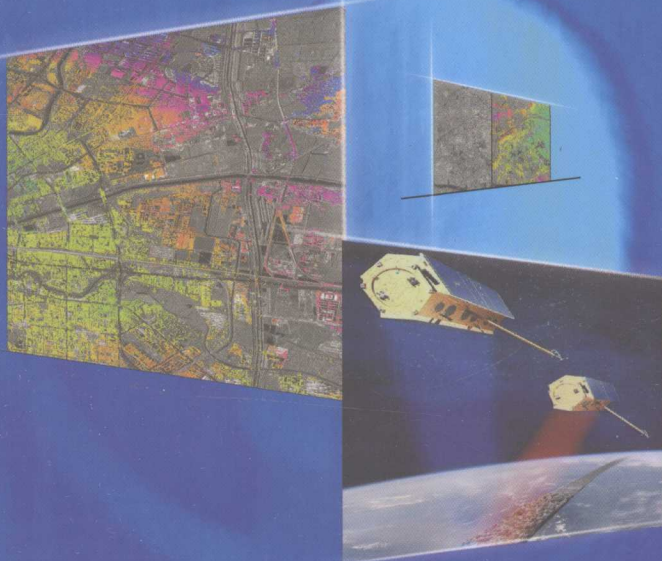




地球观测与导航技术丛书

永久散射体雷达干涉 理论与方法

刘国祥 陈 强 罗小军 蔡国林 著



科学出版社

地球观测与导航技术丛书

永久散射体雷达干涉 理论与方法

刘国祥 陈 强 罗小军 蔡国林 著

科学出版社

北 京

内 容 简 介

本书总结国内外相关研究成果,采取理论剖析、实验分析与应用验证相结合的形式,系统陈述了合成孔径雷达干涉(InSAR)及永久散射体雷达干涉(PSI)的理论、模型与数据处理方法,重点阐述了网络化 PSI 理论与方法及其在区域地表形变监测方面的应用实例。全书共分 11 章,其主要内容包括:InSAR 及 PSI 概论、InSAR 理论模型、InSAR 数据处理、PSI 理论基础、SAR 影像配准、永久散射体识别、PS 网络模型与线性参数求解、大气与非线性形变时间序列分离、PSI 地表形变探测应用实例、基于多卫星平台 PSI 提取三维形变速率场、超短基线 TCPIInSAR 及其应用。本书所陈述的理论与方法为克服雷达干涉在区域地表形变监测方面的应用局限性(主要包括时空失相关和大气延迟的负面影响)提供了有利的技术途径。

本书可作为高等院校及研究所测绘类或地球物理类专业研究生教学用书,亦可作为摄影测量与遥感、大地测量、工程测量、工程地质及地球物理等专业的科技人员与高等院校师生的参考用书。

图书在版编目(CIP)数据

永久散射体雷达干涉理论与方法/刘国祥等著. —北京:科学出版社,2012.7
(地球观测与导航技术丛书)

ISBN 978-7-03-035060-2

I. ①永… II. ①刘… III. ①合成孔径雷达—散射—干涉测量法 IV.
①TN958

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2012)第 148551 号

责任编辑:杨 岭 冯 铂/封面设计:陈思思

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>

四川煤田地质制图印刷厂印刷

科学出版社发行 各地新华书店经销

*

2012 年 7 月第 一 版 开本:787×1092 1/16

2012 年 7 月第一次印刷 印张:13.5

字数:320 000

定价:98.00 元

(如有印装质量问题,我社负责调换)

《永久散射体雷达干涉理论与方法》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

编 委 (按姓氏汉语拼音排序)

鲍虎军 陈 戈 程鹏飞 房建成 龚建华 龚健雅

顾行发 江碧涛 江 凯 景贵飞 李加洪 李 京

李 明 李增元 李志林 林 琿 林 鹏 卢乃锰

孟 波 秦其明 施 闯 史文中 吴一戎 许健民

尤 政 郁文贤 张继贤 张良培 周成虎 周启鸣

《地球观测与导航技术丛书》出版说明

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；工业与信息化部和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”计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 和 863 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 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

序

国家“十二五”科学技术发展规划中明确强调在对地观测与导航技术领域深入开展地质灾害监测及其演变规律研究的重要性。合成孔径雷达干涉(InSAR)是近四十年发展起来的极具潜力的一种定量微波遥感新技术,它是合成孔径雷达遥感成像与电磁波干涉两大技术融合的结晶。InSAR可应用于地表三维重建、制图、地表变化检测以及区域地表形变监测等,特别地,InSAR已在研究地震形变、火山运动、冰川漂移、城市沉降、山体滑坡以及长大线性工程形变等方面表现出很好的应用前景。

目前,星载SAR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率方向发展,这为雷达干涉理论的深化研究及其应用扩展提供了很好的机会。已有研究表明,常规InSAR应用于区域地表形变(特别是缓慢累积形变,如地壳运动、火山运动、滑坡及区域沉降等)的监测受到一些不利因素的制约,特别是时空失相关和大气延迟问题。近年来,诸多学者一直在围绕提高InSAR形变监测精度和可靠性方面展开研究,目前的研究重心已转移到基于SAR影像时间序列探测形变时空演变的思路上来,已提出的改进方案主要包括永久散射体(PS)、短基线子集(SBAS)技术等,所有这些研究成果为减弱或克服时空失相关和大气延迟因素对形变信息提取的负面影响提供了有效的途径。

永久散射体雷达干涉(PSI)被认为是区域形变灾害监测与分析最为有效的工具,在中国与欧盟科学家联合实施的“龙计划”中得到成功应用。西南交通大学的刘国祥博士及其研究团队,不失时机地抓住了这一前沿性研究方向,多年来对InSAR及PSI关键理论与核心技术展开了系统而深入的研究,提出了永久散射体网络化雷达干涉的理论 with 计算模型,开发了相应的软件系统,并已开始应用于区域地壳形变、城市沉降以及长大线性工程(如高速铁路)沉降监测与分析。本书作为这些研究成果的结晶,突出体现了作者及其团队对科学研究锐意进取的探索精神。我为国内不断涌现出这样一批崭露头角的学术团队感到欣慰与高兴。

本书系统地陈述了InSAR及PSI的理论、模型与数据处理方法,重点阐述了网络化PSI理论与方法及其在区域地表形变监测方面的应用实例。该书结构与体系完整,理论与实践相结合;全书层次清晰,表达清楚、文笔流畅。书中所陈述的理论和方法反映出了PSI领域的最新研究进展与发展趋势,这将对我国雷达干涉理论的进一步研究与技术发展起到促进和推动作用。基于以上理由,我愿意向与地学相关的广大读者,包括科研、教学、生产和管理方面的读者推荐本书。同时也希望作者继续努力,为雷达干涉理论及技术的进一步发展 with 完善做出更大的贡献!



二〇一二年三月八日于武汉

前 言

由地表形变所引发的相关地质灾害是国内外普遍关注的问题之一。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存环境的破坏和生命财产的损失,这包括诸如地震、火山、地面沉降、滑坡、泥石流等地质灾害。由于我国地形地貌复杂,降雨时空分布不均匀,人类活动(如地下水、油气及矿产资源的过度开采等)不断加剧,我国已成为世界上地质灾害频繁、危害严重的国家之一。开展形变监测理论与方法研究对于人居环境保护及区域可持续发展具有重要的现实意义。

长期以来,诸多学者一直在探求地形测绘及各种地球表面形变监测和反演的有效技术与方法。20世纪70年代发展起来的卫星合成孔径雷达干涉(InSAR)是一种极具应用潜力的微波遥感技术,可应用于地形三维重建、制图、地表变化检测以及区域地表形变监测。特别地,InSAR是迄今为止独一无二的基于面观测的形变监测手段,具有空间分辨率高、形变敏感度高、覆盖范围大、几乎不受云雨天气制约等突出的技术优势,已在研究地震形变、火山运动、冰川漂移、城市沉降、山体滑坡以及长大线性工程形变方面表现出很好的应用前景。

然而,常规InSAR应用于区域地表形变(特别是缓慢累积形变)的监测却受到一些不利因素的影响,特别是时空失相关和大气延迟问题,因而InSAR的应用推广受到了制约。近年来,卫星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率方向发展,如德国TerraSAR-X、意大利COSMO-SkyMed、加拿大RADAR-SAT-2及日本ALOS PALSAR均已发射升空,它们可提供空间分辨率达1~10 m的SAR影像,这为雷达干涉理论的进一步发展及其在形变监测方面的应用扩展提供了有利的条件。为了减弱或克服时空失相关和大气延迟因素对区域形变信息提取的负面影响,有关雷达干涉的研究重心已经转移到基于SAR影像时间序列探测形变时空演变的思路上来,已提出的改进方案包括永久散射体(PS)方法、短基线子集(SBAS)方法以及其他扩展方法,这些研究进展为提高InSAR形变监测的精度和可靠性奠定了很好的基础。

永久散射体雷达干涉(PSI)被认为是形变时空演变监测与分析最为有效的技术手段之一。PS是指成像区域内具有稳定散射特性的目标,其雷达后向散射特性不易随时间变化而发生改变,例如,房屋、桥梁、铁路道床、混凝土堤坝、岩石等硬目标均可被认定为PS,它们均属强散射点目标,故它们受时间和基线失相关的影响较小,从而使相位观测量保持高信噪比。PSI的关键思想是:使用在某一时间段内对同一地区所获取的多幅SAR影像(SAR影像时间序列),并使用统计分析方法探测出成像区域内时间相关性较高的目标(PS),然后基于这些PS目标的相位时间序列进行建模与分析,从而分离形变与大气延迟信息,这种建模与处理策略对减弱或克服时空失相关和大气延迟的影响非常有利。十多年来,我们围绕InSAR数学与随机模型及关键技术、永久散射体雷达干涉理论与地表形变监测关键技术等方面开展了系统而深入的研究,提出了PS网络化时序差分雷达干涉

的数学模型与数据处理方法,开发了一套数据处理软件,并已成功应用于5·12汶川震区和台湾等地的地壳形变监测与反演,以及美国菲尼克斯、香港、天津、上海和京沪等高速铁路的沉降监测。

本书是在总结国内外相关研究成果和作者多年从事InSAR及PSI研究工作的基础上撰写完成的。全书共分十一章,第一章概括性地描述了InSAR及其应用局限性和PSI的总体情况,第二章对InSAR理论模型进行了介绍与分析,第三章阐述了InSAR数据处理策略及主要过程,第四章对PSI理论及应用进行了概括性介绍,第五章对PSI影像配准的思路与方法进行了讨论,第六章介绍了PS探测的各种算法与实验结果,第七章阐述了PS网络模型及线性参数求解的方法,第八章介绍了大气与非线性形变时间序列分离的理论与方法,第九章给出了PSI应用于区域地表形变探测的实例及验证结果,作为扩展部分,第十章介绍了基于多卫星平台PSI提取三维形变信息的模型与方法,第十一章陈述了一种基于高分辨率卫星SAR影像处理的超短基线TCPIInSAR算法及其应用于区域沉降探测的实验结果。

本书的出版得益于多个基金项目的资助,这包括973计划课题(2012CB719901)、国家自然科学基金(40374003,40774004,41074005,41010304035,41072220)、教育部“新世纪优秀人才”支持计划(NCET-08-0822)、铁道部科技研究开发计划(2008G031-5)以及中央高校基本科研业务费专项资金(SWJTU11CX139,SWJTU10ZT02,SWJTU11ZT13)。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与指导,他们是武汉大学李德仁院士、刘经南院士、张祖勋院士、朱庆教授、李陶博士、张过博士,中国科学院测量与地球物理研究所的许厚泽院士,香港理工大学的丁晓利教授,香港中文大学的林晖教授,中南大学的李志伟教授,西南交通大学的刘文熙教授、李志林教授等,在此,作者对这些专家的支持表示衷心的感谢。此外,课题组的博士研究生张瑞、贾洪果、于冰、李涛、聂运菊和程海琴为文稿的整理和部分图表的绘制做了大量的工作,科学出版社的冯铂编辑为本书的出版付出了很大努力,在此一并深表谢意。

目前,雷达干涉理论与技术仍处于快速发展时期,国内外的相关研究工作正如火如荼地开展。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,对他们的研究与应用工作的开展起到帮助作用,为推动雷达干涉理论的进一步研究与技术发展产生积极的影响。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,书中难免存在错误和不妥之处,敬请读者不吝赐教。

刘国祥 陈强 罗小军 蔡国林
二〇一二年三月六日于成都

目 录

丛书出版说明

序

前言

第一章 合成孔径雷达干涉概论	(1)
1.1 InSAR 介绍	(1)
1.2 InSAR 发展简要历程	(5)
1.3 DInSAR 应用于形变探测的局限性	(10)
1.3.1 时间失相关	(10)
1.3.2 基线失相关	(11)
1.3.3 大气延迟	(12)
1.4 永久散射体雷达干涉 (PSI)	(12)
1.5 本书的组织结构	(16)
参考文献	(16)
第二章 InSAR 理论模型及分析	(23)
2.1 引言	(23)
2.2 干涉几何及相位分量	(23)
2.2.1 参考面相位构成分析	(25)
2.2.2 地形相位分析	(26)
2.2.3 形变相位分析	(28)
2.3 干涉相关性	(29)
2.4 InSAR 三维重建	(32)
2.5 InSAR 地表形变探测	(33)
2.6 InSAR 测量敏感度分析	(35)
2.6.1 InSAR 干涉相位对地形的敏感度	(35)
2.6.2 DInSAR 对地表形变的敏感度	(36)
参考文献	(37)
第三章 InSAR 数据处理	(41)
3.1 引言	(41)
3.2 影像配准	(42)
3.3 干涉图滤波	(42)
3.3.1 前置 SAR 影像滤波	(43)
3.3.2 后置干涉图滤波	(44)
3.4 参考面/地形相位去除	(46)

3.5 相位解缠 (46)

3.5.1 枝切法 (46)

3.5.2 最小二乘法 (47)

3.5.3 网络流算法 (48)

3.6 地理编码 (49)

参考文献 (50)

第四章 PSI 理论基础 (52)

4.1 引言 (52)

4.2 SAR 影像时间序列及 PS 概念 (53)

4.2.1 SAR 影像时间序列 (53)

4.2.2 永久散射体 (54)

4.3 SAR 干涉对组合模式 (61)

4.3.1 公共主影像干涉对组合模式 (61)

4.3.2 小基线集干涉对组合模式 (62)

4.3.3 自由组合模式 (63)

4.4 PSI 信号分解基本理论与方法 (63)

4.4.1 PS 网络线性形变的提取 (65)

4.4.2 PS 非线性信号的分解 (65)

4.5 PSI 技术特点 (67)

参考文献 (67)

第五章 SAR 影像配准 (70)

5.1 引言 (70)

5.2 SAR 影像粗配准 (71)

5.2.1 同名点选取方法 (71)

5.2.2 基于影像平移的 SAR 复数影像粗配准 (75)

5.3 SAR 影像精配准 (76)

5.4 配准质量的评价指标 (79)

5.5 配准方法的比较 (79)

5.5.1 实验方案 (80)

5.5.2 配准实验分析 (81)

5.6 应用实例 (84)

5.7 小结 (85)

参考文献 (86)

第六章 永久散射体的识别 (88)

6.1 引言 (88)

6.2 时序 SAR 影像的辐射校正 (89)

6.2.1 基于校正因子的辐射校正法 (89)

6.2.2 相对辐射校正法 (89)

6.3 PS探测理论与方法	(90)
6.3.1 时序相关系数阈值法	(90)
6.3.2 相位离差阈值法	(91)
6.3.3 振幅离差指数阈值法	(93)
6.4 相干系数和振幅离差双重阈值法	(95)
6.4.1 单一相关系数阈值法识别 PS 目标	(96)
6.4.2 单一振幅离差指数阈值法识别 PS 点	(96)
6.4.3 双重阈值法串行识别 PS	(97)
6.5 振幅信息双阈值法	(99)
6.5.1 振幅阈值法探测 PSC	(99)
6.5.2 振幅离差阈值法探测 PS	(99)
6.5.3 上海陆家嘴地区 PS 探测实例分析	(100)
6.6 基于相位稳定性分析的 PS 选取	(103)
6.6.1 基于相位稳定性探测 PSC	(103)
6.6.2 基于 TerraSAR-X 影像的 PS 探测实例分析	(104)
参考文献	(109)
第七章 PS 网络模型与线性参数求解	(112)
7.1 引言	(112)
7.2 PS 相位差分模型	(112)
7.3 PS 基线连接与网络建立	(113)
7.4 PS 差分相位建模与参数估计	(114)
7.5 PS 网络最小二乘法平差	(117)
7.5.1 观测值函数模型	(118)
7.5.2 形变参数估计	(118)
7.6 PS 网络解算模拟实验	(119)
7.6.1 实验设计	(119)
7.6.2 系统参数	(120)
7.6.3 仿真数据	(121)
7.6.4 PS 网络基线解算与统计分析	(123)
7.6.5 PS 形变和高程测量精度分析	(124)
7.6.6 PS 测量精度与相位标准差的关系	(126)
7.6.7 实验结论	(128)
参考文献	(129)
第八章 大气与非线性形变时间序列分离	(131)
8.1 引言	(131)
8.2 大气与非线性形变信号的时空特性	(131)
8.3 基于滤波技术的信号分离方法	(132)
8.3.1 干涉图大气相位估计	(132)

8.3.2 主影像大气相位估计	(132)
8.3.3 从影像大气相位估计	(133)
8.3.4 PS 非线性形变估计	(133)
8.4 基于经验模式分解的信号分离方法	(134)
8.5 信号分离实验与分析	(136)
8.5.1 基于滤波技术的信号分离实验及分析	(136)
8.5.2 基于经验模式分解的信号分离实验及分析	(137)
参考文献	(138)
第九章 PSI 地表形变探测应用实例	(140)
9.1 引言	(140)
9.2 基于 ERS-1/2 SAR 影像的美国菲尼克斯市沉降探测	(141)
9.2.1 研究区域及实验数据	(141)
9.2.2 PS 沉降解算结果与分析	(143)
9.2.3 不同 PS 解算方式的对比与分析	(146)
9.3 基于 ERS-1/2 SAR 影像的上海市陆家嘴沉降探测	(147)
9.3.1 研究区域及实验数据	(147)
9.3.2 实验结果及分析	(149)
9.4 基于 TerraSAR-X 影像的上海市宝山区罗泾镇沉降探测与验证	(153)
9.4.1 研究区域及实验数据	(153)
9.4.2 PSI 沉降结果及分析	(155)
9.4.3 PSI 形变结果精度分析	(158)
9.5 基于 TerraSAR-X 影像的天津市沉降探测与分析	(159)
9.5.1 研究区域及实验数据	(159)
9.5.2 PS 目标提取	(161)
9.5.3 PSI 沉降结果及分析	(162)
9.5.4 精度评估与沉降分析	(165)
参考文献	(167)
第十章 基于多卫星平台 PSI 提取三维形变速率场	(169)
10.1 引言	(169)
10.2 基于多平台 PSI 提取三维地表形变速率场	(169)
10.2.1 使用单平台 PSI 提取 LOS 向形变速率场	(170)
10.2.2 三维形变速率的恢复与重建	(172)
10.3 研究区域与实验数据	(175)
10.4 实验结果与分析	(177)
10.4.1 PS 分布及 PSI 形变速率场	(177)
10.4.2 三维形变速率场及分析	(179)
10.5 小结	(181)
参考文献	(182)

第十一章 超短基线 TCPIInSAR 及其应用 (184)

11.1 引言 (184)

11.2 超短基线 TCPIInSAR 建模及参数解算 (185)

11.2.1 超短基线干涉对的选择 (185)

11.2.2 TCP 探测及构网 (187)

11.2.3 TCP 相位建模及形变参数估计 (187)

11.3 研究区域与实验数据 (189)

11.4 实验结果与分析 (191)

11.4.1 TCP 目标分布及分析 (191)

11.4.2 沉降监测结果及分析 (194)

11.4.3 结果验证与分析 (196)

11.5 小结 (198)

参考文献 (198)

第一章 合成孔径雷达干涉概论

1.1 InSAR 介绍

合成孔径雷达干涉 (interferometric synthetic aperture radar, InSAR) 是近三十年发展起来的极具潜力的定量微波遥感新技术, 它是合成孔径雷达成像技术与电磁波干涉技术融合的结晶, 国际上一些学者也将 InSAR 归属于空间大地测量新技术^[1-6]。起初, InSAR 主要应用于地表三维重建、制图及地表变化检测, 后来很快被扩展为差分雷达干涉技术 (Differential InSAR, DInSAR) 并应用于测量地表微小形变和地球物理模型反演。DInSAR 已在研究地震形变、火山运动、冰川漂移、城市沉降以及山体滑坡等方面表现出极好的应用前景^[2, 4-6]。目前, 欧美国家对雷达干涉技术竞相展开研究, 我国许多大专院校和科研院所也已开始对这一技术展开深入的研究^[7-25], 雷达干涉技术已引起国内地学界同仁们的极大兴趣和广泛关注。

合成孔径雷达干涉利用飞机、航天飞机或人造卫星所搭载的合成孔径雷达 (SAR) 对同一地区所获取的至少两幅 SAR 影像进行分析^[4, 5, 14-19]。InSAR 系统可分为两类, 即双天线干涉系统和单天线重复轨道干涉系统^[4, 9-11, 14]。一般情况下, 机载或航天飞机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, 垂直于平台飞行方向) 同时采集信号, 其中仅一个传感器主动发射一定频率的微波信号, 而地面回波信号被两个传感器接收, 可获得不同视角且覆盖同一区域的两个雷达影像, 这种干涉配置就是双天线干涉系统。星载系统一般使用单天线采集信号, 如图 1-1 “空中部分” 所示, 对某局部区域, 一次卫星通过只能获得一幅雷达影像, 卫星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, 这种干涉配置就是单天线重复轨道干涉系统。如图 1-1 “地面部分” 所示, 机载/星载雷达系统基于侧视成像几何获取初数据, 然后须经计算机聚焦和滤波处理形成 SAR 影像, 也就是说, 合成孔径的概念是通过数据处理来实现的^[15]。SAR 影像产品一般附带有有关飞机/卫星的姿态数据 (即空间位置和速率矢量) 和传感器系统参数。

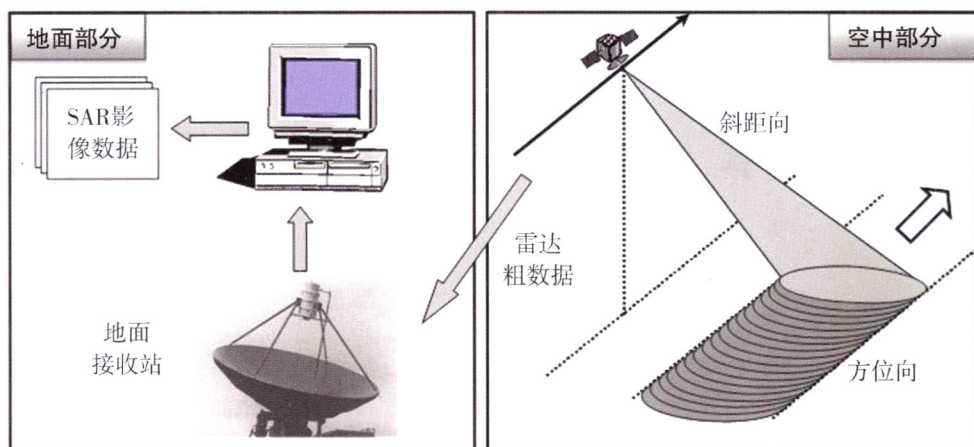


图 1-1 SAR 影像获取系统（引自文献 [14]）

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 SAR 影像对应像素的相位值相减可得到一个相位差图，即所谓的干涉相位图（Interferogram）^[1-11]。这些相位信息是参考椭球面、地形起伏、大气延迟和地表形变等因素贡献和的体现^[4-13, 16]。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。理论上来说，利用干涉相位图和搭载平台的姿态数据可以提取地表三维信息，利用干涉相关性分析可以提取地表变化信息。从地表形变探测来说（见图 1-3），借助 DInSAR 方法可以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。地表变化信息可以通过干涉相关分析来提取，而大气信息可以通过相位信息分离来提取。

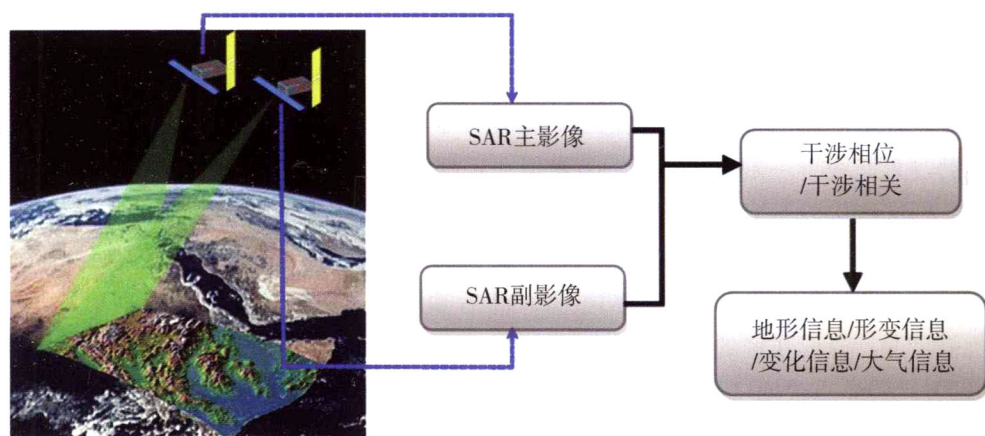


图 1-2 InSAR 信息提取示意图

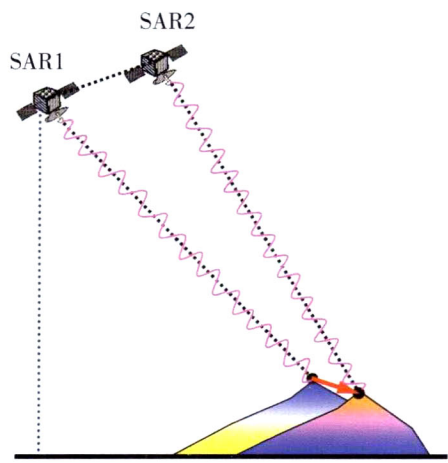


图 1-3 DInSAR 地表形变探测示意图

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, 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 (Light Detection And Ranging, LiDAR) 技术相比, InSAR 在多云雾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/m
地面测量	局部、大比例尺测图范围	0.01~0.1
摄影测量 (航空)	区域	0.1~1
LiDAR (航空)	区域	0.5~2
InSAR	区域到全球范围	5~20
SAR 阴影测图	区域到全球范围	22 (坡度 $\leq 2^{\circ}$ 时)
SAR 立体测图	区域	10~100

与常规形变大地测量监测技术 (如精密水准和 GPS) 相比, DInSAR 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, 表 1-2 列出了 DInSAR 与精密水准及 GPS 技术的对比情况。与基于点观测的大地测量技术相比, DInSAR 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 GPS 和精密水准测量等, 因此, DInSAR 为地球物理研究和形变灾害监测提供了一种经济有效的空间对地观测新途径。

表 1-2 DInSAR 与精密水准及 GPS 技术的对比

测量方式	精密水准	GPS	DInSAR
空间覆盖	离散点	离散点	面覆盖
精度	毫米	毫米	毫米、亚毫米
周期、速率	长、慢	较短、快	短、快
作业条件	根据天气	全天候	全天候
成本	高	较高	低

基于微波的 SAR 主动成像几乎不受云雨和白昼的限制，而基于可见光的被动式遥感成像受这两个自然因素的制约较严重。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，为了克服这些制约，对基于 SAR 成像的 InSAR 技术的开发成为研究与应用的热点^[15, 16]。大量的已有研究表明^[1-13, 19-25]，InSAR 可以应用于地球表面各种环境和资源的观测与研究，图 1-4 显示了 InSAR 可以应用于地形测量、大气研究、形变监测及地表变化监测。特别地，InSAR 技术具有高精度、高空间分辨率、几乎不受云雨天气制约和空中遥感等突出的技术优势，可为地球环境变化和地质灾害监测提供有利的技术支持^[14, 16]。

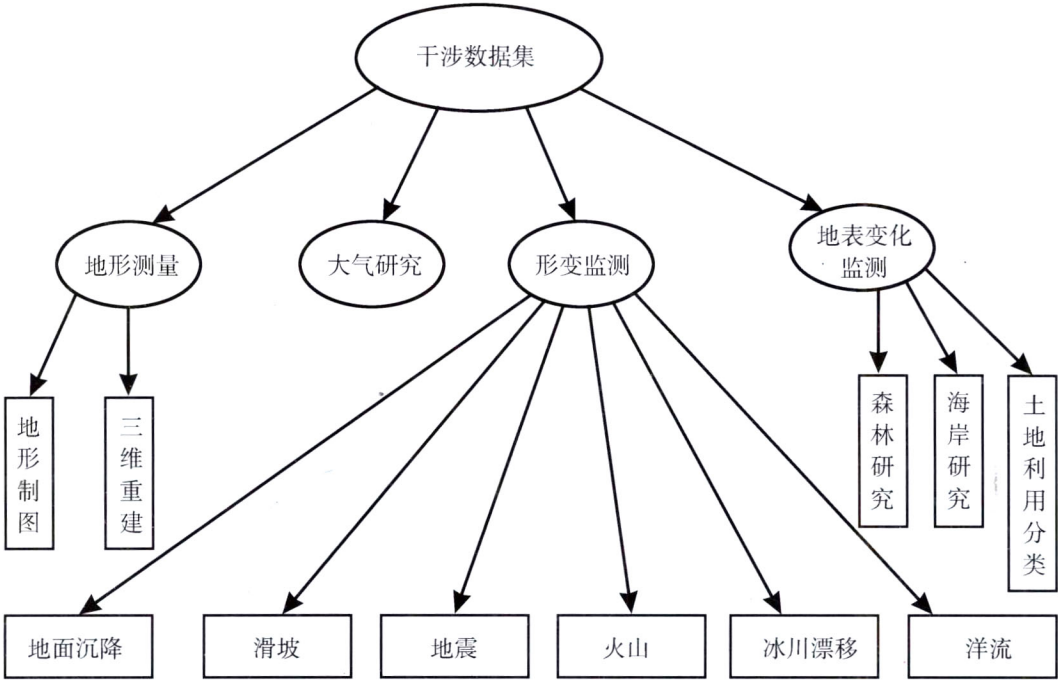


图 1-4 InSAR 应用领域

InSAR 的应用较为广泛，本书将主要关注 InSAR 理论与算法的扩展及其应用于区域地表形变的监测。由地表形变所引发的相关地质灾害已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、地面沉降、滑坡和泥石流等地质灾害^[2, 4-6]。由于我国地形地貌复杂，降雨时空分布不均匀，人类活动（如地下水及矿产资源的过度开发等）不断加