



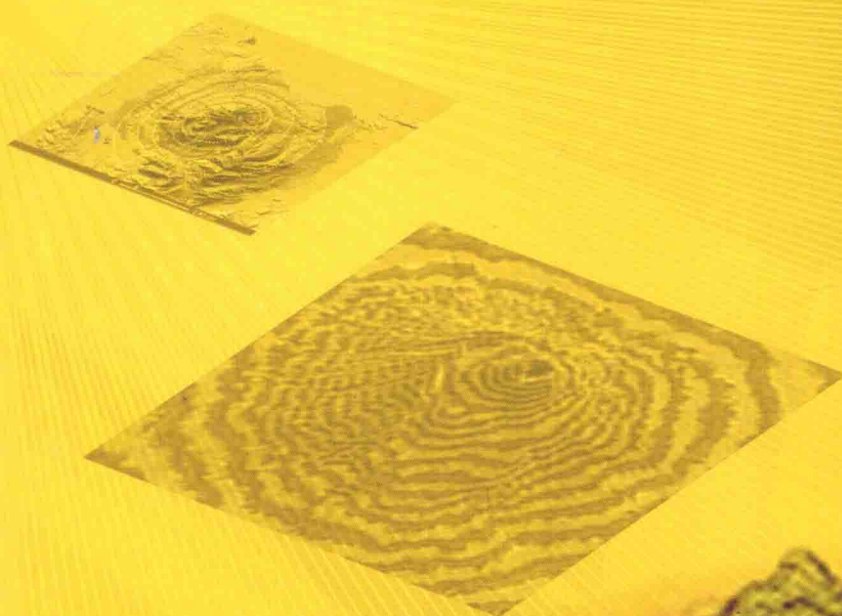
测绘地理信息科技出版资金资助
CEHUI DILI XINXI KEJI CHUBAN ZIJIN ZIZHU

高等学校教材

差分干涉雷达测量与 地面沉降监测

Differential Interferometric Synthetic Aperture Radar and
Ground Subsidence Monitoring

侯建国 初禹 著



测绘出版社

高等学校教材

差分干涉雷达测量与地面沉降监测

Differential Interferometric Synthetic Aperture Radar and
Ground Subsidence Monitoring

侯建国 初禹 著

测绘出版社

· 北京 ·

© 侯建国 2014

所有权利(含信息网络传播权)保留,未经许可,不得以任何方式使用。

内 容 简 介

本书详细介绍了合成孔径雷达干涉测量(InSAR)技术的基本概念、合成孔径雷达(SAR)图像处理技术及其在城市地面缓慢微小沉降监测中的应用,通过综合利用常规合成孔径雷达差分干涉测量(DInSAR)、短基线集干涉处理和永久散射体方法,对哈尔滨地区 ERS 卫星和 Envisat 卫星存档雷达数据进行处理,获得了哈尔滨地区地面沉降时空分布信息。全书共 7 章,以 InSAR 复数图像配准、大气效应改正及监测结果精度和可靠性分析为线索,叙述了利用 DInSAR 技术方法监测地面沉降的流程。

本书可作为高等院校测绘、遥感、地质等专业的教学参考书,也可供相关专业人员从事地面沉降监测工作的借鉴。

图书在版编目(CIP)数据

差分干涉雷达测量与地面沉降监测/侯建国,初禹著. —北京:测绘出版社,2014.11

ISBN 978-7-5030-3582-1

I. ①差… II. ①侯…②初… III. ①测量雷达—应用—地面沉降—监测—研究 IV. ①P642.26②TN959.6

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2014)第 257928 号

责任编辑	李 静	封面设计	李 伟	责任校对	董玉珍	责任印制	喻 迅
出版发行	测绘出版社	电 话	010—83543956(发行部)				
地 址	北京市西城区三里河路 50 号		010—68531609(门市部)				
邮政编码	100045		010—68531363(编辑部)				
电子信箱	smp@sinomaps.com	网 址	www.chinasmp.com				
印 刷	三河市世纪兴源印刷有限公司	经 销	新华书店				
成品规格	184mm×260mm						
印 张	8.75	字 数	212 千字				
版 次	2014 年 11 月第 1 版	印 次	2014 年 11 月第 1 次印刷				
印 数	0001—1000	定 价	32.00 元				

书 号 ISBN 978-7-5030-3582-1/P·766

本书如有印装质量问题,请与我社联系调换。

前 言

遥感技术是地球空间信息获取的重要手段,由于光学遥感应用的局限性,主动方式的微波雷达遥感技术在特定地区发挥着重要作用。合成孔径雷达干涉测量(InSAR)技术综合了合成孔径雷达(SAR)成像原理和干涉测量技术,是一般 SAR 功能的延伸和发展,极大拓展了成像雷达的功能和应用范围,在军事和国民经济建设中具有广阔的前景。InSAR 技术可充分利用雷达回波信号所携带的相位信息,精确测量地面点三维空间位置及其微小变化,因而受到测绘和地学领域研究人员的普遍青睐。从 20 世纪 80 年代初起,哈尔滨市地面沉降一直处在缓慢发展过程中,在不同时期已经引起地面建筑物和道路破损等现象的发生,但是至今从未对其地表进行全面、系统的形变监测工作。为此,本书基于 DInSAR 技术对该地区过去十几年地面沉降的时空变化特征进行了研究。

首先,本书在深入剖析 InSAR 技术相关基本概念的基础上,对 SAR 图像配准产生的粗差进行了系统分析,提出了 InSAR 复数图像配准时控制点粗差的探测和剔除方法;然后探讨了 InSAR 大气效应的改正方法,研究了基于 MODIS 数据的大气延迟改正;接着利用覆盖哈尔滨地区 ERS 卫星和 Envisat 卫星 SAR 数据,分别采用常规 DInSAR、短基线集干涉处理和永久散射体方法,首次对该地区地面沉降进行了全面实验研究,并得到毫米级的地面沉降监测结果;最后,将 DInSAR 监测结果与地下水位和地面水准测量数据进行了相关性分析,验证了其精度和可靠性,表明该技术对哈尔滨地区微小缓慢的形变监测是高效可行的,从而为哈尔滨市地面沉降灾害预防提供了重要参考。

本书的研究和出版工作得到了测绘地理信息科技出版资金以及哈尔滨城市地质调查项目、黑龙江工程学院博士基金项目的资助,在此表示感谢。由于作者水平有限,书中错误和疏漏之处在所难免,敬请读者批评指正。

目 录

第 1 章 绪 论	1
§ 1.1 地面沉降及监测方法	1
§ 1.2 雷达技术发展及应用	2
§ 1.3 InSAR 技术特点	5
§ 1.4 DInSAR 及其改进技术	6
§ 1.5 SAR 对地观测系统	9
第 2 章 InSAR 技术基础	17
§ 2.1 电磁波	17
§ 2.2 雷达图像空间分辨率	24
§ 2.3 相干斑噪声和多视	26
§ 2.4 雷达系统参数与 SAR 工作模式	29
§ 2.5 SAR 卫星轨道相关概念	31
第 3 章 SAR 成处理	35
§ 3.1 雷达成像方程及信号表示	35
§ 3.2 距离向处理	39
§ 3.3 方位向处理	44
§ 3.4 干涉成像处理	47
§ 3.5 SAR 图像数据	48
第 4 章 InSAR 复数图像配准	56
§ 4.1 概 述	56
§ 4.2 基于卫星轨道参数的粗配准	58
§ 4.3 基于窗口相关系数的精配准	63
§ 4.4 控制点粗差剔除方法	67
§ 4.5 InSAR 复数图像配准试验	69
第 5 章 InSAR 大气效应改正	73
§ 5.1 大气效应影响	73
§ 5.2 大气效应改正方法	74
§ 5.3 基于 MODIS 数据的 InSAR 大气效应改正	78
§ 5.4 InSAR 大气效应改正实验	82

第 6 章 DInSAR 地面沉降监测技术	88
§ 6.1 常规 DInSAR 技术及应用	88
§ 6.2 短基线集干涉处理技术及应用	98
§ 6.3 PS-InSAR 技术及应用	103
第 7 章 DInSAR 地面沉降监测精度与可靠性分析	111
§ 7.1 DInSAR 监测结果分析	111
§ 7.2 DInSAR 监测基准点选择	113
§ 7.3 地下水位变化与地面沉降的关系	114
§ 7.4 DInSAR 监测结果和地下水动态监测数据比较	123
§ 7.5 精密几何水准测量结果验证	126
参考文献	130

Contents

Chapter 1	Introduction	1
§ 1.1	Land subsidence and monitoring method	1
§ 1.2	InSAR and its application	2
§ 1.3	Features of InSAR	5
§ 1.4	Introduction of DInSAR	6
§ 1.5	Development of radar observation	9
Chapter 2	Theoretical basis of InSAR	17
§ 2.1	Electromagnetic waves	17
§ 2.2	Radar image spatial resolution	24
§ 2.3	Speckle noise and multi-look processing	26
§ 2.4	Imaging radar system parameters and SAR operation mode	29
§ 2.5	Concepts related to radar satellite orbit	31
Chapter 3	SAR imaging and InSAR imagery understanding	35
§ 3.1	Radar imaging equation and signal representation	35
§ 3.2	Synthetic aperture radar imaging and pulse compression	39
§ 3.3	High azimuth resolution and synthetic array	44
§ 3.4	InSAR imaging	47
§ 3.5	Introduction of SAR image data	48
Chapter 4	Theory of interferometric complex image registration and its experiment	56
§ 4.1	Complex image registration analysis and influence of interferometry	56
§ 4.2	Coarse registration based on the orbit parameters	58
§ 4.3	Fine registration based on the correlation coefficient of window	63
§ 4.4	Gross error elimination method of SAR image registration	67
§ 4.5	InSAR complex image registration experiment	69
Chapter 5	InSAR atmospheric effect correction	73
§ 5.1	Atmospheric effect	73
§ 5.2	The correction method of atmospheric effect	74
§ 5.3	InSAR atmospheric effect correction based on MODIS data	78
§ 5.4	Atmospheric effect correction experiment based on MODIS data	82

Chapter 6	Theory of monitoring land subsidence by means of DInSAR and its application	88
§ 6.1	Conventional DInSAR and its application	88
§ 6.2	The small baseline DInSAR processing technique	98
§ 6.3	Methods for permanent scatterer	103
Chapter 7	Accuracy analysis and reliability test of DInSAR monitoring results	111
§ 7.1	Analysis on DInSAR measuring results	111
§ 7.2	Choice of DInSAR measuring datum point	113
§ 7.3	Relationship of underground water level change and land subsidence	114
§ 7.4	Comparison between DInSAR monitoring results and groundwater dynamic monitoring data	123
§ 7.5	Verification of precise level measuring results	126
References		130

第1章 绪 论

§ 1.1 地面沉降及监测方法

地面沉降现象是在经济发展过程中不断加大对地下资源开发而产生的地面形变,是一种缓变性地质灾害。它对自然环境造成破坏,影响人们的正常生活和生产,是城市可持续发展的重要障碍之一(常士骝,1992)。通常,狭义的地面沉降,即目前国内外工程界所称的地面沉降,主要是指抽取液体(以地下水为主,也包括石油、天然气)所引起的区域性沉降。据统计,自1921年上海出现地面沉降以来,我国目前发生地面沉降的城市和地区大约有100个。其中,累计沉降量达2 m以上的城市有上海、天津、台北、宜兰和嘉义;累计沉降量为1~2 m的城市有西安、太原、沧州、苏州和无锡;累计沉降量为0.5~1 m的城市有北京、保定、嘉兴、常州、衡水和阜阳。地面沉降造成城市重力排污失效、地区防洪和防汛能力降低、城市建设和维护费用增加、地下管道和道路破损、建筑物开裂等,这些因素均威胁着城市的安全(丁晓利等,2000)。

城市地面沉降主要由地壳运动和人类工程经济活动所致。前者导致城市在大范围内产生整体沉降现象,沉降量值很小,持续时间长,属于人力无法控制的沉降因素,除发生地震等突变的地质灾害外,造成灾害的较少。后者主要包括工程建筑和抽取地下液及固体支撑物导致地面沉降,由于这些因素在空间上分布不均,导致局部或区域不均匀沉降,沉降量值差别大,易造成各种灾害。

目前,许多学者对地面沉降产生的机理进行了深入研究,提出了许多计算沉降形变的理论和计算方法,这些理论和方法都是在沉降形变实测资料基础上提出的。为了对这些理论和方法的准确性和适用性进行验证,对沉降可能造成的灾害做出预估和研判,并采取必要的措施对地面实施改造和保护,需要掌握地面沉降形变实测资料。因此,地面沉降监测是地面沉降研究中的一项不可缺少的主要内容。地学和测绘领域的专家对地面沉降监测开展了广泛的研究,不断将新技术、新理论应用于地面沉降监测。常规地面沉降监测方法一般采用重复精密水准测量。早期,此方法在我国大、中型城市获得了广泛应用,但此方法野外作业周期长,耗费大量人力和物力,而且随着城市的发展,水准点受到了严重的破坏,再加上水准点本身的布设密度较低,难以揭示地面形变规律。全球定位系统(Global Positioning System, GPS)技术是20世纪90年代初发展起来的空间技术,具有监测周期短、精度高、布网迅捷和经济方便等特点。在形变监测方面, GPS可用于全球和区域地壳形变监测以及局域滑坡、地面沉降等监测,其水平精度可达厘米级至毫米级,其高程精度一般比水平精度低3~5倍。不论是水准测量还是GPS测量,都只能对有限的离散点进行观测,以有效的监测区域的不连续形变,但由于其点位密度不够,无法揭示整体的形变特点,加之监测费用较高,无法实现大面积、高分辨率和高重复性的监测。20世纪90年代以来,随着一系列合成孔径雷达(synthetic aperture radar, SAR)卫星的升空,雷达遥感成为热点,特别是合成孔径雷达干涉测量(interferometric synthetic aperture radar, InSAR)及合成孔径雷达差分干涉测量(differential interferometric synthetic

aperture radar, DInSAR), 可获取大面积、全天候、高精度和高分辨率的地球表面三维空间的微小变化, 在地面形变监测方面显示出前所未有的优越性(廖明生等, 2003)。

§ 1.2 雷达技术发展及应用

众所周知, 雷达(radar)是无线电探测和测距(radio detection and ranging)的英文缩写, 这也表明了雷达最初的目的和任务, 即探测、发现目标并测量目标的距离(皮衣鸣等, 2008)。从雷达诞生起, 人们就希望在雷达屏幕上看到目标的真实图像, 而不仅仅是一个尖头脉冲或一个亮点。随着电子技术的进步, 雷达的功能也在迅速扩展, 从最初一维距离信息的获取发展到距离、方位和高度的三维信息获取, 从静止目标扩展到运动目标及其速度, 从普通目标探测扩展到目标的形状、大小和图像信息的获取, 为人们提供越来越多的有用信息。成像雷达的出现扩展了原始雷达的概念, 使雷达具有了对目标进行成像和识别的能力, 现在不仅已有各种真实孔径雷达(real aperture radar, RAR), 而且已有各种地基的、机载的、星载的和航天飞机载的用于不同目标的 SAR。InSAR 是一般 SAR 功能的延伸和发展, 通过对单天线重复轨道观测得到的回波数据进行干涉处理, 可以对地面高程进行估计, 对海流进行测高和测速, 对地面运动目标进行探测和定位。雷达技术的发展经历了“地面探测雷达—成像 SAR—InSAR”的过程, InSAR 技术是 SAR 遥感成像与电磁波干涉两大技术的融合。

1.2.1 雷达

1891 年, 美国人 H. Gernsback 发表建立在电磁传播原理基础上的雷达原理: 由发射源发出的电磁波在一些目标上会反射, 假设电磁波的传播速度基本保持不变, 那么对接收的信号进行分析, 就可以对目标进行探测和定位。最初的雷达飞行器探测试验可以追溯到 1934 年。第二次世界大战期间, 一些国家为了保密, 对雷达的工作频率用“L”、“S”、“C”和“X”等英文字母来命名。雷达的发明是无线电发展史上的重要里程碑, 在第二次世界大战中发挥了重大作用。雷达的主要功能有: ①探测(detection), 即发现目标; ②定位(location), 即确定相对载机位置, 包括距离、方位和俯仰; ③识别(recognition), 即确定目标属性; ④成像(imaging), 包括一维、二维和三维; ⑤跟踪(tracking), 即动态定位、连续跟踪和边扫边跟。由于具有上述特点, 雷达至今仍然是军用和许多民用领域的重要传感器。

雷达系统有的能够产生图像, 有的不能, 它可以在地面上, 也可以安装在航空或航天飞行器上。一种普通形式的非成像雷达的典型应用是测量车辆的速度, 这种系统称为多普勒雷达系统; 另一种普通的非成像雷达系统有一个圆形的显示屏幕, 径向扫描将雷达回应显示在此屏幕上, 这种系统称为平面位置显示器(plane position indicator, PPI)雷达系统。本质上, PPI 雷达使旋转天线周围的目标平面视图连续更新, 通常应用于天气预报、空中交通控制和海上导航, 该系统空间分辨率较差, 它不适合于地学遥感应用。

1.2.2 SAR

合成孔径的概念可以追溯到 20 世纪 50 年代初。1951 年 6 月, 美国 Goodyear 宇航公司的 C. Wiley 首先提出可以用频率分析方法改善雷达角分辨率, 将其称为“多普勒波速锐化”; 1952 年, 美国伊利诺伊大学的 C. W. Shervin 提出了全聚焦阵列和运动补偿的概念, 并且成功

研制了第一个实用化的 SAR 系统;1953 年 7 月,安装在 DC-3 飞机上的 SAR 系统获取到加拿大魁北克 Trois 河地区第一张 SAR 图像;1957 年 8 月 23 日,美国密歇根大学雷达和光学实验室与美国军方合作研制的 SAR 系统进行了飞行实验,得到了第一张全聚焦图像,宣告了 SAR 技术从理论走向实践的成功(王超等,2002a)。从此 SAR 及其原理被人们所认识,并得到不断发展。

SAR 是一种微波遥感器。它利用载有雷达的飞行平台的运动来得到长合成天线,由此获得高分辨率图像。SAR 与传统的光学遥感器相比,其优点主要在于:具有全天候、全天时的工作能力;穿透力强;采用侧视方式一次成像,面积大、成本低;SAR 的纹理特性能获取其他遥感系统所难见的断层,有利于研究地表构造和预测新矿源;分辨率高且不受平台高度或距离的影响,这点对于几百乃至上千公里高的卫星遥感系统尤为重要。

SAR 在民用和军事方面都大有用武之地:在民用方面可用于测图、农作物监测、海洋与冰层观测、地球资源探测、月球与金星的结构探测等;在军事上可用于目标区地形图的测制与更新,为军事地理信息系统提供重要的数据源,而根据 SAR 穿透掩盖物及识别伪装能力强的特点,在战场上可用于探测隐蔽的装备和烟雾笼罩区的目标。

正是由于 SAR 具有其他遥感系统所难以比拟的优点和特性,世界各国和相关组织都积极研制与发展各自的 SAR 遥感系统。当前 SAR 遥感卫星已成为国际遥感技术发展的重点之一。

1.2.3 InSAR 技术

InSAR 技术是 SAR 应用中较晚出现的一个方向,或者说是一个新的应用领域。InSAR 技术成功地综合了 SAR 成像原理和干涉测量原理,对 SAR 复数图像对进行干涉,并利用传感器的系统参数、姿态参数和轨道之间的几何关系等信息,可以精确测量地表某一点的三维空间位置及其微小变化。

无线电波干涉测量研究开始于第二次世界大战以后。1946 年,英国射电天文学家 M.Ryle 和 D.D.Vonberg 构造了类似 Michelson-Morley 干涉仪产生的无线电波,并能对一些新的宇宙电波进行定位。1969 年,无线电波干涉测量技术用于观测金星表面,这奠定了 InSAR 技术应用的基础。1971 年,美国军方首次将机载 InSAR 技术应用于地形测绘,利用相位差图像获取高程信息。1972 年,研究人员采用同样的方法测量月球的地形。1974 年,Graham 利用机载 SAR 数据获取了能满足 1:25 万地形图要求的高程数据,开创了 InSAR 技术对地观测中获取三维信息的先河。1988 年,研究人员从机载数据转换到利用 Seasat 星载数据,获取了 Death Valley 地区 Cottonball 盆地的地形图,三天所采集的数据,与美国地质勘探局(United States Geological Survey,USGS)出版的地形图相当吻合(Gddstein,1998)。同年,人们又利用 SIR-B 数据,通过 InSAR 技术对加拿大不列颠哥伦比亚省北部的落基山脉地区开展研究。

而 InSAR 技术应用于地面位移及形变的研究开始于 20 世纪 80 年代。1985 年,法国的 D.Massonnet 领导的课题组就进行了一项研究,即不需要在地面上安放任何仪器设备,利用卫星从几百公里远的空间,测量地面仅有几毫米的移动(构造引起的地面形变)。这在当时看来是不可思议的,以至于无法实现。但是在法国国家空间研究中心的支持下,经过数年持续的工作,他们取得了初步的成功。1992 年,在美国南加利福尼亚州 Landers 镇附近发生了一次较大的地震。D.Massonnet 等又收集了该地区 ERS-1 卫星可以提供的所有雷达图像,并将获取的地震前的图像与地震后大致同一位置的另一幅图像组合起来,成功地形成了雷达干涉图,借

助于数字高程模型(digital elevation model, DEM),计算并消除了地形的影响,得到一幅理想的反映地震过程中地面位移的雷达干涉条纹图像,并探测到离地震发生地点超过 100 km 外的一条断层产生 7 mm 的位移。1993 年,D.Massonnet 等在意大利西西里岛的 Etna 火山用一系列雷达图像再次进行了试验。在这个火山 1992—1993 年的 18 个月喷发周期中,ERS-1 卫星通过其上空 30 次,利用这些雷达图像和一幅该地区的高程图,得到 10 余幅与地形影响无关的干涉图(Massonnet,1994)。雷达图像显示了 Etna 火山在喷发的最后 7 个月的时间里,每个月下降了 2 cm。此变形环绕着火山扩展到很大范围,意味着底下的岩浆室比地质学家原来想象的要深很多。后来,美国喷气推进实验室(Jet Propulsion Laboratory, JPL)的 R. M. Goldstein 和他的合作者利用雷达干涉测量跟踪南极洲冰河上冰的移动,获得的图像结果直接反映了冰的移动(Goldstein et al,1988)。

自 20 世纪 90 年代初 InSAR 技术发展以来,德国航天局和德国地学研究中心,法国国家空间研究中心和法国地质调查局,美国航空航天局(National Aeronautics and Space Administration, NASA)和 JPL,瑞士 GAMMA 软件公司,美国 ERDAS 软件公司,加拿大 Earth View 软件公司等,在 InSAR 技术的基本原理、模型试验、计算方法、软件开发和实际应用等方面,开展了大量的工作,取得了重要的进展,使 InSAR 技术已从应用研究走向实用化。

1.2.4 雷达遥感技术应用

目前,雷达遥感技术的应用十分广泛,主要包括以下几个领域:

(1)农业:可用于农作物监测、土地利用调查、沙漠和植被调查、水产养殖调查等,如水稻的生长的监测,农作物产量的估计,闲置土地、大面积土地利用的统计等;

(2)林业:可用于森林识别与分类、森林蓄积量估测、森林采伐的探测和监测等;

(3)水文:可用于水系的河道特征与河流演变研究、古河道探测、湖泊的环境与演化监测、地下水与土壤水分探测等;

(4)地质矿产:可用于地形地貌测量、构造识别、岩性分析、石油资源勘探、海上石油勘探等;

(5)环境灾害:可用于火山、地震、滑坡、水面浮油、厄尔尼诺现象、火灾和烟霾(火警)的监测,洪灾评价及响应等;

(6)气候监测:可用于监测大气和地球系统的组成部分,以及全球气候指标的监测;

(7)海洋:可用于海洋石油溢出、沿海船只交通以及浅海测量等信息监测。

此外,雷达遥感技术在冰川研究、城市环境、考古、全球变化研究等方面也都有成功的应用(李平湘等,2006)。

雷达遥感技术可对世界任何地方进行无障碍的测量,只需少量的花费,就能提供近实时的图像及相关信息,改进行动反应并提高干预能力,帮助监测和预见人类活动对土壤、森林、水等环境的影响,人类和自然引起的各种灾害,以及所有类型的未经许可的活动等。总的来说,雷达图像是帮助管理大范围的环境问题最有效的方法。作为雷达遥感中的尖端技术,基于时间序列 SAR 遥感图像的 InSAR 及其 DInSAR 技术,由于其独特地利用了相位信息,可以精确地测定地面的微小位移变化,因此,它能够解决常规手段难以或无法解决的许多问题,或者能够提供更简洁、直接、高效和低成本的方法。

§ 1.3 InSAR 技术特点

SAR 遥感图像和传统的光学遥感图像相比,不仅具有全天候及穿透能力较强的优势,更重要的是它们在物理原理上根本不同点,使 SAR 遥感图像更具有利用价值。光学传感器记录的是从地面反射的太阳方向的电磁辐射量(如无数相互无关的光波或光子),即记录反射光子的数量,图像的每个元素(像素)由所接收光线的亮度或幅度所刻画。与此相反,SAR 天线用“相干”的辐射照射其目标,发射的电磁波的峰值和谷值遵循正弦曲线模式,因此,SAR 既能够测量返回波的幅度,又能够精确地测量其振动的位置,即相位。由于 SAR 以与无线电短波的波长相对应的极高频率工作,因此,为测量相位带来了极大好处。例如,如果星载 SAR 工作在 6×10^9 Hz 的频率下(即每秒 6×10^9 周期),在完成一个完整的振动波所需的短暂时间内,无线电信号将以光的速度仅能向地球方向传播 5 cm。假设从 SAR 天线到地面目标的距离正好是 800 km,那么往返 1 600 km(信号到达地球再返回)就相当于一个非常大的波长(整体)。因此,当波返回到卫星时,它只不过完成了其周期的最后部分,在剩下的时间里,其相位对于其原始条件没有改变。但是,如果到地面的距离超过 800 km 仅 1 cm,电磁波就必须在往返路程中多出 2 cm 的距离,这就占了波长的 40%。作为结果,反射波在到达卫星时其相位就会偏离一个周期的 40%,这个值可以很容易被接收设备所记录。因此,测量相位便为测量目标的距离提供了厘米级甚至是毫米级的精度。

几十年来,大多数 SAR 图像工作者完全没有注意到相位测量的价值,这种疏忽是容易理解的。SAR 图像上的单个像素代表着地面一块可以评估的区域,也许是 100 m^2 ,在这么一小块地方将对其内粗糙的表面或者无数小的目标等产生多重雷达反射,如散乱的小圆石头、岩石、树叶、树枝以及其他物体。因为这么多雷达反射到达天线时会以不可预料的方式组合起来,对于一个给定像素所测量的相位似乎是随机的。于是,在 SAR 图像中所测得的相位与相邻的像素似乎没有关系。然而,在这样一幅图像中,与给定像素相关的幅度一般会表明地表相应地点基本的反射体的多少。但由于个别的反射会叠加起来产生整体较强的反射(构成干涉),或者一个反射抵消了另一个反射(消除干涉),所以幅度测量也存在“噪声”的问题。这种相干辐射的反射现象,也叫作斑点,说明了小束激光的奇异和粒状的现象(皮衣鸣等,2008)。

许多年来,科学家们在 SAR 图像中做的许多工作是通过将相邻像素的幅度均值化来克服斑点效应产生的麻烦。他们遵循这个策略,试图模仿传统的黑白航空像片的结果,最后取得了成功。然而,通过幅度值均值化,SAR 图像会丢失雷达反射相位的所有信息,其中还包含有许多未知的隐藏信息。1974 年,Goodyear 宇航公司的 L.C.Graham,首次演示了充分利用机载 SAR 测量相位的可能性。然后,在 20 世纪 80 年代初期,JPL 的科学家们,展示了他们能够从 1978 年发射的第一颗民用 SAR 卫星 Seasat(但仅运行了三个月)测量的相位获得类似结果;他们是通过对比大致在同一位置上不同时间获得的两张 SAR 图像做出的结果。就某种意义上来说,这件工作类似于通过慢速摄影获取两张完全分开的图片。尽管每次相位本身呈现出随机性,在两张 SAR 图像上相对应的像素间的相位差就产生了相对直观的干涉模式。从原理上看,如果在完全同样的位置上获得两张连续的卫星图像,对于任何相对应的一对像素来说应该没有相位的差别。但是如果在两次 SAR 扫描期间地表的景物发生了变化,那么第二张图像的一部分像素的相位就会改变。星载 SAR 由此能够追踪地球表面微小移动。

在通常的介绍中,SAR 的干涉图是用一系列的彩色条带表示地面移动的方法,其类似于由肥皂或油的薄膜所产生的干涉条纹(舒宁,2003a)。因为雷达电磁波必须覆盖往返距离,所以一个完整的彩色条带集代表着半个波长的移动。对欧洲的 ESR-1 卫星来说,一个条纹集标志着地面运动 3 cm 的变化。尽管这些条纹只记录朝卫星方向(或背离其方向)的地面移动成分,但它们被证明是格外有用的,这是因为一张 SAR 图像所覆盖的土地跨度很大,若要由地质学家去测量达到类似的精度,需要花数年的时间。然而,InSAR 要求对每个像素有贡献的许多小的反射物体,如岩石或小块面积的植被保持不变(这样对两幅图像来说相位的随机成分才能保持完全一样)。这个有些苛刻的条件会产生一些不利的限制。如果获取的两幅图像之间的时间间隔过长,每个像素中包含的小物体将会发生无规则的变化(刘永坦,1999)。例如,树叶会从树上落下,原来无草的地方现在长出了草丛,暴风雨冲刷掉了地表的车印等。更精细地,另一个问题产生了,如果两幅 SAR 图像是在不同位置获取的,那么几何位置的改变也会引起相位的变化。如航空立体像对,观察角度稍微不同,获得的两幅 SAR 图像就会包含由地面高程的变化引起的差别。通过仔细地计算这些纯地形的影响并去除,就可以去掉这些相位的变化。但是,如果对每个像素有贡献的原始目标之间的干涉发生了变化,雷达相位就会混合在一起而不是修复,这是不可避免会发生的事,除非两幅图像以几乎完全相同的角度获得。因而,对于成功的干涉测量,星载 SAR 飞行的两条路径相距不能超过 1 km(准确的值依赖于具体采用的星载 SAR 和观察的几何位置)。

§ 1.4 DInSAR 及其改进技术

用于获取地表形变的 InSAR 技术即 DInSAR 技术。1989 年, Gabriel 最早介绍了 DInSAR 技术的概念。随着 InSAR 技术的广泛应用,尤其是在长时间序列的缓慢地面形变监测方面的深入应用,人们发现常规 DInSAR 技术存在不可克服的局限。研究人员通过对大量 SAR 图像的研究发现,城区和岩石地区,在长时间范围内仍然存在相位和幅度变化稳定的点,利用这些稳定点上的相位特征,可以很好地解决时间去相干问题,从而实现长时间尺度上的地面形变分析。目前,除了常规 DInSAR 技术的应用外,基于相干目标的多基线距 DInSAR 也逐渐被采用,主要有最小二乘(least square, LS)方法、短基线集(small baseline subset, SBAS)方法(Berardino, 2002; Lanari et al, 2004)、永久散射体(permanent scatterer, PS)方法(Ferretti, 2001)和角反射器(corner reflector, CR)方法等。

1.4.1 常规 DInSAR 技术

InSAR 技术的核心是利用相位观测值获取目标的几何特征及变化信息。干涉图中任一像素的相位表示的是雷达与该像素间距离的变化和该目标的散射相位变化之和。若两次观测期间散射相位保持稳定,则干涉相位反映的是两次观测期间目标与雷达间距离的变化,其中包含地形信息、地面形变以及大气活动引起的相位延迟。因此,可以根据各分量对干涉相位贡献的大小,分别解算出地形信息、两次观测期间目标沿雷达斜距方向的变化以及大气延迟等。由于干涉相位对微小形变极其敏感,毫米级的形变在干涉相位中都会有所反映,因而利用重复轨道观测获取的干涉相位,通过差分处理去除两次观测相位中的共有量(平地效应、地形相位和大气延迟等),可以得到形变相位,进而反算形变量,这就是 DInSAR 监测地面形变的核心思想。

1.4.2 累积干涉图法

为抑制大气波动对监测结果的影响,可以利用累积 SAR 图像进行干涉相位时间序列分析。其基本思想是在数据量较少的情况下,选择基线较短(一般小于 300 m)的干涉图像,进行短基线干涉像对组合,增大单一差分干涉图可获取形变信息的时间跨度,尽可能多地获取观测值的个数,以此来求解形变速率。为恢复形变过程,可将差分干涉相位视为观测值,而相干目标的形变序列为未知数,利用参数估计的方法求解每一相干目标的形变序列值。因此,产生了基于最小二乘方法的干涉图序列分析方法。利用最小二乘方法对不同时刻获取形变量进行平差处理,以获取线性形变速率和不同时刻的形变累积量。在这些方法中,以短基线集方法最为典型。该方法需要解决两方面的问题:一是空间相位解缠的可靠性和稳定性;二是解缠相位的时间序列分析。前者在于获取单个时相的形变场,后者则在于分析单个目标发生形变的时间特征。为此,短基线集方法首先发展了基于相位模型分解的处理方法,将形变速率进行线性和非线性分解,根据形变速率以及高程误差的变化特征,通过相位迭代解算线性形变速率和高程误差改正;其次,根据大气相位的时空变化特征,从残余相位中分离大气相位,得到非线性形变量(Berardino, 2002)。

利用累积干涉图法进行地面形变速率和形变过程信息的提取,在很大程度上抑制了大气相位对形变测量结果的影响,提高了 DInSAR 技术的实用性。由于其最大程度地利用了短基线干涉像对,极大地减弱了空间失相干对干涉相位质量的影响,充分利用了现有 SAR 数据,降低了对 SAR 数据数量的要求,能更多地提取相干目标,即使在数据量较少的情况下仍可以获得高精度的形变场速率图和形变序列图。此外,基于相位模型的考虑,将形变信号进行分解,同时求解相干目标高程误差对线性速率回归的影响,提高了线性速率获取的精度。在数据集较小情况时(5~10 景),仍可以利用若干张用不规则三角网(triangulated irregular network, TIN)解缠的相位图加权平均获取形变速率结果。当数据集较大时(大于 10 景),则可以利用时间域相位回归模型对形变速率和形变序列进行求解,提高长时间条件下监测精度,可以很好地获取大尺度地面形变场信息,也可以对重点区域进行高精度监测,是工程化应用较为实用的方法。

由于短基线集方法将不同子集的干涉相位作为恢复形变序列的观测值,因而可以对利用不同传感器获取的差分干涉相位子集联立求解,不受单一数据源的限制,如利用 ERS 卫星和 Envisat 卫星数据联合解算,从而满足同一研究区长时间连续监测,以研究形变过程的时间特征。利用累积干涉图法可以通过若干个干涉图的解算很好地反映非线性形变特征,而在非线性特征明显的条件下,可根据多个干涉图的组合以凸现单个形变事件变化引起的形变量,更好地反映监测区域的形变特征。

1.4.3 PS-InSAR 技术

永久散射体(PS)方法的提出将 DInSAR 技术向前推进了很大的一步。PS-InSAR 的核心思想是对 PS 的干涉相位进行时间序列分析,根据各相位分量的时空特征,估算大气波动、DEM 误差以及噪声等,并将其从差分干涉相位中逐个分离,最终获取每个 PS 点的线性和非线性形变速率、大气延迟量(atmosphere phase screen)以及 DEM 误差。经 PS 方法处理,获取的年度形变速率的精度可以达到毫米级。与 PS-InSAR 技术具有相同处理思想的方法还有相

干点目标(coherent point target, CPT)方法、点目标干涉测量分析(interferometric point target analysis, IPTA)方法等。这些方法的共同点是基于大量的 SAR 数据(一般大于 20 景甚至 30 景),从中筛选出具有稳定散射特性的相干点目标,构成离散点观测网络(较之常规的形变监测网密度更高),通过分析 PS 点目标相位变化获取地面形变状况。由于将 PS 作为观测对象,降低了空间基线对相干性的影响,即使在临界基线的条件下,仍然可以通过分析 PS 差分干涉相位的变化反演形变信息。但该方法往往需要反映地面形变特征的先验模型,如线性形变速率模型。另外,为了提高 PS 高程的估算精度,并进行大气校正,需要大量的 SAR 数据进行统计分析(Ferretti, 2001)。

PS-InSAR 技术一般采用的线性形变模型提取点目标对应的形变量,如测量长时间下保持稳定移动速率的地面移动的现象。该方法的优点是能一次性获取中尺度(约 $2\,000\text{ km}^2$)范围内的地面形变信息。由于非线性形变可以用线性形变模型来模拟,因而一些非线性形变也可以通过线性形变测量得到。若观测对象表现出明显的非线性特征,并且形变量变化大,则在 PS 点目标覆盖的范围内出现不连续的区域。产生不连续(空间和时间上的)原因是由于形变本身超出了所采用的模型的边界条件。这种情况下,若利用基于线性模型估算的形变速率来反演一定时间内的形变量,则必将与实际情况相差较远。可以通过两种方法来弥补线性模型模拟非线性形变的不足:一种是采用非线性形变模型;另外一种是将长时间间隔分解为数个短时间段,利用函数模型模拟各个时间段内的形变量,进而求解非线性量。非线性模拟的处理过程相当复杂,而且非常耗时,限制了其用于大面积的形变测量,但随着处理技术的进步,处理时间将逐步缩小,处理的范围也可以进一步扩大。

PS-InSAR 技术对数据量要求较高,只有 SAR 图像个数达到一定的程度才能筛选出在整个时间跨度内具有稳定信号的 PS 点,对于相干目标较多的地区(如城区),由于地物在长时间间隔下保持了很高的相干性,数据量较少的情况下也可进行处理。由于 PS-InSAR 技术基于离散点相位解缠,当点的密度不能达到形变量对相位解缠的要求时,则很难得到准确的结果。一般情况下,至少必须满足每平方千米 5 个 PS 点才能完成相位解缠。对点密度要求的另一个原因是大气问题,鉴于大气的空间相关距离,因而要求 PS 点间距尽可能小于 1 km ,以减小大气的影响。

与累计干涉图方法比较而言,PS-InSAR 技术可以利用长基线距的 SAR 数据进行形变参数估计,在 DEM 误差、大气相位估计以及非线性形变等的解算上有明确的阐述。此外,通过对残余相位的处理,可以进一步提高估计精度和 PS 点数量,在城市地面沉降监测,甚至重大基础设施的监测方面将发挥更大作用。

1.4.4 CR-InSAR 技术

对于不存在相干目标地区或者相干目标较少的,但又必须监测的形变区域,可以利用人工目标作为雷达监测对象,根据其干涉相位变化来反映形变特征。CR 就是典型的人工目标,它一般是由 3 块相互垂直的金属三角平面板构成(以三角反射器为例),在很大的范围内,入射 CR 的雷达波将沿原路返回。在雷达图像上,CR 不仅具有很大反射强度,而且还具有很高质量的相位。在很多情况下,如对山体滑坡、水库、大坝、桥梁或其他建筑物活动进行监测等,其空间监测范围相对较小,形变幅度又不大,满足相位解缠约束条件,则可以将人工的 CR 作为观测对象。

对于布设在形变体上的 CR 所构成的监测网络,利用不规则格网相位解缠方法和时间序列分析方法均可得到很好的监测结果。当观测网中点目标距离更大时,则可以应用 PS 方法,这时 CR 就是特殊的 PS 点目标了。安装时,CR 的中垂线必须严格与雷达入射方向一致,以保证强的雷达后向散射。CR 测量中要求雷达回波和周围地物能明确区分出来,避免与其他地物的散射信号相干涉。因此,建筑密度高的城区,需要选择背景散射特性较低的区域安装 CR,避免出现 CR 回波与其他地物回波信号产生干涉现象。

§ 1.5 SAR 对地观测系统

在航空器内(飞机和气球)或航天器(火箭、人造卫星、宇宙飞船和航天飞机)下方固定一个天线并指向一侧,构成一个雷达遥感系统,这种系统叫侧视雷达(side looking radar, SLR)。成像雷达系统按照安装的平台,可分为机载雷达系统、航天飞机雷达系统及星载雷达系统;按照孔径类别,可分为 RAR 系统和 SAR 系统;按照处理方式,可分为聚焦雷达系统和非聚焦雷达系统;按被测区域,可分为聚束照射雷达系统、条带测绘雷达系统和多普勒锐化雷达系统。

1.5.1 机载 SAR 系统

机载 SAR 系统是雷达遥感发展的基础,最初于 20 世纪 40 年代开发研制。SAR 技术源于美国,在欧美发达国家不断完善与成熟,其应用领域也得到不断推广。绝大多数机载 SAR 系统是军事系统,但也有一部分为民用或科学应用提供数据,并且为星载 SAR 的研究提供试验数据。下面简单介绍国内外主要几种机载 SAR 系统。

1. 美国机载 SAR 系统

1988 年, NASA/JPL 研制出一部以 DC-8 飞机为平台的 AirSAR 系统。该系统既是研制航天飞机 SAR 技术及星载 SAR 技术的试验装置,又是从航天飞机 SAR 系统或星载 SAR 系统获取地球科学研究数据及分析的基础实验系统。该系统同时在 P、L 和 C 波段上获取数据,有三种工作模式:极化合成孔径雷达(polarimetric synthetic aperture radar, POLSAR)采用的极化模式、地形合成孔径雷达(topographic synthetic aperture radar, TOPSAR)采用的交叉轨道干涉测量(across track interferometry, XTI)模式及顺轨干涉测量(along track interferometry, ATI)模式。自 AirSAR 于 1988 年开始第一次飞行以来,在美国及其他国家范围内,几乎每年都要完成科学飞行任务。其曾于 1996 年对环太平洋地区的 10 个国家及地区进行了飞行(即 PACRIM 计划),并获取了 120 多个试验区的 POLSAR 和 TOPSAR 数据;又于 2000 年 7 月 21 日至 10 月 23 日进行了 PACRIM2 计划的成像飞行,促进了参与该项目的国家和地区在极化雷达和干涉雷达技术上的发展。

20 世纪 90 年代初,美国桑迪亚国家实验室(Sandia National Laboratory)研制了一种多模式 SAR 样机——Twin-Otter 系统,能够在 Ka、Ku、X 和 VHF/UHF(甚高频/特高频)4 个波段工作,以聚束(spotlight)模式和条带(stripmap)模式实时生成高分辨率 SAR 图像。该样机设计适用性广,能够相当容易地改变数百个参数,以适应新的试验需要。

1996 年 11 月,美国 Intermap 科技公司开始运行用于地形高程测量的 SAR 系统 STAR-3I(原名 IFSARE),该系统是由密歇根环境研究所(Environmental Research Institute of Michigan, ERIM)和 NASA/JPL 联合研制的,采用 X 波段,可提供 DEM、正射校正图像和专