

文章编号: 1007 4619(2006)04 0489 08

升降轨道 ASAR 雷达干涉揭示的 巴姆地震 (Mw6.5) 3D 同震形变场

孙建宝¹, 梁 芳², 徐锡伟³, 官 鹏^{1,4}

(1 北京师范大学 资源学院, 北京 100875 2 北京市地震局, 北京 100080)

3 中国地震局地质研究所, 北京 100029 4 遥感信息科学国家重点实验室, 北京 100101)

摘 要: 通过对覆盖同一地区的升降轨道 ASAR 雷达数据进行两路差分干涉 (D-INSAR) 处理, 得到了 2003 年 12 月 26 日伊朗巴姆 (Bam) 地震 (Mw6.5) 在两种成像几何状态下的视线向 (IOS) 同震形变场。利用 Okada 弹性形变模型对形变场进行正演计算, 得到地震断层的几何参数及形变的南北向分量。对得到的干涉条纹图进行相位解绕处理, 综合分析两种不同的雷达成像几何关系, 并利用模型估计得到的南北向分量, 计算了该地震造成的 3D 同震形变场, 结果显示了典型的单断层右旋走滑活动特征。研究表明, 合并升降轨道雷达数据, 能够为形变模型提供有效约束, 用一条简化的断层模型就可以解释升降两条轨能的干涉形变场, 更为复杂的双断层模型是不必要的。

关键词: 雷达干涉; 同震形变; 隐伏断层; 视线向模糊

中图分类号: TP722.6/P565 文献标识码: A

3D Co-seismic Deformation Field of the Bam Earthquake (Mw6.5) from Ascending and Descending Pass ASAR Radar Interferometry

SUN Jianbao¹, LIANG Fang², XU Xiwei³, GONG Peng^{1,4}

(1. School of Resource Science Beijing Normal University Beijing 100875 China

2. Beijing Earthquake Administration Beijing 100080 China

3. Institute of Geology, China Earthquake Administration Beijing 100029 China

4. State Key Lab. of Remote Sensing Information Science Beijing 100101 China)

Abstract We processed the ascending and descending pass ASAR radar data that covers the same area using 2-pass D-INSAR technology and got the co-seismic deformation field in IOS direction of the Bam (Iran) earthquake (Mw6.5), which happened on Dec 26 2003 with two kinds of imaging geometry. After forward modeling of the co-seismic INSAR results using Okada's elastic model in half space we got the geometric parameters of the seismic fault and the north-south component of the deformation field. We unwrapped the interferometric phase and computed its 3D co-seismic deformation field by combining the two kinds of imaging geometry and the north-south component from Okada's model. The 3D deformation field shows typical characteristics of single right lateral strike-slip fault. The research also shows that integration of ascending and descending pass radar data could provide effective constraints for deformation models. The Bam Co-seismic deformation field could be interpreted by the simplified 1-fault model, therefore the complex 2-fault model is unnecessary.

Key words SAR interferometry; co-seismic deformation; blind fault; IOS ambiguity

收稿日期: 2005-04-08 修订日期: 2005-09-15

基金项目: 国家 863 计划项目 (编号: 2005AA132031XZ06), 国家科技基础条件平台重点项目 (编号: 2003DIA6N005)。

作者简介: 孙建宝 (1975—), 男, 2002 年硕士毕业于中国地震局地质研究所, 2005 年博士毕业于北京师范大学, 主要从事干涉雷达技术的地壳形变应用研究。

1 引 言

2003年12月26日伊朗东南部的古城巴姆,遭受了矩震级为6.5级(29.010°N, 58.266°E)的强烈地震袭击。从古城2000多年的历史来看,在本次事件之前,巴姆地区没有发生过破坏性地震^[1],不是地震活动的重点监视区域。由于本次地震的发震断层通过巴姆城下,震源深度14km(USGS快速矩张量解),当地建筑主要以砖瓦结构为主,抗震性能很差,地震又恰好发生在凌晨时间,几方面的因素造成了本世纪伤亡损失最为惨烈的地震事件之一。据挪威国际地球灾害中心(ICG)报告^[1],这个15万人口的小城有4.3万人直接死于地震,5万人受伤。震前发现的只有一条巴姆断层,以右旋走滑为主,兼具由西向东的逆冲分量。该断层是隐伏的,其活动性未知(ICG报告),地表看到的只是由于挤压作用而相对抬升的南北向陡坎,其东部比西部低20—25m,从90m分辨率的DEM上可以清晰分辨出它的位置(图1)。欧空局的ENVISAT卫星搭载的雷达传感器ASAR为此次事件提供了高质量的形变观测数据,这也是ASAR传感器运行以来首次捕获的地震信息。该地区植被稀少,气候干旱,非常适合干涉雷

达的相干观测,本次事件中ENVISAT记录了升降两条不同轨道的同震干涉雷达数据(图1)。

利用干涉雷达方法(NSAR)研究地震在国内的一些地区已经有了成功的应用,显示了这种方法对于中国的地震研究具有重大意义。Peltzer等^[2]利用三条降轨ERS雷达数据和简化的断层模型分析了1997年中国藏北玛尼地震的同震形变场;王超等^[3]利用一条降轨ERS数据研究了1998年的张北—尚义地震,并与刁桂苓等^[4]进行了一些讨论。这些工作对于干涉雷达方法在国内的应用研究起了很好的推动作用。巴姆地震属于城市型地震,危害严重,深入研究此类城市发生的毁灭性地震,给出准确的发震断层参数,对中国的防震减灾事业有重要的借鉴意义。

干涉雷达的一个弱点是直接观测到的数据并不是地面的真实形变,而是东、北、上三方向形变分量在雷达脉冲入射方向(LOS)的投影,而且干涉雷达对于南北向形变分量不敏感,仅使用一个观测方向的数据得不出真实的地表3D形变场,这就是干涉雷达的视线向(LOS)模糊问题。一方面,LOS向模糊使得大地测量结果与地质学观测存在很大差异,必须借助弹性形变模型对形变场拟合才能获得断层模型参数;另一方面,由于断层模型参数与形变场之间存在非线性关系,导致此类问题具有多解性。另外,尽管NSAR形

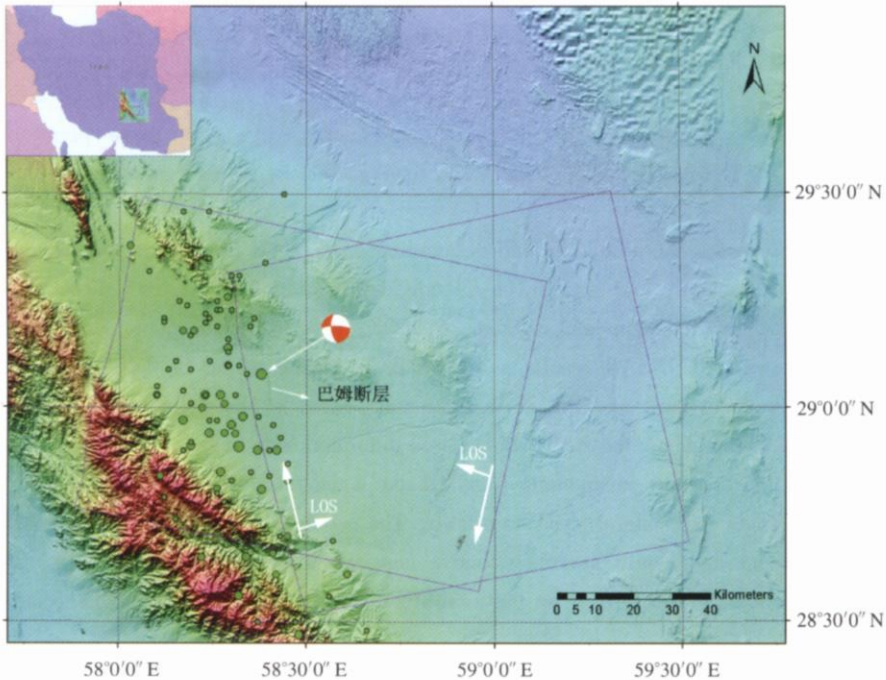


图1 研究区90m SRTM DEM及主震余震分布

(绿色实心圆代表主震和余震位置,圆大小表示震级大小,余震数据时间为2003年12月26日—2004年1月28日,为原始数据,蓝色方框为升降轨道ASAR数据覆盖范围)

Fig.1 90m SRTM DEM and mainshock and aftershock distribution of the research area

变场是连续的, 但是一次观测得到的数据存在很大的信息冗余, 如果能够对同一事件提供多次独立观测, 或者使用完全不同的观测方式, 必然会更好地约束发震断层模型。但一般情况下只能获得降轨雷达数据, 如果没有多次不同视角的雷达观测, 或者其他方面的资料相配合, 如 GPS 观测、地震学观测、地质观测等, 这种问题的多解性有时难以控制。

本文通过合并使用升降轨道两个不同视角的干涉雷达数据, 结合 Okada 弹性形变模型^[5], 根据两种轨道不同的成像几何关系, 有效约束发震断层模型, 得出发震断层参数, 解析 LOS 向模糊问题, 在一定程度上避免了单个观测方向的多解性。研究表明, Talebian^[6] 等人的双断层模型是不必要的, 利用一条简化的断层模型就能够解释两条轨道的干涉观测结果。得到的三个形变分量符合右旋剪切弹性形变场的理论模型。

2 地震构造背景

伊朗位于阿拉伯板块与欧亚板块相互汇聚并产生强烈缩短变形的区域 (图 2)。根据大尺度 GPS 观测资料^[7], 阿拉伯板块以 $22 \pm 5 \text{ mm/yr}$ 的速率 ($N 8^\circ \pm 5^\circ E$) 相对欧亚板块向北运动。在伊朗东南部地区, 三种不同的构造运动过程相互作用, 包括大陆碰撞 (Zagros 山脉), 海洋岩石圈削减 (Makran 削减带) 以及两者之间的突然转换。伊朗东部, 大多数的缩短变形被阿曼海湾 (Gulf of Oman) 吸收, 西部的缩短变形主要沿 Zagros 山脉由南向北分布, 而围

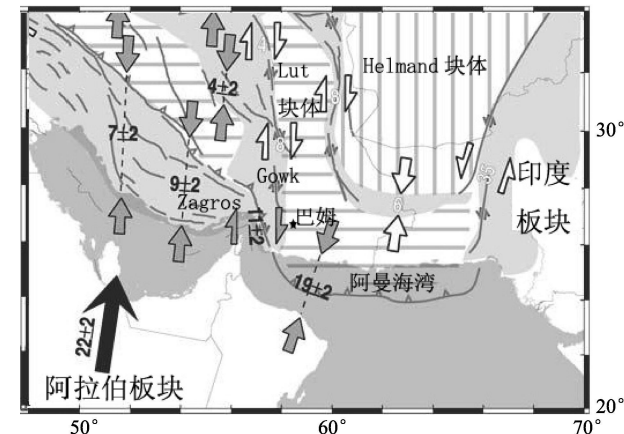


图 2 伊朗东南部 GPS 观测结果 (据 Verant 等^[7]修改) (黑色箭头代表阿拉伯板块相对欧亚板块的运动矢量, 灰色箭头对直接由 GPS 观测得到, 白色箭头对由 GPS、地质地震资料估计得到; 单边箭头表示走滑运动, 双边箭头表示缩短变形, 单位均为 mm/yr)

Fig 2 GPS measurements of Southeast Iran

(following Verant et al^[7])

绕刚性 Lut 块体 (Lut Block) 的大断层吸收了大多数的削减—碰撞转换作用^[8]。巴姆地震发生在 Lut 块体的西南边界上。根据 Walker 等人的研究^[9], Lut 块体是一个平坦的无震刚性块体, 其东西两侧处于伊朗中部和阿富汗之间的两个大型右旋走滑断层系统。根据区域 GPS 观测^[10], 块体东边界的右旋滑动率约为 9 mm/yr , 西南边界约为 7 mm/yr , 西北边界约为 3 mm/yr 。巴姆地震发生在 Lut 块体西南边界, Gowk 断层东南方向的巴姆断层附近。Gowk 断层在过去的 20 年间已经发生过 3 次 $M_s > 6$ 级的地震, 但巴姆地区至少已经有 2000 年没有发生过大地震。

3 升降轨道干涉雷达数据处理

3.1 升降轨道干涉雷达几何及形变分量敏感性计算方法

巴姆地震发生后, 欧空局 (ESA) 为本次事件提供了同震升降轨道 ASAR 数据。这是自 ERS1 卫星停运, ERS2 卫星出现多普勒频率偏移问题后, 目前能有效捕获同震变形的干涉数据源 (ERS2 部分可用)。本文综合利用升降轨道数据, 研究巴姆地震同震形变场。

任何一种地表形变都可以视为由东、北、上 (E, N, U) 三个方向分量组成。但是, 三个方向的形变分量对于 LOS 向形变的贡献各不相同。ASAR 雷达脉冲向垂直卫星飞行方向的右下方入射, 因而相对水平运动, 传感器对垂向运动要敏感得多。雷达卫星的飞行方向为近南北向, 因此干涉雷达对于南北向水平运动不敏感, 这对南北走向走滑断层的南北向分量形变观测十分不利, 比如本文研究的巴姆地震, 美国加州的 Hector Mine 地震^[11] 等。假设形变方向 (断层运动方向) 与雷达飞行方向完全一致的话, 干涉方法将得不到任何形变信息。对于近东西向的走滑断层, 升降轨道干涉都比较有利。如果要得到完整的三维地表形变信息, 至少需要输入三个不同视角的实际观测值, 仅有升降轨道观测结果是不够的。

根据雷达成像的几何关系, 并约定目标远离雷达时 LOS 向形变 d_{LOS} 为正, 靠近雷达时 d_{LOS} 为负, 可以将 d_{LOS} 用 E, N, U 三个分量 d_E, d_N, d_U 来表示:

$$d_{\text{LOS}} = d_U \cos \theta - \sin \theta [d_N \cos(\alpha_h - 3\pi/2) + d_E \sin(\alpha_h - 3\pi/2)] \quad (1)$$

α_h 为卫星飞行方向 (Heading 方向) 与北向夹角, $\alpha_h - 3\pi/2$ 为方位视线方向 (Azimuth Look Direction, 简记为 ALD), 即距离向与北向的夹角。升轨情况下, 由于目标区在靠近雷达一侧, 入射角 θ

取 21.3° , α_h 从 ASAR 数据头中读取, 为 346.47725° ; 降轨情况下, 目标区在靠近图像中部位置, 入射角 θ

取 23.7° , α_h 为 193.52080° , 计算得到升降轨道各形变分量对 LOS 向形变的敏感性 (图 3)。

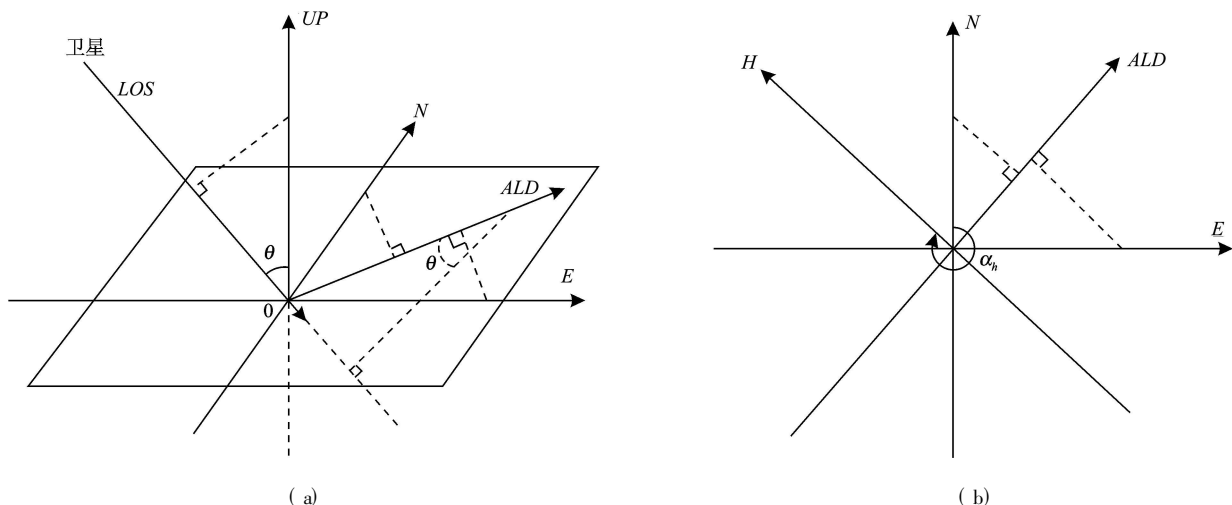


图 3 干涉雷达 LOS 向形变模糊

(a) 干涉雷达三维成像几何; (b) 干涉雷达几何水平投影

Fig 3 LOS ambiguity of SAR Interferometry

(a) 3D imaging geometry of SAR Interferometry; (b) Horizontal projection geometry of SAR Interferometry

升轨情况下有:

$$d_{LOS} = [d_U, d_N, d_E] [0.93169 \quad -0.08494 \quad -0.35318]^T \quad (2)$$

降轨情况下有:

$$d_{LOS} = [d_U, d_N, d_E] [0.91566 \quad -0.09397 \quad 0.39080]^T \quad (3)$$

分析 (2)、(3) 两式, 形变的垂直分量对 LOS 向干涉相位的贡献最大, 北向分量的贡献最小。反之, 如果知道了其他分量求南北向分量, 那么误差将被成倍放大, 因此很难利用干涉数据来解算南北向分量。(2)、(3) 两式中形变东西向分量的敏感性大小相当, 符号相反, 说明它们对 LOS 向形变有不同的贡献。

3.2 巴姆地震干涉雷达数据处理

本次事件震前震后升降轨道 ASAR (IS2 模式) 数据见表 1。ASAR 数据方位 (Azimuth) 分辨率为 4m, 地距 (Ground Range) 分辨率为 20m。其 IS2 波束模式, 除雷达波载频与 ERS 系列卫星相差 31MHz 外, 其他参数与 ERS1/2 基本相同。

本研究中, 选择的降轨数据为 2003 年 12 月 3 日—2004 年 2 月 11 日的干涉数据对, 垂直基线约为 0.6m, 该值远小于 1000 多米的临界基线值, 对高程变化不敏感, 非常适合计算形变。即使在没有消除地形相位贡献的情况下, 依然能够从干涉结果中分辨出形

表 1 巴姆地震干涉雷达 ASAR 数据 (IS2 模式, VV 极化)

Table 1 ASAR radar data of the Bam earthquake (IS2 mode VV polarization)

降轨垂直基线 (Track 120)	2004 年 1 月 7 日	2004 年 2 月 11 日
	2003 年 12 月 3 日	约 570m
		0.6m
升轨垂直基线 (Track 385)	2004 年 1 月 25 日	2004 年 2 月 29 日
	2003 年 11 月 16 日	30m
		2m

变相位, 但形变场中混入了 2003 年 12 月 26 日—2004 年 2 月 11 日的震后变形, 据 Jackson 等^[6] 的估计, 震后变形约为 2cm。升轨数据为 2003 年 11 月 16 日—2004 年 2 月 29 日的同震干涉数据对, 基线 2m。

研究中使用两路 (2 pass) 差分干涉方法, 用 90m (3 网格) 分辨率的 SRTM DEM 数据消除地形相位。SRTM DEM 数据也利用干涉方法得到, 不同的是它利用了航天飞机上搭载的单轨双天线干涉系统, 避免了重轨干涉的大气干扰 (也使得 2 pass 差分方法优于 3 pass 差分方法)、时间空间去相干等因素, 因而具有较高的精度, 特别是在地形平坦的地区可以达到数米的精度。但是, SRTM 处理得到的 DEM 数据可能由于山体阴影和其他因素 (如镜面反射) 造成一些地区没有信号。这种 DEM 数据上的缺失必然给差分干涉造成相位不连续和解绕误差等问题。首先将该地区划分成 $1^\circ \times 1^\circ$ 的 SRTM DEM 数据镶嵌成覆盖整个研

究区的 $3^{\circ} \times 3^{\circ}$ 的 DEM, 然后将较小的“洞”(设定插值半径)进行最临近内插; 对于超过插值半径的地区利用 SRM 30(30 网格)来代替有“洞”区域, 得到研究区完整无“洞”的 DEM(图 1)。为了将 DEM 模拟成解绕的干涉图, 还必须将 DEM 分辨率提高到接近 ASAR 图像的分辨率, 同样通过插值完成。

常规干涉处理需经过主副图像的配准, 距离向和方位向公共波段滤波, 复干涉图、相干图计算, 基线估计, 相位滤波、解绕等步骤, 在此研究中没有进行干涉相位去平地相位操作, 因为用 DEM 模拟解绕地形相位时, 得到的相位为未去平地相位的结果, 进行差分处理后直接得到同震形变。该同震形变场是参照某个固定的参考点(无地震形变)计算得到的。

4 处理结果及分析

4.1 差分干涉形变场总体特征

图 4 给出了两条轨道数据的干涉结果。图中的不规则多边形为体散射和地表强烈变化造成的低相干性区域。左上的两个较小的多边形即为本次地震的发生地, 巴姆古城和其卫星城 Baqavat

图 4(a)和图 4(b)分别为降轨和升轨缠绕的干涉条纹图, 单位为弧度。红蓝两色分别代表地面形变造成的视线向(LOS)距离缩短和拉长, 在处理中约定目标靠近卫星为负(红色), 远离卫星为正(蓝色)。图 4(a)和图 4(b)中的白线为已知的巴姆断层, 其本身为隐伏断层, 以右旋走滑为主^[1]。从图 4(a)可以看出, 巴姆地震的发震断层并不在巴姆断层上, 而是与巴姆断层相距 4.5—5 km 的一条隐伏断层, 野外调查也证实了这一点^[9]。图 4(a)一个明显的特征是形变的四象限分布, 但右边两个象限的形变明显大于左边的两个象限, 南部两象限 LOS 向距离缩短, 北部两象限 LOS 向距离拉长。图 4(a)右下方较大的蓝色区域并不是形变区, 而是由于山体叠掩造成的干涉相位剩余, 该区域与该地区的 DEM 高值区完全重合。 $29^{\circ} 20' N$, $58^{\circ} 25' E$ 附近的矩形区域内有较大的负值(红色), 约 π 弧度, 远离形变区域, 通过与 DEM 和 Landsat TM 图像叠合分析并没

有发现它们有任何相关性, 推测该负值区为大气相位延迟引起的误差。图 4(b)中的矩形区域, 从其空间分布、解绕后的强度(π 弧度左右)以及“波动”(ripple)特征来看, 也为比较明显的大气信号^[10]。对比图 4(a)和图 4(b), 可以看到同样的同震形变场, 在不同的成像几何条件下, 两者形变的范围、强度、符号等都有较大的差别。

图 4(a)中的降轨数据空间覆盖比较大, 根据成像几何关系可以定性判断为右旋走滑断层运动的结果, 因为右旋运动伴随着块体旋转, 即南北向运动(右旋)叠加了东西向运动(具有左旋趋势), 同时挤压区和拉张区存在垂直运动。三种方向的运动叠加到 LOS 方向便有可能产生这样的形变场图像, 但这种组合结果不是惟一的, 笔者希望通过同时拟合两条轨道的干涉结果, 得到更加合理的发震断层参数。

4.2 干涉相关性推测的近地表断层模型及干涉数据正演

图 4(e)和图 4(f)为升降轨道的归一化干涉幅值图。为了降低随机噪声和斑点噪声, 干涉处理中采用了方位 10 视, 距离向 2 视平均, 像元大小约为 $40m \times 40m$ 。这样得到的干涉幅值图归一化后即 20 视平均的主从图像干涉相关性图(correlation)。在图 4(e)和图 4(f)中的蓝色矩形框内, 可以清晰地识别出由于同震位移造成的干涉相关性降低, 推测为发震断层所在的位置, 利用震前的降轨 ASAR 数据干涉处理并没有发现此处存在线性特征。

为了解释升降轨道干涉观测结果, 采用 Okada 弹性半空间形变模型^[5], 并结合上述断层模型进行正演分析。将形变区划分成东西 80 km、南北 70 km、间距为 1 km 的网格。给定发震断层参数, 利用 Okada 解析解位错模型, 计算网格上各点形变的三个分量。利用(2)、(3)两式将计算得到的东、北、上三个形变分量投影到雷达的 LOS 向, 通过不断调整发震断层的各个参量(震中位置、震源机制、断层几何、滑动量等), 使得计算结果与实际的干涉观测结果之间的差异最小。采用单个断层模型, 通过调整之后的断层参数见表 2。

表 2 巴姆地震断层参数

Table 2 Fault parameters of Bam earthquake

	走向 $(^{\circ})$	倾角 $(^{\circ})$	长度 km	宽度 km	走滑分量 m	倾滑分量 m	滑动角 $(^{\circ})$
USGS	174	88					178
文献[6]	357	88	12	8			-166
本文	358	77	12	8	2.0	0.25	-173

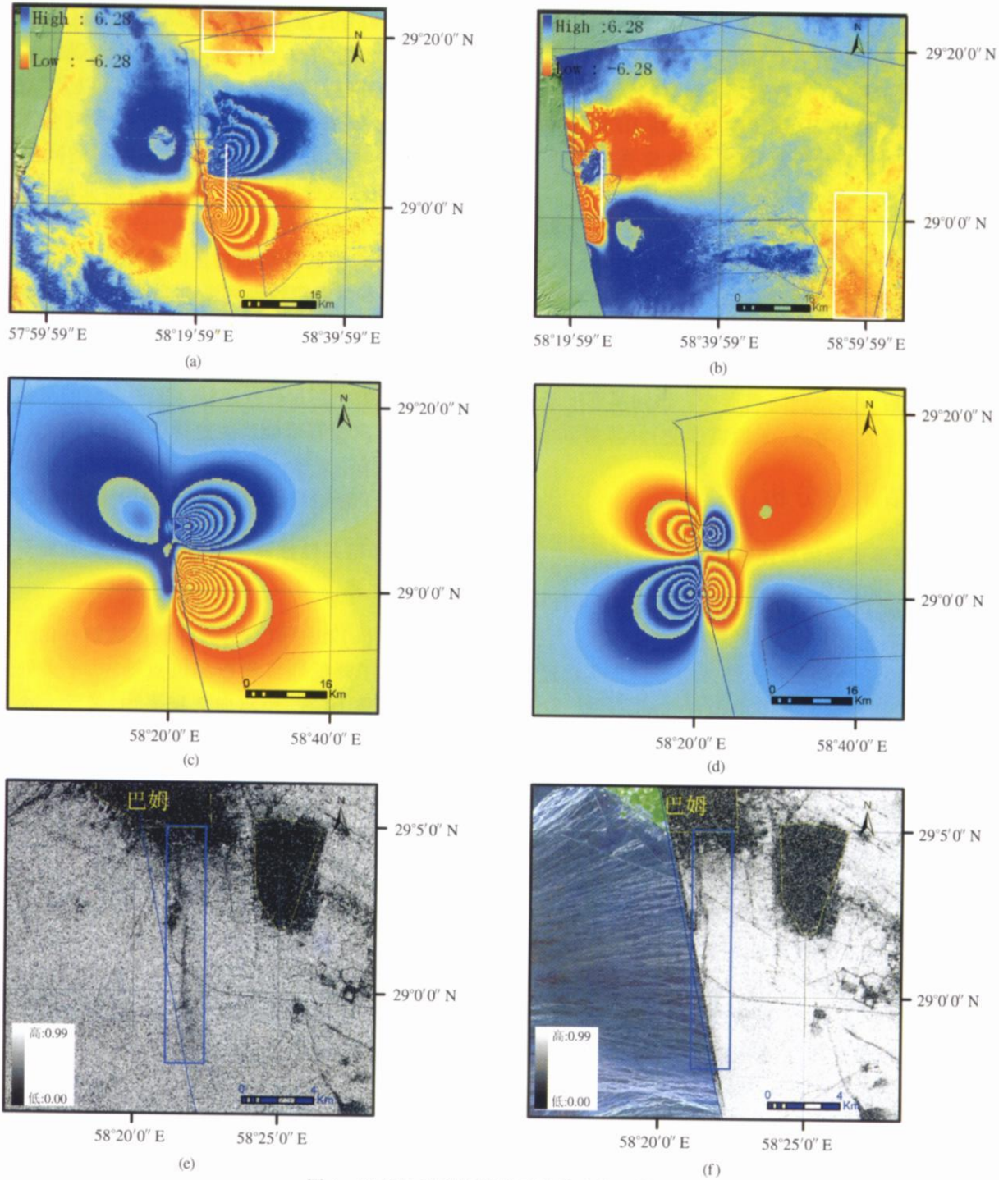


图 4 巴姆地震升降轨道干涉雷达处理结果

(a)降轨干涉结果；(b)升轨干涉结果；(c)降轨形变模拟；(d)升轨形变模拟(a),(b),(c),(d)条纹周期均为 $\pm 2\pi$ ；
(e)降轨相关性；(f)升轨相关性,相关性大小在 0 到 1 之间变化

Fig. 4 Ascending and descending pass INSAR results of the Bam earthquake

(a) Descending pass Interferogram; (b) Ascending pass Interferogram; (c) Descending pass simulation;

(d) Ascending pass simulation, the fringes of (a),(b),(c),(d) are in $\pm 2\pi$ cycles

(e) Descending pass correlation, the range is from 0 to 1; (f) Ascending pass correlation, the range is from 0 to 1

估计的震中位置为 (58.35°E, 29.06°N), 表 2 中给出的滑动量为距离地面 1.2km 以下的平均滑动值。根据观测结果, 虽然 LOS 向最大形变为

30.8cm, 但发震断层附近干涉条纹依然很清晰, 并没有因为地表强烈变形造成去相干。这说明相邻像元 LOS 向形变没有超过 π 弧度 (C 波段雷达情况

下), 地表形变比地下的滑动要小。野外调查发现地表断层附近形变只有几个厘米 (ICG 报告), Talebian 等^[6]观测到局部地区有 20cm 的右旋滑动, 说明地下的强烈滑动没有完全传播到地表。

利用表 2 中参数得到的 LOS 向形变场如图 4 (c) 和图 4 (d), 分别为降轨和升轨模拟结果。通过与图 4 (a) 和图 4 (b) 的比较可以看出 (两者条纹周期含义相同), 用单个断层模型就能够合理解释干涉雷达观测结果。在形变量值、形变符号、形变四象限分布特征等方面二者均能够很好地符合。除局部地区, 特别是北东方向由于断层走向可能发生变化及体散射造成的干涉图解绕误差等因素的影响, 误差在 4—5 cm 外, 其他地区基本上都在 2—3 cm 左右。采用 Kanamori 经验公式^[11], 计算该地震的矩震级:

$$M_w = (\log M_0 - 9.1) \cdot 1.5 \quad (4)$$

$$M_0 = \mu LW \quad (5)$$

式 (5) 中介质的剪切模量 μ 通常取 30—36 GPa 此处给定为 32 GPa 滑动量 U 为 2.016 m, 断层面积 LW

为 96 km², 得到标量地震矩 M_0 为 $6.193 \times 10^{18} \text{ N} \cdot \text{m}$, 代入 (4) 式得矩震级为 M_w 6.5 与 USGS 矩震级一致。

文献 [6] 只利用降轨雷达数据进行模拟, 除给出表中的断层参数外, 还增加了一条远离形变区的逆冲断层。本研究中从升降两条轨道干涉结果都没有看到该断层存在的迹象, 而且仅利用一条断层就解释了观测结果。USGS 给出的断层模型与文献 [6] 和本文的最大差别在于断层的倾向, 但本文的结论与 ICG 报告给出的单斜层 (Monocline) 模型一致。

4.3 干涉雷达 LOS 向模糊解析

获得了发震断层模型及断层参数后, 利用 Okada 解析表达式可以得到形变的 E, N, U 三个分量, 如图 5 (a)、图 5 (b) 和图 5 (c), 断层东西两侧的形变不对称是断层东倾的结果。给出的断层模型以右旋走滑为主, 实际的地壳运动方式并不限于南北向水平走滑, 同时带有较大的垂直分量和东西向水平分量, 可见只使用单个 LOS 向观测结果不能获得真实的地壳形变

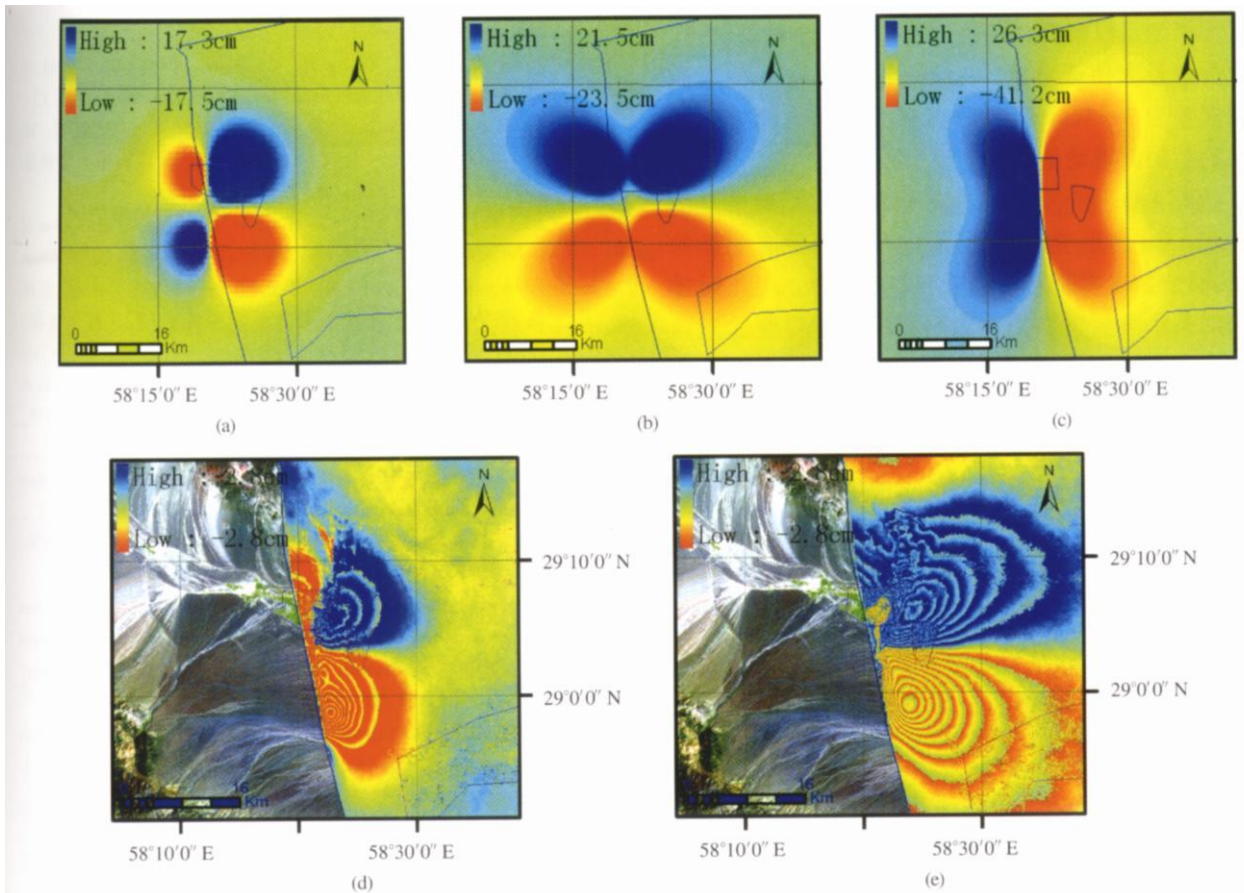


图 5 升降轨道干涉雷达形变场 LOS 向模糊解析

(a), (b), (c) 为上、东、北三分量形变模拟, 单位 cm; (d) 垂直向形变; (e) 东西向水平形变

Fig. 5 LOS ambiguity resolving of the Ascending pass and descending pass INSAR results

(a), (b), (c) are upper, east and north deformation simulations respectively with cm unit;

(d) vertical deformation; (e) east-west horizontal deformation

场。图 5(a)中垂直分量紧靠断层两侧,呈四象限分布,其中北西和南东象限为挤压区,具有相对抬升变形(形变为负);北东和南西象限为拉张区,为相对下降变形(形变为正)。水平运动中南北向分量较大,如图 5(c),最大值紧靠断层(向南为负),显示出右旋走滑特征。图 5(b)中东西向水平分量呈四象限分布,但南部向东运动(形变为负),北部向西运动,而且靠近断层的区域并不是形变的最大值区,说明东西向形变是双力偶作用下块体旋转(Tilt)引起的。这三种形式的运动按照(2)、(3)两式合成后即如图 4(c)和图 4(d)的模拟结果。

利用得到的升降轨道 LOS 向形变观测结果及上述断层参数模拟的南北向形变分量(该方向对 LOS 向形变贡献最小,对干涉雷达观测不敏感)三个条件作为输入,根据(2)、(3)两式就能计算出地表真实形变的垂直分量和东西向水平分量,如图 5(d)和图 5(e)。由于雷达成像范围的限制,LOS 向模糊解析不能覆盖整个形变区域。但是与图 5(a)和图 5(b)相比较,模拟结果与直接观测结果是一致的,表明这种单断层模型足以解释两条轨道独立的干涉观测结果。垂直分量最大值误差为 5—6m,东西向水平分量最大值误差为 2—4m,误差源主要为断层走向变化和均一的断层面滑动量简化假设所致。

从图 4(a)和图 4(b)的观测结果来看,特别是图 4(b)的 LOS 向形变,在老断层的位置似乎有明显的滑动,形变在巴姆断层两侧呈四象限分布。但是通过利用两条轨道数据和弹性形变模型分解得到的东西分量和垂直分量来看,老断层附近的形变都是连续的,没有显示出如图 4(b)那样的分布特征。这进一步说明利用一条断层分析形变场是合理的,至少利用干涉雷达方法得的形变场没有必要使用更复杂的断层模型来解释,图 4(b)的结果只是在升轨成像几何关系下,三分量形变叠加的结果。Talebian 等^[6]同时利用远震体波反演的的方法,认为两条断层在此次地震中都有活动。但是,从干涉结果来看新老断层的距离只有 4—5km,在远震网络上这个距离是无法分辨的,波形反映的可能是发震断层的垂直运动。

5 结 论

本文基于升降轨道干涉雷达观测数据,结合 Okada 弹性形变模型,利用单个断层模型解释了升降两条轨道的 LOS 向形变观测结果,并给出了发震断层的各项参数。通过分析升降轨道不同的成像几

何关系和 Okada 弹性形变模型的南北向分量,初步解析了巴姆地震干涉雷达的 LOS 向模糊问题,得到了 3D 同震形变场,研究表明利用单个轨道数据分析同震形变场具有较大的局限性,不利于断层参数的正确提取。该方法和结果有助于提高对地震及其造成地面破坏情况的认识,也有利于对此类地区未来地震危险性的正确评价。

致 谢 本研究所使用的 ASAR 数据由欧空局提供。研究中得到了瑞士 Gamma 软件公司 Urs Wegmüller 博士的帮助,中国地震局沈正康研究员提供了形变场模拟程序并给予热情指导,在此深表谢意。

参 考 文 献 (References)

- [1] Eshghi S, Zaei M. Bam (SE Iran) Earthquake of 26 December 2003 Mw 6.5: A Preliminary Reconnaissance Report Website http://www.iiees.ac.ir/English/bam_report_english_recc.htm 2003.
- [2] Pelzer G, Frederic Crampe, Geoffrey King. Evidence of Nonlinear Elasticity of the Crust from the Mw 7.6 Manyi (Tibet) Earthquake [J]. *Science* 1999, **286**: 272—276.
- [3] Wang G, Liu Z, Zhang H. Co-seismic Deformation Field of Zhangbei Shangyi Earthquake from SAR Interferometry [J]. *China Science Bulletin* 2000, **45**(23): 2550—2554. [王超, 刘智, 张红等. 张北—尚义地震同震形变场雷达差分干涉测量 [J]. *科学通报*, 2000, **45**(23): 2550—2554.]
- [4] Diao G L, Zhang S G, Cai H G, et al. Cause of Formation of Deformation Field Near the Zhangbei Earthquake [J]. *China Science Bulletin* 2004, **49**(12): 1214—1216. [刁桂苓, 张四昌, 蔡华昌等. 张北震区附近形变的成因 [J]. *科学通报*, 2004, **49**(12): 1214—1216.]
- [5] Okada Y. Surface Deformation due to Shear and Tensile Faults in a Half-space [Bull]. *Seismological Society of America* 1985, **75**: 1135—1154.
- [6] Talebian M., Fielding E J, Funning G J, 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.
- [7] Vemant B, Nilforoushan F, Hatzfeld, et al. Present day Crust Deformation and Plate Kinematics in the Middle East Constrained by GPS Measurements in Iran and Northern Oman [J]. *Geophys. J. Int* 2004, **157**: 381—398.
- [8] Nilforoushan F, Masson F, Vemant B, et al. GPS Network Monitors the Arabia-Eurasia Collision Deformation in Iran [J]. *J. of Geodesy* 2003, **77**: 411—422.
- [9] Walker R, Jackson J. Offset and Evolution of the Gowk Fault S.E. Iran: A Major Intra-continental Strike slip System [J]. *J. of Structural Geology* 2002, **24**: 1677—1689.
- [10] Lyons N S. Investigation of Fault Creep in Southern California Using Interferometric Synthetic Aperture Radar and GPS [D]. Ph.D. Thesis, University of California, SAN DIEGO 2002.
- [11] Kanamori H. The Energy Release in Great Earthquakes [J]. *J. Geophysics Research* 1977, **82**: 2981—2987.