

Stacking-InSAR 技术在矿区采空区地表形变监测中的应用与分析

吴多辉 宋丰站

北京兴遥数据科技有限公司

DOI:10.12238/gmsm.v8i1.2111

[摘要] 本研究基于Sentinel-1A卫星C波段SAR数据,选取2023年8月15日至2024年4月11日期间覆盖研究区的21景升轨影像,采用Stacking技术对内蒙古准格尔旗某矿区进行了监测。首先,系统阐述了Stacking技术的核心原理:通过对多时相干涉图进行加权叠加,抑制大气延迟、噪声干扰等影响,同时保留地表形变的时空连续性信号。其次,详细解析了数据处理流程,包括数据配准、批量差分干涉、批量解缠、批量滤波、Stacking处理、结果地理编码等。研究结果表明,研究区内存在显著的地表形变特征,验证了Stacking技术在矿区安全监测中的适用性。

[关键词] InSAR; 矿区; 采空区; 地表形变

中图分类号: U492.6+4 **文献标识码:** A

Application and analysis of Stacking-InSAR technology in surface deformation monitoring in goaf of mining area

Duohui Wu Fengzhan Song

Beijing Xingyao Data Technology Co., LTD.

[Abstract] Based on the C band SAR data of Sentinel-1A satellite, this study selected 21 ascending rail images covering the study area from August 15,2023 to April 11,2024, and monitored a mining area in Zhungeer Banner, Inner Mongolia. First of all, the core principle of Stacking technology is elaborated systematically expounded: by weighting and superposition of multitemporal interference graphs, the influence of atmospheric delay and noise interference are suppressed, while retaining the spatiotemporal continuity signal of surface deformation. Secondly, the data processing process is analyzed in detail, including data registration, batch differential interference, batch disentanglement, batch filtering, Stacking processing, result geocoding. The results show that there are significant surface deformation characteristics in the study area, which verifies the applicability of Stacking technology in safety monitoring in the mining area.

[Key words] InSAR; mining area; goaf; surface deformation

引言

随着矿产资源的不断开发,矿区面临着地表沉降、滑坡、塌陷等多种地质灾害风险,这些灾害不仅威胁矿工的生命安全,还可能对周边环境和基础设施造成严重影响。因此,建立高效、精准的矿区安全监测体系至关重要。传统的监测方法如人工巡查、GPS测量等,虽然在一定程度上能够满足需求,但存在成本高、效率低、覆盖范围有限等不足。随着遥感技术的快速发展,合成孔径雷达干涉测量(Interferometry Synthetic Aperture Radar, InSAR)技术逐渐成为矿区安全监测的重要手段。

InSAR具有高精度、大范围、全天候监测的优势,能够精确

测量地表形变,可为矿区地表沉降、滑坡等地质灾害的监测提供强有力的技术支持。然而,传统InSAR技术在处理大范围、长时间序列的形变监测时,可能会受到大气延迟、失相干等因素的干扰,导致监测精度下降。Stacking-InSAR通过对多景SAR影像进行叠加处理,能够有效抑制大气误差和噪声干扰,显著提高形变监测的精度和可靠性。目前,Stacking-InSAR技术在滑坡识别^[1]、地面沉降^[2]、矿区安全监测^[3]等方面均有广泛应用。本文采用Stacking-InSAR技术对矿区进行监测,获取矿区形变的动态演化规律,为灾害预警和防治提供一定的科学依据。

1 Stacking-InSAR技术

干涉图堆叠技术 (Stacking-InSAR) 基于D-InSAR处理过程数据, 利用相位解缠后的干涉相位按一定权重进行叠加处理, 以抑制大气误差和噪声对形变相位的影响, 从而提高形变结果精度。

Stacking假设雷达信号因大气延迟所造成的相位误差是随机的, 其在时间上表现为非线性形变, 在空间上表现为线性形变。对多幅影像进行组合干涉处理, 并进行相位解缠, 以时间为权重, 将得到的解缠相位进行叠加, 从而得到累积形变相位。由于形变相位具有时间相关性, 其累加结果表现为各干涉图相位的线性叠加; 而大气延迟相位则不同, 其叠加结果为各干涉图大气相位累加值的平方根。干涉相位中, 由于大气延迟相位贡献相对较小, 其比重在经过加权叠加后会进一步降低, 从而有效提升了形变相位与大气延迟相位的比值, 显著减弱了大气延迟效应对形变结果的干扰^[4]。与D-InSAR技术相比, Stacking技术在抑制时空失相干和大气延迟效应方面表现更为优越, 同时能够获取更全面、更精确的矿区形变信息。

Stacking技术通过以干涉对的时间间隔作为权重, 能够有效估算形变相位的平均变化速率, 具体计算公式如下^[5]:

$$v_{\varphi} = \frac{\sum_{i=1}^n \varphi_i \cdot \Delta t_i}{\sum_{i=1}^n \omega_i}$$

式中, v_{φ} 为加权叠加后的平均形变速率, n 为干涉图数量, φ_i 为第 i 幅干涉图的解缠相位, Δt_i 为第 i 幅干涉图的成像时间间隔, ω_i 为第 i 幅干涉图的权重。

Stacking技术是基于D-InSAR技术进行改进的, 其前期主要处理流程与D-InSAR相似。其主要处理流程包括: 影像配准、影像干涉处理、差分(去平地效应)、相位滤波、相位解缠、相位加权叠加处理、转为形变量、形变结果地理编码等^[3], 技术流程图如图1所示:

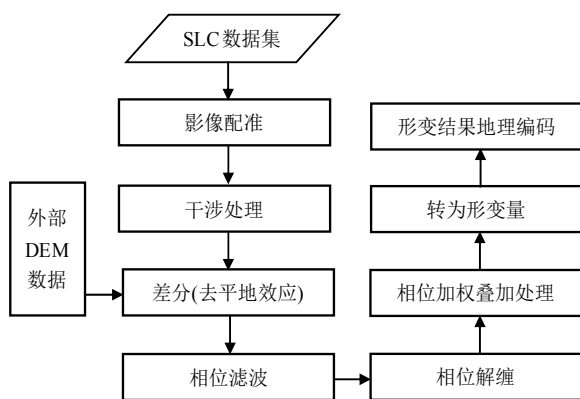


图1 Stacking-InSAR数据处理流程

2 研究区概况

本研究区域位于内蒙古自治区鄂尔多斯市准格尔旗纳日松镇。该镇位于准格尔旗西部, 地处鄂尔多斯高原东部, 地形以丘陵沟壑为主, 地势起伏较大, 海拔高度一般介于1000至1250米之间。在地质结构上, 该区域主要由古生代和中生代地层构成, 包括石炭系、二叠系、三叠系及侏罗系等地层。地质构造相对稳定,

断层和褶皱现象较少, 为地质研究和资源开发提供了有利条件。纳日松镇煤炭资源丰富, 是重要的煤矿产区。据目前勘探数据, 该镇已探明煤炭储量达91亿吨, 剩余可开采量为16.99亿吨。在水资源方面, 浅水层地下水年补给量约为0.2亿立方米, 年储藏量为2.3亿立方米, 年可开采量为180万立方米。研究区内分布有多个煤矿开采区域。研究区范围见图2。

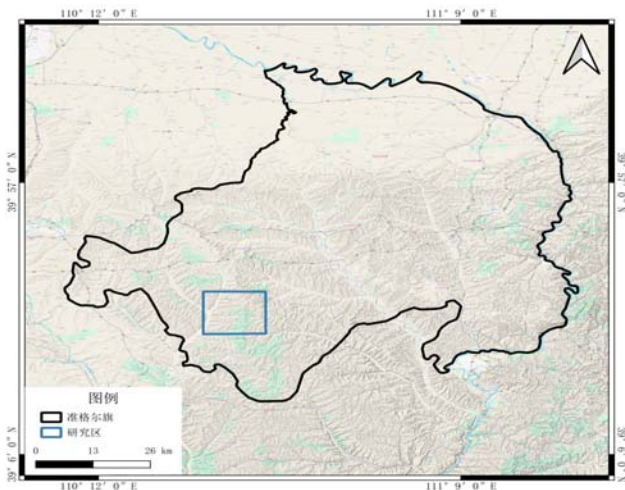


图2 研究区概况

3 Stacking处理

3.1 数据采集

本文采用欧洲空间局哨兵计划发射的Sentinel-1A卫星所提供的合成孔径雷达影像数据, 该数据集通过美国国家航空航天局(NASA)提供的对地观测数据开源平台获取。研究区域覆盖情况如图3所示。

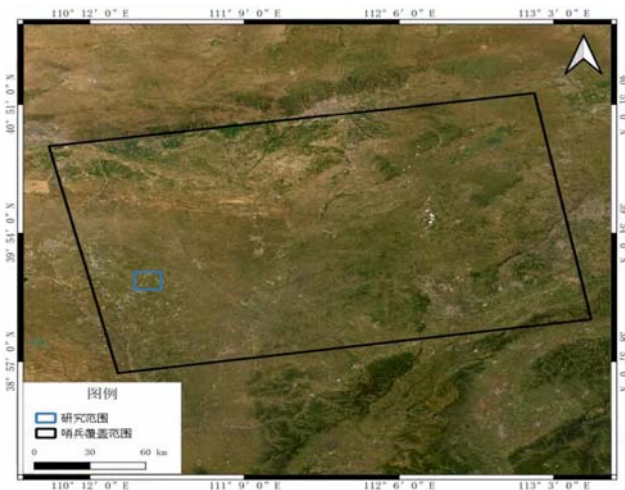


图3 研究区域影像覆盖情况

采集研究区域2023年8月15日至2024年4月11日期间数据, 参考DEM采用SRTM数据。数据情况见表1。

表1 研究区域数据参数表

数据类型	数量	时间	用途
Sentinel-1A	21	2023/8/15-2024/4/11	地表形变监测
SRTM DEM数据(30m)	监测范围全域	/	地形相位参考

3.2 数据处理

以2023年8月15日这一期数据作为基准,对所涉及的数据集进行了配准处理配准精度满足八分之一像素要求,配准结果的影像。

本研究采用24天为最长的时间基线,并设定±300米为最大空间基线,以形成影像干涉组合。该方法确保了在连续采集的数据序列中,任意相邻两期数据均能构建有效的干涉对,从而避免了干涉组合过程中可能出现的中断现象。干涉对组合情况见图4。

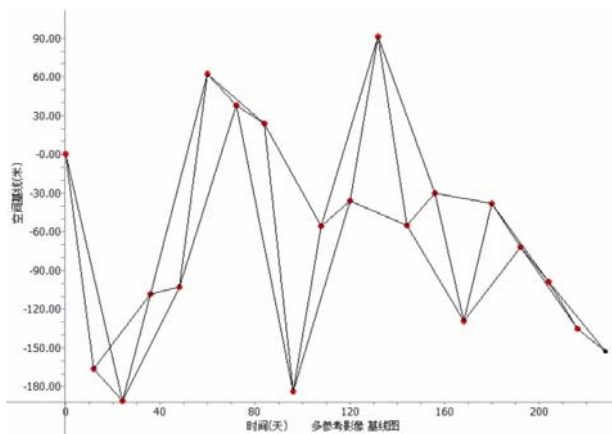


图4 时空基线

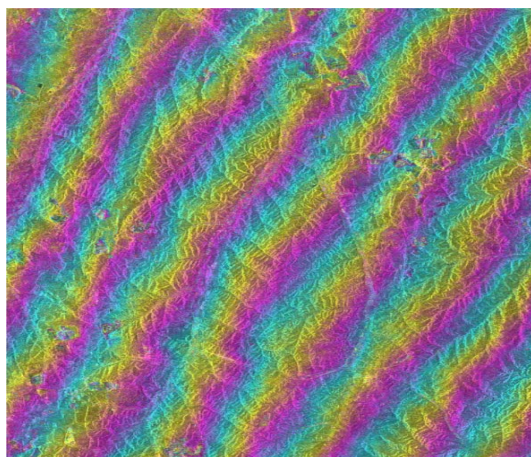


图5 干涉相位

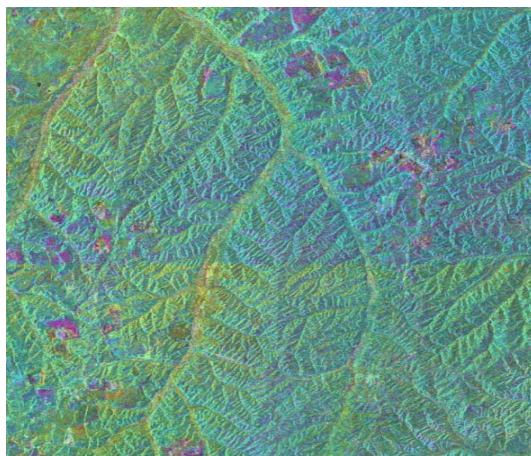
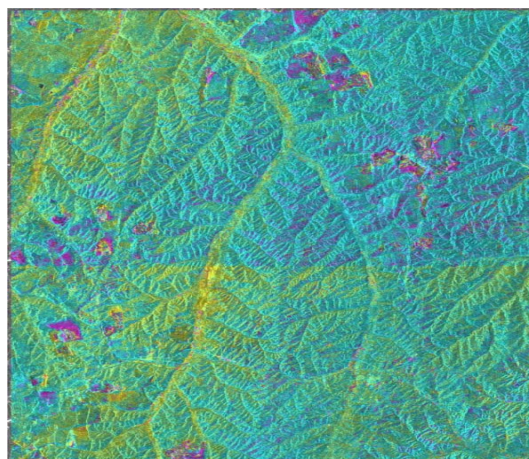


图6 去平地相位

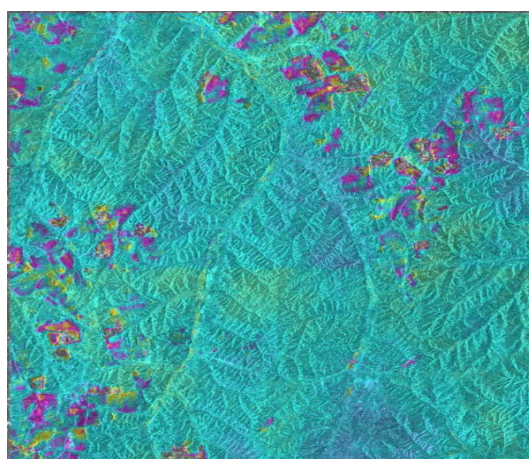
在影像数据处理与分析的初始阶段,执行精确的影像配准是至关重要的步骤,它确保了后续处理步骤的准确性。影像数据经过精确配准后,接下来的步骤是将这些数据以干涉组合的方式进行处理。具体而言,即对配准后的影像数据执行两两共轭相乘的操作,生成干涉相位图,该图能够揭示影像间的变化。干涉相位图对于解析影像数据中的变化极为有益,它能够揭示地表的微小位移、建筑物的形变以及其他多种现象。图5为处理后的干涉相位图。

接下来的处理中,引入了外部数字高程模型(DEM)数据。通过这些精确的高程信息,能够有效地执行地形相位去除操作。该步骤旨在消除地形起伏对干涉测量结果的影响,进而获得一个更为精确的去平地相位。此过程对于后续的地形分析和处理具有至关重要的作用,结果见图6。

对相位进行滤波后及相位解缠后的结果如图7所示,图7(a)为相位滤波后的结果,图7(b)为相位解缠结果,相位解缠采用最小费用流法。



(a) 滤波相位



(b) 解缠相位

图7 滤波及解缠结果

最后基于相位解缠结果,对解缠后的干涉图进行加权叠加,获取形变相位,见图8。

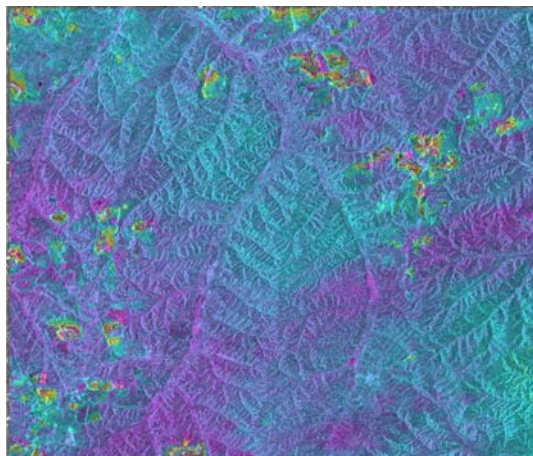


图8 Stacking形变相位

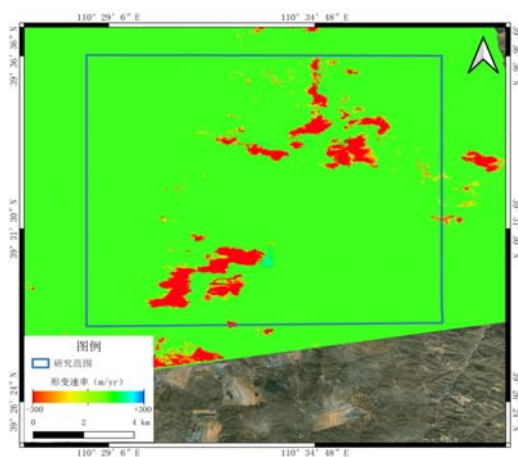


图9 Stacking形变速率图

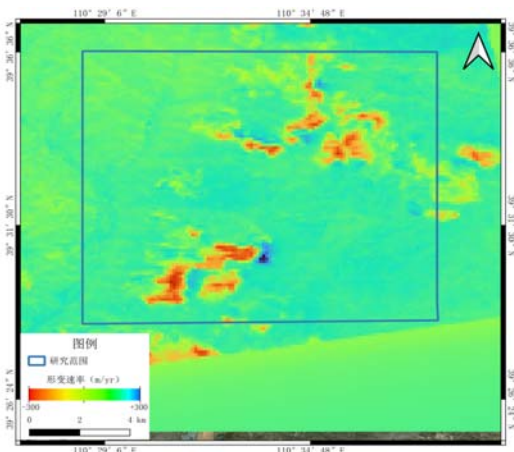


图10 Stacking形变速率图

通过细致地观察形变相位图,我们可以清晰地识别出该特

定区域的矿区中采空区的分布情况,这些区域在图中表现得非常明显,显示出存在大量经过开采的矿产区域。进一步地,通过对Stacking技术处理后的结果进行深入分析,我们能够辨识出研究区域内的形变区域,这些区域呈现出显著的沉降特征,形成了所谓的沉降漏斗现象。为了更直观地展示这一现象,可以参考图9和图10,这两张图清晰地描绘了沉降漏斗的分布情况。此外,通过对相关数据进行插值处理,我们得到了更为精确的沉降漏斗图,它进一步证实了研究区域内的沉降特征。

4 结论

本研究以多时相合成孔径雷达(SAR)卫星数据为基础,运用Stacking技术对内蒙古鄂尔多斯市准格尔旗纳日松镇特定矿区的地表形变进行了监测与分析。Stacking技术通过多时相干涉图的加权叠加,有效抑制了大气误差、噪声等干扰因素,从而提升了形变监测的精度。与传统时序InSAR方法相比,Stacking技术对数据量的依赖性较低,在较短时间序列(<30景)及非城市区域(例如农田、自然地表)中仍能保持其稳健性。结合外部数字高程模型(DEM),该技术能够有效地校正地形相位残余误差。经过处理与分析,矿区形变区域清晰可见,通过与光学影像对比,形变区域与采矿区域基本吻合,从而验证了Stacking技术在矿区形变监测方面的有效性。

[参考文献]

- [1]张春宇,郭际明,王鼎,等.基于Stacking-InSAR的澜沧江营盘镇—苗尾段滑坡隐患识别[J].地理空间信息,2023,21(9):93-97.
- [2]吴星乐.基于时序InSAR技术的西宁地表形变监测研究[D].南京信息工程大学,2023.
- [3]杨光欣,朱煜峰,张龙刚.Stacking-InSAR技术在矿区地表沉降监测中的应用[J].矿山测量,2021,49(02):98-102+119.
- [4]沙永莲,刘国祥,王晓文,等.基于Stacking时序InSAR的北泉矿区沉陷监测[J].测绘科学技术,2020,8(2):11.
- [5]张成龙,李振洪,余琛,等.滑坡探测:GACOS辅助下InSARStacking在金沙江流域的应用[J].武汉大学学报(信息科学版):1-16.

作者简介:

吴多辉(1994-),男,汉族,海南海口人,本科,初级,SAR/InSAR技术应用。