



引文格式:王乐洋,邹阿健.结合SAR和光学数据检索凯库拉Mw 7.8地震三维形变[J].武汉大学学报(信息科学版),2024,49(2):303-312.DOI:10.13203/j.whugis20210352

Citation: WANG Leyang, ZOU Ajian. Retrieving 3D Coseismic Deformation of 2016 Mw 7.8 Kaikoura Earthquake Using SAR and Optical Data[J]. Geomatics and Information Science of Wuhan University, 2024, 49(2): 303-312. DOI: 10.13203/j.whugis20210352

# 结合SAR和光学数据检索凯库拉Mw 7.8地震 三维形变

王乐洋<sup>1,2</sup> 邹阿健<sup>1</sup>

1 东华理工大学测绘与空间信息工程学院,江西 南昌,330013

2 自然资源部鄱阳湖区域矿山环境监测与治理重点实验室,江西 南昌,330013

**摘要:**地震的同震形变监测对于地震形变特征解释以及直观了解断层的几何特征具有重要意义。对于有地表破裂的大地震,GNSS(global navigation satellite system)技术空间分辨率较低,InSAR(interferometric synthetic aperture radar)技术由于大的形变梯度会发生相位失相干,均无法获得详细的断层周围形变。基于亚像素互相关技术的光学影像相关和像素偏移追踪能够很好地解决这些问题。以2016年凯库拉Mw 7.8级地震为例,使用哨兵2号数据获取东西向和南北向形变,使用哨兵1号数据获取距离向和方位向形变。为确定获取三维形变场的哨兵2号光学数据与哨兵1号SAR数据的最佳组合,将这些形变种类进行组合,并使用最小二乘方法计算三维形变。结果表明,OIC+POT\_As\_Des的组合最适合获取凯库拉地震三维形变,各种观测数据类型的结合能够较好地控制三维形变的效果和精度。对凯库拉地震的三维形变进行分析,结果表明,该地震在两个不同区域发生了巨大且复杂的地表位移,是一次右旋走滑为主带有逆冲的地震,垂直形变主要表现为抬升。研究成果可以为地表三维形变的研究提供参考。

**关键词:**光学影像相关;SAR像素偏移追踪;凯库拉地震;三维形变监测

中图分类号:P228

文献标识码:A

收稿日期:2021-06-29

DOI:10.13203/j.whugis20210352

文章编号:1671-8860(2024)02-0303-10

## Retrieving 3D Coseismic Deformation of 2016 Mw 7.8 Kaikoura Earthquake Using SAR and Optical Data

WANG Leyang<sup>1,2</sup> ZOU Ajian<sup>1</sup>

1 School of Surveying and Geoinformation Engineering, East China University of Technology, Nanchang 330013, China

2 Key Laboratory of Mine Environmental Monitoring and Improving Around Poyang Lake,  
Ministry of Natural Resources, Nanchang 330013, China

**Abstract:** Objectives: Co-seismic deformation monitoring is of great significance for the interpretation of co-seismic deformation characteristics and intuitive understanding of fault geometric characteristics. For large earthquakes with surface rupture, global navigation satellite system(GNSS) technique has a low spatial resolution, and interferometric synthetic aperture radar(InSAR) technology will cause phase decorrelation due to large deformation gradients, it is impossible to obtain specific deformation around the fault. Optical image correlation(OIC) and pixel offset tracking(POT) based on sub-pixel cross-correlation can solve these problems well. Methods: The main idea of the sub-pixel cross-correlation method is to use the pre-event image in the two images as a reference, and then compare the post-event image with it to evaluate the similarity between the two images, and then retrieve the displacement between the homonymous points. OIC can obtain east-west and north-south deformations, and POT can obtain range and azimuth deformations. In this paper, the deformation in each direction of the Kaikoura earthquake obtained from Sentinel-1 data and Sentinel-2 data is used to form different combinations, and the least square method is used

基金项目:国家自然科学基金(41874001,42174011,42104008);东华理工大学研究生创新基金(DHYC-202121)。

第一作者:王乐洋,博士,教授,主要研究方向为大地测量反演及大地测量数据处理。wleyang@163.com

to calculate the three-dimensional deformation. **Results:** The combination of OIC+POT\_As\_Des has the best constraint. The accuracy of the north-south deformation obtained by OIC+POT\_Range is not as good as that of OIC+POT\_As\_Des. Compared with POT\_As\_Des, the north-south deformation precision obtained by it is higher, and the deformation performance on the right side of the Kekerengu fault and the left side of the Papatea fault is also better. In the northeast of the Kaikoura earthquake epicenter, very complex and huge surface deformation and multiple ruptures were detected in two close areas, and the vertical deformation was mainly uplift. **Conclusions:** For Sentinel-1 and Sentinel-2, the combination of OIC+POT\_As\_Des is most suitable for obtaining the three-dimensional deformation of the Kaikoura earthquake. This earthquake is a dextral strike-slip earthquake with reverse.

**Key words:** optical image correlation; synthetic aperture radar(SAR) pixel offset tracking; Kaikoura earthquake; 3D deformation monitoring

地震形变监测可以提供断层的几何形状、地表形变以及释放的能量等信息,能够更好地了解地震灾害的具体情况。目前,有许多办法可以监测地震形变,使用最广泛的是全球导航卫星系统(global navigation satellite system, GNSS)和干涉合成孔径雷达(interferometric synthetic aperture radar, InSAR)<sup>[1-5]</sup>技术。对于有地表破裂的大地震,GNSS技术只能在特定数量的位置进行测量,这会导致GNSS技术测量的地震形变覆盖面积很小,空间分辨率较低,不能体现破裂位置附近的具体情况。InSAR技术对于较大地表形变,由于相邻像素之间的形变梯度超过一个相位周期会产生相位失相干<sup>[6]</sup>,无法获得破裂断层附近的形变。InSAR只能得到卫星视线向上的一维形变,它对沿卫星飞行轨道方向的形变十分不敏感。

Michel等<sup>[7]</sup>通过欧洲遥感卫星(Europe remote-sensing satellite, ERS)的合成孔径雷达(synthetic aperture radar, SAR)影像的亚像素互相关获取了Landers地震的二维形变场。Puymbroeck等<sup>[8]</sup>通过SPOT光学影像获取了Landers地震水平形变场,并分析了形变结果的误差。自此以后,基于互相关技术的光学影像相关(optical image correlation, OIC)和SAR像素偏移追踪(pixel offset tracking, POT)被应用到了不同地震的形变监测中<sup>[9-13]</sup>,文献[9]使用Radarsat-1 SAR数据得到了2002年阿拉斯加Mw 7.9地震距离向形变,文献[10]使用ALOS-2 SAR数据得到了2016年熊本地震的距离向和方位向形变,文献[11]使用Landsat 7 ETM+光学影像获取了2001年昆仑山Ms 8.1地震的东西向和南北向形变,文献[12]使用Landsat 8光学影像提取了2013年巴基斯坦Mw 7.7地震的水平形变场,并对结果的误差来源和误差处理进行了系统分析。不同于GNSS和InSAR技术,它们对于发生较大地表形变的地震的地表形变监测有较强的适用

性,SAR像素偏移追踪可以得到卫星距离向和方位向的形变场,光学影像相关可以得到东西向和南北向的形变场。

无论是SAR像素偏移追踪还是光学影像相关,均只能得到地表二维形变,地震的三维形变场可以观测断层的交叉,拐弯部分的复杂地表形变特征,为了能够探究地表形变最真实的情况,获取三维形变是很有必要的。目前三维形变已经有了较多的方法,其中主要包括:结合不同的入射角和方位角的多方向D-InSAR观测<sup>[14]</sup>,结合InSAR与多孔径InSAR(multi-aperture InSAR, MAI)<sup>[15]</sup>,结合InSAR和全球定位系统(global positioning system, GPS)<sup>[16]</sup>,结合InSAR与像素偏移追踪<sup>[17]</sup>,结合地应变特征与InSAR<sup>[18]</sup>,结合升降轨SAR影像像素偏移追踪<sup>[19]</sup>等。

2016-11-13T11:02:00(UTC),新西兰南岛东部凯库拉地区发生Mw 7.8地震,震中位置为42.757° S, 173.077° E,震源深度15.1 km。在Mw 7.8主震发生的9 h内,发生了多次余震,其中有4次6级以上。新西兰位于太平洋板块和澳大利亚板块交界处,地质构造复杂,板块运动较为活跃,容易发生地震活动。发生本次地震的新西兰南岛东北部地区,太平洋板块以40 mm/a的速度相对于澳大利亚板块向西南偏西移动<sup>[20]</sup>,如图1所示。此次地震产生了大范围的破坏,地震后产生了多个地表破裂,从震中北部的Humps断层开始出现,沿着Hundalee、Jordan Thrust、Papatea和Kekerengu等主要断层向东北传播,破裂总长度超过150 km,带来的浅海破裂在凯库拉附近引发的海啸高度达到1.5 m<sup>[21-22]</sup>。图1小图中红线为板块交界线,来自[http://peterbird.name/publications/2003\\_PB2002/2003\\_PB2002.htm](http://peterbird.name/publications/2003_PB2002/2003_PB2002.htm);白框为哨兵1号与哨兵2号影像范围;黑线为活动断层,蓝线为本次地震的破裂迹线,来自新西兰数据中心(<https://data.gns.cri.nz/af/>);浅红色圆

点以及蓝色沙滩球为余震,黑色沙滩球为主震,均来自美国地质调查局(United States Geological Survey, USGS)。

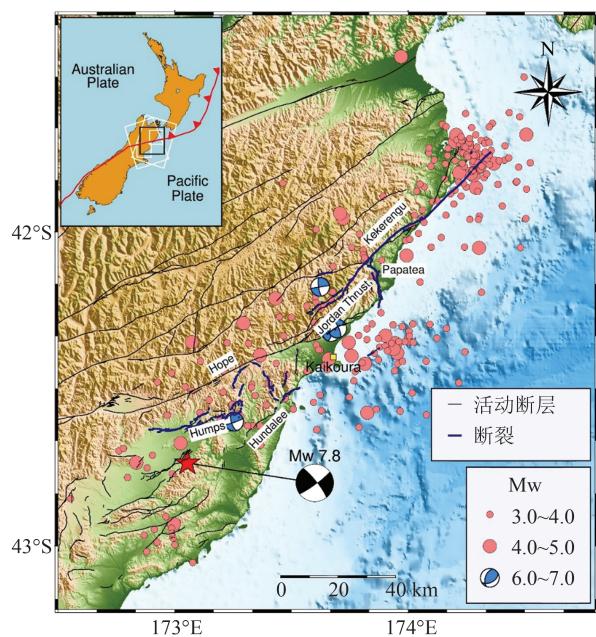


图 1 2016 年新西兰凯库拉地震背景图

Fig. 1 Background of 2016 Kaikoura Earthquake, New Zealand

本次地震产生了巨大的地表形变, InSAR 相位失相干情况十分严重<sup>[21,23]</sup>,许多方法都不适用于用来获取此次地震的三维形变。对于凯库拉地震,文献[24]利用 Planescape、Landsat 8 和哨兵2号通过光学影像相关获取了东西向和南北向形变场。文献[6]将光学影像相关技术与光线追踪方法结合,并应用到 Worldview 光学影像中获取三维形变。文献[19]结合哨兵 1 号与 ALOS-2 像素偏移追踪获取三维形变,文献[23]结合 ALOS-2 升降轨像素偏移追踪所得到的 4 个方向形变获取三维形变。这些文献使用了 ALOS-2 或者高分辨率的光学影像,由于它们对于个人并不那么容易获得,成本较高,而哨兵 1 号和哨兵 2 号数据均可以免费获取,且并未有结合光学影像和 SAR 影像来获取凯库拉地震三维形变的相关研究,本文主要通过结合哨兵 2 号光学影像相关与哨兵 1 号像素偏移追踪获取本次地震的同震形变场,它们提供了不同方向的同震形变,这些形变能够组成不同的获取三维形变的组合。为找到一个最好的组合,本文考虑这些形变的不同组合,不加权与加权情况,通过最小二乘方法来解算凯库拉地震破裂地区附近的地表三维形变,预期的结果将有助于了解地震地表破裂区域的形变情况,根据同震三维形变结果对凯库拉地震的形变和地表破裂情况进行分析。

## 1 同震形变场获取

亚像素互相关技术是确定地震、冰川移动,滑坡和沙丘移动等引起的地表位移有效的技术之一<sup>[25-27]</sup>。主要思想是通过将两个影像中的事件前影像作为参考,将事件后影像与其进行比较来评估两幅影像之间的相似性,进而检索同名点之间的位移。通过对事件前后的影像进行亚像素互相关,可以计算形变场<sup>[28]</sup>。而光学影像相关与 SAR 像素偏移追踪正是基于亚像素互相关技术的方法。本文利用哨兵 2 号光学影像相关和哨兵 1 号像素偏移追踪来获取凯库拉地震形变场。

哨兵 1 号与哨兵 2 号是欧洲空间局(European Space Agency, ESA)哥白尼计划下的地球观测任务中的卫星,哨兵 1 号载有 C 波段合成孔径雷达,拥有 A 和 B 两颗卫星,哨兵 2 号也是由两颗卫星组成,但其携带多光谱成像仪,它们对于气候变化和土地监测等方面的研究具有重大意义<sup>[29]</sup>。本文使用的是来自阿拉斯加卫星设备(Alaska satellite facility, ASF)的哨兵 1 号数据和来自于 USGS 的哨兵 2 号数据如表 1 所示。

表 1 文中采用的影像信息表

Tab. 1 Information of Images Used in This Study

卫星	震前影像采集时间	震后影像采集时间	时间间隔/d	轨道方向
Sentinel-1	2016-09-05	2016-11-16	67	降轨
Sentinel-1	2016-11-03	2016-11-15	12	升轨
Sentinel-2	2016-02-19	2017-02-23	370	—

### 1.1 光学影像相关

哨兵 2 号影像拥有 4 个 10 m 分辨率的波段,本文选取最适合来进行光学影像相关的第 8 波段数据<sup>[22]</sup>,使用 COSI-Corr<sup>[30]</sup>来估计东西向和南北向的水平偏移量。并使用文献[22]和文献[31]所示方法来处理结果中所存在的主要误差。这种技术一般可以以 1/20 像素的理论精度获取地表位移<sup>[32]</sup>。

如图 2 所示,形变场中可以清晰地看见几处明显的不连续性,这些不连续性产生的迹线就是地震产生的地表破裂在形变场中的表现,破裂区域与现场测得的地表破裂较为吻合,且与相关文献的哨兵 2 号光学影像相关结果相似<sup>[22]</sup>。在凯库拉地震中,哨兵 2 号光学影像相关的结果有较为严重的轨道误差,在使用多项式拟合进行去除时,对 Kekerengu 左侧的形变范围产生了影响,并一定程度上削弱了该部分的形变量。由于形变场远场的形变接近于 0,本文假设远场形变为 0,取东西向与南北向形变场远场部分区域计算均

方根误差,分别为0.3610 m与0.2638 m,符合光

学影像相关技术的精度水平。

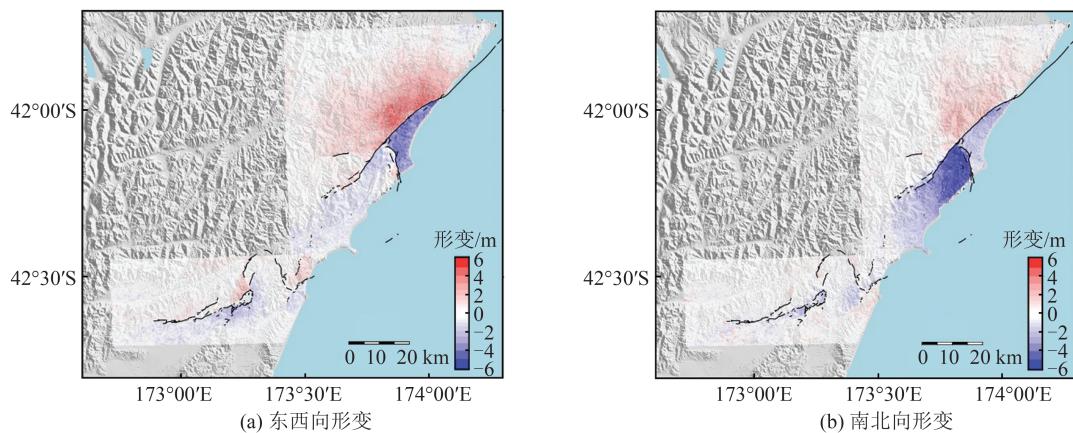


图2 哨兵2号获得的同震形变

Fig. 2 Coseismic Deformation Obtained from Sentinel-2 Image

## 1.2 像素偏移追踪

使用像素偏移追踪的主要目的是得到距离向和方位向的形变场,本文使用哨兵1号数据,通

过GAMMA软件来实现这一过程<sup>[33]</sup>。哨兵1号升轨和降轨影像获得的同震形变如图3和图4所示,与已有研究相似<sup>[34]</sup>。

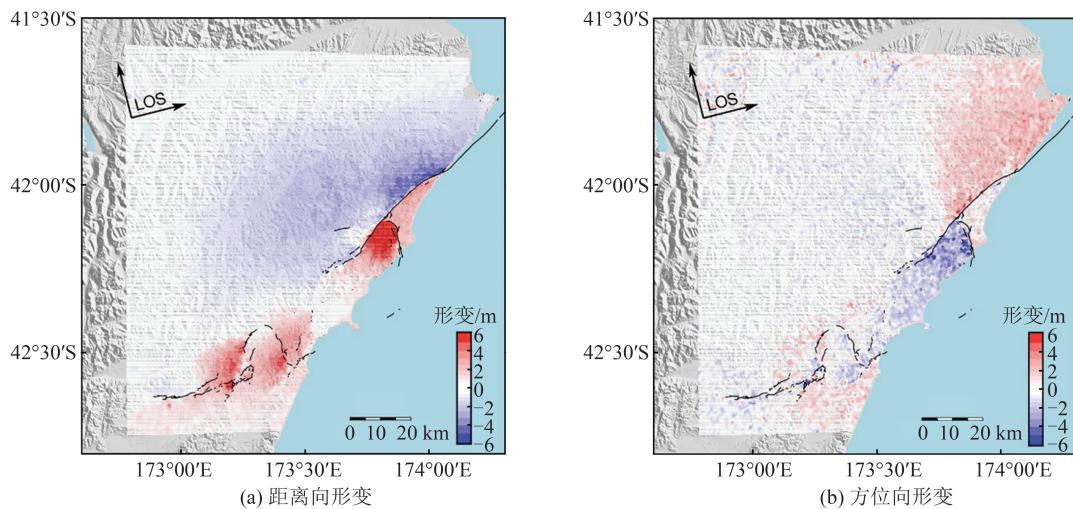


图3 哨兵1号升轨影像获得的同震形变

Fig. 3 Coseismic Deformation Obtained from Ascending Sentinel-1 Image

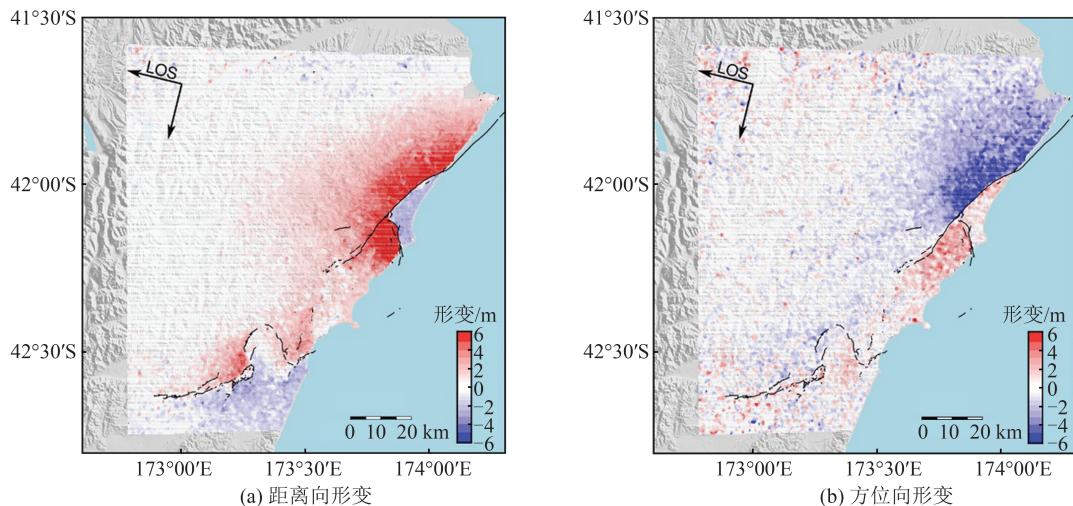


图4 哨兵1号降轨影像获得的同震形变

Fig. 4 Coseismic Deformation Obtained from Descending Sentinel-1 Image

图 3 和图 4 中,正值表示靠近卫星的形变和沿卫星飞行方向的形变,负值表示相反方向的形变。距离向形变和方位向形变与地表三维形变有以下转换关系<sup>[35]</sup>:

$$d_r = -d_E \sin \alpha \cos \beta + d_N \sin \alpha \sin \beta + d_U \cos \alpha \quad (1)$$

$$d_a = d_E \sin \beta + d_N \cos \beta \quad (2)$$

式中, $d_r$  和  $d_a$  分别表示距离向形变和方位向形变; $d_E$ 、 $d_N$ 、 $d_U$  分别表示东西方向、南北方向和垂直方向的形变; $\alpha$  表示卫星雷达波入射角; $\beta$  表示卫星飞行轨道方位角。

与光学影像相关相同,像素偏移追踪的精度很大程度上也取决于 SAR 影像的分辨率,精度一般可达到 1/10~1/30 个像素<sup>[36]</sup>。如图 3 和图 4 所示,距离向形变场中形变明显分布在几个主要破裂附近,噪声水平相对较低,而方位向形变场中形变则集中在东北地区,噪声水平明显高于距离向形变场,距离向形变场显示效果也优于方位向形变场。方位向形变场在西南地区没有明显的不连续性以及形变分布,而距离向形变场则有较大的形变分布,一部分原因是哨兵 1 号数据方位向分辨率较低。在西南地区距离向形变场中存在较大形变:由式(1)以及哨兵 1 号方位角可知,距离向形变对垂直向形变较为敏感;由式(2)可知,方位向形变与垂直向形变没有关联,对南北向形变较为敏感,而哨兵 1 号数据在西南地区检索出的南北向形变较小,原因可能是西南地区主要是垂直形变,而南北向形变较小。取形变场远场部分区域计算均方根误差,哨兵 1 号升轨数据获得的距离向与方位向形变场分别为 0.113 6 m 和 0.445 9 m,哨兵 1 号降轨数据获得的距离向和方位向形变场分别为 0.249 6 m 和 0.650 5 m。降

$$\mathbf{W} \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ 0 & 1 \\ -\sin \alpha_a \cos \beta_a & \sin \alpha_a \sin \beta_a \\ \sin \beta_a & \cos \beta_a \end{bmatrix} \begin{bmatrix} d_E \\ d_N \\ d_U \end{bmatrix} = \mathbf{W} \begin{bmatrix} d_{EW} \\ d_{NS} \\ d_{rAs} \\ d_{aAs} \end{bmatrix}$$

式中, $d_{EW}$ 、 $d_{NS}$ 、 $d_{rAs}$  和  $d_{aAs}$  分别表示为东西向形变、南北向形变、哨兵 1 号升轨数据得到距离向形变和方位向形变; $\mathbf{W} = \text{diag}(P_{EW}, P_{NS}, P_{rAs}, P_{aAs})$  表示权阵。在不加权情况下, $P$  为单位阵;在加权情况下,每个权值代表每个形变场远场部分区域的均方误差(mean square error, MSE),即  $P=1/M_{\text{MSE}}$ ,可以写成:

$$\mathbf{WAX} = \mathbf{WL}, \mathbf{X} = (\mathbf{A}^T \mathbf{WA})^{-1} \mathbf{A}^T \mathbf{WL} \quad (4)$$

## 2.2 结果

取凯库拉地震东北部主要破裂区域各方向形变场,由于光学数据结果与 SAR 数据结果有不

同的数据得到的形变场精度和显示效果整体差于升轨,可能是由于降轨数据震前震后时间间隔过长导致配准误差较大,从而影响了像素偏移追踪结果的精度。

## 2 三维形变场的解算

### 2.1 方法

SAR 像素偏移追踪可以得到距离向和方位向的形变,而升轨和降轨数据所得的距离向和方位向形变不同,相当于 4 个方向的形变,光学影像相关可以得到东西向和南北向的水平形变。将哨兵 1 号数据与哨兵 2 号数据组成能够解算出三维形变的不同的组合,见表 2。以哨兵 2 号数据与哨兵 1 号升轨数据的组合为例,它表示哨兵 2 号数据光学影像相关所获取的东西向和南北向形变,以及哨兵 1 号升轨数据像素偏移追踪所获取的方位向和距离向形变。对于这 5 种组合,使用最小二乘法来求解,并对各方向形变分别进行不加权与加权操作。

表 2 哨兵 1 号与哨兵 2 号的数据组合

Tab. 2 Data Combination of Sentinel-1 and Sentinel-2

组合	简称
哨兵 2 号数据与哨兵 1 号升轨数据	OIC+POT_As
哨兵 2 号数据与哨兵 1 号降轨数据	OIC+POT_Des
哨兵 2 号数据与哨兵 1 号升降轨数据	OIC+POT_As_Des
哨兵 2 号数据与哨兵 1 号升降轨数据 获取的距离向形变	OIC+POT_Range
哨兵 1 号升降轨数据	POT_As_Des

以 OIC+POT\_As 为例,各方向形变场与地表 3 个方向形变有以下关系:

$$\begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ \cos \alpha_a \\ 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} d_E \\ d_N \\ d_U \end{bmatrix} = \mathbf{W} \begin{bmatrix} d_{EW} \\ d_{NS} \\ d_{rAs} \\ d_{aAs} \end{bmatrix} \quad (3)$$

同的分辨率,将它们降采样到相同的分辨率,然后根据文中所述方法计算三维形变,见图 5 和图 6,第 1 行为东西向形变,第 2 行为南北向形变,第 3 行为垂直向形变。正值代表东向形变、北向形变和抬升;负值代表西向形变、南向形变和沉降。各组合最小二乘解算的 3 个方向形变场均方根误差(root mean square error, RMSE)见图 7。

如图 5 和图 7 所示,OIC+POT\_As 和 OIC+POT\_Des 得到垂直向形变与其他 3 个组合得到的垂直向形变有所差别,其他 3 个组合在 Papatea 断层左侧均存在较大抬升,与已有研究基本一

致<sup>[21,34]</sup>,但OIC+POT\_As在Kekerengu断层左侧有较大范围的沉降,而OIC+POT\_Des在Kekerengu断层左侧有远超实际情况的抬升量和范围,这是因为仅依靠单个距离向形变场获取的垂直形变会受到组合中东西向形变的较大影响,而哨兵2号所得到的东西向形变在Kekerengu左侧低估了形变范围以及部分形变量,缺乏有效的约束。其他3个组合同时存在升轨数据和降轨数据获取的距离向形变,所得垂直向形变与实际情况较为相符<sup>[21,34]</sup>。各组合得到的东西向形变有相对较好的一致性,由于OIC+POT\_As和OIC+POT\_Des组合所得的东西向形变很大程度上取决于组合中所包含的东西向形变,所以形变范围弱于其他3个同时包含哨兵1号升轨和降轨数据

所获取的距离向形变的组合,其中OIC+POT\_As\_Des所得到的东西向形变精度较高。除OIC+POT\_Range外的其他组合得到的南北向形变精度表现较差,这是因为精度较高的距离向形变对南北向形变不敏感,而精度较差的方位向形变对南北向形变影响较大,在有南北向形变约束的组合所得的南北向形变精度比没有南北向形变约束的POT\_As\_Des的南北向形变好,而仅仅由南北向形变决定的OIC+POT\_Range得到的南北向形变精度取决于哨兵2号所获取的南北向形变场精度。从精度上看,包含方位向形变的组合所得到的南北向形变精度较差,由于本次地震哨兵2号所得的南北向形变低估了Kekerengu左侧的形变,故准确度优于不包含南北向形变的组合。

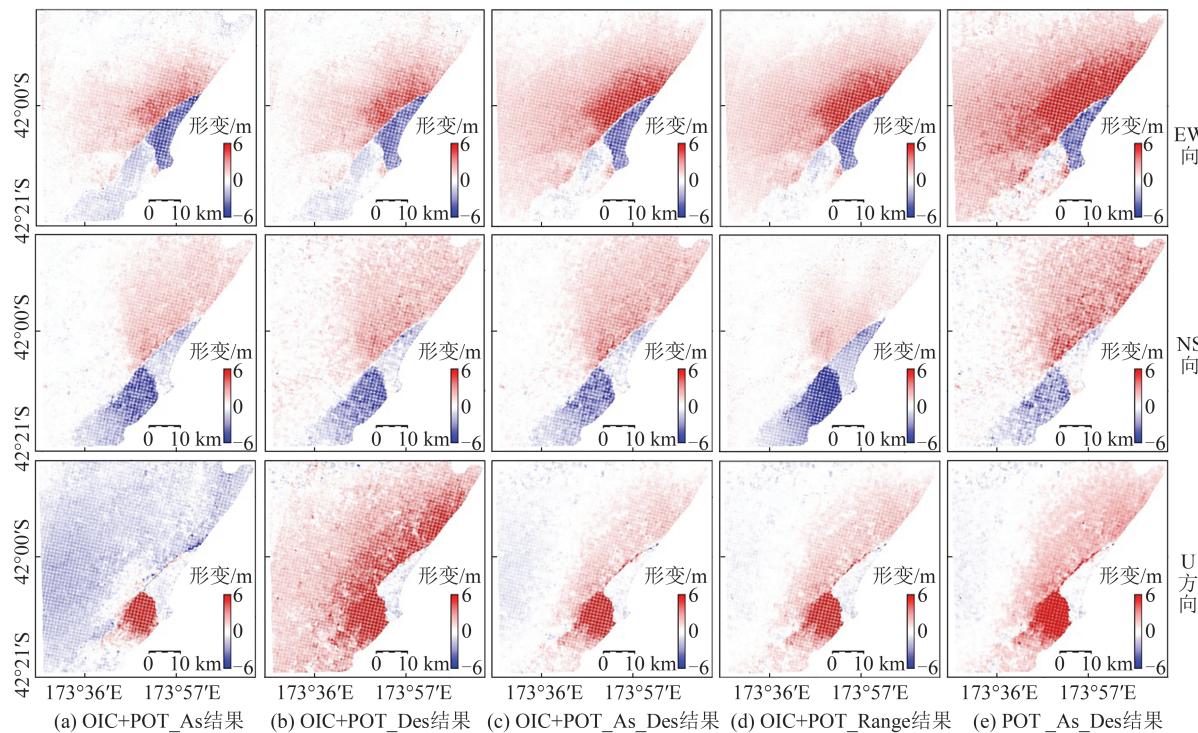


图5 未加权最小二乘解算得到的各组合三维形变

Fig. 5 3D Deformations of Each Combination Obtained by the Least Square Solution Without Weight

如图6和图7所示,对几个方向的形变场进行简单加权后(在包含方位向和南北向的组合中,根据升降轨所得方位向形变的精度增加一定的权重来计算的南北向形变),OIC+POT\_As\_Des和OIC+POT\_Range所得东西向形变在左上角有小部分明显的范围扩大,而其他组合并无明显变化。因为升轨哨兵1号数据所得方位向形变精度优于降轨数据所得,相对于等权时相对增加了这部分权重,而降低了降轨数据所得权重,所以提高了同时包含南北向形变和方位向形变的组合所得的南北向形变精度。垂直向形变在OIC+POT\_As\_Des以及OIC+POT\_Range组合结果中左侧有明

显的小部分沉降,这与文献[21]和文献[34]该部分相似,其他组合同样并未有明显变化。综上所述,在凯库拉地震中,OIC+POT\_As\_Des拥有最好的约束。由于哨兵2号光学影像相关的结果中低估了Kekerengu左侧的南北向形变范围和形变量,导致OIC+POT\_Range组合数据约束性虽并未降低太多,而且有着相对较少的数据种类,但所得南北向形变的准确度不如OIC+POT\_As\_Des。而相对于POT\_As\_Des,它所得到的南北向形变精度更高,在Kekerengu断层右侧以及Papatea断层左侧的形变表现也更好。所以在哨兵2号光学影像相关和哨兵1号升降轨数据像素偏移

追踪所得到的各类形变场组合中,OIC+POT\_As\_Des 比较适合用来检测三维形变。

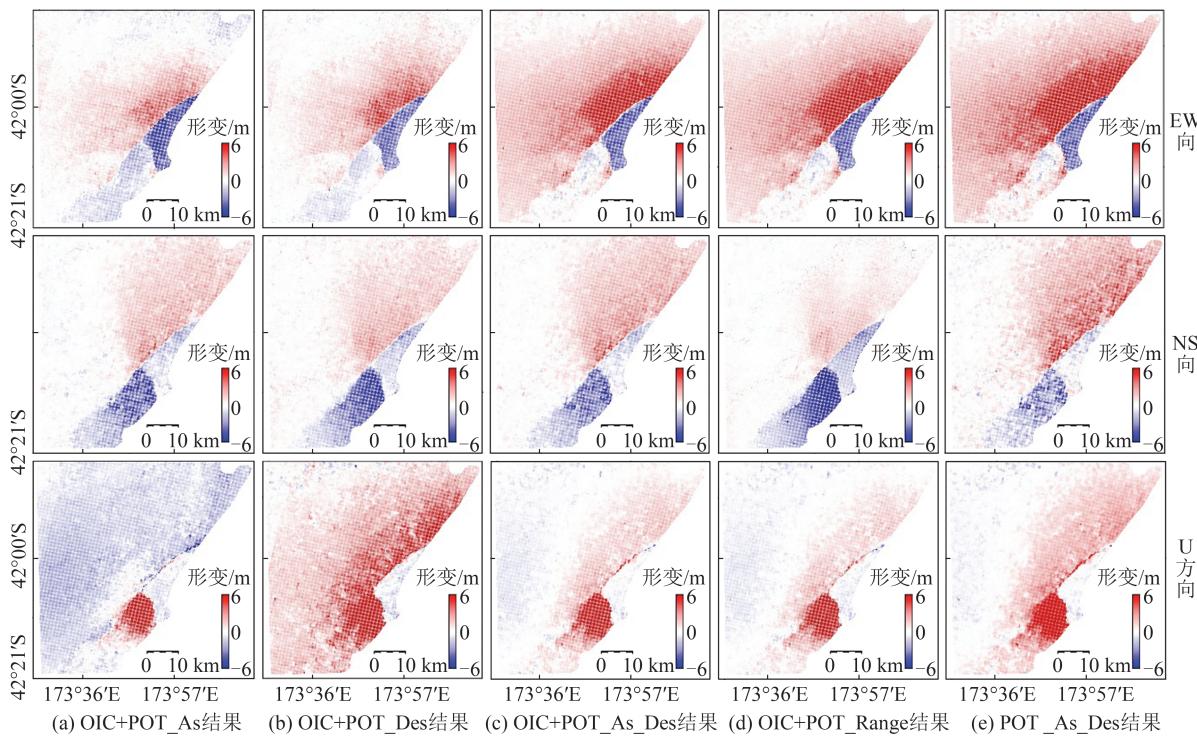


图 6 各组合加权最小二乘解算得到的三维形变

Fig. 6 3D Deformation Obtained by the Weighted Least Squares Solution of Each Combination

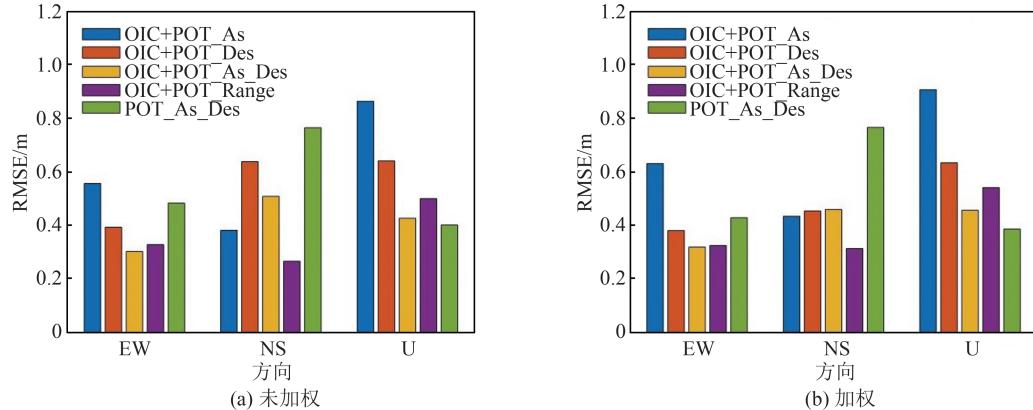


图 7 各组合最小二乘解算的 3 个方向形变远场均方根误差

Fig. 7 Far Field Root Mean Square Error of Three Directions Deformation by Least Squares Solution of Each Combination

### 3 三维形变分析

对于本文所求的形变场范围,哨兵 1 号降轨影像的 InSAR 结果基本处于失相干的情况,而哨兵 1 号升轨影像的 InSAR 结果有部分未失相干,根据 OIC+POT\_As\_Des 的组合,并将哨兵 1 号升轨影像 InSAR 结果中未失相干部分替代哨兵 1 号升轨影像像素偏移追踪结果,计算整个凯库拉地震三维形变如图 8 所示,其中,图 8(c)中黑色箭头表示水平形变,按照图 8 北部区域两个剖面线绘制对应的剖面图如图 9 所示。

选取所求形变场内的 22 个 GNSS 点计算均方根误差作为精度评定的指标,除去各形变场中

几个噪声较大区域的 GNSS 点,其中东西向形变场有 18 个点,精度为 0.56 m,主要在 Kekerengu 右侧以及 Humps 南侧的形变较大程度低于区域内 3 个 GNSS 点所测形变;南北向形变场有 22 个点,精度为 0.36 m;垂直向形变场有 22 个点,精度为 0.45 m,对于本文所获取的近断层形变范围,以及哨兵 2 号光学影像相关和哨兵 1 号像素偏移追踪的精度水平较为合理。组合所计算的形变与 18 个 GNSS 点所测形变见图 10。黑色箭头代表组合计算形变,棕色箭头代表 GNSS 形变,圆点颜色和形变场颜色表示垂直形变。

由图 10 可知,在凯库拉地震震中东北方向,两个相距较近的地区检测到了非常复杂且巨大

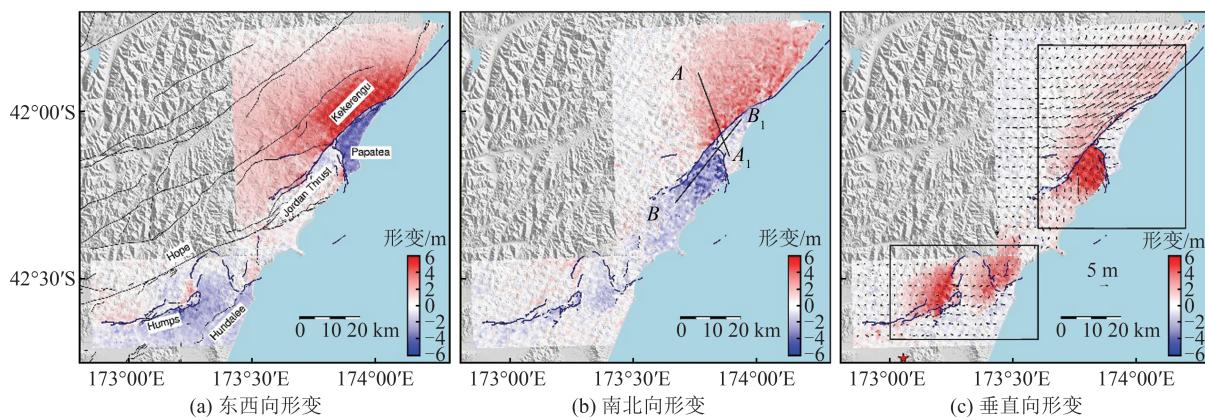


图8 凯库拉地震的三维形变

Fig. 8 3D Deformation of Kaikoura Earthquake

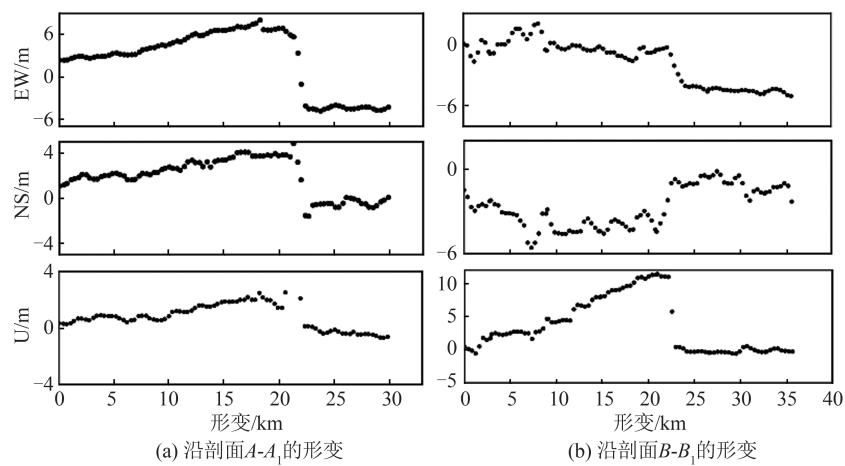


图9 沿图8(b)剖面的形变

Fig. 9 Deformation Along Profiles of Fig. 8(b)

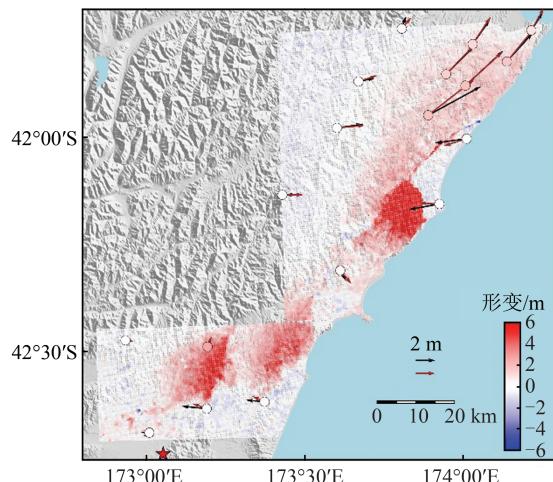


图10 组合计算形变与GNSS形变

Fig. 10 Deformation of Combination and GNSS

的地表位移,它们中间有一小段未发生较大位移的区域,其中一个在东北地区,Kekerengu、Jordan Thrust及Papatea断层附近发生巨大的地表形变与十分明显的不连续性。在Kekerengu断层与Papatea断层周围有着最大超过9 m的水平形变,是本次地震发生最大地表形变的区域。Kekerengu断层滑动主要表现为右旋走滑兼少许逆冲,左

侧有少量向上抬升。Jordan Thrust断层形变主要发生在右侧,表现为右旋走滑,右侧向上抬升的运动。这种异常的最大超过10 m的垂直方向的位移是由于Papatea右侧区域向西南运动造成的,Papatea断层表现出强烈的逆冲趋势以及少量的左旋走滑。在西南地区,产生的地表位移要小于东北地区,形变主要发生在Hope断层以南,Humps断层以及Hundalee断层区域,地表产生多个破裂,形变模式复杂,在Hope断层的南部以及Hundalee断层的北部有较大的形变分布。西南地区垂直位移与水平位移相比较大,表现为垂直位移,最大抬升超过5 m,整体显示出较强的逆冲运动并带有少量右旋走滑。从整体三维形变上看,凯库拉地震垂直形变表现为抬升,运动在东北地区以右旋走滑为主,在西南地区以逆冲为主。

#### 4 结语

本文利用哨兵2号光学数据和哨兵1号SAR数据,基于光学影像相关和像素偏移追踪技术,获取了2016年凯库拉Mw 7.8地震的同震形变

场。根据获得的东西向、南北向、距离向和方位向形变场,将它们组成能够解算出三维形变的不同的组合,使用最小二乘方法计算东北部主要破裂区域三维形变。结果表明,OIC+POT\_Des 和 OIC+POT\_As 获得的垂直形变与实际情况符合较差;对各类数据进行简单加权能够增强组合中的南北向形变精度及改善部分组合的东西向和垂直向形变;POT\_As\_Des 所得的南北向形变效果和精度较差;OIC+POT\_As\_Des 和 OIC+POT\_Range 结合能够得到较好的三维形变。考虑数据约束性和结果的准确性,对于哨兵1号和哨兵2号数据,OIC+POT\_As\_Des 的组合最适合获取凯库拉地震三维形变。使用 OIC+POT\_As\_Des 获取凯库拉地震整个区域同震三维形变,结果揭示了凯库拉地震巨大且复杂的破裂和地表形变,形变区域主要集中在东北地区的 Kekerengu、Jordan Thrust 和 Papatea 断层和西南地区的 Hope、Humps 和 Hundalee 断层附近,垂直形变主要表现为抬升,东北地区形变整体大于西南地区,该地震是以右旋走滑为主带有逆冲的地震。

## 参 考 文 献

- [1] Wang L, Gao H, Feng G, et al. Source Parameters and Triggering Links of the Earthquake Sequence in Central Italy from 2009 to 2016 Analyzed with GPS and InSAR Data [J]. *Tectonophysics*, 2018, 744: 285–295.
- [2] Wang Leyang, Xu Caijun, Wen Yangmao. Fault Parameters of 2008 Qinghai Dacaidan Mw 6.3 Earthquake from STLN Inversion and InSAR Data [J]. *Acta Geodaetica et Cartographica Sinica*, 2013, 42(2): 168–176. (王乐洋, 许才军, 温扬茂. 利用 STLN 和 InSAR 数据反演 2008 年青海大柴旦 Mw 6.3 级地震断层参数[J]. 测绘学报, 2013, 42(2): 168–176.)
- [3] Wen Yangmao, Feng Yiting. Three-Dimensional Deformation Field of Ali Earthquake from InSAR Observations and Earthquake Rupture Model [J]. *Geomatics and Information Science of Wuhan University*, 2018, 43(9): 1369–1375. (温扬茂, 冯怡婷. 地震破裂模型约束的中国阿里地震三维形变场[J]. 武汉大学学报(信息科学版), 2018, 43(9): 1369–1375.)
- [4] Wang Leyang, Gao Hua, Feng Guangcai. InSAR and GPS Inversion for Source Parameters of the 2016 Mw 6.4 Meinong, Taiwan Earthquake [J]. *Chinese Journal of Geophysics*, 2017, 60(7): 2578–2588. [4] (王乐洋, 高华, 冯光财. 2016 年台湾美浓 Mw 6.4 地震震源参数的 InSAR 和 GPS 反演 [J]. 地球物理学报, 2017, 60(7): 2578–2588.)
- [5] Wang Leyang, Gao Hua, Feng Guangcai. Triggering Relations and Stress Effects Analysis of Two Mw>6 Earthquakes in Southwest Taiwan Based on InSAR and GPS Data [J]. *Acta Geodaetica et Cartographica Sinica*, 2019, 48(10): 1244–1253. (王乐洋, 高华, 冯光财. 利用 InSAR 和 GPS 数据分析台湾西南两次 Mw>6 地震的触发关系及应力影响 [J]. 测绘学报, 2019, 48(10): 1244–1253.)
- [6] Zinke R, Hollingsworth J, Dolan J F, et al. Three-Dimensional Surface Deformation in the 2016 Mw 7.8 Kaikōura, New Zealand, Earthquake from Optical Image Correlation: Implications for Strain Localization and Long-Term Evolution of the Pacific-Australian Plate Boundary [J]. *Geochemistry, Geophysics, Geosystems*, 2019, 20(3): 1609–1628.
- [7] Michel R, Avouac J P, Taboury J. Measuring Ground Displacements from SAR Amplitude Images: Application to the Landers Earthquake [J]. *Geophysical Research Letters*, 1999, 26(7): 875–878.
- [8] Van Puymbroeck N, Michel R, Binet R, et al. Measuring Earthquakes from Optical Satellite Images [J]. *Applied Optics*, 2000, 39(20): 3486.
- [9] Elliott J L, Freymueller J T, Rabus B. Coseismic Deformation of the 2002 Denali Fault Earthquake: Contributions from Synthetic Aperture Radar Range Offsets [J]. *Journal of Geophysical Research*, 2007, 112(B6): B06421.
- [10] Himematsu Y, Furuya M. Fault Source Model for the 2016 Kumamoto Earthquake Sequence Based on ALOS-2/PALSAR-2 Pixel-Offset Data: Evidence for Dynamic Slip Partitioning [J]. *Earth, Planets and Space*, 2016, 68(1): 169.
- [11] Liu J G, Mason P J, Ma J M. Measurement of the Left-Lateral Displacement of MS 8.1 Kunlun Earthquake on 14 November 2001 Using Landsat-7 ETM+ Imagery [J]. *International Journal of Remote Sensing*, 2006, 27(10): 1875–1891.
- [12] Ding C, Feng G C, Li Z W, et al. Spatio-Temporal Error Sources Analysis and Accuracy Improvement in Landsat 8 Image Ground Displacement Measurements [J]. *Remote Sensing*, 2016, 8(11): 937.
- [13] Milliner C, Donnellan A. Using Daily Observations from Planet Labs Satellite Imagery to Separate the Surface Deformation Between the 4 July Mw 6.4 Foreshock and 5 July Mw 7.1 Mainshock During the 2019 Ridgecrest Earthquake Sequence [J]. *Seismological Research Letters*, 2020, 91(4): 1986–1997.
- [14] Wright T J. Toward Mapping Surface Deformation in Three Dimensions Using InSAR [J]. *Geophysical Research Letters*, 2004, 31: L01607.
- [15] Jung H S, Lu Z, Won J S, et al. Mapping Three-Dimensional Surface Deformation by Combining Multiple-aperture Interferometry and Conventional Inter-

- ferometry: Application to the June 2007 Eruption of Kilauea Volcano, Hawaii [J]. *IEEE Geoscience and Remote Sensing Letters*, 2011, 8(1): 34–38.
- [16] Xiong L, Xu C, Liu Y, et al. 3D Displacement Field of Wenchuan Earthquake Based on Iterative Least Squares for Virtual Observation and GPS/InSAR Observations [J]. *Remote Sensing*, 2020, 12(6): 977.
- [17] Michele M, Raucooles D, Sigoyer J, et al. Three-Dimensional Surface Displacement of the 2008 May 12 Sichuan Earthquake (China) Derived from Synthetic Aperture Radar: Evidence for Rupture on a Blind Thrust [J]. *Geophysical Journal International*, 2010, 183(3): 1097–1103.
- [18] Gan J, Hu J, Li Z, et al. Mapping Three-Dimensional Co-Seismic Surface Deformations Associated with the 2015 Mw 7.2 Murghab Earthquake Based on InSAR and Characteristics of Crustal Strain [J]. *Science China Earth Sciences*, 2018, 61(10): 1451–1466.
- [19] Wang T, Wei S, Shi X, et al. The 2016 Kaikōura Earthquake: Simultaneous Rupture of the Subduction Interface and Overlying Faults [J]. *Earth and Planetary Science Letters*, 2018, 482: 44–51.
- [20] USGS. Mw 7.8-54 km NNE of Amberley, New Zealand [EB/OL]. [2021-03-10]. <https://earthquake.usgs.gov/earthquakes/eventpage/us1000778i/executive>.
- [21] Hamling I J, Hreinsdóttir S, Clark K, et al. Complex Multifault Rupture During the 2016 Mw 7.8 Kaikōura Earthquake, New Zealand [J]. *Science*, 2017, 356(6334): eaam7194.
- [22] He Lijia, Feng Guangcui, Feng Zhixiong, et al. Co-seismic Displacements of 2016 Mw 7.8 Kaikoura, New Zealand Earthquake, Using Sentinel-2 Optical Images [J]. *Acta Geodaetica et Cartographica Sinica*, 2019, 48(3): 339–351. (贺礼家, 冯光财, 冯志雄, 等. 哨兵-2号光学影像地表形变监测: 以2016年Mw 7.8新西兰凯库拉地震为例[J]. 测绘学报, 2019, 48(3): 339–351.)
- [23] Morishita Y, Kobayashi T, Fujiwara S, et al. Complex Crustal Deformation of the 2016 Kaikoura, New Zealand, Earthquake Revealed by ALOS-2 [J]. *Bulletin of the Seismological Society of America*, 2017, 107(6): 2676–2686.
- [24] Kääb A, Altena B, Mascaro J. Coseismic Displacements of the 14 November 2016 Mw 7.8 Kaikoura, New Zealand, Earthquake Using the Planet Optical Cubesat Constellation [J]. *Natural Hazards and Earth System Sciences*, 2017, 17(5): 627–639.
- [25] Michele M, Briole P. Deformation Between 1989 and 1997 at Piton de La Fournaise Volcano Retrieved from Correlation of Panchromatic Airborne Images [J]. *Geophysical Journal International*, 2007, 169(1): 357–364.
- [26] Bontemps N, Lacroix P, Doin M P. Inversion of Deformation Fields Time-Series from Optical Images, and Application to the Long Term Kinematics of Slow-Moving Landslides in Peru [J]. *Remote Sensing of Environment*, 2018, 210: 144–158.
- [27] Hermas E, Leprince S, Abou El-Magd I. Retrieving Sand Dune Movements Using Sub-pixel Correlation of Multi-temporal Optical Remote Sensing Imagery, Northwest Sinai Peninsula, Egypt [J]. *Remote Sensing of Environment*, 2012, 121: 51–60.
- [28] Rosu A M, Pierrot-Deseilligny M, Delorme A, et al. Measurement of Ground Displacement from Optical Satellite Image Correlation Using the Free Open-Source Software MicMac [J]. *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*, 2015, 100: 48–59.
- [29] ESA. Missions-Sentinel Online-Sentinel [EB/OL]. [2021-03-10]. <https://sentinel.esa.int/web/sentinel/missions>.
- [30] Leprince S, Berthier E, Ayoub F, et al. Monitoring Earth Surface Dynamics with Optical Imagery [J]. *EOS, Transactions American Geophysical Union*, 2008, 89(1): 1–2.
- [31] Wang Leyang, Zou Ajian, Xu Guangyu. Coseismic Deformation of 2019 Ridgecrest Earthquake Sequence Obtained by Optical Images Correlation [J]. *Engineering of Surveying and Mapping*, 2021, 30(4): 1–8. (王乐洋, 邹阿健, 许光煜. 利用光学影像相关获取2019年Ridgecrest地震序列同震形变[J]. 测绘工程, 2021, 30(4): 1–8.)
- [32] Leprince S, Barbot S, Ayoub F, et al. Automatic and Precise Orthorectification, Coregistration, and Sub-pixel Correlation of Satellite Images, Application to Ground Deformation Measurements [J]. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 2007, 45(6): 1529–1558.
- [33] Wegmüller U, Werner C, Strozzi T, et al. Sentinel-1 Support in the GAMMA Software [J]. *Procedia Computer Science*, 2016, 100: 1305–1312.
- [34] Xu W B, Feng G C, Meng L S, et al. Transpressional Rupture Cascade of the 2016 Mw 7.8 Kaikoura Earthquake, New Zealand [J]. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, 2018, 123 (3): 2396–2409.
- [35] Fialko Y, Simons M, Agnew D. The Complete (3D) Surface Displacement Field in the Epicentral Area of the 1999 Mw 7.1 Hector Mine Earthquake, California, from Space Geodetic Observations [J]. *Geophysical Research Letters*, 2001, 28(16): 3063–3066.
- [36] Simons M, Rosen P. Interferometric Synthetic Aperture Radar Geodesy [M]. Geodesy. Amsterdam: Elsevier, 2007.