

# InSAR 相位梯度堆叠中的地形影响与校正方法研究

俸彬<sup>1</sup>, 李梦华<sup>1,2,3</sup>, 魏蕾<sup>1,4</sup>, 黄成<sup>1,4</sup>, 唐伯惠<sup>1,2,3</sup>

1. 昆明理工大学 国土资源工程学院, 昆明 650093;

2. 云南省定量遥感重点实验室(筹), 昆明 650093;

3. 云南省山地灾害天空地一体化智慧监测国际联合实验室, 昆明 650093;

4. 云南省地质环境监测院, 昆明 650093

**摘要:** 相较于常规时序 InSAR 即 TS-InSAR (Time series Interferometric Synthetic Aperture Radar) 技术, 相位梯度堆叠方法具有不依赖相位解缠、对大气误差不敏感、计算效率高且受失相干影响小等优点, 在广域滑坡识别中具有重要应用潜力。然而, 复杂山区地形对相位梯度堆叠结果的影响显著, 易产生伪形变信号, 制约其应用。针对上述问题, 本文系统分析了 InSAR 几何畸变和 DEM 误差对相位梯度堆叠结果的影响机理, 并提出相应的校正与抑制方法。针对地形起伏引起的几何畸变, 提出一种顾及几何畸变的相位梯度堆叠方法, 通过引入相邻像元对应的实地距离, 统一相位梯度计算的空间基准, 有效削弱透视收缩效应。在金沙江上游地区的实验证明, 该方法在干涉图数量较少的情况下即可显著降低透视收缩影响, 提高复杂山区地表形变的识别能力。实验结果表明, 为保证识别结果的完整性, 实际应用中相位梯度堆叠的干涉图数量宜不少于 180 幅。针对 DEM 误差, 本文通过理论推导定量分析了残余地形相位在相位梯度堆叠中的传播特性, 结果表明其影响程度与累计垂直基线绝对值成正比。通过优化干涉像对的基线组合、减小累计垂直基线绝对值, 可有效抑制 DEM 误差引起的伪形变信号。理论分析表明, 在使用 SRTM DEM (标称高程精度约 16 m) 并对 200 幅 Sentinel-1 干涉图进行堆叠的情况下, 当累计垂直基线绝对值控制在 600 m 以内时, DEM 误差对相位梯度堆叠结果的影响已与随机噪声水平相当。进一步以汶川地震触发的大光包滑坡为例开展实证分析, 验证了所提出方法在复杂山区滑坡识别中的合理性与有效性。

**关键词:** InSAR, 相位梯度堆叠, 滑坡隐患识别, 几何畸变, DEM 误差, 残余地形相位, 地表形变探测

**中图分类号:** P2

**引用格式:** 俸彬, 李梦华, 魏蕾, 黄成, 唐伯惠. 2026. InSAR 相位梯度堆叠中的地形影响与校正方法研究. 遥感学报, 30(4): 957-970

Feng B, Li M H, Wei L, Huang C and Tang B H. 2026. Research on topographic influences and correction methods in InSAR Phase Gradient Stacking. National Remote Sensing Bulletin, 30(4): 957-970 [DOI:10.11834/jrs.20265316]

## 1 引言

InSAR 技术具有全天时、全天候、覆盖范围广等优势, 已成为滑坡隐患识别与地表形变监测的重要技术手段 (许强等, 2019; 郭华东等, 2000; Hanssen, 2001)。近年来, 随着 Sentinel-1 等卫星数据的持续获取, 时序 InSAR (Time-series InSAR, TS-InSAR) 方法在滑坡识别和形变监测中的应用不断拓展 (Song 等, 2022; Chen 等, 2024; Liu

等, 2024)。然而, 在地形起伏大、植被覆盖复杂、气候条件多变的山区, TS-InSAR 易受到失相干、大气延迟及相位解缠误差等因素的影响, 限制了其在广域滑坡隐患识别中的适用性 (Fu 等, 2022; Zhang 等, 2024)。

为克服上述问题, InSAR 相位梯度堆叠技术逐渐受到关注。该方法通过计算干涉图中相邻像元的相位梯度来探测地表形变信号, 无需相位解缠和稳定散射点选取, 在降低失相干影响的同时,

收稿日期: 2025-08-25; 预印本: 2026-01-29

基金项目: 国家自然科学基金(编号:42404036, 42230109); 云南省基础研究计划(编号:202301AT070436); 云南省“兴滇英才支持计划”项目

第一作者简介: 俸彬, 研究方向为 InSAR 地质灾害监测。E-mail: 20232101050@stu.kust.edu.cn

通信作者简介: 李梦华, 研究方向为 InSAR 地质灾害监测。E-mail: menghuali@kust.edu.cn

对空间相关的大气误差具有较强抑制能力, 并具备较高的计算效率和对局部大梯度形变的探测能力 (Hu 等, 2020; Fu 等, 2022)。相位梯度堆叠最早应用于 1992 年 Landers 地震断裂带附近的小尺度形变探测 (Price 和 Sandwell, 1998), 随后在冰川运动学研究、同震形变探测及断层滑动反演等领域得到验证和推广 (Sharov 等, 2004; Parizzi, 2019; Xu 等, 2020, 2021; Liu 和 Wang, 2023)。近年来, 该技术被引入滑坡识别研究, 并在多种场景下展现出较好的应用潜力 (Hu 等, 2020; Fu 等, 2022; Wang 等, 2023; Mao 等, 2024; Tang 等, 2025)。

围绕相位梯度堆叠方法的改进研究主要集中在梯度计算方式和抗噪性能提升等方面。例如, 引入 Sobel、Laplace 等算子以增强边界响应 (Shen 等, 2022; 唐光民 等, 2023; 邓德贝尔 等, 2023), 或通过增加计算步长和方向数提高对微弱形变的识别能力 (Zhang 等, 2024)。此外, 一些研究尝试将相位梯度信息引入时序解算或网络约束框架, 以弥补传统相位梯度堆叠在时序信息表达或长波形变恢复方面的不足 (Cao 等, 2023; Xu 和 Wang, 2025)。尽管上述研究在不同程度上提升了方法性能, 但其共同前提是默认相位梯度本身能够可靠表征地表形变。

在复杂山区条件下, 这一前提往往难以满足。山区强烈的地形起伏会在 SAR 成像过程中引入显著的几何畸变, 如透视收缩、叠掩和阴影等, 使影像空间中相邻像元对应的实地距离存在较大差异。如果在相位梯度计算中直接以像元间距近似空间基准, 极易在透视收缩等区域引入异常梯度值, 从而在堆叠结果中表现为伪形变信号。此外, 差分干涉处理中用于去除地形相位的外部 DEM 数据不可避免地存在高程误差, 且其采集时间往往早于 SAR 影像获取时刻, 难以准确反映成像时的真实地表形态。由 DEM 误差引起的残余地形相位在相位梯度计算和堆叠过程中可能会被进一步扩大, 干扰滑坡隐患的识别结果。

尽管已有研究指出通过增加干涉图数量可以在一定程度上削弱几何畸变和 DEM 误差的影响, 但上述地形因素对相位梯度堆叠结果的作用机制及其影响程度仍缺乏系统的定量分析, 相关约束条件在实际应用中也多依赖经验设定。这在一定程度上限制了相位梯度堆叠技术在复杂山区的稳

定应用。

基于以上背景, 本文从 SAR 成像几何和相位梯度计算原理出发, 系统分析几何畸变和 DEM 误差对 InSAR 相位梯度堆叠结果的影响机制, 并提出相应的校正与抑制方法。首先, 针对几何畸变导致的像元空间尺度不一致问题, 通过引入相邻像元对应的实地距离, 对相位梯度计算的空间基准进行统一, 从而有效削弱透视收缩等几何畸变的影响。其次, 考虑到 DEM 误差可通过残余地形相位传播至相位梯度堆叠结果, 从而影响形变识别精度, 本研究通过理论推导定量揭示其在相位梯度堆叠中的传播特性, 并提出基于累计垂直基线约束的误差抑制策略。上述两方面方法相互补充, 共同提升相位梯度堆叠在复杂山区的可靠性。最后, 结合金沙江上游地区和大光包滑坡的实例分析, 对所提出方法的有效性与适用性进行了验证。

## 2 地形对相位梯度堆叠的影响机制

### 2.1 几何畸变影响

SAR 卫星采用侧视成像的方式, 地形起伏会在影像中造成严重的几何畸变。根据表现形式, 几何畸变分为透视收缩、叠掩、阴影和分辨率增强四类 (朱建军 等, 2022), 产生原理如图 1 所示。在透视收缩区域, 地面目标在影像上会被压缩; 而分辨率增强区域目标会被拉伸。叠掩区域信号会混淆, 阴影区域则无法获取信号, 这两种情况下雷达无法进行有效观测。此外, 如图 2 所示, SAR 影像中垂直于飞行方向的比例尺会由小变大, 即同样大小的地面目标, 离星下点越远, 投影到影像上就越大。由此可见, SAR 影像中相邻像素对应的地面距离存在显著差异。而不同的距离通常对应不同的相位变化, 目前的研究在计算相位梯度时直接以相邻像素的相位差值进行近似, 并未统一梯度计算的空间基准。这种处理方式会在透视收缩区域引入大量伪形变信号, 严重影响形变测量的准确性。几何畸变的校正方法将在第 3 节中给出。

### 2.2 DEM 误差的影响

地形相位的产生原理如图 3 所示, 根据几何关系可得地形相位为 (Hanssen, 2001):

$$\varphi_{\text{top}} = -\frac{4\pi B_{\perp} h}{\lambda R_1 \sin \theta'} \quad (1)$$

式中,  $\varphi_{\text{top}}$  为地形相位,  $B_{\perp}$  为垂直基线,  $h$  为目标点的大地高,  $\lambda$  为雷达信号的中心波长,  $R_1$  为获取

主影像时 SAR 卫星至目标点的距离,  $\theta'$  为获取主影像时雷达卫星至  $P'$  点的侧视角。

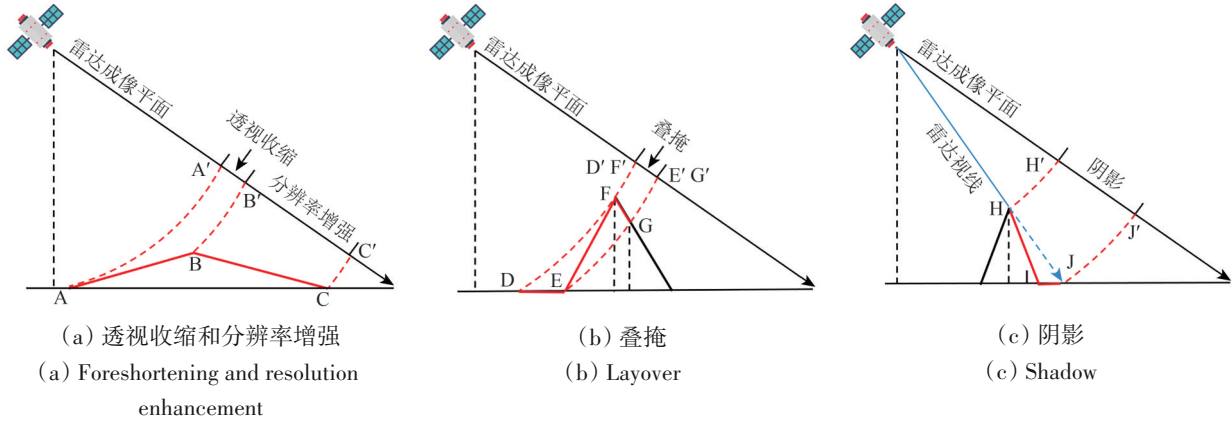


图1 几何畸变示意(朱建军等, 2022)

Fig. 1 Illustrations of geometric distortion (Zhu et al., 2022)

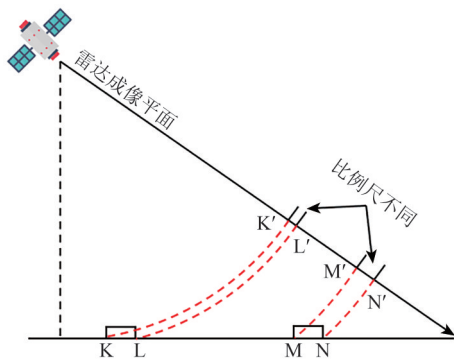


图2 侧视雷达影像的比例尺(孙家柄, 2013)

Fig. 2 Scale of the side-view radar image (Sun, 2013)

由式 (1) 可知地形相位与地面点的大地高  $h$  存在直接联系。然而, 开放获取的 DEM 数据空间分辨率和高程测量精度有限 (刘东烈等, 2023; Zhang 等, 2019), 且采集时间往往早于 SAR 影像, 现势性不足, 无法精确表征 SAR 成像时刻的地表高程。因此, 使用 DEM 改正后的干涉图中仍存在残余的地形相位, 这些残余信号将会在堆叠结果中被错误的识别为形变信号。本研究将在第 4 节对 DEM 误差的影响开展深入分析, 并给出相应对策。

### 3 几何畸变校正方法与实验分析

#### 3.1 顾及几何畸变的相位梯度堆叠方法

本研究引入相邻像元对应的地面距离, 统一了相位梯度计算的空间基准, 从而有效减弱透视收缩的影响。以东南向的相位梯度为例, 第  $i$  幅干涉图中像素  $(m, n)$  的相位梯度计算公式为

$$\Delta\varphi_i^{se}(m,n) = \frac{\text{Wrap}\{\varphi_i^+ - \varphi_i^-\}}{\sqrt{(X^+ - X^-)^2 + (Y^+ - Y^-)^2}} \quad (2)$$

式中,  $\Delta\varphi_i^{se}(m, n)$  为像素  $(m, n)$  东南方向上的相位梯度, 上标的 + 表示对应像素为  $(m + s, n + s)$ , - 表示对应像素为  $(m - s, n - s)$ ,  $s$  为相位梯度计算的步长, 后续实验中步长  $s$  均被设置为 3,  $\varphi_i$  表示相应像元的缠绕相位,  $\text{wrap}\{\}$  表示相位缠绕操作,  $X$ 、 $Y$  为投影后的局部坐标。

在得到所有干涉图的相位梯度后进行堆叠操作, 逐步抵消残余的随机噪声, 突出形变相位。计算公式如下:

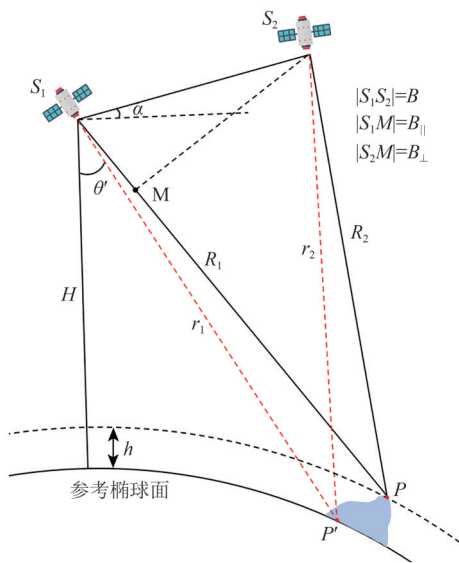


图3 地形相位产生原理( $P'$  由  $P$  等斜距投影至参考椭球面而得)

Fig. 3 Schematic diagram of the terrain phase generation principle, where point  $P'$  is obtained by projecting point  $P$  onto the reference ellipsoid with equal slant range

$$\Delta\phi^{se} = \sum_{i=1}^M \Delta\phi_i^{se} \quad (3)$$

式中,  $\Delta\phi^{se}$  为堆叠后的相位梯度,  $M$  为干涉图的数量。随后对各方向的相位梯度堆叠结果进行中值滤波, 进一步削弱噪声的影响。

$$\Delta\phi_{Median}^{se} = \text{Median}(\Delta\phi^{se}) \quad (4)$$

式中,  $\Delta\phi_{Median}^{se}$  为滤波结果,  $\text{Median}()$  表示中值滤波器。

对其他3个方向也执行如上操作, 可获得东、南、东北的相位梯度堆叠结果  $\Delta\phi_{Median}^e$ 、 $\Delta\phi_{Median}^s$ 、 $\Delta\phi_{Median}^{ne}$ 。

为了更准确的描述形变区域的边界, 本研究将四个方向的计算结果融合:

$$\phi = \sqrt{\frac{(\Delta\phi_{Median}^e)^2 + (\Delta\phi_{Median}^s)^2 + (\Delta\phi_{Median}^{ne})^2 + (\Delta\phi_{Median}^{se})^2}{4}} \quad (5)$$

式中,  $\phi$  为4个方向的相位梯度融合结果。

最后对相位梯度堆叠结果进行了归一化处理。

$$\Phi_{Nor} = \frac{\phi(m,n) - \phi_{min}}{\phi_{max} - \phi_{min}} \quad (6)$$

式中,  $\Phi_{Nor}$  为归一化后的结果, 其范围为  $[0, 1]$ ;  $\phi(m, n)$  为像元  $(m, n)$  的相位梯度融合结果;  $\phi_{min}$  为整幅图像中相位梯度的最小值;  $\phi_{max}$  为最大值。

### 3.2 几何畸变校正实例分析

为了评估本研究所提出的方法应对几何畸变的能力, 本研究以金沙江古学乡段为实验区, 并通过小基线组合的方式获取了该地的 Sentinel-1 干涉图, 在干涉图生成过程中时间基线阈值设置为 72 d, 空间基线 300 m, 距离向和方位向的多视比为 5:1, 并采用 COP DEM 去除地形相位。随后与传统方法 (Zhang 等, 2024) 进行了详细的相位梯度堆叠对比分析。

#### 3.2.1 研究区概况

该研究区位于云南省德钦县和四川省甘孜州的交界处, 经纬度范围约为  $99^{\circ}12'23''E-99^{\circ}17'32''E$ ,  $28^{\circ}22'24''N-28^{\circ}26'43''N$ 。在河流的侵蚀下, 该区域中发育了4个滑坡, 其中松麦河与硕衣河交汇处的1号和2号滑坡形变梯度较大, 另外3号和4号滑坡的形变则更为缓慢。研究区概况如图4所示。卫星影像显示, 该区域地表覆盖类型多为裸土, 植被覆盖较少。因此, SAR 影像能在该区域保持

较好的相干性, 从而在很大程度上避免失相干噪声对实验结果的干扰。

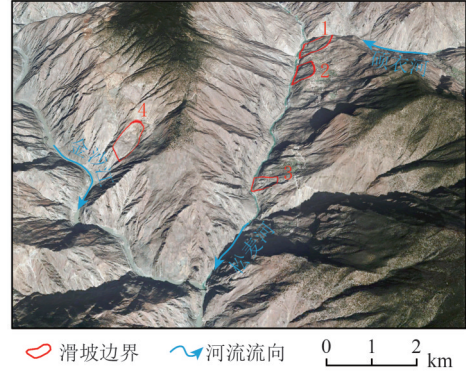


图4 研究区概况

Fig. 4 Overview of the study area

三条河流的分割使得该地地表形态破碎, 各种坡度、坡向的斜坡单元分布其中, 几何畸变严重, 且涵盖了所有几何畸变类型。为了量化该区域内的几何畸变, 研究过程中计算了 Sentinel-1 降轨的 R 指数 (Ren 等, 2021), 结果如图5所示。经统计, 对于 Sentinel-1 降轨, 该区域有 9.35% 处于叠掩和阴影区, 无法有效观测, 40.75% 受到透视收缩的影响, 仅有 49.9% 的区域可视性良好。

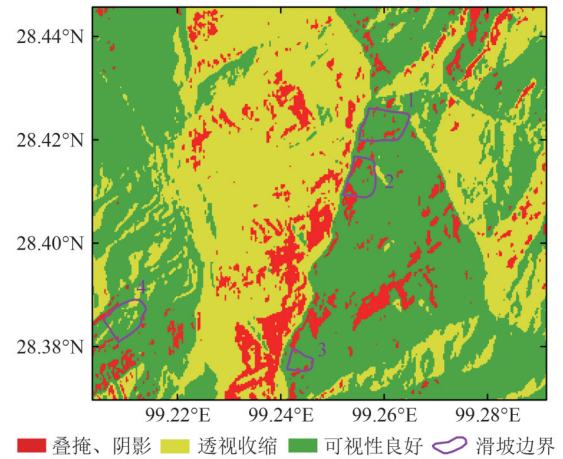
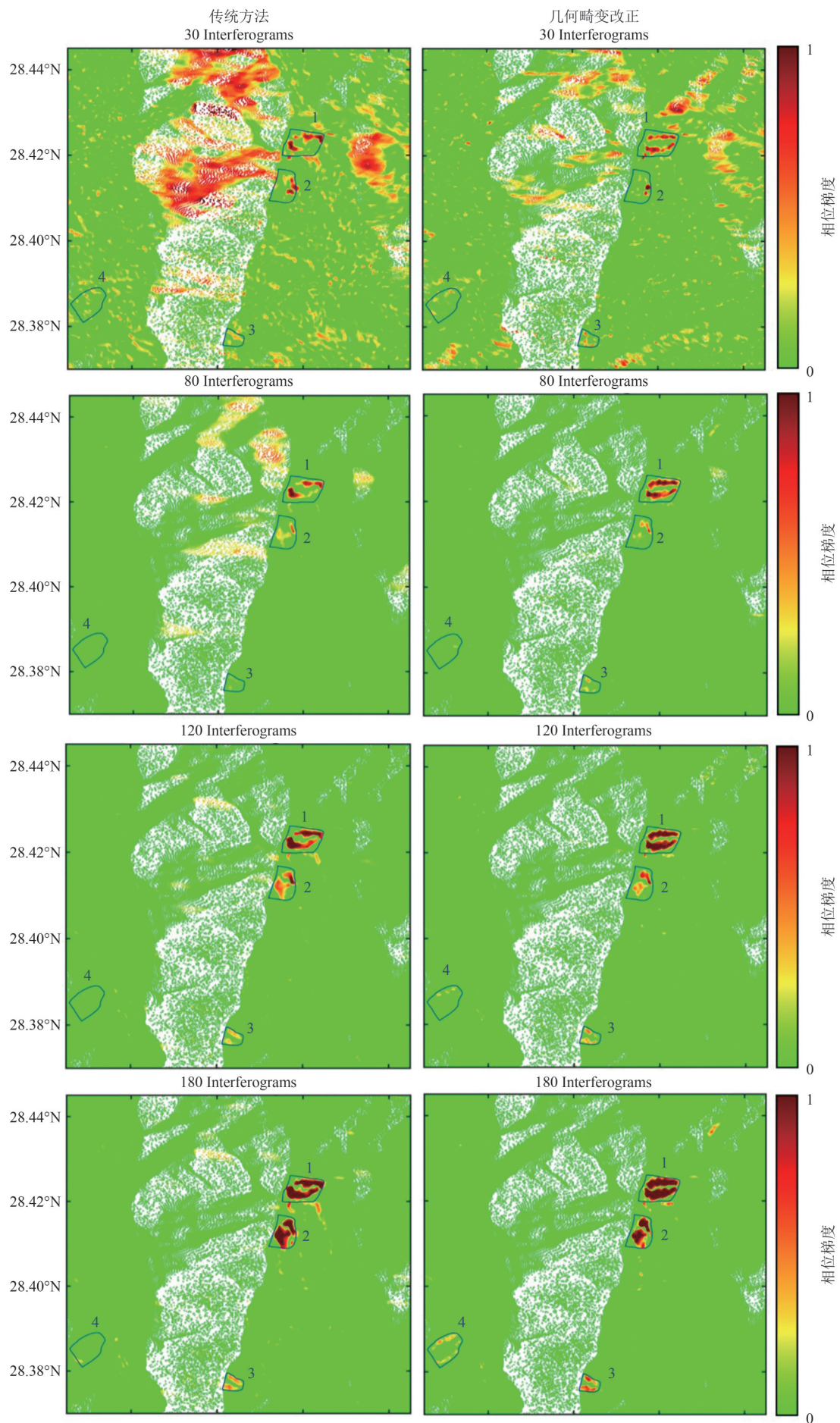


图5 Sentinel-1降轨在研究区内的几何畸变情况

Fig. 5 The geometric distortion of Sentinel-1 descending orbit in the study area

#### 3.2.2 几何畸变校正实验与结果分析

与传统方法的对比结果如图6所示。从实验结果可以明显看出, 干涉图数量较少时, 传统方法的结果在透视收缩区域存在许多虚假的形变梯度, 干涉图数量越少, 该现象越明显。在统一计算的空间基准后, 这些虚假形变梯度被大幅度削弱, 且影响程度随干涉图数量的增加迅速衰减。



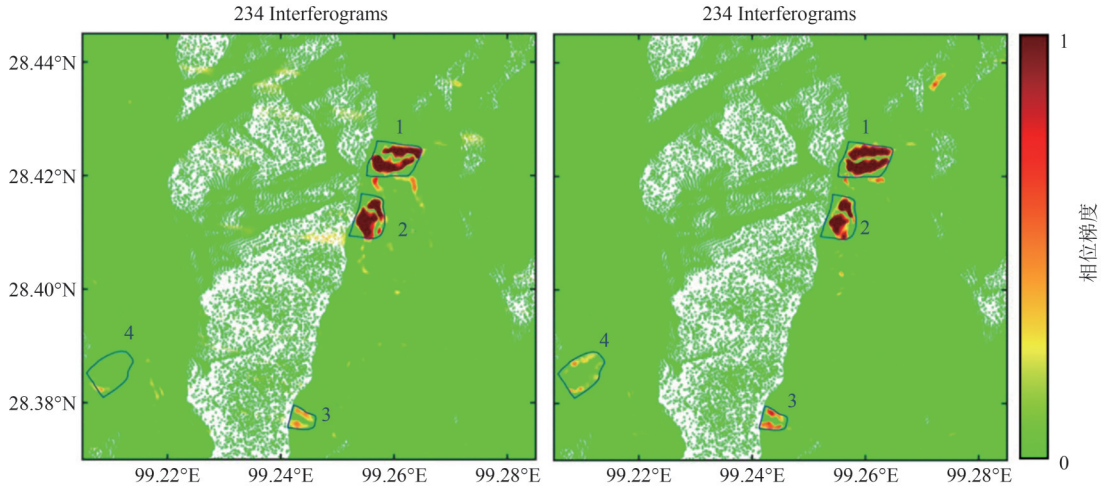


图6 传统方法及本研究改进后的方法相位梯度堆叠结果对比(蓝色多边形为滑坡边界)

Fig. 6 Compares the phase gradient stacking results of the traditional method and the improved method proposed in this study (The blue polygon in the picture represents the landslide boundary)

从整体来看, 当干涉图数量达到80—120张左右, 本研究改进的方法结果逐渐趋于稳定, 透视收缩的影响基本被消除。相比之下, 传统方法虽然可以通过大量干涉图堆叠来抑制透视收缩的影响, 但效率很低。即便在200张以上的干涉图堆叠结果中依然存在少量透视收缩的影响, 且无法检测到4号滑坡。而本研究的方法在180张干涉图时便可清晰的刻画4号滑坡的轮廓, 充分展现了其在微弱形变识别上的优势。

多组实验结果证明, 本研究改进的相位梯度堆叠算法不仅能有效应对透视收缩的影响, 还能显著提升算法对微小形变的识别能力, 同时降低数据需求。

## 4 DEM误差的影响及应对策略

### 4.1 DEM误差影响的定量分析

假设DEM与真实地表之间的高程误差为 $\Delta h$ , 则结合式(1)、(2)可得相位梯度计算结果中的像素 $(m, n)$ 残余地形相位为

$$\Delta\varphi_{\Delta h}(m, n) = \frac{\varphi_{\Delta h}^+ - \varphi_{\Delta h}^-}{d} = -\frac{4\pi B_{\perp}}{\lambda d} \left( \frac{\Delta h^+}{R_1^+ \sin(\theta'^+)} - \frac{\Delta h^-}{R_1^- \sin(\theta'^-)} \right) \quad (7)$$

式中,  $\varphi_{\Delta h}$ 为残余地形相位,  $d$ 为像素间的实地距离。其中 $R_1 \gg d$ , 因此 $\theta'^+ \approx \theta'^-$ , 本研究中以像素 $(m, n)$ 对应的 $\theta'$ 代替 $\theta'^+$ 和 $\theta'^-$ 。此外 $R_1 \gg (R_1^+ - R_1^-)$ , 因此相邻像元间的 $R_1$ 的变化对结果的影响并不显

著, 同样以像素 $(m, n)$ 对应 $R_1$ 进行代替。则式(7)可简化为

$$\Delta\varphi_{\Delta h}(m, n) = -\frac{4\pi B_{\perp}}{\lambda d R_1 \sin \theta'} (\Delta h^+ - \Delta h^-) \quad (8)$$

当使用 $M$ 幅干涉图进行相位梯度堆叠时, 像素 $(m, n)$ 的累计地形残余误差 $\Delta\Phi_{\Delta h}(m, n)$ 为

$$\Delta\Phi_{\Delta h}(m, n) = \sum_{i=1}^M -\frac{4\pi B_{\perp}^i}{\lambda d R_1^i \sin \theta'_i} (\Delta h^+ - \Delta h^-) \quad (9)$$

式中,  $B_{\perp}^i$ 为第 $i$ 幅干涉图的垂直基线,  $R_1^i$ 为第 $i$ 幅干涉图中获取主影像时SAR卫星至目标点的距离,  $\theta'_i$ 为第 $i$ 幅干涉图中获取主影像时雷达卫星至 $P'$ 点的侧视角。对于相同path和frame的影像来说, 其 $R_1$ 和 $\theta'$ 变化不大, 使用所有干涉图的平均值 $R_1^{\text{Avg}}$ 和 $\theta'_{\text{Avg}}$ 进行代替, 则式(9)可进一步简化为

$$\Delta\Phi_{\Delta h}(m, n) = -\frac{4\pi (\Delta h^+ - \Delta h^-)}{\lambda d R_1^{\text{Avg}} \sin \theta'_{\text{Avg}}} \sum_{i=1}^M B_{\perp}^i \quad (10)$$

图7展示了DEM误差对相位梯度堆叠结果的影响随 $\sum B_{\perp}$ 和 $\Delta h^+ - \Delta h^-$ 的变化情况。可以看出, DEM误差仅在其产生突变的边缘位置对堆叠结果产生影响; 当相邻像素具有相同的DEM误差时, 相位梯度堆叠结果不会受到干扰。

对式(10)进行缩放后即可得到DEM误差对相位梯度堆叠结果的最大影响:

$$\Delta\Phi_{\Delta h}^{\text{max}} = \frac{8\pi |\Delta h|_{\text{max}}}{\lambda d R_{1\text{min}} \sin \theta'_{\text{min}}} \left| \sum_{i=1}^M B_{\perp}^i \right| \quad (11)$$

式中,  $\Delta\Phi_{\Delta h}^{\text{max}}$ 为DEM误差的理论最大影响,  $|\Delta h|_{\text{max}}$ 为所使用的DEM数据的理论最大误差,  $R_{1\text{min}}$ 和 $\theta'_{\text{min}}$ 为SAR卫星相应参数的理论最小值。

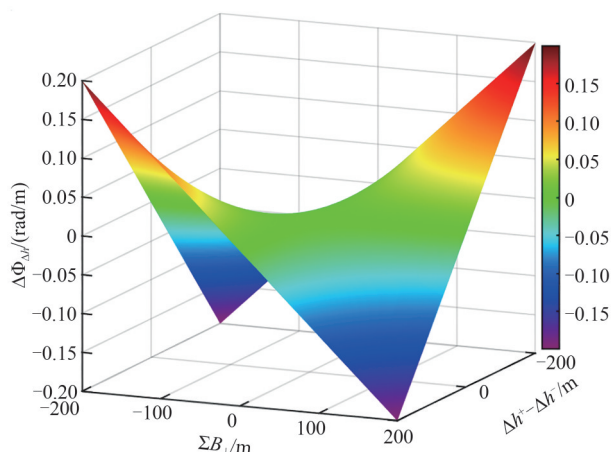


图7 DEM误差对相位梯度堆叠结果的影响随 $\sum B_{\perp}$ 和 $\Delta h^{+} - \Delta h^{-}$ 的变化情况

Fig. 7 The influence of DEM error on the phase gradient stacking results changes with  $\sum B_{\perp}$  and  $\Delta h^{+} - \Delta h^{-}$

在大量干涉图的堆叠结果中, 随机噪声的影响已经得到了有效抑制, 因此我们认为 $\Delta\Phi_{\Delta h}^{\max}$ 至少应小于随机噪声的一般水平, DEM误差才不会对相位梯度堆叠结果产生额外的影响。根据Hanssen (2001) 的研究, 干涉图中随机噪声的标准差为

$$\sigma_R \approx \sqrt{\frac{1 - \gamma^2}{2N\gamma^2}} \quad (12)$$

式中,  $\sigma_R$ 为随机噪声的标准差,  $\gamma$ 为相干性,  $N$ 为多视数量。

假设参与梯度计算的两个像元的随机噪声相互独立, 则相位梯度计算结果中随机噪声的标准差为

$$\sigma_{GR} = \frac{\sqrt{2}\sigma_R}{d} \quad (13)$$

式中,  $\sigma_{GR}$ 为相位梯度计算结果中随机噪声的标准差。假设所有干涉图的噪声独立同分布, 则 $M$ 幅干涉图的相位梯度堆叠结果中随机噪声的标准差 $\sigma_{SGR}$ 为

$$\sigma_{SGR} = \sqrt{M}\sigma_{GR} \quad (14)$$

即堆叠后噪声增加 $\sqrt{M}$ 倍, 但信号增加了 $M$ 倍, 故信噪比提升为原来的 $\sqrt{M}$ 倍。

随机噪声近似符合 $\mu = 0$ 的正态分布,  $\sigma_{SGR}$ 即为随机噪声的一般水平, 结合式(11)、(12)、(13)(14)可解算得,  $|\sum B_{\perp}|$ 的最大允许值为

$$\left| \sum B_{\perp} \right|_{\max} = \frac{\lambda R_{1\min} \sin \theta'_{\min} \sqrt{M}}{8\pi |\Delta h|_{\max}} \sqrt{\frac{1 - \gamma^2}{N\gamma^2}} \quad (15)$$

以Sentinel-1为例, 其IW模式的入射角范围为 $29.16^{\circ} - 46^{\circ}$ , 斜距范围约为800—920 km, 波长5.6 cm, 相干性 $\gamma$ 取0.5, 在采用5:1多视的情况下,  $|\sum B_{\perp}|_{\max}$ 随 $\Delta h$ 和堆叠数量的变化情况如图8所示。结果表明, 随着 $\Delta h$ 的增大, 所能容许的 $|\sum B_{\perp}|$ 迅速减小。而通过增加堆叠数量可以显著提高信噪比, 使得堆叠结果能够容忍更大的噪声水平, 从而在一定程度上放宽基线约束。

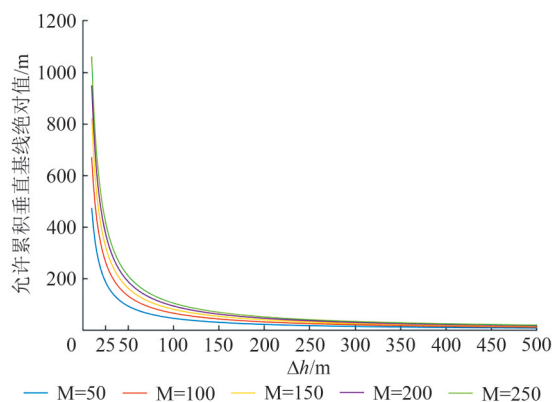


图8 垂直基线阈值随DEM误差和堆叠数量的变化关系图  
Fig. 8 Variation of vertical baseline threshold with DEM error and stacking number

对于Sentinel-1数据, 在SRTM DEM的标称精度范围内(16 m), 在200幅干涉图堆叠的情况下, 需将 $|\sum B_{\perp}|$ 控制在600 m以内, 才能使DEM误差影响不高于随机噪声水平。若采用标称精度为4 m的COP DEM去除地形相位, 则累计垂直基线阈值可放宽至2380 m, 大部分的情况下影响不大。

综上所述, DEM误差对相位梯度堆叠结果的影响程度与 $|\sum B_{\perp}|$ 成正比。因此, 可以通过选择合适的基线组合, 减小 $|\sum B_{\perp}|$ , 从而减弱DEM误差带来的伪形变信号。实际应用中, 还可结合式(15)计算 $|\sum B_{\perp}|$ 的参考域值, 指导后续的堆叠工作。

#### 4.2 基于阈值约束的基线组合优化方法

本研究基于贪心算法设计了一个基线组合优化方法, 以快速获取满足相位梯度堆叠需求的较优基线组合。该方法通过输入 $|\sum B_{\perp}|$ 阈值 $T$ 以及最大可删除基线数量 $N$ 来获得最优基线组合, 且在删除基线时优先剔除绝对值大的基线, 算法实现流程如图9所示。

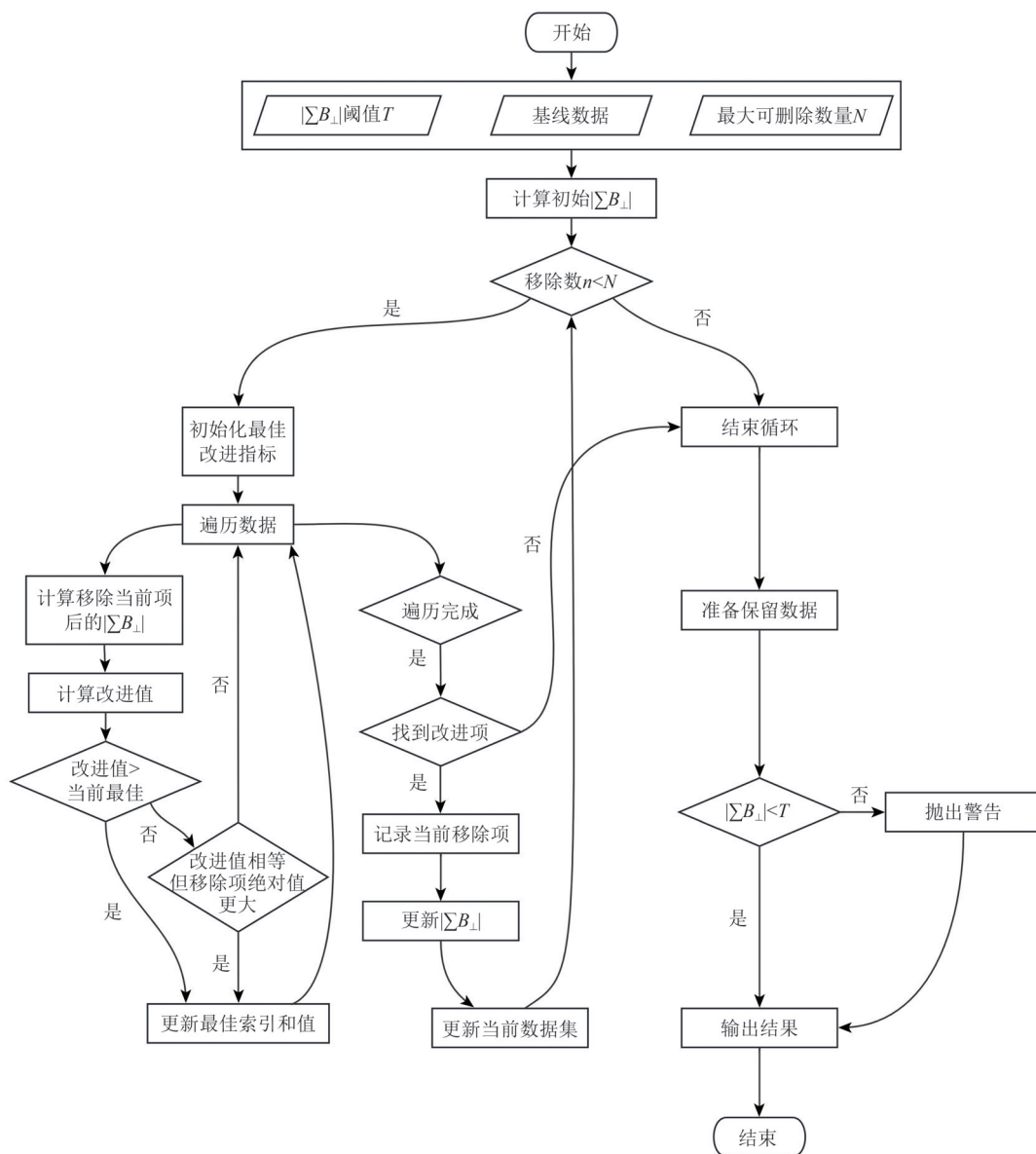


图9 基于阈值约束的基线组合优化方法(改进值为当前垂直基线累计值的绝对值减去移除当前项后的垂直基线累计值绝对值的结果)

Fig. 9 Baseline combination optimization method based on threshold constraints (The improved value is the result of subtracting the absolute value of the cumulative value of the current vertical baseline minus the absolute value of the cumulative value of the vertical baseline after removing the current item)

我们收集云南地区不同数据源的数据集，按照传统SBAS-InSAR方法形成基线组合，在表1中对比了各自组合的累计垂直基线和本算法优化后的累计垂直基线。算法剔除少量基线后， $|\sum B_{\perp}|$ 可快速降至2 m以下，尽可能减小DEM误差引起的伪形变信号。

### 4.3 DEM误差影响实例分析

#### 4.3.1 研究区概况

大光包滑坡地处四川省安州区高川乡，龙门

山断裂带中段，中心经纬度约为104°7'10"E、31°38'40"N，是2008年汶川地震引发的最大规模的滑坡(黄润秋等，2014)。滑坡滑动距离4.5 km，宽1.5 km，平面分布面积约8 km<sup>2</sup>，体积约11亿m<sup>3</sup>，堰塞坝高达690 m，为当时全球最高的堰塞坝(Dai等，2016；殷跃平，2009；黄润秋等，2008，2014)。研究区概况如图10所示。使用滑坡前后采集的DEM分析后发现，滑坡使该区域普遍产生了300 m以上的高程变化，详细如图11所示。所使用的DEM参数如表2所示。

表1 基线筛选结果统计  
Table 1 Statistics of baseline screening results

| 数据源        | 时间范围                  | 轨道方向 | 实验区  | 时间基线/d | 空间基线/m | 干涉图总数 | 初始 $\sum B_{\perp}/m$ | 剔除数量 | 最终 $\sum B_{\perp}/m$ |
|------------|-----------------------|------|------|--------|--------|-------|-----------------------|------|-----------------------|
| Sentinel-1 | 2021-01-01—2023-12-31 | 升轨   | 德钦县  | 72     | 300    | 195   | 427.93                | 3    | -0.006                |
| Sentinel-1 | 2021-01-01—2023-12-31 | 降轨   | 德钦县  | 72     | 300    | 253   | -660.806              | 4    | -0.07                 |
| Sentinel-1 | 2023-05-07—2023-10-22 | 降轨   | 昆明市区 | 72     | 300    | 39    | -740.983              | 4    | 0.697                 |
| PALSAR-2   | 2015-02-23—2019-05-27 | 升轨   | 德钦县  | 400    | 400    | 51    | -1277.043             | 5    | 1.0807                |
| PALSAR-2   | 2015-02-09—2015-03-09 | 升轨   | 德钦县  | 400    | 400    | 59    | -435.872              | 3    | -0.3554               |
| TerraSAR-X | 2017-08-23—2019-10-24 | 降轨   | 剑川古城 | 66     | 500    | 136   | 129.236               | 2    | 0.4878                |
| TerraSAR-X | 2017-08-30—2019-11-22 | 升轨   | 剑川古城 | 66     | 500    | 213   | 1348.224              | 6    | 0.2539                |

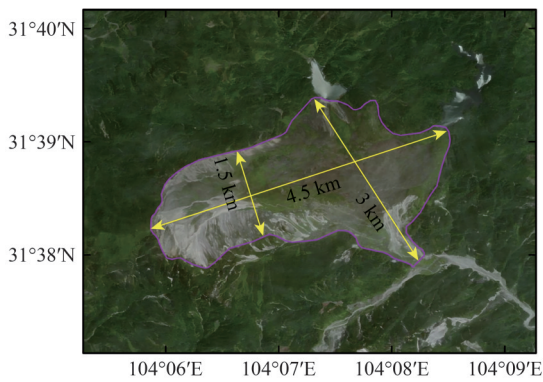


图10 大光包滑坡卫星影像

Fig. 10 Satellite image of the Daguangbao landslide

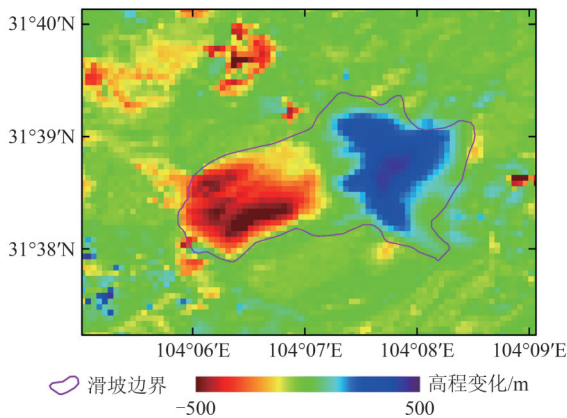


图11 滑坡发生前后高程差异分布图

Fig. 11 Distribution of elevation differences before and after landslides

表2 DEM参数  
Table 2 DEM parameters

| 参量     | SRTM DEM | TanDEM-X DEM |
|--------|----------|--------------|
| 采集时间/年 | 2000     | 2010—2016    |
| 分辨率    | 1"(30 m) | 3"(90 m)     |
| 垂直精度/m | ±16      | ±4           |
| 生产部门   | NASA     | 德国宇航中心       |

### 4.3.2 DEM误差影响消除实验

为了分析DEM误差对相位梯度堆叠结果的影响, 研究中同样以小基线组合的方式获取干涉图, 时空基线以及多视比的设置与3.2节相同, 分别采用滑坡发生前后采集DEM去除地形相位后, 利用处理结果进行相位梯度堆叠结果对比分析。图12展示了部分干涉图处理结果。其中, 图12(a)为使用TanDEM-X DEM去除地形相位后得出的正确干涉结果, 滑坡体内部的干涉相位变化均匀且平滑。而SRTM DEM在该区域存在巨大的误差, 导致滑坡内部出现了密集的条纹。说明由DEM误差所引起的相位误差已经超过 $2\pi$ , 并且发生了缠绕, 这些条纹将以高梯度值的形式出现在相位梯度计算结果中, 可能会在后期识别过程中被误判为形变信号。

在分析过程中, 以TanDEM-X DEM处理得出的结果为标准参考。按500 m的DEM误差计算,  $|\sum B_{\perp}|$  应小于18 m, 才能使DEM误差的影响低于噪声水平。因此, 在进行堆叠前剔除了20220505\_20220517和20240915\_20241009两个干涉对, 最终累计垂直基线0.3 m。此外, 研究过程中还对TanDEM-X DEM去除地形相位得到的190张干涉图进行了SBAS-InSAR分析, 以佐证相位梯度堆叠结果。如图13所示, 灾害发生十余年后, 大光包滑坡体已趋于稳定状态, 当前形变区域主要集中于滑坡体中上部及南缘次级滑体。

此外, 本研究以SRTM DEM去除地形相位的干涉图为基础数据, 挑选了不同基线组合进行实验, 分析DEM误差影响随 $|\sum B_{\perp}|$ 的变化情况。在选取基线时保证了每组干涉图都覆盖相同的时间

段，并使所有组的干涉图尽可能多的相同，每组干涉图的数量为  $153 \pm 1$  张。实验结果如图 14 所示，当  $|\sum B_{\perp}|$  很大时（图 14 (a)）相位梯度堆叠结果受到了严重的 DEM 误差影响，其甚至成为了结果中的主导分量，掩盖了周围的形变信息。随着  $|\sum B_{\perp}|$  的减小，DEM 误差的影响也逐渐变小。当  $|\sum B_{\perp}|$  减小至 300 m，DEM 误差的影响显著减小，但仍能看出部分痕迹。如图 14 (d) 所示，当

$|\sum B_{\perp}|$  进一步减小至 7 cm 后，结果中形变分布与时序形变结果基本一致，无明显的 DEM 误差痕迹。但在滑坡的中下部，其结果比 TanDEM-X DEM 的堆叠结果多出了部分形变，这可能是由以下两个原因造成的。首先对 TanDEM-X DEM 的结果进行堆叠时使用了更多的干涉图，其中部分形变信息可能在堆叠的过程中出现了相互抵消的情况，导致 TanDEM-X DEM 的堆叠结果出现了“错误”；其次，在数据处理过程中存在一些具有不确定性的操作，这也可能导致两者结果出现部分差异。

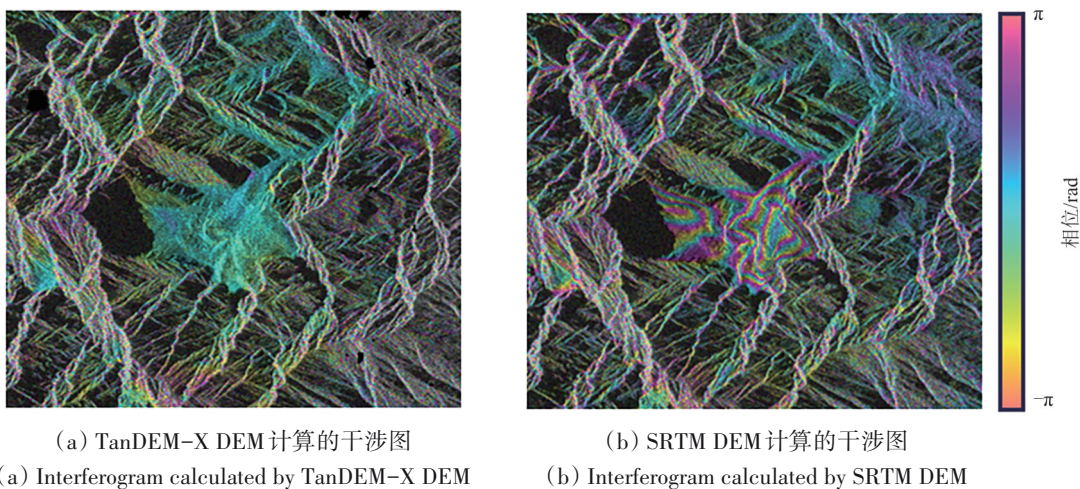


图 12 不同 DEM 获得的 20231226\_20240107 干涉图  
Fig. 12 Interferometry diagrams of 20231226\_20240107 obtained by different DEMs

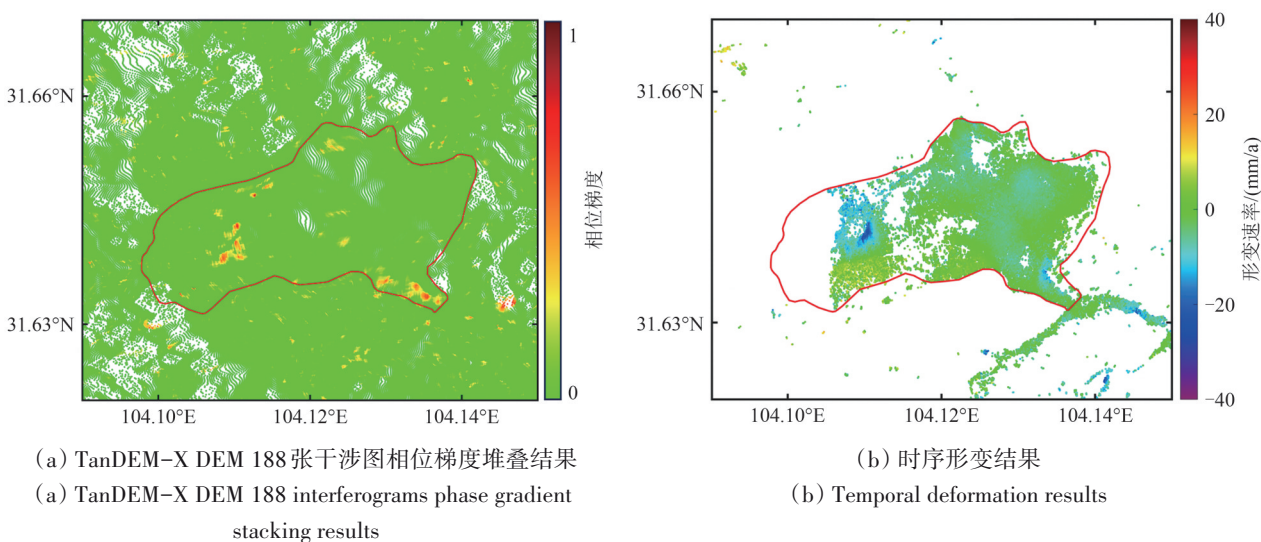


图 13 TanDEM-X DEM 相位梯度堆叠及时序形变结果，图中红色多边形为滑坡边界  
Fig. 13 TanDEM-X DEM phase gradient stacking and temporal deformation results, where the red polygon is the landslide boundary

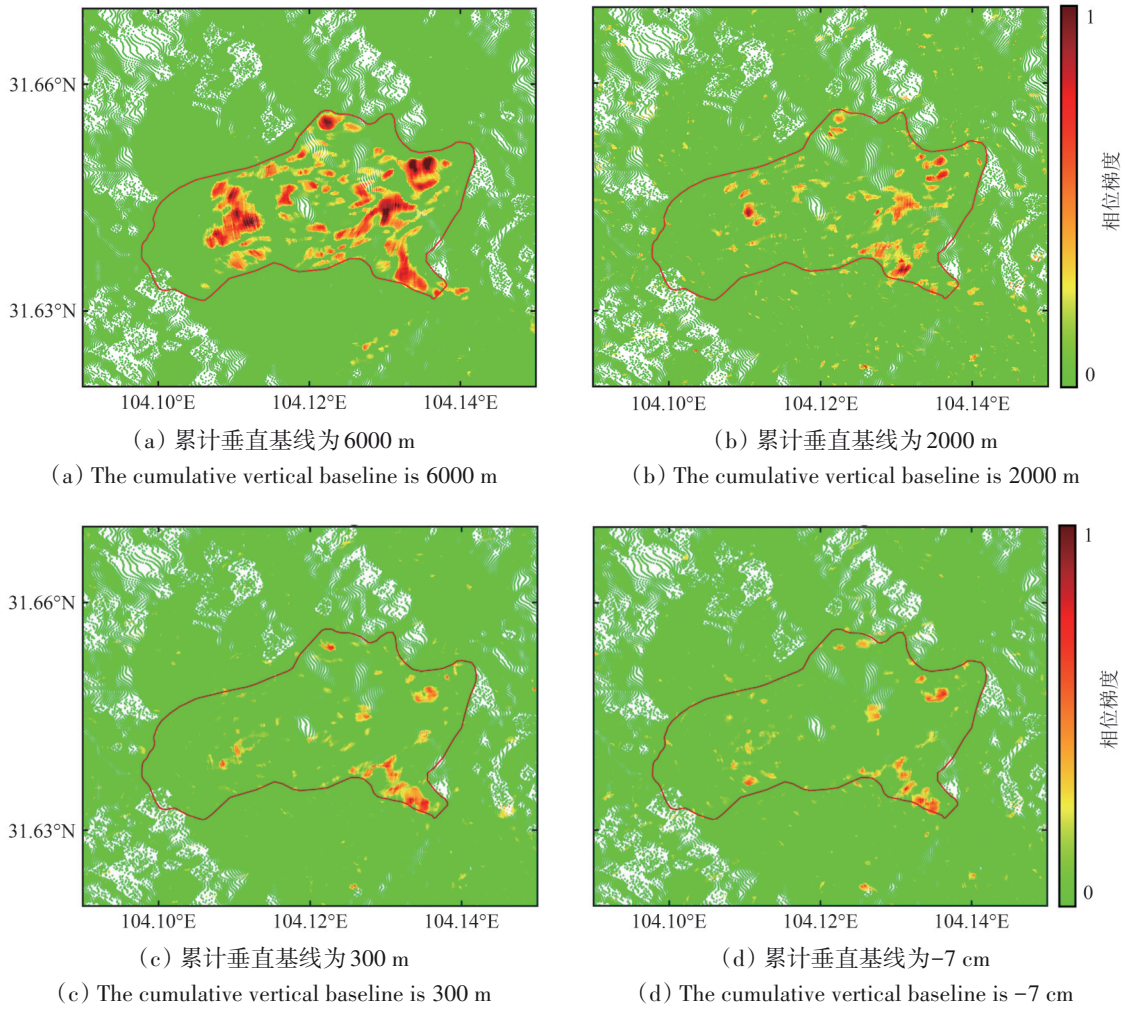


图 14 使用 SRTM DEM 去除地形相位的干涉图在不同基线组合下的相位梯度堆叠结果  
 Fig. 14 Phase gradient stacking results of interferograms using SRTM DEM to remove terrain phases under different baseline combinations

以上实验结果证明只要  $|\sum B_{\perp}|$  足够小, 相位梯度堆叠技术便可有效的减小 DEM 误差的影响并保留其中包含的形变信号。因此, 在实际应用中可以通过删除部分基线的方式创造一个  $|\sum B_{\perp}|$  很小的基线组合, 从而尽可能的消除 DEM 误差的影响。

### 4.3.3 讨论

为了确定 DEM 误差的影响是否与干涉图数量存在关联, 本研究选取了不同数量, 但  $|\sum B_{\perp}|$  接近于 0 的干涉图进行堆叠实验。如图 15 (a) 所示, 当干涉图数量较少时, 相位梯度堆叠结果中形变相位

不够突出, 且受到了严重的随机噪声影响, 但形变的总体分布趋势与最终的堆叠结果 (图 15 (b)) 相似, 无明显的 DEM 误差影响痕迹。相比之下, 图 14 (a) 中虽然使用了 153 张干涉图, 但垂直基线累计和很大, 结果中 DEM 误差的影响非常显著。证明 DEM 误差的影响与干涉图数量无明显关系, 即便在干涉图数量有限的情况下仍可通过减小  $|\sum B_{\perp}|$  来控制 DEM 误差的影响。但在实际应用中仍然建议使用 180 以上的干涉图进行堆叠。如此, 既能避免几何畸变以及随机噪声的影响, 还能增强形变信号, 避免遗漏一些形变梯度较小的滑坡, 保证识别结果的完整性。

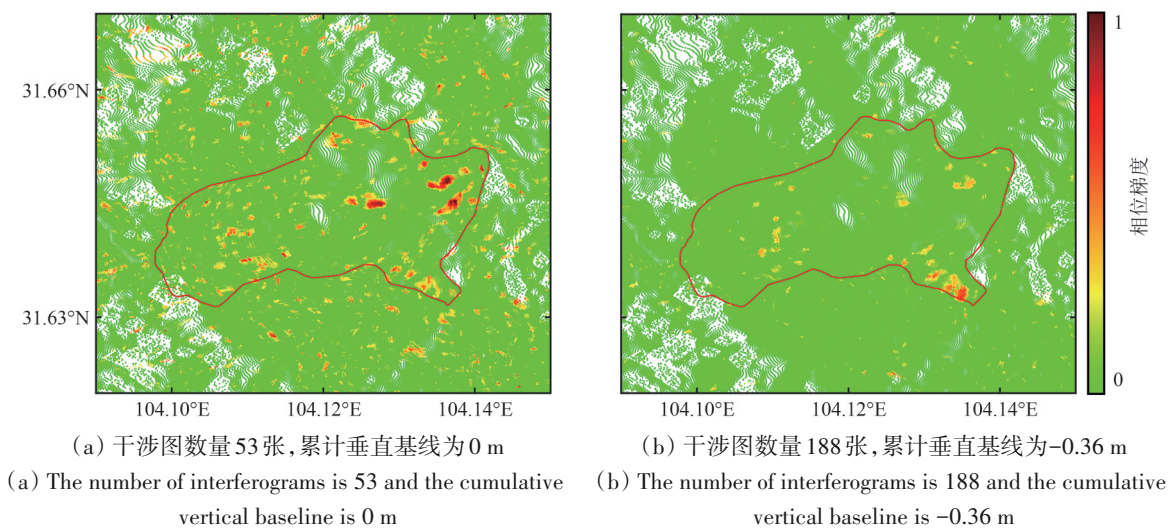


图 15 累计垂直基线较小的不同数量干涉图堆叠结果

Fig. 15 Stacking results of different quantitative interferograms with small cumulative vertical baseline

## 5 结论

针对相位梯度堆叠方法在复杂山区滑坡识别中易受地形影响产生伪形变信号的问题, 本文从 InSAR 成像几何和 DEM 误差传播机理两方面进行了系统分析, 并提出了相应的校正和抑制方法。研究表明, 山区地形起伏引起的透视收缩等几何畸变会改变相邻像元对应的实地距离, 若直接以像元间距近似相位梯度计算的空间基准, 易在透视收缩区域引入异常梯度值。通过在相位梯度计算中引入相邻像元对应的实地距离, 统一梯度计算的空间尺度, 可有效削弱透视收缩对堆叠结果的影响, 提高复杂山区地表形变的识别稳定性。

实验结果表明, 顾及几何畸变的相位梯度堆叠方法在干涉图数量相对较少的情况下即可获得稳定结果。以金沙江上游地区为例, 在约 120 幅干涉图参与堆叠时, 透视收缩引起的伪形变信号已得到显著抑制; 综合考虑几何畸变抑制效果与识别完整性, 实际应用中相位梯度堆叠的干涉图数量不宜少于 180 幅。

在 DEM 误差影响分析中, 理论推导与实例分析一致表明, DEM 误差通过残余地形相位传播至相位梯度堆叠结果, 其影响程度主要受累计垂直基线绝对值控制, 而与干涉图数量关系较弱。以 Sentinel-1 数据为例, 当采用 SRTM DEM (标称高程精度约 16 m) 去除地形相位并对约 200 幅干涉图进行堆叠时, 若累计垂直基线绝对值控制在 600 m

以内, DEM 误差对相位梯度堆叠结果的影响已退化至与随机噪声水平相当。

需要指出的是, 滑坡等地质灾害可能引起局地剧烈的地形变化, 而现有开源 DEM 数据在精度和现势性方面均存在一定局限。在实际应用中, 应结合研究区地形条件与灾害特征, 采用相对保守的累计垂直基线阈值, 并通过基线组合优化进一步降低 DEM 误差带来的潜在影响。在四川大光包滑坡的实例分析验证了上述结论的合理性与方法的有效性。

**志 谢** 本研究基于开源代码 (GitHub-whuinsar/IPGS) 二次开发, 在此表示衷心的感谢!

## 参考文献 (References)

- Cao Y M, Hamling I, Massey C and Upton P. 2023. Slow-moving landslides triggered by the 2016 Mw 7.8 Kaikōura Earthquake, New Zealand: a new InSAR phase-gradient based time-series approach. *Geophysical Research Letters*, 50(4): e2022GL102064 [DOI: 10.1029/2022GL102064]
- Chen X R, Zhao C Y, Liu X J, Zhang S C, Xi J B and Khan B A. 2024. An embedding swin transformer model for automatic slow-moving landslide detection based on InSAR products. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 62: 5223915 [DOI: 10.1109/tgrs.2024.3470325]
- Dai K R, Li Z H, Tomás R, Liu G X, Yu B, Wang X W, Cheng H Q, Chen J J and Stockamp J. 2016. Monitoring activity at the Daguangbao mega-landslide (China) using Sentinel-1 TOPS time series interferometry. *Remote Sensing of Environment*, 186: 501-513 [DOI: 10.1016/j.rse.2016.09.009]

- Deng D B E, Huang Y, Mo X Y, Jia Z G and Liu X L. 2023. Co-seismic deformation characteristics of the 2021 Madoi Mw7.4 earthquake revealed by InSAR phase gradient//2023 ANNUAL MEETING OF CHINESE GEOSCIENCE UNION, 2726-2728 (邓德贝尔, 黄宇, 莫昕宇, 贾治革, 刘小利. 2023. InSAR相位梯度揭示的2021年玛多Mw7.4地震同震形变特征//2023年中国地球科学联合学术年会, 2726-2728) [DOI: 10.26914/c.cnkihy.2023.117564]
- Fu L, Zhang Q, Wang T, Li W L, Xu Q and Ge D Q. 2022. Detecting slow-moving landslides using InSAR phase-gradient stacking and deep-learning network. *Frontiers in Environmental Science*, 10: 963322 [DOI: 10.3389/fenvs.2022.963322]
- Guo H. 2000. Theory and application of radar earth observation. Science Press (郭华东, 邵芸, 王长林. 2000. 雷达对地观测理论与应用. 北京: 科学出版社)
- Hanssen R F. 2001. Radar Interferometry: Data Interpretation and Error Analysis. Dordrecht: Springer [DOI: 10.1007/0-306-47633-9]
- Hu X, Bürgmann R, Fielding E J and Lee H. 2020. Internal kinematics of the Slumgullion landslide (USA) from high-resolution UAVSAR InSAR data. *Remote Sensing of Environment*, 251: 112057 [DOI: 10.1016/j.rse.2020.112057]
- Huang R Q, Pei X J and Li T B. 2008. Basic characteristics and formation mechanism of the largest scale landslide at dagungbao occurred during the Wenchuan earthquake. *Journal of Engineering Geology*, 16(6): 730-741 (黄润秋, 裴向军, 李天斌. 2008. 汶川地震触发大光包巨型滑坡基本特征及形成机理分析. 工程地质学报, 16(6): 730-741)
- Huang R Q, Zhang W F and Pei X J. 2014. Engineering geological study on daguangbao landslide. *Journal of Engineering Geology*, 22(4): 557-585 (黄润秋, 张伟锋, 裴向军. 2014. 大光包滑坡工程地质研究. 工程地质学报, 22(4): 557-585) [DOI: 10.13544/j.cnki.jeg.2014.04.004]
- Liu D L, Lu C R, Guo J C, Cai J H, Dong J, Zhang L and Liao M S. 2023. Landslide detection and influence analysis of DEM errors using time series InSAR. *Geospatial Information*, 21(11): 39-45 (刘东烈, 陆超然, 郭金城, 蔡杰华, 董杰, 张路, 廖明生. 2023. 时序InSAR滑坡探测与DEM误差影响分析. 地理空间信息, 21(11): 39-45) [DOI: 10.3969/j.issn.1672-4623.2023.11.010]
- Liu X J, Zhao C Y, Yin Y P, Tomás R, Zhang J, Zhang Q, Wei Y J, Wang M and Lopez-Sanchez J M. 2024. Refined InSAR method for mapping and classification of active landslides in a high mountain region: Deqin County, southern Tibet Plateau, China. *Remote Sensing of Environment*, 304: 114030 [DOI: 10.1016/j.rse.2024.114030]
- Liu Z M and Wang T. 2023. High-resolution interseismic strain mapping from InSAR phase-gradient stacking: application to the North Anatolian fault with implications for the non-uniform strain distribution related to coseismic slip distribution. *Geophysical Research Letters*, 50(15): e2023GL104168 [DOI: 10.1029/2023GL104168]
- Mao Y R, Niu R Q, Li B Q and Li J. 2024. Potential landslide identification based on improved YOLOv8 and InSAR phase-gradient stacking. *IEEE Journal of Selected Topics in Applied Earth Observations and Remote Sensing*, 17: 10367-10376 [DOI: 10.1109/JSTARS.2024.3399788]
- Parizzi A. 2019. Inversion of the slip distribution of an earthquake from InSAR phase gradients: examples using Izmit case study. *IEEE Geoscience and Remote Sensing Letters*, 16(11): 1726-1730 [DOI: 10.1109/LGRS.2019.2909025]
- Price E J and Sandwell D T. 1998. Small-scale deformations associated with the 1992 Landers, California, earthquake mapped by synthetic aperture radar interferometry phase gradients. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, 103(B11): 27001-27016 [DOI: 10.1029/98JB01821]
- Ren T H, Gong W P, Bowa V M, Tang H M, Chen J and Zhao F M. 2021. An improved R-Index model for terrain visibility analysis for landslide monitoring with InSAR. *Remote Sensing*, 13(10): 1938 [DOI: 10.3390/rs13101938]
- Sharov A I, Gutjahr K and Pellikka P E. 2004. Phase gradient approach to the evaluation and mapping of glacier rheology from multi-pass SAR interferograms//Analysis of Multi-Temporal Remote Sensing Images. New Jersey: World Scientific: 154-165 [DOI: 10.1142/9789812702630\_0017]
- Shen Y, Dai K R, Wu M T, Zhuo G C, Wang M, Wang T and Xu Q. 2022. Rapid and automatic detection of new potential landslide based on phase-gradient DInSAR. *IEEE Geoscience and Remote Sensing Letters*, 19: 4514205 [DOI: 10.1109/lgrs.2022.3207064]
- Song C, Yu C, Li Z H, Utili S, Frattini P, Crosta G and Peng J B. 2022. Triggering and recovery of earthquake accelerated landslides in Central Italy revealed by satellite radar observations. *Nature Communications*, 13(1): 7278 [DOI: 10.1038/s41467-022-35035-5]
- Sun J B. 2013. Principles and Applications of Remote Sensing. Wuhan: Wuhan University Press (孙家炳. 2013. 遥感原理与应用. 武汉: 武汉大学出版社)
- Tang G M, Dai K R, Deng J, Liu X J, Liu C, Liu T X, Guo C W and Fan X M. 2025. An enhanced neighborhood differential method for potential landslide identification from stacking-InSAR results. *Measurement*, 242: 115921 [DOI: 10.1016/j.measurement.2024.115921]
- Tang G M, Dai K R, Zhuo G C, Shen Y, Chen C and Xu Q. 2023. Rapid identification of potential landslides in the Maoergai reservoir based on InSAR phase gradient stacking. *China Earthquake Engineering Journal*, 45(5): 1096-1105 (唐光民, 戴可人, 卓冠晨, 沈月, 陈晨, 许强. 2023. 基于InSAR相位梯度叠加的毛尔盖库岸滑坡隐患快速识别. 地震工程学报, 45(5): 1096-1105) [DOI: 10.20000/j.1000-0844.20230529006]
- Wang T, Zhang Q and Wu Z P. 2023. A deep-learning-facilitated, detection-first strategy for operationally monitoring localized deformation with large-scale InSAR. *Remote Sensing*, 15(9): 2310 [DOI: 10.3390/rs15092310]
- Xu A D, Zhao Y H, Wang T, Ren C M and Yue H. 2021. Small fractures caused by the 2019 ridgecrest earthquake sequence: insights from 3D coseismic displacement and uniaxial loading rock experiments. *Frontiers in Earth Science*, 9: 672809 [DOI: 10.3389/feart.2021.672809]
- Xu H and Wang T. 2025. A network-based phase-gradient stacking method for resolving long-wavelength deformation from low-coherence SAR interferograms. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, 130(4): e2024JB030026 [DOI: 10.1029/2024JB030026]
- Xu Q, Dong X J and Li W L. 2019. Integrated space-air-ground early detection, monitoring and warning system for potential catastrophic

- geohazards. *Geomatics and Information Science of Wuhan University*, 44(7): 957-966 (许强, 董秀军, 李为乐. 2019. 基于天-空-地一体化的重大地质灾害隐患早期识别与监测预警. *武汉大学学报(信息科学版)*, 44(7): 957-966) [DOI: 10.13203/j.whugis20190088]
- Xu X H, Sandwell D T and Smith-Konter B. 2020. Coseismic displacements and surface fractures from Sentinel - 1 InSAR: 2019 ridgecrest earthquakes. *Seismological Research Letters*, 91(4): 1979-1985 [DOI: 10.1785/0220190275]
- Yin Y P. 2009. Features of landslides triggered by the Wenchuan earthquake. *Journal of Engineering Geology*, 17(1): 29-38 (殷跃平. 2009. 汶川八级地震滑坡特征分析. *工程地质学报*, 17(1): 29-38) [DOI: 10.3969/j.issn.1004-9665.2009.01.004]
- Zhang D X, Zhang L, Dong J, Wang Y A, Yang C S and Liao M S. 2024. Improved phase gradient stacking for landslide detection. *Landslides*, 21(8): 1829-1847 [DOI: 10.1007/s10346-024-02263-3]
- Zhang L, Jia H G, Lu Z, Liang H Y, Ding X L and Li X. 2019. Minimizing height effects in MTInSAR for deformation detection over built areas. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 57(11): 9167-9176 [DOI: 10.1109/TGRS.2019.2925115]
- Zhu J J, Hu J, Li Z W, Sun Q and Zheng W J. 2022. Recent progress in landslide monitoring with InSAR. *Acta Geodaetica et Cartographica Sinica*, 51(10): 2001-2019 (朱建军, 胡俊, 李志伟, 孙倩, 郑万基. 2022. InSAR滑坡监测研究进展. *测绘学报*, 51(10): 2001-2019) [DOI: 10.11947/j.AGCS.2022.20220294]

## Research on topographic influences and correction methods in InSAR Phase Gradient Stacking

FENG Bin<sup>1</sup>, LI Menghua<sup>1,2,3</sup>, WEI Lei<sup>1,4</sup>, HUANG Cheng<sup>1,4</sup>, TANG Bohui<sup>1,2,3</sup>

1. Faculty of land and Resources Engineering, Kunming University of Science and Technology, Kunming 650093, China;
2. Yunnan Provincial Key Laboratory of Quantitative Remote Sensing (Under Preparation), Kunming 650093 China;
3. Yunnan International Joint Laboratory for Integrated Intelligent Monitoring of Mountain Hazards by Sky and Land, Kunming 650093, China;
4. Yunnan Institute of Geological Environment Monitoring, Kunming 650093, China

**Abstract:** Compared to conventional time-series InSAR (TS-InSAR) techniques, phase gradient stacking offers advantages such as immunity to atmospheric and phase unwrapping errors, fast computational speed, and robustness in low-coherence scenarios, making it well-suited for large-area landslide identification. However, complex mountainous terrain significantly distorts phase gradient stacking results. Firstly, topographic variations cause severe geometric distortions in SAR images, leading to interferometric phase artifacts. Secondly, the external Digital Elevation Model (DEM) used in differential interferometry inevitably contains errors, and the residual topographic phase in interferograms introduces false deformation signals in the phase gradient results, hindering accurate landslide detection. This study provides an in-depth analysis of topographic effects in phase gradient stacking and proposes corresponding correction methods. A divide-and-conquer approach is adopted to address the two types of terrain-induced errors. To mitigate geometric distortions, the actual ground distance between adjacent pixels is calculated and used to correct phase-gradient estimates, thereby unifying the spatial reference for gradient computation across the entire interferogram and reducing foreshortening effects. For residual topographic phases, a strict theoretical derivation based on their generation mechanism and the stacking algorithm demonstrates that their magnitude is proportional to the absolute value of the cumulative perpendicular baseline. Based on this relationship, a reference threshold for the cumulative baseline is derived, and a greedy algorithm is designed to efficiently select an optimal baseline subset that meets the threshold requirement and minimizes DEM-induced errors. Experimental results in the Guxue section of the Jinsha River demonstrate that the improved phase gradient stacking method effectively eliminates foreshortening effects with only 120 interferograms and significantly enhances deformation detection capability. In contrast, conventional methods still exhibit distortions even with over 200 interferograms, confirming the effectiveness of the proposed geometric distortion correction. Further validation using the Daguangbao landslide triggered by the Wenchuan earthquake shows a clear positive correlation between the residual topographic phase error and the absolute cumulative vertical baseline but largely independent of the number of interferograms. Reducing the absolute cumulative vertical baseline effectively suppresses the impact of DEM errors. Correcting the phase gradient using the actual distance between adjacent pixels unifies the spatial reference for gradient calculation across the interferogram, effectively alleviating foreshortening and improving deformation identification capability in complex mountainous areas. The experimental results also indicate that, in practical applications, more than 180 interferograms should be used for stacking to ensure the completeness of the detection results. The residual topographic phase error is proportional to the absolute cumulative vertical baseline. By optimizing baseline selection to control the cumulative vertical baseline, this error can be significantly reduced, enhancing the accuracy and stability of phase gradient stacking results.

**Key words:** InSAR, phase gradient stacking, identification of landslide hazards, geometric distortion, DEM Error, residual topographic phase, surface deformation detection

**Supported by** National Natural Science Foundation of China (No. 42404036; 42230109); Yunnan Provincial Basic Research Program (No. 202301AT070436); Yunnan Provincial "Xingdian Talent Support Program" Project