

DOI:10.3876/j.issn.1000-1980.2016.05.008

利用 Sentinel-1A SAR 影像监测尼泊尔“4·25”地震变形

黄其欢,夏磊凯,刘学敏,徐晶鑫

(河海大学地球科学与工程学院,江苏 南京 210098)

摘要:为利用新一代欧洲太空局 SAR 系统 Sentinel-1A 卫星获取大面积地震变形数据,对其监测模式和数据特点进行研究,给出针对 TOPSAR 成像干涉数据处理的拼接方法,并利用 Sentinel-1A 数据获取尼泊尔“4·25”地震区域约 160 km×180 km 的地表形变。结果显示,地震导致的雷达视线向相对变形最大达 2 m。

关键词: Sentinel-1A;尼泊尔“4·25”地震;大面积地震变形;变形监测;InSAR

中图分类号: TP 23

文献标志码: A

文章编号: 1000-1980(2016)05-0427-05

Seismic deformation monitoring of Nepal April 25 earthquake using Sentinel-1A SAR data

HUANG Qihuan, XIA Leikai, LIU Xuemin, XU Jingxin

(School of Earth Sciences and Engineering, Hohai University, Nanjing 210098, China)

Abstract: To obtain large-area seismic deformation, the imaging mode and data characteristics of ESA's new generation Sentinel-1A SAR were studied. The method for processing interferometric data from TOPSAR images is presented in this paper. Based on data from the Sentinel-1A, an interferogram covering an area of 160 km×180 km in the region of the Nepal April 25 earthquake was generated. The results show that the maximal relative deformation in the line of sight direction reaches about 2 m.

Key words: Sentinel-1A; Nepal April 25 earthquake; large-area seismic deformation; deformation monitoring; InSAR

星载合成孔径雷达干涉技术(InSAR)是近年来迅速发展的空间对地观测技术,该技术利用卫星对同一地区不同时刻获取的合成孔径雷达影像进行干涉处理,可以高精度地获取大面积地表变形信息^[1]。利用 InSAR 技术获取地震引起的大面积地表形变场,进而反演地层深处断层的几何参数、滑动参数、动力学参数及震源破裂过程等多种信息,是认识地震成因机理的有效途径之一^[2]。

国内外基于 InSAR 技术,已多次成功地利用不同 SAR 传感器反演地震变形场^[3-9],但对欧洲太空局新发射的哨兵 Sentinel-1A 卫星 SAR 影像的变形监测国内尚无先例。国外针对该卫星的轨道“管道”^[10]、IW 模式 TOPS SAR 影像方位向多普勒频移差异^[11]、地震变形^[12-14]、火山监测^[15]以及 PS 法变形时间序列分析^[16]等进行了积极的探索。笔者在对 Sentinel-1A 卫星 SAR 成像模式及不同波束单元影像拼接问题研究的基础上,对尼泊尔“4·25”地震前后多个波束单元 Sentinel-1A 数据进行干涉处理和拼接,获取了震区大面积地表变形场。

1 Sentinel-1A 成像模式

欧洲联盟和欧洲太空局联合实施的的对地观测计划——哥白尼计划由一系列的哨兵(Sentinel)卫星星座组成,其中最先实施的哨兵 1 号星座(Sentinel-1)为合成孔径雷达成像专用卫星星座,该星座包括 A 和 B 共 2 颗同轨道的极地卫星,在赤道地区 6 d 可实现对同一地区的重访。哨兵 1 号的首颗卫星 Sentinel-1A 于 2014 年 4 月 3 日在法属圭亚那(Guiana)的库鲁(Kourou)搭载联盟号(Soyuz)火箭升空,该卫星拥有 1 根 12 m

收稿日期:2015-08-25

基金项目:国家自然科学基金(41304025);江苏省自然科学基金(BK20130831)

作者简介:黄其欢(1978—),男,安徽舒城人,副教授,博士,主要从事 InSAR 理论与应用研究。E-mail: InSAR@hhu.edu.cn

长的雷达天线,工作频率为 5.405 GHz,它是继 ERS-1/2(5.3 GHz)和 Envisat-ASAR(5.331 GHz)之后,欧洲太空局发射的又一颗 C 波段的合成孔径雷达卫星,并在信噪比上有进一步的改善,SM 模式的空间分辨率提高到了 5 m×5 m,重访周期提高到了 12 d。第 2 颗卫星 Sentinel-1B 发射升空后该星座的对地观测重访周期将缩短至 6 d,可以提供密集的全球雷达观测数据。

Sentinel-1A 采用预编程的无冲突运行方式,6 个雷达波束发射器(beams)均可以以不同的倾斜角全天时、全天候对地进行扫描成像,形成沿卫星飞行方向——方位向(azimuth)连续、不同幅宽(swath)的 SAR 影像条带,影像条带的幅宽与成像模式有关,一般由多个方位向平行的子幅(sub-swath)组成。每个子幅由一系列按方位向时间顺序排列的波束单元(bursts)组成,这些波束单元均被单独处理成单视复数(SLC)影像。Sentinel-1A 有 4 种成像模式,如图 1 所示。

a. SM 模式(stripmap mode)。SM 模式使用 6 个波束发射器中的 1 个以固定的视角对地进行扫描,随着卫星的飞行,连续的雷达脉冲信号在地面形成一个宽度约为 80 km 的扫描带,该扫描带平行于卫星的地面轨迹,该模式获取的 SLC 影像空间分辨率为 5 m×5 m。

b. IW 模式(interferometric wide swath mode)。IW 模式利用 TOPSAR 成像技术(the terrain observation with progressive scans SAR)获取 3 个子幅,250 km 幅宽,空间分辨率 5 m×20 m(距离向×方位向)的 SAR 影像,该模式有 VV 和 VH 共 2 种极化方式,主要用于陆地监测。与 ScanSAR 技术相比,TOPSAR 成像技术不仅在距离向转动扫描设备,而且在方位向转动扫描方向,使得整幅 SAR 成像使用同一个扫描设备,削弱了同幅影像内的雷达扇形信号误差,提高了影像的一致性^[17],但相对于 SM 模式,在方位向的移动使得雷达波束照射时间短,降低了方位向的分辨率,同时也增加了后续数据处理的难度。为保证影像的连续性,每个波束单元和子幅之间都有一定的重叠,如图 2 所示。为使得干涉影像对覆盖的区域相同,IW 模式不同时刻同轨道的子幅波束单元都进行同步对齐,同步误差小于 5 ms。

c. EW 模式(extra wide swath mode)。EW 模式也使用 TOPSAR 成像技术,5 个子幅组成的 SAR 影像具有更宽的幅宽,该模式以空间分辨率的损失获得 400 km 的幅宽,其距离向和方位向空间分辨率分别为 20 m 和 40 m。EW 模式主要用于海冰、海洋油污和极地环境监测。EW 模式和 IW 模式影像均可用于干涉测量。

d. WM 模式(wave mode)。WM 模式沿卫星轨道方向每隔 100 km 以 2 个不同的视角(23°和 36.5°)获取 1 个 20 km×20 km 大小、5 m×5 m 空间分辨率 VV 极化的影像,2 个相同视角的影像之间相隔 200 km。WM 模式主要用于海洋监测。

2 Sentinel-1A 波束单元拼接

2.1 方位向波束单元拼接

Sentinel-1A 每个波束单元都有一个与前一波束单元同步的时刻,如图 3 所示,设波束单元 $i+1$ 与 i 的同步时刻为 t_{i+1} ,则 2 个波束单元方位向行偏差数 $\Delta l_{i,i+1}$ 为

$$\Delta l_{i,i+1} = \frac{(t_{i+1} - t_i)f_{\text{PRF}}}{N_{\text{ML}}} \quad (1)$$

式中: f_{PRF} ——雷达脉冲方位向采用频率; N_{ML} ——干涉处理的方位向多视数。

由式(1)可以计算出波束单元 $i+1$ 的有效行在波束单元 i 中的位置,从而实现方位向的拼接。

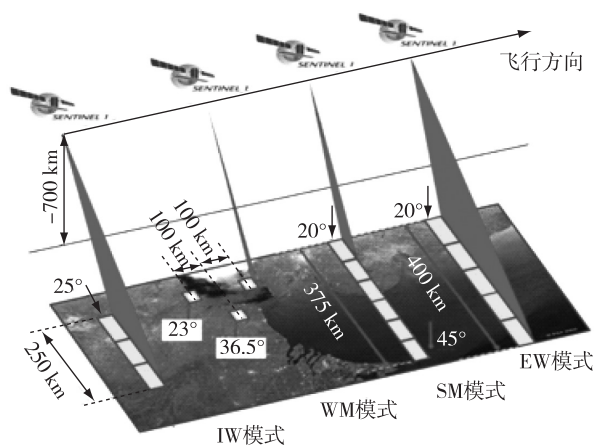


图 1 Sentinel-1A 成像模式(改自 ESA 网站)

Fig. 1 Imaging mode of Sentinel-1A
(modified from ESA website)

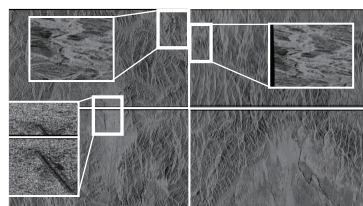


图 2 IW 模式波束单元及子幅的重叠

Fig. 2 IW-model burst and subswath overlapping

2.2 距离向拼接

距离向即子幅之间的拼接,包括子幅方位向拼接和距离向拼接。子幅方位向拼接根据同步时间计算出相邻子幅对应波束单元的时间差,然后根据 f_{PRF} 计算方位向的偏差,其原理和波束单元的拼接类似。距离向上的拼接如图4所示,波束单元 $i+1$ 与 i 的近地点精确斜距分别为 $R_{\text{NR},i+1}$ 和 $R_{\text{NR},i}$,则距离向的像元差 $\Delta c_{i,i+1}$ 表示为

$$\Delta c_{i,i+1} = \frac{R_{\text{NR},i+1} - R_{\text{NR},i}}{d_{\text{PSR}}} \quad (2)$$

式中: d_{PSR} ——斜距分辨率。

由式(2)可以根据距离向像元差计算出2个子幅之间距离向相对位置。

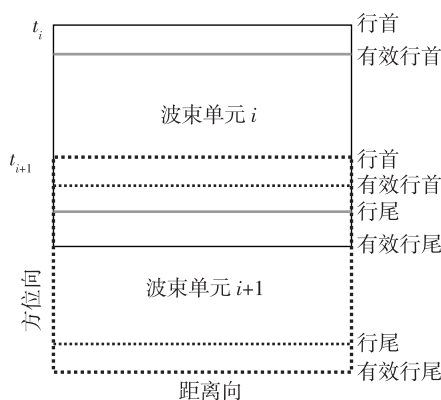


图3 方位向拼接示意图

Fig. 3 Sketch map of mosaicking in azimuth direction

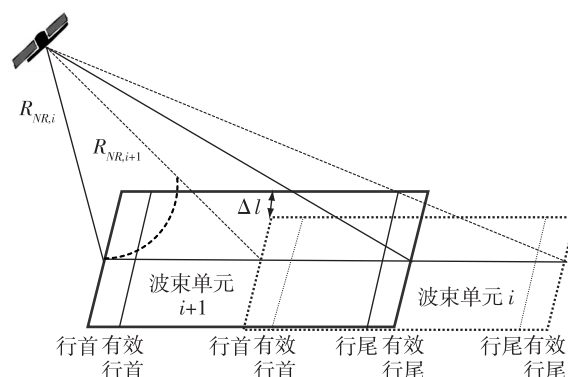


图4 距离向拼接示意图

Fig. 4 Sketch map of mosaicking in range direction

3 尼泊尔“4·25”地震监测

3.1 地震简况及 SAR 数据

据中国地震台网测定,2015年4月25日14:11在尼泊尔(北纬 28.2° ,东经 84.7°)发生8.1级地震,震源深度20 km。之后,14:45再次发生1次7.0级余震,震源深度30 km^[18]。地震不仅影响尼泊尔,而且波及印度北部、巴基斯坦、孟加拉国、不丹和中国西藏部分区域,地震引起的同震位移导致了强烈的地表变形,尼泊尔首都加德满都谷地近90%的建筑物已经在地震中被毁、大批民众露宿街头。

欧洲太空局 Sentinel-1A 卫星获取了地震前(4月17日)和地震后(4月29日)SAR影像,其影像覆盖区域如图5所示,地震变形干涉数据处理时主影像采用震前轨道号为5516的第01和02子幅中的02-09波束单元,从影像为4月29日获取的轨道号为5691的两景影像,影像参数见表1。

3.2 数据处理与初步结果

首先对 Sentinel 各波束单元进行干涉处理,然后按照前述的拼接方法将各波束单元进行距离向和方位向的有效像元拼接。为获取整景 Sentinel-1A 影像的干涉图,需克服波束单元拼接时因配准误差导致的干涉相位差。本文先进行波束单元级别的干涉处理,然后计算波束单元重叠区域的干涉图之差,并将差分相位分配到波束单元上,消除相位跳变,完成有

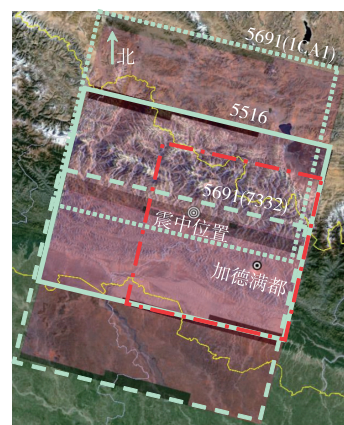


图5 Sentinel-1A 卫星尼泊尔地震 SAR 影像覆盖图

Fig. 5 Coverage area of Sentinel-1A SAR image in Nepal earthquake

表1 Sentinel-1A 干涉对影像参数

Table 1 Sentinel-1A image parameters generated from interferometric pairs

日期	轨道号	波束号	波束数	基线/m
2015-04-17	5516(460B)	02-09	16=2×8	39
2015-04-29	5691(1CA1)	02-05	8=2×4	39
2015-04-29	5691(7332)	06-09	8=2×4	39

效行/列的拼接,拼接后的监测区域覆盖面积约为 $160\text{ km} \times 200\text{ km}$, 拼接后的幅度和干涉条纹分别如图6所示。

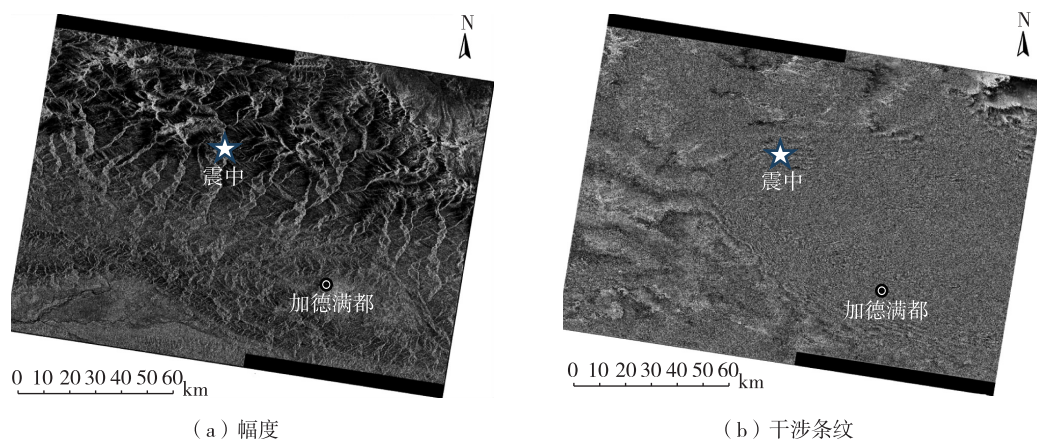


图6 尼泊尔“4·25”地震拼接后的幅度及干涉条纹

Fig. 6 Amplitude and interferogram of Nepal April 25 earthquake after mosaicking

图7展示了选取高相干像元点进行相位解缠后的变形,从图7中可以看出,地震导致的变形主要分布于震中东部,位于加德满都以北数千米处,雷达视线向(LOS)最大相对变形约2 m,这也是导致本次地震加德满都受灾严重的主要原因。图8(a)展示了通过加德满都的直线在LOS向的变形剖面;图8(b)为文献[19]利用 Sentinel-1A, ALOS-2 以及 RADARSAT-2 的获取的变形剖面。从图8可以看出本文获取的变形结果与文献[19]的结果相近,最大相对变形约2 m。

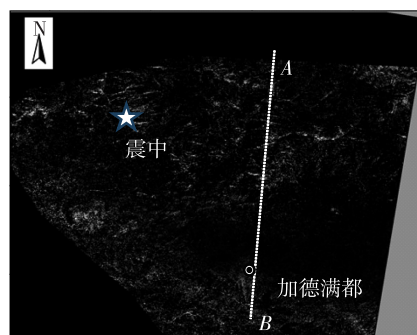


图7 相位解缠后的地表变形

Fig. 7 Surface deformation after phase unwrapping

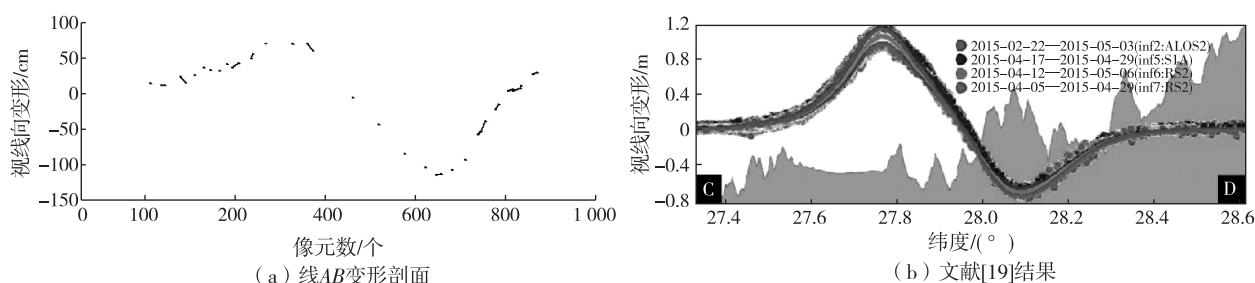


图8 线AB变形剖面和文献[19]结果

Fig. 8 Deformation profile of line AB and results from reference [19]

4 结 论

a. 研究了欧空局最新 Sentinel-1A 卫星 SAR 成像模式和波束单元拼接方法。

b. 利用 Sentinel-1A 卫星 SAR 数据,通过对波束单元的拼接处理,获取了尼泊尔“4·25”地震的大面积变形。

c. 监测结果表明尼泊尔“4·25”地震导致的最大雷达视线向相对变形达到近2 m。

值得一提的是,地震发生后欧洲太空局对尼泊尔“4·25”地震区域进行了重点监测,获取了大量 Sentinel-1A 卫星 SAR 数据,这为利用升轨和降轨数据以及基于幅度配准法获取三维变形信息提供了可能;同时,大量的 SAR 数据为时间序列法研究余震及其变形过程提供了极为有利的条件。

致谢:S-1A TOPS 影像数据由欧洲太空局提供,感谢 Centre Tecnològic de Telecomunicacions de Catalunya

(CTTC)遥感部 Oriol Monserrat 对数据处理方法的讨论与支持。

参考文献:

- [1] 黄其欢.短基线 DInSAR 方法及其在地表沉降监测中应用研究[D].南京:河海大学,2009.
- [2] 屈春燕,单新建,张桂芳,等.四川汶川 Ms8.0 级地震同震干涉变形场定量分析[J].自然科学进展,2009,19(9):963-974. (QU Chunyan, SHAN Xinjian, ZHANG Guifang, et al. Quantitative analysis coseismic interference deformation field caused by Sichuan Wenchuan Ms 8.0 earthquake[J]. Progress in Natural Science Materials International, 2009,19(9):963-974. (in Chinese))
- [3] MASSONNET D, ROSSI M, CARMONA C, et al. The displacement field of the Lander earthquake mapped by radar interferometry[J]. Nature, 1993,364:138-142.
- [4] 夏耶.巴姆地震地表变形的差分雷达干涉测量[J].地震学报,2005,27(4):423-430. (XIA Ye. Bam Earthquake: surface deformation measurement using radar interferometry[J].Earthquake Science, 2005,27(4):423-430. (in Chinese))
- [5] 许才军,林敦灵,温扬茂.利用 InSAR 数据的汶川地震形变场提取及分析[J].武汉大学学报(信息科学版),2010,35(10):1138-1142. (XU Caijun, LIN Dunling, WEN Yangmao. Extract and analysis surface deformation caused by Wenchuan Mw 7.9 earthquake from InSAR data[J]. Geomatics and Information Science of Wuhan University, 2010,35(10):1138-1142. (in Chinese))
- [6] REALE D, NITTI D O, PEDUTO D, et al. Postseismic deformation monitoring with the COSMO/SKYMED constellation[J]. Geoscience and Remote Sensing Letters, IEEE,2011,8(4):696-700.
- [7] STRAMONDO S, CHINI M, BIGNAMI C, et al. X-, C-, and L-band DInSAR investigation of the April 6, 2009, Abruzzi earthquake[J]. IEEE Geoscience and Remote Sensing Letters, 2011,8(1):49-53.
- [8] 周建民,何秀凤.SAR 差分干涉测量技术及其在地表形变监测中的应用现状[J].河海大学学报(自然科学版),2005,33(4):463-465. (ZHOU Jianmin, HE Xiufeng. Differential SAR interferometry and its application to monitoring of earth surface deformation[J]. Journal of Hohai University(Natural Sciences), 2005,33(4):463-465. (in Chinese))
- [9] MINET C, EINEDER M, YAGUE-MARTINEZ N. Haiti earthquake (12.01.2010) surface shift estimation using TerraSAR-X Data[C]//IEEE. 2011 IEEE International Geoscience & Remote Sensing Symposium. New York:IEEE,2011,2488-2491.
- [10] PRATS-IRAOLA P, RODRIGUEZ-CASSOLA M, ZAN de F, et al. Role of the orbital tube in interferometric space-borne SAR missions[J],IEEE Geosci Remote Sens Lett, 2015,12(7):1486-1490.
- [11] YAGUE-MARTINEZ N, PRATS-IRAOLA P, BRCIC R, et al. Interferometric processing of Sentinel-1 TOPS data[J].IEEE Trans Geosci Remote Sens,2016,54(4):2220-2234.
- [12] FENG Guangcai, LI Zhiwei, XU Bing, et al. Coseismic deformation of the 2015 Mw 6.4 Pishan, China, earthquake estimated from Sentinel-1A and ALOS2 data[J].Seismological Research Letters, 2016,87(4):1-7.
- [13] XU Bing, LI Zhiwei, FENG Guangcai, et al. Continent-wide 2-D Co-seismic deformation of the 2015 Mw 8.3 Illapel, Chile earthquake derived from Sentinel-1A data: correction of azimuth co-registration Error[J].Remote Sens,2016,8(5):1-12
- [14] WEN Yangmao, XU Caijun, LIU Yang, et al. Deformation and source parameters of the 2015 Mw 6.5 earthquake in Pishan, Western China, from Sentinel-1A and ALOS-2 data[J]. Remote Sens,2016,8(2):1-12,
- [15] GONZÁLEZ P J, BAGNARDI M, HOOPER A J, et al. The 2014—2015 eruption of Fogo volcano: geodetic modeling of Sentinel-1 TOPS interferometry [J]. Geophys Res Lett,2015,42:9239-9246.
- [16] CROSETTO M, DEVANTHÉRY N, CUEVAS-GONZÁLEZ M, et, al. Exploitation of the full potential of PSI data for subsidence monitoring [C]//IAHS. Proceedings of the International Association of Hydrological Sciences. Göttingen: Copernicus Publications,2015:311-314.
- [17] 陈祺,黄海风,何峰,等.基于频域扩展和 SPECAN 的全孔径 TOPSAR 成像算法[J].电子与信息学报,2012,34(10):2445-2450. (CHEN Qi, HUANG Haifeng, HE Feng, et al. Full aperture imaging algorithm of TOPSAR based on frequency domain extension and SPECAN[J]. Journal of Electronics & Information Technology, 2012,34(10):2445-2450. (in Chinese))
- [18] 中国地震台网中心.2015 年 4 月 25 日尼泊尔 8.1 级地震情况通报(2015-10-11).<http://www.cenc.ac.cn/publish/cenc/887/20150425200758215232226/index.html>.
- [19] FENG Wanpeng, LINDSEY E O, BARBOT S, et al. Source characteristics of the 2015 MW 7.8 Gorkha (Nepal) earthquake and its MW 7.2 aftershock from space geodesy[J].Tectonophysics,2016.doi: 10.1016/j.tecto.2016.02.029.