



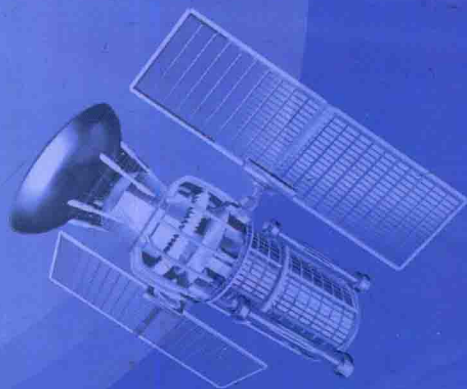
测绘地理信息科技出版资金资助

CEHUI DILI XINXI KEJI CHUBAN ZIJIN ZIZHU

Spaceborne Wide Swath SAR Interferometry

蒋廷臣 著

# 星载宽幅合成孔径 雷达干涉测量



测绘出版社

测绘地理信息科技出版资金资助

# 星载宽幅合成孔径雷达 干涉测量

Spaceborne Wide Swath SAR Interferometry

蒋廷臣 著



测绘出版社

· 北京 ·

© 蒋廷臣 2015

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

星载合成孔径雷达干涉测量是 20 世纪发展最为迅速、最具应用潜力的新型对地观测技术,宽幅合成孔径雷达干涉测量则是其拓展,是当前国际遥感界乃至地学界极为关注的热点研究课题。本书概要介绍了目前国外已经发射成功且具有宽幅模式的 SAR 卫星基本情况,系统地叙述了星载宽幅合成孔径雷达的成像与干涉原理,重点分析了星载宽幅合成孔径雷达图像拼接等关键技术,阐述了其干涉去相干性和相关误差的影响规律与大小,并对星载宽幅合成孔径雷达干涉测量的大气影响进行了初步研究。在此基础上,研究了基于多源多模式雷达干涉的形变场融合方法,最后利用宽幅合成孔径雷达差分干涉测量,对伊朗巴姆地震、汶川地震和于田地震进行了变形获取与分析研究,获得了较好的结果。

本书可供从事测绘、遥感、地理、资源和环境等学科领域的科技人员和高等院校师生学习参考。

## 图书在版编目(CIP)数据

星载宽幅合成孔径雷达干涉测量/蒋廷臣著. —北京:测绘出版社, 2015.11

ISBN 978-7-5030-3591-3

I. ①星… II. ①蒋… III. ①卫星载雷达—合成孔径雷达—干涉测量法 IV. ①TN958

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2015)第 262165 号

责任编辑 赵福生 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	169mm×239mm		
印 张	9.5	字 数	205 千字
版 次	2015 年 11 月第 1 版	印 次	2015 年 11 月第 1 次印刷
印 数	0001-1000	定 价	48.00 元

书 号 ISBN 978-7-5030-3591-3/P·774

本书如有印装质量问题,请与我社门市部联系调换。

# 序

作为大地测量的一种新技术,合成孔径雷达干涉测量技术具有全天时、全天候、周期短等优势,其差分干涉测量技术可对地面进行高精度和高分辨率变形监测,其空间连续覆盖的特征是 GNSS、SLR、VLBI 及传统大地测量(如精密水准测量)等方法所不具有的。作为 InSAR 技术的拓展,星载宽幅合成孔径雷达干涉测量技术相对于其他模式干涉测量而言,尽管其分辨率较低,但具有重访周期短和宽幅的优点。随着空间定轨技术的发展,已发射和即将发射的合成孔径雷达卫星如“哨兵一号”皆具有宽幅模式,而且还能提供大量的宽幅 SAR 数据,从而为星载宽幅合成孔径雷达干涉测量技术的全面研究和推广创造了良好的条件,未来以此为代表的大范围、高精度遥感地表监测技术将引领空间大地测量技术体系的变革。

目前,国际上已掀起针对星载宽幅合成孔径雷达干涉测量技术理论与应用研究的热潮,国内外从事该项研究的学者越来越多,但是相关的专著和书籍尚不多。蒋廷臣副教授及其科研团队,不失时机地抓住了这一前沿性的研究方向,密切关注星载宽幅合成孔径雷达干涉测量技术的前沿发展,在学习和吸收有关宽幅合成孔径雷达干涉测量书籍、专著和论文等成果的基础上,基于一些自然基金项目对星载宽幅合成孔径雷达干涉测量的理论和应用进行了认真研究,并积累了一些经验,取得了一定成果,从而编著了《星载宽幅合成孔径雷达干涉测量》一书。在本专著的编写过程中,作者还参考了大量相关文献资料,吸取了国内外最新研究成果。本专著以合成孔径雷达干涉测量的理论框架为基础,重点阐述了宽幅合成孔径雷达干涉测量技术的基本原理和方法,从测量学的视角对误差来源与误差传播模型进行了全面深入的分析研究,总结出一套较完善的宽幅合成孔径雷达干涉测量理论和方法。通过巴姆地震(伊朗)、汶川地震、于田地震的实例论证表明,该理论体系系统完备、可靠度较高。作为这些研究成果的结晶,本书突出体现了作者对相关科学研究的务实与创新精神。在此,我为国内不断涌现出崭露头角的学术团体而感到欣慰与高兴。

本书内容丰富、结构完整、逻辑清晰、层次分明、图文并茂,适合测绘及相关学科领域的科技人员和高等院校师生学习参考。期望本书的出版,能够对

推动宽幅合成孔径雷达干涉形变测量技术在我国的研究和应用推广发挥积极的作用。

香港中文大学太空与地球信息科学研究所所长  
国际欧亚科学院院士  
中国科学院/香港中文大学地球信息科学联合实验室主任



2015年9月

# 前 言

星载宽幅合成孔径雷达干涉测量是利用合成孔径雷达(synthetic aperture radar, SAR)卫星扫描模式观测地表而获取其几何信息的技术,又被称为 ScanSAR (scanning interferometric synthetic aperture radar)干涉测量。宽幅 SAR 图像强度信息已应用于资源勘探、环境监测、海洋探测、防灾减灾、土地利用和森林调查、农作物估产、国家安全等方面,取得了重大成效。由于合成孔径雷达卫星设备性能和定轨技术的改善和提高,宽幅 SAR 干涉的前提条件即扫描同步和极限基线已得到保证,同时,已发射和即将发射多颗具有宽幅模式的 SAR 卫星,为宽幅 SAR 干涉研究应用提供了丰富的数据资源,故星载宽幅干涉测量技术为地壳板块运动及地球动力学研究提供了契机。

星载宽幅合成孔径雷达干涉测量相对于其他模式干涉测量而言,尽管分辨率较低,但具有重访周期短和宽幅的优点。重访周期短则易监测地表缓慢变形,宽幅不仅可消除具有累积效应的基线误差,而且在监测精度与条带模式相当条件下,其获取的宽域形变场更能用于发震机制分析,同时其多模式干涉测量可为干涉图时间序列分析提供条件,故星载宽幅合成孔径雷达干涉测量理论与方法已成为一个热点研究与应用的新方向。我国“863”高技术研究发展等计划也把雷达成像列为重点项目,但由于受到数据源质量、数量和相关参数信息的限制,目前我国还处于利用国外提供的干涉数据进行研究的阶段,尚未在国内大规模应用。抓住时机,充分利用目前雷达卫星提供的海量影像资源,对宽幅 SAR 干涉测量技术的理论和实现进行深入研究,对我国 InSAR 技术紧跟国际发展潮流具有非常重要的科学意义。

笔者在承担国家自然科学基金项目(编号:41004003)、江苏省测绘科研项目计划(编号:JSCHKY200902)和完成博士论文的过程中,密切关注星载宽幅合成孔径雷达干涉测量技术的前沿发展,在学习和吸收有关宽幅合成孔径雷达干涉测量书籍、专著和论文等成果的基础上,对合成孔径雷达干涉测量的理论和应用进行了认真研究,并积累了一些经验,取得了一定成果,本书是对这些经验和成果的全面总结。在本书的编写过程中,笔者还参考了大量相关文献资料,吸取了国内外最新研究成果,力争在加强星载宽幅合成孔径雷达干涉基本理论和方法研究的同时,反映其研究应用的新发展,为关注和从事星载宽幅合成孔径雷达干涉测量研究的青年学者和研究生们提供学习参考资料。

本书共分为7章,第1章简要地介绍了 SAR 和星载宽幅干涉测量的发展历

史、研究现状及几个典型的雷达卫星系统;第2章叙述了合成孔径雷达和宽幅SAR成像原理,并在此基础上分析了其关键成像参数和性能,研究了TCN坐标系中的宽幅合成孔径雷达干涉测量数据学模型及其干涉测量流程,并与条带干涉测量进行了异同点的比较;第3章针对宽幅SAR影像的拼接方法进行了研究,分析了条带SAR图像和Burst图像的频谱特性,研究了全孔径拼接法和SIFFT拼接法,介绍了单Burst干涉图生成流程,研究了用于Burst干涉图拼接的时域拼接法、相关拼接法和综合法,最后针对子条带间的特性,提出了基于配准加权的子条带拼接法,并用实验进行了验证分析;第4章研究了宽幅SAR干涉去相干性和测量误差处理分析,比较了与条带干涉测量去相干性的异同点,研究了ScanSAR干涉测量与条带干涉测量不同的几何去相干和扫描同步去相干,研究了基线误差和DEM误差影响宽幅干涉测量结果的数学模型,以巴姆地震为例对其进行了验证分析,最后研究了大地水准面差距对宽幅干涉测量结果的影响规律和程度,阐述了基于EGM-96模型计算大地水准面差距的方法;第5章介绍了ScanSAR干涉测量中的大气影响研究;第6章重点讨论了多模式的合成雷达干涉测量和多源多模式的形变场融合;第7章以伊朗巴姆地震、汶川地震和于田地震为例,对这些地震利用合成孔径干涉测量获取相应的形变场,并进行了分析研究。

在本书出版之际,感谢香港中文大学林珏教授在百忙之中为本书欣然作序,感谢香港中文大学博士后张瑞博士为本书撰写三维形变场重构部分的内容;感谢测绘出版社的编辑同志为本书出版的积极支持;感谢国家自然科学基金、江苏省六大人才高峰项目、江苏省青蓝工程及高校优秀中青年教师和校长境外研修计划、江苏高校优势学科建设工程项目、江苏省“333高层次人才培养”工程项目、连云港市第五期“521高层次人才培养工程”项目、江苏硕士点增点学科、江苏省测绘局测绘科研基金和淮海工学院专著基金的资助。

由于星载宽幅合成孔径雷达干涉测量是一个多学科相互交叉、渗透的新兴领域,涉及对地观测、无线电技术、影像处理与模式识别、现代数据处理技术、测绘科学等诸多学科的相关知识,加之时间和作者水平有限,书中难免有错误和不足之处,敬请读者不吝指正。

作者

2015年9月于连云港

# 目 录

第 1 章 绪 论	1
§ 1.1 引 言	1
§ 1.2 合成孔径雷达及其干涉技术的研究现状	3
§ 1.3 宽幅 SAR 干涉测量技术国内外研究现状	9
§ 1.4 具有宽幅模式的 SAR 卫星及相关参数	13
§ 1.5 小 结	20
第 2 章 宽幅合成孔径雷达成像与干涉原理	21
§ 2.1 概 述	21
§ 2.2 合成孔径雷达基本原理	21
§ 2.3 宽幅合成孔径雷达基本理论	28
§ 2.4 宽幅合成孔径雷达干涉测量	37
§ 2.5 小 结	42
第 3 章 星载宽幅合成孔径雷达影像拼接	43
§ 3.1 概 述	43
§ 3.2 宽幅 SAR 零级数据拼接	43
§ 3.3 单 Burst 干涉图生成与拼接	48
§ 3.4 子条带干涉图拼接	50
§ 3.5 小 结	54
第 4 章 宽幅合成孔径雷达干涉去相干性与误差分析	55
§ 4.1 概 述	55
§ 4.2 宽幅合成孔径雷达干涉的去相干性分析	55
§ 4.3 宽幅 SAR 干涉测量误差分析	61
§ 4.4 大地水准面差距的影响及改正	62
§ 4.5 实 验	65
§ 4.6 小 结	69



第 5 章 宽幅 SAR 干涉图大气效应校正 .....	70
§ 5.1 概 述 .....	70
§ 5.2 宽幅 SAR 干涉测量中的大气影响分析 .....	70
§ 5.3 基于外部数据的大气改正方法 .....	72
§ 5.4 基于非外部数据的大气改正方法 .....	78
§ 5.5 小 结 .....	85
第 6 章 多源多模式雷达干涉与融合 .....	86
§ 6.1 概 述 .....	86
§ 6.2 多模式干涉测量 .....	86
§ 6.3 基于多源多分辨率雷达干涉的形变场融合 .....	93
§ 6.4 小 结 .....	103
第 7 章 宽幅 SAR 干涉监测地震形变实例 .....	104
§ 7.1 伊朗巴姆地区地震 .....	104
§ 7.2 四川汶川地震 .....	110
§ 7.3 新疆于田地震 .....	121
§ 7.4 小 结 .....	128
参考文献 .....	129
附录 英文缩略语对照表 .....	137

# CONTENTS

<b>Chapter 1</b>	<b>Introduction</b>	1
§ 1.1	Foreword	1
§ 1.2	Research Status of Synthetic Aperture Radar and Interferometry	3
§ 1.3	Research Status of Wide Swath Mode Interferometry at Home and Abroad	9
§ 1.4	Satellites and the Related Parameters with ScanSAR Mode	13
§ 1.5	Summary	20
<b>Chapter 2</b>	<b>Interference Principle of ScanSAR Imaging</b>	21
§ 2.1	Introduction	21
§ 2.2	Basic Principle of Synthetic Aperture Radar	21
§ 2.3	Basic Theory of ScanSAR	28
§ 2.4	ScanSAR Interferometry	37
§ 2.5	Summary	42
<b>Chapter 3</b>	<b>Mosaic of ScanSAR Image</b>	43
§ 3.1	Introduction	43
§ 3.2	Mosaic of ScanSAR Raw Data	43
§ 3.3	Production and Mosaic of Burst Interferogram	48
§ 3.4	Mosaic of Sub Swath Interferogram	50
§ 3.5	Summary	54
<b>Chapter 4</b>	<b>Decoherence and Error Analysis of ScanSAR Interferometry</b>	55
§ 4.1	Introduction	55
§ 4.2	Decoherence Analysis of ScanSAR Interferometry	55
§ 4.3	Error Analysis of ScanSAR Interferometry	61
§ 4.4	Effects and Correction of Geoid Difference	62
§ 4.5	Experiments	65
§ 4.6	Summary	69

<b>Chapter 5</b>	<b>Atmospheric Correction of ScanSAR Interferogram</b>	70
§ 5.1	Introduction	70
§ 5.2	Atmospheric Influence Analysis of ScanSAR Interferometry	70
§ 5.3	Atmospheric Correction Methods Based on External Data	72
§ 5.4	Atmospheric Correction Methods Based on Non External Data	78
§ 5.5	Summary	85
<b>Chapter 6</b>	<b>Multi-mode Radar Interferometry and Fusion</b>	86
§ 6.1	Introduction	86
§ 6.2	Multi-mode Radar Interferometry	86
§ 6.3	Deformation Field Fusion Based on Multi-mode Radar Interferometry	93
§ 6.4	Summary	103
<b>Chapter 7</b>	<b>Examples of Earthquake Deformation Using ScanSAR Interferometry</b>	104
§ 7.1	Bam Earthquake	104
§ 7.2	Wenchuan Earthquake	110
§ 7.3	Xinjiang Yutian Earthquake	121
§ 7.4	Summary	128
<b>References</b>		129
<b>Appendix</b>	<b>English Abbreviations</b>	137

# 第1章 绪论

## § 1.1 引言

作为一种新兴的空间大地测量技术,合成孔径雷达干涉测量技术(interferometric synthetic aperture radar, InSAR)能够获取高精度、高分辨率的地表几何信息,且无须提供地面控制点,相比于其他大地测量手段具有无法代替的作用,现已成为极具发展潜力的微波遥感对地观测技术。InSAR技术利用微波监测地表目标,通过机载或星载方式采集地面各种人工或自然目标反射的微波信号,经处理分析后,提取地表信息,揭示其几何性质及变化规律。在测绘学中,合成孔径雷达干涉测量技术能生成较高精度的数字高程模型及相关的地图测绘产品,而在合成孔径雷达干涉测量基础上发展起来的差分合成孔径雷达干涉测量(differential InSAR, DInSAR)则是根据 SAR 单视复数据提供的相位信息,以厘米级甚至毫米级精度监测地球表面的形变,尤其对地表垂直形变极其敏感,且能大规模监测几天甚至几年的形变场信息。全球导航卫星系统(global navigation satellite system, GNSS)、卫星激光测距(satellite laser ranging, SLR)、甚长基线干涉测量(very long baseline interferometry, VLBI)技术及传统大地测量(如精密水准测量)是监测地表形变的主要大地测量方法,虽然其观测结果具有量化清晰、精度高、时间尺度一致、动力学意义明确等优点,但利用离散结果求解形变场与应变场的空间分布时,需进行拟合或内插,故导致了形变高频部分的去除,即忽略了形变的精细特征,显然,这些监测方法的不足可由合成孔径雷达干涉测量技术克服。

到目前为止,合成孔径雷达卫星主要具有条带和宽幅两种模式,其观测地表原理如图 1.1 所示,其中图 1.1(左)是宽幅模式,图 1.1(右)是条带模式。条带模式又称 Stripmap 模式,或称 IM 模式(image mode),其相应的干涉测量称为条带干涉测量。Stripmap 干涉测量或 IM 模式干涉测量(相比于星载宽幅合成孔径雷达干涉测量,其被称为传统合成孔径雷达干涉测量),其差分干涉测量的结果具有监测精度高、形变场连续和分辨率较高的优点,能获得反映地表形变的更多信息,现在已成功应用于各种形变监测。

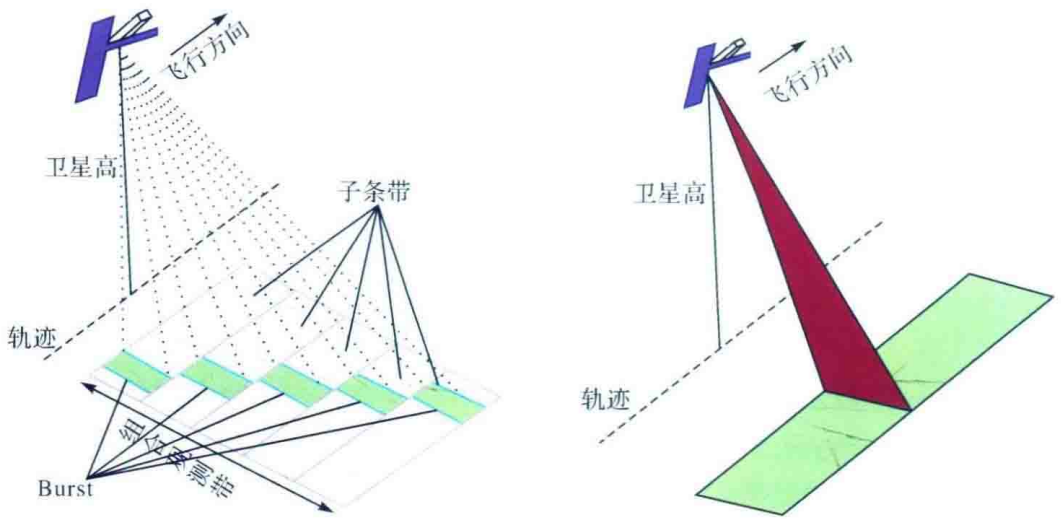


图 1.1 宽幅和条带模式比较

尽管传统条带干涉测量技术已取得相当大的进步,可有效应用于各种地表形变监测,但其覆盖范围较小,难以获取宽域的地壳形变,如 2008 年 5 月发生的汶川地震,其破裂带约达 300 km,如利用 ALOS 卫星的 IM 数据来获取其形变场,则需 6 个轨道数据(温扬茂,2009)拼接才能得到其形变场,这样无疑会带来拼接误差,另外断层形变,特别是震间形变(震间应变积累)通常分布在断层附近 50~150 km,甚至更宽的区域,此时条带干涉测量技术无能为力。2010 年年底欧洲空间局对 ENVISAT 卫星模式进行调整而不能进行干涉,其他高分辨率卫星如 TerraSAR-X 和 COSMO-SkyMed 卫星的 IM 模式数据覆盖范围更小,见表 1.1。从表中可以看出,高分辨率卫星条带模式幅宽仅数十千米,故在板块运动和地球动力学研究应用中 IM 模式合成孔径干涉测量技术受到了限制。

表 1.1 SAR 卫星的条带和宽幅模式影像幅宽比较

单位:km

卫星	条带影像幅宽	宽幅影像幅宽
ENVISAT	100	405
RadarSat	100	500
TerraSAR	30	100
COSMOS	40	100
ALOS	70	350
Sentinel-1(计划)	80	250

宽幅模式又称 WSM 模式(wide swath mode)、ScanSAR 模式、Burst 模式和扫描模式,其相应的干涉测量称为宽幅 SAR 干涉测量(wide swath synthetic aperture radar interferometry, WSInSAR)、ScanSAR 干涉测量(scanning interferometric synthetic aperture radar, SInSAR)、Burst 干涉测量。宽幅模式是

一种新的雷达成像模式,其特点是在相邻几个子测绘带之间共享合成孔径时间,以降低方位分辨率为代价,从而实现测绘带宽度的增大。它是在若干个不同天线波束之间合理分配成像时间,对每个波束位置所能接收到的 Burst 信号进行处理,形成相应子观测带内的合成孔径图像,进而得到全部组合观测带的连续雷达图像。ScanSAR 采用多个波束扫描的方式进行成像时,在每个波束上,天线都要驻留固定的时间来发射和接收一系列的脉冲串,这一系列脉冲串即称为 Burst,相应的数据块称为 Burst 数据或 Burst 图像,如图 1.1 所示。现在许多卫星具有宽幅模式,如 ENVISAT、ALOS、TerraSAR-X、COSMOS-SkyMed 和 Sentinel-1 等 SAR 卫星。在利用条带模式对研究区域监测的同时,可利用 ScanSAR 模式进行监测,例如 ALOS 卫星在降轨时以宽幅模式监测,在升轨时以条带模式监测。首先,与条带模式相比,宽幅 SAR 模式最显著的优点是有较大的幅宽,见表 1.1,从表中可以看出,每颗合成孔径雷达卫星宽幅 SAR 模式幅宽是 IM 模式的 3~4 倍,利用这样的 ScanSAR 数据可得到宽域形变场。以汶川地震为例,尽管其断裂带长度约为 300 km,但是利用两景数据差分即可得其形变场,且其形变场在空间上连续,其监测精度与 IM 模式相当;其次,由于其干涉图覆盖范围大,基线误差在干涉图中将发生累积效应,故易利用相应的方法去除或降低其影响;最后,ScanSAR 模式同一研究区域的重访时间短,易发现缓慢变形。显然,为了保证采样间隔短和获取宽域且连续的形变场,基于星载宽幅 SAR 数据的合成孔径雷达干涉测量技术是值得深入研究。

利用星载宽幅合成孔径雷达干涉测量技术来监测地表形变,需要讨论如下关键问题:①建立并完善宽幅 SAR 干涉的数学模型,深入分析其干涉形成前提条件、关键误差和大地水准面差距影响程度及消除方法;②图像拼接,主要包括 Burst 间拼接和子条带拼接;③大气效应削弱方法;④宽幅合成孔径雷达干涉图时间序列分析方法。

## § 1.2 合成孔径雷达及其干涉技术的研究现状

### 1.2.1 SAR 的历史与研究现状

合成孔径雷达就是利用雷达与目标的相对运动,把尺寸较小的真实天线孔径用数据处理的方法合成一个较大的等效天线孔径的雷达,其特点是分辨率高、能全天候工作、能有效地识别伪装和穿透掩盖物。所得到的高方位分辨率,相当于一个大孔径天线所能提供的方位分辨率。高分辨率在这里包含两方面的含义,即高的方位向分辨率和足够高的距离向分辨率。它采用多普勒频移理论和雷达相干理论为基础的合成孔径技术来提高雷达的方位向分辨率;而距离向分辨率的提高则通

过脉冲压缩技术来实现(巴顿,2007)。

装载在飞机上或空间飞行器上的雷达有几种不同的工作模式,最常见的是正侧视模式,称为合成孔径侧视雷达。此外,还有斜视模式、多普勒波束锐化模式和定点照射模式等。如果雷达保持相对静止,使目标运动成像,则成为逆合成孔径雷达,也称距离-多普勒成像系统。合成孔径雷达在军事侦察、测绘、火控、制导,以及环境遥感和资源勘探等方面有广泛用途(保铮等,2005)。

雷达诞生于“二战”时期,而合成孔径雷达的思想则出现在20世纪中期,美国古德伊尔航空公司的 Willey 第一次发现侧视雷达通过利用回波信号中的多普勒频移可以改善其方位分辨率,这个里程碑式的发现标志着现在被称为合成孔径雷达的技术诞生了。与此同时伊利诺斯大学的 Sherwin 等人也独立地进行了实验,并于1953年7月得到了第一张非聚焦型合成孔径雷达图像。1953年夏,在美国密歇根(Michigan)大学举办的暑期讨论会上许多学者提出了利用载机运动可将雷达的真实天线综合成大尺寸的线性天线阵列的新概念——合成孔径,在会上还制订了一个 SAR 发展计划,这个计划导致了第一个 SAR 实验系统的诞生。1957年8月密歇根大学与美国军方合作研究的 SAR 实验系统成功地获得了第一幅全聚焦 SAR 图像,宣告了 SAR 技术从理论走向实践的成功(黄倩,2006)。

合成孔径雷达从其载体上可以分为机载 SAR 和星载 SAR。机载 SAR 经过几十年的发展已经有很多种类型的机载 SAR,如德国的 E-SAR、丹麦的 KRAS 等。E-SAR 是德国宇航院无线电技术所从1980年开始研制的 L/C 波段机载 SAR 系统。该系统的分辨率可达 2 m 以下,并能进行实时成像。E-SAR 系统已被广泛用于科学试验研究。丹麦的 KRAS 系统工作在 C 波段,具有可变入射角、多种测绘带宽和一定的分辨率。该系统最高分辨率也可达到 2 m(保铮等,2005)。另外,机载 SAR 还广泛应用于军事方面,如美国休斯公司为“环球鹰”高空无人侦察机研制的“海萨”合成孔径雷达,其条带模式分辨率为 6 m,聚束模式分辨率达 1.8 m。近年来,美国桑迪亚国家实验室为美国 General Atomics Aeronautic System 公司制造的“I-Gnat”无人侦察机研制的“Lynx”合成孔径雷达,其分辨率达 10 cm,工作在 Ku 波段。

与机载 SAR 相比,星载 SAR 有更宽的成像范围。星载 SAR 起源于20世纪70年代末,1978年5月美国宇航局(NASA)发射了海洋一号卫星(SeaSat-A),这是首次在卫星上装载合成孔径雷达,对地球表面 1 亿  $\text{km}^2$  的面积进行了测绘,标志着 SAR 已成功地进入了空间领域。此后,星载 SAR 技术得到迅速的发展,一系列星载 SAR 先后升空。除 SeaSat-A 外,NASA 还发射了航天飞机成像雷达 SIR-A、SIR-B 和 SIR-C/X-SAR。前苏联也于1991年3月发射了 ALMAZ-1 星载 SAR,欧洲空间局于1991年7月发射了 ERS-1,日本于1992年2月发射了 JERS,加拿大于1995年初发射了 RadarSat 等,到21世纪的前5年,一些国家或国家集

团如俄罗斯、日本、加拿大、印度、欧共体和美国的机构都有进一步部署发射 SAR 传感器。星载 SAR 系统具有数据量大、测绘范围广的特点,更适合对全球进行监测(黄倩,2006)。

在各种 SAR 系统不断更新换代的同时,SAR 成像算法也一直是信号处理领域中的热点。距离多普勒(range-Doppler,R-D)算法是 SAR 成像处理中最直观、最基本的经典方法,于 20 世纪 80 年代初首先提出(保铮等,2005)。该算法采用内插的方法在 R-D 域进行距离徙动校正(range cell migration correction,RCMC)。由于徙动轨迹的突变性,内插中所采用的核函数应随距离单元发生变化。随着方位分辨率的提高及斜视角的增大,信号在距离向会出现一个与多普勒频率和距离有关的新的调频分量并引起距离向散焦。为了消除该调频分量,提出了二次距离压缩(second range compression,SRC)的概念。距离多普勒算法的主要缺点在于插值运算会增加计算量,并使 SAR 图像相位保真度下降。但只要参数设计得当,采用该算法仍可获得良好的聚焦效果(黄倩,2006),因此直到今天,R-D 算法仍然被广泛采用。CS(chirp scaling)算法的基本思想就是消除该尺度变化,从而使平移得以顺利实现,充分利用了发射信号为线性调频的性质。首先,在多普勒域对徙动轨迹进行微调,消除其突变性,使不同距离单元上的徙动轨迹与参考距离上的一致;然后,在距离频域上完成对徙动轨迹的统一校正。该算法完全避免了插值运算,并自然考虑到了二次距离压缩随多普勒频率的变化,但仍然无法解决更大斜视角时 SRC 随距离变化的问题。 $\omega\kappa$  算法又称波数域算法,算法中,距离向压缩之后经二维傅里叶变换,信号进入二维频域。该算法通过 Stolt 变换,将二维频域内均匀采样的信号转换为距离及方位波数域( $\omega\kappa$  域)内均匀采样的信号,而地面散射场与  $\omega\kappa$  域内的信号为傅里叶变换对,因而,通过二维傅里叶变换可直接完成对地面散射场的重建。理论上, $\omega\kappa$  算法未采用 R-D 算法和 Chirp Scaling 算法中的近似假设,可以完全校正突变的距离徙动和 SRC,是对 SAR 信号的最优处理。但是,算法的核心——Stolt 变换,必须通过内插实现,而成像质量对于频域内插精度十分敏感(郭华东,2000;保铮等,2005)。

### 1.2.2 InSAR 的发展历史及研究现状

InSAR 是一个嵌套式的英文缩写,即 radio detection and ranging (Radar,无线电探测与测距,简称雷达),synthetic aperture radar (SAR,合成孔径雷达),SAR interferometry (InSAR,合成孔径雷达干涉)。这说明了 InSAR 的发展先后经历了“地面探测雷达—成像合成孔径雷达—合成孔径雷达干涉”的过程,同时也说明了 InSAR 是合成孔径雷达遥感成像与电磁波干涉两大技术的融合(刘国祥,2004)。

InSAR 技术是由雷达影像复数据作为信息源,利用这些相位信息提取地表三



维信息的一项技术。该技术诞生于 20 世纪 60 年代末,1969 年合成孔径雷达干涉测量技术首次应用于对金星观测,目的是用来分离来自金星南、北半球的雷达模糊回波;1972 年利用合成孔径雷达干涉测量技术获得了月球表面的地形数据,高程精度优于 500 m(张诗玉,2009)。

1974 年,美国科学家提出用干涉合成孔径雷达进行地形测绘的原理和技术,首次演示了 InSAR 用于地形测量的可行性,并制作了第一台用于三维地形测绘的机载干涉合成孔径雷达。该雷达采用单轨道双天线方式,进行光学干涉处理来获取地面的高度信息,属于模拟型的干涉合成孔径雷达。该研究成果对 SAR 应用的发展起着巨大的推动作用,从此人们对合成孔径雷达干涉测量进行了广泛的研究(焦明连等,2008)。

美国的 SeaSat-A SAR 系统的发射,使 InSAR 的研究有了生机。1978 年 SeaSat 卫星在空间飞行 100 天,首次从空间获得地球表面雷达干涉测量数据,为开展空间 InSAR 技术应用研究提供了可能。

20 世纪 80 年代,一批学者对 InSAR 成像的理论与技术进行了进一步的研究(焦明连等,2008)。1986 年,美国加州工程技术学院的喷气推动试验室(Jet Propulsion Laboratory, JPL)的 Goldstein、Zebker 等给出了用 InSAR 观测数据进行地形成像的结果,并描述了 InSAR 处理的过程。1988 年, Gabriel 和 Goldstein 发表了他们用 SIR-B 的数据验证了单通道 SAR 形成干涉有效性的论文,给出了 InSAR 处理后的干涉图像,并对 InSAR 处理中的影像配准的重要性及其方法做了描述。同年, Goldstein 等人针对 InSAR 处理中相位展开问题,研究了一种抗噪声能力较好的相位展开方法。

20 世纪 90 年代,许多国家(如美国、加拿大、德国、法国等)的科研人员都在 InSAR 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,并取得了重要的进展(焦明连等,2008)。1990 年 F.K.Li 和 Goldstein 对多基线星载 InSAR 的回波信号的特征及高度误差进行了系统分析,并提出了基线解相关的概念。E.Rodriguez 和 J.M.Martin 在更为一般的情况下,对 InSAR 回波信号的特征、干涉相位的最优估计和系统优化设计进行了更为深入的研究。1991 年德国地学研究中心有 14 个反射器成功地进行了干涉雷达精确测量位移的试验研究。法国 Didier Massonnet 于 1992 年用干涉雷达技术研究了同年在加利福尼亚发生的地震,取得了突出的成果,成为应用干涉雷达技术研究地面位移最早的成功范例。1991 年, NASA/JPL 采用带有 GPS 的机载干涉 SAR 系统(TOPSAR)对  $6.5 \text{ km} \times 30 \text{ km}$  的区域进行了测试,在确定绝对相位时采用了多视技术(距离向因素为 4,方位向因素为 32),最后获得了该地区水平误差为 10 m 的地形图。所获地形结果与 DEM 的比较结果表明:在平坦地区有 2 m 的均方根测量偏差,山区有 5~6 m 的均方根偏差。在 1995 年举行的国际雷达会议上, NASA/JPL 展示了