

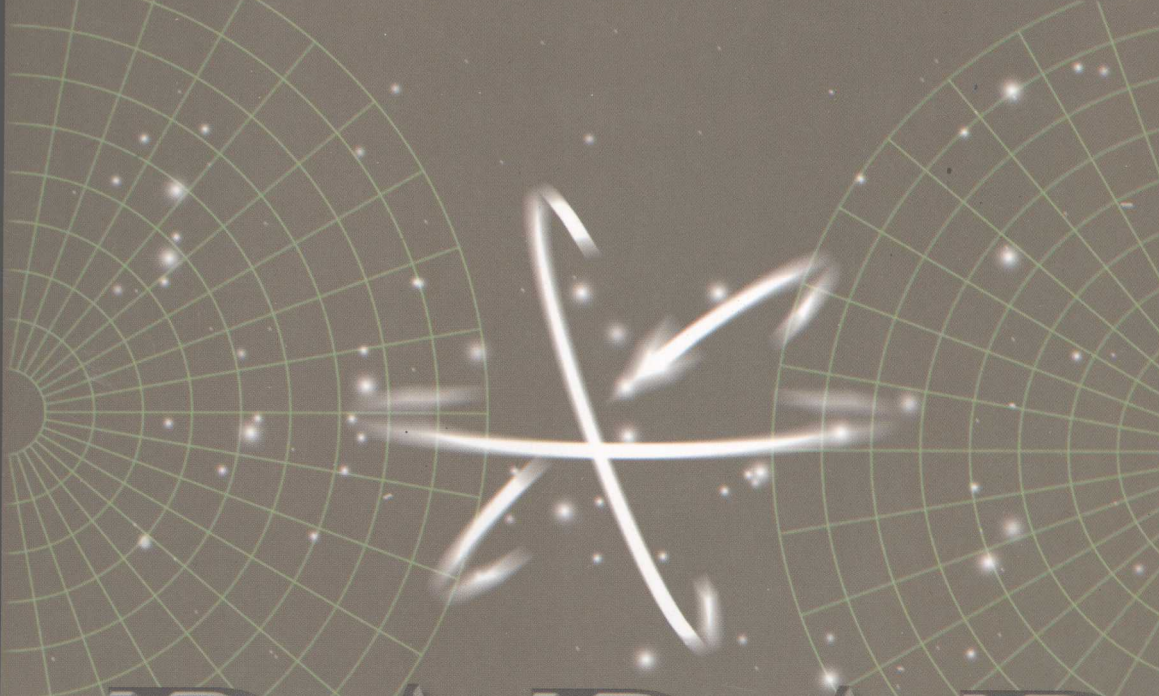
合成孔径雷达

目标检测理论、算法及应用

匡纲要 高贵 蒋咏梅 / 等编著

Synthetic Aperture Radar Target
Detection Theory Algorithms and Applications

国防科技大学出版社

The background of the lower half of the cover features a dark grey field with two large, faint green concentric circular radar grids. In the center, there is a stylized white star-like graphic composed of several curved lines intersecting. Scattered throughout the background are numerous small, bright white dots, resembling stars or radar returns.

RAIDAR



合成孔径雷达

目标检测理论、算法及应用

匡纲要 高贵 蒋咏梅 陆军 贾承丽 / 编著

Synthetic Aperture Radar Target
Detection Theory Algorithms and Applications

RADAR

国防科技大学出版社
湖南·长沙

内 容 简 介

本书主要介绍了合成孔径雷达(SAR)目标检测所涉及的基本概念、理论和应用技术,以及近年来国际上有关的最新研究成果。具体内容包括 SAR 图像中的杂波统计建模、RCS 重构、目标检测的基础理论和算法、目标鉴别、边缘及线目标检测以及极化 SAR 系统中的目标检测,最后给出典型的应用示例。

本书适用于遥感信息处理、图像判读专业的研究人员、工程技术人员、高等院校教师等阅读参考,亦可作为高等院校遥感信息处理等相关专业的研究生课程教材。

图书在版编目(CIP)数据

合成孔径雷达目标检测理论、算法及应用/匡纲要,高贵,蒋咏梅等编著. —长沙:国防科技大学出版社,2007.11

ISBN 978 - 7 - 81099 - 454 - 5

I . 合… II . ① 匡… ② 高… ③ 蒋… III . 合成孔径雷达 IV . TN958

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2007)第 152117 号

国防科技大学出版社出版发行

电话:(0731)4572640 邮政编码:410073

<http://www.gfkdcbs.com>

责任编辑:耿 筠 责任校对:黄 煌

新华书店总店北京发行所经销

国防科技大学印刷厂印装

*

开本:787×1092 1/16 印张:23.25 字数:481 千

2007 年 11 月第 1 版第 1 次印刷 印数:1—1500 册

ISBN 978 - 7 - 81099 - 454 - 5

定价:38.00 元

前言

20 世纪以来,源远流长的科学精神加上艰苦卓绝的长期探索,自然科学的各个领域取得了长足的进步,人类社会文明以前所未有的速度向前推进。兴起于第二次世界大战期间的雷达技术,历经半个多世纪,在各国学者前仆后继、呕心沥血的推动下,成绩斐然,发展更是一日千里。在此期间,被誉为最伟大的雷达技术革命的合成孔径雷达(SAR, Synthetic Aperture Radar)的出现,把雷达技术的研究推向了一个新的高峰,其具有的无与伦比的全天时、全天候成像能力以及大范围、广纵深的全球观测能力,使得人们真正实现了梦寐以求的“足不出户”而遍知天下事的理想。

合成孔径雷达技术是一项复杂的系统工程,其研究涉及雷达成像、数据传输、信号、图像处理、信息的获取与分发等诸多环节。目前,雷达成像技术日臻完善,世界各国出现了一大批耳熟能详、为人们津津乐道的空、天多模式、多极化、多波段 SAR 系统,其分辨率也从最初的几十米到现在的厘米级。然而,与突飞猛进的 SAR 系统的研制所不相宜的是 SAR 图像解译水平的低下。根据本世纪初的数据获取能力,一个典型机载 SAR 系统可在 1min 内得到约 100km^2 的 $1\text{m} \times 1\text{m}$ 分辨率的 SAR 图像,一天内得到和朝鲜面积相当的约 140000km^2 的图像。而图像的解译能力无法满足收集到的大量的图像数据处理的需求,这是世界各国普遍存在的现状。美国议会情报委员会的总监 John Mills 于 1993 年指出,美国的卫星获取的图片中,曾被人眼看过或被任何类型的机械设备或计算机处理过的还不到一半。也就是说,海量的 SAR 数据只能被迫束之高阁,考虑到 SAR 系统收集数据的能力仍然持续增长,即使是目前最先进的磁盘存储水平,仍有大量未做任何处理的数据,现有的人工或计算机

技术对于人们信息获取的需求依然无法企及。因此,为了实时获取图像信息,对发展图像解译技术的需求迫在眉睫。

可以说,目前 SAR 图像解译能力的不足已经成为制约 SAR 应用的一个瓶颈。虽然近几年欧美国家相继出版了 SAR 图像理解方面的专著(如 1998 年由 Oliver 等编著的“Understanding Synthetic Aperture Radar Images”),但都是从 SAR 图像解译大系统出发,对各方面进行了大而全的阐述,缺少对某一关键技术的具体剖析。因此完全有必要对 SAR 图像解译涉及到的关键技术进行更进一步广泛、系统、深入的研究。

SAR 图像自动解译是 SAR 图像解译的最终形式,也是解决 SAR 图像应用瓶颈问题的唯一途径。作为其中的关键技术之一,自动目标检测是实现 SAR 图像自动解译的首要步骤和关键环节。本书旨在和读者一起深入探讨 SAR 图像目标检测的理论、算法和具体的应用,对于其中涉及到的 SAR 图像统计建模技术、SAR 图像杂波抑制技术、SAR 图像自动目标检测技术以及 SAR 图像目标自动鉴别技术展开了系统的深入研究。本书总结了近 10 年来作者对 SAR 图像自动目标检测技术的理解、存在问题的分析和解决途径等研究成果。全书共分 8 章,主要内容为:SAR 图像目标识别与检测概述;SAR 图像杂波建模技术、SAR 图像 RCS 重构技术;SAR 图像点、线状目标的检测技术、SAR 图像目标鉴别技术。希望该书能在实现 SAR 图像自动解译的进程中发挥作用。

本书第一作者领导的研究团队,是由数十名教授、副教授、博士生和硕士生组成的中青年学术梯队,专业背景涉及地球空间信息科学和计算机科学等学科交叉的诸多领域。在 SAR 图像解译技术的研究方面业已进行了近 10 年,先后培养了博士生、硕士生 30 余人,在国内外公开发表了与本书相关的学术论文 100 余篇。本书的研究成果先后得到了国防预研项目、国家高技术研究发展计划(863 计划)项目、国家高技术研究发展计划基金项目、国家自然科学基金、国防科技大学博士生创新基金资助项目以及中科院电子所、中电集团 38 所、二炮装备研究院、空军装备研究院、航空 607 所等兄弟单位合作项目的资

助,作者对以上各个方面的支持表示热忱的感谢!

多年来,我们一直关注国内外 SAR 图像目标检测方面的研究动态并致力于该方面的科研工作,幸能索拾一二,以飨诸同仁。可以说,本书是所有作者与整个研究团队集体智慧的结晶,是整个研究团队辛勤劳动的结果。

本书适用于遥感图像信息处理、雷达、图像判读专业的研究人员、工程技术人员、高等院校教师等,亦可作为高等院校遥感信息处理等有关专业的博士或硕士研究生课程教材。

本书的完成,时公涛博士做了大量的文字校对和编辑排版以及图像重绘工作,周晓光博士、陈强博士、赵凌君博士、张琦硕士等参加了本书部分内容的编写及校对工作,在此表示衷心的感谢!

在本书的编著过程中,作者阅读和引用了大量国内外许多专家学者的论文和书籍,写作的初衷期望能系统阐述 SAR 图像目标检测方面的成果,既重点介绍名家大师、泰山北斗们的学术成果,也兼顾具有闪光思想的研究报道,同时结合自身的研究成果,以使它们能够浑然一体、一脉传承。然而,我们深知,本书所反映的研究工作虽然取得了一定的研究进展,然而对于博大精深的 SAR 图像解译技术而言,只是沧海一粟。路漫漫其修远,囿于作者水平,很多问题未及一顾,本书只能是抛砖引玉。书中难免有不妥甚至错误之处,恳请读者批评指正。

作者

2007 年 10 月于国防科技大学

目 录

第1章 概 论

1.1	合成孔径雷达发展史	(3)
1.2	SAR 图像基本特性	(9)
1.2.1	SAR 图像固有特性分析	(10)
1.2.2	地物参数和 SAR 系统参数对图像解译的影响	(14)
1.2.3	SAR 图像质量评估	(18)
1.3	SAR 目标识别发展现状	(24)
1.4	SAR 目标检测回顾与前瞻	(27)
1.5	本书内容简介	(31)
	参考文献	(33)

第2章 SAR 图像杂波统计模型

2.1	引言	(39)
2.2	杂波模型的分类	(40)
2.2.1	经验分布	(41)
2.2.2	由乘积模型发展的统计模型	(43)
2.2.3	由广义中心极限定理发展的统计模型	(56)
2.2.4	其他模型	(57)
2.2.5	各模型之间的关系及其应用	(60)
2.2.6	统计模型研究的主要结论	(62)
2.3	统计模型的参数估计和拟合优度	(63)
2.3.1	参数估计方法	(63)
2.3.2	各种杂波模型的参数估计	(64)

2.3.3 模型拟合精度评价准则	(65)
2.4 实验结果及分析	(68)
2.4.1 典型杂波的统计特性	(68)
2.4.2 大样本杂波数据的统计分析	(72)
2.4.3 计算量分析	(73)
参考文献	(74)

第3章 SAR 图像 RCS 重构滤波器

3.1 引言	(81)
3.2 基于局域统计的自适应空域滤波算法	(82)
3.2.1 Lee 滤波器	(83)
3.2.2 Kuan 滤波器	(83)
3.2.3 Frost 滤波器及其增强	(84)
3.2.4 MAP 滤波器	(85)
3.2.5 Sigma 滤波器和 Weighting 滤波器	(86)
3.2.6 空域滤波器的改进算法	(87)
3.3 基于相关邻域模型的 RCS 重构算法	(90)
3.3.1 基于相关邻域模型的 RCS 重构	(91)
3.3.2 改进的相关邻域模型	(92)
3.4 基于结构检测的去斑算法	(97)
3.4.1 基于结构检测的斑点抑制	(97)
3.4.2 改进的基于结构检测的斑点抑制	(99)
3.5 小波域相干斑抑制算法	(103)
3.5.1 基于小波分解的软、硬阈值算法	(104)
3.5.2 基于小波分解的贝叶斯去斑算法	(106)
3.6 相干斑抑制性能的评估	(110)
3.6.1 相干斑抑制程度的量化评估	(110)
3.6.2 后向散射系数保真度的量化评估	(110)
3.6.3 边缘细节信息保留情况的量化评估	(111)
3.6.4 点目标信息保留情况的量化评估	(112)

参考文献	(114)
第 4 章 SAR 图像目标检测基础理论与算法	
4.1 引言	(121)
4.2 SAR 图像目标检测算法概述	(121)
4.2.1 基于对比度的目标检测算法	(122)
4.2.2 基于图像的其他特征的目标检测算法	(129)
4.2.3 基于 SAR 复数据特征的目标检测算法	(130)
4.2.4 存在的问题及进一步的研究方向	(131)
4.3 CFAR 检测基础理论	(133)
4.3.1 统计检测理论推导下的 CFAR 检测	(133)
4.3.2 分辨率对 CFAR 检测性能的影响	(134)
4.3.3 由参数估计引起的 CFAR 损失	(135)
4.3.4 模型失配对检测性能影响的讨论	(136)
4.3.5 各种统计模型的 CFAR 检测阈值推导	(139)
4.3.6 四种基本 CFAR 检测器	(143)
4.3.7 智能 CFAR 检测器	(147)
4.4 目标检测后的像素聚类	(150)
4.4.1 密度滤波器	(151)
4.4.2 形态学滤波器	(151)
4.4.3 尺寸滤波器	(152)
4.5 适于乡村背景目标检测的全局 CFAR 检测	(152)
4.5.1 全局 CFAR 检测器及其特点	(153)
4.5.2 全局 CFAR 和局部双参数 CFAR 的计算复杂度分析	(153)
4.5.3 全局 CFAR 算法流程	(154)
4.6 基于自动筛选的目标快速智能 CFAR 检测	(157)
4.6.1 算法原理及详细流程	(157)
4.6.2 算法描述	(160)
4.6.3 快速算法	(162)
4.6.4 算法的理论性能分析	(165)

4 合成孔径雷达目标检测理论、算法及应用

4.6.5	实验结果与分析	(167)
4.7	基于二次 Gamma 核的目标检测	(171)
4.7.1	Gamma 方程	(171)
4.7.2	特征提取和目标检测	(173)
4.7.3	样本训练	(175)
4.7.4	自动选取二次 Gamma 核模板参数的方法	(175)
4.7.5	与双参数 CFAR 检测器的关系	(177)
4.7.6	实验结果及分析	(177)
4.8	基于扩展分形特征的目标检测	(179)
4.8.1	EF 特征检测的尺度敏感性	(180)
4.8.2	目标/杂波模型分析	(181)
4.9	基于信息融合的目标检测	(183)
4.9.1	基于对比度特征和阴影特征融合的检测	(183)
4.9.2	利用对比度特征和 EF 特征的检测	(184)
4.10	基于复数据特征的低频 UWB SAR 目标检测方法	(188)
4.10.1	基于空域特征的目标检测方法	(188)
4.10.2	基于频域特征的目标检测方法	(193)
	参考文献	(199)

第 5 章 SAR 图像目标鉴别技术

5.1	引言	(209)
5.2	SAR 图像目标鉴别算法综述	(209)
5.2.1	算法流派	(209)
5.2.2	主要结论	(218)
5.2.3	有待解决的问题	(219)
5.3	一种目标鉴别新方案:框架、模型与算法	(222)
5.3.1	目标鉴别方案	(222)
5.3.2	“松耦合”模型下的目标鉴别特征提取	(224)
5.3.3	基于遗传算法的特征选择	(230)
5.3.4	加权二次距离鉴别器的设计	(235)

5.3.5 目标编队提取	(236)
5.4 新方案的性能分析	(237)
5.4.1 基于特征选取框架下各算法性能分析	(237)
5.4.2 基于编队知识进一步去虚警方法的性能分析	(251)
参考文献	(252)

第 6 章 SAR 图像边缘及线状目标检测技术

6.1 引言	(259)
6.2 边缘类型	(260)
6.3 SAR 图像边缘检测算子	(262)
6.3.1 差分梯度边缘检测算子	(263)
6.3.2 阶跃边缘检测算子	(267)
6.3.3 屋脊边缘检测算子	(277)
6.4 基于多边缘模型阶跃边缘检测算法	(280)
6.4.1 单边缘模型的不合理性	(280)
6.4.2 基于 ROEWA 算子的边缘检测	(281)
6.5 线基元提取	(285)
6.5.1 基于相位编组的线基元提取方法	(286)
6.5.2 基于模板的线基元提取方法	(287)
6.5.3 基于 RT 的线基元提取方法	(289)
6.6 线基元连接	(293)
6.6.1 基于遗传算法(GA)的线基元连接方法	(293)
6.6.2 基于聚类分析的线基元连接方法	(298)
参考文献	(304)

第 7 章 极化 SAR 目标检测

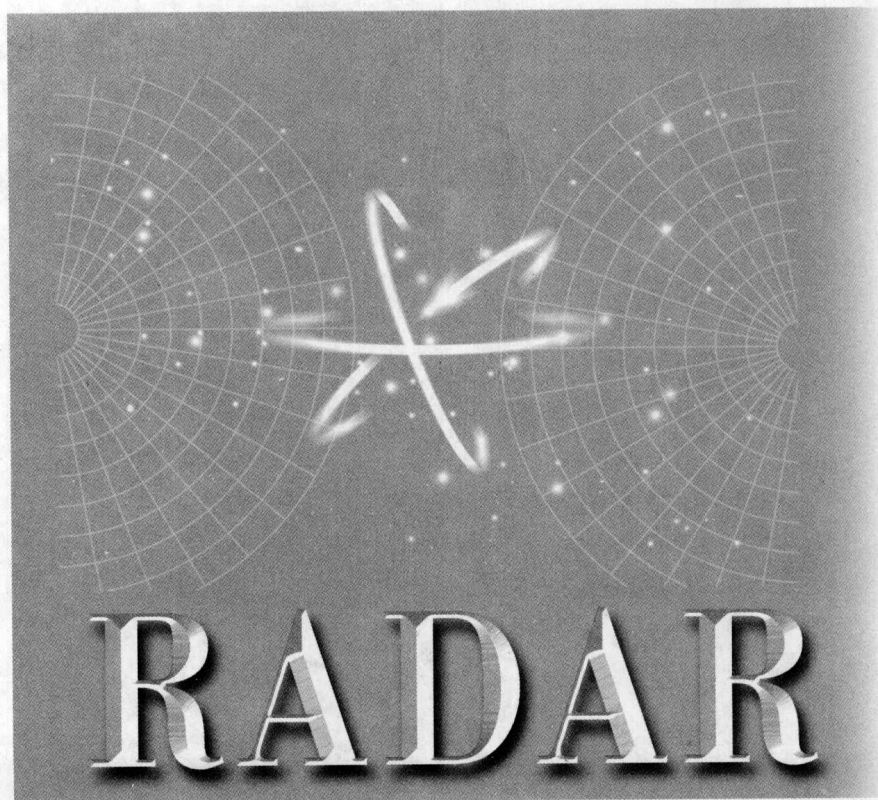
7.1 引言	(311)
7.2 极化 SAR 数据的统计描述	(312)
7.2.1 高斯模型	(312)
7.2.2 非高斯模型	(313)

7.3 最优极化检测器	(314)
7.3.1 最优极化检测器 ^[2]	(314)
7.3.2 检测概率和虚警概率	(315)
7.4 极化白化滤波器(PWF)	(316)
7.4.1 极化 SAR 图像最优斑点抑制 ^[3, 23]	(316)
7.4.2 极化白化滤波检测器 ^[23]	(319)
7.4.3 检测概率和虚警概率 ^[23]	(319)
7.5 其他极化检测器	(320)
7.5.1 单位似然比检测器	(320)
7.5.2 功率合成检测器	(321)
7.5.3 功率最大合成检测器	(321)
7.6 检测性能评估	(321)
7.6.1 极化 SAR 图像仿真	(321)
7.6.2 高斯分布杂波描述下的检测性能评估	(324)
7.6.3 广义 K 分布杂波描述下的检测性能评估	(326)
参考文献	(328)

第 8 章 典型应用示例

8.1 半城区道路网自动提取示例	(333)
8.2 机场跑道提取示例	(340)
8.3 典型车辆目标 ROI 提取示例	(344)

第 1 章 概 论



1.1 合成孔径雷达发展史

自第二次世界大战英国发明雷达以来,雷达技术无论在理论上还是在实践上都得到了飞速发展。新理论、新系统纷纷出现,合成孔径雷达(SAR, Synthetic Aperture Radar)便是其中一个典型的代表。合成孔径雷达是一种利用微波进行感知的主动传感器,也是微波遥感设备中发展最迅速和最有成效的传感器之一。和光学、红外等其他传感器相比,合成孔径雷达成像不受天气、光照等条件的限制,可对感兴趣的目标进行全天候、全天时的侦察。此外,不同波段、不同极化、不同体制的 SAR 系统的出现,使得人们不仅可以灵活地全方位地实现对地观测,而且可以实现干涉测量(InSAR)、地面运动目标指示(GMTI)、隐蔽目标探测等多种功能。随着空间技术的发展,多基 SAR 系统、由多颗卫星组成的星座(Constellation)SAR 系统、极化-干涉 SAR(POL-InSAR)等新系统的出现,也极大地丰富了对地观测的手段。

合成孔径雷达概念的产生可以追溯到 20 世纪 50 年代初。1951 年 6 月美国古德伊尔航空公司(Goodyear Aircraft Corporation)的科学家威尔(Carl Wiley),首先提出可以用频率分析的方法来改善雷达的角分辨率,这就是他提出的有关“多普勒波束锐化”的概论,即通过分析雷达运载平台(如飞机、航天飞机、卫星等)和地面目标间相对运动所产生的多普勒频率来提高方位分辨率,这一概念标志着 SAR 技术的诞生。1952 年 3 月,美国伊利亚诺大学控制系实验室的 C.W. Sherwin 等利用 X 波段机载相干雷达,回波箱电路、磁带记录仪及频谱分析仪证实了波束锐化的概论。随后, Sherwin 又从理论上提出并分析了“合成孔径”的概念。1953 年 7 月, Sherwin 等在一份研究报告中第一次展示了条带式的非聚焦 SAR 图像。1953 年夏季,美国军方在密歇根州大学召开了一次技术研讨会,其中一个小组讨论了雷达在军事侦察中的应用,会上制订了一个发展合成孔径雷达的计划,从而导致第一个机载 SAR 实验系统于 1956 年秋诞生。1957 年 8 月 23 日,密歇根州大学与美国军方合作研究的机载 SAR 实验系统,成功地获取了第一幅全聚焦的 SAR 图像,宣告 SAR 技术由理论向实践的成功跨越,并于 1959 年秋研制出第一台机载 SAR 实用样机;1960 年 4 月向世界公布了由机载 SAR 获取的图像资料。早期的 SAR 干涉条纹是记录在胶片上,需要一套复杂的光学处理系统把干涉条纹处理成可视图像才能提供判读。因此, SAR 在 20 世纪 60、70 年代主要应用于航空侦察领域。表 1.1 简单地列出了合成孔径雷达的发展历程。

表 1.1 合成孔径雷达发展的重要事件

时间	发展
1951	古德伊尔飞行器公司的威尔提出“多普勒波束锐化”概论
1952	伊利亚诺大学证实了波束锐化的概念
1957	密歇根州大学利用光学相干器获取了第一张合成孔径雷达图像
1964	研制成功非实时模拟电子 SAR 相关器
1969	研制成功非实时的数字化电子 SAR 相关器
1972	机载系统实现了实时 SAR 运动补偿
1978	首台星载 SAR NASA/JPL SEASAT 卫星发射
1981	航天飞机成像雷达系统 SIR-A 投入使用
1984	SIR-B 投入使用
1986	实时处理星载 SAR 研制成功
1987	前苏联 1870SAR 送入地球轨道
1990	星载 SAR 发展:前苏联 ALMAS(1991),欧洲 ERS-1(1991),日本 JERS-1(1992)、SIR-C(1994)、ERS-2(1995),加拿大 RADARSAT-1(1995)、SRTM(2000)、ENVISAT(2002)

1978 年 6 月 27 日,美国航空航天局(NASA)发射了“海洋卫星 1”(SEASAT-A)卫星,首次把合成孔径雷达送入宇宙空间,对地球表面 1 亿 km^2 的面积进行了观测,并用无线电传输方式把 SAR 数据送回地面。通过对该卫星图像解译,获得了大量过去未曾得到过的信息,引起地球科学家们的极大兴趣和重视。海洋卫星的上天,标志着 SAR 已成功地进入了空间遥感领域。在以后的 20 年间,星载 SAR 技术得到迅速的发展,一系列星载 SAR 系统先后升空。1981 年 11 月和 1984 年 10 月, NASA 分别发射了航天飞机成像雷达 SIR-A 和 SIR-B。SEASAT、SIR-A 及 SIR-B 都工作在 L 波段,采取 HH 单极化方式,只是 SIR-B 可以在不同的入射角模式下工作。

20 世纪 90 年代, SAR 系统进入了蓬勃发展阶段,先后发射了 5 颗 SAR 卫星,进行了

多于两次的航天飞机成像试验。前苏联于1991年3月发射了“钻石1”(ALMAZ-1)星载SAR。欧空局于1991年7月和1995年分别发射了“欧洲遥感卫星1”(ERS-1)和“欧洲遥感卫星2”(ERS-2)。日本于1992年2月发射了“日本地球资源卫星1”(JERS-1)。加拿大于1995年初发射了“雷达卫星1”(RADARSAT-1)。以上这些雷达都工作在单一频段、单一极化态,而ALMAZ-1与RADARSAT-1可以工作在不同的人射角,并且RADARSAT-1还增加了SCANSAR模式,使其一次观测区域增大到500km。

最重要的SAR系统是美国航空航天局与德国、意大利空间局联合研制成功的SIR-C/X-SAR。该系统于1994年初被成功送入太空,可以同时工作在三个频段(L、C、X波段),获取多种极化的地物信息。其中L、C两波段可以交替以水平极化和垂直极化发射和接收,此时系统具有HH、VV、HV、VH四种极化状态。而对X波段则只有VV一种极化状态。工作于不同的波段可以获取地物对多种不同频率电磁波的响应,工作在L、C波段的四种极化状态所获取的信息可进行不同极化状态下的图像合成,多频、多极化信息的利用,可显著提高地物分类准确率。

2000年2月及2002年,美国利用“奋进号”航天飞机,搭载SIR-C雷达,利用双天线C波段和X波段,对地球陆地表面执行了航天飞机雷达地形测绘任务(SRTM),获取了迄今为止最完整的地球数字地形图。

在这以后发展的SAR系统中,主要集中于增强其功能,如增加工作模式等。欧空局(ESA)于2002年发射的“环境卫星”(ENVISAT)是ESA继ERS-1、ERS-2系统后针对全球环境的监测卫星,其搭载的ASAR雷达工作在C波段,具有四种极化方式,但不能同时实现全极化观测。即将投入使用的加拿大的RADARSAT-2及日本的ALOS相控阵L波段SAR系统具有全极化和ScanSAR工作模式。表1.2列出了成功运行的星载SAR系统及其主要特性。

在星载SAR取得不断发展的同时,由于机载SAR系统具有灵活、低成本等因素,同样受到了各国的广泛的重视。其中美国在机载SAR系统的研究方面一直处于领先地位。下面以几个典型的机载SAR系统为例来说明,ERIM公司研制的P3/SAR,装配在海军P3飞机上,其空间分辨率可达0.33m,测绘带宽达4.9km/9.8km;Sandia国家实验室研制的Lynx SAR,有条带、聚束和GMTI等多种系统模式,其空间分辨率可达0.1m,测绘带宽达935m;另外,联合侦察目标攻击雷达系统、无人机载SAR侦察系统等已用于实战,在海湾战争、科沃索战争、阿富汗反恐战争及最近美国对伊拉克的军事行动中均发挥了巨大威力。目前发达国家的机载SAR空间分辨率已达到0.1~1m,具有获取地物目标的多极化、高程、速度信息和进行宽测绘带大面积观测以及目标自动检测的能力。表1.3列出目前典型的机载SAR系统。