

引文格式: 高明亮, 宫辉力, 陈蓓蓓, 等. 基于 InSAR 技术的地表三维形变获取方法综述 [J]. 测绘通报, 2017(1): 1-4. DOI: 10.13474/j.cnki.11-2246.2017.0001

基于 InSAR 技术的地表三维形变获取方法综述

高明亮^{1 2 3}, 宫辉力^{1 2 3}, 陈蓓蓓^{1 2 3}, 周超凡^{1 2 3}, 司 远^{1 2 3}

(1. 首都师范大学资源环境与旅游学院 北京 100048; 2. 城市环境过程与模拟国家重点实验室培育基地 北京 100048; 3. 水资源安全北京实验室 北京 100048)

摘要: 对近年来提出的基于 InSAR 技术的地表三维形变获取方法进行了综述, 并对该技术的发展进行了展望。对一些重要的知识背景和理论方法进行了简单介绍, 并针对每种方法列举典型案例, 对其适用条件进行了简单总结, 为相关领域的研究者提供了最新研究进展和技术参考。

关键词: InSAR; 视线向形变; 方位向形变; MAI; 偏移量追踪

中图分类号: P23

文献标识码: A

文章编号: 0494-0911(2017)01-0001-04

Review of Three-dimensional Surface Deformation Acquisition from InSAR Measurements and Its Application

GAO Mingliang^{1 2 3}, GONG Huili^{1 2 3}, CHEN Beibei^{1 2 3}, ZHOU Chaofan^{1 2 3}, SI Yuan^{1 2 3}

(1. College of Resource Environment and Tourism, Capital Normal University, Beijing 100048, China; 2. Base of the State Key Laboratory of Urban Environmental Process and Digital Modeling, Capital Normal University, Beijing 100048, China;
3. Beijing Laboratory of Water Resources Security, Capital Normal University, Beijing 100048, China)

Abstract: In this paper, methods for obtaining three-dimensional deformation based on InSAR techniques in recent years are reviewed, and the development of these techniques is discussed. Important knowledge and theory are introduced simply while typical cases for each method are enumerated. Then applicable condition is summarized to provide relevant researchers of the latest research progress and technical reference.

Key words: InSAR; deformation in LOS; deformation in azimuth; MAI; offset-tracking

20世纪70年代发展起来的 InSAR 技术是一种极具潜力的主动式对地观测技术。InSAR 技术除了具有分辨率高、覆盖范围广、观测周期短等星载平台普遍的优势外, 对形变敏感度高、全天候全天时观测等优势使其成为独一无二的基于面观测的形变监测手段^[1]。如今 InSAR 技术已广泛应用于地形测绘^[2]、DEM 重建^[3]、地面沉降^[4]、地震形变^[5]、矿山形变^[6]、火山活动^[7]、冰川漂移^[8]、山体滑坡^[9]及大型线性工程形变监测^[10]等领域。

SAR 系统的侧视成像几何和低观测角使得沿其视线 (line of sight, LOS) 方向的观测对地形的隆起和沉降非常敏感, 但是对于垂直 LOS 向的形变无法感知^[11]。实际情况中垂直向形变通常伴随着一定程度的水平向形变, 尤其是在研究由地质构造 (如地裂缝) 控制下的地表形变时, 通常是不可忽略的。通过

地表三维形变信息的获取, 常常可以揭示常规 InSAR 所观测不到的形变特征。

本文拟总结利用 InSAR 技术获取地表三维形变的近期进展, 介绍目前主流的地表形变三维解算方法和应用案例, 并对不同方法的适用条件进行总结, 以便相关研究者进行方法选择和参考借鉴。

1 传统 InSAR 观测的视线向模糊问题

根据雷达侧视观测几何可知, InSAR 观测到的是地表在正东、正北和垂直向形变量在雷达视线方向的投影的和 (即矢量和)。因此, 由 InSAR 测量得到的形变结果, 均可以按照成像几何的空间关系分解为上述 3 个方向的分量。

约定形变远离雷达 (沉降) 时 LOS 向观测结果为负, 反之为正。分别将 LOS 向、正东、正北和垂直

收稿日期: 2016-03-25; 修回日期: 2016-06-24

基金项目: 国家自然科学基金重点项目(41130744/D0107); 国家自然科学基金(41401492/D010702)

作者简介: 高明亮(1989—), 男, 博士生, 主要从事地面沉降方面的研究。E-mail: b-19890320@163.com

通信作者: 宫辉力。E-mail: gonghl1956@126.com

向形变用 $d_{\text{LOS}}, d_{\text{E}}, d_{\text{N}}, d_{\text{U}}$ 表示, 则 InSAR 观测的地表形变可以表示为^[20]

$$d_{\text{LOS}} = d_{\text{U}} \cos \theta - d_{\text{E}} \sin \theta \sin(\alpha - 3\pi/2) - \\ d_{\text{N}} \sin \theta \cos(\alpha - 3\pi/2)$$

式中 θ 为雷达观测方向(LOS 向) 与垂直向的夹角; α 为卫星航向与正北方向沿顺时针方向的夹角。

2 利用 InSAR 技术获取地表三维形变

由于星载雷达观测系统均运行在近极地轨道, 且是侧视系统, 造成方位向信息的缺失, 对南北向形变并不敏感。为了获取可靠的南北向形变信息, 国内外学者转而关注与其密切联系的方位向形变信息获取技术, 如偏移量追踪(offset-tracking) 技术和多孔径 SAR 干涉(multi-aperture InSAR MAI) 技术。

2.1 偏移量追踪(offset-tracking) 技术

偏移量追踪法一开始用于弥补 InSAR 方位向信息缺失。早在 20 世纪 90 年代末, Michel 等^[12] 利用两景 ERS-1 图像配准后的偏移量, 成功获取了由于地震引起的 LOS 向(即 SAR 距离向) 和垂直 LOS 向(即 SAR 方位向) 的二维同震形变信息, 结果满足地震形变测量的精度需要。此外, 距离向和方位向形变可以通过互相关(cross-correlation) 技术和相干追踪法(coherent tracking) 获取^[13], 但是其精度远不及干涉处理的结果, 约为 SAR 图形像元尺寸的 $1/30 \sim 1/10$ ^[14]。互相关技术又称强度追踪法(intensity tracking) 相干追踪法又称条纹法(the fringe visibility based algorithm), 通过分块配准确定全局相干性最高时给定点的方位向和距离向偏移量, 据此估算方位向和距离向的位移量, 具体过程可参考文献[15]。

2.2 多孔径 SAR 干涉技术

MAI 技术首先由 Bechor 和 Zebker 在 2006 年提出^[16], 成为继 offset-tracking 之后基于 InSAR 技术获取方位向形变信息的另一个选择。MAI 的核心思想是通过方位向滤波处理, 将构成干涉对的两景 SAR 复数影像分别通过子孔径处理技术生成前、后视复影像; 然后分别将前、后视像对进行差分干涉处理; 最后将前、后视干涉相位共轭相乘, 得到多孔径差分干涉结果。王晓文等^[17] 于 2014 年提出了一种基于 MAI 和 InSAR 联合获取地表三维形变信息的方法, 并以 2003 年伊朗 Bam 地震为案例进行了试验, 结果表明其精度和效率优于前人研究成果。

MAI 技术基于差分干涉相位, 其精度取决于干涉相干性和视数, 因此 MAI 技术得到的方位向形变精度通常高于 offset-tracking 技术, 而且效率比后者

要高。然而, 由于 MAI 技术对相位失相干非常敏感, 在获取短时间剧烈地表形变方面(如地震、冰川漂移) 与 offset-tracking 相比略逊一筹。

2.3 融合方位向观测技术

基于融合方位向形变信息观测技术的核心思想是: 通过不同途径得到方位向信息, 然后联合距离向形变信息进行三维信息的解算。从上文可以得知, 差分干涉处理或偏移量追踪的方法均可以获取 LOS 向形变信息, 而方位向形变信息可以通过 offset-tracking 或 MAI 技术得到。在获取到至少两个观测轨道(视角) 的距离向和方位向形变之后, 采用一种加权最小二乘算法得到三维形变信息。这里需要注意的是, 采用升降轨数据可以保证其观测的相对独立性, 以便得到可信的解算结果。具体的算法可参考文献[18]。

2.4 融合 GPS 观测技术

众所周知, 在连续工作模式下, GPS 观测精度(水平和垂直方向) 可以达到毫米级。其全天时、全天候、大范围观测优势可以与雷达卫星媲美。然而, 其过于稀疏的站点分布(>10 km) 及昂贵的安装和维护费用使得其普适性大大降低。

事实上, GPS 除了可以提供地面观测点的形变信息, 也可为 InSAR 提供点位上的气象观测数据, 用于消除大气延迟的影响^[19], 是 InSAR 技术的绝佳数据辅助和补充数据源。融合 InSAR 和 GPS 观测技术最早由 Gudmundsson 等^[20] 在 2002 年提出, 用于获取雷克珍半岛的三维形变速率场信息。作者将 GPS 点位信息插值到与 InSAR 观测结果同样的分辨率, 然后基于马尔可夫随机场和模拟退火算法的全局最优化方案到三维形变速率场信息。目前, 融合 InSAR 和 GPS 观测技术的发展方向主要为改进 GPS 插值算法、消除大气延迟影响^[21] 及改进融合算法^[22]。

2.5 多平台 InSAR 技术

InSAR 技术已成为较成熟地表形变信息获取技术, 因此基于本文的观测几何模型, 联合多个视角观测结果可以实现三维形变场的恢复与重建。通过对至少 3 个卫星平台 SAR 数据的干涉处理, 得到 LOS 向地表形变信息, 基于最小二乘的方法解算三维位移分量, 典型的处理案例可参考文献[23]。

2.6 基于先验知识的技术

在对研究对象形变或位移特征(如地裂缝的发育、滑坡或冰川的水平移动) 有一定认识的基础上, 可以作出相应假设, 从而简化地表三维形变信息的求解过程。Kumar 等^[24] 在冰川贴近地表地形起伏

运动的假设下,通过升降轨干涉获取的 LOS 向位移信息,解算出格陵兰岛冰川移动的三维速度场。研究表明,基于此假设解算得到的三维速率场信息与融合方位向观测技术(MAI、offset-tracking)获取的三维解算结果一致。

正如上文所述,目前在轨的雷达观测卫星运行在近极地轨道,在非极地地区,南北向地表形变信息对雷达侧视系统获取的 LOS 观测方向形变贡献不大。因此,在研究对象形变方向主要沿东西向发展的情况下,可以忽略南北方向的形变信息。在此前提下,只需两组来自不同视角的 LOS 向观测结果,便可通过简化后的观测几何模型得到垂直向和东西向的形变信息^[25]。

3 需要解决的关键问题

在过去几十年,地表形变三维获取技术有了长足的发展,然而,并没有一种技术可解决任何应用问题。在研究不同问题时,需要根据已有的数据条件和精度需要选取相应技术方法。

常规 InSAR 技术易受到时、空失相干和大气延迟等因素的影响,因此基于 InSAR 结果的地表三维形变信息获取技术势必也受到其制约。时序 InSAR 技术可以有效解决时空失相干的问题,大气延迟也可以通过模拟或结合外部数据的方法借以弱化。如何将时序 InSAR 技术与三维解算方法进行有机融合,得到时间序列的三维形变信息,是有待解决的难题。

此外,以地面沉降为典型代表的地表长时间缓慢形变,由于其普遍性和危害性受到社会各界包括学术界的高度重视^[26]。然而,对于此类长时间缓慢地表形变的三维形变速率场获取问题,融合方位向观测技术(offset-tracking 和 MAI)由于其过低的观测精度(厘米至分米级别),无法获取可靠的结果。目前最有效的方法是结合 GPS 观测结果作为补偿,然而由于后者的空间密度过低,远不能满足监测地表形变这种面观测的要求,对于区域复杂地表形变信息的获取方面依然有所欠缺。

4 InSAR 技术获取三维形变技术展望

近年来,一批高分辨率雷达卫星的发射为 InSAR 技术提供了丰富的数据源,也为进一步发现区域形变特征提供了可能。通过获取高分辨率的地形数据(如 DEM 或 DSM),可以进一步削弱地形相位误差,提高影响配准的精度,从而获得高精度的形变观测结果。此外,新型的高级 InSAR 观测技术如

SqueezeSARTM^[27] 和 SAR 层析技术^[28](SAR tomography) 的发展,极大拓展了 InSAR 技术的研究和应用领域,解决了高密度复杂建筑区目标点的识别,并提高了数据利用率。此外,GRACE(gravity recovery and climate experiment) 计划实施以来,利用重力卫星研究全球质量变化受到广泛关注^[29],InSAR 技术与 GRACE 技术的融合互补也成为国内外地学界一个研究热点。此外,正如前文所提到的,发展融合时序 InSAR 观测结果的三维形变获取技术,监测地表长时间序列缓慢形变特征,也是 InSAR 对地观测技术的重要需求。

5 结束语

本文总结了基于 InSAR 观测结果获取地表三维形变信息的主要技术。其中,融合方位向观测技术通过联合距离向与方位向观测结果得到地表的三维形变信息,多用于获取地表短时间剧烈形变,如地震同震形变场、冰川漂移速率场、火山运动引起的形变场等。融合 InSAR 和 GPS 观测结果的方法已广泛用于地震监测、地裂缝监测及滑坡监测等应用领域。基于先验知识的技术方法,常用于已掌握其形变特征或规律的研究对象,如冰川漂移、滑坡和地裂缝发育等方向性明显的地表形变问题。由于每种方法均各有利弊,在进行方法选取时要根据研究问题的具体情况进行最优选择。

有理由相信,在不久的将来,一定会有更多更先进的基于 InSAR 观测获取地表三维形变信息的技术方法涌现出来,将进一步推动 InSAR 及其相关技术在更多领域的应用和发展。

参考文献:

- [1] 廖明生,田馨,赵卿. TerraSAR-X/TanDEM-X 雷达遥感计划及其应用 [J]. 测绘信息与工程, 2007, 32(2): 44-46.
- [2] ZEBKER H A, GOLDSTEIN R M. Topographic Mapping from Interferometric Synthetic Aperture Radar Observations [J]. Journal of Geophysical Research, 1986, 91(B5): 4993-4999.
- [3] 蒋厚军,廖明生,张路,等. 高分辨率雷达卫星 COSMO-SkyMed 干涉测量生成 DEM 的实验研究 [J]. 武汉大学学报(信息科学版), 2011, 36(9): 1055-1058.
- [4] 宫辉力,张有全,李小娟,等. 基于永久散射体雷达干涉测量技术的北京市地面沉降研究 [J]. 自然科学进展, 2009, 19(11): 1261-1266.
- [5] ALBANO M, BARBA S, SAROLI M, et al. Gravity-

- driven Postseismic Deformation Following the Mw 6.3 2009 L'Aquila (Italy) Earthquake [J]. *Scientific Reports*, 2015(5): 16558.
- [6] 王志勇, 张继贤, 黄国满. 基于 InSAR 的济宁矿区沉降精细化监测与分析 [J]. *中国矿业大学学报*, 2014, 43(1): 169-174.
- [7] WALTER T R, SUBANDRIYO J, KIRBANI S, et al. Volcano-tectonic Control of Merapi's Lava Dome Splitting: The November 2013 Fracture Observed from High Resolution TerraSAR-X Data [J]. *Tectonophysics*, 2015, 639: 23-33.
- [8] NEELMEIJER J, MOTAGH M, WETZEL H. Estimating Spatial and Temporal Variability in Surface Kinematics of the Inylchek Glacier, Central Asia, Using TerraSAR-X Data [J]. *Remote Sensing*, 2014, 6(10): 9239-9259.
- [9] 王志勇, 张金芝. 基于 InSAR 技术的滑坡灾害监测 [J]. *大地测量与地球动力学*, 2013, 33(3): 87-91.
- [10] 师红云, 刘广, 杨松林. 基于时序 InSAR 技术的京津高铁区域沉降稳定性评估 [J]. *北京交通大学学报(自然科学版)*, 2014, 38(6): 78-81.
- [11] WRIGHT T J, PARSONS B E, ZHONG L. Toward Mapping Surface Deformation in Three Dimensions Using InSAR [J]. *Geophysical Research Letters*, 2004, 31(1): 169-178.
- [12] MICHEL R, AVOUAC J P, TABOURY J. Measuring Near Field Coseismic Displacements from SAR Images: Application to the Landers Earthquake [J]. *Geophysical Research Letters*, 1999, 26(19): 3017-3020.
- [13] STROZZI T, LUCKMAN A, MURRAY T, et al. Glacier Motion Estimation Using SAR Offset-tracking Procedures [J]. *IEEE Transactions on Geoscience & Remote Sensing*, 2002, 40(11): 2384-2391.
- [14] SIMONS M, ROSEN P A. Interferometric Synthetic Aperture Radar Geodesy [J]. *Treatise Geophys*, 2007, 3: 391-446.
- [15] DERAUW D. DInSAR and Coherence Tracking Applied to Glaciology: the Example of Shirase Glacier [C] // Fringe '99: Advancing ERS, SAR Interferometry from Applications towards Operations. Noordwijk: ESA Publications Division, 1999.
- [16] BECHOR N B D, ZEBKER H A. Measuring Two-dimensional Movements Using a Single InSAR Pair [J]. *Geophysical Research Letters*, 2006, 33(16): 275-303.
- [17] 王晓文, 刘国祥, 张瑞, 等. 联合多孔径雷达干涉与常规合成孔径雷达干涉提取三维形变场 [J]. *大地测量与地球动力学*, 2014, 34(4): 127-134.
- [18] FIALKO Y, SIMONS M, AGNEW D. The Complete (3-D) Surface Displacement Field in the Epicentral Area of the 1999 M(w) 7.1 Hector Mine Earthquake, California, from Space Geodetic Observations [J]. *Geophysical Research Letters*, 2011, 28(16): 3063-3066.
- [19] CATALAO J, NICOL G, HANSEN R, et al. Merging GPS and Atmospherically Corrected InSAR Data to Map 3-D Terrain Displacement Velocity [J]. *IEEE Transactions on Geoscience & Remote Sensing*, 2011, 49(6): 2354-2360.
- [20] 杨成生, 张勤, 赵超英, 等. 基于地形和 GPS 观测的 SAR 干涉图大气延迟估计 [J]. *大地测量与地球动力学*, 2011, 31(1): 142-146.
- [21] GUDMUNDSSON S, TUMI GUDMUNDSSON M, BJÖRNSSON H, et al. Three-dimensional Glacier Surface Motion Maps at the Gjálp Eruption Site, Iceland, Inferred from Combining InSAR and other Ice-displacement Data [J]. *Annals of Glaciology*, 2001, 34(1): 315-322.
- [22] 胡俊, 李志伟, 朱建军, 等. 基于 BFGS 法融合 InSAR 和 GPS 技术监测地表三维形变 [J]. *地球物理学报*, 2013, 56(1): 117-126.
- [23] 刘国祥, 张瑞, 李陶, 等. 基于多卫星平台永久散射体雷达干涉提取三维地表形变速度场 [J]. *地球物理学报*, 2012, 55(8): 2598-2610.
- [24] KUMAR V, VENKATARAMANA G, HØGDA K A. Glacier Surface Velocity Estimation Using SAR Interferometry Technique Applying Ascending and Descending Passes in Himalayas [J]. *International Journal of Applied Earth Observation & Geoinformation*, 2011, 13(4): 545-551.
- [25] GERNHARDT S, CONG X, EINEDER M, et al. Geometrical Fusion of Multitrack PS Point Clouds. [J]. *IEEE Transactions on Geoscience & Remote Sensing Letters*, 2012, 50(1): 38-42.
- [26] 陈蓓蓓, 宫辉力, 李小娟, 等. 基于 InSAR 技术北京地区地面沉降监测与风险分析 [J]. *地理与地理信息科学*, 2011, 27(2): 16-20.
- [27] FERRETTI A, FUMAGALLI A, NOVALI F, et al. A New Algorithm for Processing Interferometric Data-Stacks: SqueeSAR [J]. *IEEE Transactions on Geoscience & Remote Sensing*, 2011, 49(9): 3460-3470.
- [28] FORNARO G, REALE D, SERAFINO F. Four-Dimensional SAR Imaging for Height Estimation and Monitoring of Single and Double Scatterers [J]. *IEEE Transactions on Geoscience & Remote Sensing*, 2009, 47(1): 224-237.
- [29] 罗志才, 李琼, 钟波. 利用 GRACE 时变重力场反演黑河流域水储量变化 [J]. *测绘学报*, 2012, 41(5): 676-681.