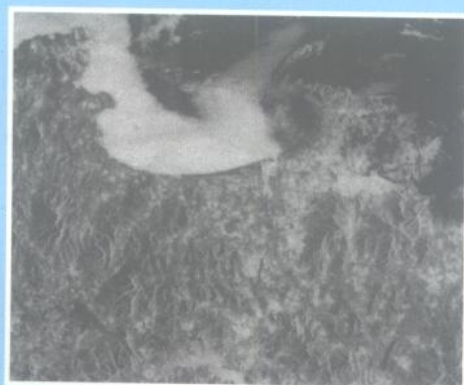
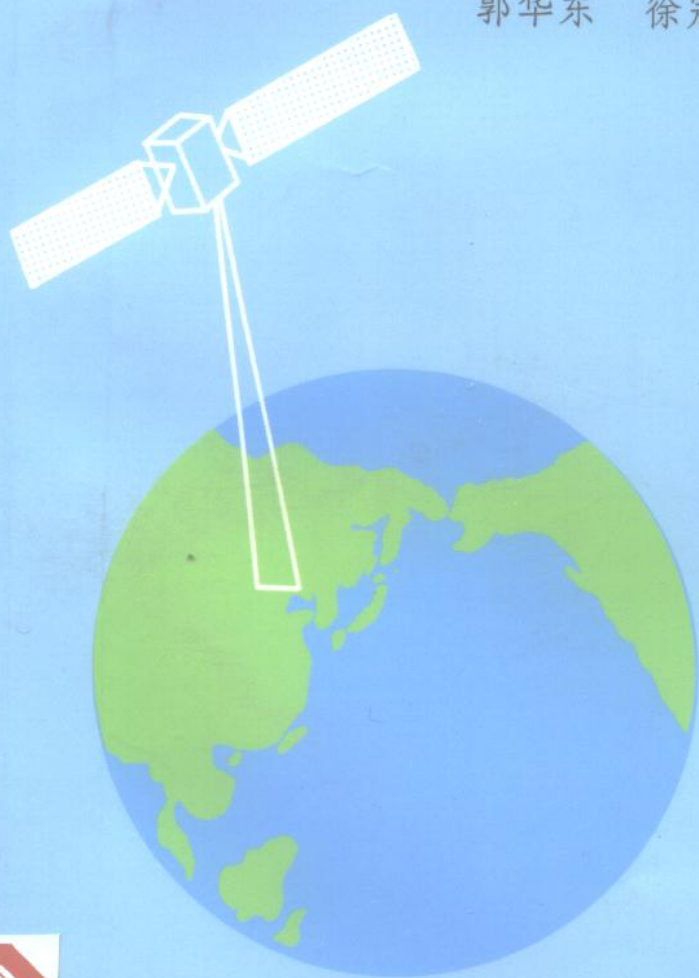


国家高技术计划信息领域

信息获取与处理技术主题十周年汇报

星载雷达应用研究

郭华东 徐冠华 主编



中国科学技术出版社

7119511
GPO-2

337171

国家高技术计划信息领域

信息获取与处理技术主题十周年汇报

星载雷达应用研究

郭华东 徐冠华 主编

中国科学技术出版社
北京

图书在版编目(CIP)数据

星载雷达应用研究/郭华东,徐冠华主编,一北京:中国科学技术出版社,1996.3
ISBN 7-5046-2204-4

I. 星… II. ①郭…②徐… III. 航天雷达-应用-研究 IV. TN959.7

中国版本图书馆 CIP 数据核字(96)第 04543 号

1996/3

中国科学技术出版社出版

北京海淀区白石桥路 32 号 邮政编码:100081

新华书店北京发行所发行 各地新华书店经售

地矿部航空物探遥感中心制印厂印刷

*

开本:787×1092 毫米 1/16 印张 15.25 插页:4 字数 364 千字

1996 年 3 月第 1 版 1996 年 3 月第 1 次印刷

印数:1—1000 册 定价:40.00 元

内 容 提 要

本书是国家 863 高技术计划研究成果之一，系统论述了星载合成孔径雷达应用的原理、方法与效果。全书共分三部分：第一部分论述典型地物与雷达的相互作用机理；第二部分阐述雷达数据处理与分析方法；第三部分介绍星载雷达数据在农、林、地矿、海洋及水文等领域中的应用结果。

本书适合遥感、农、林、地矿、海洋、水文等领域的科研人员阅读。

《星载雷达应用研究》

编辑委员会

主 编 郭华东 徐冠华

副主编 邵 芸 车学俭

编 委 (以姓氏笔划为序)

王 超 车学俭 刘玉贤 邵 芸 张 玮

张圣凯 杨清华 李增元 周长宝 郑立中

郭华东 徐冠华 彭以琪 彭 斌 曹述互

星载雷达应用研究课题组

课题负责人：徐冠华 郭华东
领导小组组长：郑立中
领导小组副组长：徐冠华 郭华东
课题办公室：李增元 邵芸 车学俭 王超 彭以琪

林业应用负责人：李增元
地质应用负责人：邵芸
海洋应用负责人：周长宝
矿产应用负责人：张雍
水文应用负责人：董文敏
农业应用负责人：张玮
预处理负责人：刘玉贤

主要科技人员：

中国科学院遥感应用研究所：	邵芸	刘浩	李骏飞	王超	石火生	魏秀萍
	卢新巧	潘起胜	廖静娟	董品亮		
中国林科院资源信息研究所：	李增元	车学俭	白黎娜	刘闽	谭炳香	曾琪明
	武红敢	包盈智	陈尔学			
国家海洋局第二海洋研究所：	周长宝	高曼娜	黄韦艮	朱廷璋	章家琳	包明泉
	李炎	毛志华	毛天明			
地矿部航空物探遥感中心：	张雍	杨清华	赵福岳	张学勤		
水利部遥感技术应用中心：	董文敏	李杏朝	钟绍南	杨晓明	陈曦川	曹宏斌
北京农业大学：	张玮	严泰来	张宏铭	贾文	金钟辉	殷克善
中国测绘科学研究院：	刘玉贤	尚东	杨明辉	任维春		

科技管理人员：

国家遥感中心：郑立中 彭以琪

前 言

90年代以来,一系列大型星载 SAR 计划相继问世,前苏联的 ALMAZ SAR、欧洲空间局的 ERS-1、ERS-2 SAR、日本的 JERS-1 SAR、加拿大的 Radarsat 和美国航天飞机成像雷达 SIR-C/X-SAR 均成功发射升空。在不到 5 年的时间内,有如此多的星载 SAR 系统投入运行,这是其它航天传感器的发展史上所未见的。

863 高技术计划的决策者们和 308 主题的专家们审时度势,决定开展我国星载 SAR 研究。为跟踪和赶超世界高新技术的发展,探索和开拓星载 SAR 的应用前景,并为我国星载 SAR 系统参数的选择提供理论科学依据和实际应用经验,以使这一高技术能够更好地为我国的国民经济建设服务,1991 年,308 专家组设立了“星载 SAR 应用研究”课题。近年来,国际观测领域的发展和课题的工作实践都充分证明了这一选题的及时性和必要性。随着今年加拿大雷达卫星的成功发射,星载 SAR 数据已开始进入商业运转,用户必将日渐增多,“星载 SAR 应用研究”课题在 SAR 成像机理、理论模型、图像处理分析和专业信息提取技术方面的研究成果,以及农、林、水文、地矿、海洋领域的应用成果,无疑为加速我国 SAR 技术及应用的发展提供了宝贵经验和理论方法。

在 863-308 专家组的指导下,在国家遥感中心的组织下,来自中国科学院遥感应用研究所、中国林业科学研究院资源信息研究所、国家海洋局第二海洋研究所、地质矿产部航空物探遥感中心、水利部遥感技术应用中心、北京农业大学、中国测绘科学研究院等七个单位五十余名科研人员,经过 4 年半时间的努力工作完成了“星载 SAR 应用研究”课题的各项计划,取得了丰硕的研究成果。

本文集即为科研人员们几年来辛勤劳动的理论总结。全书分为三部分:第一部分主要反映基础性研究成果,第二部分为技术方法成果,第三部分为应用成果,同时提出对我国发展星载 SAR 系统有关参数设计的建议。

在课题的立项阶段及研究进程中,得到了国家科学技术委员会基础研究高技术司、信息领域办公室、308 专家组以及各课题承担单位的大力支持,特别是 863-308 专家组的匡定波院士、杨震明先生、魏钟铨先生自始至终关心并领导本课题的研究工作,308 主题办公室的缪家龄和杨智同志给予了热情支持和帮助,谨此表示衷心感谢。

编 者

1995 年 12 月

目 录

前言

星载成像雷达资源探测研究..... 郭华东 徐冠华(1)

* * * * *

裸露岩石表面的后向散射模型研究——以山东试验区为例 李骏飞 邵 芸(13)

圆锥形树冠的冠体内辐射传播路径长度概率密度函数计算 曾琪明 谭炳香(24)

海面雷达后向散射特性研究 周长宝 包明泉 高曼娜(32)

双天线 SAR 海浪成像机理 包明泉 黄韦良 周长宝(43)

海浪谱-SAR 图像谱转换方法及应用研究 包明泉 周长宝 黄韦良(50)

SAR 与 TM 影像几何模式比较分析..... 严泰来 张 玮(58)

粗糙表面后向散射理论及模型的研究 李骏飞(65)

* * * * *

星载 SAR 影像的三维构像模型与高差变形改正 刘玉贤 尚 东(72)

基于 TM 合成影像 H 背景的雷达信息描述方法及其特性研究 刘 闯 李增元 车学俭 白黎娜 谭炳香(78)

多时相 JERS-1 SAR 图像分类方法研究 刘 浩 卢新巧(86)

SAR 图像纹理分析及其在地质找矿中的应用 姚国清 易昌善(92)

基于神经网络对遥感图像作类型分类的方法研究 白黎娜 车学俭 谭炳香 李增元 刘 闯(98)

SAR 图像处理方法及其地质应用 杨清华 赵福岳 姚国清(104)

* * * * *

星载 SAR 森林应用中的地形分析和制图研究——以罗山林场为例 谭炳香 李增元 车学俭 白黎娜 刘 闯(108)

SAR 松林蓄积量估测研究——以罗山林场为例 车学俭 白黎娜 谭炳香 李增元 刘 闯(114)

星载 SAR 在胶东地区的地质探测与应用 邵 芸 郭华东 石火生 刘 浩 魏秀萍(122)

利用 SAR 探测胶东地区转换构造 石火生 卢华复 邵 芸 郭华东 刘 浩 魏秀萍(130)

SAR 图像在山东烟台地区地质及矿产研究中的应用 张 雍 杨清华 赵福岳 王越胜(138)

..... 张 雍 杨清华 赵福岳 王越胜(138)

SIR-A 图像在寻找金矿中的应用研究	张 雍	张学勤	杨清华	(147)
利用 JERS-1 SAR 图像研究龙口地区的海水入侵与河道变迁	刘 浩	刘溱蕃		(156)
SAR 的海浪信息提取及应用研究	周长宝	黄韦良	章家琳	包明泉(161)
SAR 浅海水下地形测量	黄韦良	高曼娜	周长宝	朱廷璋 李 炎(172)
JERS-1 SAR 图像的近海动力特征研究	李 炎	黄韦良		(181)
利用 SAR 图像监测土壤水分的试验研究	李杏朝	杨晓明		(187)
莱阳试验区 ERS-1 SAR 图像水资源调查应用研究				
.....	钟劭南	董文敏	李杏朝	陈曦川(195)
多时相 JERS-1 SAR 图像水资源调查研究	曹宏彬	李杏朝	杨晓明	(203)
SAR 与 TM 图像复合处理提取农作物信息的研究				
.....	张 玮	严泰来	张宏铭	贾 文 金仲辉 殷克善(209)
海洋应用中 SAR 参数的优选研究	周长宝	黄韦良	包明泉	(215)
我国星载 SAR 系统波段的选择与应用前景分析	王 超	郭华东		(228)

CONTENTS OF ABSTRACTS

- Studies on Spaceborne Imaging Radar for Resource Detections
..... *Guo Huadong, Xu Guanhua*(12)
- * * * * *
- Backscatter Modeling of Rock Surfaces: A Case Study in Shandong Test Site
..... *Li Junfei, Shao Yun*(23)
- Computation of Probability Density Function of Radiation Propagation Length
Within Cone-Shaped Canopy Crown *Zeng Qiming, Tan Bingxiang*(31)
- The Studies of Radar Backscattering Properties Over Sea Surface
..... *Zhou Changbao, Bao Mingquan, Gao Manna*(42)
- Double Antenna SAR Ocean-Wave Imaging Mechanisms
..... *Bao Mingquan, Huang Weigen, Zhou Changbao*(49)
- The Studies of Ocean Waves-SAR Spectral Transform Techniques and Their
Applications *Bao Mingquan, Zhou Changbao, Huang Weigen*(57)
- A Comparative Study for Geometric Modes of Spaceborne SAR and TM Images
..... *Yan Tailai, Zhang Wei*(64)
- A Study on the Theory and Models of Rough Surface Backscatter *Li Junfei*(71)
- * * * * *
- The 3-D Model of Satellite SAR image Configuration and the Correction of Terrain In-
duced Distortion *Liu Yuxian, Shang Dong*(77)
- A Study on the Descriptive Methods and Features of SAR Information Based on Hue
Background of TM Composite Image
..... *Liu Min, Li Zengyuan, Che Xuejian, Bai Lina, Tan Bingxiang*(84)
- The Study of Classification Methods to Multi-temporal JERS-1 SAR Data
..... *Liu Hao, Lu Xinqiao*(91)
- Radar Image Texture Analysis and Its Application in Geological Exploration
..... *Yao Guoqing, Yi Changshan*(97)
- Neural Network-based Study on Forest Type Classification with Remote Sensing Data
..... *Bai Lina, Che Xuejian, Tan Bingxiang, Li Zengyuan, Liu Min*(102)
- The Study of Image Processing Technology and Its Geological Application for Space-
borne SAR Data *Yang Qinghua, Zhao Fuyue, Yao Guoqing*(107)

Study on the Topographic Analysis and Mapping of Spaceborne SAR—Taking Luo-shan Forestry as an Example
..... *Tan Bingxiang, Li Zengyuan, Che Xuejiang, Bai Lina, Liu Min*(113)

Estimating Conifer Forest Volume Using SAR Data—Taking Luoshan Forestry as an Example *Che Xuejian, Bai Lina, Tan Bingxiang, Li Zengyuan, Liu Min*(120)

Spaceborne SAR for Geological Detection in Jiaodong Region
..... *Shao Yun, Guo Huadong, Shi Huosheng, Liu Hao, Wei Xiuping*(129)

Study on Transfer Structure Using Spaceborne SAR in Jiaodong Region
... *Shi Huosheng, Lu Huaifu, Shao Yun, Guo Huadong, Liu Hao, Wei Xiuping*(137)

Application of Spaceborne SAR Image in Geology and Mineral Exploration in Yantai Area, Shandong Province
..... *Zhang Yong, Yang Qinghua, Zhao Fuyue, Wang Yuesheng*(146)

The Study of SAR Image in Gold Exploration
..... *Zhang Yong, Zhang Xueqin, Yang Qinghua*(155)

The Application of JERS-1 SAR Data to Investigate the Sea-Water Intrusion and River Migration in Longkou Area *Liu Hao, Liu Zhenfan*(160)

The Studies on Extracting Ocean Wave Information from SAR Images and their Applications
..... *Zhou Changbao, Huang Weigen, Zhang Jialin, Bao Mingquan*(171)

Mapping of Sea Bottom Topography with Spaceborne SAR
..... *Huang Weigen, Gao Manna, Zhou Changbao, Zhu Tingzhang, Li Yan*(179)

The Studies of Near Shore Dynamic Features Using JERS-1 SAR Images
..... *Li Yan, Huang Weigen* (186)

A Study on Soil Moisture Monitoring Using Airborne SAR Image
..... *Li Xingchao, Yang Xiaoming* (194)

The Study of Water Resources Investigation Using ERS-1 SAR Images in Laiyang Area *Zhong Shaonan, Dong Wenmin, Li Xingchao, Chen Xichuan* (202)

The Study of Water Resources Using Multi-temporal SAR Images
..... *Cao Hongbin, Li Xingchao, Yang Xiaoming* (208)

Synthetical Processing of Spaceborne SAR and TM Image for Extracting the Crop Information from SAR Image Data
Zhang Wei, Yan Tailai, Zhang Hongming, Jia Wen, Jin Zhonghui, Yin Keshan (214)

The Studies on the Optimum Choices of SAR Parameters for Oceanographic Applications *Zhou Changbao, Huang Weigen, Bao Mingquan* (227)

Band Selection and Application Prospect of Chinese Spaceborne SAR System
..... *Wang Chao, Guo Huadong* (234)

星载成像雷达资源探测研究

郭华东 徐冠华

摘 要

本文介绍了 863 高技术计划 308 主题星载 SAR 应用研究结果。在对典型地物与成像雷达相互作用机理分析基础上,建立了岩石、植被及海面的后向散射模型,研究发展了雷达图像处理及专题信息提取算法,利用星载 SAR 图像在林业、地矿、海洋、农业、水文等领域取得系列研究成果。文章最后提出了发展我国星载 SAR 系统有关参数的建议。

关键词 星载雷达,应用研究,资源探测

50年代后期,国际上诞生了合成孔径雷达概念,到1960年4月,第一部合成孔径雷达问世并公开。30多年来,成像雷达技术及其应用取得了重要进展。

起初对 SAR 的应用研究是在机载条件下进行的。随着 1978 年 L 波段 Seasat SAR 的发射、1981 年 SIR-A 的上天及 1984 年数字记录的 SIR-B 的升空,特别是近几年来前苏联 S 波段金刚石卫星 SAR、欧洲空间局 C 波段 ERS-1 SAR 和日本 L 波段 JERS-1 SAR 的发射,它的应用得到了迅速发展。

在地质应用方面,J. F. McCauley 等人(1982)利用 SIR-A 对埃及和苏丹交界处小沙漠的穿透能力,确定了其下存在的古河道;R. Blom 等人(1984)用 Seasat SAR 对美国莫哈维沙漠的分析,发现了被冲积扇埋藏的岩墙;B. A. Derryberry 等(1989)利用 SIR-B 数据在夏威夷进行了熔岩流分类及时代划分,并就雷达波与火山岩表面的相互作用关系进行了研究。B. Bruce(1990)利用加拿大 C 波段机载雷达图像进行了地质构造解译,并与 TM 数据进行综合分析,比较了雷达图像的应用效果,结果表明 SAR 图像在反映精细地形变化信息方面比 TM 数据好,能更好地揭示控制金矿的构造信息。在地质制图方面,SAR 图像也作出了卓有成效的贡献。这主要是因为雷达图像不仅揭示了包括地质构造、岩性等在内的地质信息,而且它可以进行数字高程的评估,从而为地质制图综合研究提供了手段。V. H. Singhroy (1989)利用雷达图像在加拿大多伦多及马尼它巴地区进行了地质制图研究,特别对该地区的几种与冰川有关的地质地形分类,SAR 图像反映较好。在资源勘查中,合成孔径雷达图像能提供十分丰富的地质构造、岩性、隐伏地质体等地质矿产信息。全面反映 SAR 图像在这方面价值的一个很好例子是 Michel Rheanh(1989)利用机载 SAR、星载 SAR 和陆地卫星 TM 图像以及重力和航磁数据,在孟托利亚和阿尔贝托两个地区进行矿产和油气资源的综合研

究。这种综合分析在提取断裂带、隐伏地质体、岩性等方面充分体现了 SAR 图像的能力。

星载 SAR 在农业中的应用研究也很活跃。国外应用海洋卫星和 SIR-A, SIR-B 的雷达图像对农作物的观测,可以看到森林比牧草和一般农田亮度大。对多极化、多时相雷达图像进行处理,所得到的彩色图像对农作物的分类判读十分有利。美国、欧洲、日本、加拿大、澳大利亚等对农作物分类、长势监测等方面都作了大量工作,对土壤水分的微波散射测量也作了不少工作。

同样,微波遥感在林业方面应用研究的 20 多年历史中也发展很快。由于该系统能够穿透云层,并记录从地面景物返回的能量,所以,该传感器提供了用其它遥感方法难以获得的热带森林的面积和结构(Sader, 1987)。在雷达遥感应用中,对其图像的解译,特别依赖于对后向散射过程的仔细理解(Richards, 1990)。一些学者报道了从 Seasat 和 SAR-A (Wu, 1981, 1984)、SIR-B (Mueller 等, 1985)及机载系统(Hoffer 等, 1985)上 SAR 信号与森林景物间的关系。Richards (1989)用 L 波段、HH 极化 SIR-B 图像研究了澳大利亚 Victoria 洲人工松林的后向散射特征及后向散射对入射角的依赖性,指出 L 波段、HH 极化 SIR-B 可区分树龄间隔为五年的树龄组;类似的研究也见于天然林(Birrer 等, 1982; Wu, 1987; Cimino, 1986; Sieber 等, 1986; Imhoff 等, 1986)。

近几年来,许多森林林分的微波后向散射模型被发展(Lang 等, 1983; E 等, 1984; Richards 等, 1987; Sun 等, 1988; Ulaby 等, 1988; Karam 等, 1988; Durden 等, 1989; Wang 等, 1990; Miller 等, 1990; Kolawole 等, 1991)。这些模型所输入的因子为森林物理参数(胸径、树高和密度)、森林介电参数(叶、枝条和树干的介电常数)和雷达参数(频率、极化和入射角)。在许多情况下,这些模型可成功地预测各种林分的后向散射特征,尤其对连续郁闭的林分。Sun 等(1991)建立了非连续植冠的森林微波后向散射模型, Wang (1993)对其进行了补充和完善。

对森林生物量来说,近来用机载和星载 SAR 图像的研究指出,波长较长(L 和 P 波段雷达图像与林分总生物量或树干生物量是高度相关的(Hoffer 等, 1986; Wu, 1987; Sader, 1987; Wu 等, 1987; Sader, 1987; Sun 等, 1988; Ahmed 等, 1989; Hussin 等, 1991; Kasischke 等, 1991; Dobson 等, 1992; Kasischke 等, 1993; Kasischke 和 Christensen, 1993; Le 等, 1992); 高频率(C 和 X 波段)的雷达后向散射主要受枝条和叶组成的树冠层支配,而频率较低的雷达(P 和 L 波段),其后向散射主要受树干和枝条的影响(Ulaby 等, 1990; McDonald 等, 1991)。L 波段雷达后向散射(SIR-A 和机载 SAR)与林分参数,如树龄、高度、基面积和生物量高度相关(Letoan 等, 1981; Wu, 1987; Hussin 等, 1991)。

在森林类型分类和制图方面, Cimino 等(1986)根据不同入射角 SIR-B 图像上的相对亮度区分了阿根廷 Chubut 省 Cordon Larasa 地区的森林类型,指出用多种入射角雷达图像可区分不同的树种及每一树种的结构, Ford 等(1988)利用该图像对婆罗纳洲的雨林进行了分类和制图; Dams (1990)用机载 X 波段 SAR 图像,对加拿大 Albeata 中心的皆伐林地进行了制图,并量算了面积,经与摄影图的比较分析发现,两种图间存在显著的线性相关关系,通过线性回归模型,从 SAR 图像上制图求算出的面积与实际面积差异不显著。

在水资源调查和土壤水分监测方面,国外从 70 年代即已开展研究,特别是 80 年代美国在执行“农业与资源航天遥感调查计划”中,对微波遥感土壤水分作了系统的研究。

以上研究说明,具有全天时、全天候特别星载 SAR 是再生、非再生资源的重要探测工

具。90年代后期的ERS-2 SAR、Radarsat及2000年计划发射的数颗星载SAR都清楚地说明了星载SAR可为全球资源与环境研究提供快速的手段。面对国际上星载SAR的研制、发射和应用研究突飞猛进的发展,“863-308”主题决定在“八五”期间开展我国星载SAR的模祥机研究,并设立农林、水资源、地质、海洋等方面的应用研究课题,以追踪国际先进水平,促进我国在相关领域研究的发展。

一、星载SAR数据获取

星载SAR数据的获取,是各应用研究课题开展工作的基础。面对1991年立项以来未有商业性星载SAR的发射,我们通过各种渠道获得了1981年成像飞行的美国SAR-A、1991年由欧洲空间局发射的ERS-1 SAR和1992年由日本发射的JERS-1 SAR三种星载SAR景像或数据。研究中,部分专业也用到了国家遥感中心航空遥感一部的地球资源雷达(ERR)影像,现将所用SAR参数列表如表1:

表1 航天、航空SAR参数

参数	SIR-A	ERS-1 SAR	JERS-1 SAR	ERR
飞行高度(km)	260	785	570	10
波段	L	C	L	X
极化	HH	VV	HH	HH
入射角(°)	47	23(中心区)	35	14
辐照宽度(km)	50	100×102.5(距离×方位)	75	18
距离分辨率(m)	40	<33	18	3
方位分辨率(m)	40	<30	18	3
数据记录方式	光学	数字	数字	光学

二、图像几何和辐射校正

1. 星载SAR几何纠正方法及计算机软件

依据星载SAR的成像原理和构像几何模型,采用几何途径建立起构像模型。

SAR影像上的每条扫描线可看作是具有一个投影中心的透视变换的图像。SAR图像的每条扫描线所对应的空间直角坐标系中摄站的空间方位可用一组姿态参数表示。在一景图像的扫描时间内,姿态参数的变化可以看作是时间的函数。假设每景中心扫描线的姿态参数为 $X_{s0}, Y_{s0}, Z_{s0}, \phi_0, \omega_0$ 和 K_0 ,则任意一条扫描线j上的姿态为:

$$\begin{aligned}
X_{sj} &= X_{s0} + A_0 t_j \\
Y_{sj} &= Y_{s0} + B_0 t_j \\
Z_{sj} &= Z_{s0} + C_0 t_j \\
\phi_j &= \phi_0 + A_1 t_j + A_2 t_j^2 \\
\omega_j &= \omega_0 + B_1 t_j + B_2 t_j^2 \\
K_j &= K_0 + C_1 t_j + C_2 t_j^2
\end{aligned}$$

对影像上任意一点,按中心投影的几何关系可列出构像方程式如下:

$$\begin{aligned}
X_{ij} &= -f \frac{a_1(X_{ij} - X_{sj}) + b_1(Y_{ij} - Y_{sj}) + C_1(Z_{ij} - Z_{sj})}{a_3(X_{ij} - X_{sj}) + b_3(Y_{ij} - Y_{sj}) + C_3(Z_{ij} - Z_{sj})} \\
O &= -f \frac{a_2(X_{ij} - X_{sj}) + b_2(Y_{ij} - Y_{sj}) + C_2(Z_{ij} - Z_{sj})}{a_3(X_{ij} - X_{sj}) + b_3(Y_{ij} - Y_{sj}) + C_3(Z_{ij} - Z_{sj})}
\end{aligned}$$

将上式按泰勒级数展开,得出误差方程式如下:

$$\begin{aligned}
V_{Xij} &= D_0 \Delta X_{s0} + D_1 \Delta Y_{s0} + D_2 \Delta Z_{s0} + D_3 \Delta \phi_0 + D_4 \Delta \omega_{s0} + D_5 \Delta K_{s0} + D_6 \Delta A_0 + D_7 \Delta B_0 \\
&\quad D_8 \Delta C_0 + D_9 \Delta A_1 + D_{10} \Delta B_1 + D_{11} \Delta C_1 + D_{12} \Delta A_2 + D_{13} \Delta B_2 + D_{14} \Delta C_2 - L_{Xij} \\
V_{Yij} &= D'_0 \Delta X_{s0} + D'_1 \Delta Y_{s0} + D'_2 \Delta Z_{s0} + D'_3 \Delta \phi_0 + D'_4 \Delta \omega_{s0} + D'_5 \Delta K_{s0} + D'_6 \Delta A_0 + D'_7 \Delta B_0 \\
&\quad D'_8 \Delta C_0 + D'_9 \Delta A_1 + D'_{10} \Delta B_1 + D'_{11} \Delta C_1 + D'_{12} \Delta A_2 + D'_{13} \Delta B_2 + D'_{14} \Delta C_2 - L_{Yij}
\end{aligned}$$

再通过选取地面控制点,利用平差运算求解定向参数,运用 DEM 纠正因高差引起的几何变形,并用该方法对山东 SAR 试验区的 ERS-1 SAR 影像进行了几何纠正,达到了很高的精度,地面误差在 36m 以内,可满足生产 1:10 万影像图的要求。

2. 星载 SAR 影像斑点噪声去除方法及软件

根据星载 SAR 影像斑点噪声较大的特点,用(1)SAR 影像斑点噪声的倍增噪声模型及去除方法;(2)SAR 影像斑点噪声的峰值去除法;(3)综合上述二种方法优点的峰值倍增模型噪声去除法。此三种方法,都能有效地去除 SAR 影像中的斑点噪声,能较好地保留原 SAR 影像中的结构、纹理等边缘信息,并不产生新的人工结构,但以第三种方法效果最好,经处理的 SAR 影像可基本上满足各专业对星载 SAR 影像的要求。

三、典型地物 SAR 散射特性研究

1. 森林微波后向散射模型建立

在总结前人工作,尤其是 Ulaby 有关研究的基础上,通过吸收 M. T. Hallikainen 等的土壤介电常数计算经验公式和 F. T. Ulaby, EL-Rages 的 Debye-cloe 双色散射模型对植被组分介电常数的计算公式,在大量外业实测数据的支持下,建立了松林微波后向散射模型。利用该模型,可对松林成像进行模拟,这对该类森林的成像机理研究和实践应用都有重要意义。

2. 裸露岩石表面微波后向散射模型建立

以大量的野外及室内岩石表面几何特性和物理特性参数的测试为基础,以电磁波理论

为指导,建立了裸露岩石表面的双尺度后向散射模型。由于地质体表面的复杂性和不确定性,国内外尚无这类研究的报道。这一模型的建立是 SAR 在地质领域定量化研究中的重要探索。

3. 农作物微波后向散射特性

地物微波的后向散射系数是雷达遥感应用的重要物理参数,它可以通过微波散射计测试和一定计算后测算。地物后向散射系数不但取决于农作物等地物的理化性质,而且受到大气环境以及测试其它条件的多方面影响。农作物的 X 波段微波后向散射系数测试表明,X 波段微波对农作物穿透能力较弱,50cm 以上植被不能穿透;小叶密植的作物后向散射大于大叶疏植的作物;波束发射方向与农田垅向的夹角对后向散射系数有较大的影响,对于农作物 X 波段的同极化微波后向散射系数大于交叉极化。这些测试结论可以作为雷达遥感图像判译的参照。但是由于微波信号与农作物的相互作用过程的复杂性,准确的定量化的研究成果,还有待于更多的地面测试和分析工作。

用面状均匀纵向线性分布的水颗粒层状模型模拟不连续几何形状随机变化的散射体,是研究农作物散射过程的可行方法。

4. 海面雷达后向散射特性

(1)用新的微扰法研究随机粗糙表面的雷达后向散射

海面是一种随机的粗糙表面,我们提出了一种新的微扰法来研究海面的散射特征,这种方法与常用的微扰法相比,有如下特点:

(a)运用诺伊曼级数推导随机表面场强所满足的随机积分方程的近似解,很方便地获得海表面场强的各阶微扰解。

(b)在推导海面散射场的相干与非相干分量时,使用了随机变量的特征函数及其偏导数,提高了微扰法的精度,当表面粗糙度较大时,尤为明显。

(c)应用帕斯第逼近法拓宽了微扰解的收敛域。其使用范围达到克希霍夫法及双尺度模型的应用范围的一部分,更主要的是能用于经典模型不适用的情况,使计算结果与数值解相吻合。

(2)用基函数展开法研究全频域的随机粗糙表面的雷达后向散射

运用基函数展开法解粗糙表面散射问题中的粗糙表面流的积分方程,得到一个适合全频域粗糙表面的新模型。使用该模型的计算结果与利用距量法的数值解的结果一致,而数值解通常被当作标准解。

研究表明:基函数展开法不仅能用于克希霍夫方法一阶微扰和分类模式中,而且能在全频域得到很好的结果。

(3)用一般非线性积分方法研究海浪谱与 SAR 图像谱的转换关系

非线性系统分析,即特征函数法研究两种谱的非线性关系,该模型包括了由于海面波浪运动引起的成像位置偏移、速度扩散和二阶次的加速引起的方位聚焦以及聚焦参数。因此,得到了一个比较完整的海浪谱到合成孔径雷达图像谱的非线性积分转换式。根据该模式,编制了计算机软件并作出了计算机模拟图像。所得到的海浪谱和 SAR 雷达图像谱的结果与国外著名的学者 W. Alpers 和 Hasselmann 等人的结果基本一致。

合成孔径雷达观测海洋就是探测不同海浪、海风、海况条件下的海面雷达后向散射特性。海面粗糙度直接与雷达后向散射特性相关。为此：在东海海区用 C 波段和 C 波段两台雷达散射计开展了海面雷达后向散射特性的研究。通过实验得到：

(1)海面雷达后向散射特性随着入射角 θ 的变化关系为：

$$\sigma^{\circ} = C \exp(-\theta/\theta_0), 20^{\circ} < \theta < 70^{\circ}$$

(2)海面雷达后向散射特性与极化方式的关系为：

垂直极化状态下的海面雷达后向散射系数 $\sigma_{\text{v}}^{\circ}$ 要比水平极化状态下的海面雷达后向散射系数 $\sigma_{\text{HH}}^{\circ}$ 大，在中等海面状态下（风速 5~10m/s，海况 4 级，浪高 2.5m 以下），L、C、X 波段在入射角 60° 时的 $\sigma_{\text{v}}^{\circ}$ 比 $\sigma_{\text{HH}}^{\circ}$ 大 7~10dB。

(3)海面雷达后向散射特性与雷达波长的关系为：

海面雷达后向散射系数随着波长的增加而减小（随着频率的增加而增加）。在平直区， σ° 值随频率增加最多。

(4)海面雷达后向散射特性与海浪的关系：

实验研究表明，在小入射角情况下 σ° 随着浪高的增加而增加。这种现象一直要持续到“饱和”状态到来为止。在 X 波段，饱和的浪高约为 0.60~0.90m，饱和的浪高随着雷达波长增加而增加。

垂直极化的雷达回波频谱与海浪的频谱很相似，而水平极化的回波谱比海浪谱宽。因此，雷达在垂直极化时测得的数据更接近于海浪的数据，一般选择垂直极化状态进行海浪雷达后向散射的测量。

5. 海岸带目标的雷达后向散射特性

海岸带是海陆交界的地带，具有海洋和陆地的各种特征，X 波段的雷达散射计测定结果表明在观测海岸带、陆地、植被等目标时，水平极化最好。雷达散射系数变化范围从 12.86~38.44dB，达 26dB 左右的差异。

研究表明， $\sigma_{\text{HH}}^{\circ}$ 比 $\sigma_{\text{VV}}^{\circ}$ 大。所以一般观测海岸带时选用水平极化和较大的入射角是合适的。

上述结果表明：用于海岸带陆上目标观测的 SAR，应选水平极化；入射角可以大些，如 30° ~ 50° 。

四、SAR 图像处理研究方法

1. 图像增强与纹理分析

对雷达图像进行低通滤波和线性拉伸、亮度调整、反差增强等处理是十分必要的处理措施，经低通滤波和图像拉伸后，图像灰度直方图得到改善，去除了噪声，提高了影像的质量，可以提高雷达图像的解译。

研制的斑点噪声抑制、多层纹理分析方法、信息层分离等图像处理方法，节时有效，是实用型的 SAR 图像处理分析方法，为 SAR 的应用提供了快捷、有效的处理技术。

利用 PCI 软件中的小波变换方法，增强了北东向的线性构造，而这个方向的线性构造