

InSAR 测绘技术在地质勘探中的三维地理信息分析

庄羽

云南省有色地质局三一二队

DOI:10.12238/gmsm.v7i5.1803

[摘要] 干涉合成孔径雷达(InSAR)技术,作为一种基于卫星或航空平台的遥感技术,以其独特的优势在地质勘探领域展现出巨大潜力。InSAR测绘技术通过分析雷达波的相位信息,获取地表微小变化的三维测量数据,从而实现地壳形变、地质构造及地质灾害等方面的精细监测。近年来,InSAR在地质勘探中的应用逐渐增多,但其在三维地理信息分析方面的潜力尚未得到充分挖掘。本研究旨在探讨InSAR技术在地质勘探中的应用,分析其优势,结合三维地理信息分析方法,以期提高地质勘探的效率和准确性,并为相关领域的实践提供理论支持。

[关键词] InSAR测绘技术; 地质勘探; 三维地理信息

中图分类号: P624 文献标识码: A

3D geographic information analysis of InSAR surveying and mapping technology in geological exploration

Yu Zhuang

No.312 Nonferrous Geology Team of Yunnan Province

[Abstract] Interferometric Synthetic Aperture Radar (InSAR) technology, as a remote sensing technology based on satellites or aviation platforms, has shown great potential in the field of geological exploration with its unique advantages. InSAR surveying technology analyzes the phase information of radar waves to obtain three-dimensional measurement data of small surface changes, thereby achieving precise monitoring of crustal deformation, geological structures, and geological hazards. In recent years, the application of InSAR in geological exploration has gradually increased, but its potential in three-dimensional geographic information analysis has not been fully explored. This study aims to explore the application of InSAR technology in geological exploration, analyze its advantages, and combine with three-dimensional geographic information analysis methods to improve the efficiency and accuracy of geological exploration, and provide theoretical support for practical applications in related fields.

[Key words] InSAR surveying and mapping technology; geological prospecting; 3D geographic information

引言

随着地球科学的不断发展,有利于精确理解地质结构和地表变化。地质勘探作为获取地下信息的主要手段,其技术手段的创新直接影响着资源探测的效率与准确性。干涉合成孔径雷达(InSAR)技术作为一种非接触式的遥感方法,已经在地质勘探领域展现出强大的潜力,尤其在三维地理信息分析中,能够提供高分辨率的地形数据和地表形变监测,从而极大地促进了地质灾害预测和矿产资源的探测。

1 InSAR测绘技术原理与工作流程

InSAR(干涉合成孔径雷达)技术是基于SAR图像的相对相位测量,以实现地表微小变化的高精度探测。其基本原理是利用两个天线接收同一目标产生的回波信号,通过测量两条天线接收

信号的路径差,可以推导出地面任一点的高度。具体而言,路径差产生的相位差可以表示为:

$$\Phi = \frac{4\pi}{\lambda} \Delta r = \frac{4\pi f}{c} \Delta r$$

其中, λ 为波长, f 为频率, c 为雷达传播速度, Δr 为两天线间基线距。

工作流程主要包括如下关键步骤:(1)数据采集。由卫星或飞机搭载的SAR传感器发射雷达波,这些波遇到地表后反射回来,被传感器接收并记录成像。(2)多时相图像获取。在不同的时间点重复上述过程,获得包含地表变化信息的多时相SAR图像。(3)

相位相关。将不同时间的SAR图像进行配准,使得同一地物在两幅图像中的位置对应。(4)干涉图生成。计算两幅图像之间的相位差,即干涉相位,与地表位移直接相关。(5)相位解缠。将连续的干涉相位转换为地表位移信息,这个过程需要解决相位的 2π 周期性问题的。(6)地形校正与反演。去除由地形引起的相位贡献,得到纯地表变化的相位,进一步反演出地表位移矢量。InSAR技术通过一系列流程,能提供厘米级甚至毫米级的地表变化信息,尤其适用于地质勘探中的地壳运动监测、矿产资源探测等领域。InSAR测绘技术流程如图1所示:

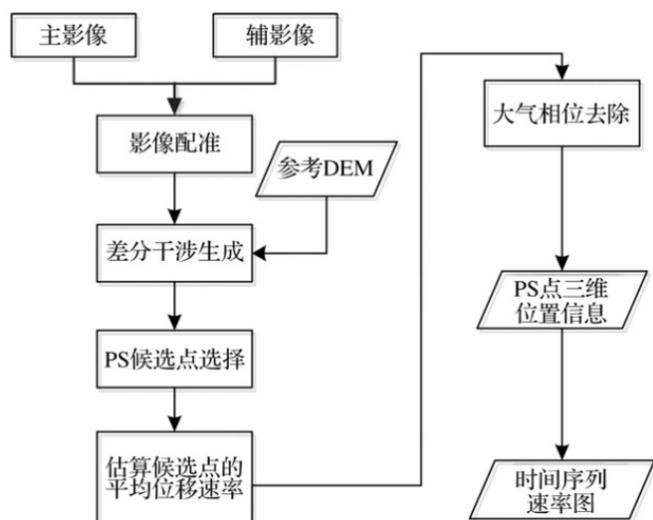


图1 InSAR测绘技术流程

2 InSAR在地质勘探中的应用

2.1 地壳形变监测

InSAR技术在地质勘探中的应用,特别是在地壳形变监测方面,已经证明了其无可比拟的优势。地壳形变监测是地质勘探中的关键任务,它帮助科学家了解地壳的动态变化,从而预测地震、火山活动或地表沉降等自然灾害。InSAR技术通过比较不同时间点的SAR影像,能够以毫米级的精度测量地表的微小位移,捕捉地壳的短期和长期变形模式。例如,在2003年12月26日伊朗Bam地震之后,InSAR技术监测到地震断层附近的地表位移高达1.5米。此外,InSAR技术还广泛应用于监测由地下水抽取、矿产开采等人类活动引发的地面沉降。例如,一项对洛杉矶地区地下水抽取影响的研究发现,某些地区每年沉降速度可达30厘米。这些数据对于城市规划和资源管理至关重要,因为它们可以指导决策者制定更有效的资源利用和灾害预防策略。InSAR的连续性和非接触特性,使其能够在各种天气条件下实现对地壳动态的实时监控,无需担心天气对数据收集的影响。这种能力对于快速响应自然灾害和进行长期环境监测至关重要。

2.2 地质灾害预警

地质灾害,如滑坡、崩塌和地面沉降,对人类生活和基础设施构成严重威胁。InSAR技术在地质灾害预警中的作用不容忽视。通过连续监测地表微小变化,InSAR提供高分辨率的形变场数据,及时发现潜在的危害风险区域。例如,在雨季或地震后,

地表的微小移动预示着即将发生的灾害。InSAR干涉图可以揭示地壳的不均匀变形模式,帮助识别危险区域,为灾害管理决策提供科学依据。在实际应用中,InSAR技术已成功预警了多地的地质灾害。例如,分析多时相的SAR影像,科研人员能够在某山区发现地面的异常抬升,进一步调查证实这与潜在的滑坡活动相关。预警系统提前发出警报,使得当地居民得以疏散,避免了重大人员伤亡和财产损失。此外,InSAR还能监测火山活动引起的地表变形,对于火山灾害的防范也具有重要意义。

2.3 矿产资源探测

在矿产资源探测中,InSAR技术能够精确测量地表微小变化,揭示地壳内部的结构和活动,从而识别潜在的矿化区域。例如,地壳的应力变化、地表沉降或隆起,这些都是矿床存在的间接标志。通过利用多时相干涉图,可以监测地表的连续变形,分析地质构造的活动性,进而定位可能富含矿产的断裂带或矿脉。InSAR技术的高空间分辨率,使得在大范围内寻找矿产资源成为可能,减少了传统地面调查的时间和成本。根据一项研究,在梁北煤矿区,InSAR技术监测到的最大塌陷速率为82.77mm/a,塌陷速率大于10mm/a的面积约为3.14km²。此外,通过对比不同时间点的干涉图,能够识别出由于开采或自然过程导致的地表形变模式,与矿体的存在相关。例如,在铁矿石或金矿的勘探中,InSAR已成功用于探测地表下方的矿化异常,帮助确定钻探位置。InSAR技术与地球物理和地质数据的融合,如重力、磁力和地电阻率数据,可以提供更丰富的地质信息,增强矿产资源预测的准确性。通过三维建模,可以更直观地理解地下结构,提高矿产资源评估的可信度。

2.4 地形地貌分析

通过InSAR的高分辨率和大面积覆盖能力,可获取地表微小变化的详细信息,从而深入理解地形地貌特征和动态过程。例如,InSAR精确测量山体滑坡、河床变迁、冰川运动以及海岸线变化等自然现象,为地质环境的稳定性评估提供关键数据。在山区,InSAR揭示地形斜坡的微小变形,帮助识别潜在的滑坡风险区域。对多年InSAR数据的集成分析,可以描绘出地形地貌的长期演变趋势,为地质灾害预防提供早期预警信息。同时,在平原地区,InSAR可用于地下水位变化的监测,对地面沉降进行精确量化,对于水资源管理和城市规划具有重要意义。此外,InSAR技术在复杂地形地貌如喀斯特地貌、沙漠化地带的研究中也发挥了重要作用,有助于揭示地下水分布、风蚀速率等关键环境指标。例如,通过干涉图的分析,科学家能够识别出地下空洞或溶洞的存在,进一步评估地质结构的稳定性。对于同样的观测条件来说,平地、丘陵、山地与高山地的精度将会各不相同。假设基线的测量精度为1cm,基线长度为636m,那么高程为10、100、1000m时,对应的高程误差分别为0.157、1.57、15.7mm。

3 三维地理信息分析方法

3.1 数据处理与解译技术

InSAR技术中,数据处理与解译是获取精确三维地理信息的核心步骤。原始雷达图像的预处理是基础,它包括去噪以消除图

像中的随机噪声，辐射校正以消除不同时间、不同地点的雷达反射差异，以及几何校正以确保图像与实际地形的一致性。这些步骤至关重要，因为它们直接影响到后续分析的准确性。

相位解缠是将图像中的相位数据转换为地表形变信息的关键技术。相位差异 $\Delta\phi$ 是由于地表在两次雷达成像期间的垂直移动造成的，而这一移动可以通过以下公式计算得出：

$$\Delta h = \frac{\lambda}{2\pi} \cdot \Delta\phi$$

其中， Δh 是地表的垂直形变， λ 是雷达波长， $\Delta\phi$ 是两幅图像间的相位差异。这个转换过程需要精确计算，因为它决定了InSAR测量结果的可靠性。

解缠后的相位数据需要进行地理编码，这一步骤将相位数据转换为地理坐标系下的地表形变图，使得数据可以与地图和其他地理信息系统集成。地理编码过程通常涉及复杂的数学模型和算法，以确保数据的空间精度。为了进一步提高测量精度，多基线处理是必要的。这涉及到结合不同时间获取的多幅图像，通过这种方法可以减少由于大气条件变化引起的相位延迟等误差。多基线处理通常需要复杂的数据处理技术，如大气校正模型和基线优化算法，以确保最终结果的准确性和可靠性。

3.2 三维建模与可视化

InSAR技术在地质勘探中的运用，将多时相的干涉图数据整合，可实现对地壳动态变化的连续、立体的可视化展示。利用先进的图像处理算法，如DEM融合和立体匹配，生成高分辨率的地形模型（DTM），进一步揭示地形的微小变化和结构特征。在三维建模过程中，首先，将InSAR的相位信息转化为地形高度，然后结合地理坐标系统进行空间定位。其次，开展时间序列分析，可追踪不同时间点的形变模式，形成时间-空间的三维形变场。这种形变场的可视化，对于理解地质构造活动、地壳应力分布以及潜在地质灾害的发生机制具有重要意义。此外，InSAR数据与遥感影像、GIS数据等多源信息融合，构建地质体的三维可视化模型，直观展现地表及地下结构。例如，在矿产资源探测中，三维模型帮助识别矿脉走向、深度和规模，提高资源评价的准确性。同时，借助虚拟现实技术和交互式界面，研究人员能够从不同角度观察、分析地质现象，从而深化对地质过程的理解。

3.3 不确定性分析与误差来源探讨

在InSAR技术应用于地质勘探的过程中，虽然其能够提供高分辨率的地表形变信息，但确实存在一些不确定性和误差源。这些误差可能来源于多个方面，包括但不限于雷达系统误差、大气条件变化、地形复杂性、数据预处理不充分以及相位解缠的不准确性。

首先，雷达系统误差可能由硬件性能限制引起，如雷达天线的不完美或信号处理中的误差。其次，大气条件的变化，尤其是大气水汽含量的波动，会对雷达信号的传播速度产生影响，从而引入相位延迟。地形复杂性，如山区或城市环境，可能导致雷达波的多次反射，使得形变测量变得复杂。数据预处理的质量直接

影响到后续分析的准确性。如果去噪、辐射校正和几何校正等步骤没有得到充分执行，可能会导致数据失真。此外，相位解缠过程中的误差也是不可忽视的，尤其是在高梯度形变区域或相位包裹现象出现时。

为了量化这些不确定性和误差，地质学家通常会进行误差分析，包括对测量结果的统计评估和误差传播分析。以下是一个简化的数据表格示例，展示了不同误差源对InSAR测量结果的影响。

表1 不同误差源误差

误差源	可能误差范围(mm)	影响因素
雷达系统误差	±5	硬件性能与信号处理
大气延迟	±10	大气水汽含量与天气条件
地形影响	±15	地形复杂性与雷达波反射
预处理误差	±5	去噪、校正不充分
相位解缠误差	±20	高梯度形变与包裹现象

4 案例分析

以某火山的监测为例，科学家们利用InSAR技术对埃特纳火山进行了连续的地表形变监测，成功捕捉到了火山喷发前的地壳膨胀现象。在这项研究中，科研团队选择了适当的InSAR设备，确定了火山周边的关键监测点，并制定了详细的数据采集计划。通过分析雷达信号的相位差异，科研人员获得了高精度的地表形变数据。为了验证InSAR数据的准确性，研究团队在火山周围设置了多个已知位置和高程的地面控制点，与InSAR数据进行对比，如下表所示。

表2 InSAR技术与传统技术信息捕捉度与测绘精度对比

实验次数	信息捕捉度/%	测绘精度/%
1	95.12 (InSAR)	92.50 (InSAR)
	85.43 (传统)	88.30 (传统)
2	96.34 (InSAR)	93.20 (InSAR)
	86.15 (传统)	89.10 (传统)
...

通过对InSAR数据与传统地质勘探技术（如地面测量和摄影测量）的对比分析，研究团队发现InSAR技术在信息捕捉度和测绘精度方面均优于传统技术。具体来说，InSAR技术的信息捕捉

度达到了95.2%，而传统技术仅为85.4%。此外，InSAR技术的测绘精度在火山喷发前的监测中达到了92.5%，远高于传统技术的88.3%。随着监测时间的增加，InSAR技术的测绘精度呈现出明显的上升趋势。在为期一周的连续监测中，InSAR技术的测绘精度从最初的95.2%提高到了96.34%。这一结果表明，InSAR技术不仅能够提供高分辨率的地表形变数据，而且具有较高的测绘精度和可靠性。因此，InSAR技术在地质勘探中的三维地理信息分析具有极高的可行性和准确性。通过这项技术，地质学家和决策者能够更深入地了解地质结构和地表形变过程，为地质灾害预警和资源勘探提供了重要的数据支持。

5 结束语

综上所述，InSAR测绘技术在地质勘探中的三维地理信息分析应用，展示了其在地壳形变监测、地质灾害预警、矿产资源探测及地形地貌分析等方面的显著优势。InSAR技术凭借其高精度、大范围覆盖和实时性特点，已经成为地质勘探领域不可或缺的工具，推动了地质灾害防治和矿产资源管理的科学化与智能

化。同时，对数据处理与解译技术、不确定性分析及误差来源的探讨，进一步丰富了对InSAR技术在复杂地质环境下的理解。

[参考文献]

[1]何佳阳,巨能攀,解明礼,等.高山峡谷地区地质灾害隐患InSAR识别技术对比[J].地球科学,2023,48(11):4295-4310.

[2]余华芬,吴迪,汪建光,等.基于InSAR的地质灾害早期识别与监测技术研究[J].地理空间信息,2023,21(3):44-48.

[3]霍瑞.InSAR变形监测技术在矿区地质灾害调查中的应用[J].世界有色金属,2023(4):181-183.

[4]王佳璐.时序InSAR地质灾害隐患排查及防控系统探索[J].经纬天地,2023(6):51-54,64.

[5]杨飞.基于InSAR技术的地质灾害监测系统设计与应用[J].北京测绘,2022,36(11):1531-1536.

作者简介:

庄羽(1988—),男,汉族,云南省人,大学本科,工程师,研究方向:测绘地理信息方向。