

InSAR毫米级地表形变监测的关键技术及应用

张艺樊

深圳市岩土综合勘察设计有限公司 广东 深圳 518000

摘要: InSAR地表形变监测技术正朝多源数据综合分析方向发展。该技术通过整合InSAR、GNSS、LiDAR及光学遥感等多源数据,利用智能算法和模型进行高效处理与分析,提升形变监测的精度与全面性。多源数据的互补性增强了监测的解析能力,拓展了应用场景,不仅服务于地震、火山等自然灾害预警,还广泛应用于地质灾害监测、城市规划等领域。未来,随着技术进步,多源数据综合分析将更智能、自动化,为地球科学及灾害管理提供更强支持。

关键词: InSAR; 毫米级; 地表形变; 失相关噪声滤波; 复杂形变建模

1 InSAR 技术基本原理

1.1 合成孔径雷达 (SAR) 原理

合成孔径雷达 (SAR) 是一种主动雷达系统,它通过发射脉冲雷达信号并接收回波来获取地表信息。SAR的基本原理和成像过程具有独特的特点,主要包括以下几个步骤:(1)发射脉冲信号:SAR通过天线发射高频率的脉冲雷达信号,这些信号连续发射并覆盖一定的地面范围。(2)接收回波信号:当脉冲信号与地物相互作用后,会产生散射回波。SAR接收并记录下这些回波信号。这些回波信号包含了地表的散射特性和结构信息。(3)平台运动:SAR平台(如卫星、飞机或无人机)在获取回波信号的同时,以一定的速度沿特定轨迹移动。这种运动使得SAR能够在不同位置接收来自同一地物的回波信号。(4)多次回波叠加:由于平台的运动,不同位置接收到的回波信号具有不同的相位。SAR将多次接收到的回波信号叠加在一起,以合成一个虚拟孔径。这个虚拟孔径比实际天线孔径大得多,从而提高了成像的分辨率。(5)回波信号处理:通过对叠加后的回波信号进行相位校正、滤波等信号处理操作,SAR可以减少噪声和干扰,提高图像质量。(6)图像重构:SAR利用叠加和处理后的回波信号,使用合成孔径雷达成像算法生成高分辨率的雷达图像。这些图像可以显示地表的细节和特征,如地形、建筑物、植被、水体等。SAR成像的特点包括;高分辨率:SAR能够捕捉到地表上细微的特征,其分辨率高于传统光学遥感系统。全天候和全天时:SAR不受天气、光照和时间限制,可以在白天和夜晚、晴天和阴天、甚至雨雪天气下工作。障碍物穿透能力:SAR的雷达波可以穿透云层、雨雪、浓密植被以及一些建筑结构等障碍物,从而实现对地表目标的观测。三维信息获取:SAR结合干涉技术可以获取地表目标的高度或形变信息。

1.2 InSAR技术基本原理

InSAR(合成孔径雷达干涉)技术是一种将SAR成像技术与干涉测量技术相结合的雷达技术。它的基本原理是通过同一地区进行两次或多次平行观测,获取两幅或多幅具有相干性的SAR复数图像,并通过分析这些图像之间的相位差来获取地表高程或形变信息。InSAR技术的具体过程如下;(1)数据获取:使用SAR系统对同一地区进行两次或多次观测,获取多幅具有相干性的SAR复数图像^[1]。(2)相位差提取:将覆盖同一地区的两幅或多幅SAR图像对应像素的相位值进行相减,得到一个相位差图,即干涉相位图。这个相位差图包含了地形起伏和地表形变(如果存在)的信息。(3)干涉处理:利用干涉处理技术对相位差图进行分析,通过解算相位差与地表高程或形变之间的几何关系,获取地表的三维空间位置及微小变化信息。(4)高程和形变信息提取:根据干涉处理的结果,可以提取出地表的高程信息或形变信息。这些信息可以用于地形测绘、地表形变监测、地震活动研究等多个领域。InSAR技术具有高精度、高分辨率和全天候的特点,能够获取地表的三维信息和微小形变信息,为地球科学研究提供了重要的技术手段。

2 InSAR 毫米级地表形变监测的关键技术

2.1 大气误差抑制技术

在InSAR毫米级地表形变监测中,大气误差是一个不可忽视的干扰因素。大气中的水汽和温度变化会导致雷达信号传播路径上的延迟,这种延迟在InSAR干涉图中表现为额外的相位变化,从而掩盖或扭曲了真实的地表形变信息。为了准确监测地表形变,必须有效抑制大气误差。大气误差抑制技术主要包括融合多源水汽资料和建立高精度大气延迟改正模型。通过融合气象卫星、地面气象站、GPS观测等多种数据源的水汽信息,可以构建出三维空间上的水汽分布图,进而估算出大气对InSAR信

号的延迟影响。利用这些多源数据建立高精度的大气延迟改正模型，可以精确计算出每个像素点上的大气延迟量，并将其从干涉相位中去除，从而显著提高形变监测的精度。

2.2 失相关噪声滤波技术

失相关噪声是InSAR形变监测中常见的另一种干扰因素。它主要由地表覆盖物的变化（如植被生长、土壤湿度变化等）和雷达观测几何条件的变化（如视角、入射角等）引起。失相关噪声会破坏干涉图中的条纹连续性，降低形变监测的精度和可靠性。为了滤除失相关噪声同时保持形变条纹信息，需要采用有效的滤波技术。基于最小二乘平差的最优滤波方法是一种常用的解决方案。该方法通过构建滤波算子，在保持形变条纹信息的同时，最小化噪声的影响。具体来说，它根据干涉图的局部统计特性和形变特征，自适应地调整滤波器的参数，以达到最佳的滤波效果。通过这种方法，可以在滤除噪声的同时，保留形变条纹的连续性和清晰度，提高形变监测的精度和可靠性^[2]。

2.3 复杂形变建模技术

地表形变往往具有复杂性和多样性，包括线性形变、非线性形变、周期性形变等多种类型。为了准确监测和解析这些复杂形变，需要采用先进的建模技术。复杂形变建模技术通常包括多分量形变模型、时空滤波方法以及物理模型驱动的方法等。多分量形变模型将形变分解为多个独立分量（如线性形变、季节性形变、突发性形变等），并分别进行建模和求解。时空滤波方法则利用形变在时间和空间上的相关性，通过滤波算法提取出不同尺度和类型的形变信息。物理模型驱动的方法则结合地质、水文、气象等领域的专业知识，构建出能够描述地表形变物理机制的模型，并通过模型反演获取形变参数。

3 InSAR 毫米级地表形变监测的应用

3.1 地震监测

InSAR技术在地震监测领域的应用极大地提高了我们对地震活动的理解和响应能力。通过卫星或机载SAR系统对地震活跃区域进行周期性观测，InSAR技术能够捕捉到地震前地壳的微小形变，这些形变可能预示着地壳应力的积累和释放过程，为地震预警提供重要线索。在地震发生后，InSAR图像能够迅速揭示出地震造成的地表破裂、断层滑动以及地壳的抬升或沉降等详细形变特征，这对于评估地震灾害的严重程度、确定震源参数以及指导灾后救援和重建工作具有不可替代的作用。

3.2 火山活动监测

InSAR技术在火山活动监测中的应用，为火山学家提供了一双“透视眼”，使他们能够深入了解火山内部的动态变化。火山在喷发前，通常会经历长时间的岩浆积累和地壳形变过程，这些变化通过InSAR技术可以精确测量和记录。通过分析InSAR数据中的地表形变时间序列，研究人员能够识别出火山体膨胀、塌陷等形变特征，进而推断出岩浆上升通道、火山口扩张以及潜在的喷发区域。此外，InSAR技术还能监测火山喷发后的地表形变，如火山锥的变形、火山口的变化以及火山灰的分布等，为火山灾害的应急响应、风险评估和长期监测提供重要信息。

3.3 地质灾害监测

地质灾害如滑坡、泥石流等，往往具有突发性强、破坏力大的特点，对人民生命财产构成严重威胁。InSAR技术以其高精度、广覆盖的监测能力，在地质灾害监测中发挥着重要作用。通过定期获取地质灾害易发区的InSAR数据，科研人员能够实时监测地表形变情况，及时发现潜在的滑坡体和泥石流源区^[3]。结合地质勘察、气象预报等多源数据，可以进一步分析地质灾害的成因、发展趋势及潜在风险，为地质灾害预警、风险评估及防治措施的制定提供科学依据。

3.4 基础设施沉降监测

随着城市化进程的加快，城市基础设施的安全性和稳定性越来越受到关注。InSAR技术以其非接触、高精度、广覆盖的特点，在城市基础设施沉降监测中展现出巨大潜力。通过定期对建筑物、道路、桥梁等基础设施进行InSAR观测，可以精确测量其沉降情况，及时发现并预警潜在的沉降风险。这对于保护人民生命财产安全、维护城市基础设施的正常运行具有重要意义。InSAR数据还可用于评估基础设施的稳定性和耐久性，为城市规划和设计提供科学依据。例如，在道路设计中，可以利用InSAR数据预测地基沉降情况，合理设置路基高度和排水系统；在建筑物安全评估中，可以利用InSAR数据监测建筑物的沉降变形情况，及时发现并处理安全隐患。

4 InSAR 地表形变监测技术的发展趋势

4.1 高分辨率SAR数据应用

InSAR地表形变监测技术的发展趋势正朝着高分辨率SAR数据应用的深化与普及方向迈进。随着卫星技术和雷达遥感技术的不断进步，SAR（合成孔径雷达）系统正逐步具备更高的空间分辨率和时间分辨率，这为InSAR（干涉合成孔径雷达）技术在地表形变监测领域的应用提供了更为丰富和精细的数据基础。高分辨率SAR数据的应用，使得InSAR技术能够捕捉到地表更为细微的形变

信息,如城市建筑物基础的微小沉降、地质构造的精细变化等。这种高精度的监测能力不仅提高了地质灾害预警的准确性和时效性,还为城市规划、基础设施维护、环境保护等领域提供了更为科学的决策支持。随着SAR卫星星座的部署和地面接收站网络的完善,InSAR数据的获取将更加便捷和高效。

4.2 智能算法在监测中的应用

InSAR地表形变监测技术的发展趋势中,智能算法的应用正日益成为关键驱动力。智能算法能够显著提升InSAR数据处理的效率和质量,面对海量的SAR数据,传统的人工处理方法已难以满足高效、准确的需求。而智能算法,如深度学习、机器学习等,能够自动学习数据特征,实现快速、准确的干涉图生成、相位解缠、滤波去噪等处理步骤,大大提高了数据处理的效率和精度。智能算法在形变信息提取方面展现出强大能力,通过构建复杂的模型和优化算法,智能算法能够自动识别并提取InSAR图像中的形变信息,包括形变量、形变速率、形变模式等,为地质灾害预警、城市规划等提供重要依据。

4.3 多源数据综合分析技术

InSAR地表形变监测技术的发展趋势之一是多源数据综合分析技术的广泛应用。随着遥感技术、地理信息系统(GIS)、全球导航卫星系统(GNSS)等多源数据获取手段的日益丰富,将多种数据源进行综合分析已成为提升地表形变监测精度和效能的重要手段。第一、多源数据综合分析技术的优势;不同数据源具有各自的优缺点和适用范围,多源数据综合分析能够充分利用各种数据的互补性,弥补单一数据源的不足,从而更全面地反映地表形变的真实情况。通过融合多种数据源的信息,可以消除或减小单一数据源带来的误差,提高形变监测的精度和可靠性。多源数据综合分析能够提供更丰富的信息维度,有助于深入解析地表形变的成因、发展规律和潜在风险^[4]。第二、多源数据综合分析技术的应用;将InSAR数据与GNSS、激光雷达(LiDAR)、光学遥感影像等多种数据源进行整合,形成综合监测网络。这些数

据源在时空分辨率、覆盖范围、测量精度等方面各具特色,通过综合分析可以实现对地表形变的全方位监测。利用先进的算法和模型对多源数据进行处理和分析,提取形变信息并进行融合。这包括数据预处理、形变信息提取、误差校正、形变模型构建等步骤。通过多源数据的相互验证和补充,可以提高形变监测结果的准确性和可信度。多源数据综合分析技术不仅适用于地震、火山等自然灾害的监测预警,还可以广泛应用于城市扩张、地面沉降、滑坡泥石流等地质灾害的监测评估。同时,在农业、林业、水资源管理等领域也具有广阔的应用前景。第三、未来展望;随着技术的不断进步和应用需求的增加,多源数据综合分析技术将在InSAR地表形变监测中发挥越来越重要的作用。未来,可以期待更多创新性的多源数据融合方法和算法的出现,以及更加智能化、自动化的监测系统的研发。

结束语

综上所述,InSAR地表形变监测技术正步入一个多元化、智能化的新时代。多源数据综合分析技术的广泛应用,不仅提高了形变监测的精度与效率,还极大地丰富了我们在地表动态变化的认识。展望未来,随着技术的不断创新与融合,InSAR地表形变监测将在防灾减灾、城市规划、环境保护等多个领域发挥更加重要的作用,为构建安全、可持续的社会环境贡献力量。

参考文献

- [1]张剑,柯宝贵,刘同木,等.利用时序InSAR监测兰州市中心城区地面沉降[J].测绘科学技术学报,2021,46(01):99-107,161.
- [2]王霞迎,赵超英,尹慧芳.地表形变时间序列InSAR监测法综述[J].地球物理学进展,2018,33(04):1430-1437.
- [3]李锁乐,吴宏安,张永红,等.包头市地面沉降高分辨率时序InSAR监测[J].测绘科学,2018,43(09):76-80.
- [4]赵喜江,王斌,张在岩.基于SBAS-InSAR技术的鹤岗矿区地表沉降监测与分析[J].黑龙江科技大学学报,2019,29(01):66-70.