基于 Radarsat-2 的矿山沉降监测方案

中国科学院遥感应用研究所

北京国遥万维信息技术有限公司

二零一零年

目　录

1 矿区沉降监测的目的和意义 1
2 应用雷达卫星进行矿区沉降监测的优势 2
2.1 传统监测方法及其局限性 2
2.2 雷达沉降监测的优势 3
3 Radarsat-2 卫星介绍 6
3.1 Radarsat-2 卫星及其数据简介 6
3.2 Radarsat-2 新增波束模式 8
3.3 在矿区沉降监测中的独特优势 9
4 矿区沉降监测技术方案 10
4.1 雷达沉降监测技术理论 10
4.2 短期监测方案 11
4.2.1 所需数据 11
4.2.2 处理流程 11
4.2.3 成果及精度 11
4.3 长期监测方案 12
4.3.1 所需数据 12
4.3.2 处理流程 12
4.3.3 成果及精度 12
4.4 持续监测方案 12
4.4.1 所需数据 12
4.4.2 处理流程 13
4.4.3 成果及精度 13
4.5 某矿区沉降监测实例分析 14
5 我们的技术优势 16
5.1.1 公司简介 16
5.1.2 合作伙伴-MDA 公司 17
5.1.3 遥感所微波遥感专家 18

1 矿区沉降监测的目的和意义

我国是一个能源大国，矿产资源总量较为丰富，成矿地质条件优越，矿种齐全配套。大小矿山有 12 万多，其中 2 万多个煤矿，10 万多个金属和非金属矿。从事采矿业的人员已经超过 1000 多万人。煤炭是我国的主要能源，也是最大的矿产资源开采行业。矿产资源的开采为国民经济的发展起到了重要的作用。

矿产资源的开发和利用是一柄双刃剑：在给人类带来物质财富的同时，也一定程度上破坏着人类赖以生存和发展的自然环境。资料表明：我国每年由于煤炭开采损伤土地面积达到 12.5 万公顷左右，塌陷面积约 2 万公顷左右，直接经济损失约 20 亿元。据不完全统计，我国因采矿而直接破坏的森林面积累计已达 106 万公顷，破坏草地面积 26.3 万公顷，采矿业造成的地面塌陷面积已达 500~600 万亩，其中耕地为 130 万亩。

矿产开采沉陷对自然环境和社会环境的影响突出表现在以下几个方面：

(1) 破坏地表；

(2) 影响生态环境；

(3) 危及工用、民用建筑和生活生产设施；

(4) 危及公路、铁路交通运输、地面输电线路等。

矿产资源开采严重地破坏了工矿区环境，已成为影响和制约工矿城市可持续发展的重要因素。及时、准确地监测地面沉陷及其发展过程是工矿区面临的重要任务。

2 应用雷达卫星进行矿区沉降监测的优势

2.1 传统监测方法及其局限性

目前，煤炭开采地表沉陷监测的主要方法有传统的水准测量、静态 GPS 测量或动态 GPS。

传统的水准测量变形观测站的设置以剖面线形式为主，获得的监测数据主要反映的是开采区域主断面的沉陷情况，该方法只能对监测点绘制出沉陷剖面曲线图进行分析。如果要对沉陷区域的地面沉陷变形情况进行全面的掌握和分析处理，必须布设大量的监测点，通过拟合等手段，绘制出监测区域的沉陷等值线图。这种地面沉陷监测方式，不仅有工作量大、费时、费财和测点难于长时间保存等缺陷，而且还因监测精度等原因，导致沉陷变形分析处理出现偏差。

随着 GPS 技术的成熟和广泛应用，对于大区域地面沉陷逐渐采用 GPS 地面沉陷监测网，这种方法主要通过 GPS 测量确定水平位置和椭球体的高度，根据椭球体高度的差异来确定地面垂直变化的程度。对某一局部的区域，为了获得精确的形变参数，通常建立专门的地表与岩层移动观测站，进行定期观测。GPS 测量方法具有定位精度高、观测时间短、观测站之间无需通视且能提供三维坐标等优点，易于自动化监测、自动化数据采集与处理的优势，因而迅速在煤矿区沉陷形变监测中得到广泛应用，是切实可行的好方法。但依然面临水准点的稳定性难以保证，只能进行沉降点、线测量，无法满足几百平方公里全矿区的监测任务，对于煤矿区因开采所造成的动态地表形变监测难以达到理想的效果等问题。

总之，传统的测量方法在地面形变监测方面一直发挥着重要的作用，并成功地解决了许多关键工程问题。但随着测绘手段的发展，其局限性也越来越突显，主要表现：

- 观测标志的保存与维护比较困难，因而形变监测的实施比较困难；
- 监测网的投资和维护费用比较大，受气候和地形条件的影响；
- 观测的时间比较长，大区域的形变监测很难在短时间内完成，影响形变数据的分析质量；

- 结果为离散点监测，只能获得空间尺度较大的离散点形变信息，难以反映连续形变规律；
- 通常观测线往往设在开采盆地的正上方，只能监测采矿直接造成的地表形变，而且不能获得全面的形变状况，对于地下采矿引起的其他因素变化(如地下水的移动)等造成的沉陷以外的地表形变难以监测等各种问题。

为了研究煤矿区地表形变发生的原因、过程、趋势和发展规律，必须采用新的技术进行全面的监测。

2.2 雷达沉降监测的优势

上世纪 90 年代出现的星载雷达数据提供了一种新型的差分雷达干涉侧量(D-InSAR)技术，已经成为地表形变监测领域极有发展潜力的新手段。

合成孔径雷达差分干涉测量作为一种专门监测地表形变的新技术，它可以高精度地监测大面积微小地面形变。与传统的 GPS、水准测量这些基于离散点的形变监测技术相比，雷达差分干涉测量有其自身探测形变的特点和长处，主要表现在以下几个方面：

(1) 精度高

D-InSAR 采用相位来测量地表形变，当地表形变在雷达视线方向的分

量达到半波长时，就会使干涉相位产生整周跳变，表现在干涉图中酒会出现一条完整的干涉条纹。由于雷达波长通常为厘米级，因此，D-InSAR 至少可探测到厘米级的地表形变，甚至可监测到毫米级的地表形变。

(2) 监测范围广

目前获取干涉数据的雷达主要以卫星或飞机作为搭载平台，它的特点是飞得高、视域广、监测范围大，一次就可监测地表上百平方公里的范围。而且获取的是整个监测范围内所有分辨单元的形变量，由此可分析地表在区域上的总体形变情况，即区域地表形变场。而 GPS 测量和水准测量只能获得地面一些离散点的形变信息。

(3) 监测连续性

雷达按一定的时间间隔对地面同一目标进行周期或非周期的长期观测，数据更新快，数据量丰富，可监测地面目标在时间序列上的连续形变过程。

(4) 受天气影响小

卫星雷达，使用探测波段较长，可以穿云透雾，受天气影响较小，而且它部分白天和黑夜，可全天候、全天时地监测地表形变。

(5) 监测实施方便容易

传统监测方法需要布设水准点，但是，在矿区沉降过程中，水准点破坏严重，有效的重复水准点比较少，这给直接利用水准点分析沉降的时空分布带来了很大的困难。而雷达沉降监测不受这些条件的限制，一般只需卫星重复获取地表影像就可以了，给沉降监测带来很大的便利。

(6) 成本相对低

不需要观测网的布设和维护费用，而数据的成本相对不高，所以，对于大面积的矿区沉降监测服务好，而成本相对较低。

(7) 安全性高

D-InSAR 监测地表形变不需要直接接触地面目标，即使发生各种灾害也可对地表进行观测。而 GPS 测量或水准测量则需要测量人员到现场工作，对某些形变(如滑坡、火山等)的监测来说，这样的工作是极其危险的。尤其是对火山的监测，常规测量工作几乎无法实施。

在测量精度、作业条件、工作成本等许多方面，雷达沉降监测具有与 GPS 和水准测量相当甚至更高的优越性，下表为雷达沉降监测与传统沉降监测方法的比较。

表 2.1 雷达沉降监测与传统沉降监测方法的比较表

比较指标	精密水准	GPS	D-InSAR
监测范围	一定区域	一定区域	大范围
时间分辨率	周期性	连续性	周期性
空间分辨率	区域覆盖、离散性	区域覆盖、离散性	全球覆盖、连续性
观测值	点、线信息	点、线信息	点、线、面信息
精度	毫米	毫米	毫米
作业条件	根据天气	全天候	全天候
数据处理	慢	快	快
周期/速度	长/慢	较短/快	短/快
成本	高	较高	较低

3 Radarsat-2 卫星介绍

3.1 Radarsat-2 卫星及其数据简介

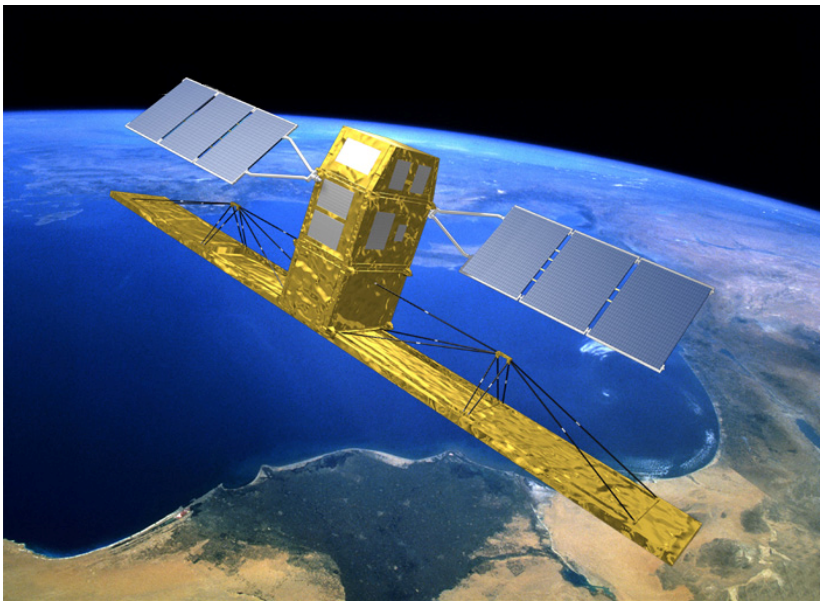

图 3.1 RADARSAT-2 卫星

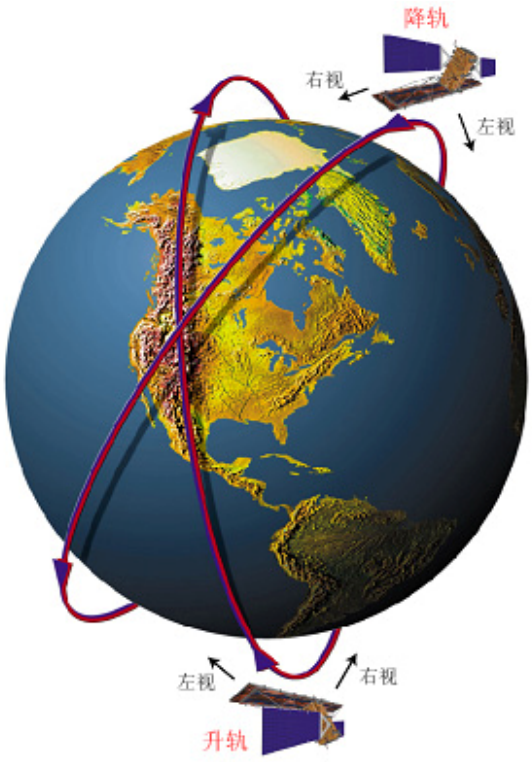

图 3.2 RADARSAT-2 卫星轨道示意图

RADARSAT-2 是一颗搭载 C 波段传感器的高分辨率商用雷达卫星，由加拿大太空署与 MDA 公司合作，于 2007 年 12 月 14 日在哈萨克斯坦拜科努尔基地发射升空。卫星设计寿命 7 年而预计使用寿命可达 12 年，目前已投入运营。

RADARSAT-2 具有 3-100 米分辨率成像能力，多种极化方式使用户选择更为灵活，根据指令进行左右视切换获取图像缩短了卫星的重访周期，增加了立体数据的获取能力。另外，卫星具有强大的数据存储功能和高精度姿态测量及控制能力。

该卫星接受编程订单。

RADARSAT-2 的基本参数和波束模式分别见表 3.1 和表 3.2。

表 3.1 RADARSAT-2 基本参数

卫星种类	C 波段 SAR 商用卫星
运行商	加拿大 MDA 公司
发射时间	2007 年 12 月 14 日
轨道类型	太阳同步轨道
卫星高度	798km(赤道上空)
重访周期	24 天
轨道周期	100.7 分（14 轨/天）
拍摄方向	左右侧视
采用波段	C 波段（频率为 5.405 GHz）
极化方式	全极化
特征	·多种波束模式 ·左右侧视缩短了重访时间 ·丰富的极化信息

表 3.2 RADARSAT-2 波束模式特征

波束模式	极化方式	入射角	标称分辨率		景大小（标称值）
			距离向	方位向	
超精细	可选单极化（HH、VV、HV、VH）	30°-40°	3 米	3 米	20km×20 km
多视精细		30°-50°	8 米	8 米	50km×50 km
精 细	可选单&双极化（HH、VV、HV、VH）&（HH&HV、VV&VH）	30°-50°	8 米	8 米	50km×50 km
标 准		20°-49°	25 米	26 米	100km×100 km
宽		20°-45°	30 米	26 米	150km×150 km
四极化精细	四极化（HH&VV&HV&VH）	20°-41°	12 米	8 米	25km×25 km
四极化标准		20°-41°	25 米	8 米	25km×25 km
高入射角	单极化（HH）	49°-60°	18 米	26 米	75km×75 km
窄幅扫描	可选单&双极化（HH、VV、HV、VH）&（HH&HV、VV&VH）	20°-46°	50 米	50 米	300km×300 km
宽幅扫描		20°-49°	100 米	100 米	500km×500 km

3.2 Radarsat-2 新增波束模式

为了增强 Radasat-2 应用能力，MDA 公司将 Radasat-2 的宽波束模式增加了两种：

(1) MFW（分辨率为 5m，幅宽为 90Km）；

(2) FW（分辨率为 10m，幅宽为 150Km）；

这两种模式，分辨率较高，幅宽很大，极大地增强 Radasat-2 对陆地和海洋的观测能力。

3.3 在矿区沉降监测中的独特优势

应用 Radasat-2 新增 5 米和 10 米波束模式数据，对矿区进行沉降监测有自己的优势：

(1) 根据实际经验，5 米和 10 米分辨率对矿区沉降监测完全适合；

(2) 这两种分辨率的 Radasat-2 影像的幅宽很大，提高了监测能力，降低了成本；

(3) 分辨率达到 5-10 米，而幅宽又如此之大，这是其他雷达卫星所不具有的。

4 矿区沉降监测技术方案

4.1 雷达沉降监测技术理论

合成孔径雷达干涉相位图包含了 2 次成像时雷达天线到目标的传播路径长度差异信息，传播路径的长度一般受到卫星测量位置、测量时间以及大气状况等改变的影响。在忽略大气影响的情况下，通过一定的算法移除由于卫星测量位置改变产生的地形干涉相位。可以得到形变干涉相位，从而实现对地表形变的监测。

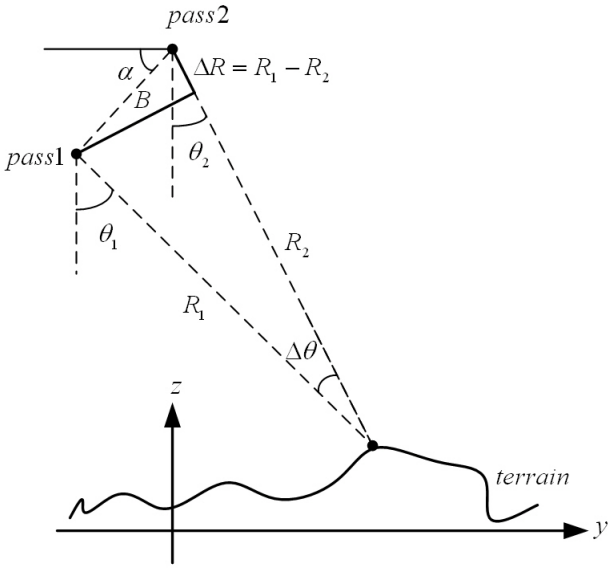

图 4.1 差分干涉测量几何示意图

图 4.1 给出了差分干涉测量几何示意图，其中雷达视向与雷达轨道方向正交。两次雷达成像记录的相位之差可以表示为：

$$\Delta\phi = \phi_{def} + \phi_{topo} + \phi_{orb} + \phi_{atm} + n$$

其中：ϕ_{def} 是在雷达视线方向上地面形变造成的相位，ϕ_{topo} 是由于地形相位，ϕ_{orb} 是由于轨道相对位置差异造成的相位，ϕ_{atm} 是大气相位，n 是去相干噪声。在去除了 ϕ_{topo} 和 ϕ_{orb}，忽略 ϕ_{atm} 和 n 的影响，可以得到雷达视线方向上地面形变造成的相位。根据雷达视线方向上地面形变造成的相位与地表沉降量 Δr 的关系，获取地表沉降量 Δr。

$$\phi_{def} = \frac{4\pi}{\lambda}\Delta r$$

4.2 短期监测方案

4.2.1 所需数据

采用 RADARSAT-2 SLC 数据（推荐选新增的两种波束模式的数据）：

- 入射角：20-40 度；
- 极化方式：单极化、双极化，单极化以 HH 极化最佳；
- 时间间隔：构成干涉对的 SAR 数据的时间基线不超过 72 天；
- 数据量：构成干涉对，两景以上。

4.2.2 处理流程

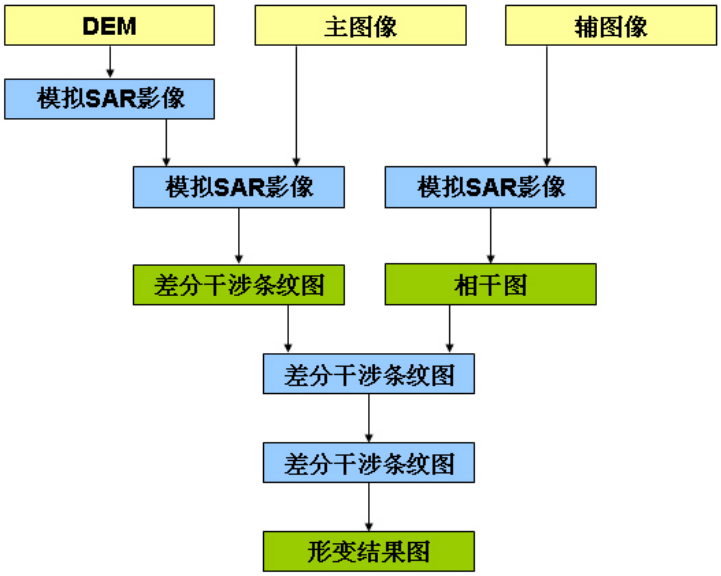

图 4.2 二轨法数据处理流程

4.2.3 成果及精度

时间周期：时间跨度 3 个月

成果形式：地理编码的雷达视向矿山区域地面沉降图

精度：雷达视向的矿山区域地面沉降量精度达到 1cm

4.3 长期监测方案

4.3.1 所需数据

采用 RADARSAT-2 SLC 数据（推荐选新增的两种波束模式的数据）：

- 入射角：20-40 度；
- 极化方式：单极化、双极化，单极化以 HH 极化最佳；
- 时间间隔：构成干涉对的 SAR 数据的时间基线不超过 72 天；
- 数据量：构成干涉对，五景以上。

4.3.2 处理流程

仍然采用 4.2.2 节的二轨法数据处理流程。

4.3.3 成果及精度

时间周期：时间跨度 6 月以上

成果形式：地理编码的雷达视向矿山区域地面沉降图

精度：雷达视向的矿山区域地面沉降量精度达到 1cm

4.4 持续监测方案

4.4.1 所需数据

采用 RADARSAT-2 SLC 数据（推荐选新增的两种波束模式的数据）：

- 入射角：20-40 度；
- 极化方式：单极化、双极化，单极化以 HH 极化最佳；
- 时间间隔：构成干涉对的 SAR 数据的时间基线不超过 72 天；
- 数据量：构成干涉对，15 景以上。

4.4.2 处理流程

利用永久散射体技术获取长时间序列的矿山区域沉降变化，永久散射体技术利用在长时间间隔 SAR 干涉图上保持有高相干特性的地面目标点，通过分析这些地面目标点上的相位，检测毫米级的地面形变。将 DEM 误差、形变、大气和轨道误差造成的相位的空间相干性和时间相干性进行对比，根据各部分相位在时间和空间上的不同表现，可以将它们分离出来。在 DEM 误差被分离出来之后，考虑到形变造成的相位在时间上的相干性，通过在时间域上的低通滤波，可以将形变造成的相位准确地估计出来。

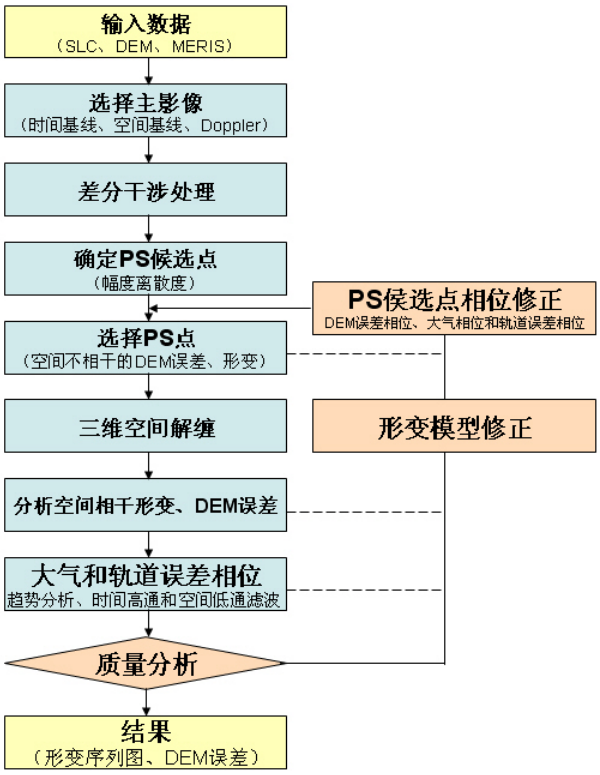

图 4.3 永久散射体技术的整体流程

4.4.3 成果及精度

时间周期：时间跨度 6 月以上

成果形式：地理编码的雷达视向矿山区域长时间序列地面沉降图

精度：雷达视向的矿山区域地面沉降量精度达到毫米级

4.5 某矿区沉降监测实例分析

该案例是应用 RADARSAT-2 影像，应用差分干涉测量技术对某矿区进行的沉降监测。

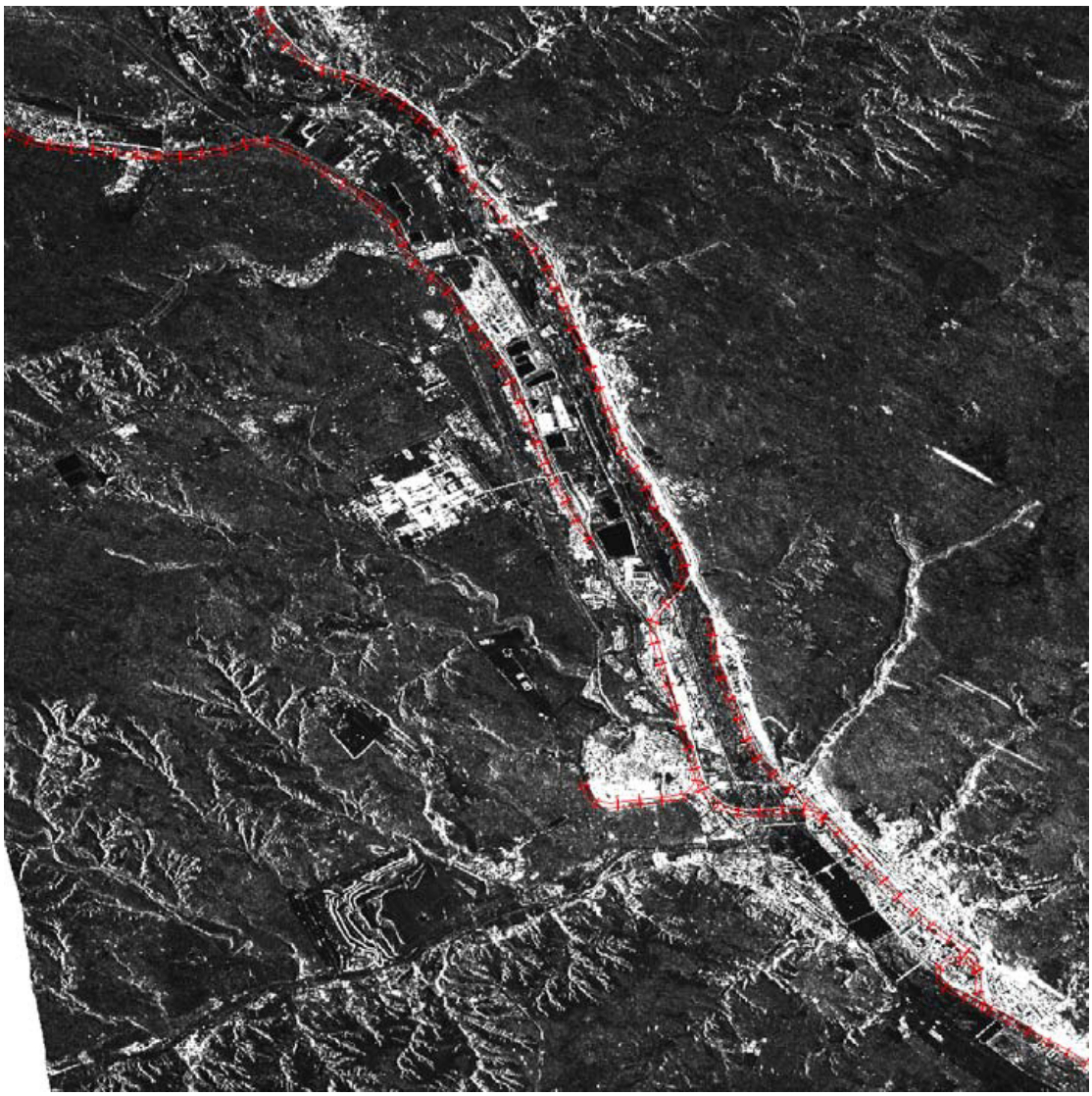

图 4.4 某矿区 RADARSAT-2 影像图

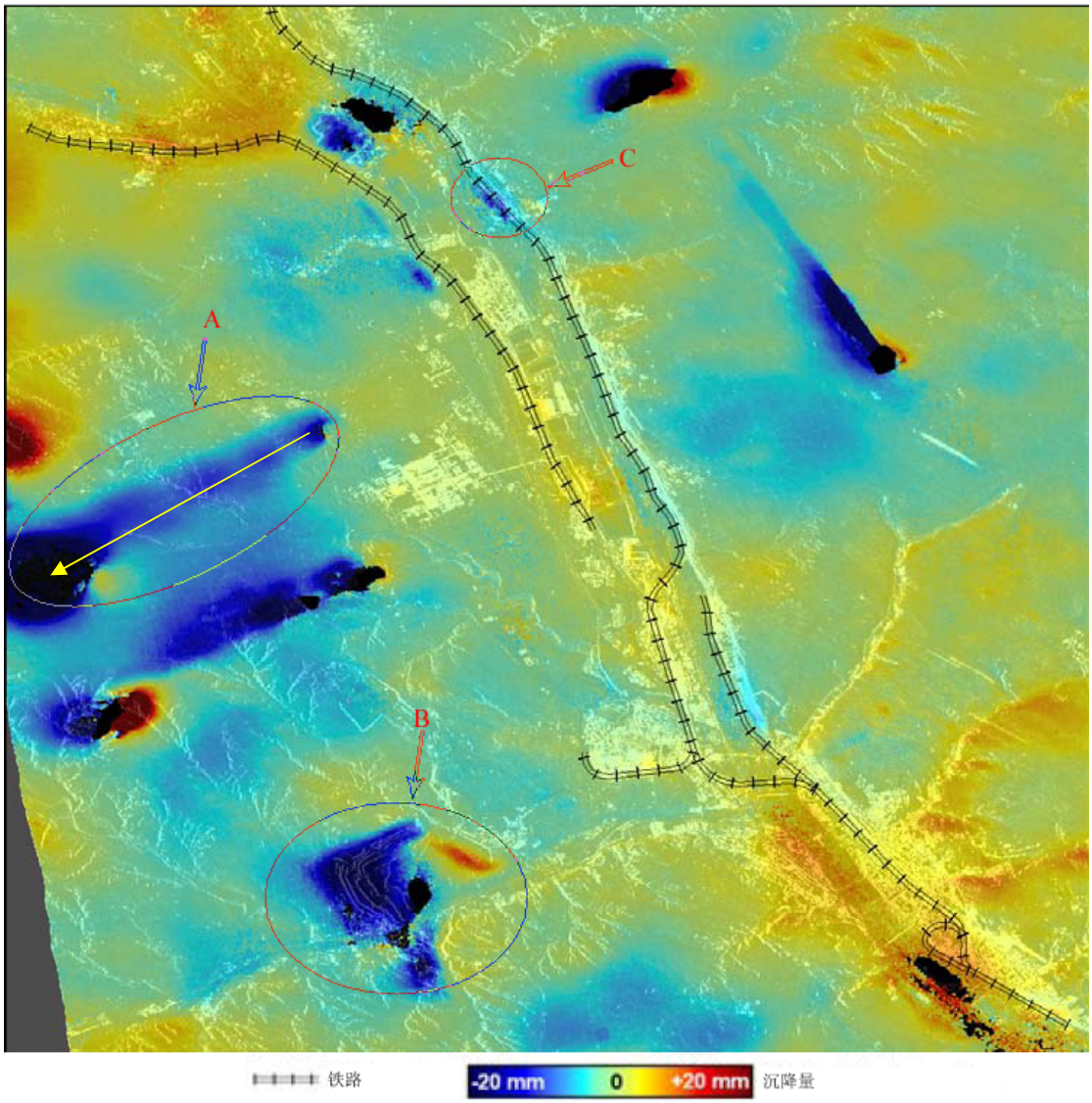

图 4.5 某矿区沉降监测结果图

图中 A 区域为一条矿带，黄色箭头方向为开采顺序，采用边开采边填充的方式，从图中可以看到，虽然前面的开采已经采取了填充措施，但是仍然存在沉降。

B 区域为一露天采矿区。

C 区域为铁路经过的地区，该铁路为运煤通道，一般运煤车是普通列车重量的十几倍，已造成 C 区域的明显沉降，应予以重视，以免造成铁路的损毁，甚至引起通行事故。

5 我们的技术优势

我公司在雷达应用方面拥有强大的技术支撑：

(1) 公司隶属于中科院遥感所，与遥感所联合成立了雷达卫星地表沉降监测应用中心，该中心依托遥感所微波遥感方面的专家及科研人才和一流的技术优势，致力于雷达地表沉降监测在各行业的应用推广。

(2) 公司与加拿大 MDA 公司建立了长期合作关系。

5.1.1 公司简介

中国科学院遥感应用研究所是目前国内航天、航空遥感应用的最高研究机构，拥有遥感科学国家重点实验室、国家航天局航天遥感论证中心、国家遥感应用工程技术研究中心、遥感卫星应用国家工程实验室等多个国家级科研机构，目前拥有 3 名中国科学院院士、1 名“爱因斯坦”讲习教授、2 名国际宇航科学院院士、2 名第三世界科学院院士、5 名“百人计划”、2 名国家级“百千万人才”、58 名高级研究人员、近 200 名在职职工、160 余名项目聘用人员、200 多名博士生与博士后及 100 余名硕士研究生。

北京国遥万维信息技术有限公司成立于 2001 年，是隶属于中国科学院遥感应用研究所的高科技公司，是遥感所最重要的产学研转化平台。公司专注于实现遥感所高新技术成果的产业转化以及国际尖端技术的引进与推广，并以其雄厚的科研实力和强大的技术力量为依托，不断进行可视化信息系统集成技术、遥感工程集成技术的研究与开发、未来数字城市远景规划，核心业务涉及遥感行业应用、航空航天遥感数据分发、网络地理信息与虚拟现实工程实现、国际业务合作与咨询等领域，并已成长为国内最主要的空间信息高新技术企业，能够为广大客户提供一站式遥感工程解决方案。

5.1.2 合作伙伴-MDA 公司

加拿大大不列颠哥伦比亚的里士满市麦克唐纳•迪特维利联合有限公司（MacDonald Dettwiler and Associates Ltd.，MDA）1969 年由 John MacDonald 和 Werner Dettwiler 创建。MDA 是全球最主要的对地观测卫星信息公司之一，提供先进的信息解决方案，捕获并处理大量数据、改进商业部门和政府机构的决策制定及运作效率；传递大量信息的解决方案：复杂操作系统、个性化信息服务、电子信息产品；业务情报：数据收集、处理及管理，信息提取，发布，制定决策。可应用于农业、国防、灾害管理、地质、冰、森林、水文、湿地监测、制图等。其遥感数据地面卫星接收站占全世界的一半多，在 RADARSAT 计划占主导地位。

接收卫星有：RADARSAT-2（2007 新增）、RADARSAT-1、QuickBird、EROS、LANDSAT 5、LANDSAT 7、ENVISAT、RESOURCESAT-1、IKONOS、ERS、IRS Airborne Imagery（ptical Imagery、LiDAR Imagery、Oblique Aerial Imagery & Viewing Software、Services、GSA Schedule）。

以信息产品服务和信息系统服务进行运作，在美国、英国和加拿大拥有 3 000 多雇员，在 60 多个国家拥有 600 多个客户。

MDA 拥有加拿大 RADARSAT-1 和 RADARSAT-2 的总经销权，并管理 2007 年发射的 RADARSAT-2。

2008 年 11 月，加拿大航天局宣布与 MDA 公司签署一份为期 16 个月，价值 4000 万美元的合同，MDA 公司负责设计 RADARSAT 星座任务（RCM）。根据合同，MDA 公司将完成 RCM 卫星及地面基础设施的初步设计。最初的任务包括三颗卫星，整个星座预计最终将包含六颗卫星。这将使整个星座随着灵活性的增大而满足未来需求。

MDA 主要的部门有：国际地理空间信息服务部（Geospatial Services International）、航天部（Space Missions）、美国地理空间信息服务部 Geospatial Services US（MDA Federal Ltd.）。

其中，国际地理空间信息服务部，简称 GSI，可以提供各种 GIS 服务：

- 专家服务：实时路线图、违法捕鱼和石油倾销的追踪、机场灾难成图、市区用地分级、海油储量探测、海陆安全监测、湿地制图、自然资源监测和管理、下陷成图、地形图和 3D 模型。
- 常规服务：快速化多语言用户服务、24 小时紧急服务和卫星计划、数据实时传递、内部数据快速处理和产品生产、培训及技术转让、项目管理、地理信息系统应用、网络化的决策支持工具。

5.1.3 遥感所微波遥感专家

邵芸

女，创新研究员 2004-今中国科学院遥感所遥感科学国家重点实验室副主任 2003中国科学院暨香港中文大学地球信息科学联合实验室主任 2001年获中科院遥感所理学博士学位 1999－1998在美国宇航局喷气推进实验室作高级访问学者 1996中国科学院遥感应用所 研究员、1993遥感所副研、1989遥感所助研 1986年毕业于北京大学并获理学硕士学位 1983年毕业于北京大学并获理学学士学位 主要研究领域为微波遥感，发表论文80余篇，获国家科技进步奖，中科院科技进步奖，中科院自然科学奖，北京市科技奖等，以及其它奖项，共计10项。 招生专业：地图学与地理信息系统。 研究方向：微波遥感 电邮：yunshao@irsa.ac.cn 010-6487-6313

微波遥感

1、郭华东等著，2000，《雷达对地观测理论与应用》，（国家自然科学基金委优秀研究果专著出版基金资助项目），科学出版社，北京，2000，（邵芸主持编写第6、7和8章，pp.214-347） 2、魏钟铨等著，《合成孔径雷达卫星》，科学出版社，北京，2001，（邵芸：第十二章，pp.252-263） 3、童庆禧等著，《中国金矿研究新进展》（第二卷），地震出版社，北京，1994，（邵芸撰写雷达遥感一章）

国家统计遥感前沿技术研究与示范应用；863计划重点项目课题新型成像雷达地下目标探测与隐伏特征提取技术研究；863计划课题海洋石油渗漏油膜雷达遥感检测技术方法研究（共二期）；中石油项目海洋溢油污染SAR遥感探测；国家海洋局海洋动力环境精细化数值预报系统建设；国家海洋局面向地表参数提取的微波与光学遥感图像融合技术；院创新重要方向项目课题多极化星载SAR载荷指标与陆地应用关键技术研究；科工委高分辨率极化雷达土地利用动态监测机理与方法研究方案；中国土地勘测规划院贵州省森林二类调查应用卫星影像的信息挖掘研究；贵州省长基金合作项目。