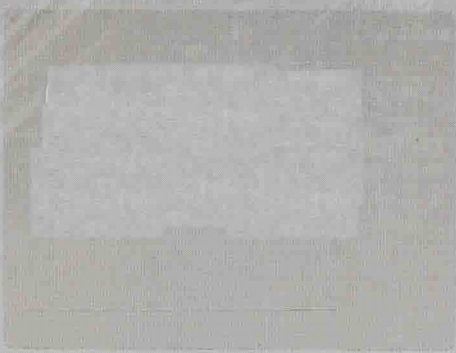
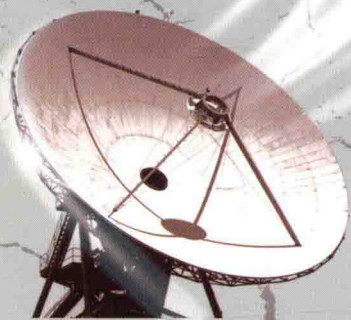


极化SAR土地资源 调查监测技术与应用

尤淑撑 行敏锋 何彬彬 魏 海 著



科学出版社

极化 SAR 土地资源调查 监测技术与应用

尤淑撑 行敏锋 何彬彬 魏 海 著

科学出版社

北 京

内 容 简 介

本书系统地介绍了 SAR 技术在土地资源业务调查中的应用。主要包括 SAR 卫星的现状和发展趋势以及 SAR 数据的应用进展现状, 土地资源调查业务对 SAR 数据的要求, SAR 图像的增强技术, 极化分解与纹理参数提取技术, 土地质量参数反演方法, 土地利用信息提取方法, SAR 土地利用变化检测, 建筑物提取与三维重建等。最后, 从多个方面分析了 SAR 的典型应用案例。

本书可供从事 SAR 图像处理、土地利用变化检测的研究人员参考使用, 也可作为高等院校遥感和地理信息系统等相关专业研究生和高年级本科生的教学参考书。

图书在版编目(CIP)数据

极化 SAR 土地资源调查监测技术与应用 / 尤淑撑等著. — 北京: 科学出版社, 2018.7

ISBN 978-7-03-058294-2

I. ①极… II. ①尤… III. ①遥感图象-数字图象处理-应用-土地资源-资源调查 IV. ①F301-39

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2018) 第 158557 号

责任编辑: 李小锐 / 责任校对: 韩雨舟
责任印制: 罗 科 / 封面设计: 墨创文化

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>

成都锦瑞印刷有限责任公司印刷

科学出版社发行 各地新华书店经销

*

2018年7月第 一 版 开本: 787×1092 1/16

2018年7月第一次印刷 印张: 15 1/4

字数: 298 千字

定价: 128.00 元

(如有印装质量问题, 我社负责调换)

前 言

全国土地资源信息是制定国民经济发展规划、计划及宏观决策的重要依据,也是国家可持续发展的需要。及时准确地掌握全国土地利用/土地覆盖变化情况,开展土地利用调查,既可为国土资源管理部门加强国土资源管理、切实保护耕地提供数据支持,也可为科学研究工作提供基础材料。中国在土地资源遥感调查与监测在技术方法和监测技术体系方面取得了很大进展,基本实现了遥感监测技术在国土资源管理中的产业化应用。但对于中国南方多雨、多云地区,光学遥感在土地调查方面受到了限制。SAR 遥感技术具有全天时、全天候、不受气候影响、具有一定穿透能力等优势,将会对光学遥感形成补充,在土地利用调查中发挥重要作用。

本书是作者在主持国家国际科技合作专项“国家耕地资源动态监管系统核心技术引进与合作研究项目(2012DFA20930)”、“十二五”民用航天科研工程先期攻关项目“高分极化 SAR 土地业务应用潜力评价和新增建设用地提取技术”、“基于高轨 SAR 数据的土地资源调查监测技术”、国家重点研究计划“星载新体制 SAR 综合环境监测技术(2017YFB0502700)”等研究课题的基础上,总结提升并参考相关研究撰写而成。

本书共分 9 章,第 1 章绪论,主要简述 SAR 卫星的现状与发展趋势,以及 SAR 数据的应用进展;第 2 章阐述 SAR 卫星数据在土地资源调查中的作用,以及土地资源调查监测对 SAR 数据的要求;第 3 章针对 SAR 图像的增强,介绍 SAR 滤波及 SAR 图像与光学图像的融合;第 4 章以极化特征矩阵为基础,探讨极化分解与纹理参数提取的方法;第 5 章针对植被生物量、土壤水分等土地质量主要参数,介绍其反演方法;第 6 章研究基于最大似然准则和 SVM 的土地利用信息提取方法;第 7 章以图像差异为基础,研究 SAR 土地利用变化检测方法;第 8 章介绍建筑物提取与三维重建;第 9 章从 SAR 分类、单时相 L-SAR 数据的建设用地提取、多时相 L-SAR 数据的新增建设用地提取三个方面分析 SAR 典型案例的应用。

本书历时多年完成,凝聚了课题组多位成员的辛勤工作。在此感谢高延利、张建平、李宪文、张晓玲、刘顺喜、宋海荣、陆颖、戴建旺、何宇华、刘爱霞、王忠武、郑佳佳、蔡勇、张辉、马晶、吴田等。

由于著者水平有限,书中难免有疏漏之处,恳请前辈及同仁批评指正。

著 者

2018 年 7 月

目 录

第1章 绪论	1
1.1 SAR 卫星的现状与发展趋势	1
1.1.1 SAR 卫星的现状	1
1.1.2 SAR 卫星的发展趋势	6
1.2 SAR 数据的应用及发展	8
参考文献	10
第2章 SAR 数据土地资源调查监测应用需求	11
2.1 SAR 卫星数据在土地资源调查监测中的地位与作用	11
2.2 土地资源调查监测对 SAR 数据的要求	11
2.2.1 波段设置要求	11
2.2.2 极化设置要求	12
2.2.3 空间分辨率设置要求	13
2.2.4 入射角设置要求	13
2.2.5 扫描幅宽设置要求	13
2.2.6 土地行业应用对地面系统要求	14
参考文献	15
第3章 SAR 数据处理	16
3.1 SAR 图像斑点噪声抑制	16
3.1.1 滤波方法	18
3.1.2 滤波实验结果	24
3.2 SAR 图像与光学图像融合	57
3.2.1 基于 HSV 变换的图像融合	57
3.2.2 基于 Brovey 变换的图像融合	59
3.2.3 基于 PCA 变换的图像融合	60
3.2.4 基于 Gram-Schmidt 变换的图像融合	61
3.2.5 基于 Curvelet 变换的图像融合	62
参考文献	64

第4章 SAR 特征提取	65
4.1 极化特征矩阵	65
4.2 极化分解	68
4.2.1 Cloude 分解	68
4.2.2 Holm 分解	70
4.2.3 Van Zyl 分解	72
4.2.4 SPOEC 分解	74
4.2.5 Freeman 分解	76
4.3 纹理特征提取	77
4.3.1 灰度共生矩阵	77
4.3.2 纹理特征提取	78
参考文献	82
第5章 SAR 土地质量主要参数反演	84
5.1 草原草本植被生物量反演	84
5.1.1 植被散射模型	85
5.1.2 草本植被散射模型	89
5.1.3 草本植被生物量估算方法	92
5.1.4 结果与讨论	93
5.2 草原混合植被生物量反演	99
5.2.1 混合植被散射模型	99
5.2.2 混合植被生物量估算方法	102
5.2.3 混合植被后向散射模拟	102
5.2.4 生物量估算结果	105
5.3 草原土壤水分反演	110
5.3.1 土壤散射模型	111
5.3.2 植被对土壤水分反演的影响	118
5.3.3 后向散射模拟	120
5.3.4 土壤水分估算结果	124
参考文献	127
第6章 土地利用信息提取	135
6.1 基于最大似然准则的 SAR 土地利用信息提取	135
6.1.1 基于最大似然准则的监督分类	135
6.1.2 基于[S]矩阵的最大似然准则分类	137

6.1.3 基于 $[C]$ 或 $[T]$ 矩阵的 Wishart 分类	138
6.1.4 H/α -Wishart 非监督分类	140
6.2 基于 SVM 的土地利用信息提取	149
6.2.1 SVM 分类器	149
6.2.2 基于 SVM 的土地利用信息提取结果	151
参考文献	160
第 7 章 土地利用变化检测	161
7.1 变化检测方法	161
7.2 生成灰度差异图	162
7.3 生成纹理差异图	164
7.4 基于主成分变换的纹理差异图	164
7.5 变化区域检测	166
7.6 变化动态指数	169
参考文献	170
第 8 章 建筑物提取与三维重建	171
8.1 建筑物提取	171
8.1.1 分割尺度参数确定	172
8.1.2 多尺度分割	173
8.1.3 基于 SVM 的建筑物提取	174
8.2 建筑物三维重建	176
8.2.1 基于 InSAR 技术的 DSM 生成	178
8.2.2 基于 Landsat 数据的建筑物足印提取	180
8.2.3 面向对象的建筑物三维重构	183
8.2.4 重建结果分析	185
参考文献	189
第 9 章 典型案例应用	190
9.1 单极化、双极化与全极化 SAR 的分类	190
9.1.1 分类特征提取与分析	190
9.1.2 分类流程	192
9.1.3 实验结果与分析	192
9.1.4 分析与结论	196
9.2 基于单时相 L-SAR 数据的建设用地提取	200
9.2.1 基于单时相 L-SAR 数据的建设用地提取(幅度)	205

9.2.2 基于单时相 L-SAR 数据的建设用地提取(幅度+纹理)	210
9.2.3 基于单时相 L-SAR 数据的建设用地提取(幅度+分解参数)	214
9.2.4 基于单时相 L-SAR 数据的建设用地提取(幅度+DSM)	220
9.2.5 基于单时相 L-SAR 数据的建设用地提取(幅度+纹理+分解参数)	222
9.3 基于多时相的新增建设用地提取	224
9.3.1 基于多时相 L-SAR 数据的新增建设用地提取(幅度)	225
9.3.2 基于多时相 L-SAR 数据的新增建设用地提取(幅度+纹理)	226
9.3.3 基于多时相 L-SAR 数据的新增建设用地提取(幅度+分解参数)	230
9.3.4 基于多时相 L-SAR 数据的新增建设用地提取(幅度+DSM)	231
9.3.5 基于多时相 L-SAR 数据的新增建设用地提取(幅度+纹理+极化熵)	232
参考文献	233

第 1 章 绪 论

1.1 SAR 卫星的现状与发展趋势

合成孔径雷达 (synthetic aperture radar, SAR) 是一种高分辨率有源微波遥感成像系统, 能够全天时、全天候地对目标大面积成像, 对于全天候地形测绘、海洋洋流及极地冰山的跟踪观察、灾情预报、资源勘探和军事侦察都有重要意义, 已经逐步发展为国际雷达领域、遥感领域及众多学科的热点研究课题之一(张澄波, 1989)。

1.1.1 SAR 卫星的现状

自 1978 年美国成功发射了第一颗星载 SAR 卫星 Seasat-1 以来, 许多国家都陆续开展星载 SAR 技术研究(Townsend, 1980)。尤其是近 10 年来, 随着世界各国对多元空间信息的日益重视, 星载 SAR 越来越成为对地观测领域的研究热点, 美国、俄罗斯、加拿大、以色列、日本等国先后发射了面向不同应用需求的 SAR 成像雷达卫星, 星载 SAR 技术的发展推动力已不仅仅依靠单项技术突破, 而转变为依靠概念体制的推陈换代(李春升等, 2016)。

纵观星载 SAR 技术的发展历程, 其经历了早期的孕育期(1970~1990 年)、成长期(1990~2000 年)到目前的蓬勃期(2000 年至今), 整个发展趋势已经从传统的单项技术突破转变为概念体制的更新, 各种面向不同应用需求的先进星载 SAR 系统不断出现, 呈现出工作模式多样化、分辨能力精细化、空间布局层次化的特点(李春升等, 2016)。

美国是最早开发和应用 SAR 技术的国家, 陆续发射了 SIR 系列(Jordan et al., 1995; Evans et al., 1997)、“长曲棍球”系列(孙佳, 2007)、“FIA”系列(杨海燕等, 2009)等雷达卫星, 积累了丰富的研制和应用经验。

SIR-A 是一部 HH 极化 L 波段合成孔径雷达(SAR), 以光学记录方式成像。它是构成 NASA(OSTA-1)的一个组成部分, 主要目的是让人们更多地获取地表信息, 并作为地球观测的科学平台。SIR-B 也是一部 HH 极化 L 波段合成孔径雷达(SAR), 它是构成 NASA(OSTA-3)的一个组成部分。SIR-C/X-SAR(Stofan et al., 1995)是在 SIR-A、SIR-B 的基础上发展起来的, 引入了很多新技术, 于 1994 年 4 月由美国 NASA 利用航天飞机将其送上太空, 是 20 世纪 90 年代最先进的航天雷达系统, 主要表现在: ①它是运行在地球轨道高度上的第一部多波段同时成像雷达, 共有 3 个波段, 由美国研制 L 和 C 波段 SAR, 德国、意大利研制 X 波段 SAR; ②它是运行在地球轨道高度上的第一

部高分辨率 4 种极化(HH、HV、VH 和 VV)同时成像的雷达(X-SAR 只有 VV 极化);
③它采用相控阵天线,其下视角和测绘带都可在大范围内改变。该系统可随航天飞机进行多次飞行,主要应用于环境监视和资源勘探等(王振力和钟海,2016)。

航天飞机雷达地形测量任务(Shuttle Radar Topography Mission, SRTM)(Belz et al., 2006)是由美国宇航局(NASA)、国防部国家测绘局(NIMA)和德国宇航中心(DLR)共同承担的测量任务。SRTM 采用的主雷达天线由 C 波段天线(可接收和发射波长为 5.6 cm 的雷达信号)、X 波段天线(可接收和发射波长为 3 cm 的雷达信号)和 1 台计算天线位置数据的姿态与轨道测定电子仪(AODA)组成。SRTM 的主要目标是收集干涉雷达数据,生成几乎可以覆盖全球的数字高程模(DEM)(此模型覆盖 $-56^{\circ}\sim+60^{\circ}$ 纬度的地球表面)。SRTM 数据的应用领域十分广泛,如地质学、地球物理学、地震研究、火山监控及遥感图像数据的配准、土木工程、飞行模拟器、导弹与武器制导、演习及战场管理等(王振力和钟海,2016)。

“长曲棍球”(Lacrosse)卫星是当今世界上技术非常先进的美国军用雷达成像侦察卫星。迄今为止,美国共发射了五颗“长曲棍球”卫星,Lacrosse-1(于1988年12月发射)、Lacrosse-2(于1991年3月发射)、Lacrosse-3(于1997年10月发射)、Lacrosse-4(于2000年8月发射)、Lacrosse-5(于2005年4月发射),其中Lacrosse-1已经退役。由于星载合成孔径雷达采用大型相控阵抛物面天线(直径9~14 m, X、L 两个频段,双极化方式),所以长曲棍球卫星地面分辨率可以达到1 m(标准模式)、3 m(宽扫模式)和0.3 m(精扫模式)。在宽扫模式下,其地面覆盖面积可达几百平方千米。目前,“长曲棍球”卫星已成为美国卫星侦察情报的主要来源,它不仅能够跟踪舰船和装甲车辆的活动,监视机动或弹道导弹的动向,而且能发现伪装的武器和识别假目标,甚至能穿透干燥的地表,发现藏在地下数米深处的设施(王振力和钟海,2016)。

“Discover II”(发现者 II)卫星是由美国空军(U.S. Air Force)、美国国防部高级研究计划署(DARPA)和国家情报局(NRO)联合开发的 SAR 卫星系统(刘志刚等,2011)。Discover II 能够提高对战场的监测和侦察能力,可以通过多星协作实现对全球地面目标的精确监控,实现高距离分辨率地面动目标检测(HRR-GMTI)、合成孔径雷达成像和获得高分辨率数字地形高程数据(DTED)(王振力和钟海,2016)。

美国宇航局(NASA/JPL)一项轻型 SAR 技术研究计划(Light SAR),目标是利用先进技术来降低 SAR 的成本、提高 SAR 数据的质量。在设计上确定为双频(L, X)、L 波段四极化、高分辨率(优于3 m)的 SAR 系统。满足商业和科学等用户需求,最终目标为设计、发射和操作地球轨道 SAR 小卫星系统,其主要用途为监测自然灾害、炭周期,测量冰川/冰原平衡,测量海岸线,监测海洋对大气的影响,同时引导下一代商业远程数据的扩展(王振力和钟海,2016)。

合成孔径雷达除了开展对地观测研究之外,也是研究其他星球的重要工具之一。1989年,美国 NASA 开展了第一项星球雷达任务,即 Magellan 雷达观测金星计划。1996年,美国 NASA、欧洲空间局(European Space Agency)、意大利空间局(Italian Space Agency)共同开展了第二项星球雷达任务——卡西尼(Cassini)计划。Cassini 上搭载的雷达工作于 Ku 波段,HH 极化,距离向分辨率为400~1600 m,方位向为600~2100 m,

其主要目的是探测土星环结构与相关性质、土星卫星组成与地质历史、土星大气组成结构与性质、土星磁场结构与性质、土星之泰坦卫星表面云雾组成与性质。

美国 NASA 的首颗土壤水分探测卫星 SMAP, 是继欧洲局 SMOS 之后全球第二颗专注于土壤水分观测的卫星, 于 2015 年 1 月 31 日从范登堡空军基地成功发射。SMAP 搭载 L 波段的雷达和辐射计, 能够探测到地表 5 cm 深度, 具有穿透云和中等程度植被冠层覆盖的能力, SMAP 将产生至今为止最高分辨率和最高精度的土壤水分卫星产品(王振力和钟海, 2016)。

近年来, 以德国、意大利为首的欧盟各国开始向天基侦察领域进军, 并在天基 SAR 发展中走出一条不同于美国的发展路线。

ERS-1 和 ERS-2 由欧洲局分别于 1991 年和 1995 年发射。ERS-1/2 携带多种有效载荷, 包括侧视合成孔径雷达和风向散射计等装置。由于卫星采用了先进的微波遥感技术来获取全天候与全天时的图像, 所以比起传统的光学遥感图像, 它有着独特的优势。ERS-2 卫星借助其优于预期的运行状况和不可多得的多学科、多用途特点, 使得该卫星具有独一无二的科学价值。ERS 系列卫星是民用卫星, 主要用途是对陆地、海洋、冰川、海岸线成像(庞之浩和常明娟, 2003)。

ENVISAT-1 是由欧空局于 2002 年在阿里亚纳 5 号火箭发射的一颗先进的太阳同步极轨地球环境监测卫星。ENVISAT-1 上所搭载的 ASAR 是基于 ERS-1/2 主动微波仪 (AMI) 建造的, 它继承了 ERS-1/2 AMI 中的成像模式和波模式, 增强了在工作模式上的功能, 具有多极化、多入射角、大幅宽等新的特性。ENVISAT-1 上仍装载了 ERS 上的海洋遥感器, 其技术性能有所改进, 探测能力也会增强。除上述以外, ENVISAT-1 还具有探测海洋水色环境和海岸带的能力, 如叶绿素浓度、泥沙含量、有色可溶有机物及海洋污染和海岸形成过程等, 而 ERS 卫星则不具备这种能力。

欧洲局的 Sentinel-1 是其 GMES (Global Monitoring for Environment and Security) 计划的重要组成部分, 为极轨 SAR 业务化应用系统。它工作于 C 波段, 采用双星工作模式。Sentinel-1 保持了欧洲局 ERS-1/2、ENVISAT-1 的 C 波段星载 SAR 数据的连续性。

德国的 SAR-Lupe 军事雷达卫星, 是欧洲高分辨率天基成像雷达的首次应用。该系统独特的设计概念包括 5 颗卫星的星座, 分布在 3 个不同的轨道上。在轨道上只要有 2 颗卫星就能保证该系统正常工作, 之所以要发射 5 颗卫星, 主要是为预防卫星在轨道上发生故障。SAR-Lupe 是目前世界上重量最小的雷达成像侦察卫星, 其装备有星间通信链路, 以加快成像指令从一颗卫星向另一颗卫星的传递速度, 缩短图像获取的延迟时间。利用这些卫星上的星间通信链路, 欧盟军事终端用户能够在成像指令发出后 11 小时内接收到卫星对全球任一地点拍摄的图像数据。SAR-Lupe 卫星使用 X 波段雷达系统, 可以穿透黑暗和云层, 提供分辨率优于 1 m 的图像。

Terra SAR-X 是德国新一代的高分辨率雷达成像卫星(Pitz and Miller, 2010), 于 2007 年在俄罗斯拜科努尔发射场成功发射, 它也是世界上第一颗商用分辨率达到 1 m 的雷达卫星。Terra SAR-X 雷达卫星具有多极化、多入射角和精确的姿态和轨道控制能力, 采用 3 cm 的 X 波段合成孔径雷达, 可进行干涉测量和动态目标的检测。从技术角度来说, Terra SAR-X 是对已经成功实施的 SIR-C、SRTM 等项目的良好延续, 同时

采用了可裁减能力的 Astro Bus 平台、体装方式的 3 节砷化镓太阳能电池、全冗余设计的有效载荷部件等新技术。因此, Terra SAR-X 的成功实施, 标志着德国对地观测技术水平达到了崭新的高度。

德国 Tan DEM-X 卫星于 2010 年 6 月 22 日由俄罗斯一枚运载火箭成功发射升空。这颗卫星是 Terra SAR-X 的“姊妹”卫星, 重 1.3 t, 飞行高度为 514 km。同年 10 月 14 日, Tan DEM-X 被移近至与 Terra SAR-X 相距 350 m 的距离。通过一颗卫星发射信号, 两颗卫星同时接收实现了干涉观测能力, 开始执行为期 3 年的 3D 地球数字模型绘制任务, 主要用于水文学、地质学、海洋学等领域(王振力和钟海, 2016)。

由意大利自行研制的、耗费约 9 亿欧元的军民两用 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 619.6 km 的太阳同步轨道上。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 1 m, 扫描带宽为 10 km, 且可以利用不同入射角的 2 颗雷达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(王振力和钟海, 2016)。

加拿大是最早发展星载 SAR 的国家之一, 早在 1976 年, 加拿大就启动了“雷达卫星”(Radarsat)计划。作为最为成功的商用 SAR 系列卫星, 在 1995 年 11 月成功发射并运营了 Radarsat-1 卫星后, 于 2007 年 12 月 14 日再次成功地发射了 Radarsat-2 卫星。Radarsat-2 是由 CAS(Canadian Space Agency)和 MDA(Mac Donald, Dettwiler and Associates Ltd)联合出资开发的星载合成孔径雷达系统。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、3 m 分辨率成像、双边(dual-channel)成像和 MODEX(moving object detection experiment)。Radarsat-2 与 Radarsat-1 拥有相同的轨道, 但是比 Radarsat-1 滞后 30 min, 这是为了获得两星干涉数据。Radarsat-2 的用途是给用户提供更极化方式的高分辨率的星载合成孔径雷达图像, 在地形测绘、环境监测、海洋和冰川的观测等方面都有很高的实用价值(刘新和曹晓庆, 2008)。

俄罗斯也是最早发展星载 SAR 技术的国家之一, 早在 20 世纪 80 年代就已经发射了民用遥感雷达卫星 Almaz。但近年来, 俄罗斯在星载 SAR 领域发展相对缓慢, 新型 SAR 卫星系统相对较少。

俄罗斯于 1991 年发射的 Almaz-1 卫星是一种潜艇探测卫星, 可以观察到潜艇在水下产生的尾流。该卫星在服役 17 个月后, 由于缺少燃料坠入太平洋。Almaz-1B 卫星是俄罗斯于 1998 年发射的, 用于海洋和陆地探测, 在轨工作 2 年, 卫星上搭载 3 种 SAR 载荷: SAR-10(波长 9.6 cm, 分辨率 5~40 m, 带宽 25~300 km); SAR-70(波长 7 cm, 分辨率 15~60 m, 带宽 100~150 km)和 SAR-10(波长 3.6 cm、分辨率 5~7 m)。

Arkon-2 多功能雷达卫星主要用于获取地面固定和移动目标以及海面目标, 监视地表、海面等。该卫星拥有独特的三波段雷达。它的分米波段观测系统可以在地面丛林中寻找目标。雷达的 70 cm 波长可以在干燥的土地之下识别伪装或地下目标。Arkon-2 卫星还可提供详细的、质量最好的区域图片, 其测量范围是 10 km×10 km(分辨率达 1 m); 除此之外, 它也可提供 500 km 范围内的全景图片(分辨率为 50 m)。

Kondor-E 是由俄罗斯 NPO Mash 负责研发的一颗小型 S 波段雷达卫星, 采用轻型 6 m

可折叠的抛物面天线,重量仅为 800 kg(国外类似卫星重达 2~3 t),且费用比国外类似卫星减少 4~5 倍。卫星轨道为极轨,高度为 800 km。其多功能雷达可提供卫星两侧各 500 km 范围内的高分辨率图像,还能提供 30 幅数字地图模拟图像。

日本在 L 波段星载 SAR 研究方面获得了很多成果。JERS-1 卫星于 1992 年在 Tanegashima 空间中心被发射升空,其主要用于地质研究、农林业应用、海洋观测、地理测绘、环境灾害监测等。该卫星载有两个完全匹配的地对观测载荷:有源 SAR 和无源多光谱成像仪。1998 年 10 月 11 日 JERS-1 发生故障,使得该卫星终止了寿命。因此, JERS-1 总共在轨工作了 6 年半。

日本于 2006 年发射了一颗 ALOS(advanced land observing satellite)卫星,是 JERS-1 与 ADEOS 的后继星,采用了先进的陆地观测技术,能够获取全球高分辨率陆地观测数据,主要用于环境观测、灾害检测和资源调查等(沈强等, 2012)。ALOS 卫星携带 3 个传感器:全色立体测图传感器(PRISM),主要用于数字高程测绘和立体测图;新型可见光和近红外辐射计(AVNIR-2),主要用于精确的土地覆盖观测;相阵型 L 波段合成孔径雷达(PALSAR),主要用于实现全天候的陆地观测。PALSAR 是一种主动式微波传感器,该传感器具有高分辨率(幅宽为 40~70 km)、扫描式合成孔径雷达(幅宽为 250~350 km)、极化三种观测模式。它不受云层、天气和昼夜的影响,可全天候对地进行观测,其性能比 JERS-1 卫星所携带的 SAR 传感器更优越。

日本的 ALOS-2 卫星于 2014 年 5 月 24 日搭载 H-IIA 火箭被送入预定轨道,发射取得成功。ALOS-2 卫星是 ALOS 卫星的后续计划(Suzuki et al., 2009),配备了全球领先的 L 波段 SAR 传感器,能够克服恶劣天气的影响,并拥有较强的植被穿透能力。相对于上一代 ALOS 卫星,其拍摄范围提高了 3 倍,雷达传感器的拍摄模式也有显著增加,可以获得 1~100 m 多种不同分辨率图像。相对于其他波段的 SAR, L 波段能更准确地观测到陆地的变化,其主要用于对地球陆地区域进行观测,并能及时监测一些自然灾害,例如洪水和滑坡、暴风雨或者飓风等。

2008 年 1 月, TecSAR 卫星的成功发射标志着以色列跻身于世界卫星研制强国之列。2008 年 1 月 31 日得到了第一幅 SAR 图像。该卫星重量达 300 kg,其中包括 100 kg 的合成孔径雷达有效载荷。TecSAR 的雷达有效载荷能够在白天、夜晚及全天候条件下提供高分辨率图像(最高可以辨别地面 10 cm 范围的图像),并能在 24 h 内提供双倍数量的可用情报,可在多种模式下工作,并且其天线非常敏捷,可以很快地从一个目标调整至另一个目标。

RISAT-2 是印度首颗 X 波段雷达成像(SAR)卫星,隶属于印度空间研究组织(IRSO),于 2009 年由 PSLV-CA12(即“极地运载火箭”)火箭搭载,从印度斯里哈里科塔发射升空。RISAT-2 因为其外形以及技术参数酷似 2008 年由印度发射升空的以色列 TecSAR 卫星,所以外界通常认为 RISAT-2 为 TecSAR 的印度版。在 RISAT-2 之后, RISAT-1 于 2012 年 4 月成功发射。RISAT 卫星主要目标是对农业、林业、土壤和地质以及海岸线监测等实现全天时、全天候观测,其中 RISAT-2 可全天候监视我国西南地区的导弹和卫星发射情况。

韩国多用途卫星 5 号 (KOMPSAT-5)于 2013 年 8 月在俄罗斯亚斯内发射场由“第聂

伯”火箭成功发射。该卫星是韩国第四颗多用途卫星,也是第一颗使用合成孔径雷达的卫星,它可以用来对地表农作物生长状况、地下资源探测等进行远距离观测及拍摄,并向韩国科技部门提供多种科学数据信息。

1.1.2 SAR 卫星的发展趋势

纵观国外天基雷达的发展过程和世界各国天基雷达的发展动态可以看出,天基雷达从开始的单波段、单极化、固定入射角、单工作模式,逐渐向多波段、多极化、多入射角和多工作模式方向发展,天线也经历了固定波束视角、机械扫描、一维电扫描及二维相控阵的发展过程。天基雷达的发展将具有如下特点(孙佳,2007):

(1)小型化成为星载合成孔径雷达发展的主要趋势。随着战场环境的日益变化,大卫星逐步暴露出一些弊端,主要体现在造价高昂、维护不便、应急发射困难、战术保障和快速反应能力有限等。随着航天技术的发展,特别是轻型天线技术、集成电路技术和固态电子器件技术等的发展,卫星的重量和体积大大降低,使性能高、体积小、重量轻和成本低的小星载合成孔径雷达卫星研制成为可能。集成电路和固态电子器件降低了中央电子设备的重量和体积,以可展开折叠网状天线技术和轻型相控阵天线技术为主的轻型天线技术发展大大降低了天线的重量,大幅度降低了卫星有效载荷的重量,从而降低了卫星整体重量;另外,高效率太阳能技术和电池技术的发展也相对降低了能源系统的重量,小卫星系统及其组网技术的发展改变了卫星的工作及使用模式,缩短了卫星系统有效载荷的工作时间,也降低了对能源系统的要求,进一步降低了卫星的重量和体积。与大卫星相比,小卫星的战场生存能力和快速反应能力要强得多,并已经发挥了一些作用。SAR 卫星应用的效费比明显提高,SAR 卫星的研制费用大幅降低,SAR 卫星在军事和经济上的应用越来越重要,越来越普及,研制 SAR 卫星的国家越来越多,天基 SAR 已经不再是少数大国的专利。

(2)性能技术指标不断提高。高性能指标的图像始终是系统设计和研制的最终目的,高分辨率的 SAR 图像在军事上具有极其重要的应用价值,追求更高的分辨率一直是研制部门努力的方向。更高的分辨率意味着更精确的目标分辨和识别能力、更准确的情报和更精确的地形数据。近几年来,小 SAR 卫星的发展非常迅速,各国纷纷开展小卫星项目的研究,但并没有放弃获得更高分辨率的研制工作。美国在大力规划和发展小 SAR 卫星的同时,一直在提高 SAR 的图像分辨率。“长曲棍球 1”、“长曲棍球 3”和“长曲棍球 5”卫星的 SAR 图像分辨率就分别上了 2 个台阶,分别达到 1 m、0.5 m 和 0.3 m。除了分辨率指标外,其他的图像质量指标也同样重要。SAR 卫星的图像质量指标在不断提高,SAR 图像的目标定位精度越来越高。从 SAR 图像的定位原理讲,SAR 图像的定位精度可做到与卫星的轨道精度在同一量级。定位精度与卫星姿态无关,从这一点讲,SAR 卫星图像的定位精度优于可见光传感器卫星图像的定位精度。随着 SAR 图像在目标识别和民用应用越来越广,对 SAR 图像的定量遥感要求也越来越高,如今对 SAR 图像不仅要求有高的空间分辨率,而且要求有高的辐射精度。

(3)多功能、多模式是未来星载 SAR 的主要特征。1978 年美国发射的载有 SAR 的海洋卫星(Seasat-A)为 L 波段、固定入射角、单一的 HH 极化,现在在轨或正研制的 SAR

卫星(或其他航天平台的 SAR)很少仅固定入射角和单一极化。今天的天基 SAR,特别是星载 SAR 正向着多模式、多频、多极化和可变视角波束,并具有地面运动目标显示和地面高程测量功能方向发展。多模式成像主要有条带、扫描(scanSAR)、聚束(spotlight)3种工作模式。扫描工作模式要求波束在距离向的快速扫描,一般采用电扫描的方式。通过改变雷达收发的极化方式,可获得 HH、VV、HV 和 VH(H 为水平极化, V 为垂直极化)不同极化的图像。不同频率下目标的散射特性不同,同时获取目标的多频信息,有助于目标分类与识别。欧洲的 Terra-SAR 包含 X 波段与 L 波段两个频段, L 频段的穿透性强。天基星载合成孔径雷达可通过立体像对方式或干涉 SAR(InSAR)的方式获得地面的高程信息。美国航天飞机 STRM 项目在 11 天左右获得了全球 80%陆地的高程数据,高程精度在几米的量级。利用相位中心重置等方法可获得地面目标运动的信息,从而实现地面运动目标显示,快速提供地面运动目标的信息,这一特点在军事上具有极其重大的应用价值,可大大提高获取地面运动目标情报的时效性。

(4) 雷达与可见光卫星的多星组网是主要的使用模式。采取星座或星队侦察方式可有效提高时间分辨率,多星组网提高侦察情报的时效性,即提高时间分辨率,将航天侦察的“盲区”降至最低。与可见光卫星配合使用能弥补可见光成像受气候条件限制的不足,并发挥 SAR 具有的一定的穿透能力,揭露伪装的特点,使各种侦察卫星优势互补。美国在伊拉克战争中就利用 3 颗“锁眼”可见光侦察卫星和 2 颗长曲棍球雷达成像侦察卫星组成的航天侦察网。美国人形象地将所有在轨的“锁眼”和“长曲棍球”成像侦察卫星统称为“卫星舰队”(satellite fleet)。德国的 SAR-Lupe 项目是一个由 5 颗小 SAR 卫星组成的军事专用卫星系统。COSMO-SkyMed 是意大利航天局的一个低轨道、军民两用的地球观测星座,由 4 颗在工作 X 波段的小星载合成孔径雷达成像卫星组成。根据意大利和法国在 2001 年 1 月底签署的 ORFEO 联合地球观测协议,意大利的 COSMO-SkyMed 雷达成像星座和法国的“昂星团”光学成像星座将共同组成 ORFEO 军民两用高分辨率地球观测系统,两国将共享该系统的图像数据,而且两国国防部将在制定卫星成像任务计划方面享有优先权。按协议规定,意大利还取得了法国“太阳神 2”军事侦察卫星和 SPOT-5 民用资源卫星的图像数据使用权。随着航天技术的不断进步和雷达卫星的小型化,其成本将大幅度降低,雷达卫星与可见光卫星多星组网获取动态情报将成为一种主要的应用模式。

(5) 分布 SAR 成为一种很有发展潜力的星载合成孔径雷达。分布 SAR 并不是简单的卫星组网,它是利用 2 颗或多颗轨道具有相互关系的卫星配合工作,一颗卫星发射多颗卫星接收,或多颗卫星发射多颗卫星接收,实现单颗卫星不能实现的功能,或获得单颗卫星不能达到的技术指标。如实现干涉 SAR 成像、地面运动目标显示、增加成像带宽、提高 SAR 图像分辨率等。

(6) 星载合成孔径雷达的干扰与反干扰成为电子战的重要内容。星载合成孔径雷达成像卫星作为军事侦察卫星系统,必然会受到人为的电磁干扰影响。所以,研究军事侦察卫星系统的抗干扰能力,对提高星载合成孔径雷达的生存能力和增强其受干扰时的应用效果等具有重大的实用价值,深入研究 SAR 的抗干扰技术具有深远的战略意义。美国空军早已注意到星载合成孔径雷达在日趋密集和复杂的电磁干扰环境下能否有效工作的问题,已经开始研制能够对付目前和未来威胁的抗干扰技术。星载合成孔径雷达的干扰与

反干扰已成为电子战的重要内容。前者通过使用电磁干扰使对方的星载合成孔径雷达不能正常工作或者性能降低,后者采用抗干扰技术保证在电子对抗环境下己方星载合成孔径雷达正常工作。对星载合成孔径雷达实施干扰,大致可分为对有效载荷的干扰、数传链路的干扰和对卫星平台的干扰(包括对遥测遥控的干扰)。根据星载合成孔径雷达的特点,探讨星载合成孔径雷达系统可采取的抗干扰措施,结合现有星载合成孔径雷达系统的一般结构,可在星上或地面采取不同的抗干扰措施。一般来讲,抗干扰就是利用干扰信号和有用信号的不同特性,将干扰信号去除或降低,同时保留有用信号。通常可根据信号的频率特性、空间特性、时间特性、极化特性、编码特性等将干扰信号和有用信号区分开来,从而将干扰信号抑制掉。

(7)军用和民用卫星的界线越来越不明显。星载合成孔径雷达在商业民用和军事侦察上都具有比较大的应用价值,ERS-1/2 和 Radarsat-1 等都是以民用为主的星载合成孔径雷达,而美国的“长曲棍球”雷达卫星、德国的 SAR-Lupe 雷达卫星则是军用侦察卫星,商业民用和军事侦察应用对雷达卫星的技术指标的要求侧重有所不同。一般来讲,商业民用要求雷达卫星具有宽的测绘带宽和高精度的辐射定标,并具有中等分辨率的图像(一般低于 5 m)。军事侦察在强调测绘带宽的同时,更强调高分辨率,分辨率一直是军事侦察最关键的技术指标,军用侦察卫星的图像分辨率一般应优于 1 m,相关国家在提高分辨率方面投入了大量的人力物力,不断改进分辨率指标。随着卫星技术的提高,工作模式增多,卫星的功能和技术指标也不断提高,有些卫星虽然是商业民用卫星,但也具有较大的军事应用价值,如加拿大的 Radarsat-2 卫星,精细模式达到了 3 m 分辨率,具有一定的军事侦察能力。

随着科学技术的不断进步,天基雷达的技术水平和功能在不断提高,天基雷达在追求工作性能技术指标的同时,向着小型化、多模式、多星配合工作的方向发展,在军事应用上开始重视战时的生存能力,提供卫星适应战时复杂电磁环境的能力。随着技术的进步和普及,研制成本不断降低,参与研制天基雷达的国家也越来越多。

1.2 SAR 数据的应用及发展

合成孔径雷达(synthetic aperture radar, SAR)在资源调查、灾害监测和国防建设中具有重要意义,一直受到世界各国政府的高度重视。1967 年,巴拿马首次启动使用雷达系统制作大范围地形图工程,引发了全球性雷达技术应用。20 世纪 70 年代开始,一系列大范围的雷达制图项目启动,并取得了显著效果(Curlander, 1982; 汪长城和廖明生, 2009)。

从现有研究来看, SAR 一直被用于居民地检测、人口估计、土地利用与土地变化制图等(Floyd M Herderson et al., 1998)。

由于构成居民地的几何形状、材料特性、类型和在水平方向及垂直方向上的分布结构,使得它在成像雷达影像上的信号特别突出,所以成像雷达特别适合于这一应用。回顾已有的研究表明,具有 1000 人以上的居民区,在雷达影像上都是可见的而不受地形和雷达波长的影响。一些文献则论述了居民地与其他地形特征产生混淆的一些情况,产生这类

错误的原因在很大程度上与雷达系统参数和地面目标的变化以及它们周围环境的相互作用有关(Floyd M Herderson et al., 1998)。基于机载影像进行的研究在数量上要少些,但仍表明居民地检测是很有前途的。早期的用K波段影像对新英格兰的一些镇进行研究发现,它可识别8000人以上的居民地,精度已达到了80%,但居民地规模越小,其精度就越低。X波段HH影像在检测加拿大、美国、德国以及尼日利亚的居民地时显示了其功能的一致性。加拿大对C波段影像的广泛研究显示,在C波段上,城区与其他地形特征有明显的区别。

20世纪50年代中期,当利比里亚的居民区单元通过航片来计数时,遥感影像便首次用于人口估计。居民地单元数乘上每单元的居住人口数便得到了人口估计数。自此以后,各种遥感系统都曾被用于获取人口信息。用居民地大小来估计人口的理论基础是描述土地面积和人口数之间关系的异速生长模型。居民地的建筑面积应与人口数的 n 次幂成正比。起初便采用这种关系利用公布的人口数来计算建筑面积,但该过程很容易反过来从已知的土地面积得到人口数。从影像上很容易算得建筑面积,再从已有的人口数据或采样调查上也很容易确定系数和指数。到目前为止,所完成的基于雷达的人口研究清楚地表明了其在这方面应用中的潜力。Sabol是第一位用雷达影像来量测居民地面积并把它与人口数相联系的研究者,他从机载影像的K波段上量测到了美国的19个城市地区分段。他后来的工作集中在卫生影像SAR数据的研究上。Harris运用突尼斯的SAR-A数据得到了用线性回归在0.01显著水平上的 R^2 值为0.91。Lo则用了美国5个地区的SAR-A数据并采用了线性回归和异速增长模型两种方法进行研究。前一方法中有两个地区的相关系数都是0.98,不过该模型所形成的人口与面积之间的关系随着研究区域的变化而有所不同。Lo还对中国地区的SAR-A数据进行了实验,他把检测到的居民地划分为4类,并把它们与中国的人口统计数据联系起来,得出的结论是,小至1000~2000的人口数都能精确确定。到目前为止的研究(尽管数量上有限)已表明了雷达影像在统计人口数据方面的能力,这对于世界上那些还没有统计人口分布与增长数据或用传统统计方法比较受限制的国家 and 地区来说,显得尤为重要(Floyd M Herderson et al., 1998)。

通过对居民地进行检测以及对人口进行分析,间接地区分了机载或星载成像雷达系统上城区与非城区土地覆盖类型。其他一些研究工作则把城市土地作为普通的土地利用/土地覆盖制图来对待,同时也尽力绘制出城市体现活动的某些特别类型。全国土地资源信息是制订国民经济发展规划、计划及宏观决策的重要依据,也是国家可持续发展的需要。及时准确地掌握全国土地利用/土地覆盖变化情况,开展土地利用调查,既是国土资源管理部门加强国土资源管理、切实保护耕地的必要前提,也可为科学研究工作提供基础材料。土地利用动态监测是新一轮土地利用调查计划中的一项重要内容,其目的是建立和完善全国土地利用动态监测体系,实现对全国土地利用状况的有效监测,及时、准确地掌握土地利用状况。由于常规手段难以直接快速获取反映土地资源的现状、分布和变化特征的数据信息,也难以从整体上把握国内土地资源,特别是耕地、林地、湿地等重要资源的数量、空间分布和动态变化。遥感作为一种快速、宏观的资源调查技术手段,近几十年来在土地利用/土地覆盖变化调查与研究中的作用得到了公认(崔书珍和周金国, 2008)。目前,中国的土地资源遥感调查与监测在技术方法和监测技术体系方面取得了很大进展,基本实现了遥感