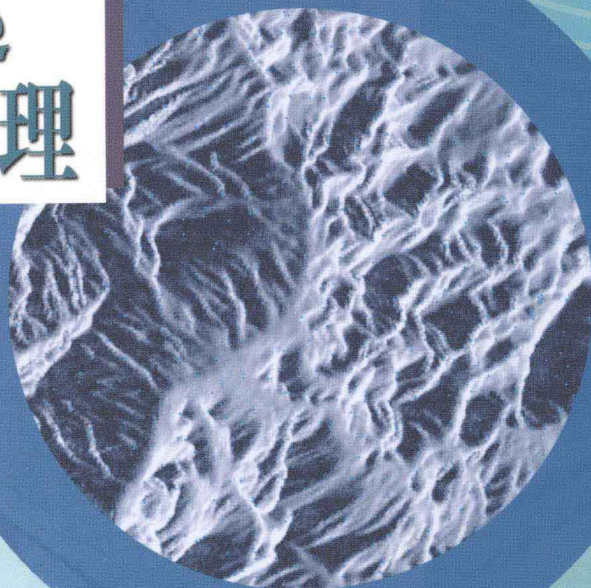


尤红建 付 琨 著

# 合成孔径雷达 图像精准处理



科学出版社

# 合成孔径雷达图像精准处理

尤红建 付 琨 著

科学出版社

北 京

## 内 容 简 介

本书系统地介绍了合成孔径雷达(synthetic aperture radar, SAR)图像精准处理的技术原理和实验结果。首先,简单讲述了SAR的基本原理、图像特点和发展状况;然后,以SAR图像精准处理为主线,重点阐述了SAR图像的几何精校正和正射校正处理、SAR图像配准处理、SAR图像的变化检测处理以及利用SAR图像进行高程、建筑物等专题信息提取。

本书是作者近年来在SAR图像精准处理领域的研究成果总结,内容具体翔实,适合于从事遥感、测绘、图像处理等领域的科学和工程技术人员参考使用,也可作为高等院校相关专业的教学和研究资料。

### 图书在版编目(CIP)数据

---

合成孔径雷达图像精准处理/尤红建,付琨著. —北京:科学出版社, 2011  
ISBN 978-7-03-031168-9

I. 合… II. ①尤…②付… III. 合成孔径雷达-图像处理 IV. TN958

中国版本图书馆CIP数据核字(2011)第097154号

---

责任编辑:余 丁 王 哲 / 责任校对:李 影

责任印制:赵 博 / 封面设计:耕者

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

\*

2011年6月第 一 版 开本: B5(720×1000)

2011年6月第一次印刷 印张: 16 3/4 插页: 2

印数: 1—2 500 字数: 324 000

定价: 68.00 元

(如有印装质量问题,我社负责调换)

## 前 言

合成孔径雷达(synthetic aperture radar, SAR)自 20 世纪 50 年代诞生以来,在军事和民用领域得到了较为广泛的应用,进入 21 世纪以来,SAR 的发展更是突飞猛进,2000 年美国 SRTM 成功获取了地面 80% 的地面高程测量数据,2006 年日本的 PALSAR、后来的意大利 COSMO-SkyMed 星座、德国的 TerraSAR 和 SAR-Lupe 星座、加拿大的 RadarSat-2 以及以色列的 TecSAR 等都相继发射入轨并顺利运行,使得目前可用的商业 SAR 卫星达到了 10 颗以上,而且聚焦模式下的分辨率普遍达到了 1m 左右,基本具备多极化甚至全极化能力。我国也相继发射了用于国土测绘、资源调查、农业估产的中国遥感卫星 1 号和 9 号,这为高分辨率 SAR 的应用提供了更为便利的图像获取方式。

机载 SAR 更是向着高分辨率、多波段、干涉等新技术方面快速进步,国家 863 计划“十五”期间支持了 0.5m 高分辨率 SAR 系统和机载干涉 SAR 系统的原理研究,“十一五”期间又支持了高效能航空 SAR 遥感应用系统,目标是面向“西部测图”、“国家自然灾害应急响应”等国家重大工程与应用需求,集成和开发以多波段干涉合成孔径雷达(interferometric SAR, InSAR)为核心、具有自主知识产权、达到世界先进水平的高效能航空 SAR 遥感集成应用系统,显著提升我国 SAR 遥感数据获取与处理能力,促进航空 SAR 遥感产业化发展。

无论是机载 SAR 系统还是星载 SAR 系统,它们获取的回波数据经过成像处理都能得到较高分辨率的 SAR 图像,由于 SAR 的成像机理和常规光学遥感成像机理有着本质的差异,因此 SAR 图像无论是从视觉感官上还是处理方法上都与光学图像处理有着明显的不同。尽管 SAR 图像和传统的光学图像在机理上有很大差别,但是目前 SAR 图像的表现和处理还主要借用常规图像处理方式。SAR 系统获取图像的最终的目的是应用,而应用中必然要对 SAR 图像进行处理,且一般要求 SAR 图像满足一定精度和准确度。为了能够使 SAR 图像更好地应用,必须要求处理的 SAR 图像在定位精度上达到较高的水平,这就涉及 SAR 图像的几何精校正和正射校正技术;SAR 图像具有全天候和全天时的优势,因此常常利用多源数据进行对比和分析,这就需要对多源 SAR 图像进行精确配准处理;而利用 SAR 进行地物动态监视和观测,需要对多时相 SAR 图像进行变化检测;为此本书把对 SAR 图像进行精确化、准确化的处理统称为精准处理,精准处理是 SAR 图像更好应用的关键。本书是作者对近年来 SAR 图像精准处理方面研究成果的一个阶段总结,同时也是对 SAR 图像精准处理技术的一个初步诠释。

本书的主要内容如下:第1章主要介绍了SAR的基本原理、SAR图像的主要特点以及近年来SAR系统的发展情况;第2章重点阐述了SAR图像的几何精校正问题,给出了各种SAR图像的校正模型和实现方法,包括常规的多项式模型、共线方程模型,也包括了距离-多普勒模型和有理函数模型,对正射校正方法也进行了深入阐述,此外也对机载InSAR的校正进行了阐述和实验;第3章围绕SAR图像的配准问题展开论述,对近年来兴起的基于点面特征结合的自动配准方法进行了介绍,并给出实验结果,在此基础上给出了多时相SAR图像的精配准技术;第4章对SAR图像的变化检测技术进行了讨论,既介绍了SAR变化检测的基本原理和常规方法,也结合SAR图像特点提出了基于分布差异的变化检测新方法以及考虑尺度特性的检测方法,进行了理论分析和算法实验;第5章对SAR图像提取数字高程模型(digital elevation model, DEM)进行了介绍和处理,并对高分辨率SAR提取建筑物三维信息等前沿信息提取进行了初步介绍。

全书的主要内容由尤红建、付琨负责撰写,詹芊芊参加了第4章部分内容的撰写,贺经纬参加了5.1节内容的撰写,傅兴玉参加了5.2节内容的撰写。

本书作者组成的研究团队近年来一直从事SAR图像的应用处理,先后得到了国家自然科学基金(编号:40871209)、国家863计划(编号:2006AA12Z149)和国防预研基金(编号:9140A21020408ZK1301)等项目的支持,而袁文龙、张翰墨、王山虎、郑瑾等研究生也先后参与了部分研究工作,为本书做出了贡献,在此表示感谢。国内外多家单位和公司为本书提供了实验数据,还有许多数据和内容来自网上和相关国内外专家讲课的资料,由于涉及面广,没有专门列出,在此也向他们表示深深的感谢。在本书的编写和研究过程中,作者还得到了中国科学院电子学研究所的吴一戎院士、丁赤飏研究员、洪文研究员、向茂生研究员、李道京研究员等领导和同志的指导、帮助和鼓励,在此向他们表示致敬和感谢。

SAR图像处理技术一直处在不断发展和进步之中,作者只是将近年来的研究成果进行了初步整理,限于作者的水平,书中不足之处在所难免,恳请读者不吝指正。

# 目 录

## 前言

第 1 章 SAR 图像原理和发展 .....	1
1.1 SAR 的基本原理和特点 .....	1
1.1.1 SAR 成像基本原理 .....	1
1.1.2 SAR 图像的特点 .....	2
1.1.3 SAR 应用的主要特性 .....	9
1.2 SAR 系统的发展现状 .....	13
1.2.1 星载 SAR 的发展概述 .....	13
1.2.2 日本 PALSAR .....	14
1.2.3 意大利 COSMO SAR 系统 .....	16
1.2.4 德国 TerraSAR-X 系统 .....	18
1.2.5 加拿大 RadarSat-2 .....	21
1.2.6 我国 SAR 的发展 .....	23
参考文献 .....	27
第 2 章 SAR 图像的几何精校正 .....	29
2.1 星载 SAR 图像的几何精校正 .....	34
2.1.1 星载 SAR 的对地定位模型 .....	35
2.1.2 星载 SAR 校正计算中病态方程的求解 .....	42
2.1.3 星载 SAR 的对地定位的精度 .....	46
2.2 星载 SAR 图像 GCP 自动匹配方法 .....	54
2.2.1 选取图像片,建立 GCP 库 .....	55
2.2.2 基于轨道参数的区域粗匹配 .....	57
2.2.3 基于归一化互相关的局部精匹配 .....	58
2.2.4 试验和结论 .....	60
2.3 星载 SAR 图像对地定位的严密共线方程模型 .....	62
2.3.1 等效焦距的严密计算 .....	63
2.3.2 斜距图像转化成严密中心投影图像的变化 .....	65
2.3.3 基于中心投影模型的 SAR 图像定位 .....	67
2.3.4 基于 GCP 的 SAR 图像对地定位精度试验和对比 .....	73
2.4 SAR 图像几何校正的实现策略 .....	74

2.4.1	分块校正算法	74
2.4.2	灰度重采样方法	77
2.5	星载 SAR 图像正射校正	82
2.5.1	地形起伏对 SAR 的影响	82
2.5.2	利用 GCP 和 DEM 的正射校正	83
2.5.3	组合图像模拟和精配准的星载 SAR 直接正射校正	85
2.6	基于通用成像模型的星载 SAR 图像校正	99
2.6.1	通用成像模型	99
2.6.2	RPC 模型参数求解	101
2.6.3	RPC 模型参数的直接求解	102
2.6.4	基于 GCP 点精化参数的 RPC 定位	102
2.7	机载高分辨率 SAR 图像几何校正	107
2.7.1	基于 GPS 的机载 SAR 直接对地定位原理	108
2.7.2	SAR 图像自动定位的实现流程	110
2.7.3	实际定位精度的检验	111
2.7.4	误差传播和定位精度分析	113
2.8	机载 InSAR 数据的直接几何校正处理	116
2.8.1	成像几何坐标直接转换地理坐标	117
2.8.2	SAR 侧视成像的采样不均处理	117
2.8.3	机载 InSAR 数据的处理	119
	参考文献	122
<b>第 3 章</b>	<b>SAR 图像配准处理</b>	<b>124</b>
3.1	基于 SIFT 算法的 SAR 图像自动配准	125
3.1.1	引言	125
3.1.2	SIFT 算法基本原理	128
3.1.3	基于 SIFT 特征向量的特征点自动匹配	135
3.1.4	基于 SIFT 算法的 SAR 图像自动配准	136
3.2	基于 SURF 算法的 SAR 图像自动配准	139
3.2.1	SURF 算法特征原理	140
3.2.2	SAR 图像提取 SURF 特征点和同名点匹配	146
3.2.3	SAR 图像 SURF 算法自动配准试验	148
3.3	多时相星载 SAR 图像精配准	153
3.3.1	基于 Harris 算法提取 SAR 图像的特征点	154
3.3.2	基于归一化相关系数匹配的同名特征点提取	156
3.3.3	基于 TIN 小面元的精配准	158

3.3.4 精配准试验和精度 .....	161
参考文献 .....	165
<b>第4章 SAR 图像的变化检测</b> .....	<b>168</b>
4.1 SAR 图像变化检测原理 .....	168
4.2 SAR 图像变化检测的基本方法 .....	172
4.2.1 图像差值法 .....	172
4.2.2 图像比值法 .....	173
4.2.3 相关系数法 .....	173
4.2.4 直方图比较法 .....	173
4.2.5 图像熵的方法 .....	174
4.2.6 变化区域的提取 .....	174
4.2.7 试验和结论 .....	175
4.3 基于分布差异的 SAR 变化检测 .....	181
4.3.1 SAR 图像的统计分布模型 .....	183
4.3.2 基于皮尔逊模型反演 SAR 分布模型 .....	183
4.3.3 基于高斯分布的差异指数计算 .....	184
4.3.4 基于瑞利分布的差异指数计算 .....	186
4.3.5 对数正态分布下的交叉熵差异指数计算 .....	187
4.3.6 韦布尔分布下的交叉熵差异指数 .....	189
4.4 基于 Edgeworth 逼近的 SAR 图像统计模型 .....	193
4.4.1 Chebyshev 多项式 .....	193
4.4.2 Edgeworth 逼近 .....	194
4.4.3 Edgeworth 逼近 SAR 图像分布的试验 .....	196
4.5 基于 Edgeworth 逼近的 SAR 变化检测 .....	201
4.5.1 基于交叉熵的差异计算 .....	201
4.5.2 基于积分图像的高效计算 .....	204
4.5.3 星载 SAR 变化检测试验 .....	205
4.6 变化检测的尺度效应 .....	206
4.6.1 多尺度 SAR 序列图像的构建 .....	208
4.6.2 不同尺度上变化差异指数的变化情况 .....	210
4.6.3 样本窗口尺度对变化检测的影响 .....	214
4.6.4 渐进聚焦的变化检测方法 .....	216
4.7 多尺度联合分割优化的 SAR 变化检测 .....	217
4.7.1 联合多尺度分割 .....	219
4.7.2 基于分割斑块的差异指数计算 .....	221



---

4.7.3 试验和结论 .....	222
4.8 变化区域的自动提取 .....	223
4.8.1 CFAR 基本原理 .....	224
4.8.2 差异分布模型 .....	225
4.8.3 基于差异分布模型提取变化区域的阈值 .....	226
参考文献 .....	228
<b>第 5 章 基于 SAR 图像的信息提取 .....</b>	<b>232</b>
5.1 基于 SAR 图像对提取 DEM .....	232
5.1.1 SAR 提取 DEM 的发展历史 .....	232
5.1.2 SAR 提取 DEM 的原理 .....	233
5.1.3 SAR 图像对同名点匹配 .....	235
5.1.4 同名点三维位置的解算 .....	238
5.1.5 基于 SAR 图像对提取 DEM 的试验 .....	240
5.2 基于高分辨率 SAR 提取建筑物 .....	240
5.2.1 基于 SAR/InSAR 的建筑物提取的发展 .....	242
5.2.2 建筑物的几何模型 .....	245
5.2.3 建筑物 SAR 成像几何结构分析 .....	246
5.2.4 基于 L 型叠掩结构提取建筑物 .....	248
参考文献 .....	255

彩图

# 第 1 章 SAR 图像原理和发展

## 1.1 SAR 的基本原理和特点

### 1.1.1 SAR 成像基本原理

SAR 是在雷达基础上发展起来的一种探测技术。雷达主要利用电磁波的散射进行目标探测和测距,在第二次世界大战期间发挥了重要作用。传统的雷达主要解决有无目标的问题,获得的信息主要是回波脉冲以及回波的强弱,并无图像。20 世纪 50 年代,人们采用多普勒锐化技术,实现了雷达回波方位向的高分辨率成像,后来逐渐发展成为 SAR。SAR 拓展了原始的雷达概念,使雷达具有了对目标和区域进行成像和识别的能力,为人们提供越来越多的信息。

SAR 为了得到二维图像,在距离向上采用线性调频信号技术,可以将离得很近的目标从其回波中分离,达到了高分辨率;在方位向上通过平台的运动构建了一个虚拟的大孔径天线,从而实现了另一维的高分辨率<sup>[1~5]</sup>。SAR 获取图像的几何原理如图 1.1 所示。

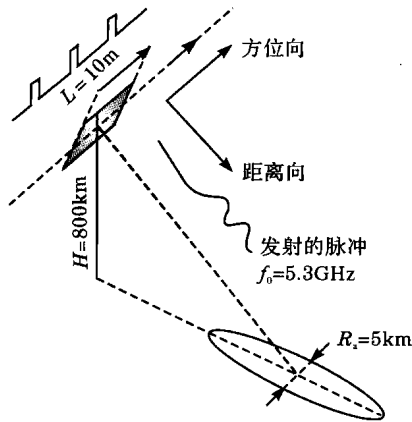


图 1.1 SAR 回波的空间几何关系

距离向分辨率的提高:通过对发射的脉冲信号进行线性调频,使得原来的距离向分辨率由  $\frac{C\tau}{2}$  提高到  $\frac{C}{2B}$ ,如图 1.2 所示。

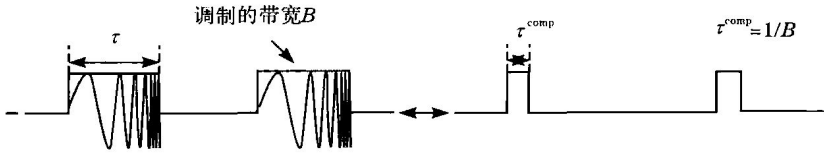


图 1.2 距离向分辨率的提高示意图

SAR 是通过飞行平台的向前运动实现合成孔径的雷达技术。地面目标被雷达发射的信号照射后会返回包含有地面目标信息反射特性的信号,如果雷达天线是固定不动的话,则只能接收到很小一部分从地面反射的信号(后向散射),但是,如果雷达天线是快速向前移动的话,则就有可能收集到从地面后向散射到各个方向的信号,如图 1.3 所示。利用天线的移动,可以将小孔径的雷达天线虚拟成一个大孔径的天线,从而获得类似大孔径天线的探测效果。在飞行过程中,每一个位置上发射一个信号,接收相应发射位置的回波信号并存储记录下来,存储时必须同时记录接收信号的幅度和相位。

方位向的分辨率  $\rho = \frac{\lambda R}{D}$ ,如果星载 SAR 距离 850km,工作频率 1.276GHz,像素分辨率 25m,则需要 8km 的天线孔径,8km 的孔径长度由小天线实现,如图 1.3 所示。

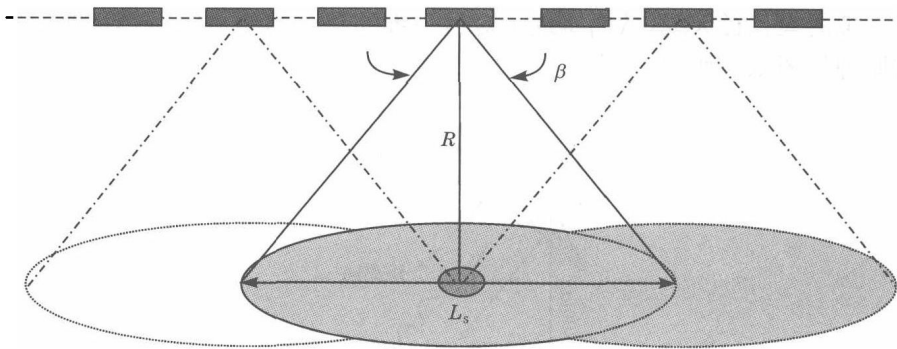


图 1.3 方位向分辨率的提高示意图

### 1.1.2 SAR 图像的特点

和传统的光学图像不同,SAR 图像是通过天线发射有规律的无线电信号,同时接收地面返回的无线电回波信号,通过成像处理的方法将回波信号转换成人眼可见图像。因此它比光学图像多一个处理步骤,需要将二维的信号回波数据通过一定的方法转换成地面二维的散射信息。成像处理也可以在平台飞行获取回波数据的同时进行,即 SAR 实时成像处理,由于 SAR 成像处理运算量巨大,因此实

时成像对硬件要求高。一般星载或机载获取的 SAR 回波数据都是事后在地面进行成像处理而生成图像的。

成像处理得到的 SAR 数据就是地面后向散射的二维分布,是按复数形式存放的,即每个地面分辨率单元的都由实部和虚部构成,从信号处理的角度来看,SAR 成像就是重建地面目标散射系数的二维反卷积过程,图 1.4 显示了 SAR 回波数据经过距离向压缩和方位向压缩而得到 SAR 图像的过程。雷达成像是从回波信号中提取目标的后向散射系数,所以图像反映的是被测地域的微波特性,而光学成像依据的是普通的反射。所以有可能出现两部分区域光学特性不同但后向散射系数相同的情况。因此,虽然在光学图像上两个区域的区别很明显,但在雷达图像上却不能区分。

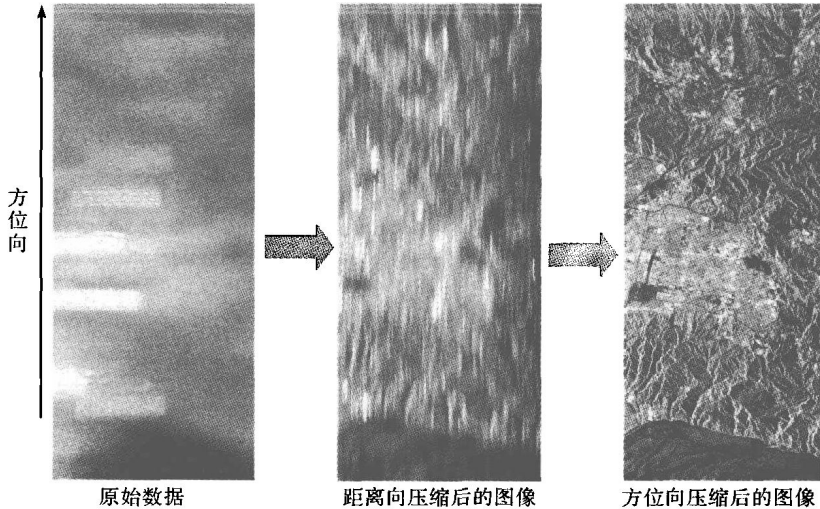


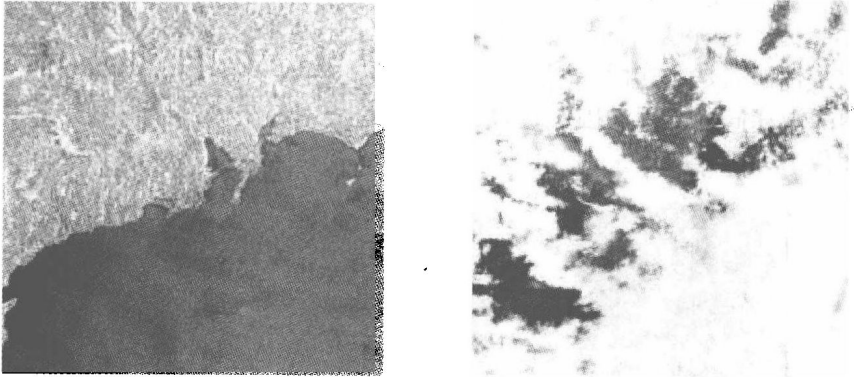
图 1.4 SAR 回波数据处理为图像示意图

和光学图像相比,SAR 图像具有的特点:

- ① 全天候作业能力,因为云雨对无线电的影响十分有限。
- ② 全天时,由于它是主动发射无线电波和太阳照射无关,无论白天黑夜均可工作。
- ③ 大气成分对 SAR 没有影响,适合多时相分析,如动态监视。
- ④ 对电介质特性特别敏感(如水分含量、生物量、冰雪等)。
- ⑤ 对地表粗糙度敏感,如海洋风速等。
- ⑥ 能精确测量距离(干涉)。
- ⑦ 对人工目标敏感。
- ⑧ 对目标结构敏感(可以用于极化)。

⑨ 具有一定的表面穿透性,波长长的 SAR 能够穿透植被和树叶。雷达图像的分辨率不受雷达的工作波长、传感器平台的飞行高度、雷达作用距离的影响,光学图像则不然。

图 1.5 显示了 ERS-1 SAR 图像能够穿透云层获取地表信息,而 Landsat TM 光学图像上却显示了大量的云层。



(a) ERS-1 SAR

(b) Landsat TM

图 1.5 云层对 SAR 图像和光学图像的影响

图 1.6 显示了 ERS 获取的直布罗陀海峡图像(源自欧空局发表的“ERS-1:在轨 500 天”),它为 C 波段入射角  $22^{\circ}$  VV(发射和接收都采用垂直极化)图像,可以看到由于大西洋和地中海之间的盐度差异和潮汐引起的内波(1~2km)。海上溢油检测也用了 SAR 图像的海面粗糙度信息。图 1.7 显示了印度尼西亚的沉积盆地的 RadarSat 8m SAR 图像,它对地形特别敏感。

图 1.8 显示了利用 ERS 的 SAR 多时相图像进行红绿蓝合成而得到的一幅伪彩色图像,红色分量对应 1997 年 10 月,绿色分量对应 1997 年 12 月,蓝色分量对应 1998 年 1 月。

SAR 图像的穿透性如图 1.9 和图 1.10 所示,SAR 能够穿透干燥季节的树林,而探测到地面的水域分布。

图 1.11 显示 SAR 图像对地表的穿透性,在光学图像上看不出水下的地物结构,而在 SAR 图像上却显示了水下的地物结构。

当然 SAR 也有自身的不足:

- ① 复杂的相互作用,使得理解特别困难,处理也很复杂。
- ② 斑点效应,可视化解译时十分困难。
- ③ 地形效应影响十分明显。
- ④ 地表粗糙度的影响较大。

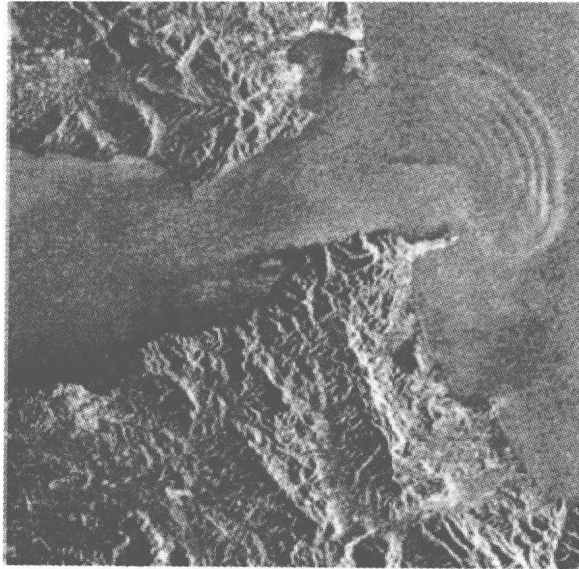


图 1.6 ERS 获取的直布罗陀海峡图像

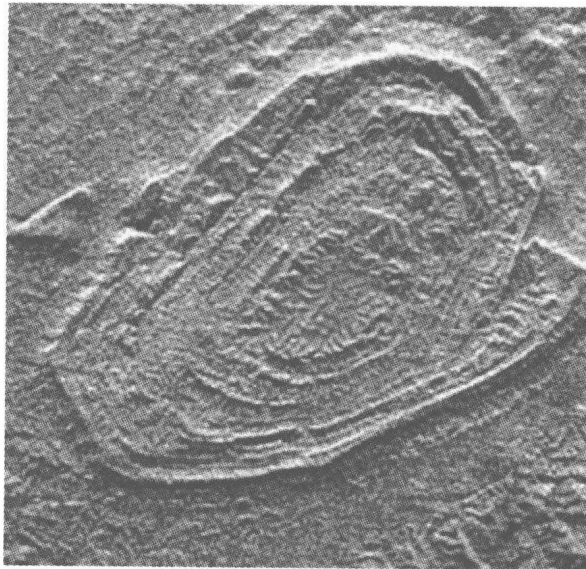


图 1.7 SAR 显示的印度尼西亚的沉积盆地图像

SAR 的侧视使得地面起伏造成的效应比光学图像要严重得多,会出现透视收缩(foreshortening)、阴影(shadow)、叠掩(layerover)等,如图 1.12 所示。SAR 波束以一定的俯角照射被测绘的地域,使得 SAR 图像上的山体前倾(朝向传感器的山

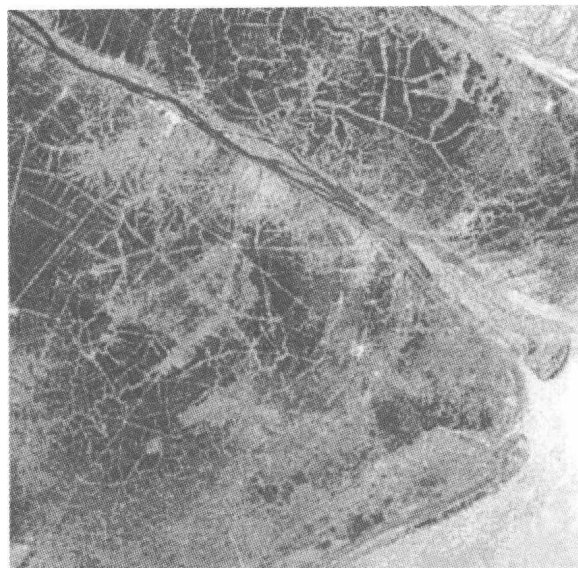


图 1.8 ERS 的多时相分析(见彩图)

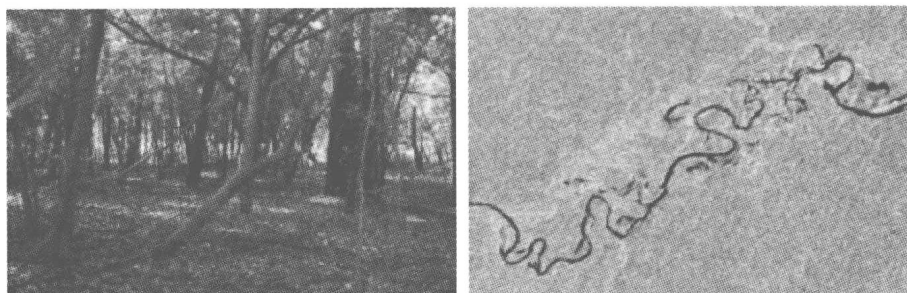


图 1.9 干燥季节的树林和 SAR 图像(见彩图)

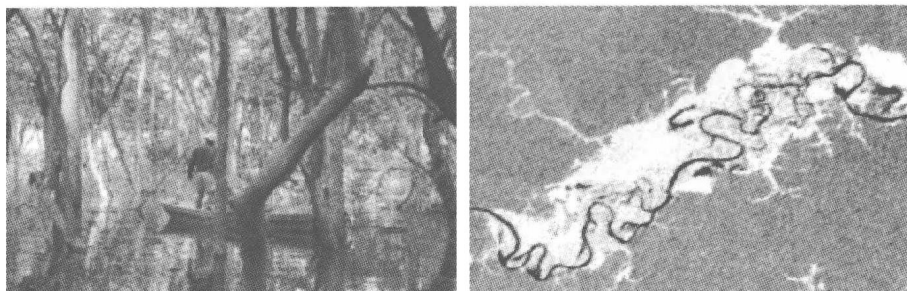


图 1.10 多雨季节的树林和 SAR 图像(见彩图)

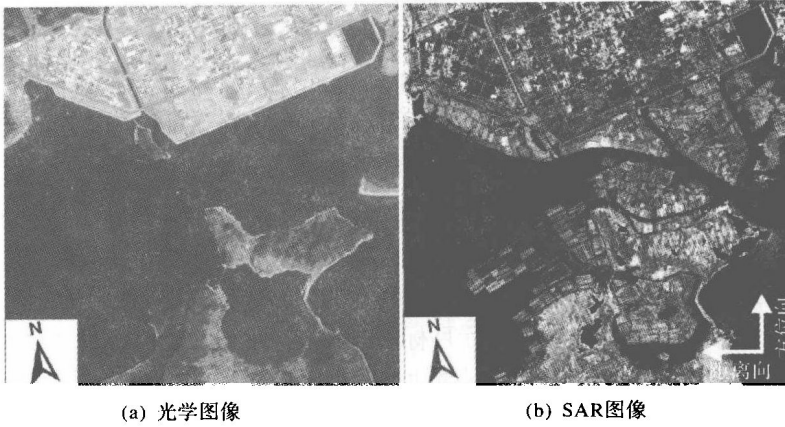


图 1.11 同一地区的光学图像和 SAR 图像(见彩图)

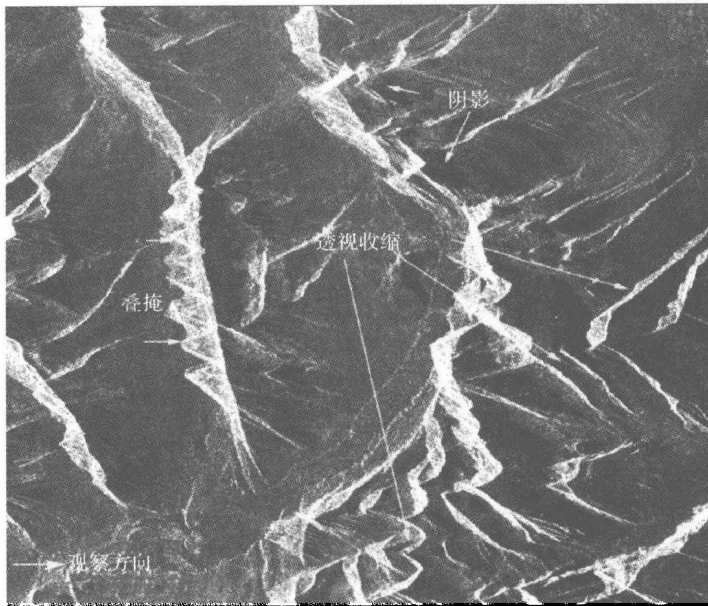


图 1.12 地形效应引起的几何变形

坡被压缩, 背向传感器的山坡被拉长)、顶底倒置(当侧视角小于地面坡度, 雷达波束到达斜坡顶部的时间比到达底部的时间短时, 和中心投影时的点位关系相比, 会出现顶部图像和底部图像颠倒的现象)、透视收缩(当侧视角小于地面坡度, SAR 波束照射到位于天线同一侧的斜面时, 波束到达顶部的斜距和到达底部的斜距差要小于实际地面距离, 造成在图像上的斜面长度被缩短了)等。这些特征虽



然对图像造成一定影响,但是在某些情况下,合理应用这些现象求得的坡度和目标高度却能作为解译的重要特征。

SAR 图像的相干斑机理<sup>[6~8]</sup>: SAR 是相干成像系统,不可避免地受到相干斑噪声的影响<sup>[9]</sup>。对于 SAR 系统,分辨单元总是比发射信号的波长大得多,每个分辨单元都可以看作由许多尺寸与波长相近的散射点组成,回波信号则是由这些在同一个分辨单元内的散射点发射的电磁波合成的,而且其幅度和相位与回波的方向有很大关系。在理想情况下,这些散射点的回波为球面波。在球面上幅度处处相等,由于这些散射单元出自同一分辨单元之内,SAR 无法将它们区分开来,如图 1.13 所示。当相干电磁波照射实际目标时,其散射回来的总回波并不完全由地物目标的散射系数决定,因为各散射点的回波是相干的,这些回波互相干涉,造成合成的电磁波矢量的振幅和相位都有一定的起伏,这就是相干斑噪声。斑点噪声表现为图像灰度的剧烈变化,在 SAR 图像的同一片均匀粗糙区域,SAR 图像像素的灰度值围绕某一均值随机起伏,有的灰度值很大,有的则很小,这样就造成了图像的亮度变化,即对均匀目标区域仍然表现出颗粒状特征和一个有较大标准差的统计分布。

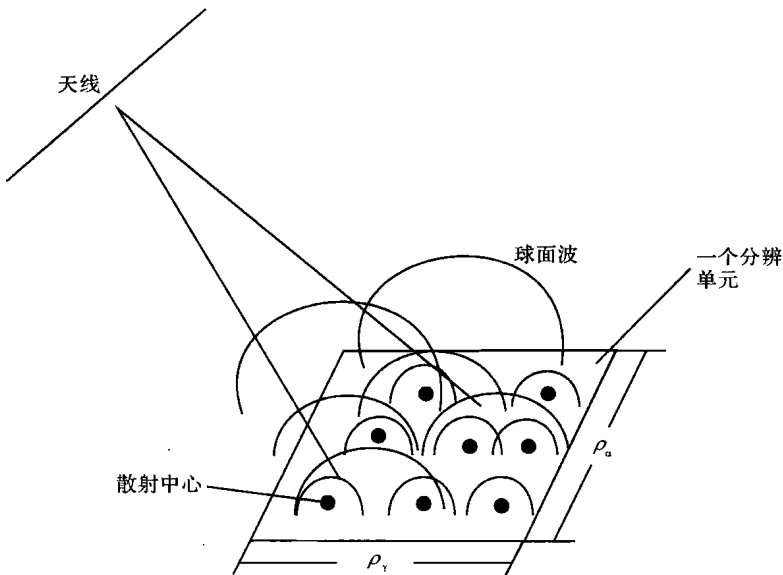


图 1.13 SAR 相干斑产生原理

斑点噪声的存在使得 SAR 图像不能正确反映地物目标的散射特性,隐藏了图像的精细结构,降低了对图像中目标的信息提取能力,使得 SAR 图像灰度分辨率与可解译性明显变差,图像的质量和图像的空间分辨率下降,严重影响到 SAR 图像的特征提取、图像匹配、目标识别等后续处理和应用,因而相干斑的抑制是