

引文格式:朱建军,李志伟,胡俊.InSAR 变形监测方法与研究进展[J].测绘学报,2017,46(10):1717-1733. DOI:10.11947/j. AGCS. 2017.20170350.

ZHU Jianjun, LI Zhiwei, HU Jun. Research Progress and Methods of InSAR for Deformation Monitoring[J]. Acta Geodaetica et Cartographica Sinica, 2017, 46(10): 1717-1733. DOI: 10.11947/j. AGCS. 2017. 20170350.

InSAR 变形监测方法与研究进展

朱建军,李志伟,胡 俊

中南大学地球科学与信息物理学院,湖南 长沙 410083

Research Progress and Methods of InSAR for Deformation Monitoring

ZHU Jianjun, LI Zhiwei, HU Jun

School of Geosciences and Info-Physics, Central South University, Changsha 410083, China

Abstract: Deformation monitoring is one of the most mature applications of space-borne InSAR technique. Firstly, we introduce the basic principle of InSAR in the monitoring of deformation and the current SAR satellites. The deformation monitoring methods of InSAR are then classified into the groups of D-InSAR, PS-InSAR, SBAS-InSAR, DS-InSAR and MAI, which are analyzed in the aspects of technical features and application scopes. Subsequently, we analyze the research progress and deficiencies of InSAR in the investigation of urban, mining area, earthquake, volcano, infrastructure, glacier, permafrost and landslide. Finally, some advanced academic problems such as deformation monitoring in multi-dimension and low coherence area, atmospheric and orbital errors mitigation, and accuracy assessment are concluded.

Key words: InSAR; deformation monitoring; space-borne; review

Foundation support: The National Basic Research Program of China (973 Program) (No. 2013CB733303); The National Natural Science Foundation of China (Nos. 41371335; 41404011); The Major Projects of High Resolution Earth Observation (Civil Part) (No. 03-Y20A11-9001-15/16)

摘 要: 变形监测是星载 InSAR 技术应用最为成熟的领域之一。本文首先介绍了 InSAR 变形监测的基本原理和卫星数据来源;然后对 InSAR 变形监测方法进行了系统性的分类,分析了 D-InSAR、PS-InSAR、SBAS-InSAR、DS-InSAR 和 MAI 等方法的技术特点和适用范围;进而从应用的角度分析了 InSAR 技术在城市、矿山、地震、火山、基础设施、冰川、冻土和滑坡等领域的研究现状和不足之处;最后总结出 InSAR 变形监测在多维形变和低相干区测量、大气和轨道误差去除和精度评定等方面的前沿问题。

关键词: InSAR; 变形监测; 星载; 综述

中图分类号: P237

文献标识码: A

文章编号: 1001-1595(2017)10-1717-17

基金项目: 国家重点基础研究发展计划(973 计划)(2013CB733303); 国家自然科学基金(41371335; 41404011); 高分辨率对地观测系统重大专项(民用部分)(03-Y20A11-9001-15/16)

星载合成孔径雷达干涉测量(interferometric synthetic aperture radar, InSAR)因其高精度、高分辨率、全天候等优点已迅速成为常用的大地测量技术之一,旨在通过计算两次过境时 SAR 影像的相位差来获取数字高程模型^[1-2]。随之而来的差分雷达干涉技术(differential interferometric synthetic aperture radar, D-InSAR)则是通过引入外部 DEM 或三轨/四轨差分实现了地表变形

监测。除了地形因素外,时空失相干、大气、轨道等也是影响 DInSAR 技术的形变监测精度的主要因素^[3-4]。与此同时,卫星硬件的不断发展,重返周期越来越短会导致微小形变与噪声之间的混叠,空间分辨率越来越高也会导致噪声更加复杂,这些都对常规 D-InSAR 的形变监测提出更高的挑战。此外,D-InSAR 技术获取的形变是地表真实三维形变在雷达视线方向(line-of-sight, LOS)

上的投影,目前多通过除以入射角的余弦值得到垂直向的形变。但是,这需要假设水平方向上无形变^[5],很多情况下并不满足,从而导致形变信号的错误解译。

为了突破 DInSAR 技术的这些限制,学者们提出了多时相 InSAR 技术 (multi-temporal InSAR, MT-InSAR) 来进行高精度的形变监测,如永久散射体 (persistent scatterer InSAR, PS-InSAR)、小基线集 (small baseline subsets InSAR, SBAS-InSAR) 和分布式散射体 (distributed scatterer InSAR, DS-InSAR) 等。此外,为了弥补 D-InSAR 或 MT-InSAR 技术只能获取 LOS 形变的缺陷,学者又提出多孔径 InSAR (multi-aperture InSAR, MAI) 技术来获取方位向(即卫星飞行方向)上的形变信息。以上这些 InSAR 技术已广泛应用于各类形变监测中,如城市地面沉降、矿区沉降、地震及板块运动、火山喷发、基础设施变形、冰川漂移、冻土形变、滑坡等。

本文旨在通过分析以上这些 InSAR 技术及其在各应用领域的研究现状,使读者能够对 InSAR 变形监测有更为系统性的理解。本文章节安排如下:第 1 节介绍 InSAR 技术与现状,包括雷达干涉测量原理和 SAR 卫星现状;第 2 节介绍目前主流的几种 InSAR 变形监测方法及进展;第 3 节介绍 InSAR 变形监测在重点应用领域的研究现状;第 4 节则对 InSAR 变形监测的挑战进行分析。

1 InSAR 技术与现状

1.1 雷达干涉测量原理

合成孔径雷达干涉测量技术(InSAR)集合成孔径雷达技术与干涉测量技术于一体。合成孔径雷达(SAR)是一种主动式微波遥感,用来记录地物的散射强度信息及相位信息,前者反映了地表属性(含水量、粗糙度、地物类型等),后者则蕴含了传感器与目标物之间的距离信息。干涉的基本原理是同一区域两次或多次过境的 SAR 影像的复共轭相乘,来提取地物目标的地形或者形变信息。雷达干涉的模式分为:沿轨道干涉法、交叉轨道干涉法、重复轨道干涉法。其中利用重轨干涉最为常用的方式,以此为例,所得到的干涉相位表达式为^[4]

$$\varphi_{\text{int}} = \varphi_{\text{flat}} + \varphi_{\text{topo}} + \varphi_{\text{def}} + \varphi_{\text{atmo}} + \varphi_{\text{noise}} \quad (1)$$

式中, φ_{flat} 为平地相位; φ_{topo} 为地形相位,该相位可

以用来恢复地形信息; φ_{def} 为地表形变引起的相位; φ_{atmo} 为大气延迟相位; φ_{noise} 为观测噪声引起的相位。

将平地相位、地形相位、噪声相位、大气相位去除,即可得到地表形变相位,这样的雷达干涉技术被称为雷达差分干涉技术(D-InSAR),文献[2]首次论证该项技术可用于探测厘米级的地表形变。其几何关系如图 1 所示。

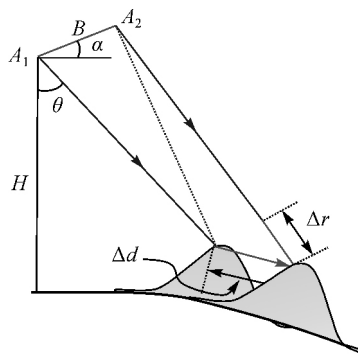


图 1 差分干涉测量几何关系

Fig.1 Geometric relation of differential interferometry

从图 3 中可以导出以下关系

$$\Delta r = \frac{\lambda}{4\pi} \varphi_{\text{def}} \quad (2)$$

式中, Δr 为所求解的地面目标点的 LOS 向形变信息; λ 为雷达波长。

1.2 SAR 卫星的发展现状

1978 年,美国发射了 L 波段 SEASAT 卫星,在 1981、1984 年又相继发射了 SIR-A 和 SIR-B 卫星,为最初的研究提供了少量的星载数据。随后其他国家也相继研究并研发了不同波段的中低分辨率的 SAR 卫星。1991 年 7 月、1995 年 4 月欧洲空间局(ESA)相继发射了 C 波段 ERS-1 和 ERS-2 卫星,采用相同的轨道参数,组成串行飞行模式,为对地观测提供了大量的数据,极大地推动了 InSAR 技术的发展。1992 年日本空间局发射了 L 波段 JERS-1 卫星,长波段的穿透力强,使其在 InSAR 监测中具有很强的优势,但 JERS-1 卫星并不是专门针对干涉测量而设计的,轨道误差较为严重,影响了它的适用性。1995 年,加拿大发射了 C 波段 RADARSAT-1 卫星,获取了覆盖全球的大量数据。21 世纪以后,SAR 卫星系统的硬件得到更大的改进,专门针对干涉测量的卫星陆续发射成功。2000 年美国实施的 SRTM 计划,利用航天飞机获取了全球 80% 的 30 m 和

90 m分辨率的 DEM 数据,对差分干涉测量提供了可靠的外部 DEM 数据。欧空局 2002 年 3 月发射的 ERS 系列后继卫星 ENVISAT 不仅提供了 SAR 数据,还提供了 MERIS 水汽数据,对 InSAR 数据中大气延迟误差的改正提供了极大的帮助。2006 年 1 月日本空间局发射了 L 波段的 ALOS-1 卫星,因其长波长穿透性强、抗失相干的特性在地震、矿山等方面的监测得到了广泛的应用。ERS-1/2、ENVISAT、ALOS-1、RADARSAT-1 获取丰富的中低分辨率 SAR 数据成为 21 世纪早期 InSAR 技术发展的主要数据源,大部分的研究成果也是基于这些数据得到。

在上述的中低分辨率的 SAR 卫星陆续停止服务后,新一代高分辨率卫星相继发射,而且这些 SAR 卫星系统也从单一极化、模式、波段、固定入射角向多极化、多模式、多波段、可变入射角发展。由此,SAR 卫星系统迎来了一个全新的时代。2007 年德国航空航天局成功发射了 X 波段 TerraSAR-X 卫星,随后在 2010 年发射了其姊妹星 TanDEM-X,构成分布式协同工作模式,可以提供全球高精度的数据及数字高程模型,分辨率最高可达 0.25 m。意大利空间局设计的 X 波段 COSMO-SkyMed 星座包括 4 颗星,分别于 2007 年

6 月、2007 年 12 月、2008 年 10 月、2010 年 11 月成功发射,分辨率高达 1 m,重访周期短,在风险预警、灾害管理等方面发挥着重要的作用。2007 年 12 月加拿大发射的 C 波段 RADARSAT-2 卫星继承了 RADARSAT-1 卫星的工作模式,还增加了多极化成像等,增强了其在地形监测领域的观测能力。2014 年 4 月欧空局成功发射了首颗环境监测卫星 C 波段 Sentinel-1A 卫星,并于 2016 年 4 月发射了 Sentinel-1B 卫星,对全球大范围的地质、环境灾害的监测提供了丰富的数据。2014 年 5 月日本成功发射的 L 波段 ALOS-2 卫星,空间分辨率最高达到 1 m,其在大型地质灾害(如地震)监测领域具有独一无二的优势。与此同时,我国也在积极的研发 SAR 卫星,并于 2016 年 8 月 10 日在太原成功发射了高分三号(GF-3)卫星,实现了我国卫星 SAR 影像干涉测量零的突破。

现有的 SAR 卫星系统具体参数如表 1 所示。在未来,SAR 卫星系统的设计将会针对不同的研究领域而进行规划,例如,欧空局规划在 2020 年发射 P 波段 BIOMASS 卫星是为森林树高测绘和生物量反演而设计;德国航天局预计在 2022 年发射的 L 波段 TanDEM-L 卫星,主要针对全球陆表动态变化监测而设计。

表 1 现有 SAR 卫星系统具体参数
Tab.1 Specific parameters of current SAR satellites

SAR 传感器	运行起止时间	重访周期 /days	工作波段 (波长/cm)	幅宽 /km	分辨率(方位向×距离向)	入射角
SEASAT	1978.06—1978.10	17	L(23.5)	100	25 m×25 m	20°~26°
SIR-A	1981.11—1981.11		L(23.5)	50	40 m×40 m	47°
SIR-B	1984.10—1984.10		L(23.5)	50	40 m×40 m	15°~64°
ERS-1	1991.07—2000.03	35,3,168	C(5.63)	100	30 m×30 m	20°~26°
JERS-1	1992.02—1998.10	44	L(23.5)	75	18 m×18 m	35°
ERS-2	1995.04—2011.09	35,3	C(5.63)	100	30 m×30 m	20°~26°
RADARSAT-1	1995.11—2013.03	24	C(5.63)	Fine;50	9 m×(8,9) m	37°~47°
				Standard;100	28 m×(21~27) m	20°~49°
				canSAR;500	28 m×(23,27,35) m	20°~45°
				AP mode;58-110	30 m×(30~150) m	15°~45°
ENVISAT	2002.03—2012.04	35,30	C(5.63)	Image;58-110	30 m×(30~150) m	15°~45°
				Wave;5	10 m×10 m	15°~45°
				GM;405	1 km×1 km	17°~42°
				WS;405	150 m×150 m	17°~42°
ALOS-1	2006.01—2011.05	46	L(23.5)	Single/dual pol;70	10 m×(7,14) m	8°~60°
				Quad-pol; 30	10 m×24 m	8°~30°
				ScanSAR; 350	100 m×100 m	18°~43°
TerraSAR-X	2007.06 至今	11	X(3.11)	HR Spotlight;10	1 m×(1.5~3.5) m	20°~55°
				Spotlight;10	2 m×(1.5~3.5) m	20°~55°
				Stripmap;30	3 m×(3~6) m	20°~45°
				ScanSAR;100	26 m×16 m	20°~45°

续表 1

SAR 传感器	运行起止时间	重访周期 /days	工作波段 (波长/cm)	幅宽 /km	分辨率(方位向×距离向)	入射角
COSMO-SkyMed	2007.06 至今	24	X(3.12)	Spotlight;10	1 m×1 m	25°~50°
				Stripmap;30~40	3~15 m	25°~50°
				ScanSAR;100~200	30~100 m	25°~50°
RADARSAT-2	2007.12 至今	24	C(5.63)	Spotlight;20	0.8 m×(2.1~3.3) m	20°~49°
				Stripmap;20~150	(3~25.6) m×(2.5~42.8) m	20°~60°
				ScanSAR;300~500	(46~113) m×(43~183) m	20°~49°
TanDEM-X	2010.06 至今	11	X(3.11)	HR Spotlight;10	1 m×(1.5~3.5) m	20°~55°
				Spotlight;10	2 m×(1.5~3.5) m	20°~55°
				Stripmap;30	3 m×(3~6) m	20°~45°
				ScanSAR;100	26 m×16 m	20°~45°
Sentinel-1A	2014.04 至今	12	C(5.63)	Strip map;80	5 m×5 m	29°~46°
				IW;250	5 m×20 m	19°~47°
				EW;400	20 m×40 m	22°~35°/35°~38°
				Wave mode;20	5 m×5 m	
ALOS-2	2014.05 至今	14	L(23.5)	Spotlight;25	1 m×3 m	
				Strip Map;50/70	3 m,6 m,10 m	8°~70°
				ScanSAR;350/490	100 m/60 m	
Sentinel-1B	2016.04 至今	12	C(5.63)	Strip map;80	5 m×5 m	20°~45°
				IW;250	5 m×20 m	29°~46°
				EW;400	20 m×40 m	19°~47°
				Wave mode;20	5 m×5 m	22°~35°/35°~38°
GF-3	2016.08 至今	29	C(5.63)	12 种模式;10~650	1 m~500 m	10°~60°

2 InSAR 变形监测方法与进展

2.1 D-InSAR 方法

D-InSAR 是在传统的 InSAR 技术上发展起来的方法,主要通过引入外部 DEM 去除 InSAR 获取的干涉图中的地形相位,进而得到差分干涉图^[2]。而这差分干涉相位中除了地形相位外,还存在平地效应、形变信号、大气以及噪声成分。由于该差分干涉相位仍然是缠绕的,因此需对剩余的相位成分进行整周模糊度求解。具体地,通过精确的轨道信息来去除平地效应,利用一定的滤波来降噪,通过外部数据或模型来去除大气相位^[6],通过相应的相位解缠方法来获取整周模糊度^[7]。自 Gabriel 在 1989 年首次利用 D-InSAR 成功获取了农田区的形变信息后,学者们相继对 DInSAR 技术做了一系列的改进,如滤波算法的提出和改进^[8-9]、轨道相位的去除^[10]、相干性的稳健性估计、电离层的去除^[12]等。同时,D-InSAR 也从最初的地震、火山等大范围地表形变监测慢慢发展到局部形变监测,如结合角反射器的矿区、滑坡、油气田以及城市地表形变。虽然 D-InSAR 已取得了一定的成果,但因监测精度仍受时空失相干、大气等因素的影响,因此基于 D-InSAR 发

展起来的 MT-InSAR 是现今 InSAR 技术监测变形的研究热点。

2.2 PS-InSAR 方法

文献[13—14]首次提出了 PS-InSAR 方法,其基本思想是:第一,利用覆盖同一研究区的多景单视 SAR 影像,选取其中一景 SAR 影像作为主影像,其余 SAR 影像分别与主影像配准,依据时间序列上的幅度和(或)相位信息的稳定性选取永久散射体(Persistent Scatterer,PS)目标;第二,经过干涉和去地形处理,得到基于永久散射体目标的差分干涉相位,并对相邻的永久散射体目标的差分干涉相位进行再次差分;第三,根据两次差分后的干涉相位中各个相位成分的不同特性,采用构建形变相位模型和时空滤波或方式估计形变和地形残余信息。

PS-InSAR 技术不是针对 SAR 影像中的所有像元进行数据处理,而是选取在时间上散射特性相对稳定、回波信号较强的 PS 点作为观测对象。这些 PS 点通常包括人工建筑物、灯塔、裸露的岩石以及人工布设的角反射器等^[14]。PS 点的准确选取可以确保即便在干涉对的时间或空间基线很长的条件下(甚至达到临界基线),PS 点依然呈现出较好的相干性和稳定性。常用 PS 点选取

方法包括振幅离差阈值法^[14]、相干系数法^[16]、相位分析法^[17],以及这些方法的组合等。而形变和地形残差解算通常采用解空间搜索法^[14]、LAMBDA 方法^[18]和 StamPS 中的三维解缠法^[19]等。

目前,PS-InSAR 技术已在多个城市的高分辨率地面沉降监测中得到广泛应用,特别是城市重点基础设施的高分辨率形变监测。通过对比同期的水准和 GPS 测量数据,证实了 PS-InSAR 技术具有较高的可靠性(mm 级的精度)^[20],因此对掌握城市地面沉降动态规律以及分析地面沉降的成因等具有重要意义。

然而 PS-InSAR 技术也存在自身的缺陷。首先,其通常要求覆盖同一区域的 SAR 影像数目较多(通常要求大于 25 景),便于保证模型解算的可靠性。其次,PS-InSAR 技术由于是基于大量 PS 点的迭代回归或网平差计算,运算效率不高,因此不适合大范围地区高分辨率的地面沉降监测。

2.3 SBAS-InSAR 方法

SBAS-InSAR 是一种基于多主影像的 InSAR 时间序列方法,只利用时空基线较短的干涉对来提取地表形变信息,文献^[21]提出并利用该技术进行意大利南部 Campi Flegrei 火山口和 Naples 市的时间序列形变估计,证明了该方法具有能够准确估计形变的能力。SBAS-InSAR 技术克服了 PS-InSAR 因选取一幅影像作为公共主影像而引起的部分干涉图相干性较差的不足,同时降低了对 SAR 数据的需求量,运算效率较高。

SBAS-InSAR 技术是以多主影像的干涉对为基础,基于高相干点恢复研究区域的时间序列形变信息,其原理如下:首先对覆盖某个地区的不同时间段的多景 SAR 影像计算时间空间基线,选择恰当的时空基线阈值选取干涉对;然后对选取的干涉对进行差分干涉处理并进行相位解缠;最后根据自由组合的干涉图形成子集的情况,对所有干涉图组成相位方程采用最小二乘法或者 SVD 方法进行形变参数的估计。在实际处理中会采用时空滤波的方法去除大气延迟的影像分离出非线性形变,估算的低频形变与此非线性形变的总和即为整个研究区的形变信息。

针对 SBAS-InSAR 技术,各国学者展开了许多研究,在高相干点选取方面主要有相位稳定性选点法^[22]、振幅离差指数选点法^[13]、空间相干性^[23]等方法;在形变观测的数学模型选取方面,主要有线性模型^[23]、二阶多项式形变模型^[21]、周期

性形变项^[24]等;在参数估算方面主要有最小二乘法^[23]、SVD 法^[21]、基于 L1 范数的解算方法^[26]等。

为了提高高质量相干点的密度、减弱误差的影像、改善形变参数估计结果的精度,国内外学者提出了一些融合 PS-InSAR 和 SBAS-InSAR 优点的算法,如文献^[23]提出了基于最小二乘网络的平差法,利用少量的 SAR 数据获取干涉图中高相干点的地表形变信息。文献^[27]应用 PS-InSAR 和 SBAS-InSAR 融合技术于 Eyjafjallajökull 火山的形变监测中,获取了该区域的时间序列形变结果。文献^[28]提出了时域相干点法(TCP-InSAR),对形变参数、轨道误差同时进行估计,提高了监测精度。

2.4 DS-InSAR 方法

自 2011 年文献^[29]发布第二代永久散射体技术 SqueeSAR 以来,时序 InSAR 领域的研究热点逐渐转向对分布式目标(distributed scatterer, DS)的探索。与 PS 目标的物理属性不同,DS 是指在雷达分辨率单元内没有任何散射体的后向散射占据统治地位的点目标^[30]。事实上,利用 DS-InSAR 进行形变监测的概念早在 SBAS 技术和 StamPS 技术中已经建立^[21,27],当时学界更多的是以相干、非相干目标加以区分,而弱化了 PS 与 DS 之间的物理界限。因此,从数据处理的角度来说,以 SBAS 为代表的小基线技术与 SqueeSAR 技术及其变种有本质不同,但它们又同时强调 DS 目标的信噪比,因而均属于相位滤波。

SqueeSAR 的技术要点是:①通过同质点选取算法增强时序 InSAR 协方差矩阵的估计精度,并同时辅助 PS 与 DS 目标的分离;②通过相位优化算法从协方差矩阵中恢复时序 SAR 影像的相位。在第 1 个步骤中,其前提条件是相同 SAR 影像质地的像素具有相同相位中心,因此在时序统计推断的框架下,选取具有相同 SAR 统计分布的像素参与平均不仅可以提升相位信噪比,还能保留图像的空间分辨率^[32]。相比之下,SBAS 多采用常规多视处理或空间(自适应)滤波,是一种以牺牲空间分辨率为代价换取相位质量提升的方法^[29]。在复杂形变特征环境下,这类方法极易损失细节,并伴随形变非形变区域的误读。在第 2 个步骤中,SqueeSAR 在样本协方差矩阵服从复 Wishart 分布的基础之上,采用极大似然估计方法得到优化后的时序相位。由于似然估计量无解析表达式,需采用非线性优化“挤压”待估参数,

便成为“Squeeze”一词命名的由来。值得注意的是,SqueeSAR一方面运用了所有干涉对的信息,另一方面却并未从滤波后的干涉相位中直接提取时序相位,这与大多数时序InSAR技术采用相位三角关系从滤波后的干涉相位中直接解算时序相位有本质区别^[29]。在优化DS之后,与PS目标一起融入传统PS-InSAR数据处理框架就可以获得精度更高、空间分辨率增强的时序形变产品。

SqueeSAR技术也有其缺陷。在同质选点算法中,使用的KS假设检验功效低,特别在小样本条件下易使选取的同质集合中包含许多异质点,而且计算效率低下^[32]。因此,近年来国内外学者纷纷提出了计算更为高效或估计精度更高的统计推断方法,具有代表性的是AD检验^[33]、似然比检验^[32]、自适应检验和置信区间估计等^[34]。在相位优化算法中,计算效率是该方法的主要诟病之处,使得大范围的精细监测几乎无法施展,备择的方案是文献^[35]提出的协方差矩阵奇异值分解方法。在优化可靠性方面,可采用抗差性更强的估计量,如M估计量等^[36]。

上述改进算法与SqueeSAR技术一起构成了当今DS-InSAR的雏形,旨在提高计算效率、增加观测密度和改善估计精度。广义的,除基于PS目标之外的时序InSAR技术都或多或少地应用了DS的概念,而联合PS-InSAR和DS-InSAR或许是提高最终产品精度的最佳方案^[27,29]。

2.5 MAI方法

MAI技术的提出旨在获取地表方位向的形变信息,由于方位向和LOS向相互垂直,因此为D-InSAR的监测结果起到很好的补充作用,进而获取地表三维形变信息^[37]。而相对于偏移量跟踪(Offset-tracking)方法而言,MAI方法在方位向上的形变解算精度和效率都更高,从而为形变的精确解译起到较好的促进作用,现已广泛应用于地震、火山、冰川的等相关的三维形变测量中^[38-39]。

MAI的技术原理主要是通过方位向公共频谱滤波技术重新确定SAR数据的零多普勒中心,进而将一景SAR影像重新划分为前视与后视两景影像。通过对主影像和从影像的前视与后视影像分别进行影像配准、多视处理、生成干涉图、去平地相位、去地形相位以及滤波处理得到前视干涉图与后视干涉图,再对前视与后视干涉图进行差分处理后,即可得到MAI干涉图,其包含的即为方位向形变相位^[37]。

由于MAI技术进行了方位向公共频谱滤波,相当于缩短了合成孔径时间,单个前视或者后视影像接收到的回波信号会减弱,因此相比于传统的InSAR技术,MAI技术更易受到失相关噪声的影响,不适用于近场的同震形变信息提取以及较快的冰川流速估计^[40]。针对该问题,文献^[39]将Stacking思想引入MAI技术中,通过对多个干涉对进行叠加,有效地抑制了失相关噪声对MAI观测的影响。另一方面,由于前视与后视干涉对之间的垂直基线存在有细微的差别,会导致MAI干涉图中出现由平地 and 地形效应引起的相位残留。以PALSAR数据为例,在标准幅宽下,0.1 m的垂直基线差会造成20°的平地相位残余,相当于50 cm的方位向形变。文献^[41]对MAI干涉图中的相位残余进行了分析,给出垂直基线差与相位残余间的关系,同时提出了使用多项式模型对相位残余进行模拟和消除的方法。再一个限制MAI技术应用与发展的因素是电离层相位对MAI干涉图所造成的影响。由于电离层分布的时变性,当电离层活跃时,其会在干涉影像上造成方位向偏移,进而在MAI获取的方位向形变上表现出一定方向性的条纹,即电离层条纹,且在L波段上该现象尤为明显。文献^[38]根据电离层条纹的空间特性,提出了基于方向性滤波与插值的MAI电离层趋势的改正方法。

3 InSAR变形监测的应用与进展

3.1 城市沉降监测

随着全球城市化进程的不断加快,导致城市形变的原因也越来越多元化,如地下资源的过度开发/采、建筑物及基础设施的大量修建以及软土层的压实等导致的地表形变。城市区域内多为人工建筑物,其散射特性比较稳定,可以很大程度地减少InSAR技术中的时间失相干,从而得到较为可靠的形变信号,因此城市监测技术及应用研究一直是InSAR技术的研究热点^[42]。

根据城市沉降的主要成因,InSAR城市沉降监测主要包括:①因过度抽取地下水而导致的大范围、大量级形变的城市,如上海^[17]、北京^[43]等区域的时序形变监测都取得了显著效果;②因基础设施的大量修建等导致的地表形变,如上海、深圳、广州等地铁沿线的形变^[44];③因软土地质压实导致的形变,如填海区的时序形变监测^[44]。

随着SAR影像分辨率的提高和轨道重返周

期的缩短,InSAR 在城区监测中的应用会越来越广泛的同时也面临着一些挑战。例如,由于高分影像中因高楼而导致的条纹过于密集,从而导致相位解缠困难的问题;由于已有的外部 DEM 数据分辨率和精度均较低,导致大量 DEM 相位残留的问题;由于常用的 MT-InSAR 技术均假设各 PS/DS 点上的形变均为线性形变,而在很多城市形变并不满足这一条件,导致形变信息误估的问题。

3.2 矿山形变监测

自从 2000 年文献[45]利用 DInSAR 监测了法国 Gardanne 附近煤矿的地表沉降以来,InSAR 技术已逐渐成为矿区地表形变监测和预计的重要工具之一。目前,InSAR 技术在矿区应用研究主要包括以下两个方面:①矿区地表 InSAR 三维形变高精度监测;②基于 InSAR 的矿区地表变形预计。

在矿区地表三维或三维时序形变高精度监测方面,文献[46]将 SBAS-InSAR 用于监测湖南冷水江锡矿山地表 LOS 向形变以来,其他时序 InSAR 技术(如 Stacking InSAR 和 PS-InSAR),也被相继引入了矿区地表 LOS 向时序形变监测。但由于获取的时序形变沿着 LOS 方向,而非地表真实三维形变,因此,文献[47]提出利用 3 个不同平台或轨道 SAR 数据估计地表三维时序形变。但该方法对于数据要求比较苛刻,所以实际应用前景有限。文献[48]引入开采沉陷模型,实现了基于单个 InSAR 干涉对的矿区地表三维形变估计。文献[49]将 Li 的方法扩展到基于单个雷达成像几何学 SAR 数据的矿区地表三维时序形变监测。

在基于 InSAR 的矿区地表变形预计方面,文献[50]提出结合概率积分法模型和 InSAR 技术实现了矿区地表沉降预计。然而,由于该方法方法忽略了水平移动对 LOS 形变的贡献,且无法估计全部的概率积分法参数,所以其实际应用受到了一定的制约。文献[51]建立了概率积分法全部参数与 InSAR LOS 向形变之间的函数模型,实现了基于 InSAR 的矿区全盆地任意方向的形变预计。文献[52]引入 Boltzmann 函数改进了其 2016 年提出的函数模型,实现了不同采动程度下的矿区地表全盆地变形预计。

矿区地表形变范围小、梯度大,因此失相关是目前 InSAR 矿区应用的主要瓶颈。但随着目前

长波长、短时空基线的 SAR 卫星的发射,如 ALOS 2 和 Sentinel-1A/B(见表 1),该问题应该有所突破。此外,当前的 InSAR 矿区应用主要着眼于地表形变监测和预计,对于如何利用 InSAR 分析矿区沉降机理以及矿区生态环境修复等领域则较少涉足。

3.3 地震形变监测

地震的形变监测是目前 InSAR 技术应用最为广泛和成功的领域之一。文献[53]利用 InSAR 技术成功获得 1992 Lander 地震形变以来,世界范围内数以百计的地震已经通过 InSAR 技术进行了研究。根据 InSAR 监测的形变量级大小和技术来分,可以分为两类:InSAR 同震形变监测和 InSAR 震后或震间形变监测。

同震的形变量级一般较大(分米至米级),虽然 D-InSAR 技术可以获得较好的监测效果,但是由于 InSAR 技术侧视成像几何的限制,无法估计地震三维形变^[40]。因此,近年来围绕如何融合不同观测几何和不同卫星传感器观测获得有益于地震解释的三维形变场开展了大量的研究,在该方面文献[40]进行了较系统的综述。同时,为了提高地震形变监测的精度,大量学者针对 D-InSAR 技术中轨道误差、大气误差和电离层异常误差的去除也开展了一系列研究^[12]。另外,由于 InSAR 相位在大形变量级的近场往往会失相干,无法获得有效观测值,Offset-Tracking 技术成为目前大地震近场形变监测的重要补充。

震后和震间形变量级一般较小(厘米至毫米级),需要应用精度更高的 MT-InSAR 技术才能满足精度要求。目前 MT-InSAR 技术在时间失相干和大气误差的改进都对震间和震后形变的监测起到了帮助,已经成功在世界范围内的多个重要断裂上得到应用,如美国加州的 San Andreas 断裂^[54],土耳其的 North Anatolian 断裂^[55]等。InSAR 技术也在我国的海源断裂和鲜水河断裂也有大量的尝试和研究工作^[55]。另外,由于受到茂盛植被的影响,CR-InSAR 等人工散射体技术也被用于辅助震间形变的监测^[56]。

InSAR 地震形变监测一方面得益于技术的提高和创新,可以为地震参数反演提供更为精确可靠的观测值;另一方面也跟 SAR 卫星软硬件的提高紧密相连,特别是 SAR 数据的全球无缝覆盖和高密度重返都会为抗震救灾,地震监测提供重要的数据源。

3.4 火山活动监测

InSAR 十分适合测量由于火山岩脉入侵,岩浆膨胀和收缩和地热系统引起的复杂地表形变。文献[57]首次利用 InSAR 监测了 Etna 火山的形变。通过分析 32 景升轨和 60 景降轨干涉图,文献[57]从 12 景相干性较好的干涉图识别出伴随着 1993 年 Etna 火山喷发的稳定的地表收缩信号。

文献[60]利用 InSAR 观测了位于哥拉帕戈斯群岛的 Fernandina 火山产生的地表形变,发现入侵的火山岩脉的倾角在浅层发生了大约为 35° 的旋转。文献[61]通过研究覆盖该火山多次喷发的一系列干涉图,发现火山岩脉的入侵可以改变应力场从而控制下次岩脉入侵的几何和位置。文献[62]监测了位于哥拉帕戈斯群岛最北端的 Wolf 火山发生了喷发;通过反演 InSAR 监测的地表形变,发现 Wolf 火山体浅层存在两个岩浆囊,它们分别位于地下 1 km 和 5 km 处。最著名的离散板块边界火山活动监测当属 2005 年至 2010 年位于埃塞俄比亚的 Dabbahu 岩脉入侵^[63]和 2014 年位于冰岛的 Bardarbunga 岩脉入侵^[64]。岩浆容积约为 1 km^3 的岩脉传播大约 65 km 的距离。InSAR 的监测结果表明该入侵致使地表产生了大约 6 m 地表形变并在岩脉的上方形成了 2~3 km 宽的地堑。通过利用高分辨率的 COSMO-SkyMed 数据,文献[64]成功提取了 2014 年 Bardarbunga 岩脉入侵产生的地表三维形变场。

在火山弧监测方面,文献[65]利用 C 波段 InSAR 普查了 Andes 山脉大约 900 座火山。他们发现了 4 处明显的地表形变区域并估计处火山的岩浆囊可能处于地下 5~17 km 之间。文献[66]进一步利用 InSAR 数据普查了拉丁美洲和 Andes 南部的火山并发现了 11 处火山形变明显区域。L 波段 InSAR 数据被广泛的应用于热带地区火山形变的监测。以印度尼西亚为例,文献[67]的 InSAR 普查结果显示 6 座火山正处于膨胀阶段其中 3 座火山于观察后发生了喷发。

尽管至今 InSAR 已经成功的观测了至少 160 座火山的地表形变,但是如何利用 InSAR 形变监测数据进行火山喷发早期预警,如何联合地表形变和物理模型准确的估计地下岩浆囊具体物理参数,如何有效地考虑建模时地形的影响,仍然是 InSAR 在火山学研究中需要考虑和解决的一

些重要问题。

3.5 基础设施形变监测

基础设施,如高速公路、高速铁路、发电设施、码头等,是社会经济发展的链条。受区域不合理的人类工程活动等因素的影响,基础设施周边出现严重的地表形变,影响基础设施的地基稳定性,对基础设施的安全运营造成潜在的安全威胁。因此,监测基础设施地表形变,对于保障基础设施稳定安全运营具有重要的现实意义。MT-InSAR 技术能够快速提供高精度、高空间分辨率以及大范围空间连续覆盖的地表形变监测结果,为基础设施地表形变监测提供更全面有效的手段^[68]。

近年来,随着 SAR 卫星的不断发展,SAR 影像的空间分辨率不断提高,最高达到 0.25 m,极大地提高了 InSAR 技术的精细化形变监测能力^[69],使得 InSAR 技术在基础设施的形变监测应用不断扩宽。尽管 InSAR 在基础设施形变监测中取得了较好的应用效果,但是 InSAR 在实际应用中仍存在挑战。由于受最小天线面积的限制,传统 SAR 传感器无法在满足影像分辨率和幅宽的同时提高,因而难以实现超大范围高分辨率基础设施的形变监测,例如我国京广高铁线路(上千千米长度)。

3.6 冰川运动监测

由于微波能穿透一定深度的冰/雪面,InSAR 观测可以不受冰雪表面光学对比度/纹理的制约。此外,冰川区经常被云层覆盖,而微波却可以穿透云层。因此,在冰川动态监测方面 InSAR 相对于其他手段有巨大优势。当前,InSAR 技术在冰川的应用主要体现在 3 个方面;①利用 InSAR 相干性提取冰川边界。由于形变和融化等影响,冰面相干性普遍要低于非冰面,快速流动冰面普遍要低于缓慢流动冰面,因此根据相干性分布可以提取冰川边界以及入海冰川的陆上部分^[70]。②利用 D-InSAR 技术监测冰川流速。1993 年 Goldstein 等首次利用 D-InSAR 技术获取了南极 Rutford 冰川的流速。随后,D-InSAR 技术被广泛应用于格陵兰岛^[66]、南极^[71]、斯瓦尔巴特群岛^[72]等区域的冰川流速监测中。然而在中低纬度区域,受冰面 InSAR 相干性低的限制,相关的研究仅局限于部分流速较为缓慢的冰川,例如珠峰地区 Khumbu 冰川和 Kangshung 冰川^[73],唐古拉山冬克玛底冰川^[70]。由于测量的是一维形变,单轨道 D-InSAR 很难反映冰川真实流速信息。针对

这一问题,基于冰面平行于河床流动的假设和升降轨数据融合,文献[74]采用 D-InSAR 技术估计格陵兰岛的 Storstrømmen 冰川的三维流速。很明显,这种三维流速解算并不是严格的。于是文献[75]通过 4 个 Radarsat 影像干涉来重建埃尔斯米尔岛北部 Henrietta Nesmith 冰川的真三维流速。但这种基于多角度的严格三维观测需要有足够的数据支撑,在中低纬度区域很难满足。虽然采用 MAI 技术基于单个 SAR 影像对可以同时获取冰川在雷达视线向和方位向的流量,但事实上 MAI 技术对影像的相干性要求更高。因此,一般情况下的冰川三维流速监测须联合 D-InSAR、MAI、Offset-tracking 等多种 SAR 技术^[40],而如何给各个观测值合理定权则具有一定的挑战性。

③利用 InSAR 技术监测冰川的厚度变化。2000 年基于单轨双天线 InSAR 技术获取的 SRTM DEM 因其精度稳定被广泛采纳为冰川厚度变化监测中的历史或最新高程数据来源^[76]。然而其他 SAR 卫星任务多为常规重复轨道单天线模式,InSAR 技术因为受到大气和冰川形变等影响很难准确获取冰川高程。纯 InSAR 技术成功监测冰川厚度变化的案例集中出现在 TanDEM-X 数据公开后(2013 年)。TerraSAR-X 和姊妹星 TanDEM-X 组成的双基站星座可以获取几乎不受大气变化和冰面形变影响的干涉对。自 2013 年以来,利用 TanDEM-X 双基站干涉对与 SRTM DEM 来获取冰川厚度变化的研究在南极洲^[77]、格陵兰岛^[78]、高亚洲^[79]等地区陆续开展,极大地丰富了社会对山岳冰川响应全球气候变化的认知。

3.7 冻土过程监测

近年来,在全球气候变暖和人类活动的干扰下,全球多年冻土均发生了不同程度的退化,引起了水土流失、草场退化和环境变化,对寒区的重点工程和设施的安全造成了威胁。大范围高精度高分辨率的对多年冻土区的进行形变监测和活动层厚度变化监测,对寒区安全平稳的可持续发展具有非常重要的科学意义。

InSAR 为多年冻土区形变监测方法和活动层厚度的监测提供了一种全新的、非常有效的测量方法。文献[80]采用 D-InSAR 探测加拿大北部地区的冻土区地表变形,开创了 InSAR 技术在冻土区形变监测方面的先河。随着 InSAR 技术的发展,PS-InSAR、SBAS-InSAR 技术也相继被

用于监测冻土区地表形变。但由于冻土区地表形变复杂,文献[81、83、25、85]分别提出了并采用考虑冻土融化时发生沉降累积时间的形变观测模型、三次幂函数形变模型、周期性模型、顾及气候因子影响的形变模型用于监测不同冻土区的地表形变,取得了比较可靠的结果。利用 InSAR 技术获取冻土活动层厚度的研究仍处于探讨阶段。文献[82]根据水质量守恒,建立形变-活动层厚度反演模型,反演了美国阿拉斯加州北部靠近普拉德霍湾的多年冻土活动层厚度。文献[24]考虑冻土的热物理性质,提出了基于 InSAR 形变结果与土壤一维热传导模型的活动层厚度反演方法,得到了青藏高原当雄冻土区平均活动层厚度。文献[86]采用 Liu 等提出活动层厚度反演方法估计了青藏高原腹地地区活动层厚度及其变化速率,与实测数据较为吻合。

InSAR 技术在冻土研究中具有广泛的应用潜力。如何利用 InSAR 监测冻土活动层物理参数,如冻结融化深度、活动层厚度、冻土上限等,仍是一个棘手的问题,仍是未来该技术在该领域应用的研究热点。

3.8 滑坡灾害监测

早期用于滑坡动态监测的数据主要是 ERS-1/2 的串行数据,利用传统的 D-InSAR 技术取得了一系列有益的结果。但是由于滑坡所处环境一般比较复杂,如地形起伏严重、植被覆盖较为茂密、部分滑坡滑动快速等,使得 InSAR 观测滑坡较为困难。为了解决这些问题,MT-InSAR 技术逐渐被运用到了滑坡形变的监测中。

首次 PS-InSAR 技术的成功试验是文献[13—14]在 2000 年对意大利 Ancona 地区开展的滑坡监测。文献[87]尝试将 SBAS-InSAR 方法用于意大利 Maratea 山谷的滑坡监测,形变测量精度也得到了实地 EDM 和 GPS 观测结果的验证。文献[88]利用 PS-InSAR 技术对美国 Berkley 地区的滑坡展开监测,结果表明该滑坡形变历史进程与厄尔尼诺现象存在明显的相关性,该成果发表于国际著名的杂志《Science》上。随后,诸多学者利用或结合 PS-InSAR 和 SBAS-InSAR 监测了国内外诸多滑坡。在此期间,欧空局发起了 MUSCL 和 SLAM 项目,得到了一系列令人振奋的成果。我国科技部与欧空局的合作项目——“龙计划”,三峡库区重点灾害监测点安装了角反射器,对我国三峡地区的滑坡泥石流等地

质灾害进行了监测。

然而,由于已有的 MT-InSAR 技术基本都是基于地面沉降监测发展而来,对于滑坡监测而言无法达到其最佳性能。此外,地形起伏引起的几何畸变和植被覆盖导致的低相干仍然是 InSAR 滑坡监测的主要难题,严重时会导致无法得到有效的监测结果。

4 InSAR 变形监测的挑战

4.1 多维形变测量

众所周知,InSAR 技术只能监测地表形变在雷达视线方向(line-of-sight, LOS)上的一维投影。然而在现实中,地质灾害引发的地表形变都是发生在三维空间框架下的,即所谓的三维形变场。理论上,融合 3 个或以上平台或轨道的 InSAR 形变观测值就可以重建三维地表形变。但受限于现有 SAR 卫星的极轨飞行和侧视成像模式,InSAR 形变观测值对南北向形变极其不敏感,导致该方法只能在忽略南北向形变的前提下得到可靠的垂直向和东西向形变^[89]。因此,InSAR 形变观测值极有可能导致对地质灾害的误判甚至错判,这已经成为限制 InSAR 技术应用和推广的主要瓶颈之一。

为了克服 InSAR 技术的上述缺陷,部分学者开始研究利用偏移量跟踪(OFT)^[90]和 MAI^[37]技术监测 LOS 向之外(即方位向)的地表形变结果。其中,OFT 方法是利用主辅 SAR 影像的配准偏移量信息来监测地表在方位向(即卫星飞行方向)上的形变信息。国内外的研究成果表明,融合升轨和降轨的 DInSAR 和 OFT/MAI 观测值,可以较好的重建由地震、火山喷发和冰川漂移等大型地质灾害的三维形变场。另一方面,GPS 是目前最为常用的三维地表形变监测技术,但是只能获得稀疏的 GPS 地面站所在位置的测量结果。通过融合 InSAR 和 GPS 资料,可以充分利用二者的优点,获取高分辨率的三维形变场^[91]。

通过上述分析可知,对于绝大多数没有布设足量 GPS 的研究区域,现有的 InSAR 方法都难以得到高精度的三维形变(特别是南北向形变)结果,从而导致 InSAR 在监测某些地质灾害时力不从心,例如近南北走向的走滑断层活动、近东西走向的逆冲断层活动、朝南或朝北的山体滑坡等。已经进入可行性论证阶段的高轨 SAR 卫星,其成像几何与目前低轨 SAR 卫星的成像几何差异较

大,已有研究表明,融合高轨和低轨 InSAR 观测值,可以获取高精度的三维形变场^[92]。另一方面,不同平台、不同轨道 SAR 数据的获取时间和重返周期都有所差异,导致现有模型在解算三维时序形变存在秩亏问题,需要借助附件条件进行约束,这不仅有损 InSAR 三维时序形变结果的估计精度,而且每获取一景新的 SAR 数据,都需要将其与之前所有的存档数据一起重新处理,极大地浪费了时间和精力。动态平差方法(如卡尔曼滤波)则为解决该问题提供了新的思路。

4.2 低相干区测量

相干性是 InSAR 技术无法回避的问题之一^[3-4]。受各成像时刻分辨率单元内散射体变化、传感器姿态变化和雷达波透射比等因素制约,雷达回波信号不同程度地遭受着时空去相干的影响,导致干涉相位随机噪声增加,相干性衰减,测量精度降低。当两次回波信号的线性相似程度为 0 时,则产生完全失相干现象,致使 InSAR 技术失效。

低相干或快速去相干区域目前并没有明确的定义,一般是指时间或空间相干性小于某个临界值时的研究对象,如牧草地或湿地区域的干涉质量随时间变化呈指数衰减,是典型的低相干区域。从 InSAR 的技术特点出发,传统 D-InSAR 由于观测有限,很难直接捕捉到这类区域的形变特征。反之,时序 InSAR,特别是基于分布式目标的时序 InSAR 技术因观测数增多、信噪比增强等特点能够部分恢复低相干区域的形变历史^[27,29]。然而,这对于 InSAR 数据处理是一项极具挑战性的任务,主要体现在两个方面:①相干性是评价相位质量的唯一指标,因此相干性的参数估计问题是整个质量控制的关键;②在时间维,仅有限的观测用于解算时序形变,在最小范数框架下,设计矩阵面临秩亏,增加约束条件是影响最终产品精度的关键^[21]。在第①点中,由于样本相干性是有偏估计量,在低相干区域产生更高的系统偏差,使得相干值并不能客观反映相位质量,导致实际选取的点目标相位质量差。若要提取正确的点目标,去除系统误差是关键。但是,相干性估计量的统计属性十分复杂,且无解析表达式。当前行之有效的解决方法是采用 Bootstrapping 或 Jackknife 非参数统计技术在无分辨率损失的情况下逐点去除观测偏差^[11]。在第②点中,解的稳定性取决于观测数量和约束条件与现实时序形变的吻合程度,

目前通用的方法是采用截尾 SVD 分解或 Tikhonov 正则化方法(拉普拉斯平滑算子)进行补偿^[21]。

不同波长的传感器具有不同的抗失相干能力。随着 SAR 影像的累积,同一区域可能覆盖多个传感器的数据栈。将多源传感器数据进行联合解算以便增加观测数并同时提高时间分辨率是实现低相干区域 InSAR 形变监测的主流方法^[93]。这不仅对不同平台的数据配准有更高的要求,而且不可避免地衰减空间分辨率。然而,在干涉条件较差的环境下,利用牺牲空间分辨率换取估计精度的可靠性可能是目前低相干区域测量的唯一手段,而在没有先验知识的情况下一味追求对形变解算方法的改进很可能导致错误的解译结果。

瞬时形变,如同震引起的地表破裂常使得断层附近的观测完全失相干,上述 InSAR 监测方法完全失效。备择方案是采用 SAR 图像偏移量技术获取近场变形或以偏移量方法辅助恢复干涉条纹信息。

4.3 大气误差改正

大气延迟的影响是当前 InSAR 地表形变监测中的主要误差源之一。SAR 卫星发射的微波信号穿过大气层时,会由于大气层中传播介质的非均匀性而影响电磁波的传播速度和传播路径,从而产生额外的大气信号。由于大气层在不同时刻呈现的状态不一样,导致 SAR 卫星在不同成像时刻受大气的影响也不相同,两次成像时刻的大气信号之差即所谓的“大气延迟”。大气层中的电离层和对流层是导致大气延迟的主要介质层^[4]。

电离层对微波信号的影响主要与传播路径上的总自由电子数目(TEC)有关,其中电离层中自由电子的数目主要受太阳表面黑子活动强度的影响,InSAR 中的电离层影响则主要是由于两次 SAR 成像时刻沿传播路径上电离层自由电子数目的变化导致,且影响程度与传播信号频率的平方成正比相关,则频率越高影响越大。在相同电离层情况下,L-波段(1.275 MHz)SAR 卫星受电离层的影响程度大约是 C-波段(5.29 MHz)的 17 倍^[94]。此外,TEC 在不同纬度带的分布及其不均匀,通常情况下赤道附近的 InSAR 电离层影响相比于中高纬度地区要更明显。当前对于 InSAR 电离层的改正主要有以下几种方法:①利用外部探测手段监测到的 TEC 数据(例如 GPS)来改正干涉图中的电离层误差^[95];②通过计算

SAR 影像在方位向上的 Offset-tracking 来估计电离层误差^[96];③利用 MAI 监测出方位向上的形变来估计电离层影响^[97];④通过分裂距离向雷达频谱的方法(Range Split-spectrum Interferometry, RSI)得到基于两个不同频率获得的干涉图来估算出与电离层相关的大气误差^[94]。然而以上方法都还存在着一些自身的局限性,第 1 种方法受限与外部数据的空间分辨率,例如 GPS 站的空间分辨率往往达到了数十千米;第 2 种方法则非常依赖于像素匹配的精度,而且估计结果会受方位向形变信号的影响;第 3 种方法则非常依赖于前后孔径干涉图的空间相关性以及 MAI 相位沿方位向上的积分精度;第 4 种方法则受限与 SAR 卫星本身的载波频率带宽,例如当前的 SAR 卫星带宽通常只有 14 MHz 或者 28 MHz。因此,对于 InSAR 中电离层影响的校正依然是一个较为棘手的问题。

相比于电离层的影响主要集中在低纬度地区以及长波段 SAR 干涉图中,对流层(又称中性大气层)延迟对于 InSAR 干涉图的影响则更为普遍^[4]。电磁波在对流层中的传播主要与大气压强、温度以及空气中的水汽含量的有关。由于压强和温度在空间上的变化比较缓慢,空间尺度比较大,因此 InSAR 干涉图中的对流层延迟主要与水汽含量的空间分布有关。两个 SAR 成像时刻的水汽含量只要变化 20%,则可以导致 10~14 cm 的 InSAR 形变误差^[3]。空间上的 InSAR 对流层延迟在物理机制上可以将其分为两部分:垂直分层部分和湍流部分。其中垂直分层部分的对流层延迟与地形起伏相关,在多山地区的影响较为明显,湍流部分的对流层延迟则与地形无关,而受大气的湍流作用影响^[4]。当前 InSAR 对流层误差的校正主要可以分为如下两大类方法:第 1 类,基于外部大气数据的对流层误差改正方法^[98];第 2 类,利用 InSAR 对流层延迟在时空上的统计特性基于统计学的方法来削弱其影响^[14]。其中第 1 类方法中的外部大气数据源主要有:①GPS 估计出的天顶延迟数据;② MODIS、MERIS 光学传感器获得的水汽数据;③气象模型(如 WRF, NWM)估计出的对流层延迟数据。这一类基于外部数据的校正方法非常受限与外部数据自身的观测质量以及数据的时空分辨率,例如 GPS 数据虽然有较好的时间分辨率,但空间分辨率远低于 SAR 影像,MODIS 数据和 MERIS 数

据则只在白天工作,而且数据质量受云污染的影响严重,气象模型则受限于原始气象数据的空间分辨率(数十千米),而且气象模型不能估计湍流部分的对流层延迟。第2大类对流层校正方法则主要有以下两种:①通过分析对流层延迟与地形起伏的关系,在空间上建立对流层延迟的函数模型^[99];②利用时间序列上的干涉图,在时间域通过滤波或者平差的手段来削弱对流层的影响^[14]。然而这一类方法也存在着一些自身的缺陷以及局限性,例如空间域对流层函数模型建模的方法则只能削弱垂直分层部分的大气延迟,通过时许滤波的方法则往往都是基于时间域对流层延迟符合高斯分布的假设,而这往往不符合实际情况的。

相信随着外部探测技术的不断完善、SAR 传感器的不断改进以及算法的不断优化,InSAR 大气延迟的校正可以得到进一步的改善和提高,这对于 InSAR 技术的推广以及更高精度地表形变的提取也是至关重要的。

4.4 轨道误差改正

由于轨道状态矢量存在误差,导致基线估计不准确,给 InSAR 数据处理带来的误差,称之为轨道误差。根据 InSAR 原理,基线存在的误差不仅影响平地相位的去除,同时会影响高程与地形相位转换参数的计算,其一方面在 InSAR 地形测绘中直接降低 DEM 的计算精度,另一方面在差分 InSAR 中影响外部地形贡献的去除,从而降低差分 InSAR 形变监测的可靠性。影响 InSAR 干涉测量精度的些误差中,基线误差对 InSAR 干涉测量精度的影响是系统性的^[100],尤其突出。无论是传统的差分 InSAR,还是在 PS-InSAR 和 SBAS-InSAR 等时序形变分析方法,轨道误差都是必须考虑的误差源。为了消除基线估计不精确导致的相位误差,从数据处理角度出发,目前有两种可选方法,即基线精确估计^[101]、干涉相位误差校正。

在基线精确估计方面,文献^[101]提出了利用地面控制点精化 InSAR 干涉基线的方法,根据已知的解缠相位和地面控制点高程建立观测方程,采用最小二乘方法进行基线参数的求解。但是很多情况下,我们没法获得研究区域的地面控制点。近年来,有学者将基线精化研究工作转移到结合多时域 InSAR 的研究上,提出了多时域基线精化方法^[102],但是这些方法采用的基线精化模型在计算雷达视线方向矢量时仍高度依赖精确的地面

高程信息^[103],这在很大程度上影响了基线精确估计结果的精度水平。在干涉相位误差校正方面,研究工作主要集中于利用多项式模型去除轨道误差,包括线性模型、二次多项式模型。然而,采用多项式拟合方法对干涉相位进行校正仅能去除平地相位误差,而由于基线误差导致的地形残余仍留在干涉图中,这部分误差与高程高度相关,容易被认为是与高程相关的大气误差^[104]。

4.5 精度评定

目前,InSAR 的形变测量结果基本都依赖于实地测量数据(如水准、GPS 等)来检核其精度和可靠性。其中最科学合理的方法是在研究区域布设人工角反射器,在 SAR 影像获取时刻利用实地测量手段对角反射器进行精密测量,并以此为标准对 InSAR 结果进行精度评定^[105]。对于绝大部分没有布设角反射器的区域,则一般是根据实地测量数据的地理坐标选择最近的或一定范围内的 InSAR 监测点进行比较。然而值得注意的是,实地测量手段和 InSAR 技术所监测的地面点往往并不一致。例如,在城区形变监测时,InSAR 技术所监测的地面点一般是建筑物等反射信号稳定的地物,而水准监测点大多是沿马路进行布设,GPS 监测站则可能建立在基岩上,这就导致实地测量数据不能准确、客观地评价 InSAR 形变监测结果。

由上述介绍可知,目前 InSAR 精度评定受限于实地测量数据的数量和可靠性,因此未来有必要研究一种不依赖于外部数据的 InSAR 精度评定方法。相干性是衡量 InSAR 干涉图质量的一个重要指标,但如何实现相干性的精确估计、以及如何将相干性与 InSAR 形变监测精度相关联,都有待进一步研究。然而,大气延迟的影响噪声在相干性中难以得到体现,因此对于大气影响严重的 InSAR 形变监测结果,需要考虑引入更为复杂的模型(如协相关函数)来估计大气噪声的方差^[106]。另一方面,方差分量估计理论可以通过平差得到的观测值改正数来迭代估计观测量的方差,不受到任何先验信息的限制,有望在 InSAR 精度评定中取得突破^[107]。

5 结 论

自 InSAR 技术提出以来,大量学者针对如何提高 D-InSAR 变形监测的精度和维度作出了大量努力,提出了 PS-InSAR、SBAS-InSAR、DS-

InSAR 和 MAI 等经典技术,并且在城市、矿山、地震、火山、基础设施、冰川、冻土、滑坡等领域取得了大量的成功应用。但是,InSAR 技术也存在自身的局限性,例如对南北向形变的不敏感性、由失相关、大气延迟和轨道误差导致的不确定性、以及缺乏有效的精度评定方法等,这些都在一定程度上阻碍了 InSAR 工程化和市场化进程。随着 SAR 卫星的成像质量和时空分辨率等越来越高,如何进一步挖掘 SAR 数据的时空几何物理特性在 InSAR 误差改正和多源融合等方面的潜力,实现高精度三维时序变形监测和精度评定,将是未来该领域的主要研究方向。

致谢:本文在撰写过程中得到了河海大学蒋弥、香港理工大学许文斌、湖南师范大学孙倩等的协助,在此一并表示感谢。

参考文献:

- [1] ZEBKER H A, GOLDSTEIN R M. Topographic Mapping from Interferometric Synthetic Aperture Radar Observations [J]. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, 1986, 91(B5): 4993-4999.
- [2] GABRIEL A K, GOLDSTEIN R M, ZEBKER H A. Mapping Small Elevation Changes over Large Areas: Differential Radar Interferometry [J]. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, 1989, 94(B7): 9183-9191.
- [3] ZEBKER H A, VILLASENOR J. Decorrelation in Interferometric Radar Echoes [J]. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 1992, 30(5): 950-959.
- [4] HANSSEN R F. *Radar Interferometry: Data Interpretation and Error Analysis* [M]. Netherlands: Springer, 2001.
- [5] GALLOWAY D L, HUDNUT K W, INGEBRITSEN S E, et al. Detection of Aquifer System Compaction and Land Subsidence Using Interferometric Synthetic Aperture Radar, Antelope Valley, Mojave Desert, California [J]. *Water Resources Research*, 1998, 34(10): 2573-2585.
- [6] LIU Shizhuo, HANSSEN R F, MIKA Á. Feasibility of Retrieving Spatial Variations of Atmospheric Phase Screen at Epochs of SAR Acquisitions from SAR Interferometry [C]//Sixth International Workshop on ERS/Envisat SAR Interferometry. Frascati, Italy: [s.n.], 2009: 5.
- [7] COSTANTINI M, ROSEN P A. A Generalized Phase Unwrapping Approach for Sparse Data [C]//Proceedings of IEEE 1999 International Geoscience and Remote Sensing Symposium. Hamburg: IEEE, 1999, 1: 267-269.
- [8] GOLDSTEIN R M, WERNER C L. Radar Interferogram Filtering for Geophysical Applications [J]. *Geophysical Research Letters*, 1998, 25(21): 4035-4038.
- [9] LI Zhiwei, DING Xiaoli, ZHENG Dawei, et al. Least Squares-Based Filter for Remote Sensing Image Noise Reduction [J]. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 2008, 46(7): 2044-2049.
- [10] XU Bing, LI Zhiwei, WANG Qijie, et al. A Refined Strategy for Removing Composite Errors of SAR Interferogram [J]. *IEEE Geoscience and Remote Sensing Letters*, 2014, 11(1): 143-147.
- [11] JIANG Mi, DING Xiaoli, LI Zhiwei, et al. InSAR Coherence Estimation for Small Data Sets and Its Impact on Temporal Decorrelation Extraction [J]. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 2014, 52(10): 6584-6596.
- [12] FENG Guangcai, JÓNSSON S, KLINGER Y. Which Fault Segments Ruptured in the 2008 Wenchuan Earthquake and Which Did Not? New Evidence from Near-fault 3D Surface Displacements Derived from SAR Image Offsets [J]. *Bulletin of the Seismological Society of America*, 2017, 107(3). DOI: 10.1785/0120160126.
- [13] FERRETTI A, PRATI C, ROCCA F. Nonlinear Subsidence Rate Estimation Using Permanent Scatterers in Differential SAR Interferometry [J]. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 2000, 38(5): 2202-2212.
- [14] FERRETTI A, PRATI C, ROCCA F. Permanent Scatterers in SAR Interferometry [J]. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 2001, 39(1): 8-20.
- [15] KAMPES B M. *Radar Interferometry: Persistent Scatterer Technique* [M]. Netherlands: Springer, 2006.
- [16] 陈强. 基于永久散射体雷达差分干涉探测区域地表形变的研究 [D]. 成都: 西南交通大学, 2006.
CHEN Qiang. Detection Regional Ground Deformation by Differential SAR Interferometry Based on Permanent Scatterers [D]. Chengdu: Southwest Jiaotong University, 2006.
- [17] 熊文秀, 冯光财, 李志伟, 等. 顾及时空特性的 SBAS 高质量点选取算法 [J]. *测绘学报*, 2015, 44(11): 1246-1254. DOI: 10.11947/j.AGCS.2015.20140547.
XIONG Wenxiu, FENG Guangcai, LI Zhiwei, et al. High Quality Targets Selection in SBAS-InSAR Technique by Considering Temporal and Spatial Characteristic [J]. *Acta Geodaetica et Cartographica Sinica*, 2015, 44(11): 1246-1254. DOI: 10.11947/j.AGCS.2015.20140547.
- [18] KAMPES B M, HANSSEN R F. Ambiguity Resolution for Permanent Scatterer Interferometry [J]. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 2004, 42(11): 2446-2453.
- [19] HOOPER A, ZEBKER H A. Phase Unwrapping in Three Dimensions with Application to INSAR Time Series [J]. *Journal of the Optical Society of America A*, 2007, 24(9): 2737-2747.
- [20] 李德仁, 廖明生, 王艳. 永久散射体雷达干涉测量技术 [J]. *武汉大学学报(信息科学版)*, 2004, 29(8): 664-668.
LI Deren, LIAO Mingsheng, WANG Yan. Progress of Permanent Scatterer Interferometry [J]. *Geomatics and Information Science of Wuhan University*, 2004, 29(8): 664-668.

- [21] BERARDINO P, FORNARO G, LANARI R, et al. A New Algorithm for Surface Deformation Monitoring Based on Small Baseline Differential SAR Interferograms[J]. IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing, 2002, 40(11): 2375-2383.
- [22] HOOPER A J. Persistent Scatter Radar Interferometry for Crustal Deformation Studies and Modeling of Volcanic Deformation[D]. California: Stanford University, 2006.
- [23] MORA O, MALLORQUI J J, BROQUETAS A. Linear and Nonlinear Terrain Deformation Maps from a Reduced set of Interferometric SAR Images[J]. IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing, 2003, 41(10): 2243-2253.
- [24] LI Zhiwei, ZHAO Rong, HU Jun, et al. InSAR Analysis of Surface Deformation over Permafrost to Estimate Active Layer Thickness Based on One-dimensional Heat Transfer Model of Soils[J]. Scientific Reports, 2015, 5: 15542.
- [25] 李珊珊, 李志伟, 胡俊, 等. SBAS-InSAR 技术监测青藏高原季节性冻土形变[J]. 地球物理学报, 2013, 56(5): 1476-1486.
- LI Shanshan, LI Zhiwei, HU Jun, et al. Investigation of the Seasonal Oscillation of the Permafrost over Qinghai-Tibet Plateau with SBAS-InSAR Algorithm[J]. Chinese Journal of Geophysics, 2013, 56(5): 1476-1486.
- [26] LAUKNES T R, ZEBKER H A, LARSEN Y. InSAR Deformation Time Series Using An L_1 -Norm Small-Baseline Approach[J]. IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing, 2011, 49(1): 536-546.
- [27] HOOPER A. A Multi-Temporal InSAR Method Incorporating Both Persistent Scatterer and Small Baseline Approaches[J]. Geophysical Research Letters, 2008, 35(16): L16302.
- [28] ZHANG Lei, LU Zhong, DING Xiaoli, et al. Mapping Ground Surface Deformation Using Temporarily Coherent Point SAR Interferometry: Application to Los Angeles Basin[J]. Remote Sensing of Environment, 2012, 117: 429-439.
- [29] FERRETTI A, FUMAGALLI A, NOVALI F, et al. A New Algorithm for Processing Interferometric Data-Stacks; SqueeSAR[J]. IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing, 2011, 49(9): 3460-3470.
- [30] LEE J S, POTTIER E. Polarimetric Radar Imaging: From Basics to Applications[M]. Boca Raton: CRC Press, 2009.
- [31] HOOPER A, BEKAERT D, SPAANS K, et al. Recent Advances in SAR Interferometry Time Series Analysis for Measuring Crustal Deformation[J]. Tectonophysics, 2012, 514-517: 1-13.
- [32] PARIZZI A, BRCIC R. Adaptive InSAR Stack Multilooking Exploiting Amplitude Statistics: A Comparison Between Different Techniques and Practical Results[J]. IEEE Geoscience and Remote Sensing Letters, 2011, 8(3): 441-445.
- [33] GOEL K, ADAM N. An Advanced Algorithm for Deformation Estimation in Non-Urban Areas[J]. ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing, 2012, 73: 100-110.
- [34] 蒋弥, 丁晓利, 何秀凤, 等. 基于快速分布式目标探测的时序雷达干涉测量方法: 以 Lost Hills 油藏区为例[J]. 地球物理学报, 2016, 59(10): 3592-3603.
- JIANG Mi, DING Xiaoli, HE Xiufeng, et al. FaSHPS-InSAR Technique for Distributed Scatterers: A Case Study over the Lost Hills Oil Field, California[J]. Chinese Journal of Geophysics, 2016, 59(10): 3592-3603.
- [35] FORNARO G, VERDE S, REALE D, et al. CAESAR: An Approach Based on Covariance Matrix Decomposition to Improve Multibaseline-multitemporal Interferometric SAR Processing[J]. IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing, 2015, 53(4): 2050-2065.
- [36] WANG Yuanyuan, ZHU Xiaoxiang. Robust Estimators for Multipass SAR Interferometry[J]. IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing, 2016, 54(2): 968-980.
- [37] BECHOR N B D, ZEBKER H A. Measuring Two-dimensional Movements Using a Single InSAR Pair[J]. Geophysical Research Letters, 2006, 33(16): L16311.
- [38] HU J, LI Z W, DING X L, et al. 3D Coseismic Displacement of 2010 Darfield, New Zealand Earthquake Estimated from Multi-aperture InSAR and D-InSAR Measurements[J]. Journal of Geodesy, 2012, 86(11): 1029-1041.
- [39] JO M J, JUNG H S, WON J S. Measurement of Precise Three-Dimensional Volcanic Deformations via TerraSAR-X Synthetic Aperture Radar Interferometry[J]. Remote Sensing of Environment, 2017, 192: 228-237.
- [40] HU J, LI Z W, DING X L, et al. Resolving Three-dimensional Surface Displacements from InSAR Measurements: A Review[J]. Earth-Science Reviews, 2014, 133: 1-17.
- [41] JUNG H S, WON J S, KIM S W. An Improvement of the Performance of Multiple-aperture SAR Interferometry (MAI)[J]. IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing, 2009, 47(8): 2859-2869.
- [42] CHAUSSARD E, AMELUNG F, ABIDIN H, et al. Sinking Cities in Indonesia: ALOS PALSAR Detects Rapid Subsidence Due to Groundwater and Gas Extraction[J]. Remote Sensing of Environment, 2013, 128: 150-161.
- [43] ZHANG Yonghong, WU Hongan, KANG Yonghui, et al. Ground Subsidence in the Beijing-Tianjin-Hebei Region from 1992 to 2014 Revealed by Multiple SAR Stacks[J]. Remote Sensing, 2016, 8(8): 675.
- [44] XU Bing, FENG Guangcai, LI Zhiwei, et al. Coastal Subsidence Monitoring Associated with Land Reclamation Using the Point Target Based SBAS-InSAR Method: A Case Study of Shenzhen, China[J]. Remote Sensing, 2016, 8(8): 652.
- [45] CARNEC C, MASSONNET D, KING C. Two Examples of the Use of SAR Interferometry on Displacement Fields of Small Spatial Extent[J]. Geophysical Research Letters, 1996, 23(24): 3579-3582.
- [46] 尹宏杰, 朱建军, 李志伟, 等. 基于 SBAS 的矿区形变监测研究[J]. 测绘学报, 2011, 40(1): 52-58.

- YIN Hongjie, ZHU Jianjun, LI Zhiwei, et al. Ground Subsidence Monitoring in Mining Area Using DInSAR SBAS Algorithm[J]. *Acta Geodaetica et Cartographica Sinica*, 2011, 40(1): 52-58.
- [47] NG A H M, GE Linlin, ZHANG Kui, et al. Deformation Mapping in Three Dimensions for Underground Mining Using InSAR-Southern Highland Coalfield in New South Wales, Australia[J]. *International Journal of Remote Sensing*, 2011, 32(22): 7227-7256.
- [48] I Zhiwei, YANG Zefa, ZHU Jianjun, et al. Retrieving Three-dimensional Displacement Fields of Mining Areas from a Single InSAR Pair[J]. *Journal of Geodesy*, 2015, 89(1): 17-32.
- [49] 杨泽发, 朱建军, 李志伟, 等. 基于单个雷达成像几何学 SAR 影像的矿区三维时序形变监测方法: 中国, 201610546270.1[P]. 2016-12-14.
- YANG Zefa, ZHU Jianjun, LI Zhiwei, et al. Based on the Timing of Individual Mines Dimensional Radar Imaging Geometry SAR Image Deformation Monitoring Methods; China, 201610546270.1[P]. 2016-12-14.
- [50] FAN H D, CHENG D, DENG K Z, et al. Subsidence Monitoring Using D-InSAR and Probability Integral Prediction Modelling in Deep Mining Areas[J]. *Survey Review*, 2015, 47(345): 438-445.
- [51] YANG Zefa, LI Zhiwei, ZHU Jianjun, et al. InSAR-Based Model Parameter Estimation of Probability Integral Method and Its Application for Predicting Mining-Induced Horizontal and Vertical Displacements[J]. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 2016, 54(8): 4818-4832.
- [52] YANG Zefa, LI Zhiwei, ZHU Jianjun, et al. An Extension of the InSAR-Based Probability Integral Method and Its Application for Predicting 3-D Mining-Induced Displacements under Different Extraction Conditions[J]. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 2017, 55(7): 3835-3845. DOI: 10.1109/TGRS.2017.2682192.
- [53] MASSONNET D, FEIGL K, ROSSI M, et al. Radar Interferometric Mapping of Deformation in the Year after the Landers Earthquake[J]. *Nature*, 1994, 369(6477): 227-230.
- [54] TONG Xiaopeng, SMITH-KONTER B, SANDWELL D T. Is There A Discrepancy Between Geological and Geodetic Slip Rates along the San Andreas Fault System? [J]. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, 2014, 119(3): 2518-2538.
- [55] ELLIOTT J R, WALTERS R J, WRIGHT T J. The Role of Space-Based Observation in Understanding and Responding to Active Tectonics and Earthquakes[J]. *Nature Communications*, 2016, 7: 13844.
- [56] 徐小波. 多手段 InSAR 技术研究及其在同震、震间形变监测中的应用[J]. *国际地震动态*, 2016(6): 34-36.
- XU Xiaobo. Multi-means InSAR Research and Its Application in Coseismic and Interseismic Deformation Monitoring[J]. *Recent Developments in World Seismology*, 2016(6): 34-36.
- [57] MASSONNET D, BRIOLE P, ARNAUD A. Deflation of Mount Etna Monitored by Spaceborne Radar Interferometry[J]. *Nature*, 1995, 375(6532): 567-570.
- [58] BRIOLE P, MASSONNET D, DELACOURT C. Post-Eruptive Deformation Associated with the 1986-87 and 1989 Lava Flows of Etna Detected by Radar Interferometry[J]. *Geophysical Research Letters*, 1997, 24(1): 37-40.
- [59] LANARI R, LUNDGREN P, SANSOSTI E. Dynamic Deformation of Etna Volcano Observed by Satellite Radar Interferometry[J]. *Geophysical Research Letters*, 1998, 25(10): 1541-1544.
- [60] JÓNSSON S, ZEBKER H, CERVELLI P, et al. A Shallow-Dipping Dike Fed the 1995 Flank Eruption at Fernandina Volcano, Galápagos, Observed by Satellite Radar Interferometry[J]. *Geophysical Research Letters*, 1999, 26(8): 1077-1080.
- [61] BAGNARDI M, AMELUNG F, POLAND M P. A New Model for the Growth of Basaltic Shields Based on Deformation of Fernandina Volcano, Galápagos Islands[J]. *Earth and Planetary Science Letters*, 2013, 377-378: 358-366.
- [62] XU Wenbin, RUCH J, JÓNSSON S. Birth of Two Volcanic Islands in the Southern Red Sea[J]. *Nature Communications*, 2015, 6: 7104.
- [63] WRIGHT T J, EBINGER C, BIGGS J, et al. Magma-Maintained Rift Segmentation at Continental Rupture in the 2005 Afar Dyking Episode[J]. *Nature*, 2006, 442(7100): 291-294.
- [64] RUCH J, WANG Teng, XU Wenbin, et al. Oblique Rift Opening Revealed by Reoccurring Magma Injection in Central Iceland[J]. *Nature Communications*, 2016, 7: 12352.
- [65] PRITCHARD M E, SIMONS M. An InSAR-Based Survey of Volcanic Deformation in the Central Andes[J]. *Geochemistry, Geophysics, Geosystems*, 2004, 5(2): Q02002.
- [66] FOURNIER T J, PRITCHARD M E, RIDDICK S N. Duration, Magnitude, and Frequency of Subaerial Volcano Deformation Events: New Results from Latin America Using InSAR and A Global Synthesis[J]. *Geochemistry, Geophysics, Geosystems*, 2010, 11(1): Q01003.
- [67] CHAUSSARD E, AMELUNG F. Precursory Inflation of Shallow Magma Reservoirs at West Sunda Volcanoes Detected by InSAR[J]. *Geophysical Research Letters*, 2012, 39(21): L21311.
- [68] EPPLER J, RABUS B. Monitoring Urban Infrastructure with An Adaptive Multilooking InSAR Technique[C]// *Proceedings of Fringe 2011*. Frascati, Italy: ADS, 2012: 68.
- [69] BAKON M, PERISSIN D, LAZECKY M, et al. Infrastructure Non-Linear Deformation Monitoring via Satellite Radar Interferometry[J]. *Procedia Technology*, 2014, 16: 294-300.

- [70] 周建民, 李震, 邢强. 基于雷达干涉失相干特性提取冰川边界方法研究[J]. 冰川冻土, 2010, 32(1): 133-138.
ZHOU Jianmin, LI Zhen, XING Qiang. Deriving Glacier Border Information Based on Analysis of Decorrelation in SAR Interferometry[J]. Journal of Glaciology and Geocryology, 2010, 32(1): 133-138.
- [71] BELL R E, STUDINGER M, SHUMAN C A, et al. Large Subglacial Lakes in East Antarctica at the Onset of Fast-Flowing Ice Streams [J]. Nature, 2007, 445 (7130): 904-907.
- [72] STROZZI T, KOURAEV A, WIESMANN A, et al. Estimation of Arctic Glacier Motion with Satellite L-band SAR Data [J]. Remote Sensing of Environment, 2008, 112(3): 636-645.
- [73] LUCKMAN A, QUINCEY D, BEVAN S. The Potential of Satellite Radar Interferometry and Feature Tracking for Monitoring Flow Rates of Himalayan Glaciers[J]. Remote Sensing of Environment, 2007, 111(2-3): 172-181.
- [74] MOHR J J, REEH N, MADSEN S N. Three-Dimensional Glacial Flow and Surface Elevation Measured With Radar Interferometry[J]. Nature, 1998, 391(6664): 273-276.
- [75] GRAY L. Using Multiple RADARSAT InSAR Pairs to Estimate a Full Three-Dimensional Solution for Glacial Ice Movement[J]. Geophysical Research Letters, 2011, 38 (5): L05502.
- [76] AIZEN V B, KUZMICHENOK V A, SURAZAKOV A B, et al. Glacier Changes in the Tien Shan as Determined from Topographic and Remotely Sensed Data[J]. Global and Planetary Change, 2007, 56(3-4): 328-340.
- [77] ROTT H, FLORICIOIU D, WUITE J, et al. Mass Changes of Outlet Glaciers along the Nordenskjöld Coast, Northern Antarctic Peninsula, Based on TANDEM-X Satellite Measurements[J]. Geophysical Research Letters, 2014, 41 (22): 8123-8129.
- [78] BEVAN S L, LUCKMAN A, KHAN S A, et al. Seasonal Dynamic Thinning at Helheim Glacier[J]. Earth and Planetary Science Letters, 2015, 415: 47-53.
- [79] NECKEL N, BRAUN A, KROPÁ ? EK J, et al. Recent Mass Balance of the Purogangri Ice Cap, Central Tibetan Plateau, by Means of Differential X-band SAR Interferometry[J]. The Cryosphere, 2013, 7(5): 1623-1633.
- [80] WANG Zhijun, LI Shusun. Detection of Winter Frost Heaving of the Active Layer of Arctic Permafrost Using SAR Differential Interferograms [C] // Proceedings of IEEE 1999 International Geoscience and Remote Sensing Symposium. Hamburg: IEEE, 1999, 4: 1946-1948.
- [81] LIU Lin, ZHANG Tingjun, WAHR J. InSAR Measurements of Surface Deformation over Permafrost on the North Slope of Alaska [J]. Journal of Geophysical Research: Earth Surface, 2010, 115(F3): F03023.
- [82] LIU Lin, SCHAEFER K, ZHANG Tingjun, et al. Estimating 1992-2000 Average Active Layer Thickness on the Alaskan North Slope from Remotely Sensed Surface Subsidence[J]. Journal of Geophysical Research: Earth Surface, 2012, 117(F1): F01005.
- [83] CHEN Fulong, LIN Hui, LI Zhen, et al. Interaction between Permafrost and Infrastructure along the Qinghai-Tibet Railway detected via Jointly Analysis of C- and L-band Small Baseline SAR Interferometry[J]. Remote Sensing of Environment, 2012, 123: 532-540.
- [84] CHEN Fulong, LIN Hui, ZHOU Wei, et al. Surface Deformation Detected by ALOS PALSAR Small Baseline SAR Interferometry over Permafrost Environment of Beiluhe Section, Tibet Plateau, China[J]. Remote Sensing of Environment, 2013, 138: 10-18.
- [85] ZHAO Rong, LI Zhiwei, FENG Guangcai, et al. Monitoring Surface Deformation Over Permafrost with an Improved SBAS-InSAR Algorithm: With Emphasis on Climatic Factors Modeling[J]. Remote Sensing of Environment, 2016, 184: 276-287.
- [86] JIA Yuanyuan, KIM J W, SHUM C K, et al. Characterization of Active Layer Thickening Rate over the Northern Qinghai-Tibetan Plateau Permafrost Region Using ALOS Interferometric Synthetic Aperture Radar Data, 2007-2009[J]. Remote Sensing, 2017, 9(1): 84.
- [87] BERARDINO P, COSTANTINI M, FRANCESCHETTI G, et al. Use of Differential SAR Interferometry in Monitoring and Modelling Large Slope Instability at Maratea (Basilicata, Italy)[J]. Engineering Geology, 2003, 68(1-2): 31-51.
- [88] HILLEY G E, BÜRGMANN R, FERRETTI A, et al. Dynamics of Slow-moving Landslides from Permanent Scatterer Analysis [J]. Science, 2004, 304 (5679): 1952-1955.
- [89] MANZO M, RICCIARDI G P, CASU F, et al. Surface Deformation Analysis in the Ischia Island (Italy) Based on Spaceborne Radar Interferometry[J]. Journal of Volcanology and Geothermal Research, 2006, 151(4): 399-416.
- [90] 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.
- [91] GUDMUNDSSON S, SIGMUNDSSON F, CARSTENSEN J M. Three-dimensional Surface Motion Maps Estimated from Combined Interferometric Synthetic Aperture Radar and GPS Data[J]. Journal of Geophysical Research: Solid Earth, 2002, 107(B10): ETG 13-1-ETG 13-14.
- [92] ZHENG Wanji, HU Jun, ZHANG Wei, et al. Potential of Geosynchronous SAR Interferometric Measurements in Estimating Three-Dimensional Surface Displacements[J]. Science China Information Sciences, 2017, 60(6): 060304.
- [93] PEPE A, SANSOSTI E, BERARDINO P, et al. On the Generation of ERS/ENVISAT DInSAR Time-Series via the SBAS Technique[J]. IEEE Geoscience and Remote Sensing Letters, 2005, 2(3): 265-269.

- [94] MEYER F J, CHOTOO K, CHOTOO S D, et al. The Influence of Equatorial Scintillation on L-band SAR Image Quality and Phase[J]. IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing, 2016, 54(2): 869-880.
- [95] REUVENI Y, BOCK Y, TONG Xiaopeng, et al. Calibrating Interferometric Synthetic Aperture Radar (InSAR) Images with Regional GPS Network Atmosphere Models[J]. Geophysical Journal International, 2015, 202(3): 2106-2119.
- [96] CHEN A C, ZEBKER H A. Reducing Ionospheric Effects in InSAR Data Using Accurate Coregistration[J]. IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing, 2014, 52(1): 60-70.
- [97] LIU Zhen, JUNG H S, LU Zhong. Joint Correction of Ionosphere Noise and Orbital Error in L-band SAR Interferometry of Interseismic Deformation in Southern California[J]. IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing, 2014, 52(6): 3421-3427.
- [98] LI Zhenhong, MULLER J P, CROSS P, et al. Interferometric Synthetic Aperture Radar (InSAR) Atmospheric Correction; GPS, Moderate Resolution Imaging Spectroradiometer (MODIS), and InSAR Integration[J]. Journal of Geophysical Research: Solid Earth, 2005, 110(B3): B03410.
- [99] BEKAERT D P S, HOOPER A, WRIGHT T J. A Spatially Variable Power Law Tropospheric Correction Technique for InSAR Data[J]. Journal of Geophysical Research: Solid Earth, 2015, 120(2): 1345-1356.
- [100] 屈春燕, 单新建, 张国宏, 等. 干涉基线对地震形变场的影响——以玛尼地震同震震后形变场为例[J]. 地震地质, 2012, 34(4): 672-683.
- QU Chunyan, SHAN Xinjian, ZHANG Guohong, et al. Influence of Interferometric Baseline on Measurements of Seismic Deformation: A Case Study on the 1997 MANI, Tibet M7.7 Earthquake[J]. Seismology and Geology, 2012, 34(4): 672-683.
- [101] SMALL D, WERNER C, NUESCH D. Baseline Modelling for ERS-1 SAR Interferometry[C]// Proceedings of 1993 International Geoscience and Remote Sensing Symposium, 1993. Better Understanding of Earth Environment. Tokyo: IEEE, 1993, 3: 1204-1206.
- [102] BÄHR H, HANSSEN R F. Reliable Estimation of Orbit Errors in Spaceborne SAR Interferometry[J]. Journal of Geodesy, 2012, 76(12): 1147-1164.
- [103] LIU Guang, HANSSEN R F, GUO Huadong, et al. Nonlinear Model for InSAR Baseline Error[J]. IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing, 2016, 54(9): 5341-5351.
- [104] 张亚利, 游扬声, 兰敬松. 基线误差、相位误差和大气延迟误差对 InSAR 数据处理的影响分析[J]. 遥感技术与应用, 2010, 25(3): 399-403.
- ZHANG Yali, YOU Yangsheng, LAN Jingsong. Error Analysis of Baseline, Phase and Atmosphere Delay in InSAR Data Processing[J]. Remote Sensing Technology and Application, 2010, 25(3): 399-403.
- [105] FERRETTI A, SAVIO G, BARZAGHI R, et al. Submillimeter Accuracy of InSAR Time Series: Experimental Validation[J]. IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing, 2007, 45(5): 1142-1153.
- [106] REFICE A, BELMONTE A, BOVENGA F, et al. On the Use of Anisotropic Covariance Models in Estimating Atmospheric Dinsar Contributions[J]. IEEE Geoscience and Remote Sensing Letters, 2011, 8(2): 341-345.
- [107] HU Jun, LI Zhiwei, SUN Qian, et al. Three-Dimensional Surface Displacements from InSAR and GPS Measurements with Variance Component Estimation[J]. IEEE Geoscience and Remote Sensing Letters, 2012, 9(4): 754-758.

(责任编辑:张艳玲)

收稿日期: 2017-06-26

修回日期: 2017-09-13

第一作者简介: 朱建军(1962—),男,教授,博士生导师,研究方向为测量平差与 InSAR 数据处理。

First author: ZHU Jianjun (1962—), male, professor, PhD supervisor, majors in surveying adjustment and InSAR data processing.

E-mail: zjj@mail.csu.edu.cn