空间信息获取与处理前沿技术丛书

高效高精度合成孔径雷达干涉相位滤波技术

汪 洋 黄海风 董 臻◎著



科学出版社

需要全本请访问 www.ertongbook.com

空间信息获取与处理前沿技术丛书

高效高精度合成孔径雷达干涉相位滤波技术

汪 洋 黄海风 董 臻 著

科学出版社
北京

内 容 简 介

本书系统地介绍合成孔径雷达干涉相位滤波技术。首先，简要讲述InSAR系统发展历史、干涉相位滤波研究现状及滤波原理。其次，详细介绍干涉相位滤波特点、现有主要算法和滤波结果评价指标。再次，提出4个定量评价指标，用于对滤波结果进行全面的评价和比较。最后，重点论述3种高效高精度滤波算法。书中采用大量仿真和实测数据对算法性能进行展示和对比。

本书是作者及课题组成员近年来在合成孔径雷达干涉相位滤波领域的最新研究成果总结，可供遥感测绘、图像处理、地质等学科领域的研究人员和工程技术人员参考使用，也可作为高等院校相关专业的教学参考资料。

图书在版编目(CIP)数据

高效高精度合成孔径雷达干涉相位滤波技术/汪洋，黄海风，董臻著.
—北京：科学出版社，2019.6
(空间信息获取与处理前沿技术丛书)
ISBN 978-7-03-060621-1

Ⅰ.①高… Ⅱ.①汪… ②黄… ③董… Ⅲ.①合成孔径雷达-滤波技术
Ⅳ.①TN958

中国版本图书馆CIP数据核字(2019)第034990号

责任编辑：张艳芬 罗 娟 / 责任校对：王萌萌
责任印制：吴兆东 / 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

北京九州逐驰传媒文化有限公司 印刷
科学出版社发行 各地新华书店经销
*
2019年6月第 一 版 开本：720×1000 B5
2019年6月第一次印刷 印张：14 1/4
字数：273 000

定价：88.00元

(如有印装质量问题，我社负责调换)

《空间信息获取与处理前沿技术丛书》编委会

主　编：黎　湘

副主编：王宏强　董　臻　郑　键　刘永祥

编　委：高勋章　魏玺章　何　峰　邓　彬

秦玉亮　程永强　李彦鹏　黄海风

刘　振

《空间信息获取与处理前沿技术丛书》序

进入21世纪，世界各大国加紧发展空间攻防武器装备，空间作战被提到了国家军事发展战略的高度，太空已成为国际军事竞争的战略制高点。作为空间攻防的重要支撑，同时伴随着我国在载人航天、高分专项、嫦娥探月、北斗导航等重大航天工程取得的成功，空间信息获取与处理技术也得到了蓬勃发展，受到国家高度重视。空间信息获取与处理技术在科学内涵上属于空间科学技术与电子信息技术交叉的学科，为各种航天装备的开发和建设提供支持。

国防科技大学是我国国防科技自主创新的高地。为适应空间攻防国家重大战略需求和学科发展要求，2004年正式成立了空间电子技术研究所。经过十多年的发展，目前已经成长为相关领域研究的中坚力量，取得了一大批研究成果，在国内电子信息领域形成了一定的影响力。为总结和展示研究所多年的研究成果，也为有志于投身空间信息技术事业的研究人员提供一套有用的参考书，我们组织撰写了《空间信息获取与处理前沿技术丛书》，这对推动我国空间信息获取与处理技术发展无疑具有极大的裨益。

空间信息领域涉及信息、电子、雷达、轨道、测绘等诸多学科，其新理论、新方法与新技术层出不穷。作者结合严谨的理论推导和丰富的应用实例对各个专题进行了深入阐述，丛书概念清晰，前沿性强，图文并茂，文献丰富，凝结了各位作者多年深耕结出的累累硕果。

相信丛书的出版能为广大读者带来一场学术盛宴，成为我国空间信息技术发展史上的一道风景和独特印记。丛书的出版得到了国防科技大学和科学出版社的大力支持，各位作者在繁忙教学科研工作中高质量地完成书稿，特向他们表示深深的谢意。

2019年1月

需要全本请访问 www.ertongbook.com

前　言

合成孔径雷达干涉测量技术作为一种主动的、具有穿透性的微波遥感手段，能够全天时、全天候获取高精度的地球物理参数，如数字高程模型、地表形变和沉降、冰川运动等。干涉相位是整个合成孔径雷达干涉处理中最重要的物理量，其质量将极大地影响获取地球物理参数的精度。然而，受各种去相关因素的影响，干涉相位中总是存在噪声，严重影响后续的处理，必须进行滤波处理。二十多年来，科研人员提出了很多干涉相位滤波算法，但这些算法很难兼顾滤波精度和算法效率。本书旨在对现有主要干涉相位滤波算法进行归纳介绍，然后就高效高精度干涉相位滤波算法进行研究。

本书是作者及课题组成员在多年研究基础上，借鉴国内外最新研究工作撰写而成的，系统而全面地阐述合成孔径雷达干涉相位滤波的最新研究成果。全书共6章。第1章总结国内外主要的机载、星载合成孔径雷达干涉系统和干涉相位滤波算法的发展现状，介绍本书的主要内容。第2章介绍合成孔径雷达干涉的几何原理和全流程数据处理的主要步骤，分析干涉相位的统计特性和干涉相位滤波的原理。第3章总结干涉相位滤波的特点，介绍主要干涉相位滤波算法和滤波结果评价方法，提出4个滤波结果评价指标。第4章分析基于块局部最优维纳算法不适用于干涉相位滤波的原因，提出改进措施，得到改进的基于块局部最优维纳算法。第5章分析现有基于“分而治之”策略干涉相位滤波算法存在的问题，提出基于Twicing迭代滤波的自适应空频干涉相位滤波算法。第6章结合自适应空频干涉相位滤波算法和现有频域迭代干涉相位滤波算法，提出基于Twicing迭代滤波的自适应频域迭代干涉相位滤波算法。

本书具有以下特点：第一，对干涉相位滤波的特点进行总结，使读者对干涉相位滤波有一个全面的了解；第二，对现有主要干涉相位滤波算法的基本原理、算法步骤、算法缺点和算法本质等进行详细介绍，便于读者掌握干涉相位滤波的最新技术和发展趋势；第三，并未简单地使用“残差点越少越好”的准则来评价滤波结果，而是对滤波结果进行全面、综合的分析，使读者对滤波结果的好坏和算法的性能有一个全面了解。

在撰写本书过程中，武汉大学的廖明生教授，西安电子科技大学的廖桂生教授，中国电子科技集团公司第三十八研究所的鲁加国教授，中南大学的李志伟教授，国防科技大学的朱炬波教授、粟毅教授、常文革教授、王宏强研究员等都对本书相关研究工作提出过指导意见；国防科技大学的张永胜副研究员、余安喜副教授、

何峰副研究员、孙造宇讲师、金光虎讲师、何志华讲师、张启雷讲师对书稿提供了修改意见；研究生秦立龙、李福友、罗慧、易天柱、计一飞、刘奇、江魏好、杜思尧、吴鹏、黄志伟、朱小祥、郑涵之、杨博文、侯振宇对本书的初稿进行了校对。在此一并表示感谢。

吴曼青研究员对本书相关研究内容进行了指导，在此表示衷心感谢。

本书的研究工作是在国家973项目、国家自然科学基金重大研究计划项目、国家自然科学基金面上项目、国家高分辨率对地观测系统重大专项等的资助下完成的。本书所采用的数据仿真工具箱由代尔夫特理工大学提供，TerraSAR-X数据由德国宇航中心和空中客车公司提供，RADARSAT-2数据由加拿大航天局和加拿大麦克唐纳·迪特维利联合有限公司提供，Envisat-ASAR数据由欧洲航天局和地质灾害观测站与自然实验室提供，SIR-C数据由美国喷气推进实验室提供，在此表示感谢。

限于作者水平和学识，书中难免存在不当之处，恳请读者批评指正。

汪　洋

2019年1月

目　录

《空间信息获取与处理前沿技术丛书》序
前言
第 1 章　绪论 …… 1
1.1　引言 …… 1
1.2　国内外研究现状 …… 3
1.2.1　InSAR 系统发展现状 …… 3
1.2.2　干涉相位滤波的发展现状 …… 20
1.3　本书内容安排 …… 26
参考文献 …… 28
第 2 章　InSAR 原理和数据统计特性 …… 41
2.1　引言 …… 41
2.2　InSAR 原理和数据处理流程 …… 41
2.2.1　InSAR 原理 …… 41
2.2.2　InSAR 数据处理流程 …… 45
2.3　InSAR 数据统计特性 …… 48
2.3.1　SAR 信号统计特性及去相干源 …… 48
2.3.2　干涉相位的统计特性 …… 50
2.4　本章小结 …… 53
参考文献 …… 53
第 3 章　干涉相位滤波特点、算法及评价指标 …… 55
3.1　引言 …… 55
3.2　干涉相位滤波的特点 …… 55
3.3　现有干涉相位滤波算法 …… 61
3.3.1　空域滤波算法 …… 62
3.3.2　变换域滤波算法 …… 79
3.3.3　基于“分而治之”策略的滤波算法 …… 103
3.4　评价指标 …… 110
3.4.1　主观评价指标 …… 110
3.4.2　客观评价指标 …… 111
3.5　实验与分析 …… 120

3.5.1 实验一 …… 120
3.5.2 实验二 …… 123
3.6 本章小结 …… 128
参考文献 …… 128
第 4 章 MPLOW 干涉相位滤波算法 …… 135
4.1 引言 …… 135
4.2 PLOW 算法 …… 136
4.3 MPLOW 干涉相位滤波算法 …… 141
4.4 实验与分析 …… 146
4.4.1 仿真数据 …… 147
4.4.2 实测数据 …… 156
4.5 本章小结 …… 163
参考文献 …… 163
第 5 章 ASFIPF 算法 …… 166
5.1 引言 …… 166
5.2 现有算法及 ASFIPF 算法 …… 167
5.2.1 现有算法 …… 167
5.2.2 ASFIPF 算法 …… 168
5.3 ASFIPF 算法参数的确定 …… 173
5.4 实验与分析 …… 174
5.4.1 仿真数据 …… 175
5.4.2 实测数据 …… 185
5.5 本章小结 …… 192
参考文献 …… 193
第 6 章 AIPFFD 算法 …… 195
6.1 引言 …… 195
6.2 AIPFFD 算法 …… 195
6.3 AIPFFD 算法参数的确定 …… 200
6.4 实验与分析 …… 200
6.4.1 仿真数据 …… 201
6.4.2 实测数据 …… 210
6.5 本章小结 …… 216
参考文献 …… 217

第1章 绪 论

1.1 引 言

1951年，数学家 Wiley 在给美国固特异飞机公司(Goodyear Aircraft Co.)的一份报告中首次提出了多普勒波束锐化[1]的技术。该技术通过对雷达回波信号的多普勒频移进行处理，能够改善与波束垂直方向上(方位向)的分辨率，这也是合成孔径雷达(synthetic aperture radar，SAR)的由来。与此同时，伊利诺伊大学控制系统实验室独立地用非相参雷达进行实验，证实多普勒波束锐化技术的正确性和可行性。紧接着，以多普勒无照耀搜索雷达(Doppler unbeamed search radar，DOUSER)[1]为首的一系列机载 SAR 实验相继展开。然而，受观测区域大小的限制，所取得的成果并没有突显出 SAR 这种新型传感器的优势。1978年，美国国家航空航天局(National Aeronautics and Space Administration，NASA)将第一个载有 SAR 的海洋卫星 SEASAT 送入太空，开启了人类从太空观测地球的新纪元。尽管由于电源系统短路只运行了105天，但 SEASAT 在42h内采集的数据超过过去100年间靠船舶累计采集的海洋信息，展示了 SAR 系统大面积、快速获取数据的能力，并极大地激励了 SAR 相关技术的研究和系统的研制[2~7]。

SAR 获取的图像数据是三维场景向二维平面雷达坐标的投影，场景的高程信息无法在图像中体现出来。为了提取场景的高程信息，科研人员将 SAR 技术和射电天文干涉技术相结合，形成合成孔径雷达干涉(synthetic aperture radar interferometry，InSAR)技术。该技术自1969年和1972年用于金星[8]和月球[9,10]表面测绘以来，已经经历了超过40年的发展，其间很多机载和星载 SAR 系统研制成功并投入使用，它们为 InSAR 技术的发展成熟提供了大量宝贵的数据和经验，使得 InSAR 技术的应用范围从当初的数字高程模型(digital elevation model，DEM)生成[11]，扩展到由地震、火山喷发、地面沉降、山体滑坡所造成的形变的测量[12~23]，以及冰川运动和建筑物形变的监测[24~27]。InSAR 技术已经成为继可见光和近红外之后遥感领域不可或缺的重要手段。

与基于 SAR 数据幅度或者强度信息的技术不同，InSAR 是以 SAR 图像对的相位差即干涉相位为基础，进行一系列处理进而得到 DEM 和地表形变信息的技术，因此干涉相位的质量将直接影响产品的精度。然而，受制于相干成像和 InSAR 原理，多种去相干因素[11]会降低干涉相位的质量，具体表现为相位噪声，这些噪声

会导致大量的残差点[28]，严重影响后续相位解缠的精度和速度。为了降低相位噪声的影响，一方面，科研人员通过采用高精度的硬件和合理的编队设计来提高干涉图像对的相干性；另一方面，通过干涉相位滤波算法来滤除相位噪声。

和光学图像滤波算法一样，对干涉相位滤波算法性能的追求主要是滤波精度和算法效率两方面。对干涉相位滤波算法的研究主要集中在最近二十年，其间科研人员提出的算法滤波精度越来越高，但效率越来越低。早期的干涉相位滤波算法，如多视(multilooking)滤波或者盒式(boxcar)滤波(两者的核心均是均值滤波)，算法效率很高，非常适合海量数据的快速处理。因此，目前已经完成的两次全球地形测绘任务——航天飞机雷达地形测绘任务(shuttle radar topography mission，SRTM)[29]和地形测绘附加 TanDEM-X(TerraSAR-X add-on for digital elevation measurement)任务[30]中，仍然将多视作为其干涉相位滤波算法。然而，在滤波精度方面，早期的滤波算法还有很大的提升空间，一个极具说服力的例子就是 TanDEM-X 的高分辨率 DEM(high-resolution DEM，HDEM)[31,32]。德国宇航中心(Deutsches Zentrum für Luft-und Raumfahrt，DLR)的科研人员利用盒式滤波处理 TanDEM-X 的数据得到 WorldDEM[33,34]，精度为高分辨率地形信息(high resolution terrain information)HRTI-3 标准：分辨率 12m × 12m、绝对高程精度 10m、相对高程精度 2m；之后，利用 NL-InSAR(non-local InSAR)滤波算法[35]得到了精度更高的处理结果，其精度达到 HRTI-4 标准：分辨率 6m × 6m、绝对高程精度 5m、相对高程精度 0.8m。此外，一方面随着卫星技术、轨道技术等相关技术的发展，SAR 获得的数据质量越来越高，为高精度产品的生产提供了可能；另一方面，人们对产品精度的要求越来越高，以便对地球进行更精细的观测和为国民经济发展提供更大的帮助，这些都对算法的滤波精度提出了更高的要求。

在这种情况下，科研人员开始致力于高滤波精度的算法研究，提出了大量算法。与传统滤波算法不同，这些算法通过最新的信号处理技术和手段，充分挖掘和利用干涉相位的特点，能在有效抑制噪声的同时更好地保持相位信号的细节信息，达到早期算法无法企及的滤波精度。这里以 NL-InSAR 算法[35]和基于稀疏编码的干涉相位估计(sparse-coding-based approach to interferometric phase estimation，SpInPHASE)算法[36]为例进行阐述。NL-InSAR 算法已经是干涉相位滤波算法的一个标杆，它是将图像处理领域里最新、最热的非局部(non-local，NL)技术[37]和 InSAR 数据统计特性结合起来的干涉相位滤波算法，它的滤波精度大大超越了现有算法[35]。正因为精度高，NL-InSAR 算法被 DLR 的科研人员改进并应用于 TanDEM-X 的数据处理[31,32,38,39]，得到了精度高达 HRTI-4 标准的 DEM。然而，NL-InSAR 算法的效率十分低下。在装有 32 位操作系统、主频 3.2GHz 的 Intel Pentium D 处理器的计算机上处理像素大小为 600×464 的数据，盒式滤波只需要 0.22s，而 NL-InSAR 算法需要 1540.93s[35]。也正是效率原因，NL-InSAR 算

需要全本请访问 www.ertongbook.com

法并未成为制作 HDEM 的主要算法[31]。SpInPHASE 算法[36]也是基于图像块的相似性，但通过最优稀疏表示来完成滤波。从滤波结果来看，SpInPHASE 算法的滤波精度明显高于 NL-InSAR 算法[36]。更为难得的是，同为空域算法，SpInPHASE 算法对致密条纹的保持能力大大优于 NL-InSAR 算法。然而非常遗憾的是，在效率上，SpInPHASE 算法远不如 NL-InSAR 算法。在内存 8G、装有 Core i7-3770 处理器的计算机上处理像素大小为 100×100 的数据，NL-InSAR 算法用时 33.04s，而 SpInPHASE 算法需要 369.32s[36]。因此，SpInPHASE 算法和盒式滤波在效率上的差距更大。

因此，现有算法都没有同时满足高效高精度的要求。目前面临的形势是：一方面，人们对产品精度的要求越来越高，因此对算法滤波精度的要求越来越高；另一方面，在轨和未来 SAR 系统获取的数据量越来越大（SRTM 获取的数据量大于 9.8TB，TanDEM-X 获取的数据量大于 1300TB，而即将发射的 TanDEM-L 一天的数据量就高达 78TB），而 InSAR 数据处理步骤多，提升任何一个处理步骤的效率，都将有效降低总的处理时间。虽然可以通过并行处理的方式来提高效率，但受制于计算资源的有限性，这种方式对效率的提升作用有限。相比而言，高效的滤波算法更能有效地降低总的处理时间。

因此，无论从理论研究还是实际工程应用的角度来说，高效高精度干涉相位滤波算法研究都是一项很有意义的课题。

本课题组一直从事的是 InSAR 理论和处理算法的研究，在干涉相位滤波算法研究上积累了大量经验[40~49]。本书将从这些经验出发，对干涉相位滤波进行深入研究，在充分总结现有滤波算法的基础上，提出一些高效高精度算法，为我国未来的 InSAR 处理系统提供参考算法。

1.2 国内外研究现状

20 世纪 80 年代以来，与 InSAR 相关的硬件系统和数据处理算法取得了长足的发展。本节将分别对近年来涌现的机载与星载 InSAR 系统以及干涉相位滤波技术的研究情况进行介绍。

1.2.1 InSAR 系统发展现状

InSAR 系统的发展，主要遵循“实验室→机载 InSAR 系统→星载 InSAR 系统”这一模式，本节将分别对机载与星载 InSAR 系统进行介绍。

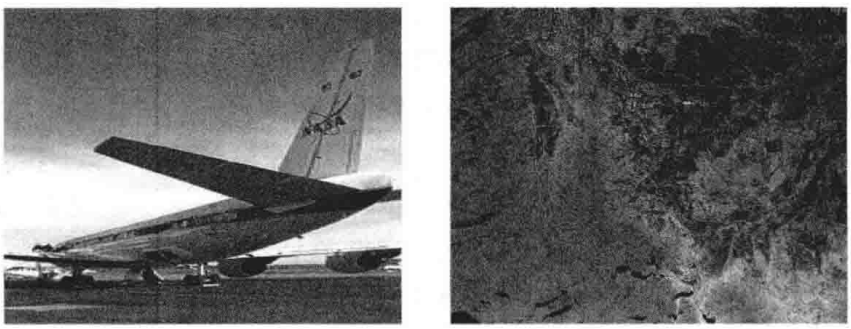
1. 机载 InSAR 系统

相比星载 InSAR 系统，机载 InSAR 系统的设计和实现简单，并且机载 InSAR

系统肩负着验证星载 InSAR 技术的重任，因此机载 InSAR 系统成为各国科研人员的首要研究对象。目前，世界上主要的机载 InSAR 系统如下。

1) AIRSAR 和 UAVSAR

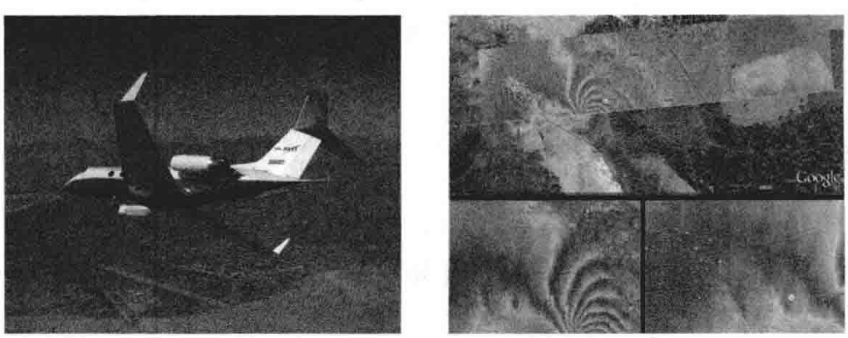
AIRSAR[50]是由美国喷气推进实验室(Jet Propulsion Laboratory，JPL)为 NASA 研制的机载 InSAR 系统，装载在 Douglas DC-8 飞机上。该系统包含 C、L 和 P 共 3 个波段和沿航向干涉、垂直航向干涉及全极化工作模式。图 1.1 为 AIRSAR 示意图，以及该系统获取的美国科罗拉多州北部 Rabbit Ears Pass 地区的 DEM。



(a) AIRSAR示意图　　(b) AIRSAR获取的DEM

图 1.1　AIRSAR 示意图及其获取的 DEM

UAVSAR[51]是由 JPL 和 NASA 联合研制的无人机载 L 波段 InSAR 系统。作为由 NASA 资助的仪器孵化器计划项目(instrument incubator project，IIP)的重要数据源，该系统最初装载在 Gulfstream III 飞机上进行性能验证；之后，用于与地震、火山喷发等地质灾害相关的地形形变测量和冰川运动测量。为了保证测量的精度，系统还配备了实时全球定位系统(global positioning system，GPS)用以调整飞机的航线，使其在200km 飞行距离内的位置误差始终保持在 10m 范围以内。图 1.2为 UAVSAR 示意图，以及该系统获取的 2010 年加利福尼亚州地震的形变干涉相位[52]。



(a) UAVSAR示意图　　(b) UAVSAR获取的形变干涉相位

图 1.2　UAVSAR 示意图及其获取的形变干涉相位

2) E-SAR 和 AeS-1

E-SAR[53]是由 DLR 的微波雷达所和飞行器研发部门共同研制的全极化、多频段机载 InSAR 系统。该系统装载在 Dornier 飞机上并于 1988 年获取第一幅 SAR 图像后，经历不断的发展升级，由最初的两个频段发展成为现在的四个频段，已经成为 DLR 获取雷达数据的重要工具和实验平台。在服役二十多年后，该系统具备了多模式地形测绘能力，如基于单频段单极化的单通道工作、一次航过交轨和顺轨干涉测量、全极化测量和重复航过极化干涉测量。系统上还装有实时差分 GPS 惯性导航系统和 Fugro 公司 OmniStar 3000L 差分 GPS 接收机，能够提供高精度的导航和定位信息。

AeS-1[54,55]是德国 Aero-Sensing Radarsysteme 公司研制的、装载在 Rockwell Aero Commander 690 飞机上的机载 InSAR 系统。该系统工作在 X 频段，最大工作带宽为 400MHz，对应的 SAR 图像分辨率为 0.5m×0.5m，最大扫描幅宽为 15km，干涉基线分别为 0.6m 和 2.4m，最大高程精度为 5cm。该系统的任务主要包括 DEM 制作、形变测量、城区建筑物高度测量、海洋顺轨干涉测量、沿海地区的实时监测。该系统于 1996 年 10 月开始正式服役，并分别于 1997 年和 1998 年对印度尼西亚附近岛屿、巴西北部和委内瑞拉南部的区域进行了地形测绘。图 1.3 是 E-SAR 和 AeS-1 的示意图，以及 AeS-1 获取的瑞士 Küttigen 的干涉数据。



(a) E-SAR示意图



(b) AeS-1示意图



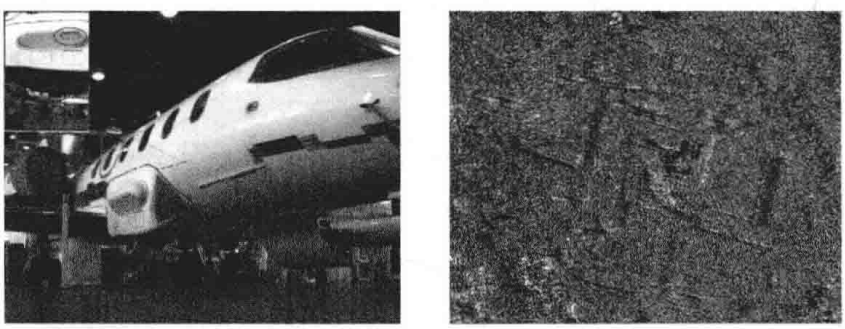
(c) AeS-1获取的干涉数据(从左至右分别是SAR幅度图像、干涉相位和相干系数图)

图 1.3 E-SAR 示意图、AeS-1 示意图及 AeS-1 获取的干涉数据

3) TOPSAR 和 TELAER-SAR

TOPSAR[56]是 1992 年由意大利航天局(Agenzia Spaziale Italiana, ASI)和先进遥感系统研究联合会(Consortium of Research on Advanced Remote Sensing Systems)联合研制的机载 InSAR 系统。科研人员用该系统替换原 AIRSAR 系统上的 C 频段部分,用以获取高程精度为 2m、分辨率为 10m×10m 的 DEM。但受斜距分辨率制约的同时,缺乏高精度的载机运动补偿算法,TOPSAR 获取的 DEM 绝对高程精度未能达到预期指标[57]。

TELAER-SAR[58,59]原是一部包含光学、多光谱、高光谱传感器和 SAR 的机载系统,装载在 Learjet35A 飞机上。2011 年,由意大利国家研究委员会(Italiana National Research Council, CNR)出资,CNR、AGEA(Agency for Agriculture Subsidy Payments)和 Telaer 公司共同联合,对 TELAER-SAR 系统进行了升级——在原系统上加装了两幅 X 波段的天线,以赋予系统单航过干涉的能力并提高其重复航过干涉的能力。其干涉测量手段非常灵活,扫描幅宽的范围为 2～10km,相应的图像分辨率范围为 0.5m×0.5m～5m×5m,在第一次试飞实验中就获取了 1m×1m 分辨率的 DEM。图 1.4 是 TELAER-SAR 示意图及其获取的干涉相位[59]。



(a) TELAER-SAR示意图　　(b) TELAER-SAR获取的干涉相位

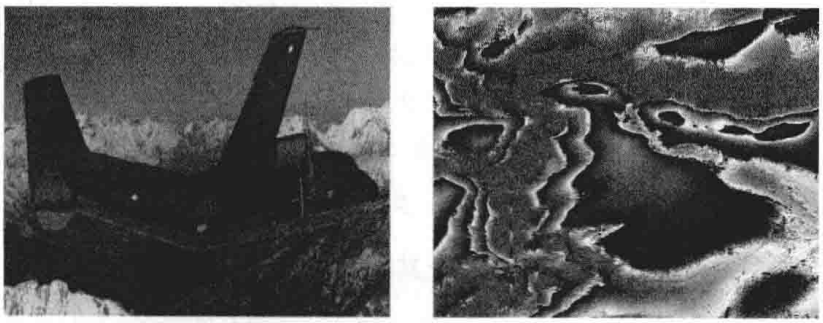
图 1.4　TELAER-SAR 示意图及其获取的干涉相位

4) RAMSES 和 SETHI

RAMSES[60]是由法国国家航空航天研究中心(Office National d′Etudes et deRecherches Aérospatiales, ONERA)下属的电磁与雷达科学部(Department of Electromagnetic and Radar Science, DEMR)研制的多波段、全极化机载 InSAR 系统,装载在 Transall C160 飞机上。该系统包含 P、L、S、C、X、Ku、Ka 和 W 共 8 个波段,其中用于干涉测量的是 X、Ku 和 Ka 波段。图 1.5 是 RAMSES 示意图及其获取的 Puylaurent barrage 地区的干涉相位[61]。

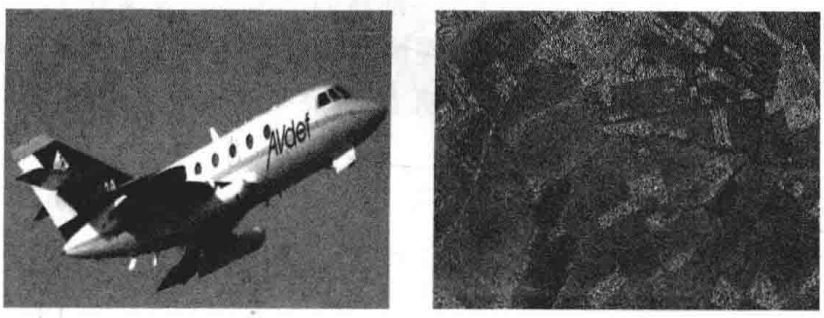
SETHI[62,63]是继 RAMSES 之后 ONERA 研制的另一部机载 InSAR 系统。相比 RAMSES, SETHI 系统的天线可以分别安装在两个吊舱中,从而使该系统可以安装在 Falcon20 这样的小型飞机上。除了 4 部雷达,SETHI 上还装备 2 部光学

传感器，可以进行多光谱和光学/微波混合遥感。图 1.6 是 SETHI 的示意图及其获取的 P 波段干涉相位。



(a) RAMSES示意图 (b) RAMSES获取的干涉相位

图 1.5 RAMSES 示意图及其获取的干涉相位



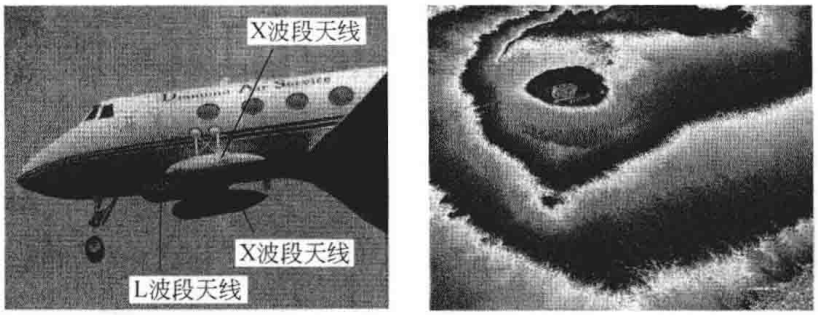
(a) SETHI示意图 (b) SETHI获取的干涉相位

图 1.6 SETHI 示意图及其获取的干涉相位

5) Pi-SAR 和 Pi-SAR2

Pi-SAR[64]是一部由日本通信研究实验室(Communication Research Laboratory, CRL)和日本宇宙事业开发集团(National Space Development Agency of Japan, NASDA)联合研制的双频带、全极化 InSAR 系统。该系统装载在 Gulfstream-II 喷气式飞机上，可以同时工作在 L 和 X 波段，其中用于干涉的是 X 波段，干涉基线为 2.3m。飞机上还装有惯性导航系统和 GPS，用于补偿气流所造成的运动误差。由于日本地理位置特殊，该系统主要用于对火山形变的监测。自 1995 年投入使用后 Pi-SAR 进行了超过 100 次的飞行，其间采集了大量火山形变数据。图 1.7是 Pi-SAR 示意图及其获取的三原山的干涉相位[65]。

星载 SAR 获取的图像分辨率随着硬件的升级和算法的改进在不断提高，已经有超越机载 SAR 数据的趋势，同时科研人员希望能够测量到更高精度的形变量。于是，以日本国家信息与通信技术研究所(National Institute of Information and Communication Technology, NICT)为首的科研团队开始研制 Pi-SAR2[66]并于 2008 年投入使用。该系统的分辨率(斜距向和方位向)高达 0.3m×0.3m，能够检测出亚米级的公路形变。系统的最大信号带宽为 500MHz，具备聚束和滑聚两种成



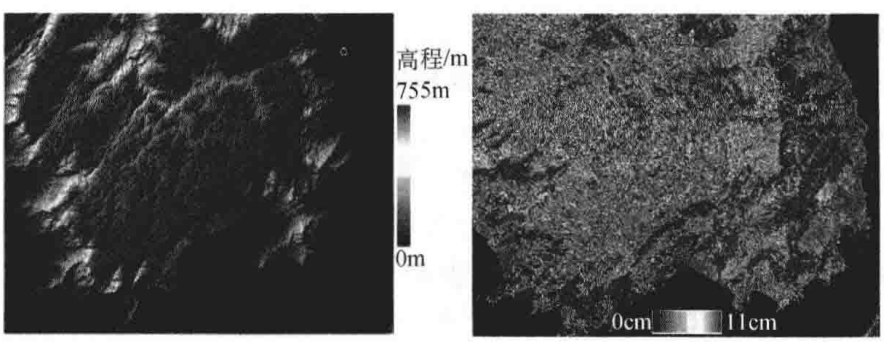
(a) Pi-SAR示意图　　(b) Pi-SAR获取的干涉相位

图 1.7　Pi-SAR 示意图及其获取的三原山的干涉相位

像模式。之后，日本电气股份有限公司(Nippon Electric Company Limited，NEC)和日本总务省(Ministry of Internal Affairs and Communications，MIC)签署了一个始于 2012 年、为期 3 年的合同，旨在研发一部新的小型雷达来替代 Pi-SAR2。该小型雷达的体积只有 Pi-SAR2 的 1/5，但在测绘性能上几乎没有损失。该小型雷达由于质量轻，可以安装在更加轻便的飞机上，优点是测绘成本降低、机动性能提高和持续工作时间增加[67]。

6) OrbiSAR

OrbiSAR[68]是由巴西奥比特遥感(Orbisat Remote Sensing)公司研制的，装载在 Turbo Commander 飞机上的机载 InSAR 系统。该系统包含三个 X 波段天线和一个 P 波段天线，其中 X 波段可以用于单航过和重复航过干涉，而 P 波段只能进行重复航过干涉，因此该系既可获取 DEM 也能进行差分干涉。飞机上还装载了高精度的全球导航卫星系统(global navigation satellite system，GNSS)和惯性测量单元(inertial measurement unit，IMU)，保证了高精度的干涉和 DInSAR 的处理结果。由于其高精度的测绘能力，该系统广泛用于中美洲和南美洲大量丛林地带的地形测绘、森林面积测量和雷达正射影像图的制作。该系统在植被覆盖较少的平地区域获得的 DEM，高程精度可达 1m，分辨率为 0.5m×0.5m～2.5m×2.5m。同时，该系统还被大量应用于地形形变的监测[69,70]。图 1.8 是 OrbiSAR 获取的 São Sebastião-SP 地区的 DEM[68]和对应的地形形变[70]。



(a) OrbiSAR获取的DEM　　(b) OrbiSAR获取的地形形变

图 1.8　OrbiSAR 获取的 DEM 和地形形变

需要全本请访问 www.ertongbook.com