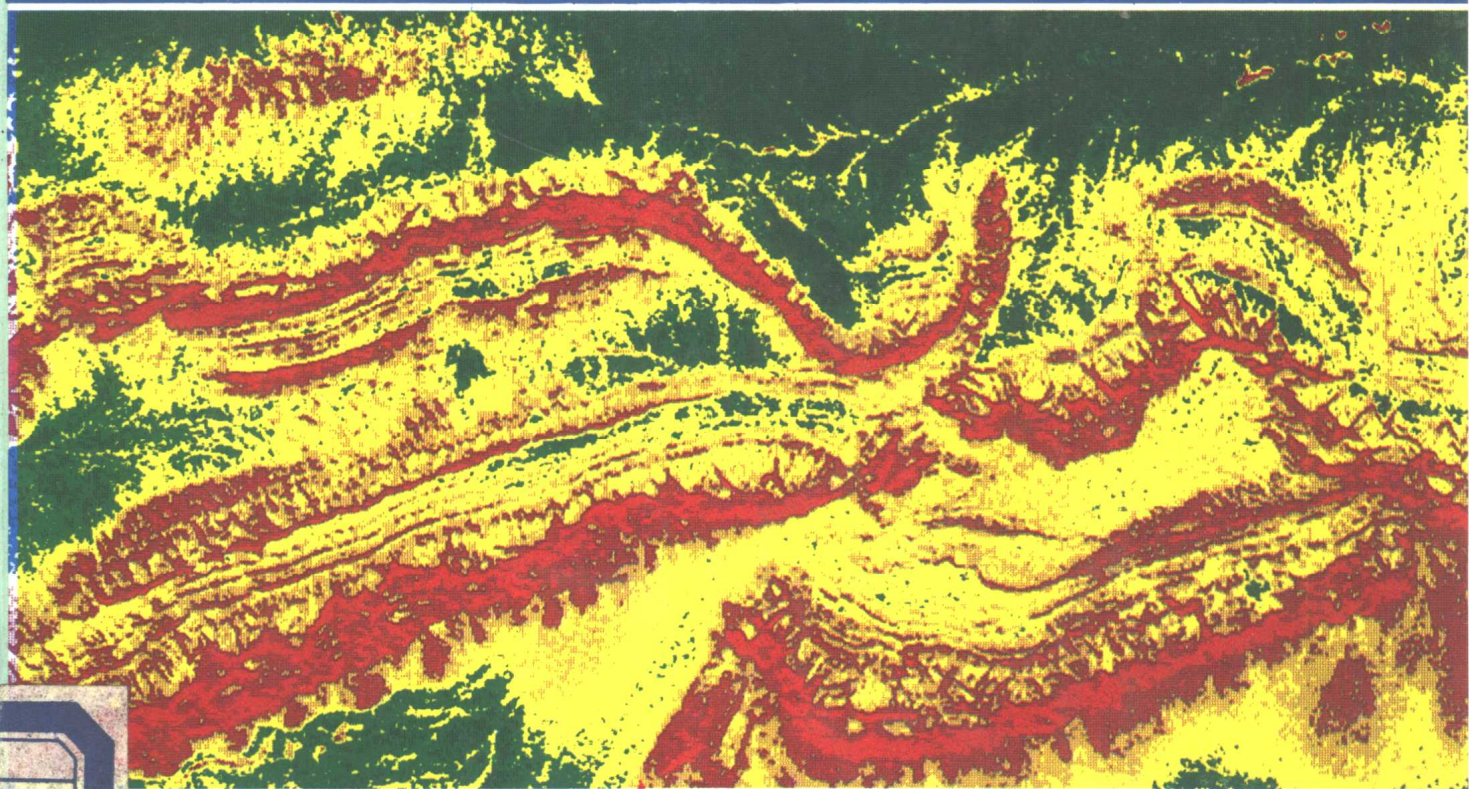


雷达图像分析 及地质应用

郭华东 主编



科学出版社

雷达图像分析及地质应用

郭华东 主 编

科 学 出 版 社

1 9 9 1

(京)新登字092号

内 容 简 介

本书介绍了雷达图像的分析方法及其在地质学中应用的有关研究成果。其内容包含三部分：①雷达图像几何校正、处理及专题信息增强技术；②雷达图像成像机理分析；③雷达图像在岩性、构造及矿产调查中的应用。

本书可供从事遥感技术、遥感应用，特别是从事雷达遥感，以及地质、地理、水文等专业的科研人员和大专院校有关专业的师生阅读、参考。

雷达图像分析及地质应用

郭华东 主编

责任编辑 唐云江 彭胜潮

科学出版社出版

北京东黄城根北街16号

邮政编码：100707

北京怀柔县黄坎印刷厂印刷

新华书店北京发行所发行 各地新华书店经售

*

1991年11月深圳第一版 开本：787×1092 1/16

1991年11月第一次印刷 印张：10 1/2 插页：6

印数：0001—1 000 字数：230 000

ISBN 7-03-002818-X/P·556

定价：14.00 元

《雷达图像分析及地质应用》编辑委员会

主 编 郭华东

副主编 舒士畏 王 超 张琦娟

委 员 卫 政 张圣凯 张云和 洪 峻 董品亮

序

我国微波遥感事业的辛勤开拓者和长期合作者——郭华东、舒士畏教授，组织中国科学院遥感应用研究所和电子学研究所许多同志一起承担中国科学院资源与环境科学局设置的重大科研项目，历时三年，取得了丰硕的成果，汇编成这部论文集——《雷达图像分析及地质应用》。这是一部以地质体的微波散射理论为基础，以雷达成像、数据处理及地质分析为核心的边缘学科——雷达地质学论著，反映我国微波遥感已开始进入理论系统化与应用专业化的新阶段。这使我感到十分欣慰，并衷心地向作者致以热烈的祝贺。

雷达遥感地质是一个崭新的科学领域。即使在遥感技术的行列中，它也是“后起之秀”。由于历史、社会的原因以及该技术固有的特点，至今给人们的印象或多或少带有几分神秘感。

第一，“雷达”这个名词，本来是第二次世界大战期间才普及的缩写词和外来语，近些年再加上“侧视”和“极化”，就使人们更加感到生疏了。遥感波段由可见光波段延伸到近红外，以假彩色合成的图像出现，已经超越了人们的视觉生理的局限；而雷达把微波信息也转换为视觉图像，读者就需要再作一番图形信号的概念转换，更费一番思索工夫，才能加深对它的理解。

第二，雷达所具有的穿透能力，即使对于科技界来说，也很有引人入胜的魅力。因为整个地球是由气圈、水圈和生物圈层层包裹着，要从外层空间的卫星、飞船上来观测人类自己居住的星球，受到一些因素的覆盖限制，然而雷达能够穿透云层和植被，甚至干燥的沙漠，揭露出岩石圈表层的特性和环形构造、不同电介质和粗糙度的岩石，用来找矿、找水，寻找油气和黄金等矿藏。雷达遥感自然是格外受到青睐的遥感手段。

第三，雷达遥感从一开始就服务于军事侦察，它能不分昼夜，全天候、全天时工作，一直被看作是“秘密武器”，讳莫如深。后来日渐广泛地应用于气象、水文、海洋的环境监测与预报，普及到民用建设部门，但能够提供高分辨率雷达图像的隐形飞机、巡航导弹等等，至今仍然是保密的禁区。

基于成像雷达对云雾和植被具有穿透能力，它在地质学研究方面的应用很早就受到了重视。1972年发射的阿波罗17号登月飞船，首次携带合成孔径雷达（SAR）进入太空，并用其所取得的图像，确定了13个火山口的位置。1981年哥伦比亚号航天飞机提供的成像雷达（SIR-A）图像，使北非小沙原的深埋地下的古河道，被J.F. McCauley等发现。1984年R. Blom等人利用海洋卫星SAR对美国西部莫哈韦沙漠（Mojave Desert）的分析，揭示出被冲积扇埋藏的岩墙。1990年起，麦哲伦号成像雷达对金星的探测，发现了大量的陨石坑、火山和构造地质现象。……这些研究揭开了雷达地质学的序幕。

今天，正如文集中所指出：“90年代将成为星载雷达为主体的微波遥感的黄金时代”。目前，除已经升空的苏联金刚石和欧洲空间局遥感卫星外，日本的资源卫星（JERS-1）、

加拿大的雷达卫星 (Radarsat)、美国的航天飞机和地球观测卫星计划, 都将相继进入轨道, 而且都将获得 SAR 的图像资料。“后起之秀”显然要“后来居上”了。雷达成像原理及其地学应用研究, 也就成为遥感应用基础研究的热门, 刻不容缓。

中国科学院电子学研究所研制的多极化、多测绘通道的合成孔径雷达 (CAS/SAR), 工作在 X 波段, 具有四个极化的能力。我国国家遥感中心航空遥感一部拥有地球资源雷达 (ERR), 同样是工作在 X 波段, 分辨率为 $3\text{m} \times 3\text{m}$ 。它们所提供的航空雷达图像, 在抗洪救灾、林火监测、资源勘探、环境保护等各方面都取得了显著的社会经济效益, 也为星载成像雷达研制和地学应用积累了丰富的实验成果; 其次, 对覆盖我国领土的美国航天飞机 SIR-A 和 SIR-B 雷达图像的地学评价, 在这部文集中也有所反映。所以说, 从这部文集可看到我国已为建立雷达地质学迈出了可喜的第一步, 成果辉煌; 但也看到跟踪国际雷达地质学的差距还不小, 来日方长!

鉴此, 谨重复我的祝贺: 后起之秀, 成果辉煌; 后来居上, 来日方长!

陳述彭

1991 年 9 月

前 言

雷达遥感技术问世以来,由于其特有的全天候、全天时成像特点及对一些地物的穿透性能,在资源与环境调查中日益显示出有效作用及应用潜力。90年代,随着雷达遥感技术的迅速发展及应用领域的迫切需要,在国际范围内除继续保持机载雷达遥感的盛势外,星载雷达遥感将有长足的发展。苏联金刚石卫星、欧洲空间局欧洲遥感一号卫星、日本地球资源一号卫星、加拿大雷达卫星、美国航天飞机及地球观测系统上携带的合成孔径成像雷达,已经或将要陆续进入太空,实现对地球的周期性、长期性探测。可以看出,90年代将是雷达遥感的黄金时代。

中国科学院资源环境科学局预测到雷达遥感的这一重要发展趋势,于1988年设立了院重大科研项目“雷达图像分析及地质应用研究”课题,目的在于从雷达遥感的一个侧面开展系统研究,同时为90年代雷达遥感高潮的到来作技术及理论储备。

中国科学院遥感应用研究所和合作单位——中国科学院电子学研究所科研人员承担了这项研究工作。研究资料采用了我国自行研制的SAR图像、国家遥感中心航空遥感一部引进的SAR图像、航天飞机SIR-A、SIR-B图像等,研究地区分布在内蒙古、甘肃、新疆、湖南、山东等省区,同时在美国西部也曾作了有关试验。

本文集收入的有关研究论文共20篇,主要包括三部分内容:①雷达图像几何校正与处理方法研究。在分析雷达成像几何基础上,进行图像计算机模拟,研究发展了不同的几何校正方法及雷达图像地质信息增强技术。②雷达图像成像机理研究。介绍雷达波长、极化、俯角及粗糙度、复介电常数对成像的影响,多极化、多视角雷达成像效应,垂直视向雷达图像探测地质体效果,雷达穿透能力的定性、定量分析结果,并设计提出了用于地质探测的我国最佳雷达俯角选择图,以及进行了雷达图像定标试验。③雷达图像在地质学中的应用研究。叙述雷达图像在岩性识别、构造分析中的研究成果,重点揭示雷达图像对线性体的探测能力,分析其在矿产调查中的作用,特别是对含金构造带的成功识别,并综述了麦哲伦成像雷达对金星地质学的贡献。

参加本项工作的有中国科学院遥感应用研究所郭华东、王超、张云和、董品亮、邵芸、陈锡杰、赵昌龄、蔺启忠、李林、张圣凯、鲍士柱、刘子贵、魏秀萍、傅秀银等;中国科学院电子学研究所舒士畏、洪峻、王岩飞、秦少杰等。美国路易斯安那州立大学A.J.刘易斯(Lewis)博士参加了部分研究工作。全部图件由李薇薇清绘。

在研究过程中,得到了中国科学院资源环境科学局有关领导及同事们的大力支持与帮助,谨此表示衷心感谢。

由于编者水平有限,书中缺点错误在所难免,恳请读者不吝批评指正。

编者

1991年8月

目 录

序.....	陈述彭 (i)
前言.....	(iii)
雷达地质及其进展.....	郭华东 (1)
雷达图像的几何特点及计算机模拟.....	舒士畏等 (11)
侧视雷达图像的几何校正与镶嵌.....	张云和等 (22)
一种新的合成孔径雷达图像几何校正方法.....	洪 峻等 (27)
增强地质信息的雷达图像处理方法研究.....	张云和等 (35)
目标的雷达图像特征及其提取方法的研究.....	舒士畏等 (42)
方向溶解算子在平滑雷达图像斑点噪声中的应用.....	张大力等 (56)
雷达图像成像机理分析.....	郭华东 (61)
X波段微波穿透性的定量分析.....	赵昌龄等 (71)
雷达图像定标.....	舒士畏 (78)
地质探测的最佳雷达俯角选择.....	郭华东 (88)
垂直视向雷达图像线性体提取及对比分析.....	董品亮 (94)
圣海伦火山区 X波段多极化雷达图像评价.....	A. J. 刘易斯等 (99)
内蒙古巴音诺尔公地区雷达图像构造分析.....	王 超等 (103)
雷达图像用于恰奔金矿区地质调查.....	李 林等 (108)
利用航天雷达图像寻找含金构造带.....	王 超等 (116)
新疆布尔根地区雷达图像的金矿地质分析.....	蔺启忠 (123)
甘肃酒泉地区 SIR-A 图像的地质信息.....	刘子贵等 (129)
麦哲伦成像雷达对金星地质学的贡献.....	郭华东等 (135)
90年代的星载雷达遥感.....	郭华东 (141)
英文摘要.....	(147)
图版	

CONTENTS OF ABSTRACTS

Radar Geology and Its Development	Guo Huadong (147)
The Characteristics of Radar Image and Its Simulation.....	Shu Shiwei et al. (147)
Geometric Rectification and Digital Mosaicking of SAR Imagery.....	
.....	Zhang Yunhe et al. (147)
A New Geometric Rectification Method for Synthetic Aperture Radar Image ...	
.....	Hong Jun et al. (148)
Radar Image Processing for Enhancement of Geologic Information.....	
.....	Zhang Yunhe et al. (148)
The Research on Radar Signature of Targets and Its Extraction Techniques...	
.....	Shu Shiwei et al. (149)
Directive Solution Operator and Its Application in Smoothing of Speckle Noise	
in SAR Images	Zhang Dali et al. (149)
Analysis for Radar Imaging Mechanism.....	Guo Huadong (150)
Quantitative Analysis of X-Band Microwave Penetration.....	
.....	Zhao Changling et al. (150)
Radar Image Calibration.....	Shu Shiwei (150)
Optimum Radar Depression Angles for Geologic Analysis in China.....	
.....	Guo Huadong (151)
Extraction and Comparison of the Lineaments Derived from SAR Imagery	
with Two Illuminated Directions.....	Dong Pinliang (151)
Evaluation of X-Band Multi-Polarization Radar Imagery in St. Helens Volcanic	
Region.....	A. J. Lewis et al. (152)
Radar Imagery for Structural Analysis in Bayinnorgong Region, North China...	
.....	Wang Chao et al. (152)
Applying Radar Imagery to Geologic Interpretation of Qiabon Gold Mining	
District, Northwest China.....	Li Lin et al. (153)
Exploration of Gold-Bearing Structural Zone Using Spaceborne Radar Imagery	
.....	Wang Chao et al. (153)
Synthetic Aperture Radar Imagery for Gold Exploration in Burgen Area of	
Northwest China.....	Lin Qizhong (154)
The Geologic Information of SIR-A Image in Jiuquan Region of Northwest	
China.....	Liu Zigui et al. (154)
Magellan Imaging Radar for Venus Geology.....	Guo Huadong et al. (154)
Spaceborne Radar Remote Sensing in the 1990s.....	Guo Huadong (155)

雷达地质及其进展

郭 华 东

(中国科学院遥感应用研究所)

摘 要

本文在回顾成像雷达系统及雷达地质发展过程的基础上,论述了雷达图像成像机理、几何校正、信息增强及图像分析方法,给出了内蒙古、新疆、甘肃及湖南等研究区机载、星载雷达地质研究结果,包括岩性识别、构造分析及矿产调查。分析了L波段雷达的穿透性及沙丘区的雷达回波特点,并指出了雷达图像在地质研究中的重要作用及雷达地质发展的潜力。

一、历史回顾

50年代中期,雷达技术领域取得了一项重要进展,即在先前唯一类型的成像雷达——以极坐标形式表示斜距和方位的PPI(平面位置显示器)雷达——基础上,由美国西屋、佳年、莫托罗拉、德克萨斯仪器公司为军事目的研制的真实孔径侧视成像雷达(RAR)相继问世,并获得了地球表面空间分辨率为数十米量级的雷达图像^[1]。但由于真实孔径雷达受到天线尺寸的限制,要取得高分辨率的雷达图像仍有困难。为此50年代后期诞生了合成孔径的概念。1960年4月,国际上第一部合成孔径雷达(SAR)问世并公开^[2]。SAR为军事目的而发展,较早转向地球资源探测的有AN/APQ-56, AN/APQ-69, AN/APQ-86等雷达系统。

30年来,成像雷达技术取得了重要进展。1961年西屋公司研制的AN/APQ-97系统引进交叉极化特性,成为第一部具有两种极化方式的成像雷达。1971年,佳年公司研制的AN/APQ-102系统空间分辨率达 $15 \times 15\text{m}$,由此演变而来的GEMS系统,分辨率提高到 $10 \times 12\text{m}$,发展到AN/APQ-102系统,分辨率已达 $3 \times 3\text{m}$ ^[3]。至1979年,加拿大遥感中心在密执安环境研究所研制的双波段(X, L)双极化(HH, HV)雷达基础上改进而成的SAR-580系统,其X波段图像分辨率达到 1.6m , L波段 2.2m ^[1]。80年代至90年代初,人们的注意力更多地转向了数字成像雷达。为了给星载雷达上天作技术准备,研制成功了新一代机载数字成像SAR系统,欧洲空间局研制的C波段E-SAR系统,距离及方位分辨率为 $2.5 \times 4.0\text{m}$;加拿大的CV-580 SAR系统,工作在C波段和X波段,具多极化能力,分辨率 $6 \times 6\text{m}$;JPL的AIRSAR系统是一个3波段(P, L, C波段)多极化成像雷达。令人可喜的是,我国也于80年代初期及后期分别研制成功了X波段单极化及多极化多通道合成孔径雷达,后者的分辨率达 $10 \times 10\text{m}$ 。

随着机载SAR的成功运行,星载SAR也得到了迅速发展。自1978年起, L波段海

1) 陈述彭, 环境遥感的动向与前沿, 遥感应用年报, 1980年。

洋卫星 SAR, L 波段航天飞机成像雷达 SIR-A 和 SIR-B 先后发射, 获得地球表面 $2 \times 10^7 \text{km}^2$ 的雷达图像; 今年以来, 苏联的 S 波段金刚石 SAR、欧洲空间局的 ERS-1 SAR (C 波段) 也先后升空。

雷达具有全天候、全气候成像能力, 并对云雾、小雨、植被及干燥地物有一定的穿透性, 其成像的立体效应增强了地形信息。这些优势使得雷达遥感技术在地质学中得到了广泛应用及深入发展。

利用 PPI 雷达图像, P. Hoffman 于 1954 年最早开展了地质研究^[4]。50 年代末, Feder 撰写出《雷达地质》论文, 将 PPI 雷达与地质学联系到了一起。在 1962 年举行的第一届国际环境遥感会议上, Bienvenis 宣读了《用侧视雷达图像进行工程地质分析》的论文, 把地质学与侧视雷达明确地结合起来。1965—1966 年 USGS 与西屋公司合作, 对美国本土进行了约 $5 \times 10^5 \text{km}^2$ 的雷达遥感飞行, 进行了区域地质构造与火山研究^[5]。此后, 雷达地质论文开始大量报道。

大规模的机载雷达地质应用计划首先是在云雾覆盖、林木繁茂的南美洲展开的。1965 年在巴拿马开展的“巴拿马雷达测图”计划, 以获取的雷达图像为基础数据, 与其它资料匹配, 发现了若干剪切带、硅化带, 确定了一些铜、锌、金矿化位置。紧接着巴西政府制订了 RADAM (Radar Amazon) 计划, 对全国 $8.5 \times 10^6 \text{km}^2$ 面积全部进行了雷达成像, 制作了比例尺为 1:25 万的 160 幅半控制雷达镶嵌图, 这些图件广泛地用在了基础地质及矿产、油气调查中。以上成功的飞行, 激起了许多国家对雷达遥感的浓厚兴趣。随之, 委内瑞拉、哥伦比亚、秘鲁、多哥、尼日利亚、印度尼西亚及日本等国家相继开展了机载雷达遥感飞行, 成像面积达 $2.5 \times 10^7 \text{km}^2$ 。在尼日利亚, 用雷达图像发现了结晶灰岩中受断裂控制的地下水, 在 $3.08 \times 10^3 \text{km}^2$ 范围内, 打井 24 口, 每口井每小时产水 10m^3 。在印度尼西亚, 用雷达图像开展了板块构造研究。

进入 80 年代, 机载雷达遥感已作为一种成熟的技术应用于地质探测中。美国地质调查局于 1980 年开始设立 SAR 制图计划, 利用分辨率 $10 \times 15 \text{m}$ 的 X 波段 HH 极化雷达系统, 对 50 个州的大部分地区成像。采用数字记录方式, 图像数据记录在只读高密盘 (CD-ROM) 上, 经济而且处理方便。利用这些资料发现了许多新的地质现象, 并进行了地质灾害的监测。1987 年起, 加拿大遥感中心设立雷达地质研究计划, 迄今已获取了全国 50 个试验区的雷达图像及地质分析成果^[6]。

在开展机载雷达地质应用研究的同时, 随着 Seasat SAR 及 SIR-A, SIR-B 航天雷达数据的获得, 星载 SAR 地质应用研究于 80 年代初活跃起来。除机载雷达遥感的优点外, 星载雷达的快速大面积成像和几何失真较小的特点, 使 SAR 在岩性识别和构造分析中发挥了明显的作用。令人兴奋的是从理论及实践上确认了 L 波段雷达对干燥地物的穿透能力。J. F. McCauley 等人发现了 SIR-A 对埃及及苏丹交界处小沙原的穿透现象, 确定了其下存在的古河道^[7]; R. Blom 等人用 Seasat SAR 对美国莫哈韦沙漠的分析, 发现了被冲积扇埋藏的岩墙^[8]。

鉴于成像雷达对大气和云雾的穿透能力, 它除对地球的遥感外, 也已成为探测星球地质的主要手段。1972 年发射的阿波罗 17 号登月飞船首次携带了进入太空的 SAR 系统, 用取得的 SAR 图像, 确定了 13 个火山口位置。其后金星成像雷达上天, 获得分辨率约 1km 的图像。1990 年起, 分辨率达 120m 的麦哲伦号成像雷达开始工作在金星轨道,

已发现大量陨石坑、火山和构造地质现象^[9]。

随着雷达遥感技术及其地质应用的深入发展,正孕育着一门以地质体的微波散射理论为基础,以雷达成像、数据处理及地质分析为核心的新的边缘学科——雷达地质学。90年代将成为以星载雷达为主体的雷达遥感的黄金时代。鉴于此,中国科学院资源环境科学局于1988年设立了“雷达图像分析及地质应用”预研性课题,以期通过研究,跟踪世界遥感技术前沿,促进我国雷达地质研究的进展。

本文围绕雷达地质这一核心内容,论述雷达图像处理分析及地质应用两个方面。

二、雷达图像处理与分析

1. 雷达图像获取

本研究中采集了航天、航空及L、X波段雷达数据,包括由哥伦比亚号航天飞机携带的成像雷达SIR-A,由挑战者号航天飞机携带的SIR-B,中国科学院电子学研究所研制的多极化多测绘通道合成孔径雷达(CAS/SAR)及中国国家遥感中心航空遥感一部拥有的地球资源雷达(ERR)。SIR-A于1981年11月成像,我国从东到西成像三个条带;SIR-B成像于1984年10月,南北向覆盖我国一个条带;我国自行研制的CAS/SAR为X波段,具有4种极化能力,于1989年11月获取内蒙古试验区HH极化图像;ERR同样工作在X波段,具有 $3 \times 3\text{m}$ 较高的空间分辨率,于1988年12月对新疆试验区成像。4个雷达系统的具体参数见表1。

表1 航天航空雷达参数

参 数	SIR-A	SIR-B	CAS/SAR	ERR
飞行高度(km)	260	352, 274, 225	7	10
波 长(cm)	23.5	23.5	3	3
极 化	HH	HH	HH, HV, VV, VH	HH
视 角	47°	15°—60°	19°	14°
幅照宽度(km)	50	20—50	35	18
距离分辨率(m)	40	14—46	10	3
方位分辨率(m)	40	20—30	10	3
数据记录方式	光学	数字	光学	光学

在研究过程中,还利用并分析了其它雷达图像,包括CAS/SAR的前身——我国第一代X波段单极化合成孔径雷达图像,美国佳年及摩托罗拉公司X波段雷达图像,麦哲伦号金星成像雷达图像。

2. 雷达图像处理

雷达波束的主动发射及侧视特点,使得其与可见光、红外传感器成像特征有本质不同,对雷达图像的几何校正成为该图像分析及应用的基础一步。雷达图像的主要几何特点是:①斜距显示所形成的图像出现近距离侧压缩及远距离侧拉长的几何畸变;②山峰等目标阻挡住发射电磁波而形成的雷达阴影;③由于雷达回波信号与时间相关而造成的雷达叠掩;④山坡顶底两端成像的时间间隔所形成的雷达透视收缩。为使这些成像几何

特点造成的几何畸变达到最小,需进行几何校正。用DTM和雷达成像参数产生几何模拟图像,再用多项式拟合方法对雷达图像进行初步校正,并与几何模拟图像配准,然后对雷达图像进行地形畸变校正,同时针对阴影、叠掩、透视收缩区分别进行灰度处理,实现了对雷达图像的几何校正^[10]。同时研究提出了一种新的SAR图像校正方法,即把通用的雷达图像多项式校正方法与模型方法结合起来,该方法兼有多项式及模型法的特点,具有精度高、运算量小的特点。用该方法对机载SAR图像进行校正,取得了满意的效果^[11]。

雷达发射的是相干波,因此造成了雷达图像斑点噪声的存在,这是雷达图像处理中必须解决的问题之一。为有效地识别内蒙古试验区SIR-A图像上的沙丘特征,将斑点噪声与沙丘的点状回波区分开,对数字化的 2439×4600 个像元的SIR-A图像进行了高通滤波处理。依此选择了 3×3 , 5×5 , 25×25 及 101×101 四个窗口,同时进行了分段滤波方法处理。由于在一些地物背景下雷达后向散射会发生强烈变化,像基岩、植被等一类地物,本身的高粗糙度、高介电常数及角反射器效应会有很强的回波,而平地、水面、干沙等一类目标,则回波较弱。两类地物的DN值相差较大,形成图像上的大反差,显然对解译是不利的。分段滤波的原理,是将数据的原始值与低通滤波值相除,起到一种“平滑”的效果,把相邻目标的高反差调整到适中。本试验中,分段滤波后的图像就反映了降低花岗岩的强散射与沙丘的弱回波造成的大反差效应。研究表明,这是处理雷达图像的一种有效方法。

对5种方法处理出的结果进行评价,用 5×5 高通滤波窗口及分段滤波图像质量是比较理想的。

为平滑斑点噪声,研究中提出了一种新的命名为“方向溶解算子”的自适应滤波器。该空域滤波器首先判别局部区域内斑点噪声的存在特征及有无边缘信息,然后对局部区域内的中心像元点进行方向溶解处理。实验结果表明,用这种算子处理的雷达图像,在平滑斑点噪声和保护边缘信息方面都有较好的效果^[12]。

雷达图像反映了地质体的微波散射特性,而陆地卫星TM图像给出了地质体可见光及红外波段信息。显然,将两者进行复合,可以增强地质信息。将内蒙古研究区的SIR-A, CAS/SAR及TM数据采用以下三种方法分别进行了复合试验:①直方图调节。对高亮度区雷达图像进行直方图调整,再与线性拉伸TM图像复合,这样既保留了地质构造信息,又提高了岩性分辨能力。②比值合成。进行SIR-A/TM4, TM5/TM4及TM7/TM5比值合成,突出了辉长岩体,并明显区分出混合花岗岩及黑云母花岗岩。TM7/SIR-A, TM4/SIR-A及TM1/SIR-A也突出了构造与岩性信息。③IHS变换。用雷达图像作为I,从TM7, 4, 1波段IHS变换中取出H成分, S为均值,进行IHS反变换,得到IHS变换图像,效果比比值合成方法更佳^[13]。

从图像上提取专题信息特征,不仅是其它遥感图像处理的目标之一,也是雷达图像处理需要解决的问题。但不同区域的地质条件异常复杂,实现这一点有相当的难度。本研究中,对地物目标的共性特征进行了分析与探讨,即把它们分别归结为点目标、线目标、面目标及硬目标。赋予其地质意义时,如断裂、线性体即为线目标,岩体、地层即为面目标。对这些归化的几何体进行信息提取,经试验,切实可行^[14]。

3. 图像机理分析

理论及实验结果表明, 雷达图像的密度变化取决于散射系数 σ° 的大小, 而 σ° 则为雷达系统参数波长、极化、俯角及表面粗糙度和地物复介电常数的函数。研究中结合具体图像及试验区进行了分析。

1) 介电常数与粗糙度

利用X波段微波网络仪, 对研究区内沙、土壤及植物样品进行了介电常数(ϵ)测量。测量不同含水量和干燥条件下的沙和土壤, 发现两条规律, 一是沙和土壤的 ϵ 随着含水量的增加而增大, 二是在含水量较少时(对土壤来讲不超过20%), 斜度相对小一些, 含水量增高, ϵ 增大的幅度也随之变陡。值得一提的是, 干沙、土壤的 ϵ 仅在2.0—5.0间徘徊, 而新鲜的麦苗、油菜、杨树枝的 ϵ 可分别达37.78, 45.46和19.21, 这就解释了为什么植被有较强的回波。当然植被的粗糙度也是对强回波的贡献之一。 ϵ 相差不太大的油菜与麦苗, 图像密度分别为0.10及1.09, 差别较大。其粗糙度测量结果, 油菜为19.4, 麦苗为7.9, 说明粗糙度起着比较重要的作用。

对岩石的测量结果表明, 各类岩石的 ϵ 值无太大幅度变化, 但含Fe、Mg元素丰富的岩石, ϵ 值要高些。如花岗岩的 ϵ 平均值为4.77, 片麻岩为5.22, 砂岩类为4.80, 而闪长岩为6.22。矿化岩石 ϵ 值范围在10.73—27.99之间, 显著高于围岩, 有较强的雷达回波。因而对确定内蒙古沙拉西别含金构造带起了重要的作用。

作为一种普遍规律, 从丘陵到山区, 对回波具有控制作用的因子是粗糙度、介电常数在大范围的岩性识别中很难成为主导因子。

2) 极化

对圣海伦火山区的研究及有关资料的综合分析表明, 粗糙度对极化的影响是明显的。像树林、粗糙岩石表面去极化作用较强, 而表面平坦的地质体为劣去极化体, 在交叉极化图像上, 这种地质体可以明显的暗灰度区别于背景地物, 达到识别特征地质体的作用。

3) 视向

为探讨波束发射方向对成像的影响, 在新疆伊德尔地区的飞行试验中, 我们进行了垂直视向的雷达飞行, 试验是用ERR雷达进行的。该区地层及构造呈WNW向展布, 设计的发射波束分别向北和向东两个方向, 对获取的两种图像进行数字化, 并进行中值滤波处理。在此基础上进行线性体解译, 并自动产生每 15° 区间的线性体总长度和频率玫瑰图。结果表明, 与雷达波束方向垂直或接近垂直的线性体得到增强, 而与雷达波束方向平行或接近平行的线性体受到压抑^[15]。这说明雷达波束发射方向对地质体成像的影响是重要的。

同样地, 在利用SIR-A, SIR-B对内蒙古洪古尔玉林地区沙丘的研究中亦反映出这一点。在该区, SIR-A飞行方向为 $N 80^\circ W$, 波束方向 $N 10^\circ E$; SIR-B飞行方向为 $N 20^\circ E$, 波束方向 $N 70^\circ W$, 而区内沙丘的落沙坡朝向为 $S 60^\circ E$, 其沙丘规模远远大于两个雷达系统的空间分辨率。在SIR-A图像上, 没有任何沙丘迹向显示, 而在波束呈 100° 相交的SIR-B图像上, 却显示清楚, 说明了雷达波束方向的重要性。

4) 俯角

俯角指雷达发射机与入射点的连线与在同一平面上通过发射机的水平线的夹角。近

年来常用视角 (Looking angle) 这个术语,指的是俯角的余角。俯角对雷达成像有很大影响。雷达图像上经常出现的雷达阴影、叠掩和透视收缩效应,其中适中的阴影是保证雷达图像质量所期望的,而对后两者则希望达到最小。而控制这一点的关键,则是雷达俯角的选择。基于此,本研究通过对全国地形数据的分析,并参考局部地质条件,设计了“用于地质探测的中国最佳雷达俯角选择图”,该图对雷达遥感飞行中的模式选择及传感器设计中对俯角的考虑均有一定实际意义。

三、地质应用

雷达图像地质应用的研究,是建立在对雷达图像分析基础上的,现分别从岩性、构造、矿产 3 个方面进行论述,同时分析典型地区的穿透现象。

1. 岩性识别

下面利用中国科学院获取的湖南、广东等地区的单极化 X 波段雷达图像来进行地质分析。湖南省陶岭地区的钟水两侧是雷达图像成功识别岩性的地区之一。在图像上解译出了 6 种岩石单元(图版 I-1)。在了解该区域岩性解译标志的基础上,可确定岩性及新老关系,其结果与 1:20 万地质图吻合程度相当高。隆起的山体是由含铁石英砂岩组成的泥盆系中统地层,纹理较细及灰度较暗的地层是二叠系石英砂岩、粉砂岩及含铁锰硅质岩。有意义的是泥盆系中统、上统及石炭系下统白云岩、白云质灰岩及灰岩等,这些在化学成分上相似的岩石,在雷达图像上可以较好地地区分¹⁾。

在广东-湖南交界的坪石-武水地区的雷达图像(图版 I-2)上,解译出了三种岩石单元[图 1(a)]。参考同一地区的地质图[图 1(b)],发现两者的岩性界限有很大差别。地质图中 K_{2nn} 表示为白垩系上统砾岩、砂砾岩,仅为单一时代地层,与雷达图像解译出的 3 种地层结论是矛盾的。我们分析,在图 1(a) 中三种地层分别为: I——白垩系上统, II——二叠系上统, III——石炭系下统,显然,地质图没能将它们显示出来。有趣的是不仅各类岩石的结构形态差别比较明显,其灰度变化也很截然, $III > II > I$ 。可以从两方面解释这种现象:一是飞行时正值雷雨

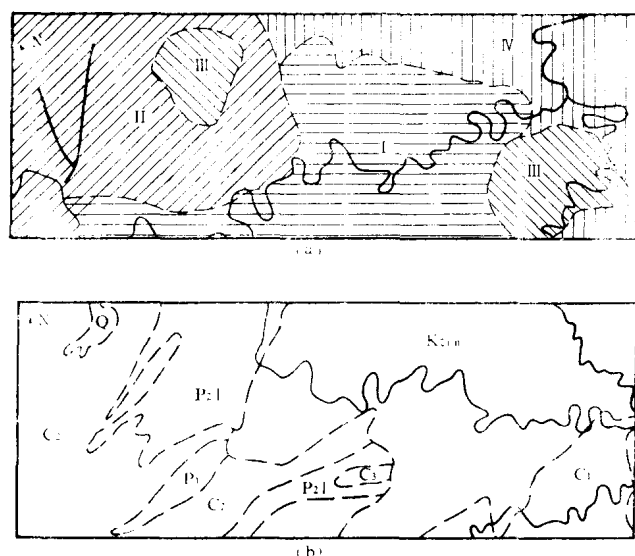


图 1 (a) 武水地区雷达图像岩性解译图
(b) 武水地区地质图

天气,砾石[图 1(a) 中 I 表面相对平滑且疏水性优于二叠系、石炭系地层,回波较低;

1) 郭华东,国产雷达图像的地质地貌学应用评价,1984 年。

二是石炭系地层上覆植被相对较多,粗糙度大,介电常数高。

在内蒙古、甘肃、新疆研究区,利用 SIR-A, CAS/SAR 和 ERR 雷达图像,较好地识别出了花岗岩体。本文集有关文章作了详细叙述。花岗岩体以特有的纹理特征区别于围岩。有意义的是,雷达图像可穿透植被,揭示其下的岩体,在海南岛南部的 SIR-A 图像上,很清楚地反映了这一现象。雷达图像成功地识别出新疆哈巴河及内蒙古洪古尔玉林花岗岩基中的中-基性岩脉,这些脉体宽不过 1—2m,高度数十厘米至 1m,根据雷达图像的分辨率条件,是难以识别的。但由于这些岩脉与地面形成的角反射器效应及相对于风化围岩表面的粗糙程度,使得其在雷达图像上得以显示。

2. 构造分析

对线性体的检测能力是 SAR 的固有优势之一。无论是机载、星载,还是不同波段的雷达图像,在线性地质的分析中都起到了很大的作用。在内蒙古巴音诺尔公地区,在 CAS/SAR 图像上解译出 300 余条线性体,远远大于地质图中所示的断裂的数目。特别是发现了巴音诺尔公大型走滑断裂,该断裂呈 ENE 向延伸,长 80km,野外调查已证实了它的存在。除地貌特征外,沿断裂分布着断层角砾岩、断裂蚀变花岗岩。岩石薄片鉴定表明,断层角砾岩主要由花岗质角砾组成,碳酸盐胶结,还发现了近水平擦痕。对走滑断裂的发现,在研究区内板块构造学方面有很大意义。在新疆恰奔和伊德尔地区,用 SAR 图像揭示了众多线性构造,比同一区域的 SPOT, HRV, Landsat MSS 和 TM 及航空彩色红外图像给出了丰富得多的构造信息。在甘肃试验区,雷达图像研究结果表明了著名的阿尔金山大断裂向 NE 延伸的趋势。

在新疆柯坪山地区的 SIR-A 图像(见封面图像)上,解译出了系列断裂构造。区内最大的断裂呈 NNW 走向,长度达 50km,主断裂两侧发育许多次级断裂,两侧地层发生显著扭曲、变形与位错,错距达 5km 以上。断层两盘牵引弯曲方向相反,是一左旋平移断层。该断裂切断了区内全部地层,对第四系亦有影响。该区于 1961 年发生过 6.8 级地震,是一个很新的活动构造。同时在该图像上解译出 6 种地质单元,分别为奥陶系、志留系泥盆系、二叠系和 3 种第四系单元。受粗糙度的控制, SIR-A 对第四纪冲积扇、洪积扇、盐湖相沉积有很强的分辨能力。

雷达图像可以识别褶皱构造。在湖南彬县渡头地区的机载雷达图像上解译出向斜构造。渡头向斜以其沉积岩层和亮灰度区别于两侧围岩,自轴部向两侧依次为硬、软、硬岩层。其表现出的对称性,我们推测是一褶皱构造,分析其左右侧

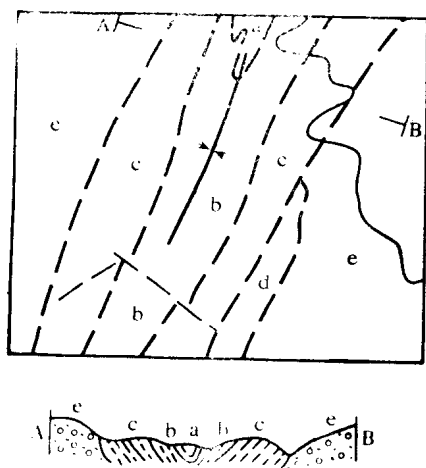


图 2 彬县渡头地区雷达图像构造解译图

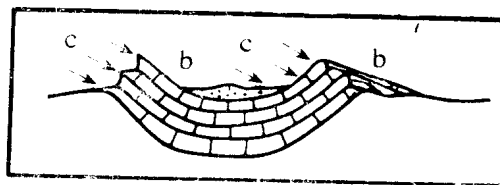


图 3 褶皱识别示意图

可知岩层向轴部方向倾斜,通过对区域新老岩层的了解,解译出了它们的新老关系,遂判定是一向斜。图2和图3分别为构造解译图及向斜构造倾向机理示意图。该构造呈一个向南部逐渐合围的倾伏向斜。这种分析已被地质图证实是一个以二叠纪地层为轴部的向斜构造。

3. 矿产调查

雷达图像对矿产调查的关键性贡献是识别控矿构造。

用SIR-A图像,在内蒙古洪古尔玉林地区直接发现了含金构造带^[16]。该带长约50 km,由震旦系砂岩、灰岩及石英闪长岩组成,沿构造带采样,金元素化学分析结果大多数大于1g/t,最高值为7.94g/t,金品位不高但比较稳定,属破碎带蚀变岩型金矿类型。发现该含金构造带的因素主要有两个:①呈线性展布的高亮度异常。这种异常一方面来之于构造蚀变带本身较大的粗糙度,另一方面是由蚀变岩石的高介电常数引起的。围岩的介电常数一般低于7,而矿化岩石的介电常数达20以上;②相关分析得出的结论。含金构造带本身为一断裂破碎带,沿大的花岗岩体的边缘分布,呈接触关系。由成矿理论可知,这是易于产出金属矿产的位置。

金矿分布与地质构造息息相关,许多构造蚀变带本身就是金矿床的载体。在新疆恰奔地区,用雷达图像发现了唯一的弧形构造带,这个弧形构造带也是含金构造蚀变带。在新疆布尔根地区和甘肃酒泉地区也发现了金矿蚀变带,说明了雷达图像揭示含金构造带的有效性。

4. 沙漠区雷达回波

为探讨雷达对沙漠的探测能力,分析了巴丹吉林沙漠、亚玛雷克沙漠、腾格里沙漠、塔里木盆地及双井子沙丘的SIR-A及SIR-B图像,以及美国西部俄勒冈海岸沙丘的K波段真实孔径雷达图像。

研究表明,无植被沙丘的回波来自朝向雷达波束的落沙坡,其回波强度随雷达波束与沙脊线夹角的增大而减小,落沙坡朝向垂直于雷达波束时有最强回波,背向雷达时无回波。二级沙丘有同样的散射机理^[17]。另一个结论是,对于复合型垅状沙丘,雷达强回波来自于垅状沙丘间谷地部分,腾格里沙漠南缘的SIR-A图像(图版II-1)清楚地显示了这种现象。塔克拉玛干沙漠中塔里木河东端的SIR-A图像具同样特征。这点与航空像片的灰度显示恰好相反。这是由于:①谷底湿度增大,有较高的介电常数;②往往发育有植被;③沙丘坡与谷底形成的角反射器效应诸因素而造成的。

对沙丘区的雷达图像解译是一个必须审慎的问题。由于松软的干沙对电磁波的吸收和衰减,沙丘特别是平坦的沙原无散射回波。内蒙古亚玛雷克沙漠的SIR-A图像(图版VII-1)说明了这种现象,条带状沙丘完全呈暗灰调。在美国西部俄勒冈海岸K波段雷达图像(图版III-1)上,平坦的沙地回波与邻近的湖泊回波无异。从同一地区的彩色红外图像中(图版III-2,近四方形白色部分),可以看出与湖泊完全不同的色调。

5. 穿透性分析

在内蒙古阿拉坦敖包地区,发现了SIR-A对薄层干沙的穿透现象。在SIR-A图像