

DOI:10.13203/j.whugis.20150587



文章编号:1671-8860(2017)09-1195-08

宽幅 InSAR 大地测量学与大尺度形变监测方法

李 鹏^{1, 2, 3} 李振洪^{3, 4} 李 陶³ 施 闯³ 刘经南³

1 中国海洋大学海底科学与探测技术教育部重点实验室, 山东 青岛, 266100

2 中国海洋大学海洋地球科学学院, 山东 青岛, 266100

3 武汉大学卫星导航定位技术研究中心, 湖北 武汉, 430079

4 英国纽卡斯尔大学土木工程与地球科学学院, 英国 纽卡斯尔, NE1 7RU

摘 要:随着人们对大尺度地形信息与地表环境变化监测需求的提升,以及哨兵 1 号(Sentinel-1A)、大地 2 号(ALOS-2)等合成孔径雷达(synthetic aperture radar, SAR)卫星的宽幅模式数据不断获取,宽幅雷达干涉测量(SAR interferometry, InSAR)技术已成为大尺度地形测绘、地球动力学(地震、火山、滑坡等)与人工地物结构健康监测等领域的研究热点。分析了两类宽幅 SAR 数据,即扫描(ScanningSAR, ScanSAR)模式与逐行扫描地形观测(terrain observation by progressive scans SAR, TOPSAR)模式开展干涉测量的主要限制条件与解决方法,探讨了宽幅 InSAR 形变监测关键误差估计与改正方法、时间序列分析技术与方位向位移观测技术,并给出 2008 年矩震级 Mw 7.1 新疆于田地震同震、震后形变监测应用。随着宽幅 SAR 数据的不断积累,宽幅 InSAR 大地测量学有望得到深入发展与应用。

关键词:合成雷达干涉测量;空间大地测量学;地壳形变;ScanSAR;TOPSAR;宽幅 InSAR

中图法分类号:P228

文献标志码:A

过去二十年,合成孔径雷达干涉测量(synthetic aperture radar interferometry, InSAR)技术已经广泛用于自然灾害和人类活动导致的地表环境变化监测^[1-4]。相比传统大地测量技术,InSAR 技术可以提供高分辨率地表形变观测信息,进而能够为政府部门防灾减灾决策提供科学依据。

条带模式合成孔径雷达(synthetic aperture radar, SAR)是星载雷达主要观测模式之一(幅宽通常不超过 100 km),ScanSAR(Scanning SAR)扫描模式可以通过方位向拼接多个子条带获取比传统条带模式 SAR 更大的影像范围(幅宽可达 400 km)。Tomiyasu^[5]最早将 ScanSAR 模式称之为宽幅模式(wide-swath, WS)SAR。宽幅 SAR 干涉图能够完整地观测某些大尺度地壳形变场(例如 Mw>7 地震断层运动等),非常有利于开展大尺度地壳形变相关的研究与应用。过去十多年的研究进展表明,宽幅 InSAR 技术已经在全球数字高程模型生成与地壳变形监测等领域

发挥了重要作用。

本文首先分析宽幅 SAR 干涉测量应用的主要限制条件与解决方法,探讨高级宽幅 InSAR 技术的特点与问题,给出了新疆于田地震同震、震后形变监测实例,最后讨论了宽幅 InSAR 大地测量学的发展趋势与应用前景。

1 宽幅 SAR 获取几何

1.1 ScanSAR 模式

1994 年,星载测图雷达任务(spaceborne imaging radar C-band, SIR-C)最早测试了 ScanSAR 模式。2000 年,美国航天飞机雷达测图任务(shuttle radar topography mission, SRTM)基于 C 波段 ScanSAR 模式干涉测量技术 11 d 就可获取全球陆地的数字高程模型。后续星载 SAR 系统大多具备 ScanSAR 观测能力。

ScanSAR 模式通过周期性改变 SAR 天线波束视角来交替扫描不同子条带,以牺牲方位向分

收稿日期:2016-04-02

项目资助:中国博士后科学基金(2016M592248);国家测绘地理信息局测绘基础研究基金(14-02-02);山东省自然科学基金(ZR2016DB30);青岛市自主创新计划应用基础研究(16-5-1-25-jch);中央高校基本科研业务费(2042014kf0066)。

第一作者:李鹏,博士,讲师,主要从事 InSAR 地壳形变监测研究。pengli@ouc.edu.cn

通讯作者:刘经南,教授,中国工程院院士。jnliu@whu.edu.cn

辨率为代价来获取更大影像范围。相邻一组脉冲称为1个片段,片段之间部分称为数据间隙^[6]。

由于不同目标的方位向天线模式不一致,ScanSAR模式存在方位向分辨率损失,另外存在两大缺点,一是聚焦图像中的幅度周期调制现象,即扇贝效应;二是方位向变化模糊度。为了降低上述影响,不同片段通常被非相干平均,导致方位向分辨率降低、干涉测量体散射失相关,对于永久散射体(persistent scatterer, PS)应用意味着信杂比(SCR)的降低。

大地2号(advanced land observing satellite2, ALOS-2)卫星于2014年5月24日发射,作为第一颗可以提供片段同步的L波段ScanSAR观测SAR卫星,用于开展常规宽幅InSAR应用。2015年4月20日Mw7.8尼泊尔廓尔喀(Gorkha)地震发生之后,加州大学圣地亚哥分校研究小组最先发布了相控阵型L波段合成孔径雷达(phased array L-band synthetic aperture radar, ALOS-2 PALSAR)宽幅同震和强余震(Mw7.3)干涉图^[7],已有多个国内外小组进行了同震与震后滑动分布建模与反演。

1.2 TOPSAR 模式

作为一种新的宽幅SAR模式,逐行扫描地形观测(terrain observation by progressive scans SAR, TOPSAR)模式控制天线旋转方向与聚束模式正好相反,即由后向前以固定速度旋转,使得所有目标在相同的方位向天线模式下观测,进而显著降低扇贝效应和方位向变化模糊度,并使得方位向面状目标模糊度噪声比率(distributed target ambiguities noise ratio, DTAR)和信噪比(signal-to-noise ratio, SNR)接近常数^[8]。

TOPSAR模式由欧空局和意大利米兰理工大学提出并开发,是欧洲空间局哨兵1号(Sentinel-1)卫星的主要SAR观测模式。德国宇航局(DLR)微波与雷达研究所最早利用陆地合成孔径雷达X波段卫星(TerraSAR-X)影像给出了TOPSAR模式干涉测量结果,验证了该模式可以有效地避免传统ScanSAR存在的方位向相关的DTAR和SNR问题^[9]。

陆地合成孔径雷达X波段卫星(Sentinel-1)是欧空局第一颗常规InSAR卫星(C波段),该卫星于2014年4月3日发射,2014年10月3日向公众开放下载。Yague-Martinez等给出了Sentinel-1A干涉宽幅模式(interferometric wide swath, IWS)数据的干涉处理流程^[10]。González等利用IWS资料对火山喷发地表形变开展形变

建模研究^[11]。2015年Mw7.8尼泊尔地震发生后,Feng等与Elliott等学者联合多源卫星大地测量与遥感资料反演其同震与震后滑动分布特征^[12-13]。

2 宽幅 InSAR 主要限制条件

2.1 方位向扫描不同步

宽幅InSAR需要主辅影像对的片段频谱相互重叠来保证足够的公共带宽,利用式(1)可以计算宽幅片段方位向扫描同步比例:

$$\text{Ratio} = \frac{N_{\text{Synchronisation}}}{N_{\text{Burst}}} \times 100\% \quad (1)$$

式中,Ratio代表同步比例; $N_{\text{Synchronisation}}$ 代表同步数量; N_{Burst} 代表片断总数。

Tong等研究了大地卫星(advanced land observing satellite, ALOS)相控阵型L波段合成孔径雷达(phased array L-band synthetic aperture radar, PALSAR)宽幅InSAR所需的片段重叠比例。当该值小于18%时,相干性将低于0.2;当该值大于50%时,相干性大于0.35,是获得高质量干涉测量结果的前提^[14]。

非同步扫描失相关(asynchronous scanning decorrelation, ASD)即方位向频谱的非相关部分会降低宽幅干涉测量的相干性与空间分辨率,特别是当子条带数较多时,将对方位向相干性起到决定作用。

2.2 较小的临界基线值

干涉图超过临界基线将面临相干性的完全损失,特别是在地形坡度较大地区。利用式(2)计算宽幅InSAR理论临界基线值^[15]:

$$|B_{\text{critical}}| = \left| \frac{\lambda \cdot r_0 \cdot \tan(\theta - \alpha)}{2\rho_{\text{slant}}} \right| \quad (2)$$

式中, λ 为波长; θ 为入射角; α 为局部地形坡度; ρ_{slant} 代表斜距分辨率; r_0 代表传感器与地面目标的距离。

对于欧洲环境卫星Envisat的高级合成孔径雷达(advanced synthetic aperture radar, ASAR)宽幅数据,临界基线值约为430m,但在实际应用中,可用基线通常限制在临界基线值的1/4以内。对于ALOS-2 PALSAR宽幅数据,可用基线应当小于20%的临界基线值。

为保证宽幅SAR数据的片段同步性与短基线,欧洲空间局(ESA)和日本宇航局(JAXA)已分别对其卫星轨道控制策略进行了优化:①Envisat ScanSAR干涉对的片段同步比例>50%的概

率由原来的 50% 提升至 90%^[16]; ② ALOS-2 PALSAR 可在水平基线优于 500 m、沿轨精度优于 10 m 的基础上提供片段同步比例 >70% 的干涉对^[7]。

2.3 严格的方位向配准

如图 1 所示, TOPSAR 模式干涉测量处理与

传统 ScanSAR 模式基本相同。需要注意的是, 由于 TOPSAR 模式成像的特殊性, 其片段边缘的方位向多谱勒质心快速变化, 配准不准确将会导致方位向和距离向存在相位坡面。TOPSAR 数据要求非常严格 (~1/1 000 像素) 的方位向配准, 否则片段之间将存在显著的相位跳变。

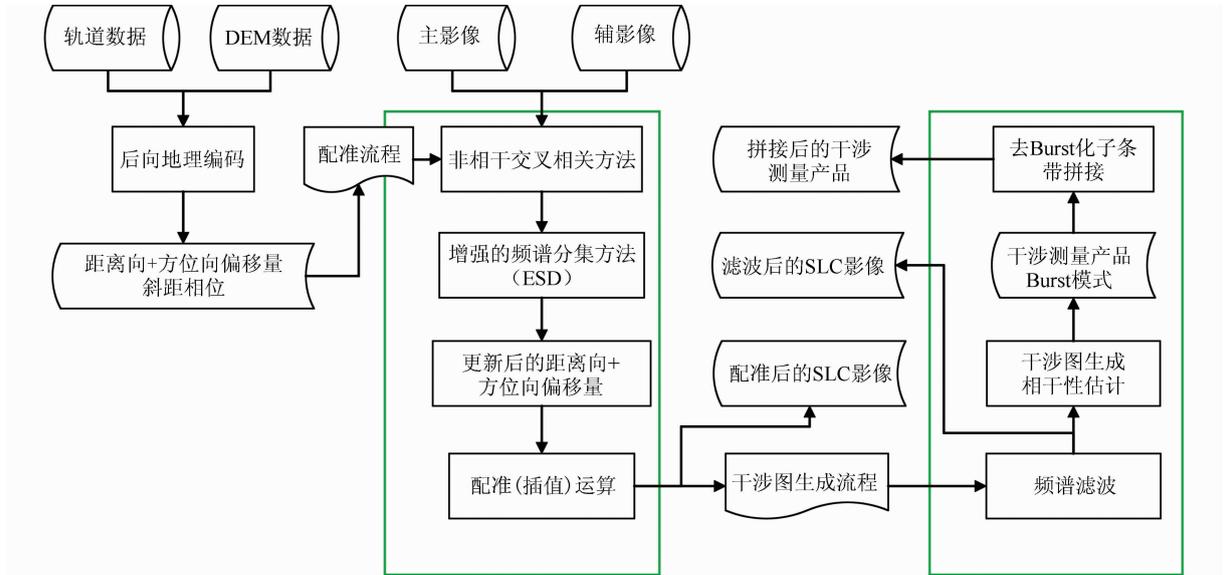


图 1 TOPS 模式数据干涉测量处理流程图(改自 Prats-Iraola 等^[17])

Fig. 1 TOPS Interferometric Processing Chain (Modified from Prats-Iraola et al. ^[17])

已有研究表明, 基于精密轨道和外部数字高程模型(digital elevation model, DEM)的几何配准方法仍然存在方位向相位误差, 而基于增强频谱分集(enhanced spectral diversity, ESD)的精配准方法可以有效估计片段重叠区域残余的方位向偏移, 以保证最终的配准精度^[10]。

2.4 相位误差估计与改正

对于大范围、微小形变监测而言, 星载重复轨道宽幅 InSAR 需要考虑如何精确地分离形变与地形相位、残余轨道相位、大气相位、热噪声等分量。

采用统一高程参考系统(如 WGS84 坐标系)可以有效避免大地水准面高误差的影响^[18]。由于地形误差对形变测量的影响与垂直基线成正比, 高精度形变监测需选择短基线来减小未建模地形的影响。基于时间域或者干涉图域的小基线集时序分析(small baseline subset, SBAS)方法可以用于估计 DEM 误差。Ducret 等^[18]提出了从缠绕干涉图估计与改正 DEM 误差的算法, 可以降低局部相位变化和长基线干涉图的相位留数数量。

Sentinel-1A 轨道不确定性定义为地固坐标系下围绕卫星正常运行路径的轨道管道, Prats-Iraola 等^[19]系统研究了轨道中误差对片段非同步

变化、方位向频谱失相关、方位向配准精度等干涉性能的影响。对于卫星轨道状态向量误差, 常见的估计与改正策略包括干涉处理过程基线重估计, 线性或二次多项式平面拟合, 采用干涉图网络分析或时间序列分析估计与改正以及利用 GPS 观测进行分离。需要注意的是, 剔除长波长轨道误差相位的同时, 也可能包含了部分长波长形变信号。

大气温度、压强、水汽的时空变化会导致构造或火山形变 InSAR 监测存在显著的对流层路径延迟, 主要的估计与改正方法分为两大类。①经验方法, 如采用线性、幂律、高斯、小波等高程-相位关系估计或者高级时间序列分析方法; ②预测方法, 如采用外部独立观测数据等^[20-21]。

Marinkovic 等^[22]发现 Envisat 卫星存在时间相关的本地振荡器频率漂移会降低 ASAR 形变时间序列估计, 导致系统性相位斜坡及距离向地理位置误差。通过近似经验公式估计与改正^[23]:

$$V = 3.87 \times 10^{-7} \cdot (T_{\text{LOS}}^P - T_{\text{LOS}}^{\text{Near}}) \cdot \frac{c}{2} \quad (3)$$

式中, V 为相位坡面; c 为光速; T_{LOS} 为斜距方向 SAR 信号双程传输时间; 上标 P 和 Near 分别为当前像素与近距像素。

DLR 基于 TerraSAR-X 数据理论分析了

TOPS 模式所需的配准精度,认为方位向配准精度需要优于 0.001 像素(即配准误差小于 1 cm)才能避免片段之间相位跳变大于 3° ,因此建议采用 ESD 精配准方法来估计残余方位向配准误差。De Zan 等^[24]研究了 TOPS 模式地球物理信号与其他方位向偏移量贡献的分离策略。

3 大尺度形变监测方法及应用

3.1 时间序列分析技术

由于受到方位向扫描失相关、临界基线等限制,关于宽幅 InSAR 时间序列分析技术的研究仍相对较少。Guarnieri^[25]认为宽幅 InSAR PS 技术受限于空间分辨率以及识别 PS 点所需的影像数量,在城区地面沉降监测方面存在较大局限。Pepe 等^[26]的研究表明宽幅与条带模式相结合的时序分析方法,可在应急情况下提供观测资料。Buckley 等^[7]认为宽幅 InSAR SBAS 技术可以用来探测 1 mm/a 的形变速率与 cm 级的形变位移。李鹏^[27]利用宽幅 InSAR 时序分析方法研究了青藏高原北部地区活动断裂带形变,评估了该方法在大尺度活动断裂带形变监测方面的可行性。Pagli 等^[28]联合 GPS、宽幅与条带模式 InSAR 观测资料首次得到了覆盖整个东非 Afar 地区的大尺度、高分辨率三维连续速度场。

上述研究均采用了 ScanSAR 数据,其空间分辨率通常低于 100 m,而 Sentinel-1A IWS 数据在空间分辨率、轨道精度和方位向扫描同步比例均有较大改进。DLR 已针对 TOPSAR 模式时序分析技术开展了可行性研究^[17],Wegmüller 等^[29]基于 IWS 真实数据时间序列研究了墨西哥城地表形变。

3.2 方位向位移观测技术

视线(line of sight, LOS)向观测无法求解形变模型参数和分辨形变源几何,可以联合多个 LOS 向与方位向观测组成方程组来获得三维地表形变观测。方位向观测技术主要有像元偏移量跟踪法(SAR pixel offset tracking, SPOT)、多孔径干涉测量(multiple aperture InSAR, MAI)两大类。

以 1999 年 Hector Mine Mw7.1 地震为例, Jung 等^[30]测试了 Sentinel-1A IWS 数据的方位向位移观测(SPOT 与 MAI)精度,结论为:① MAI方法与相干性、方位向天线有效大小相关,中误差约为 9.6 cm,等同于方位向分辨率的 0.5%;② SPOT方法与方位向像元分辨率相关,

中误差约为 27.5 cm,等同于方位向分辨率的 1.4%。因此,MAI方法比 SPOT方法更适合方位向位移观测,但是该研究未考虑 TOPS 模式信号特征,仅评估了空间分辨率对观测精度的影响。

Scheiber 等^[31]认为 MAI与基于频谱差异(spectral diversity, SD)的方位向偏移量观测是一致的。DLR 通过分析 TOPS 模式仿真数据,给出了配准所需的严格条件,提出了方位向自适应公共带滤波方法用于补偿天线波束控制与方位向地表大位移导致的频谱失相关,以南极地区 Lambert 冰川为例,评估了 Sentinel-1A IWS 数据方位向位移观测技术用于监测非稳定现象(如冰川流动、地震水平位移等)的性能。

3.3 大尺度形变监测应用

2008 年 Mw 7.1 新疆于田地震发生在阿尔金山断裂带、康西瓦断裂带与昆仑断裂带的交界处,是青藏高原北部有仪器记录以来最大的一次正断层地震。该地震是西向倾滑兼少量左旋走滑分量的正断层机制地震,主震之前在 1980 年距离震中 50 km 左右的东北方向曾发生过一次 Mw 5.8 地震,主震之后没有发生显著的余震,但是在 2011~2014 年东北方向距离震中 150 km 左右的阿尔金山断裂带发生了 3 次 Mw>5.3 地震(图 2)。

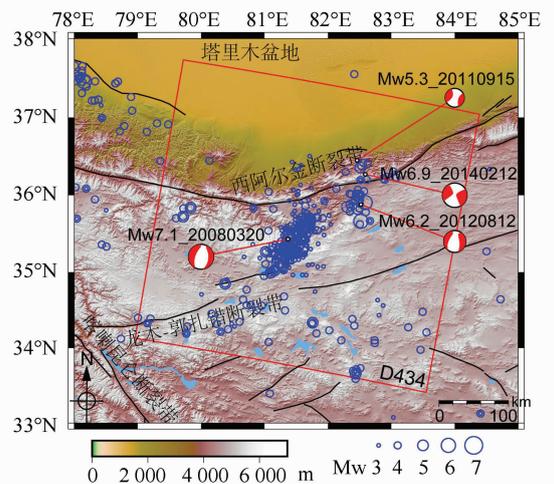


图 2 于田震后 3 次 Mw>5.3 地震及余震分布
Fig. 2 Three Mw>5.3 Events and Aftershocks after 2008 Mw 7.1 Yutian Earthquake

本文利用宽幅 InSAR 资料反演得到了同震滑动分布模型(图 3),相比由条带模式 InSAR 资料得到的结果,该模型可以更好地解释远场应变。由于近场形变各向异性,在近场仍然存在约 1~2 个条纹未建模相位残差。Elliott 等^[32]采用条带模式 InSAR 资料得到的同震模型仅覆盖了断层上盘,而下盘区域至少存在 4~5 个残余条纹。若

考虑宽幅与条带 InSAR 资料联合反演,有望兼顾到同震模型的空间尺度与数据分辨率。

该地区难以开展常规大地测量观测与地质考察,为了进一步了解该地震的震后形变机制,本文选取 Envisat ASAR 宽幅降轨 434 轨道的 17 景原始数据开展震后形变时间序列分析,时间为 2008 年 4 月~2010 年 10 月。基于欧洲中期天气预报中心(European Centre for Medium-Range Weather Forecasts)提的大气模型再分析资料估

计大气延迟,采用随点位变化的入射角将延迟改正投影至斜距方向,通过干涉图网络方法估计残余轨道影响,估计每个像素视线向相位变化。

如图 4 所示,在新疆于田主震发生 2.5 a 之后,震中附近仍然存在明显地余滑形变,累积形变量超过 10 cm。Bie 等^[33]利用震后 1.5 a 的条带干涉图序列研究了新疆于田地震的震后余滑特征,但是其时间与空间范围均小于本文的宽幅 InSAR 时序分析结果。

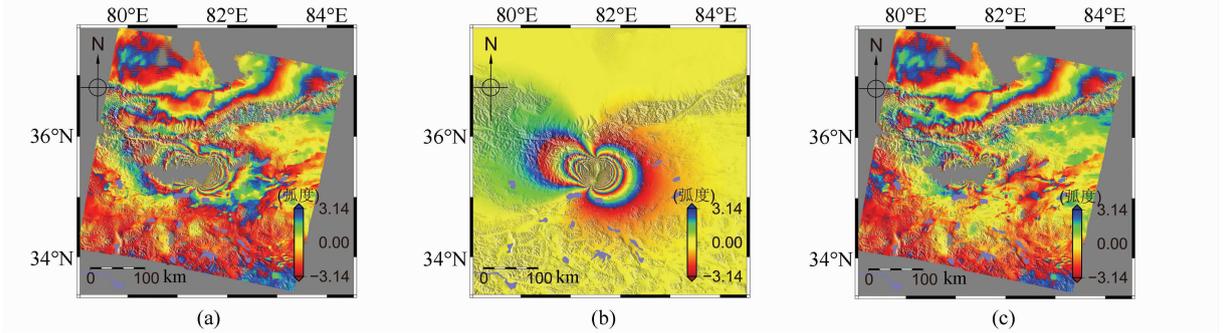


图 3 2008 年于田地震同震干涉图、模型与残差

Fig. 3 Deformation Phase, Coseismic Model and Phase Difference of 2008 Mw7.1 Yutian Earthquake from WS InSAR Time Series Analysis

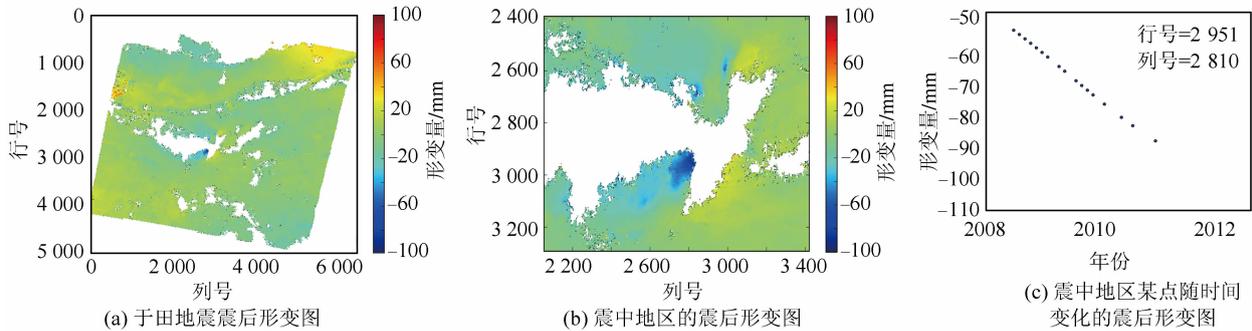


图 4 于田地震震后形变位移图

Fig. 4 Postseismic Deformation Map of 2008 Mw7.1 Yutian Earthquake

4 宽幅 SAR 与宽幅 InSAR 的发展趋势

4.1 下一代高分宽幅 SAR

传统 SAR 观测通常在空间分辨率与幅宽之间存在折中,以牺牲方位向分辨率为代价换取宽幅观测。为克服上述限制,沿轨方向布设多孔径天线系统可以获取每个发射脉冲的多个采样,通过高程方向数字波束形成(digital beam-forming, DBF)技术可以获得多个条带的宽幅观测^[34],但是该方法在相邻条带存在盲区,难以满足大范围连续地面观测应用。在上述背景下,诞生了新的高分宽幅(high resolution wide swath, HRWS)SAR 概念,无需多

孔径、长天线即可实现宽幅连续条带观测,即脉冲重复间隔连续变化的交错观测模式^[35]。

Tandem-L 卫星作为 DLR 下一代 L 波段 SAR 卫星任务,将采用 DBF 技术和交错 SAR 模式,以 mm 级精度和 HRWS 模式观测全球地表动态过程,具有双基 SAR 模式获取 DEM 的优势,可在地震、火山、城市、滑坡等 5 个方面开展大尺度形变监测应用,有望得到全球活动构造断裂带、754 个大城市、1 538 个全新世火山等关键区域的高分辨率、高精度、三维形变矢量图^[36]。

4.2 宽幅 InSAR 大地测量学

宽幅 InSAR 大地测量学基于宽幅 InSAR 技术测绘地形与形变,获取大范围、连续、高分辨率地表位移矢量图,挖掘地表环境时空变化信息。

通过与传统大地测量、GNSS(global navigation satellite system)、水准测量、宽频带地震仪、角反射器等相结合,服务全球防震减灾、板块运动监测等领域,有望得到全球大陆应变累积图。

在理论基础方面,宽幅模式时间序列分析(SBAS、PS等)方法可以有效估计地表均匀分布的面状散射体或者单个持久散射体的时空变化,将用于大面积、长周期缓慢地表形变监测,以及人类活动相关的城市建筑物、大型人工地物等结构健康监测领域。

在数据获取方面,最新发射的C波段 Sentinel-1 与 L波段 ALOS-2 卫星在空间分辨率、重访周期与轨道控制方面均有较大改进,有利于削弱时间去相干与轨道误差等影响,特别是在植被覆盖的山区。通过实时或近实时获取宽幅 SAR 干涉模式数据,基于云计算技术有望提升地震与火山灾害监测系统的早期预警能力。

5 结 语

宽幅 InSAR 技术已成为大尺度地形测绘、地球动力学等领域的研究热点。本文通过分析两类宽幅 SAR 数据干涉测量的主要限制条件与解决方案,讨论了宽幅 InSAR 形变监测关键误差影响因素、时间序列分析方法及方位向位移观测方法,并给出了其在于田地震同震和震后形变监测中的应用。随着宽幅 SAR 数据的不断获取与积累,宽幅 InSAR 大地测量学有望得到深入发展与应用。

致谢:感谢梁存任和冯万鹏博士在宽幅干涉测量和同震建模等过程提供的帮助;感谢欧空局(ESA Category-1 Project: 8690)提供的 ScanSAR 数据。

参 考 文 献

- [1] Li Yongsheng, Zhang Jingfa, Li Zhenhong, et al. Land Subsidence in Beijing City from InSAR Time Series Analysis with Small Baseline Subset [J]. *Geomatics and Information Science of Wuhan University*, 2013, 38(11): 1 374-1 377(李永生, 张景发, 李振洪, 等. 利用短基线集干涉测量时序分析方法监测北京市地面沉降[J]. 武汉大学学报·信息科学版, 2013, 38(11):1 374-1 377)
- [2] He Ping, Xu Caijun, Wen Yangmao, et al. Estimating the Magma Activity of the Changbaishan Volcano with PALSAR Data [J]. *Geomatics and Information Science of Wuhan University*, 2015, 40(2): 214-221(何平, 许才军, 温扬茂, 等. 利用 PALSAR 数据研究长白山火山活动性 [J]. 武汉大学学报·信息科学版, 2015, 40(2): 214-221)
- [3] Yang Chengsheng, Zhang Qin, Zhao Chaoying, et al. Small Baseline Subset InSAR Technology Used in Datong Basin Ground Subsidence, Fissure and Fault Zone Monitoring [J]. *Geomatics and Information Science of Wuhan University*, 2014, 39(8): 945-950(杨成生, 张勤, 赵超英, 等. 短基线集 InSAR 技术用于大同盆地地面沉降、地裂缝及断裂活动监测 [J]. 武汉大学学报·信息科学版, 2014, 39(8): 945-950)
- [4] Xu Caijun, He Ping, Wen Yangmao, et al. Crustal Deformation Monitoring of Xianshuihe Fault by CR-InSAR [J]. *Geomatics and Information Science of Wuhan University*, 2012, 37(3): 302-305(许才军, 何平, 温扬茂, 等. 利用 CR-InSAR 技术研究鲜水河断层地壳形变 [J]. 武汉大学学报·信息科学版, 2012, 37(3): 302-305)
- [5] Tomiyasu K. Conceptual Performance of a Satellite Borne Wide Swath Synthetic Aperture Radar [J]. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 1981, GE-19(2):108-116
- [6] Buckley S M, Gudipati K. Evaluating ScanSAR Interferometry Deformation Time Series Using Burst Stripsmap Data [J]. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 2011, 49(6): 2 335-2 342
- [7] Lindsey E O, Natsuaki R, Xu X, et al. Line-of-Sight Displacement from ALOS-2 Interferometry: Mw 7. 8 Gorkha Earthquake and Mw 7. 3 Aftershock [J]. *Geophysical Research Letters*, 2015, 42(16): 6 655-6 661
- [8] Zan F D, Guarnieri A M. TOPSAR: Terrain Observation by Progressive Scans [J]. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 2006, 44(9): 2 352-2 360
- [9] Prats-Iraola P, Scheiber R, Marotti L, et al. TOPS Interferometry with TerraSAR-X [J]. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 2012, PP(99): 1-10
- [10] Yague-Martinez N, Prats-Iraola P, Rodriguez Gonzalez F, et al. Interferometric Processing of Sentinel-1 TOPS Data [J]. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 2016, 99: 1-15
- [11] 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]. *Geophysical Research Letters*, 2015, 42(21): 9 239-9 246
- [12] Feng W, Lindsey E, Barbot S, et al. Source Characteristics of the 2015 MW 7. 8 Gorkha Earthquake

- and Its MW 7. 2 Aftershock from Space Geodesy [J]. *Tectonophysics*, 2016, 713(126-972): 1-12
- [13] Elliott J R, Jolivet R, Gonzalez P J, et al. Himalayan Megathrust Geometry and Relation to Topography Revealed by the Gorkha Earthquake [J]. *Nature Geoscience*, 2016, 9(2): 174-180
- [14] Tong X, Sandwell D T, Fialko Y. Coseismic Slip Model of the 2008 Wenchuan Earthquake Derived from Joint Inversion of InSAR GPS and Field Data [J]. *Journal of Geophysical Research*, 2010, 115: 1-19
- [15] Guarnieri A M, Rocca F. Combination of Low-and High-Resolution SAR Images for Differential Interferometry [J]. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 1999, 37(4): 2 035-2 049
- [16] Rosich B, Monti-Guarnieri A, D' Aria D, et al. ASAR Wide Swath Mode Interferometry: Optimisation of the Scan Pattern Synchronization [C]. The Envisat Symposium (ESA SP-636), Montreux, Switzerland, 2007
- [17] Prats-Iraola P, Nannini M, Scheiber R, et al. Sentinel-1 Assessment of the Interferometric Wide-Swath Mode [C]. IGARSS 2015, Milan, Italy, 2015
- [18] Ducret G, Doin M P, Grandin R, et al. DEM Corrections Before Unwrapping in a Small Baseline Strategy for InSAR Time Series Analysis [J]. *IEEE Geoscience and Remote Sensing Letters*, 2014, 11(3): 696-700
- [19] Prats-Iraola P, Rodriguez-Cassola M, De Zan F, et al. Role of the Orbital Tube in Interferometric Spaceborne SAR Missions [J]. *IEEE Geoscience and Remote Sensing Letters*, 2015, 12(7): 1 486-1 490
- [20] Jolivet R, Agram P S, Lin N Y, et al. Improving InSAR Geodesy Using Global Atmospheric Models [J]. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, 2014, 119(3): 2 324-2 341
- [21] Li Z H, Pasquali P, Cantone A, et al. MERIS Atmospheric Water Vapor Correction Model for Wide Swath Interferometric Synthetic Aperture Radar [J]. *IEEE Geoscience and Remote Sensing Letters*, 2012, 9(2): 257-266
- [22] Marinkovic P, Larsen Y. Consequences of Long-Term ASAR Local Oscillator Frequency Decay-An Empirical Study of 10 Years of Data [C]. Living Planet Symposium, Edinburgh, UK, 2013
- [23] Spaans K, Hreinsdóttir S, Hooper A, et al. Crustal Movements due to Iceland's Shrinking Ice Caps Mimic Magma Inflow Signal at Katla Volcano [J]. *Scientific Reports*, 2015, 5: 10 285
- [24] De Zan F, Prats-Iraola P, Scheiber R, et al. Interferometry with TOPS: Coregistration and Azimuth Shifts [C]. The 10th European Conference on Synthetic Aperture Radar, Berlin, Germany, 2014
- [25] Guarnieri A M. ScanSAR Interferometric Monitoring using the PS Technique [C]. The ERS-ENVISAT Symposium, Gothenburg, Sweden, 2000
- [26] Pepe A, Bertran Ortiz A, Lundgren P R, et al. The Stripmap-ScanSAR SBAS Approach to Fill Gaps in Stripmap Deformation Time Series with ScanSAR Data [J]. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 2011, 49(12): 4 788-4 804
- [27] Li Peng. Interseismic Strain Accumulation across the Western Altyn Tagh Fault from the Wide-Swath InSAR Observations [D]. Wuhan: Wuhan University, 2013(李鹏, 宽幅 InSAR 观测阿尔金断裂带西段震间应变累积的研究 [D]. 武汉: 武汉大学, 2013)
- [28] Pagli C, Wang H, Wright T J, et al. Current Plate Boundary Deformation of the Afar Rift from a 3-D Velocity Field Inversion of InSAR and GPS [J]. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, 2014, 119(11): 2014JB011391
- [29] Wegmüller U, Werner C, Strozzi T, et al. Sentinel-1 Support in the GAMMA Software [C]. ESA FRINGE 2015 Workshop, ESA-ESRIN, Frascati, Rome, Italy, 2015
- [30] Jung H S, Lu Z, Zhang L. Feasibility of Along-Track Displacement Measurement from Sentinel-1 Interferometric Wide-Swath Mode [J]. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 2013, 51(1): 573-578
- [31] Scheiber R, Jager M, Prats P-Iraola, P, et al. Speckle Tracking and Interferometric Processing of TerraSAR-X TOPS Data for Mapping Nonstationary Scenarios [J]. *IEEE Journal of Selected Topics in Applied Earth Observations and Remote Sensing*, 2014, 99: 1-12
- [32] Elliott J R, Walters R J, England P C, et al. Extension on the Tibetan Plateau: Recent Normal Faulting Measured by InSAR and Body Wave Seismology [J]. *Geophysical Journal International*, 2010, 183(2): 503-535
- [33] Bie L, Ryder I. Recent Seismic and Aseismic Activity in the Ashikule Stepover Zone, NW Tibet [J]. *Geophysical Journal International*, 2014, 198(3): 1 632-1 643
- [34] Gebert N, Krieger G, Moreira A. Digital Beamforming on Receive: Techniques and Optimization Strategies for High-Resolution Wide-Swath SAR Imaging [J]. *IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems*, 2009, 45(2): 564-592

[35] Villano M, Krieger G, Moreira A. Staggered SAR: High-Resolution Wide-Swath Imaging by Continuous PRI Variation [J]. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 2014, 52(7): 4 462-4 479

[36] Moreira A, Krieger G, Hajnsek I, et al. Tandem-L: A Highly Innovative Bistatic SAR Mission for Global Observation of Dynamic Processes on the Earth's Surface [J]. *IEEE Geoscience and Remote Sensing Magazine*, 2015, 3(2): 8-23

Wide-Swath InSAR Geodesy and Its Applications to Large-Scale Deformation Monitoring

LI Peng^{1,2,3} LI Zhenhong^{3,4} LI Tao³ SHI Chuang³ LIU Jingnan³

1 Key Lab of Submarine Geosciences and Prospecting Techniques, Ministry of Education, Ocean University of China, Qingdao 266100, China

2 College of Marine Geosciences, Ocean University of China, Qingdao 266100, China

3 GNSS Research Center, Wuhan University, Wuhan 430079, China

4 COMET, School of Civil Engineering and Geosciences, Newcastle University, Newcastle NE1 7RU, UK

Abstract: The increasing demands for large-scale terrain information and land surface environmental change monitoring, as well as increasing availability of wide-swath (WS) SAR (Synthetic Aperture Radar) data acquisitions from the Sentinel-1A and ALOS-2, WS InSAR (SAR Interferometry) technology has made InSAR a hot research topic in the fields of large-scale topographic surveying and mapping, Geodynamics (earthquakes, volcanoes, landslides, etc.) and structural monitoring. In this paper, on the basis of our existing research and the recent research achievements, we review the two kinds of WS SAR acquisition geometries, ScanSAR (Scanning SAR) mode and TOPS (Terrain Observation by Progressive Scans) mode, and analyze the main limitations and solutions in InSAR applications. We investigate the key sources of error in deformation monitoring, WS InSAR time series analysis methods, azimuth displacement observation methods, and the applications of coseismic and post-seismic crustal deformation monitoring during the 2008 Mw7.1 Yutian Earthquake. We end with a discussion of the next generation high resolution WS SAR satellite and summarize trends in WS InSAR. With continuous data acquisition, WS InSAR Geodesy will achieve in-depth development.

Key words: SAR interferometry; space geodesy; crustal deformation; ScanSAR; TOPSAR; WS InSAR

First author: LI Peng, PhD, lecturer, specializes in InSAR deformation monitoring. E-mail: pengli@ouc.edu.cn

Corresponding author: LIU Jingnan, professor, Academician of Chinese Academy of Engineering. E-mail: jnliu@whu.edu.cn

Foundation support: China Postdoctoral Science Foundation, No. 2016M592248; the Open Research Fund Program of the Key Laboratory of Geospace Environment and Geodesy, Ministry of Education, No. 14-02-02; Shandong Provincial Natural Science Foundation, No. ZR2016DB30; the Qingdao Indigenous Innovation Program, No. 16-5-1-25-jch; the Fundamental Research Funds for the Central Universities, No. 2042014kf0066.