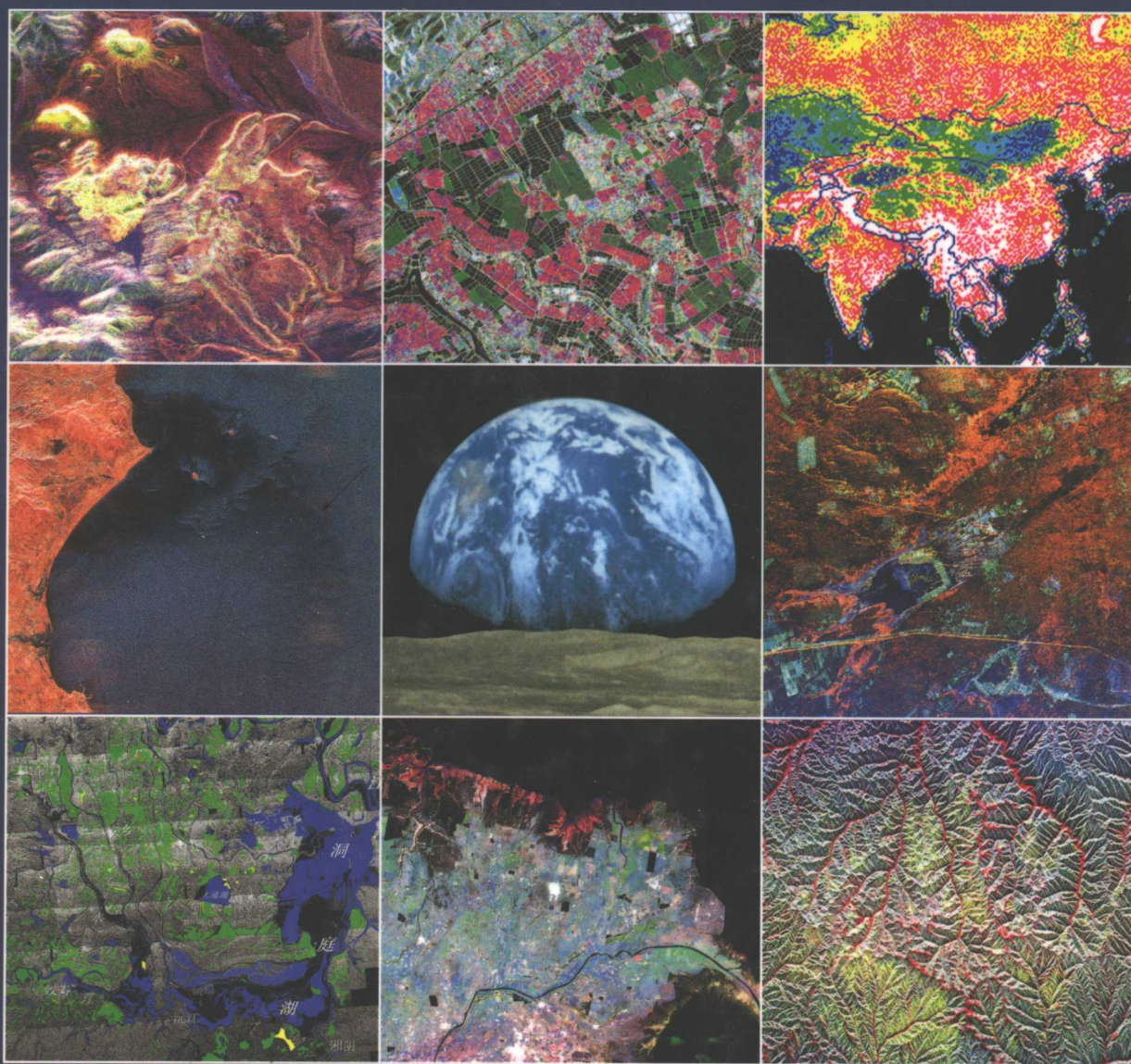
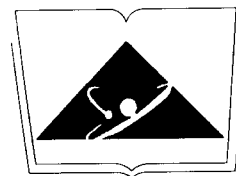


郭华东 主编

中国雷达遥感 图像分析



科学出版社



国家自然科学基金委员会资助出版

中国雷达遥感 图像分析

郭华东 主编

科学出版社

1999

内 容 简 介

本书利用当前国内和国际上主要的星载和机载雷达在中国陆地和海域获取的典型图像,图文并茂地以实例形式总结分析和论述了在资源和环境领域的研究成果,是一部专著与图集性质并重的著作。首先扼要介绍了雷达遥感原理及技术发展,同时简述了地物散射特性及信息提取方法;核心是以雷达遥感所独具的特性和优势,分别叙述成像雷达数据在农业、林业、水文、地质矿产、城市与考古、海洋、灾害及全球变化8个领域中的应用。

本书可供从事遥感和空间科学,地学、生物和环境科学,农、林、水和工程技术,以及有关管理部门的学者和高等院校教师及研究生阅读参考。

图书在版编目(CIP)数据

中国雷达遥感图像分析 / 郭华东主编. — 北京: 科学出版社, 1999.1
ISBN 7-03-007343-6

I. 中… II. 郭… III. 雷达图像 - 图像分析 - 中国 IV. TP75

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (1999) 第 04453 号

科学出版社 出版

北京东黄城根北街 16 号

邮政编码: 100717

深圳美光彩印刷股份有限公司 印刷

新华书店北京发行所发行 各地新华书店经售

*

1999 年 1 月第 一 版 开本: 889 × 1194 1/16

1999 年 1 月第一次印刷 印张: 16

印数: 1-2000 字数: 460 000

定价: 368.00 元

序

雷达遥感经历了 30 多年的蓬勃发展，日臻成熟。它由航空机载跃登上航天飞机（太空梭）和人造卫星；由单一波段的传感器扩展到多波段、多极化的系统。凭借其全天候作业、长波束穿透的优势，雷达遥感可获取的信息资源日益丰富，应用领域日益广泛。90 年代末，雷达遥感逐步跃居国际上遥感技术与信息开发的前沿与主流，也受到了我国科技界的支持和决策部门的重视。在国家空间计划、863 计划和国家自然科学基金项目中，均为之优先立项；而在国防、资源、防灾……等应用部门的需求，更是与日俱增。

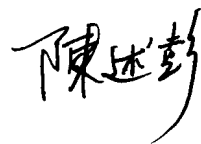
中国科学院遥感应用研究所所长郭华东教授，长期从事雷达遥感信息机理与应用研究，主持多项微波遥感对地观测课题，参与大型雷达遥感国际合作计划，至今主持 863 - 308 项目。他领导着青年专家们，20 年如一日，致力于雷达遥感信息源的综合开发与利用，开拓雷达图像在农、林、水资源、海洋调查、城市化与环境、灾害监测以及地质构造、金矿、油田、考古等诸多方面的应用示范，取得了不少突破性的成果，例如：隋代古长城遗址的探测；亚热带水稻田的识别与分类；荒漠地区风沙掩埋的基岩构造识别；蚀变围岩中的含金矿体的评估，喀喇昆仑的火山地貌演化研究等，均已在国际期刊论述，并获得了相当广泛的引用，或在国际会议上受到同行的称赞！

今读到他主编的这部新书，我格外欣慰。因为象他这样一位肩负重任的学术带头人，终年辛劳，日不暇给，能够挤出时间来整理自己长期的科学积累，毫无保留地奉献给读者，需要一种对科学的执著的追求精神。作为美国航天飞机成像雷达计划、加拿大雷达卫星计划、欧洲空间局遥感卫星雷达计划、日本地球资源卫星雷达计划、全球雷达遥感计划等一系列大型国际雷达对地观测计划中国项目的一位首席专家 (PI) 及国际合成孔径雷达工作组成员，他率领同事们将获取的这些先进的雷达数据，进行处理



分析，产出丰厚成果。书中大量选用了覆盖我国陆地和海洋的典型雷达遥感图像，介绍雷达遥感的原理、典型地物散射特性，结合中国地理环境的特点，选择许多实例，阐述处理分析方法，给出科学实验结果。读者既可纵情浏览，作为了解雷达遥感的向导；还可对比分析，深入琢磨，挖掘新的信息，发现新的规律和问题。这是一种开拓者甘为人梯的宽阔胸怀，也是科学技术为社会发展和经济建设服务的一个不可缺少的重要环节。

我想读者们是会乐于接受这份献给国庆50周年的厚礼的；一定会从中得到启发、获取新知、吸取力量，踏在前人的肩膀上，去攀登科学的高峰，去探测月亮和星星的。



中国科学院院士
第三世界科学院院士
国际欧亚科学院院士
1998年11月

序

近十年来, 航天成像雷达遥感取得了突破性进展。具有全天候、全天时成像能力的合成孔径雷达已经成为对地观测和行星探测的尖端技术之一, 并在许多领域中得到了广泛的应用。以航天飞机成像雷达 (SIR-C/X-SAR) 为代表的先进科学实验的实施, 以及欧洲空间局的欧洲遥感卫星 (ERS-1/2)、日本的地球资源卫星 (JERS-1) 和加拿大的 Radarsat 等这些运行性成像雷达系统的升空, 使得雷达遥感研究和应用专家们, 能够开拓思路、创新应用, 直接将其用于解决环境和地球科学问题。

这部著作论述了雷达遥感前沿学科领域的研究成果, 是对雷达遥感和应用的重要贡献。在过去的十多年里, 中国科学院遥感应用研究所的郭华东教授和研究人们在中国和国际雷达遥感研究和应用领域起到了导向作用。这部著作是雷达遥感在农业、土地利用、林业、水文、地质、矿产勘探、城市化、考古、自然灾害、海洋和散射计全球变化探测等领域应用研究成果的卓越体现。在这些应用领域中, 收集了覆盖中国国土的典型雷达图像, 探讨和分析了其影像特征及地学生物学现象, 并与地面验证数据对比, 给出了研究结果, 大量研究实例表明中国科学院遥感应用研究所的学者们在雷达遥感数据分析方面已取得了关键性进展。

书中涵盖了多领域应用、数据分析、算法研究、模型建立和诸如水稻、森林和裸露岩石等目标物的后向散射特性分析等内容, 阐述了许多重要的应用实例, 包括: 不同生长期水稻的雷达识别; 森林蓄积量的航空雷达估算; 中国研制的机载雷达监测 1998 年特大洪水; 多波段、多极化雷达对火山和熔岩流的发现; 内蒙古干旱区的地下水探测; 干涉穿透性及植被覆盖下岩层信息研究; 雷达揭示明、隋两代长城的考古勘查及海洋内波探测等等。她覆盖领域广泛, 是第一部多波段、多极化、多时相、多入射角和多平台的雷达遥感数据分析图集。在许多试验区, 还使用其他数据进行匹配分析。书中所使用的数据是由中国、欧洲空间局、日本、俄罗斯、加拿

大和美国的星载和机载雷达系统获取,由中国科学院遥感应用研究所处理和分析的。这生动地反映了国际合作的重要意义。

这是一本极其有科学价值的著作。在中国和国际上,对致力于对地观测技术与应用领域的科技人员有很大的参考作用,同时也为从事环境与地学研究的大专院校师生提供了重要的雷达遥感及应用知识。该书丰富的内容、色彩斑斓的图像和精美的装帧,对于关心中国地学的国际学者和非专业读者,也是一份不可多得的珍品。

Charles Elachi 博士



美国国家工程院院士
美国宇航局喷气推进实验室
空间与地球科学计划主席
1998年12月

前 言

60年代初,国际上第一部合成孔径雷达的问世,标志着人类从太空观测地球能力的新突破。从那以来,雷达遥感理论、技术与应用得到了长足的发展。在地球科学、生物科学及可持续发展相关领域,成像雷达得到广泛深入的应用,而雷达对地观测技术本身,也在沿着单波段单极化—多波段多极化—全极化干涉成像的轨迹不断拓进。

起步于70年代中后期的中国雷达对地观测事业,伴随着国际性雷达遥感的进展,适应国家经济建设和高科技发展的需求,已走过了20余载的路程。依靠自己的技术力量,走国际合作之路,在形成雷达对地观测体系方面已见成效。利用国际国内先进的雷达数据,在诸多应用领域取得了一系列重要进展。

这部著作即是在这样的背景下形成的。正如书名“中国雷达遥感图像分析”所表达的,在区域上,涵盖了我国陆地与海疆,择典型地区重点剖析;在数据源方面,应用了包括迄今覆盖我国国土的14种航天航空雷达数据;在研究内容上,体现技术发展、理论分析、应用扩展的综合性。全书共由十部分组成:第一部分介绍雷达遥感原理及其技术发展;第十部分论述地物雷达散射特性及信息提取方法;核心是第二至第九部分,分别叙述雷达遥感在农业、林业、水文、地质矿产、城市与考古、海洋、灾害及全球变化8个领域中的应用。

本书既是一本雷达遥感学术专著,又是一本雷达遥感分析图集,图文并茂,特色明显。(1) 雷达数据先进:包含了多平台、多波段、多极化、多视角、多时相、多模式、多分辨率及干涉、全极化等最先进的数据;(2) 雷达数据丰富:共有5种卫星雷达数据,3种航天飞机雷达数据及6种机载雷达数据,全书计有340幅雷达图像;(3) 时间跨度大:最新的SAR数据成像于1998年,最早的数据是1979年我国首次获取的机载SAR图像;(4) 覆盖区域全:低分辨率数据覆盖全国疆土,中、高分辨率数据涵盖29个省、市、自治区和特别行政区及渤海、黄海、东海、南海海域(每部分

开篇在中国版图上以圆点表示了研究区的位置);(5)处理分析方法新:介绍了典型地物的散射模型、先进的算法和信息提取方法以及前沿领域的极化波和干涉雷达数据处理分析方法;(6)应用领域广:系统叙述了成像雷达对多学科的贡献,展示了雷达遥感在地球科学、生物科学、环境科学等领域中的重要作用及广阔前景。

本书 10 部分的分主编分别是: 雷达遥感 郭华东; 农业 邵芸; 林业 廖静娟; 水文 刘浩; 地质矿产 王长林; 城市与考古 王翠珍; 海洋 董庆; 灾害 郭华东; 全球变化 王湘云、王超; 雷达散射特性及信息提取 郭华东。从第一到第十部分的作者依次为: 郭华东; 邵芸、范湘涛、池宏康; 廖静娟; 刘浩、濮静娟、魏成阶、王长林、王心源、谭宽祥; 王长林、郭华东、朱亮璞、蔺启忠、王心源、单新建、刘浩、陈正宜、王超、邵芸、廖静娟、范湘涛; 王翠珍、郭华东、濮静娟、卢新巧; 董庆、刘浩、李俊飞、刘建强、周长宝; 郭华东、王世新、魏成阶、邵芸、刘浩、范湘涛、王长林、廖静娟、王尔和、肖建华、邵一鸣、宋福明、沈汀、荆麟角、娄晓光; 王湘云、郭华东、王超; 郭华东、邵芸、廖静娟、王翠珍、刘浩、李俊飞、范湘涛。

本著作是国际合作的结晶, 通过开展国际性大型雷达对地观测计划, NASA/JPL/JSC, DARA/DLR, ISA, CSA, CCRS, ESA, NASDA 提供了高质量的航天航空雷达遥感数据。没有这样的国际合作, 本书是不可能与大家见面的。特别是 SIR-C/X-SAR 合作计划及 GlobeSAR 合作计划的实施, 为本书出版奠定了坚实的基础。

在历时 6 载的 SIR-C/X-SAR 计划及其中国项目研究中, NASA 总部的 M. Baltuck, JPL 的 C. Elachi, D. Evans, T. Farr, J. Plaut, E. Stofen 及 E. O'Leary 等给予了帮助。特别是 Elachi 博士, 作为 SIR-A、SIR-B 计划的首席科学家及 SIR-C/X-SAR 计划的领导者, 作为国际航天雷达遥感的主要开拓者, 积极促进了双边的雷达遥感合作, 此次又亲为本书作序; 在 1993-1997 年开展的全球雷达遥感计划中国项目研究中, CSA 的 M. St-Pierre, IDRC 的 D. Benmouffok, CCRS 的 R. Brown, M. D'Iorio, PCI 的 T. Taylor 起到了重要作用。特别是 GlobeSAR 计划的首席专家、CCRS 的 F. Campbell 博士及现任加拿大遥感学会主席 B. Brisco 博士, 为我们共同完成 GlobeSAR 中国项目及后来顺利进入 Radarsat 计划发挥了关键作用。谨此, 作者向以上国际机构及个人致以诚

挚的感谢。愿我们的合作不断迈向新的高地。

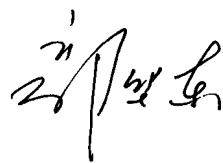
本专著是长期科研积累的结果。在研究过程中,得到国家自然科学基金重大项目“地表遥感信息传输及成像机理研究”及其第三课题“地物微波遥感信息处理及成像机理”、中国科学院“九五”重大及特别支持项目“中国资源环境遥感信息系统”及其第四课题“前沿遥感技术与地理信息若干关键问题”、国家863计划308主题项目“星载SAR应用研究”、“南方农作物SAR识别”等课题,中国科学院院长基金项目“SIR-C/X-SAR科学研究”及“GlobeSAR科学研究”等课题的资助;得到国家自然科学基金委员会地球科学部与信息科学部、中国科学院资源与环境科学技术局与计划财务局、国家科技部高新技术与产业化司、国家863计划信息领域及308主题专家组、中国科学院电子学研究所、中国遥感卫星地面站、中国科学院遥感应用研究所及遥感信息科学开放实验室的支持,对以上单位和领导致以衷心的感谢。

特别感谢陈述彭先生,他自始至终指导本书的撰写,付出了极大的心血,不仅亲自审阅全书,同时亲为本书作序;特别感谢徐冠华先生对本书涉及的多项课题立项的支持及研究期间给予的宝贵的学术指导;感谢陈芳允院士、承继成教授审阅初稿。

在本书编辑出版阶段,姚岁寒先生和廖静娟同志付出了大量创造性劳动,彭斌同志给予了很大支持,李新芬同志为本书印刷做了卓有成效的工作。谨此,向他(她)们致以真诚的谢意。

本书与大家见面的时候,迎来了本世纪的最后一年——1999年。这是人类历史上的非凡之年。谨以此书献给中华人民共和国成立50周年,献给中国科学院建院50周年,献给中国科学院遥感应用研究所建所20周年,献给中国科学院知识创新工程及国家创新体系,献给国际国内遥感界同仁及关心遥感事业的各界领导和朋友们。

虽历时数载,可谓是精心磨砺,但在本书即将付梓之际,仍感到许多的缺憾。恳请大家批评指导,我们将不胜感激。



1998年12月

《中国雷达遥感图像分析》

主 编： 郭华东

副主编： 邵 芸 廖静娟

王长林 刘 浩



目 录

雷 达 遥 感

雷达遥感概述	(1)
雷达遥感原理	(1)
雷达散射特性	(1)
雷达遥感发展	(2)
采用的雷达数据	(3)
机载雷达系统	(3)
中国 L-SAR	(3)
中国科学院雷达	(3)
加拿大 CV-580 SAR	(4)
美国 AIRSAR	(5)
地球资源雷达	(5)
航天飞机雷达系统	(6)
SIR-A	(6)
SIR-B	(6)
SIR-C/X-SAR	(6)
星载雷达系统	(8)
加拿大雷达卫星	(8)
欧洲遥感卫星雷达	(9)
日本地球资源卫星雷达	(9)
俄罗斯金刚石卫星雷达	(9)
欧洲遥感卫星 1 号散射计	(9)

农 业

南方作物监测和土地利用调查	(12)
肇庆地区水稻长势监测和土地利用调查	(12)
长江三角洲土地覆盖类型调查	(23)
鹿港海滨带围海造陆	(26)
华北农业调查	(28)
京津地区	(28)
渤海海滨	(30)
西北沙漠戈壁绿洲及植被调查	(30)
额尔齐斯河流域	(30)
塔里木河流域	(32)
荒漠植被	(33)

水产养殖	(36)
渤海湾	(36)
长江口	(36)

林 业

森林识别与分类	(38)
林地识别	(38)
森林类型识别与分类	(45)
森林蓄积量估测	(53)
广东肇庆松树蓄积量	(53)
山东罗山林场蓄积量	(54)

水 文

河流水系	(56)
河道特征	(56)
河流演变	(60)
古河道探测	(64)
长江水利枢纽	(67)
湖泊	(70)
湖泊环境	(70)
湖泊演化	(73)
盐湖	(79)
地下水与土壤水分	(81)
内蒙古巴音诺尔公地区地下水	(81)
内蒙古额济纳旗地区地下水	(82)
土壤水分	(86)
冰川	(87)
阿克赛钦湖东北部冰川	(87)
乔戈里峰东南部冰川	(90)

地质矿产

地形地貌	(92)
地形	(92)
典型地貌	(94)
冲积扇	(97)

火山	(103)
构造识别	(116)
断裂构造	(116)
褶皱构造	(127)
弧形构造	(135)
岩性分析	(138)
侵入岩体	(138)
岩体风化盆地	(142)
层状岩石	(142)
矿产石油	(143)
矿产勘探	(143)
石油勘探	(148)
穿透性分析	(150)
干旱区穿透性分析	(150)
植被地区穿透性分析	(153)

城市与考古

城市化	(156)
城镇交通	(160)
城市交通	(160)
乡镇交通	(162)
典型城市	(163)
直辖市	(163)
港台城市	(167)
省会城市	(173)
县市景观	(175)
古长城探测	(177)

海洋

海洋特征	(182)
海洋峰面	(182)
海浪	(184)
内波	(185)
水下地形	(186)
船舶及尾迹	(187)
海冰	(189)
海洋污染	(193)
海岸带变迁与近海养殖场	(194)
河北宁河地区湿地识别	(194)
山东龙口海水入侵与河道变迁	(196)
珠江三角洲东部海岸带变迁	(198)
山东长山岛近海养殖场监测	(200)

灾害

洪涝灾害	(202)
长江中游	(202)

东北地区	(208)
地质灾害	(210)
滑坡	(210)
地震	(212)

全球变化

全球陆地变化	(214)
全球典型地物后向散射系数	(214)
全球陆地后向散射系数季相变化	(214)
中国陆地变化	(218)
中国典型地物后向散射系数	(218)
中国陆地后向散射系数季相变化	(219)

雷达散射特性及信息提取

地物雷达散射特性	(224)
农作物	(224)
森林	(231)
岩石	(234)
信息提取	(239)
雷达影像分维方法信息提取	(239)
学习矢量量化神经网络分类方法信息提取	(240)
干涉雷达数据处理	(241)
极化雷达信息提取	(242)

参考文献	(243)
------	-------

雷达遥感

雷达遥感是一种主动微波遥感技术,它具有特有的全天候、全天时对地观测能力及对一些地物的穿透性能。在常用的遥感电磁波段范围内,可见光的产生来源于物质外层电子的激励,红外线的产生形成于物质的分子振动和晶格振动,而波长更长的微波,则是由于物质的分子旋转和反转、电子自转与磁场之间的相互作用而引起的,这决定了地物与工作在微波波段的成像雷达之间具有其固有的相互作用机理。成像雷达主动发射电磁波的特点,对地表粗糙度及介电性质的敏感性,多波段、多极化散射特性和干涉测量的成像方式等,使得雷达遥感成为最重要的对地观测前沿领域之一。

雷达遥感概述

雷达遥感原理

合成孔径雷达(SAR)是由发射机、调制器、天线、接收机、数据记录和处理系统及能输出SAR图像的处理器组成。发射机发出一系列脉冲,由开关将脉冲导向天线,然后通过天线将其发射向地面。由天线接收地物后向散射信号(雷达回波),并把它通过开关转入接收机。接收机输出的是一系列接收到的雷达回波脉冲,这些脉冲又进到相干器中,最后处理生成雷达图像。

空间分辨率是雷达图像最重要的参数之一,SAR空间分辨率由距离分辨率及方位分辨率组成。对于距离分辨率,在斜距上脉冲从SAR到地面目标并返回到SAR所需要的时间为 $t=2R/c$,这里 c 是光速, R 是天线到目标物的距离,2表示往返过程。沿斜距方向的分辨率是由脉冲宽度确定的,也就是: $r_r=c\tau/2$,因此可以知道,距离分辨率

由 $r_r=c\tau/(2\sin\theta)$ 得到,这里 τ 为脉冲宽度, θ 为入射角。这样距离分辨率取决于脉冲宽度和入射角,在大入射角时会取得最好的距离分辨率。

脉冲宽度是由发射机的波宽决定的,波宽大会产生窄脉冲,就会有更好的距离分辨率。当发射的脉冲是线性调频脉冲,并且接收的波宽足可以和接收到的雷达回波相匹配时,就会有较好的距离分辨率。

为了取得轨道高度成像雷达的高方位分辨率,必须使用多普勒电子束聚焦方法。SAR最基本的技术就是要记录接收到来自地面目标的一系列雷达回波及由于雷达运动产生的多普勒频移,通过特殊的处理器把这些回波聚集起来实现天线合成技术,由此来获得高方位分辨率。

雷达散射特性

后向散射系数

点目标,诸如火车、飞机、建筑物、角反射器等会产生强雷达回波,面目标的强度取决于目标的雷达散射截面面积。大面积分布的目标(如农田、地质景观或海洋表面)产生的雷达回波强度为单位面积的雷达散射截面。一个面目标的雷达后向散射系数 σ° 等于雷达散射截面除以其在平面上的实际面积。因此, σ° 为无量纲。当表面粗糙或入射角非常小时, σ° 就大。当表面光滑或入射角大时, σ° 就小。雷达后向散射系数常呈现出几个数量级的动态范围。

雷达图像强度

成像雷达信号经处理,形成由二维像元矩阵组成的数字图像。图像像元 $P(i, j)$ 的强度(也称为灰度或灰调)或数字值与相应地面单元后向散射的能量 P_r 有关。所接收到的能量 $P_r(i, j)$ 与

地面单元雷达后向散射系数 $\sigma^\circ(i, j)$ 成直接的比例关系: $P_r(i, j) = k(j) \sigma^\circ(i, j)$ 。

这里 $k(j)$ 是一个与距离有关的系统因子, 它与发射功率、天线到目标的距离、地面单元的大小及天线增益函数有关。如果在绝对尺度上已知 $k(j)$, 就可把 $DN(i, j)$ 直接地与 $\sigma^\circ(i, j)$ 联系起来, 生成一幅在绝对尺度上强度直接和后向散射系数有联系的图像。如果只知道 $k(j)$ 的相对变化, 就只能生成一幅相对后向散射图像。

雷达图像斑点

SAR 成像时通过对景区相干波照射和对后向散射信号相干检波以获得方位向的高分辨率, 从一地单元后向散射回来的全部信号是地面散射中后向散射信号相干总和。地表通常由许多随机分布的散射面组成。这种随机性是生成图像斑点的原因, 其表现形式为与单一目标不同单元对应像元的图像色调随机变化。因此, 斑点是 SAR 系统相干信号处理产生的结果, 而不是地表自然特性或电磁特性的空间变化的产物。

面散射和体散射

从大面积目标后向散射回来的信号可能是面散射或体散射, 或二者兼有的散射结果。目标边界的表面特性、地表下介质的不均匀性及介质的衰减特性控制着面散射和体散射的程度。所有这些要素都与波长关系密切。

微波穿透海水的深度只有几个毫米。因此, 从海面后向散射回来的信号没有水下的散射贡献, 尽管可能会有浮标或其他水面物质不均匀体产生的体散射贡献。植被的后向散射主要以体散射为主, 由于冠层中空气通常占 99% 以上, 植被的平均相对电容率只稍大于 1。结果, 空气-冠层边界的反射系数近于零。这样, 面散射的贡献可以忽略不计。然而, 冠层的内部会产生很强的体散射。这是由厘米波长粗糙尺度的冠层不均匀原因造成的。如果对冠层的穿透深度与冠层斜距高度(沿着观测方向)相差不大或比它还小, 在后向散射的信号中可能还存在冠层下地表表面的贡献。介质的穿透深度取决于介质对电磁波的衰减和散射特性, 在厘米波波段, 大多数介质的吸收损失大于散射造成的损失。介质对电磁波的衰减与介电常数, 特别是与其虚部有关。

雷达遥感发展

国际上最早问世的是机载成像雷达遥感系统。机载雷达遥感开始于 60 年代初期。三十多年来, 不仅作为独立的航空系统, 同时作为星载雷达的模拟系统, 机载雷达发挥着重要的作用。典型的为加拿大遥感中心拥有的 CV-580 合成孔径雷达, 美国宇航局(NASA)喷气推进实验室(JPL)的航空雷达(AIRSAR)系统等。中国的机载 SAR 研制经过 20 余年的发展, 近期推出的机载 L 波段 SAR 正在诸多应用领域发挥显著作用。

在航天成像雷达遥感领域, 继 80 年代航天飞机成像雷达上天之后, 90 年代俄罗斯的金金刚石卫星雷达、日本的地球资源卫星雷达、欧洲空间局的欧洲遥感卫星及加拿大的雷达卫星相继进入太空。其中形成商业运行能力的加拿大雷达卫星的多模式成像方式独具特色, 由美国、德国和意大利合作研制的航天飞机成像雷达 3 号(SIR-C/X-SAR)则是运行在地球轨道高度的第一个同时成像的多波段多极化雷达系统, 并且有极化测量及干涉测量功能。

在此基础上, 1999 年将开展称作航天飞机雷达地形测图计划(SRTM)新的飞行。加拿大拟于 2001 年发射的雷达卫星 2 号将具有全极化测量能力, 欧洲空间局也将在 1999 年发射的环境卫星上装载有同极化和交叉极化两种极化模式的先进合成孔径雷达, 美国于 2002 年将要发射的小卫星 LightSAR 将是 L 波段多极化兼具干涉测量、扫描模式的实用化成像雷达。日本正在计划于 2002 年发射先进陆地观测卫星相控阵天线 L 波段合成孔径雷达(ALOS/PALSAR), 有 5 种分辨率和全极化功能。与此同时, 中国也正在形成 21 世纪初发射星载雷达的计划。

同时成像的多波段多极化 SAR 系统, 可以获取地物对不同波段雷达的回波响应及线极化状态下同极化与交叉极化信息, 可更准确地探测目标特征; 极化波雷达可同时接收相干回波信号的振幅和相位信息, 可获取地物的包括线极化、圆极化及椭圆极化在内的全极化信息, 能测量每一像元的全散射矩阵, 进而可自动识别并提取地面参数; 干涉雷达是目前空间遥感获取三维信息的最佳技术之一, 可用于地形制图、测量地壳形变及

作物的生长变化等。

采用的雷达数据

本书采用了迄今为止覆盖中国国土的全部 14 种雷达数据，在平台上分为机载和航天两种。成像的机载雷达系统包括中国 L 波段合成孔径雷达 (L-SAR)，中国科学院合成孔径雷达 (CAS/SAR)，加拿大遥感中心 CV-580 SAR，NASA/JPL AIRSAR 及中国地球资源雷达 (ERR) 和中国真实孔径雷达；航天雷达系统有两类：一类是航天飞机成像雷达 1、2、3 号 (SIR-A、SIR-B 及 SIR-C/X-SAR)，另一类是星载雷达系统，包括加拿大雷达卫星 (Radarsat)、欧洲遥感卫星雷达 (ERS SAR)、日本地球资源卫星雷达 (JERS-1 SAR)、俄罗斯金刚石雷达 (ALMAZ SAR) 及欧洲资源卫星微波散射计。本书使用较多的是 SIR-C/X-SAR、Radarsat SAR、中国 L-SAR 和 CV-580 SAR 数据等。

本书主编是 NASA 主持的 SIR-C/X-SAR 科学工作组成员及中国 SIR-C/X-SAR 项目首席科学家 (Principal Investigator，简称 PI)。书中所采用的 SIR-C/X-SAR 数据是根据他对中国试验区的设计，由 NASA 于 1994 年 4 月和 10 月两次组织飞行获取的；CV-580 SAR 对中国肇庆试验区的成像是全球雷达遥感计划的重要组成部分，由中国科学院遥感应用研究所与加拿大遥感中心合作完成；L-SAR 是中国国家高技术计划信息获取与处理技术 (863-308) 主题支持的 863 重大项目，SAR 系统由中国科学院电子学研究所研制，装载在中国科学院遥感应用研究所的遥感飞机上完成成像飞行。同时，主编是 ERS、JERS 及 Radarsat SAR 计划应用项目的 PI；根据项目合同由欧洲空间局及日本提供 SAR 数据；雷达卫星数据由加拿大航天局 ADRO 项目及特别支持项目提供；CAS/SAR 系统由中国科学院电子学研究所研制，SIR-A、SIR-B 数据由 NASA/JPL 提供，AIRSAR 数据由 NASA/JPL 环太平洋雷达飞行计划及台湾中央大学提供。

机载雷达系统

中国 L-SAR

中国国家高技术研究发展计划信息获取与处理技术主题专家组主持中国科学院电子学研究所

等单位研制星载合成孔径雷达模样机，并在此基础上形成机载 L 波段合成孔径雷达系统。该系统于 1997-1998 年进行了应用飞行试验，成功获取中国第一批 L 波段陆地和近海面 SAR 图像，特别是在 1998 年度的洪水监测中起到重要作用。

L-SAR 在飞行中有两种工作模式。A 模式为模拟模式，雷达波束入射角范围为 20° 至 55°，与星载 SAR 的工作状态完全相同，因而图像几何关系、空间分辨率等也与星载 SAR 相似。B 模式为实用模式，雷达的作用距离较远，测绘带较宽，距离分辨率较高，用于机载 SAR 应用试验。

L-SAR 两种工作模式

模 式	A	B
飞行高度 (km)	6	6
入射角 (°)	20 ~ 55	66.42 ~ 78.46
近边斜距 (km)	6	15
远边斜距 (km)	10	30
斜距测绘带宽 (km)	4	15
地距测绘带宽 (km)	6	15
斜距分辨率 (m)	3	3
地距分辨率 (m)	8.8 ~ 3.7	3.3 ~ 3.1
方位分辨率 (m)	3	3
飞行速度 (km/h)	550	550

中国科学院雷达

中国科学院雷达系统是从 1977 年正式开始研制的，其发展过程经历了三个阶段，分别为原理实验系统、单测绘通道系统和多测绘通道多极化系统。原理实验系统包括晶体振荡倍频微波信号源、行波管功率放大器、相参接收机、光学记录器、定时器、控制器、电源和喇叭天线。雷达系统工作在 X 波段，脉冲重复频率为 1000Hz，脉冲宽度为 1.2 μm，脉冲峰值功率为 1kW。系统安装在前苏制 TY-4 飞机上，航高 6000 ~ 7000m，航速 450km/h，测绘带宽 9km，最大作用距离 24km。由于没有采用脉冲压缩技术，距离向分辨率为 180m。方位向采用合成孔径技术，分辨率为 30m。系统中设有天线平台和运动补偿分机，天线直接固定在飞机上。为了保持合成孔径需要的雷达波束正侧视方向，让飞机沿风向或逆风向飞行，靠驾驶员保持飞机的偏流角为 0°。该系统于

1979年9月17日在陕西地区获取中国第一幅SAR图像。1980年12月,该系统进行了改进,发射峰值功率提高到10kW,采用了脉冲压缩技术,增加了天线稳定伺服平台、运动补偿电路,距离向和方位向分辨率提高到了15m。

单测绘通道SAR系统于1983年研制成功。在这个系统中,采用表面声波器件进行脉冲展宽和压缩,采用由微处理机控制的运动补偿系统,增加了地速跟踪,飞机的姿态信号全部从惯性导航系统中取出,保证了系统的高精度和高可靠性。

1987年多测绘通道多极化SAR系统研制成功,并正式命名为CAS/SAR。该系统的主要特点有:(1)能适应多种型号的载机,既能装载在喷气式飞机上作高空飞行,又能装在螺旋桨飞机上作中、低空作业;(2)天线波束俯视角可变;(3)采用多极化成像技术,可获HH、HV、VH、VV四种极化图像;(4)采用多测绘通道成像技术,总测绘宽度可达35km;(5)既可以左侧视,又可以右侧视;(6)具有实时空对地数据传输功能。下表列出了该系统参数。

CAS/SAR系统参数

系统参数	参数值
飞行高度 (m)	6000 ~ 10000
地速 (km/h)	450 ~ 750
波长 (cm)	3
极化	HH,HV,VV,VH
俯角	可调
侧视方向	左或右
分辨率 (m)	10 × 10(方位 × 距离)
成像宽度 (km)	35
数据记录方式	光学

1994年9月,机载SAR实时成像处理器研制成功,标志着CAS/SAR又迈上了一个新台阶。该处理器能实时处理数据,图像动态范围大,图像质量有了明显改善。

加拿大 CV - 580 SAR

加拿大遥感中心 (CCRS) 拥有的双波段全极化兼具干涉测量能力的雷达系统装载在Convair 580载机上。整个系统又称为 CV - 580 雷达系统。可实时处理成像,在飞机显示器上实

时显示并用于银粉纸打印输出SAR图像,同时将信号数据记录在高密度磁带上,飞行结束后再行处理。其具有星下点、窄幅及宽幅3种成像条带模式,成像条带宽度分别为22km、18km和63km。飞机上装有两个天线,具有C和X两个工作波段,可同时工作获取雷达数据。X波段具有HH、VV极化同时成像能力,C波段具有HH、HV、VV和VH四种极化同时成像、极化测量及干涉测量能力。全极化测量同时接收相干回波信号的振幅和相位信息,产生目标物的复散射矩阵,能够高精度识别地物,提高分类精度和准确度。干涉测量有两种工作状态,一种是垂直轨迹向干涉测量,另一种是轨道向干涉测量。前者利用装在飞机左侧的C波段的第二个水平极化接收天线,精确测绘地形高程,通过两个垂直轨迹向的接收天线间隔,接收测量到的相位差来计算高程;而后的第二个天线实际上是一个装在轨迹方向的双天线,通过对比两个接收天线分别接收到的相位图,可以测量目标物相对于雷达的运动速度。CV - 580还装载有较完备的定标设备,为定量化应用提供精确的雷达遥感数据。

CV-580 雷达在GlobeSAR计划中的系统参数

系统参数	C波段	X波段
频率 (GHz)	5.30	9.25
波长 (cm)	5.66	3.24
峰值功率 (kW)	16	6
极化	全极化	HH,VV
干涉测量	C-III	
分辨率 (方位向 × 距离向)		
星下点模式 (m × m)	6 × 6	6 × 6
窄幅模式 (m × m)	6 × 6	6 × 6
宽幅模式 (m × m)	20 × 20	20 × 10

1993年,加拿大发起了基于CV - 580 SAR的全球雷达遥感 (GlobeSAR) 计划,中国作为GlobeSAR计划的重要成员与其他11国共同开展了这一大型机载雷达遥感合作计划。开展先进成像雷达信息处理分析,进行Radarsat数据的模拟及应用潜力研究。GlobeSAR中国项目1993年11月20日和21日分别进行了两次成像飞行。飞行高度为5400m,时值小雨天气,飞机紧贴云层上空作业。第一次飞行获取了3个图像条带,包括