

利用 PALSAR 数据获取拉奎拉地震同震形变场*

谢志鹏¹, 张震华², 王永哲³, 许兵³

(¹冷水江市国土资源局, 湖南冷水江 417500; ²中国水电工程顾问集团公司中南勘测设计研究院, 湖南长沙 410014; ³中南大学地球科学与信息物理学院, 湖南长沙 410083)

摘要 2009年4月6日发生的意大利拉奎拉 Mw6.3 地震造成了地表的严重破坏, 为了解地震引起的地表变化情况, 本文利用 ALOS/PALSAR 影像数据, 采用二轨差分干涉测量技术提取了该次地震的地表同震形变场。通过分析可知: 地表在西北-东南方向上发生错动, 形变主要发生在 40×30 km 的范围内, 西南部出现了沿视线方向的下降, 东北部出现了沿视线方向的抬升, 最大值分别为 0.337 m 和 0.122 m。结果表明, 获得的同震形变场与地震地质调查的结果一致。

关键词 DInSAR 拉奎拉地震 PALSAR 同震形变

中图分类号: P258

文献标识码: A

文章编号: 1672-4097(2011)05-0003-04

1 引言

差分干涉测量技术(DInSAR)是20世纪新发展起来的大地测量技术, 该技术具有高空间分辨率、穿透能力强、覆盖面广等特点, 观测精度可达厘米级, 甚至在观测条件好的情况下可以达到毫米级。最早使用 DInSAR 技术获取地震同震形变场的是 1993 年的 Massonnet^[1]。他们利用 ERS-1 数据成功获取了美国 Landers 地震的地表形变场, 其结果与其他数据所得结果比较一致。从此以后, DInSAR 技术得到了国际学者的关注, 并得到了迅速发展和广泛应用^[2-4]。

DInSAR 技术最典型的应用就是监测地震的形变, 因为地震的发生很难被预测, 所以其他常用的大地测量手段难以直接获得地震的形变结果。而对于 DInSAR 技术来讲, 只要地震发生在雷达卫星覆盖范围之内, 便可以利用震前、震后的数据来获得地表的同震形变场。

2009年4月6日, 意大利中部的拉奎拉城遭受了 Mw 6.3 级地震的破坏, 震源位于 42.334 N, 13.334 N(USGS), 此次地震引起了地表的较严重破坏, 并伴随了一些余震。震中地区属于具有正断层以及西北-东南走向断层系统特征的阿尔卑斯带, 该地区被认为是容易发生中级地震的地区。

本文利用震前和震后获取的升轨 ALOS/PALSAR 数据, 通过 DInSAR 二轨方法处理, 获得拉奎拉地震的同震形变场, 并对地震引起的地表形变特征进行分析。

2 二轨 DInSAR 获取形变方法

常用的 DInSAR 获取形变的方法: 二轨法、三轨法和四轨法。二轨法与另外两种方法相比, 具有的优势是可以避免由相位解缠及大气相位引起的误差影响。因此, 本文选择二轨 DInSAR 技术进行处理。

二轨法是由 Massonnet 于 1993 年提出来的, 其精髓是利用已有的形变区形变前的外部 DEM 来模拟地形相位, 从而从干涉图中将其消除, 得到地表形变。该方法通过获得形变前后的含有复数信息的两景影像, 进行干涉处理生成干涉图, 然后将地理坐标系下的外部 DEM 转换到 SAR 坐标系下, 模拟形变前地形变化引起的干涉相位, 再从干涉图中减去地形变化引起的相位, 最后就可以得到形变干涉图, 从而可以根据形变干涉图来计算视线方向的形变量。

当分别获得了形变前后的两景 SAR 数据后, 通过干涉处理, 得到形变前后的干涉图, 若假设地表的形变与雷达分辨率单元相比很小, 则根据二轨 DInSAR 原理的几何示意图(图 1)中的几何关系, 可得到干涉图中的相位计算公式:

$$\varphi = \frac{1}{\lambda}(B \sin(\theta - \alpha) + \Delta r) \quad (1)$$

其中, B 为卫星两次成像天线的基线长度, Δr 为两次成像的视线长之差。

* 湖南省高校创新平台开放基金项目(09K005, 09K006), 中南大学创新实验计划(101053301), 国家大学生创新实验计划(LA10001)和中南大学 2010 年度米塔尔学生创新项目(10 MX04)资助。

相位 φ 中包含以下几部分信息:

$$\varphi = k \cdot 2\pi + \varphi_{def} + \varphi_{flat} + \varphi_{top} + \varphi_{atm} + \varphi_{noi} \quad (2)$$

其中: φ_{def} 为形变前、后地表形变对应的相位, φ_{flat} 为平地效应产生的相位, φ_{top} 为地形变化引起的相位, φ_{atm} 为大气延迟对应的相位, φ_{noi} 为难以消除的随机噪声引起的相位。

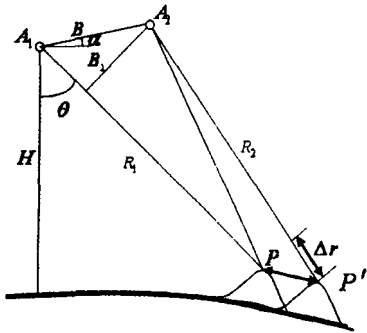


图1 二轨 DInSAR 原理示意图

为得到只包含地表形变信息的相位干涉图,需要去除干涉图中除形变信息之外的相位,二轨 DInSAR 处理的整个过程具体步骤包括:基线估算,DEM 模拟地形相位,干涉图差分处理,相位滤波,相位解缠,形变量计算。图 2 为二轨差分方法的一般流程图。

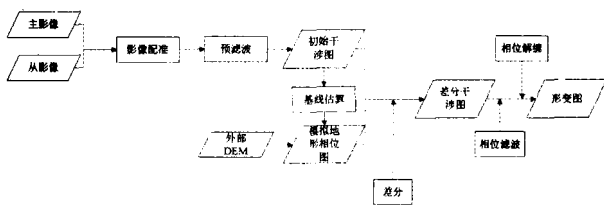


图2 二轨 DInSAR 方法处理一般流程图

以上得到的为 SAR 坐标系下的形变图。为便于应用和分析,一般将 SAR 坐标系下的形变图转到地理坐标系即 WGS84 下,这个过程称为地理编码。以上即为二轨 DInSAR 处理 SAR 数据从而获取形变的方法。

3 拉奎拉地震的 DInSAR 数据处理

3.1 数据选取

拉奎拉地震发生后,日本空间局的 ALOS 卫星的 PALSAR 传感器收集了震前和震后的 SAR 数据,为研究拉奎拉地震的同震形变场提供了很好的数据基础。拉奎拉地区属于山区,地形起伏较大,因此,利用短波段的雷达影像进行干涉获得的结果相干性较差,结果精度不高。而 PALSAR 数据为 L 波段,属长波段,易于避免干涉时的条纹混叠现象和解缠^[5]。

本文通过分析时间跨度和垂直基线等因素的影响,选取了两景数据进行处理,成像时间分别为 2008 年 7 月 20 日和 2009 年 4 月 22 日,详细的数据信息如表 1 所示。

表 1 ALOS/PALSAR 数据信息

数据名	Path	Frame	模式	时间基线	垂直基线
ALOS/ PALSAR	639	833	FBD	276 days	-182 m
	639	833	FBS		

二轨 DInSAR 方法需要用到研究区域的外部 DEM 数据,本文采用美国航天局发布的 SRTM (Shuttle Radar Topography Mission) 数据,该数据在欧亚地区的水平分辨率为 $90 \text{ m} \times 90 \text{ m}$, 垂直方向的精度大约为 $\pm 16 \text{ m}$ ^[6]。二轨 DInSAR 方法得到的结果精度主要受外部 DEM 垂直精度和基线的影响^[7]:

$$\delta r = \frac{\delta h}{R \sin \theta} B_{\perp} \quad (3)$$

其中: δh 为 DEM 垂直精度, R 为卫星天线到地面点距离, B_{\perp} 为垂直基线长度, 雷达信号入射角。

经过计算,DEM 精度和基线长度对形变影响约为 5.3 mm ,因地震形变较大,在本文的处理中,该部分的影响忽略不计。

3.2 数据处理

本文从原始数据到最后生成形变图,是以瑞士商用软件 GAMMA 为基础,按二轨 DInSAR 处理的一般流程进行。

由于所选取的两景数据模式不同,也即分辨率不同,需要将 2008 年 7 月 20 日的数据进行距离相重采样,使之与另外一景数据具有相同的分辨率。在进行干涉处理之前,先将获得的 ALOS/PALSAR Level 1.0 级数据转换为干涉所需的 SLC 数据,然后进行图像的配准,在配准过程中,经过粗配准和精配准后,其中精配准需达到子像元级精度,不至于影响到最后的形变结果。再对从影像进行重采样,此时的两景影像便可以进行干涉处理了。

为得到同震形变场,需对式(2)中除形变相位外的其它相位全部去除。首先根据轨道信息来去除平地效应的影响。然后再利用外部 DEM 去除地形的影响,先将研究区域的 DEM 数据转换到 SAR 坐标系下,根据相位和高程的关系^[7]:

$$\varphi_{top} = \frac{4\pi}{\lambda} \cdot \frac{B_{\perp}}{R \sin \theta} \cdot h \quad (4)$$

其中 λ 为雷达波长, B_{\perp} 为垂直基线, R 为斜距, θ 为雷达入射角, h 为高程。

模拟地形变化的相位,经过差分处理,得到不含地形相位的差分干涉图。得到的干涉图中存在各种因素的影响,使得图中存在随机噪声,可能会影响最后的形变结果,因此采用改进的 Goldstein 滤波方法^[8]对差分干涉图进行滤波去噪,最大程度减少噪声的影响。此时的差分干涉图中依然包含了大气延迟影响的相位信息,且相位是缠绕的,即相位的主值在 $[-\pi, \pi]$ 之间。为获得真实相位的信息,必须对差分干涉图中的相位进行解缠处理。本文采用最小费用流的方法来进行解缠,确定相位的整周数。经过解缠后的差分干涉图中就只包含了形变相位和大气延迟相位。由于大气延迟的影响对形变精度的影响可达厘米级^[9],因此,必须减弱它的影响,为此,本文采用了最小线性回归的方法。处理后的干涉图中就只剩下了形变相位信息,将干涉图进行转换,得到了 SAR 坐标系下的形变量图。为方便应用和研究,再将形变量图转换到 WGS84 坐标系下。

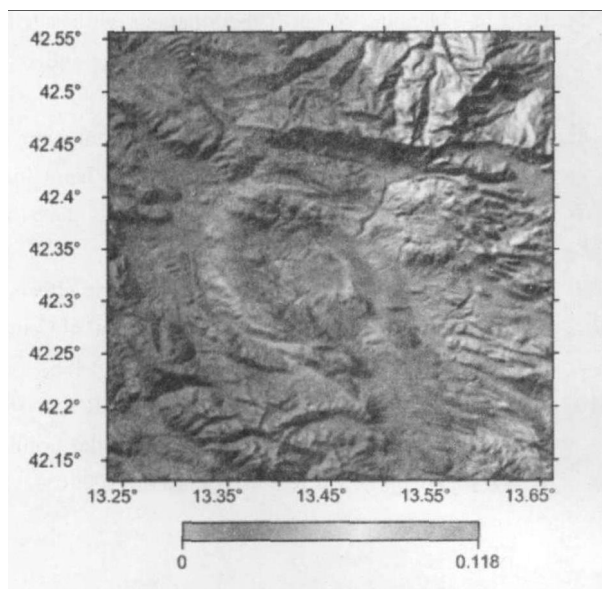


图 2 形变差分干涉图,单位:米。

4 形变场分析

获得的 WGS84 坐标系下的形变图如图 3 所示。在形变干涉图中,每个条纹对应 0.118 m (L 波段半波长)的雷达视线方向的地表形变,利用二轨 DInSAR 获取的地表形变场分西南和东北两部分,且形变分布并不对称,在拉奎拉地区的西南部分引起的沿雷达视线方向的下降量偏大,形变最大值达到了 0.337 m,而在东北部分引起的视线方向上升量偏小,最大值仅为 0.122 m (由于雷达影像未覆盖全部的地表变形地区,因此未获得所有东北部分的形变)。在形变干涉图中,相对于远离震中区域,靠

近震中区域的干涉条纹率相对较高,西南部分高于东北部分。

由于 L 波段雷达信号的特点,使得在干涉处理时,所获取的相干图质量较好(相干图如图 4 所示)。从相干图中,可以发现,震中平地地区的相干性普遍较高,而在南、北部的高山地区相干性相对较低,从而使得在形变干涉图中的上部和下部,条纹率变得模糊。产生低相干的原因可能是由于高山区植被覆盖及大气延迟影响造成了雷达信号失相干。

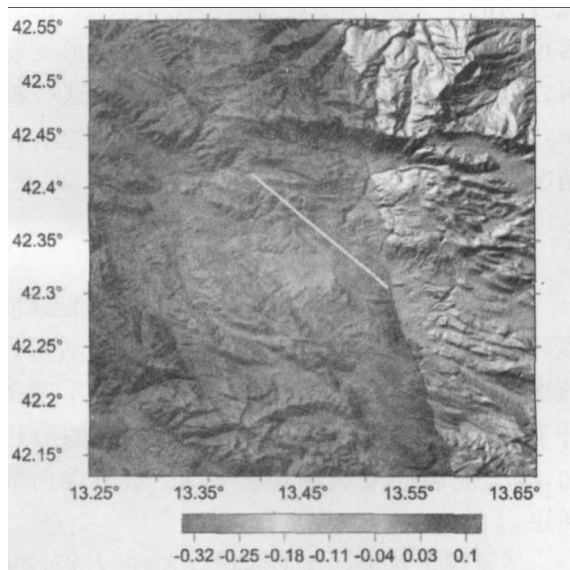


图 3 同震形变图,单位:米

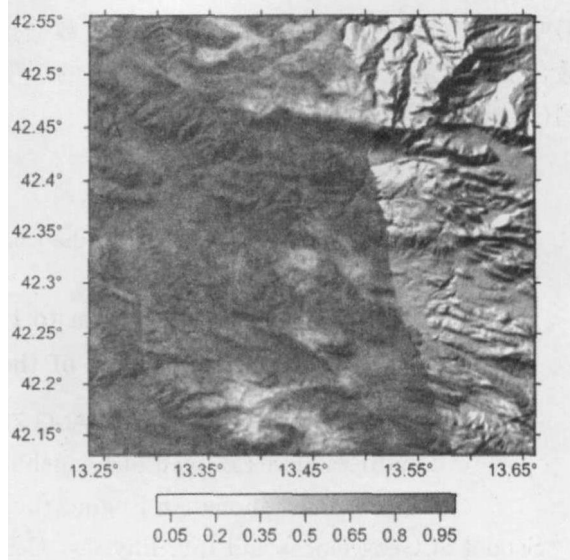


图 4 相干图

此次地震发生后,跟随着一系列的余震,这些余震也会使地表发生不同程度的位移,本文的数据包含了余震的信息,其中最大的余震为 Mw5.6 级,发生在 4 月 7 日,位于主震东南方向 15 km。同震形变场包含了由余震引起的形变量,经过模拟试验,余震引起的形变量比较小可忽略不计^[10]。因

此,本文所获取的拉奎拉地震同震地表形变可认为是完全由主震引起。同震形变场可用作理解此次地震的测量资料。

地震地质调查的结果显示,拉奎拉地区所在的阿尔卑斯地区断层系统具有以下特征:大小在40—50之间的西南倾向,断层走向为西北-东南方向,正断层。通过同震形变量图可以发现,拉奎拉地区的东北和西南部地表发生了相对错动,错动的走向为西北-东南方向。DInSAR技术获得的视线方向的形变多为垂直方向形变的贡献,甚至有时可以将视线向形变作为垂直形变,由形变量图可以判断拉奎拉发震断层为正断层。这些都显示,同震形变场基本反映了该次地震的地表位移情况。

5 结论

利用二轨DInSAR方法对拉奎拉地震震前和震后的PALSAR数据进行干涉处理,成功得到了该次地震的同震差分干涉图,利用差分干涉图估计了同震形变场。经过对同震形变场的分析可知,本次地震的发震断层为西北-东南走向的正断层。

尽管拉奎拉地区地形起伏较大,但L波段雷达信号不易引起条纹混叠和利于相位解缠的优点得到利用,得到的干涉图具有很高的相干性。但其对形变不够敏感,因此,L波段的PALSAR数据比较适合于地形起伏较大地区且形变量较大的形变监测(如地震形变监测)。

参考文献

- 1 D. Massonnet. The displacement field of the Landers

earthquake mapped by radar interferometry[J]. Nature, 1993,364:138-142.

- 2 R. Burgmann. Deformation during the 12 November 1999 Duzce, Turkey, earthquake, from GPS and InSAR data[J]. Bulletin of the Seismological Society of America, 2002,92:161-171.
- 3 G. Liu. Surface deformation associated with the 2008 Ms8.0 Wenchuan earthquake from ALOS L-band SAR interferometry[J]. International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation, 2010, 12: 496-505.
- 4 T. J. Majumdar, D. Massonnet. D-InSAR applications for monitoring of geological hazards with special reference to Latur earthquake 1993[J]. Current Science, 2002,83:502-508.
- 5 蒋弥. 用L波段和C波段SAR数据研究汶川地震的同震形变[J]. 大地测量与地球动力学, 2009, 29: 21-26.
- 6 B. Smith, D. Sandwell. Accuracy and resolution of shuttle radar topography mission data[J]. Geophysical Research Letters, 2003,30:1467.
- 7 G. Liu. Mapping of earth deformations with satellite SAR interferometry: a study of its accuracy and reliability performances, 2003.
- 8 Z. Li. Improved filtering parameter determination for the Goldstein radar interferogram filter[J]. Isprs Journal of Photogrammetry and Remote Sensing, 2008,63: 621-634.
- 9 Z. W. Li. Quantitative study of atmospheric effects in spaceborne InSAR measurements[J]. Journal of Central South University of Technology, 2005,494-498.
- 10 S. Atzori. Finite fault inversion of DInSAR coseismic displacement of the 2009 L'Aquila earthquake (central Italy)[J]. Geophysical Research Letters, 2009,36.

Using PALSAR Data to Estimate the Co-Seismic Deformation Fields of the L'Aquila Earthquake

XIE Zhi-peng¹, ZHANG Zhen-hua², WANG Yong-ze³, XU Bing³

¹ Land Resources Bureau of Lengshuijiang City, Leng Shuijiang Hunan 417500, China;

² HydroChina Zhongnan Engineering Corporation, Changsha Hunan 410014, China;

³ School of Geosciences and Info-Physics, Central South University, Changsha Hunan 410083, China)

Abstract The Mw6.3 L'Aquila earthquake that occurred on 6 April 2009 caused serious surface damage. To measure the ground deformation induced by the earthquake, this paper use the ALOS/PALSAR data and the Two-Pass differential interferometry to estimate the co-seismic deformation. The analysis show that the ground surface dislocated along the Northwest and Southeast direction, mainly within an area of 40×30 km, while in the Southwest and Northeast part significant subsidence and uplift occurred, with the maximum of 0.337 and 0.122 m. The results are consistent with that from geological investigation.

Key words DInSAR; L'Aquila earthquake; PALSAR; co-seismic deformation