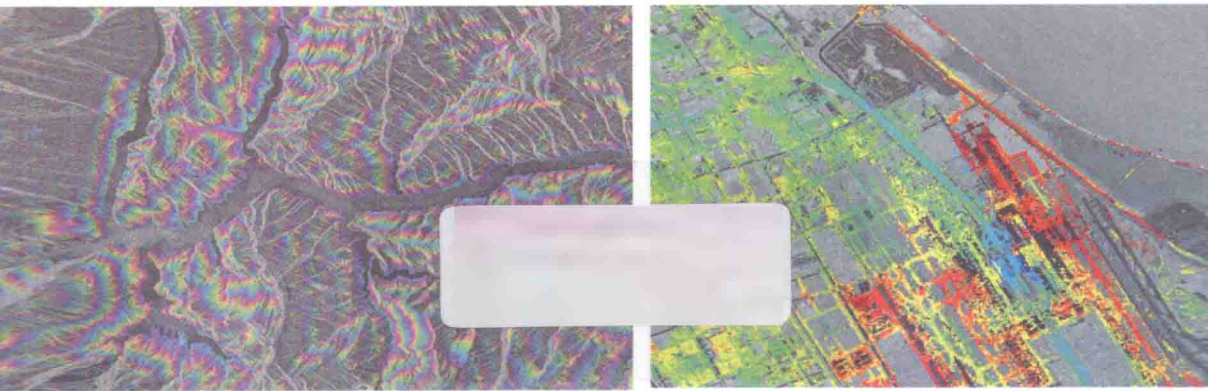




# 时间序列InSAR技术与应用

廖明生 王 腾 著



科学出版社

# 时间序列 InSAR 技术与应用

廖明生 王 腾 著

科学出版社

北 京

## 内 容 简 介

本书结合作者多年来从事 InSAR 研究的成果和实际经验, 兼顾基本原理和前沿发展两方面给出较为全面的介绍。首先系统论述 InSAR 的基本原理、数据处理关键技术等; 然后针对时间与空间去相关及大气效应问题, 进一步论述时间序列 InSAR 分析技术, 并将长时间序列相干点目标模型扩展至短时间序列准相干目标模型; 最后在 DEM 更新、城市地表沉降检测、滑坡监测和人工地物稳定性评估等领域给出具体的示范应用成果, 为不同应用领域的读者提供参考案例。

本书可作为高等院校、科研院所测绘、遥感、地质灾害、资源调查、地球物理和电子信息等专业研究生的专业课教材, 也可供相关专业的研究人员和工程技术人员参考阅读。

图书在版编目(CIP)数据

时间序列 InSAR 技术与应用 / 廖明生, 王腾著. —北京: 科学出版社, 2014

ISBN 978-7-03-040411-4

I. ①时… II. ①廖…②王… III. ①合成孔径雷达—干涉测量法  
IV. ①P398

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2014)第 072942 号

责任编辑: 余 丁 孙 芳 / 责任校对: 刘小梅  
责任印制: 张 倩 / 封面设计: 蓝 正

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>

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

\*

2014 年 5 月第 一 版 开本: 720 × 1000 1/16

2014 年 5 月第一次印刷 印张: 15 彩插: 10

字数: 290 000

定价: 80.00 元

(如有印装质量问题, 我社负责调换)

# 前 言

人类活动对地表的影响往往是从量变到质变的过程，许多地学现象都是长期和动态变化的。SAR作为一种工作在微波波段的相干成像系统，不仅能够提供与地物特性相关的幅度、相位、频率和极化等丰富信息，而且具备全天时、全天候数据获取能力，尤其是星载SAR系统能够长时间、大范围地对地表进行稳定、连续的观测，便于揭示出地学现象的时空变化规律。

InSAR是获取高精度地面高程信息的前沿技术之一。作为InSAR技术的延伸，D-InSAR可以用于检测地表微小形变，在地质灾害监测与预警、地球物理参数反演和公共安全等领域有着巨大的应用潜力。针对严重制约D-InSAR技术应用的时间与空间去相关问题，意大利米兰理工大学Rocca教授的研究小组在20世纪末又提出了永久散射体技术，把注意力集中在一些长时间序列SAR数据中保持高相干性的点目标上。与传统的D-InSAR方法相比，该技术对于地表形变的监测能力达到了毫米级，精度与水准测量相当。

从常规的InSAR到PS-InSAR为代表的时间序列分析，使得该项技术在理论、方法和应用等方面都向前迈进了一大步。显然，长时间序列数据中蕴含着反映地物长期变化规律的丰富信息。随着SAR系统成像能力的不断提高和SAR影像的不断积累，如何充分发掘和利用这些信息仍然是需要进一步解决的重要课题。相关领域巨大的应用潜力吸引了众多青年学者及研究生的关注和参与，也迫切需要系统论述相关方法和应用实例的教程或参考书。

本书作者之一曾经在十年前与香港中文大学林珪教授合著《雷达干涉测量学——原理与信号处理基础》一书，这是一本入门性教程，侧重于InSAR技术的基本原理和方法，虽然该书受到许多读者的喜爱，但时至今日已经很难反映出相关领域新的发展。此后，作者继续从事相关的研究工作，并密切关注和跟踪InSAR技术的前沿发展。特别是于2004年参加我国科学技术部与欧洲空间局对地观察领域国际合作“龙计划”以来，通过承担多个国家自然科学基金项目、国家863项目和973项目等，在时间序列InSAR数据分析方向持续消化、拓展和积累。期间与首创PS-InSAR技术的Rocca教授及其团队合作，建立了密切的合作关系，受益匪浅。因此，在众多热心读者和朋友的鼓励下，力图延续前书的风格，与另一青年学者合作撰写了本书，希望不会让新、老读者失望。

本书侧重于论述时间序列InSAR分析的最新进展、理论和方法，同时还给出了

大量的实际案例以展示这些理论和方法的应用效果和应用条件,供读者在实际工作中参考。为便于阅读和理解本书的内容,设置了1.5节——本书内容安排及阅读建议,希望能够对读者有所帮助。

本书主要取材于作者近几年来完成的研究工作,主要内容来源于课题的研究报告,部分内容来源于所指导的研究生毕业论文,其中有些内容已在国内外有关的刊物上发表。除了作者之外,还有许多同事和研究生参与这些研究工作,对于本书的形成也有重要贡献。在撰写过程中,作者还参考了国内外的许多著作和学术论文。在书稿的整理和修改过程中,研究生魏恋欢、胡燮、田馨和杨梦诗等同学做了大量文字整理和图表绘制等工作。在此一并表示衷心感谢。

本书涉及的研究工作得到了国家自然科学基金项目(编号:40721001,41021061,60472039)、国家973项目(编号:2013CB733205,2007CB714400)和国家863项目(编号:2006AA12Z123)等的项目资助。在上海实验区的工作得到了上海市地质调查研究院的大力支持和帮助。

InSAR技术仍然处于不断发展之中,作者尽力将近几年来的研究成果进行了梳理。但是,局限于作者的水平,书中不足之处在所难免,敬请各位专家和读者批评指正。

作者

2013年12日

# 目 录

## 前言

<b>第 1 章 绪论</b> .....	1
1.1 引言 .....	1
1.2 星载 SAR 系统发展概述 .....	3
1.3 InSAR/D-InSAR 技术研究概况 .....	6
1.4 时间序列 InSAR 技术及其研究现状 .....	8
1.5 本书内容安排及阅读建议 .....	12
1.5.1 内容安排和阅读建议 .....	12
1.5.2 进一步研读的参考书目和相关的信息 .....	12
参考文献 .....	14
<b>第 2 章 InSAR/D-InSAR 基本原理</b> .....	19
2.1 SAR 原理和成像特点 .....	19
2.1.1 SAR 成像原理 .....	19
2.1.2 典型地物散射机理及 SAR 相干成像特性 .....	22
2.1.3 SAR 成像几何特性 .....	24
2.2 InSAR/D-InSAR 技术的基本原理 .....	26
2.2.1 InSAR 几何原理 .....	26
2.2.2 D-InSAR 几何原理 .....	28
2.2.3 InSAR 系统中的一些重要参数 .....	28
2.3 干涉图生成 .....	33
2.3.1 前置滤波 .....	34
2.3.2 影像配准 .....	34
2.3.3 干涉图和相干图的生成 .....	35
2.3.4 后置滤波 .....	36
2.4 相位解缠 .....	36
2.4.1 相位解缠问题的提出及基本解决思路 .....	36
2.4.2 路径积分和枝切法 .....	38
2.4.3 最小范数框架和最小二乘法相位解缠 .....	42
2.4.4 相位解缠最优化问题模型及统计费用网络流算法 .....	43

2.5 地表几何信息提取	45
2.5.1 相位到高程的转化	45
2.5.2 形变信息提取	49
2.5.3 地理编码	49
参考文献	52
<b>第3章 干涉相位与相干性分析</b>	<b>55</b>
3.1 InSAR/D-InSAR 技术误差来源及模型	55
3.1.1 卫星参数误差	55
3.1.2 干涉相位误差	57
3.2 相干性及相干分解分析	58
3.2.1 相干性分析	59
3.2.2 相干分解	60
3.2.3 相干分解结果	62
3.3 大气效应及其相位特性	67
3.3.1 大气延迟信号分析	67
3.3.2 大气信号的分布特性	70
3.3.3 大气延迟对重复轨道 InSAR 测量的影响	73
参考文献	74
<b>第4章 时间序列 InSAR 分析方法</b>	<b>77</b>
4.1 时间序列 InSAR 分析基本原理	77
4.2 PS-InSAR 方法	78
4.2.1 PS-InSAR 技术基本原理	79
4.2.2 PS-InSAR 技术流程	81
4.3 SBAS 方法	83
4.3.1 SBAS 方法的基本原理	84
4.3.2 SBAS 方法技术流程	84
4.4 StaMPS 方法	86
参考文献	88
<b>第5章 短时间序列 InSAR 小数据集分析方法</b>	<b>90</b>
5.1 子孔径法提取相干点目标	90
5.1.1 目标的散射机制和类别	91
5.1.2 基于振幅信息的振幅离差点目标提取方法	92
5.1.3 基于相干信息的时间相干系数点目标提取方法	93
5.1.4 基于振幅和相位信息的子视相关点目标提取方法	95
5.1.5 相干点目标提取方法特点和性能的比较与分析	96

5.2 基于时序的干涉数学模型	99
5.2.1 函数模型	99
5.2.2 随机模型	100
5.3 三维时空解缠	102
5.3.1 基于时间维的相位解缠	102
5.3.2 基于空间维的相位解缠	103
5.3.3 结果精化处理	105
5.4 小数据集时间序列 InSAR 处理流程	106
5.5 基于 ERS 数据的地表形变提取实验	111
5.5.1 实验区选择及形成干涉组合	111
5.5.2 实验结果	112
5.5.3 实验结果解译和验证	114
参考文献	117
<b>第 6 章 基于最优干涉组合准相干目标分析方法</b>	<b>119</b>
6.1 相干目标和准相干目标	119
6.2 最优干涉组合	122
6.3 准相干目标分析方法	123
6.4 QPS 技术与 StaMPS 技术的比较及验证	125
参考文献	129
<b>第 7 章 地形信息提取及 DEM 更新</b>	<b>131</b>
7.1 InSAR 技术在 DEM 更新中的应用	131
7.1.1 InSAR 技术获取 DEM 的精度限制因素	131
7.1.2 干涉图线性相位误差模型	133
7.2 外部数据辅助下的 InSAR DEM 生成算法	135
7.2.1 系统性相位误差消除	136
7.2.2 高程粗差点滤除	138
7.3 DEM 生成结果与分析	139
7.3.1 张北实验区	140
7.3.2 三峡实验区	143
7.4 新一代星载 InSAR 的优势	146
7.5 高分辨率 SAR 数据在地形更新中的应用实例	149
7.5.1 实验区和数据	149
7.5.2 大气相位的估计结果	151
7.5.3 InSAR DEM 精度评价	154



参考文献	157
<b>第 8 章 上海地区沉降监测与评估</b>	<b>159</b>
8.1 上海地区地表沉降概况	159
8.1.1 地质地貌背景	159
8.1.2 上海地面沉降观测概述	160
8.1.3 收集的实验数据介绍	164
8.2 基于时间序列 InSAR 分析的上海地区沉降速率监测结果	166
8.2.1 上海市 1992~2000 年 ERS-1/2 数据地表沉降量测结果	166
8.2.2 上海市小数据集 Envisat 数据形变量测结果	169
8.2.3 上海市 2008~2010 年 TerraSAR-X 数据地表沉降量测结果	175
8.3 上海市地表沉降时空分布特点及原因分析	177
8.3.1 上海市沉降原因概述	178
8.3.2 实验区沉降原因分析	181
参考文献	187
<b>第 9 章 三峡库区地表形变及滑坡监测</b>	<b>188</b>
9.1 三峡工程和库区概况	188
9.1.1 三峡工程和库区概况	188
9.1.2 本章采用的 SAR 数据	190
9.2 基于 Envisat ASAR 数据的巴东地区形变监测	191
9.2.1 巴东地区介绍	191
9.2.2 数据处理与分析	192
9.3 基于 TerraSAR-X 数据的秭归地区滑坡体监测	194
9.3.1 秭归实验区介绍	194
9.3.2 数据处理与分析	194
9.4 不同波段 InSAR 数据比较与分析	198
参考文献	201
<b>第 10 章 大型人工地物变形监测</b>	<b>203</b>
10.1 三峡大坝稳定性监测	203
10.1.1 概述	203
10.1.2 研究区域和研究数据	205
10.1.3 数据处理及坝体形变量测结果	207
10.1.4 小结	213
10.2 上海地区海塘形变监测	215
10.2.1 概述	215

---

10.2.2	研究区域及 Envisat ASAR 数据集	216
10.2.3	海塘监测结果	217
10.2.4	结果分析与讨论	222
10.3	高分辨率数据在人工地物形变监测中的应用	223
10.3.1	概述	223
10.3.2	实验数据和实验区选取	224
10.3.3	结果分析	224
10.3.4	小结	227
	参考文献	228

彩插

# 第1章 绪 论

合成孔径雷达(synthetic aperture radar, SAR)传感器获取数据不受气象条件的影响,能够长时间、大范围地对地表进行稳定、连续的观测,便于揭示地质现象的时空演变规律,在许多领域有着巨大的应用潜力。本章首先阐述本书的学科背景;然后简要回顾 SAR 系统、SAR 干涉测量(Interferometric SAR, InSAR)技术/差分 InSAR(differential InSAR, D-InSAR)技术及时间序列 InSAR 技术的发展,并对当前的研究及应用现状进行系统的评述,同时融入作者对这一技术的认识和展望;最后概述本书的内容安排。

## 1.1 引 言

对地观测系统是由陆地卫星、海洋卫星、气象卫星等系列遥感卫星及地面各类地球观测数据收集平台等所组成的系统<sup>[1, 2]</sup>。由此发展而来的对地观测技术集成了计算机、传感器、通信等新兴科技,能够对地表物理和几何属性进行观察和量测,对认识和研究我们所生活的地球起到了十分重要的作用,是20世纪地球科学进步的一个重要标志<sup>[3-5]</sup>。根据《国家中长期科学和技术发展规划纲要(2006~2020年)》<sup>[6]</sup>战略部署,高分辨率对地观测系统重大专项(简称高分专项)列为国家重大科技专项之一,可见对地观测技术在我国中长期战略部署中的重要作用。

作为多种对地观测手段中的一种, SAR 是一种工作在微波波段的相干遥感成像系统,能够提供与地物散射特性相关的幅度、相位、频率和极化等丰富信息<sup>[7-11]</sup>。特别是随之发展而来的 InSAR 技术,使我们能够精确测量地表目标的三维空间位置及雷达视线向微小形变<sup>[12-16]</sup>。这些特点使得 SAR 影像成为一种既能感知地表对微波的后向散射特性,又能精确量测地形及其变化的独特对地观测数据来源。此外,由于 SAR 系统获取数据不受气象条件的影响,能够长时间、大范围地对地表进行稳定、连续的观测,便于揭示地质现象的时空变化规律,在地形量测、灾害监测与预警、地球物理参数反演和公共安全等领域有着巨大的应用潜力<sup>[17-20]</sup>。

航天飞机雷达测图计划(Shuttle Radar Topography Mission, SRTM)充分体现了 SAR 系统及 InSAR 技术在获取地表几何信息方面的强大能力。2000年初,“奋进号”航天飞机搭载的 SAR 传感器在 11 天内获取了覆盖全球陆地表面 80% 以上的地形数据,引起了地球科学界的轰动。正是由于 SRTM 数字高程模型(digital elevation model, DEM)数据的获取及公开,数字地球等崭新的地理信息概念才能够得以实

现。目前, SRTM DEM 仍然是绝大部分地球科学研究的基础地理信息数据<sup>[21-23]</sup>。当前, 新一代高分辨率 SAR 卫星的地面分辨率已经达到了米级, 如何在原有低分辨率 DEM 的基础上, 利用高分辨率 SAR 数据进行地形数据的更新已成为 InSAR 技术应用的一个新热点<sup>[24,25]</sup>。作为 InSAR 技术的延伸, D-InSAR 技术通过量测回波信号相位的延迟获取地表微小形变, 是 SAR 传感器的另一独特优势<sup>[16]</sup>。1993 年, Massonnet 和 Rossi<sup>[26]</sup>利用美国加利福尼亚州 Landers 地震前后两幅 SAR 影像获取了差分干涉图, 干涉图中的条纹以前所未有的高空间分辨率表现了这次地震所造成的地表形变细节。Nature 杂志以封面报道的形式将该干涉图命名为“image of an earthquake”。这一轰动性成果将地球物理参数反演时可以获取的地表形变量测空间分辨率提高了几个数量级, 从而使 D-InSAR 技术获得了地球科学界的广泛关注。此后, 不仅在地震学领域, D-InSAR 技术还在城市沉降监测、火山构造反演、滑坡监测等方面得到了全面应用, 并在理论与技术上不断成熟<sup>[27-44]</sup>。

由于某些地物目标在一定时间后因物理属性的变化而失去相干性, 此时, SAR 回波信号中的差分相位无法准确反映目标在雷达视线向的形变<sup>[34]</sup>。另一方面, 大气对微波信号的延迟效应也限制了 D-InSAR 技术对形变的量测精度<sup>[35]</sup>。随着 D-InSAR 技术应用的不断拓展, 针对上述问题, 意大利米兰理工大学的研究小组于 2000 年前后发表了一系列文章, 首次提出永久散射体(permanent scatterer, PS)的概念<sup>[36-38]</sup>, 并由此开辟了时间序列 InSAR 分析这一崭新领域。时间序列 InSAR 技术利用多景覆盖同一地区的 SAR 影像, 通过分析地面目标回波信号的相位序列, 判别并提取长时间保持稳定的点目标, 然后基于这些点目标构成的稀疏格网消除大气相位的影响, 并最终分离出形变相位序列。与传统的 D-InSAR 方法相比, 该技术可达毫米级的形变监测能力<sup>[39,40]</sup>。2005 年美国新奥尔良飓风灾害后, Dixon 等<sup>[41]</sup>利用 PS-InSAR 分析技术开展了一次示范性应用, 对新奥尔良周边堤坝的稳定性进行了监测, 发现许多堤坝在飓风发生前已经出现了严重的形变, 另外, 新奥尔良城内的许多沉降漏斗在堤坝垮塌后成为水灾重灾区。这一应用成果是时间序列 InSAR 技术在灾害预警方向的一次开拓性尝试。

近年来, 由地表形变引发的地质灾害也已经成为我国一大热点问题, 其主要表现为以断层活动、地震为标志的现代地壳构造活动, 以地下水开采为主的地面沉降、地面塌陷, 以矿物开采引起的地面沉降, 以及由于水土流失造成的滑坡、泥石流等, 这些地质灾害对社会的发展和人民的生产、生活都产生了重大影响。地表形变监测都是其中亟待解决的重要课题之一。随着相关研究的不断深入, 有关地表形变的量测手段和方法被研究人员相继提出, 而如何利用时间序列 InSAR 数据中丰富的信息格外引人注目。长时间序列 InSAR 数据蕴含了反映地物长期变化规律的丰富信息。随着 SAR 系统成像能力的不断提高和 SAR 影像数目的不断积累, 如何充分发掘和利用这些信息成为迫切需要解决的问题, 也是本书写作的出

发点。作者在2005年启动的中欧合作“龙计划”框架下,与意大利米兰理工大学合作,首次成功利用时间序列欧洲资源卫星 SAR 数据获取了上海地区1992~2000年的地表沉降速率场,并将结果与当地水准数据进行了交叉验证,精度可达毫米级<sup>[42]</sup>。这一技术得到了上海沉降监测部门的高度肯定,证明了时间序列 InSAR 技术在城市沉降监测方面已达到工程化应用水平,并有可能在全国逐步推广。随后,在针对三峡工程及其周边困难地区的形变监测研究中,我们进一步拓展了传统 PS-InSAR 技术的应用范围,使之适用于人工地物较少的非城市地区,并在大坝形变及滑坡监测领域取得了可喜的成果<sup>[43~47]</sup>。

从2000年以来,时间序列 InSAR 分析技术理论不断完善,近期研究成果也证明了其在地表高程和形变量测方面的精确性及有效性。但是,许多特定的需求仍不断推动着这一技术继续向前发展,如河堤海堤结构形变监测、铁路高速公路路基沉降监测、微小震间形变量测、大型建筑物不规则形变量测等。对我国而言,自20世纪末,已有超过95个城市存在地面沉降现象,该现象甚至影响到了全国高铁网络的稳定运行。同时,中国还是一个滑坡、泥石流等地质灾害频发的国家,拥有世界上最多的水利工程,每一个大坝及其周边区域均为需要进行重复形变监测的重点区域。对于上述任务而言,时间序列 InSAR 技术无疑是传统形变量测手段的有力补充。我们相信,时间序列 InSAR 技术在我国将具有更加广阔的应用前景,并应得到更大程度的重视。基于在 InSAR 领域十余年来的技术积累和研究经验,我们期望能通过本书的写作,为地球科学研究提供一种新的对地观测技术途径,并进一步推动时间序列 InSAR 技术在我国国情监测和地质灾害预警等领域的深入应用。

## 1.2 星载 SAR 系统发展概述

1978年6月28日,美国宇航局(NASA)发射了世界上第一颗搭载 SAR 传感器进行海洋监测的海洋卫星(Seasat),开创了星载 SAR 研究的历史。该卫星搭载的 SAR 系统工作波段为 L 波段,固定入射角为 $22^{\circ}$ ,采用水平(HH)极化方式,主要用于海洋和海冰观测。Seasat SAR 第一次获取了海洋和陆地的高分辨率雷达图像,尽管只运行了105天,但其在轨期间获取了覆盖地表近 $100\text{万 km}^2$ 的 SAR 数据,这些数据被广泛应用于冰川、地球物理等研究领域,取得了许多有意义的研究成果。

随后, NASA 于1981年11月、1984年10月和1994年4月相继发射了航天飞机成像雷达 SIR-A、SIR-B 和 SIR-C/X-SAR。其中, SIR-C 是 SIR 系列中最具代表性的 SAR 系统,其具有多波段、多极化成像能力,同时还具有重复轨道干涉测量能力。在此基础上, NASA 于2000年2月开展了 SRTM 计划,通过装载在“奋进号”航天飞机上的双天线干涉成像雷达系统222小时23分钟的连续工作,完成了对覆盖地球

陆地南北纬 60° 之间区域的地形测绘, 获取了 30m 分辨率的高精度地形数据, 这些数据广泛应用于军事、民用、科研等领域。1988年12月, 美国发射“长曲棍球”(Lacrosse)军用 SAR 卫星, 其地面分辨率高达 1m, 能够对地面目标进行实时监测, 该系统在海湾战争中起到了重要作用。上述 SAR 系统虽然取得了许多应用成果, 但相对而言, 在轨时间都较短, 无法形成对地的连续观测, 所以获取的成果多在提取地形信息或目标识别上。D-InSAR 技术和时间序列 InSAR 技术的真正发展主要得益于 20 世纪 90 年代后发射升空的星载 SAR 系统(图 1.1)。

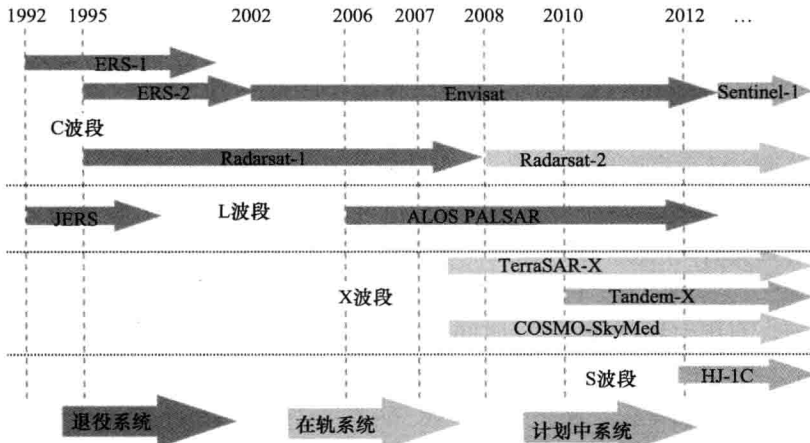


图 1.1 当前及未来主要 SAR 传感器时间分布图

1991年7月, 由德国、英国、法国、意大利等12个成员国组成的欧洲空间局(ESA)发射了欧洲遥感卫星 ERS-1 (European Resource Satellite-1)。ERS-1搭载了 C 波段、垂直(VV)极化的SAR系统, 该系统运行稳定, 成像质量高, 运行期间获取了大量数据, 在许多领域得到了广泛应用。1995年4月, ESA 又发射了 ERS-2 SAR, 其系统参数基本与 ERS-1 相同, 能够与 ERS-1 形成时间间隔一天的 Tandem 模式串接飞行, 实现高相干 SAR 干涉测量研究。继 ERS-1/2 之后, 2002年3月, ESA 发射了 Envisat 环境遥感卫星, 其上搭载了 C 波段高级 SAR (advanced SAR, ASAR), 该系统具有多极化、多角度、多模式成像能力, 分辨率最高可达 5m。Envisat 旨在提供长期连续、可靠的数据, 应用于自然灾害防治、环境监测等领域, 卫星在轨运行已超过十年, 提供了大量高质量的 SAR 数据。ESA 发射的 C 波段 ERS 系列卫星和 Envisat 卫星虽然都不是专门为干涉测量设计的, 但它们提供的长达二十年的数据积累极大促进了 InSAR 及时间序列 InSAR 技术的发展, 值得一提的是, 与其他商业和军事卫星不同, ERS 和 Envisat 卫星在发射一段时间后均实现了全球数据共享, 任何科研机构均可以通过 ESA 的网站免费申请数据作为研究用途, 这在一定程度上也加速了时间序列 InSAR 技术应用的推广。虽然在 2012 年 4 月, Envisat 与地面失

去了联系,但在大量的存档数据中仍然蕴含着丰富的信息,值得我们进一步去认识和发掘。

加拿大于1995年11月发射了一颗兼商业及科学实验用途的雷达卫星 Radarsat-1,其携带了 C 波段、HH 极化的 SAR 传感器,该系统具有25种不同的成像模式,能以8~100m 分辨率对50~500km 测带宽度的区域成像,为海洋观测、海冰监测、资源勘测、地质勘探及制图等领域应用研究提供了大量的数据。2007年12月,加拿大又发射了第二代雷达卫星Radarsat-2,可以为用户提供全极化方式的高分辨率星载 SAR 图像,其与 Radarsat-1拥有相同的运行轨道,并且比 Radarsat-1滞后30min,以获得高质量的双星串飞干涉数据,在地形测绘、环境监测、海洋和冰川的观测等方面都有很高的应用价值。由于加拿大的独特地理位置,Radarsat 卫星在极地测绘和冰川流速监测方面的应用最为显著。

日本于1992年2月发射了地球资源1号卫星 JERS-1 (Japanese Earth Resource Satellite),该卫星上装有光学传感器和 SAR 传感器。JERS-1 SAR 是一部 L 波段、HH 极化 SAR 系统。作为 JERS 系统的替代升级,2006年1月,日本宇航开发局发射了先进陆地观测卫星(ALOS),其携带有L波段相控阵型 SAR(PALSAR),能够提供全极化 SAR 数据,具有干涉成像能力。PALSAR 是全球第一个真正意义上的星载全极化干涉 SAR。L 波段较长的波长使得 PALSAR 发射的电磁波能够穿透植被,获取地表信息,在 C 波段和 X 波段 SAR 相干性较差的植被覆盖地区能够获得较高信噪比的干涉条纹。另外,在地表发生较大形变(如地震)时,PALSAR 获取的干涉图条纹密度要明显低于波长较短的数据,所以,更易于相位解缠和后续解译,这是 L 波段 SAR 又一独有优势。

意大利于2007年6月8日发射了首颗侦察卫星“宇宙-天空地中海”(COSMO-SkyMed),该卫星具备军民两用的雷达成像能力,其星座由四颗太阳同步轨道卫星组成,每颗卫星都搭载具有多个成像模式的 X 波段 SAR<sup>[1]</sup>。COSMO-SkyMed 不仅具备全天候、全天时的观测能力,其成像分辨率和定位精度都远高于上一代雷达遥感卫星;同时,为了满足雷达干涉测量的要求,其星座设计可实现观测时间间隔仅为20s 的串飞 Tandem 模式,以降低时间去相干和大气效应对干涉测量的影响。COSMO-SkyMed 的 SAR 传感器具有三种成像模式: Spotlight、Stripmap 和 ScanSAR。在 Spotlight 模式和 Stripmap 模式下,COSMO-SkyMed 可分别获取1m 和3m 的高分辨率影像,其观测入射角可在 20°~60° 变动,以满足不同的观测需要,并应对观测地形的变化。

TerraSAR-X 卫星是德国宇航中心(DLR)研制的新一代高分辨率多极化雷达卫星,于2007年6月15日发射,重复观测周期为11天,可以有效地提高雷达干涉数据的相干性。DLR 在2010年6月又发射了 Tandem-X 卫星,可以与 TerraSAR-X 卫星编队飞行,构成一个高分辨率、高精度的雷达干涉测量系统,将在地形测量、地表

形变监测和地震研究等领域发挥重要作用。目前(2012年), Tandem-X 地形测绘计划正在进行中,有望获取高分辨率全球地形数据,作为替代 SRTM DEM 的基础地理信息。

新一代星载 SAR 系统使影像分辨率由十几米提高到了 3m,甚至 1m,而且均在时间、空间基线控制上针对干涉成像的需要进行了优化设计,在保持目标相干性方面有很大的提高,经过一段时间的数据积累后将成为雷达遥感领域的重要数据来源。作为 ERS-1/2 和 Envisat 计划的延续,ESA 目前研发中的 Sentinel-1 系统将是全球第一个类似常规气象卫星系统的业务化运行 SAR 卫星星座,该系统将使用户得到长期、稳定、连续的雷达观测数据,推动 InSAR/时间序列 InSAR 技术的进一步工程化和实用化。

纵观世界各国星载 SAR 系统发展过程,随着各种不同应用领域需求的不断扩增,SAR 传感器技术的发展趋势可以归结为如下几点:

(1) 多参数 SAR,即多波段、多极化和多角度 SAR。利用多参数 SAR 数据可以更加完整地定量分析地面目标的雷达散射特性,对于准确提取 SAR 数据中的信息有着重要意义。

(2) 高分辨率 SAR。随着技术的不断进步,星载 SAR 分辨率不断提高,如 COSMO-SkyMed SAR 最高分辨率可以达到 0.5m。

(3) 干涉及极化干涉 SAR 系统。现代星载 SAR 系统一般都具有重复轨道控制功能,从而可以实现重复轨道干涉 SAR 或极化干涉 SAR 成像能力。

(4) 分布式 SAR 系统。分布式 SAR 系统是利用两颗或多颗轨道具有相互关联的卫星配合工作。例如,DLR 正在实施的 Tandem-X 计划由两颗卫星组成编队,意大利的 COSMO-SkyMed 系统由四颗 SAR 卫星组成卫星星座。

我国对星载 SAR 系统的研究尚处在起步阶段。民用领域已经启动的环境与减灾卫星计划中,搭载了 S 波段单极化 SAR 系统。规划中的测绘系列卫星也已经在有关部门的组织下进行了星载 SAR 系统的初步论证。可以预计在不久的将来,我国的星载 SAR 系统将有更大的发展,InSAR 技术人员和学者也终将能够使用我国自己的 SAR 数据进行科学研究。

### 1.3 InSAR/D-InSAR 技术研究概况

InSAR/D-InSAR 技术的发展是与实际应用的推动密不可分的,该技术从 1969 年首次用于金星表面地形测绘以来<sup>[12]</sup>,到目前为止,其基本理论、数据处理流程已较为成熟<sup>[17~20]</sup>,目前正在针对不同的应用领域进一步完善。

地形测绘是 InSAR 技术发展的主要推动力,Graham<sup>[13]</sup>于 1974 年率先报告了机载干涉雷达用于地形测绘的实验。稍后,Zebker 和 Goldstein<sup>[14]</sup>将其引入 JPL 的机



载系统实验,此时首次采用了数字信号处理技术直接用两幅复数影像形成干涉。ERS-1/2的Tandem计划获取了大量时间间隔仅一天的高相干性干涉图,这些干涉图对获取地形数据十分有利。而SRTM计划的实施更是推动了如SAR影像配准、干涉图滤波和相位解缠等相关技术的发展<sup>[48~51]</sup>。随着SRTM DEM数据的不断公开,InSAR技术在地形测绘方面的研究则更多地集中在如何在现有外部DEM的基础上进行地形更新方面<sup>[24]</sup>。

相对于地形测绘,对地表形变的量测更是SAR对地观测系统无可替代的优势。相应的D-InSAR技术首次应用是在1989年,Garbriel等<sup>[16]</sup>利用差分干涉图观测到美国加利福尼亚州Imperial峡谷黏土的吸水性导致的地表收缩和膨胀特性。随后,该技术在实用化上不断提高,应用领域也在不断扩展。

D-InSAR技术在同震形变量测方面的应用最为广泛和深入。1993年,Massonnet和Rossi等<sup>[26]</sup>率先将InSAR技术引入到地震形变测量中,利用间隔数月的ESR-1/2 SAR影像测量美国Landers地震的同震形变场,首创了该技术应用于厘米级地表形变场观测的先例。此后,许多研究小组利用该技术成功提取了地球物理参数,寻找地震源,为该技术深入应用于地震学研究做出了贡献<sup>[52~56]</sup>。但对于地震研究来说,更为迫切的需求还是如何利用该技术监测震间微小形变场,研究断裂活动引起地表位移的时空演化特征,捕获可能的震前形变异常,为地震的监测预测提供可靠依据,推进地震预报工作<sup>[57]</sup>。D-InSAR技术对于跨断层的震间形变监测具有较大潜力,如东昆仑断裂玛尼段震间形变场InSAR观测及断层滑动率估计<sup>[58]</sup>。特别是对GPS测站分布稀疏的地区,利用D-InSAR技术获取的震间形变场对于理解活动断层的地壳形变特征、地球动力学问题等具有重要的应用价值<sup>[59,60]</sup>。

在城市沉降监测方面,Strozzi和Wegmuller<sup>[61]</sup>研究了墨西哥市的地面沉降情况,利用D-InSAR处理了3景1996年1月~1997年9月的ERS-1/2数据,证明了该市每年30mm的沉降速度。Buckley<sup>[62]</sup>详细阐述了利用传统D-InSAR技术提取地表沉降场的整个技术流程,实验对美国Phoenix、Arizona、Houston和Texas等四座城市的地表沉降情况进行了观测,其中,还获取了Texas时间序列的地表沉降场。Buckley认为大气效应严重影响了该技术在地球表面形变观测中的应用,但通过与水准、GPS的比较,星载重轨D-InSAR仍然被认为是一项高空间分辨率观测缓慢地表形变的、有发展潜力的技术。李德仁等<sup>[63]</sup>采用D-InSAR利用ERS-1/2的Tandem数据对天津市地面沉降进行研究,获取了地面沉降等值线图,与实地水准数据比较,该沉降场的精度是均方差1.112cm。此后,天津市控制地面沉降工作办公室和荷兰Delft大学合作对天津城区,王超和张红等对苏州市,香港理工大学丁晓利、刘国祥和李志伟等对香港填海地区及香港新机场<sup>[64~66]</sup>,分别利用传统的D-InSAR观测方法获得了地面沉降场,证实了该方法在城市地面沉降观测中的精度达到厘米级。