# 利用合成孔径雷达差分干涉测量技术 监测伊朗 Bam 地震同震形变场

王志勇,刘 磊,周兴东

(山东科技大学 测绘科学与工程学院,山东 青岛 266510)

摘 要:介绍了差分干涉测量的原理、差分干涉数据对的选取方法,以及三轨法差分干涉测量数据处 理的流程。利用星载合成孔径雷达差分干涉(D-InSAR)测量技术和 ENVISAT ASAR 雷达数据对 2003年12月26日伊朗 Bam 6.5级地震引起的地表形变场进行了测量试验,成功地获取了 Bam 地 震的蝴蝶状的同震形变场生成了地表形变的等值线图,并且根据相干图确定了地震造成破坏最严 重的区域的位置、分布及面积。试验证明 D-InSAR 技术是地表形变测量和地震研究的一个强大和 有效的工具。

关键词:差分干涉测量;合成孔径雷达;地表形变;相干图;伊朗 Bam 地震 中图分类号: P227 文献标识码: A 文章编号: 1000 - 0844 (2008 )04 - 0310 - 07

# Monitoring Co-seismic Deformation Field of Bam Earthquake in Iran Using D-InSAR Technique

WANG Zhi-yong, LIU Lei, ZHOU Xing-dong

(Geomatics College, Shandong University of Science and Technology, Shandong Qingdao 266510, China)

Abstract: The principle of differential interferometric (D-In) technique, the method for selecting proper D-In data pairs, and the flowchart of 3-pass D-In data processing are introduced firstly. Then using the differential interferometric on synthetic aperture radar (D-InSAR) technique and the ENVISAT ASAR data, the monitering to co-seismic deformation field in the Bam  $M_w6.5$  earthquake in Iran, on December 26, 2003, is taken as application. As the result, the butterfly shap co-seismic deformation field of the Bam earthquake is gotten successfully, the isoline map of the defermation is generated, and the position, distribution and area of seriously destruction region are determined according to the coherence map. The test proves that D-InSAR technique is a powerful tool to measure surface deformation and to study earthquake.

Key words: Differential interferometric; Synthetic aperture radar; Surface deformation; Coherence map; Bam earthquake in Iran

### 0 引言

2003 年 12 月 26 日世界时 01 时 56 分 52 秒,伊 朗东南部发生里氏 6.5 级强地震,震中位于南部克 尔曼省有千年历史的古城巴姆(Bam)附近,震中经 纬度为 29.01°N,58.26°E。强震摧毁了伊朗历史古 城巴姆许多民房和名胜,巴姆老城区全部被毁,造成 了巨大的人员伤亡和财产损失。

星载合成孔径雷达干涉测量(InSAR)技术是20 世纪90年代发展起来的一项空间对地观测新技术,

基金项目:国家自然科学基金项目(40571104)

收稿日期:2008-06-18

作者简介:王志勇(1978 -),男(汉族),山东胶南人,博士,主要从事微波遥感、SAR 图像处理、InSAR 及 D-InSAR 数据处理、摄影测量 等方面的研究.

主要应用于地形测绘及地表形变的监测<sup>[13]</sup>,特别是 差分干涉测量(D-InSAR)技术应用于地表形变的监 测,其精度可以达到厘米级甚至是毫米级。目前 D-InSAR 的应用主要集中在地震同震形变场的监测、 火山形变的监测、冰川运动的监测、地面沉降的监测 等领域<sup>[23]</sup>。

在国外, D-InSAR 技术在地震形变监测方面已 经有许多成功的应用案例。1989 年 Gabriel 等<sup>[4]</sup>首 次论证了 D-InSAR 技术可用于探测厘米级的地表 形变,利用 Seasat L 波段 SAR 数据测量了美国加利 福尼亚州东南部的 Imperial Valley 灌溉区的地表形 变;1993 年 Massonnet 等<sup>[5]</sup>人首先利用 ERS -1 SAR 数据获取了 1992 年美国 Landers 地震(M=7.2)的 同震形变场,并将测量结果与野外断层滑动测量结 果、GPS 位移观测结果以及弹性位错模型进行比较, 结果相当吻合,研究成果发表在《Nature》上,引起了 国际地震界震惊。此后, D-InSAR 在地球表面的形 变场探测方面的研究在世界各国普遍地开展起来。 1994 年,Zebker 等<sup>[6]</sup>应用 D - InSAR 方法获得了类 似的结果。随后一些学者又利用 InSAR 技术对日 本 Hyogoken—Nanbu 地震、美国加利福尼亚的 Northridge 地震、意大利 Colfiorito 地震、智利 Antofagasta 地震、日本的 Kyushu 地震等进行了监测<sup>[2-3,7]</sup>。 我国学者在地壳形变与地震上也取得一些成果: 2000年王超等<sup>[8]</sup>利用星载 ERS - 1/2 SAR 雷达数 据基于 D-InSAR 技术首次提取了 1998 年我国张 北一尚义 6.2 级地震的同震形变场;2002 年单新建 等<sup>[9]</sup>利用星载 D-InSAR 技术进一步分析了张北一 尚义地震震源破裂的特征:张景发等[10]应用 1996 年5月到1998年4月间的5景ERS-1/2 SAR数 据,组成两个差分像对提取了1997年11月9日西 藏玛尼里氏 7.4 级地震的同震形变场。

本文的研究就是利用星载 ENVISAT ASAR 雷 达数据,采用三轨法雷达差分干涉测量对发生在伊 朗的 Bam 地震引起的同震形变场进行监测,详细阐 述三轨法差分干涉测量的原理及数据处理过程,并 对差分干涉结果进行解译与分析。

### 1 D-InSAR 差分干涉测量的原理

雷达干涉测量生成的干涉条纹图的相位贡献主 要有五项,可用公式表示为

$$\varphi = \varphi_{\text{topography}} + \varphi_{\text{displacement}} + \varphi_{\text{atmosphere}} + \varphi_{\text{flat}} + \varphi_{\text{noise}}$$
(1)
其中,  $\varphi_{\text{topography}}$  为地形因素贡献的相位;  $\varphi_{\text{topography}}$  是由

地表形变引起的相位; $\varphi_{atmosphere}$ 是由大气效应产生的 相位; $\varphi_{nai}$ 是由参考平面引起的相位; $\varphi_{noise}$ 是由噪声 引起的相位。要想获得由地表形变引起的精确的相 位 $\varphi_{displacement}$ ,就要消除上面公式右边的其余四项的 影响。参考平面引起的相位 $\varphi_{nai}$ 是通过去平地效应 消除;噪声引起的相位 $\varphi_{noise}$ 是通过干涉条纹图的滤 波加以消除;大气效应产生的相位 $\varphi_{atmosphere}$ 而产生的 误差一般都很小,与地震造成的地表形变相比可以 不用考虑,或者也可以跟噪声引起的相位一起用滤 波的方法去除。

要获取地表的形变信息,必须要去除观测区域 的地形信息 φ<sub>topography</sub>。目前主要有三种方法可以去 除地形因素的影响<sup>[5-7]</sup>。一是利用两幅 SAR 图像, 采用其它的 DEM 数据,基于已有的成像参数模拟干 涉条纹图,从而达到去除地形因素的效果,一般称之 为"双轨法"(two-pass);二是利用三幅 SAR 图像,采 用干涉的方法去除地形的影响,一般称之为"三轨 法"(three-pass);三是利用四幅 SAR 图像,采用干 涉的方法去除地形的影响,一般称之为"四轨法" (four-pass)。

双轨法是由 Massonnet 等<sup>[5]</sup>首先提出的。它是 利用试验区地表变化前后的两幅 SAR 图像生成干 涉条纹图,再利用事先获取的 DEM 数据模拟干涉条 纹图,从干涉条纹图中去除地形信息就得到地表的 形变信息。这种方法的优点是 DEM 和满足干涉的 两幅 SAR 图像比较容易获取,缺点是如果选取的 DEM 精度不高、干涉对的基线过长,DEM 的误差会 传递到最终的形变结果中,影响监测的精度。另外 其数据处理的算法也相对比较复杂。

1994 年 Zebker 等<sup>[6]</sup>提出了三轨法,其几何关系 如图 1 所示。它利用三幅 SAR 图像进行差分干涉 测量,生成两幅干涉条纹图,一幅为形变干涉对(defo-pair),反映地表形变信息和地形信息,一幅为地 形干涉对(topo-pair),反映地形信息。进行平地相 位消除后,分别进行相位解缠,得到  $\varphi_{ft}$ 、 $\varphi_{f2}$ ,最后利 用差分干涉测量的公式计算得到雷达视线方向上的 形变量  $\Delta R_d$ :

$$\Delta R_{\rm d} = \frac{\lambda}{4\pi} \left( \varphi_{\rm fl} - \frac{B_{\perp}}{B_{\perp}} \varphi_{\rm fl} \right)$$
(2)

其中, $B_1$ 、 $B'_1$ 分别为 defo-pair 和 topo-pair 干涉对的 垂直基线; $\varphi_n$ 、 $\varphi_n$ 分别为 defo-pair 和 topo-pair 干涉 对的解缠相位; $\lambda$  为雷达波长。根据上式,为了减少 误差的影响,一般地在选取干涉对时要求  $B_1 < B'_1$ 。





在上图中,在 $A_1$ 、 $A_2$ 获取的影像组成 defo-pair 干涉对,在 $A_1$ 、 $A_3$ 获取的影像组成 topo-pair 干涉对。

三轨法比双轨法的优势在于不需要额外的 DEM,但需要同一传感器获取的三幅影像。由于所 生成的两个干涉对共用一幅影像,因此在数据处理 方面也要简单一些,干涉图之间的配准也相对简单 一些。该方法的缺点是相位解缠的好坏将直接影响 最终的结果,但在相干性较高的区域可以得到较好 的结果。

三轨法差分干涉测量特别适合于气候干燥、植 被稀少的地区所发生的瞬时形变的监测,如地震、火 山喷发等造成的地表形变。

### 2 干涉数据对的选取及数据处理流程

为了利用星载合成孔径雷达差分干涉测量技术 获取 Bam 地震引起的形变场,欧空局(ESA)提供了 7 幅 ENVISAT ASAR 数据,均为 SLC 产品。Image 模式,Swath 2,极化方式为 VV 极化。其中4 幅为降 轨数据,Track 号为 120,Bam 古城位于图像中部;3 幅为升轨数据,Track 为 385,Bam 古城位于图像的 近距端。为了更全面的监测地震对 Bam 古城的影 响情况,我们选取 Track120 的四景数据进行差分干 涉测量处理。

Track120 共有震前数据两景,震后数据两景,总 共可以组成6个干涉对,如图2所示。根据三轨差 分对空间基线和时间基线的要求,选取轨道号为 9192的数据为主影像,轨道号为10194的数据为从影 像,轨道号为6687的数据为辅助影像,即选取 BA



#### (注:以上垂直基线距由 Descw 软件计算出来, 与实际的垂直基线距还存在偏差)

图 2 Track120 四景数据所组成的干涉对



三轨法的数据处理主要包括 lnSAR 复影像的 高精确配准、干涉图的生成、去平地效应、相位噪声 的滤除、相位解缠、精密基线估计、差分干涉处理等 几个步骤,其数据处理流程见图 3。





# 3 D-InSAR 技术监测 Bam 地震同震 形变场

#### 3.1 数据处理

第一步是对 9192—6687 组成的 topo-pair 干涉 对进行处理。首先需要对两景复影像进行高精确配 准。配准过程首先采用基于 DEOS 精密轨道数据的 第4期

概略配准,可以计算得到初始偏移量为(18,212), 再采用基于相关系数的配准方法<sup>[11]</sup>,通过最小二乘 法进行多项式拟合可以得到几何偏移的拟合参数 (表1)。

表1 topo-pair 拟合参数

 方向	<b>常数</b> 项	x 系数	<i>y</i> 系数	xy 系数
距离向	14.89649	1.282 5E - 03	-2.549 OE -06	4.503 1E - 09
方位向	212.585 96	7.8197E-05	-8.528 1E -06	1.599 OE - 09

配准完成后就可以生成干涉图,多视处理为 2:10(即距离向采样因子为2,方位向采样因子为 10),生成的干涉图大小为2583列×2046行。

再采用基于轨道参数的方法去除平地效应。为 了消除相位噪声的影响,还需要对干涉条纹图进行 滤波处理,滤波方法采用 Coldstein 滤波法<sup>[12]</sup>,生成 的干涉条纹图如图 4(a)所示。同时进行精密基线 估计,采用的方法是基于 DEOS 精密轨道数据的基 线估计方法,精密基线估计结果见表 2,相位解缠方 法采用 Minimum Cost Flow<sup>[13]</sup>的方法,解缠结果如图 4(c)。

表 2 基线估计结果

行	列 -	topo-pair 干涉对(9192—6687)					
		B //	<i>B</i> _	В	B //	B _	В
500	600	- 126. 103 8	- 480. 552 6	496.927 3	-13.914 1	-0.8727	13.941 5
500	1200	- 139. 587 3	- 476. 820 0	496.927 3	-13.933 2	-0.4806	13.94 15
500	1800	- 151. 716 8	-473.1073	496.927 3	- 13. 940 9	-0.1247	13.941 5
1000	600	- 126. 259 2	- 480. 001 4	496.433 7	-14.008 9	-0.331 4	14.012 9
1000	1200	- 139. 723 6	-476.265 6	496.4337	- 14. 012 7	0.063 0	14.012 9
1000	1800	- 151. 836 2	-472.550 5	496.433 7	- 14.006 6	0.4206	14.012 9
1500	600	- 126. 414 2	- 479. 450 2	495.940 2	- 14. 103 7	0.209 8	14.105 3
1500	1200	- 139. 859 5	-475.711 3	495.940 2	- 14.092 2	0.6066	14.105 3
1500	1800	- 151. 955 1	-471.993 8	495.940 2	-14.072 1	0.966 0	14.105 3

第二步采用上述相同的处理步骤对 9192— 10194 组成的 defo-pair 干涉对进行处理,得到的精 确配准的拟合参数见表 3。

表 3 defo-pair 拟合参数

方向	常数项	x 系数	y 系数	xy 系数
距离向	1.855 54	2.885 9E - 06	1.775 7E - 06	-1.333 7E - 10
方位向	-6 184.039 43	1.292 8E - 04	2.867 1E - 06	-9.019 2E - 10

生成的干涉条纹图如图 4(b) 所示,相位解缠结 果如图 4(d) 所示。生成的干涉图大小为 2 583 列 × 2 064 行。

第三步就是进行差分干涉处理,由于两个干涉 对共用同一幅主影像,所以干涉对之间不需要再进 行配准,通过对干涉基线进行比例标定,然后从 defo-pair 的相位中中减去 topo-pair 的地形相位,再公 式(2)进行一定的转换,最终就可以得到雷达视线 方向上的形变图,如图4(e)所示。

由于地形干涉对(9192—6687)的垂直基线较长(-470~-480 m之间),在去除了平地效应后, 在干涉条纹图中显示出了与当地地形起伏相似的干涉条纹。

而由于形变干涉对(9192—10194)的垂直基线 很小(-2~+2 m之间),在去除了平地效应后,干 涉相位主要由地形高程和地表形变引起。地形高程 引起的相位由于与垂直基线成正比<sup>[7]</sup>,在干涉图中 也就变得很小,地表形变引起的相位从而在干涉图 中占主导地位,故在图4(b)显示出了与地表形变图 相似的干涉条纹。

#### 3.2 差分干涉结果解译与分析

图 4(e)就是我们求得的最终的在雷达视线方向上(LOS)的地震同震形变场,还需要对其进行细致地解译和分析。在形变图中一个颜色周期表示 2π 的相位变化,代表实际的地表形变为2.8 cm,即 一个色周代表2.8 cm 的形变量。从图中可以清晰 的看到,由于地震的影响在地表形成了一个蝴蝶形 状的地表沉降场,其中形变主要发生在东边的南北 两个花瓣上。由颜色周期变化的不同,我们发现一 个花瓣是上升,而另外一个花瓣却是下沉的。南边 的花瓣是上升的,在视线方向上形变量的最大值为 +29.9 cm,北边的花瓣是下沉的,在视线方向上的 形变量的最大值为 – 17.8 cm。研究结果与公布的 其他人员的研究结果<sup>[14-15]</sup>基本一致。

为了更直观地显示 Bam 古城的地表形变量,我 们选取了地表形变最大值所在位置的部分区域进行 进一步的分析,所选的区域大小为1000 行 ×1000 列,完全覆盖蝴蝶形状的地表形变场。我们将 D-ln-SAR 技术监测到的雷达视线方向上的形变量相同 的点相连,生成了等值线图(图4(f)),等值线主要 是+1、+5、+10、+15、+20、+25、-2、-5、-10、



(c) 地形干涉对的相位解缠结果

(d) 形变干涉对的相位解缠结果



(e) 形变图

(f) Ban地震地表形变等值线图(局部)

图4 差分干涉结果 Fig.4 The results of D-InSAR. 第4期

### 3.3 相干图的应用

对于 Bam 地震造成的破坏情况,由于 SAR 幅度 影像中斑点噪声的大量存在,房屋的大面积倒塌无 法直接反映在雷达影像上,也就无法直接通过雷达 幅度影像对其进行分析。然而我们可以考察 InSAR 相干图。相干图表示的是两幅影像的相关性。由于 Bam 地区气候干旱, 植被稀少, Bam 古城主要是由

土所筑成的砖墙建造而成的,在 InSAR 相干图上主 要反映的是地物相干性,正常情况下在时间基线较 短的两景 InSAR 影像中会保持很高的相干性。而 Bam 地震造成了古城区的大面积房屋的倒塌,使得 的相干性大大降低,甚至在某些地区的相干性会很 低。我们通过对相干图的对比就可以检测出地震造 成房屋大面积破坏的区域的大致位置和分布情况。





(c) 同震相干图 (9192-10194)



(d) 同霞相干图(局部放大)

# 图5 相干图

Fig. 5 The coherence map.

图 5(a)、(b)、(c) 是震前、震后、同震的三幅相 干图。为了便于显示和分析,我们将相干图与幅度 图进行叠加显示。由于在震前相干图和震后相干图 中其垂直基线都很大,在400 m以上,在震前、震后 两幅相干图中的山区,基线去相关现象特别严重,致 使在山区的很多的地方的相干性很差,表现为黑色 (如图5(a)和(b)的左下角区域所示);而在同震相 干图中,其垂直基线很小(-2~+2m之间),基线 去相关现象并不是很突出,也仅仅只是在某些山区 相干性不好,如图5(c)的左下角部分区域。

通过对比以上三幅相干图,在去除了基线去相 关的影响后,可以看到在同震相干图中 Bam 古城附 近明显有一块连续区域的相干性很差,如图5(c)中 的白色矩形框所示。这就是地震造成破坏最严重区 域的位置以及大致的范围。图5(d)是图5(c)白色 方框内的局部放大图。通过对图 5(d) 中相干系数 小于0.5 的像元进行统计,结果是在相干图中有 24 346个像元小于 0.5; 再根据像元大小, 可以得到 Bam 地震造成地面破坏最严重的区域的面积大约是 39 km<sup>2</sup>。

## 4 结束语

本文利用 ENVISAT ASAR 雷达数据通过三轨 法差分干涉测量技术对 Bam 地震引起的地表形变 进行了监测,成功地获取了 Bam 地震的同震形变 场,得到了一个蝴蝶形状的地面沉降形变场,其中在 雷达视线方向上的最大形变量达到了 + 29.9 cm 和 - 17.8 cm,并生成了地表形变的等值线图。

相干图法检测地震造成的破坏最严重的区域的 方法适合于气候干燥、植被稀少的城市区域,由于强 地震造成房屋的大面积倒塌,使得的雷达回波的散 射特性发生很大的改变,相干性也就大大降低,去除 基线去相关的影响,就可以得到地震造成破坏最严 重区域的分布、形状和面积。

目前,监测地震灾害主要依赖于 GPS 技术、甚 长基线干涉(VLBI)技术、水准测量、应力测量和张 力测量等传统的方法,但这些方法局限于选择性监 测一些离散站点,虽然也能生成地表图像和地形数 据,但无法提供高空间分辨率的地震形变图。与传 统的地震监测方法相比,D-InSAR 技术能够提供地 震易发地区的高分辨率影像、高分辨率的地形数据 和高分辨率的地震同震形变图。地表形变是地震过 程的直接表现形式,因此研究人员可以通过地震形 变图对地震的各个过程进行深入的研究。D-InSAR 技术不但可以事后监测地震或火山等造成的危害, 还可以通过 D-InSAR 技术对地震或火山活动地区 的地表形变进行不间断地监测,从而可以预报地震 发生或火山喷发的大致时间,提前做出预报。

与其它测量地震引起地表形变技术相比,D-In-SAR 技术可以实现地表沉降的大面积、低成本、高精度监测,可以快速、准确、实时动态地监测地震等引起的地表形变。更为重要的是它无需人力到地震现场进行野外观测。总之,D-InSAR 技术是地表形 变测量和地震研究的一个十分强大和有效的工具。随着雷达卫星的不断发射和技术的成熟,我们相信 D-InSAR 技术将会在地震监测和预报方面发挥越来 越重要的作用。

致谢:感谢欧空局为本文的研究提供 ENVISAT ASAR 影像数据。感谢 DEOS 提供的精密轨道数据。

- [参考文献]
- [1] 王志勇,张继贤,张永红.从 InSAR 干涉测量提取 DEM[J].测 绘通报,2007,(7):27-29.
- [2] Richard Bamler, Philipp Hartl. Synthetic aperture radar interferometry[J]. Inverse Probles, 1998, 14:1-54.
- [3] Paul A Rosen, Hensley S Joughin. Synthetic Aperture Radar Interferometry[J]. Proceedings of the IEEE, 2000, 88(3): 333-382.
- [4] A K Gabriel, R M Goldstein, H A Zerker. Mapping Small Elevation Changes Over Large Areas: Differential Radar Interferometry
   [J]. J. Geophys. Res., 1989, 94(B7): 9183-9191.
- [5] D Massonnet, et al.. The displacement field of the Landers earthquake mapped by radar interferometry [J]. Nature, 1993, 364: 138-142.
- [6] H A Zerker, P A Rosen, R M Goldstein, et al. On the derivation of coseismic displacement fields using Differential Radar Interferometry, the Landers earthquake[J]. J. Geophys. Res., 1994, 99 (B10): 19617-19634.
- [7] R F Hanssen. Radar Interferometry Data Interpretation and Error Analysis[M]. London: Kluwer Academic Publisher, 2001.
- [8] 王超,张红,刘智.星载合成孔径雷达干涉测量[M].北京:科学出版社,2002.
- [9] 单新建,马瑾,宋晓宇,等.利用星载 D-InSAR 技术获取的地 表形变场研究张北一尚义地震震源破裂特征[J].中国地震, 2002,18(2):119-126.
- [10] 张景发,刘钊. InSAR 技术在西藏玛尼强震区的应用[J]. 清 华大学学报(自然科学版),2002,42(6):847-850.
- WANG Zhi-yong, ZHANG Ji-xian, HUANG Guo-man, et al. The High-precision Registration in the IFSAR Data Processing [R].
   DMA12005 - Workshop.
- [12] Goldstein Werner. Radar Interferogram filtering for Geophysical Applications[J]. Geophys. Res. Letter, 1998, 25 (21): 4035-4038.
- [13] Michael Eineder. Unwrapping Large Interferograms Using the Minimum Cost Flow Algorithm[J]. IEEE 1998;83-87.
- Morteza Talebian, E Fielding, C J Funning, et al. The 2003 Bam(Iran) earthquake: Rupture of a blind strike-slip fault[J]. Geophysical Research Letters, 2004,31;L11611, doi:10.1029/ 2004GL020058,2004.
- [15] 罗小军,黄丁发,刘国祥. lnSAR 相位分解及其在生成 DEM 和 研究地震形变场中的应用[J]. 西北地震学报, 2006,28(3): 204-209.
- [16] 郭华东.雷达对地观测理论与应用[M].北京:科学出版社, 2000.
- [17] LU Zhong, ZHANG Ji-xian, ZHANG Yon-ghong. 干涉合成孔径 雷达及其在火山研究中的应用[J]. 测绘科学, 2006, 31(1): 51-57.
- [18] ZHONG Lu. InSAR Imaging of Volcanic Deformation over Cloud - prone Areas - Aleutian Islands [J]. Photogrammetric Engineering & Remote Sensing, 2007, 173 (3); 245-257.