

文章编号: 0253-3782(2005)04-0423-08

巴姆地震地表形变的差分雷达干涉测量^{*}

夏 耶

(德国波茨坦 D-14473 德国波茨坦地球科学研究中心)

摘要 利用星载合成孔径差分雷达干涉技术和 ENVISAT 卫星雷达数据, 获得了 2003 年 12 月 26 日伊朗巴姆的里氏 6.5 级地震引起的同震地表形变场, 并详细地介绍了信号处理的过程。利用地震前后的相干图的差异及形变场的突变棱线, 精确定得了地面上断层裂缝的位置、形状和长度。这对震源理论模型的参数估计提供了依据。由雷达干涉技术测量得到的形变场与理论模型模拟的结果一致。

关键词 微波遥感 雷达干涉 地震 形变测量

中图分类号: P313.2 文献标识码: A

1 合成孔径雷达及干涉的基本原理

合成孔径雷达是一种微波侧视成像雷达(Curlander, McDonough, 1991)。为获取大面积地面图象, 载体多为航空航天飞行器, 如飞机、航天飞机和卫星。由于它的全天候和高分辨率工作特性, 近 20 年来, 获得了比光学传感器更快的发展。其应用领域遍及军事、测绘、气象、地质地震、海洋冰川、农林业等等。从原理上说, 它与真实孔径雷达一样, 都是发射一种线性调频脉冲信号。由于雷达随着载体在运动中不断地发射和接收脉冲信号, 回波信号的延迟将是运动着的雷达与目标相对位置的函数。若某一点目标距雷达距离是 R , 其微波反射系数为 σ_0 , 雷达增益为 A , 载波波长为 λ , 则在雷达图象上该点目标值为

$$\sigma_0 A e^{-j\frac{4\pi R}{\lambda}} \quad (1)$$

雷达干涉的原理, 相对于雷达成像来说要简单得多。如果雷达在不同的位置上对同一个点目标进行两次扫描, 便可得到该目标的两幅图象 f_1 和 f_2 , 这里不考虑反射系数

$$f_i = e^{-\frac{4\pi R_i}{\lambda}} \quad i = 1, 2 \quad (2)$$

这两次扫描, 可以用两副天线同时进行, 即所谓的单轨模式; 也可以用一副或不同的天线在不同的时候进行, 这便是所谓的重复轨道模式。根据式(2), 并参考图 1, 很容易推导出雷达干涉进行地形测量的机理。

在图 1 中, P 是地面上高度为 h 的一点, 雷达在 S 和 S_1 两个不同的位置上得到 P 点的两幅图象 f_1 和 f_2 , 称为主图象和副图象。点到雷达的距离分别为 R 和 R_1 , 雷达高 H , 俯视角 θ 。 B_1 是 S 与 S_1 之间的距离, 叫基线, 它的水平角为 α 。若以雷达射线为基准, 基线 B_1 可分解为投影到雷达射线上的一个水平分量 $B_{1||}$ 和一个垂直于雷达射线的垂直分量 $B_{1\perp}$ 。所谓干涉, 即将两幅雷达图象共轭相乘。乘积即为干涉图, 其相位叫干涉条纹图,

* 2004-06-11 收到初稿, 2005-05-18 收到修改稿并决定采用。

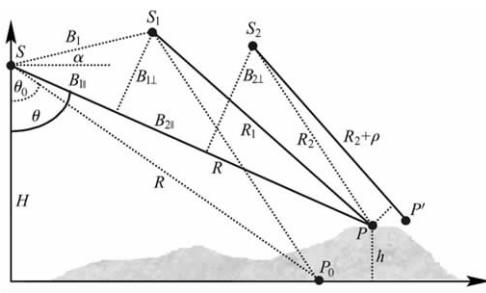


图 1 雷达干涉的几何关系示意图

记为 Φ_1 . 它等于

$$\Phi_1 = -\frac{4\pi(R - R_1)}{\lambda} = -\frac{4\pi}{\lambda} B_1 \sin(\theta - \alpha) \quad (3)$$

记 P_0 为参考地平面上的一点, 距雷达 S 的距离也为 R . 这时雷达对 P_0 的俯视角缩小了 $\delta\theta$ (图中未标出), 变为 θ_0 . 如果雷达在 S 和 S_1 也对 P_0 成像, 则其干涉相位应为

$$\Phi_0 = -\frac{4\pi(R - R_1)}{\lambda} = -\frac{4\pi}{\lambda} B_1 \sin(\theta_0 - \alpha) \quad (4)$$

式中, $B_1 \sin(\theta_0 - \alpha)$ 实际上就是 S 和 S_1 对 P_0 成像时基线 B 在 SP_0 射线上的水平分量 $B_{0\perp}$. 将参考地平面的干涉相位 Φ_0 从 Φ_1 中减去, 即式(3)减式(4), 也就是所谓的去平过程, 其差为

$$\Delta\Phi_1 = -\frac{4\pi}{\lambda} B_1 \cos(\theta - \alpha) \delta\theta = -\frac{4\pi h}{\lambda R \sin(\theta_0)} B_{1\perp} \quad (5)$$

在式(5)中, 做了 $\delta\theta \approx \sin(\delta\theta)$ 及 $R \sin(\delta\theta) \approx PP_0 = h/\sin(\theta_0)$ 的近似. 由于式(5)中除了 P 点的高程 h 以外都是已知量, 故该高程可通过去平后的干涉图直接求出. 这便是用合成孔径雷达干涉进行地形测绘的基本原理.

如果 P 点发生了位移, 到了 P' 点, 并出现在第二张副图象上, 雷达的位置是 S_2 , 则 P' 到雷达的距离为它原来的距离 R_2 加一个变化 ρ . 在主图象与第二幅副图象构成的第二幅干涉图中, P' 点的干涉相位为

$$\Phi_2 = -\frac{4\pi(R - R_2 - \rho)}{\lambda} = -\frac{4\pi(R - R_2)}{\lambda} + \frac{4\pi}{\lambda} \rho \quad (6)$$

可以看到, 位移在干涉图中的贡献与基线无关. 与第一幅干涉图一样, 将这第二幅干涉图中的相应的参考地平面的干涉相位减去, 剩下的是高程分量和位移分量:

$$\Delta\Phi_2 = -\frac{4\pi h}{\lambda R \sin(\theta_0)} B_{2\perp} + \frac{4\pi}{\lambda} \rho \quad (7)$$

两幅干涉图中的高程分量只不过是标度不同而已. 将第一幅干涉图乘上一个因子后便可从第二幅干涉图中全然减去, 在差分干涉图中得到位移分量

$$\frac{4\pi}{\lambda} \rho = \Delta\Phi_2 - \frac{B_{2\perp}}{B_{1\perp}} \Delta\Phi_1 \quad (8)$$

这便是差分雷达干涉测量微形变的基本原理. 这里的位移 ρ 还只是真正的位移在雷达射线上的投影. 要找到真正的位移矢量还需要先验知识或其它的附加条件和手段.

2 数据处理与结果

2.1 数据

为了用合成孔径雷达干涉测量巴姆地震引起的形变场, 欧洲航天局(ESA)提供了 7 幅 ENVISAT 卫星的 ASAR 雷达图象数据, 都是 IS2 模式和 VV 极化. 其中 4 幅是降轨数据,

3幅是升轨数据, 轨道号分别是6687, 9192, 9693, 10194, 8956, 9958, 10459, 相应的接收日期依次是2003年6月11日、2003年12月03日、2004年1月7日、2004年2月11日、2003年11月16日、2004年1月25日和2004年2月29日。升轨数据中, 2004年1月25日接收的数据因多普勒频率差异太大不能使用。4幅降轨数据中, 震前震后各两幅, 可各自配对产生高程模型。差分干涉则选震前震后各一幅配对。可用的两幅升轨数据只能用来差分。所有的数据按升轨降轨归类配准, 配准的精度为 $1/10$ 个像元, 选用复相干系数作配准的判据。

2.2 基线估算

在雷达干涉信号处理中, 基线的估算至关重要。由前面的分析可知, 干涉图中任一点的相位, 都是由该点对应的在参考平面上的参考点的干涉相位与其高程所决定的干涉相位的和(不考虑位移)。而这两者正分别由基线的水平分量和垂直分量来标度。值得一提的是, 地表上的一点与其在参考平面上的参考点虽然不是同一点, 但在雷达图象上, 它们是重合的。因此, 所谓基线估算, 就是把雷达图象上每一点都看成是在参考平面上, 然后求每一点对应的水平基线和垂直基线。在主图象中, 每一个距离行对应于卫星一个位置。这里所说的一个距离行是对主图象定义的, 副图象配准好后, 它的一个距离行可能来自原来的若干行。换句话说, 配准后副图象中一个距离行要对应于雷达不同的位置。雷达对同一距离行上的点的距离和视角是不一样的。因此, 在同一距离行上各点有各点的水平基线和垂直基线, 并且不是线性变化的。卫星轨道的不平行造成同一距离行上每个点对应的基线不相等。在一幅标准ENVISAT卫星雷达图象对应的飞行时间内, 一般为16 s, 基线的变化可达数米, 甚至上10 m。ENVISAT雷达数据产品同时提供了相应的卫星轨道数据和其他的辅助数据。它不像它的前辈ERS卫星那样有精度为几十厘米的精密轨道数据(Reigber *et al*, 1996), 计算干涉图时有必要进行基线校正。

要估算基线, 实际上就是要估算干涉图中每一参考点在参考地平面上的坐标及对应的卫星在空间的坐标。根据主图象数据产品提供的卫星轨道数据和与其对应的图象时间数据, 可以首先确定每一距离行对应的卫星的坐标。然后求这一距离行上每一点的坐标。一般选取地球的椭球体模型的表面作为参考地平面(坐标系为WG84)。也就是说, 每一点都应在这椭球体表面上。它与卫星的距离则由雷达接收天线的接收时间窗口决定。它与卫星的连线应与卫星空间轨道垂直, 因为在成像处理时, 将它定位在多普勒频率等于0的位置上。在这些条件的限制下, 干涉图中每一参考点的坐标(x_p, y_p, z_p)应满足下面的方程组(Curlander, 1982):

$$\begin{cases} \frac{(x_p^2 + y_p^2)}{R_e^2} + \frac{z_p^2}{R_p^2} = 1 \\ \frac{2}{\lambda P_s} (\mathbf{V}_s - \mathbf{V}_p) \cdot (\mathbf{S} - \mathbf{P}) = 0 \\ \sqrt{(\mathbf{S} - \mathbf{P}) \cdot (\mathbf{S} - \mathbf{P})} = R_s \end{cases} \quad (9)$$

式中, R_s 是参考点到卫星的距离, R_e 和 R_p 分别是椭球体的长短轴, \mathbf{V}_s 是卫星的速度矢量, \mathbf{V}_p 是参考点因地球自转引起的速度矢量, \mathbf{S} 是卫星的坐标向量, \mathbf{P} 即参考点的坐标向量(x_p, y_p, z_p)。解出(x_p, y_p, z_p)以后, 由参考点引第二条卫星轨道的垂线, 便可得到辅卫星的坐标。有了卫星和参考点的坐标, 所有的基线便迎刃而解。然后将其应用到去平和差

分过程中去[参见式(4)~(6)]. 表1列出了本文中用到的所有配对图象间的轨道号、接收日期及基线分布. 表中只给出了图象开始部分两端(near range and far range)的垂直基线.

2.3 干涉图与高程模型

图2a是巴姆地区的ENV-ISAT雷达强度图象(雷达坐标), 覆盖面积为42 km×42 km. 巴姆城位于图象的中央偏左上方. 图2b和图2c是两张

表1 干涉配对图象数据一揽

轨道号	接收日期	轨道方向	基线分布/m
9192, 6687	2003-12-03, 2003-06-11	降轨	484.09~468.58
10194, 9693	2004-02-11, 2004-01-07	降轨	-540.59~-508.31
9192, 10194	2003-12-03, 2004-02-11	降轨	3.08~3.39
10459, 8956	2004-02-29, 2003-11-16	升轨	-13.56~-20.72

去平以后的干涉图, 分别用地震前的两幅图9192, 6687和地震后的两幅图10194, 9693干涉而成. 它们反映了巴姆地区地震前后的地形. 每一条干涉条纹表示 2π 的相位变化或分别表示大约17 m和19 m的高程变化. 图3a, b是图2b, c的积分(即解缠)(Costantini, 1996), 它们表达了累计的相位变化, 也就是实际地形的一种标度. 图3c是图3a和图3b的差分. 在做差分时, 没有必要将相位转换成高程, 见式(8). 差分的结果是十分均匀的, 说明在地震前后的各自时间段内的地形没有变化, 图3a和图3b都可以作为高程模型使用. 差分结果的均匀性还证明了图2b, c的积分没有误差, 基线估计也是正确的. 在图3中, 为了增加一些相对位置的信息, 相位的值用颜色度表示, 但强度和饱和度分别用雷达强度和地震前后的相关值进行了调制.

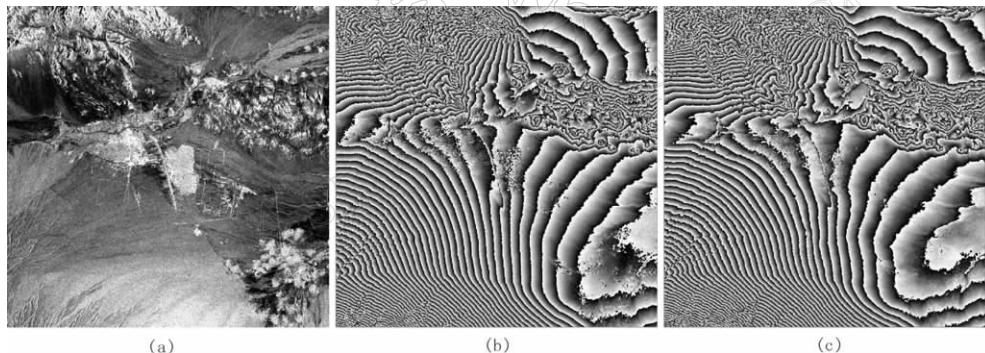


图2 (a) 雷达强度图; (b) 震前干涉图(2003年12月3日, 2003年6月11日);
(c) 震后干涉图(2004年2月11日, 2004年1月7日)

2.4 差分干涉与形变场

地震前后各取一张雷达图进行干涉并去平后, 得到的干涉图除了包含地形信息外, 还应包含有地震引起的地表的形变. 将降轨雷达图9192和10194配对干涉, 时间段是2003年12月3日和2004年2月11日, 再对图3a进行差分, 即减去地形的相位. 图4a即是其差分的结果. 该结果已做了地理位置校正(geocoding). 图4a中, 地形全减掉了, 只剩下形变引起的相位变化. 一个颜色周期仍表示 2π 的相位变化, 但这时反映的是大小为半个波长的形变, 即2.8 cm[式(8)]. 该形变主要发生在巴姆城内及其周围25 km的范围内. 前已述及, 雷达干涉测量到的形变只是真实形变在雷达射线上的投影. 对ENVISAT降轨图象和巴姆地区来说, 雷达射线的方向余弦是-0.066, 0.384和0.920. 形变场只可见4个梅花瓣的一半, 即东边南北两个. 南边的一瓣在雷达射线方向上隆起30 cm, 北边的下沉

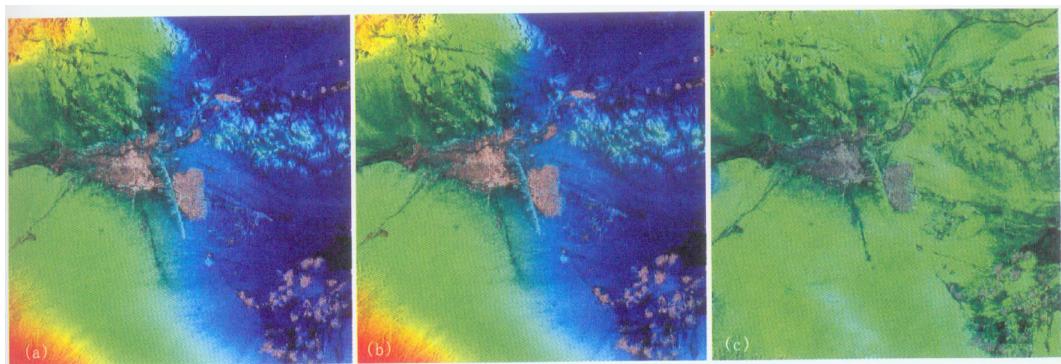


图 3 (a) 震前地形图; (b) 震后地形图; (c) 图(a)与图(b)的差分

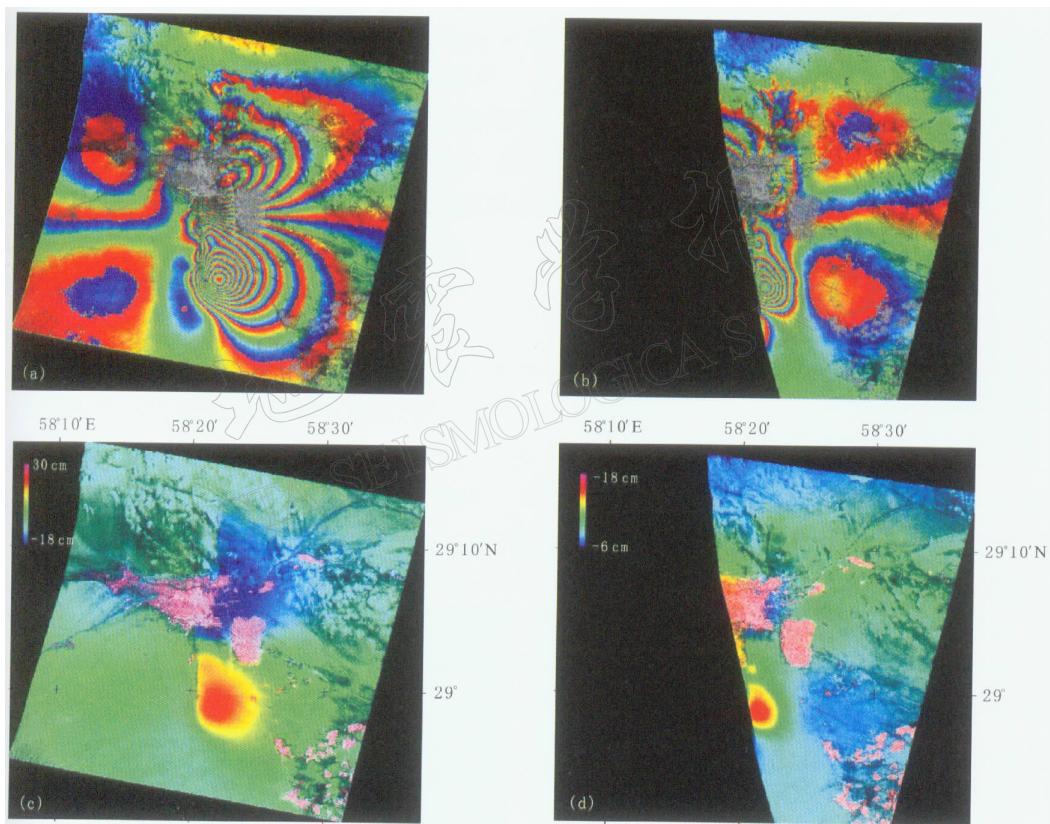


图 4 (a) 降轨形变图(2003 年 12 月 3 日, 2004 年 2 月 11 日); (b) 升轨形变图(2004 年 2 月 29 日, 2003 年 11 月 16 日); (c) 同震形变场(降轨); (d) 同震形变场(升轨)

18 cm. 图 4b 是用升轨数据 (10459, 8956) 得到的形变场, 投影在方向余弦为 -0.057 , -0.332 和 0.942 的雷达射线上. 图 4b 中可见 3 个形变花瓣, 只是量小多了. 西北瓣隆起 12 cm, 东北瓣下沉 6 cm, 东南瓣隆起 18 cm, 西南边的那一瓣因位置不在此升轨图象中, 故只见一个很小的外围弧段, 但可看出是下沉的. 由形变梅花瓣隆起与下沉的分布推断, 断层应是南北走向, 断层东边的板块向南搓动, 而西边的板块向北. 断层似乎应由若干段构成. 巴姆地震形变的主要成份——南北相对位移矢量与雷达射线在空间几乎垂直

(99.8°), 导致它在图 4a, b 中的贡献甚微. 图 4c, d 分别是图 4a, b 的积分, 即形变场, 并已标定了其地理坐标. 可见该形变主要在巴姆城附近, 其 25 km 以外已经基本削弱到 0 了.

3 断层位置和形状的确定

巴姆地震是由于断层的破裂引起的. 如果地面上也出现了裂缝, 裂缝本身是一种破坏, 其周边的近临点的相对位移量应是最大. 因此, 可通过检测此裂缝来估计断层的位置和形状. 第一种方法是比较震前、震后和地震前后 3 张雷达相干图. 断层应只出现在地震前后相干图中. 因篇幅有限, 这里只给出了地震前后相干图, 并用于图 3 和图 4 对颜色的调制中. 在这些图中, 巴姆城北边和南边的黑线条即是新的裂缝. 在震前、震后的相干图以及雷达强度图中, 这两条黑线是不存在的. 在巴姆城内, 因相关值太低, 无法检测此裂

缝在城内的走向. 但可以肯定的是, 新破裂的断层正好位于巴姆城地下. 第二种方法是用图象棱边滤波器(edge detection filter)对形变场滤波. 图 5 是滤波器的输出, 断层的位置和形状十分清楚地突现出来. 可见它粗略地由 3 段组成: 南段、北段和中间段. 中间段在巴姆城中, 是杂乱无序的. 北段的端点位置是 $58^{\circ}21'57.68''E$, $29^{\circ}11'36.00''N$ 和 $58^{\circ}22'10.29''E$, $29^{\circ}7'36.78''N$, 长约 6 km; 南段的端点位置是 $58^{\circ}20'19.91''E$, $29^{\circ}4'57.30''N$ 和 $58^{\circ}20'45.14''E$, $28.58'27.46''N$, 长约 13 km. 在巴姆城地下的

图 5 检测出的断层裂缝

中间段可想象成北段南端与南段北端的联结线, 长约 5 km.

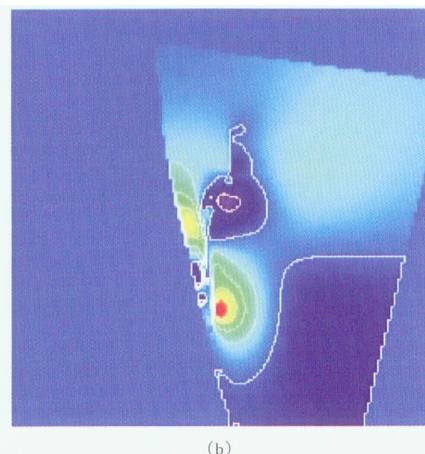
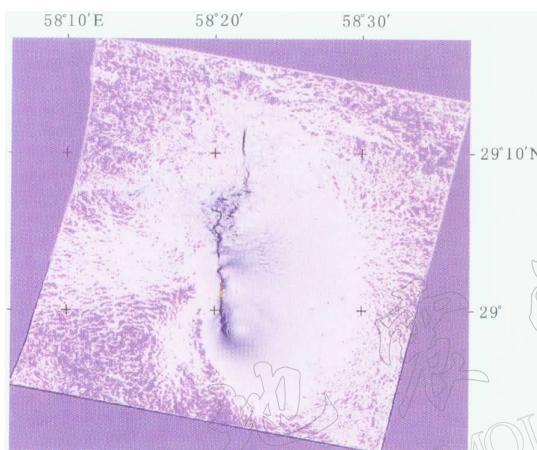


图 6 理论模型模拟的结果. (a) 降轨; (b) 升轨(Wang, 2004)

4 震源理论模型的参数估计

合成孔径雷达干涉测量得到的形变场和断层位置的形状及构成的数据, 可帮助地球物理学家深化他们的震源理论模型的研究和模拟。德国波茨坦地球科学研究中心汪荣江 (Wang, 2004) 博士用日本庆应大学冈田光弘(Okada, 1985) 教授提供的弹性半空间形变理论模型和本文提供的形变场(包括升轨和降轨)和断层的测量数据, 借助一个二维正交傅里叶级数, 用最小二乘法对形变理论模型的参数进行了估计。图 6a, b 是用理论模型和估计出的参数反演出来的分别对应于降轨和升轨的地壳形变场。将图 4a, b 分别与图 6a, b 比较, 可以说它们非常一致, 方差在 2 cm 左右, 较大差异只在断层附近, 且只有几厘米。可能因理论模型及参数尚不能完全反映断层的微细结构的缘故。参考巴姆地区地质图, 可知北段断层与老断层(巴姆断层)重合, 但它没有像老断层那样向东南延伸, 而是拐向西南, 穿过巴姆城, 再向南延伸, 形成全新的南段断层, 与原巴姆断层几乎平行且相距大约 5 km。汪荣江(Wang, 2004)的模拟结果表明, 北、中、南 3 块断层面的长度和走向分别是 7 km, 0° ; 5 km, 35° ; 14 km, 357° 。北段断层朝西倾斜 55° , 滑移分量很小, 在 20~70 cm 范围内; 而中段和南段断层向东倾斜近 80° , 南段滑移分量为 1~2 m, 最大达 2.75 m。中段是过度带。可见 80% 以上的地震能量是在南段释放的, 震源应在南段断层上。这也是巴姆城遭到毁灭性破坏的主要原因之一。

5 结论

本文简要地介绍了合成孔径雷达的成像和干涉的基本原理, 给出了用 ENVISAT 卫星雷达数据进行巴姆地震形变场测量的干涉处理过程及结果, 证明了星载合成孔径雷达干涉技术是大地形变测量和地震研究的一个十分强大和有效的工具。本文同时用升轨和降轨干涉结果作为形变理论模型参数估计数据源。因估计结果是不唯一的, 多一个独立数据源等于多加了一个限制条件。但这样做的话, 对干涉结果的准确性则提出了更高的要求。从升轨和降轨干涉结果来看, 远场的形变都基本为 0, 近场和远场的形变模型参数估计残差非常小, 在断层附近也就几厘米。这证明本文中涉及的雷达干涉信号处理过程是优秀的。如果干涉结果不准确, 用升轨和降轨干涉结果同作为形变理论模型参数估计数据源将导致形变模型参数估计残差显著增大。在本文中, 用梯度滤波器和解缠后的差分相位精确地确定了引起这次地震的新老断层的结构、大小及位置。这对形变理论模型参数估计至关重要。Talebian 等(2004)没有把这个断层估计好, 为了减小参数估计残差, 毫无道理地增加另一条断层, 并断言, 不增加另一条断层, 则模型参数估计不好, 更谈不上同时使用升轨和降轨干涉结果作为形变理论模型参数估计数据源。本文的结果证明他们的观点是不对的。

利用干涉雷达进行大面积、快速度、低成本、高精度高分辨率的形变测量, 是其它传统方法, 包括现代的 GPS 都无法做到的。现在合成孔径雷达干涉技术的主要缺陷有 3 点: 一是有些地区雷达信号的相干性很差, 以至无法进行干涉; 其二是在数据量少的情况下, 大气影响难于去除; 第三是干涉结果只是形变投影到雷达射线上的结果, 单靠雷达干涉技术本身, 不能确定真实的形变矢量。随着雷达技术的进步, 这些缺陷会逐步得到解决。例如, 多波段, 长波长及借助其它技术(Ferretti *et al*, 2001; Xia, *et al*, 2002)可解决部分地区的不相干和大气的问题; 多卫星、多轨道和双侧视可解决确定真实的形变矢量的问题。

2006 年德国将发射一颗 X 波段的雷达卫星(TerraSAR-X). 随后德国和欧洲航天局还将发射 Tandem TerraSAR-X 及 P 波段的雷达卫星(TerraSAR-P). 可以预见, 合成孔径雷达干涉技术将会迎来一个新的研究和应用的高潮.

参 考 文 献

- Costantini M. 1996. A phase unwrapping method based on network programming[A]. In: ESA eds. *Proceedings of the "Fringe'96" Workshop*, EAS SP-406[C]. Zürich, Switzerland, 261~272
- Curlander J C. 1982. Location of spaceborne SAR imagery[J]. *IEEE Trans Geosci and Remote Sensing*, **20**(3): 359~364
- Curlander J C, McDonough R N. 1991. *Synthetic Aperture Radar*[M]. New York: John Wiley & Sons Inc., 28
- Ferretti A, Prati C, Rocca F. 2001. Permanent scatterers InSAR interferometry[J]. *IEEE*, **39**: 8~20
- Okada Y. 1985. Surface deformation due to shear and tensile faults in a half-space[J]. *Bull Seism Soc Amer*, **74**(4): 1 135~1 154
- Reigber Ch, Xia Y, Kaufmann H, et al. 1996. Impact of precise orbits on SAR interferometry[A]. In: ESA eds. *Proc. ESA-Fringe Workshop on Applications of ERS SAR Interferometry*, EAS SP-406[C]. Zürich, Switzerland, 223~232, <http://www.geo.unizh.ch/rsl/fringe96>
- Tabebian M, Fielding E, Funning G, et al. 2004. The 2003 Bam (Iran) earthquake: Rupture of a blind strike-slip fault [J]. *Geophys Res Lett*, **31**: L11611, doi:10.1029/2004GL020058
- Wang R, Xia Y, Grosser H, et al. 2004. The 2003 Bam (SE Iran) earthquake: precise source parameters from satellite radar interferometry[J]. *Geophys J Int*, **159**: 917~922
- Xia Y, Kaufmann H, Guo X F. 2002. Differential SAR interferometry using corner reflectors[A]. In: IEEE ed. *Proc IGARSS'02* [C]. Hoes Lane: IEEE Inc, 1 243~1 246

BAM EARTHQUAKE: SURFACE DEFORMATION MEASUREMENT USING RADAR INTERFEROMETRY

Xia Ye

(GeoForschungsZentrum Potsdam, D-14473 Potsdam, Germany)

Abstract: This paper described the application of differential synthetic aperture radar interferometry(D-INSAR) and Envisat ASAR data to map the coseismic surface deformation caused by the $M_w = 6.5$ Bam earthquake on 26th December 2003 including the interferometric data processing and results in detail. Based on the difference in the coherence images before and after the event and edge search of the deformation field, a new fault ruptured on the surface was detected and used as a data source for parameter extraction of a theoretical seismic modeling. The simulated deformation field from the model perfectly coincides with the result derived from the SAR interferometric measurement.

Key words: microwave remote sensing; SAR interferometry; earthquake; deformation measurement