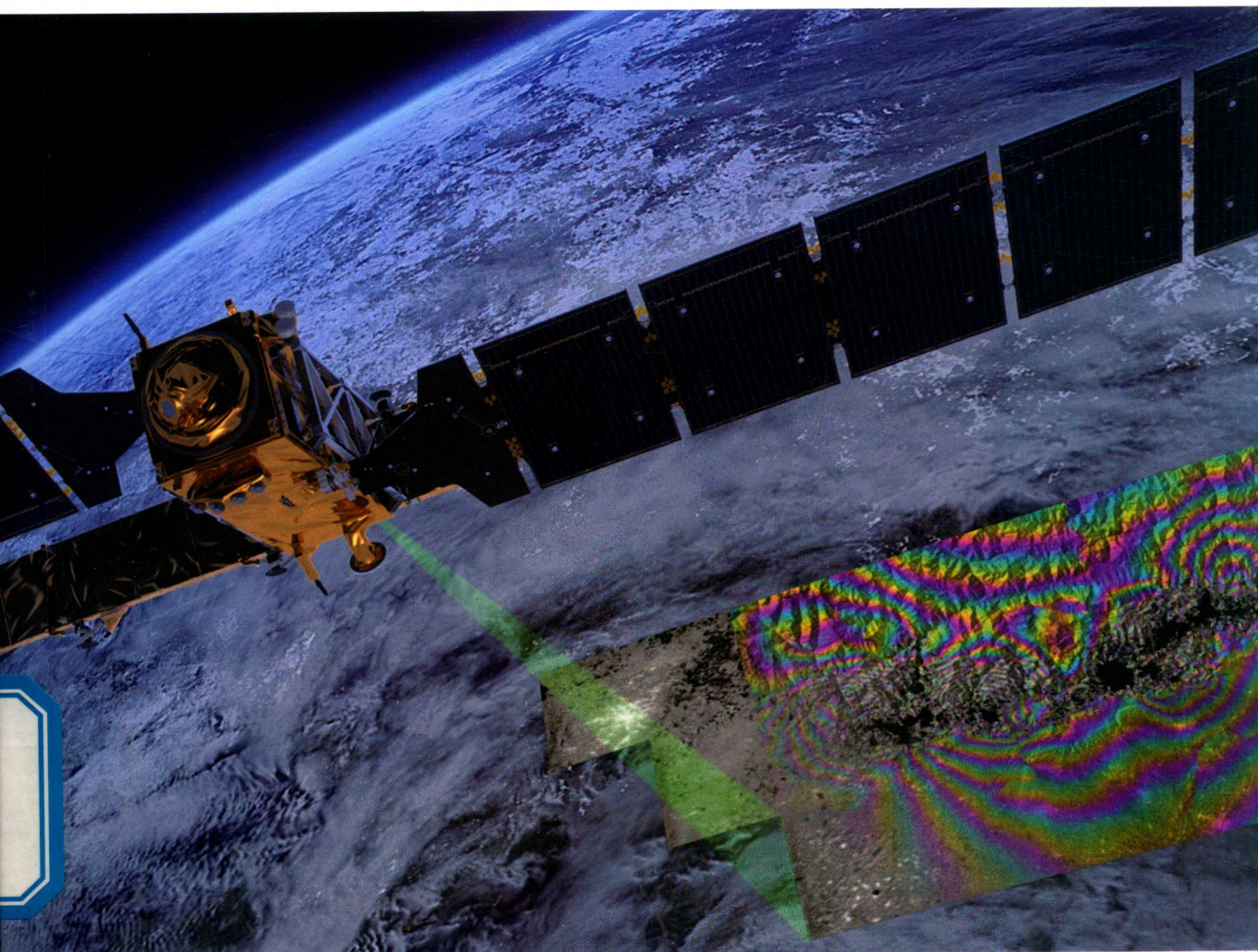




地球观测与导航技术丛书

InSAR 原理与应用

刘国祥 陈 强 罗小军 蔡国林 著



科学出版社

“十三五”国家重点出版物出版规划项目

地球观测与导航技术丛书

InSAR 原理与应用

刘国祥 陈 强 罗小军 蔡国林 著

科学出版社

北 京

内 容 简 介

本书系统阐述合成孔径雷达干涉(InSAR)理论、技术方法与应用,汇集国家973计划、国家重点研发计划、国家自然科学基金和中国铁路总公司科技研发计划等项目支持下取得的一系列研究成果。本书采用理论验证、实验分析与案例展示相结合的手段,系统阐述SAR成像基本原理、SAR参考框架与投影转换方法、合成孔径雷达干涉原理、SAR影像配准方法、参考椭球面相位计算方法、干涉相位滤波算法与质量评价、相位解缠原理与方法、InSAR地形三维重建方法和InSAR形变探测方法,最后,综合介绍InSAR前沿技术及其应用情况。本书所陈述的理论与技术方法在地质灾害监测与防治和国家重大基础设施安全监控等领域具有广阔的应用前景。

本书可作为摄影测量与遥感、大地测量、地理信息工程、地球物理、地质工程和环境工程等专业的教学用书或参考用书,也可供从事相关领域研究与开发的科研人员参考使用。

图书在版编目(CIP)数据

InSAR 原理与应用/刘国祥等著. —北京: 科学出版社, 2019.5

(地球观测与导航技术丛书)

“十三五”国家重点出版物出版规划项目

ISBN 978-7-03-061185-7

I. ①I… II. ①刘… III. ①合成孔径雷达—应用—地球观测 IV. ①P183

中国版本图书馆CIP数据核字(2019)第086303号

责任编辑: 苗李莉 / 责任校对: 何艳萍

责任印制: 肖 兴 / 封面设计: 图阅社

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>

天津市新科印刷有限公司印刷

科学出版社发行 各地新华书店经销

*

2019年5月第一版 开本: 787×1092 1/16

2019年5月第一次印刷 印张: 17 3/4

字数: 400 000

定价: 99.00元

(如有印装质量问题, 我社负责调换)

《地球观测与导航技术丛书》编委会

顾问专家

徐冠华 龚惠兴 童庆禧 刘经南 王家耀
李小文 叶嘉安

主 编

李德仁

副主编

郭华东 龚健雅 周成虎 周建华

编 委 (按姓氏汉语拼音排序)

鲍虎军	陈 戈	陈晓玲	程鹏飞	房建成
龚建华	顾行发	江碧涛	江 凯	景贵飞
景 宁	李传荣	李加洪	李 京	李 明
李增元	李志林	梁顺林	廖小罕	林 琿
林 鹏	刘耀林	卢乃锰	闫国年	孟 波
秦其明	单 杰	施 闯	史文中	吴一戎
徐祥德	许健民	尤 政	郁文贤	张继贤
张良培	周国清	周启鸣		

《地球观测与导航技术丛书》编写说明

地球空间信息科学与生物科学和纳米技术三者被认为是当今世界上最重要、发展最快的三大领域。地球观测与导航技术是获得地球空间信息的重要手段，而与之相关的理论与技术是地球空间信息科学的基础。

随着遥感、地理信息、导航定位等空间技术的快速发展和航天、通信和信息科学的有力支撑，地球观测与导航技术相关领域的研究在国家科研中的地位不断提高。我国科技发展中长期规划将高分辨率对地观测系统与新一代卫星导航定位系统列入国家重大专项；国家有关部门高度重视这一领域的发展，国家发展和改革委员会设立产业化专项支持卫星导航产业的发展；工业和信息化部、科学技术部也启动了多个项目支持技术标准化和产业示范；国家高技术研究发展计划(863计划)将早期的信息获取与处理技术(308、103)主题，首次设立为“地球观测与导航技术”领域。

目前，“十一五”规划正在积极向前推进，“地球观测与导航技术领域”作为863计划领域的第一个五年计划也将进入科研成果的收获期。在这种情况下，把地球观测与导航技术领域相关的创新成果编著成书，集中发布，以整体面貌推出，当具有重要意义。它既能展示973计划和863计划主题的丰硕成果，又能促进领域内相关成果传播和交流，并指导未来学科的发展，同时也对地球观测与导航技术领域在我国科学界中地位的提升具有重要的促进作用。

为了适应中国地球观测与导航技术领域的发展，科学出版社依托有关的知名专家支持，凭借科学出版社在学术出版界的品牌启动了《地球观测与导航技术丛书》。

丛书中每一本书的选择标准要求作者具有深厚的科学研究功底、实践经验，主持或参加863计划地球观测与导航技术领域的项目、973计划相关项目以及其他国家重大相关项目，或者所著图书为其在已有科研或教学成果的基础上高水平的原创性总结，或者是相关领域国外经典专著的翻译。

我们相信，通过丛书编委会和全国地球观测与导航技术领域专家、科学出版社的通力合作，将会有一大批反映我国地球观测与导航技术领域最新研究成果和实践水平的著作面世，成为我国地球空间信息科学中的一个亮点，以推动我国地球空间信息科学的健康和快速发展！

李德仁

2009年10月

前 言

自 20 世纪 50 年代以来,合成孔径雷达 (synthetic aperture radar, SAR) 遥感理论与技术一直处于快速发展态势,目前已经成为一种重要的对地观测技术手段。相比可见光和红外遥感, SAR 成像属主动遥感,因雷达传感器所采用的波长较长,受大气散射的影响较小,可以穿透云层、薄雾、雨和尘埃等,故 SAR 主动遥感具有全天候、全天时等明显的技术优势。近年来, SAR 成像系统正向多平台、多波段、多极化、多模式、高空间分辨率和高重访频率方向发展,现已形成地基、机载和星载 SAR 影像获取系统并存的格局。因为 SAR 影像包含有振幅、相位、极化等多种信息, SAR 数据处理技术得到了快速发展,现已形成合成孔径雷达干涉、极化分析、幅度追踪、层析建模和立体量测等多种技术并存的局面。目前, SAR 遥感已广泛应用于农林监测、地质调查、海洋监测、冰雪探测、地表覆盖监测、地形测绘、自然灾害(如洪水)和地质灾害监测以及国防建设等诸多方面。

自 20 世纪 60 年代末以来,合成孔径雷达干涉 (interferometric SAR, InSAR) 理论与技术得到了持续发展,本书将重点陈述卫星 InSAR 的理论、方法与应用。实际上, SAR 影像的每一像素既包含地面分辨元的雷达后向散射强度(振幅)信息,也包含与斜距(即传感器到目标的距离)有关的相位信息,将覆盖同一地区的两幅卫星 SAR 影像对应像素的相位值进行差分,便可得到一次差分相位图,通常称为干涉相位图 (interferogram),干涉相位是参考椭球面、地形起伏、大气延迟和地表形变等因素贡献和的体现。InSAR 主要围绕干涉相位及干涉相关数据来分离和提取感兴趣的信息。利用干涉相位图和搭载雷达传感器的平台姿态数据可以提取地表三维信息,而借助二次差分方法从干涉相位图中去除地形及其他因素的影响,可达到提取形变信息的目的,大气信息可通过相位信息分离(如时空滤波)来提取。因为以相位差异反映距离差异,所以 InSAR 在地形三维重建、形变探测和大气信号提取等方面具有高精度的特征。目前,卫星 InSAR 已开始广泛应用于地形三维重建和由地震活动、火山运动、冰川漂移、地面沉陷、滑坡等引起的地表形变探测及其地球物理模型反演,具有精度高、覆盖范围广、数据处理自动化程度高等技术优势。

惯用 InSAR 技术应用于区域地表形变监测常常受到轨道参数误差、地形数据误差、干涉失相关所引起的相位噪声、相位解缠误差以及大气延迟等不利因素的影响,这在一定程度上制约了 InSAR 在地表形变监测与地球物理模型反演方面的进一步应用。此外, InSAR 仅能获取沿雷达视线方向的一维形变量,难以满足地表真实三维形变信息提取的需求。针对这些问题,国内外诸多学者近年来开展了系统而深入的研究,在像素偏移跟踪方法、多孔径雷达干涉方法、三维形变监测方法、时序雷达差分干涉方法以及时序二维形变监测方法等方面取得了一系列突破,对 InSAR 理论体系进行了完善和拓展,进一步提升了该技术途径的精度、可靠性和实用性。此外,

随着地基 SAR 设备及数据处理技术的发展,地基 InSAR 已开始广泛应用于局部工程地表形变的监测与反演。

多年以来,本书作者一直跟踪 InSAR 发展国际前沿,针对 InSAR 基础理论、方法及其应用开展了系统而深入的研究,主要工作包括:扩展了基于参考椭球面的严密雷达干涉模型与计算方法;提出了永久散射体网络化雷达干涉理论与模型,有效克服了大气延迟与时空失相关的负面影响;提出了多平台时序雷达干涉与多孔径干涉组合计算模型与方法,提高了形变监测的可靠性,并成功应用于地震/滑坡三维形变监测与反演;研制了基于天然永久散射体/人工角反射器混合构网提取形变信息的装备与软件,并已成功应用于高速铁路沿线沉降监测且能有效发现沉降漏斗。这些研究成果已在西部地质灾害评估、华北平原沉降评估以及京沪高速铁路、郑西高速铁路等国家重大工程中发挥重要作用。

本书是在总结国内外相关研究成果和作者多年从事 InSAR 研究与教学工作的基础上撰写完成的。本书将从 SAR 成像原理、InSAR 原理、SAR 数据处理、InSAR 三维重建、InSAR 形变探测、InSAR 前沿等方面进行系统介绍,全书共包含 11 章的内容。第 1 章为绪论,主要介绍 InSAR 概况、发展历程、平台系统和应用情况等方面;第 2 章将对 SAR 成像基本原理进行介绍;第 3 章将介绍卫星 SAR 参考框架与投影转换方法;第 4 章将阐述合成孔径雷达干涉原理;第 5 章将对 SAR 影像的配准方法进行详细介绍并结合配准实例进行分析;第 6 章将对参考椭球面相位计算方法进行介绍;第 7 章将介绍干涉相位滤波的各种算法与滤波质量评价方法,并给出实例分析;第 8 章将阐述 InSAR 相位解缠的原理与方法;第 9 章将系统介绍 InSAR 地形三维重建的方法与数据处理流程,并给出典型应用实例;第 10 章将系统介绍 InSAR 形变探测的方法与数据处理流程,并给出典型应用实例;作为扩展,第 11 章将介绍 InSAR 前沿技术及其应用情况。

本书的出版得益于多个国家级和省部级科研项目的资助,这包括国家 973 计划课题“高分辨率遥感影像的信息度量与质量改善”(2012CB719901)、国家重点研发计划课题“星载 SAR 综合环境监测高精度数据处理与反演技术”(2017YFB0502704)、国家自然科学基金项目“基于卫星 PS-DS InSAR 的龙门山断裂带滑坡监测与反演”(41474003)、国家自然科学基金项目“基于卫星升降轨 X/C/L 波段 SAR 影像监测贡嘎山冰川分布及其动态演变”(41771402)、中国铁路总公司科技研究开发计划重点课题“高速铁路沿线环境及沉降监测关键技术研究”(2014G009-B)和“深层黄土地质灾害空间形态特征监测与分析研究”(2016T002-E)等。在此,作者对这些基金的资助表示诚挚的谢意!没有这些实质性的资助,本书所涉及的研究工作是不可能正常开展的。

在相关研究工作的开展及本书的撰写过程中,作者得到了诸多专家的鼓励、帮助或指导,他们是武汉大学李德仁院士、刘经南院士、张祖勋院士、龚健雅院士、李建成院士、许才军教授、廖明生教授、张过教授和李陶教授,中国科学院测量与地球物理研究所许厚泽院士,香港理工大学丁晓利教授、陈永奇教授和李志林教授,香港中文大学林珺教授,香港浸会大学周启鸣教授,英国纽卡斯尔大学李振洪教授,北京大学曾琪明教授,中南大学李志伟教授,同济大学伍吉仓教授,河海大学何秀

风教授，西南交通大学刘文熙教授、朱庆教授和徐柱教授等。在此，作者对这些专家的支持表示衷心的感谢！此外，课题组张瑞博士提供了第 11 章的编写素材，贾洪果博士、于冰博士、王晓文博士、杨莹辉博士分别提供了第 10、9、3、2 章的编写素材；戴可人博士、李涛博士、刘怡硕士、黄澜心硕士和博士研究生张波、武帅莹、包佳文、师悦龄和蔡嘉伦，以及硕士研究生李广宇、韦博文、符茵、吴婷婷、何沐、汪致恒、杨崇、李诗娆、沙永莲等为文稿的整理和部分图表的绘制做了细致的工作；在此一并深表谢意！

作者期望本书的出版能给诸多从事相关工作的科技人员与高等院校师生带来方便，对他们的学习与研究起到借鉴和帮助作用，为持续推动 InSAR 理论与应用研究产生积极的影响。尽管作者已尽最大的热情和投入来完成本书，以不辜负将要面对的诸多读者，但由于作者水平所限，疏漏之处在所难免，敬请读者不吝赐教，我们将持续对本书进行完善和改进。

刘国祥 陈 强 罗小军 蔡国林

二〇一八年六月于成都

目 录

《地球观测与导航技术丛书》编写说明

前言

第 1 章 绪论	1
1.1 合成孔径雷达干涉介绍	1
1.2 合成孔径雷达干涉的发展历史	7
1.3 合成孔径雷达成像系统的进展	10
1.4 InSAR 的主要应用情况	15
1.5 本书内容安排	23
思考题	24
第 2 章 雷达成像基本原理	25
2.1 雷达成像物理基础	25
2.2 雷达成像信号学理论	29
2.3 真实孔径雷达成像基本原理	32
2.4 合成孔径雷达成像基本原理	34
2.5 合成孔径雷达成像工作模式	38
2.6 合成孔径雷达影像的主要几何畸变	41
思考题	43
第 3 章 卫星 SAR 参考框架与投影转换	44
3.1 卫星 SAR 影像与目标空间定位参考框架	44
3.2 SAR 卫星轨道模型及其参数计算	47
3.3 SAR 目标空间定位	51
3.4 投影转换方法	54
3.5 投影转换实例	60
思考题	63
第 4 章 合成孔径雷达干涉原理	64
4.1 电磁波干涉——杨氏双缝干涉实验	64
4.2 InSAR 干涉几何	67
4.3 InSAR 干涉相位模型	70
4.4 基于干涉相位的地形三维重建	76
4.5 差分干涉形变信号提取	77
4.6 干涉相干性及相位噪声源	80
思考题	84

第 5 章 SAR 影像配准与干涉相位计算	85
5.1 SAR 影像粗配准	85
5.2 SAR 影像精配准	92
5.3 干涉相位计算	96
5.4 配准质量评价	97
5.5 SAR 影像配准与干涉相位计算实例及分析.....	98
思考题	102
第 6 章 参考椭球面相位计算	103
6.1 单点参考椭球面相位的计算	103
6.2 干涉区域参考椭球面相位建模	107
6.3 参考椭球面相位计算实例及分析	108
思考题	111
第 7 章 干涉相位滤波	112
7.1 滤波方法类别	112
7.2 SAR 影像前置滤波	113
7.3 干涉相位的后置滤波	117
7.4 干涉相位滤波质量评价	124
7.5 干涉相位滤波实例	125
思考题	131
第 8 章 相位解缠	133
8.1 相位解缠基本原理	133
8.2 相位解缠相关概念	135
8.3 相位解缠算法	139
8.4 干涉相位解缠实例及分析	158
思考题	168
第 9 章 合成孔径雷达干涉地形三维重建	169
9.1 InSAR 地形三维重建方法	169
9.2 InSAR 地形三维重建的误差分析	171
9.3 InSAR 地形三维重建数据选取	175
9.4 InSAR 地形三维重建数据处理流程	176
9.5 InSAR 地形三维重建实例：以 TSX/TDX 数据为例.....	178
思考题	184
第 10 章 合成孔径雷达差分干涉地表形变监测	185
10.1 典型地表形变及相关地球物理现象	185
10.2 DInSAR 地表形变监测方法	187
10.3 DInSAR 地表形变监测误差来源及干涉失相关分析.....	189
10.4 DInSAR 地表形变监测数据选取	191
10.5 DInSAR 数据处理流程	193

10.6 DInSAR 地表形变监测实例：以 2010 年玉树地震为例·····	196
思考题·····	201
第 11 章 合成孔径雷达干涉前沿技术 ·····	202
11.1 方位向形变监测方法·····	202
11.2 三维形变监测方法·····	208
11.3 时序差分雷达干涉技术·····	215
11.4 时序二维形变监测方法·····	232
11.5 地基 InSAR 形变监测方法·····	237
思考题·····	242
参考文献·····	243
附录 相关专业名词中英文对照表·····	262

第1章 绪 论

自 20 世纪 50 年代以来,合成孔径雷达 (synthetic aperture radar, SAR) 遥感理论与技术一直处于快速发展态势,目前已经成为一种重要的对地观测遥感技术手段。SAR 传感器工作采用的是微波波段 (波长 (wavelength) 范围为 1 mm~1 m),能主动发射微波,并接收目标反射的回波,属主动遥感成像。相比可见光和红外遥感,SAR 遥感所采用的波长较长,因而受大气散射的影响较小,可以穿透云层、薄雾、雨和尘埃等。因此,无论是在白天和黑夜,还是在恶劣天气和环境条件下,SAR 都能进行目标探测和成像。很显然,SAR 主动遥感具有全天候、全天时等明显的技术优势,目前已广泛应用于农林监测、地质调查、海洋监测、冰雪探测、地表覆盖监测、地形测绘、自然灾害 (如洪水) 和地质灾害监测以及国防建设等诸多方面。

随着雷达传感器、通信与计算机等技术的不断进步,以及越来越多对地观测任务需求不断涌现,SAR 遥感正经历着从理论与技术驱动到应用需求驱动的转变。近年来,SAR 成像系统正向多平台、多波段、多极化、多模式、高空间分辨率 (resolution) 和高重访频率 (frequency) 方向发展,现已形成地基 (ground-based)、机载 (airborne) 和星载 (spaceborne) SAR 影像获取系统并存的格局。因为 SAR 影像包含有振幅 (amplitude)、相位 (phase) 和极化 (polarization) 等多种信息,SAR 数据处理技术得到了多样化的发展,现已形成干涉处理 (即合成孔径雷达干涉)、极化分析、幅度追踪、层析建模和立体量测等多种技术并存的局面。

本书将重点介绍合成孔径雷达干涉 (interferometric synthetic aperture radar, InSAR) 理论、方法及其应用。自 20 世纪 60 年代末以来,InSAR 理论与技术得到了持续发展。起源于 1801 年 Thomas Young 提出的“杨氏双缝干涉实验”,InSAR 主要利用覆盖同一地区的两幅或多幅 SAR 影像中的相位数据进行干涉处理与分析,可以广泛应用于地形三维重建 (three-dimensional reconstruction of terrain) 和由地震活动、火山运动、冰川漂移、地面沉陷、滑坡等引起的地表形变探测 (deformation detection) 及其地球物理模型反演,具有精度高、覆盖范围广、数据处理自动化程度高等技术优势。本章将从 InSAR 概况、发展历程、平台系统、应用情况等方面进行陈述。

1.1 合成孔径雷达干涉介绍

InSAR 是近半个世纪发展起来的定量微波遥感 (microwave remote sensing) 技术 (Bamler and Hartl, 1998; Rosen et al., 2000; Rott, 2009; Moreira et al., 2013; Ouchi, 2013; Monserrat et al., 2014),国际上一些学者也将 InSAR 归类于空间大地测量技术 (Hanssen, 2001; Simons and Rosen, 2007)。起初,InSAR 主要应用于地表三维重建 (Zebker

and Goldstein, 1986; Bamler and Hartl, 1998; Rosen et al., 2000; Rabus et al., 2003; Farr et al., 2007)、制图 (Ouchi, 2013) 及地表变化检测 (Ouchi, 2013), 后来很快被扩展为差分合成孔径雷达干涉 (differential InSAR, DInSAR) 技术并应用于测量地表形变和地球物理模型反演 (Massonnet and Feigl, 1998; Hanssen, 2001; Lu and Dzurisin, 2014)。为解决常规 InSAR 所存在的问题, 国内外学者又提出并发展了时序/多基线 InSAR (Ferretti et al., 2000; Ferretti et al., 2001; Berardino et al., 2002; Crosetto et al., 2016; Gong et al., 2016)、多孔径干涉 (multi-aperture interferometry, MAI) (Bechor and Zebker, 2006; Jung et al., 2009; Jung et al., 2011; Hu J et al., 2014; Wang et al., 2014)、像素偏移量跟踪 (pixel offset tracking, POT) (Hu X et al., 2014; Wang et al., 2014) 及不同方法联合使用的策略 (Hu X et al., 2014)。目前, InSAR 已开始广泛应用于地震形变、火山运动、山体滑坡、冰川漂移以及地面沉陷等方面的监测与分析。关于 InSAR 及相关技术在这些方面的具体研究和应用, 读者可参阅本书后面给出的参考文献。

InSAR 是在合成孔径雷达成像与电磁波干涉两类技术融合的基础上发展起来的 (Hanssen, 2001)。实际上, 雷达探测起源于第二次世界大战期间的军事用途, 是一种基于微波探测的主动式传感器, 而电磁波干涉技术则起源于“杨氏双缝干涉实验”。为了便于理解 InSAR 的基本要义, 此处首先借助图 1.1 来介绍。图 1.1 (a) 给出了“杨氏双缝干涉实验”示意图, 图 1.1 (b) 给出了 InSAR 概念示意图。假设某卫星 SAR 系统沿着重复轨道对某一区域进行侧视成像, 对同一个地面分辨元来说, 两次成像便形成了两条雷达视线, 也就是说形成了地面分辨元至传感器的两个几何距离, 这种情形与“杨氏双缝干涉实验”非常类似, 两个雷达传感器的位置类似于“双缝”, 两个距离对应着两个雷达波程, 因波程差导致两个微波相遇时形成增强、削弱、甚至相互抵消的情况, 其实质是由相位差异 (对应着波程差) 所引起, 也就是导致“干涉”现象发生的原因 (图 1.3 (a))。

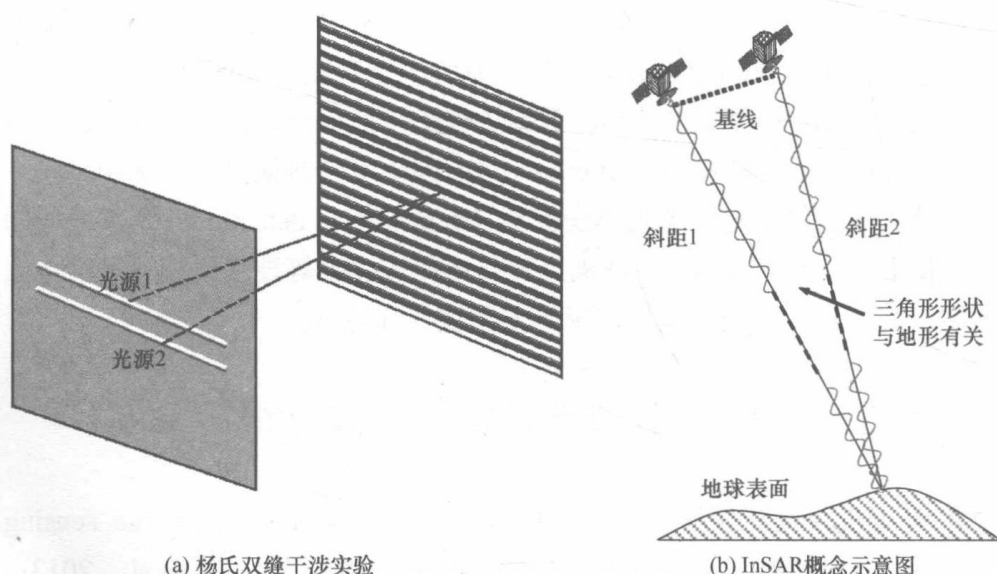


图 1.1 “杨氏双缝干涉实验”和 InSAR 概念示意图

实际上，SAR 成像时，雷达天线 (antenna) 发射的微波信号需穿越大气层且与地表交互作用后被反射至传感器，并记录回波强度与相位信息，这一成像过程会受到大气折射和观测噪声的影响 (Hanssen, 2001; 刘国祥等, 2001a; 刘国祥, 2005a)。经过信号采集与数据处理，SAR 影像的每一像素既包含地面分辨元的雷达后向散射 (backscattering) 强度 (振幅) 信息，也包含与斜距 (slant range, 即传感器到目标的距离) 有关的相位信息，将覆盖同一地区的两幅 SAR 影像对应像素的相位值进行差分，便可得到一个一次差分相位图，通常称为干涉相位图 (interferogram)。干涉相位 (interferometric phase) 意即相位差异，与传感器到目标的距离直接相关，是 InSAR 数据处理与信号提取的焦点所在。顺便指出，SAR 影像的每一像素的相位均存在整周模糊度 (integer ambiguity) 问题，在干涉处理中，需要采用相位解缠 (phase unwrapping) 方法 (Ghiglia and Pritt, 1998) 为每一像素确定干涉相位的整周末知数。理论研究表明，干涉相位是参考椭球面 (reference ellipsoid)、地形起伏、地表形变大气延迟 (atmospheric delay) 和其他噪声等因素贡献和的体现 (Hanssen, 2001; 刘国祥, 2004a)。InSAR 主要围绕干涉相位及干涉相关数据来提取感兴趣的信息，图 1.2 显示了星载 InSAR 信息提取的基本概念。

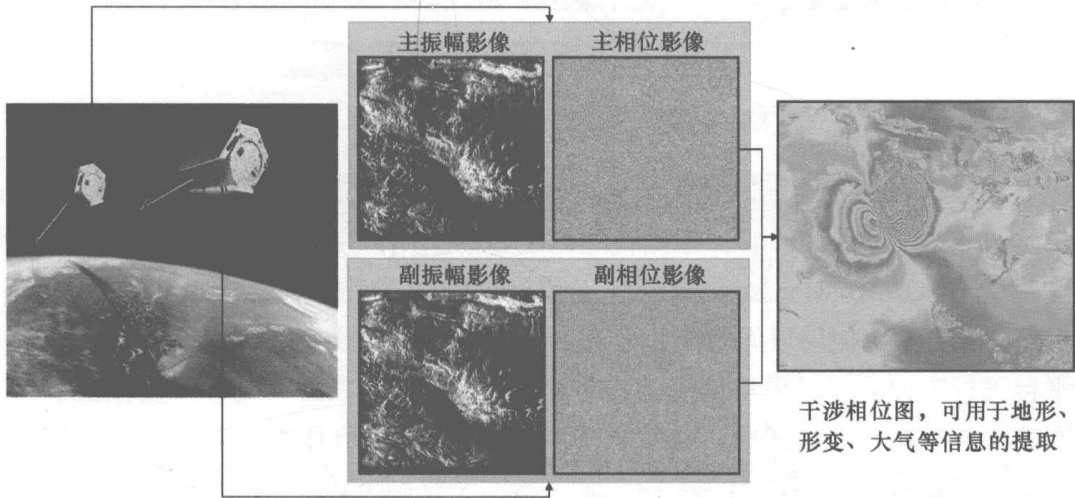


图 1.2 InSAR 信息提取示意图

理论上来说，利用干涉相位图和搭载雷达传感器的平台姿态数据可以提取地表三维信息 (Zebker and Goldstein, 1986; 王超等, 2002; 何秀凤和何敏, 2012)，利用干涉相干性 (interferometric coherence) 分析可以提取地表覆盖的变化信息 (Rott, 2009; Ouchi, 2013)。从地表形变探测来说，可以借助二次差分方法从干涉相位图中去除地形及其他因素的影响，从而达到提取形变信息的目的 (刘国祥等, 2001a; 单新建等, 2002; 龙四春, 2012)，这种方法被称为差分合成孔径雷达干涉。此外，大气信息可通过相位信息分离来提取。因为通过相位差异反映距离差异，所以 InSAR/DInSAR 在地形三维重建、形变探测和大气信号提取等方面具有高精度的特征 (Rosen et al., 2000; Hanssen, 2001)。值得说明的是，为便于陈述，如无特别需要，本书其他地方不严格区分一次差分 InSAR 方法和二次差分 DInSAR 方法，而是将 SAR 干涉处理统称为 InSAR 方法。

为便于了解干涉相位图，图 1.3 给出了西藏双湖地区的局部干涉相位图（不同的颜色表示干涉相位在 $-\pi$ 和 π 之间变化）。该图从德国 TerraSAR-X/Tandem-X (Sansosti et al., 2014) 姊妹卫星于 2012 年 2 月 28 日对该区域成像所获取的两幅 SAR 影像进行干涉处理中得到，图 1.3 (a) 显示了包含参考椭球面和地形起伏的干涉相位，而图 1.3 (b) 显示了去除参考椭球面贡献（也称“平地效应”）后反映地形起伏的干涉相位。干涉相位图也称“干涉条纹 (interference fringe)”，类似于等高线，这些条纹反映了地形起伏的状况，地形越平坦，条纹越稀疏；地形起伏越大，条纹越密集。

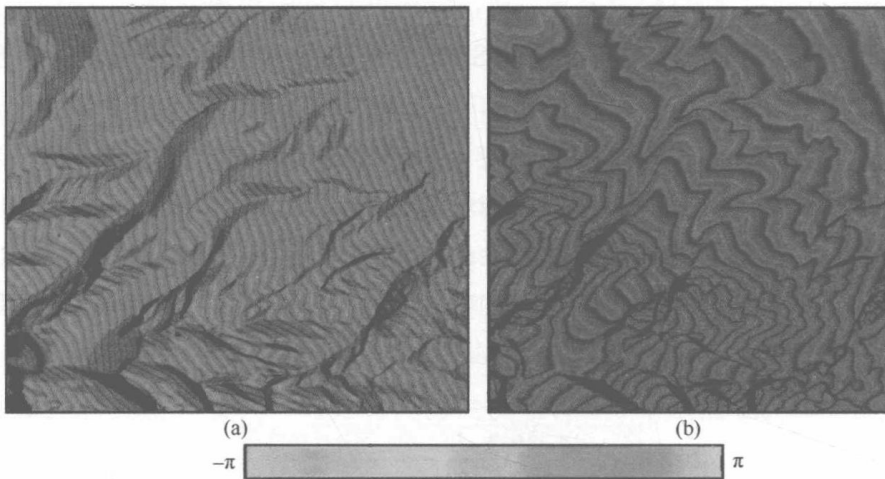


图 1.3 西藏双湖地区的局部干涉相位图实例

根据成像平台的不同，InSAR 系统可分为地基、机载和星载三类 (Moreira et al., 2013; Monserrat et al., 2014)。根据传感器配置的不同，可分为双天线干涉系统和单天线重复轨道干涉系统 (Hanssen, 2001; 王超等, 2002; 刘国祥, 2004a)。如图 1.4 所示，一些机载 SAR 系统使用以固定间距分开的两个天线（天线中心连线称为基线，一般垂直于平台飞行方向）同时采集信号，其中仅一个天线主动发射一定频率的微波信号，而地面回波信号被两个天线接收，经过处理，可获得不同视角且覆盖同一区域的两幅 SAR 影像，这种配置就是双天线干涉系统。航天飞机一般也搭载类似的双天线干涉系统，具体可参见 1.3 节中的描述 (图 1.10)。



图 1.4 机载 SAR 系统

星载 SAR 系统一般使用单天线采集信号（王超等，2002），如图 1.5 所示，对某个局部地区来说，一次卫星通过只能获得一幅 SAR 影像，卫星雷达以一定的时间间隔和轻微的轨道偏离重复对该地区成像，两次获取的 SAR 影像可形成一个干涉对，垂直于轨道飞行方向的基线称为合成基线，这种配置就是单天线重复轨道干涉系统。在星载雷达系统获取初数据后，须经计算机聚焦和滤波处理，才能形成 SAR 影像（廖明生和林琿，2003；刘国祥，2004b；Moreira et al., 2013）。SAR 影像产品一般附带有有关飞机/卫星轨道的姿态数据（即空间位置和速度矢量）和传感器系统参数。近年来，地基 InSAR 成像系统得到迅速发展，与星载和机载 InSAR 系统形成较好的互补，图 1.6 显示了意大利 IDS 公司研发的 IBIS-L 雷达干涉仪，由数据采集和数据处理系统构成，可对滑坡、露天矿边坡等进行局部重点监测。需要说明的是，本书主要针对卫星 InSAR 进行介绍，关于机载和地基 InSAR，有兴趣的读者可参阅相关参考文献（Rott, 2009；Moreira et al., 2013；Ouchi, 2013；Monserrat et al., 2014）。

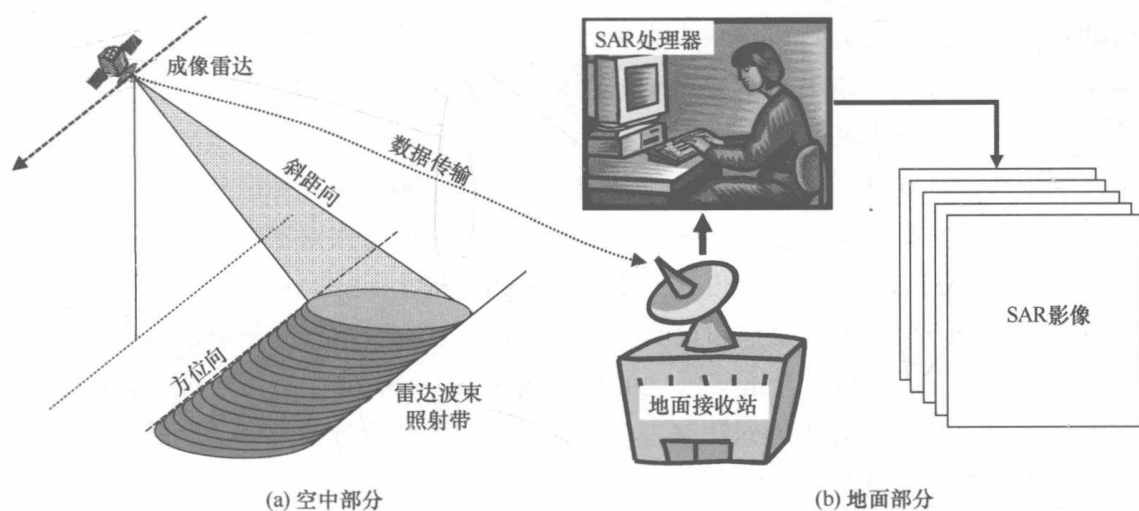


图 1.5 星载 SAR 系统

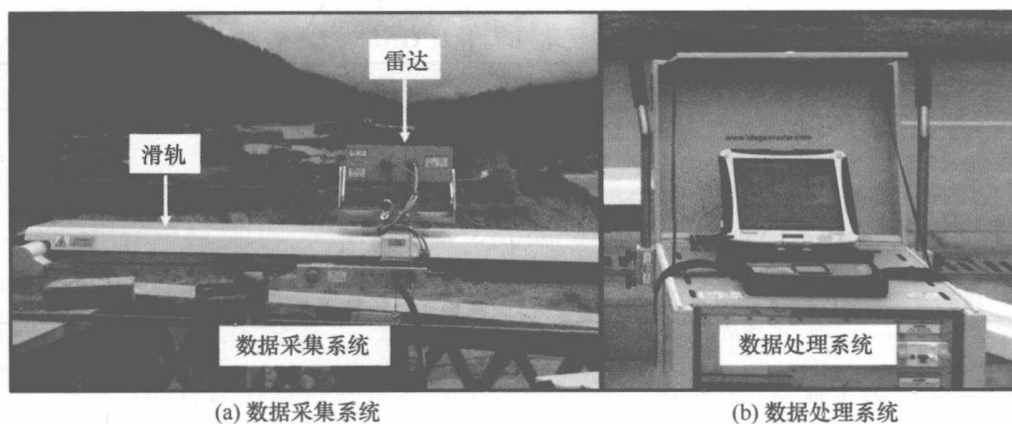


图 1.6 IDS 公司 IBIS-L 地基 SAR 系统

InSAR 在数字高程模型（digital elevation model, DEM）建立方面具有独特的技术优势（刘国祥等，2000；Hanssen, 2001），表 1.1 列出了 InSAR 与其他 DEM 获取技术

的对比情况。与地面测量、摄影测量和激光雷达技术相比，InSAR 在多云、多雾和多雨的天气条件下获取地形数据的技术优势更加突出，因而，它在获取全球地形数据方面具有不可替代的技术优势。从几种合成孔径雷达遥感技术对比来看，InSAR 在地形数据获取方面具有独特的优势，并且比 SAR 立体测图和 SAR 阴影测图具有更高的测量精度。

表 1.1 InSAR 与其他 DEM 获取技术的对比

DEM 获取技术	覆盖面	DEM 精度
地面测量	局部、大比例尺测图范围	0.01~0.1 m
摄影测量 (航空)	区域	0.1 ~ 1 m
LiDAR (航空)	区域	0.5~2 m
InSAR	区域到全球范围	1~20 m
SAR 阴影测图	区域到全球范围	坡度 $\leq 2^\circ$ 时为 22 m
SAR 立体测图	区域	10~100 m

由地表形变所引发的相关地质灾害是国内外普遍关心的问题之一，因自然因素或人为活动所引发的地质灾害可以造成人类生命财产损失或人类生存环境的破坏，这包括诸如地震、火山、冰川、滑坡和地表沉陷（因地下水抽取、矿产与油气资源开采等引起）等地质灾害。从区域地表形变监测手段来说，基于差分处理的 InSAR 是独一无二的遥感技术（刘国祥等，2000；Hanssen，2001；游新兆等，2001），可为地质灾害监测及预警提供独特的理论与技术支撑。与常规大地测量形变监测技术如精密水准测量和卫星导航定位系统（global navigation satellite system, GNSS）相比，InSAR 具有高精度、高分辨率、覆盖范围大、成本低、安全和观测连续等特点，具有常规形变监测手段无可比拟的优越性（刘国祥等，2000；Hanssen，2001；Xu et al., 2016），表 1.2 列出了 InSAR 与精密水准测量及 GNSS 技术的对比情况。与基于点观测的大地测量技术相比，InSAR 是独特的基于面观测的空间大地测量新技术，可补充已有的基于点观测的低空间分辨率大地测量技术如精密水准测量与 GNSS 等，因此，InSAR 为地球物理研究和形变灾害监测提供了一种经济而有效的空间对地观测途径。

表 1.2 InSAR 与精密水准测量及 GNSS 技术的对比

测量方式	精密水准	GNSS	InSAR
空间覆盖	离散点	离散点	面覆盖
精度	mm	mm	mm
周期、速度	长、慢	短、快	短、快
作业条件	根据天气	全天候	全天候
成本	高	较高	低

前已提及，基于微波的 SAR 主动成像几乎不受云雨和昼夜的限制，而基于可见光的被动式遥感成像则受这两个自然因素的制约较为严重。例如，赤道附近地区因云层的覆盖几乎很难获得有用的影像，欧洲地区所获得的非 SAR 影像也仅有 20%左右可被利用，这些正是基于 SAR 成像的合成孔径雷达干涉技术成为研究与应用热点的重要驱动力之一（Rott，2009；Ouchi，2013）。大量的已有研究表明，合成孔径雷达干涉可以应