

王家庆,单新建,张国宏,等. 2017 年九寨沟 $M_s7.0$ 地震 InSAR 同震形变场与断层滑动分布反演[J]. 华北地震科学,2018,36(2):1-7.

2017 年九寨沟 $M_s7.0$ 地震 InSAR 同震形变场与断层滑动分布反演

王家庆^{1,2},单新建²,张国宏²,吕 健¹,申 星¹

(1. 中国地震局第一监测中心,天津 300180; 2. 地震动力学国家重点实验室 中国地震局地质研究所,北京 100029)

摘要:联合升、降轨 Sentinel-1A 卫星的差分干涉数据反演 2017 年 8 月 8 日四川九寨沟 $M_s7.0$ 地震的断层滑动分布。首先对 SAR 复数干涉像对进行“三通”差分干涉处理,获取了覆盖震区的多视向 InSAR 同震形变场;然后利用四叉树和均匀采样法分别进行近、远场数据降采样,在此基础上,利用弹性半空间矩形位错模型,反演发震断层的几何参数和最优滑动分布。结果显示:① InSAR 干涉条纹呈蝶状分布,最大 LOS 向沉降和抬升形变量分别为 -20.3 cm、 11.3 cm;② 发震断层以左旋走滑为主兼有少量正断运动,断层走向为 154° ,倾角为 82° ;③ 断层滑动分布集中在 $2\sim 15$ km 深度,平均滑动角为 -22° ,最大滑移量约为 0.68 m,位于沿断层面深约 9 km 处,地震释放的能量约为 9.6×10^{18} N·m($M_w6.6$),与测震学的研究结果基本一致。

关键词:2017 年九寨沟 $M_s7.0$ 地震;InSAR;多视向;滑动分布

中图分类号:P315.5

文献标志码:A

文章编号:1003-1375(2018)02-0001-07

doi:10.3969/j.issn.1003-1375.2018.02.001

0 引言

北京时间 2017 年 8 月 8 日 21 时 19 分,四川阿坝州九寨沟发生 $M_s7.0$ 地震。震中位于(103.82° E, 33.20° N),震源深度约为 20 km,最大烈度为 IX 度^[1],九寨沟景区遭受到较大的破坏。地震发生后,多家研究机构发布了相关应急处置产品报告。中国地震局地球物理研究所发布的震源机制解^[2]表明这是一次走滑型地震,两节面走向分别为 NE 和 NW,与 USGS^[3]、GCMT^[4]等结果基本一致(表 1);徐锡伟等人^[5]推测发震构造为塔藏断裂南侧分支和虎牙断裂北段;中国地震台网中心(CENC)发布的余震精定位图^[1]显示,震后约 3 d 内的余震主要呈 NNW 分布,深度集中在 $5\sim 25$ km。此次地震发生在青藏高原东缘、巴颜喀拉块体东北边界,是青藏高原向四川盆地的过渡地带(图 1)。此处地质构造背景复杂,具有褶皱断裂发育、新构造运动强烈、地壳抬升幅度大等特点,多种应力交错复合,造就了如角峰、刃脊、冰斗、U 字谷、悬谷、槽谷等十分典型的地形地貌,是南北地震带北段强震破裂空段的高危区^[6]。

因此,深入认识此次地震破裂的机制和动力学过程是十分必要的。

InSAR 因其具有的高空间分辨率、全天候和全天候工作能力等优势,已被广泛用于地震形变监测和震源参数反演研究中^[7-12]。单新建等人^[13]于震后一周即发布了基于单轨 InSAR 数据的九寨沟地震断层滑动分布等应急产品;其后,季灵运^[14]、张旭^[15]也分别利用 InSAR 数据做了震源参数和震源破裂等相关研究,但均只利用了覆盖震中主形变区的 InSAR 数据,没有考虑远场数据的约束。本文将利用升、降轨 Sentinel-1A 卫星数据获取覆盖震区的多视向同震形变场,综合近、远场数据,并基于弹性位错模型反演发震断层的滑动分布。

1 InSAR 同震形变场

1.1 数据准备

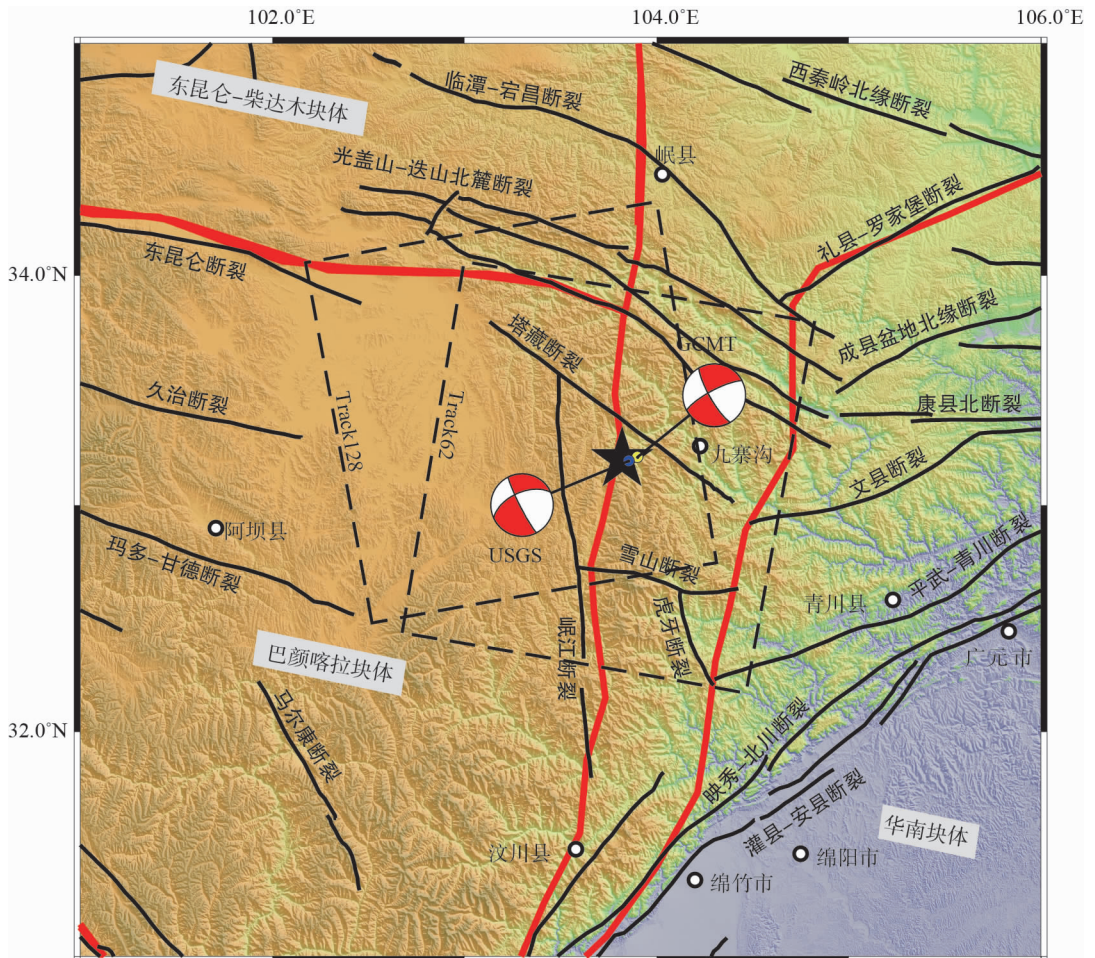
受到数据源的限制,本文选用免费开放的欧空局 Sentinel-1A 宽幅 SAR 数据进行差分干涉处理。为获取完整的同震形变信息,本研究挑选出覆盖整个形变区且时间基线较短、空间基线距较小的 2 个

干涉像对,干涉像对各参数如表 2 所示。Sentinel-1A 干涉宽幅成像 (IW) 模式是采用滑动扫描方式 (TOPS, Terrain Observation with Progressive Scans) 来获取 3 个子条带 (Swath), 幅宽约为 250 km, 分辨率 $5\text{ m} \times 20\text{ m}$ 。相比于传统的扫描或聚束成像模式, TOPS 模式可以明显改善 ScanSAR

存在的扇贝效应问题,且方位向模糊度和信噪比沿方位向约为常数,能够获取更优质的影像,同时其具有的波束扫描和波束转动特点,也使信号特性更加复杂^[17],因此在使用 TOPSAR 数据进行干涉处理时,需要非常高的复数图像配准精度(一般优于 0.02 个像元)。

表 1 不同机构发布的九寨沟地震震源机制解

来源	震中位置		深度/ km	节面 I			节面 II			震级
	经度/(°E)	纬度/(°N)		走向/(°)	倾角/(°)	滑动角/(°)	走向/(°)	倾角/(°)	滑动角/(°)	
GCMT	103.900	33.021	14.9	242	77	-168	150	78	-13	$M_w 6.5$
USGS	103.855	33.193	13.5	246	57	-173	153	84	-33	$M_w 6.5$



注:黑色五角星为 CENC 测定的震中位置,红实线为块体边界,黑实线表示断裂^[16];

黑色虚线框为本文采用的 Sentinel-1A 升轨(Track128)和降轨(Track62)数据中 2 个子条带 InSAR 覆盖范围。

图 1 九寨沟地震区域构造背景图

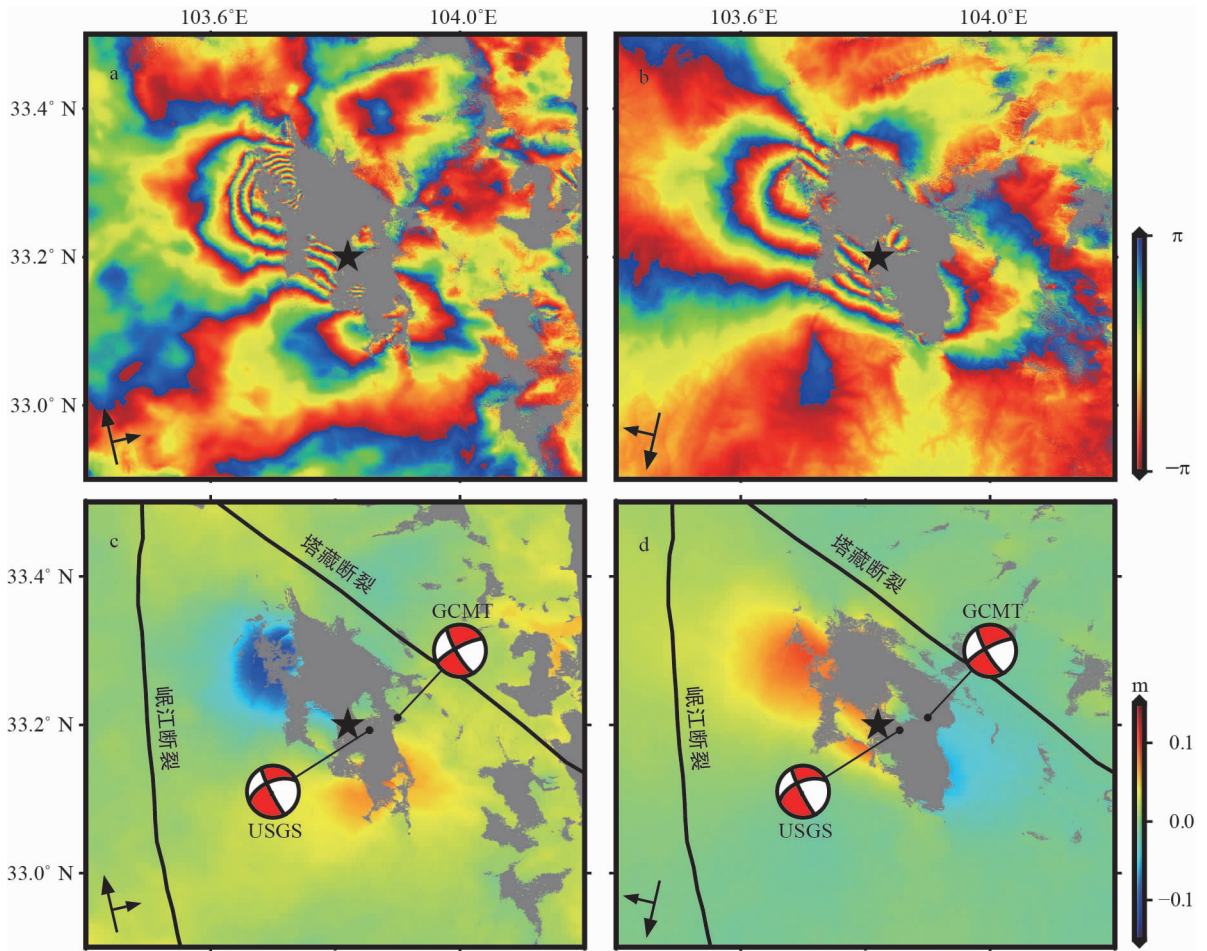
表 2 九寨沟地震 SAR 数据

Track	起止日期	入射角/(°)	垂直基线距/m	模式	波段	时间基线/d
128	2017-07-30/2017-08-11	39.2	36.0	升轨	C	12
62	2017-08-06/2017-08-18	39.2	34.0	降轨	C	12

1.2 同震形变场

对于 Track128(升轨)和 Track62(降轨)干涉像对,本文采用“二通”差分法对覆盖震中的 2 个子条带 SAR 复数影像进行干涉差分处理,其中使用 SRTM4 DEM 数据消除地形相位影响。为保证较高的配准精度,采用结合轨道和地形数据的图像配准技术,配准精度优于 0.001 个像元。由于九寨沟群山环绕,雷达影像在山区易出现的叠掩、透视收缩、阴影以及地表茂密植被等影响,导致研究区部分区域相干性较差,为此本文使用迭代自适应滤波算法进行降噪处理^[18]。经过相位解缠和地理编码,并对低相干区和雷达阴影部分进行掩膜处理后,获取了覆盖范围约 165 km × 170 km 的视线向(LOS, Line of sight)形变场。震中区干涉条纹图和视线向

形变场如图 2 所示,Track128 的条纹相比于 Track62 的较为稠密,震中西侧条纹数量明显多于东侧,说明西侧的形变梯度较大。尽管不同的成像模式必然会导致干涉条纹和形变场表现出迥异的空间分布特征和量级,但从图 2 中仍可看出:Track128 和 Track62 的干涉条纹均呈蝶状,具有明显的四象限特征,表现为十分典型的走滑型地震变形特征^[19-22];从相对于卫星的视线向上升和下沉的分布特征,可判断这是一次左旋走滑事件。此次地震造成的主要地表形变区约为 45 km × 55 km,最大 LOS 向沉降(Track128)和最大抬升(Track62)形变量分别为 -20.3 cm、11.3 cm,其中 Track128 的量级与单新建等人^[13]的结果相当。



注:a、b 分别为震中区的升轨(Track128)、降轨(Track62)InSAR 干涉条纹图;c、d 分别为对应区域的 LOS 向形变场;黑色五角星表示 CENC 测定的震中位置。

图 2 九寨沟地震多视向形变场

2 震源参数反演

雷达差分干涉测量获取的同震形变以高空间分辨率图像形式表达,其形态特征与发震断层的运动模式、传感器的观测模式等密切相关。通过建立高分辨率地表形变与断层特征参数之间的函数关系,可以更为精细地研究震源破裂过程。根据线弹性位错理论^[23],可以建立观测数据与断层滑动分布的关系:

$$y = Gb + \epsilon \quad (1)$$

式中: y 和 b 分别为观测数据和离散的滑动分布; G 为联系位错模型和观测数据的格林函数; ϵ 为观测误差。通常使用9个参数来描述断层位错,包括走向、倾角、滑动量、滑动角、起始点经度和纬度、长度、宽度、深度。对式(1)的求解,一般采用附加光滑约束限制的最小二乘拟合算法。在求解过程中,如果断层模型的9个特征参数均作为未知数,则反演过程会呈现高度非线性化。为了提高反演计算效率及将问题线性化,需要先确定断层模型的几何结构;同时,由于InSAR形变数据是二维连续分布且数据量巨大,对于反演需求而言,存在较高的信息冗余;再考虑到计算效率和反演的可行性,有必要进行数据降采样。但在同等条件下,作为约束条件的观测数据集越多,断层滑动分布反演结果的可靠性越高^[24-25]。故本文选择同时使用Track128和Track62同震LOS向形变场(图6a、6d)进行约束,先使用二叉树法对近场数据进行降采样,在降低数据量的同时有效保留原有形变场的细节特征,保证对断层几何参数的约束能力;再使用均匀采样法采集远场形变数据,形成对断层深部滑动的有效约束。

2.1 断层几何模型

通常,断层模型的几何参数可以从对地表破裂带的调查信息中获取,或者基于均匀滑动模型的反演得到最佳拟合的断层几何参数,还可以利用连续分布的InSAR干涉条纹或形变分布特征来判定发震断层的大致走向。震中区干涉条纹呈蝶状分布(图2),长轴走向为NW-SE,结合震源机制解,可以认为发震断层应基本符合节面II的参数特征。本文假设断层面穿过USGS给出的震中位置(103.855°E,33.193°N),并沿走向分别向两侧伸展25 km。设定断层面上边界到达地表,下边界为沿断层面向下拓展至40 km,并将断层走向变化范围限制在145°~175°,倾角变化范围设为70°~90°,进行多次反演试验,选取拟合残差均方根误差最小和模数相关度最高的走向和倾角组合作为最优值,最

终选定发震断层的走向和倾角分别为154°、82°。

2.2 同震断层滑动分布

在确定断层几何参数之后,发震断层的滑动分布反演则变成了一个附加约束条件的线性过程。本文采用汪荣江教授开发的SDM程序^[24]进行反演计算。SDM程序是利用梯度下降法进行反演计算,即利用负梯度方向来决定每次迭代的搜索方向,使得每次迭代能使待优化的目标函数逐步减小^[25-26]。为获得更为精确的断层滑动分布,本文将断层面上的非均匀滑动在整个破裂面上进行分段或区域平均,即将断层面离散成2 km×1 km的矩形元。为避免断层滑动分布出现振荡或过度光滑的情况,还需要寻求数据拟合残差和光滑因子之间的折中,本文通过测试,拟合出折中曲线并确定最佳光滑因子为0.1(图3)。滑动角的范围设定则依据震源机制解(表1),此次地震是以走滑破裂为主的运动性质,将其设为-180°~0°。最终以断层面内部各个矩形元的滑动角与滑动量作为反演目标。

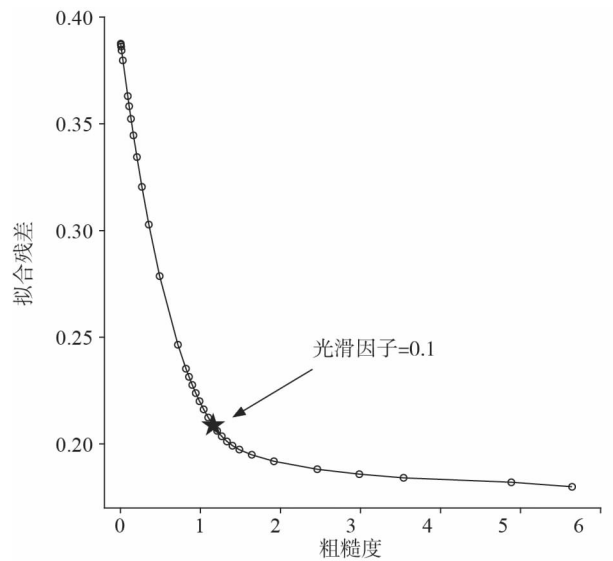


图3 数据拟合残差与粗糙度折中曲线

本文反演的九寨沟地震断层滑动分布如图4~5,可以清晰看出:同震滑动集中在沿断层面深2~15 km范围,沿走向长约25 km,破裂较为完全;断层错动以左旋走滑为主,随深度增加兼有少量正断运动,平均滑动角约-22°;最大滑动位移位于沿断层面约9 km深处,处于地下约7.5 km处,量值为0.68 m;发震断层面积较大,平均滑动量约为0.15 m。九寨沟地震释放的地震矩约为 9.6×10^{18} N·m,根据经验公式^[27],相当于 M_w 6.6。

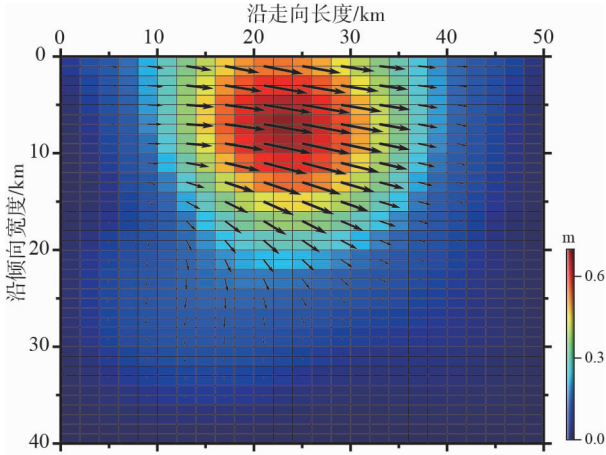


图 4 断层滑动分布平面图

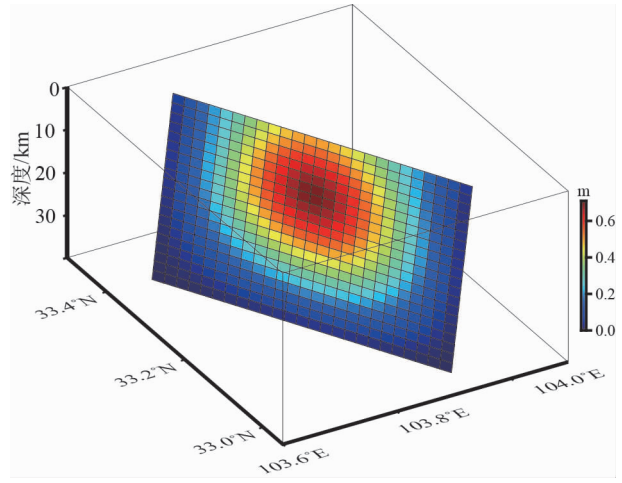
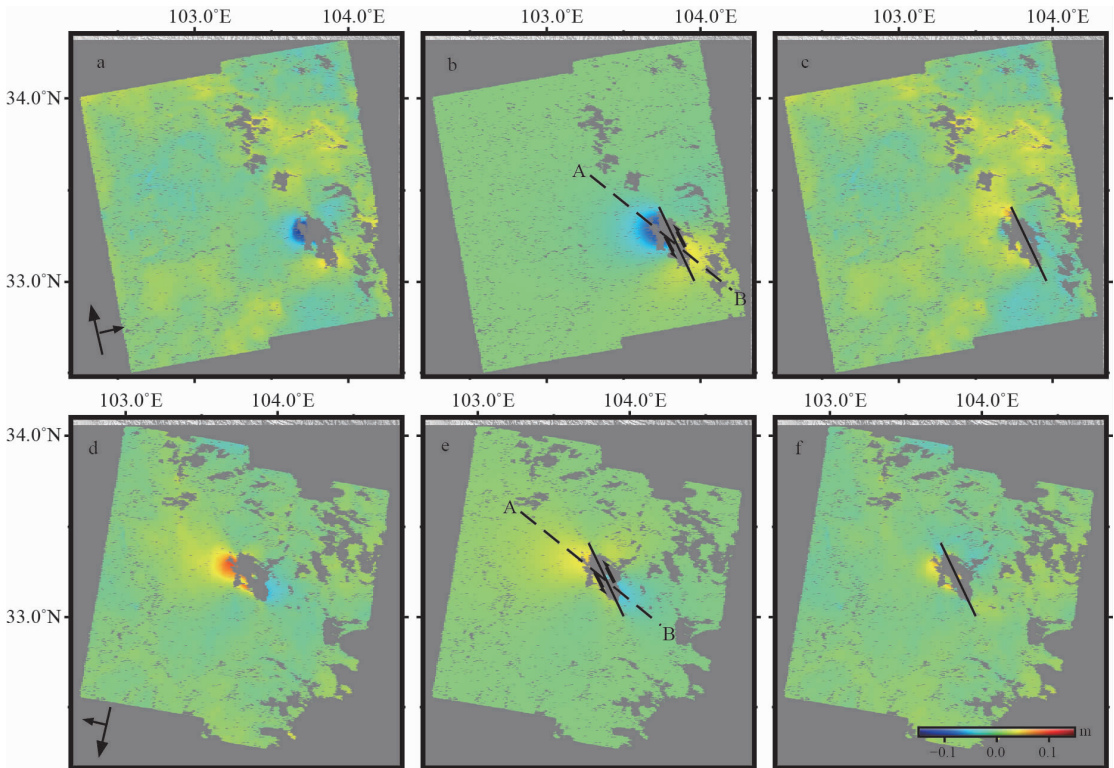


图 5 九寨沟地震断层滑动分布三维示意图

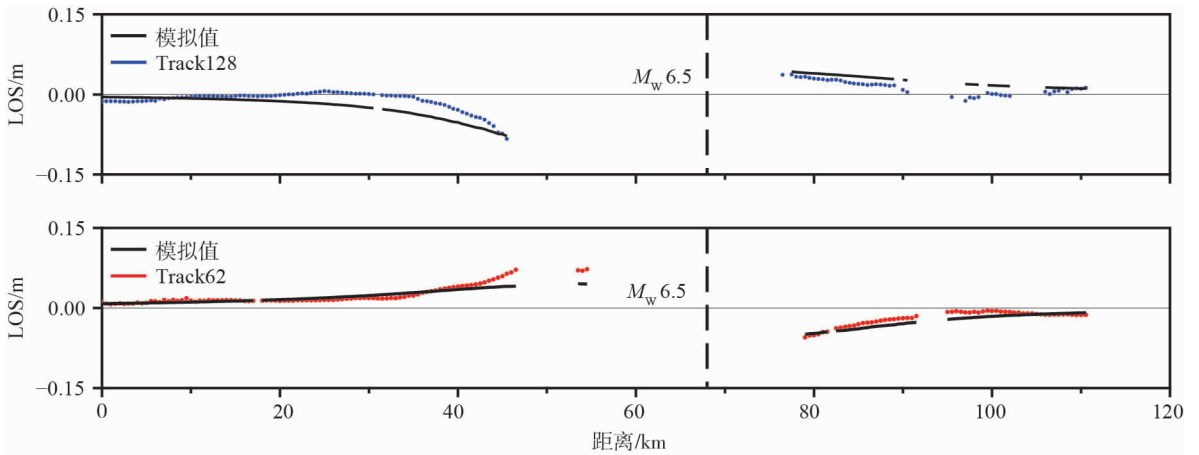
为检验结果的可信度,本文利用反演断层模型拟合了同震 InSAR 形变场,拟合结果及残差分布如图 6 所示。观测数据与模型的相关度达 98.4%,主要形变特征得到较好的拟合。从残差分布可见绝大部分小于 8 cm,Track128 和 Track62 的数据拟合残差均方根(RMS, Root mean square error)分别为 1.2 cm、0.7 cm。此外,本文提取了跨断层的一条剖面线上的观测结果和模拟值进行比较(图 7),可以看出升、降轨数据的拟合残差均较小,本文断层模型

可以较好地解释同震 InSAR 形变场。在这两个轨道数据的拟合结果中,远场数据的拟合均优于近场,这主要是由于震中附近相干性较差导致的形变数据缺失和近场破裂情况较为复杂所致。同时升轨(Track128)干涉图在远离震中的 NE 向分布着一些大的残差,对比观测数据,发现两者形态相似,应是干涉数据中可能含有的大气延迟相位或其他非同震形变噪声引起的影响,并不影响反演结果的稳定性。



注:a、d 分别是升轨(Track128)、降轨(Track62) InSAR 同震形变场;
b、e 为对应的模拟形变场,黑色实线为发震断层在地表的位置;虚线为跨发震断层的剖面线位置;c、f 为残差图。

图 6 模拟形变场与残差分布图



注:图中虚线为发震断层位置

图7 断层剖面(图6中虚线)LOS向形变及其模拟值

3 结论

本文利用欧空局 Sentinel-1A 升、降轨 SAR 影像,经过差分干涉处理,获取了 2017 年四川九寨沟 $M_s 7.0$ 地震的多视向 InSAR 同震形变场,并联合多视向 InSAR 形变数据,反演了发震断层的几何参数和最优滑动分布,得到了以下认识。

1) 九寨沟地震的 InSAR 干涉条纹呈蝶状分布,具有明显的四象限特征,结合震源机制解中的节面走向,判断这是一次左旋走滑事件;干涉图显示最大 LOS 向

“沉降”和“抬升”形变量分别为 -20.3 cm 、 11.3 cm 。

2) 观测数据与反演结果的相关度达 98.4%,发震断层走向 154° ,倾角 82° 。断层错动以左旋走滑为主,随深度增加兼有少量正断运动,平均滑动角为 -22° ,最大滑移量约为 0.68 m,位于沿断层面深约 9 km 处,表明此次地震是一次以走滑为主兼有少量正断分量的事件,与单新建等人^[13]结果基本一致。此次地震的标量地震矩为 $9.6 \times 10^{18} \text{ N} \cdot \text{m}$,等同于 $M_w 6.6$,与震后 USGS^[3]、GCMT^[4]等发布的测震学结果基本一致。

致谢:感谢审稿专家对本文提出的宝贵建议和意见;本文所使用的 Sentinel-1A SAR 数据由欧空局 (ESA) 提供,文中图件使用 GMT5.0 (Generic Mapping Tools) 绘制。

参考文献:

- [1] 中国地震台网中心. 四川阿坝州九寨沟 7.0 级地震综合图集[EB/OL]. (2017-08-08)[2017-10-30]. <http://www.csi.ac.cn/manage/eqDown/05LargeEQ/201708082119M7.0/zonghe.html>.
- [2] 中国地震局地球物理研究所. 2017 年 8 月 8 日九寨沟 7.0 级地震[EB/OL]. (2017-08-11)[2017-10-30]. <http://www.cea-igp.ac.cn/tpwx/275881.html>.
- [3] USGS. M6.5-36 km WSW of Yongle, China [EB/OL]. (2017-08-08)[2017-10-30]. <https://earthquake.usgs.gov/earthquakes/event-page/us2000a5x1#moment-tensor>.
- [4] GCMT. 201708081319A GANSU, CHINA[EB/OL]. (2017-08-08)[2017-10-30]. <http://www.globalcmt.org/cgi-bin/globalcmt-cgi-bin/CMT4/form?itype=ymd&yr=2017&mo=8&day=8&otype=ymd&oyr=2017&omo=8&oday=8>.
- [5] 徐锡伟, 于贵华, 吴熙彦. 2017 年 8 月 8 日四川九寨沟 7.0 级地震区域地震构造图[EB/OL]. (2017-08-09)[2017-10-30]. <http://www.eq-igl.ac.cn/upload/images/2017/8/991724632.jpg>.
- [6] 梅秀苹, 邵志刚, 张浪平, 等. 南北地震带北段强震破裂空段的地震危险性研究[J]. 地震学报, 2012, 34(4): 509-525.
- [7] Massonnet D, Rossi M, Carmona C, et al. The displacement field of the Landers earthquake mapped by radar interferometry[J]. Nature, 1993, 364(6433): 138-142.
- [8] Wright T J, Parsons B E, Jackson J A, et al. Source parameters of the 1 October 1995 Dinar (Turkey) earthquake from SAR interferometry and seismic bodywave modelling[J]. Earth and Planetary Science Letters, 1999, 172(1/2): 23-37.
- [9] Shan X J, Ma J, Wang C L, et al. Co-seismic ground deformation and source Parameters of Mani M7.9 earthquake inferred from Spaceborne D-InSAR observation data[J]. Science in China Series D: Earth Sciences, 2004, 47(6): 481-488.

- [10] Qu C Y, Zhang G H, Shan X J, et al. Coseismic deformation derived from analyses of C and L band SAR data and fault slip inversion of the Yushu $M_s7.1$ earthquake, China in 2010[J]. *Tectonophysics*, 2013, 584: 119-128.
- [11] Zhang G H, Vallée M, Shan X J, et al. Evidence of sudden rupture of a large asperity during the 2008 $M_w7.9$ Wenchuan earthquake based on strong motion analysis[J]. *Geophysical Research Letters*, 2012, 39(17): L17303, doi: 10.1029/2012GL052516.
- [12] Lu Z. InSAR Imaging of volcanic deformation over cloud-prone Areas-Aleutian Islands[J]. *Photogrammetric Engineering & Remote Sensing*, 2007(3): 245-257.
- [13] 单新建, 屈春燕, 龚文瑜, 等. 2017年8月8日四川九寨沟7.0级地震 InSAR 初步分析结果[EB/OL]. (2017-08-15) [2017-10-30]. <http://www.eq-igl.ac.cn/upload/files/2017/8/15151711397.pdf>.
- [14] 季灵运, 刘传金, 徐晶, 等. 九寨沟 $M_s7.0$ 地震的 InSAR 观测及发震构造分析[J]. *地球物理学报*, 2017, 60(10): 4069-4082, doi: 10.6038/cjg20171029.
- [15] 张旭, 冯万鹏, 许力生, 等. 2017年九寨沟 $M_s7.0$ 级地震震源过程反演与烈度估计[J]. *地球物理学报*, 2017, 60(10): 4105-4116, doi: 10.6038/cjg20171035.
- [16] 邓起东, 张培震, 冉勇康, 等. 中国活动构造基本特征[J]. *中国科学(D辑)*, 2012, 32(12): 1020-1030.
- [17] 王玲军, 仇晓兰, 胡东辉. TOPSAR 模式特性分析及成像仿真[J]. *现代雷达*, 2013, 35(1): 15-18, 23.
- [18] Goldstein R M, Werner C L. Radar interferogram filtering for geophysical applications[J]. *Geophysical Research Letters*, 1998, 25(21): 4035-4038.
- [19] 夏耶. 巴姆地震地表形变的差分雷达干涉测量[J]. *地震学报*, 2005, 27(4): 423-430.
- [20] Wang R, Xia Y, Grosser H, et al. The 2003 Bam (SE Iran) earthquake: precise source parameters from satellite radar interferometry[J]. *Geophysical Journal International*, 2004, 159(3): 917-922.
- [21] 孙建宝, 梁芳, 徐锡伟, 等. 升降轨道 ASAR 雷达干涉揭示的巴姆地震($M_w6.5$)3D 同震形变场[J]. *遥感学报*, 2006, 10(4): 489-496.
- [22] 姚鑫, 张永双, 杨农, 等. 玉树地震地表变形 InSAR 观测及初步分析[J]. *地质力学学报*, 2010, 16(2): 129-136.
- [23] Okada Y. Internal deformation due to shear and tensile faults in a half-space[J]. *Bulletin of the Seismological Society of America*, 1992, 82(2): 1018-1040.
- [24] Wang R J, Lorenzo-Martín F, Roth F. Computation of deformation induced by earthquakes in a multi-layered elastic crust: FORTRAN programs EDGRN/EDCMP[J]. *Computers & Geosciences*, 2003, 29(2): 195-207.
- [25] 洪顺英, 刘智荣, 申旭辉, 等. 多视线向 InSAR 形变场约束的改则地震滑动分布反演[J]. *遥感学报*, 2015, 19(2): 288-301.
- [26] 畅柳, 杨博, 张风霜, 等. 基于 GPS 和水准数据的 2013 年芦山 7.0 级地震震源滑动模型[J]. *地震地质*, 2017, 39(3): 561-571.
- [27] 许忠淮, 李世恩. 地震学百科知识(二)——震源物理(下)[J]. *国际地震动态*, 2013(3): 34-40.

Fault Slip Distribution Inversion and Co-seismic Deformation of the 2017 Jiuzhaigou $M_s7.0$ Earthquake Based on InSAR

WANG Jia-qing^{1, 2}, SHAN Xin-jian², ZHANG Guo-hong², LYU Jian¹, SHEN Xing¹

(1. The First Monitoring and Application Center, CEA, Tianjin 300180, China;

2. State Key Laboratory of Earthquake Dynamics, Institute of Geology, CEA, Beijing 100029, China)

Abstract: An $M_s7.0$ earthquake struck Jiuzhaigou, Sichuan province on 8 August 2017. This work obtained two LOS co-seismic measurements by carrying out the “Two-pass” differential interferometry on two tracks (1 ascending and 1 descending) of ERS sentinel-1A images firstly; Then the co-seismic displacements located in near and far field were subsampled with Quad-tree sampling and uniform sampling methods, respectively. The fault slip distributions were built based on the rectangular dislocation model in an elastic half space from the subsampled measurements. The results show that: ① the both inteferograms display a similar butterfly shape caused by Jiuzhaigou earthquake, with the max amplitude of -20.3 cm and 11.3 cm, respectively. ② The seismogenic fault is dominated by left-lateral strike with little normal faulting, with strike of 154° and dip of 82° . ③ The fault slip is mainly happened in the depth between 2 km and 15 km, with maximum slip of 0.68 m located at 9km depth, and the average rake of -22° . The moments released by the earthquake is about 9.6×10^{18} Nm ($M_w6.6$), which is almost consistent with the seismology research.

Key words: the 2017 Jiuzhaigou $M_s7.0$ earthquake; InSAR; multi-incidence measurements; fault slip distribution