

星载/地基雷达干涉变形 监测方法与应用

◎ 黄其欢 谢新宇 樊恒通 著



科学出版社

星载/地基雷达干涉变形 监测方法与应用

黄其欢 谢新宇 樊恒通 著

科学出版社

北京

内 容 简 介

本书系统地总结了作者近年来利用星载/地基雷达干涉技术进行变形监测的研究成果。书中重点阐述星载/地基雷达系统、雷达数据获取、合成孔径雷达(SAR)干涉变形监测技术与数据处理方法;论述永久散射体法(PS-InSAR)和短基线法(SBAS-InSAR)两种时间序列分析方法,并将时间序列分析方法应用于大型桥梁的变形监测和分析,提出利用星载SAR干涉技术进行大型桥梁健康诊断的新方法。书中还对地基雷达大气延迟问题以及大型建(构)筑物振动、变形监测的应用进行较为深入的研究和分析。

本书可作为高等院校测绘工程专业本科生和研究生的参考用书,也可供测绘、遥感相关专业技术人员参考。

图书在版编目(CIP)数据

星载/地基雷达干涉变形监测方法与应用/黄其欢, 谢新宇, 樊恒通著.
—北京: 科学出版社, 2019.3

ISBN 978-7-03-060900-7

I. ①星… II. ①黄… ②谢… ③樊… III. ①雷达技术-遥感技术-变形观测-应用-研究 IV. ①P227

中国版本图书馆CIP数据核字(2019)第051339号

责任编辑: 王腾飞 沈旭 邢华/责任校对: 杜子昂

责任印制: 张伟/封面设计: 许瑞

科学出版社 出版

北京东黄城根北街16号

邮政编码: 100717

<http://www.sciencep.com>

北京中石油彩色印刷有限责任公司 印刷

科学出版社发行 各地新华书店经销

*

2019年3月第 一 版 开本: 720×1000 1/16

2019年3月第一次印刷 印张: 8 1/4

字数: 167000

定价: 79.00元

(如有印装质量问题, 我社负责调换)

前 言

城市基础设施是人居环境的重要组成部分，基础设施的结构健康问题直接关系到城市环境和社会经济的可持续发展。获取城市重大基础设施高精度、高时空分辨率的变形信息，是基础设施结构健康监测的重要组成部分。

雷达干涉技术通过计算两次回波信号的相位差，可提取观测期间高精度的变形信息。置于不同观测平台的雷达传感器，可探测的面积、时间和空间分辨率等不同，这大大促进了雷达干涉技术的广泛应用。

本书在总结星载/地基雷达干涉变形监测技术原理、数据处理方法的基础上，重点研究短基线差分干涉和永久散射体（permanent scatter, PS）差分干涉两种时间序列分析方法。本书利用星载 SAR 时间序列分析方法，开展大型铁路桥梁的变形监测研究，获取南京大胜关大桥的时空变形特性，并以此为基础，建立该桥梁的变形模型，提出利用星载 SAR 干涉技术进行大型桥梁健康诊断的新方法。另外，本书针对地基雷达的变形监测应用，主要从动态和静态两方面，分别对桥梁拉索的振动监测和大坝的长时间变形进行较为深入的研究。

感谢国家自然科学基金项目（41304025）、江苏省自然科学基金项目（BK20130831）、中国电建集团中南勘测设计研究院有限公司研发项目（YFHT-1883）、中央高校基本科研业务费专项资金（2018B18814, 2018B699X14）、江苏省研究生科研与实践创新计划项目（KYCX18_0619）的大力支持。

本书是课题组全体同志集体研究的成果总结，研究生付五洲、希尔艾力、刘学敏、夏磊凯、周伟、王一安、江剑锋、王青青、郭剑、刘闹、王雪瑞等参与了部分研究及实验工作，江剑锋对本书的检校出版做了大量工作。本书参阅了大量技术文献，在此，对文献作者表示衷心的感谢。

书中部分研究成果得到了加泰罗尼亚通信技术研究中心（Centre Tecnològic de Telecomunicacions de Catalunya, CTTC）同仁的大力帮助，并对他们表示由衷的感谢。

由于作者理论和技术水平有限，书中疏漏之处在所难免，敬请读者批评指正。

作 者

2018年10月16日

目 录

前言

第 1 章 绪论	1
1.1 研究的目的与意义	1
1.2 星载 SAR 干涉研究进展	2
1.2.1 星载 InSAR 变形监测技术研究现状	2
1.2.2 Sentinel-1 干涉技术研究现状	4
1.2.3 InSAR 技术用于桥梁变形监测研究现状	5
1.3 地基 SAR 干涉研究进展	6
参考文献	7
第 2 章 SAR 干涉测量变形监测基础	12
2.1 星载 SAR 干涉测量原理	12
2.1.1 星载 SAR 成像原理	12
2.1.2 星载 SAR 干涉测量原理及模式	14
2.1.3 星载 SAR 干涉变形监测	18
2.1.4 星载 SAR 形变向量分解	20
2.2 星载 SAR 干涉测量数据处理	21
2.2.1 数据的选择及读取	22
2.2.2 影像配准和重采样	22
2.2.3 干涉生成干涉图	22
2.2.4 干涉图相位解缠	23
2.2.5 地理编码	24
2.3 几种星载 SAR 系统	24
2.3.1 ERS-1/2	24
2.3.2 ENVISAT	25
2.3.3 RADARSAT	25
2.3.4 ALOS	25
2.3.5 COSMO-SkyMed	26

2.3.6	TerraSAR-X	26
2.3.7	哨兵 1 号 (Sentinel-1)	27
2.4	地基 SAR 变形监测技术方法	30
2.4.1	地基 SAR 成像原理	30
2.4.2	地基 SAR 变形监测原理	32
2.5	几种地基雷达变形监测系统	33
2.5.1	IBIS-S 系统	33
2.5.2	LISA 系统	34
2.5.3	IBIS-L 系统	34
2.5.4	SSR 系统	35
2.5.5	GPRI 系统	36
2.5.6	RiskSAR 系统	36
2.6	小结	37
	参考文献	37
第 3 章	SAR 干涉时间序列分析法	39
3.1	SAR 干涉局限性与时间序列分析	39
3.1.1	SAR 干涉变形监测的局限性	39
3.1.2	SAR 干涉时间序列分析法	40
3.2	短基线 SAR 干涉变形监测方法	41
3.2.1	基本原理	41
3.2.2	短基线 DInSAR 变形估计算法	43
3.2.3	相干系数与双阈值法相干像元提取	46
3.2.4	残余相位分离	48
3.3	PS-InSAR 变形监测方法	49
3.3.1	PS-InSAR 变形监测算法	49
3.3.2	振幅离差指数法 PS 点选取	51
3.4	邻域差分 InSAR 时间序列分析	52
3.4.1	基于 Delaunay 三角网的邻域差分原理	52
3.4.2	线性形变速率和 DEM 误差估计过程	54
3.5	干涉相位重建	56
3.5.1	2D 相位解缠	56
3.5.2	离散像元组网	57

3.5.3	1D 检核与校正	58
3.5.4	2D+1D 相位解缠算例	60
3.6	小结	62
	参考文献	62
第 4 章	星载 SAR 大型桥梁变形监测与分析	64
4.1	大胜关长江大桥概况	64
4.2	主桥变形时间序列特性分析与健康监测	65
4.2.1	主桥变形时间序列特性	65
4.2.2	主桥变形建模与健康监测	69
4.3	基于全桥变形模型的大型桥梁健康诊断方法	71
4.4	大胜关长江大桥变形监测与健康诊断	74
4.4.1	SAR 影像数据	74
4.4.2	星载 SAR 桥梁监测的灵敏度分析	76
4.4.3	PS 数据处理	77
4.4.4	扩展 PSI 变形结果	78
4.4.5	桥梁健康诊断	83
4.5	小结	86
	参考文献	86
第 5 章	地基雷达干涉变形监测应用研究	89
5.1	IBIS 系统监测精度研究	89
5.2	IBIS 系统信号静杂波研究	92
5.2.1	静杂波相位分量	92
5.2.2	静杂波对变形相位的影响实验	93
5.3	海量 SAR 影像相干目标提取研究	96
5.3.1	相干系数阈值法初选	97
5.3.2	振幅离差指数阈值精选	97
5.3.3	相干目标选取实验与分析	97
5.4	稳定点加权大气延迟相位校正研究	102
5.4.1	稳定点加权校正法	103
5.4.2	稳定点加权大气校正实验	105
5.5	地基雷达变形监测应用研究	108
5.5.1	南京眼步行桥环境振动监测研究	108

5.5.2 大坝变形监测应用研究	112
5.6 小结	116
参考文献	117
第 6 章 总结	119

第 1 章 绪 论

1.1 研究的目的是与意义

合成孔径雷达干涉 (synthetic aperture radar interferometry, InSAR) 技术开辟了遥感技术应用于监测地表形变的先河 (舒宁, 2003)。InSAR 是传统的合成孔径雷达 (SAR) 遥感技术与射电天文干涉技术相结合的产物, 机载、星载及地基 SAR 都通过微波对地球表面主动成像, 既可以记录地面分辨单元的雷达后向散射强度信息, 又能记录与斜距有关的相位信息。通过对覆盖同一地区的两幅 SAR 图像联合处理, 提取相位差图即干涉图, 可建立数字高程模型 (digital elevation model, DEM); 特别是跨越形变时的两幅 SAR 图像干涉处理得到的干涉图还包含了地表形变的信息, 利用合成孔径雷达差分干涉 (differential InSAR, DInSAR) 技术可从中提取厘米甚至毫米级精度的地表形变信息 (廖明生和林琿, 2003), 以揭示众多地球物理现象, 如地震形变、火山运动、冰川漂移、地面下沉、山体滑坡及大型建筑物变形等。DInSAR 技术在监测地表形变方面具有高分辨率和连续空间覆盖的特点, 是已有监测方法 (如精密水准、GPS 等) 所不具备的, 且遥感探测形变覆盖面积大、成本低, 因而 DInSAR 技术被认为是极具潜力的空间对地观测新技术 (刘国祥等, 2000)。

到 2020 年, 我国高速铁路运营里程预计将达到 3 万 km, 大型桥梁数量多、分布广, 桥梁结构的微小变形都会对行车安全性和舒适性造成影响 (魏召兰, 2012)。跨越大江大河和山谷的桥梁, 在整个交通线路中起到关键作用。大型桥梁在工程建设时会安装结构健康监测系统, 但是, ①现有监测传感器主要采用单点监测方式, 采集的结构现状数据空间密度低, 且成本高; ②传感器在恶劣环境下长期工作, 易损难修, 使监测系统功能缺失、效能降低, 一般桥梁健康监测系统的实际寿命比桥梁本身寿命短很多。因此, 有必要探索新的桥梁结构监测方法。利用 InSAR 技术进行桥梁监测的优点主要有: ①成本低, SAR 影像的大面积覆盖 ($100\text{ km}\times 100\text{ km}$) 可用较低的成本对全国大型桥梁进行遥测; ②空间连续性好, InSAR 技术可用雷达影像像元 ($3\text{ m}\times 3\text{ m}$) 获取全桥空间连续的变形信息; ③持续性好, InSAR 可用较高的时间分辨率 (每周) 长时间持续监测; ④可回溯性, 存档 SAR 数据可对桥梁历史健康状况进行评估, 对桥梁安全事故进行追溯。

尽管 InSAR 技术在形变监测方面表现出极大的潜力,并取得了一些成功的应用,但要使该技术完全走向实用化,还受到诸多因素的影响和制约。首先,时间和空间失相干噪声影响 InSAR 变形监测的可行性,大大限制了其应用,尤其在长时间序列的城市沉降监测上,时间失相干会严重影响所获得的相位图的质量,从而影响监测的精度;其次,时间和空间上不断变化的对流层水汽引起的干涉条纹和短时间产生的微小形变混合在一起,难以区分,降低了 DInSAR 变形监测的精度;另外,受可获取 SAR 影像数量和空间分辨率的限制,InSAR 变形监测的时间和空间分辨率还难以满足实际应用的需要(葛大庆等,2008)。

为发挥雷达干涉技术在变形监测方面的大面积覆盖和高精度优势,克服星载 SAR 干涉技术存在的固有缺陷,专门针对变形监测应用的地基 SAR 技术得到了广泛关注。地基 SAR 技术是在星载 SAR 基础上发展起来的,它将干涉平台从空中移至地面,能在几分钟内获取数平方千米的高精度、高空间分辨率 SAR 影像,具有安置灵活、连续监测等优点,非常适合地形复杂、气候特殊的局部区域的实时灾害监测(周校等,2012)。

综上所述,融合星载和地基雷达干涉变形监测技术,发挥两者的优点,研究运用雷达干涉变形监测技术对大型建(构)筑物进行变形监测,并诊断其健康状况,具有非常重要的现实意义。

1.2 星载 SAR 干涉研究进展

1.2.1 星载 InSAR 变形监测技术研究现状

时空失相干和大气延迟是影响 InSAR 技术提取地表变形的主要因素。为提高区域变形监测的精度和可靠性,克服时空失相干及大气延迟相位对传统 InSAR 技术的影响,以永久散射体(Ferretti et al., 2000, 2001)和短基线法(Berardino et al., 2002)为代表的 InSAR 时间序列分析法通过探测相干目标点的时空统计特性,获取监测点的变形信息,可有效减弱时空失相干和大气延迟的影响,极大地增强了 SAR 干涉技术的应用;Xia 等(2004)针对人工地物稀少地区,提出了人工角反射器法(CR-InSAR);而 SqueeSAR(Ferretti et al., 2011)和 StaMPS(Hooper, 2008)通过结合 PS 法和 SBAS 法,可对分布式散射目标(distributed scatters, DS)进行有效监测;Zhang 等(2011)利用临时性相干目标(temporary coherence points, TCP)进行变形监测,不仅可以提高监测的空间密度,而且监测结果的可靠性也更高;根据大气延迟在空间尺度上表现的强相关性,Mora 等(2003)提出邻域差分网法削弱大气延迟相位的思想,该方法可以降低大气延迟误差对形变估计的

影响,同时避免了稀疏相位解缠 (phase unwrap) 的难题。考虑多余观测中干涉相位之差为 2π 整数倍的特点, Monserrat (2012) 提出了“2D+1”维相位解缠方法,该方法能有效探测并校正相位解缠的整周跳变。国内的众多学者 (刘国祥等, 2007; 李珊珊等, 2013; 黄其欢和何秀凤, 2009; 汤益先等, 2006) 针对 PS 点的选取、格网组建、多源数据融合等进行了深入而广泛的研究,极大地推进了 InSAR 技术的发展和應用。

近几年,高分辨率 SAR 影像使得对城市地物散射特征的研究更为细致, SAR 干涉技术更多地偏向于重大工程和单体建筑物的精细监测 (Nitti et al., 2010; Kim et al., 2008; Schunert and Soergel, 2012)。针对 X 波段变形的高灵敏性,热膨胀参数也被增加到模型中。相关研究表明 (Monserrat et al., 2011; Fornaro et al., 2013),对于建筑物、桥梁等单个大型建筑物的研究,即使是 C 波段 SAR 影像,也有必要考虑热膨胀影响。

分析雷达视线 (LOS) 向位移的三维空间模型,利用三维方向上各分量之间的联系,融合多源 SAR 影像联合求解三维变形也是 InSAR 研究的热点之一 (刘国祥等, 2012; Fialko et al., 2005; Zhu et al., 2013)。然而,由于卫星几乎沿南北飞行,三维模型对南北方向的位移不敏感,降低了模型在该方向上获取形变信息的精度。陈强等 (2015) 建立了利用 SAR 像素偏移量提取雷达方位向与距离向形变的误差模型,但该方法受匹配窗口尺寸与过采样因子的影响较大。

InSAR 数据处理过程复杂,影响 InSAR 变形监测结果的因素众多,如何评价监测结果的质量是 InSAR 技术在实际应用中必须解决的问题。欧洲太空署和中国国土资源航空物探遥感中心等众多研究机构和学者 (葛大庆, 2013) 开展了 InSAR 监测成果与地面测量成果的对比研究,但因两种监测成果的参考基准、时间同步、空间密度等不一致,目前主要从变形速率的一致性进行考虑,缺少一个系统的质量评价指标体系。

近几年,由两个或更多卫星组成的 SAR 星座逐渐“常态化”,如 COSMO-SkyMed、TerraSAR-X/TanDEM-X 及 Sentinel-1 A/B 等,它们正源源不断地提供质量更高、应用更广泛的 SAR 图像。为满足快速重访需要,地球同步轨道等非传统轨道 SAR 理念逐渐被重视,随着 SAR 卫星及传感器设计的创新,必将开创 InSAR 应用的第二春。

综合国内外文献,目前 InSAR 变形监测技术的发展趋势及问题如下。

1) 多源 SAR 数据融合

发展趋势: 尽可能多地收集同一区域多源 SAR 数据,利用各平台 SAR 影像单独建立数据处理模型,从中提取 LOS 向或三维变形信息,并进行信息融合和交

互验证。

存在问题：一是难以完整收集到同一区域同时段的多源 SAR 数据；二是海量 SAR 影像的存储、管理问题；三是要对多源 SAR 数据进行单独处理和建模，数据处理工作量大；四是各平台获取的形变信息的空间密度、时空分辨率、雷达视角、波长等参数的不一致，增大了信息融合的难度，影响了形变信息提取的精度和可靠性。

2) 高分辨率 SAR 干涉

发展趋势：利用时间序列高时空分辨率 SAR 影像，对城市精细目标建立较为完备的模型，获取目标细部变形、热膨胀参数和目标高度，并将提取的信息准确投射到目标表面，直观地展示城市目标高度、变形、热膨胀等信息。

存在问题：一是高分辨率 SAR 商业化运作比例高，数据获取成本大；二是由于 SAR 干涉处理采用的 DEM 不包含地面建筑，干涉图相位梯度大，极易造成相位解缠错误；三是城区干涉图中高层建筑引起的叠掩、顶底倒置严重，给 PS 点的相位解缠和精确定位带来困难。

1.2.2 Sentinel-1 干涉技术研究现状

Sentinel-1 卫星的 IW（幅宽 250km）和 EW（幅宽 400km）模式可用于干涉测量，因影像数据可免费获取，且具有质量高、幅宽广、重访周期短（最短 6 天）等特点，使其成为近期 InSAR 的研究热点。Sentinel-1 的 TOPS 成像技术 (Meta et al., 2010; Scheiber et al., 2014) 最早被安装在 TerraSAR-X 和 RADARSAT-2 上。De Zan 和 Monti-Guarnieri (2006) 对 TOPS 成像模式及干涉条件进行了分析；相关文献对 burst 级别的干涉处理方法、TOPS 影像 burst 之间的配准、方位向拼接、SD (spectral diversity) 法和 ESD (enhanced spectral diversity) 法的配准精度等进行了研究。

Prats-Iraola 等 (2015) 分析了轨道“管道”及其对干涉的影响，指出顺轨向轨道误差会导致 burst 同步误差，必须予以校正，而 Sentinel-1 轨道不平行导致的失相干可以忽略。Yague-Martinez 等 (2016) 讨论了 IW 模式影像对配准的要求，指出要使得方位向的线性相位小于 $1/100$ 周 (3.6°)，配准精度要达到 0.0009 像元，这相当于方位向同步时间 $1.9\mu\text{s}$ 或者 1.3cm。González 等 (2015) 最早将 Sentinel 影像用于 Fogo 火山监测，并与贝叶斯反演结果进行了对比。Crosetto 等 (2012) 进行 PS 法时间序列分析，获取了 Mexico DF 主城区变形时间序列及累积图，并就 burst 级别干涉处理、PS 选点及相位解缠等进行了讨论。吴文豪等 (2016) 对 TOPS 干涉的数据处理进行了较为深入的研究。Wen 等 (2016) 利用 GAMMA 软

件处理了升降轨 Sentinel-1 数据, 获取了 2015 年中国皮山 (Pishan) 地震同震形变场。Sentinel-1 提取大面积变形信息的能力也在尼泊尔地震、美国纳帕谷地震及智利地震中得到了验证。

综上所述, ①Sentinel-1 TOPS SAR 影像干涉在变形监测方面的可行性已经得到验证, 但利用 TOPS 影像进行时间序列分析的研究还很少; ②基于 Sentinel-1 影像的时间序列变形监测数据处理流程与其他 SAR 影像基本一致; ③Sentinel-1 干涉处理的关键是高精度影像配准, 从而消除配准误差导致的方位向相位梯度, 便于 burst 之间的拼接; ④针对整景影像的干涉处理目前有两种思路: 一种思路是先进行 burst 级别的干涉处理, 然后计算 burst 的重叠区域的干涉图之差, 并将差分相位分配到 burst 上, 消除相位跳变, 完成有效行/列的拼接; 另一种思路是将重叠区域的差分相位转化成配准偏移量实现整景影像的配准和拼接, 最后获取影像级别的干涉图。

1.2.3 InSAR 技术用于桥梁变形监测研究现状

随着 SAR 数据分辨率的提高和对干涉相位组成分析的精细化, InSAR 技术监测大型基础设施的潜能逐渐展现 (Sousa et al., 2014)。在桥梁监测方面, Fornaro 等 (2013) 利用 34 景 TerraSAR 影像研究了意大利 Basento 大桥热膨胀导致的季节性周期变形, 指出桥梁与桥墩的固定连接结构使热膨胀变形在跨中最大, 影响了水平方向的桥梁安全。Lazecky 等 (2015) 通过对三个桥梁的 InSAR 监测变形分析, 指出多时相 InSAR 时间序列分析可实现大桥水平和竖直变形监测, 但要实现桥梁变形的异常监测, 需有地面辅助手段。Lazecký 等 (2014) 利用 X 波段 SAR 对捷克的 Radontin 桥和 Svinov 桥的热膨胀变形进行了监测, 并对环境温度误差进行了校正。Sousa 和 Basto (2013) 利用多时相 InSAR 技术追溯了葡萄牙一座因过度采沙而倒塌的大桥的变形情况, 发现大桥倒塌前存在加速变形。Shamshiri 等 (2013) 利用成像于 2003~2013 年的 ENVISAT、ALOS、TerraSAR 影像监测了伊朗北部 Urmia Causeway 湖上的一座大桥, 发现变形最大幅度大于 50mm/a。国内, 2016 年 11 月在长沙召开的第三届成像雷达对地观测高级学术研讨会上, 廖明生等展示了 InSAR 在桥梁变形监测方面的潜力, 但相关公开文献较少。

综上所述, InSAR 技术用于桥梁变形监测的问题主要有: ①受桥型、地面交通等影响, 星载雷达桥梁反射信号复杂, 数据处理难度大; ②雷达 LOS 向变形难以全面分析桥梁实际变形; ③大型悬索桥、斜拉桥等柔性桥梁竖向振幅较大, 并与水平向热膨胀混合在一起, 难以分离; ④单一的 InSAR 技术难以实现桥梁异常变形的探测, 需有地面辅助监测手段。

1.3 地基 SAR 干涉研究进展

地基雷达分为 SAR 和真实孔径雷达 (RAR), 前者可获取二维影像, 提取监测区目标变形, 后者主要用于建筑物振动监测 (希尔艾力·艾尔肯等, 2017)。地基 SAR 最初设计用于大坝等具有较强雷达反射信号的大型人工建筑物变形监测, 后来被广泛用于滑坡监测, 如大坝 (Tarchi et al., 1999)、滑坡 (Luzi et al., 2004)、矿区 (杨红磊等, 2012)、冰川 (Gray, 2011; Luzi et al., 2009) 等。地基 SAR 应用中的主要问题, 一是大气延迟不一致影响精度, 二是设备昂贵难以推广。研究表明, 20℃时, 1km 距离上 1% 的相对湿度变化可导致 2mm 的测量误差。Noferini 等 (2005) 利用 PS 技术和外部气象数据校准法研究了大气扰动对地基 InSAR 相位的影响及相应的补偿方法。Iannini 和 Guarnieri (2011) 利用观测区域的气压、温度和湿度建立了大气折射模型, 估算出大气折射率的变化来校正大气扰动误差。地基 RAR 能获取 LOS 向不同距离处目标的动态变形, 如桥梁、风车、烟囱和通信塔等, 且不受大气影响, 精度达到亚毫米级, 通过对动态变形的分析还可提取目标振动频率等模态信息。地基 RAR 设备无滑轨, 设备运输、安装方便, 且价格相对便宜。

地基雷达技术巨大的应用前景吸引了众多科研机构和公司进行理论和设备研究, 其中包括欧盟委员会联合研究中心 (Joint Research Center), 意大利的佛罗伦萨大学、IDS 公司, 英国的谢菲尔德大学, 西班牙的加泰罗尼亚理工大学、IG 研究所 (Institute of Geomatics), 以及瑞典的皇家理工学院等。

国内对地基雷达的研究蓬勃发展, 中国科学院曲世勃等 (2011) 对中国科学院电子学研究所微波成像技术国家级重点实验室研制的 ASTRO 系统实施了模型分析, 并且试验性地探讨和分析了地基 SAR 的误差源、测量模式等; 武汉大学刁建鹏和黄声享 (2009) 在 CCTV 大楼及大桥变形监测中使用了 IBIS 系统, 将监测结果对比于传统测量手段的结果, 分析了该方法监测变形的可行性、优势和特点; 河海大学黄其欢等 (2015, 2016) 应用该技术对大坝进行了变形监测, 通过实验验证了该技术在在大坝监测中可获得优于毫米级精度的监测结果; 王荣海和黄月军 (2011) 将该技术应用于露天矿边坡监测中, 验证了该技术在边坡变形监测预警中的可行性; 中国地质大学杨红磊等 (2012) 在地基雷达系统研制和变形监测应用方面进行了较为深入的研究。目前, 国内已经将地基雷达用于人工建筑物、露天矿区监测, 并就大气误差校正等进行了较为深入的研究。

综合国内外文献可以看出, 地基 SAR 进行变形监测具有以下优势: ①利用干

涉技术,地基 SAR 提取的形变精度高;②不受重访周期限制,地基 SAR 提取的形变具有连续性;③地基 SAR 可根据监测区域的变形特点,选择合适的时间和位置进行观测,具有灵活性;④地基 SAR 的设站和周边环境易于控制和测量,测量误差具有可控性。总之,地基 SAR 的局域性、全天时、全天候、定点连续监测、良好的灵活性和可操作性,使得该技术在变形监测方面得到越来越广泛的重视和应用。

参 考 文 献

- 陈强,罗容,杨莹辉,等. 2015. 利用 SAR 影像配准偏移量提取地表形变的方法与误差分析. 测绘学报, 44(3): 301-308.
- 刁建鹏,黄声享. 2009. 地面干涉雷达在建筑变形监测中的应用. 测绘通报, (9): 45-47.
- 葛大庆. 2013. 区域性地面沉降 InSAR 监测关键技术研究. 北京: 中国地质大学.
- 葛大庆,王艳,郭小方,等. 2008. 利用短基线差分干涉纹图集监测地表形变场. 大地测量与地球动力学, 28(2): 61-66.
- 黄其欢,何秀凤. 2009. 附加约束条件短基线 DInSAR 法及其应用. 中国矿业大学学报, 38(3): 450-454.
- 黄其欢,岳建平. 2015. 地基 InSAR 新技术及水利工程变形监测应用. 辽宁工程技术大学学报(自然科学版), 34(3): 386-389.
- 黄其欢,岳建平,贡建兵. 2016. GBInSAR 隔河岩大坝变形监测实验. 水利水电科技进展, 36(3): 47-51.
- 李珊珊,李志伟,胡俊,等. 2013. SBAS-InSAR 技术监测青藏高原季节性冻土变形. 地球物理学报, 56(5): 1476-1486.
- 廖明生,林珏. 2003. 雷达干涉测量——原理与信号处理基础. 北京: 测绘出版社.
- 刘国祥,陈强,丁晓利. 2007. 基于雷达干涉永久散射体网格探测地表形变的算法与试验结果. 测绘学报, 36(1): 13-18.
- 刘国祥,丁晓利,陈永奇,等. 2000. 极具潜力的空间对地观测新技术——合成孔径雷达干涉. 地球科学进展, 15(6): 734-740.
- 刘国祥,张瑞,李陶,等. 2012. 基于多卫星平台永久散射体干涉提取三维地表形变速度场. 地球物理学报, 55(8): 2598-2610.
- 刘学敏,黄其欢,田林亚. 2015. IBIS-L 系统及其在大坝变形监测中的应用. 测绘与空间地理信息, 38(7): 34-36.
- 曲世勃,王彦平,谭维贤,等. 2011. 地基 SAR 形变监测误差分析与实验. 电子与信息学报, 33(1): 1-7.
- 舒宁. 2003. 雷达影像干涉测量原理. 武汉: 武汉大学出版社.
- 汤益先,张红,王超. 2006. 基于永久散射体雷达干涉测量的苏州地区沉降研究. 自然科学进展, 16(8): 1015-1020.
- 王荣海,黄月军. 2011. IBIS-M 在露天矿边坡微变形监测预警方面的应用. 露天采矿技术, (4):

44-47.

魏召兰. 2012. 高速铁路大型桥梁结构健康监测与状态评估研究. 成都: 西南交通大学.

吴文豪, 李陶, 陈志国, 等. 2016. Sentinel-1A 卫星 TOPS 模式数据干涉处理. 测绘通报, (2): 42-45.

希尔艾力·艾尔肯, 黄其欢, 岳建平, 等. 2017. 基于地基雷达的斜拉索环境振动测试研究. 工程勘察, (1): 48-52.

杨成生, 张勤, 赵超英, 等. 2014. 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. 武汉大学学报(信息科学版), 39(8): 945-950.

杨红磊, 彭军还, 崔洪曜. 2012. GB-InSAR 监测大型露天矿边坡变形. 地球物理学进展, 27(4): 1804-1811.

张勤, 赵超英, 丁晓利, 等. 2009. 利用 GPS 与 InSAR 研究西安现今地面沉降与地裂缝时空演化特征. 地球物理学报, 52(5): 1214-1222.

张祥, 陆必应, 宋千. 2011. 地基 InSAR 差分干涉测量大气扰动误差校正. 雷达科学与技术, 9(6): 502-506, 512.

周校, 王鹏, 邢诚. 2012. 基于 GB-SAR 的建筑物微变形测量研究. 测绘地理信息, 37(5): 40-43.

祝传广, 张继贤, 邓喀中, 等. 2014. 多源 SAR 影像监测矿区建筑物三维位移场. 中国矿业大学学报, 43(4): 701-706, 725.

Berardino P, Fornaro G, Lanari R, et al. 2002. A new algorithm for surface deformation monitoring based on small baseline differential SAR interferogram. IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing, 40(11): 2375-2383.

Bovenga F, Nitti D O, Refice A, et al. 2010. Multi-temporal DInSAR analysis with X-band high resolution SAR data: Examples and potential. Proceedings of SAR Image Analysis, Modeling, and Techniques X, Toulouse.

Crosetto M, Monserrat O, Cuevas M, et al. 2012. Measuring thermal expansion using X-band persistent scatterer interferometry. ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing, 100: 84-91.

De Zan F, Monti-Guarnieri A. 2006. TOPSAR: Terrain observation by progressive scans. IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sens, 44(9): 2352-2360.

del Ventisette C, Intrieri E, Luzi G, et al. 2011. Using ground based radar interferometry during emergency: The case of the A3 motorway(Calabria Region, Italy)threatened by a landslide. Natural Hazards and Earth System Sciences, 11(9): 2483-2495.

Ferretti A, Fumagalli A, Novali F, et al. 2011. A new algorithm for processing interferometric data-stacks: SqueeSAR. IEEE Transactions on Geoscience and Remote, 49(9): 3460-3470.

Ferretti A, Prati C, Rocca F. 2000. Nonlinear subsidence rate estimation using permanent scatterers in differential SAR interferometry. IEEE Transactions on Geoscience and Remote, 38(5): 2202-2212.

Ferretti A, Prati C, Rocca F. 2001. Permanent scatterers in SAR interferometry. IEEE Transactions on Geoscience and Remote, 39(1): 8-20.

Fialko Y, Sandwell D, Simons M, et al. 2005. Three-dimensional deformation caused by the Bam, Iran, earthquake and the origin of shallow slip deficit. Nature, 435(7040): 295-299.

- Fornaro G, Reale D, Verde S. 2013. Bridge thermal dilation monitoring with millimeter sensitivity via multidimensional SAR imaging. *IEEE Geoscience and Remote Sensing Letters*, 10(4): 677-681.
- Gentile C, Bernardini G. 2010. An interferometric radar for non-contact measurement of deflections on civil engineering structures: Laboratory and full-scale tests. *Structure and Infrastructure Engineering*, 6(5): 521-534.
- González P J, Bagnardi M, Hooper A J, et al. 2015. The 2014-2015 eruption of Fogo volcano: Geodetic modeling of Sentinel-1 TOPS interferometry. *Geophysical Research Letters*, 42(21): 9239-9246.
- Gray L. 2011. Using multiple RADARSAT InSAR pairs to estimate a full three-dimensional solution for glacial ice movement. *Geophysical Research Letters*, 38(5): L05502-1-6.
- Herrera G, Fernandez-Merodo J A, Mulas J, et al. 2009. A landslide forecasting model using ground based SAR data: The Portalet case study. *Engineering Geology*, 105(3-4): 220-230.
- Hooper A. 2008. A multi-temporal InSAR method incorporating both persistent scatterer and small baseline approaches. *Geophysical Research Letters*, 35(16): L16302-1-5.
- Iannini L, Guarnieri A M. 2011. Atmospheric phase screen in ground-based radar: Statistics and compensation. *IEEE Geoscience and Remote Sensing Letters*, 8(3): 537-541.
- Kim S W, Wdowinski S, Amelimg F, et al. 2008. X-band InSAR Observations in New Orleans, Louisiana. 2008 IEEE International Geoscience and Remote Sensing Symposium, Boston.
- Lazecy M, Perissin D, Bakon M, et al. 2015. Potential of satellite InSAR techniques for monitoring of bridge deformations. *IEEE, JURSE, Lausanne, Switzerland*.
- Lazecy M, Rapant P, Perissin D, et al. 2014. Deformations of highway over undermined Ostrava-Svinov area monitored by InSAR using limited set of SAR images. *Procedia Technology*, 16: 414-421.
- Luzi G, Crosetto M, Cuevas-González M. 2014. A radar-based monitoring of the Collserola tower(Barcelona). *Mechanical Systems and Signal Processing*, 49(1-2): 234-248.
- Luzi G, Noferini L, Mecatti D, et al. 2009. Using a ground-based SAR interferometer and a terrestrial laser scanner to monitor a snow-covered slope: Results from an experimental data collection in Tyrol(Austria). *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 47(2): 382-393.
- Luzi G, Pieraccini M, Mecatti D, et al. 2004. Ground based radar interferometry for landslides monitoring: Atmospheric and instrumental decorrelation sources on experimental data. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 42(11): 2454-2466.
- Luzi G, Pieraccini M, Mecatti D, et al. 2007. Monitoring of an alpine glacier by means of ground-based SAR interferometry. *IEEE Geoscience and Remote Sensing Letters*, 4(3): 495-499.
- Meta A, Mittermayer J, Prats P, et al. 2010. TOPS imaging with TerraSAR-X: Mode design and performance analysis. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 48(2): 759-769.
- Monserrat O. 2012. Deformation measurement and monitoring with Ground-based SAR. Barcelona: Technical University of Calalonia.
- Monserrat O, Crosetto M, Cuevas M, et al. 2011. The thermal expansion component of persistent scatterer interferometry observations. *IEEE Geoscience and Remote Sensing Letters*, 8(5):