

# 中国地质调查局地质调查技术标准

DD2014—11

---

## 地面沉降干涉雷达数据处理技术规程

中国地质调查局

---

2014年7月



# 目 次

前言 .....	III
1 范围 .....	1
2 规范性引用文件 .....	1
3 术语、定义和缩略语 .....	1
3.1 术语和定义 .....	1
3.2 缩略语 .....	2
4 总则 .....	2
4.1 目的 .....	2
4.2 工作流程 .....	3
4.3 基本要求 .....	3
5 技术设计 .....	4
5.1 资料收集 .....	4
5.2 设计书编写 .....	4
6 数据获取 .....	4
6.1 数据选择 .....	4
6.1.1 SAR 数据选择 .....	4
6.1.2 辅助数据选择 .....	5
6.2 数据采购 .....	5
7 数据处理 .....	5
7.1 处理方法选择 .....	5
7.2 D-InSAR 数据处理 .....	5
7.2.1 基本流程 .....	5
7.2.2 数据预处理 .....	6
7.2.3 差分干涉计算 .....	7
7.2.4 形变量计算 .....	7
7.3 PS-InSAR 数据处理 .....	8
7.3.1 基本流程 .....	8
7.3.2 数据预处理 .....	9
7.3.3 差分干涉计算 .....	9
7.3.4 时间/空间域形变估算 .....	9
7.3.5 形变量计算 .....	10
7.4 SBAS-InSAR 数据处理 .....	10
7.4.1 基本流程 .....	10
7.4.2 数据预处理 .....	10
7.4.3 差分干涉计算 .....	11

7.4.4	时间/空间域形变估算	11
7.4.5	形变量计算	11
8	精度评估	12
8.1	评估内容	12
8.2	评估方法和指标	12
8.2.1	最邻近点选取方法和要求	12
8.2.2	主要指标算法	12
8.3	精度要求	13
8.3.1	样本数目要求	13
8.3.2	相关系数要求	13
8.3.3	中误差要求	13
9	质量控制	13
9.1	检查内容	13
9.2	检查方法和要求	14
9.2.1	日常及阶段性检查	14
9.2.2	终期质量检查	14
10	成果编制与提交	14
10.1	资料整理与入库	14
10.1.1	数据文件	14
10.1.2	入库要求	15
10.2	成果图件编制	15
10.2.1	图件类型	15
10.2.2	图件生成	15
10.2.3	制图要求	15
10.3	成果报告编写	16
10.4	成果提交	16
附录 A (资料性附录)	星载 SAR 数据表	17
附录 B (资料性附录)	InSAR 主要监测方法适用条件表	18
附录 C (规范性附录)	地面沉降 InSAR 监测 (1:250000) 成果图图式	19
附录 D (资料性附录)	地面沉降速率值对应分级设色图例表	19
附录 E (规范性附录)	地面沉降干涉雷达监测成果报告编写提纲	20
	参考文献	21

## 前 言

本标准遵循GB/T1.1-2009《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。

请注意本标准的某些内容可能涉及专利。本标准的发布机构不承担识别这些专利的责任。

本标准由中国地质调查局提出和归口管理。

本标准起草单位：中国国土资源航空物探遥感中心

本标准主要起草人：王艳、张玲、葛大庆、李曼、郭小方。

本标准由中国地质调查局负责解释。



# 地面沉降干涉雷达数据处理技术规程

## 1 范围

本标准规定了利用星载合成孔径雷达干涉测量技术开展地面沉降测量的任务、工作流程、数据获取与处理、技术要求、精度评估、质量控制和成果编制。

本标准适用于地面沉降测量，其它类似地质灾害的形变测量可参考使用

## 2 规范性引用文件

下列文件对于本标准的应用是必不可少的。凡是注日期的引用文件，仅所注日期的版本适用于本标准。凡是不注日期的引用文件，其最新版本（包括所有的修改单）适用于本标准。

GB/T15968-2008 遥感影像平面图制作规范

GB/T 24356 测绘成果质量检查与验收

CH/T 1004-2005 测绘技术设计规定

DD2006-02 地面沉降监测技术要求

DD2011-01 遥感影像地图制作规范（1：50 000、1：250 000）

DD2011-07 环境地质遥感监测技术要求

## 3 术语、定义和缩略语

### 3.1 术语和定义

下列术语和定义适用于本标准。

#### 3.1.1

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

干涉雷达

利用同一地区不同期次SAR数据中的相位信息进行干涉测量的技术，本规程特指利用SAR数据开展地面沉降监测的空间大地测量技术，包括差分合成孔径雷达干涉测量、永久散射体干涉测量和短基线集干涉测量。

#### 3.1.1.1

**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，去除地形、平地等相位分量以测量地面形变的干涉测量方法。

#### 3.1.1.2

**永久散射体干涉测量** Persistent Scatterer InSAR

利用长时间序列SAR影像集进行时间和空间域形变量估算，以提取永久散射体形变信息的干涉测量方法。

#### 3.1.1.3

**短基线集干涉测量** 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奇异值分解,以获取时序相干目标形变量的干涉测量方法。

### 3.1.2

**重复轨道数据** repeat pass data

重轨数据

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。

### 3.1.3

**空间基线** spatial baseline

监测同一地区的两景SAR影像,它们同名点在空间上的连线。

### 3.1.4

**时间基线** temporal baseline

监测同一地区的两景SAR影像的时间差。

### 3.1.5

**相干目标** coherent target

在一定时间间隔内,在干涉图上能保持后向散射特性稳定、相位保真、且相干性良好的像元。

### 3.1.6

**干涉图** interferogram

干涉纹图

干涉相位的二维分布图。

### 3.1.7

**视线向** Line Of Sight

雷达传感器照射地面的方向。

## 3.2 缩略语

下列缩略语适用于本标准。

CGCS: 中国大地坐标系 (China Geodetic Coordinate System)

DEM: 数字高程模型 (Digital Elevation Model)

DTIN: 狄洛尼三角网 (Delaunay Triangulation Irregular Net)

FFT: 快速傅立叶变换 (Fast Fourier Transform)

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

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: 短基线集 (Small Baseline Subsets)

SRTM: 航天飞机机载干涉雷达测地任务 (Shuttle Radar Topography Mission)

SVD: 奇异值分解 (Single Value Decomposition)

## 4 总则

### 4.1 目的

应用InSAR技术,开展地面沉降分布区域及变化状况的调查与监测,为防治地面沉降提供基础测量数据。



## 4.2 工作流程

利用InSAR技术开展地面沉降的作业流程包括：技术设计、数据获取、干涉雷达数据处理、成果精度评估、质量控制、成果编制与提交，具体内容见图1所示。

## 4.3 基本要求

4.3.1 地面沉降 InSAR 监测可按照国家标准分幅或自由分幅进行。

4.3.2 国家标准分幅的比例尺通常采用 1:250 000 或 1:100 000；自由分幅的比例尺根据实际需要确定。

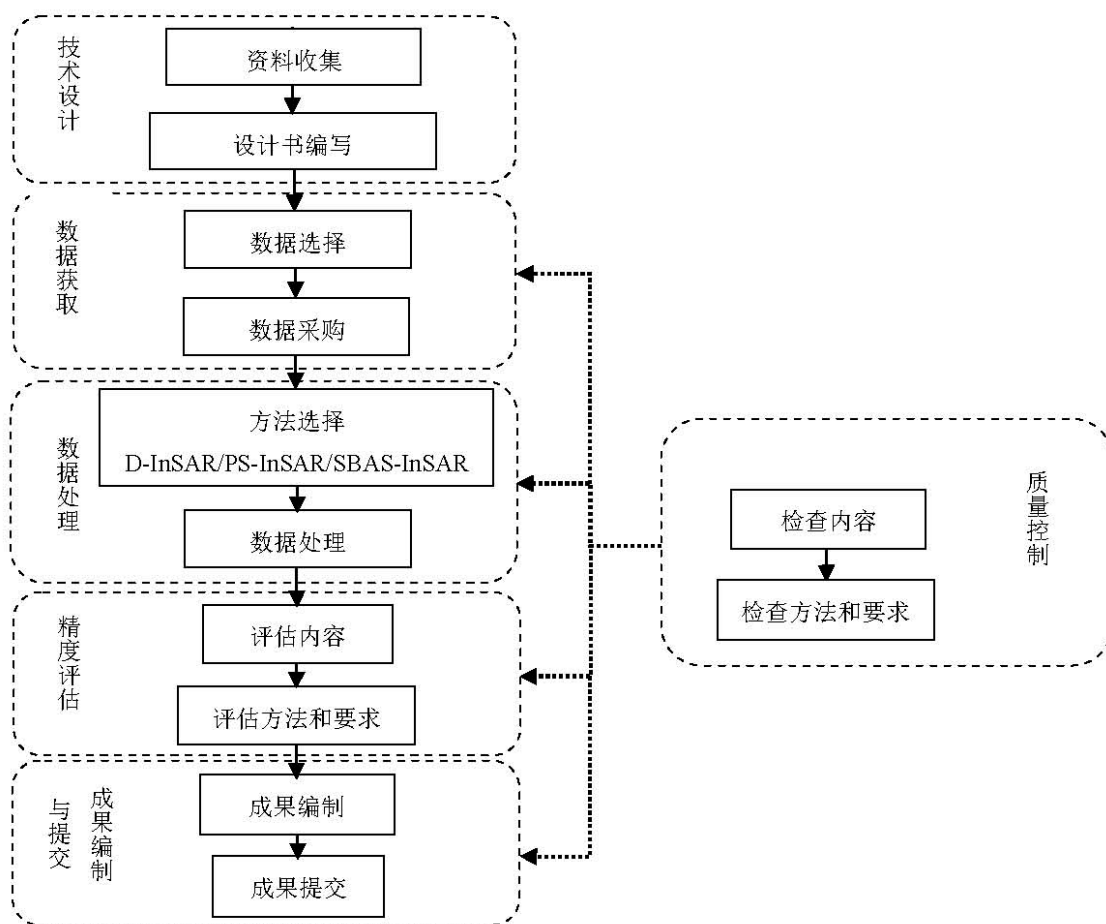


图1 地面沉降监测 InSAR 数据处理作业流程图

4.3.3 应根据工作区域沉降特点和任务要求，选择地面沉降监测的 SAR 数据和 InSAR 数据处理方法。

4.3.4 地面沉降监测 InSAR 数据处理工作应生成沉降速率图，亦可转换为累计沉降量图、时间序列沉降量图和相关沉降统计表格等成果资料。

4.3.5 InSAR 监测结果宜与其它高精度监测数据对比验证以评价其精度。

4.3.6 地面沉降 InSAR 监测成果应采用 CGCS2000 大地坐标系，也可根据需要采用经国家和地方行政主管部门审批备案的可与国家高程系统相联结的独立高程系统。

## 5 技术设计

### 5.1 资料收集

在编制技术设计书之前，应收集下列资料：

- a) 监测区域地形图；
- b) 监测区地质、水文基础资料；
- c) 监测区地面沉降灾情资料；
- d) 已有监测工作及成果资料；
- e) 监测区 SAR 数据存档信息；
- f) 监测区在轨 SAR 数据参数、在轨状况和编程定制规则信息；
- g) 监测区辅助数据资料，包括：地形数据、成果底图数据、卫星轨道数据和其它数据等。

### 5.2 设计书编写

在资料收集基础上，应根据任务需要编写技术设计书，由主管部门审批确认。技术设计部分可参考CH/T 1004-2005规定的有关内容。技术设计书主要内容应包括：

- a) 任务来源及目的、意义；
- b) 技术设计的依据；
- c) 测区地形、地质、水文概况及已有工作条件；
- d) 监测项目、监测网（点）布置及相关部署图件；
- e) 监测方法及主要技术要求；
- f) 监测数据选择及质量要求；
- g) 任务分工及工作进度安排；
- h) 成果资料检查验收；
- i) 预期提交成果。

## 6 数据获取

### 6.1 数据选择

#### 6.1.1 SAR 数据选择

星载SAR传感器的基本参数可参见附录A中所示，选择进行数据处理的SAR影像应满足：

- a) SAR 数据选取的时间和空间范围，应略大于任务要求的时间与空间范围。
- b) SAR 数据成像模式、极化方式和视角均应相同。
- c) 宜依据 SAR 数据的临界空间基线选择其空间基线阈值。系统带宽小于 30MHz 的 SAR 数据选择其一半临界空间基线值作为空间基线阈值；系统带宽大于 30MHz 的 SAR 数据选择其十分之一临界空间基线值作为空间基线阈值。具体临界空间基线值见附录 A 中所示。
- d) 时间基线不宜超过 3 年。
- e) 同轨数据如果按照单幅定制，相邻两景影像应有超过 15%影像长度的重叠度；跨轨数据，相邻两景影像间应有超过 15%影像幅宽的重叠度。
- f) 顺轨方向订购同一时刻超过两景 SAR 数据时，宜选择订购长条带数据。
- g) 生成优于 10mm 监测精度地面沉降成果，SAR 数据量应大于或等于 8 景/年；如需生成非线性地面沉降成果，数据量应大于或等于 16 景/年。

- h) 以 1:100 000 比例尺图件表达 InSAR 形变成果宜采用像元大小为 5m ~ 10m 的 SAR 数据；以 1:250 000 比例尺图件表达 InSAR 形变成果宜采用像元大小为 15m ~ 30m 的 SAR 数据。

### 6.1.2 辅助数据选择

进行数据处理前，应选择适当的辅助数据，其主要类型见5.1。具体选择内容如下：

- a) 地形数据应满足：
  - 1) 地形数据宜选择分辨率优于 SAR 影像分辨率的数据；平原地区亦可采用 SRTM DEM 等中低分辨率数据。
  - 2) 地形数据在空间上应保持一致，无跳变和空洞。如发生质量问题，面积不超过 20%时，宜用其它数据补充；超过 20%时，宜更换数据。
  - 3) 监测区域地形差大于 100m，且山区面积超过工区总面积的 10%时，应采用地形数据产品。选用 DEM 的比例尺不应低于 InSAR 形变成果比例尺。
- b) 成果底图数据应满足：
  - 1) 地面沉降速率图宜选用 SAR 幅度影像作为中等比例尺成果底图，以不小于 1:100 000 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；
  - 2) 地面沉降等值线图宜选用地质图为底图。
  - 3) 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%、且色调一致的数据。
- c) 卫星轨道数据应满足：轨道数据宜优先使用精密轨道数据。
- d) 其他数据应满足：
  - 1) 宜采用优于三等的水准数据修正 InSAR 形变成果的基准面。
  - 2) 宜优先选用一、二、三等水准数据作为 InSAR 成果精度的验证数据，其它验证数据应具有精度等级说明，检验数据应比 InSAR 成果具有更高的精度等级。
  - 3) 精度验证数据应与 InSAR 形变成果在时空上一致、且在空间上分布均匀。

## 6.2 数据采购

用于InSAR数据处理流程的SAR数据和辅助数据，应采用如下途径采购：

- a) 根据监测工作设计书的要求，结合监测区 SAR 数据接收情况购买已存档数据，并编程定制工作周期内的待接收 SAR 数据。目前商用星载 SAR 数据可参见附录 A。
- b) 通过申请、商业购买或网络下载其它辅助数据。

## 7 数据处理

### 7.1 处理方法选择

7.1.1 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。

7.1.2 数据量较大、监测精度要求较高时，宜选择 PS-InSAR 或 SBAS-InSAR 方法。在 SAR 数据的时空基线分布均匀的情况下，宜选用 PS-InSAR 方法；在 SAR 数据的时间和空间基线有一个以长基线为主的情况下，宜选用 SBAS-InSAR 方法。

7.1.3 不同监测方法所适用的地面沉降严重程度分级、监测精度和应用条件见附录 B 中表 B.2 中的说明。

### 7.2 D-InSAR 数据处理

#### 7.2.1 基本流程

D-InSAR方法数据处理的基本流程见图2所示。

## 7.2.2 数据预处理

### 7.2.2.1 主影像选择和影像组合

在满足6.1.1中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。
- 选择设计工作周期内空间基线尽量短的像对，并选择像对中一景影像作为主影像。

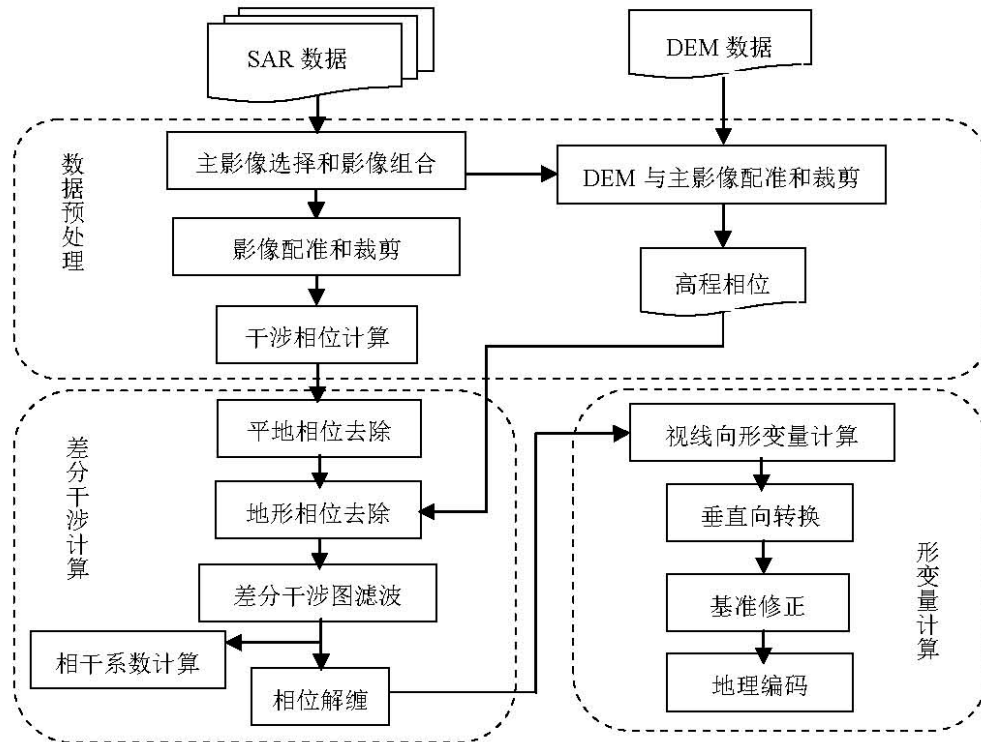


图2 D-InSAR 数据处理工作流程图

### 7.2.2.2 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，具体步骤如下：

- 选择配准算法，设置配准参数，对每个像对进行配准计算。
- 主辅影像配准时要求方位向和距离向误差均小于  $1/8$  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设计的监测工作范围。如有缺失应及时补充数据。
- 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。

### 7.2.2.3 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，具体步骤如下：

- 应对 DEM 采样成与主影像一致的分辨率。
- 将 DEM 与主影像进行配准，配准精度应优于  $0.5$  个像元。
- 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。

#### 7.2.2.4 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。

#### 7.2.3 差分干涉计算

##### 7.2.3.1 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。

##### 7.2.3.2 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。

##### 7.2.3.3 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。

##### 7.2.3.4 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。

#### 7.2.4 形变量计算

##### 7.2.4.1 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  $\Delta r$ 。

##### 7.2.4.2 视线向形变量垂直向转换

依据雷达入射角, 将LOS形变量  $\Delta r$  转换为垂直向形变量  $d$ :

$$d = \Delta r / \cos \theta \dots\dots\dots (1)$$

式中:

$\theta$ ——雷达波入射角。

### 7.2.4.3 地理编码

地理编码的方法可利用DEM产品进行地理编码。具体步骤如下：

- 利用 7.2.1.3 中建立的坐标系查找表,完成地面沉降监测成果由 SAR 影像坐标系到大地坐标系的反变换,即对监测成果垂直向形变量进行地理编码。
- 集合所有地理编码后的点目标,将垂直向形变量的时间单位换算成年,生成年度地面沉降速率,逐像元计算生成地面沉降速率图。

### 7.2.4.4 地面沉降速率基准修正

地理编码后点目标的地面沉降速率应利用水准等高精度控制点数据修正基准,具体步骤为:

- 以同步水准测量结果作为基准参考,在临近点上计算点目标沉降量与水准沉降量之间差值的平均值,即与地面实际沉降量之间存在的整体偏差值。
- 将上一步得到的整体偏差值加入每个点目标的沉降值,修正因参考点不统一产生的 InSAR 结果沉降量的整体偏差,完成基准修正。

## 7.3 PS-InSAR 数据处理

### 7.3.1 基本流程

PS-InSAR方法数据处理的基本流程见图3所示。

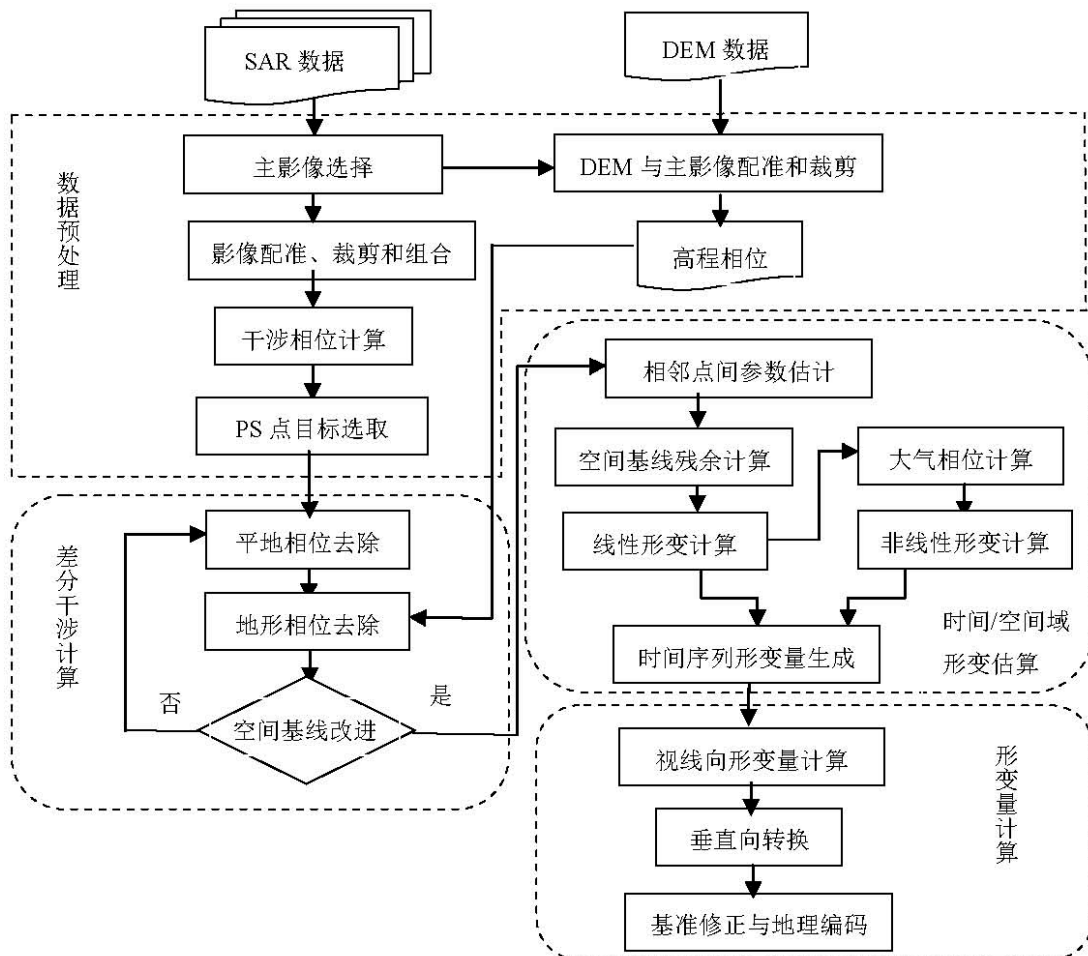


图3 PS-InSAR 数据处理工作流程图

### 7.3.2 数据预处理

7.3.2.1 主影像选择。PS-InSAR 方法宜选择单一主影像。在满足 6.1.1 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：

- a) 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。
- b) 选择时间和空间基线居中的一景作为主影像。

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

- a) 所有影像对主影像进行配准。配准方法见 7.2.2.2。
- b) 将所有数据裁剪成范围一致的区域。剪裁要求见 7.2.2.2。
- c) 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。

7.3.2.3 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 7.2.2.3。

7.3.2.4 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 7.2.2.4。

7.3.2.5 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：

- a) PS 点目标识别。SAR 数据 PS 点目标的识别宜采用幅度离散指数法、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。

### 7.3.3 差分干涉计算

7.3.3.1 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 7.2.3.1。

7.3.3.2 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 FFT 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 7.3.3.1 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。

### 7.3.4 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 DTIN（或称冗余网），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，则可直接输出成果垂直向形变量计算，生成地面沉降速率图。

- c) 非线性形变相位和大气相位计算。从差分干涉相位中去除 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，得到非线性形变相位。
- d) 时间序列形变相位计算。将 b) 步骤中线性形变相位和 c) 中非线性形变相位相加，结合时间基线参数，得到每个 PS 点目标的时间序列形变相位。

### 7.3.5 形变量计算

将PS点目标的形变相位转换为LOS形变量和垂直向形变量，进行基准纠正和地理编码，生成地面沉降速率图，以及其它相关图件。具体工作步骤见7.2.4。

## 7.4 SBAS-InSAR 数据处理

### 7.4.1 基本流程

SBAS-InSAR方法数据处理的基本流程如图4所示。

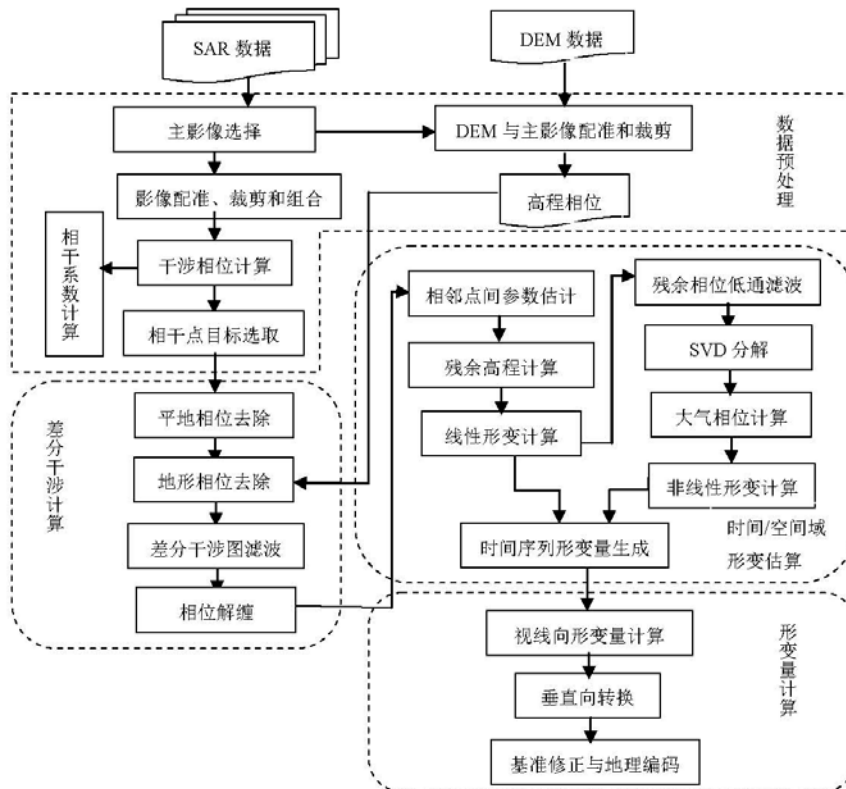


图4 SBAS-InSAR 数据处理工作流程图

### 7.4.2 数据预处理

7.4.2.1 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：

- a) 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。



- 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 6.1.1 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 300m，L 波段空间基线阈值宜定为 500m；时间基线根据监测对象的变化特征而定，时间基线愈短愈好，最大时间阈值不超过 3 年。

7.4.2.2 影像配准、裁剪和组合。所有 SAR 影像的对一景影像进行配准、裁剪，并组合生成时间序列干涉图集，具体工作步骤如下：

- a) 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 7.2.2.2。
- b) 将所有数据裁剪成一致的区域，剪裁要求见 7.2.2.2。
- c) 对所有配准好的干涉像对，按照 7.4.2.1 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。

7.4.2.3 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。具体步骤见 7.2.2.3。

7.4.2.4 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 7.2.2.4。

7.4.2.5 相干系数计算。见 7.2.2.5。

7.4.2.6 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 7.3.2.4 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。

### 7.4.3 差分干涉计算

7.4.3.1 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 7.2.3.1。

7.4.3.2 差分干涉图滤波。见 7.2.3.2。

7.4.3.3 相位解缠。见 7.2.3.3。

### 7.4.4 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 7.3.4 的步骤 a)。
- b) 线性形变相位和残余高程计算。方法见 7.3.4 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 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 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 PS 点目标的时间序列形变相位。

### 7.4.5 形变量计算

同 7.2.4。

## 8 精度评估

### 8.1 评估内容

8.1.1 评价 InSAR 地面沉降测量成果精度的方法宜采用最邻近法等，评价的主要参数有样本数目、误差平均值、相关系数和中误差。

8.1.2 精度评估所采用的数据、评估方法、评估指标、评估结论应写入精度评估报告，并编入成果报告中。

### 8.2 评估方法和指标

#### 8.2.1 最邻近点选取方法和要求

8.2.1.1 在相干目标稀少的地区，宜通过空间插值相干目标点拟合成面，提取水准点位置对应的相干目标拟合面的位置，分别提取水准和相干目标的沉降值，组成一组精度验证数据，收集齐工作区所有验证数据组后，进行精度验证和相关性分析。

8.2.1.2 空间插值方法宜采用克里金插值法。

8.2.1.3 在相干目标密集的地区，宜采用最邻近点法搜索水准点数据附近最邻近相干目标点，组成验证数据组，进行精度验证和相关性分析。其搜索应在 5 个像元以内。

8.2.1.4 评估成果精度应利用中误差和平均误差作为主要参数，样本数目和相关系数作为必要的评估参数。

#### 8.2.2 主要指标算法

##### 8.2.2.1 中误差

假设精密水准测量结果为真值，InSAR 测量沉降量为观测值，以水准观测值与 InSAR 测量值互差中误差  $m_0$  的无偏估计为指标，检验 InSAR 测量精度。中误差计算公式为：

$$m_0 = \pm \sqrt{\frac{[vv]}{n-1}} \dots\dots\dots (2)$$

$$[vv] = \sum_{i=1}^n (dI_i - dL_i)^2 \dots\dots\dots (3)$$

式中：

N——样本数；

$dL_i$  和  $dI_i$ ——分别为样本点  $i$  对应的水准观测值和 InSAR 的观测值。

##### 8.2.2.2 相关系数

利用相关系数检验 InSAR 与水准测量结果的相关程度。相关系数  $\rho$  的计算公式为：

$$\rho = \frac{n \sum_{i=1}^n dL_i dI_i - \sum_{i=1}^n dL_i \cdot \sum_{i=1}^n dI_i}{\sqrt{n \sum_{i=1}^n dL_i^2 - (\sum_{i=1}^n dL_i)^2} \cdot \sqrt{n \sum_{i=1}^n dI_i^2 - (\sum_{i=1}^n dI_i)^2}} \dots\dots\dots (4)$$

式中：

N——样本数

$dL_i$  和  $dI_i$ ——样本点  $i$  对应的水准观测量和 InSAR 的观测值。

### 8.3 精度要求

#### 8.3.1 样本数目要求

8.3.1.1 检验 InSAR 监测成果精度的样本数目应大于等于 15 组。

8.3.1.2 如果地面实测验证数据数量不符合要求，应及时补充数据。

#### 8.3.2 相关系数要求

8.3.2.1 相干系数大于 0.7 时，评估结论认为：InSAR 成果精度可靠，数据可信。

8.3.2.2 相干系数小于 0.7 时，宜重新选择方法（见 7.1），检查数据处理质量，评估结论：InSAR 成果不可靠。

#### 8.3.3 中误差要求

8.3.3.1 InSAR 监测成果的中误差值应满足附录 B 中的成果精度要求。

8.3.3.2 如果验证结果不符合步骤 a) 中要求，宜根据 7.1，调整所选择的方法，检查数据处理质量，再次进行数据处理。

## 9 质量控制

### 9.1 检查内容

9.1.1 质量检查应贯穿于地面沉降 InSAR 数据处理的全过程。

9.1.2 在开展 InSAR 数据处理前，应检查 SAR 原始影像质量和数量及辅助数据的种类、质量、精度和数量。具体内容如下：

a) SAR 数据要求应满足：

- 1) 数据质量应符合设计书中要求；
- 2) 检查数据幅度影像图是否保持一致、完整，无跳变。如出现上述质量问题，应补充或更换数据。
- 3) 检查重轨数据有无数量缺失，所有数据的公共区域是否完全覆盖工作区。如不符合条件，应及时补充数据。

b) 辅助数据要求应满足：

- 1) 检查地形数据的完整性和一致性。如有数据空洞可用其它数据填补空洞。
- 2) 检查光学遥感光学影像数据的云层覆盖量、数据缺失和色调一致情况。
- 3) 确认轨道数据的精度。
- 4) 确认水准数据的精度等级是否符合设计书要求。如不符合要求，则不予采用，或补充满足精度要求的数据。

5) 检查水准数据是否与被检验的 InSAR 成果具有时空一致性, 空间分布是否较均匀。如不符合要求, 需补充数据。

9.1.3 数据处理完成阶段, 应检查阶段成果和工作日志。具体内容包括:

- a) 检查数据处理作业流程是否符合设计书要求, 每个工作步骤的日志是否齐全, 如有缺失, 应尽快补充。
- b) 检查数据处理阶段性成果是否齐全, 关键指标是否符合技术要求。

9.1.4 精度评估阶段, 应检查精度评估结果是否符合任务要求, 成果精度结论是否适当, 报告是否内容完整。

9.1.5 成果资料整理阶段, 应检查成果图、表格和报告的内容、数量和质量。具体内容为:

- a) 检查成果图件的图件类型、比例尺和大地坐标系是否正确, 文件名命名是否正确, 图面要素是否完全、规范, 图面内容是否清晰可辨, 矢量线拓扑关系是否正确等。如不符合要求, 应补充内容或修改错误。
- b) 地面沉降统计表格字段是否完整, 取值范围、数据类型是否符合要求等。
- c) 检查成果报告内容是否齐全。

## 9.2 检查方法和要求

### 9.2.1 日常及阶段性检查

9.2.1.1 参加 InSAR 数据处理的工作人员应在数据处理、成果图件编制等工作过程中填写工作日志及质量检查表, 对所承担的各项内容进行 100% 的自检、互检。

9.2.1.2 InSAR 监测工作的负责人应定期对工作进度和阶段性成果质量进行检查。

### 9.2.2 终期质量检查

9.2.2.1 成果检查方法按 GB/T 24356 规定的标准执行。

9.2.2.2 成果验收时应对照项目任务书, 全面核查项目完成情况, 确认提交成果数据及待归档资料是否规范、齐全。

9.2.2.3 InSAR 监测承担单位(或所属项目)的技术负责人应组织对监测工作的原始资料、关键性中间结果和最终成果资料不少于 20% 的抽检。

## 10 成果编制与提交

### 10.1 资料整理与入库

#### 10.1.1 数据文件

InSAR 地面沉降监测数据和文件是地面沉降数据库的重要组成部分, 其内容应包括:

- a) 文字报告。InSAR 监测工作设计书和地面沉降 InSAR 监测报告
- b) 数据。SAR 原始数据, 地形数据, 光学遥感影像, 轨道数据, 水准数据或 GPS 数据, 其中除 SAR 原始数据外, 其它数据均视项目实际需要所配备的可选数据。
- c) 图件。分为两类主要成果:
  - 1) 阶段成果图包括: 差分干涉相位图、相干图和解缠相位图等;
  - 2) 最终成果图包括: 地面沉降速率图、地面沉降累计沉降量图、地面沉降等值线图 and 地面沉降时间序列图等, 其中除地面沉降速率图是必须汇交成果图外, 其它成果图均可选择制作成果图件。
- d) 统计报表。沉降中心沉降量统计表和沉降面积统计表, 统计报表均为可选择制作报表。

### 10.1.2 入库要求

InSAR地面沉降监测结果所获得各类数据、报表和图形资料，应经检查并按数据库要求格式进行系统整理后，方可输入数据库。数据格式要求如下：

- a) 专题图工程文件及其所包含的所有数据应放在同一文件夹内，一个文件夹存放一个工程文件。以专题图名称命名文件夹名。
- b) InSAR 处理成果数据应以形变成果的矢量点文件和由其插值生成的等值线矢量文件为成果形式，矢量点和矢量线应具备沉降速率或沉降量值、序列号和坐标等属性值。

## 10.2 成果图件编制

### 10.2.1 图件类型

成果图件包括地面沉降速率图、地面沉降累计沉降量图、地面沉降等值线图和地面沉降时间序列图等。成果图应满足基本图面要素等要求，具体见附录C和附录D要求。

### 10.2.2 图件生成

各类成果图件中应包含沉降量属性值的点目标、线矢量目标，属性值可包括沉降速率值、累计沉降量值、时序累计沉降速率值、等值线沉降量值等。按照不同载体类型成果图分为：

- a) 点目标为形变信息载体成果图，底图宜采用 SAR 强度影像或光学遥感影像。
  - 1) 地面沉降速率图。对监测成果点目标的沉降速率属性值按照其大小进行分级设色，生成沉降速率的图。
  - 2) 地面沉降累计沉降量图。对监测成果点目标按照其累计沉降量属性值的大小分级设色，生成累计沉降量图。
- b) 线矢量为形变信息载体成果图，底图宜采用地质图。
  - 1) 地面沉降等值线图。对监测成果等值线按照其沉降量属性值的大小分级设色，并选择均匀间隔的沉降值进行图面数字标注，生成沉降等值线图。
  - 2) 地面沉降时间序列图。对长时间的地面累计沉降量，按照时间排列不同年份的沉降等值线，同一年度等值线宜用同一色系进行分级设色，并对有均匀间隔的沉降值进行图面数字标注，生成沉降时间序列图。

### 10.2.3 制图要求

成果图件以能清晰表达和分辨图面内容为原则。基本制图要求为：

- a) 以地质图、光学遥感影像图或 SAR 幅度影像图为底图，遵照 GB/T 15968-2008 规定制图。
- b) 制图坐标系采用国家 CGCS2000 坐标系。特殊情况下可采用地方独立坐标系。
- c) 制图比例尺可参考 DD2006-02、DD2011-01、DD2011-07 中的有关要求，依据 SAR 图像分辨率确定。
- d) 图件通常按国家标准分幅，特别需要时亦可按应用专题进行工作区分幅。

## 10.3 成果报告编写

10.3.1 地面沉降 InSAR 监测成果报告应按照任务要求和设计规定编制，对所开展的工作进行系统总结，对取得的成果作出综合评价。成果报告的提纲内容可参见附录 E 所示。

10.3.2 大区域、长周期的监测工作通常还需编制阶段成果报告和年度成果报告。

10.3.3 报告中第二章第二节 InSAR 数据处理方法及精度要求部分，应对根据地面沉降严重程度分级所做的 SAR 数据配备和适宜方法选择进行技术设计和方法选择说明，具体选择依据可见附录 B 的表 B.2 所示。

10.3.4 精度检验报告应作为成果报告的报告内容之一。

#### 10.4 成果提交

10.4.1 地面沉降 InSAR 监测工作完成后，应及时将成果报告、图件及相关资料提交主管部门验收。

10.4.2 成果提交内容包括：

- a) 成果图件。地面沉降速率图。可选择附加地面沉降累计沉降量图、地面沉降等值线图和地面沉降时间序列图等；
- b) 成果报告。InSAR 地面沉降监测成果报告。报告中可选择包含精度验证评估报告、和地面沉降统计中心表和统计面积表等。

10.4.3 应按资料管理的有关规定及时完成已验收资料的归档工作。

附 录 A  
(资料性附录)  
星载 SAR 数据表

目前可使用的星载SAR数据见表A. 1。

表A. 1 目前可使用的 SAR 星载数据表

星载SAR系统	ERS-1/2	JERS-1	RADARSAT-1/2	ENVISAT-ASAR	ALOS-PALSAR	TerraSAR-X/TanDEM-X	COSMO-SkyMed
所属国家/机构	欧空局	日本	加拿大	欧空局	日本	德国	意大利
运行时间	1:1991~2000 2:1995~2012	1992~1998	1:1995~ 2:2007~	2002~2012	2006~2011	2007~	2007~
轨道高度 (km)	790	568	790	800	691	514	620
波段 (cm)	C (5.6)	L (23.5)	C (5.6)	C (5.6)	L (23.5)	X (3.1)	X (3.1)
极化方式	VV	HH	全极化	HH/VV	全极化	全极化	HH/VV
侧视角 (°)	23	35	23-65	15-45	8-50.8	20-55	19.7-45.5
轨道倾角 (度)	98.49	98.16	98.6	98.55	98.16	97.44	97.86
重复周期 (天)	35	44	24	35	46	11	16
像元大小 (m)	25	25	3-30	25-100	7-100	1-16	1-100
影像幅宽 (km)	100	80	50-500	100-400	30-350	15-100	15-200
可否编程定制	否	否	是	是	否	是	是
系统带宽(MHz)	15.5	15	11.6,17.3*, 30,50,100	16	14*,28	73.5*,300	100*,150
临界空间基线 (m)	983	5217	1094	990	3235	2718	3068
备注	—	—	多侧视角	多侧视多极化	多侧视多极化	多侧视多极化	多侧视多极化
注 1: 所有数据以 2012 年度为准。							
注 2: 表中带*标注的数值是计算临界空间基线的参数数据。							

**附录 B**  
**(资料性附录)**

**InSAR 主要监测方法适用条件表**

依据地面沉降速率进行地面沉降严重程度的分级见表B. 1；D-InSAR、SBAS-InSAR和PS-InSAR三种不同监测方法所需要的数据量、主要用途、监测精度和应用条件见表B. 2。

**表 B. 1 地面沉降严重程度分级**

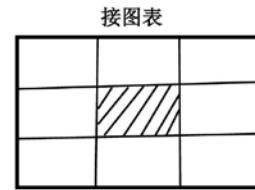
指标	低	较低	中等	较高	高
沉降速率/ (mm/a)	<10	10~30	30~50	50~80	>80

**表 B. 2 InSAR 主要监测方法适用条件表**

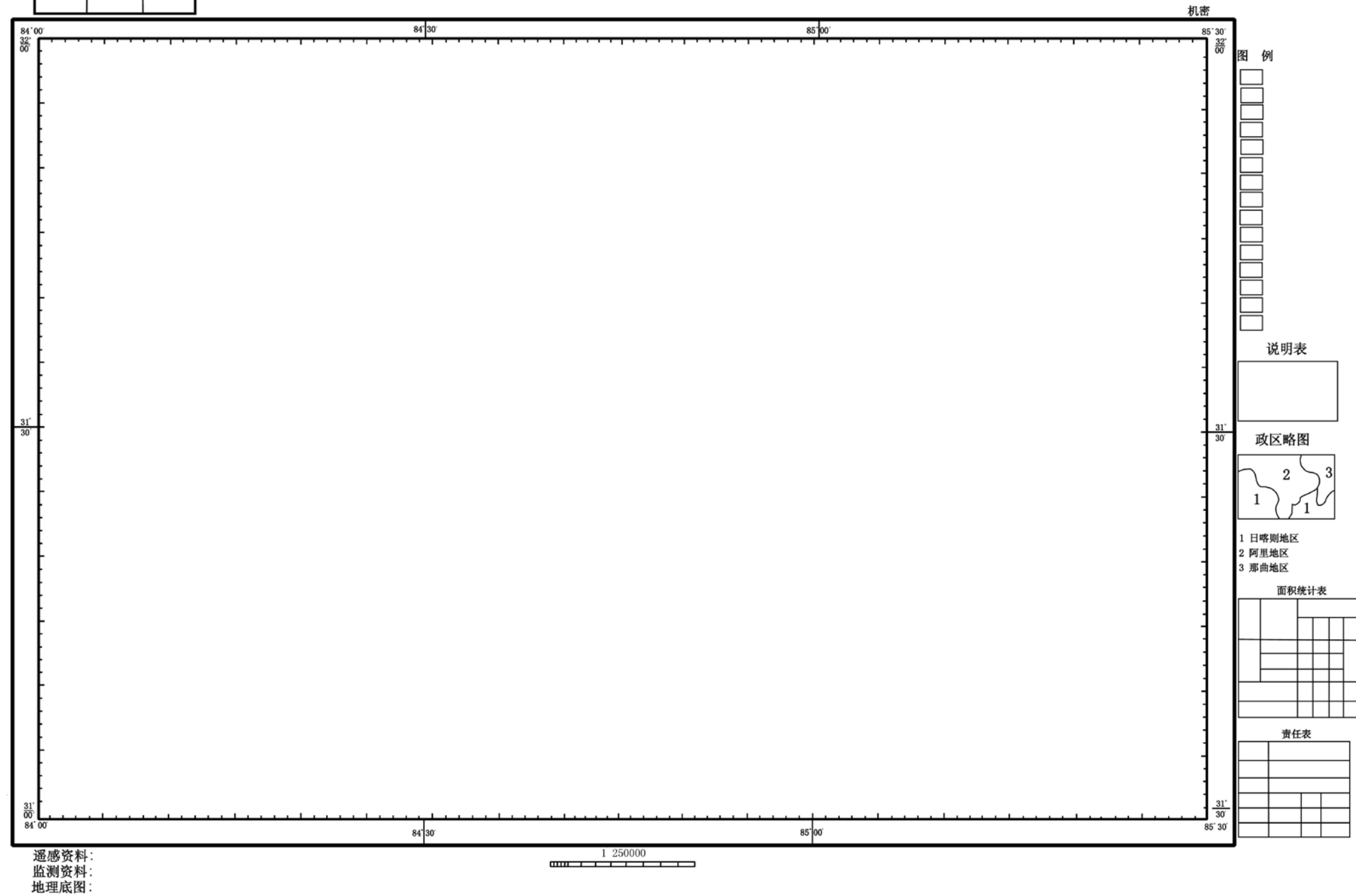
方法	最少SAR数据量 (景)	主要用途	精度	监测应用条件	适用监测地面沉降严重程度分级
D-InSAR	2	地面沉降	1~3cm	适用时间间隔短和天气/季节接近，以避免受到过多的时间去相干和大气的影晌。主要适宜于沉降趋势调查。	中等以上
SBAS-InSAR	>8景	地面沉降	<1cm	通过较多的SAR干涉组合，获取地面沉降时间序列信息	低~高等
PS-InSAR	>25景	地面沉降	5mm	适用于时间间隔长、天气状况差异大。一般要求25景影像。PS点要求城镇地区平均有10点/km <sup>2</sup> ；非城镇地区有1点/km <sup>2</sup> 。可以获取PS点的形变时间序列，DEM改正值和所有SAR影像的大气延迟量。	低~高等



附录 C  
 (规范性附录)  
 地面沉降 InSAR 监测 (1:250000) 成果图图式



中华人民共和国  
 XXXX 地面沉降速率图  
 H45C002002





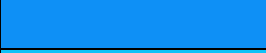


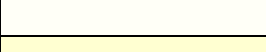
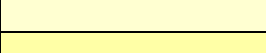



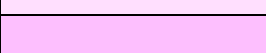











注1: 图改自DD2011-07附录J环境地质遥感监测 (1:250000) 成果图图式。



附 录 D  
 (资料性附录)  
 地面沉降速率值对应分级设色图例表

地面沉降速率值对应分级设色图例见表D. 1.

表D. 1 地面沉降速率值对应分级设色图例

地面沉降速率值 (单位 mm)	填充颜色的 R. G. B 比例组合	填充颜色示例
>50	(16. 14. 246)	
40~50	(16. 92. 247)	
30~40	(14. 144. 246)	
20~30	(15. 194. 247)	
10~20	(15. 220. 246)	
0~10	(17. 237. 247)	
0~-10	(255. 255. 209)	
-10~-20	(255. 255. 166)	
-20~-30	(255. 255. 122)	
-30~-40	(255. 255. 25)	
-40~-50	(255. 223. 254)	
-50~-60	(253. 191. 254)	
-60~-70	(254. 163. 255)	
-70~-80	(255. 134. 246)	
-80~-90	(255. 92. 246)	
-90~-100	(255. 0. 253)	
-100~-110	(228. 0. 220)	
-110~-120	(191. 0. 191)	
-120~-130	(179. 0. 164)	
-130~-140	(192. 0. 0)	
-140~-150	(125. 0. 0)	
<-150	(74. 0. 0)	

## 附录 E

(规范性附录)

### 地面沉降干涉雷达监测成果报告编写提纲

#### 第一章 前言

- 第一节 项目概况
- 第二节 工作区区域地质背景
- 第三节 工作完成情况
- 第四节 取得的成果与进展

#### 第二章 数据与技术方法

- 第一节 遥感数据简介
- 第二节 InSAR数据处理方法及精度要求
- 第三节 实地调查
- 第四节 已有地面沉降监测成果

#### 第三章 数据获取与处理

- 第一节 数据获取
- 第二节 数据处理
- 第三节 成果精度评估
- 第四节 成果图编制

#### 第四章 地面沉降特征

- 第一节 地面沉降基本特征
- 第二节 地面沉降与地质环境关系研究
- 第三节 典型地面沉降体

#### 第五章 专题应用研究及分析（可选内容）

可针对重大工程、矿山塌陷、构造形变等进行专题应用研究，并对成果进行分析说明。

#### 第六章 结论与建议

- 第一节 结论
- 第二节 进一步工作建议

#### 参考文献

## 参 考 文 献

- [1] GB 3101-93 有关量、单位和符号的一般原则
  - [2] GB 3102.1-93 空间和时间的量和单位
  - [3] GB/T 17228-1998 地质矿产勘查测绘术语
  - [4] GB/T 18207.2-2005 防震减灾术语 第2部分：专业术语
  - [5] GB/T 14158 区域水文地质工程地质环境地质综合勘查规范（1：50000）
  - [6] CJJ/T 8-2011 城市测量规范
  - [7] CJJ/T 151-2010 城市遥感信息应用技术规范
  - [8] DG/T J08-2051-2008 地面沉降监测与防治技术规程
  - [9] DD2006-02 地面沉降监测技术要求
  - [10] DD2008-03 城市环境地质调查评价规范
  - [11] DZ/T 0151-95 区域地质调查中遥感技术规定
  - [12] DZ/T0154-95 地面沉降水准测量规范
  - [13] DZ/T 0190-1997 区域地质环境勘查遥感技术规程
  - [14] DZ/T 0195-1997 物探化探遥感勘查技术规程规范编写规定
  - [15] 岳建平，方露等著，城市地面沉降监控理论与技术，科学出版社，2012年
-