



中华人民共和国国家标准

GB/T 44146—2024

基于 InSAR 技术的地壳形变监测规范

Specification for crustal deformation monitoring based on InSAR technology

2024-06-29 发布

2025-01-01 实施

国家市场监督管理总局
国家标准化管理委员会 发布

目 次

前言 III

引言 IV

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 3

4 基本要求 4

5 总体流程 4

6 资料与数据准备 5

 6.1 基础资料收集 5

 6.2 SAR 数据获取 5

7 形变起始参考点选择 6

8 InSAR 数据处理 6

 8.1 处理方法选择 6

 8.2 D-InSAR 数据处理 7

 8.3 PS-InSAR 数据处理 11

 8.4 SBAS-InSAR 数据处理 12

9 质量保障..... 14

 9.1 质量检查 14

 9.2 真实性检验 15

10 成果编制 16

 10.1 数据成果 16

 10.2 图件成果 16

 10.3 文档成果 16

附录 A (资料性) 常用星载 SAR 数据格式及参数列表 17

附录 B (资料性) 典型形变场的特征及处理方法 21

附录 C (资料性) 不同波段 SAR 数据的地壳形变 InSAR 监测精度 22

附录 D (资料性) 误差类型与误差校正 23

附录 E (资料性) InSAR 地壳形变监测结果的对比验证方法 24

附录 F (资料性) 成果图示例 25

附录 G (资料性) 地壳形变模型反演方法 27

参考文献 28

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。

请注意本文件的某些内容可能涉及专利。本文件的发布机构不承担识别专利的责任。

本文件由中国科学院提出。

本文件由全国遥感技术标准化技术委员会(SAC/TC 327)归口。

本文件起草单位：应急管理部国家自然灾害防治研究院、北京大学、长安大学、中国地震局地质研究所、中国科学院空天信息创新研究院、武汉大学、中南大学、中国自然资源航空物探遥感中心、首都师范大学、中山大学、同济大学、深圳大学、中国地震局第一监测中心、中国科学院深圳先进技术研究院、自然资源部卫星遥感应用中心、湖北省地震局、北京市地震局、天津市地震局。

本文件主要起草人：张景发、曾琪明、李振洪、单新建、王超、刘照言、廖明生、李志伟、葛大庆、常占强、李永生、田云锋、罗毅、冯万鹏、姜文亮、李强、王新鸿、梁存任、王腾、胡俊、常玲、张磊、汪驰升、张庆云、刘斌、张磊、孙鹭怡、李涛、乔学军、胡乐银、屈春燕、龚丽霞、田甜、朱武、申文豪。



引 言

近年来,国内外星载合成孔径雷达(SAR)数据资源逐渐丰富,合成孔径雷达干涉测量技术(InSAR)发展迅速,应用领域越来越广,特别是在地壳形变测量工作中发挥着越来越重要的作用。目前,SAR数据来源多样,InSAR技术策略各有侧重、处理流程复杂,不同InSAR处理软件要求也存在一定差异,且InSAR技术应用人员专业背景和知识水平不尽相同。因此,把现阶段业已成熟的经验总结出来,从InSAR处理各环节上进行规范,以保证InSAR处理成果质量并提高规范性与工作效率,既必要也切实可行。

基于 InSAR 技术的地壳形变监测规范

1 范围

本文件规定了基于 InSAR 技术的地壳形变监测的基本要求、总体流程、资料与数据准备、形变起始参考点选择、InSAR 数据处理、质量保障和成果编制。

本文件适用于基于星载 SAR 数据开展的地壳形变监测。利用星载 SAR 数据开展的其他地表固体形变监测参照使用。

2 规范性引用文件

本文件没有规范性引用文件。

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文件。

3.1.1

地壳形变 **crustal deformation**

在地球内力与外力的作用下,地壳几何形态产生的变化。

[来源:GB/T 18207.2—2005,4.4.1]

3.1.2

同震形变 **coseismic deformation**

发震断层在地表造成的永久静态位移。

3.1.3

震间形变 **interseismic deformation**

同一地域内两次大震之间产生的地壳形变。

注:震间形变持续时间可达数十年、数百年甚至千年。

3.1.4

合成孔径雷达 **synthetic aperture radar; SAR**

利用雷达与目标的相对运动,把尺寸较小真实天线孔径用信号处理方法合成为一个较大等效天线孔径的成像雷达。

[来源:CH/T 3009—2012,3.1]

3.1.5

单视复数图像 **single-look complex image; SLC**

未作多视处理的复数形式的 SAR 图像。

[来源:GB/T 32874—2016,3.1.8]

3.1.6

视线向 **line of sight; LOS**

雷达天线相位中心指向地面目标的方向。

3.1.7

主图像 primary image

在两幅单视复数图像进行干涉处理时,作为配准参照的图像。

3.1.8

辅图像 secondary image

在两幅单视复数图像进行干涉处理时,参照主图像进行配准的图像。

3.1.9

空间基线 spatial baseline

对同一目标进行两次 SAR 成像时,雷达天线相位中心间的空间连线向量。

3.1.10

垂直基线 perpendicular baseline

空间基线在垂直于主图像视线向的投影分量。

3.1.11

时间基线 temporal baseline

两幅 SAR 图像获取的时间间隔。

3.1.12

临界空间基线 critical spatial baseline

在无其他失相干因素影响下,使地面散射体的两次观测 SAR 回波信号之间相干性降为零的空间垂直基线长度。

3.1.13

临界时间基线 critical temporal baseline

在无其他失相干因素影响下,使地面散射体的两次观测 SAR 回波信号之间保持相干性的最长时间间隔。

3.1.14

复图像配准 complex image co-registration

对同一地区不同时相所获得的雷达复图像,经几何变换使其同名点在空间位置对应同一地面目标的处理方法。

[来源:CH/T 6006—2018,3.1.10,有修改]

3.1.15

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

利用两幅经配准的 SAR 复图像共轭相乘得到的干涉相位以获取图像覆盖区域地面高程或地表形变信息的一种空间对地观测技术。

3.1.16

干涉图 interferogram

干涉相位的二维分布图。

注:一般表现为条纹状。

[来源:GB/T 32874—2016,3.1.12,有修改]

3.1.17

相干系数 coherence coefficient

取值为两幅 SAR 复图像配准区域中对应像素的相位相关系数,用于衡量两幅 SAR 复图像对应像素的相位相关程度和干涉图的质量。

注:其值域为 $[0,1]$ 。

[来源:GB/T 32874—2016,3.1.10,有修改]

3.1.18

失相干 decorrelation

由于空间基线、时间基线、热噪声、多普勒中心频率漂移以及地面散射特性的改变等导致的相干性降低的现象。

3.1.19

平地相位 earth-flattening phase

因 SAR 视线向距离的变化而在地球参考椭球面上产生的干涉相位。

[来源:GB/T 32874—2016,3.1.13,有修改]

3.1.20

相位解缠 phase unwrapping

将干涉相位由主值(模为 2π)恢复为全值的过程。

[来源:GB/T 32874—2016,3.1.14,有修改]

3.1.21

合成孔径雷达差分干涉测量 differential interferometric synthetic aperture radar;D-InSAR

对覆盖同一地区的两期及以上 SAR 图像进行干涉处理,得到图像间同名像元点的相位差,并联合外部 DEM 等参考数据去除地形、平地相位贡献,以得到卫星雷达视线方向上距离变化信息的一种 InSAR 处理方法。

3.1.22

合成孔径雷达时序干涉测量 time series InSAR;TS-InSAR

同一颗或编队 SAR 卫星对同一地区以相同的成像模式、入射角和极化方式获取的多次重复观测 SAR 图像序列,进行干涉处理,通过时序分析,估计并削弱轨道误差、地形数据误差、大气延迟等影响,以得到长时序地表形变信息的一种 InSAR 处理方法。

3.1.23

永久散射体合成孔径雷达干涉测量 persistent scatterer InSAR;PS-InSAR

通过对在较长时间基线和较大空间基线,甚至超过临界空间基线情况下,仍保持较高相干性的点目标进行干涉处理,通过时序分析,估计并削弱轨道误差、地形数据误差、大气延迟等影响,以得到长时序地表形变信息的一种 InSAR 处理方法。

3.1.24

小基线集成孔径雷达干涉测量 small baseline subset InSAR;SBAS-InSAR

对同一空间范围的长时序 SAR 图像集,设定较短时空基线阈值以确保干涉图的相干性,形成一组/多组干涉对集,利用最小二乘或奇异值分解开展时序分析,估计并削弱轨道误差、地形数据误差、大气延迟等影响,以得到长时序地表形变信息的一种 InSAR 处理方法。

3.1.25

地壳时序形变图 time series crustal deformation map

利用 TS-InSAR 方法获取的地壳形变信息制作的体现地壳形变与时间关联性的序列图组。

3.2 缩略语

下列缩略语适用于本文件。

DEM:数字高程模型(digital elevation model)

D-InSAR:合成孔径雷达差分干涉测量(differential interferometric synthetic aperture radar)

GNSS:全球导航卫星系统(global navigation satellite system)

InSAR:合成孔径雷达干涉测量(interferometric synthetic aperture radar)

PS-InSAR:永久散射体合成孔径雷达干涉测量(persistent scatterer InSAR)

SAR:合成孔径雷达(synthetic aperture radar)

SBAS-InSAR:小基线集成孔径雷达干涉测量(small baseline subset InSAR)

SLC:单视复数图像(single-look complex image)

SRTM:航天飞机雷达地形测绘任务(shuttle radar topography mission)

TOPS:步进扫描地形观测(terrain observation by progressive scans)

TS-InSAR:合成孔径雷达时序干涉测量(time series InSAR)

4 基本要求

采用 InSAR 技术开展地壳形变监测,应满足以下基本要求。

- a) 星载 SAR 数据成像后统一采用 SLC 数据格式。
- b) 测量单次地壳形变,至少获取 ≥ 50 mm 地壳形变发生前后各 1 期 SAR 数据;测量时序地壳形变,宜积累不少于 15 期 SAR 数据。
- c) 优先选用卫星轨道与地壳运动方向的夹角 $\leq 165^\circ$ 且 $\geq 15^\circ$ 的 SAR 数据。
- d) 不宜在如下地区开展基于 InSAR 技术的地壳形变监测:
 - 1) 沙漠、水体、积雪、沼泽等地区;
 - 2) 完全被浓密植被覆盖地区。

5 总体流程

基于 InSAR 技术的地壳形变监测总体流程见图 1,主要内容如下。

- a) 资料与数据准备。根据工作目标及地壳形变特性确定工作区范围,收集工作区的基础资料和 SAR 数据。常用星载 SAR 数据格式及参数列表见附录 A。
- b) 形变起始参考点选择。宜选择无形变区高相干点作为形变计算起始参考点。
- c) InSAR 数据处理。根据 SAR 数据累积量等因素选择 D-InSAR 或 TS-InSAR(包括 PS-InSAR 和 SBAS-InSAR)方法进行干涉处理。典型形变场的特征及处理方法见附录 B。
- d) 质量保障。检查处理后获得的地壳形变图质量,并与其他独立的地壳形变测量成果进行不低于观测成果 5%样本量的对比验证。优先采用直接对比验证,适宜时可采用交叉对比验证和间接对比验证。
- e) 成果编制。收集整理处理过程中的各类数据成果、图件成果和文档成果,形成工作报告。

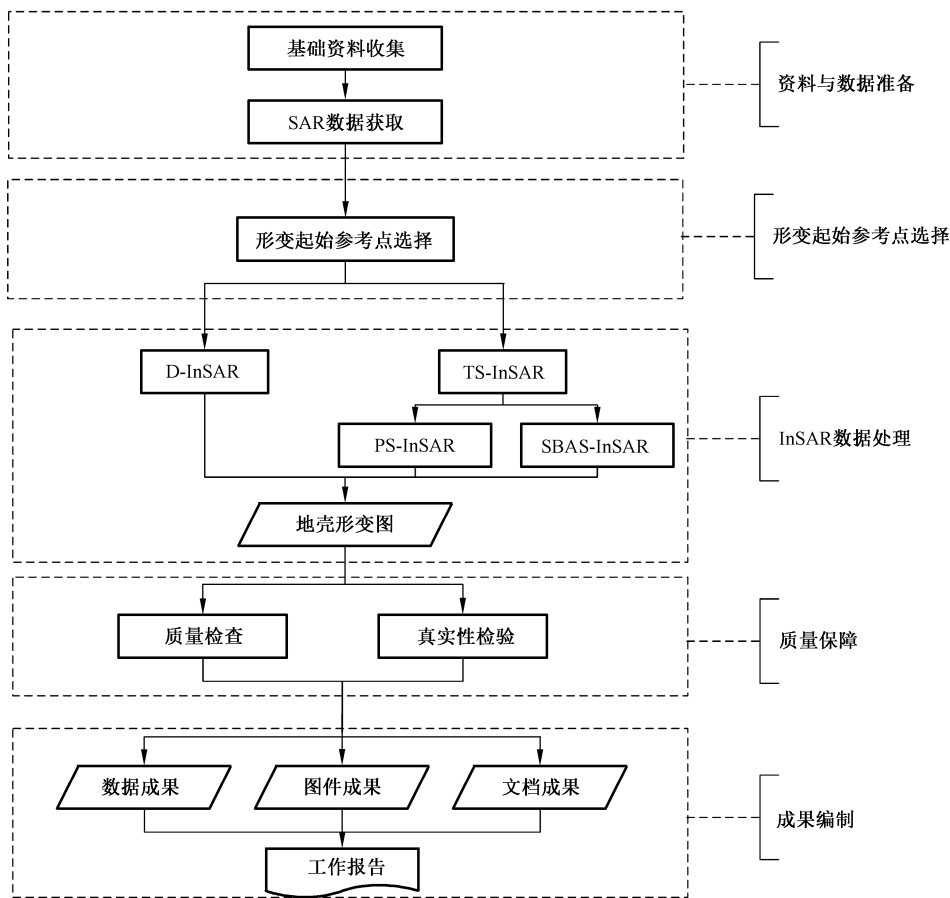


图 1 基于 InSAR 技术的地壳形变监测总体流程图

6 资料与数据准备

6.1 基础资料收集



应收集以下资料。

- a) 与地壳应力和形变测量有关的各类资料。例如：工作区内水准网、GNSS 网的布设情况及测量资料；活动断裂带、地裂缝、滑坡体等调查资料；地震现场调查资料；地下水和矿产资源开采情况资料。
- b) 与干涉失相干有关的资料。例如厚植被、冰雪覆盖、强降雨导致洪涝等。
- c) 地面覆盖资料。包括：工作区主要地面覆盖类型；对 SAR 观测有影响的各种地物分布情况，包括大面积湖泊、河流、农田等低反射地物等。
- d) 气象资料。包括气温、湿度、降雨、降雪等资料。
- e) DEM 数据。其覆盖范围应略大于相应 SAR 数据的覆盖范围；格网间隔宜接近 SAR 数据分辨率。

6.2 SAR 数据获取

应收集工作区范围内 SAR 数据以及卫星所提供的精密轨道数据。组成数据像对或数据集的 SAR 数据获取要求如下。

- a) 波源。应选择具有相同工作频率、带宽、脉冲重复频率、极化方向、轨道倾角且入射角相近的相干波源为 SAR 数据源。
- b) 轨道。应获取同一轨道且覆盖相同工作区的 SAR 数据；卫星飞行姿态稳定，L、S、C 波段的卫星轨道定位精度宜优于 0.05 m，X 波段的卫星轨道定位精度宜优于 0.03 mm。
- c) 波长(λ)。应结合地物覆盖和任务要求选用 L 波段($\lambda \approx 0.23$ m)到 X 波段($\lambda \approx 0.03$ m)的 SAR 数据。不同波段 SAR 数据的地壳形变 InSAR 监测精度见附录 C。
- d) 极化方式。优先选用同一极化方式的 SAR 数据，如垂直极化或者水平极化的 SAR 数据。
- e) 图像重叠率。当大尺度工作区需要同轨或跨轨的多景 SAR 图像进行拼接时，同轨相邻两景 SAR 图像的重叠率应超过沿轨图像长度的 15%；跨轨数据相邻两景图像的重叠率应超过图像幅宽的 15%。
- f) 时间基线。应选择时间间隔较短的 SAR 数据组成像对或数据集。临界时间基线与 SAR 波长、信号带宽、气候条件、植被覆盖程度等有关。干旱、少植被地区，即使时间基线较长（如 10 年甚至更长），干涉图依旧可保持较好相干性；植被较密的地区，即使时间基线较短（如几天或更短），干涉失相干现象依旧可能严重。
- g) 空间基线。应选择小于临界空间基线的 SAR 数据组成像对或数据集。临界空间基线与 SAR 波长、信号带宽、卫星飞行高度、雷达入射角等有关。随波长增加，临界空间基线相应变长；为保证较高的相干性，较理想的空间基线在 X 波段小于或等于 100 m，C 波段小于或等于 300 m，L 波段小于或等于 1 000 m。

7 形变起始参考点选择

宜在无形变区内选择易辨别的高相干地物作为形变计算起始参考点。不宜在矿区塌陷区、油气开采区、地质灾害区等潜在或已知存在形变的区域，以及在沙漠、沼泽、冻土、冰雪、森林、水体等低相干区域选择形变起始参考点。典型形变的形变起始参考点选取要求如下：

- a) 同震形变，宜选择距震中较远的无形变区内的易辨别、高相干地物；
 - b) 震间形变，宜选择垂直于断层方向，距活动断层较远的无形变区内的易辨别、高相干地物；
 - c) 震后形变，宜选择距发震断层较远的无形变区内的易辨别、高相干地物；
 - d) 火山形变，宜选择距火山口较远的无形变区内的易辨别、高相干地物；
 - e) 地面沉降，宜选择沉降区范围之外，无形变区内的易辨别、高相干地物；
 - f) 地质灾害形变，宜选择远离地质灾害区的无形变区内的易辨别、高相干地物。
- 形变起始参考点亦可选取其他高精度技术手段持续监测的易辨别的高相干地物。

8 InSAR 数据处理

8.1 处理方法选择

根据地壳形变量（典型形变场的形变量见附录 B）、持续时间、SAR 数据累积量、数据时间间隔分布、工作目标等选择 InSAR 处理方法。

- a) 当形变量大于或等于 0.02 m 时，宜选择 D-InSAR 方法；如有多期 SAR 数据，亦可选择 TS-InSAR 方法。
- b) 当地表形变量小于 0.02 m，宜选择 TS-InSAR 方法。
- c) 当选择 TS-InSAR 方法时，可根据累积 SAR 数据集内各数据像对的垂直基线情况，选择 PS-InSAR 或 SBAS-InSAR 方法；根据垂直基线分成几个集合组，每个集合组内垂直基线均满足 6.2 g) 中有关空间基线的要求，且单个集合组内 SAR 数据累积量至少 15 期时，应选择 SBAS-

InSAR 方法;当集合组只有 1 个时,应选择 PS-InSAR 方法。

8.2 D-InSAR 数据处理

8.2.1 数据处理流程

D-InSAR 数据处理流程见图 2。

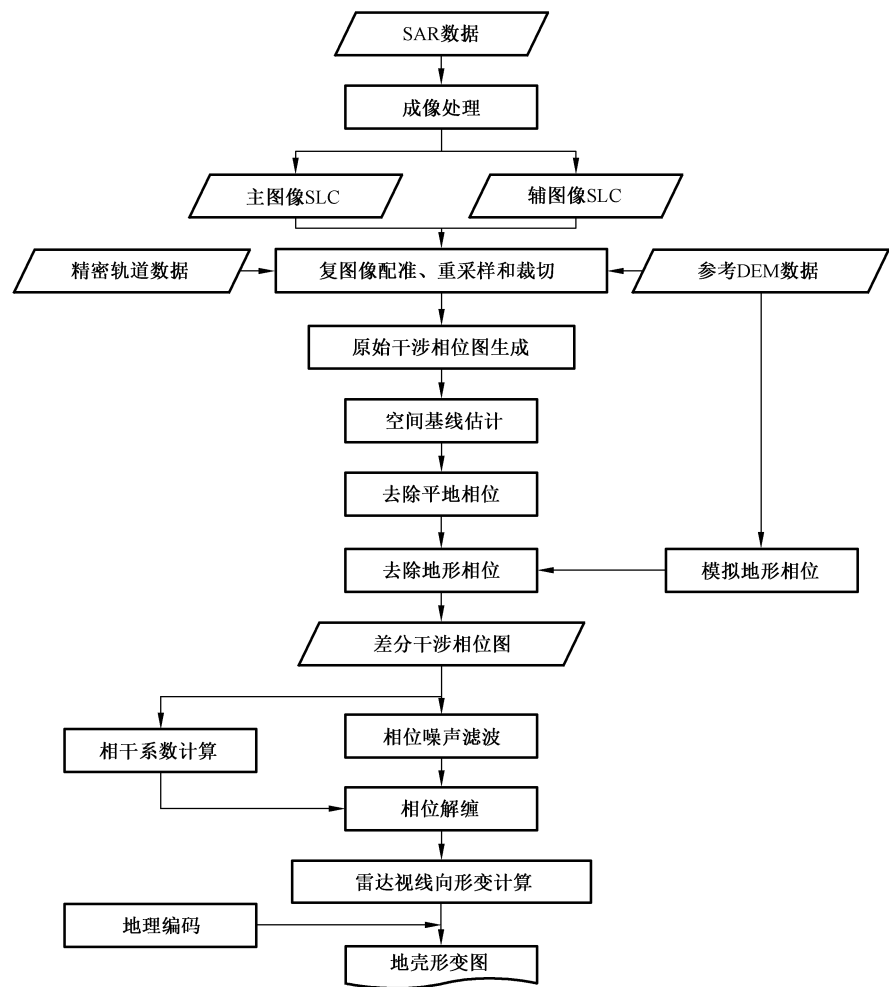


图 2 D-InSAR 处理流程图

8.2.2 数据处理步骤

8.2.2.1 成像处理

使用存档的 SAR 原始数据时,应首先进行成像处理,生成主图像 SLC 和辅图像 SLC。对于 SAR 原始数据可选择下列一种成像算法生成 SLC 数据:

- 距离-多普勒算法(Range-Doppler Algorithm,RDA);
- 频调变标算法(Chirp Scaling Algorithm,CSA);
- 波数域算法(ω -k Algorithm, ω -k)。

同一组 SLC 数据集生成应采用单一成像算法。

8.2.2.2 复图像配准、重采样和裁切

按以下步骤对主图像、辅图像和 DEM 进行图像配准和重采样,可输入精密轨道数据参与图像配准和重采样。

- a) 宜使用与 SAR 数据分辨率接近、源于 SRTM 的 DEM 数据,应依据主图像的卫星轨道参数将 DEM 转换成主图像格网的 SAR 模拟图像。
- b) 宜使用互相关和几何配准方法计算主图像和辅图像之间特征像元点的偏移量,实现粗配准。
- c) 按以下方式实现精配准:
 - 非 TOPS 模式下宜使用最大相关系数法、最大频谱法等精配准方法实现 SAR 图像精配准,配准精度应达到 1/10 个 SAR 像元;
 - TOPS 模式下宜使用增强谱分集法(enhanced spectral diversity,ESD)实现 SAR 图像精配准,配准精度应达到 1/1 000 个 SAR 像元。
- d) 精配准后,将辅图像重采样至主图像相同格网上。
- e) 根据主图像和辅图像相对应的范围、任务要求进行裁切。

8.2.2.3 原始干涉相位图生成

按以下步骤生成原始干涉相位图。

- a) 图像预滤波:宜对主图像和辅图像进行预滤波,预滤波包括距离向和方位向滤波,分别去除垂直基线和斜视角不同导致的不重叠频谱。

注 1: TOPS 模式数据一般不做方位向预滤波。

- b) 原始干涉相位图生成:按公式(1)计算得到原始干涉相位图。

$$\begin{aligned}\phi_{\text{int}} &= \text{angle}(S_1 \cdot S_2^*) \\ &= \text{angle}(|S_1| \cdot |S_2| e^{j(\Psi_1 - \Psi_2)})\end{aligned}\quad \dots\dots\dots (1)$$

式中:

- ϕ_{int} ——原始干涉相位图,单位为弧度(rad);
- $\text{angle}()$ ——取相位值运算符;
- S_1 、 S_2 ——分别为主图像和辅图像对应像元的复数值;
- S_2^* ——辅图像 S_2 经过复共轭运算后的复数值;
- j ——虚数单位, $j = \sqrt{-1}$;
- Ψ_1 、 Ψ_2 ——分别为 S_1 和 S_2 的相位值。

注 2: 基于 InSAR 技术的地壳形变监测是去除原始干涉相位图中,除地壳形变相位之外的其他相位成分的过程。原始干涉相位图的干涉相位构成及误差类型与误差校正见附录 D。

8.2.2.4 空间基线估计

宜使用以下方法估计干涉空间基线:

- 如果有精密轨道参数,使用主图像和辅图像的卫星精密轨道参数,估计最优空间基线;
- 如果无精密轨道参数,可基于地面控制点及其高程信息,采用最小二乘法精化基线。

8.2.2.5 去除平地相位

按以下步骤去除原始干涉相位图中的平地相位。

- a) 获取 SAR 数据中轨道参数,计算主图像和辅图像沿方位向每一行的平行基线。
- b) 计算四个顶点和方位向中间行的平地相位,按公式(2)计算:

$$\phi_{\text{flat}} = \frac{4\pi}{\lambda} B_{//} \dots\dots\dots (2)$$

式中:

- ϕ_{flat} ——平地相位,单位为弧度(rad);
- λ ——SAR 波长,单位为米(m);
- $B_{//}$ ——空间平行基线,单位为米(m)。

- c) 将步骤 b)的计算结果进行二维多项式拟合,得到整幅图像各点的平地相位,也可以直接按公式(3)计算整幅图像的二维平地相位,再将其转化为平地参考相位复数值。

$$f(x,y) = \sum_{i=0}^d \sum_{j=0}^d a_{i-j} x^{i-j} y^j \dots\dots\dots (3)$$

式中:

- $f(x,y)$ ——二维平地相位;
- x,y ——图像点位置坐标;
- a_{i-j} ——多项式系数;
- d ——多项式系数的阶, $d=1,2,3$ 。

注:平地参考相位计算原理:选择参考椭球基准面,在同一参照坐标系下,确定基准面中任一点的坐标和该点所对应的两次成像卫星的位置,计算场景内基准面上的点到卫星的距离差。对多个点的计算结果进行最小二乘拟合,就得到基准面的参考相位。从干涉相位中减去参考相位就得到由地形高差以及形变引起的相位图。

- d) 按公式(4),将主图像、辅图像及平地参考相位复数值进行复共轭相乘即得到去除平地相位后的干涉相位图。

$$\phi_{\text{flattening}} = \text{angle}(S_1 \cdot S_2^* \cdot R^*) \dots\dots\dots (4)$$

式中:

- $\phi_{\text{flattening}}$ ——去除平地相位后的干涉相位图,单位为弧度(rad);
- $\text{angle}()$ ——取相位值运算符;
- S_1 ——主图像对应像元的复数值;
- S_2^* ——辅图像 S_2 经过复共轭运算后的复数值;
- R^* ——平地参考相位图像 R 对应像元经过复共轭运算后的复数值。

8.2.2.6 模拟地形相位

宜使用与 SAR 图像分辨率接近的源于 SRTM 的高精度 DEM 数据,按以下步骤模拟地形相位:

- a) 建立 SAR 成像参数的图像坐标与 DEM 大地坐标之间映射关系,形成 DEM 数据的模拟地形相位图像;
- b) 将模拟地形图像与真实 SAR 图像进行精确配准,获得真实 SAR 图像坐标系的高程数据;
- c) 利用主图像和辅图像的精密轨道数据计算真实 SAR 图像中每个像元的模拟地形相位。

8.2.2.7 去除地形相位

从 8.2.2.5 中获得的去除平地相位后的干涉相位中减去 8.2.2.6 获取的模拟地形相位,得到去除地形相位后的干涉相位图(差分干涉相位图)。

8.2.2.8 相干系数计算

按公式(5)计算去除地形相位后的干涉相位图中各个像素点的相干系数,得到相干性图。

$$\gamma = \frac{|E\{S_1 \cdot S_2^*\}|}{\sqrt{E\{|S_1|^2\} \cdot E\{|S_2|^2\}}} \dots\dots\dots (5)$$



式中:

γ ——相干系数, 值域为 $[0, 1]$;

$E\{\}$ ——数学期望;

S_1, S_2 ——分别为滑动窗口中主图像和辅图像对应像元的复数值;

S_2^* ——辅图像 S_2 经过复共轭运算后的复数值。

注: 计算相关系数的滑动窗口一般设为 5×5 。

8.2.2.9 相位噪声滤波

可采用下列滤波方法去除 8.2.2.7 得到的干涉相位图中的噪声影响:

——频率域滤波方法: 带通滤波、低通滤波、Goldstein 滤波等;

——空间域滤波方法: 等值线滤波、中值滤波、均值滤波、圆周期滤波等;

——非局域滤波(Non-local filtering)方法: 方向滤波、小波变换滤波、自适应滤波等。

对于滤波后的干涉相位图, 应检查工作区内相干性图的相干系数。如果区域的大部分相干系数小于 0.3, 则需要变换滤波方法进行相位噪声滤波。

8.2.2.10 相位解缠

查看 8.2.2.9 得到的差分干涉相位图中的相干性分布, 应掩膜低相干区域, 使用周边可靠数值填充或插值; 应采用一定的解缠方法处理较高相干性的区域; 对同震形变梯度较大区域, 可采用弹性半空间位错模型辅助解缠, 从干涉图中扣除源于模型模拟的一阶地壳形变, 再解缠残差相位。

按公式(6)计算解缠后的真实相位。

$$\Phi_{i,j} = \phi_{i,j} + 2k\pi \quad \dots\dots\dots (6)$$

式中:

$\Phi_{i,j}$ ——差分干涉相位图解缠后的真实相位;

$\phi_{i,j}$ ——差分干涉相位图的缠绕相位, $\phi_{i,j} \in (-\pi, \pi]$;

k ——正整数, 为相位缠绕的整周期数, 可通过判别相邻像元的相位差值跳跃变化而确定。

注: 相位解缠前干涉相位图的取值在 $(-\pi, \pi]$ 范围之内, 缺少相位的整数周期, 该相位称为缠绕相位。常用解缠方法有枝切法, 最小费用网络流方法(snapu, mcf)等。

8.2.2.11 雷达视线向形变计算

按公式(7)计算解缠后的真实相位对应的雷达视线向形变。

$$D_{i,j} = -\frac{\lambda}{4\pi} \Phi_{i,j} \quad \dots\dots\dots (7)$$

式中:

$D_{i,j}$ ——雷达视线向形变, 单位为米(m);

λ ——SAR 波长, 单位为米(m);

$\Phi_{i,j}$ ——解缠后的真实相位。

8.2.2.12 地理编码

利用 8.2.2.6 a) 建立的 SAR 图像坐标与大地坐标之间映射关系, 基于反向查找表, 对 8.2.2.11 得到的雷达视线向形变从 SAR 图像坐标转换到大地坐标, 得到地壳形变图。

8.2.2.13 地壳形变图

地理编码后得到的地壳形变图, 在确定 InSAR-LOS 向形变量主要由垂直向或水平向形变引起的

情况下,可通过卫星-地面几何关系,进一步转换为垂直向或水平向的地壳形变图。计算公式见式(8)和式(9)。

$$D_U = D_{LOS} / \cos \theta_{inc} \dots\dots\dots (8)$$

$$D_H = D_{LOS} / \sin \theta_{inc} \dots\dots\dots (9)$$

式中：
 D_U ——InSAR-垂向形变,单位为米(m)；
 D_H ——InSAR-水平形变,单位为米(m)；
 D_{LOS} ——InSAR-LOS 向形变,单位为米(m)；
 θ_{inc} ——雷达卫星雷达入射角,单位为度(°)。

8.3 PS-InSAR 数据处理

8.3.1 数据处理流程

PS-InSAR 数据处理流程见图 3。

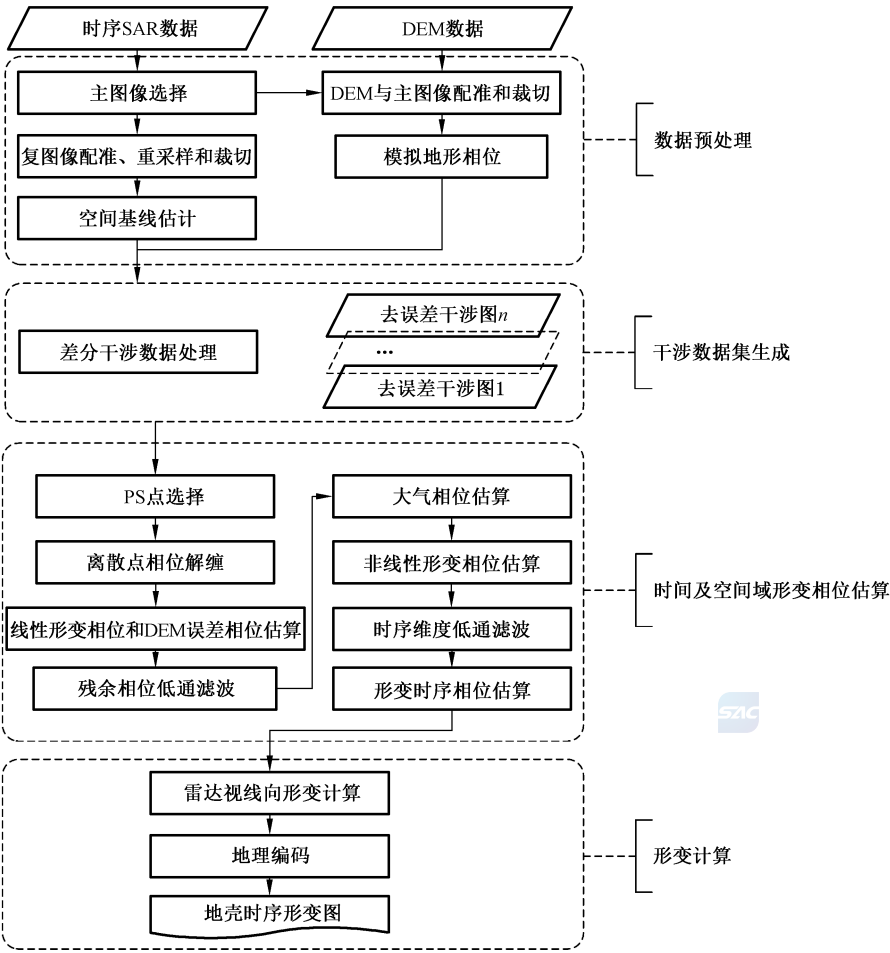


图 3 PS-InSAR 处理流程图

8.3.2 数据处理步骤

8.3.2.1 数据预处理

数据预处理步骤如下：

- a) 主图像选择:从时序 SAR 数据中选择 1 幅主图像,与时序 SAR 数据其他所有图像组成多组像对,主图像宜处于时间中点,与其他图像组成像对的空间基线不大于临界空间基线;
- b) 复图像配准、重采样和裁切:按 8.2.2.2 对主图像与各辅图像组成的像对进行复图像配准、重采样和裁切,形成多组干涉像对;
- c) DEM 与主图像配准和裁切:按 8.2.2.2 对 DEM 数据与主图像进行配准和裁切;
- d) 空间基线估计:按 8.2.2.4 执行;
- e) 模拟地形相位:按 8.2.2.6 计算多组干涉像对对应的模拟地形相位。

8.3.2.2 干涉数据集生成

按 8.2.2.3~8.2.2.9 的步骤对多组干涉像对分别执行差分干涉数据处理,获得去除平地相位、去除地形相位后的多幅干涉相位图和相干性图。

8.3.2.3 时间及空间域形变相位估算

时间及空间域形变相位估算步骤如下。

- a) PS 点选择:宜选择稳定的强散射性点目标,其对应图像像元的相干系数、幅度等数值较大,可通过计算多幅图像同名点的相干系数、幅度的离差等,设置阈值以提取 PS 点;应提取一定密度的 PS 点(如 ≥ 100 个/ km^2),并去除在雪面、水体等区域出现的伪 PS 点。
- b) 离散点相位解缠:可按 8.2.2.10 对 PS 点进行相位解缠,也可使用周边可靠数值插值或模拟数据进行相位解缠。
- c) 线性形变相位和 DEM 误差相位估算:宜采用最小二乘法估计 PS 点的线性形变相位和 DEM 误差相位。
- d) 残余相位低通滤波:可采用最小二乘法求解每个 PS 点的残余相位(包含非线性形变相位、大气相位和其他噪声相位);对此残余相位进行空间低通滤波处理,以去除空间高频噪声相位。
- e) 大气相位估算:应基于 SAR 数据自身或外部数据计算大气相位。可用时序方法分析 SAR 数据自身相位时空特性,估计并分离出大气相位;也可使用外部数据计算大气相位,计算方法见附录 D 中 D.3。
- f) 非线性形变相位估算:从低通滤波后的残余相位中去除高频大气相位,得到初步的非线性形变相位。
- g) 时间维度低通滤波:对各成像时刻的残余相位进行时间维度低通滤波,将时间高频的大气相位、其他噪声相位与时间低频的非线性形变相位进一步分离,得到非线性时序形变相位。
- h) 形变时序相位估算:叠加前面步骤得到的线性形变相位和非线性形变相位。

8.3.2.4 形变计算

形变计算步骤如下:

- a) 雷达视线向形变计算:按 8.2.2.11 执行;
- b) 地理编码:按 8.2.2.12 执行;
- c) 地壳时序形变图:按 8.2.2.13 执行,多个时相组合成地壳时序形变图。

8.4 SBAS-InSAR 数据处理

8.4.1 数据处理流程

SBAS-InSAR 数据处理流程见图 4。

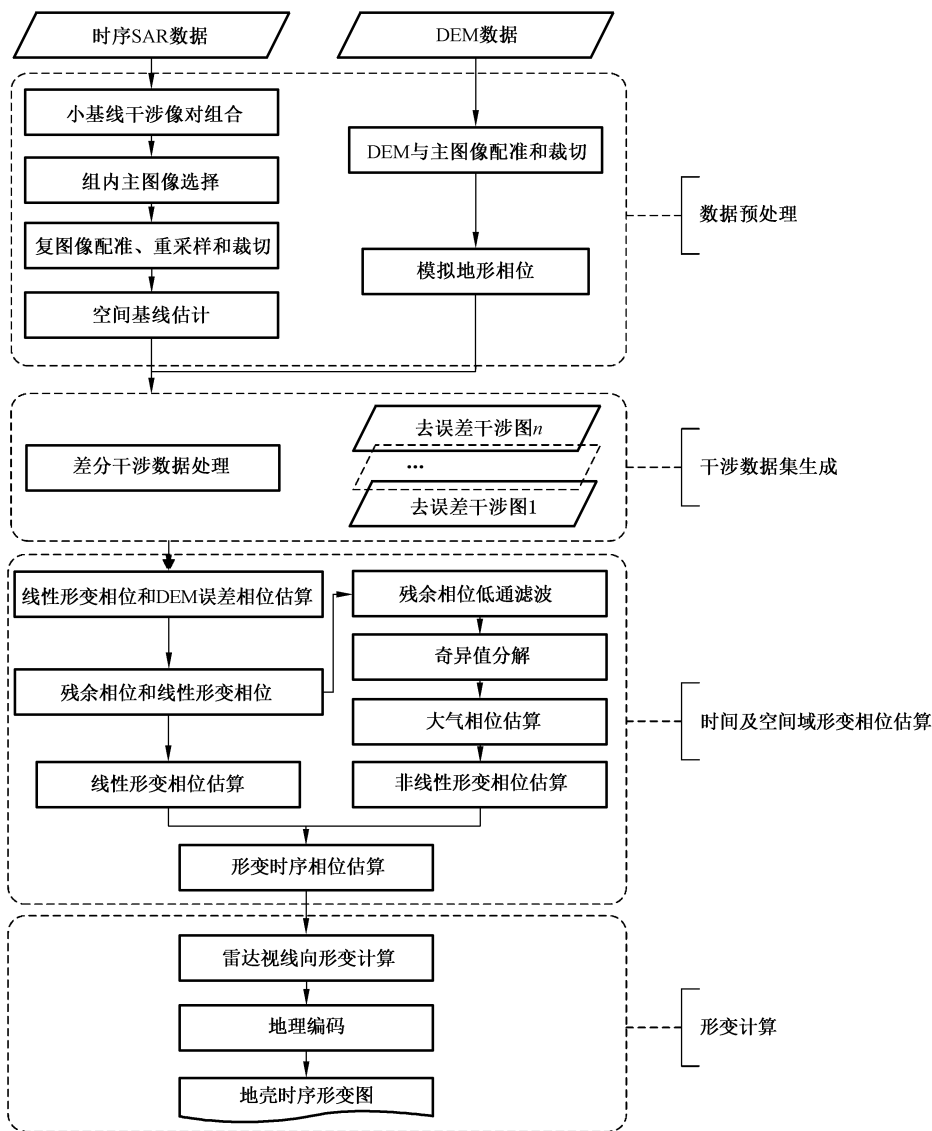


图 4 SBAS-InSAR 处理流程

8.4.2 数据处理步骤

8.4.2.1 数据预处理

数据预处理应按以下步骤执行。

- a) 小基线干涉像对组合:综合考虑空间垂直基线与时间基线以及各图像对之间多普勒中心频率差异,对时序 SAR 数据进行分组,形成若干个小基线干涉像对组合,使得组内的 SAR 图像干涉基线距小,组间的基线距大。在每个组合中,进行数据预处理。
- b) 组内主图像选择:每个组合中选择 1 幅图像作为主图像,与组内其他图像组成像对,主图像宜处于时间中点,与其他图像组成像对的空间基线远小于临界空间基线、时间基线不高于临界时间基线。
- c) 复图像配准、重采样和裁切:按 8.2.2.2 对主图像与各辅图像组成的像对进行配准、重采样和裁切,形成多组干涉像对。
- d) DEM 与主图像配准和裁切:按 8.2.2.2 对 DEM 数据与主图像进行配准和裁切。

- e) 空间基线估计:按 8.2.2.4 执行。
- f) 模拟地形相位:按 8.2.2.6 计算多组干涉像对对应的模拟地形相位。

8.4.2.2 干涉数据集生成

按 8.2.2.3~8.2.2.9 的步骤对多组干涉像对分别执行差分干涉数据处理,获得去除平地相位、去除地形相位后的多幅干涉相位图和相干性图。

8.4.2.3 时间及空间域形变相位估算

时间及空间域形变相位估算步骤如下:

- a) 线性形变相位和 DEM 误差相位估算:宜采用最小二乘方法,估算小基线组内线性形变相位和 DEM 误差相位,并从干涉相位中扣除由于 DEM 配准不精确造成的 DEM 误差相位;
- b) 残余相位和线性形变相位:经过上一步骤的处理,得到线性形变和残余相位;
- c) 线性形变相位估算:地壳形变速率在时域上呈线性变化,以此特点分离出线性形变相位;
- d) 残余相位低通滤波:经过上一步骤的处理,剩下残余相位,再经过低通滤波过滤局部信息;
- e) 奇异值分解(Singular Value Decoposition, SVD):将由于长基线限制而分开的独立原始数据集联合起来,从大气相位分量等背景噪音场中分离出形变信号;
- f) 大气相位估算:通过统计数值或外部数据估算大气相位,计算方法见附录 D 中 D.3;
- g) 非线性形变相位估算:从残余相位中减去大气相位,得到非线性形变相位;
- h) 形变时序相位估算:叠加前面步骤得到的线性形变相位和非线性形变相位,多个时相组合成形成形变时序相位。

8.4.2.4 形变计算

形变计算步骤如下:

- a) 雷达视线向形变计算:按 8.2.2.11 执行;
- b) 地理编码:按 8.2.2.12 执行;
- c) 地壳时序形变图:按 8.2.2.13 执行,多个时相组合成地壳时序形变图。

9 质量保障

9.1 质量检查

InSAR 地壳形变监测结果的质量检查应至少包括表 1 所列内容。

表 1 InSAR 地壳形变监测结果质量检查内容

检查内容	检查方法
主、辅复图像配准精度	是否符合 8.2.2.2 要求
干涉图相位与地形的相关性	检查干涉图相位变化是否与地形呈高相关性。相关性弱,则质量较好;相关性 强,则质量较差
差分干涉相位统计值	统计值直方图是否大致服从正态分布
差分干涉图与相干性图对比	应符合 8.2.2.9 有关相干性阈值的要求。小于 0.3,质量差;0.3~0.5,质量良好;大 于 0.5,质量很好
差分干涉图纹路检查	检查纹路是否清晰可辨。如清晰可辨,对应区域干涉图质量较好;反之,则干涉图 质量较差

表 1 InSAR 地壳形变监测结果质量检查内容（续）

检查内容	检查方法
解缠误差残差点分布图	采用残差点空间分布的统计方法核验分布图。零星分布,质量较好;不均匀分布或密集分布,质量较差。构建时空闭合环,检查解缠相位的闭合差,探测解缠误差
PS 点分布	是否符合 8.3.2.3a)的要求。PS 点目标分布密度较均匀,多于 100 个/km ² 。采用检查 PS 点地物属性的方法。多与反射能力较强的实际地物对应,水体中极少出现,则质量较好,否则质量较差
小基线干涉像对组合	是否符合 8.4.2.1 的要求。干涉像对组内空间基线如果远小于临界空间基线,时间基线也不大于临界时间基线,主图像处于时间中点位置,则质量较好;反之,质量较差
时间序列图的离散度和曲线	采用检查离散度收敛情况和跨断层时序曲线方法。离散度低,质量好;跨断层时序曲线,与活动断层的升降对应较好,如相对上升盘对应于正断层的下盘或逆断层的上盘,则质量较好,否则质量较差

9.2 真实性检验

9.2.1 直接对比验证

应利用同时期地壳形变的地面监测结果,对 InSAR 地壳形变监测结果进行直接对比验证。InSAR 地壳形变监测结果宜与水准测量、GNSS 测量等高精度监测结果进行对比。

- a) 与水准测量结果对比。宜采用时序 InSAR 监测结果的多点均值与对应时段的水准测量结果对比,将所查找到的一定空间范围内高相干目标 InSAR 监测结果的均值与水准测量点结果对比。
- b) 与 GNSS 测量结果对比。使用研究区内相同时段高等级 GNSS 测站点的监测结果进行检验。选取距离高等级 GNSS 站点一定范围内的 InSAR 高相干点目标参与验证。

缺少高相干点的区域,可先对数据进行插值,将高相干点拟合成面,获取面数据,再通过最小临近法获取拟合数据参与验证。直接对比验证时应考虑 InSAR、GNSS 和水准测量在测量原理、测量时间、空间尺度及基准方面的差异。

InSAR 地壳形变监测结果的直接对比验证方法见附录 E 中 E.1。

9.2.2 交叉对比验证

使用具有重叠时空的 SAR 数据得到的 InSAR 监测结果进行交叉验证。这些 SAR 数据可来源于相同卫星不同轨道、不同成像模式,或来源于不同卫星、不同波段的 SAR 数据序列或者像对。

将不同来源的 InSAR 地壳形变监测结果投影到同一方向,选出同名点统计差值及均方根误差。InSAR 地壳形变监测结果的交叉对比验证方法见 E.2。

9.2.3 间接对比验证

使用 InSAR 地壳形变监测结果统计数据,根据地震学原理或灾害情况进行对比验证。

- a) 同震形变,可通过两种间接对比方法开展验证。
 - 1) 利用地震波和/或其他大地观测数据反演得到地震断层参数,采用弹性半空间的位错模型模拟同震形变,进而与 InSAR 监测结果进行相关性分析,求取两者差值中误差。
 - 2) 基于 InSAR 获得的形变结果统计数据,根据地震学原理或震害情况定性检验 InSAR 测

量成果的可靠性,包括:

——形变高值区应与地震断层有关,远场区形变应逐步减少至无形变;

——形变高值区与地面建筑物破坏严重区有关,形变低值区的地面建筑物破坏较轻。

- b) 地质灾害形变,可对照地质灾害形变区是否与采矿、地下水开采等活动有关,再加以评估和验证。

10 成果编制

10.1 数据成果

应整理、编目、分类保存 InSAR 处理过程中重要环节的各类数据和结果,包括但不限于:

- a) 原始数据与资料,包括参与 InSAR 处理的原始 SAR 观测数据,处理所需的各类辅助资料;
- b) 中间结果数据与关键参数,包括相干性图数据、空间基线、时间基线、相干阈值、解缠参考点、PS 点阈值、差分干涉图数据、PS 点分布数据、PS 点地壳形变时序数据;
- c) 最终成果数据,包括地壳形变分布图数据、地壳形变时序数据、累积地壳形变量数据。

10.2 图件成果

图件成果制作要求如下:

- a) 制图范围:图幅内图廓线范围涵盖实际 InSAR 处理成果;
- b) 坐标系:制图坐标系应采用 2000 国家大地坐标系(CGCS2000,China Geodetic Coordinate System 2000);
- c) 比例尺:根据不同应用目的选择 1:250 000、1:100 000、1:50 000、1:25 000 或 1:10 000 比例尺,或根据实际具体工程需要与要求,选择工程比例尺,但宜参考上述比例尺;
- d) 图例:以色标显示地壳形变方向和大小,宜用红色代表地面下降,蓝色代表地面前升。

InSAR 处理生成地壳形变分布成果图的成果格式、示例图及制图说明表见附录 F。

10.3 文档成果

文档成果宜包括但不限于如下内容:

- a) 任务来源、工作目标和具体指标要求等资料与信息;
- b) 工作区的地形地貌、历史地震、活动断层分布,已有地壳形变研究现状等地理及地壳形变信息;
- c) 获取数据、历史存档数据、编程数据、数据接收时间及其质量等数据收集信息;
- d) 数据处理方法及关键参数选取;
- e) 地壳形变信息提取结果及其时空分布,也可给出地壳形变模型反演方法获得的地壳运动模型(见附录 G);
- f) 成果质量检查和真实性检验,包括直接检验、交叉检验或间接检验,提供精度评价和质量控制结果;
- g) 监测成果质量如未达到既定目标要求,工程设计人员、InSAR 处理人员及内外业有关人员,需综合分析原因、存在问题,并提交检查工作报告;如仍无法确定原因,应进行返工处理,直到 InSAR 处理成果满足要求。

附录 A
(资料性)

常用星载 SAR 数据格式及参数列表

A.1 星载 SAR 数据的格式

表 A.1 给出了常用星载 SAR 数据的格式。

表 A.1 常用星载 SAR 数据格式

SAR 卫星名称	数据格式	
	图像文件	头文件
ERS-1/2	CEOS(*.IMG, *.001, *.dat)	CEOS(*.001)
JERS	CEOS(*.IMG, *.001, *.dat)	CEOS(*.001)
ENVISAT ASAR	Envisat(*.N1)	Envisat(*.N1)
ALOS-1	ALOS L1.1(*.H1.1_A)	(*L1.1)
Radarsat-1	CEOS(*.IMG, *.001, *.dat)	CEOS(*.001, *.TRL, *.TRA)
Radarsat-2	RADARSAT2(*.tif)	(*xml)
Terrasar-X	TERRASAR-X(*.cos)	(*xml)
Cosmo-SkyMed Stripmap Himage	Cosmo-skymed(*.h5)	(*xml)
ALOS-2	ALOS L1.1	(*L1.1)
Sentinel-1IW	Sentinel-1 file(*.tif)	(*xml)
ICEYE	ICEYE SLC(*.h5)	(*xml)
SAOCOM	SAOCOM file(*.tif)	(*xml)
Capella SAR	Capella file(*.tif)	(*xml)
海丝一号	TY-1 file(*.tif)	(*xml)
Lutan-1	LT-1 file(*.tif)	(*xml)

A.2 星载 SAR 数据参数列表

星载 SAR 数据一般包括以下几种获取模式：

- a) 聚束模式(spotlight)，分辨率一般为几分米至几米；
- b) (超级)条带模式(stripmap)，分辨率一般为几米至几十米；
- c) 宽幅模式(burst、ScanSAR、TOPS 等)，分辨率一般为十几米至百米。

表 A.2 给出了可用于 InSAR 处理的常用星载 SAR 数据的主要参数。

表 A.2 常用星载 SAR 数据主要参数

SAR 卫星名称	所属国家或机构	运行时间	轨道高度/km	波长/m	极化方式	入射角/(°)	最短间隔/d	地面分辨率(m)及模式	RAW 数据	存档情况	幅宽/km	可否编程
ERS-1	欧洲空间局	1991 年—2000 年	785	C(0.056)	VV	20~26	35	25	是	全球覆盖 20 次以上	100	否
ERS-2	欧洲空间局	1995 年—2012 年	785	C(0.056)	VV	20~26	35	25	是	全球覆盖 20 次以上	100	否
JERS-1	日本	1992 年—1998 年	568	L(0.235)	HH	32~38	44	25	否	全球覆盖 5 次以上	80	否
Radarsat-1	加拿大	1995 年—2013 年	790	C(0.056)	HH	23~65	24	8~30	是	部分地区覆盖	50~500	否
ENVISAT-ASAR	欧洲空间局	2002 年—2012 年	800	C(0.056)	双极化	15~45	35	25~100	是	全球覆盖 25 次以上	100~400	否
ALOS-PALSAR	日本	2006 年—2011 年	700	L(0.236)	全极化	8~60	46	10~100	是	全球覆盖 15 次以上	20~350	否
Radarsat-2	加拿大	2007 年月至今	798	C(0.056)	单极化、 双极化、 全极化	20~39	24	3(超级条带) 5(条带) 16~100(其他)	否	中国东部 2007 ~ 2013 年间多期存档	20(超级条带) 50(条带) 50~500(其他)	可
TerraSAR-X	德国	2007 年月至今	514	X(0.031)	单极化、 双极化、 全极化	20~55	11(单)	1(聚束) 3(条带) 18.5(扫描) 40(宽扫描)	否	大部分地区需要编程观测	20(聚束) 30(条带) 150(扫描) 270(宽扫描)	可
TanDEM-X 星座(2)	德国	2010 年 6 月至今	514	X (0.031)	单极化、 双极化、 全极化	20~55	11(单星) 5.5 (双 星)	1(聚束) 3(条带) 18.5(扫描) 40(宽扫描)	否	大部分地区需要编程观测	20(聚束) 30(条带) 150(扫描) 270(宽扫描)	可
COSMO-SkyMed 星座(6)	意大利	2007 年 6 月、 2007 年 12 月、 2008 年 10 月、 2010 年 11 月、 2019 年 12 月、 2022 年 2 月	620	X (0.031)	单极化、 双极化	16.36~ 52.06	16(单星) 1(双星/3 星)	1(聚束) 1.3、5(条带) 30(扫描) 100(宽扫描)	否	大部分地区需要编程观测	7~10(聚束) 30~40(条带) 100~00(扫描)	可



表 A.2 常用星载 SAR 数据主要参数 (续)

SAR 卫星名称	所属国家或机构	运行时间	轨道高度/km	波长/m	极化方式	入射角/(°)	最短间隔/d	地面分辨率(m)及模式	RAW 数据	存档情况	幅宽/km	可否编程
Sentinel-1 星座(2)	欧洲空间局	2014 年 4 月至今	693	C (0.056)	HH + VV、VV + VH	20~45	12(单星) 6(双星)	5(聚束) 5×20(条带) 20(扫描) 20(宽扫描)	是	全球观测计划, 每 6 天/12 天 1 次同轨 观测	20(聚束) 80(条带) 250(扫描) 400(加宽扫描)	否
ALOS-2 (PAL-SAR-2)	日本	2014 年 5 月至今	628	L (0.2425)	全极化	8~ 70	14	1×3(聚束) 3、6、10(条带) 100(扫描)	否	全球观测计划	25(聚束) 30~50(条带) 350~490(扫描)	可
Lutran-1A	中国	2022 年 1 月至今	607	L (0.238)	单极化、 双极化、 全极化	20~46 20~46 18~30 20~49	8(单) 4(双)	3(条带 1) 12(条带 2) 20~30(宽幅) 30(扫描)	是	全球观测计划	50(条带 1) 100(条带 2) 150~500(宽幅) 400(扫描)	可
Lutran-1B	中国	2022 年 2 月至今	607	L (0.238)	单极化、 双极化、 全极化	20~46 20~46 18~30 20~49	8(单) 4(双)	3(条带 1) 12(条带 2) 20~30(宽幅) 30(扫描)	是	全球观测计划	50(条带 1) 100(条带 2) 150~500(宽幅) 400(扫描)	可
SAOCOM 星座(2)	阿根廷	2018 年 10 月、 2020 年 8 月至今	620	L	单极化、 双极化、 全极化	20~50	16(单星) 8(双星)	10(条带 1) 10(条带 2) 30(扫描窄幅 1) 50(扫描窄幅 2) 50(扫描宽幅 1) 100(扫描宽幅 2)	是	全球观测计划	20(条带 1) 40(条带 2) 100(扫描窄幅 1) 150(扫描窄幅 2) 220(扫描宽幅 1) 350(扫描宽幅 2)	可

表 A.2 常用星载 SAR 数据主要参数 (续)

SAR 卫星 名称	所属国家 或机构	运行时间	轨道 高度/ km	波长/ m	极化 方式	入射角/ (°)	最短间隔/ d	地面分辨率(m) 及模式	RAW 数据	存档情况	幅宽/ km	可否 编程
ICEYE 星座(27)	芬兰	2018 年 1 月至今	560 ~580	X	单极化	15~35	22(单星) 1(27 星)	0.5(SPOT FINE) 1(SPOT) 1(DWELL) 1(SLEA) 3(STRIP) 15(SCAN)	是	全球观测计划	5(聚束) 30(条带) 120(扫描)	可
Capella 星座(10)	美国	2018 年 12 月至今	620	X	单极化	25~50	15(单星) 1.5(10 星)	0.35(聚束) 0.6(滑块聚束) 0.8(条带)	是	全球观测计划	5(聚束) 200(滑块聚束) 10~50(条带)	否
海丝一号	中国	2020 年 12 月 至今	512	C	单极化	20~35	15	1(聚束) 3(条带) 10(扫描 NS) 20(扫描 ES)	是	全球观测计划	5(聚束) 20(条带) 50(扫描) 100(加宽扫描)	可
巢湖一号	中国	2022 年 2 月至今	512	C	单极化	15~40	16	1(聚束) 2(滑聚) 3(条带) 12(扫描 NS) 20(扫描 ES) 10(TOPS 模式)	是	全球观测计划	7(聚束) 25(条带) 100(扫描 NS) 170(扫描 ES) 100 (TOPS 模 式)	可
高景二号星座 (2)	中国	2022 年 7 月至今	496	X	单极化	20~50	17	0.5(滑动聚束) 1(滑动聚束) 2(条带)	是	全球观测计划	10(滑动聚束) 20(条带)	可
宏图一号星座 (4)	中国	2023 年 3 月至今	528	X	单极化	15~40	15	0.5(聚束 1) 1 (聚束 2) 3 (条带) 5 (TOPSAR) 3(多星条带干涉)	是	全球观测计划	5(聚束 1) 10(聚束 2) 20(条带) 50(TOPSAR) 20(多星条带干 涉)	可

附录 B
(资料性)

典型形变场的特征及处理方法

表 B.1 给出了典型形变场的特征及处理方法。

表 B.1 典型形变场的特征及处理方法

形变类型		形变场特征		时间过程分类		处理方法	
		空间分布范围 km ²	形变量或 形变速率	瞬时 ^a	缓慢 ^b	D-InSAR	TS-InSAR
地震 ^c	同震形变 ^d	100~10 000	>20 mm	√		√	√
	震间形变	1 000~1 000 000	<20 mm/年		√		√
	震后形变	100~10 000	>5 mm		√		√
火山	火山隆起/下沉	<20	<20 mm/年		√		√
	火山爆发	< 20	> 100 mm	√		√	
滑坡	滑坡前兆	0.5~5	>50 mm		√	√	
地面沉降	地下水开采	0.5~100	(20 ~100)mm/年		√	√	√
	矿产开采	0.1~10	(20~100)mm/年	√	√	√	√
注：滑坡、地面沉降等地质灾害的形变是地壳形变监测时的噪声，一般依据其形变特征，在计算地震、火山等引起的地壳形变时加以分辨并剔除。							
^a 事件过程持续数秒至数分钟。 ^b 事件过程持续数天至数月，甚至数年。 ^c 包括两次特征地震期间与长期应变积累(震间)、地震发生(同震)等过程相关的地壳表面变形。 ^d 根据统计分析，利用 D-InSAR 方法能探测到的可靠形变量 50 mm(对应最小震级地震 Ms6)，利用 TS-InSAR 方法能探测到的可靠形变量 20 mm(对应最小震级地震 Ms4.5)。							



附 录 C

(资料性)

不同波段 SAR 数据的地壳形变 InSAR 监测精度

C.1 L 波段数据

在植被覆盖密集区域表现优于 C 波段和 X 波段;在形变量大于或等于 1 m 的地区,如同震形变、滑坡时序变形和矿区开采形变等地区,有较好的性能;在有利条件下,D-InSAR 地壳形变测量精度可达 10 mm,多时相数据 TS-InSAR 测量精度可达 5 mm/年~8 mm/年。

C.2 C 波段数据

在植被相对稀少区域表现优于 X 波段数据;在有利条件下,D-InSAR 地壳形变测量精度可达 8 mm,多时相数据 TS-InSAR 测量精度可达 2 mm/年~5 mm/年。

C.3 X 波段数据

在裸露区及重大人工建筑目标地区具有较好的探测效果,如城区精细形变测量等;在有利条件下 D-InSAR 地壳形变测量精度可达 5 mm,多时相数据 TS-InSAR 测量精度可达 2 mm/年~3 mm/年。



附录 D
(资料性)
误差类型与误差校正

D.1 原始干涉相位图构成

原始干涉相位图的干涉相位主要包含 6 种相位成分,按公式(D.1)计算。

$$\phi_{\text{int}} = \phi_{\text{flat}} + \phi_{\text{topo}} + \phi_{\text{track}} + \phi_{\text{def}} + \phi_{\text{atm}} + \phi_{\text{noise}} \dots\dots\dots (D.1)$$

式中:

- ϕ_{int} ——原始干涉相位图,为复图像;
- ϕ_{flat} ——平地相位;
- ϕ_{topo} ——地形相位;
- ϕ_{track} ——轨道误差相位;
- ϕ_{def} ——SAR 两次观测期间目标沿卫星视线方向移动引起的形变相位;
- ϕ_{atm} ——两次观测间大气环境差异引起的延迟相位;
- ϕ_{noise} ——其他噪声相位。

在差分 InSAR 数据处理中,要获取精确的地壳形变相位 ϕ_{def} ,就要去除原始干涉相位图的干涉相位 ϕ_{int} 中的其他各类噪声相位成分,包括: ϕ_{flat} 、 ϕ_{topo} 、 ϕ_{track} 、 ϕ_{atm} 、 ϕ_{noise} 。

D.2 误差类型成因分析

InSAR 形变处理结果主要包含以下误差。

- a) 失相干误差。主要包括时间失相干误差、空间失相干误差以及热噪声。时间失相干误差与地面覆盖物散射特性变化有关;空间失相干误差由 SAR 天线视角差导致的微波波数差异造成。
- b) 大气延迟误差。指由于雷达信号在传输过程中,大气折射的非均质性引起的雷达信号传播路径弯曲和雷达信号传播延迟;大气对雷达信号传播的影响包含受对流层和电离层的影响。
- c) 卫星轨道误差。属于系统误差,通常以残差条纹形式存在于干涉图中。
- d) DEM 误差。在利用 DEM 对地形相位进行估计时,所用 DEM 误差会导致干涉相位中残留地形相位误差项,其大小与垂直基线长度和雷达入射角有关。

D.3 误差校正

常见误差校正方法如下。

- a) 失相干误差。滤波方法和时序分析方法相结合方法去除失相干地物,保留高相干地物。
- b) 大气延迟误差,校正方法如下。
 - 1) 单景干涉图像。利用外部数据校正大气误差;外部数据包括 GNSS 大气延迟产品、MERIS 和 MODIS 等的水汽产品,以及大气数值模型大气产品(ECMWF、MERRA2 和 GACOS);利用线性或者幂律模型削弱与地形相关的对流层延迟影响。
 - 2) 多时相干涉图像。利用时序方法分离出大气误差相位分量,用最小二乘方法或者奇异值分解(SVD 分解)估计每景 SAR 图像对应的大气相位;可用外部数据,计算出一阶大气误差相位,并从残余相位中减去,然后用主成分分析法估计残余大气误差相位。
 - 3) 电离层误差。使用图像本身的电离层统计分量、电离层模型,或者 split-spectrum 算法(方位向)进行校正。
- c) 卫星轨道误差。基于地面控制点估算一个相位趋势面,从原始相位中减去,实现轨道误差校正。
- d) DEM 误差。TS-InSAR 中作为一个参数进行估计。

附录 E

(资料性)

InSAR 地壳形变监测结果的对比验证方法

E.1 直接对比验证方法

依据 InSAR 成像几何参数(入射角、方位角),将水准测量/GNSS 测量的三维形变结果投影到 InSAR-LOS 向,再与 InSAR 监测结果进行对比验证,具体步骤如下。

- a) 归一化水准测量/GNSS 测量结果和 InSAR 监测结果的时间间隔。
- b) 按公式(E.1)计算水准测量/GNSS 测量结果的投影,得到 InSAR-LOS 向形变。

$$D_{\text{LOS}} = D_{\text{U}} \cdot \cos\theta_{\text{inc}} - D_{\text{E}} \cdot \sin\theta_{\text{inc}} \cdot \sin\left(\alpha_{\text{azi}} - \frac{3\pi}{2}\right) - D_{\text{N}} \cdot \sin\theta_{\text{inc}} \cdot \cos\left(\alpha_{\text{azi}} - \frac{3\pi}{2}\right) \quad \cdots (E.1)$$

式中:

D_{LOS} ——水准测量/GNSS 测量结果投影到 InSAR-LOS 向的形变,单位为米(m);

D_{U} ——水准测量/GNSS 测量结果投影到 InSAR-垂向的形变,单位为米(m);

θ_{inc} ——雷达入射角,单位为度(°);

D_{E} ——水准测量/GNSS 测量结果投影到 InSAR-东向的形变,单位为米(m);

α_{azi} ——雷达视线向的方位角,单位为度(°);

D_{N} ——水准测量/GNSS 测量结果投影到 InSAR-北向的形变,单位为米(m)。

- c) 将 D_{LOS} 与解缠后的真实相位对应的雷达视线向形变量[即公式(7)中的 $D_{i,j}$]进行比对,计算两者的差值。
- d) 根据多组比对差值,按公式(E.2)计算 InSAR 监测结果的均方根误差(Root Mean Square; RMS)。

$$R = \pm \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n x_i^2}{n}} \quad \cdots (E.2)$$

式中:

R ——均方根误差;

n ——比对样本数;

x_i ——比对差值,单位为米(m)。

E.2 交叉对比验证方法

利用源于不同卫星或相同卫星不同轨道的 InSAR 形变监测结果,根据雷达入射角将视线向形变场投影转换到垂直方向,再对待检验的 InSAR 形变监测结果进行交叉对比验证。具体步骤如下。

- a) 归一化不同卫星或相同卫星不同轨道的 InSAR 监测结果的时间间隔。
- b) 根据雷达入射角将不同来源的 InSAR-LOS 向形变投影到垂直方向,计算见公式(E.3)。

$$D_{\text{U}} = D_{\text{LOS}} / \cos\theta_{\text{inc}} \quad \cdots (E.3)$$

式中:

D_{U} ——不同来源的 InSAR-垂向形变,单位为米(m);

D_{LOS} ——不同来源的 InSAR-LOS 向形变,单位为米(m);

θ_{inc} ——雷达入射角,单位为度(°)。

- c) 比对待检验和其他来源的 InSAR 形变监测结果的同名点的垂直方向形变,计算两者的差值。根据多组比对差值,按公式(E.2)计算 InSAR 监测结果的均方根误差。

附录 F
(资料性)
成果图示例

F.1 成图格式

图 F.1 给出了成图格式示例。

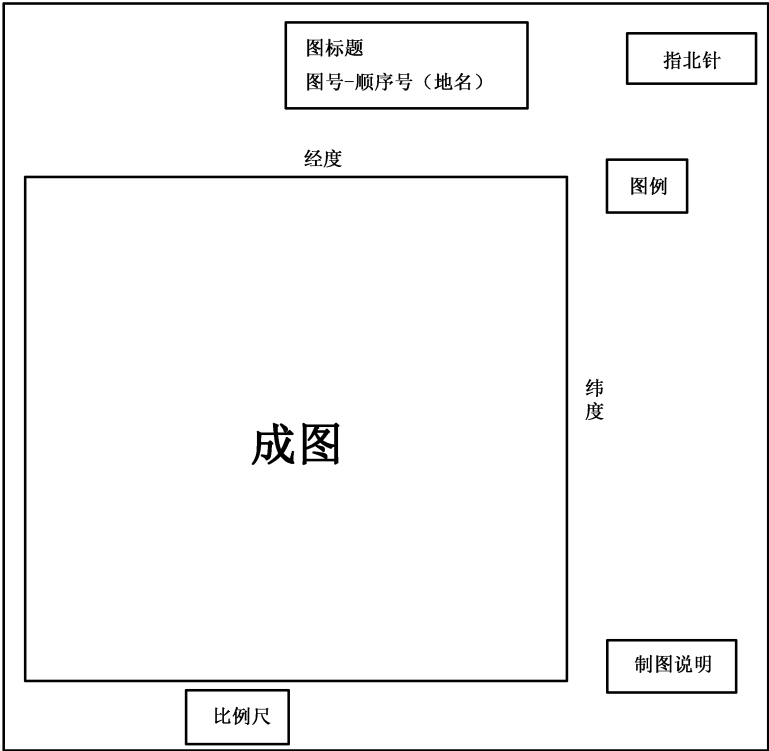


图 F.1 成图格式示意图

F.2 示例图

图 F.2 给出了成果的示例图。

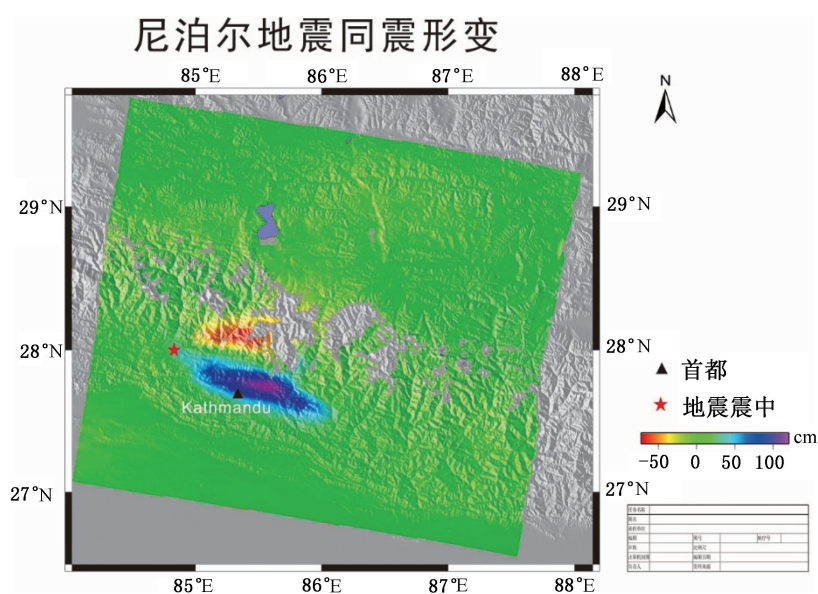


图 F.2 尼泊尔地震同震差分干涉图像

F.3 制图说明表



表 F.1 给出了制图说明表样例。

表 F.1 制图说明表

任务名称					
图名					
承担单位					
编图		图号		顺序号	
审核		比例尺			
计算机制图		编图日期			
负责人		资料来源			

附录 G
(资料性)
地壳形变模型反演方法

G.1 同震形变

以同震形变为约束、结合震源机制解及其余震分布信息,获取最佳的断层几何参数,反演同震断层滑动模型。

G.2 震后形变

以震后地壳形变为约束,用弹性半空间位错模型或分层半空间模型,反演断层余滑分布,反演下地壳和上地幔的黏弹系数。

G.3 震间形变



以震间地壳形变为约束,采用形变速率剖面分析法分析跨断层形变梯度和断层两盘相对运动方向,或采用反正切一维弹性半空间位错模型反演断层平均滑动速率和闭锁深度。

G.4 火山过程地壳形变

以获取的形变场为约束,基于均匀弹性半空间点源 Mogi 模型进行反演,获取火山内部岩浆房的几何参数解,分析火山压力源的深度位置与岩浆等效体积大小的演变趋势。

注:均匀弹性半空间点源 Mogi 模型是将岩浆压力源置于均匀弹性半空间中,在源的半径远小于源的深度时,由于膨胀性或收缩性压力源引起的弹性半空间地表的水平变形和垂直变形与源的参数之间的表达式。

参 考 文 献

- [1] GB/T 18207.2—2005 防震减灾术语 第2部分:专业术语
 - [2] GB/T 32874—2016 机载 InSAR 系统测制 1:10 000 1:50 000 3D 产品技术规程
 - [3] CH/T 3009—2012 1:50 000 地形图合成孔径雷达航天摄影测量技术规定
 - [4] CH/T 6006—2018 时间序列 InSAR 地表形变监测数据处理规范
 - [5] 廖明生,王腾.时间序列 InSAR 技术与应用[M].北京:科学出版社,2014.
 - [6] 刘国祥,陈强,罗小军,等. InSAR 原理与应用[M].北京:科学出版社,2019.
 - [7] 张景发,李永生,罗毅,等.干涉雷达测量技术及地震应用[M].北京:清华大学出版社,2020.
 - [8] 单新建,屈春燕,张国宏,等. InSAR 地壳形变观测与发震断层特征[M].北京:科学出版社,2021.
-



