



星载合成孔径雷达 干涉新技术

黄海风 张永胜 董臻 著



科学出版社

星载合成孔径雷达干涉新技术

黄海风 张永胜 董 臻 著



科学出版社

北京

内 容 简 介

本书系统而全面地阐述星载 SAR 干涉技术基本理论和最新研究进展。首先简要讲述 SAR 干涉测量的概念、发展历史、各种干涉体制和模式的比较；然后介绍星载双站 SAR 和星载双站 InSAR 的基本原理、信号模型和测高精度分析，作为后续干涉新技术的理论基础。之后逐一阐述各种星载 SAR 干涉技术，包括分布式 SAR 干涉技术、单/双站 SAR 极化干涉技术、SAR 多频/多基线干涉技术、SAR 顺轨干涉技术、双天线和系绳式干涉技术、差频干涉技术、被动 SAR 干涉技术。

本书内容新颖实用、体系结构完整，可供空间电子、航天测绘、航天遥感、地球物理、地震、林业，以及其他对地观测技术与应用学科领域的研究人员、高等院校相关专业高年级本科生、研究生和教师使用。

图书在版编目(CIP)数据

星载合成孔径雷达干涉新技术/黄海风，张永胜，董臻著. —北京：科学出版社，2015.11

ISBN 978-7-03-045998-5

I. ①星… II. ①黄… ②张… ③董… III. ①卫星载雷达—合成孔径雷达—干涉测量法 IV. ①TN959.74 ②TN958

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2015)第 245787 号

责任编辑：任 静 / 责任校对：桂伟利

责任印制：张 倩 / 封面设计：迷底书装

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>

三河市骏杰印刷有限公司 印刷

科学出版社发行 各地新华书店经销

*

2015 年 11 月第 一 版 开本：720×1 000 1/16

2015 年 11 月第一次印刷 印张：17 3/4 彩插：2

字数：345 000

定价：88.00 元

(如有印装质量问题，我社负责调换)

前 言

合成孔径雷达（Synthetic Aperture Radar, SAR）是一种先进的微波成像系统，它利用脉冲压缩技术获得高的距离向分辨率，利用合成孔径原理提高方位向分辨率。星载合成孔径雷达能够全天候、全天时获得大面积的高分辨率雷达图像，因此广泛应用于军事侦察、军事测绘、地球遥感、海洋研究、资源勘探、灾情预报等领域。

星载干涉合成孔径雷达（Interferometric Synthetic Aperture Radar, InSAR）系统建立在星载 SAR 技术基础之上，是一种基于干涉测量理论和方法、以主动式微波传感器为核心的天基雷达系统，它以 SAR 复数据提取的相位信息为信息源获取地表三维地形、微小变化或地物属性，因此具有很高精度。星载 InSAR 系统在全球地形测绘、地震火山监测、冰川地质调查、海洋测绘、交通监视、气象预报等方面都有重要应用。以实现全球高精度测绘为例，星载 InSAR 系统与机载 InSAR 系统和星载光学立体摄影系统相比，具有全天候、全天时、全球覆盖、数据处理效率高和平台稳定性高等综合特点，因此是目前应用最为广泛的一类成像雷达干涉测量系统。

从干涉原理上说，已有的星载 SAR 都具备一定的干涉功能。随着星载 SAR 技术向空、时、频、码、极化等多维度方向发展，星载 InSAR 技术也迅猛发展。尤其是近年来全球首个分布式 SAR 卫星系统——TanDEM-X 系统的成功运行，更是将 InSAR 技术的研究和应用推向了高潮。近些年来涌现了各种星载 InSAR 新技术，从平台体制来说，InSAR 技术已从早期的单卫星平台双航过 InSAR 体制、双卫星平台跟飞 InSAR 体制朝着系绳式 InSAR 体制、单平台双天线 InSAR 体制、被动式 InSAR 体制和分布式卫星 InSAR 体制方向发展。从工作模式来说，已从传统的单基地、单模式、单视角、单基线、单频段、单极化干涉模式向多基地、多模式、多视角、长基线、多基线、多频段、差频点、多极化、多时相干涉模式方向发展。

本书是作者及其研究团队在多年研究基础上，学习和借鉴国内外最新研究成果编写而成的，系统而全面地阐述了星载 SAR 干涉技术领域的最新研究进展。目前已出版的 SAR 干涉相关专著，主要专注于干涉信号处理方面，如已出版的《星载干涉合成孔径雷达——高效高精度处理技术》，它也是本研究团队在星载 SAR 干涉技术方面的研究成果，是本书的姊妹篇。比较而言，本书力求从系统的角度介绍星载 SAR 干涉新技术方面的最新进展，尤其是对各新体制干涉系统的关键技术进行介绍。本书的研究工作是在国家自然科学基金项目（项目编号：61002031）“多维 SAR-Hermitian 乘积的统计建模理论与噪声抑制新方法研究”、国家自然科学基金项目（项目编号：41271459）“差分层析 SAR 四维成像技术研究”、国家自然科学基金重大研究计划项目（项目编号：91438202）“空间分布式 SAR 高精度干涉成像基础理论与关键技术”、国家 973 项目、国防背景预

研项目、高分辨率对地观测系统重大专项项目等项目的资助下完成的，力求反映科研项目的最新成果。

此外，陈祺、王青松分别参与了 1.2.1 节和 1.2.2 节的编写，张永俊参与了 4.4 节的编写，李廷伟参与了第 5 章的编写，韦海军、蔡斌分别参与了 6.3 节和 6.4 节的编写，蔡斌参与了第 7 章的编写，张启雷参与了 8.3 节的编写。

由于作者水平和时间所限，书中难免存在不足之处，恳请读者批评指正。

目 录

前言

第 1 章 绪论	1
1.1 合成孔径雷达干涉测量的概念	3
1.2 国内外研究概况	5
1.2.1 星载合成孔径雷达发展历史	5
1.2.2 星载合成孔径雷达干涉发展历史	8
1.3 星载 InSAR 平台体制比较	18
1.4 星载 InSAR 工作模式比较	22
参考文献	25
第 2 章 星载双站 SAR 模型	31
2.1 星载双站 SAR 信号模型	31
2.1.1 回波信号模型	31
2.1.2 图像信号模型	34
2.1.3 空间分辨率分析	36
2.2 “停走停”假设误差分析	36
2.2.1 斜距误差分析	37
2.2.2 斜距误差影响分析	40
2.2.3 等效斜距误差计算	41
2.2.4 实验结果	42
2.3 星载双站 SAR 等效距离模型	44
2.3.1 几种等效距离模型	44
2.3.2 等效距离模型比较	47
参考文献	50
第 3 章 星载双站 InSAR 原理	52
3.1 高程反演原理	52
3.2 双站 InSAR 信号模型	55
3.2.1 干涉信号模型	56
3.2.2 相干系数与频谱偏移的关系	59
3.2.3 相干系数与基线的关系	60

3.3	干涉相位图分析	62
3.4	测高精度分析	64
3.4.1	测高精度公式	65
3.4.2	测高精度与基线矢量的关系	66
	参考文献	70
第4章	分布式 SAR 干涉技术	72
4.1	概述	72
4.2	卫星编队构形设计	76
4.2.1	相对运动模型比较	76
4.2.2	应用系统编队构形优化设计一般方法	77
4.2.3	分布式星载 InSAR 编队构形优化设计	80
4.3	雷达三同步方法	85
4.3.1	时间同步方法	85
4.3.2	相位同步方法	87
4.3.3	空间同步方法	94
4.4	高精度干涉基线确定方法	103
4.4.1	星间相对状态测量方法概述	103
4.4.2	基线定义与转换分析	105
4.4.3	干涉基线定标方法	106
	参考文献	115
第5章	单/双站 SAR 极化干涉技术	122
5.1	概述	122
5.1.1	SAR 极化干涉理论及系统的研究现状	122
5.1.2	单/双站地 SAR 极化干涉植被参数反演	125
5.2	SAR 极化干涉基础	126
5.2.1	单/双站 SAR 极化信号模型	126
5.2.2	SAR 极化干涉信号模型	130
5.3	基于经典植被散射模型的参数反演	134
5.3.1	经典植被散射模型基本假设	134
5.3.2	经典植被 SAR 极化干涉复相关系数模型	135
5.3.3	经典 SAR 极化干涉三阶段植被参数反演	136
5.4	单/双站地极化干涉两层植被参数反演	139
5.4.1	两层植被复相关系数模型	139
5.4.2	两层植被参数反演方法	149
5.5	单/双站地极化干涉三层植被参数反演	159

5.5.1	三层植被复相关系数模型	160
5.5.2	三层植被参数反演方法	169
	参考文献	174
第 6 章	SAR 多频/多基线干涉技术	178
6.1	概述	178
6.2	多频/多基线相位解缠方法	179
6.2.1	最小二乘频率快速算法	179
6.2.2	迭代相位解缠算法	184
6.3	多频/多基线相位融合处理方法	186
6.3.1	多基线相位融合	187
6.3.2	多频段相位融合	191
6.4	叠掩区域相位估计方法	193
6.4.1	多基线 SAR 图像信号模型与协方差矩阵	193
6.4.2	基于信息论的干涉相位区域分类方法	198
6.4.3	干涉相位估计与解缠方法	201
	参考文献	206
第 7 章	SAR 顺轨干涉技术	210
7.1	概述	210
7.2	SAR-ATI 和 SAR-DPCA 性能分析	211
7.2.1	SAR-ATI 和 SAR-DPCA 简述	211
7.2.2	SAR-ATI 和 SAR-DPCA 性能分析	216
7.3	单基线 SAR-ATI 恒虚警检测方法研究	221
7.3.1	SAR-ATI 的干涉幅度和相位的统计模型	221
7.3.2	恒虚警和似然比检测方法	223
7.3.3	性能分析比较	234
7.4	混合基线条件下 SAR-GMTI 方法	235
7.4.1	信号模型	235
7.4.2	修正的 SAR-DPCA 和 SAR-ATI 方法	237
7.4.3	自适应 SAR-DPCA 方法	240
	参考文献	242
第 8 章	其他干涉新技术	245
8.1	双天线和系绳干涉技术	245
8.1.1	毫米波双天线干涉技术	246
8.1.2	系绳干涉技术	251

8.2 差频干涉技术·····	253
8.2.1 概念与原理·····	253
8.2.2 面目标干涉·····	255
8.2.3 永久散射体干涉·····	258
8.3 被动 SAR 干涉技术·····	261
8.3.1 基于星载 SAR 照射源的被动 SAR 技术·····	261
8.3.2 基于导航卫星照射源的被动 SAR 技术·····	264
8.3.3 被动 SAR 干涉技术·····	266
参考文献·····	267

彩图

第 1 章 绪 论

合成孔径雷达 (Synthetic Aperture Radar, SAR) 是一种高分辨率的微波遥感成像雷达。作为一种主动发射信号的传感器, SAR 不仅可以测量散射区域的散射强度和相位信息, 在接收信号中还包含了目标与 SAR 传感器距离造成的收发时延信息、目标与传感器相对运动造成的多普勒频移信息以及极化信息, 丰富的信息使得 SAR 图像具有巨大的开发潜力, 可用于对目标不同特性的测量。另外, SAR 自带照射源, 使用的频段大多可以穿透云层和水汽, 某些频段可以穿透叶簇甚至地表等遮挡物, 与光学遥感相比, SAR 具有全天时、全天候、探测隐蔽目标等特点。因此, 作为一种重要的测绘和侦察手段, SAR 在军事和民用方面都有着重要的价值^[1-8]。图 1.1 方框中是德国机载 PAMIR 系统的 SAR 图像, 分辨率高达 0.1m, 与方框外光学图像的视觉效果已十分接近。

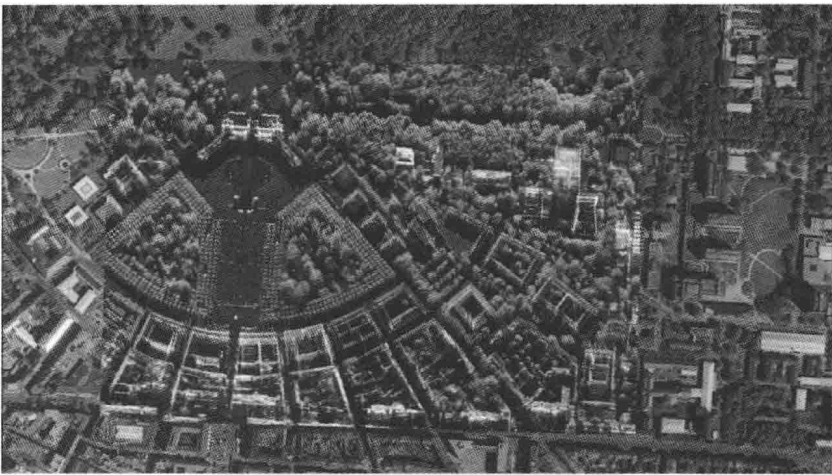


图 1.1 德国机载 PAMIR 系统的 SAR 图像 (0.1m 分辨率)

早期的 SAR 技术多是在机载平台上发展起来的^[9]。1978 年, 美国国家航空航天局 (National Aeronautics and Space Administration, NASA) 发射的第一颗 SAR 卫星 SEASAT 作为星载 SAR 的先驱, 虽然只工作了短短的 105 天, 却采集了超过过去 100 年间靠船舶积累的海洋信息, 展示了星载 SAR 快速稳定获取地表信息的能力, 星载 SAR 逐渐得到各国科研工作者的重视并呈现快速发展。在民用上, 星载 SAR 在农业、林业、地质、水文、海冰监测、灾害监测、环境监测、高程测绘等方面都有着广泛的用途。而在军事上, 星载 SAR 可以用于地图测绘、地貌侦测、大型舰船和陆地战略目

标侦察监视、打击效果评估等方面。由于与机载 SAR 成像相比，星载 SAR 具有反应速度快、覆盖范围广、抗打击能力强等优点，所以一直是各国竞相发展的军事侦察监视手段^[10-12]。图 1.2 是以色列军事侦察卫星 TecSAR 的图片，该卫星设计重量仅为 300kg，采用集中发射的抛物面天线体制，具备多种工作模式，可提供优于 1m 分辨率的 SAR 图像。该卫星是低成本、高性能的小型轻量化 SAR 卫星的典型代表。

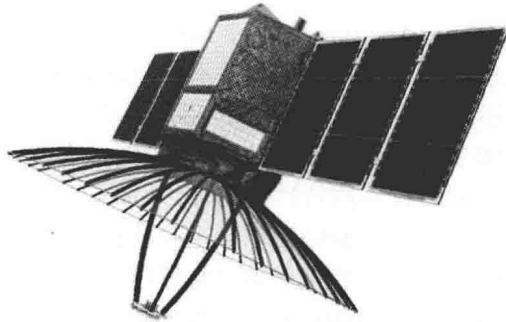


图 1.2 以色列军事侦察卫星 TecSAR

星载干涉合成孔径雷达(Interferometric Synthetic Aperture Radar, InSAR)系统^[13-19]是一种基于干涉测量理论和方法、以主动式微波传感器为核心的天基雷达系统，它以 SAR 复数据提取的相位信息为信息源获取地表三维地形、微小变化或地物属性，因此具有较高精度。图 1.3 是德国 TanDEM-X 系统两星编队飞行工作示意图，该系统也是全球首个分布式 SAR 卫星系统。



图 1.3 TanDEM-X 任务示意图

星载 InSAR 系统的一个重要功能就是实现全球高精度的测绘，与机载 InSAR 系

统和星载光学立体摄影系统相比,具有全天候、全天时、全球覆盖、数据处理效率高和平台稳定性高等综合特点,因此是目前应用最为广泛的一类成像雷达干涉测量系统。图 1.4 给出几种测绘系统的测绘性能和效能比较。其中机载系统的测绘性能普遍能达到 HRTI-3 标准,但覆盖效能很低。天基系统的测绘性能较低,但测绘效能很高。TanDEM-X 系统在测绘性能和效能上具备了综合优势,分布式 SAR 卫星系统具备在测绘性能上进一步提升的潜力。

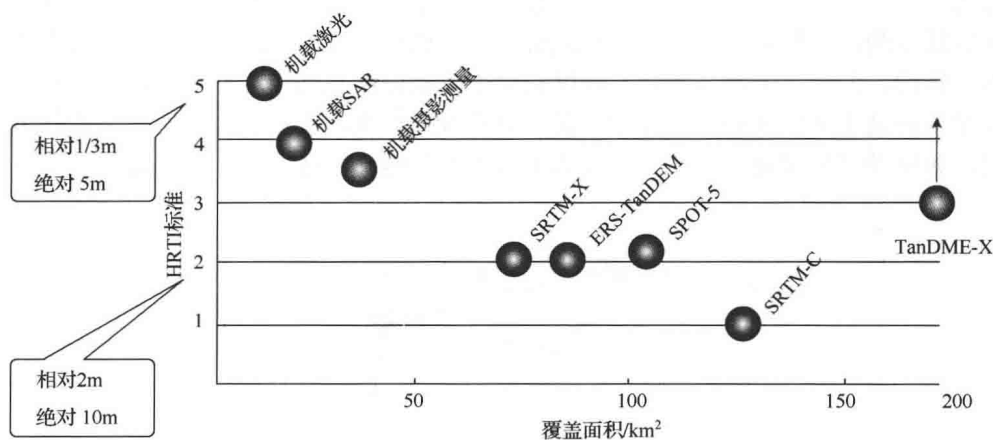


图 1.4 几种测绘系统的测绘性能和效能比较

1.1 合成孔径雷达干涉测量的概念

合成孔径雷达干涉测量技术是指利用不同入射角下、满足干涉条件的两幅或多幅 SAR 复图像所形成的干涉相位或相干信息来反演地表三维地形、微小变化或地物属性的技术。

假设 S_1 和 S_2 表示同一区域任意两幅 SAR 复图像,二者的共轭乘积 $S_1 \cdot S_2^H$ 称为 Hermitian 乘积,也称为干涉。两幅 SAR 复图像可表示为

$$S_1(x, r) = A_1 \exp(-j\varphi_1), \quad S_2(x, r) = A_2 \exp(-j\varphi_2)$$

其中, (x, r) 为图像的方位和距离坐标; A_1 、 φ_1 、 A_2 和 φ_2 分别为两幅图像的幅度和相位参数。根据定义,两幅图像的干涉信号表达式为

$$S_1(x, r) \cdot S_2^*(x, r) = A_1 A_2 \exp[-j(\varphi_1 - \varphi_2)] = A_1 A_2 \exp\left[j\frac{4\pi}{\lambda}(r_2 - r_1)\right]$$

其中, r_2 和 r_1 表示两幅图像的斜距参数。上式表明,图像的干涉相位包含了斜距之差信息。

当干涉的两幅图像满足不同的几何关系时，可得到两类基本的干涉测量情况，分别是交轨干涉测量和顺轨干涉测量。

图 1.5 是 SAR 交轨干涉测量的几何示意图。以两星干涉为例，两颗卫星获取地面同一区域的雷达回波信号，并进行成像。两颗卫星在各自成像时刻的空间位置相距为 B （也称为基线），基线矢量与卫星飞行方向存在一定的夹角，即存在一定的垂直卫星航迹的分量，这是交轨干涉测量名称的来源。当两颗卫星的 SAR 图像进行干涉时，根据前述定义，干涉相位将包含两幅图像斜距差的信息。利用该斜距差的信息可以对地面区域进行测高。与立体 SAR（Stereo SAR）定位技术相比，二者的测高反演原理是基本一致的，但由于干涉测量技术可以利用干涉相位信息高精度反演斜距差信息，其测高精度将高于立体 SAR 定位技术。除上述两星干涉外，交轨干涉的实现方式有多种情况，如单颗卫星重复航过、单个天基平台上安装两部雷达天线一次航过等。

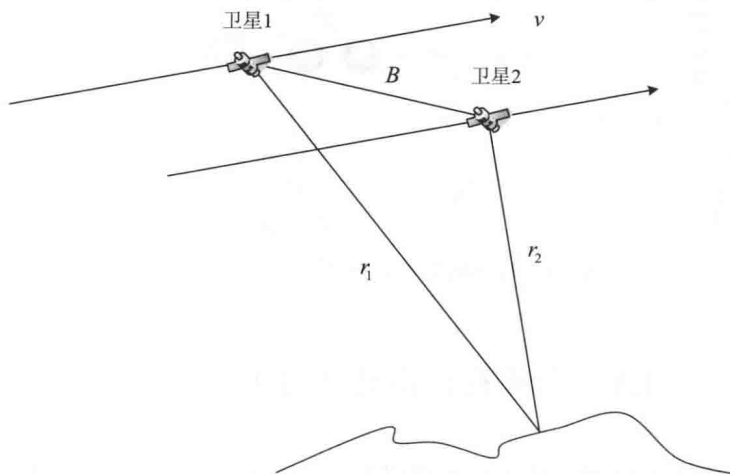


图 1.5 SAR 交轨干涉测量的几何示意图

图 1.6 是 SAR 顺轨干涉测量的几何示意图。同样以两星顺轨干涉为例，两颗卫星之间的基线 B 与卫星飞行方向平行，这是顺轨干涉测量名称的来源。图 1.6(a) 为 t_1 时刻，卫星 1 对地面动目标和场景进行成像，动目标在地面位置 P_1 ，卫星 1 和动目标之间的斜距为 r_1 。图 1.6(b) 为 t_2 时刻，卫星 2 与 t_1 时刻卫星 1 的位置重合，对地面动目标和场景也进行成像，此时动目标在地面位置 P_2 ，卫星 2 和动目标之间的斜距为 r_2 。同理，当两颗卫星的 SAR 图像进行干涉时，根据前述定义，干涉相位将包含动目标的两幅图像斜距差的信息。假设地面场景杂波在两次成像过程未发生变化，因此其干涉过程也是对消过程，干涉相位中将仅包含动目标运动带来的斜距差信息，利用该斜距差的信息可以对地面动目标进行检测和速度估计等。

除上述两星干涉外，交轨干涉的实现方式也可以是单个天基平台上安装两部雷达天线进行干涉等。

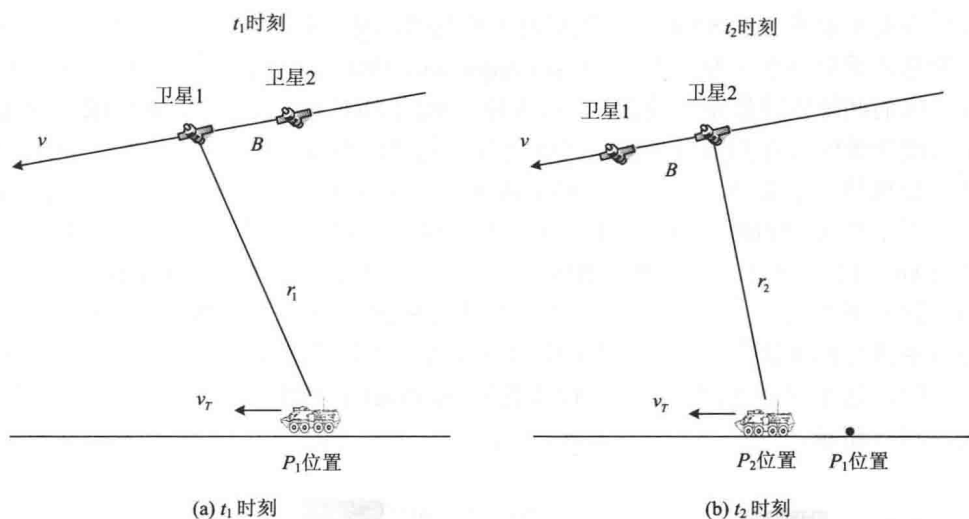


图 1.6 SAR 顺轨干涉测量的几何示意图

上述两类干涉是最基本的干涉方式，当多个雷达天线在空间位置上形成交轨和顺轨干涉时，会形成多个干涉图像对，称为多基线干涉。如果多个干涉图像对分别工作在不同的频段，则称为多频干涉。如果多个干涉图像对的形成过程中，地面发生了形变，可利用形变前后的干涉相位之差对地面形变进行反演，称为差分干涉。如果干涉图像对由不同极化收发组合形成，称为极化干涉。极化干涉通过极化和干涉信息的有效组合，可以同时提取观测对象的空间三维结构特征信息和散射信息。各干涉技术将在后续章节详细介绍。

1.2 国内外研究概况

1.2.1 星载合成孔径雷达发展历史

从 1978 年美国发射第一颗 SAR 卫星 SEASAT 开始，很多国家都陆续大力开展星载 SAR 的研究。据不完全统计，已经发射或即将发射星载 SAR 的国家和机构包括美国、欧洲太空局（European Space Agency, ESA）、俄罗斯、德国、日本、加拿大、印度、以色列、韩国、阿根廷等。图 1.7 是目前已经在轨运行和在研的主要星载 SAR 系统。

1) 分辨率与测绘带宽

相比机载 SAR 系统，星载 SAR 的飞行平台更高、速度更快，其回波的距离/多普勒模糊比机载 SAR 严重得多，模糊性成为星载 SAR 设计中的重要约束。一般来说，

高方位分辨率要求星载 SAR 具有较宽的多普勒谱，因此需要提高方位向采样率，即用较高的脉冲重复频率（Pulse Repetition Frequency, PRF）；另外，宽测绘带则要求脉冲间有足够的间隙以降低距离模糊，即需要用较低的 PRF。这是传统星载 SAR 系统的分辨率与测绘带间存在的固有矛盾，也就是著名的“最小天线面积”约束^[20]。按照这一约束，如果将测绘带宽与方位向单视分辨率之比定义为品质因子^[21]，那么星载 SAR 的品质因子约为 20000，而实际上，由于信噪比、数据率、视角范围等的影响，一般星载 SAR 的品质因子为 10000~20000（随着卫星高度、视角范围和模糊度要求等因素的不同有所变化）。表 1.1 是对一些典型星载 SAR 系统在条带模式工作时的测绘带与分辨率进行的统计^[22-33]。从表 1.1 中可以看出，部分星载 SAR 系统由于能量、数据率等原因，这个比值还比较低，而较新的如 Sentinel-1 系统，可以基本达到极限值，但无法进行超越。

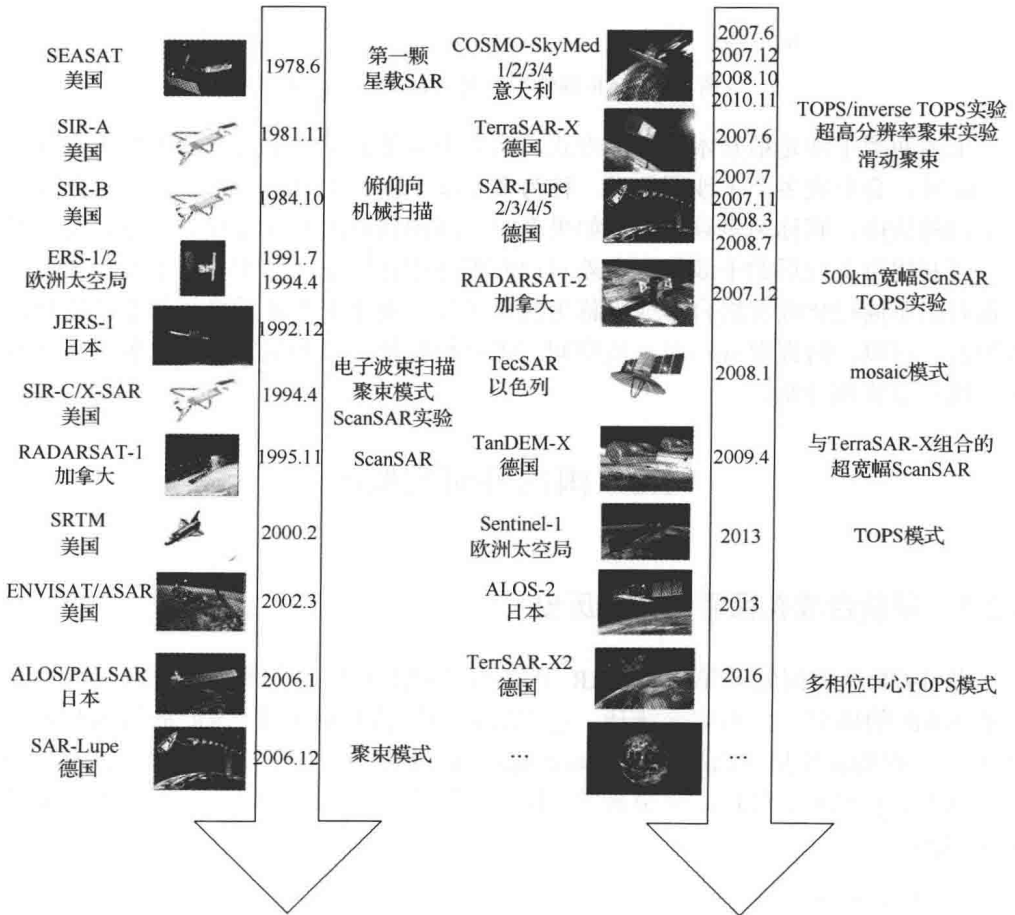


图 1.7 世界主要星载 SAR 系统

表 1.1 典型星载 SAR 系统测绘带宽与分辨率统计

卫星名称	轨道高度/km	工作频段/GHz (频段)	分辨率		测绘带宽/km	品质因子
			方位向/m	距离向/m		
SEASAT	800	1.28(L)	25 (4 视)	25	100	16000
JERS-1	568	1.27(L)	18 (3 视)	18	75	12500
RADARSAT-1	800	5.3(C)	9	9	45	5000
ERS-1/2	785	5.3(C)	30	26.3	100	3333
ENVISAT/ASAR	800	5.33(C)	30 (4 视)	30	100	13333
ALOS/PALSAR	700	1.27(L)	10	7~44	70	7000
SAR-Lupe	500	9.6(X)	5	5	60	12000
COSMO-SkyMed	620	9.6(X)	3	3	40	13333
TerraSAR-X	514	9.6(X)	3	3	30	10000
RADARSAT-2	800	5.4(C)Ultra-Fine	3	3	20	6667
		5.4(C)Fine	9	10	50	5556
		5.4(C)Standard	28 (4 视)	25	100	14286
Sentinel-1	693	5.4(C)	5	5	80	16000
ALOS-2	628	1.28(L)Ultra-Fine	3	3	50	16667
		1.28(L)Fine	10	10	70	7000
TerraSAR-X2	505~533	9.6G(X)SM 1m	1	1	10	10000
		9.6G(X)SM 3m	3	1	24	10000

2) 星载 SAR 多种实现方式

随着 SAR 理论和技术水平的不断进步,星载 SAR 技术也得到了迅猛发展。星载 SAR 系统从性能来说,朝着高分辨宽测绘带、高时间分辨率、高辐射分辨率、高辐射精度方向发展;从功能来说,朝着成像侦察、干涉测绘、动目标指示等多功能方向发展;从使用灵活性来说,朝着大卫星平台/功能强大和轻小型/敏捷两个相反的方向发展;从实现方式来说,朝着多平台体制、多频段、多极化、多模式、多天线体制、多通道等方向发展,具体如下。

- (1) 平台体制:单星、空间站、航天飞机、编队卫星。
- (2) 工作模式:条带、标准聚束、滑动聚束、扫描、TOPSAR、马赛克等。
- (3) 频段:P、L、S、C、X、Ku、Ka 等。
- (4) 极化方式:单极化、多极化、全极化。
- (5) 天线体制:相控阵、抛物面。
- (6) 相位中心:单相位中心、多相位中心。
- (7) 收发体制:单发单收、单发多收。
- (8) 信号体制:线性调频信号、相位编码信号。

表 1.2 给出了典型星载 SAR 系统的工作频段、极化、工作模式、通道数、首次实现方式等的统计结果。

表 1.2 典型星载 SAR 系统工作模式统计

卫星名称	工作频段	极化	工作模式	通道数	备注
SEASAT	L	HH	条带	1	第一颗星载 SAR
ALMAZ	S	HH	条带	1	第一颗 S 频段
SIR-A	L	HH	条带	1	第一颗航天飞机载
SIR-B	L	HH	条带	1	第一颗多视角
ERS-1/2	C	VV	条带	1	第一颗 C 频段
SIR -C/X-SAR	L/C/X	HH, HV, VH, VV X-SAR 只有 VV	条带	1	第一颗多频段多极化
RADARSAT-1	C	HH	条带/扫描	1	第一颗扫描模式
SRTM	L/C/X	HH, HV, VH, VV X-SAR 只有 VV	条带/交轨干涉/ATI	2	第一颗真正意义上的天 基雷达干涉测绘系统
SAR-Lupe	X	HH	聚束/条带	1	第一个 SAR 卫星星座
COSMO-SkyMed	X	HH, HV, VH, VV	聚束/条带/扫描		第一颗分辨率达到 1m 的商业卫星
TerraSAR-X	X	HH, HV, VH, VV	聚束/滑动/条带/ 扫描/TOP	2	第一颗 TOPSAR 模式, 第一个编队卫星系统
RADARSAT-2	C	HH, HV, VH, VV	聚束/条带/扫描/ATI	2	第一颗双相位中心 成像模式
TecSAR	X	HH, HV, VH, VV	聚束/条带/扫描 /Mosaic	1	第一颗 Mosaic 模式

1.2.2 星载合成孔径雷达干涉发展历史

SAR 干涉测量是建立在 SAR 技术之上的，从干涉原理上说，已有的星载 SAR 都具备一定的干涉功能。星载 SAR 系统的不断发展强劲地推动着 InSAR 技术从理论研究走向实用化。本节主要介绍其中对星载 InSAR 技术发展具有重大促进作用的七套系统，分别是 SEASAT 重轨和差分干涉、SIR-C/X-SAR 多频和极化干涉、ERS-1/2/ENVISAT 跟飞和差频干涉、SRTM 双天线和 ATI 干涉、ENVISAT/SABRINA 被动干涉、TanDEM-X 编队干涉、TanDEM-L 编队极化干涉，如图 1.8 所示。此外，国外提出的一些最新干涉计划还包括 TanDEM-X2、Ka 频段干涉等。

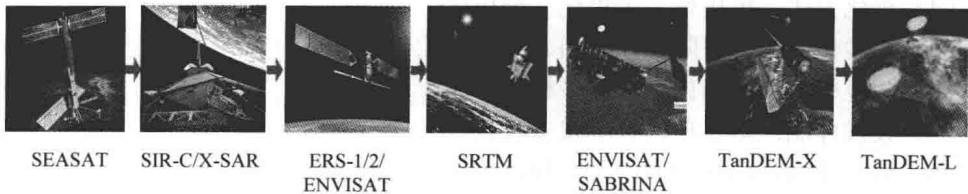


图 1.8 星载 InSAR 系统发展历程