



T/CECS G XXXX: 20XX

中国工程建设标准化协会标准

Standard of China Association for Engineering Construction
Standardization

公路形变 InSAR 监测技术规程

Technical Specification for InSAR Monitoring of Highway
Deformation Deformation

中国工程建设标准化协会 发布

Issued by China Association for Engineering Construction Standardization

前 言

根据中国工程建设标准化协会《关于印发〈2023 年第二批工程建设协会标准制订、修订计划〉的通知》（建标协字[2023]50 号）的要求，由中国公路工程咨询集团有限公司承担《公路形变 InSAR 监测技术规程》（以下简称“本规程”）的制订工作。

本规程是在系统总结我国公路形变合成孔径雷达干涉测量研究成果和工程实践经验的基础上编制的。

本规程共分为 10 章、3 个附录，主要内容包括：总则、术语、基本规定、边坡监测、路基监测、桥梁监测、隧道洞口监测、数据处理、精度评价、成果管理等。

本标准基于通用的工程建设理论及原则编制，适用于本标准提出的应用条件。对于某些特定专项应用条件，使用本标准相关条文时，应对适用性及有效性进行验证。

本标准由中国工程建设标准化协会公路分会负责归口管理，由中国公路工程咨询集团有限公司负责具体技术内容的解释，在执行过程中如有意见或建议，请函告本标准日常管理组，中国工程建设标准化协会公路分会（地址：北京市海淀区西土城路 8 号；邮编：100088；电话：010-62079839；传真：010-62079983；电子邮箱：shc@rioh.cn），或 XX（地址：北京市海淀区西三环北路昌运宫 17 号；邮编：XXXXXX；传真：XXXX-XXXXXX；电子邮箱：526508789@qq.com），以便修订时研用。

主 编 单 位：中国公路工程咨询集团有限公司

参 编 单 位：中咨数据有限公司

主 编：侯芸

主要参编人员：董元帅、张蕴灵、晋玉洁、张鹏、崔丽、李潇屹、苗林林、牟晓莉、王刚、常金全

目次

1 总则	1
2 术语	1
3 基本规定	3
3.1 监测任务	3
3.2 工作流程	3
3.3 方案设计	3
3.4 数据选取	4
3.5 数据处理	6
3.6 精度分析	6
3.7 质量控制	7
3.8 结果分析	7
3.9 成果编制与提交	8
4 边坡监测	8
4.1 监测内容	8
4.2 监测方案	8
4.3 方法要求	9
4.4 数据处理结果验证	9
4.5 监测结果综合分析	9
5 路基监测	10
5.1 监测内容	10
5.2 监测方案	10
5.3 方法要求	11
5.4 数据处理结果验证	11
5.5 监测结果综合分析	11
6 桥梁监测	12
6.1 监测内容	12
6.2 监测方案	12
6.3 方法要求	13
6.4 数据处理结果验证	13
6.5 监测结果综合分析	14
7 隧道洞口监测	14
7.1 监测内容	14
7.2 监测方案	14
7.3 方法要求	15
7.4 数据处理结果验证	15
7.5 监测结果综合分析	15
8 数据处理	15
8.1 数据处理方法的选择	15
8.2 DInSAR	16
8.3 SBAS-InSAR	18
8.4 PS-InSAR	21

8.5 GB-InSAR	24
9 精度评价	26
10 成果管理	27
10.1 数据图件成果	27
10.2 成果报告	27
10.3 成果提交	27
附录 A（资料性附录）目前可使用的 SAR 数据信息表	28
附录 B（资料性附录）InSAR 技术方法及适用地质灾害类型和条件	31
附录 C（资料性附录）成果报告提纲	32

征求意见稿

公路形变 InSAR 监测技术规程

1 总则

1.0.1 为了提高地质灾害监测的效率和准确性，确保公路交通安全。通过制定规程，可以规范数据处理流程，实现对地质灾害隐患的早期识别、监测和预警，从而减少地质灾害对公路交通带来的影响，保障人民生命财产安全。

1.0.2 本标准适用于国内外公路勘察设计和运营养护阶段利用合成孔径雷达干涉测量技术（Interferometric Synthetic Aperture Radar, InSAR）技术对公路沿线地质灾害隐患进行识别和监测。

1.0.3 公路地质灾害隐患卫星合成孔径雷达数据处理主要规定了方案设计、数据选择、数据处理、精度分析、质量控制、结果分析、成果编制与提交等。

1.0.4 卫星合成孔径雷达数据处理除本规范外尚应符合国家、行业颁布的其它有关标准、规范的规定。

2 术语

2.0.1 公路形变 highway deformation

公路路面或路基因地质灾害（如沉降、滑坡）、车辆荷载、气候变化（如冻融、热胀冷缩）等因素引起的几何形态变化。

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

一种基于合成孔径雷达（Synthetic Aperture Radar, SAR）技术的遥感方法，通过分析两幅或多幅 SAR 图像的相位差异，获取地表形变、高程变化等信息。其核心在于利用雷达信号的相干性，结合干涉处理技术，实现毫米级至厘米级的高精度地表形变监测和地形测绘。

2.0.3 差分合成孔径雷达干涉测量 differential interferometric synthetic aperture radar

合成孔径雷达干涉测量（Interferometric Synthetic Aperture Radar, InSAR）的扩展技术，其核心目标是通过差分处理消除地形相位的影响，专门用于高精度监测地表微小形变（如地震、火山活动、地面沉降等引起的毫米级至厘米级位移）。与标准 InSAR 不同，差分合成孔径雷达干涉测量（differential interferometric synthetic aperture radar, DInSAR）通过引入参考数据（如数字高程模型 DEM 或多次观测数据），分离形变信号与地形

信号，从而直接获取地表形变信息。

2.0.4 永久散射体干涉测量 persistent scatterers interferometric synthetic aperture radar

一种基于时序 InSAR 技术的高精度地表形变监测方法，其核心思想是通过识别和跟踪地表上长期稳定的永久散射体（Persistent Scatterers, PS），利用多时相 SAR 数据提取毫米级的地表形变信息。

2.0.5 短基线集干涉测量 small baselines subset interferometric synthetic aperture radar

一种针对分布式散射体（如农田、森林、自然地表）的时序 InSAR 技术，通过选择具有短空间基线和短时间基线的 SAR 图像组合，生成多组干涉对，结合时间序列分析提取地表形变信息。

2.0.6 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。

2.0.7 空间基线 normal baseline

同一地区两次观测时，雷达卫星（或雷达天线）在空间位置上的相对距离向量。

2.0.8 时间基线 temporal baseline

重复轨道获取影像像对时，两幅影像成像的时间间隔称为时间基线。

2.0.9 卫星视线向 satellite line-of-sight

卫星与地面目标之间的微波信号传输路径方向。

2.0.10 差分干涉 differential interferometry

通过计算两期或多期观测数据的相位差，提取目标区域的形变信息。

2.0.11 相位解缠 phase unwrapping

将周期性折叠的相位数据恢复为物理真实的连续相位场。

3 基本规定

3.1 监测任务

公路形变 InSAR 监测任务如下：

- a) 监测范围内缓慢形变区域的识别；
- b) 公路形变速率、形变量信息获取；
- c) 形变监测结果精度评价及质量控制；
- d) 识别和监测结果综合验证；
- e) 公路病害发育趋势和公路稳定性分析。

3.2 工作流程

利用合成孔径雷达干涉测量技术监测公路形变的工作流程包括方案设计、数据获取、数据处理、精度分析、质量控制、结果分析、成果编制与提交。

3.3 方案设计

方案设计包括资料收集、方案设计书编写两个部分。

3.3.1 资料收集

3.3.1.1 应收集监测区 SAR 数据存档信息，监测区在轨 SAR 数据参数，在轨状况和编程定制规则，监测区光学遥感图像，监测区数字地形图和 DEM。

3.3.1.2 应搜集监测区地质灾害调查和已有监测成果资料，监测区地层岩性与活动断裂，监测区及周边的地震、降水、人类工程活动情况等资料。

3.3.2 方案设计书编写

3.3.2.1 开展公路形变监测之前，应编制独立的方案设计书。

3.3.2.2 方案设计书应包括以下内容：

- a) 项目来源及目的；
- b) 监测区自然地理概况及已有工作基础；
- c) InSAR 技术适用性分析；
- d) 技术路线及工作方法；
- e) 监测数据精度要求及质量控制；

- f) 预期成果;
- g) 人员组成及工作进度安排;
- h) 经费预算。

3.4 数据选取

数据选择包括 SAR 数据选取原则、辅助数据选择原则。

3.4.1 SAR 数据选取原则

3.4.1.1 SAR 数据选取需要考虑的因素包括：监测区植被覆盖情况、地形坡度、地表变化、所需的监测精度、监测时间长度和监测模式等。

a) 升降轨模式：

- 1) 平原、城市公路形变监测，宜选取升轨 SAR 数据；
- 2) 山区公路形变监测，需选取升轨数据和降轨数据联合监测。

b) 空间分辨率：根据监测任务选取空间分辨率

- 1) 大范围公路形变普查，宜选用低分辨率 SAR 数据；
- 2) 公路整体形变监测，宜选用中分辨率（5~20m）SAR 数据；
- 3) 公路细节形变监测，宜选用高分辨率（小于 5m）SAR 数据。

c) 数据量：

1) 生成优于 10mm 监测精度成果，SAR 数据量宜不少于 8 景/a，生成非线性形变监测成果数据量宜不少于 16 景/a。

d) 波长：

1) 根据公路沿线植被覆盖情况选取。植被覆盖茂密区，宜选择 L 波段 SAR 数据。植被稀疏或裸土区，宜选择 C 波段 SAR 数据；城市建成区，宜选择 C 波段或 X 波段 SAR 数据；

2) 根据公路形变速率选取。缓慢形变监测，宜选取 L 波段或 C 波段；快速形变监测，宜选取 X 波段或 C 波段；

3) 根据公路监测范围选取。公路精细结构部位监测，宜选取 X 波段或 C 波段 SAR 数据；公路大范围监测，宜选取 C 波段或 L 波段 SAR 数据。

e) 幅宽：

- 1) 公路大范围监测，宜选取幅宽较大的 SAR 数据；
- 2) 公路局部精细化监测，宜选取较小幅宽的 SAR 数据。

f) 重复周期：

- 1) 监测目标快速形变，宜选择短周期；

2) 稳定区域的长期形变趋势监测, 宜选择长周期。

g) 成像模式:

1) 极化方式: 首选同极化 SAR 数据, 次选交叉极化 SAR 数据。

3.4.1.2 结合待监测公路路段情况确定 SAR 数据。根据公路等级、路面材质、路段长度、车道宽度及数量都是决定 SAR 数据源选取的重要因素, 一般情况下建议一条公路车道宽度能覆盖至少两个 SAR 影像的像元 (以 SAR 影像空间分辨率计) 为宜。

3.4.2 辅助数据选取原则

辅助数据的种类一般包含 DEM 数据、卫星精密轨道数据、气象数据、成果底图数据等。

3.4.2.1 DEM 数据选取:

a) 宜选择分辨率优于 SAR 影像分辨率的 DEM 数据, 在不能获取高分辨率 DEM 的地区可使用 SRTM DEM 等中低分辨率数据;

b) DEM 数据在空间上应保持一致, 无跳变和空洞, 如发生质量问题, 当面积不超过 20% 时宜用其他数据补充, 当面积超过 20% 时宜更换数据;

c) 选用的 DEM 比例尺应不低于 InSAR 监测成果比例尺;

d) DEM 数据的现势性应与 SAR 数据时相接近。

3.4.2.2 卫星精密轨道数据:

a) 严格按照 SAR 数据的日期选择卫星精密轨道数据, 应与 SAR 数据的日期保持一致。

3.4.2.3 气象数据:

a) 校正大气延迟误差。

3.4.2.4 成果底图数据可选用 SAR 强度数据、光学遥感影像、地形图、DEM 晕渲图等数据的一种或几种, 应满足:

a) 首选 SAR 强度影像作为中等比例尺成果底图;

b) 以光学遥感影像为成果底图时, 若比例尺大于 1:10 万, 宜选用高分辨率的光学遥感影像作为底图;

c) 光学影像数据宜选用云层覆盖量小于 20%、数据缺失不超过 5%, 且辐射校正后的数据。

3.5 数据处理

3.5.1 应充分利用 SAR 数据源，综合运用 DInSAR、SBAS-InSAR、PS-InSAR、GB-InSAR 方法进行公路形变监测。

3.5.2 合成孔径雷达干涉测量技术适用的精度条件如下：

- a) 强度图像可视化 SAR 数据处理用于目视分析地质背景、预估相干性；
- b) SBAS-InSAR 数据监测较大形变，可监测形变速率一般为 $1\text{cm/a} \sim 1\text{dm/a}$ ；
- c) PS-InSAR 监测长期微小线性形变和非线性形变，可监测形变速率一般为 $1\text{mm/a} \sim 1\text{dm/a}$ 。

3.5.3 数据处理过程中应符合下列规定：

- a) 有精密轨道的卫星数据宜优先使用精密轨道；
- b) D-InSAR 应进行轨道趋势误差去除；
- c) 具有与卫星同步拍摄的大气数据，宜试算去除大气延迟误差；
- d) 相邻两轨 InSAR 观测应在重叠区选择同一参考基点，在重叠区内二者形变量相关系数宜大于 0.95；
- e) InSAR 数据处理结果应进行地理编码，以便于结果质量评价和地质分析。

3.6 精度分析

3.6.1 内符合分析

3.6.1.1 数据处理结果精度的内符合评估宜采取以下方式：

- a) 形变量或形变速率直方图；
- b) 空间分布状态；
- c) 空间离群值查找；
- d) 半变异函数/协方差分析；
- e) 形变年速率中误差的大小；
- f) 将不同 SAR 数据、不同处理方法的结果投影到同一方向进行交叉验证。

3.6.2 外符合分析

3.6.2.1 通过高精度 GNSS、精密水准数据的对比可验证 InSAR 结果。

3.6.2.2 精度验证数据宜与 InSAR 监测成果在时空上一致，且在空间上分布均匀。

3.7 质量控制

3.7.1 质量过程控制

3.7.1.1 质量控制应贯穿公路形变 InSAR 监测工作全过程，包括下列内容：

- a) 公路形变 InSAR 监测方案设计审查；
- b) 数据处理过程文件汇交备查；
- c) 数据处理结果精度评估；
- d) 数据分析结果野外抽查；
- e) 公路形变 InSAR 监测成果评审。

3.7.2 数据处理质量控制

3.7.2.1 在 InSAR 数据处理过程中应保存重要过程参数和过程文件，以便进行后续质量控制。

3.7.2.2 应建立质量控制文件，记录软件模块，版本及相应处理过程的命令参数或脚本程序源代码。文件的命名包括工作区、数据类型，数据量、处理方法、处理时间（年月日）和处理者等主要信息。

3.7.2.3 质量控制文件应保存 SAR 数据参数、干涉像对的匹配及其时空基线、单视复数图像纠正多项式参数和标准差、DEM 转到 SAR 坐标系统下的纠正多项式参数和标准差、轨道误差、大气误差、高程误差等重要参数指标。

3.7.2.4 存储重要步骤的图形文件，应包括通用文件、D-InSAR 处理过程图件、PS-Isar 处理过程图件、SBAS-InSAR 处理过程图件和 GB-InSAR 处理过程图件等。

3.8 结果分析

3.8.1 公路形变监测结果应与地质调查、测绘和勘查成果对比分析，进行可靠性验证。

3.8.2 根据形变位置、规模、影响因素及形变区的地质、水文条件分析形变的发展趋势和危害程度。

3.8.3 分析的要素宜包括区域地质灾害的发育分布、活动构造、地层岩性，地形坡度和坡向、浅表层地下水分布和开采情况、工程活动等。

3.8.4 分析方法宜采用彩色渲染、动态显示、空间分析、剖面线分析，等值线分析，形变面积统计等技术。

3.8.5 监测结果分析过程中应注意：InSAR 位移速率主要反映垂直形变及部分近东西向形变，

对南北向形变不敏感。

3.9 成果编制与提交

3.9.1 InSAR 监测工作结束后，应编制专门的成果报告和图件并及时提交。

3.9.2 InSAR 监测成果应包括数据、图件、报告等。

4 边坡监测

4.1 监测内容

4.1.1 监测对象的形变特征

- a) 边坡形变类型包括崩塌型、滑坡型、蠕变型、泥石流型；
- b) 边坡形变发育期分为缓慢蠕变期（形变速率 $<1\text{mm/d}$ ）、累进破坏期（形变速率 $<1\text{--}10\text{mm/d}$ ）、临滑失稳期（形变速率 $>10\text{mm/d}$ ）；
- c) 边坡形变可引发公路路基沉降、路面形变等。

4.1.2 监测内容

- a) 边坡形变区位置、范围、时间节点；
- b) 边坡形变区形变速率、形变量、位移方向、形变发展过程、形变发展趋势、发育阶段及状态。

4.2 监测方案

4.2.1 数据要求

4.2.1.1 SAR 数据要求

- a) 首选面向边坡、大入射角（入射角大于 35° ）的高分辨率 SAR 数据，其中面向边坡、高分辨率、大入射角依次为重要条件；
- b) SAR 数据首选聚束成像模式中高分辨率数据，次选条带模式，不宜采用扫描模式；
- c) 数据波段长短依据边坡表层植被覆盖和形变量而定，首选高频中短波长 SAR 数据；
- d) 数据空间分辨率应优于 5m 。

4.2.1.2 辅助数据要求

- a) 优于 SAR 空间分辨率的 DEM 数据；

- b) 采用 SAR 卫星精密轨道数据;
- c) 气象数据校正大气延迟误差;
- d) 应获取或估计前期的边坡形变数据, 作为监测参考;
- e) 宜获取调查区域地面控制点坐标信息。

4.2.2 方法选择及适用性

- a) 宜采用 PS-InSAR、SBAS-InSAR 或改进型方法;
- b) 植被覆盖区宜采用 SBAS-InSAR 方法;
- c) 处于临滑失稳期的边坡宜采用 GB-InSAR 方法;
- d) 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) 进行。

4.3 方法要求

4.3.1 PS-InSAR 监测边坡

- a) 对 SLC 数据进行 2 倍过采样处理;
- b) 植被覆盖区 PS 点宜根据相干性来选取, 值为 0.6;
- c) 视向形变年速率大于 5mm/年可作为识别边坡形变的预判据;
- d) 对疑似变坡形变区域进行误差排除分析。

4.3.2 SBAS-InSAR 监测边坡

- a) 视向形变年速率绝对值大于 10mm/年可作为识别边坡形变的预判据;
- b) 对疑似变坡形变区域进行误差排除分析。

4.4 数据处理结果验证

- a) 可采用形变年速率中误差进行监测精度评定;
- b) 将同一区域、同一时间段不同 SAR 数据结果投影到位移方向进行交叉检验;
- c) 采用 GPS、水准等地面监测结果进行检验, 将 GPS 三维形变投影到 SAR 视向进行比较;
- d) 应进行野外实地调查检验。

4.5 监测结果综合分析

- a) 进行边坡时间形变特征分析, 根据边坡形变速率, 判断边坡形变发育阶段; 根据累

计形变量、形变方向，判断边坡形变趋势，及时预警；

b) 根据边坡的地形坡度和坡向、浅表层地下水分布和开采情况、工程活动等因素，分析形变原因。

5 路基监测

5.1 监测内容

5.1.1 监测对象形变特征

- a) 路基形变主要包括沉降形变、胀缩形变、滑移形变、冻融形变、冲刷与塌陷；
- b) 路基形变可直接影响公路安全。

5.1.2 监测内容

- a) 路基形变位移方向、形变量与形变速率；
- b) 路基的形变范围、形变模式、形变速率及稳定状态。

5.2 监测方案

5.2.1 数据要求

5.2.1.1 SAR 数据要求

- a) SAR 数据首选聚束成像模式中高分辨率数据，次选条带模式，不宜采用扫描模式；
- b) 数据波长依据路基周围植被覆盖和形变量而定，首选高频中短波长 SAR 数据；
- c) 时间基线小于 60 天，避免因地表覆盖变化（如植被生长、降水）导致相位失相干；
- d) 数据空间分辨率应优于 5m。

5.2.1.2 辅助数据要求

- a) 宜选用高精度 DEM 修正地形相位误差，尤其在山区公路的叠掩区域；
- b) 采用 SAR 卫星精密轨道数据；
- c) 气象数据校正大气延迟误差；
- d) 应获取或估计前期的边坡形变数据，作为监测参考；
- e) 应获取公路施工日志，排除因养护工程（如铣刨重铺、注浆加固），导致的非结构性形变。

5.2.2 方法选择及适应性

- a) 路基快速形变监测宜采用 D-InSAR;
- b) 路基缓慢形变监测宜采用 PS-InSAR、SBAS-InSAR;
- c) 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) 进行。

5.3 方法要求

5.3.1 D-InSAR 监测路基

- a) 影像日期分别选择形变发生前后, 形变前日期为主影像, 形变后日期为辅影像;
- b) 空间基线宜小于 500 米, 山区公路空间基线宜小于 200 米。

5.3.2 PS-InSAR 监测路基

- a) 形变速率: 常规路段 ≥ 3 mm/月, 软土路段 ≥ 5 mm/月可作为识别路基形变的预判据;
- b) 累计形变阈值: 设计使用年限内 ≤ 30 cm (特殊地质路段可放宽至 50 cm) 可作为识别路基形变的预判据;
- c) 对疑似路基形变区域进行误差排除分析。

5.3.3 SBAS-InSAR 监测路基

- a) 剔除基线过长或相干性过低 (如相干系数 < 0.3) 的干涉对;
- b) 对疑似路基形变区域进行误差排除分析。

5.4 数据处理结果验证

- a) 将不同 SAR 数据、不同处理方法的结果投影到重直方向进行交叉检验;
- b) 以形变监测结果为依据进行实地调查, 验证可靠性;

5.5 监测结果综合分析

- a) 根据路基形变速率、方向, 判断路基形变类型、形变趋势、所处状态;
- b) 根据路基形变范围、形变速率、趋势, 分析路基形变可能对公路稳定性造成的影响;
- c) 以路基形变时序监测结果结合路基的气象水文、岩土结构, 分析路基形变原因。

6 桥梁监测

6.1 监测内容

6.1.1 监测对象形变特征

a) 桥梁的形变类型包括垂直形变（沉降或隆起）、水平形变（位移）、局部形变（弯曲、裂缝）、周期性形变（温度引起的热胀冷缩）。

6.1.2 监测内容

- a) 桥梁整体的形变方向、形变速率、累计形变量、发展状态、形变趋势；
- b) 桥面局部形变、弯曲、开裂。

6.2 监测方案

6.2.1 数据要求

6.2.1.1 SAR 数据要求

- a) 宜选取时间基线较短的 SAR 影像；
- b) 结合桥梁形变方向选择 SAR 影像，小入射角 SAR 影像对垂直形变敏感，大入射角对水平形变敏感；
- c) 桥梁墩台与梁体连接处、伸缩缝等部位形变梯度大，需融合机载 LiDAR 数据提升局部细节精度。

6.2.1.2 辅助数据要求

- a) 宜选取高精度 DEM 数据去除地形相位，对跨山谷或河流的桥梁需重点处理；
- b) 采用 SAR 卫星精密轨道数据；
- c) 气象数据校正大气延迟误差；
- d) 应获取或估计前期的桥梁形变数据，作为监测参考。

6.2.2 方法选择及适应性

- a) 桥梁整体形变宜采用 PS-InSAR、SBAS-InSAR；
- b) 桥面微小形变捕捉宜选用 GB-InSAR；
- c) 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）进行。

6.3 方法要求

6.3.1 PS-InSAR 监测桥梁

- a) 优先选择强散射、高相干性的永久散射体做 PS 点；
- b) 桥梁表面涂装更新、附属设施改造可能导致 PS 点散射特性改变，需定期重新选取 PS 点；
- c) 剔除低相干点（如植被覆盖区域、水面等），确保 PS 点在时间序列中保持稳定散射特性；
- d) 山区桥梁需注意阴影和叠掩效应；
- e) 跨度 <100 米的中小型桥梁，需确保 PS 点空间密度 ≥ 1 点/10 米，以捕捉局部形变特征。

6.3.2 SBAS-InSAR 监测桥梁

- a) 时间基线 ≤ 180 天，空间基线 ≤ 200 米，确保每景影像参与 ≥ 5 个干涉对，提升相位解缠可靠性；
- b) 剔除时间相干性 < 0.4 的低相干区域（如植被覆盖的桥墩周边），聚焦桥梁主体结构（混凝土、钢结构等强相干目标）；
- c) 跨度 > 500 米的桥梁，需通过多轨道数据（升轨+降轨）或高分辨率模式（如 Sentinel-1 的 TOPSAR-SL mode）提升点位密度（ ≥ 1 点/20 米）；
- d) 重点监测区域：桥墩底部与顶部（监测垂直沉降与水平位移）；主梁跨中、支点及伸缩缝两侧（监测挠曲变形与差异沉降）；斜拉桥拉索锚固端、悬索桥主缆连接点（监测局部应力集中引起的微小形变）。

6.3.3 GB-InSAR 监测桥梁

- a) 根据桥梁的规模、监测精度要求等选择合适的 GB-InSAR 系统；
- b) GB-InSAR 系统安置在桥梁附近的稳定地面上，避免安置在可能产生自身变形的区域；
- c) 根据桥梁的运营状况和变形特征确定监测频率。

6.4 数据处理结果验证

- a) 布设水准测量点、GNSS 监测站或静力水准仪，定期与 InSAR 结果交叉验证；
- b) 采用时序统计方法（如均方根误差 RMSE、一致性系数）评估 InSAR 结果的可靠性。

6.5 监测结果综合分析

- a) 根据时序形变速率判断形变类型（基础性均匀形变、周期性形变、异常形变等）；
- b) 根据形变趋势、形变部位结合现场踏勘资料，分析形变原因。

7 隧道洞口监测

7.1 监测内容

7.1.1 监测对象形变特征

- a) 隧道洞口形变主要包括包括垂直方向形变、水平方向形变及收敛形变等三种类型；
- b) 隧道洞口形变具有集中性，主要发生在洞口周边 50~100 米范围内，衬砌与土体衔接部位尤甚；
- c) 隧道洞口形变受地形影响，地形对称区多为均匀形变，偏压地形靠山侧形变更显著；
- d) 隧道洞口形变与地质构造具有相关性，如断层穿过洞口时，形变可能沿断层面呈条带状分布；节理发育岩体中，形变易沿裂隙面扩展，形成局部塌落。

7.1.2 监测内容

- a) 隧道洞口的地表形变；
- b) 隧道洞口边坡稳定性；
- c) 隧道洞口衬砌结构位移。

7.2 监测方案

7.2.1 数据要求

7.2.1.1 SAR 数据要求

- a) 宜选择高频短波数据；
- b) 宜根据形变速率确定监测频率，快速形变场景选择实时或分钟级采集；缓慢形变可降至小时级或日级；
- c) 单次扫描需完整覆盖监测区域，必要时通过多方位角扫描扩展监测范围；
- d) 垂直面内形变选择小入射角（接近水平），水平面内选择中等入射角（ $20^{\circ} \sim 45^{\circ}$ ）。

7.2.1.2 辅助数据要求

- a) 气象数据校正大气延迟误差；

- b) 水文气象数据，分析降雨等气象因素与雷达监测结果的相关性；
- c) GNSS/水准测量数据，用以修正雷达监测的相对位移误差；
- d) 施工记录，分析施工行为对雷达形变监测结果的扰动。

7.2.2 方法选择及适应性

- a) 隧道洞口形变监测宜选取 GB-InSAR。

7.3 方法要求

- a) 宜在地质条件稳定的基点上进行 GB-InSAR 监测，并根据监测需求设置监测模式；
- b) 拱顶累计沉降 $>20\text{mm}$ 或单日沉降速率 $>3\text{mm}/\text{天}$ ；边墙水平收敛 $>15\text{mm}$ 或速率 $>2\text{mm}/\text{天}$ 可作为隧道洞口形变的判断依据。

7.4 数据处理结果验证

- a) 布设水准测量点、GNSS 监测站或静力水准仪，定期与 GB-InSAR 结果交叉验证。

7.5 监测结果综合分析

- a) 根据 GB-InSAR 监测结果结合岩土特性、水文气象数据，分析隧道洞口地表、边坡、衬砌结构的形变原因。

8 数据处理

数据处理包括不同场景条件下 SAR 数据选取建议、InSAR 数据处理方法的选取建议、InSAR 技术数据处理方法 DInSAR、SBAS-InSAR、DS-InSAR、PS-InSAR、GB-InSAR 方法工作流程的介绍。

8.1 数据处理方法的选择

根据监测目标特性、数据源质量及硬件资源等多方面因素，选择合适的数据处理方法。

- a) 时间尺度。短期突发形变监测，宜选取 DInSAR；长期形变趋势分析，宜选取时序 InSAR （SBAS-InSAR、PS-InSAR）；
- b) 地表特性与数据条件。高相干区域，宜选取 PS-InSAR、SBAS-InSAR；低相干区域，宜选取 SBAS-InSAR；
- c) 监测精度要求较低、SAR 数据量。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；监测精度要求较高、数据量较大，宜选择 PS-InSAR、SBAS-InSAR

方法：

d) 临滑阶段的形变监测及局部微小形变，宜选择 GB-InSAR 方法。

8.2 DInSAR

8.2.1 基本流程

D-InSAR 数据处理流程见图 8.2.1-1 所示。

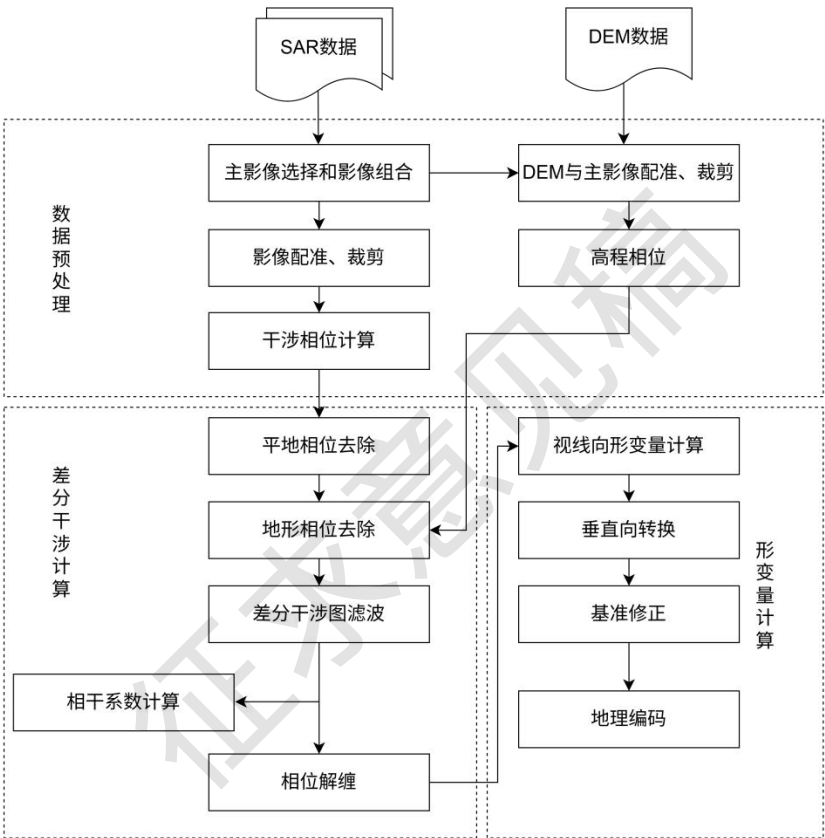


图 8.2.1-1 D-InSAR 数据处理流程

8.2.2 数据预处理

8.2.2.1 主影像选择和组合

- a) 以时间靠前的影像作为主影像，在允许范围内选择空间基线较小的像对；
- b) 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。

8.2.2.2 影像配准和裁剪

a) 主、辅影像配准时要求方位向和距离向误差均小于 0.25 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；

b) 所有配准影像裁剪后的公共区域应大于或等于监测区工作范围；

c) 将所有影像裁剪至大于或等于监测区工作范围。

8.2.2.3 DEM 与主影像配准和裁剪

将 DEM 配准至主影像，并按照主影像范围裁剪。

a) 将 DEM 采样至主影像分辨率；

b) 将 DEM 配准至主影像，配准精度应优于 0.5 个像元；

c) 将 DEM 转换至 SAR 影像坐标系，生成影像坐标系下的 DEM。

8.2.2.4 干涉相位计算

对已配准的主辅影像进行前置滤波，并生成干涉图。

a) 在频率域中截取主、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) 对前置滤波后的主辅影像像元对进行共轭相乘，计算干涉相位值，并逐像元计算生成干涉图。

8.2.2.5 相干系数计算

依据相干系数计算公式，对经过滤波的主、辅影像差分干涉像元，选择窗口大小，逐像元计算相干系数，生成相干图。

8.2.3 差分干涉计算

8.2.3.1 平地 and 地形相位去除

a) 依据空间基线参数和地球椭球体参数，计算平地相位；

b) 利用配准后 DEM，计算地形相位；

c) 从干涉相位中去除平地相位和地形相位，生成差分干涉相位，逐像元计算，并生成差分干涉图。

8.2.3.2 差分干涉图滤波

a) 对差分干涉图进行相位滤波，得到滤波后的差分干涉图。

8.2.3.3 相干系数计算

a) 对滤波后的差分干涉图，逐像元计算相干系数，生成相干图。

8.2.3.4 相位解缠

对差分干涉图进行相位解缠，规定如下：

- 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。

8.2.4 形变量计算

8.2.4.1 视线向形变量计算

依据雷达波长，将解缠相位换算为 LOS 形变量 Δr 。

8.2.4.2 视线向形变量转换

- a) 垂直向转换

通过雷达入射角，计算垂直向形变量 d_1 ：

$$d_1 = \frac{\Delta r}{\cos \theta} \quad (1)$$

式中， θ 为雷达波入射角。

- b) 水平向转换

通过雷达入射角，计算水平向形变量 d_2 ：

$$d_2 = \frac{\Delta r}{\sin \theta} \quad (2)$$

式中， θ 为雷达波入射角。

8.2.4.3 地理编码

- a) 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；
- b) 将形变量的时间单位换算成年，生成年度形变速率，逐像元计算生成形变速率图。

8.3 SBAS-InSAR

8.3.1 基本流程

SBAS-InSAR 数据处理流程见图 8.3.1-1 所示。

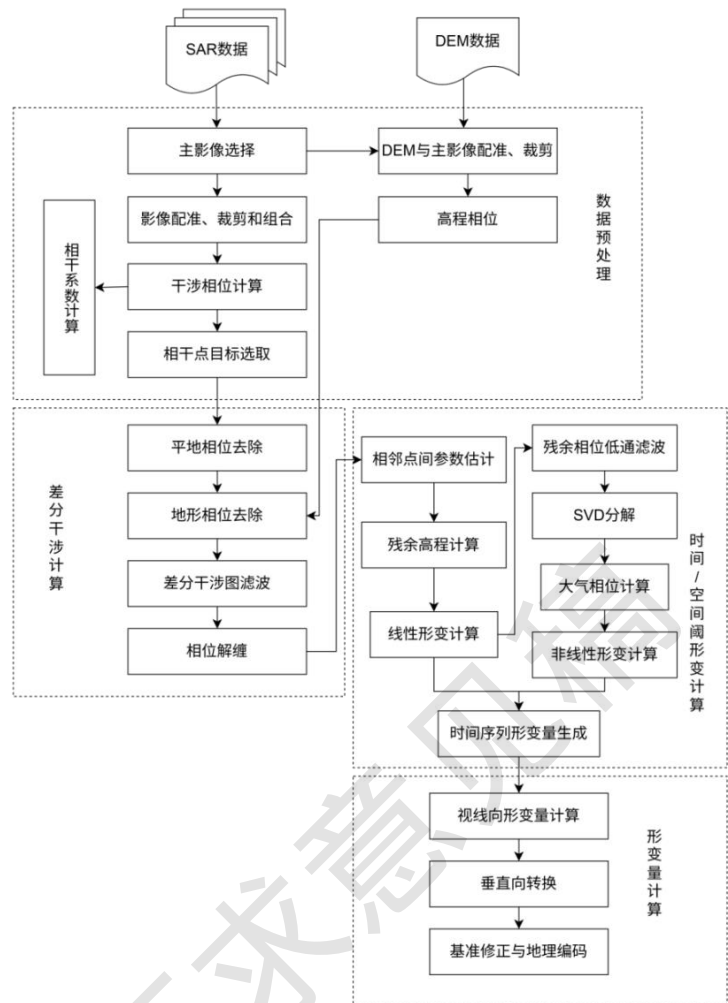


图 8.3.1-1 SBAS-InSAR 数据处理流程

8.3.2 数据预处理

8.3.2.1 主影像选择，SBAS-InSAR 宜选取多个主影像，其步骤如下：

- 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；
- 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。在满足空间基线和时间基线要求的前提下，C 和 X 波段空间基线值宜定为 300m，L 波段空间基线值宜定为 500m；时间基线根据监测对象的变化特征而定，时间基线越短越好，最大时间值不超过 3 年。

8.3.2.2 影像配准、裁剪和组合

- 选择非夏季、时空基线尽量居中的影像作为配准参考影像，所有影像对其进行配准。配准方法应符合 8.2.2.2 的规定；

b) 将所有数据裁剪成一致的区域，剪裁要求见 8.2.2.2;

c) 在所有配准好的干涉像对中，按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。

8.3.2.3 DEM 与主影像配准和裁剪

将 DEM 配准至主影像，并按照主影像范围裁剪。裁剪要求见 8.2.2.3。

8.3.2.4 将所有主、辅影像前置滤波，计算干涉相位，生成干涉图，应符合 8.2.2.4 要求。

8.3.2.5 相干系数计算

依据相干系数计算公式，对经过滤波的主，辅影像差分干涉像元，选择窗口大小，逐像元计算相干系数，生成相干图。

8.3.2.6 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，具体步骤应符合下列规定：

a) 相干点目标选取。SAR 数据相干点目标的识别宜采用幅度离差指数法、信比法等方法结合监测区地物类型，宜选择一种或多种方法，以提高相干点目标识别的准确性；

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。

8.3.3 差分干涉计算

8.3.3.1 平地 and 地形相位去除的具体步骤应符合 8.2.3.1 的规定。

8.3.3.2 差分干涉图滤波的具体步骤应符合 8.2.3.2 的规定。

8.3.3.3 相位解缠的具体步骤应符合 8.2.3.4 的规定。

8.3.4 时间/空间域形变估算

对于干涉图的差分干涉相位应进行时间域的线性形变相位估计，如有特殊要求，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。计算步骤应符合下列规定：

a) 相邻点间参数估计。将 PS 点目标相连接构成 Delaunay 不规则三角网，依据点间连接关系求解相邻点差分相位差；

b) 线性形变相位和残余高程计算。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 DEM 误差值。若监测工作设计书仅要求线性形变成果，则可直接输出成果进行垂直向形变量计算，

生成地面沉降速率图；

c) 残余相位低通滤波。从差分干涉相位中减去步骤 a) 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。根据短基线像对组合关系，对步骤 b) 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。将步骤 b) 中线性形变相位和步骤 e) 中非线性形变相位相加，结合时间基线参数，得到每个相干点目标的时间序列形变相位。

8.3.5 形变量计算

计算步骤见 8.2.4。

8.4 PS-InSAR

8.4.1 基本流程

PS-InSAR 数据处理流程见图 8.4.1-1 所示。

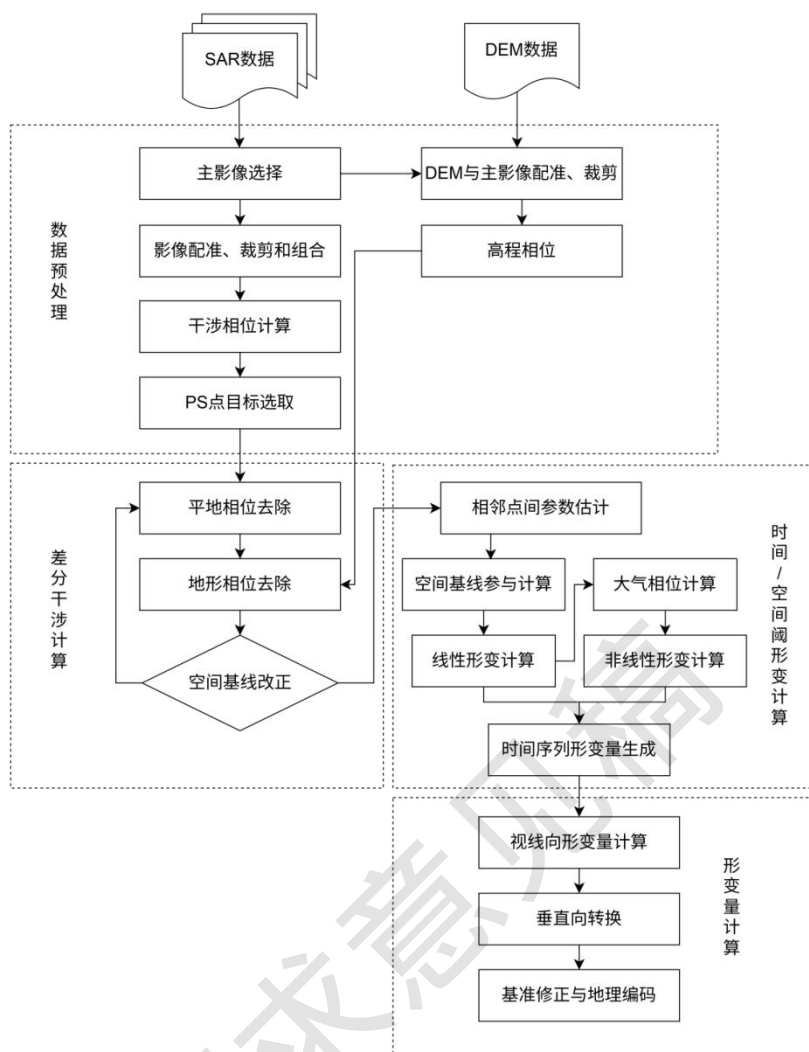


图 8.4.1-1 PS-InSAR 数据处理流程

8.4.2 数据预处理

8.4.2.1 主影像选择，PS-InSAR 宜选取一幅主影像

- 逐一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；
- 选择时间和空间基线居中的一景作为主影像。

8.4.2.2 影像配准、裁剪和组合

- 影像配准、裁剪方法应符合 8.2.2.2 的规定；
- 组合：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。

8.4.2.3 DEM 与主影像配准和裁剪

将 DEM 配准至主影像，并按照主影像范围裁剪。裁剪要求见 8.2.2.3。

8.4.2.4 干涉相位计算

对已配准的主辅影像进行前置滤波，并生成干涉图，应符合 8.2.2.4 要求。

8.4.2.5 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。

a) PS 点目标识别。SAR 数据 PS 点目标的识别宜采用幅度离差指数法，信比法等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 点目标识别的准确性；

b) 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。

8.4.3 差分干涉计算

8.4.3.1 平地 and 地形相位去除的具体步骤应符合 8.2.3.1 的规定。

a) 依据空间基线参数和地球椭球体参数，计算平地相位；

b) 利用配准后 DEM，计算地形相位；

c) 从干涉相位中去除平地相位和地形相位，生成差分干涉相位，逐像元计算，并生成差分干涉图。

8.4.3.2 空间基线改正

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。

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) 利用快速傅立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，得到改正的空间基线相位；

d) 利用改正的空间基线相位，对 8.4.3.1 中的平地相位去除残余平地相位，计算得到改正后的平地相位和干涉图集。

8.4.4 时间/空间形变计算

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 的计算步骤应符合下列规定：

- a) 相邻点间参数估计见 8.3.4 a) ；
- b) 线性形变相位和残余高程相位计算见 8.3.4 b) ；
- c) 非线性形变相位和大气相位计算见 8.3.4 e) ；
- d) 时间序列形变相位计算见 8.3.4 f) 。

8.4.5 形变量计算

将 PS 点目标的形变相位转换成为 LOS 形变量，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 8.2.4。

8.5 GB-InSAR

8.5.1 基本流程

GB-InSAR 数据处理流程见图 8.5.1-1 所示。

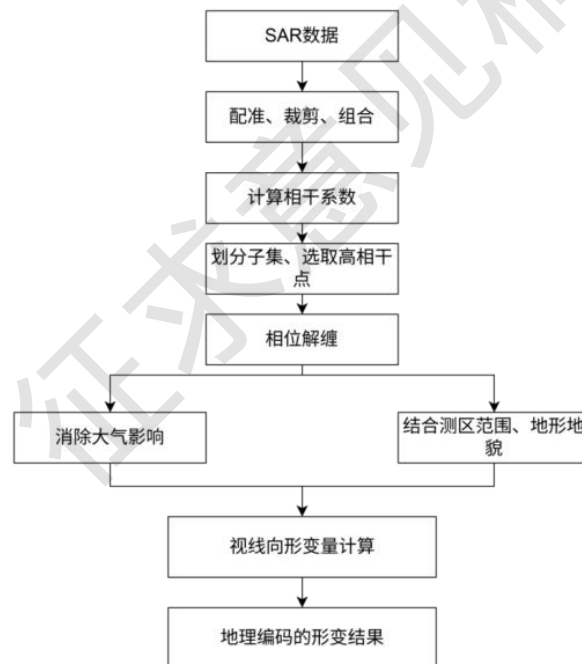


图 8.5.1-1 GB-InSAR 数据处理流程

8.5.2 数据预处理

8.5.2.1 所有像对对主影像配准、裁剪、组合

a) 配准：主、辅影像配准时要求方位向和距离向误差均小于 0.25 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；所有配准影像裁剪后的公共区域应大于或等于监

测区工作范围；

- b) 裁剪：将所有影像裁剪至大于或等于监测区工作范围。

8.5.2.2 划分子集

- a) 以第一景 SAR 影像为主影像，依次计算主影像与其他影像的相干系数；
- b) 设置相干系数阈值，划分子集；
- c) 以前一子集最后一景为主影像，按时序计算主影像与其余 SAR 影像的相干系数；
- d) 转到 b) 步骤，重复进行，直至划分完所有影像。

8.5.3 干涉相位计算

对已配准的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。

- a) 对各子集，在频率域中截取主、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) 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。

8.5.4 相干点目标选取

对经过滤波的各 SAR 影像子集，以子集第一景数据为主影像，剩余数据依次为辅影像，选定窗口，逐像元计算相干系数，生成时间序列相干图。设置相干系数阈值，选取各子集内相干点。取各子集相干点交集，获取最终相干点目标。

8.5.5 相位解缠

计算方法同 8.2.3.4。

8.5.6 消除大气扰动影响

8.5.6.1 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。

8.5.6.2 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 $\phi_{atm} = ar + b$ ，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。

8.5.6.3 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，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 $\phi_{atm} = ar^2 + br + c$ ，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；

c) 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。

8.5.7 形变量计算

依据雷达波长，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。

9 精度评价

通过三维 GPS 位移结果与 SAR 视线向监测结果比较，进行评估：

$$\Delta = d_{InSAR} - d_{GPS} \quad (3)$$

式中： d_{InSAR} 为视线向形变量， d_{GPS} 为投影到视线向的形变量， Δ 为 d_{InSAR} 与 d_{GPS} 二者差值。

$$d_{GPS} = -\sin \theta \cdot \sin \left(a_h - \frac{3\pi}{2} \right) \cdot dx + \sin \theta \cdot \cos \left(a_h - \frac{3\pi}{2} \right) \cdot dy + \cos \theta \cdot dz \quad (4)$$

式中： a_h 为 SAR 数据投影到地面的水平角度； θ 为雷达波入射角； x, y, z 分别为南北、东西和垂直方向的形变量。

通过水准测量结果与 SAR 垂直方向结果比较，进行评估：

$$\Delta = d_{InSAR} - d_{Level} \quad (5)$$

$$d_{Level} = V_{Level} \cdot \cos \theta \quad (6)$$

$$\sigma = \sqrt{\frac{\Delta^2}{n}} \quad (7)$$

式中， V_{Level} 为水准形变量， σ 为形变中误差， n 为外部测量点数，应满足样本统计需要。

10 成果管理

包括数据图件成果、成果报告和成果提交三个部分。

- a) 监测成果应采用统一的坐标基准和时间基准;
- b) 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;
- c) 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。

10.1 数据图件成果

10.1.1 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。

10.1.2 图表应清晰美观, 整饰要素完整。

10.1.3 数据图件成果包括:

- 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 成果报告

10.2.1 成果报告应该包含:

- a) 项目概况;
- b) 监测依据;
- c) 监测方法与工作流程;
- d) 数据处理流程;
- e) 监测结果及分析;
- f) 监测结论及建议。

10.3 成果提交

成果提交的内容应包含数据图件成果和成果报告。

附 录 A（资料性附录）目前可使用的 SAR 数据信息表

表 A.0.1 目前可使用的 SAR 数据信息表

星载 SAR 系统	ERS-1/2	JERS-1	RADARSAT-1	ENVISAT-ASAR	ALOS-PALSAR	RADARSAT-2	TerraSAR-X/TanDEM-X 星座 (2)	COSMO-SkyMed 星座 (4)	Sentinel 1A/1B 星座 (2)	ALOS-2 (PALSAR-2)
所属国家/机构	欧空局	日本	加拿大	欧空局	日本	加拿大	德国	意大利	欧空局	日本
运行时间 (开始年份—终止年份)	1:1991-2000 2:1995-2012	1992-1998	1995-2013	2002-2012	2006-2011	2007—	2007—	2007—	2014.4—	2014.5—
轨道高度 (km)	790	568	780	800	691	798	514	619	693	626
波长 (cm)	C (5.5)	L (23.5)	C (5.6)	C (5.6)	L (23.6)	C (5.6)	X (3.1)	X (3.1)	C (5.6)	L (23.6~25.0)
极化方式	VV	HH	HH	HH/VV	全极化	单极化/ 双极化/ 全极化	全极化	HH, VV, HV, VH, HH /VV, HH /HV. VV/VH	HH+HV, VV+VH	全极化
侧视角 (°)	23	35	23~65	15~45	8~50.8	23~65	20~55	16.36~52.06	20.0~45.0	8.0~70.0
轨道倾角 (°)	98.49	98.16	98.6	98.55	98.16	98.6	97.44	97.86	98.18	97.9
最短观测 时间间隔 (d)	35	44	24	35	46	24	11 (单星) 5.5 (双星)	单星重返 周期 16 天, 其中 2 号星和 3 号星为 1	12 (单星) 6 (双星)	14

								天间隔的 tan- dem 模式，每 17 天 4 颗 星以 8 天、 1 天、3 天 和 4 天的 间隔获取 干涉数据		
地面分辨率（m）	25	25	8~30	25~100	7~100	聚焦模式 1 超级条 带模式 3 条带模式 5 其他模 式>5	凝视模式 0.25 聚束模式 1 条带模式 3 扫描模式 18.5 宽扫描模 式 40	聚束模式 1 条带模式 3、15 扫描模式 30 宽扫描模 式 100	聚束模式 5 条带模式 5×20 扫描模式 20 宽扫描模 式 20	聚束模式 1 ×3 条模 式 3、6、10 扫描模式 100
是否提供 原始 raw 数据	是	否	是	是	是	否	否	否	否	否
测量交形 精度	厘米级	厘米级	毫米级	毫米级	毫米级	毫米级	毫米级	毫米级	毫米级	毫米级
存档数果 情况	全球覆道 20 次以上	全球覆 盖 5 次 以上	部分地区 覆盖	全球覆盖 25 次以 上	全球覆盖 15 次以 上	有中国东 部 2007--20 13 年 间 多期存档 数据	大部分地 区需要编 程观测	大部分地 区需要编 程观测	有全球观 测计划， 不少于 48 天 ScanSAR 同轨观测 一次、目 前有 30 次以上存 档数据	有全球观 测计 划
影像幅宽 （km）	100	80	50~500	100~400	30~350	聚焦模式 18	凝视模式 10	聚束模式 7~10	聚束模式 20	聚束模式 25

						超级条带模式 20 条带模式 50 其他模式 50~ 500	聚束模式 20 条带模式 30 扫描模式 150 宽扫描模式 270	条带模式 30~40 扫描模式 100~200	条带模式 80 扫描模式 250 加宽扫描模式 400	条带模式 50~50 扫描模式 350~490
可否编程定制	否	否	否	否	否	是	是	是	需协商	是
主要优点	具有较早的存档数据	具有较早的一批存档数据	为 2007 年前唯一的高分辨率，中短波数据。	存档数据多、价格低、覆盖历史时段长	覆盖范围广、存档数据丰富、波长长，适合高山峡谷区地质灾害监测	数据质量较好，高分辨率单景数据覆盖范围大，有计划全球拍摄	轨道精度高、数据质量好、重返周期短	存档数据丰富、数据质量好、重返周期最短	覆盖范围广、重返周期短、存档数据丰富	覆盖范围较大，重返周期适中，波长长，对植物茂密区观测有利
主要缺点	稳定性较差，处理技术难度大	分辨率低，轨道精度低，干涉质量较差	与其他中分辨率 SAR 数相比轨道精度较低	在高山峡谷区干涉效果差	空间基线较长，且有系统变化	编程数据价格高	存档数据较少	空间基线较长	主要是低分辨率模式，一般不接受编程预订，方位向配准难度较大	价格相对较高

附录 B（资料性附录）InSAR 技术方法及适用地质灾害类型和条件

表 B.0.1 InSAR 技术方法及适用地质灾害类型和条件

监测方法	应用环境	适应灾害类型	SAR 数据 频率（景/a）	SAR 数据 数量	最高监测 速率精度	监测幅度 （年累计 形变量）
D-InSAR	适用于 SAR 数据时间间隔短和天气/季节接近的环境，以避免受到过多的时间去相干和大气的干扰。高相干、中短空间基线。	滑坡、泥石流、 地面沉降、地面 塌陷	无限制	2	cm	cm~dm.
PS-InSAR	适用于 SAR 数据时间间隔长、监测区天气条件差异大的环境。可以获取 PS 点的形变时间序列、DEM 改正值和所有 SAR 影像的大气延迟量。点相干、短空间基线。	滑坡、崩塌、泥 石流、地面沉 降、地裂缝、地 面塌陷	≥ 4	≥ 20	mm	mm~dm
SBAS-InSAR	短时间基线高相干，长时间基线低相干。通过较多的 SAR 干涉组合，获取灾害形变时间序列信息。	滑坡、泥石流、 地面沉降、地裂 缝、地面塌陷	≥ 4	≥ 8	cm	mm~dm
GB-InSAR	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。	滑坡、泥石流、 地面沉降、	无限制	2	mm	mm~dm

附录 C（资料性附录）成果报告提纲

第一章 概述

项目概况、工作区范围、以往工作程度分析与评述、本次工作概况

第二章 地质背景

地形地貌与地表覆盖物、区域地层岩性、活动构造和地震、人类活动、公路现状等

第三章 InSAR 技术方法与工作流程

- 一、InSAR 工作原理
- 二、技术路线
- 三、本项目采用的主要技术方法

第四章 InSAR 数据处理过程

- 一、选用的 SAR 数据说明
包括数据类型、采集方案、分辨率、数据量、时空间基线、分辨率、入射角、轨道等
- 二、数据处理过程
包括数据预处理，D-InSAR 数据处理与有效数据对选取，SBAS-InSAR、PS-InSAR 数据处理采用的关键参数，干涉和解缠过程中难题的处理、精度评价等
- 三、数据处理结果
包括各种方法监测得到的公路形变结果的说明

第五章 InSAR 监测结果综合分析

- 一、各数据监测结果比较
- 二、区域形变分析
包括区域形变速率分析、累计形变值分析、对区域形变异常的解释等

第六章 结论与建议

一、取得的主要结论

二、存在的问题与建议

参考文献

附图及相关附件

征求意见稿