

Understanding and Applications of
Synthetic Aperture Radar Images

合成孔径雷达图像理解与应用

宋建社 郑永安 袁礼海 著



科学出版社
www.sciencep.com

合成孔径雷达图像理解与应用

宋建社 郑永安 袁礼海 著

科学出版社

北 京

内 容 简 介

本书从 SAR 的基本原理和图像的基本特征出发,以 SAR 图像工程应用的后处理为重点,将理论、方法与工程应用实例相结合,以目标电磁散射特征计算、图像特征分析、图像分割、目标识别与分类、图像融合和图像压缩等内容为研究重点,较系统地涵盖了 SAR 图像应用中涉及的核心内容。

本书可作为从事 SAR 图像处理、信号处理、模式识别技术人员和科研院所相关研究人员的重要参考书,也可作为高等院校信号处理、遥感图像处理等相关专业的教师、高年级本科生和研究生的参考教材。

图书在版编目(CIP)数据

合成孔径雷达图像理解与应用/宋建社,郑永安,袁礼海著. —北京:科学出版社,2008

ISBN 978-7-03-023094-2

I. 合… II. ①宋…②郑…③袁… III. 合成孔径雷达 IV. TN958

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2008)第 151976 号

责任编辑:鞠丽娜/责任校对:赵 燕

责任印制:吕春珉/封面设计:三函设计

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>

新蕾印刷厂印刷

科学出版社发行 各地新华书店经销

*

2008 年 11 月第 一 版 开本:B5(720×1000)

2008 年 11 月第一次印刷 印张:14 1/2

印数:1—3 000 字数:291 000

定价:39.00 元

(如有印装质量问题,我社负责调换〈环伟〉)

销售部电话 010-62134988 编辑部电话 010-62138978-8002

版权所有,侵权必究

举报电话:010-64030229;010-64034315;13501151303



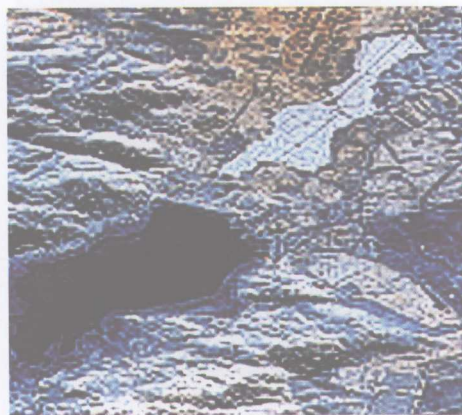
(a)



(b)



(c)



(d)



(e)



(f)

彩色图片1 多波段SAR图像伪彩色融合结果图 ($\alpha=2.0, \beta=1.0$)

(a) 灰度融合图像的高频提升; (b) 图像A与灰度融合图像混合高频提升; (c) 图像B与灰度融合图像混合高频提升; (d) 混合高频提升方法得到的伪彩色图像; (e) 伪彩色映射融合图像; (f) 融合结果局部放大2倍



彩色图片2 多波段SAR图像伪彩色融合结果

- (a) Ku波段SAR图像；(b) L波段SAR图像；(c) X波段SAR图像；(d) P波段SAR图像；
 (e) 不进行多尺度分解，分别将P、L、X三个波段赋给R、G、B三个分量 ($OIF=39.6865$)；
 (f) 多尺度分解与IHS结合，分别将P、L、X三个波段赋给R、G、B三个分量 ($OIF=39.6865$)；
 (g) 多尺度分解与IHS结合，分别将P、X、Ku三个波段赋给R、G、B三个分量 ($OIF=36.5043$)

前 言

自 20 世纪 50 年代合成孔径雷达 (synthetic aperture radar, SAR) 诞生至今, 由于具有全天候、全天时、多波段、多极化等独特的成像特点, 合成孔径雷达在军事和民用领域有极为广泛的应用前景, 受到诸多相关领域研究专家的高度关注。尤其是随着运载平台技术的迅速发展, 星载、机载和无人机载合成孔径雷达成像技术的成熟, 极大地推动了合成孔径雷达在国民经济和国防建设中的普及和应用。

在合成孔径雷达技术发展的前期, 人们的研究热点集中在获取高质量的雷达图像方面。雷达图像不仅具有光学图像一般的几何特性和代数特性, 而且还具有复杂的电磁特性, 对其图像的解译研究具有很大难度, 截至目前, 对其解译算法的研究还不够系统, 远远落后于对前期图像获取技术的研究, 严重制约了对其图像的应用。

1998 年, 我们有幸作为合作单位参加了国家自然科学基金重点资助项目“用信号处理方法提高雷达成像质量”(项目批准号: 69831040), 在项目负责人保铮院士领导下, 承担了其中雷达图像识别专题的研究。从此, 笔者及其所负责的课题组在这一领域开始了艰苦的探索, 在这 10 年中, 课题组又先后承担了三个国家自然科学基金资助项目和几个国防预研项目, 在 SAR 图像理解方面完成了多篇博士、硕士学位论文, 取得了一些研究成果。本书是对笔者及其所负责的课题组 10 年来在合成孔径雷达图像理解与应用方面研究工作较系统的总结。

本书从 SAR 的基本原理和图像的基本特征出发, 以 SAR 图像工程应用的后处理为重点, 将理论、方法与工程应用实例相结合, 以目标电磁散射特征计算、图像特征分析、图像分割、目标识别与分类、图像融合和图像压缩等内容为研究重点, 较系统地涵盖了 SAR 图像应用中涉及的核心内容; 综合了电磁理论、控制科学、数学和计算科学等学科知识, 目的是希望能为从事 SAR 图像应用研究的技术人员和该领域的学生提供一些有价值的参考。

SAR 图像应用研究是信息科学领域研究的前沿课题, 许多问题仍处于探索阶段。本书是在宋建社、郑永安、袁礼海等课题组成员研究的基础上完成的, 宋莹华、蔡幸福、孙文昌、王瑞花、张雄美、潘湘岳和王金龙等参加了本书的校对、绘图工作, 并提出了许多修改意见; 另外, 还参考了课题组张红蕾、薛文通、周文明等成员的博士学位论文, 在此表示感谢。

在编写中, 我们还参考了不少中外相关资料, 对这些文献的作者们表示感谢。书中所用的 SAR 图像除网上公开发布的以外, 大部分来源于中国电子科技集团第 38 研究所。西北工业大学电子信息工程学院何明一教授和西安电子科技

大学雷达信号处理国家重点实验室邢孟道教授在百忙中抽时间审阅了全文，提出了许多宝贵的修改意见，作者在此一并表示感谢。

特别感谢科学出版社的鞠丽娜老师，她对本书的出版给予了极大的关心，在内容安排上给予了热情的指导和帮助，提出了许多宝贵的修改意见。本书的研究工作得到了国家自然科学基金项目和国防预研项目的支持，在此深表谢意！

限于我们的水平，难免带有局限性和片面性，在算法研究方面存在的不足之处乃至谬误在所难免，恳请读者批评指正。

宋建社

2008年7月于西安

目 录

第 1 章 绪论	1
1.1 合成孔径雷达概况	1
1.2 发展历程	2
1.2.1 国外 SAR 发展历程	2
1.2.2 我国 SAR 发展历程	5
1.3 发展趋势	7
1.4 主要应用	8
1.4.1 军事领域	8
1.4.2 民用领域	8
1.5 内容安排	9
第 2 章 合成孔径雷达	11
2.1 概述	11
2.2 SAR 成像基本原理	12
2.2.1 距离向分辨率与脉冲压缩技术	12
2.2.2 方位向分辨率与合成孔径原理	15
2.2.3 点目标信号回波模型	18
2.2.4 SAR 成像处理与算法	20
2.3 SAR 成像的几何特性	23
2.3.1 斜距图像的比例失真	23
2.3.2 透视收缩与顶底位移	24
2.3.3 雷达阴影	25
2.3.4 雷达视差与立体观察	25
第 3 章 雷达目标电磁散射计算	26
3.1 概述	26
3.1.1 电磁散射基本计算方法	26
3.1.2 严格的经典解法	26
3.1.3 近似求解方法	27
3.2 等效电磁流计算	30
3.2.1 等效电磁流奇异性的消除	30
3.2.2 等效电磁流的分析与计算	33
3.3 多次散射的计算	35
3.3.1 几何/物理光学混合算法	35

3.3.2	存在多重散射的条件和遮挡关系的判断	37
3.3.3	几何光学/等效电磁流混合算法	39
3.3.4	GO/PO 混合方法的应用	41
3.4	腔体结构电磁散射 RCS 计算	42
3.4.1	复射线近轴近似电磁散射算法	42
3.4.2	计算实例	45
3.5	复杂目标电磁散射的计算	46
3.5.1	复杂目标几何建模	46
3.5.2	复杂目标电磁散射混合计算	49
第 4 章	合成孔径雷达图像特征分析	53
4.1	概述	53
4.2	SAR 图像辐射特征	53
4.2.1	SAR 图像回波强度的概率分布	53
4.2.2	辐射分辨率	54
4.3	SAR 图像噪声特征	55
4.4	SAR 图像目标几何特征	57
4.4.1	点目标	57
4.4.2	线目标	58
4.4.3	面目标	59
4.5	SAR 图像灰度统计特征	60
4.5.1	幅度特征	60
4.5.2	直方图特征	60
4.5.3	统计特征	61
4.6	SAR 图像纹理特征	63
4.6.1	方向差分特征	64
4.6.2	灰度共现特征	64
4.6.3	小波纹理能量特征	66
第 5 章	合成孔径雷达图像分割	68
5.1	概述	68
5.2	阈值分割法	68
5.2.1	基于遗传算法的二维最大熵阈值分割法	69
5.2.2	二维模糊熵阈值分割法	76
5.2.3	双阈值分割算法	77
5.3	基于马尔可夫随机场模型的分割法	79
5.3.1	吉布斯 MRF 分割模型	79

5.3.2 吉布斯 MRF 分割算法	81
5.3.3 多尺度 MRF 图像分割	86
5.4 基于多尺度几何分析的分割法	91
5.4.1 基于 Contourlet 变换的 SAR 图像分割	91
5.4.2 基于 Wedgelet 变换的 SAR 图像分割	98
5.5 分割评价方法	102
5.5.1 分割质量评价	102
5.5.2 适用情况分析	103
第 6 章 合成孔径雷达图像目标分类	105
6.1 概述	105
6.1.1 分类流程	105
6.1.2 评价标准	106
6.2 概率密度函数估计	107
6.2.1 单一密度函数	107
6.2.2 混合密度函数	109
6.2.3 有限混合密度函数的逼近能力	109
6.3 参数估计	113
6.3.1 极大似然估计	113
6.3.2 EM 算法	114
6.4 最小距离分类法	118
6.5 最大后验概率分类法	120
6.6 支持向量机分类法	124
6.6.1 支持向量机原理	124
6.6.2 支持向量机分类法	129
6.7 隐马尔可夫优化分类法	132
6.7.1 HMM 原理	132
6.7.2 HMOC 模型	133
第 7 章 合成孔径雷达图像目标识别	142
7.1 概述	142
7.1.1 识别方法	142
7.1.2 自动目标识别系统	144
7.2 基于电磁特性的目标识别	146
7.3 典型目标识别	152
7.3.1 道路识别	152
7.3.2 机场识别	158

7.3.3	MSTAR 坦克识别	161
第 8 章	合成孔径雷达图像融合	167
8.1	概述	167
8.1.1	图像融合概念	167
8.1.2	融合效果评价	168
8.2	SAR 图像与可见光图像融合	170
8.2.1	提升小波变换	170
8.2.2	基于提升小波变换区域统计特性的融合算法	172
8.3	SAR 图像与多光谱图像融合	174
8.3.1	主成分分析方法	174
8.3.2	基于主成分分析的 SAR 与多光谱图像融合	175
8.4	多波段 SAR 图像融合	176
8.4.1	基于 à trous 算法方向滤波器组的多波段 SAR 图像灰度融合	177
8.4.2	多波段 SAR 图像伪彩色融合	182
第 9 章	合成孔径雷达图像压缩	190
9.1	概述	190
9.1.1	第一代和第二代压缩技术	190
9.1.2	多尺度方向分析技术	191
9.2	SAR 图像压缩中的典型特征	195
9.2.1	纹理特征	196
9.2.2	变换域系数统计特征	196
9.3	SAR 图像 Non-SWMDA 压缩方法	200
9.3.1	不可分离小波的提升实现	201
9.3.2	基于块分割的二叉树编码方案设计	204
9.4	SAR 图像压缩效果评价	209
9.4.1	保真度准则	209
9.4.2	特征衡量标准	211
英汉术语对照		213
主要参考文献		216

第 1 章 绪 论

1.1 合成孔径雷达概况

雷达 (radar), 源于英文 radio detection and ranging 的缩写, 原意是“无线电探测和测距”, 即用无线电方法发现目标, 测定它们在空间的位置, 因此雷达也被称为“无线电定位”。合成孔径雷达的概念是 1951 年 6 月由美国 Goodyear 宇航公司的 Carl Wiley 首次提出的。SAR 是一种主动式微波成像传感器, 它利用脉冲压缩技术提高距离分辨率, 利用合成孔径原理提高方位分辨率, 从而获得大面积的高分辨率雷达图像。SAR 具有全天时、全天候、多波段、多极化、可变侧视角及高分辨率等优点, 不仅可以详细、准确地测绘地形、地貌, 获取地球表面的信息, 还可以透过地表和自然植被收集地下信息, 甚至在恶劣的环境下也能以较高的分辨率提供详细的地面测绘数据和图像。

合成孔径技术的基本思想是对在平台前进方向的不同位置上所接收的包含相位信息的信号进行记录和处理, 得到比实际天线更长的假设天线进行观测的结果。SAR 的原始数据是把雷达天线发射出的宽幅脉冲到达地表后的后向散射信号以时间序列记录下来的数据, 在原始数据中, 来自地表某一点 P 的后向散射信号被拉长记录到仅相当于脉冲宽度的距离向上。但 SAR 得到的原始数据还不是图像, 只是一组包含强度、相位、极化、时间延迟和频移等信息的大矩阵, 需要经过复杂的处理, 才能得到通常意义上的图像。

SAR 遥感技术是从空间对地观测的一种有效手段, 自 20 世纪 50 年代问世以来, 由于它具有如下特有的优势, 因此得到了迅速发展。

1) SAR 成像不依赖光照, 而是靠自己发射的微波, 能穿透云、雨、雪和烟雾, 具有全天时、全天候成像能力, 这是 SAR 遥感最突出的优势。例如, 在 X 波段, 波长为 3.2cm 时, 微波穿过 4km 浓云后, 其强度仅衰减 1dB, 对地面目标的观测基本没有影响。只有当波长小于 1cm 时, 其影响才较为显著。

2) 微波对地表有一定的穿透能力。当电磁波照射到非导电物体表面时, 一部分被反射, 另一部分进入物体内部。穿透的深度与波长和物质特性有关, 波长越长穿透深度越大。例如, 在 L 波段, 波长为 24cm 时, 可穿透几十米深的干沙, 并可穿透地面植被, 有利于探测地面和地下目标。

3) 对金属目标及地表纹理特征有较强的探测能力。大部分军事目标都含有金属材料, 因此, 许多伪装目标很容易被 SAR 发现。由于 SAR 发射的波束倾斜

照射地面,地面的起伏在 SAR 图像上形成明显的明暗纹理。分析这些纹理特征,对陆地可探测地形、地貌,以及矿产分布;对海洋可探测海浪、海面风场、内波和水下地形,还可用于探测水下潜艇。

4) 利用微波信号中的极化信息、相位信息和多普勒信息,可提高 SAR 的探测能力。微波回波信号中的极化信息可用于提高对目标的分类和识别能力;微波回波信号中的相位信息可用于提取目标的高程信息;微波回波信号中的多普勒信息可用于提取目标的运动参数,实现地面动目标检测 (ground moving target Indication, GMTI)。

随着 SAR 应用领域的拓宽以及 SAR 硬件技术的不断成熟,对 SAR 图像理解与应用的研究变得愈加迫切。人们不仅希望获取 SAR 图像目标的位置与轨道信息,还期望获得目标的形状、体积、质量以及表面电磁参数等物理信息;不但要知道目标在哪里,还要确切知道是什么目标。SAR 图像理解是对图像上各种信息进行综合分析、比较、推理和判断,提取感兴趣的目标特征从而达到对目标的正确描述与表达。它以计算机系统为支撑环境,利用模式识别技术和人工智能技术,根据遥感图像中目标地物的各种影像特征 (颜色、形状、纹理与空间位置),结合专家知识库中目标地物的已知参数和成像规律进行分析计算与推理,实现对 SAR 图像的理解与解译。

1.2 发展历程

1.2.1 国外 SAR 发展历程

合成孔径雷达技术源于美国,在欧美发达国家不断完善与成熟,其应用领域也得到不断推广。类似于其他高新技术,目前欧美发达国家掌控着合成孔径雷达最先进的理论、技术和方法,国外 SAR 的发展历程可分为起步、发展和成熟三个阶段。

1. 起步阶段

1951 年 6 月,美国 Goodyear 航空公司的 Carl Wiley 提出利用频率分析的方法改善雷达角分辨率,他将其称为多普勒波束锐化。次年,C. W. Shervin 提出了全聚焦阵列以及运动补偿的概念。正是这些新思想促成了 X 波段相干雷达的研制。1957 年,美国密歇根大学雷达和光学实验室研制的 SAR 系统获取了第一张全聚焦的 SAR 图像,从此 SAR 逐步进入人们的视野。

1967 年,Greenberg 提出在卫星上安装 SAR 的设想。由于卫星具有飞行高度高、测绘带宽、可以大面积成像等优点,科学家们开始了以航天飞机、卫星等为载体的空载 SAR 研究,并取得了巨大进展。1972 年,美国国家航空航天局

(National Aeronautics and Space Administration, NASA) 和喷气动力实验室 (Jet Propulsion Laboratory, JPL) 进行了 L 波段星载 SAR 的机载校飞。

1978 年 6 月 27 日, NASA 发射了全球第一颗装载了合成孔径雷达的人造地球卫星 SEASAT, 对地球表面 1 亿 km^2 的面积进行了测绘。SEASAT 卫星的运行高度约为 800km, 工作于 L 波段, 测绘带宽为 100km。它具有很高的覆盖率, 转发了不同地形特征的 SAR 数据, 获得了大量过去未曾获取过的信息, 引起了科学家们的重视。SEASAT 的发射标志着 SAR 已成功地进入从太空对地观测的新时代, 标志着星载 SAR 由实验研究向应用研究的关键转变。

2. 发展阶段

由于合成孔径雷达具有全天时、全天候对地观测, 以及能透过地表和自然植被探测地下浅层目标的能力, 因此在其发展的起步阶段便受到了世界上各发达国家的重视。合成孔径雷达也经历了由单波段、单极化、单工作模式、固定入射角向多波段、多极化、多工作模式、多入射角发展的过程。

1981 年 11 月 12 日, 美国“哥伦比亚”号航天飞机搭载 SIR-A 顺利升空。雷达影像成功观测到撒哈拉沙漠的地下古河道, 显示了 SAR 具有穿透地表的能力。1984 年 10 月 5 日, 美国又进行了“挑战者”号航天飞机搭载 SIR-B 的实验。

1987 年 7 月, 前苏联发射的“COSMOS-1870”卫星配备了一部分辨率为 25m 的 S 波段 ALMAZ SAR 系统。该雷达具有双侧视天线, 运行时间长达 2 年, 是第一部长时间运行的空间合成孔径雷达, 主要对人类无法进入的地区进行雷达成像测绘, 监测海洋表面污染, 鉴别海冰和为厚冰区的舰船进行导航等, 其改进型 ALMAZ-1 于 1991 年 3 月 31 日由前苏联发射升空, 搭载 S 波段 SAR。

1988 年 12 月 2 日, 美国航天飞机“亚特兰蒂斯”号将“长曲棍球 (Lacrosse)”军事侦察卫星送入预定轨道, 该卫星是世界上第一颗高分辨率雷达成像卫星, 分辨率达到 1m。“长曲棍球”系统共由 5 颗卫星组成 (Lacrosse-1~5), 后四颗卫星分别于 1991 年 3 月 8 日、1997 年 10 月 24 日、2000 年 8 月 17 日和 2005 年 4 月 30 日发射升空, 该系统在海湾战争与伊拉克战争中均发挥了重要作用。

1989 年, NASA 开展了一项星球雷达计划——Magellan 雷达观测金星计划, 将 SAR 拓展为研究其他星球的重要工具之一。1996 年 NASA 开展了第二项星球雷达任务——Cassini 任务, 用于观测土卫六土星 (Titan) 表面的物理状态、地形和组成成分等, 进而推测其内部构造。Cassini 上搭载的 SAR 工作于 Ku 波段, HH 极化, 距离分辨率为 400~1600m, 方位分辨率为 600~2100m。

德国空间局 (Deutsche Forschungsanstalt fuer Luft-und Raumfahrt, DLR)

于 20 世纪 80 年代中期开发机载合成孔径雷达,并于 1988 年和 1989 年先后研制成功线性极化 C 波段和 X 波段 SAR 系统,1990 年又扩展到 L 波段。该雷达系统具有全极化工作方式,分辨率为 $2.4\text{m} \times 4\text{m}$,测绘带宽为 4km ,投射角为 $20^\circ \sim 27^\circ$ 。

1991 年 7 月 16 日,欧洲空间局 (European Space Agency, ESA) 发射了 ERS-1 合成孔径雷达,运行时间为 3 年。该雷达系统采用准极地轨道,平均运行高度为 785km ,测绘带宽为 100km ,分辨率为 $26\text{m} \times 28\text{m}$,工作于 C 波段,垂直极化方式。它提供全球气候变化情况,并可对近海水域和陆地进行观测。1995 年 4 月 21 日,ESA 又发射了 ERS-2。继 ERS-1/2 后,ESA 于 2002 年 3 月 1 日发射了 Envisat 卫星,它继承了 ERS-1/2 主动微波仪 (active microwave instrument, AMI) 中的成像模式和波模式,增强了其工作模式的功能,具有多极化、多人射角、大幅宽等新特性。

1992 年 2 月 11 日,日本发射了 JERS-1 空间合成孔径雷达,工作于 L 波段,水平极化方式,运行时间为 2 年,轨道高度为 568km ,投射角为 38.5° ,测绘带宽为 75km ,分辨率为 $18\text{m} \times 24\text{m}$ 。2006 年 1 月 24 日,日本发射了更先进的 ALOS 卫星,搭载了光学传感器和 L 波段相控阵合成孔径雷达 PALSAR。

1994 年 9 月,美国航空航天局 (NASA)、德国空间局 (DLR) 和意大利空间局 (Agenzia Spaziale Italiana, ASI) 共同进行了航天飞机成像雷达 (SIR-C/X-SAR) 飞行任务。SIR-C 是由 JPL 和 NASA 共同建造的,为双频雷达 (L 波段和 C 波段),全极化 (HH、HV、VH 和 VV) 工作方式;X-SAR 工作于 X 波段,只有一种 (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,SIR-C 图像数据有助于人们深入理解现象背后的物理机理,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。

1995 年 11 月 4 日,加拿大发射了第一颗资源勘测卫星 Radarsat-1,轨道高度为 800km ,投射角为 $10^\circ \sim 60^\circ$,测绘带宽为 $45 \sim 500\text{km}$,分辨率为 $10 \sim 100\text{m}$,工作于 C 波段,水平极化方式。该系统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。

3. 成熟阶段

随着 SAR 技术的不断发展,在实现多频段、多极化和多视角的同时,为实现更高的全球覆盖率,提供实时准确的数据信息,SAR 逐渐向小型化、SAR 星座组网及干涉测量等方向发展,且其分辨率已达到 1m 以内。

2007 年 6 月 15 日,德国航空航天中心发射了 TerraSAR-X 雷达卫星。该卫星运行在 514km 的轨道上,利用有源天线昼夜搜集整个地球的 X 波段雷达数据,

并且无论天气条件、云层覆盖和照明情况如何,其分辨率均可达到 1m。

2007 年 6 月 8 日与 2007 年 12 月,意大利发射了前两颗 Cosmo-skymed 卫星。Cosmo-skymed 卫星是一个新的地球观测系统,它是基于 4 颗雷达卫星的星座,每颗卫星运行在高度为 619.6km 的太阳同步轨道上。剩余两颗将分别于 2008 年和 2009 年发射。该星座与成熟的地面设备将全天时、全天候地监测地球表面,最高分辨率为 1m,扫描带宽为 10km,且可以利用不同入射角的两颗雷达的测量数据干涉形成三维立体图像,具备雷达干涉测量地形的能力。

2006 年 12 月 19 日、2007 年 7 月 3 日、2007 年 11 月 1 日、2008 年 3 月 28 日,德国分别发射了前四颗 SAR-Lupe 军事雷达卫星,最后一颗计划于 2008 年发射。该系统独特的设计理念是包括五颗卫星的星座,分布在三个不同轨道上。在轨道上只要有 2 颗卫星就能保证系统的正常工作,发射 5 颗卫星主要是预防卫星在轨道上发生故障。卫星每颗重 770kg,搭载的雷达成像设备可以在任何照明和气象条件下对地面设施进行观测和拍照,分辨率约为 0.7m。卫星还可以分辨运动中的汽车及飞机型号,并能识别地面“特殊设施”。

2007 年 12 月 14 日,加拿大航天局(Canadian Space Agency, CSA)和 MDA (MacDonald, Dettwiler and Associates Ltd.) 联合发射了 Radarsat-2 星载合成孔径雷达卫星。Radarsat-2 是加拿大继 Radarsat-1 之后的新一代商用合成孔径雷达卫星。为了保持数据的连续性, Radarsat-2 继承了 Radarsat-1 所有的工作模式,并在原有的基础上增加了多极化成像、3m 分辨率成像、双边(dual-channel)成像和地面动目标检测能力。Radarsat-2 与 Radarsat-1 拥有相同的轨道,但比 Radarsat-1 滞后 30min,这是为了获取两星干涉数据。Radarsat-2 为用户提供全极化方式的高分辨率星载合成孔径雷达图像,在地形测绘、环境监测、海洋和冰川观测等方面都有很高的实用价值。

2008 年 1 月 21 日,以色列的 TecSAR 间谍卫星发射升空,2008 年 1 月 31 日得到了第一幅 SAR 图像。该卫星重 300kg,其中包括 100kg 的合成孔径雷达有效载荷,它能够全天时、全天候提供高分辨率雷达图像(分辨率可达 0.1m),拥有多种工作模式,并能在 24h 内提供双倍数量的可用情报。

目前合成孔径雷达分辨率已经达到 0.1m 数量级。纵观国外 SAR 的发展历程,可以看出随着科学技术的不断进步, SAR 的水平和功能也在不断提高。可以相信,科学家们将不断地挖掘 SAR 的技术潜力,为人类的需求服务。

1.2.2 我国 SAR 发展历程

我国对 SAR 的研究工作起步较晚,始于 20 世纪 70 年代后期。经过几代人三十余年的努力,从无到有,从小到大,从弱到强,许多领域的技术已经进入了国际先进行列。我国 SAR 的发展经历了起步和发展两个阶段。

1. 起步阶段

1973年,中国科学院电子研究所(以下简称中科院电子所)成立了线路调研组,开始进行SAR方面的调研工作。

1976年,中科院电子所成立了我国第一个以合成孔径成像雷达为主要研究方向的研究室,开始了机载合成孔径雷达及其相关技术的研究工作。

1979年,中科院电子所研制了机载SAR样机,并于9月17日在陕西地区获取了第一幅合成孔径雷达图像,标志着我国从此成为世界上为数不多掌握这一核心技术的国家之一。

2. 发展阶段

从国家“六五”计划至今,在有关部门的大力支持下,我国的微波成像雷达及其应用技术在航空、航天、地面接收处理与应用等方面都取得了长足的发展。逐步实现了从单一波段到多波段、从单极化到多极化、从二维到三维、从单一条带模式到条带、聚束、扫描等模式、分辨率从最初的几十米到国际先进水平的跨越。

1983年,研制出单通道、单极化(HH)、单侧视机载SAR系统,采用声表面波器件进行距离向脉冲展宽与压缩,并增加了地速补偿与惯导系统,实现了连续大面积成像。

1987年,我国“863”计划正式提出了星载SAR的研究任务,标志着我国在空间成像领域迈出了具有重大意义的一步。中科院电子所自1988年就开始了与此相关的总体设计和论证工作,1990年完成了单极化星载SAR系统可行性论证,1993年完成了星载SAR工程样机方案,1995年通过了样机设计评审,1997年完成了工程样机的研制。

1987年,中科院电子所研制了多条带、多极化机载合成孔径雷达系统,雷达工作于X波段,可以从HH、VV、HV、VH四种极化方式中任选一种工作,具有双侧视功能。

1988年,受国家“863-308”主题的委托,中科院电子所负责开展了我国第一部星载合成孔径雷达系统的总体研究工作。

1994年,研制出X波段、多极化、多通道、数字成像处理、分辨率为10m的机载SAR系统及其“机载SAR实时数字成像处理器”系统,并获取了我国第一批机载SAR实时数字图像。

2003年,中科院电子所与马来西亚签订了机载L-SAR的出口合同,实现了我国合成孔径雷达走向国际舞台这一历史性的跨越。

中科院电子所、电子科技集团14所和38所、航空航天607所等单位分别研