

**T/CECS ×××-20××**

中国工程建设协会标准

**地上建筑物安全遥感监测技术规程**

**Technical specification for building safety monitoring**

**by remote sensing**

（征求意见稿）

中国××出版社

**中国工程建设协会标准**

**地上建筑物安全遥感监测技术规程**

**Technical specification for building safety monitoring**

**by remote sensing**

T/CECS ×××-20××

主编单位：国质（北京）建设工程检测鉴定中心

批准单位：中国工程建设标准化协会

施行日期：20××年×月×日

中国××出版社

20××　北京

**前　言**

根据中国工程建设标准化协会《关于印发<2019年第二批协会标准制订、修订计划>的通知》（建标协字[2019]022号）的要求，编制组经过广泛调查研究，认真总结实践经验，参考有关标准，并在广泛征求意见的基础上，制定本规程。

本规程主要技术内容是：总则、术语、符号和缩略语、基本规定、建筑物安全风险普查、建筑物变形精细化监测、成果编制与提交。

请注意本标准的某些内容可能直接或间接涉及专利，本标准的发布机构不承担识别这些专利的责任。

本标准由中国工程建设标准化协会施工安全专业委员会归口管理，由国质（北京）建设工程检测鉴定中心负责具体技术内容的解释。本标准在执行过程中如有需要修改或补充之处，请将有关建议和资料寄送国质（北京）建设工程检测鉴定中心（地址：北京市海淀区百万庄建设部大院130号楼（新北配楼）303房间，邮政编码：100835)。

**主编单位：**国质（北京）建设工程检测鉴定中心

**参编单位：**北京东方至远科技股份有限公司

清华大学

洛阳市职业技术学院

贵科检测有限公司

建大检测有限公司

重建检测有限公司

贵阳信息科技学院

铜仁市工程设计质量监督站

贵州富源众智工程技术投资有限公司

铜仁市玉屏侗族自治县住房和城乡建局

重庆交通大学

天津市房屋安全鉴定检测中心

重庆市住房和城乡建设工程质量总站

贵州省建材产品质量检验检测院

杭州市房屋安全和更新事务中心

**主要起草人：**费毕刚、韩鹏飞、朱茂、李吉平、王春伟、刘晶波、孙珍珍、罗丹阳、张沿杰、辛爽、崔燕伟、葛春青、班勇、周海兵、王大伟、成宝平、段志花、龚艳清、李云故、张庭丽、王贵禄、王愚、陈影、夏运琴、江世永、赵亿、何春燕、文松松、丁隆、熊莎、康正一。

**主要审查人：**

目 次

[1 总 则 7](#_Toc76655145)

[2 术语、符号和缩略语 9](#_Toc76655146)

[2.1 术语 9](#_Toc76655147)

[2.2 符号 11](#_Toc76655148)

[2.3 缩略语 12](#_Toc76655149)

[3 基本规定 14](#_Toc76655150)

[4 建筑物安全风险普查 17](#_Toc76655151)

[4.1 风险普查数据选择 17](#_Toc76655152)

[4.2 风险普查数据处理 19](#_Toc76655153)

[4.3 建筑物风险评价 23](#_Toc76655154)

[5 建筑物变形精细化监测 28](#_Toc76655155)

[5.1 角反射器布设与测量 28](#_Toc76655156)

[5.2 精细化监测数据选择 30](#_Toc76655157)

[5.3 精细化监测数据处理 30](#_Toc76655158)

[6 成果编制与提交 34](#_Toc76655159)

[6.1 成果编制 34](#_Toc76655160)

[6.2 成果提交 37](#_Toc76655161)

[本规程用词说明 38](#_Toc76655162)

[引用标准名录 39](#_Toc76655163)

**Contents**

[1 General provisions 7](#_Toc73287480)

[2 Terms, symbols and abbreviations 9](#_Toc73287481)

[2.1 Terms 9](#_Toc73287482)

[2.2 Symbols 11](#_Toc73287483)

[2.3 Abbreviations 12](#_Toc73287484)

[3 Basic requirements 14](#_Toc73287485)

[4 Risk Census of Building Safety 17](#_Toc73287486)

[4.1 Risk Census Data Selection 17](#_Toc73287487)

[4.2 Risk Census Data Processing 19](#_Toc73287488)

[4.3 Building Risk Assessment 23](#_Toc73287489)

[5 Fine Deformation Monitoring of Buildings 28](#_Toc73287490)

[5.1 Layout and Measurement of Corner Reflector 28](#_Toc73287491)

[5.2 Fine Monitoring Data Selection 30](#_Toc73287492)

[5.3 Fine Monitoring Data Processing 30](#_Toc73287493)

[6 Results Compilation and Submission 34](#_Toc73287494)

[6.1 Results compilation 34](#_Toc73287495)

[6.2 Results Submission 37](#_Toc73287496)

[Explanation of Words in This Standard 38](#_Toc73287497)

List of Quoted Standards [39](#_Toc73287498)

# 1 总 则

**1.0.1** 为保证星载合成孔径雷达干涉测量（InSAR）对建筑物安全的监测质量，做到技术先进，方案合理，安全可靠，特制定本规程。

【条文说明】本条明确了制定本规程的目的。随着星载合成孔径雷达干涉测量（InSAR）的迅猛发展，其在地震、地表各类地物形变等监测中得到了重视和应用。与传统测量手段，比如水准仪、近景摄影等测量技术相比，其综合优势明显：形变监测精度可达毫米级；监测范围一次可达成百上千平方公里；可定量获得建筑物时间序列形变信息，数据更新快且丰富；受天气影响小，可全天候、全天时地连续长期监测；监测实施便利和安全，一般仅需卫星重复获取地表影像，无需直接接触目标；成本相对低，无需维护观测网，对广范围建筑物监测服务好。许多研究人员对InSAR监测建筑物及基础设施的形变进行了研究和应用。本规程提出了星载InSAR监测建筑物安全的技术要求，为星载InSAR在监测建筑物安全中的应用，提供了合理可靠的评价依据。

**1.0.2** 本规程适用于星载InSAR监测建筑物安全的方案部署、数据选择、风险评价、成果编制与提交。

【条文说明】本规程适用于指导星载InSAR对建筑物变形监测和安全风险评价工作。

**1.0.3** 星载InSAR监测建筑物安全工作，除应符合本规程外，尚应符合国家现行有关标准的规定。

【条文说明】与本规程相关的国家现行标准还有《建筑物变形测量规范》 JGJ 8-2016、《工程测量规范》 GB 50026-2007，《建筑地基基础设计规范》 GB 50007-2011、《危险房屋鉴定标准》 JGJ 125-2016、《时间序列InSAR地表变形监测数据处理规范》 CH/T 6006-2018、《地面沉降调查与监测规范》 DZ/T 0283-2015、《地面沉降测量规范》 DZ/T 0154-2019、《地质灾害InSAR监测技术指南》（试行）T/CAGHP 013-2018和《机载InSAR系统测制1:10000 1:50000 3D产品技术规程》 GB/T 32874-2016等。

# 2 术语、符号和缩略语

# 2.1 术语

**2.1.1** 建筑物变形 deformation of building

建筑物的地基、基础、上部结构及其场地受各种作用力而产生的形状或位置变化现象。

**2.1.2** 建筑物变形监测 deformation monitoring of building

对建筑物变形进行监测，并对观测结果进行处理和分析的工作。

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

对同一地区不同层次SAR数据中的相位信息进行干涉计算的技术。

【条文说明】参考《地质灾害InSAR监测技术指南》（试行） T/CAGHP 013-2018、《时间序列InSAR地表变形监测数据处理规范》 CH/T 6006-2018、《地面沉降调查与监测规范》 DZ/T 0283-2015、《地面沉降测量规范》 DZ/T 0154-2019编制。本规程中特指利用星载SAR数据提取建筑物变形的技术，测量方法包括PS-InSAR和CR-InSAR方法。

**2.1.4** 永久散射体 persistent scatterer

在长时间跨度InSAR影像序列中稳定的天然反射体。

**2.1.5** 角反射器 corner reflector

采用金属材料制成，与雷达波的入射方向保持最佳夹角的人工反射装置。

**2.1.6** 时间序列 time series

一系列变形观测数据按观测时间先后排序而成的数列。

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

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

**2.1.8** 角反射器合成孔径雷达干涉测量 corner reflector InSAR

 对长时间序列SAR影像集合对角反射器获取的像元进行时间和空间域变形量计算，以提取高精度时间序列变形信息的干涉测量方法。

**2.1.9** 干涉相位 interferometric phase

精确配准后的两幅SAR复影像，通过对应像素的复数据共轭相乘得到的两幅复影像的相位差。

【条文说明】干涉相位反映了同一地物至两个SAR天线相位中心的路差。

**2.1.10** 视线向 line of sight

雷达传感器照射地物的方向。

**2.1.11** 层次聚类法 hierarchical cluster method

逐层进行类别聚合的方法。

【条文说明】本条对层次聚类法进行了定义，层次聚类根据聚类要求可以把小簇合并成大簇，也可以把大簇分割成小簇。

**2.1.12** 聚类点 convergence point

PS点集合的代表点。

【条文说明】对聚类点进行了定义，通过层次聚类法对PS点进行聚类，形成不同的PS点集合。计算每个PS点集合中所有PS点的平均空间位置，形成1个代表点，作为该集合的聚类点。

**2.1.13** 关键点 key point

从聚类点中选取的最能代表建筑变形特征的点。

# 2.2 符号

|  |  |  |
| --- | --- | --- |
| *Bperp* | —— | 主副图像的垂直基线； |
| *c* | —— | 光速； |
| *d* | —— | 垂直向变形量； |
| *d*3y | —— | 三年累计沉降最大值； |
| *h* | —— | 由DEM数据获取的高程值； |
| *l* | —— | 星载SAR影像的方位坐标； |
| *p* | —— | 星载SAR影像的距离坐标； |
| PRF | —— | 星载SAR影像的方位向采样频率； |
| *R* | —— | 卫星到目标的斜距； |
| RSR | —— | 星载SAR影像的距离向采样频率； |
| *S*(*ta*) | —— | 卫星在*ta*时刻的三维位置坐标； |
| *ta*1 | —— | 星载SAR影像的方位起始时刻； |
| *tr* | —— | 角反射器目标对应的距离向时间； |
| *tr*1 | —— | 星载SAR影像的距离起始时刻； |
| *T* | —— | 角反射器的三维位置坐标； |
| *T*3y | —— | 三年累计倾斜最大值； |
| *TV*1y | —— | 近一年倾斜速率最大值； |
| *V*1y | —— | 近一年沉降速率最大值； |
| *V*(*ta*) | —— | 卫星在*ta*时刻的速度； |
|  | —— | 雷达波波长； |
| *θ* | —— | 雷达波入射角； |
| *φatmo* | —— | 大气残余相位； |
| *φDEM* | —— | 地形因素引入的相位； |
| *φDEM,r* | —— | 残余的地形相位； |
| *φInt* | —— | 角反射器影像对的干涉相位； |
| *φInt,r* | —— | 补偿后的影像对干涉相位； |
| *φM* | —— | 角反射器在主图像的相位； |
| *φnoise* | —— | 噪声误差相位； |
| *φS* | —— | 角反射器在辅图像的相位； |
| *φtrack* | —— | 轨道误差相位； |
|  | —— | LOS变形量； |
|  | —— | 时间序列变形相位。 |

# 2.3 缩略语

CR 角反射器（Corner reflector）

CR- InSAR（Corner reflector InSAR）

DEM 数字高程模型（Digital Elevation Model)

InSAR 合成孔径雷达干涉测量（Interferometric SAR）

LOS 视线向（Line of sight）

PS 永久散射体（Persistent Scatterer）

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 Aperature Radar）

SRTM 航天飞机雷达地形测绘任务（Shuttle Radar Topography Mission）

WGS-84 全球大地坐标系统1984（World Geodetic System 1984）

# 3 基本规定

**3.0.1** 星载InSAR监测建筑物安全宜采用WGS-84大地坐标系，也可根据需要采用国家高程系统，或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。

**3.0.2** 建筑物风险评价和监测方案的基本技术流程图3.0.2，宜分为3个主要步骤：

1 建筑物安全风险普查，宜采用PS-InSAR方法。

2 建筑物安全风险详查，宜进行现场检测，可采用水准测量、全站仪测量、GPS测量、激光测量、近景摄影测量等方法。

3 建筑物变形精细化监测，可采用CR-InSAR、水准测量、全站仪测量、GPS测量、激光测量、近景摄影测量等方法。

【条文说明】本条规定了建筑物风险评价和监测方案的基本技术流程。本条确定了3个主要步骤：建筑物安全风险普查，是对大区域的建筑物变形采用星载InSAR方法进行监测，从而确定大区域范围内建筑物的风险等级，目前PS-InSAR方法能够完成此种监测任务。建筑物安全风险详查是建筑物安全风险普查的下一步工作，是对星载InSAR的监测结果进行甄别，从而划分每栋建筑物的类别。根据建筑物安全风险详查的结果，部署下一步建筑物变形精细化监测方案。建筑物变形精细化监测是针对I、II类建筑物关键点位的变形监测。

**3.0.3** 建筑物安全风险普查应给出建筑物的风险等级，当无法给出建筑物风险等级时，应对功能重要的建筑物进行建筑物安全风险详查。

【条文说明】本条规定了建筑物安全风险普查的目的。当星载InSAR无法给出大区域内某些建筑物的风险等级时，应根据功能重要程度对这些建筑物进行区分，作为下一步进行建筑物安全风险详查的组成部分。

**3.0.4** 建筑物风险等级宜按表3.0.4规定划分。

**表3.0.4 建筑物风险等级**

|  |  |
| --- | --- |
| 等级 | 建筑物变形阈值 |
| （mm） | （mm/月） | — | （/月） |
| A | *d*3y<18 | *V*1y<1 | *T*3y<1‰ | *TV*1y<0.067‰ |
| B | 18*≤d*3y<24 | 1*≤V*1y<2 | 1‰*≤T*3y<1.5‰ | 0.067‰*≤TV*1y<0.083‰ |
| C | 24*≤d*3y<48 | 2*≤V*1y<2.67 | 1.5‰*≤T*3y<3‰ | 0.083‰*≤TV*1y<0.167‰ |
| D | *d*3y≥48 | *V*1y≥2.67 | *T*3y≥3‰ | *TV*1y≥0.167‰/ |

【条文说明】目前建筑物安全风险评价标准主要有《危险房屋鉴定标准》 GJ 125-2016、《民用建筑可靠性鉴定标准》 GB 50292-2015、《工业建筑可靠性鉴定标准》 GB 50144-2008和《建筑地基基础设计规范》 GB 50007-2011等。建筑物变形阈值主要是综合参考上述标准而选取，主要指标是：当建筑物处于自然状态时，地基沉降速率连续2个月是否大于4mm/月；基础倾斜量是否大于2‰。本条也考虑了InSAR监测建筑物的时长因素，并结合大量的InSAR监测建筑物变形与现场踏勘验证案例，给出建筑物风险等级确定方法。

**3.0.5** 建筑物风险等级为C级和D级的建筑物，应进行建筑物风险详查。

【条文说明】本条对应进行风险详查的建筑物进行了规定。

**3.0.6**  建筑物风险详查宜鉴定建筑物类别，建筑物类别可分为I类建筑物、II类建筑物、III类建筑物。

【条文说明】本条规定了建筑物风险详查的目的。I类建筑物为高风险建筑物，II类建筑物为较高风险建筑物，III类建筑物为无风险建筑物。

**3.0.7** I类建筑物和II类建筑物宜开展建筑物变形精细化监测。I类建筑物可开展高频率变形监测，II类建筑物可采用CR-InSAR方法进行较高频率变形监测。

【条文说明】本条对I类建筑物和II类建筑物开展建筑物变形精细化监测的方案选择进行了规定。高频率宜是数次/天，CR-InSAR监测频率宜是数次/月。

**图3.0.2 建筑物风险评价和监测方案技术流程图**

监测区域内的建筑物

功能重要

建筑物

数据选择

数据处理

建筑物高频率的变形监测

II类建筑物

功能不重要

建筑物

建筑物现场检测

III类建筑物

CR-InSAR对建筑物

较高频率的变形监测

I类建筑物

星载InSAR监测建筑物

建筑物风险评价

A、B级建筑物

C、D级建筑物

无法确定

风险等级建筑物

建筑物安全

风险普查

建筑物安全

风险详查

建筑物变形

精细化监测

# 4 建筑物安全风险普查

## 4.1 风险普查数据选择

**4.1.****1** 监测区建筑物安全风险普查的相关数据应包括星载SAR数据、DEM数据、建筑物矢量框数据。

【条文说明】目前可选择使用的星载SAR数据如表1所示。

|  |  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- | --- |
| 星载SAR系统 | TerraSAR-X/TanDEM-X | COSMO-SkyMed | RADARSAT-2 | ALOS-2PALSAR-2 |
| 隶属 | 德国 | 意大利 | 加拿大 | 日本 |
| 运行时间 | 2007 | 2007 | 2007 | 2014 |
| 轨道高度(km) | 514 | 620 | 798 | 628 |
| 波段(cm) | X(3.1) | X(3.1) | C(5.6) | L(22.9) |
| 极化方式 | 全极化 | HH/VV | 全极化 | 全极化 |
| 侧视角(o) | 20~55 | 19.7~45.5 | 10~59 | 8~70 |
| 重复周期（天） | 11 | 16 | 24 | 14 |
| 分辨率(m) | 1~16 | 1~100 | 3~100 | 3~100 |
| 影像幅宽(km) | 15~100 | 15~200 | 20~500 | 25~490 |

**表1 目前可使用的星载SAR数据**

|  |  |  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- | --- | --- |
| 星载SAR系统 | Sentinel-1A/1B | ICEYE X2、X4~X7 | KOMPSAT-5 | SAOCOM | 高分三号 |
| 隶属 | 欧空局 | 芬兰 | 韩国 | 阿根廷 | 中国 |
| 运行时间 | 2014/2016 | 2018 | 2013 | 2018 | 2016 |
| 轨道高度(km) | 700 | 570 | 550 | 620 | 755 |
| 波段(cm) | C(5.6) | X(3.2) | X(3.2) | L(23.5) | C(5.6) |
| 极化方式 | 单/双极化 | VV | 全极化 | 全极化 | 全极化 |
| 侧视角(o) | 18.3~47 | 20~35 | 20~45 | 20~50 | 10~60 |
| 重复周期（天） | 12 | 22 | 28 | 16 | 3 |
| 分辨率(m) | 3~20 | 1~3 | 0.85~20 | 10~100 | 0.9~700 |
| 影像幅宽(km) | 20~400 | 5~30 | 5~100 | 20~350 | 10~650 |

**续表1 目前可使用的星载SAR数据**

**4.1.2** 建筑物安全风险普查时，星载SAR数据应满足下列要求：

1 星载SAR影像的分辨率宜优于3m。

2 星载SAR影像应选取同一类数据，星载SAR影像的极化方式宜选择HH或VV，入射角宜分布在20°~45°之间。

3 根据星载SAR数据的临界空间基线选择其空间基线阈值。当选择X波段的数据时，空间基线阈值宜为1000m，当选择C波段的数据时，空间基线阈值宜为1500m。

4 当预定顺轨方向同一期的星载SAR数据为2景及以上时，宜选择长条带数据；单轨数据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。

5 星载SAR数据量应不少于35景，数据的采样频率宜为12~18景/年。

【条文说明】PS点的数量与数据分辨率直接相关，为了保证在建筑物上能获取足够多的PS点，宜选用优于3m分辨率的数据。针对极化条件，考虑到建筑目标在HH或VV极化情况下的信号较强，能够提取较多的PS点，因此宜选用这两种极化条件获取数据。针对入射角条件，当入射角过小时，星载SAR图像的地距分辨率较差；当入射角过大时，较易出现信号遮挡现象，因此入射角宜分布在20°~45°之间。根据InSAR理论，空间基线越小，星载SAR数据的相干性越强，能够提取的PS点也越多。为了保证星载SAR数据之间的相干质量，X波段数据的空间基线阈值宜选择为1000m，C波段数据的空间基线阈值宜选择为1500m。《时间序列InSAR地表变形监测数据处理规范》 CH/T 6006-2018中，在预定顺轨方向同一期的星载SAR数据2景及以上时，单轨数据相邻两景影像重叠度应超过10%影像长度，跨轨数据相邻两景影像间重叠度应超过10%影像幅宽；《地质灾害InSAR监测技术指南》（试行）T/CAGHP 013-2018中，在预定顺轨方向同一期的星载SAR数据2景及以上时，单轨数据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；本条选择了《地质灾害InSAR监测技术指南》（试行）T/CAGHP 013-2018中的规定。建筑物变形监测精度要求较高，同时考虑到建筑物很大概率存在非线性变形，所以本条规定了较高景数的数据量和采样频率。

**4.1.3** DEM数据应满足下列要求：

1 DEM数据格网间隔与干涉图分辨率相差不应超过5倍，高程精度应优于15m，应满足大地基准和高程基准要求。

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

3 DEM数据在空间上应保持一致，应无跳变和空洞。当发生质量问题且面积不超过20%时，宜用其他数据补充；当超过20%时，宜更换数据。

4 选用的DEM比例尺不应低于InSAR监测成果比例尺。

## 4.2 风险普查数据处理

**4.2.1** 数据处理应按下列步骤进行：

1 星载SAR数据预处理。

2 差分干涉计算。

3 时间序列变形相位计算。

4 变形量计算。

5 年度沉降速率计算。

6 地理编码。

**4.2.2** 星载SAR数据预处理应符合下列规定：

1 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，星载SAR主影像的选择和像对组合应按下列步骤进行：

1）计算所有影像像对之间的时间和空间基线，生成其基线分布图；

2）选择时间和空间基线居中的一景作为主影像。

2 所有星载SAR影像应对主影像进行配准、裁剪，组合生成时间序列干涉图集。具体步骤应符合下列规定：

1）应将所有影像裁剪成范围一致区域，其公共区域作为星载SAR处理范围，选择配准算法，设置配准参数，对每个像对进行配准计算；

2）当主、辅影像配准时，方位向和距离向误差均宜小于0.1个像元，且用于计算配准的同名点应在整景影像上均匀分布；

3）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。

3 应将DEM与选好的主影像进行配准，其范围应裁剪成与主影像范围一致，具体步骤应符合下列规定：

1）应对DEM数据采样成与主影像一致的分辨率；

2）当DEM与主影像配准时，配准精度应优于0.5个像元；

3）应根据配准关系，计算生成DEM坐标系到星载SAR影像坐标系的转换查找表；

4）应根据转换查找表，运用拟合算法将DEM转换到星载SAR影像坐标系，生成影像坐标系下的DEM。

4 干涉图生成的具体步骤应符合下列规定：

1）在频率域，应对已配准主、辅影像的公共频带进行前置滤波，生成滤波后的主、辅影像；

2）应对滤波后主、辅影像的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。

【条文说明】在《地质灾害InSAR监测技术指南》（试行）T/CAGHP 013-2018中，当主、辅影像配准时，方位向和距离向误差均小于0.25个像元；在《地面沉降调查与监测规范》 DZ/T 0283-2015中，当主、辅影像配准时，要求方位向误差不低于0.125个像元，距离向误差不低于0.2个像元。主辅图像的配准误差会影响干涉相位的精度，为了保证干涉相位的质量，本条规定配准误差宜控制在0.1个像元。

**4.2.3** 差分干涉计算应按下列步骤进行：

1 应从干涉相位中去除平地和地形相位，生成差分干涉相位，逐像元计算生成差分干涉图。

2 应检查每景差分干涉图，计算空间基线残余相位并去除，进行空间基线修正。

**4.2.4** 时间序列变形相位应按下列计算步骤进行：

1 相邻PS点参数估计。

2 线性变形相位和残余高程相位计算。

3 三维空时相位解缠

4 非线性变形相位和大气相位计算。

5 时间序列变形相位计算。

【条文说明】对干涉图的差分干涉相位应进行时间和空间域的线性相位和非线性变形相位计算，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。相邻PS点参数估计时，将PS点目标相连构成不规则网络，依据点间连接关系求解相邻点差分相位差。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化速率和DEM误差值。差分干涉相位去除线性变形相位和残余高程相位后，得到残余相位。采用三维空时相位解缠算法，对残余相位进行相位解缠。以每幅图像计算的解缠相位为输入，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，并进一歩分解出非线性变形相位。将4.2.4中第2款和第4款得到的线性变形相位和非线性变形相位求和，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。

**4.2.5** 变形量计算应按下列步骤进行：

1 依据雷达波长参数，把时间序列变形相位换算为视线向（LOS）变形量：

 (4.2.5-1)

式中：——时间序列变形相位；

Δ*r*——为LOS形变量；

——为雷达波波长。

2 依据雷达入射角，将LOS变形量转换为垂直向变形量：

 (4.2.5-2)

式中：*d*——为垂直向变形量；

*θ*——为雷达波入射角。

**4.2.6** 年度沉降速率计算应按下列步骤进行：

1 应根据同期地面高精度控制点数据，在临近点上计算PS点沉降量与实际沉降量之间差值的平均值，即整体偏差值。

2 根据整体偏差值修正PS点沉降量。

3 集合修正后的PS点沉降量，生成PS点沉降序列，逐点计算PS点沉降序列的年度沉降速率。

【条文说明】本条规定了年度沉降速率的计算步骤。地面高精度控制点数据宜利用GPS测量、全站仪测量、水准测量等方法获取。因为参考点不统一InSAR获得的变形量与实际变形量存在整体偏差，所以应进行PS点沉降量修正，以地面高精度控制点数据作为实际变形量。

**4.2.7** 在进行地理编码时，应利用DEM坐标系到星载SAR影像坐标系所建立的坐标系转换查找表，完成每个PS点的星载SAR影像坐标到大地坐标的变换，获取每个PS点的空间三维坐标（经度、纬度、高度）。

## 4.3 建筑物风险评价

**4.3.1** 建筑物风险评价应按下列步骤进行：

1 识别建筑物上对应的PS点。

2 区分建筑物所对应的地面PS点和上部结构PS点。

3 PS点聚类分析。

4 计算建筑物变形特征参数。

5 建筑物风险分级。

**4.3.2** 建筑物风险评价所用变形监测参数宜符合表4.3.2的规定。

**4.3.3** 建筑矢量框宜进行轮廓外延，当选用分辨率为3m的数据时，轮廓外延值可设置为3m；根据外延建筑矢量框和PS点空间三维位置坐标，识别每栋建筑物矢量框中建筑物上所对应的PS点。

【条文说明】当星载SAR数据的分辨率为3m时，PS点的定位精度也为3m。因此，需要将建筑矢量框进行轮廓外延，确保每建筑物所对应的PS点都能落于该栋建筑物的矢量框中。

**表4.3.2 建筑物变形监测参数**

|  |  |
| --- | --- |
| 部位 | 监测参数 |
| 建筑物地面墙角 | 三年累计沉降最大值*d*3y | 近一年沉降速率最大值*V*1y | 三年累计倾斜最大值*T*3y | 近一年倾斜速率最大值*TV*1y |
| 建筑物结构 |

**4.3.4**  估计测量区域的地面高程信息，应符合下列规定：

1 基于目标区域内所有的PS点信息，可首先将目标区域划分为网格，在每个网格中通过对PS点高程进行统计，估计当地的地面高程信息。

2 地面高程估计的网格可依据当地地形设定，当选用3m分辨率的数据时，对于平原地区，可设定为300m×300m的网格；对于地形起伏地区，可设定为100m×100m的网格。

【条文说明】在地面高程估计的过程中，假定每个网格内的地面高程是一致的。同时，如果网格内PS点的数量越多，地面高程估计越精确。因此，对于平原地区，宜选择较大的网格，对于地形起伏地区，网格可适当缩小。

**4.3.5** 区分每栋建筑所对应的建筑物地面墙角PS点和建筑物结构PS点，应符合下列规定：

1 高于地面高程值ΔH的PS点可被划分为建筑物结构PS点。

2 与地面高程值之差分布在[-ΔH，ΔH]之间的PS点可被划分为建筑物地面墙角PS点。

3 当选用分辨率为3m的X波段数据时，ΔH可设置为3m~5m。

【条文说明】对于3m分辨率的X波段数据，PS点的高程定位精度也为3m。因此可将ΔH设置为3~5m，区分地面上的PS点和上部结构的PS点。

**4.3.6 当**PS点聚类分析采用层次聚类法时，应符合下列规定：

1 当两个PS点的空间位置相近且变形演化相似时，则它们就属于同类PS点集合。

2 某个PS点在空间上距离一个较大同类PS点集合较近，但其变形演化历史与该同类PS点集合偏差较大，则该PS点为奇异PS点，需要剔除。

3 每个同类PS点集合最后被聚合为一个聚类点。

【条文说明】针对每一栋建筑物，可采用层次聚类的方法进行PS点聚类分析，从而获取同类PS点集合。如图1所示，当两个点的空间位置相近且变形演化相似时，它们就属于同类PS点集合。根据层次聚类法对PS点聚类后，如果某个PS点在空间上距离一个较大同类PS点集合较近，但它的变形演化值与该同类PS点集合偏差较大，该PS点就可定义为奇异PS点，将被剔除。同时，每个同类PS点集合将会被聚合为一个聚类点，后续的建筑物稳定性分析将基于聚类点。

PS点集合中可以包括一个PS点或者多个PS点。如果两个PS点的空间距离和变形演化值都小于对应的阈值，那么这两个PS点的变形演化偏差值可根据式（1）进行计算：

 （1）

式中：*de*——变形演化偏差值；

*M*——时间节点的数量；

*Xi，Yi*——分别为两个PS点第*i*时间节点的变形值。

根据随机信号理论，如果两个PS点相似，那么可假设*Xi*—*Yi*服从正态分布，即*Xi*—*Yi*~*N*(0, *σ*2)，则存在*Mde*/*σ*2~χ2(*M*)。一般地，*σ*2与两个PS点的噪声水平相关，可提前估计。所以，变形偏差阈值最终可用χ2检验理论来计算。



**图1 PS点聚类基本原理**

**4.3.7** 根据PS点聚类分析获取建筑物地面墙角聚类点和建筑物结构聚类点，从而计算建筑物的变形监测参数，计算方法应按表4.3.7进行。

**表4.3.7 建筑物变形参数计算方法**

|  |  |
| --- | --- |
| 参数 | 计算方法 |
| *d*3y | 选取三年累计沉降最大的聚类点，计算其三年累计沉降值。 |
| *V*1y | 选取三年累计沉降最大的聚类点，计算其近一年的沉降速率值。 |
| *T*3y | 计算聚类点对的三年累计倾斜值*TAB*，选取其最大值。当选用分辨率为3m的X波段数据时，聚类点水平距离宜不小于10m。 |
| *TV*1y | 根据确定*T*3y的聚类点对，计算其近一年的倾斜速率。 |

注：建筑物地面墙角和建筑物结构应分别计算变形参数。

【条文说明】参数*T*3y的计算公式如式(2)所示：

 (2)

式中：*d*A、*d*B——聚类点A和B的三年累计沉降，

*LAB*——聚类点A和B的水平距离。

为了更准确地计算建筑物近一年的沉降速率和倾斜速率，可将目标变形曲线（沉降曲线或倾斜曲线）以分段线性信号和周期型信号建模，其数学表达式如式(3)所示，考虑到在*tN1*时刻，两段曲线的连续性，建立约束条件如式(4)所示：

 (3) (4)

式中：*di*——第*ti*时刻InSAR测得的变形量，其中*i*=*N*0, *N*0+1, …, *N*1, …, *N*2；

*tN*0*~ tN*1——为前三年~前一年时间段；

*tN*1*~ tN*2——为近一年时间段；

*vj*和*bj*——分别为第*j*分段区间内的变形速率和恒定变形量；

*A*和*φ*——分别为周期性信号的参数；

*εi*——第*ti*时刻的随机噪声；

*Nj*——第*j*个断点时刻。

在数据处理过程中，*vj*、*bj*、*A*、*φ*及断点时刻*N*1、*N*2可采用最小二乘法进行数据估计处理。最终，式（3）中的算得的*v*2为近一年的变形速率。

**4.3.8** 根据本规程第3.0.4条确定建筑物风险等级，应取建筑物变形参数所对应的最高等级作为建筑物风险等级。

【条文说明】建筑物变形参数包括建筑物地面墙角和建筑物结构的*d*3y、*V*1y、

*T*3y、*TV*1y。

##

# 5 建筑物变形精细化监测

## 5.1 角反射器布设与测量

**5.1.1** 当采用CR-InSAR精细化监测建筑物变形时，CR选点应符合下列规定：

1 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。

2 CR监测点应选择具有代表性的区域，且固定在建筑物表面。

3 拉线应保证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。

4 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200m和100m，对于容易产生多路径散射的物体，应远于100m。

5 CR点位附近不应有强烈干扰接收卫星信号的物体。

6 CR应安置在背景反射特性较弱的地方。

**5.1.2** CR设计时应计算雷达后向散射横截面来确定雷达信号反射强度，从而确定CR的几何结构和参数尺寸，雷达后向散射横截面计算方法、CR几何结构和参数尺寸确定方法应按现行行业标准《地面沉降调查与监测规范》 DZ/T 0283和现行团体标准《地质灾害InSAR监测技术指南》（试行）T/CAGHP 013-2018执行。

【条文说明】CR测量原理要求雷达发射的入射信号经过角反射器的反射面时能够沿原路径的反方向被反射回去，在星载SAR影像上形成高强度的亮斑。雷达后向散射横截面是衡量一个物体将信号反射到雷达信号接收装置能力大小的一个物理量，雷达后向散射横截面越大，表示该方向上的反射信号强度越大，越容易将CR与其他背景地物区别开。CR几何结构常用的有两种类型，即二面CR和三面CR，宜选择三面CR，其中三面CR以单面形状为等腰直角三角形和正方形两种。

**5.1.3** CR制作与安装应符合下列规定：

1 CR的反射面板宜采用表面光滑、导电性好的网状或薄板材料构成，材料宜选择铝板和镀锌铁皮双层结构，铝板厚度3mm，外加1mm厚镀锌铁皮，边侧加三角角钢加固。

2 CR的反射面板之间应保持相互垂直关系，角度加工公差不应超过±1o。

3 CR棱边宜设置三个活动关节，通过伸缩杆来调节CR的仰角。

4 CR顶底处宜设置一漏水孔，使CR不至于积水影响其反射路线。

5 CR底边方位角和截面仰角方向确定方法应按现行行业标准《地面沉降调查与监测规范》 DZ/T 0283和现行团体标准《地质灾害InSAR监测技术指南》（试行）T/CAGHP 013执行。

6 CR方位角与雷达航线方向的夹角应小于±5o。

7 CR定位点偏离设计位置的三维坐标偏差应小于10mm，否则应记录实际偏离值。

8 CR底面应采用水平仪或倾角仪调水平，误差应小于±3o，当不满足时，应对布设区域进行平整处理。

9 CR反射面应清洁，无尘土、雨水、冰雪等。

**5.1.4** CR布设测量应符合下列规定：

1 CR布设完成后，应测量底面水平程度，水平向测量仪器的标称精度不应低于1o。

2 CR布设完成后，应测量CR的方位角，方位测量仪器的标称精度不应低于1o。

## 5.2 精细化监测数据选择

**5.2.1** 当采用CR-InSAR精细化监测建筑物变形时，相关数据应包括下列内容：

1 星载SAR影像。

2 DEM数据。

**5.2.2** 根据星载SAR数据的临界空间基线和时间基线选择其基线阈值。当星载SAR影像的分辨率采用3m时，对于X波段，空间基线阈值宜为2000m；对于C波段，空间基线阈值宜为3000m。时间基线可设置为365天。

【条文说明】 角反射器处信号较强，在更大的基线情况下，仍然能保持较好的相干性，因此可设置较大的空间基线阈值。

**5.2.3** 星载SAR数据量不应少于2期，数据的采样频率宜为12~18景/年。数据选择的其他要求应符合本规程第4.2.2条和第4.2.3条的规定。

## 5.3 精细化监测数据处理

**5.3.1** 精细化监测数据处理应按下列步骤进行：

1 在星载SAR影像中搜索角反射器的空间位置；

2 获取角反射器处的相位信息；

3 计算影像对的干涉相位，并对由地形因素引入的相位进行补偿；

4 建立相位模型；

5 变形相位计算。

**5.3.2** 根据星载SAR轨道数据和实地测量的角反射器空间三维坐标，在星载SAR影像中搜索角反射器的空间位置，应符合下列规定：

1 根据零多普勒条件，角反射器对应的方位时刻*ta*宜按下式进行叠代计算：

 (5.3.2-1)

式中：*S*(*ta*)——卫星在*ta*时刻的三维位置坐标；

*T*——角反射器的三维位置坐标；

*V*(*ta*)——卫星在*ta*时刻的速度。

2 以角反射器对应的粗略影像坐标[*l*, *p*]为窗口中心，搜索窗口内星载SAR数据中幅度最强信号的位置，则星载SAR影像中角反射器的准确坐标宜按下列公式进行计算：

 (5.3.2-2)

 (5.3.2-3)

 (5.3.2-4)

式中：*l*——星载SAR影像的方位坐标；

*p*——星载SAR影像的距离坐标；

*ta*1——星载SAR影像的方位起始时刻；

*tr*1——星载SAR影像的距离起始时刻；

PRF——星载SAR影像的方位向采样频率；

RSR——星载SAR影像的距离向采样频率；

*tr*——角反射器目标对应的距离向时间；

*c*——光速。

**5.3.3** 对角反射器数据进行升采样，升采样倍数宜为10倍，获取角反射器处的相位信息。

【条文说明】10倍的升采样是为了获取角反射器的精确位置（0.1像元级别），进而准确提取角反射器的相位信息。

**5.3.4** 计算影像对的干涉相位，并对由地形因素引入的相位进行补偿，应符合下列规定：

1 根据多幅星载SAR影像中角反射器的相位信息，影像对的干涉相位宜按下式进行计算：

 (5.3.4-1)

式中：*φInt*——角反射器影像对的干涉相位；

*φM*——角反射器在主图像的相位；

*φS*——角反射器在辅图像的相位。

2 根据卫星轨道数据和外部DEM粗略处理估计，地形因素引入的相位宜按下式进行计算：

 (5.3.4-2)

式中：*φDEM*——为地形因素引入的相位；

——为雷达波波长；

——为主副图像的垂直基线；

——为卫星到目标的斜距；

——为雷达波入射角；

*h*——为由DEM数据获取的高程值。

3 在干涉相位中，补偿后的影像对干涉相位宜按下式进行计算：

 (5.3.4-3)

式中：*φInt,r*——为补偿后的影像对干涉相位。

**5.3.5** 目标角反射器处时间序列变形相位宜按下式进行计算：

 (5.3.5-1)

式中：——为时间序列变形相位；

*φDEM,r*——为残余的地形相位；

*φatmo*——为大气残余相位；

*φtrack*——为轨道误差相位；

*φnoise*——为噪声误差相位。

**5.3.6** 目标角反射器时间序列变形相位应进行相位解缠，获取解缠后的变形相位。

**5.3.7** 目标角反射器处变形量应按本规程第4.2.5条进行计算。

# 6 成果编制与提交

## 6.1 成果编制

**6.1.1** 星载InSAR建筑物变形监测成果宜包括下列内容：

1 数据类成果，包括星载InSAR变形监测数据和建筑物变形风险普查数据，InSAR变形监测数据包括PS点的地理位置、平均变形速率、变形演化历史；建筑物变形风险普查数据包括关键点变形信息、建筑物高度信息、建筑物沉降信息、建筑物倾斜信息和建筑物变形风险等级。

2 图件类成果，包括星载InSAR变形监测图件成果和建筑物变形监测图件成果，星载InSAR变形监测图件成果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；建筑物变形监测图件成果包括建筑物二维风险等级图、建筑物三维风险等级图和建筑物关键点变形曲线图。

3 表格类成果，包括建筑物潜在风险等级表和建筑物风险信息评价表。

4 文档类成果，即建筑物变形监测报告，包括建筑物变形风险普查报告、采用CR-InSAR方法的建筑物精细化监测报告。

【条文说明】1 表格类成果可按照如下模板来编写。

表2 建筑潜在风险等级表



表3 建筑物风险信息评价表

|  |  |
| --- | --- |
| 详细地址 |  |
| 行政区 |  | 经纬度 |  |
| 监测时间 |  |
| 卫星光学底图 | 百度地图 |
|  |  |
| 建筑风险评价指标 |
| 建筑监测类型 | 建筑物上有PS点 |
| 建筑综合确定性风险等级 | D |
| 地面沉降风险评价 |
| 风险评价类型 | 确定性评价 | 地面沉降变化趋势 | 明显加速 |
| 地面累积沉降风险等级 | C | 地面累积沉降 | -46.60mm |
| 地面近期沉降风险等级 | D | 地面近期沉降速率 | -2.74mm/月 |
| 地面倾斜风险评价 |
| 风险评价类型 | 确定性评价 | 地面倾斜变化趋势 | 缓慢加速 |
| 地面累积倾斜风险等级 | A | 地面累积倾斜 | 0.92‰ |
| 地面近期倾斜风险等级 | B | 地面近期倾斜速率 | 0.07‰/月 |
| 上部结构沉降风险评价 |
| 风险评价类型 | 确定性评价 | 上部结构沉降变化趋势 | 一般加速 |
| 上部结构累积沉降风险等级 | C | 上部结构累积沉降 | -42.60mm |
| 上部结构近期沉降风险等级 | C | 上部结构近期沉降速率 | -2.27mm/月 |
| 上部结构倾斜风险评价 |
| 风险评价类型 | 确定性评价 | 上部结构倾斜变化趋势 | 缓慢加速 |
| 上部结构累积倾斜风险等级 | A | 上部结构累积倾斜 | 0.92‰ |
| 上部结构近期倾斜风险等级 | A | 上部结构近期倾斜速率 | 0.06‰/月 |
| 建筑物关键变形曲线 |
| 地面最大沉降曲线 | 地面最大倾斜曲线 |
|  |  |
| 上部结构最大沉降曲线 | 上部结构最大倾斜曲线 |
|  |  |

**2** 图件类成果可按照如下模板来制作:



图2 建筑关键点变形曲线图

**6.1.2** 星载InSAR建筑物变形监测报告应包括下列内容：

1 建筑物安全问题现状；

2 项目概况，包括监测区范围、监测内容、基础资料等；

3 建筑物安全风险普查，包括基础数据、技术路线、评价指标等；

4 采用CR-InSAR方法对建筑物变形的精细化监测，包括基础数据、评价指标；

5 结论与建议。

【条文说明】当采用CR-InSAR方法对建筑物变形进行精细化监测时，应包括该条第4款的报告内容。

**6.1.3** 图件类成果编制应包括下列内容：

1 地面沉降速率图。对监测成果点目标的沉降速率值按照其大小进行分级设色，生成沉降速率图。

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值的大小分级设色，生成累计沉降量图。

3 建筑物二维风险等级图。根据建筑物综合风险等级评价结果，选取变形监测指标中的最高等级作为所评价建筑物的综合风险等级，对建筑矢量框按其等级分级设色，生成建筑物二维风险等级图。

4 建筑物三维风险等级图。根据建筑物综合风险等级评价结果，选取变形监测指标中的最高等级作为所评价建筑物的综合风险等级，对建筑三维矢量框按其等级分级设色，生成建筑物三维风险等级图。

5 地面沉降等值线图。对监测成果等值线按照其沉降量值的大小分级设色，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。

6 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。

7 建筑物关键点变形曲线图。对关键变形点根据时间序列绘制沉降曲线，横坐标为数据时间点，纵坐标为变形量，同时获取趋势拟合曲线，生成关键点变形曲线图。

**6.1.4** 图件类成果制图要求应符合现行国家标准《遥感影像平面图制作规范》 GB/T 15968 、现行行业标准《环境地质遥感监测技术要求（1：250000）》 DZ/T 0296、现行团体标准《地质灾害InSAR监测技术指南》（试行）T/CAGHP 013的规定。

## 6.2 成果提交

**6.2.1** 星载InSAR监测建筑物安全工作完成后，宜及时将相关成果文件及资料提交相关部门。

**6.2.2** 应按资料管理的有关规定及时完成资料归档工作。

# 本规程用词说明

**1** 为便于在执行本标准条文时区别对待，对要求严格程度不同的用词说明如下：

**1）**表示很严格，非这样做不可的：

正面词采用“必须”，反面词采用“严禁”；

**2）**表示严格，在正常情况下应这样做的：

正面词采用“应”，反面词采用“不应”或“不得”；

**3）**表示允许稍有选择，在条件许可时首先应这样做的：

正面词采用“宜”，反面词采用“不宜”；

**4）**表示有选择，在一定条件下可以这样做的，采用“可”。

**2** 条文中指明应按其他有关标准执行的写法为“应符合......的规定”或“应按......执行”。

# 引用标准名录

《遥感影像平面图制作规范》 GB/T 15968

《地面沉降调查与监测规范》 DZ/T 0283

《环境地质遥感监测技术要求（1：250000）》 DZ/T 0296

《地质灾害InSAR监测技术指南》（试行）T/CAGHP 013