

T/CAGHP

中国地质灾害防治工程行业协会团体标准

T/CAGHP 013—2018

地质灾害InSAR监测技术指南（试行）

Guideline of InSAR Monitoring for Geo-hazard

2018-01-01发布

2018-04-01实施

中国地质灾害防治工程行业协会 发布

目 次

前言 III

引言 V

1 适用范围 1

2 规范性引用文件 1

3 术语和缩略语 1

 3.1 术语 1

 3.2 缩略语 3

4 基本规定 3

 4.1 监测任务 3

 4.2 工作流程 3

 4.3 技术设计 3

 4.4 数据获取 4

 4.5 数据处理 6

 4.6 精度评估 6

 4.7 质量控制 7

 4.8 监测结果综合分析 7

 4.9 成果编制与提交 7

5 InSAR 技术作业流程及要求 8

 5.1 D-InSAR 8

 5.2 PS-InSAR 9

 5.3 SBAS-InSAR 11

 5.4 CR-InSAR 13

 5.5 Offset-SAR 15

 5.6 其他 InSAR 方法 16

 5.7 地理编码 16

 5.8 精度评估 17

6 滑坡监测 18

 6.1 监测内容 18

 6.2 监测方案 18

 6.3 方法要求 19

 6.4 数据处理结果验证 19

 6.5 监测结果综合分析 20

7 崩塌(危岩体)监测 20

 7.1 监测内容 20

 7.2 监测方案 20

7.3	方法要求	21
7.4	数据处理结果验证	21
7.5	监测结果综合分析	21
8	泥石流监测	22
8.1	监测内容	22
8.2	监测方案	22
8.3	方法要求	23
8.4	数据处理结果验证	23
8.5	监测结果综合分析	23
9	地面塌陷监测	24
9.1	监测内容	24
9.2	监测方案	24
9.3	方法要求	25
9.4	数据处理结果验证	25
9.5	监测结果综合分析	25
10	地面沉降与地裂缝监测	26
10.1	监测内容	26
10.2	监测方案	26
10.3	方法要求	26
10.4	数据处理结果验证	27
10.5	监测结果综合分析	27
11	成果编制与提交	27
11.1	成果报告编制	27
11.2	成果图件编制	28
11.3	成果提交	29
附录 A (资料性附录)	地质灾害主要变形监测技术优缺点及适用性	30
附录 B (规范性附录)	地质灾害 InSAR 监测工作条件分类	31
附录 C (资料性附录)	现有可用星载 SAR 传感器基本参数及应用特征	32
附录 D (规范性附录)	各灾种 InSAR 监测技术方法及内符合精度要求	34
附录 E (资料性附录)	InSAR 技术方法及适用条件	35
附录 F (规范性附录)	人工角反射器(CR)及其雷达后向散射横截面	36
附录 G (资料性附录)	成果报告提纲	37

前 言

本指南按照 GB/T 1.1—2009《标准化工作导则 第 1 部分：标准的结构和编写》给出的规则起草。

本指南附录 A、C、E、G 为资料性附录，B、D、F 为规范性附录。

本指南由中国地质灾害防治工程行业协会提出并归口。

本指南主编单位：中国地质科学院地质力学研究所、中国国土资源航空物探遥感中心。

本指南参编单位：中国科学院地理科学与资源研究所、长安大学、中国地质环境监测院。

本指南主要起草人：张永双、姚鑫、葛大庆、兰恒星、赵超英、王艳、李凌婧、郭长宝、徐素宁、杨成生、高星、杨志华。

本指南由中国地质灾害防治工程行业协会负责解释。

引 言

地表变形是地质灾害孕育发展过程中最直接有效的监测指标之一。InSAR 技术具有获取变形信息范围大、灵敏度高、非接触、可回溯、适应广等优势,近年来在地质灾害监测工作中得到越来越多的应用。为了规范和引导地质灾害 InSAR 监测工作,国土资源部发布了《国土资源部关于编制和修订地质灾害防治行业标准工作的公告》(2013 年第 12 号),确定将《地质灾害 InSAR 监测技术指南》(试行)纳入地质灾害防治行业标准。本指南旨在搭建 InSAR 技术与工程应用间的桥梁,指导地质灾害 InSAR 监测的方案部署、SAR 数据选取、监测方法运用、监测资料整理、综合分析等工作,为地质灾害调查评价和监测预报等提供技术支持。

本指南在编写过程中,认真研究了国内外有关地质灾害监测技术规范标准和较为成熟的 InSAR 技术方法。在此基础上,针对滑坡、崩塌(危岩体)、泥石流、地面塌陷、地面沉降与地裂缝灾害,分别提出了 InSAR 监测技术要求。

本指南的某些内容可能涉及专利。本指南的发布机构不承担识别这些专利的责任。

地质灾害 InSAR 监测技术指南(试行)

1 适用范围

本指南规定了星载 InSAR 技术监测地质灾害的方案部署、SAR 数据选取、监测方法运用、精度指标、监测资料整理、地质灾害分析等技术要求。

本指南适用于指导滑坡、崩塌(危岩体)、泥石流、地面塌陷、地面沉降与地裂缝等地质灾害的 InSAR 识别与监测工作,其他地表变形监测可以参考。

2 规范性引用文件

下列文件对于本指南的应用必不可少。凡是注明日期的引用文件,仅注日期的版本适用于本指南。凡是不注日期的引用文件,其最新版本(包括所有的修改单)适用于本指南。

- GB 50026—2007 工程测量规范
- GB/T 15968—2008 遥感影像平面图制作规范(1 : 50 000、1 : 250 000)
- JGJ 8—2007 建筑变形测量规范
- YS 5229—96 岩土工程监测规范
- DZ/T 0261—2014 滑坡崩塌泥石流调查技术规范(1 : 5 万)
- DZ/T 0283—2015 地面沉降调查与监测规范
- DZ/T 0221—2006 崩塌、滑坡、泥石流监测规范
- DZ/T 0296—2016 环境地质遥感监测技术要求(1 : 250 000)
- DD2014—11 地面沉降 InSAR 监测规范
- DD2012—01 滑坡监测技术规范
- DD2015—01 地质灾害遥感调查技术规定
- DD2012—03 1 : 5 万岩溶塌陷调查规范
- DD2015—08 地裂缝调查规范
- DD2015—02 活动断层与区域地壳稳定性调查评价规范(1 : 50 000、1 : 250 000)
- DD2011—02 遥感解译地质图制作规范

3 术语和缩略语

下列术语和缩略语适用于本指南。

3.1 术语

3.1.1

地质灾害 Geo-hazard

由自然或人类活动等因素引发的对生命财产造成损失的地质现象。

注:本指南中的地质灾害主要包括滑坡、崩塌(危岩体)、泥石流、地面塌陷、地面沉降与地裂缝。

3.1.2

危岩体 Unstable rock

具备发生崩塌的条件,且已出现崩塌前兆的岩体。

3.1.3

合成孔径雷达干涉测量 Interferometric Synthetic Aperture Radar

对同一地区不同期次 SAR 数据中的相位信息进行干涉计算的技术,本指南中特指利用 SAR 数据提取地质灾害体变形的技术,简称干涉测量,包括差分合成孔径雷达干涉测量(D-InSAR)、短基线集合成孔径雷达干涉测量(SBAS-InSAR)和永久散射体合成孔径雷达干涉测量(PS-InSAR)等。

3.1.4

差分合成孔径雷达干涉测量 Differential InSAR

对干涉相位进行差分处理,包括去除地形、平地 and 基线等相位分量以获取变形信息的干涉测量方法。

3.1.5

时序合成孔径雷达干涉测量 Time Series InSAR

通过长时间序列的 InSAR 分析,去除或削弱大气、地形、轨道、高程误差,获取高精度时间序列地表变形信息的 InSAR 数据处理方法。

注:典型方法有 PS-InSAR 和 SBAS-InSAR 等。

3.1.6

永久散射体合成孔径雷达干涉测量 Persistent Scatterer InSAR

对长时间序列 SAR 影像集中的永久散射体进行时间和空间域变形量计算,以提取高精度时序变形信息的干涉测量方法。

3.1.7

短基线集合成孔径雷达干涉测量 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,对相干像元的差分相位序列进行时序分析,以获取相干像元变形量时序的干涉测量方法。

3.1.8

合成孔径雷达数据偏移变形测量 Offset-SAR

通过不同 SAR 图像间的配准偏差提取影像间隔期内地表变形的的方法。

3.1.9

堆叠干涉测量 Stacking-InSAR

利用多景解缠后的 D-InSAR 结果计算变形的的方法。

3.1.10

重复轨道数据 Repeat Pass Data

卫星在不同时刻、重复轨道条件下对同一地区进行监测获取的 SAR 数据。

3.1.11

角反射器 Corner Reflector

能将雷达入射信号沿原路径反射回去,并在 SAR 图像上形成高强度信号的人工装置。

3.1.12

空间基线 Spatial Baseline

同一地区两景 SAR 影像上同名点在卫星轨道上的连线。

3.1.13

时间基线 Temporal Baseline

监测同一地区的两景重复轨道 SAR 影像的时间差。

3.2 缩略语

SAR 合成孔径雷达(Synthetic Aperture Radar)

InSAR 合成孔径雷达干涉测量(Interferometric SAR)

TS-InSAR 时序合成孔径雷达干涉测量(Time Series InSAR)

D-InSAR 差分合成孔径雷达干涉测量(Differential InSAR)

PS-InSAR 永久散射体合成孔径雷达干涉测量(Persistent Scatterer InSAR)

SBAS-InSAR 短基线集成孔径雷达干涉测量(Small Baseline Subsets InSAR)

IPTA-InSAR 相干点目标分析干涉测量(Interferometric Point Target Analysis InSAR)

CR 角反射器(Corner Reflector)

CR-InSAR 角反射器合成孔径雷达干涉测量(Corner Reflector InSAR)

DEM 数字高程模型(Digital Elevation Model)

SRTM 航天飞机雷达测地任务(Shuttle Radar Topography Mission)

4 基本规定

4.1 监测任务

地质灾害 InSAR 监测主要任务如下：

- a) SAR 数据覆盖范围内具有缓慢变形要素的多种地质灾害综合识别。
- b) 工作目的设定的地质灾害时空变形信息获取。
- c) 变形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) 地质灾害发育规律和灾害体稳定性分析。

4.2 工作流程

利用 InSAR 技术开展地质灾害监测的工作流程主要包括技术设计、数据获取、数据处理、精度评估、质量控制、结果分析、成果编制与提交七部分。

4.3 技术设计

4.3.1 需求分析

4.3.1.1 应分析地质灾害特征和监测条件,比较各种变形监测方法的优缺点,充分了解 InSAR 技术对拟监测对象的适用性,提出采用 InSAR 技术的依据,参考附录 A。

4.3.1.2 应根据地质条件及 SAR 数据源,在工作之初明确地质灾害 InSAR 监测拟获取的变形信息(如:覆盖区域、变形量、位移方向、变形范围、变形速率等)、达到的精度、成果的表达形式、最终要解决的问题等,使其与工作目标、数据条件和成本相匹配。

4.3.2 资料收集

4.3.2.1 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,监测区域数字地形图和 DEM。

4.3.2.2 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。

4.3.3 地质背景分析

4.3.3.1 应根据搜集到的各类资料,分析地质灾害形成条件和 SAR 成像特点,为 InSAR 监测数据选取、处理方法、参数确定和监测结果地质分析提供参考依据。

4.3.3.2 地质背景分析应考虑地质灾害的类型、时空发育特征、发育阶段、灾害发生的时间段、灾害体的变形梯度、地形、植被、气候、地层岩性、地震和活动构造、SAR 数据干涉条件、人类工程活动等因素。

4.3.4 技术设计书编写

4.3.4.1 开展地质灾害 InSAR 监测之前,应编制独立的技术设计书。

4.3.4.2 技术设计书应包括下列内容:

- a) 任务来源及目的、意义。
- b) 监测区地质背景及 InSAR 技术适用性分析。
- c) SAR 数据选择及数据处理方法。
- d) 监测数据精度要求与质量控制措施。
- e) 监测结果验证方式和方法。
- f) 地质灾害区域发育规律和地质稳定性分析方法。
- g) 人员组成、任务分工及工作进度安排。
- h) 预期提交成果。
- i) 成果资料检查验收方案。
- j) 监测工作部署图。

4.3.4.3 在技术设计环节,工作量的投入应根据监测区的工作条件(参考附录 B)给出。

4.4 数据获取

4.4.1 InSAR 监测类型及对应的数据要求

InSAR 监测精度按从低到高可分为 4 个级别,与之对应的 SAR 数据空间分辨率、数据类型、数据量及精度宜满足下列规定:

- a) 灾害集中区发现(Discovery):分辨率优于 40.0 m,以扫描模式 SAR(ScanSAR)数据模式或递进地形扫描 SAR(TOPSAR)数据模式为主,所需景数不少于 2 景,分米级至米级精度。
- b) 灾害空间分布探测(Detection):分辨率优于 20.0 m,以条带模式(Strip)为主,所需景数不少于 2 景,厘米级至分米级精度。
- c) 灾害变形规律识别(Recognition):分辨率优于 15.0 m,以聚束模式(Spot)和条带模式(Strip)为主,所需景数不少于 8 景/a,毫米级精度。
- d) 灾害发育特征确认(Identification):分辨率优于 5.0 m,以凝视模式(Staring Spot)和聚束模

式(Spot)为主,所需景数不少于 20 景/a,总数不少于 40 景,亚毫米级精度。

4.4.2 SAR 数据选取基本原则

4.4.2.1 应根据监测目的和监测对象特点,结合监测区 SAR 数据接收情况,获取存档数据,编程定制工作周期内的 SAR 数据,现有可供选择的主要星载数据源详见附录 C。

4.4.2.2 SAR 数据选择具体考虑的因素有:灾害体变形量值、位移方向、地表变化、地形坡度、空间范围、时序特征以及所需监测精度、监测时间长度和监测模式等。

4.4.2.3 应根据监测区内最大变形量和变形梯度公式(1)换算工作区内所需 SAR 数据的数量、数据幅宽、波长、重访周期、分辨率、成像模式(聚束、条带、扫描)等参数。

$$d_{\max} = \frac{(N_T - 1) \cdot \lambda}{4} \dots\dots\dots (1)$$

式中:

$d_{\max}$ ——相邻监测点间年最大变形量;

N_T ——雷达在一年内最大的重复次数;

λ ——雷达波长。

4.4.2.4 当区内最大变形量超过理论最大变形梯度时,可考虑更换数据类型,采用增大雷达波长、缩短重访周期、增加像元空间分辨率等方式。

4.4.2.5 当预订顺轨方向同一期的 SAR 数据 2 景及以上时,宜选择长条带数据;如果按照单景定制,同期相邻两景影像重叠度应超过 15%影像长度,跨轨数据相邻两景影像间重叠度应超过 15%影像幅宽。

4.4.2.6 生成优于 10 mm 监测精度成果,SAR 数据量宜不少于 8 景/a,生成非线性变形监测成果,数据量宜不少于 16 景/a。

4.4.2.7 以 1 : 10 万比例尺图件表达 InSAR 变形成果宜采用分辨率优于 15 m 的 SAR 数据,以 1 : 25 万比例尺图件表达 InSAR 变形成果宜采用分辨率优于 30 m 的 SAR 数据。

4.4.2.8 雷达波入射角的选择,以雷达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、透视收缩等成像扭曲现象。

4.4.2.9 首选同极化 SAR 数据,次选交叉极化 SAR 数据。

4.4.3 辅助数据选择

4.4.3.1 进行数据处理前,应选择适当的辅助数据,主要包括 InSAR 数据处理所需要的 DEM、成果底图、部分 SAR 卫星精密轨道。

4.4.3.2 DEM 数据应满足以下要求:

- 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。

4.4.3.3 可将地形图中高程点和等高线转换成 DEM 数据用于 InSAR 处理,其平面精度和高程精度换算关系参考《地面沉降 InSAR 监测规范》(DD 2014—11)。

4.4.3.4 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,以不小于 1:10 万比例尺表达成果时宜选用高分辨率的光学遥感影像作为底图。
- b) 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。

4.5 数据处理

4.5.1 应充分利用 SAR 数据源,综合运用 Offset-SAR、D-InSAR、SBAS-InSAR、PS-InSAR 及其他 TS-InSAR 方法进行监测,确保米级、分米级、厘米级、毫米级等各尺度变形的连续覆盖。

4.5.2 InSAR 数据处理方法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) Offset-SAR 方法识别明显变形,可监测变形速率一般可达 1 m/a。
- c) Stacking-InSAR 观测组合识别大变形,可监测变形速率一般为 1 cm/a~1 m/a。
- d) SBAS-InSAR 数据监测较大变形,可监测变形速率一般为 1 cm/a~1 dm/a。
- e) PS-InSAR 监测长期微小线性变形和非线性变形,可监测变形速率一般为 1 mm/a~1 dm/a。

4.5.3 干涉雷达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 与 TS-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,在重叠区内二者变形量相关系数宜大于 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。

4.6 精度评估

4.6.1 内符合评估

4.6.1.1 数据处理结果精度的内符合评估宜采取以下方式:

- a) 变形量或变形速率直方图。
- 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) 变形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检验。

4.6.1.2 各灾种 InSAR 数据处理结果的内符合精度应符合附录 D 的要求。

4.6.2 外符合评估

数据处理结果精度的外符合评估宜采取以下方式:

- a) 与 GPS、水准、全站仪等地表监测结果比较,地表监测标准应符合《工程测量规范》(GB 50026—2007)、《崩塌、滑坡、泥石流监测规范》(DZ/T 0221—2006)和《滑坡监测技术规范》(DD 2012—01)。
- b) 光学遥感影像解译的宏观变形破坏特征对比分析,解译标准应符合《地质灾害遥感调查技

术规定》(DD 2015—01)。

- c) 野外实地调查检验地质灾害变形破坏特征的评估方式参见《滑坡崩塌泥石流调查技术规范(1:5万)》(DZ/T 0261—2014)、《1:5万岩溶塌陷调查规范》(DD 2012—03)、《地面沉降调查与监测规范》(DZ/T 0283—2015)、《地裂缝调查规范》(DD 2015—08)。

4.6.3 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,精度验证应符合《岩土工程监测规范》(YS 5229—96)。

4.7 质量控制

4.7.1 质量过程控制

质量控制应贯穿地质灾害 InSAR 监测工作全过程,包括下列内容:

- a) 地质灾害 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) 地质分析结果野外抽查。
- e) 地质灾害 InSAR 监测成果评审。

4.7.2 数据处理质量控制

4.7.2.1 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。

4.7.2.2 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。

4.7.2.3 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。

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

4.8 监测结果综合分析

4.8.1 区域地质灾害及单个灾害体 InSAR 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。

4.8.2 应根据地质灾害的位置、规模、影响因素、灾害前兆、灾害区的工程地质和水文地质条件以及稳定性验算结果等综合判定,并分析发展趋势和危害程度。

4.8.3 综合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。

4.8.4 综合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、变形面积统计等技术。

4.8.5 监测结果分析过程中应注意:InSAR 位移速率主要反映垂直变形及部分近东西向变形,对南北向变形不敏感;大气与轨道误差导致的趋势性变形误差,勿与构造变形误差混淆。

4.9 成果编制与提交

4.9.1 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。

4.9.2 InSAR 监测成果应包括报告、图件、数据等。

5 InSAR 技术作业流程及要求

InSAR 技术的选择应根据监测对象、应用环境、监测精度、可监测的量程、所需数据量和观测频率、技术复杂程度等因素综合确定，可参照附录 E。

5.1 D-InSAR

5.1.1 基本流程

D-InSAR 技术数据处理的基本流程如图 1 所示。

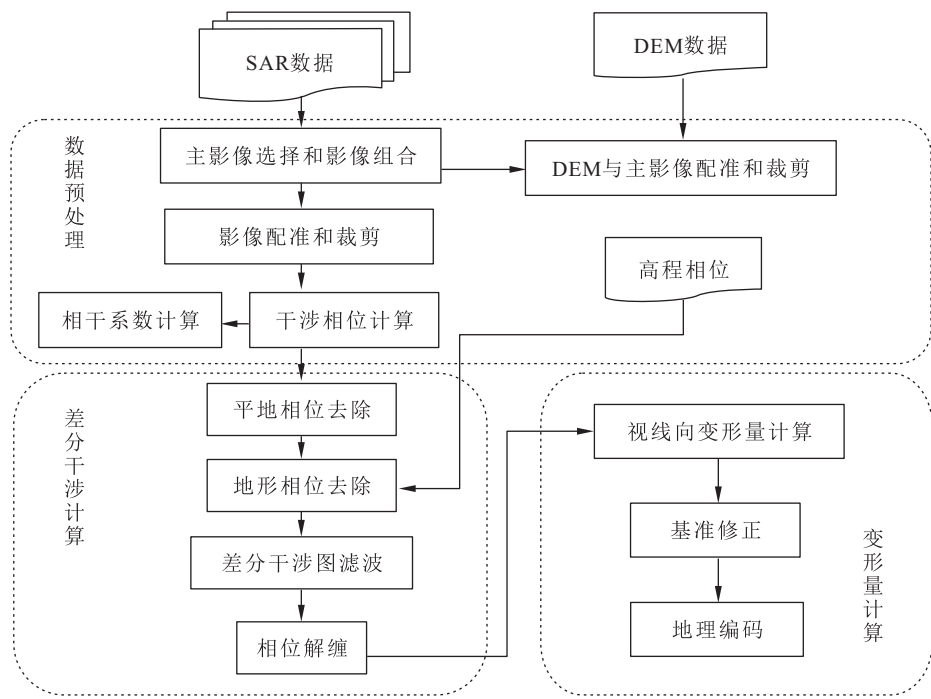


图 1 D-InSAR 数据处理基本流程图

5.1.2 数据预处理

5.1.2.1 主影像选择和影像组合

在满足空间基线和时间基线要求的前提下，SAR 主影像的选择及影像组合生成像对的步骤应符合如下规定：

- 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) 选择设计工作周期内空间基线尽量短的像对，宜选择时间早的影像作为主影像。

5.1.2.2 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，具体步骤应符合如下规定：

- 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 0.25 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。

- 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。
- d) 选择配准影像中的公共区域作为 InSAR 处理范围,将所有影像裁剪成相同范围的区域。

5.1.2.3 DEM 与 SAR 影像配准和裁剪

将 DEM 与选好的主影像进行配准,并将 DEM 范围裁剪成与主影像范围一致,具体步骤应符合如下规定:

- 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。

5.1.2.4 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,具体步骤应符合如下规定:

- 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、辅影像像元对进行复共轭相乘,生成干涉相位值,逐像元计算生成干涉图。

5.1.2.5 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。

5.1.3 差分干涉计算

5.1.3.1 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;利用配准后的 DEM,计算地形相位。从干涉相位中去除平地 and 地形相位,生成差分干涉相位,逐像元计算生成差分干涉图。

5.1.3.2 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,得到相位缠绕的差分干涉图。

5.1.3.3 相位解缠

对相位缠绕的差分干涉图进行解缠,具体步骤应符合如下规定:

- a) 宜采用空间域二维相位解缠方法,主要包括枝切法、最小费用流法等。
- 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 0.4 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。

5.2 PS-InSAR

5.2.1 基本流程

PS-InSAR 技术数据处理的基本流程如图 2 所示。

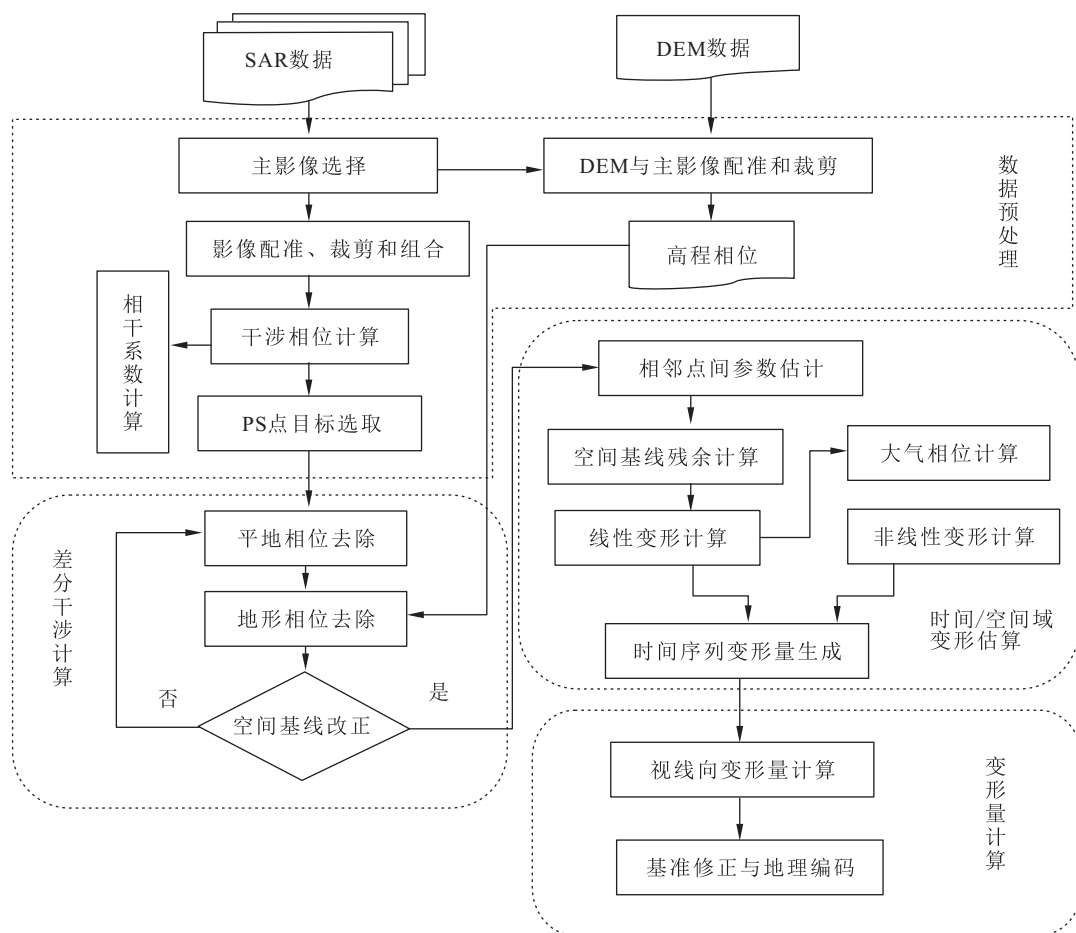


图2 PS-InSAR 数据处理基本流程图

5.2.2 数据预处理

5.2.2.1 主影像选择。PS-InSAR 方法宜选择单一主影像。在满足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。

5.2.2.2 影像配准、裁剪和组合。所有 SAR 影像对主影像进行配准、裁剪,并组合生成时间序列干涉图集。具体步骤应符合如下规定:

- 所有影像对主影像进行配准。配准方法见 5.1.2.2。
- 将所有数据裁剪成范围一致的区域。剪裁要求见 5.1.2.2 和 5.1.2.3。
- 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。

5.2.2.3 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。具体步骤见 5.1.2.3。

5.2.2.4 干涉相位计算。将所有主、辅影像前置滤波,计算干涉相位,生成干涉图。具体步骤见 5.1.2.4。

5.2.2.5 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。具体步骤应符合如下规定：

- 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、信噪比法等方法。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。

5.2.3 差分干涉计算

5.2.3.1 平地 and 地形相位去除。对由 PS 点目标组成的干涉图,进行平地 and 地形相位的去除,具体步骤应符合 5.1.3.1 的规定。

5.2.3.2 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。具体步骤应符合下列规定：

- 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 5.2.3.1 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。

5.2.4 时间/空间域变形估算

对干涉图的差分干涉相位应进行时间和空间域的线性变形相位估计,如有要求还应进行非线性变形相位估计,去除大气、噪声等残余相位,得到每个点目标的时间序列变形相位。PS-InSAR 的计算步骤应符合下列规定：

- a) 相邻点间参数估计。将 PS 点目标相连接构成 Delaunay 不规则三角网(DTIN)(或称冗余网),依据点间连接关系求解相邻点差分相位差。
- b) 线性变形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变形速率和 DEM 误差值。若监测工作设计书仅要求线性变形成果,则可直接输出成果进行垂直向变形量计算,生成地面沉降速率图。
- c) 非线性变形相位和大气相位计算。从差分干涉相位中去除步骤 b) 中两项相位量,得到残余相位。对该残余相位进行空间域均值滤波,计算得到主影像大气相位。对去除主影像大气相位的残余相位进行空间域低通滤波和时间域高通滤波,得到辅影像大气相位,并进一步分解出非线性变形相位。
- d) 时间序列变形相位计算。将步骤 b) 中线性变形相位和步骤 c) 中非线性变形相位相加,结合时间基线参数,得到每个 PS 点目标的时间序列变形相位。

5.3 SBAS-InSAR

5.3.1 基本流程

SBAS-InSAR 技术数据处理的基本流程如图 3 所示。

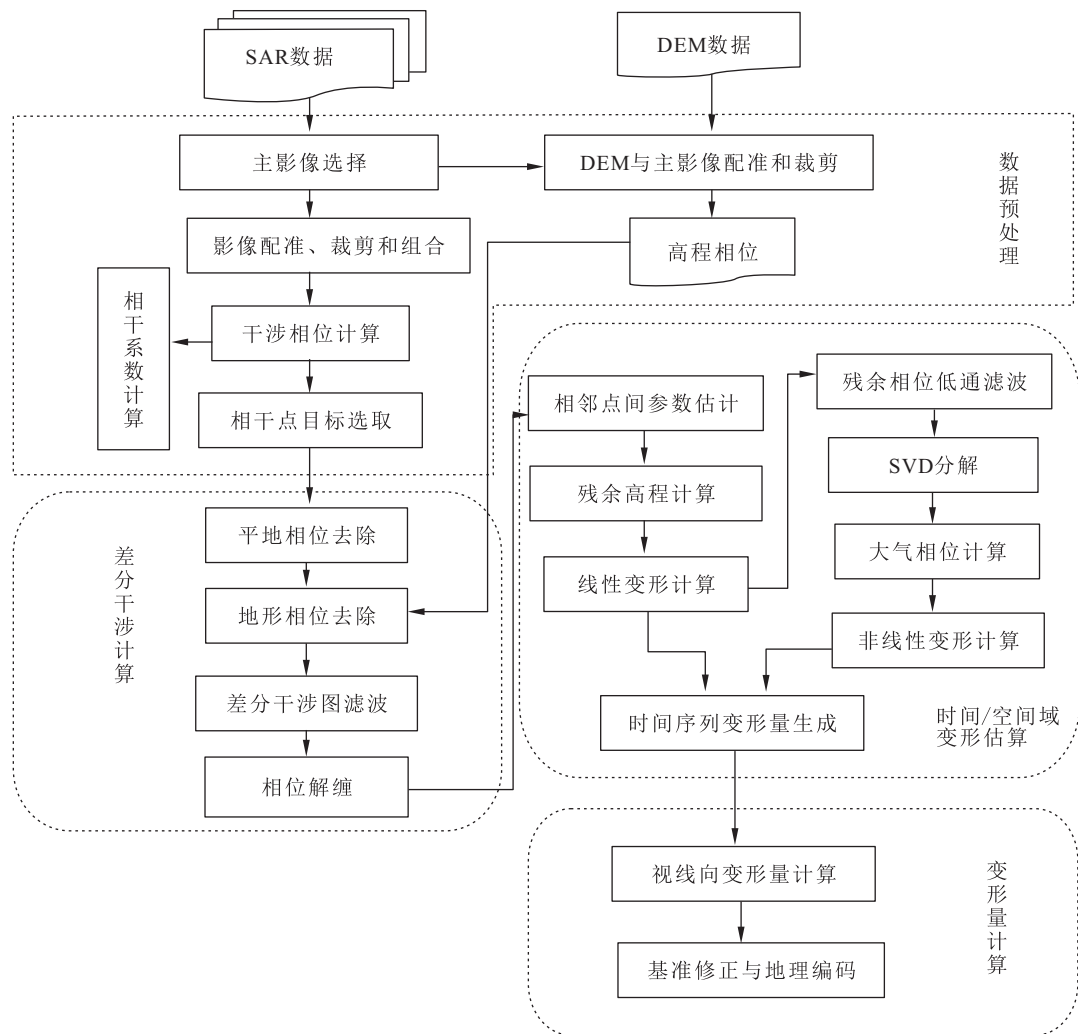


图 3 SBAS-InSAR 数据处理基本流程图

5.3.2 数据预处理

5.3.2.1 SAR 主影像的选择和像对组合工作步骤应符合下列规定：

- a) 计算所有影像对间的时间和空间基线,生成时间和空间基线分布图。
- b) 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,不应超过极限基线距的 30%,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,时间基线越短越好,最大时间阈值不宜超过 3 a。

5.3.2.2 所有 SAR 数据对一景影像进行配准、裁剪,并组合生成时间序列干涉图集,具体步骤如下：

- a) 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 5.1.2 的规定。
- b) 将所有数据裁剪成一致的区域,剪裁要求见 5.1.2.2。

- c) 对所有配准好的干涉像对,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。

5.3.2.3 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。具体步骤应符合 5.1.2.3 的规定。

5.3.2.4 将所有主、辅影像前置滤波,计算干涉相位,生成干涉图。具体步骤见 5.1.2.4。

5.3.2.5 相干系数计算。具体步骤见 5.1.2.5。

5.3.2.6 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。相干点目标的识别可采用 5.2.2.5 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。

5.3.3 差分干涉计算

5.3.3.1 平地 and 地形相位去除的具体步骤应符合 5.1.3.1 的规定。

5.3.3.2 差分干涉图滤波的具体步骤应符合 5.1.3.2 的规定。

5.3.3.3 相位解缠的具体步骤应符合 5.1.3.3 的规定。

5.3.4 时间/空间域变形估算

对干涉图的差分干涉相位应进行时间域的线性变形相位估计,如有特殊要求,还应进行非线性变形相位估计,去除大气、噪声等残余相位,得到点目标的时间序列变形相位。计算步骤应符合下列规定:

- a) 相邻点间参数估计方法应符合 5.2.4 a) 的规定。
- b) 线性变形相位和残余高程计算方法应符合 5.2.4 b) 的规定。
- 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变形相位。
- e) 大气相位和非线性变形相位计算。对奇异值分解得到的大气相位和非线性变形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,得到非线性变形相位。
- f) 时间序列变形相位计算。将步骤 b) 中线性变形相位和步骤 e) 中非线性变形相位相加,结合时间基线参数,得到每个相干点目标的时间序列变形相位。

5.4 CR-InSAR

5.4.1 基本流程

CR-InSAR 技术数据处理的基本流程如图 4 所示。

5.4.2 CR-InSAR 选点要求

- a) CR 基准点应固定在稳定且易长期保护的区域,基座和拉线亦应保持长期稳定。

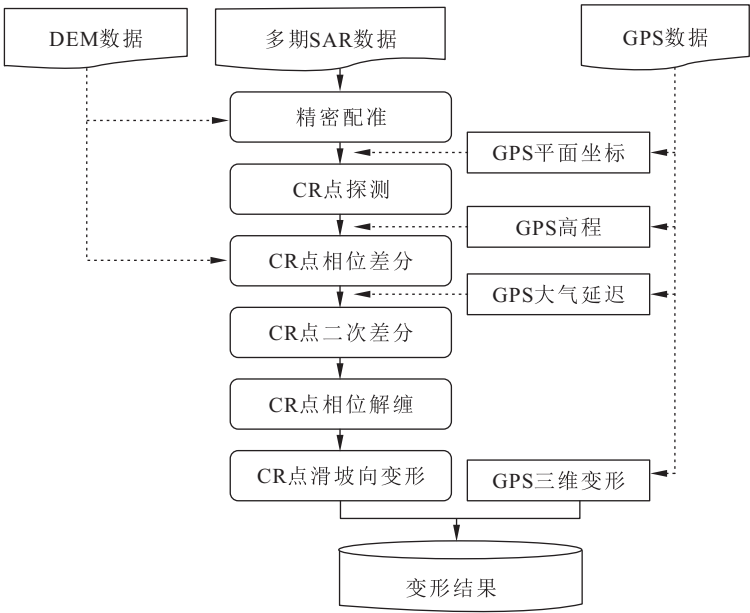


图 4 CR-InSAR 数据处理基本流程图

- b) CR 监测点应选在具有变形代表性的区域,且固定在地表,基座应用水泥浇注,辅助拉线固定。
- c) 应保证 CR 的指向和方位长期不变,且拉线和基座应位于同一变形体上。

5.4.3 CR 安装环境要求

- a) CR 点位应远离大功率无线电发射源和高压输电线,距离分别不小于 200 m 和 100 m,对于容易产生多路径散射的物体,一般要远于 100 m。
- b) CR 点位附近不应有强烈干扰接收卫星信号的物体,并应远离镜面建(构)筑物、正对的坡面强反射体。
- c) CR 应安置在背景反射特性较弱的地方,以便于在 SAR 影像中提取其位置。

5.4.4 CR 的设计与安装

- a) CR 在制作时,需根据周围地表的反射特性及雷达入射波长,合理选择制作类型和设计尺寸。
- b) 应根据附录 F.3 计算雷达后向散射横截面,确定信号反射强度。
- c) CR 有单面形状为等腰直角三角形和正方形两种,宜选择等腰直角三角形 CR,边长为 1m 的三面角反射器的几何结构和参数参见附录 F.1。

5.4.5 CR 的制作

CR 的制作应符合下列要求:

- a) 为实现高反射性和高反射效率,需要选择表面光滑、导电性好的材料。
- b) 材料宜选择铝板和镀锌铁皮双层结构,铝板厚度取 3 mm,外加镀锌铁皮(1mm 厚)以保护反射面(铝板),边侧加三角角钢加固。

- c) 确保三块金属板之间的相互垂直关系,要求角度加工公差不得超过 $\pm 1^{\circ}$ 。
- d) CR 棱边设置了三个活动关节,通过伸缩杆来调节 CR 的仰角。
- e) 在 CR 顶底处设置一漏水孔,使 CR 不至于积水影响其反射路线。
- f) 获得最大反射截面(RCS),应符合附录 F. 3 的规定。
- g) 根据雷达数据轨道信息来调整角反射器的底边方位角,并使角反射器的底边与卫星飞行方向平行,见附录 F. 2。
- h) 应注意保证 CR 在野外可以微调(方位角和仰角方向),并要保证其具有稳固性。

5.5 Offset-SAR

5.5.1 基本流程

Offset-SAR 技术数据处理的基本流程如图 5 所示。

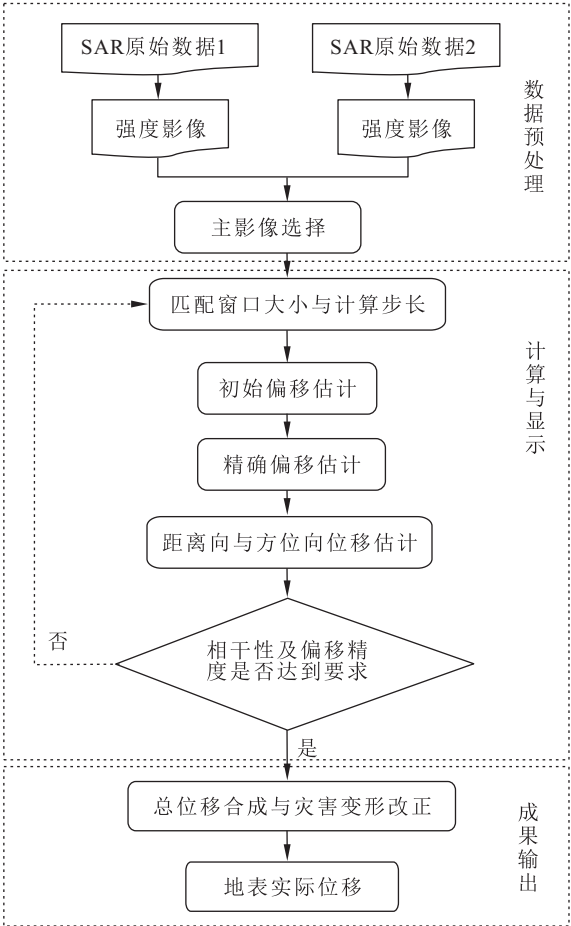


图 5 Offset-SAR 数据处理基本流程图

5.5.2 数据预处理

- 5.5.2.1 可采用单视复数或多视强度影像用于 Offset-SAR 方法计算地表变形。
- 5.5.2.2 应按不少于监测目标面积 16 倍范围裁剪 SAR 数据。

5.5.2.3 宜选取拍摄时间早的 SAR 数据作为主参考景影像。

5.5.2.4 应根据预估的地表变形量和影像分辨率合理设定偏移匹配窗口大小和计算步长。

5.5.3 计算与显示

5.5.3.1 为保证偏移计算的准确性和计算效率,可采用匹配窗口由大到小、计算步长由粗至精的递进计算流程。

5.5.3.2 初始偏移估计应采用大匹配窗口、低分辨率参数,获得高相干性和粗略位移值。

5.5.3.3 精确偏移估计应采用小匹配窗口、高分辨率参数,获得精确的位移值。

5.5.3.4 Offset-SAR 在计算过程中需测试不同匹配窗口大小和位移分辨率,以获得最佳变形值。一般情况下大匹配窗口获取较大的变形值,小匹配窗口获得较小的变形值。

5.5.3.5 可采用多种配准算法以获取最优的相干性,影像强度相关法是基础算法。

5.5.3.6 在保证 90% 以上区域相干的条件下,Offset-SAR 应尽可能采用小匹配窗口、小步长,以获得更准确的变形值。

5.5.4 变形量显示

5.5.4.1 应将偏移像素值转换成以“米”为单位的距离向变形量、方位向变形量和地表变形量,用于准确性评估和质量控制

5.5.4.2 基于先验知识,判定相干性和准确性达不到质量控制要求的,应重新设定匹配窗口和计算步长,再次计算。

5.5.4.3 对于满足质量控制要求的偏移结果和匹配相干性图件进行地理编码。

5.6 其他 InSAR 方法

a) 可采用改进的 D-InSAR、SBAS-InSAR、PS-InSAR、CR-InSAR 方法进行地质灾害监测,以获得丰富、稳定的地质灾害 InSAR 监测信息。

b) 宜采用融合 PS 优点和 SBAS 优点的方法,如 IPTA-InSAR 方法,对地表干涉条件差的区域进行监测,以满足不同数据和地质条件下高精度地质灾害 InSAR 监测需要。

5.7 地理编码

5.7.1 变形量计算

5.7.1.1 视线向变形量计算

依据雷达波长参数,将解缠相位换算为视线向(LOS)变形量 Δr 。

5.7.1.2 视线向变形量垂直向转换

依据雷达入射角,将 LOS 变形量 Δr 转换为垂直向变形量 d_1 :

$$d_1 = \frac{\Delta r}{\cos\theta} \quad \dots\dots\dots (2)$$

式中:

θ —— 雷达波入射角(°)。

5.7.1.3 视线向变形量水平向转换

依据雷达入射角,将 LOS 变形量 Δr 转换为水平向变形量 d_2 :

$$d_2 = \frac{\Delta r}{\sin\theta} \quad \dots\dots\dots (3)$$

5.7.2 地理编码

可利用 DEM 产品进行地理编码,具体步骤应符合下列规定:

- a) 利用建立的坐标系查找表,完成监测成果由 SAR 影像坐标系到大地坐标系的变换,即对监测成果变形量进行地理编码。
- b) 集合所有地理编码后的点目标,将变形量的时间单位换算成年,生成年度变形速率,逐像元计算生成地质灾害体速率图。

5.7.3 变形速率基准修正

地理编码后点目标的灾害体变形速率应利用 GPS、全站仪、水准等地面高精度控制点数据修正基准,具体步骤应符合下列规定:

- a) 以同期地面测量结果作为基准参考,在临近点上计算点目标变形量与实测量之间差值的平均值,即与实测变形量之间存在的整体偏差值。
- b) 将上一步得到的整体偏差值加入每个点目标的变形值,修正因参考点不统一产生的 InSAR 结果变形量的整体偏差,完成基准修正。

5.8 精度评估

5.8.1 基于多干涉图,如 Stacking-InSAR 获取的年变形速率及其中误差,可以评定其精度,对于 PS 技术和 SBAS 技术,获取年变形速率、中误差和 DEM 误差,也可以评定其精度。

5.8.2 在一定假设条件下对独立 InSAR 数据解算的结果进行内符合精度的评定,如覆盖同一区域的不同轨道 SAR 数据结果,或者不同 SAR 卫星解算的结果。

5.8.3 采用高精度 GPS、水准等监测结果对 InSAR 结果进行外符合精度的评定。

5.8.3.1 通过三维 GPS 位移结果与 SAR 视线向监测结果比较,进行评估:

$$\Delta = d_{\text{InSAR}} - d_{\text{GPS}} \quad \dots\dots\dots (4)$$

式中:

d_{InSAR} ——视线向变形量;

d_{GPS} ——GPS 投影到视线向的变形量;

Δ —— d_{InSAR} 与 d_{GPS} 二者差值。

$$d_{\text{GPS}} = -\sin\theta \cdot \sin\left(\alpha_h - \frac{3\pi}{2}\right) \cdot dx + \sin\theta \cdot \cos\left(\alpha_h - \frac{3\pi}{2}\right) \cdot dy + \cos\theta \cdot dz \quad \dots\dots (5)$$

式中:

α_h ——SAR 数据投影到地面的水平角度($^\circ$);

θ ——雷达波入射角($^\circ$);

x, y, z ——分别为南北、东西和垂直方向的变形量。

5.8.3.2 通过水准测量结果与 SAR 垂直方向结果比较,进行评估:

$$\Delta = d_{\text{InSAR}} - d_{\text{Level}} \quad \dots\dots\dots (6)$$

$$d_{\text{Level}} = V_{\text{Level}} \cdot \cos\theta \quad \dots\dots\dots (7)$$

$$\sigma = \sqrt{\frac{[\Delta^2]}{n}} \quad \dots\dots\dots (8)$$

式中:

V_{Level} ——水准变形量;

以上内容仅为本文档的试下载部分，为可阅读页数的一半内容。如要下载或阅读全文，请访问：<https://d.book118.com/297002146120010040>