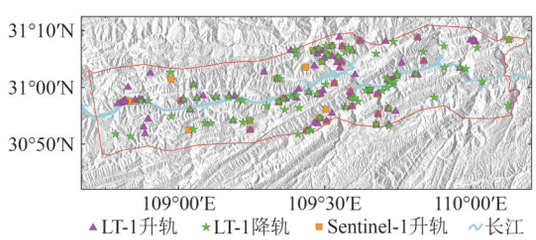
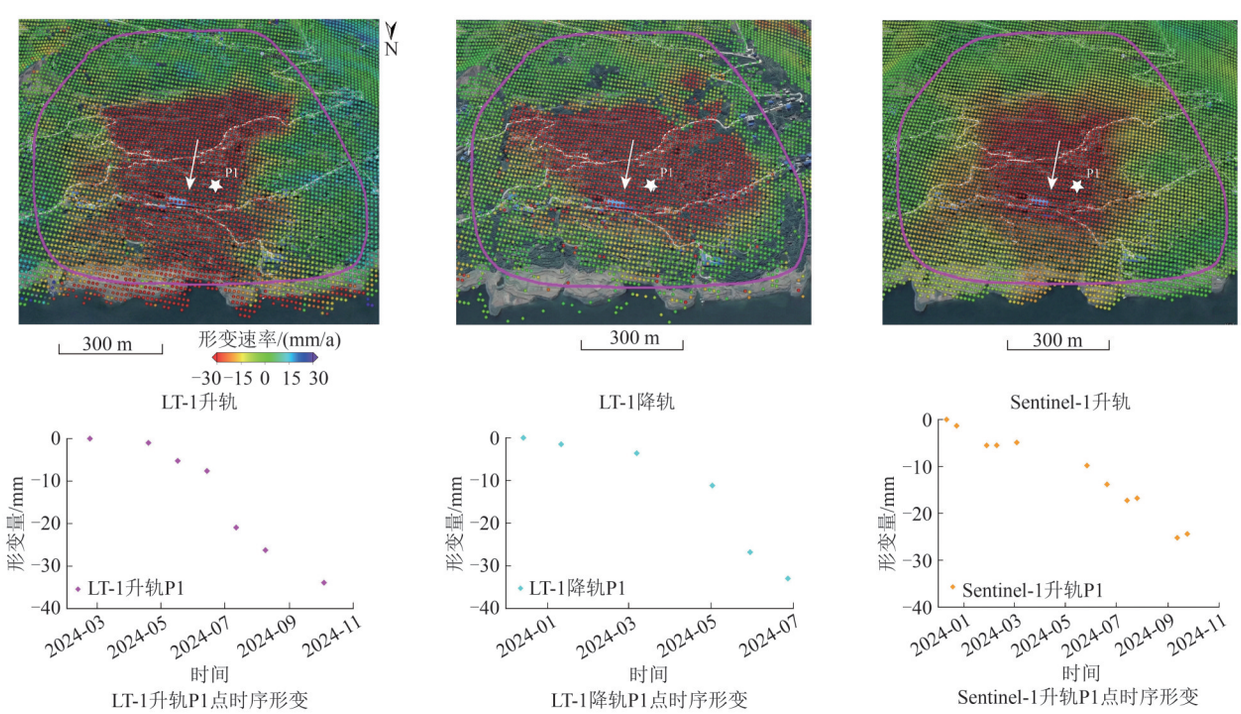


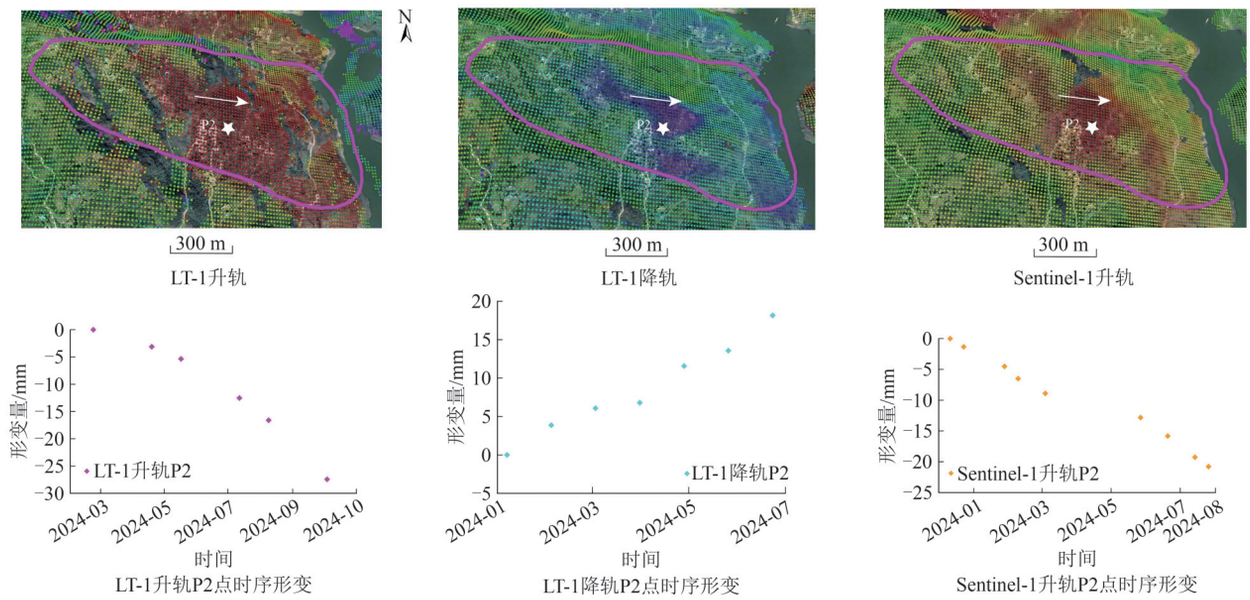
图5 研究区疑似滑坡隐患点分布图

Fig. 5 Distribution of suspected landslide hazard points in the study area



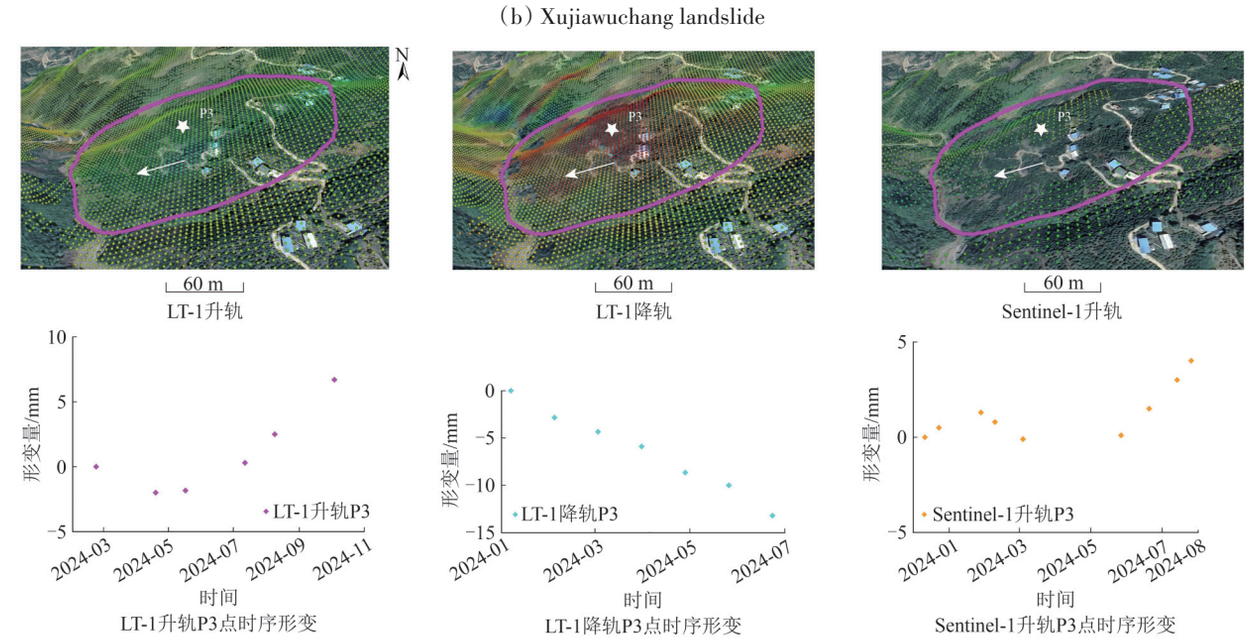
（a）新铺滑坡

（a）Xinpu landslide



（b）徐家屋场滑坡

（b）Xujiawuchang landslide



（c）高梁溪滑坡

（c）Gaoliangxi landslide

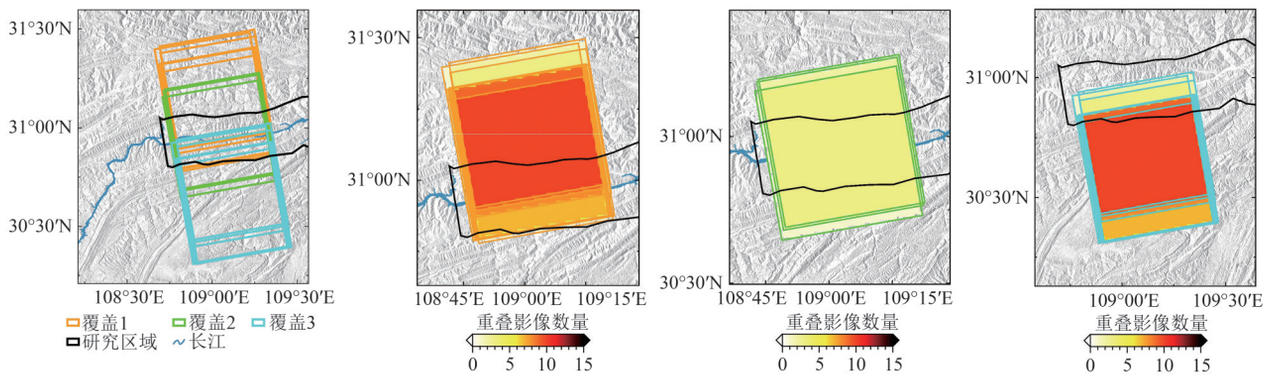
图6　新铺滑坡、徐家屋场滑坡及高梁溪滑坡形变速率和时序形变结果的对比图

Fig. 6　Comparison of deformation rates and time-series deformation resalts of the Xinpu, Xujiawuchang and Gaoliangxi landslides

5　讨　论

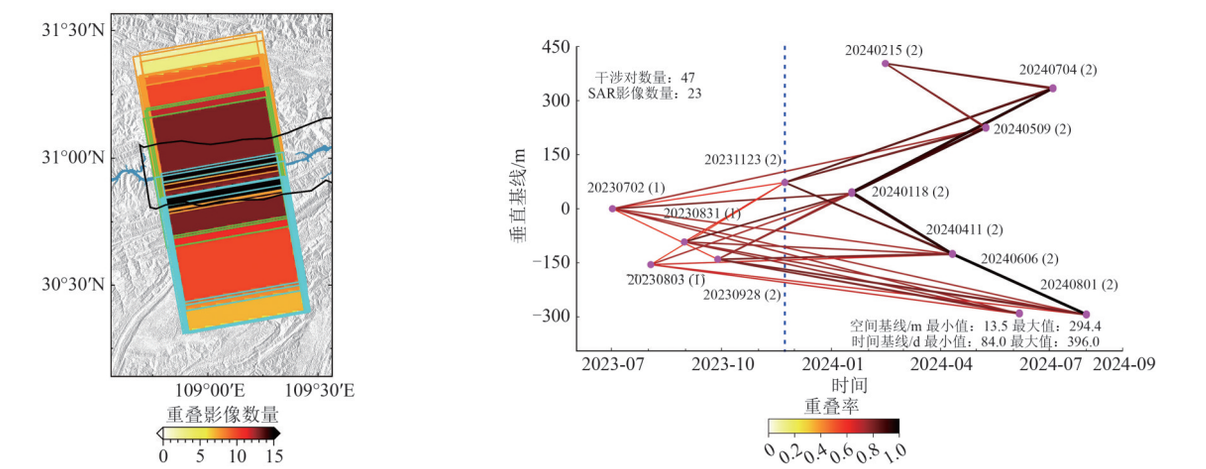
5.1　广域LT-1数据处理影像利用率

传统以覆盖为单位的构网方法适用于分幅规则的SAR影像，这类影像不同时间同一覆盖间重叠率通常保持在95%以上，能够确保较高的影像利用率。然而，LT-1卫星在调试初期获取的影像存在重叠率偏低（图7）以及实时轨道精度不高的问题，导致拼接多个覆盖的影像后再处理难度增加。以LT-1升轨影像中的轨道2为例（图2（b）），23景影像采用传统时空构网方法被划分为3个覆盖（其中，覆盖1为10景，覆盖2为3景，覆盖3为10景，见图7（b）—（d））。三者在相同时空基线阈值条件（时间基线84 d，空间基线300 m）下共生成29个干涉对（其中覆盖1为13对，覆盖2为3对，覆盖3为13对）。



（a）分幅构网策略影像覆盖　（b）覆盖1影像重叠数量　（c）覆盖2影像重叠数量　（d）覆盖3影像重叠数量

（a）Image coverage of the frame-based network strategy　（b）No. of overlapping images for Frame 1　（c）No. of overlapping images for Frame 2　（d）No. of overlapping images for Frame 3



（e）轨道2影像重叠数量　（f）轨道2基线构网

（e）No. of overlapping images for Path 2　（f）Baseline network of Path 2

图7　分幅分类构网策略与轨道分类构网策略影像间重叠数量及干涉构网数量对比图

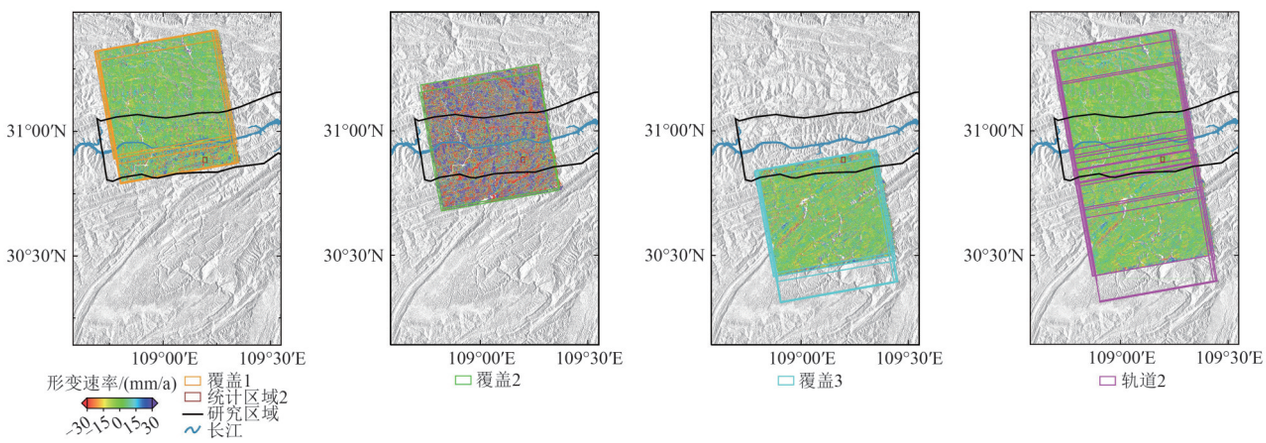
Fig. 7　Comparison of the number of overlapping images and interferometric pairs between frame-based and path-based network strategies

采用本研究提出的顾及影像重叠率的时空构网策略，与传统方法相同的时空基线阈值下，当重叠率阈值设定为0.4时，干涉对数量增加至47对（图7（f）），利用率提升达62%。该策略突破了传统分幅的限制，将覆盖2影像与相邻覆盖1和覆盖3联合构网，从而显著提升了影像利用率。其中研究区大部分区域获得10次以上的差分干涉对覆盖，其中覆盖2区域平均覆盖次数超过15次，这为形变监测精度的提升提供了有力保障。需要指出，虽然新方法在提升影像利用率方面效果显著，但同时也带来了计算负荷的增加，主要体现在影像配准次数和干涉对数量的增长。此外，图7（f）显示随着轨道持续优化，影像重叠率从2023年11月前的0.51提升至2023年11月后的0.88，表明LT-1卫星成像质量持续改善，这为后续更高精度的形变监测研究奠定了坚实基础。

5.2　广域LT-1数据处理形变结果精度

针对分幅不规则的LT-1影像，本研究还对比了传统分幅分类构网策略与顾及影像间重叠率的轨道分类构网策略的形变结果精度。传统分幅分类构网策略将影像划分为3个覆盖（覆盖1—3），其Stacking形变结果显示，覆盖1在长江流域南侧因干涉对数量不足导致误差较大，覆盖2因仅含3对短时间基线干涉对，年均形变速率呈现显著噪声，覆盖3则在北部干涉对稀疏区域误差明显（图8（a）—（c））；相比之下，轨道分类构网策略因干涉对分布均匀，显著改善了上述区域的误差，形变结果更为可靠（图8（d））；在覆盖1至3、轨道2以及Sentinel-1形变结果中的重叠区域选取无形变区域（图8（a）—（d）棕色矩形框），通过形变速率直方图统计及标准差计算验证精度（图8（e））。结果显示，传统分幅分类构网策略中覆盖2标准差最

大（30.5 mm/a），覆盖1次之（12.2 mm/a），覆盖3相对较小（10.7 mm/a），均与形变速率图的误差分布一致。而轨道分类构网策略形变速率平均值集中分布于±20 mm/a，标准差（6.1 mm/a）显著低于分幅分类构网策略，且与Sentinel-1升轨结果统计趋势一致，仅因波长差异略低于后者精度。综上所述，轨道分类构网策略在形变结果精度上优于传统分幅分类构网策略。

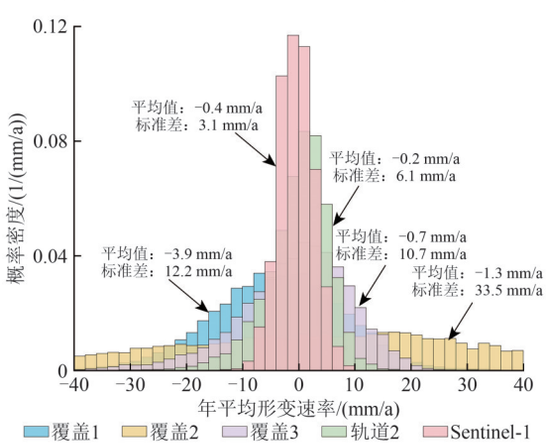


（a）覆盖1
（a）Frame 1

（b）覆盖2
（b）Frame 2

（c）覆盖3
（c）Frame 3

（d）轨道2
（d）Path 2



（e）年平均形变速率概率密度直方图统计、分布曲线及标准差计算图（注：直方图的组距为2.0 mm/a）
（e）Annual average deformation rate probability density histogram, distribution curve, and standard deviation (Note: The histogram bin width is 2.0 mm/a)

图8　分幅分类构网策略、顾及重叠率的轨道分类构网策略形变精度对比图
Fig. 8　Comparison of deformation accuracy between the frame-based network strategy and the path-based network strategy considering overlap ratio

5.3　广域LT-1西南山区滑坡监测前景

本研究将LT-1卫星数据应用于三峡库区广域滑坡灾害识别，揭示了其在疑似滑坡隐患点探测中的显著优势。与Sentinel-1升轨数据相比，LT-1升轨和降轨数据分别多识别了57处和63处疑似滑坡隐患点，联合升降轨数据相比Sentinel-1仅漏测6处疑似滑坡隐患点，表明LT-1在滑坡识别中具有巨大潜力。主要由于L波段LT-1卫星数据相比C波段的Sentinel-1卫星数据最大可分辨位移梯度更大，能够捕捉到C波段无法识别的滑坡边界和快速运动区域，并且穿透能力强进而抵御失相干能力也更强。因此，在植被茂密且多南北向滑坡的三峡库区具有更强的滑坡探测能力。且相对于单一观测几何的Sentinel-1卫星数据，在该区域具备升、降轨的LT-1卫星数据，能有效弥补单一观测几何的局限性，并实现结果的相互验证，显著提升滑坡识别的可靠性与精确度，从而更有效地提高滑坡识别率。然而，LT-1卫星数据在广域滑坡识别中仍面临挑战。对于单一几何的LT-1数据受地形起伏影响，易产生阴影和叠掩区域，导致形

变结果噪声较大，影响形变结果的精度。因此，联合升轨和降轨数据进行广域滑坡识别尤为重要。随着LT-1存档数据的不断积累、卫星轨道的不断优化以及影像间重叠率的提升，结合本研究提出的顾及影像重叠率的广域LT-1数据处理方法，广域数据处理效率和形变结果精度有望进一步提升。未来，通过融合Sentinel-1数据，可实现更高精度的滑坡识别与更密集的时间序列监测，为西南山区地质灾害早期预警提供更可靠的技术支撑。

6 结 论

本研究针对LT-1卫星初期数据存在实时轨道精度不高、影像分幅不规则及影像间有效重叠率低而导致广域数据处理受限的问题，提出了一种基于影像重叠率约束的广域LT-1卫星数据处理方法。主要结论如下：

（1）引入影像重叠率约束能够有效优化LT-1广域干涉网络构建，突破传统分幅分类构网在影像覆盖不规则条件下的限制，使影像利用率较传统策略提升62%；

（2）基于该构网策略获得的广域形变速率结果在空间一致性与精度上更可靠，结合区域网平差拼接可实现不同轨道结果的无缝拼接，从而获得研究区连续的广域形变场，验证显示该方法监测精度达6.1 mm/a，显著优于传统策略中精度覆盖的10.7 mm/a；

（3）在三峡库区复杂山区的验证表明LT-1数据具备较强的滑坡探测能力，LT-1升、降轨数据分别比Sentinel-1多识别57处和63处疑似滑坡隐患点，体现出国产L波段InSAR在广域地质灾害监测中的应用潜力。

本研究成果不仅有效解决了LT-1卫星广域形变监测的技术难题，更为L波段SAR卫星在广域地质灾害监测领域的业务化应用提供了可靠的技术支撑。随着LT-1卫星数据的持续积累和轨道精度的逐步提升，结合本研究提出的广域数据处理方法，预计将进一步提高广域形变监测的精度和可靠性，为地质灾害防治工作提供更加有力的技术支持。

志 谢 感谢重庆市二零八地质环境研究院有限公司提供的LT-1卫星数据；欧空局提供的Sentinel-1卫星数据以及GMT 6.4提供的绘图支持。

参考文献（References）

Achache J, Fruneau B and Delacourt C. 1996. Applicability of SAR interferometry for monitoring of landslides//ERS Applications, Proceedings of the Second International Workshop. London: European Space Agency: 165

Berardino P, Fornaro G, Lanari R and Sansosti E. 2002. A new algorithm for surface deformation monitoring based on small baseline differential SAR interferograms. IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing, 40(11): 2375-2383 [DOI: 10.1109/TGRS.2002.803792]

Cai J H, Zhang L, Dong J, Guo J C, Wang Y A and Liao M S. 2023. Automatic identification of active landslides over wide areas from time-series InSAR measurements using Faster RCNN. International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation, 124: 103516 [DOI: 10.1016/j.jag.2023.103516]

Chen H S, Qin Z H, Liu B, Peng R W, Yu Z Y, Yao T F, Yang Z F, Feng G C and Wang W X. 2025. Assessing the landslide identification capability of LuTan-1 in hilly regions: a case study in Longshan County, Hunan Province. Remote Sensing, 17(6): 960 [DOI: 10.3390/rs17060960]

Ferretti A, Prati C and Rocca F. 2001. Permanent scatterers in SAR interferometry. IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing, 39(1): 8-20 [DOI: 10.1109/36.898661]

Gabriel A K, Goldstein R M and Zebker H A. 1989. Mapping small elevation changes over large areas: differential radar interferometry. Journal of Geophysical Research: Solid Earth, 94(B7): 9183-9191 [DOI: 10.1029/JB094iB07p09183]

Han J, Yang S, Yang T, Zhu N N, Ma Y D and Zhang W L. 2024. Identification of potential landslide hazards in the Ankang area using L-band differential interferometric SAR satellite. Remote Sensing for Natural Resources, 36(4): 254-259 (韩静, 杨帅, 杨涛, 朱楠男, 马煜栋, 张文龙. 2024. 基于L波段差分干涉SAR卫星的安康地区滑坡隐患识别. 自然资源遥感, 36(4): 254-259) [DOI: 10.6046/zrzyyg.2023152]

Hanssen R F. 2001. Radar Interferometry: Data Interpretation and Error Analysis. Dordrecht: Springer: 308 [DOI: 10.1007/0-306-47633-9]

Hu L R, Tang X M, Tomás R, Li T, Zhang X, Li Z W, Yao J Q and Lu J. 2024. Monitoring surface deformation dynamics in the mining subsidence area using LT-1 InSAR interferometry: a case study of Datong, China. International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation, 131: 103936 [DOI: 10.1016/j.jag.2024.103936]

Li H, Li B Q, Li Y S and Duan H Z. 2023. The stability analysis of Mt. Gongga glaciers affected by the 2022 Luding M_S 6.8 earthquake based on LuTan-1 and Sentinel-1 data. Remote Sensing, 15(15): 3882 [DOI: 10.3390/rs15153882]

Li N, Wen J J, Liu Y Y, Ling H X, Wei C and Chen J L. 2024. An strictly-regressive orbit optimization algorithm for L-band differential interferometric SAR satellite. Acta Geodaetica et Cartographica Sinica, 53(10): 1873-1880 (李楠, 温俊健, 刘艳阳, 凌惠祥, 魏春,

陈筠力 . 2024. L波段差分干涉SAR卫星严格回归轨道优化设计方法 . 测绘学报, 53(10): 1873-1880) [DOI: 10.11947/j.AGCS.2024.20230321]

Li T, Tang X M, Li S J, Zhou X Q, Zhang X and Xu Y Z. 2023. Classification of basic deformation products of L-band differential interferometric SAR satellite. Acta Geodaetica et Cartographica Sinica, 52(5): 769-779 (李涛, 唐新明, 李世金, 周晓青, 张祥, 许耀宗 . 2023. L波段差分干涉SAR卫星基础形变产品分类 . 测绘学报, 52(5): 769-779) [DOI: 10.11947/j.AGCS.2023.20220050]

Li W H, Li T, Zhou X Q and Liu X. 2024. Application of LuTan-1 SAR data in railway subsidence monitoring. The International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences, XLVIII-1-2024: 351-357 [DOI: 10.5194/isprs-archives-XLVIII-1-2024-351-2024]

Li Y S, Li Q, Jiao Q S, Jiang W L, Li B Q, Zhang J F and Luo Y. 2024. Application of Lutan -1 SAR satellite constellation to earthquake industry and its prospect. Geomatics and Information Science of Wuhan University, 49(10): 1741-1752 (李永生, 李强, 焦其松, 姜文亮, 李兵权, 张景发, 罗毅 . 2024. 陆地探测一号SAR卫星星座在地震行业的应用与展望 . 武汉大学学报(信息科学版), 49(10): 1741-1752) [DOI: 10.13203/j.whugis20230498]

Liang R B, Dai K R, Lopez-Sanchez J M, Han Y K, Shi X L and Xu Q. 2025. Landslide mapping from post-event single-temporal polarimetric SAR image by a deep learning method exploiting a morphological model. Remote Sensing of Environment, 328: 114904 [DOI: 10.1016/j.rse.2025.114904]

Liu B, Zhang L, Ge D Q, Li M, Zhou X L, Guo Z C, Shi P Q, Zhang L, Jin D J, Wan X X, Wang Y and Wang Y. 2024. Application of InSAR monitoring large deformation of landslides using Lutan-1 constellation. Geomatics and Information Science of Wuhan University, 49(10): 1753-1762 (刘斌, 张丽, 葛大庆, 李曼, 周小龙, 郭兆成, 石鹏卿, 张玲, 金鼎坚, 万祥星, 王宇, 王艳 . 2024. 陆地探测一号卫星滑坡大变形InSAR监测应用 . 武汉大学学报(信息科学版), 49(10): 1753-1762) [DOI: 10.13203/j.whugis20230478]

Ohki M, Motohka T, Kankaku Y, Miura S H, Tadono T and Arikawa Y. 2025. *Advanced Land Observing Satellite-4*: mission concepts and technical overview: *pioneering a new era of L-band SAR*. IEEE Geoscience and Remote Sensing Magazine, 13(2): 35-40 [DOI: 10.1109/MGRS.2025.3529037]

Peng F Y. 2020. Monitoring Landslides Deformation along Three Gorges Reservoir Bank with Multi-source SAR Data. Wuhan: Wuhan University (彭凤友 . 2020. 基于多源SAR数据的三峡库岸典型滑坡形变提取与时序分析研究 . 武汉: 武汉大学) [DOI: 10.27379/d.cnki.gwhdu.2020.000350]

Pepe A and Lanari R. 2006. On the extension of the minimum cost flow algorithm for phase unwrapping of multitemporal differential SAR interferograms. IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing, 44(9): 2374-2383 [DOI: 10.1109/TGRS.2006.873207]

Sandwell D T and Price E J. 1998. Phase gradient approach to stacking interferograms. Journal of Geophysical Research: Solid Earth, 103(B12): 30183-30204 [DOI: 10.1029/1998JB900008]

Tang H M, Wasowski J and Juang C H. 2019. Geohazards in the Three Gorges Reservoir area, China – lessons learned from decades of research. Engineering Geology, 261: 105267 [DOI: 10.1016/j.enggeo.2019.105267]

Tang X M, Li T, Zhang X, Zhou X Q, Lu J and Zhang X F. 2024. In-orbit application parameters test and analysis of L-band differential interferometric SAR satellite constellation. Acta Geodaetica et Cartographica Sinica, 53(10): 1863-1872 (唐新明, 李涛, 张祥, 周晓青, 禄兢, 张雪飞 . 2024. L波段差分干涉SAR卫星在轨应用关键参数测试分析 . 测绘学报, 53(10): 1863-1872) [DOI: 10.11947/j.AGCS.2024.20230240]

Wang R, Liu K Y, Liu D C, Ou N M, Yue H X, Chen Y F, Yu W, Liang D and Cai Y H. 2025. LuTan-1: an innovative L-band spaceborne bistatic interferometric synthetic aperture radar mission. IEEE Geoscience and Remote Sensing Magazine, 13(2): 58-78 [DOI: 10.1109/MGRS.2024.3478761]

Wang W X, Yang D F, Li L, Li W J, Feng G C, He L J, Xiong Z Q, Li N, Jiang H B, Luo W L H and Wang Y L. 2025. Image initial registration algorithm for Lutan-1 satellite based on scale-invariant feature transform-like algorithm—a case study of the Jishishan earthquake. Geomatics and Information Science of Wuhan University, 50(2): 377-390 (王文昕, 杨德芳, 李龙, 李文军, 冯光财, 贺礼家, 熊志强, 李宁, 蒋泓波, 罗吴林洪, 汪亿林 . 2025. 类尺度不变特征变换的陆探一号卫星影像初配准算法——以积石山地震为例 . 武汉大学学报(信息科学版), 50(2): 377-390) [DOI: 10.13203/j.whugis20240087]

Wang Y D, Feng G C, Li Z W, Yang Z F, Wang B, Wang Y X, Du Y N, Wang Y M, He L J and Zhu J J. 2024. A multi-frame deformation velocity splicing method for wide-area InSAR measurement based on uncontrolled block adjustment: a case study of long-term deformation monitoring in Guangdong, China. Remote Sensing of Environment, 301: 113929 [DOI: 10.1016/j.rse.2023.113929]

Wang Y X, Feng G C, Feng Z X, Wang Y D, Wang X H, Luo S R, Zhao Y G and Lu H. 2022. An MT-InSAR data partition strategy for Sentinel-1A/B TOPS data. Remote Sensing, 14(18): 4562 [DOI: 10.3390/rs14184562]

Xia Z G, Motagh M, Wang W D, Li T, Peng M M, Zhou C and Karimzadeh S. 2024. Modeling slope instabilities with multi-temporal InSAR considering hydrogeological triggering factors: a case study across Badong County in the Three Gorges Area. Remote Sensing of Environment, 309: 114212 [DOI: 10.1016/j.rse.2024.114212]

Xu B, Zhu Y, Li Z W, Yi H W, Hu M W, Chen Q, Han K and Du X. 2024. Analysis of InSAR time-series deformation monitoring accuracy of domestic satellite. Acta Geodaetica et Cartographica Sinica, 53(10): 1930-1941 (许兵, 朱焱, 李志伟, 易辉伟, 胡妙文, 陈琦, 韩焜, 杜洵 . 2024. 国产卫星时序InSAR形变监测精度分析 . 测绘学报, 53(10): 1930-1941) [DOI: 10.11947/j.AGCS.2024.20230345]

Yang F Q, Shi X L, Dai K R, Zhang W L, Yang S, Han J, Wen N L, Deng J, Li T, Yao Y, Zhang R. 2024. Utilizing LuTan-1 SAR images to monitor the mining-induced subsidence and comparative analysis with Sentinel-1. Remote Sensing, 16(22): 4281 [DOI: 10.

3390/rs16224281].

Yang J, Wang J, Guo J C, Xie H and Feng H. 2024. Analysis of geological hazard potential detection in Guizhou mountainous area based on L-SAR data. Science of Surveying and Mapping, 49(9): 174-182 (杨隽, 汪娟, 郭金城, 谢杭, 冯瀚. 2024. 陆探一号在地质灾害隐患探测中的应用研究. 测绘科学, 49(9): 174-182) [DOI: 10.16251/j.cnki.1009-2307.2024.09.018]

Yu Z H, Yan L B, Liu Q, Lu G B and Liu R. 2024. Research and application of Lutan-1 SAR satellite in survey and monitoring of catastrophic geohazards. Bulletin of Surveying and Mapping, 11: 97-101, 176 (于忠海, 闫立波, 刘茜, 路广博, 刘睿. 2024. 基于陆探一号SAR卫星的地质灾害普查监测技术研究及应用. 测绘通报, (11): 97-101, 176) [DOI: 10.13474/j.cnki.11-2246.2024.1117]

Zhang X F, Li T, Zhang X, Zhou X Q and Lu J. 2023. A feasibility study of LT-1 SAR satellite for permafrost deformation monitoring//2023 SAR in Big Data Era (BIGSARDATA). Beijing: IEEE: 1-4 [DOI: 10.1109/BIGSARDATA59007.2023.10294951]

Zheng Y Z. 2019. Application and Research of InSAR Technology in Three Gorges Reservoir Area Landslide Measurement. Beijing: China University of Geosciences (Beijing) (郑岳泽. 2019. InSAR技术在三峡库区滑坡监测中的应用研究. 北京: 中国地质大学(北京)) [DOI: 10.27493/d.cnki.gzdzy.2019.001310]

A wide-area LuTan-1 data processing method considering image overlap rate: A case study of landslide monitoring in the Chongqing section of the Three Gorges Reservoir area

WANG Wenxin[1], FENG Guangcai[1], JI Yuanfa[2], WANG Haiyan[3], XIONG Zhiqiang[1], CHEN Hesheng[1], JIANG Hongbo[1], HE Lijia[4]

1. School of Geosciences and Info-Physics, Central South University, Changsha 410083, China;
2. Guangxi Key Laboratory of Precision Navigation Technology and Application, Guilin University of Electronic Technology, Guilin 541004, China;
3. Chongqing 208 Geological Environment Research Institute Co., Ltd., Chongqing 400700, China;
4. Earth Observatory of Singapore, Nanyang Technological University, Singapore 639798, Singapore

Abstract: The LuTan-1 (LT-1) satellite, China's first L-band interferometric SAR constellation, offers significant advantages for large-scale geological hazard monitoring because of its long wavelength and high spatiotemporal resolution. However, early-stage limitations such as insufficient real-time orbit accuracy, irregular image frames, and low effective image overlap rates significantly constrain its potential for wide-area applications. This study aims to develop a wide-area LT-1 data processing strategy that explicitly accounts for image overlap rate, thereby improving processing efficiency and deformation monitoring accuracy. The proposed approach classifies images by orbital path and then, within each path, constructs interferometric networks optimized by constraints on both spatiotemporal baselines and overlap ratios. A combination of interferogram stacking and regional network adjustment is employed to achieve seamless mosaicking of deformation results from different paths. On this basis, the small baseline subset interferometric synthetic aperture radar technique performs refined time-series deformation inversion for key areas. The Chongqing section of the Three Gorges Reservoir Area (including Yunyang, Fengjie, and Wushan counties) serves as the experimental area. The methodology is evaluated against a conventional LT-1 processing workflow to quantify improvements in data utilization and deformation accuracy. Compared with the traditional frame-based network construction strategy, the proposed method improves image utilization by 62% and achieves a deformation monitoring accuracy of 6.1 mm/a, outperforming the 10.7 mm/a obtained using the conventional frame-based network construction approach. Landslide detection results indicate that LT-1 ascending and descending track data identify 57 and 63 more potential landslide hazard sites, respectively, than Sentinel-1 ascending track data. The findings highlight the distinctive capability of L-band SAR satellites for landslide detection in mountainous terrain with complex surface conditions. The proposed wide-area LT-1 data processing method effectively addresses challenges of low efficiency and reduced accuracy caused by irregular image coverage and low overlap rates. It significantly enhances LT-1's applicability for large-scale geological hazard monitoring and demonstrates superior landslide detection performance over C-band systems in complex terrain. This method is expected to increase the precision and reliability of deformation monitoring for wide-area hazard assessment further as the LT-1 data archives grow and the orbital accuracy improves.

Key words: wide-area InSAR, LuTan-1, overlap-rate constraint, deformation monitoring, landslide detection, Three Gorges Reservoir Area, Stacking, L-band

Supported by Guangxi Key Laboratory of Precision Navigation Technology and Application, Guilin University of Electronic Technology (No. DHKL2415); Guangxi Science and Technology Plan Project (No. Guike AD25069103, Guike AA24206043); Key Cooperative Research and Development Project of the Ministry of Natural Resources and Chongqing Municipality (No. 2023ZRBSHZ052); Technology Innovation and Application Development Project of Chongqing Municipal Science and Technology Bureau