

# PS-InSAR 技术在潘集区采煤沉降监测中的应用

文 / 汪 洋 安徽省地质矿产勘查局三一二地质队

**摘要:** 近几年, 通过 PS-InSAR 监测采煤区域地表沉降的方法在诸多地区得到推广, 该方法能够弥补常规方法用时长且无法提供沉降面状数据的不足, 为矿区日后的发展提供参考。文章结合潘集区的情况, 深入讨论了该技术的应用路线和监测要点, 内容涉及选择主影像、生成干涉组合、修正高程等方面, 以供参考。

**关键词:** 采集煤炭; 地表沉降; PS-InSAR 技术

【DOI】10.12254/j.issn.2096-6539.2025.10.119

## 引言

新时期, 随着煤炭资源的大规模开采, 矿区地面沉降问题日益严重, 对生态环境和人类活动造成了巨大影响。以往监测地表沉降的方法存在成本高、周期长等问题, 难以满足实时监测的需求, 在此背景下, PS-InSAR 应运而生, 该技术具有高精度、高效率的特点, 能够有效监测地表形变, 使监测工作充分发挥作用。本文旨在探讨 PS-InSAR 在潘集区的应用, 为矿区地面沉降监测提供新的解决方案。

## 一、PS-InSAR 介绍

PS-InSAR 是基于 SAR 数据的地面变形监测方法, 强调利用多个时刻获取的雷达影像, 通过干涉处理技术, 提取出地面活动的微小位移信息。该项技术的关键在于识别和利用“永久散射体”, 简单来说, 就是以在多个影像中保持稳定反射的地物为参照物, 提高监测的精度和可靠性, 目前多用于城市沉降、滑坡监测等领域。其优势包括高空间分辨率、广泛覆盖和成本可控, 可以通过分析散射体的相位变化, 实现对地面动态的长期监测, 为城市规划、基建安全和灾害评估提供重要数据支持<sup>[1]</sup>。

## 二、技术路线

潘集区隶属于淮南市, 北接茨淮新河, 南靠淮河, 西连凤台县, 东接怀远县。该区的幅员面积约 590km<sup>2</sup>, 四季分明, 全年平均气温在 15.1℃左右。地层为典型的华北地层, 表土层平均厚度在 1201m 至 564m 间, 含水量较大且夹杂有流沙层。沉降监测以监测潘集区地表变形程度得出结论为基础, 工作内容包括: 一是收集具有实际意义的光学影像、卫星影像和 DEM 数据, 了解当地划分行政区的依据、历史沉降资料、工程地质及水文地质条件。二是预处理 D-InSAR, 读取单视复数影像, 配准影像, 生成具体的差分干涉图。分析 PS-InSAR, 了解线性形变情况和整体速率, 对形变时间序列加以确定。三是验证形变结果, 若验证未发现问题, 则将数据按照一定顺序写入 ArcGIS, 由 ArcGIS 基于预设指令生成能够准确展示潘集区形变量平均值、总值的图表。四是套合乡镇注记、监测结果和分区矢量图, 整理并分析形变

情况, 根据分析结果、矿区所在位置、当前地质条件和开采历史, 解释地表形变特征, 确定具有代表性的沉降区域, 撰写可以为后续工作提供监测报告<sup>[2]</sup>。

## 三、应用要点

### (一) 获取并处理数据

本次工作所使用数据见表 1:

表 1 沉降监测 SAR 数据

影像覆盖范围	潘集区全境
成像时间	(2017 年 5 月-2022 年 8 月, 总数据 87 景) 20170520; 20170613; 20170719; 20170812; 20170905; 20171011; 20171104; 20171128; 20171222; 20180115; 20180208; 20180304; 20180409; 20180503; 20180527; 20180620; 20180714; 20180807; 20180831; 20180924; 20181018; 20181123; 20181217; 20190110; 20190203; 20190311; 20190404; 20190428; 20190522; 20190615; 20190709; 20190802; 20190826; 20190919; 20191013; 20191106; 20191130; 20191224; 20200117; 20200210; 20200305; 20200329; 20200422; 20200516; 20200609; 20200703; 20200727; 20200820; 20200913; 20201007; 20201031; 20201124; 20201218; 20210111; 20210204; 20210228; 20210324; 20210417; 20210511; 20210604; 20210628; 20210722; 20210815; 20210908; 20211002; 20211026; 20211119; 20211213; 20220106; 20220118; 20220130; 20220211; 20220223; 20220307; 20220319 20220331; 20220412; 20220424; 20220506; 20220518 20220530; 20220611; 20220623; 20220705; 20220717 20220729; 20220810;
模式	Interferometric Wide 干涉宽模式
分辨率 (m)	20
极化方式	VV
幅宽(km*km)	250
处理级别	SLC(单视复数图像)

PS-InSAR 的原理是以已知时间序列影像为基础, 分析地面点散射性。将裸岩、建筑顶部等散射性满足要求的点作为监测 PS 点, 基于分散在不同位置的 PS 点获取具有实际意义的相位信息。通过对相位信息进行插值, 掌握可以反映地表形变情况的信息。此过程中可采取 31 景 Sentinel-1 卫星影像数据针对地面沉降进行形变状态

的监测与分析。这类数据具有大幅宽、多极化、重复周期短的特点,能在地表遮盖物较为密集的情况下监测获取信息效果最为显著。同时受到采集周期的时间跨度、宽幅、极化方式、波段等影响,PS定位点会随着参数调节而逐渐更加准确,切实保证后续的数据处理环节能得到技术优化。此期间为提高获取数据的精度,应借助地面高程模型作为InSAR中的地形相位,去除错误或者差异较大的数值,准确把控卫星遥感沉降监测点位图的空间分辨率。

处理数据的工作通常分两步展开,第一步是预处理,工作内容包括选择并处理主影像、去除地形相位、形成差分干涉图等。第二步是深度处理,该阶段需要完成的工作包括但不限于确定PS点、分析残余相位。这一过程中可采用GAMMA软件对收集数据实施干涉处理,提取需求的地面沉降数据。基于潘集区采煤矿业的实际挖掘范围与当地地理信息状况,运用该软件中的五大优势功能进行处理,包括SAR处理器、干涉SAR处理器、土地利用工具、干涉定点目标解析、差分干涉与地理编码。

## (二) 选择主影像

该环节的主要任务是分析影像集,筛选时空基线大小符合有关要求的真实影像,以该影像为参考,配准已经掌握的辅影像。事实证明,这样做不仅能够使配准误差得到有力控制,还能够降低去相干这一情况出现的可能性。目前PS-InSAR中公共主影像的选择方法主要分为时间基线最小与基线均衡化两种。第一种方法中认为时间基线越长,测试地区受到地表植被、表层土形状与天因素造成的影响越大。因此,需考虑干涉图的相干性,把时间基线作为最佳的主影像选择依据,也就说一定程度上时间基线最短。该方法这里仅仅验证和的最小取值,没有充分考虑到各个基线在相关联权重方面的问题,同时去相干模型构建的越复杂,实际获取权重数值则会表现出明显的不统一趋势。

第二种方法是在前一种基础上提出的补充、完善,通常三组基线中时间基线所占据的量级较大,选取主影像的倾向权重就会更大,由此在与空间基线和多普勒质心频率基线综合后,提出基线均衡化方法。可先绘制SAR数据集成时间基线散点图,并通过选择更为合适的阈值,找出在预期目标范围内小于该阈值的SAR备用影像序号。接下来应针对备用主影像的三基线实施均衡化,把存在较大差异的基线值改为(0, 1]区间范围内。随后计算各个备用序号对应影像数据的总和,再对比选择最小的作为主要处理影像。该方法有效平衡了各个基线的权重,还能在一定程度上确保优选时间基线的原则顺利落到实处,促使公共主影像的选择更为合理。

## (三) 处理影像

确定主影像后,应尽快配准影像,保证配准精度不超过1/8像元,以避免干涉图整体相干质量由于配准精度不达标而受到影响。此过程中需在主影像图层选择某一个定点位置作为待配准点,并将这一点作为中心选取规定范围内需求大小的滑动窗口。依据PS-InSAR中已经获取到的初始偏移量,同时分别在辅助影像上逐行逐列围绕待批准点移动窗口,确保精度的测绘指标增长到最值,这样就会让辅助影像的窗口中心点与待配准点同名。随后,分解研究范围并按照规定裁剪,在此基础上,通过并行处理的方式,进一步提高处理数据的质效,为后续工作预留更加充分的时间。需注意在处理滤波前可选取具有不同相干性的典型像对,通过运用Boxcar、Modified Goldstein等手段进行数据试验。如发现二者获取的报告结果相似,相干性好时可认定Boxcar技术的应用效果显著,否则需用Modified Goldstein技术处理。本次工作研究中选择Boxcar滤波手段,且配备SRTM DEM数据干涉去除平地与地形相位,进一步便于后续环节严控差分干涉相位计算的可靠性。

## (四) 生成干涉组合

在本次工作中,为保证研究区域所包含高相干目标得到充分利用,避免大气受到严重影响,同时降低监测研究区域受采矿行为影响所出现形变的难度,有关人员决定利用PS-InSAR完成分析工作。PS-InSAR能否正常发挥作用,主要取决于所选取干涉组合是否合理,在选择干涉组合时,不仅要分析去相干现象对干涉图的影响,还要注意组合对应的网络构型,保证所选择组合能够为解算提供便利。

在PS-InSAR技术支持下生成干涉组合的具体操作流程:一是要将公共主影像作为选取基准,把所有的图像都配准、取样到主影像空间中。这样同一地区的n+1幅SAR图像就能形成N个干涉对,而每一个干涉对都会逐一进行差分处理,获取N幅干涉相位图。二是把给定的n+1景SAR影像构成一个干涉组合网络。按照小基线子集的传统处理方法,将时间基线、空间基线的垂直分量、多普勒质心频率差三者整合在一起,通过调控增加时间基线季节性变化、降雨量等影像因素,评估像对相干性。三是根据计算获取的相干矩阵,要选取具有高相干性的像对,参与后续该地建模时间序列的形变推演,生成干涉像对,重构组合干涉网络。

整个生成干涉组合的过程中,需考虑空间基线与时间基线的阈值,并严控可能存在的相位误差,提高干涉图的相干性,生成短基线集。还需对数字高程模型(DEM)实施更加有效的地理编码,与SAR强度标准图相互配准,以保障后续环节处理的精准性。此期间要明确注意数据处理的流程与应用技术手段,都需遵守科学的指导要求,

并结合潘集区的实际情况和数据特征做出适当调整、优化。

### (五) 确定地理编码

地理编码是指将SAR坐标系标准下的形变监测结果，转为地理坐标系的过程。先将地理坐标系对应DEM转换为有实际意义的雷达坐标，利用所转换坐标将地形相位去除，再整合雷达坐标、地理坐标，得到具有实际意义的地理编码。在地理编码的过程中要利用DEM数据操作，但这类数据获取的平面坐标精度较低时，可能会引发相对严重的编码误差。误差会让形变监测结果在和其他的基层地图层相互叠加时出现形变点系统性偏移<sup>[3]</sup>。为更好地保证数值偏差在允许的最小范围内，可利用添加地面控制点(GCPs)的方式，借助把这些点与SAR形变结果匹配，调整或者校正地理编码层面上的错误，促使最终得到的参考信息更为准确。还能通过提高外部DEM数据精度，减少数值本身误差对编码操作的影响。注意事项：在进行地理编码期间需保证所使用的DEM数据和SAR影像在空间和时间上存在一致性。

### (六) 生成差分干涉图

基于外部地形相位、干涉组合，生成完整的差分干涉图。这里提到的差分干涉图是通过比较两幅不同时间获取的SAR影像生成的波形图像，通常用于检测地表变形。其基本原理是利用干涉效应，计算同一地点反射信号的相位差异，消除大气和其他非地表变化的影响。此过程中应先选取一个数字高程模型(高精度)作为参考，其能有效代表监测区域的地形特征，抓取影像成图中获取数据的特征。以参考DEM针对初步生成的干涉相位图进行差分干涉处理，消除地形相位的影响，进一步突出地表形变信息。从潘集区采集数据的涉及处理相干性上来看，应在差分干涉模型中清除参考DEM有关地形相位的组成因素。还需对该差分干涉图采取滤波处理，尽可能规避相位误差、噪声，实施解缠操作转换连续的相位数值。目前，主要用于监测地面沉降、滑坡等现象，能够提供高精度的位移信息。

需注意SAR影像的质量对于差分干涉图生成具有较大影响。影像中的噪声、失相关等因素都有可能让干涉条纹出现模糊或断裂问题。整个差分干涉处理过程中均要科学、合理地设置有关的参数，比如滤波窗口的大小、基线长度等等，此类参数要结合潘集区具体的监测要求实行调整。这期间还应尽量减少大气相位对实际数值图模处理的误差干扰，提高地表形变信息获取的准确性<sup>[4]</sup>。

### (七) 修正高程

虽然差分干涉相位不包括外部地形与有关信息，但仍然保留了构筑物、建筑高度相位。因此，在后续处理

环节，有关人员应修正相位，确保所估计线性速率和实际情况相符。常见的修正高程处理方法有使用外部DEM数据校正、利用PS点高程信息优化、差分干涉相位图校正等。

### (八) 计算线性速率

针对地表沉降速度较慢的情况，可通过非线性、线性分量对演化全过程加以说明。解算时，有关人员应基于最小二乘法拟合时序相位，根据线性拟合的最优解，估计线性成分。具体的地表沉降速度计算流程如下所示：第一步是从预处理好的数据中精准识别出PS点(通常是地表稳定且容易识别的特征点，如岩石、建筑物边角等)，从该类定点的相位变化分析中可提取地表形变时间序列信息，为后续程序计算提供可靠的信息依据。第二步是利用线性回归分析每个PS点的线性形变速率。此处线性形变速率是指计算时间与相位变化的斜率获得，即斜率代表地表在该点位置出现的线性沉降或者抬升。第三步是与其他监测手段(如水准测量、GPS等)获取结果进行比对、验证，确保PS-InSAR技术得到线性速率的正确性，进而评估测定区域的稳定性。

### (九) 反演大气影响及形变

在将时序相位所包括线性分量去除后，根据大气影响、非线性分量具有的时空特性，通过滤波分离的方式，确定具体数值。

### 结语

对比常规的沉降监测方法，PS-InSAR不仅在成本和时间上具有明显优势，还能够提供连续的沉降数据，有助于有关人员更好地理解沉降过程和机制。由此不难看出，PS-InSAR在矿区沉降监测领域有良好的发展前景，未来应加大对该技术的研究力度，尽快形成有普适性、可行性和实效性的监测方案，使监测矿区沉降的工作能够充分发挥作用。

### 参考文献

- [1] 李益敏, 计培琨, 杨雪, 等. 基于PS-InSAR技术的地表形变监测与驱动力分析[J]. 地理空间信息, 2024, 22(09): 61-66+99.
  - [2] 王新龙, 车子杰, 马飞, 等. 基于PS-InSAR技术的晋城矿区地表形变监测及地质灾害风险预警[J]. 安全与环境工程, 2024, 31(02): 173-179+212.
  - [3] 林聪. SBAS-InSAR与PS-InSAR技术在陈旗两矿区地表沉降分析中的应用[J]. 科技创新与应用, 2023, 13(26): 184-187.
  - [4] 聂运菊, 熊倩, 计玉芳, 等. 曹妃甸新区PS-InSAR技术沉降监测及分析[J]. 江西科学, 2023, 41(01): 62-66.
- 作者简介: 汪洋(1992—), 男, 工程师, 本科, 中国地质大学(武汉), 主要从事地球物理及遥感勘查工作。