

融合多平台 DInSAR 数据解算拉奎拉地震三维同震形变场

王永哲¹ 李志伟¹ 朱建军¹ 胡俊¹

(1 中南大学地球科学与信息物理学院,长沙市麓山南路 932 号,410083)

摘 要:针对单一平台 DInSAR 技术仅能获取雷达视线方向同震形变场的问题,根据雷达成像的几何条件,融合不同轨道、不同平台的 DInSAR 数据解算了拉奎拉地震的三维同震形变场。三维形变结果反映的拉奎拉地震发震断层的特征与地质调查的结果较吻合。将得到的三维形变场数据与该地区 GPS 观测站数据进行比较,结果表明,得到的拉奎拉地震的三维同震形变场比较可靠且精度较高。

关键词:拉奎拉地震;DInSAR;三维形变;多平台

中图法分类号:P315.8; TP227.1

2009-04-06,在意大利中部的拉奎拉地区发生了 Mw6.3 级(42.334° N, 13.334° E,震源深度 8.8 km)地震,这是该地区自 1703 年以来最大的一次地震^[1]。该地震对地表造成了较严重的破坏,致使 300 多人死亡、6 000 多人受伤^[2]。地震震中位于意大利构造地震多发的中部 Apennines 带,根据历史的记录和构造分析,该地区易于发生以正断层为特征的地震^[3]。

差分雷达干涉测量技术(DInSAR)是利用地表形变前后的相位信息来获取雷达视线方向形变量的一种新技术,具有高空间分辨率、高精度、不受云和雨影响等特点,但其只能得到雷达视线方向的形变。欧空局的 ENVISAT/ASAR 传感器及日本宇航局的 ALOS/PALSAR 传感器收集了拉奎拉地震震前、震后的 SAR 资料,从而为获取该地震同震形变场提供了前提条件。众多学者^[2,4-6]利用 DInSAR 得到了该地震的同震形变场,但这些研究都只获得了雷达视线方向的形变场,并不能详细反映地表的三维形变情况。本文通过融合不同平台的数据,其中包括升、降轨的 ENVISAT/ASAR 和升轨的 ALOS/PALSAR 数据,经过 DInSAR 处理,再根据雷达成像的几何特征进行了解算,最后得到了此次地震的三维同

震形变场。

1 数据选取及 DInSAR 处理

拉奎拉地震发生后,欧空局将 ENVISAT/ASAR 传感器所获取的升、降轨 SAR 数据免费发布在其网站上。本文考虑到基线长度和时间跨度,分别选取升、降轨各一对图像进行 DInSAR 处理,数据信息如表 1 所示。此外,笔者也从日本宇航局获取了升轨 PALSAR 数据,通过基线长度和时间跨度的计算,选取了一对合适的图像进行了干涉处理(数据信息如表 2 所示)。

以震前影像为主影像,将震后影像与震前影像配准并对震后影像进行重采样和干涉处理,采用二轨差分方法来去除地形相位的影响,使用的外部 DEM 数据为美国国家航空航天局发布的水平分辨率为 90 m(3 s)的 SRTM 数据,将研究区域的 SRTM 数据投影到对应的雷达坐标系下,然后根据高程和相位的转换关系来模拟地形相位^[7]:

$$\varphi_{\text{top}} = -\frac{4\pi}{\lambda} \frac{B_{\perp}}{R \sin \theta} h \tag{1}$$

式中, 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。

收稿日期:2012-04-21。
项目来源:国家自然科学基金资助项目(40974006,40774003);国家教育部新世纪优秀人才支持计划资助项目(NECT-08-0570);国家西部 1:50 000 空白区测图工程研究课题资助项目;湖南省高校创新平台资助项目(09K005,09K006);中南大学研究生教育创新工程资助项目(1343-74334000023)。

表 1 ENVISAT/ASAR 数据信息

Tab. 1 Parameters of ENVISAT/ASAR Images

数据名	帧号	轨道号	日期	时间基线/d	垂直基线/m
ENVISAT/ASAR	00079	32197	2008-04-27	350	-36
	00079	37207	2009-04-12		
	00401	36527	2009-02-23	70	-140
	00401	37529	2009-05-04		

表 2 ALOS/PALSAR 数据信息

Tab. 2 Parameters of ALOS/PALSAR Images

数据名	Path	Frame	日期	时间基线/d	垂直基线/m
ALOS/PALSAR	639	833	2008-07-20	276	-182
	639	833	2009-04-22		

这样便可以将地形相位部分从干涉相位中去除,从而生成差分干涉图(DInSAR)。采用改进的 Goldstein 滤波方法^[8]对差分干涉图进行去噪处理,尽量减小噪声的影响。然后采用最小费用流和不规则三角网的方法对差分干涉图进行解缠,即确定相位的整周数,经过解缠后的差分干涉图中就只包含形变相位和大气延迟相位两项。因此,还需要去除大气延迟相位,由于没有大气改正的其他资料可用,本文只对与地形相关的大气延

迟进行改正,采用考虑地形影响的线性回归方法,该方法是先确定大气相位与地形之间的线性关系,然后利用该关系去除大气相位,去除后的干涉图中远场地区的相位信息比较光滑,因此,认为得到的差分干涉图中仅包含了形变的相位,最后再将干涉图转为形变图。由于得到的形变图为雷达坐标系下的视线向形变图,需将形变图进行地理编码(图 1),将只包含形变信息的结果进行重采样处理,使两个不同平台获得的结果具有相

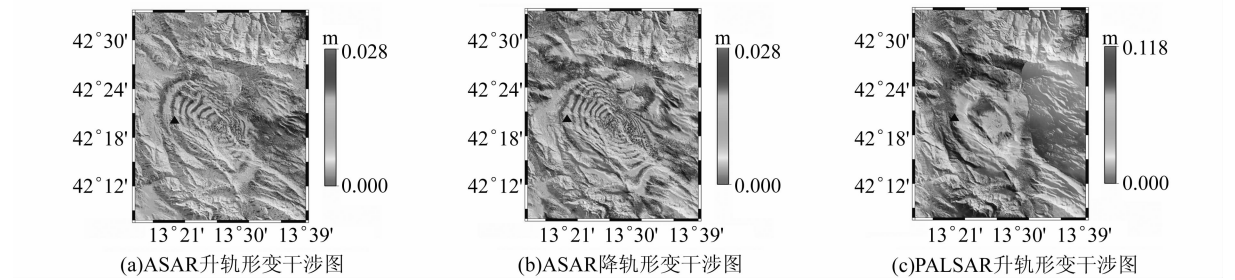


图 1 形变干涉图(三角符号表示 USGS 的震中位置)

Fig. 1 Deformation Interferograms(the Triangle Represents the USGS Position of the Epicenter)

同的分辨率且像元具有一一对应关系。

2 三维同震形变解算

经过 DInSAR 处理,已经得到了 3 个不同视线方向的形变。3 种数据都覆盖了绝大部分的前震和余震信息,且在主震前后的长时间跨度内没有发生其他大的地震,因此,在解算地表三维形变时,认为该 3 种数据所检测到的地表形变为主震

引起的形变。假定拉奎拉地震的同震三维形变量为 $\text{def}=[d_N,d_E,d_{Up}]^T$,其中, d_N 、 d_E 和 d_{Up} 分别代表南北、东西和竖直方向的形变量。ASAR 升、降轨以及 PALSAR 升轨的形变量为 $\boldsymbol{D}_{\text{LOS}}=[D_{\text{LOS}}^1,D_{\text{LOS}}^2,D_{\text{LOS}}^3]^T$,对应的视线方向的单位向量 $\boldsymbol{U}=[u_1,u_2,u_3]^T$ 。根据雷达观测的空间几何特征(图 2)得到视线向和三维形变量转换关系为:

$$\boldsymbol{D}_{\text{LOS}}=\boldsymbol{U}\cdot\text{def}\tag{2}$$

其中,

$$\boldsymbol{U}=\begin{bmatrix}-\sin\theta_{AA}\cdot\cos(\alpha_{AA}-\frac{3}{2}\pi),-\sin\theta_{AA}\cdot\sin(\alpha_{AA}-\frac{3}{2}\pi),\cos\theta_{AA}\\-\sin\theta_{AD}\cdot\cos(\alpha_{AD}-\frac{3}{2}\pi),-\sin\theta_{AD}\cdot\sin(\alpha_{AD}-\frac{3}{2}\pi),\cos\theta_{AD}\\-\sin\theta_{PA}\cdot\cos(\alpha_{PA}-\frac{3}{2}\pi),-\sin\theta_{PA}\cdot\sin(\alpha_{PA}-\frac{3}{2}\pi),\cos\theta_{PA}\end{bmatrix}$$

式中, θ_{AA} 、 θ_{AD} 和 θ_{PA} 为 ASAR 影像升、降轨和

PALSAR 影像升轨的入射角。

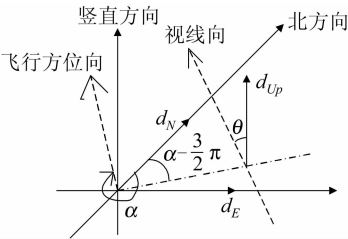
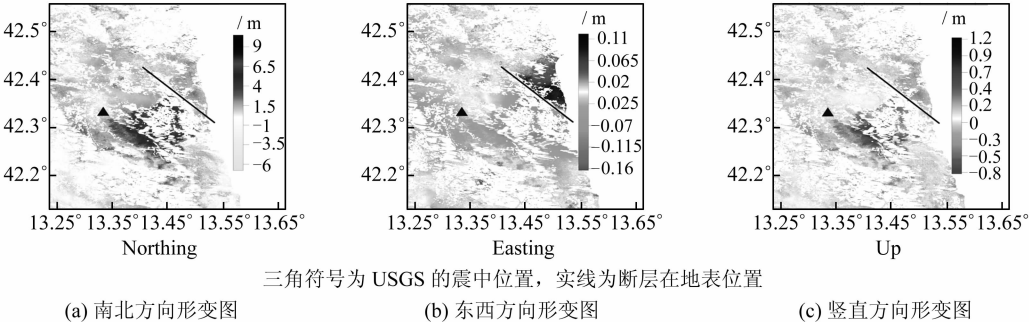


图 2 雷达成像几何示意图
Fig. 2 Geometry of SAR Imagery

在同一图像中,像元之间的雷达入射角差别较小,其引起的误差不会影响三维形变的求解精度^[9],为方便计算,选取各图像中心像元的入射角 22.77°、22.72°和 38.73°作为解算时的入射角。同

一图像中所有像元的卫星飞行方位角相同,因此,ASAR 影像升、降轨和 PALSAR 影像升轨的飞行方位角 α_{AA} 、 α_{AD} 和 α_{PA} 对应值分别为 343.61°、196.41°和 349.98°。

通过以上关系构建了包含 3 个未知参数的方程组,可以很容易解算得到 3 个未知参数,即三维形变量。在解算的过程中,考虑到低相干点的精度较差,会影响解算精度,因此,相干性低于 0.3 的点不参与解算。经过解算,得到了拉奎拉地震的三维同震形变场(图 3)。考虑到两个平台数据所覆盖区域的差别,在解算三维形变时,只解算了共同覆盖区域的部分。



三角符号为 USGS 的震中位置,实线为断层在地表位置

图 3 首次估计的拉奎拉地震的三维同震形变场
Fig. 3 Initial Estimated 3D Deformation

图 3 表明,其形变主要集中在图像中部的 30 km²范围内的震中地区。其中,南北方向的最大形变量为 10.49 m,东西方向的最大形变量为 -0.16 m,竖直方向的最大形变量达到 1.22 m。同时可以看出,在震中区域,地表出现了东南方向的水平错动,而在断层周围的竖直方向和南北方向的形变场所表现出来的形变特征并不明显。

众所周知,雷达视线向形变来自于南北、东西和竖直方向形变的贡献。而 ENVISAT 卫星及 ALOS 卫星的飞行特点决定了其在南北方向形变检测的能力较差。由式(2),南北方向对视线向形变贡献系数分别为: -0.109 2、-0.109 3、-0.108 8。由于南北方向形变对视线向形变贡献较小,在从视线方向形变反算南北方向形变过程中,视线向形变数据的错误或者误差会放大,使南北方向的解算精度降低,故在解算东西和竖直方向形变的同时解算南北方向形变,也必然使东西和竖直两个方向形变偏差较大。为得到更精确的东西和竖直方向的形变,假设南北方向形变对雷达视线向形变的贡献忽略不计,此时,视线向形变与东西和竖直方向形变的关系为:

$$\mathbf{D}_{LOS} = \mathbf{U}_{EU} \cdot \mathbf{def}_{EU} \quad (3)$$

式中,

$$\mathbf{U}_{EU} = \begin{bmatrix} -\sin\theta_{AA} \cdot \sin(\alpha_{AA} - \frac{3}{2}\pi), \cos\theta_{AA} \\ -\sin\theta_{AD} \cdot \sin(\alpha_{AD} - \frac{3}{2}\pi), \cos\theta_{AD} \\ -\sin\theta_{PA} \cdot \sin(\alpha_{PA} - \frac{3}{2}\pi), \cos\theta_{PA} \end{bmatrix},$$
$$\mathbf{def}_{EU} = [d_E, d_{Up}]^T$$

从上式可以看出,对东西和竖直两个方向解算时,出现了多余观测值,本文采用最小二乘的方法对东西和竖直方向形变场进行求解,得到的两个方向的形变为:

$$\mathbf{def}_{EU} = (\mathbf{U}_{EU}^T \mathbf{P} \mathbf{U}_{EU})^{-1} \mathbf{U}_{EU}^T \mathbf{P} \mathbf{D}_{LOS} \quad (4)$$

式中, \mathbf{P} 为解算时观测值的权阵,为了简化计算,本文按等权进行计算。

经过解算,估算得到的东西和竖直方向的同震形变场如图 4 所示。

将得到的南北方向初始形变场和最小二乘方法求得的东西、竖直方向形变场作为最终的地表同震三维形变场。从图 4 中可以发现,在东西方向形变场的下半部,地表发生了向西方向的移动,上半部则发生了向东方向的移动,且可看到明显的形变错动。在竖直形变场的右上方,地表表现为很小的上升运动,而在左下方,地表表现为沉

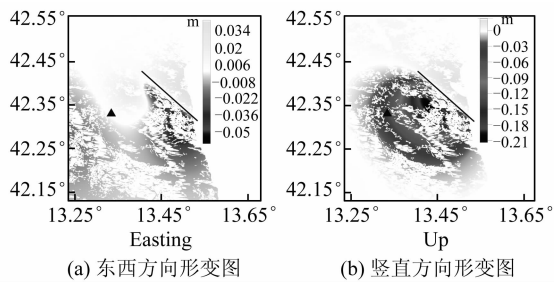


图 4 重新估计的东西和竖直方向形变
Fig. 4 Reestimated Easting and Up Deformation

降,其中最大沉降量达到了 0.242 m,地表同样也发生了错动,且与东西方向的错动位置吻合得较好,表明错动位置就是断层位置。综合三维形变场的特征,认为该次地震的发震断层为右旋走滑

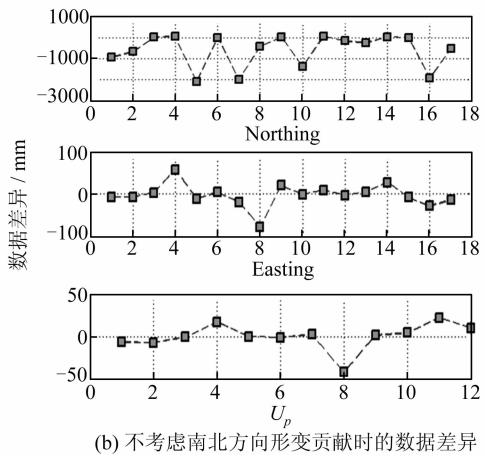
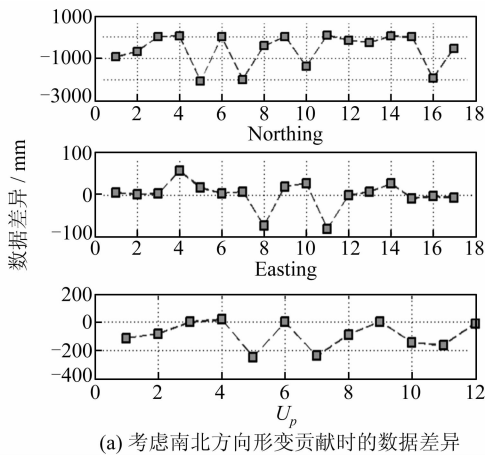


图 5 三维变形数据与 GPS 测站三维变形数据差异
Fig. 5 Comparison Between Estimated Deformation and GPS Sites 3D Deformation

考虑南北方向贡献时的结果与 GPS 对比后,计算得到的 3 个方向 RMS 中东西方向的最小为 3.2 cm,竖直方向为 12.8 cm,最大的是南北方向为 96.4 cm。可见,考虑南北方向贡献时,获取的东西方向的形变量精度最高,而南北方向的最低。

在不考虑南北方向形变的贡献时,得到的东西和竖直方向的 RMS 得到了很大的改善,其中,竖直方向的最小为 1.5 cm,而东西方向的为 2.7 cm。同时可以发现,绝大部分的三维数据与 GPS 数据比较吻合,只有几个点的数据偏差较大。经过分析,造成这几个点偏差较大的原因可能是,在三维形变解算之前,DInSAR 数据的形变信息中仍然包含部分残差相位。

由此可见,利用不同平台、不同轨道 DInSAR 数据所获取的拉奎拉地震的同震三维形变场比较可靠,且具有较高的精度。

随着不同平台雷达图像数据的增加,可观测

的正断层,与地质调查的结果非常一致^[10]。

3 结果精度分析

为了验证用以上方法获取拉奎拉地震三维同震形变场的可靠性和精度,将所得两次结果分别与实际的 GPS 测站数据进行比较,GPS 数据来源于文献[11]。在此覆盖区域,共有 17 个水平观测站和 12 个竖直观测站数据。

将各点三维变形数据与 GPS 测站三维变形数据作差。图 5 为作差结果,图 5(a)为考虑南北方向形变贡献时的作差结果图;图 5(b)为不考虑南北方向形变贡献时的作差结果图),然后求其均方根(RMS)。

得到的视线向形变越来越多。为更好地将多平台数据相融合,求取高精度的三维形变场,可同样利用三维形变与视线向形变的几何关系,运用最小二乘方法直接求解 3 个方向的形变场。

致谢:研究所用的 SAR 数据分别由欧洲航天局(ESA)和日本宇航局提供;ASAR 精轨数据由欧空局项目提供。

参 考 文 献

[1] Anzidei M, Boschi E, Cannelli V, et al. Coseismic Deformation of the Destructive April 6, 2009 L'Aquila Earthquake (Central Italy) from GPS Data[J]. Geophysical Research Letters, 2009, 36, L17307, doi:10.1029/2009GL039145

[2] Atzori S, Hunstad I, Chini M, et al. Finite Fault Inversion of DInSAR Coseismic Displacement of the 2009 L'Aquila Earthquake (Central Italy)[J]. Geophysical Research Letters, 2009, 36, L15305, doi: 10.1029/2009GL039293

[3]

Pino N A, Luccio F D. Source Complexity of the 6 April 2009 L’Aquila (Central Italy) Earthquake and Its Strongest Aftershock Revealed by Elementary Seismological Analysis[J]. Geophysical Research Letters, 2009, 36, L23305, doi: 10. 1029/2009GL041331

[4]

Istituto Nazionale Di Geofisica E Vulcanologia (INGV). Measurement and Modeling of Co-seismic Deformation During the L’Aquila Earthquake, Preliminary Results[R]. National Earthquake Center of Italy, Rome, 2009

[5]

Walters R J, Elliott J R, D’Agostino N, et al. The 2009 L’Aquila Earthquake (Central Italy): A Source Mechanism and Implications for Seismic Hazard[J]. Geophysical Research Letters, 2009, 36, L17312, doi:10. 1029/2009GL039337

[6]

Wang Yongzhe, Ou Ziqiang, Zhu Jianjun, et al. Coseismic Deformation of 2009 L’Aquila, Italy Earthquake Derived from Ascending and Descending ENVISAT/ASAR Images[C]. The 6th International Conference on Wireless Communications, Networking and Mobile Computing, WiCOM 2010, Chengdu, 2010

[7]

刘国祥. 利用雷达干涉技术监测区域地表形变[M]. 北京:测绘出版社, 2006

[8]

Li Zhiwei, Ding Xiaoli, Huang C, et al. Improved Filtering Parameter Determination for the Goldstein Radar Interferogram Filter[J]. ISPRS Journal of Photogrammetry & Remote Sensing, 2008, 63: 621-634

[9]

胡俊, 李志伟, 朱建军, 等. 融合升降轨 SAR 干涉相位和幅度信息揭示地表三维形变场的研究[J]. 中国科学:地球科学, 2010, 40(3): 307-318

[10]

Emergeo Working Group. Rilievi Geologici di Terreno Effettuati Nell’area Epicentrale Della Sequenza Sismica Dell’Aquilano del 6 Aprile 2009[R]. INGV report, Ist, National Earthquake Center of Italy, Rome, 2009

[11]

Cheloni D, D’Agostino N, D’Anastasio E, et al. Coseismic and Initial Post-seismic Slip of the 2009 Mw 6. 3 L’Aquila Earthquake, Italy, from GPS Measurements[J]. Geophysical Journal International, 2010, 181:1 539-1 546

第一作者简介:王永哲,博士生,主要从事 InSAR 形变及震源参数反演研究。
E-mail: yongzhe. wang@csu. edu. cn

Coseismic Three-dimensional Deformation of L’Aquila Earthquake Derived from Multi-platform DInSAR Data

WANG Yongzhe¹ LI Zhiwei¹ ZHU Jianjun¹ HU Jun¹

(1 School of Geosciences and Info-Physics, Central South University, 932 South Lushan Road, Changsha 410083, China)

Abstract: Differential Synthetic Aperture Radar Interferometry (DInSAR) can only measure one-dimensional deformation of surface along Radar line-of-sight (LOS). However, surface changes always exhibit three-dimensional (3D) characteristics. This paper presents a method to estimate 3D deformation of L’Aquila earthquake by combining multi-platform DInSAR LOS data based on the imaging geometry of Radar. The characters of the surface reflected by the 3D deformation are very consistent with the geological exploration. The 3D deformation was also compared with real GPS survey, and the results demonstrate that the 3D surface deformation fields are reliable and with high accuracy.

Key words: L’Aquila earthquake; DInSAR; 3D deformation; multi-platform

About the first author: WANG Yongzhe, PhD candidate, his research interests include InSAR deformation and source parameters inversion.
E-mail: yongzhe. wang@csu. edu. cn