

公路边坡干涉雷达监测技术规程

Technical specification for highway slope monitoring by synthetic aperture radar

2024 - 10 - 08 发布

2025 - 01 - 08 实施

目 次

前言	II
1 范围	1
2 规范性引用文件	1
3 术语和定义	1
4 缩略语	2
5 基本规定	2
6 InSAR 技术方法及要求	5
7 边坡监测	14
8 监测期限及频率	15
9 监测预警	16
10 监测成果及报告	16
附录 A（资料性） 星载 SAR 可视性分析	18
附录 B（资料性） 主要星载 SAR 数据汇总	19
附录 C（资料性） 主要 InSAR 技术适用条件	20

前 言

本文件按照GB/T 1.1—2020《标准化工作导则 第1部分：标准化文件的结构和起草规则》的规定起草。

本文件由山西省交通运输厅提出、组织实施和监督检查。

由山西省市场监督管理局对标准的组织实施情况进行监督检查。

本文件由山西省交通运输标准化技术委员会(SXS/TC37)归口。

本文件起草单位：山西省交通科技研发有限公司、山西省智慧交通研究院有限公司、中国地质大学（北京）。

本文件主要起草人：熊威、孙志杰、孔繁盛、彭军还、杨烜宇、赵紫阳、付玉强、吕永萍、王军飞、王帅、陈毅、刘亚明、王闫超、张必昌、牛雨竹、陈汝先、高淑利、付智源。

公路边坡干涉雷达监测技术规程

1 范围

本文件规定了公路边坡干涉雷达监测技术的基本规定、技术方法及要求、边坡监测、监测期限及频率、监测预警、监测成果及报告的技术要求。

本文件适用于各等级公路边坡形变监测，矿区、城区等场地地表形变监测可参考使用。

2 规范性引用文件

下列文件中的内容通过文中的规范性引用而构成本文件必不可少的条款。其中，注日期的引用文件，仅该日期对应的版本适用于本文件；不注日期的引用文件，其最新版本（包括所有的修改单）适用于本文件。

- GB 50026 工程测量规范
- GB 50330 建筑边坡工程技术规范
- GB/T 40112 地质灾害危险性评估规范
- JGJ 8 建筑变形监测规范
- JTG/T D31-05 黄土地区公路路基设计与施工技术规范
- JTG/T 3334 公路滑坡防治设计规范
- CH/T 6006 时间序列InSAR地表形变监测数据处理规范
- DZ/T 0221 崩塌、滑坡、泥石流监测规范

3 术语和定义

下列术语和定义适用于本文件。

3.1

公路边坡 slope of highway

由于公路工程建设开挖或填筑所形成的斜坡，包括路堑边坡和路堤边坡。

3.2

合成孔径雷达干涉测量 interferometric synthetic aperture radar

利用合成孔径雷达在不同时刻获取同一地区的雷达回波信号的相位进行差分计算获取数字高程模型或地表形变信息的技术。本文件特指利用 SAR 数据开展边坡形变监测的空间大地测量技术，包括星载合成孔径雷达干涉测量和地基合成孔径雷达干涉测量。

3.2.1

差分合成孔径雷达干涉测量 differential InSAR

从合成孔径雷达干涉相位中减去地形相位及平地相位，提取地表形变信息的测量技术。

3.2.2

永久散射体干涉测量 persistent scatterers InSAR

利用合成孔径雷达干涉图像中具有长期稳定、强后向散射特性的像元（即 PS 点），进行时间和空间域形变量估算以提取地面形变信息的干涉测量方法。

3.2.3

小基线集干涉测量 small baseline subsets InSAR

利用时间和空间基线均小于给定阈值的干涉像对构成多个差分干涉图集，对时间序列相干目标的差分相位进行分析处理并获取地面形变信息的干涉测量方法。

3.2.4

地基合成孔径雷达干涉测量 ground-based InSAR

通过地面测站上的合成孔径雷达对监测体进行干涉成像，获得监测体周期性或实时位移信息的测量方法。

3.3

干涉基线 interferometric baseline

包括空间基线和时间基线。主影像和辅影像干涉成像时，卫星位置构成的空间向量称作空间基线，主、辅影像获取时间差称作时间基线。

3.4

干涉图 interferogram

配准后的主辅影像中对应像元值进行复共轭相乘得到的图像。

3.5

相干目标 coherent target

在干涉图上能保持后向散射特性稳定且相干性良好的像元。

3.6

角反射器 corner reflector

能够对雷达波束产生强烈反射，并在合成孔径雷达图像上形成高强度信号的人工装置。

3.7

视线向 line of sight

雷达传感器与地面目标构成的直线方向。

4 缩略语

下列缩略语适用于本文件。

DEM: 数字高程模型 (Digital Elevation Model)

InSAR: 合成孔径雷达干涉测量 (Interferometric Synthetic Aperture Radar)

TS-InSAR: 时间序列合成孔径雷达干涉测量 (Time Series InSAR)

LOS: 视线向 (Line of Sight)

PS: 永久散射体 (Persistent Scatterer)

SAR: 合成孔径雷达 (Synthetic Aperture Radar)

SBAS: 小基线集 (Small Baseline Subsets)

SLC: 单数复图像 (Single Look Complex)

GNSS: 全球导航卫星系统 (Global Navigation Satellite System)

5 基本规定

5.1 监测任务

包括边坡形变速率图制作、边坡滑动范围获取、历史形变回溯及趋势判断、监测结果精度评价。

5.2 监测等级

5.2.1 公路边坡监测等级根据边坡稳定状态和边坡风险等级进行划分，当边坡稳定状态发生变化时，监测等级应动态调整。

5.2.2 公路边坡稳定状态宜采用地质分析法、极限平衡法、数值模拟法等确定，也可依据滑坡特征按《崩塌、滑坡、泥石流监测规范》（DZ/T 0221）附录 C.3 中滑坡稳定性评价标准来确定。

5.2.3 公路边坡风险等级按照表 1 进行划分。

表1 公路边坡风险等级划分表

评价要素	风险等级		
	I 级	II 级	III 级
经济损失	直接经济损失>500 万元或间接经济损失>5000 万元	直接经济损失 100 万~500 万元或间接经济损失 500 万~5000 万元	直接经济损失<100 万元或间接经济损失<500 万元
人身安全	威胁人数>100 人	威胁人数 10 人~100 人	威胁人数<10 人
危害后果	完全中断	半幅中断	不影响通行
注：满足评价要素中的一项即可。			

5.2.4 公路边坡监测等级应按表 2 划分。

表2 公路边坡监测等级划分表

边坡监测等级	边坡稳定状态	边坡风险等级
一级	不稳定	I 级、II 级、III 级
	欠稳定	I 级
二级	欠稳定	II 级、III 级
	稳定	I 级
三级	稳定	II 级、III 级

5.3 工作流程

利用 InSAR 技术开展公路边坡监测的作业流程包括：技术设计、数据获取、数据处理、成果精度评价、成果编制与提交，具体内容见图 1 所示。

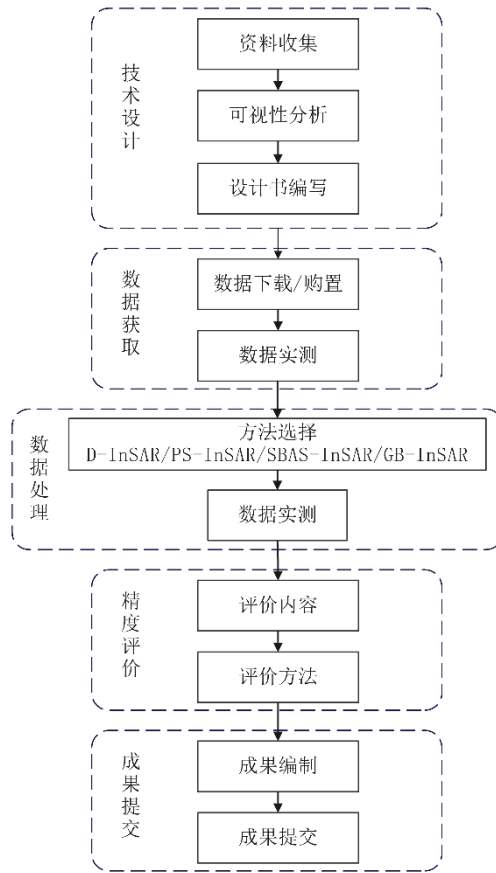


图1 公路边坡 InSAR 监测作业流程图

5.4 资料收集

实施 InSAR 边坡监测任务前需要收集的资料包括：

- 边坡地质状况、影像资料；
- 边坡设计、施工资料；
- 历史监测数据；
- 监测区 SAR 数据，包括存档数据和编程数据；
- 监测区辅助数据资料，包括 DEM 数据、成果底图数据、卫星轨道数据和其它数据等。

5.5 可视性分析

5.5.1 实施 InSAR 边坡监测任务前需要根据 SAR 传感器与坡表的空间位置关系进行可视性分析，星载 SAR 可视性分析步骤见附录 A。

5.5.2 GB-InSAR 根据传感器的位置、视场角与边坡坡度、走向确定是否可视。

5.5.3 可视性良好区域宜连续分布，应达到影像覆盖范围 60%以上。

5.6 设计书编写

5.6.1 实施 InSAR 边坡监测任务前应制定相应的技术设计书。

5.6.2 技术设计书的内容包括：

- a) 任务来源及目的、意义；

- b) 技术设计的依据;
- c) 测区概况;
- d) 监测方法及主要技术要求;
- e) 监测数据选择及质量要求;
- f) 任务分工及工作进度安排;
- g) 成果资料检查验收;
- h) 预期提交成果。

5.7 SAR 数据选择

5.7.1 应根据监测任务要求和监测对象特点, 优先选择监测区开源 SAR 数据, 当其不能满足监测要求时, 应购置商业数据, 现有可供选择的主要星载数据源见附录 B。

5.7.2 星载 SAR 数据选择应考虑的因素有: 边坡走向及坡度、形变量级、数据范围、植被覆盖情况、监测精度和监测时间跨度等。其要求包括:

- a) 边坡走向宜与卫星视线向垂直, 不应超过 5.5.1 中可视性条件要求;
- b) 卫星视线向与最大位移方向夹角最小为优, 尽量避免山体阴影、叠掩、透视收缩等几何畸变现象;
- c) 当监测目标的视线向形变量过大而引起失相干时, 应采用雷达波长更大、重访周期更短、像元分辨率更高的 SAR 数据;
- d) 影像范围应大于监测区范围, 不满足要求时, 应对相邻的两景影像进行拼接;
- e) 植被覆盖面积不宜超过测区的 50%, 年度覆盖时间不宜超过 6 个月, 不满足要求时, 应布设角反射器;
- f) 应根据具体任务要求和监测精度选择技术方法和 SAR 影像数量, 具体要求可参考附录 C;
- g) 监测时间跨度应大于任务要求期限。

5.7.3 当星载 SAR 数据不能满足监测要求时, 应使用 GB-InSAR 进行监测。

5.8 辅助数据选择

5.8.1 进行数据处理前, 应选择适当的辅助数据, 主要包括监测区 DEM、卫星精密轨道数据、大气校正数据、高清底图数据。宜收集监测区内其他手段获取的参考点形变数据作为对比。

5.8.2 DEM 数据应满足以下要求:

- a) 宜选择分辨率优于 SAR 影像的 DEM 数据, 在无法获取高分辨率 DEM 的地区可使用 SRTM DEM 等中低分辨率的数据;
- b) DEM 数据的现势性应与 SAR 数据接近;
- c) DEM 数据在空间上应与 SAR 数据保持一致, 面积比裁剪后的 SAR 数据增加 5%以上。

5.8.3 大气校正数据应与 SAR 影像的空间范围及获取时间一致, 空间分辨率不宜低于后者, 否则应进行内插。

5.8.4 底图数据宜首选带地理坐标信息的高清地图, 次选光学遥感数据、SAR 强度数据、地形图、DEM 渲染图等数据。

6 InSAR 技术方法及要求

6.1 基本要求

6.1.1 宜综合运用多种技术方法及数据源实现边坡不同角度、不同分辨率、不同精度的全方位监测,

并相互验证。

6.1.2 应优先使用精密轨道数据。

6.1.3 宜使用同时期的气象数据对 SAR 数据做大气校正。

6.2 数据处理方法

6.2.1 监测精度要求较低、SAR 数据量不大于 4 景的工作区宜选择 D-InSAR 方法。

6.2.2 数据量较大、监测精度要求较高时，宜选择 PS-InSAR、SBAS-InSAR 方法。

6.2.3 对于临滑阶段的形变监测，宜选择 GB-InSAR 方法。

6.2.4 不同监测方法所适用的边坡监测等级、监测精度和应用条件见附录 C。

6.3 D-InSAR 数据处理

6.3.1 基本流程

D-InSAR 方法数据处理的基本流程见图 2 所示。

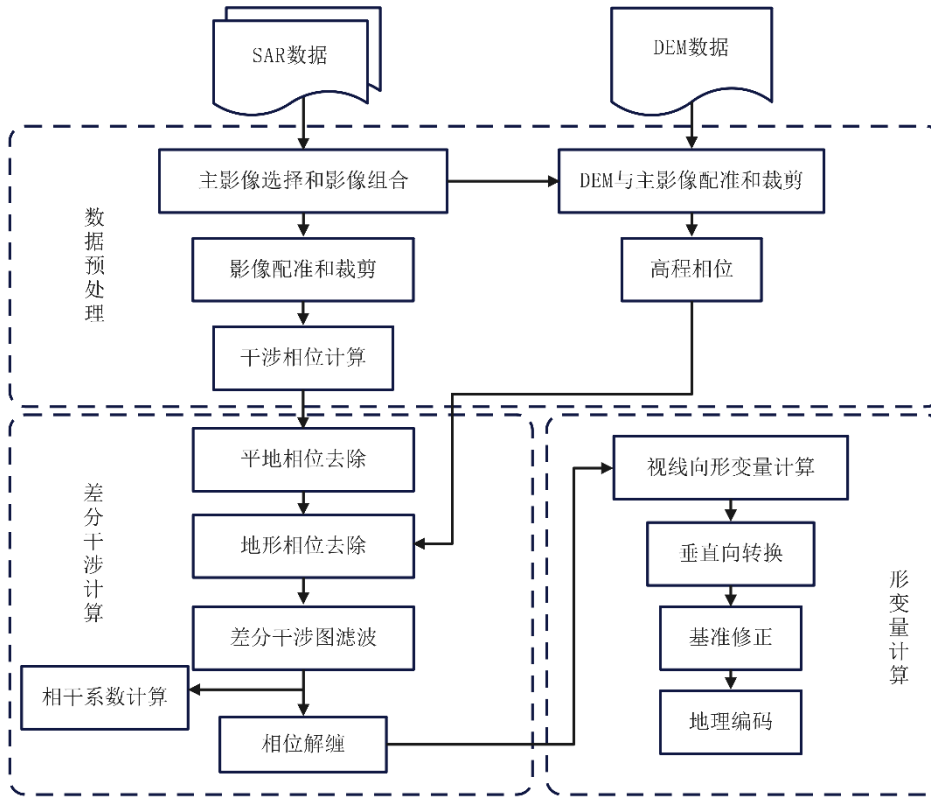


图2 D-InSAR 数据处理流程图

6.3.2 数据预处理

SAR 主影像的选择及影像组合生成像对的步骤如下：

- a) 计算所有影像像对的时间和空间基线，生成时间和空间基线分布图；
- b) 空间基线不宜超过临界基线的 1/2，时间基线应根据相干点数量进行选取，当相干点数量不能反映形变特征时，宜减小时间基线长度；
- c) 选择时间范围内空间基线尽量短的像对，并选择像对中时间较早的影像作为主影像。

6.3.3 影像配准和裁剪

已组合好的像对，根据主影像进行配准，并将所有影像裁剪成范围一致区域，具体步骤如下：

- a) 选择配准算法，设置配准参数，对每个像对进行配准计算；
- b) 主辅影像配准时要求方位向和距离向误差均小于 0.1 个像元，且计算配准多项式的同名点应在整景影像上均匀分布；
- c) 所有配准影像裁剪后的公共区域应大于或等于设计的监测工作范围，如有缺失应及时补充数据。

6.3.4 DEM 与 SAR 影像配准和裁剪

将 DEM 与选好的主影像进行配准，并且将 DEM 范围裁剪成与主影像范围一致，具体步骤如下：

- a) 应对 DEM 采样成与主影像一致的分辨率；
- b) 将 DEM 与主影像进行配准，配准精度应优于 0.5 个像元；
- c) 依据配准关系式，计算生成 DEM 坐标系到 SAR 影像坐标系的转换查找表；
- d) 依据转换查找表，利用多项式拟合算法，将 DEM 转换到 SAR 影像坐标系，生成影像坐标系下的 DEM。

6.3.5 干涉相位计算

对已配准主辅影像进行前置滤波，并计算生成干涉图，具体步骤如下：

- a) 前置滤波。在频率域，截取主、辅影像的公共频带进行前置滤波，生成滤波后的主、辅影像；
- b) 干涉相位计算。对已经过前置滤波的主辅影像像元对进行共轭相乘，生成干涉相位值，逐像元计算生成干涉图。

6.3.6 差分干涉计算

6.3.6.1 平地与地形相位去除

依据空间基线参数和地球椭球体参数，计算平地相位；利用配准后 DEM，计算地形相位。从干涉相位中去除平地与地形相位，生成差分干涉相位，逐像元计算生成差分干涉图。

6.3.6.2 差分干涉图滤波

宜选用自适应滤波方法，对干涉图差分相位滤波，得到滤波后的差分干涉图。

6.3.6.3 相干系数计算

依据相干系数计算公式，对经过滤波的主辅影像差分干涉相位像元，选择窗体大小，逐像元计算相干系数，生成相干图。

6.3.6.4 相位解缠

对相位缠绕的差分干涉图进行解缠，具体步骤如下：

- a) 宜采用空间域二维相位解缠方法，主要包括最小费用流法、枝切法等；
- b) 干涉图整体相干性较低时，宜采用基于不规则格网的最小费用流法依据相干图，对相干系数大于 0.2 的像元进行相位解缠；
- c) 干涉图整体相干性较高时，宜采用枝切法进行相位解缠。对于不连续的“孤岛”区域，可采用手动连接方式设定枝切线，连接解缠区域；

- d) 目视检查解缠结果质量：解缠后相位图的幅度值是否连续、有无跳变存在；无解缠结果区域是否为低相干区域，水体、阴影区、叠掩区等不合理地区是否在计算差分干涉步骤中被掩膜，且不被计算。

6.3.7 形变量计算

6.3.7.1 视线向形变量计算

依据雷达波长参数，将解缠相位换算为 LOS 形变量 Δr 。

6.3.7.2 视线向形变转滑坡方向

依据雷达入射角与边坡坡度、坡向之间的关系，将 LOS 形变量 Δr 转换为滑坡方向形变量 d_{slope} ：

$$d_{slope} = \begin{cases} \Delta r / \cos \theta & \text{当 } \theta < 90^\circ \text{ 时} \\ -\Delta r / \sin \theta & \text{当 } \theta > 90^\circ \text{ 时} \end{cases} \quad (1)$$

式中：

θ 为雷达入射角；

α 为雷达卫星飞行方向；

β 为斜坡坡向；

φ 为斜坡坡度。

当 $d_{slope} > 0$ 时，表示斜坡向上滑动不符合实际，故剔除仅保留负值部分。

6.3.7.3 地理编码

地理编码的具体步骤如下：

- 根据 6.3.4 生成的转换查找表将监测成果由 SAR 影像坐标系转换到地理坐标系，即对监测结果进行地理编码；
- 集合所有地理编码后的点目标，将形变量的时间单位换算成年，生成年度形变速率，逐像元计算生成滑坡速率图。

6.4 PS-InSAR 数据处理

6.4.1 基本流程

PS-InSAR 方法数据处理的基本流程见图 3 所示。

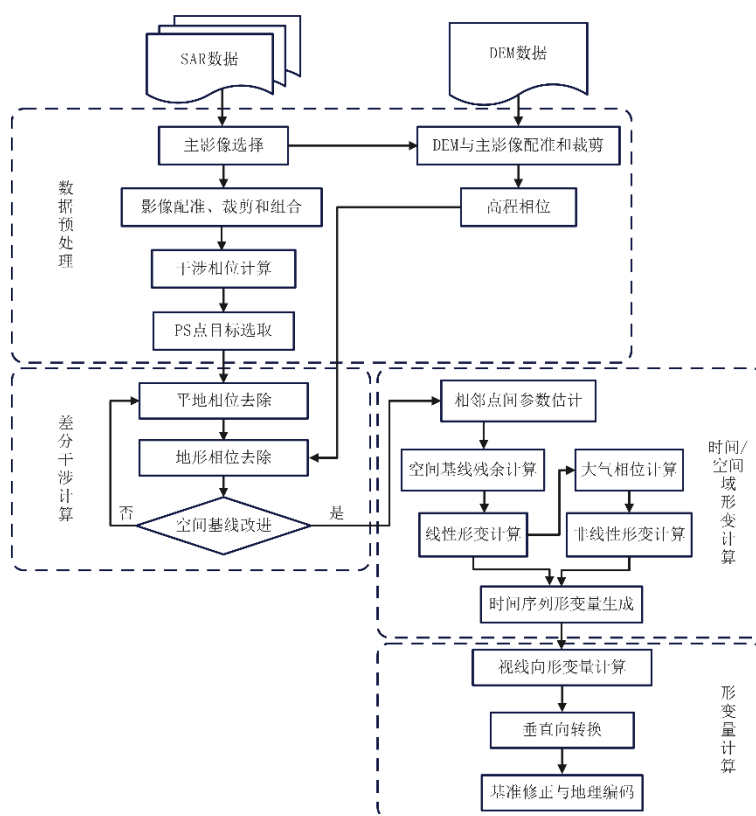


图3 PS-InSAR 数据处理流程图

6.4.2 数据预处理

6.4.2.1 主影像选择。PS-InSAR 方法宜选择单一主影像。在满足 6.3.2 中空间基线和时间基线要求的前提下，SAR 主影像的选择和像对组合工作步骤如下：

- 计算所有影像像对间的时间和空间基线，生成时间和空间基线分布图；
- 选择时间和空间基线居中的一景作为主影像。

6.4.2.2 影像配准、裁剪和组合。所有 SAR 影像与主影像进行配准、裁剪，并组合生成时间序列干涉图集。具体工作步骤如下：

- 所有影像对主影像进行配准。配准方法见 6.3.3；
- 将所有数据裁剪成范围一致的区域。剪裁要求见 6.3.3；
- 对所有已配准的干涉像对，按照时间序列分别与主影像进行像对组合。逐像元计算干涉相位，生成时间序列干涉图集。

6.4.2.3 DEM 与主影像配准和裁剪。将 DEM 与主影像进行配准，并将 DEM 范围裁剪成与主影像一致。具体工作步骤见 6.3.4。

6.4.2.4 干涉图相位计算。将所有主、辅影像前置滤波，计算干涉相位，生成干涉图。具体工作步骤见 6.3.5。

6.4.2.5 PS 点目标选取。对时间序列干涉图集的像元进行 PS 点目标筛选。具体步骤为：

- PS 点目标识别。SAR 数据 PS 点目标的识别宜采用振幅离差、指标系数和平均强度等指标方法。结合监测区地物类型，宜选择一种或多种方法，以提高 PS 点目标目标识别的准确性；
- PS 点目标干涉相位序列生成。将满足上述条件要求的点目标从干涉图集中提取出来，生成 PS 点目标的干涉相位序列。

6.4.3 差分干涉计算

6.4.3.1 平地 and 空间相位去除。对由 PS 点目标组成的干涉图，进行平地 and 地形相位的去除，具体工作步骤见 6.3.6.1。

6.4.3.2 空间基线改进。目视检查每景差分干涉图，若含有残余干涉条纹超过半个波长，计算空间基线残余相位，并去除。具体步骤如下：

- a) 利用二次曲面模型对差分干涉图进行空间基线粗估计，得到空间基线的粗估计相位；再利用差分干涉图中差分相位减去粗估计相位，得到残余相位；
- b) 利用快速傅里叶变换对残余相位进行估计，得到残余基线相位；
- c) 将步骤 a) 中空间基线粗估计相位加上步骤 b) 中的残余基线相位，得到改进的空间基线相位；
- d) 利用改进的空间基线相位，对 6.4.3.1 中的平地相位去除残余平地相位，计算得到改进后的平地相位和干涉图集。

6.4.4 时间/空间域形变估算

对干涉图的差分干涉相位应进行时间和空间域的线性形变相位估计，如有要求，还应进行非线性形变相位估计，去除大气、噪声等残余相位，得到每个点目标的时间序列形变相位。PS-InSAR 的计算步骤为：

- a) 相邻点间参数估计。将 PS 点目标相连接构成不规则三角网，依据点间连接关系求解相邻点差分相位之差；
- b) 线性形变相位和残余高程相位计算。依据空间基线、时间基线关系，建立 PS 点目标的二维周期图，以此为目标函数使模型相关系数最大化，估算相邻点间的线性形变速率和高程差值。若监测工作设计书仅要求线性形变成果，则可直接输出形变速率结果。

6.4.5 形变量计算

将 PS 点目标的形变相位转换成为 LOS 形变量和滑坡方向形变量，进行基准纠正和地理编码，生成滑坡速率图，以及其它相关图件。具体工作步骤见 6.3.7。

6.5 SBAS-InSAR 数据处理

6.5.1 基本流程

SBAS-InSAR 方法数据处理的基本流程见图 4 所示。

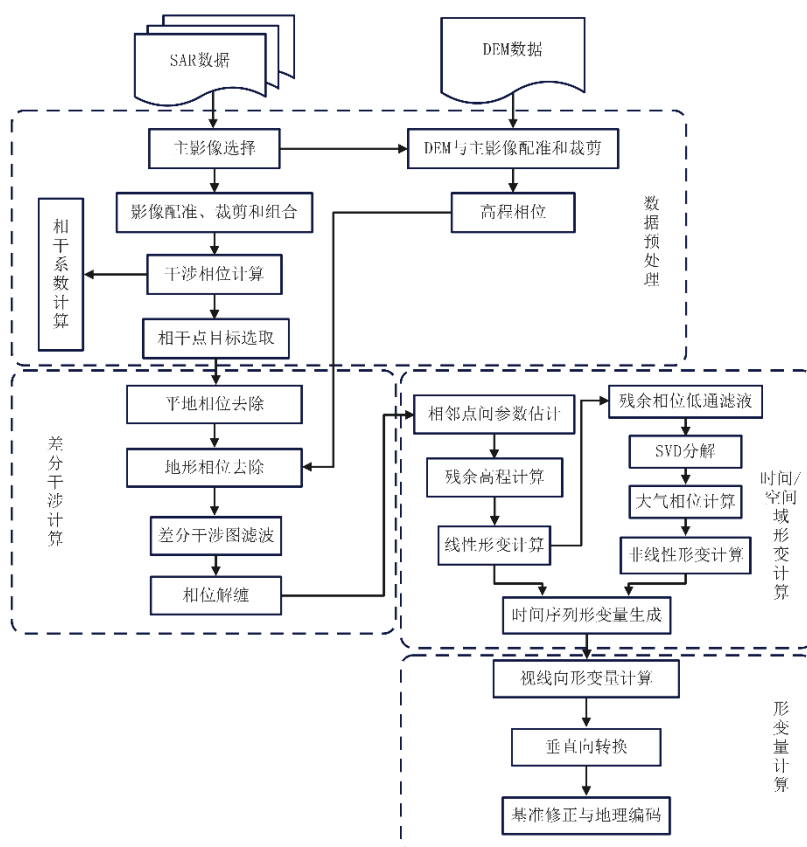


图4 SBAS-InSAR 数据处理流程图

6.5.2 数据预处理

6.5.2.1 主影像选择。SBAS-InSAR 方法宜选择多个主影像。SAR 主影像的选择和像对组合工作步骤如下：

- 计算所有影像像对的时间和空间基线，生成时间和空间基线分布图；
- 采用时间和空间基线均满足给定阈值的像对组合生成差分干涉图集。在满足 6.3.2 中空间基线和时间基线要求的前提下，C 和 X 波段空间基线阈值宜定为 300 m，L 波段空间基线阈值宜定为 500 m；时间基线根据监测对象的变化特征而定，时间基线愈短愈好，最大时间阈值不超过 3 年。

6.5.2.2 影像配准、裁剪和组合。所有 SAR 影像统一进行配准、裁剪，并组合生成时间序列干涉图集，具体工作步骤如下：

- 任意挑选一景影像作为配准参考影像，所有影像对其进行配准。配准方法见 6.3.3；
- 将所有数据裁剪成一致的区域，剪裁要求见 6.3.3；
- 对所有配准好的干涉像对，按照 6.5.2.1 中的时间和空间基线限制条件，选择像对组合。逐像元计算干涉相位，生成时间序列干涉图集。

6.5.2.3 DEM 与配准参考影像配准和裁剪。将 DEM 与配准参考影像进行配准。将 DEM 范围裁剪成与配准参考影像一致区域，具体工作步骤见 6.3.4。

6.5.2.4 干涉图相位计算。将所有主、辅影像前置滤波，计算干涉相位，生成干涉图。具体工作步骤见 6.3.5。

6.5.2.5 相干系数计算见 6.3.6.3。

6.5.2.6 相干点目标选取。对时间序列干涉图集的像元进行相干点目标的筛选，具体步骤为：

- a) 相干点目标选取。相干点目标的识别可采用 6.4.2.5 中的 PS 点目标筛选方法，也可根据时间序列相干系数统计值选取；
- b) 相干点目标干涉相位序列生成。将满足上述条件要求的辅影像与主影像进行相位干涉处理，提取相干点目标的干涉相位序列图。

6.5.3 差分干涉计算

6.5.3.1 平地 and 地形相位去除。对由相干目标点组成的干涉图，进行平地 and 地形相位的去除，具体工作步骤见 6.3.6.1。

6.5.3.2 差分干涉图滤波见 6.3.6.2。

6.5.3.3 相位解缠见 6.3.6.4。

6.5.4 时间/空间域形变估算

对干涉图的差分干涉相位应进行时间和空间域的线性形变相位估计，如有要求，还应进行非线性形变相位估计，去除大气、噪声等残余相位，得到点目标的时间序列形变相位。SBAS-InSAR 的计算步骤为：

- a) 相邻点间参数估计。方法见 6.4.4 的步骤 a)；
- b) 线性形变相位和残余高程计算。方法见 6.4.4 的步骤 b)；
- c) 残余相位低通滤波。从差分干涉相位中减去步骤 b) 中两项相位分量后得到残余相位，对残余相位进行空间域低通滤波得到滤波后的残余相位；
- d) 奇异值分解处理。根据小基线像对组合关系，对步骤 c) 得到的滤波后残余相位进行奇异值分解（SVD）处理，求解每个影像对应时刻的大气相位和非线性形变相位；
- e) 大气相位和非线性形变相位计算。对奇异值分解得到的大气相位和非线性形变相位进行空间域高通滤波，得到大气相位，并对滤波后的相位序列进行时域低通滤波，得到非线性形变相位；
- f) 时间序列形变相位计算。将 b) 步骤中线性形变相位和 e) 中非线性形变相位相加，结合时间基线参数，得到每个像元的时间序列形变相位。

6.5.5 形变量计算

计算过程同 6.3.7。

6.6 GB-InSAR 数据处理

6.6.1 基本流程

GB-InSAR 方法数据处理的基本流程见图 5。

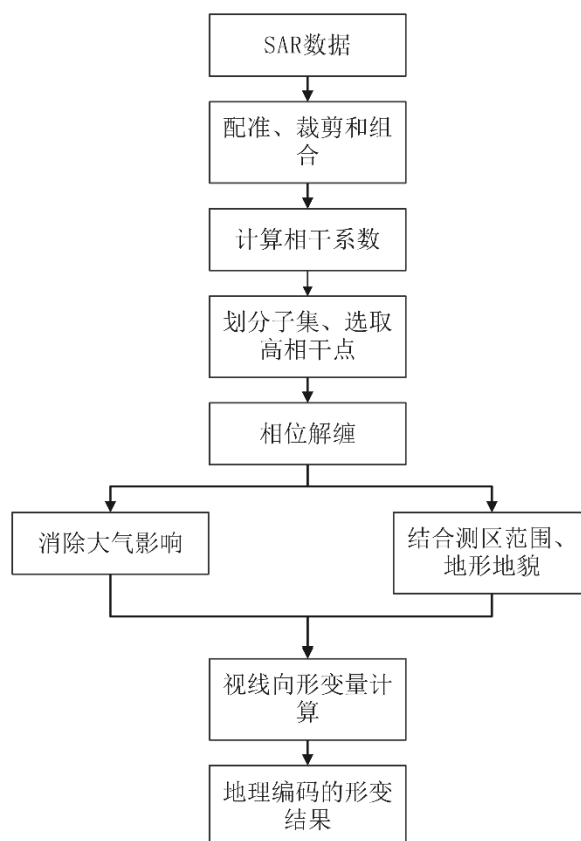


图5 GB-InSAR 数据处理流程图

6.6.2 数据预处理

6.6.2.1 所有 SAR 影像的对主影像进行配准、裁剪，具体工作步骤如下：

- a) 所有影像对主影像进行配准。配准方法见 6.3.3；
- b) 将所有数据裁剪成范围一致的区域。剪裁要求见 6.3.3。

6.6.2.2 宜采用时间小基线集方法划分子集，具体步骤如下：

- a) 对所有 SAR 影像，以第一景为主影像，按时序依次计算其与后续影像的相干系数，相干系数计算方法见 6.3.6.3；
- b) 采用一定的相干系数作为划分子集的阈值，划分出一个子集；
- c) 对剩余 SAR 影像，以前一子集最后一景为主影像，按时序依次计算其与剩余 SAR 影像的相干系数；
- d) 转到 b 步骤，重复进行，直到划分完所有影像。

6.6.3 干涉相位图计算

对已配准各子集影像进行前置滤波，在各子集内，以第一景为主影像，计算生成干涉图。具体步骤如下：

- a) 前置滤波。对各子集，在频率域，截取主、辅影像的公共频带进行前置滤波，生成滤波后的主、辅影像；
- b) 干涉相位计算。对已经过前置滤波的子集影像，在各子集内，以第一景为主影像，进行共轭相乘，生成时间序列干涉相位图。

6.6.4 相干点目标选取

对经过滤波的 SAR 影像各子集，以子集内第一景为主影像，后续影像依次作为辅影像，依据相干系数计算公式，选择一定窗体大小（如 3、5 等），逐像元计算相干系数，生成时间序列相干图。采用一定的相干系数作为阈值，选取各子集内相干点。将各子集内相干点取交集，获取最终相干点目标。

6.6.5 相位解缠

计算方法同 6.3.6.4。

6.6.6 消除大气扰动影响

大气扰动是影响 GB-InSAR 精度的主要因素之一，其影响可达厘米级。

当测区范围较小、地形较平坦、大气环境较稳定时，宜采用距离线性改正模型削弱大气扰动。具体步骤如下：

- a) 选择测区内形变为零的稳定点，认为高相干点（如相干系数大于 0.9）为稳定点；
- b) 稳定点的形变相位为零，其干涉相位即可看作大气扰动相位 $\varphi_{atm} \approx a * r$ ，其中 r 为视线向距离，计算模型系数 a 、 b ，得到线性改正模型；
- c) 通过线性改正模型对相干点的解缠相位进行大气改正。

当测区范围较大、地形起伏较大、大气环境复杂时，宜采用二阶距离改正模型削弱大气扰动。具体步骤如下：

- a) 选择测区内形变为零的稳定点，可认为高相干点（如相干系数大于 0.9）为稳定点；
- d) 稳定点的形变相位为零，其干涉相位即可看作大气扰动相位 $\varphi_{atm} \approx a * r^2 + br + c$ ，其中 r 为视线向距离，计算模型系数 a 、 b 、 c ，得到二阶距离改正模型；
- b) 通过二阶距离改正模型对相干点的解缠相位进行大气改正。

6.6.7 形变量计算

依据雷达波长参数，将各子集消除大气扰动后的相位换算为 LOS 形变量 Δr ，对各子集的形变按最小二乘原则进行平差，结合监测点 GNSS 坐标获取地理编码后的形变量。将视线向形变量转换为滑坡方向，具体步骤同 6.3.7。

7 边坡监测

7.1 一般规定

7.1.1 公路边坡监测应根据监测等级开展工作，监测等级划分应符合本文件第 5.2.2 条的规定。

7.1.2 公路边坡监测宜根据任务要求采用不同分辨率的 SAR 数据、不同监测方法组合进行。

7.1.3 公路边坡监测应在搜集资料及现场调查的基础上编制监测方案，搜集资料及现场调查除应符合本文件 5.4 条规定外，尚应满足下列要求：

- a) 分析滑坡边界、变形特征、规模、主要诱发因素与影响因素等，确定其发育阶段和稳定状态；
- b) 搜集能满足监测工作的地形图、典型的剖面图和附近建设规划图。

7.1.4 GB-InSAR 应安置在形变区外稳定的基点，视情况选择连续监测模式或非连续监测模式。

7.1.5 当 InSAR 监测不能满足任务要求时，应结合其他监测手段（GNSS、全站仪、单点位移计等）共同进行。

7.2 监测内容

- 7.2.1 公路边坡监测的内容包括变形监测和相关诱因监测。
- 7.2.2 变形监测包括形变趋势监测、累积形变量监测、形变速率监测和形变范围监测。
- 7.2.3 相关诱因监测是指监测一切与边坡变形产生相关的因素，一般包括采空区监测、路基沉陷监测、气象环境、地震活动等。

7.3 监测方案

- 7.3.1 应根据边坡监测等级和监测任务要求按照本文件 5.6 条规定制定监测方案。
- 7.3.2 应根据监测任务要求和监测对象特点按照本文件 5.7、5.8 条规定选择 SAR 数据和辅助数据。
- 7.3.3 应根据监测任务要求和 InSAR 方法技术特点按照本文件 5.1 条规定选择数据处理方法。

7.4 精度评价

- 7.4.1 基于 TS-InSAR 技术获取的年形变速率、累积形变量和 DEM，均可以评定其精度。
- 7.4.2 通过覆盖同一地区不同轨道的 SAR 数据、或者不同 SAR 卫星数据的解算结果可以评定内符合精度。
- 7.4.3 通过与高精度 GNSS、精密水准数据的对比可验证 InSAR 结果的外符合精度。

8 监测期限及频率

8.1 一般规定

- 8.1.1 公路边坡 InSAR 监测工作应贯穿于边坡工程施工全过程，监测期限宜从边坡工程施工前一年开始，直至变形趋于稳定后结束。
- 8.1.2 公路边坡 InSAR 监测频率的确定应能及时、系统地反映边坡及支护结构、周边环境的动态变化过程，宜采用定时监测，必要时应进行跟踪监测。

8.2 监测周期

- 8.2.1 边坡监测期限应根据监测等级确定，一级监测项目监测期限宜至边坡工程交工后不少于 2 年，二级监测项目监测期限宜至边坡工程交工后不少于 1 年，三级监测项目监测期限可至边坡工程交工后结束。
- 8.2.2 一级边坡工程宜建立长效监测机制，具体周期视项目需求而定。

8.3 监测频率

- 8.3.1 针对不同监测等级的边坡分别阐述施工期及运营期的监测期限和频率要求，具体要求见表 3。

表3 公路边坡 InSAR 监测频率

施工期			运营期		
一级	二级	三级	一级	二级	三级
<1 次/10d	1 次/15d	1 次/20d	<1 次/10d	1 次/20d	1 次/30d
注1：边坡工程施工前的监测频率视情况而定；					
注2：实际监测频率视卫星的重复周期而定，选择重复周期最接近上述要求的SAR数据；					
注3：雨季应当适当提高监测频率。					

- 8.3.2 当出现特殊情况需要提高监测频率而 InSAR 技术手段又无法满足要求时，须使用 GNSS、水准、

全站仪等手段辅助监测。

9 监测预警

9.1 一般规定

9.1.1 公路边坡监测应根据监测等级确定预警值，当监测数据达到预警值时，应及时通告后出具书面报告。

9.1.2 公路边坡发生下列情况之一时，应立即进行危险报警，并应对边坡支护结构和周边环境中的保护对象采取应急措施，同时增加监测频率并调整监测方案：

- a) 监测数据累计变化量或变形加速度值超出报警值；
- b) 边坡支挡结构或周边岩土体位移突然明显增大；
- c) 边坡及其影响范围内地面出现隆起、陷落或较严重的渗漏等；
- d) 边坡及其影响范围内建（构）筑物出现较严重的突发裂缝或危害结构的变形裂缝。

9.2 监测预警值

9.2.1 根据不同的 InSAR 技术方法、边坡监测等级确定监测预警值，具体要求见表 4。

表4 公路边坡 InSAR 监测预警值

技术方法	监测等级					
	一级		二级		三级	
	速率值(mm/d)	加速度(mm/d ²)	速率值(mm/d)	加速度(mm/d ²)	速率值(mm/d)	加速度(mm/d ²)
D-InSAR	10	/	15	/	20	/
PS-InSAR	2	1	3	1.5	4	2
SBAS-InSAR	2	1	3	1.5	4	2
GB-InSAR	5	2	8	3	10	5

注1：加速度为相邻两个时段平均速率的变化；
注2：预警值只作为理想情况下的参考，需结合其它高频监测手段及现场情况共同预警；
注3：岩质边坡的预警值可适当增大。

10 监测成果及报告

10.1 一般规定

10.1.1 监测成果应采用统一的坐标基准和时间基准。

10.1.2 监测数据的整理应及时，当出现异常时，应分析原因，必要时应借助其他监测手段进行复核。

10.1.3 监测项目数据的分析应结合其他相关项目的监测数据、现场勘查情况及历史数据进行，并对其发展趋势作出预测。

10.2 监测成果

10.2.1 监测成果应包括：

- a) 解译后的 SAR 数据，包括计算过程数据、累积形变量图、形变速率图、关键点位的历史形变图等；

- b) 计算过程数据，包括配准结果、干涉图、相干系数图、解缠相位图、结果精度文件等；
- c) 累积形变量文件及图件；
- d) 形变速率文件及图件；
- e) 关键点位的历史形变文件及图件。

10.2.2 数据文件命名应统一规范，宜采用“项目名称+文件内容+监测时间”的形式。

10.2.3 图表应清晰美观，整饰要素完整。

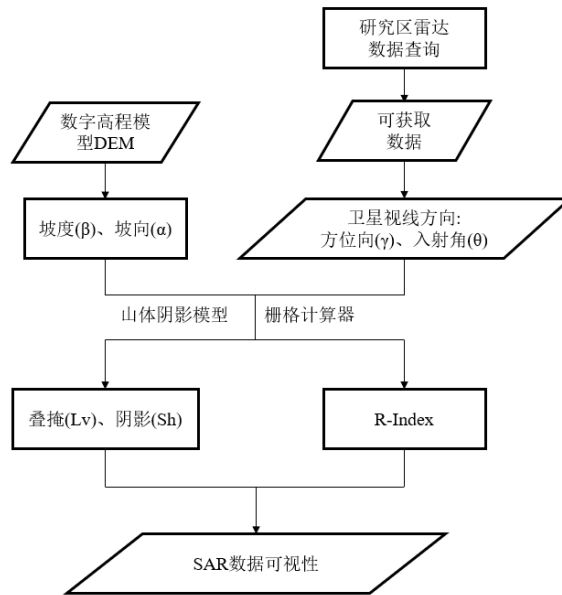
10.3 监测报告

内容包括：

- 边坡概况；
- 监测依据；
- 监测方法与工作流程；
- 数据处理流程；
- 监测结果及分析；
- 监测结论及建议。

附录 A
(资料性)
星载 SAR 可视性分析

可视性分析流程图如图A.1所示。



图A.1 可视性分析流程图

第一步，利用ARCGIS软件中的空间分析模块基于DEM计算得到地形坡度（ β ）和坡向（ α ），再利用山体阴影模型计算阴影（Sh）和叠掩（Lv）掩膜。

第二步，利用查询获得的卫星几何参数和地形坡度（ β ）、坡向（ α ）计算R-Index指数，R-Index指数定义为： $R-Index = \sin[\theta - \beta \times \sin(A)]$ ，升轨数据 $A = \alpha - \varepsilon$ ，降轨数据 $A = \alpha + \varepsilon + 180^\circ$ ，其中 θ 为卫星入射角， ε 为卫星飞行方位角 γ 与北方向夹角，升轨为负，降轨为正。

第三步，将所得的 R-Index 指数、阴影和叠掩相乘，获得最终的SAR地形可视性 $Visibility = R-Index \times Lv \times Sh$ 。其中：

- (1) 好可视性： $R-Index > \sin \theta$ ，且非主动阴影区；
- (2) 透视收缩： $0 < R-Index \leq \sin \theta$ ，且非阴影和叠掩区；
- (3) 叠掩： 在山体阴影模型计算得到的叠掩图层中， $-1 \leq R-Index \leq 0$ 的区域为主动叠掩，其他为被动叠掩；
- (4) 阴影（Sh）： 在山体阴影模型计算得到的阴影图层中， $R-Index > \sin \theta$ 且坡度大于视线入射角余角的区域为主动阴影，其他为被动阴影。

附录 B

(资料性)

主要星载 SAR 数据汇总

表 B.1 主要星载 SAR 数据汇总表

星载 SAR 系统	高分三号	L-SAR 01A/B	宏图一号	Sentinel-1A/B	ALOS-2 PALSAR	RadarSAT-2	TerraSAR-X	COSMO-SkyMed
国家/机构	中国	中国	中国	欧空局	日本	加拿大	德国	意大利
发射时间	2016年8月 /2021年11月 /2022年4月	2022年1月 /2022年2月	2023年3月	2014年4月 /2016年4月	2014年5月	2007年12月	2007年6月 /2010年6月	2007年6月 /2007年12月 /2008年10月 /2010年11月
设计寿命	8年	8年	5年	7年	5年	7年	5年	7年
是否在轨	是	是	是	是	是	是	是	是
重访周期	29天	4天(单卫星 8天)	15天	6天(单卫星 12天)	14天	24天	11天	4天(单卫星 16天)
工作波段	C	L	X	C	L	C	X	X
侧视方式	左右侧视	左右侧视	左右侧视	右侧视	左右侧视	左右侧视	右侧视	左右侧视
入射角	10° ~60°	10° ~60°	20° ~60°	18° ~47°	8° ~70°	20° ~60°	20° ~55°	20° ~60°
主要观测模式及分辨率	聚束模式 (1 m)、 条带模式 (3 m、5 m、 10 m、25 m)、 扫描模 (50 m、100 m)	条带模式 (3 m、6 m、 12 m、24 m) 扫描模式 (30 m)	聚束模式 (1 m)、 条带模式 (3 m)、 TOPSAR 模 式(5 m)	条带模式 (5 m×5 m) 干涉宽幅模式 (5 m×20 m) 超宽幅模式 (20 m×40 m)	聚束模式 (1 m×3 m)、 条带模式 (3 m、6 m、 10 m) 扫描模式 (60 m、 100 m)	聚束模式 (1 m)、 条带模式 (3 m、8 m、 25 m)、 宽幅模式 (30 m)、 扫描模式 (50 m、 100 m)	聚束模式 (2 m)、 条带模式 (3 m)、 扫描模式 (18.5 m) 宽幅扫描模 式 (40 m)	聚束模式 (1 m)、 条带模式 (3 m、15 m)、 扫描模式 (30 m、 100 m)

附录 C

(资料性)

主要 InSAR 技术适用条件

表 C.1 主要 InSAR 技术适用条件表

方法	最少 SAR 数据量 (景)	精度	监测应用条件	适用边坡监测等级
D-InSAR	2	1 cm~5 cm	适用于时间间隔短、天气/季节接近、地表形变达分米级的区域。	一级、二级
SBAS-InSAR	>8	<1 cm	适用于植被覆盖程度较高、地表呈线性或非线性变化的区域，主要为郊区。	一级、二级、三级
PS-InSAR	>20	5 mm	适用地表裸露程度较高、干涉条件和辐射比较稳定、地表呈线性变化的区域，主要为城区。	一级、二级、三级
GB-InSAR	2	0.1 mm	不受边坡的朝向和坡度限制，需要稳定的基准点。适用于周期性监测和临滑阶段应急监测。	一级、二级、三级