

文章编号:1671-8860(2011)04-0379-05

文献标志码:A

基于 GIS 的 InSAR 结果分析方法及在汶川 Mw7.9 级地震同震解释中的应用

许才军¹ 江国焰¹ 王 浩¹ 温扬茂¹

(1 武汉大学测绘学院,武汉市珞喻路 129 号,430079)

摘要:利用 GIS 对 InSAR 结果进行分析可以更全面地解释地表形变机制。介绍了利用 GIS 对 SAR 影像进行裁剪、切割和拼接处理、剖面和等值分析的方法。在此基础上,以汶川 Mw7.9 级地震为例介绍了基于 GIS 的 InSAR 结果分析方法在地震形变机制解释方面的应用:①根据 InSAR 距离向偏移量和同震形变场,利用 GIS 技术提取了汶川 Mw7.9 级地震发震断层的地表迹线;②将基于位错模型正演得到的视线向形变场与 InSAR 同震形变场进行比较,得到了汶川地区 InSAR 同震形变场的上盘和整体改正数,进一步借助 GIS 进行修正得到了更为真实的 InSAR 同震形变场;③利用 2D/3D InSAR 同震形变场、干涉纹图和剖面分析结果对汶川 Mw7.9 级地震同震形变特征进行了具体分析和解释。

关键词:GIS;InSAR;形变分析;同震解释

中图法分类号:P225.7; P208

合成孔径雷达干涉测量技术(interferometric synthetic aperture radar, InSAR)可以获取高精度、高可靠性的地表变化信息,广泛应用于探测由于地震、火山爆发、地下水抽取、煤矿开采等引起的地表形变。利用地表形变区域的 InSAR 影像、地形图、正射影像图、数字高程模型(DEM)等数据,借助地理信息系统强大的空间数据管理和分析能力,可以更全面地对形变机理进行解释。鉴于此,利用 GIS 对 InSAR 数据处理结果进行后处理正逐渐成为 InSAR 数据处理过程的一个重要环节。

目前,在 InSAR 和 GIS 技术集成与应用领域,更多的学者是结合两者对地表的沉降机理进行解释,其研究方法大致可分为以下两类:①在 GIS 中综合 InSAR 数据处理结果、地形、地质、正射影像等数据,直接对地表沉降和形变机理进行解释^[1-3];②在利用 GIS 对 InSAR 数据处理结果进行空间分析的基础上,再综合其他各类数据对地表沉降和形变机理进行解释^[4-6]。相对于第二类情况, GIS 在第一类情况中仅仅是一种数据集成平台,其强大的空间分析能力没有得到有效的应用。本文主要利用 GIS 对汶川 Mw7.9 级地震

进行了处理与分析。

1 数据来源

本文选取汶川地区(经度 95°~109°,纬度 21°~35°)作为实验研究区域,涉及到的数据主要有雷达影像数据、SRTM DEM 数据和地形图数据。选取的雷达影像数据是覆盖汶川地震震中破裂区域的 6 轨 36 景 L 波段 ALOS PALSAR 雷达卫星升轨影像数据;每轨 6 景,震前、震后各 3 景。每条干涉带对影像获取的时间间隔和垂直基线距如表 1 所示^[7]。

表 1 选用的 ALOS 卫星雷达数据

Tab. 1 Applied ALOS SAR Data

像对	主影像	辅影像	垂直基线/m	时间间隔/d	Track	Frame
IP1	0802 29	0805 31	96	93	471	640/630/620
IP2	0701 28	0806 17	201	506	472	640/630/620
IP3	0802 17	0805 19	255	93	473	630/620/610
IP4	0803 05	0806 05	300	91	474	630/620/610
IP5	0706 02	0806 22	-45	365	475	620/610/600
IP6	0804 08	0805 24	-196	48	476	620/610/600

收稿日期:2011-03-11。

项目来源:国家公益(地震)行业科研专项基金资助项目(200808080);国家自然科学基金资助项目(40874003;41074007;41021061);国家 863 计划资助项目(2009AA12Z317);国家教育部高等学校博士点专项基金资助项目(20090141110055)。

2 基于 GIS 的 InSAR 结果分析与管理

通过对两幅单视干涉纹图进行去平地效应、相位解缠、差分干涉计算后可以获取地表形变结果。基于 GIS 的 InSAR 数据处理结果分析内容可以概括为以下几个方面:① 数据准备与导入;② 影像编辑;③ 空间分析;④ 数据的可视化与管理。对应的分析过程如图 1 所示,主要由上述②、③、④ 3 个内容组成,三者之间以及对应的具体分析内容之间可任意组合构成适合实际需求的分析模式。然而,不论实际分析过程是否需要② 和③,数据的可视化与管理都是必不可少的。

不同的 GIS 软件,数据准备与导入的内容不同。若采用 ArcGIS DesktopTM 及同类软件,通常需要将 InSAR 的数据处理结果保存为 IMG、TIF、PNG、JPG 等栅格文件;除此之外,在数据导入 GIS 后还需要通过影像纠正和空间配准建立起与矢量地形图等数据一致的坐标参考系统。若采用二次开发的方式可根据影像左上角点的大地坐标、影像的长度与宽度、像元的长度与宽度、坐标参考系统等参数条件,直接将二进制的形变数据创建为单波段的数据集,通过这种方式可以避免影像纠正和空间配准。

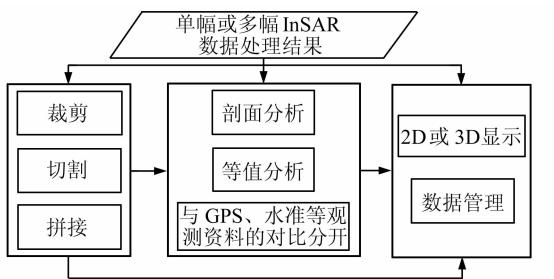


图 1 基于 GIS 的 InSAR 数据处理结果分析流程图

Fig. 1 Flowchart of InSAR Results Analysis Based on GIS

2.1 影像裁剪、切割与拼接

各种去相干因素(主要包括有植被、影像的叠掩与阴影以及高形变梯度等)的影响都将导致地表形变无法被 InSAR 探测出来^[6],在影像图上就会出现大范围的无值区域。相邻的影像同时显示时常发生无值区域覆盖有值区域现象,若将无值区域剔除,即对影像进行切割处理,可避免这种现象的发生。具体的实现过程如下。

1) 在无值区域采集一定数量的点,以构成包

含有值区域的多边形。

2) 利用该多边形在原影像中提取有值区域并创建新的栅格数据集。封二彩图 1(a)、1(b)给出了对轨道为 472、474 和 476 的 InSAR 同震形变场进行裁剪的效果。

影像切割是指利用一条横贯 SAR 影像的多段线将影像一分为二。在分析地震同震形变场时,常需对上/下盘形变场进行不同的修正。利用断层线和影像切割可将横跨断层的形变场分为上盘形变场和下盘形变场,从而实现对上/下盘形变场的区别修正。影像切割的实现过程如下。

- 1) 提取影像的轮廓;
- 2) 利用多段线将影像轮廓切割为两个独立的多边形;
- 3) 利用多边形对原影像进行裁剪。封二彩图 1(c)、1(d)给出了对轨道为 474 的 InSAR 同震形变场进行切割的效果。

SAR 影像拼接是指将两幅或两幅以上栅格数据创建为一个栅格数据集。通过拼接可以消除两幅以上 SAR 影像同时显示时同一颜色对应不同形变值的现象,有利于建立对大范围地表形变的统一认识。影像拼接的前提是每幅影像的像元大小相同。影像在切割与拼接前后,坐标参考系统和像元的空间位置不发生改变。

2.2 剖面分析与等值分析

剖面分析可以获取某一直线向上的地表形变变化;等值分析可以获取形变场的等值线图。通过剖面分析和等值分析有助于解释火山、地震等引起的地表形变机制。基于 GIS 的 InSAR 影像剖面分析过程如下。

- 1) 在影像上采集两点并创建多段线;
- 2) 获取影像上多段线所在位置的栅格图层像元的空间坐标和形变值;
- 3) 绘制成图。

对汶川地震震源所在的形变场(轨道号 476)在近似垂直地表主破裂带的方向进行剖面分析,结果如封二彩图 2 所示。封二彩图 2(a)是形变场修正前的剖面分析结果;封二彩图 2(b)是形变场修正后的剖面分析结果。

此外,选取轨道号为 471 的形变场进行等值分析,间距为 0.06 m,结果如封二彩图 3 所示。封二彩图 3(a)为形变场修正前的等值分析结果;封二彩图 3(b)为形变场修正后的等值分析结果。比较两者可以发现,形变场整体加上 0.228 6 m 的修正后,等值线沿经度方向向东移动。除此之外,两次等值分析结果中均出现了大量的“孤岛”,

其直接原因是部分像元无变形值, 而其相邻像元存在变形值。这种局部区域的形变值出现较大幅度的波动现象必然会导致在等值分析时出现“孤岛”。导致“孤岛”现象出现的根本原因有多种, 如山体滑坡、大气改正和相位解缠失败等。因此, 从另一个角度来说, 通过等值分析也可以判定 InSAR 结果的质量。等值分析的结果对解释由煤矿开采和地下水抽取引起的地表沉降有很大的帮助。

2.3 数据可视化与管理

数据的可视化可以直观地展示形变区域, 是进行形变机制解释的一个重要环节。本文借助 GIS 分别通过二维和三维的方式将汶川地区的地形图数据、断裂带数据和 InSAR 同震形变场以二维的方式显示在同一坐标参考系统中, 见封三彩图 4。其中封三彩图 4(a)为修正前的同震二维形变场, 封三彩图 4(b)为修正后的同震二维形变场。通过这两种方式可以比较全面地对汶川地震进行同震解释。

由于绝大多数 GIS 平台都提供了强大的显示功能, 因此, 借助 GIS 可可视化 InSAR 影像数据能够满足各种研究工作的需求。本文提出的基于 GIS 的 InSAR 数据管理主要包括数据存储和数据查询。InSAR 形变数据一般以 ERDAS IMAGINE Image 格式存储, 同时存储形变值和坐标参考系统。数据查询主要指查询 InSAR 影像的角点坐标、高、宽、像元大小、像元的形变值等。

3 基于 InSAR/GIS 的汶川 Mw7.9 级地震同震解释

基于 GIS 的 InSAR 结果分析在地球物理大地测量学领域具有广阔的应用前景。本文将以 2008-05-12 发生的汶川 Mw7.9 级地震为例, 在对其进行同震解释的同时逐步展现基于 GIS 的 InSAR 结果分析方法在同震形变观测结果显示、分析以及解释等方面的优势。

3.1 断层线提取

在 InSAR 干涉测量数据处理过程中, 除了可以利用相位信号来获取干涉图, 还可以利用 SAR 影像像元的偏移量来获取震中区域的地表形变^[7]。由于本文使用的 6 轨同震 SAR 影像均为升轨数据, 并且汶川地震的发震断层的走向与卫星的方位向近似垂直, 因此, 在距离向得到的偏移量表达了特征明显的地表形变信息, 而方位向的形变信号特征很不明显。根据距离向偏移量可以

提取到发震断层的地表位置。

本文以 InSAR 距离向偏移量封三彩图 6 为主、同震形变场(封三彩图 4(a))为辅, 借助 GIS 提取了发震断层的地表位置(封三彩图 4、图 5 和图 6 中的粉红色线段, 封三彩图 7 中的黑色线段)。从提取到的断层迹线来看, 汶川地震的发震断层的走向与先存断裂带相吻合, 但在汶川-北川方向上发震断层相对先存断层发生了波动。这表明汶川地震使先存断层在这一区域发生了错位; 或者是汶川地震造成先存断层在这一区域发生折断并产生了若干小断层。

3.2 形变场修正

由于汶川地震在震中区域的地表形变变化剧烈, 非常容易形成高的相位梯度区域, 如果地面两相连像元的相位变化超过了 π rad(即 11.8 cm), 雷达后向散射机制将发生剧烈变化, 两次成像的回波信号将不具有相干性, 表现在干涉图上就为不相干区域(即图中的无值空白区)。在常规的相位解缠中无法对这样大范围去相干区域的解缠整周数进行有效的传递, 这就使得解缠得到的干涉图(如 472、473、474 和 475)中的上盘和下盘之间存在着一个明显的相位跳变。

此外, 在相位解缠中, 我们通常都是选择一个远离震中的区域作为解缠相位的起算点, 这就使得不同轨道解缠得到的干涉相位具有不同的起始值。因此, 在进行更进一步的形变分析时有必要对形变场进行改正。形变场的改正包括两个方面的内容: ① 对每轨形变场进行整体改正; ② 对分处上/下盘的形变场进行区别改正。根据地球物理正演的结果可以获取形变场的改正数^[8], 如表 2 所示。

表 2 形变场改正数

Tab. 2 Corrections of Deformation Field

Track	整体改正数/m	上盘改正数/m
471	0.077 6	
472	-0.182 0	0.708
473	0.089 7	1.298
474	0.042 9	0.944
475	-0.012 6	0.472
476	0.228 6	

以下几个方面利用 GIS 对形变场进行改正的过程可以概括为: 1) 对每轨影像进行整体改正; 2) 利用提取的发震断层地表迹线对影像进行切割; 3) 对处于上盘的形变场进行改正。改正后的结果如封三彩图 4(b)和图 7(b)所示, 较改正前的形变场, 地表形变的变化更加连续, 表现出了较好的一致性。

3.3 同震形变场特征分析及解释

封三彩图5为经过差分干涉处理得到的汶川Mw7.9级地震地表同震形变干涉条纹图,图中的每级干涉条纹代表了雷达视线方向11.8 cm的地表位移量。在干涉图的中心地带,有一条很明显的NE走向的非相干地带,该非相干区域从震中西南侧开始,延伸到东北面的苏河附近,长约240 km,南段宽约20 km,北段宽约10 km。结合图像中心的红线表示本次地震的地表主破裂带位置,该非相干区域可能是由于地表破裂导致的形变量剧烈,超过了InSAR所能探测到的最大相位梯度而造成的干涉图像失相干,而非相干条带西南段较宽也说明了该区域,即震中附近的地表形变量更大。从图中可以清晰地看出,越靠近地表破裂且存在有效干涉的区域,干涉条纹越密集,远离地表破裂带的区域干涉条纹疏松,表明靠近破裂带的区域有着更大的地表形变量。此外,从地表破裂带附近的不规则同心圆干涉条纹还可以说明此次地震造成的地表形变量沿断层分布不均匀,表现出较强的分段性^[9]。

借助建立起的InSAR数据处理结果管理和分析平台可以得到雷达视线方向形变干涉测量结果的三维视图,如封三彩图7所示。从图中可以看出,在断层的西北盘,地表的大部分区域是隆升的,而东南盘总体表现为沉降。在常规的形变干涉条纹图的判读中,只能根据干涉条纹的颜色变化顺序来确定形变量正负,当干涉条纹比较密集时很容易出现判读错误,而基于该平台生成的三维形变视图,能够很好地克服这种常规方法的缺陷,方便直观,显示了该平台在同震形变场形变特征判读方面的优势。

3.4 同震形变剖面特征分析及解释

差分干涉图表征的是大范围区域内的总体形变特征,为了定量地分析地震引起的同震地表形变,可以借助剖面图的形式,如封二彩图2所示。封二彩图2(a)和图2(b)分别表示修正前和修正后的测线形变剖面图。图2中左边部分为选取的测线位置,图2中右边部分为选取的测线对应的雷达视线方向形变量剖面图,测线的位置过震中并近似垂直于地表主破裂带。

从修正后的封二彩剖面图2(b)中可以看出,从西北端的测线初始点开始,视线向的形变观测为负值,表征了该区域的地表变形指向雷达方向,即地表是隆起的。顺着测线沿东南方向观察,一方面,形变梯度越来越大,说明离震中越近,地表位错的变化越剧烈;另一方面,地表变形逐渐由隆

起转为沉降,并在理县附近区域,形变出现了反转,分析可能是由于断层的右旋走滑造成的断层上盘,即西端点附近区域的沉降,该沉降区域雷达视线方向最大沉降形变量约为0.7 m。而在到达震中之前,变形值又迅速由正变负,即区域变形由沉降转为隆起,震中区域雷达视线方向最大隆起形变量约为0.6 m,与之前的沉降区域形成约为1.3 m的最大相对形变量。再顺着东南方向,到了断层的下盘,地表沉降变形迅速衰减至渐渐平缓,区域形变量相对较小。

本文基于InSAR计算得到的地表形变量值,要比GPS观测^[10]以及野外实地调查测量^[11-12]得到的形变值小,但是InSAR观测结果在大尺度范围覆盖上可以很好地反映区域整体的形变特征。

4 结语

本文给出了利用GIS对InSAR结果进行分析的流程和方法,并以汶川Mw7.9级地震为例详细阐述了基于GIS的InSAR结果分析方法在地震形变机制解释方面的应用。本文通过研究建立了基于GIS的InSAR数据处理结果管理和分析平台,这是课题组正在研制的活动断层地震危险性评估系统(active fault earthquake risk evaluating system, AFERES)的重要组成之一。利用该系统可以实现SAR影像编辑(裁剪、切割与拼接)、形变场空间分析、断层线提取、形变场改正、多源数据的可视化与管理等功能。除此之外,借助GIS对InSAR结果和传统大地测量结果进行对比分析,以及对InSAR形变场进行像元精度评定是有待进一步研究的问题。

参考文献

- [1] Liu Jianguo, Mason P, Hilton F, et al. Detection of Rapid Erosion in SE Spain: A GIS Approach Based on ERS SAR Coherence Imagery[J]. Photogrammetric Engineering & Remote Sensing, 2004, 70(10): 1 179-1 185
- [2] Fang Miao, Yan Mingxing, Qi Xiaoying, et al. Application of DInSAR and GIS for Underground Mine Subsidence Monitoring[J]. The International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences, 2008, 37(B1): 251-256
- [3] Meisina C, Zucca F. PS InSAR Integrated with Geotechnical GIS: Some Examples from Southern Lombardia Geodetic Deformation Monitoring[J]. Geophysical to Engineering Roles, 2007(131): 65-

72

- [4] Ge Linlin, Li Xiaojing, Rizos C, et al. GPS and GIS Assisted Radar Interferometry[J]. Photogrammetric Engineering & Remote Sensing, 2004, 70(10): 1 173-1 177
- [5] Ge Linlin, Chang Hsingchung, Rizos C. Mine Subsidence Monitoring Using Multi-source Satellite SAR Images[J]. Photogrammetric Engineering & Remote Sensing, 2007, 73(3): 259-266
- [6] Hanssen R F. Radar Interferometry: Data Interpretation and Error Analysis[M]. Kluwer: Kluwer Academic Publishers, 2002
- [7] 温扬茂. 利用InSAR资料研究若干强震的同震和震后变形[D]. 武汉: 武汉大学, 2009
- [8] Xu Caijun, Liu Yang, Wen Yangmao, et al. Coseismic Slip Distribution of the 2008 Mw 7.9 Wenchuan Earthquake from Joint Inversion of GPS and InSAR[J]. Bulletin of the Seismological Society of America, 2010, 100(5B): 2 736-2 749
- [9] 屈春燕, 宋小刚, 张桂芳, 等. 汶川Ms8.0地震InSAR同震形变场特征分析[J]. 地震地质, 2008, 30(4): 1 076-1 084
- [10] 顾国华, 王武星. GPS测得的汶川大地震同震位移[J]. 地震, 2009, 29(1): 92-99
- [11] 李海兵, 付小方, 司家亮, 等. 汶川地震(Ms8.0)地表破裂及其同震右旋斜向逆冲作用[J]. 地质学报, 2008, 82(12): 1 623-1 643
- [12] 刘静, 张智慧, 文力, 等. 汶川8级大地震同震破裂的特殊性及构造意义[J]. 地质学报, 2008, 82(12): 1 707-1 722

第一作者简介:许才军,教授,博士生导师,长江学者特聘教授,主要研究方向为大地测量学与地球动力学、InSAR与GPS数据融合处理理论与应用。

E-mail: cjxu@sgg.whu.edu.cn

Analyzing InSAR Results Using GIS and Its Application on the Coseismic Interpretation of Mw7.9 Wenchuan Earthquake

XU Caijun¹ JIANG Guoyan¹ WANG Hao¹ WEN Yangmao¹

(1 School of Geodesy and Geomatics, Wuhan University, 129 Luoyu Road, Wuhan 430079, China)

Abstract: InSAR results' analysis assisted with GIS can give more comprehensive interpretation on surface deformation mechanism. In this paper, we present the methods to clip, split and merge SAR images with the help of GIS. Besides, the profile and contour analysis to SAR images are illustrated. In order to demonstrate the effectiveness on interpreting earthquake deformation mechanism using the InSAR results assisted with GIS, we analyze the Mw7.9 Wenchuan earthquake as follows. First, the seismic fault surface trace is extracted according to the InSAR range offset and coseismic deformation field. Second, through the comparison between the LOS deformation field obtained by geophysical forward using dislocation model and the InSAR coseismic deformation field, the whole and hanging wall corrections of InSAR deformation field are obtained, with which the more actual coseismic deformation are got by correction using GIS. Finally, more comprehensive analysis and interpretation on the characteristics of coseismic deformation are presented by using the 2D/3D coseismic deformation field, interferograms and profile analysis.

Key words: InSAR; GIS; deformation analysis; coseismic interpretation

About the first author: XU Caijun, professor, Ph.D supervisor, Changjiang Scholar, majors in geodesy and geodynamics, theory and algorithm of data fusion between GPS and InSAR and its application.

E-mail: cjxu@sgg.whu.edu.cn