 DOI: https://doi.org/10.12349/edc.v8i1.8986

Application of D-InSAR and the Beidou System in Ground Deformation Monitoring Technology for Mining Areas

Dongcheng Liu

China Railway Design Group Co., Ltd. Geological Survey Institute, Tianjin, 300143, China

Abstract

Differential Interferometric Synthetic Aperture Radar (D-InSAR) offers all-weather capability, high resolution, multi-polarization, and broad coverage, demonstrating significant advantages over traditional measurement and monitoring techniques. This paper introduces the principles of D-InSAR technology and applies the two-pass differential interferometry method to a case study in part of the Hedong Coalfield in Shanxi Province, obtaining ground deformation data. The results are compared with data from the Beidou Navigation Satellite System in terms of accuracy. The findings indicate that D-InSAR technology is better suited to meet the demands of areal-based observation in analyzing ground deformation in mining-induced subsidence areas under new circumstances.

Keywords

Goaf; ground deformation; D-InSAR

基于 D-InSAR 与北斗系统在矿区地面变形监测技术中的应用

刘东成

中国铁路设计集团有限公司地勘院，中国·天津 300143

摘　要

合成孔径雷达差分干涉测量（D-InSAR）具有全天候、高分辨率、多极化、覆盖广等特点，比传统的测量监测技术具有明显的优势。本文通过介绍D-InSAR技术的原理，以山西省河东煤田部分矿区为例，通过二轨法差分干涉处理，得到地面变形数据，再与北斗监测系统进行精度比较，研究结果表明：D-InSAR技术对分析采空区地面变形能够更好的适应新形势要求下的基于面域的观测要求。

关键词

采空区；地面变形；D-InSAR

1 引言

近年来，我国铁路事业发展迅速，作为国家重要的基础设施与民生工程，其高质量发展深刻改变着人民生活的方方面面，从日常出行的便捷度到消费方式的升级，从就业机会的创造到民生保障的强化，持续为民众带来实实在在的获得感与幸福感。但是随着铁路全国覆盖区域的增加，难免会遇到各种地质问题影响铁路安全，比如采空区、滑坡、泥石流等不良地质。矿区开采引起地面沉降问题对高速铁路的线路选择和运行带来巨大挑战和影响，所以必须借助各种勘察手段查明采空区的影响范围，保证铁路的运行安全。

【基金资助】中国铁路设计集团有限公司科技开发课题（2024B0103000009、2023B03040001）。

【作者简介】刘东成（1990–），男，中国河北唐山人，硕士，工程师，从事地质工程研究。

一直以来，大地测量学家和地球物理学者一直在探索监测地表变形的技术与方法 [1]。常用的地表变形监测技术主要有水准测量和 GPS 测量等方式，这些种方法虽然具有操作简单、精度高的优势，但是也有观测工作量大、作业周期长、数据量少、观测成本高等缺点。本文研究的合成孔径雷达干涉测量技术（D-InSAR,Differential Interferometric Synthetiec Aperture Radar）诞生于 20 世纪 60 年代，具有全天候、高分辨率、多极化、覆盖广等特点 [2]，能够更好的适应新形势要求下的基于面域的观测要求。

2 D-InSAR 的原理

合成孔径雷达差分干涉测量（D-InSAR）技术是在 InSAR 技术的基础理论平台上深化而来，是以合成孔径雷达（SAR）复数据所提供的相位及强度信息为信息源进行差分干涉测量，从包含目标区域地形和形变等信息的一幅或多幅干涉条纹图中提取地表目标的微小形变信息 [3]。D-InSAR

技术按照初始影响数量可以分为二轨法、三轨法和四轨法。其关键处理流程包括影像配准与重采样、干涉成像、去除地形相位、干涉图滤波与质量评价、相位解缠以及误差去除等[4]。以“二轨法”为例，D-InSAR 的基本数据处理流程如图 1 所示：

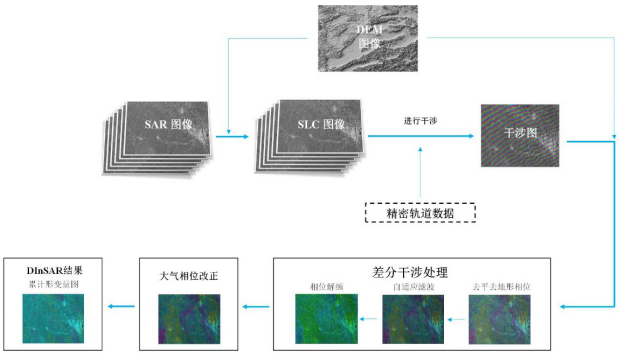


图 1 D–InSAR 的基本数据处理流程

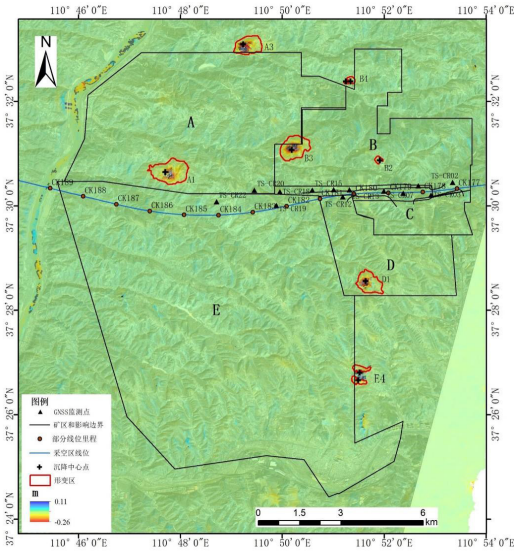


图 2 20240111–20240208 期形变监测成果

3 D–InSAR 在开采沉陷监测中的应用

3.1 矿区概况

矿区在山西省煤田划分上属于河东煤田，地形地貌为中低山区，地表大部分为黄土覆盖，局部沟谷纵横，黄土冲沟发育，沟谷两侧及谷底有基岩零星出露，地形起伏较大，地面标高一般 880-1779m。地层时代涵盖新生界、中生界、古生界等地层，其中古生界石炭系上统太原组和二叠系下统山西组是该井田的主要含煤地层，而且本溪组和下石盒子组也含有薄煤层，开采煤层为 3#~10# 煤，煤层厚度不一。该井田开采历史最远可追溯至明代，复杂的开采过程和悠久的开采历史造就了矿区内采空区具有 - 多类型、多时期、多层位、高瓦斯、高密度、大面积的特点。

3.2 沉降变形结果分析

为了保证变形数据的准确，矿区附近安装了多角度 D-InSAR 角反射器集成装置更好的采集数据。多角度角反射器包含四个角反射器单元，能够满足不同类型、不同模式 SAR 卫星拍摄需求，提高了角反射器的通用性；该装置也配备了角反射器、北斗接收机与水准监测点，这样可以同时兼顾星载 D-InSAR、北斗与水准测量三种监测方法的监测需求，在实现三种不同类型监测数据之间的相互精度验证的同时也可以从点到面的监测地面变形情况。

本次监测采用 2024 年 3 月 -2024 年 4 月 LT-1 号卫星影像数据，运用 D-InSAR 技术对矿区进行地面变形监测分析，经过数据处理，目标区域具体监测结果如图 2 所示。

根据图 2 所示，利用 20240111 和 20240208 四景降轨 L-SAR 数据，从整体形变结果可看出，位于 5 个矿区（A、B、C、D、E）及周围共发生了 7 处形变（A1、A3、B1、B2、B3、D1、E1）。具体沉陷情况详见表 1。

表 1 地面形变统计表

矿区名称	地面沉陷情况
A 矿区	A1 处形变沉降最大为 20cm；A3 处形变沉降最大为 26cm；
B 矿区	B2 处形变沉降最大为 8cm；B3 处形变沉降最大为 22cm；B4 处形变沉降最大为 6cm；
C 矿区	无发生形变；
D 矿区	D1 处形变沉降最大为 18cm；
E 矿区	E1 处形变沉降最大为 12cm

3.3 北斗监测成果分析

根据本区域的实际情况，北斗自动化监测系统选用北斗监测专用接收机 CRDCA01、北斗时钟同步多天线监测专用接收机 BDM201 和 TDXL-GGBA7I01 多星多频高精度测量天线。北斗接收机用于获取角反射器位置近实时的形变序列，为 InSAR 区域沉降提供校正基准和点位高精度形变监测。北斗接收机数据处理方法采用短基线 BDS（BeiDou Navigation Satellite System），该方法的定位精度主要受多路径效应影响，BDS 单差单频单历元模型冗余度较低，坐标误差较大，只能达到厘米级水平。为了提高模型冗余度，采用基于 BDS/GPS 抗差精密定权 Kalman 方法的 BDS/GPS 单频单差组合定位模型，减弱了多路径误差影响，达到了 mm 级形变监测精度[5]。核心算法流程如图 3 所示。

根据现场情况共计设置 13 个北斗机，对各个位置东方向、北方向和高程方向的形变进行监测。监测周期为 2023 年 12 月 22 日至 2024 年 5 月 16 日，例如以 TS-CR02、TS-CR05 为例整理监测周期地面形变数据如图 4 所示。

3.4 北斗与 D–InSAR 监测结果精度分析

为了完成精度分析，采用北斗监测数据检验 D-InSAR 技术获取的沉降量[6]，将同一时间段上的两种监测数据进行了对比，其中部分监测点对比图如图 5 所示。

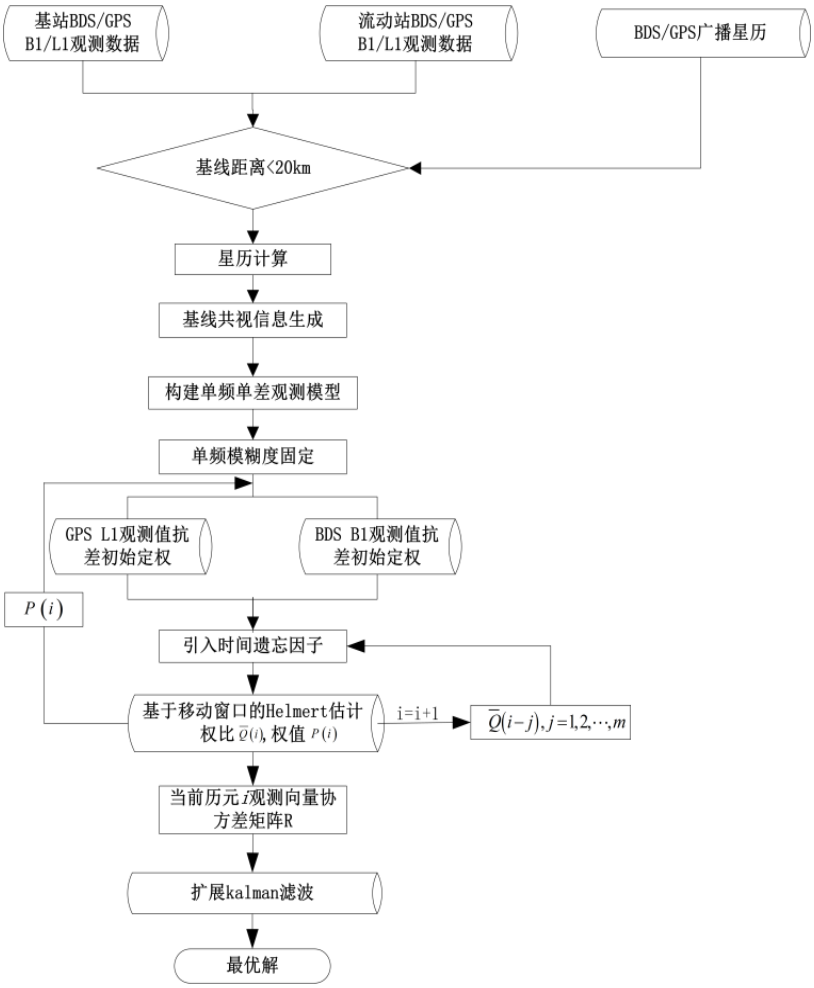
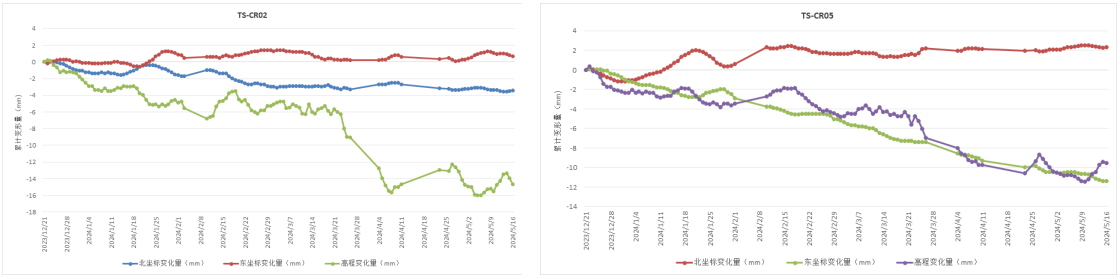
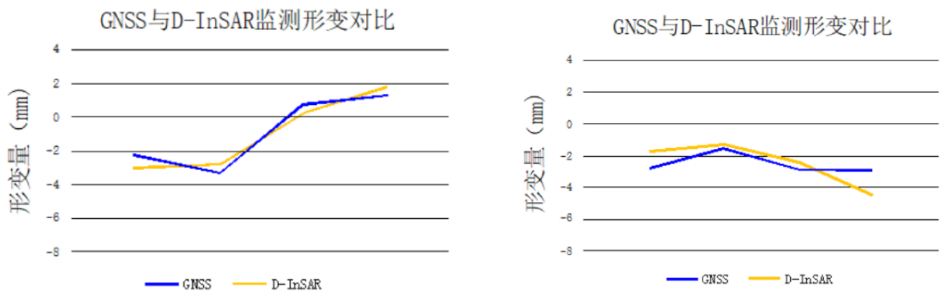


图 3 核心算法流程图



TS-CR02　　TS-CR05

图 4 TS-CR02、TS-CR05 监测周期地面形变数据



TS-CR02　　TS-CR05

图 5 TS-CR02、TS-CR05 部分监测点对比图

以北斗监测数据为准，通过各个角反射器相同周期的D-InSAR 形变量和北斗形变量对比可知：在相同周期形变量对比中，两者变形趋势基本一致，相同周期形变比较最大差 8 mm，均方根误差在 3.31 mm 至 6.69 mm 之间，“二轨”D-InSAR 监测精度是可靠的。

4 结论

本文针对矿区采空引起的地面沉陷问题，通过 D-InSAR 和北斗的形变监测结果分析可以得出以下结论：

（1）通过 2024 年 3 月 14 日至 2024 年 4 月 4 日的 D-InSAR 区域形变监测分析可知，除 C 矿区之外，线位周围其余矿区内均存在开采沉降。

（2）“二轨”D-InSAR 方法是可靠的，通过和同期北斗形变数据对比可知：相同周期形变比较最大差 8mm，均方根误差在 3.31mm 至 6.69mm 之间。待 SAR 数据积累到一定数量后，重新识别角反射器，采用多时相 InSAR 方法获取高精度区域形变监测结果，结合北斗监测数据进行基准校正和数据分析。

综上，采用 D-InSAR 技术可以获取矿区在一定时间段内的变形特征，进而可以在实际应用中指导铁路的建设工作。

参考文献

[1] 周荣,顾爱辉,钱小娟.D-InSAR技术地表沉降监测概述[J].中国西部科技,2012,11(10):6-8+10.

[2] 石慧群,王炳亮,万思思.基于D-InSAR技术的黑山峡地区地表沉降监测研究[J].绿色科技,2023,25(12):258-263.DOI:10.16663/j.cnki.lskj.2023.12.047.

[3] 付春永,苗小利,冯西林.D-InSAR技术在矿区开采沉陷监测中的应用[J].陕西科技大学学报(自然科学版),2011,29(03):113-117.

[4] 甄洪帅.采煤矿区形变场的多基线D-InSAR监测——以梁宝寺矿区为例[J].测绘与空间地理信息,2020,43(11):63-66.

[5] 李广宇,张云龙.北斗-InSAR融合的铁路沉降监测[J].测绘通报,2022,(S2):1-7.DOI:10.13474/j.cnki.11-2246.2022.0544.

[6] 李永超,高腾飞,李建军,等.D-InSAR技术在岱庄生建煤矿地面沉降监测中的应用[J].矿山测量,2018,46(03):49-53.