

# 基于 InSAR 技术的地表形变监测

黄伟<sup>1</sup>, 王霞<sup>2</sup>, 张永忠<sup>3</sup>

(1. 兰州交通大学 数理与软件工程学院, 甘肃 兰州 730070; 2. 山东省垦利一中, 山东 东营 257500;  
3. 兰州市勘察测绘研究院, 甘肃 兰州 730030)

**摘要:** 地表形变引发了一系列的地质灾害, 因此, 对地表形变进行监测显得尤为重要。卫星合成孔径干涉测量是一项极具潜力的区域地表形变监测技术, 具有很好的优越性, 应用前景广泛。介绍了地表形变及其带来的危害和 SAR 数据的基本处理流程等, 并以 BAM 地震为例对 InSAR 技术在地表形变监测中的具体应用进行了讨论与分析。

**关键词:** InSAR; 地表形变; BAM 地震

**中图分类号:** P23

引起地球表面形变的原因很多, 包括诸如地震形变、火山运动、冰川漂流等一系列自然因素和煤矿开采、地下水过度抽取等在内的一系列人为因素。而由地表形变所引发的各种地质灾害已成为国内外普遍关心的问题之一<sup>[1]</sup>。20 世纪 70 年代发展起来的卫星合成孔径雷达测量 (Synthetic aperture radar interferometry, InSAR) 为有效的监测大范围地表形变提供了可能, 是一项极具潜力的区域地表形变监测技术。INSAR 技术在用于地表形变时, 具有高形变敏感度、高空间分辨率, 几乎不受云雨天气制约, 并具用空中遥感等一系列突出的技术优势, 是迄今为止独一无二的基于面观测的形变监测手段, 既可补充已有的基于点观测的低空间分辨率大地测量技术, 又可为地球物理模型反演研究, 相关形变机理解释甚至形变灾害预测提供丰富的观测数据<sup>[2]</sup>。因此, INSAR 技术在研究地表形变方面表现出极好的应用前景, 具有无可比拟的优越性<sup>[3]</sup>。

## 1 InSAR 数据的处理流程

### 1.1 干涉数据的获取

合成孔径雷达干涉测量的数据处理能否成功关键就在于选取可利用的 SAR 数据。根据具体应用选取 SAR 图像数据需要考虑的因素主要包括以下几个方面: 传感器类型、基线的时空分布获取图像时的地形、大气特征等<sup>[4]</sup>。目前可用于干涉测量的星载合成孔径雷达数据源主要有: 欧空局 (European Space Agency, ESA) 的 ERS-1/2、ENVISAT、加拿大的 RADARSAT 和日本的 JERS-1、ALOS。同时, 美国的奋进号航天飞机也可以提供部分干涉测量数据。

### 1.2 SAR 图像的配准

SAR 图像数据的空间配准是 SAR 图像干涉处

理中关键的一步。图像配准是对取自不同时间、不同传感器或不同视角的同一景物的两幅图像或多幅图像匹配、叠加的过程。由于星载 InSAR 中的两幅图像不是同步得到的, 它们之间的像素点不对应, 因此需要进行图元配准, 目的是将两个图像中同样位置的像素对应地面同一回波点, 以使两幅图像具备干涉的条件, 一般通过曲线插值和拟合等方法来实现。图像配准通常分粗配准和精配准两个步骤, 粗配准误差约为一个像素, 精配准能达到亚像元精度。

### 1.3 干涉图的生成

对于来自不同时间、不同传感器或不同视角的同一景物复雷达图像对, 由于两副天线与地面某一目标之间的距离不等, 使得在复雷达图像对同名象点之间产生相位差, 从而可以形成干涉纹图, 干涉纹图中的相位值即为两次成像的相位差测量值, 根据两次成像相位差与地面目标的三维空间位置之间存在的几何关系, 利用飞行轨道的参数, 即可测定地面目标的三维坐标, 生成干涉图。通常, 图像的配准误差必须在 1/8 个像元以下才对干涉条纹的质量没有明显影响。

### 1.4 干涉图的滤波

引起 InSAR 相位图中噪声的因素很多, 观测区域的地形、基线相关损失、相干斑点噪声、信号处理噪声、图像不匹配噪声、接收机热噪声等都是干涉相位图中噪声的重要来源。在 InSAR 成像处理中, 由于干涉相位图受到噪声的影响, 干涉条纹可能并不明显, 甚至会完全淹没在噪声之中, 因此需要对干涉相位图作滤波处理, 来降低其中由噪声引起的残余点数量, 提高干涉条纹的质量, 以利于干涉相位图的二维相位展开处理。

### 1.5 去平地效应

去除干涉图的噪声后,就要对干涉图产生的平地效应进行去除。平地效应是干涉图在高度相同的平地上所表现出来的干涉条纹随距离向和方位向的变化而变化的一种现象。平地效应的变化具有一定的周期性。干涉图中,有平地效应引起的条纹与地形起伏所引起的条纹夹杂在一起,并不能反映真实的地表形变信息,因此需要去除平地效应后再进行相位解缠。平地效应可通过对干涉纹乘以复相位函数来去除。

### 1.6 相位解缠

由于干涉相位图的条纹是由相位差形成的,它与地面位置直接相关的相位以  $2\pi$  为模,即只能测量出不足一个周期的相位差,丢失了  $2k\pi$  的模糊度。因此为了计算目标点的高程,必须解出相位模糊度,给相位测量值加上  $2k\pi$  的相位周期。这种求解  $2k\pi$  模糊性问题的技术称为相位解缠。它类似于 GPS 相位测量中的整周模糊度问题,是一个重要而有难度的步骤,解缠得到的相位值准确与否,直接关系到提取出的目标高程信息的有效精度。目前,所有的相位解缠可分为两个步骤:①基于缠绕相位计算解缠相位的相位梯度估算值;②积分。根据所采用的积分方法,相位解缠方法主要分为两大类:路径跟踪法和最小二乘法。实践证明,路径跟踪法比最小二乘法更加稳健和可靠<sup>[5]</sup>。在相位解缠完成后计算出形变信息,最后将形变图投影至地理坐标系中。

## 2 InSAR 技术应用实例——伊朗 BAM 地震

### 2.1 试验区简介

2003年12月26日,德黑兰当地时间凌晨5点28分,伊朗东南部地区发生里氏6.8级强烈地震,震中位置为29.01N,58.30E,震源深度33km。地震震中位于距克尔曼省省会克尔曼市约180km的巴姆市。地震造成了大面积破坏,巴姆市有60%的房屋倒塌,一些具有历史价值的古迹也变成了废墟,巴姆及其附近地区的通讯、水、电供应均遭中断。根据截至2004年1月8日的报道,地震造成约3万人死亡<sup>[6]</sup>。

### 2.2 试验数据的获取

BAM地震发生以后,ENVISAT卫星监测到了BAM地震的全过程。利用欧空局ENVISAT卫星获取的3幅雷达影像数据进行差分干涉处理。三幅影

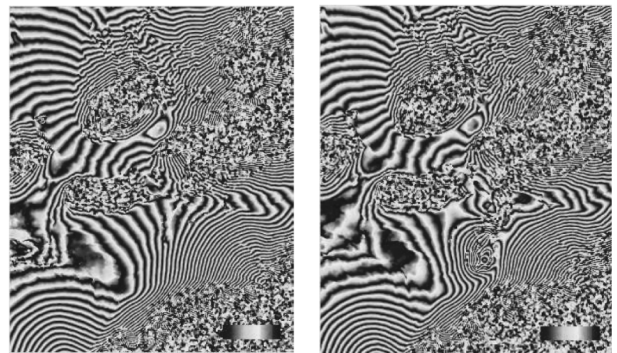
像的轨道号依次为6687,9192和9693,成像时间分别为2003年6月7日,2003年12月3日和2004年1月7日。其中,6687和9192为BAM地震前获取的照度图像,9693为地震后获取的照度图像。

### 2.3 处理结果

以6687和9192为Topo相对,以9192和9693为Defo相对,采用荷兰Delft大学的DORIS软件进行三轨法差分干涉处理,其中采用Goldstein滤波方法进行滤波,采用Snaphu网络流算法进行解缠,在解算前先进行基线估算,依次得到表1的干涉图基本参数信息,只包含地形相位信息的干涉条纹图(9192-6687,图2)与包含地形和形变的干涉条纹图(9192-9693,图1),包含形变信息的差分干涉条纹图(图2),该地区地震前的DEM高程图(图3)以及视向上(LOS)的地表形变三维图(图4)。

表1 干涉图基本参数

干涉图参数	9192-6687	9192-9693
基线(m)	496	586
垂直基线(m)	-475	521
入射角(°)	22.8	22.8
时间间隔(d)	175	-35
多视处理	2:10	2:10



(a)9192-6687干涉图 (b)9192-9693干涉图

图1 干涉条纹图

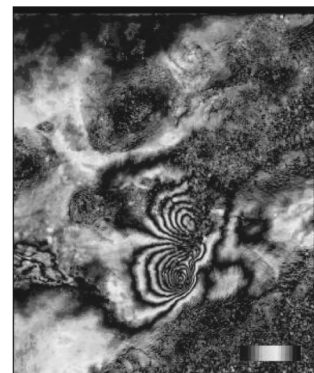


图2 未解缠差分干涉测量图

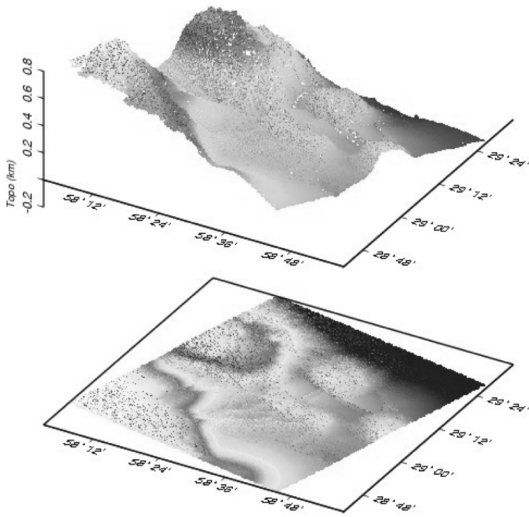


图 3 DEM 高程显示图

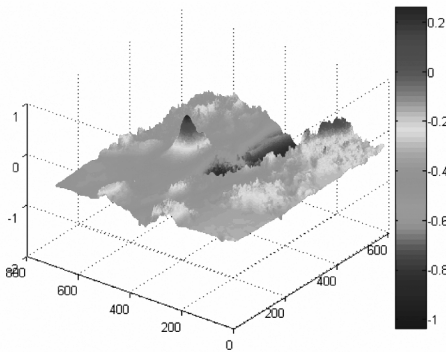


图 4 照度方向上的三维图

由于 BAM 地区气候干燥, 植被比较稀少, 所以相隔 35d 和 175d 的干涉图其相关性依旧非常好。对比图 1 中的两幅图, 从包含形变信息的干涉条纹图(a)中就可以分辨出由于形变引起的条纹, 但是由于地形信息产生的相位影响, 形变条纹被淹没在地形条纹之中。采用三轨法可以获取地震前当地的 DEM, 如图 3 所示, 然后减去由 DEM 产生的相位信息, 去除地形相位影响, 即可获得精确的地表形变未解缠干涉条纹图, 如图 2 所示。但是在形变中心之外还有 2 条明显的其他条纹, 这些残差是由于地形相位的残差以及基线误差的影响造成的。对于这种情况, 只有精确获取了当地的 DEM 数据和对 ENVISAT 图像的轨道进行优化, 才能消除这种影响<sup>[7]</sup>。从干涉图中得出地震形变场分布及形变信息, 对形变相位进行解缠之后, 得出地面各点的形变量  $\Delta R$ 。由于 ASAR 雷达采用 C 波段(波长 5.666cm)微波成像, 所以每条整周干涉条纹代表约 2.8cm 的形变量, 由此得出地震造成的最大形变量约为 30.4cm (图 3)。其中, 图 4 中南边地区的一瓣在雷达射线方向隆起 25cm 左右, 而北边则下沉约 70cm。

### 3 结论

简要介绍了地表形变的一些危害及进行地表形变监测重要性, 合成孔径雷达技术基本原理及数据处理流程, 最后以 BAM 地震形变场的干涉处理过程及结果为例, 显示了星载合成孔径雷达技术在监测地表形变中的突出技术优势, 证明 InSAR 技术是地表形变监测的一种十分有效而且强大的工具。利用干涉雷达进行大面积、快速、低成本、高精度高分辨率的形变测量, 是其他传统方法, 包括现代的 GPS 都无法做到的<sup>[8]</sup>。

虽然 InSAR 本身的优势明显, 但由于其自身方面故有的技术限制, 特别是受到大气层延迟(对流层延迟、电离层延迟等)、卫星轨道误差、地表状况和时变去相关性等影响, 很容易导致 InSAR 图像解释错误, 而 InSAR 数据本身无法解决所存在的上述问题。随着雷达技术的进一步发展, 将会使 InSAR 的相关缺陷逐步得到解决。而新一代 SAR 卫星的发射升空, 如 Radarsat-2 及 ALOS 等, 将有可能对 SAR 数据资源在地震监测、火山活动、以及其他地表形变等现象进行更加深入和广泛的应用研究。可以预见, 合成孔径雷达干涉测量技术在地表形变监测中的应用将会越来越普遍, 作用也会越来越大, 进而成为形变监测中不可或缺的强大工具。

### 参考文献:

- [1] 张宗枯. 环境地质与地质灾害. 第四纪研究[J], 2005, 25(1): 1-5.
- [2] 刘国祥. 利用雷达干涉技术检测区域地形形变(中文摘要-英文版)[M]. 北京: 测绘出版社, 2006.
- [3] 舒宁. 雷达影像干涉测量原理[M]. 武汉: 武汉大学出版社, 2003(4): 13-14.
- [4] 周建民. InSAR 技术及其在地表形变监测中的应用[D]. 南京: 河海大学, 2006.
- [5] 陈强. 基于永久散射体雷达差分干涉探测区域地表形变的研究[D]. 成都: 西南交通大学, 2006.
- [6] 孙振凯. 伊朗东南部发生里氏 6.8 级强烈地震[J]. 北京: 国际地震动态, 2004, 1(1).
- [7] 李毅. 用 D-InSAR 研究巴姆地震形变场[J]. 武汉: 大地测量与地球动力学, 2008, 28(1).
- [8] 夏耶. 巴姆地震地表形变差分雷达干涉测量[J]. 北京: 地震学报, 2005, 24(4).