

# 雷达干涉测量原理与应用

Synthetic Aperture Radar Interferometry  
Principle and Application

(第二版)

李平湘 杨杰 史磊 编著



测绘出版社

# 雷达干涉测量原理与应用

Synthetic Aperture Radar Interferometry  
Principle and Application

(第二版)

李平湘 杨杰 史磊 编著

测绘出版社

· 北京 ·

© 李平湘 2016

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 提 要

本书系统地阐述了雷达干涉测量的发展和雷达遥感的基本原理和方法,详细给出了 InSAR 处理生成数字高程模型的实现流程及其关键算法。全书共分 8 章,内容包括:系统分析和总结了国内外 InSAR 影像提取数字高程模型的研究现状;阐述了数字高程模型生成技术及质量控制、InSAR 的基本处理原理,并详细给出了 InSAR 处理流程;比较和分析了现有的干涉相位解缠算法,提出了一种基于经典相位解缠算法(支切法)的改进算法;讲述了基于遗传算法的相位解缠算法;利用干涉测量处理分析的理论,系统全面地分析了利用 InSAR 影像提取数字高程模型时产生误差的因素,并给出了误差估计的定量化公式;给出了一些关键算法的原程序。

本书可作为我国研究 InSAR 处理的人员的参考书,也可作为高年级本科生和相关专业研究生的入门教材。

## 图书在版编目(CIP)数据

雷达干涉测量原理与应用/李平湘,杨杰,史磊编  
著. —2 版. —北京:测绘出版社,2016.12

ISBN 978-7-5030-4024-5

I. ①雷… II. ①李… ②杨… ③史… III. 雷达—干涉测量法 IV. ①P225.1

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2016)第 320991 号

|      |                  |      |     |      |                    |      |     |
|------|------------------|------|-----|------|--------------------|------|-----|
| 责任编辑 | 巩 岩              | 封面设计 | 李 伟 | 责任校对 | 孙立新                | 责任印制 | 陈 超 |
| 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  | 北京京华虎彩印刷有限公司     |      |     | 经 销  | 新华书店               |      |     |
| 成品规格 | 169mm×239mm      |      |     |      |                    |      |     |
| 印 张  | 14.5             |      |     | 字 数  | 281 千字             |      |     |
| 版 次  | 2006 年 12 月第 1 版 |      |     | 印 次  | 2016 年 12 月第 2 次印刷 |      |     |
|      | 2016 年 12 月第 2 版 |      |     |      |                    |      |     |
| 印 数  | 1501-2300        |      |     | 定 价  | 48.00 元            |      |     |

书 号 ISBN 978-7-5030-4024-5

本书如有印装质量问题,请与我社门市部联系调换。

## 序

应武汉大学测绘遥感信息工程国家重点实验室青年学者李平湘教授、杨杰教授和史磊博士之邀,为其撰写的专著《雷达干涉测量原理与应用》作序。

雷达干涉技术发展几十年来,其应用领域不断发展,主要包括:地形测量和高精度数字地形图的生成,地壳形变与地震位移的测量,火山监测,冰川的流速和运动监测,地面沉降,森林调查,海洋现象和舰船的监测,军事应用,运动目标的发现与监视,以及合成孔径雷达(SAR)图像几何和辐射校正等。

从雷达影像提取高程信息是摄影测量与遥感领域长期关注的课题,也是地形测绘、自然灾害监测、自然资源调查等空间对地观测技术应用领域的先行基础工作,有着巨大的社会和经济效益。合成孔径雷达干涉测量(InSAR)是获取高精度地面高程信息的一种新手段,差分合成孔径雷达干涉测量(D-InSAR)技术能应用于地面沉降的监测,可提供精度达到毫米级的地面形变监测精度。

武汉大学测绘遥感信息工程国家重点实验室多年来一直跟踪国际雷达遥感相关的前沿研究,开展了大量的技术攻关工作,同时也取得了可喜的研究成果。近几年来,李平湘教授、杨杰教授和史磊博士的博士论文都是专门针对 InSAR 技术进行研究,其中杨杰博士的论文是在我的指导下完成。李平湘教授主持了国家“973”课题,同时主持了国家“863”项目(2011AA120404)“面向对象的 SAR 影像地物高精度解译”课题、国家自然科学基金(F010408)“基于震后高分辨率极化 SAR 图像的倒塌建筑物解译”的研究,其中自主开发的干涉雷达处理软件已经嵌入国家“通用遥感平台”。同时,“863”项目利用两位作者研究的方法,对德国地区 InSAR 数据处理得到的数字高程模型(DEM)精度在 10 m 以内、对天津地区地面沉降的监测结果达到厘米级精度。

本书系统地综述了雷达干涉测量的发展和雷达遥感的基础知识,注重基本原理和方法的描述,同时注重对关键技术进行重点阐述,做到了深入浅出。整个内容形成了较为完整的体系,是近年来雷达干涉测量用于地形测量从理论到实践较完备的专著,因此,我推荐给不同专业背景的学者阅读或参考。

在目前雷达硬件技术飞速发展、国外 InSAR 理论研究相对成熟、国内数据处理相对滞后的情况下,期望本书的出版能够起到积极的作用,推动我国 InSAR 在地形测绘领域的理论研究和其数据处理水平向前发展。我殷切地希望三位青年学者能够百尺竿头更进一步,在雷达测绘领域做出更大贡献。

李德仁

中国科学院、中国工程院院士  
二〇一六年六月

# 前 言

合成孔径雷达干涉测量(InSAR)是用来提取地表三维和高程变化信息的一项先进技术,它通过传感器、轨道和地球模型之间几何关系的建立,利用雷达干涉数据导出的相位信息可快速大面积地获取高精度数字地形信息。20世纪60年代以来,InSAR技术发展迅速,应用十分广泛。例如,冰川和冰缘的变化及地表形变的监测,城市沉降、火山喷发、地震、滑坡等地质灾害的监测,监测精度已达到毫米级。InSAR技术现已成为遥感研究领域的新热点。

InSAR是通过机载系统发展起来的,其最初的应用领域受到局限。进入20世纪90年代后,一系列星载系统,如欧洲的ERS-1/2、JERS-1、Radarsat-1相继发射成功,提供了大量的星载雷达干涉测量(SAR)数据。由此,InSAR技术也从纯理论研究迈向实用阶段。例如,在2000年,美国利用航天飞机搭载合成孔径雷达飞行11天,获取了覆盖全球80%的数字高程模型(DEM)数据,高程精度在20m以内。在我国,一批学者也致力于InSAR技术的基础理论与应用研究。但是,相对于国际先进水平,我国在数据获取与处理技术手段方面仍然滞后。例如,InSAR数据的处理几乎完全依赖于进口软件,还不能满足国家建设的迫切需要。因此,要加强InSAR及其数据处理关键技术的研究和创新,积极推动我国自主知识产权的数据处理软件平台的开发,满足未来雷达对地观测技术发展的需求。

本书从InSAR几何模型入手,全面地阐述了从InSAR影像提取DEM的基本理论、数据处理技术、实用化系统。第1章为概述部分,阐述了InSAR的发展及其在地形测绘中和其他领域的应用;第2章从InSAR的成像几何模型入手,给出了InSAR中关键参量的求解方法及可用于干涉测量的InSAR数据;第3章系统地总结了DEM数据获取、存储、处理过程及应用中的一些典型理论与方法,分析了DEM的数据来源、数据采集、生产流程及质量控制等因素对DEM精度和可靠性的影响,比较了常规DEM生产方法与InSAR生成DEM方法的特点;第4章介绍了从InSAR提取DEM的过程,分析了数据处理的理论和实现步骤,详细推导了从相位到高程转换的模型,对其中的典型方法进行了分析和评述;第5章针对相位解缠这一核心技术进行了分类、比较,并对各自适用的条件进行了总结,在经典相位解缠的基础上,提出了改进支切法相位解缠和基于遗传算法的相位解缠的理论与方法;第6章结合作者多年的研究成果,系统地阐述了InSAR的应用;第7章简要地介绍了差分合成孔径雷达干涉测量技术(D-InSAR)的基本原理和应用;第8章对目前利用极化干涉技术进行植被下DEM提取的基本原理进行了详细介绍。

全书内容充实,针对性强,对从事 InSAR 相关研究的读者具有较高的参考价值。

在本书稿的撰写、修改和出版的过程中,得到了许多知名学者和有关人士的帮助。李德仁院士作为我们的老师和领导,一直关注本书的撰写,为本书提出了宝贵的意见。测绘遥感信息工程国家重点实验室的张良培教授,首先审阅了书稿,对本书的整体结构和一些具体细节都提出了宝贵的修改意见。本书的部分实验是在中国测绘科学研究院完成的,得到了张继贤研究员及相关人员的热情帮助。德国波茨坦地球科学研究中心的夏耶教授为我们的研究工作提供了许多珍贵的资料,同时对我们的研究工作也给予了积极的指导。在此一并表示感谢。

本书的出版得到了国家自然科学基金(F010408)“基于震后高分辨率极化 SAR 图像的倒塌建筑物解译”、国家测绘地理信息局公益项目项目(201412002)“微小型 SAR 测图系统及其应急检测应用”、国家“863”项目(2011AA120404)“面向对象的 SAR 影像地物高精度解译”等课题的资助。

由于作者水平所限,书中难免有错误及不当之处,敬请读者不吝指教。

# 目 录

|                               |    |
|-------------------------------|----|
| 第 1 章 概 述                     | 1  |
| § 1.1 合成孔径雷达的发展历史             | 1  |
| § 1.2 InSAR 的发展及其在地形测量中的应用    | 6  |
| § 1.3 InSAR 图像提取 DEM 的现状与发展趋势 | 9  |
| § 1.4 InSAR 在其他领域的应用          | 11 |
| 参考文献                          | 15 |
| 第 2 章 干涉雷达测量的基本原理             | 17 |
| § 2.1 干涉测量模型                  | 17 |
| § 2.2 干涉基线估算                  | 24 |
| § 2.3 多普勒距离等式的几何关系            | 24 |
| § 2.4 干涉相干                    | 26 |
| § 2.5 干涉测量的合成孔径雷达数据           | 29 |
| § 2.6 ERS-1/2 的 InSAR         | 30 |
| § 2.7 干涉质量分析与评价               | 31 |
| 参考文献                          | 33 |
| 第 3 章 DEM 产品                  | 34 |
| § 3.1 数据获取                    | 34 |
| § 3.2 生成技术                    | 38 |
| § 3.3 质量控制                    | 40 |
| 参考文献                          | 45 |
| 第 4 章 InSAR 生成 DEM            | 46 |
| § 4.1 基本流程                    | 46 |
| § 4.2 复图像配准                   | 47 |
| § 4.3 原始干涉数据滤波                | 52 |
| § 4.4 干涉条纹图生成                 | 53 |
| § 4.5 相位数据质量评价                | 54 |
| § 4.6 干涉条纹图滤波                 | 55 |

|                                         |            |
|-----------------------------------------|------------|
| § 4.7 平地效应消除 .....                      | 62         |
| § 4.8 相位解缠算法 .....                      | 65         |
| § 4.9 目标高程反演 .....                      | 66         |
| § 4.10 地理编码 .....                       | 69         |
| § 4.11 从干涉条纹直接生成精确的 DEM .....           | 70         |
| 参考文献 .....                              | 72         |
| <b>第 5 章 相位解缠 .....</b>                 | <b>74</b>  |
| § 5.1 解缠问题的由来 .....                     | 74         |
| § 5.2 理想情况下相位解缠的数学描述 .....              | 75         |
| § 5.3 噪声情况下的病态模型 .....                  | 77         |
| § 5.4 噪声和不一致性检测 .....                   | 78         |
| § 5.5 传统相位解缠算法 .....                    | 82         |
| § 5.6 改进支切法 .....                       | 98         |
| § 5.7 遗传算法 .....                        | 102        |
| 参考文献 .....                              | 109        |
| <b>第 6 章 合成孔径雷达数据处理及应用 .....</b>        | <b>111</b> |
| § 6.1 InSAR 处理软件简介 .....                | 111        |
| § 6.2 InSAR 提取地面 DEM 流程 .....           | 112        |
| § 6.3 InSAR 处理的应用 .....                 | 113        |
| 参考文献 .....                              | 118        |
| <b>第 7 章 D-InSAR 技术 .....</b>           | <b>119</b> |
| § 7.1 差分干涉的基本原理 .....                   | 119        |
| § 7.2 D-InSAR 数据应用中的几点问题 .....          | 121        |
| § 7.3 InSAR、GPS 和地面气象观测资料集成用于形变测量 ..... | 123        |
| § 7.4 D-InSAR 与其他数据集成的问题和展望 .....       | 130        |
| 参考文献 .....                              | 132        |
| <b>第 8 章 极化干涉技术植被下 DEM 提取 .....</b>     | <b>134</b> |
| § 8.1 极化合成孔径雷达技术基本原理 .....              | 134        |
| § 8.2 极化 InSAR 技术基本原理 .....             | 147        |
| § 8.3 RVoG 模型植被下 DEM 估计 .....           | 149        |
| 参考文献 .....                              | 157        |

---

|      |                |     |
|------|----------------|-----|
| 附录 1 | 基线距 .....      | 160 |
| 附录 2 | 基本参数及其关系 ..... | 162 |
| 附录 3 | 部分相位解缠程序 ..... | 164 |

# CONTENTS

|                                                                      |               |
|----------------------------------------------------------------------|---------------|
| <b>Chapter 1 Introduction .....</b>                                  | <b>1</b>      |
| § 1.1 Review of SAR .....                                            | 1             |
| § 1.2 Application of InSAR for topographic surveying .....           | 6             |
| § 1.3 Extraction of DEM from InSAR .....                             | 9             |
| § 1.4 Applications of InSAR in other fields .....                    | 11            |
| References .....                                                     | 15            |
| <br><b>Chapter 2 Principles of SAR Interferometry .....</b>          | <br><b>17</b> |
| § 2.1 Model of InSAR measurement .....                               | 17            |
| § 2.2 Interferometric baseline approachment .....                    | 24            |
| § 2.3 Geometry relationship of Doppler range equations .....         | 24            |
| § 2.4 Interferometric coherence .....                                | 26            |
| § 2.5 SAR data of interferometric measure ment .....                 | 29            |
| § 2.6 Interferometric SAR of ERS-1/2 .....                           | 30            |
| § 2.7 Analysis and evaluation of interferometric measurement .....   | 31            |
| References .....                                                     | 33            |
| <br><b>Chapter 3 Digital Elevation Model .....</b>                   | <br><b>34</b> |
| § 3.1 Acquisition of data .....                                      | 34            |
| § 3.2 Technique of generating DEM .....                              | 38            |
| § 3.3 Quality control .....                                          | 40            |
| References .....                                                     | 45            |
| <br><b>Chapter 4 Generation of DEM from SAR Interferometry .....</b> | <br><b>46</b> |
| § 4.1 Basic flow .....                                               | 46            |
| § 4.2 Image registration of complex image .....                      | 47            |
| § 4.3 Filter of original InSAR data .....                            | 52            |
| § 4.4 Generation of interference fringes .....                       | 53            |
| § 4.5 Evaluation of phase data quality .....                         | 54            |
| § 4.6 Filtering of interference fringes .....                        | 55            |

|                  |                                                                      |            |
|------------------|----------------------------------------------------------------------|------------|
| § 4.7            | Flat-earth effect removal .....                                      | 62         |
| § 4.8            | Phase unwrapping algorithms .....                                    | 65         |
| § 4.9            | DEM reconstruction .....                                             | 66         |
| § 4.10           | Geocoding .....                                                      | 69         |
| § 4.11           | Direct generation of precise DEM from interference fringes .....     | 70         |
| References       | .....                                                                | 72         |
| <b>Chapter 5</b> | <b>Phase Unwrapping .....</b>                                        | <b>74</b>  |
| § 5.1            | Origination of phase unwrapping .....                                | 74         |
| § 5.2            | Mathematical description of phase unwrapping .....                   | 75         |
| § 5.3            | Ill-conditioned model with existence of noise .....                  | 77         |
| § 5.4            | Noise and inconsistency detection .....                              | 78         |
| § 5.5            | Conventional method of phase unwrapping .....                        | 82         |
| § 5.6            | Improved branch cut algorithm .....                                  | 98         |
| § 5.7            | Genetic algorithms .....                                             | 102        |
| References       | .....                                                                | 109        |
| <b>Chapter 6</b> | <b>InSAR Data Processing and Application .....</b>                   | <b>111</b> |
| § 6.1            | Brief introduction to InSAR software .....                           | 111        |
| § 6.2            | Process of extraction DEM from InSAR data .....                      | 112        |
| § 6.3            | InSAR application .....                                              | 113        |
| References       | .....                                                                | 118        |
| <b>Chapter 7</b> | <b>D-InSAR Technique .....</b>                                       | <b>119</b> |
| § 7.1            | Base principles of D-InSAR .....                                     | 119        |
| § 7.2            | Some problems of D-InSAR data application .....                      | 121        |
| § 7.3            | GPS, meteorological measurement and InSAR data integration ...       | 123        |
| § 7.4            | Some problems for integration of D-InSAR and others data .....       | 130        |
| References       | .....                                                                | 132        |
| <b>Chapter 8</b> | <b>Underlying Ground Topography Estimation Based on PolInSAR ...</b> | <b>134</b> |
| § 8.1            | Base principles of PolSAR .....                                      | 134        |
| § 8.2            | Base principles of PolInSAR .....                                    | 147        |
| § 8.3            | RVoG model for underlying topography estimation .....                | 149        |
| References       | .....                                                                | 157        |

---

|            |                                                |     |
|------------|------------------------------------------------|-----|
| Appendix 1 | Base Line Distance .....                       | 160 |
| Appendix 2 | Basic Parameters and Their Relationships ..... | 162 |
| Appendix 3 | Some Phase Unwrapping Algorithms .....         | 164 |

# 第 1 章 概 述

精确的地形信息在地质、地形、水文、冰山、自然灾害监测、自然资源调查等地球物理领域有着十分重要的作用。相关领域的科研人员一直在进行各种探讨和研究,以求用尽可能短的时间获取覆盖面积广、空间分辨率高、精度高的数字高程模型(digital elevation model, DEM)。合成孔径雷达(synthetic aperture radar, SAR)技术与其他遥感技术相比,具有全天候、全天时、一定的地面穿透能力等独特优点,因此应用领域更加广泛。目前,合成孔径雷达技术已经取得了优于米级的空间分辨率(方位分辨率和距离分辨率)。合成孔径雷达干涉测量(interferometry SAR, InSAR)技术又充分利用了雷达所获取的相位信息,极大地增加了雷达数据所提供的信息量,扩大了合成孔径雷达的应用范围。InSAR 技术为 DEM 的快速精确获取提供了一个全新的信息源,是雷达遥感的最新研究方向,也是遥感和摄影测量学科的前沿。正因为如此,利用 InSAR 图像提取 DEM 的方法研究,已成为各国遥感研究领域的热点研究方向之一<sup>[1-3]</sup>。

## § 1.1 合成孔径雷达的发展历史

合成孔径雷达是 20 世纪 50 年代末研制成功的一种微波传感器,也是微波传感器中发展最迅速和最有成效的一种。作为一种主动式传感器,合成孔径雷达技术与其他遥感技术相比,不受光照和天气条件的限制,可全天时、全天候对地观测,还可以穿透一定的地表和植被获取地表下信息。利用 InSAR 图像提取 DEM 的方法研究已成为各国遥感领域研究的主要方向之一,它可广泛用于冰川、地震、火山、地表沉降等研究中<sup>[4-5]</sup>。

早在第二次世界大战期间,雷达遥感就已在战争中发挥作用。20 世纪 50 年代已出现了能成像的机载侧视雷达(side looking airborne radar, SLAR)。1951 年,美国 Goodyear 宇航公司的 Carl Wiley 首先提出:可以利用频率分析方法改善雷达的角分辨率。与此同时,伊利诺依大学控制系统实验室证实:频率分析方法的确能改善雷达的角分辨率。但由于当时的这些雷达空间分辨率较差,遥感应用上还有很大的局限性。1952 年,第一个实用化的合成孔径雷达系统研制成功。1953 年,安装在 DC-3 飞机上的合成孔径雷达系统(频率为 930 MHz)获取了第一幅合成孔径雷达图像,这是合成孔径原理和合成孔径雷达发展的最初阶段。1957 年,美国密歇根大学雷达和光学实验室对其研制的合成孔径雷达系统进行了飞行实验,得到了

第一张全聚焦的合成孔径雷达图像。从此,合成孔径原理和合成孔径雷达被人们所认识<sup>[6-7]</sup>。

20 世纪 60 年代,美国开展了大量的机载合成孔径雷达实验。

进入 20 世纪 70 年代,合成孔径雷达系统由机载向星载过渡。1972 年,阿波罗 17 登月宇宙飞船上的合成孔径雷达系统是这种过渡的首次尝试。同年,美国航空与航天局(National Aeronautics and Space Administration, NASA)的喷气推进实验室(Jet Propulsion Laboratory, JPL)进行了机载 L 波段合成孔径雷达实验,获得了可喜的成果。1978 年,在先驱者金星 1 号卫星和海洋卫星(Seasat)1 号卫星上合成孔径雷达系统得到了成功应用,尤其是海洋卫星上的合成孔径雷达,它是从航天高度向地球环境和资源进行主动微波遥感的第 1 次实验,引起了遥感领域科技工作者的广泛注意。海洋卫星为期 98 天的飞行结果取得了大量雷达图像,证明了合成孔径雷达从航天高度获取地面高分辨率图像的能力:其 25 m 的空间分辨率已经超过了陆地卫星上多光谱扫描仪(multispectral scanner, MSS)图像的分辨率(78 m),也超过了专题制图仪(thematic mapper, TM)图像的分辨率(30 m);不会因地面被云层覆盖而产生无效的空白区,具有全天候、全天时的成像工作能力。这是多光谱扫描仪、专题制图仪及 SPOT 卫星上电荷耦合器件(charge coupled device, CCD)推扫式扫描仪等无法做到的。海洋卫星的发射标志着合成孔径雷达已成功地进入从太空对地面进行观测的新时代,标志着星载合成孔径雷达由实验研究向应用研究的关键转变。

进入 20 世纪 80 年代以后,美国航空与航天局开始有计划地对合成孔径雷达进行航天高度上的实验和应用。1981 年 11 月,哥伦比亚号航天飞机上搭载了成像雷达 SIR-A,这是一种 L 波段的合成孔径雷达,根据它所获得的图像探测到了埃及西北部沙漠地区的地下古河床,这一成果引起了国际科技界的震动。1983 年,原苏联利用 COSMOS 卫星进行海洋测绘,同时利用 Verena-15 和 Verena-16 宇宙飞船对金星进行雷达测绘。1984 年,挑战者号航天飞机上的成像雷达 SIR-B 又一次成功地进行了航天遥感实验, SIR-B 是 SIR-A 的改进型,为双波段(C、L)的合成孔径雷达,该系统同时实现了合成孔径雷达立体成像及数字记录和数字处理。1988 年 12 月 2 日,美国航天飞机亚特兰蒂斯号将长曲棍球(Lacrosse)新型军事侦察卫星送入轨道,该卫星是世界上第一颗高分辨率雷达成像卫星,采用 X、L 两个频段和双极化方式。1989 年,美国航空与航天局开展了一项星球雷达任务——Magellan 雷达观测金星计划, Magellan 雷达 1989 年 5 月 4 日由亚特兰蒂斯号送上太空,1990 年 9 月 15 日开始测绘任务,1991 年 5 月 15 日终止。Magellan 雷达工作于 S 波段, HH 极化,距离向分辨率为 120~360 m,方位向分辨率为 120~150 m,入射角大于 30°<sup>[6-8]</sup>。

原苏联于 1991 年将 ALMAZ-1 卫星送上太空, ALMAZ-1 为 COSMOS-1870

卫星的改进型,其上搭载了 S 波段合成孔径雷达,可对地球上  $78^{\circ}\text{N}\sim 78^{\circ}\text{S}$  之间的地区进行成像,数据的处理采用光学与数字两种方式。同年,欧洲空间局(European Space Agency,ESA)发射了其第一颗地球资源卫星 ERS-1,其上搭载的合成孔径雷达工作于 C 波段,采用 VV 极化,入射角为  $23^{\circ}$ ,观测带宽为 100 km,距离向分辨率为 26 m,方位向分辨率为 28 m,具有全系统校准能力。ERS-1 可提供全球气候变化情况,并对近海水域和陆地进行观测。这颗卫星与其后继卫星 ERS-2 所获取的大量数据被世界各国广泛使用,是性能较好的合成孔径雷达系统之一。1992 年,日本发射的地球资源卫星 JERS-1 携带的是 L 波段合成孔径雷达系统。该合成孔径雷达系统采用 HH 极化,观测带宽 75 km,距离向和方位向分辨率均为 18 m,总体性能与 ERS-1 相似,主要用于地形测绘,以及农业、林业和畜牧业的植被灾情监测。1994 年,美国航空与航天局、德国空间局(German Aerospace Center,DLR)和意大利空间局(ASI)共同进行了航天飞机成像雷达飞行任务(SIR-C/X-SAR),分别在 1994 年 4 月 9 日至 20 日、9 月 30 日至 10 月 11 日进行了两次飞行。SIR-C 是由喷气推进实验室建造的,为双频雷达(L 波段和 C 波段),采用全极化(HH、HV、VH 和 VV)方式;X-SAR 由德国空间局和意大利空间局共同建造,为单频雷达(X 波段),采用 VV 极化方式。SIR-C/X-SAR 首次实现了利用多频、多极化雷达信号从空中对地球进行观测,利用 SIR-C 图像数据有助于深入开展植被、土壤湿度、海洋动力学、火山活动、土壤侵蚀和沙化等多项科学研究工作<sup>[3]</sup>。1995 年,欧洲空间局的 ERS-1 后继卫星 ERS-2 发射升空,其系统参数与 ERS-1 基本一致。同年,加拿大成功发射了其第一颗资源调查卫星 Radarsat-1。该卫星借鉴了很多 ERS 卫星经验,采用 C 波段、单极化(HH),具有 7 种工作模式,分辨率从 10 m 到 100 m 可变,重复观测周期为 24 天,观测带宽可达 500 km,天线视角在  $10^{\circ}\sim 60^{\circ}$  之间变化。同时,该卫星带有实验天线波束,可使扫描带进一步扩展,为商业应用和科学研究提供全球冰情、海洋和地球资源数据。1996 年,美国航空与航天局开展了继 Magellan 雷达观测金星计划后第二项星球雷达任务——观测土卫六星(Titan)的 Cassini 任务,用于开展 Titan 表面的物理状态、地形和组成成分等观测的多项任务,进而推测其内部构造。Cassini 上搭载的合成孔径雷达工作于 Ku 波段,HH 极化,距离向分辨率为  $400\sim 1\,600$  m,方位向分辨率为  $600\sim 2\,100$  m。由美国、德国和意大利合作研制的航天飞机成像雷达 3 号(SIR-C/X-SAR)则是运行在地球轨道高度的第一个同时成像的多波段、多极化雷达系统,并且有极化测量及干涉测量功能。在此基础上,2000 年 2 月,美国奋进号航天飞机成功完成了地球测绘任务(shuttle radar topography mission, SRTM)。SRTM 系统在 SIR-C/X-SAR 系统上进行改进,增加了一个进行地形测绘的固定基线距的干涉仪,包括一个 60 m 长的可展开的天线杆,在天线杆的末端装有 C 波段和 X 波段天线,以及用于确定高度和轨道的控制系统。由于 SRTM 同时拥有 C

波段和 X 波段的 InSAR 系统,故 SRTM 能够利用干涉相干与频率之间相关联的特性,以及不同频率电磁波具有不同的穿透特性,来提高所提取的 DEM 精度,并获取散射过程的物理信息,对植被地区的研究极为有利<sup>[4,7,9]</sup>。

进入 21 世纪后,世界各国都在加紧筹划和研制新的可进行长期观测的各种先进空间雷达。欧洲空间局于 2002 年 3 月成功发射的环境卫星 Envisat 上搭载了先进的合成孔径雷达 ASAR 系统,为 C 波段、多极化、多模式的系统,采用分布式 T/R 组件及相控阵技术,对后续合成孔径雷达遥感卫星的设计与研究影响广泛。随后,日本航天宇航局(Japan Aerospace Exploration Agency, JAXA)于 2006 年 1 月发射了高级陆地观测卫星 1 号(advanced land observing satellite, ALOS-1), ALOS-1 搭载了 L 波段的全极化、多模式 PALSAR 系统。由于 L 波段的合成孔径雷达穿透力较强,同时 ALOS-1 具备较高的重轨观测精度,故 PALSAR 系统被广泛应用于森林覆盖地区的遥感研究。2007 年 6 月,德国空间局发射了 TerraSAR-X 雷达卫星,其与随后发射的姐妹星 TanDEM-X(2010 年 6 月)被公认为具有里程碑意义的双星串联 InSAR 系统。TerraSAR-X 与 TanDEM-X 为遥感科学家提供了 1 m 分辨率、X 波段、全极化、全球合成孔径雷达图像,双星系统产生的全球 DEM 垂直精度高达 4 m,为地质灾害、地图测图、生态环境研究等领域注入了新的活力。同年,加拿大以 Radarsat-1 为原型,发展了 Radarsat-2 全极化合成孔径雷达卫星,并于 2007 年 12 月发射升空。Radarsat-2 工作波长为 C 波段,该波长穿透力适中,对农作物生长监测具有较好的能力。为了实现短周期、近实时的全球观测,意大利空间局开展了多星座合成孔径雷达对地观测计划,并于 2007 年 6 月和 12 月、2008 年 10 月、2010 年 11 月分别发射了 4 颗 X 波段全极化 COSMOS 卫星。4 颗卫星组成的多星座模式使得 COSMOS 对自然灾害、土地利用等应用具有连续观测的可能,同时也具备了较好的 InSAR 数据获取能力。2014 年以后,欧洲空间局与日本航天宇航局分别发射了新一代合成孔径雷达卫星 Sentinel-1 与 ALOS-2,虽然其数据尚未大量公开,但可以预见未来的星载合成孔径雷达将向极化干涉、高分辨率、星座连续观测等多模式发展。

从合成孔径雷达技术的历史发展可以看出,随着电子技术和计算机技术的不断发展,合成孔径雷达技术的水平和功能也在不断地提高,从开始的单波段、单极化、固定入射角、单模式,逐渐向多波段、多极化、变入射角、多模式方向发展。天线也经历了固定的、机械扫描、电扫及相控阵的发展过程<sup>[2,7]</sup>。

在进行星载系统和航天飞机研究的同时,世界发达国家也开展了大量的机载实验与应用研究。与星载系统不同的是,由于机载系统一般都是进行实验研究和一些商业应用,它们的硬件配置经常变化,因此很难给出很准确的机载合成孔径雷达系统性能参数。

我国对合成孔径雷达的研究工作起步较晚,开始于 20 世纪 70 年代后期。最

初中国科学院电子研究所开展了机载合成孔径雷达的研究工作,经过 10 多年的不懈努力,在国家“六五”期间研制成功了单通道、单侧视方向 X 波段合成孔径雷达。1983 年,得到了光学处理的地形图像。1987 年,研制成功了多观测通道、多极化合成孔径雷达系统,正式命名为 CAS/SAR,并在后来的工作中对机载合成孔径雷达系统和信号处理系统进行了进一步改进和完善。20 世纪 80 年代以来,我国利用机载合成孔径雷达系统,成功地进行了洪涝灾害、海岸线遥感、海洋雷达后向散射特性及成像机理的研究。在 1991 年淮河和太湖流域、1998 年长江流域发生洪涝灾害时,机载合成孔径雷达系统获取了大量的现场资料,为及时评估灾情和进行抗洪救灾提供了准确可靠的依据。

目前,国内已经完成或正在研制的机载合成孔径雷达系统主要有以下几种<sup>[2,4,10-11]</sup>。

(1)机载 L-SAR 实用系统,即星载合成孔径雷达模拟机机载校飞系统。实践证明,该系统具有大面积、快速、稳定成像能力,在农、林、地矿、水利、海洋等应用中效果明显;首次进行了干涉雷达飞行实验,取得初步成功;开展的聚束成像雷达实验也取得了预期成果,获得优于 1.5 m 的空间分辨率,特殊点达到 1.2 m。该系统已成为国际上先进的机载合成孔径雷达系统之一。

(2)空军机载合成孔径雷达侦察系统。中国科学院电子所承担了该系统的研制任务,该侦察系统最大作用距离为 150 km,可以在 100 km 上获得两帧 2.5 m 分辨率、观测带宽为 16 km(2.5 m 分辨率时)的图像数据。另外,在国家“863”计划的支持下,电子所还为该系统配套研制了高分辨率实时成像处理器。经模拟测试,该处理器不仅完全满足了上述雷达指标,而且具有近距离高分辨率模式。在 8 km 的作用距离上,该处理器具有 0.8 m 分辨率的处理能力。该处理器在 2000 年 11 月首次飞行时就获得成功,得到了大面积高质量的图像,公路、立交桥清晰可见。经实际测试发现,该处理器在 L 波段上达到了两视 3 m 的分辨率(最大作用距离 33 km)。

(3)聚束高分辨率合成孔径雷达技术。中科院电子所还积极开展了聚束式高分辨率合成孔径雷达技术的预先研究,根据聚束合成孔径雷达的成像机理进行了成像算法的仿真研究;针对机载条件进行了运动补偿方案的初步研究;完成了聚束合成孔径雷达波束控制方案设计,以及多模式波控机的研制与测试;最终在 2000 年年底进行了机载聚束合成孔径雷达飞行实验,完成了数据采集,经处理后获得聚束合成孔径雷达图像,达到方位向分辨率 1.5 m(两视)的技术指标,并具有方位分辨率优于 1 m 的能力。

(4)中航工业雷华电子技术研究所(607 所)研制的机载 JZ-8 合成孔径雷达系统。该样机是我国首次研制成功的、同时具有前斜视区域成像和侧视条带成像的 X 波段机载合成孔径雷达系统。在试飞中,在国内首次获得了前斜视满足  $10\text{ m} \times 10\text{ m}$