



测绘科技专著出版基金资助

CEHUI KEJI ZHUANZHU CHUBAN JIJIN ZIZHU

Applications of Contourlet-domain Hidden
Markov Model in SAR Image Processing

邓磊 著

SAR图像处理方法

——Contourlet域
隐马尔可夫模型的应用



测绘出版社

测绘科技专著出版基金资助

SAR 图像处理方法

——Contourlet 域隐马尔可夫模型的应用

Applications of Contourlet-domain Hidden Markov Model
in SAR Image Processing

邓 磊 著

测绘出版社

· 北京 ·

内 容 简 介

本书主要论述 Contourlet 域隐马尔可夫模型的基本理论、方法和遥感应用,系统地介绍了 Contourlet 变换、Contourlet 域隐马尔可夫模型的基本理论以及 Contourlet 域隐马尔可夫模型在遥感影像,尤其是合成孔径雷达(SAR)图像处理方面的应用。本书首先介绍合成孔径雷达图像的特点、Contourlet 变换的定义、图像的随机场模型、Contourlet 域隐马尔可夫随机场等基础理论,给出了实际工程应用中 Contourlet 域隐马尔可夫模型建立和处理的方法以及快速算法。然后,介绍基于 Contourlet 域隐马尔可夫模型的遥感影像处理的有关理论,提出了统一 SAR 图像滤波框架和基于通用传感器模型的多尺度遥感影像融合方法,可供理论研究和产品开发人员参考。

本书在注重理论研究的同时,面向工程技术应用,通俗易懂,便于自学,适合遥感、测绘、数字信号处理、数字图像处理领域的院校、研究所以及相关机构的教师、科研人员、研究生和工程技术人员学习参考。

图书在版编目(CIP)数据

SAR 图像处理方法:Contourlet 域隐马尔可夫模型的应用/邓磊著. —北京:测绘出版社,2009.2

ISBN 978-7-5030-1902-9

I. S… II. 邓… III. 遥感图像—数字图像处理 IV. TP751.1

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2009)第 006932 号

责任编辑 吴 芸

封面设计 李 伟

出版发行 **测绘出版社**

社 址 北京西城区复外三里河路 50 号

邮政编码 100045

电 话 010-68512386 68531609

网 址 www.sinomaps.com

印 刷 北京建筑工业印刷厂

经 销 新华书店

成品规格 169mm×239mm

印 张 7.75

字 数 150 千字

版 次 2009 年 2 月第 1 版

印 次 2009 年 2 月第 1 次印刷

印 数 0001-1000

定 价 20.00 元

书 号 ISBN 978-7-5030-1902-9

如有印装质量问题,请与我社发行部联系

前 言

合成孔径雷达(synthetic aperture radar, SAR)是一种工作在微波波段的主动式传感器,由于其不依赖于太阳光等光照条件,且具有一定的穿透能力,因此可以全天时、全天候地获取数据。同时,SAR的回波数据包含了丰富的信息,如地表粗糙度、土壤湿度等,与光学影像形成了良好的互补。20世纪90年代以来,SAR受到了世界各国的普遍青睐,并且已经在农业、测绘、海洋、森林、地质、水文、土地利用、海冰调查、军事等众多领域得到了极为广泛的应用。

随着遥感研究和应用的发展,很多非常新的数学理论和智能计算理论被应用到了遥感图像处理中,如小波和小波包、脊波、模糊数学、数学形态学、支持向量机等。Contourlet变换是近年来发展起来的一种变换域方法,代表了小波领域的最新发展方向。该变换具有多分辨率、局部定位、多方向性、近邻界采样和各向异性等性质,其基函数分布于多尺度、多方向上,少量系数即可有效地捕捉图像中的边缘轮廓,而边缘轮廓正是自然图像中的主要特征。隐马尔可夫模型(hidden Markov model, HMM)是一种比较成熟的模型,将之与Contourlet结合形成的Contourlet域隐马尔可夫模型(Contourlet-domain hidden Markov model, CHMM)已在图像去噪、影像分割等方面取得了一定的进展。但由于SAR图像一般采用“乘性”噪声模型进行描述,与一般图像采用的“加性”噪声模型有很大的不同,导致直接应用该模型遇到很多困难,致使这种模型目前在SAR图像处理方面鲜有应用。本书比较系统地研究了CHMM的性质和特点,在SAR图像滤波和图像融合等方面进行探索和尝试,试图拓展CHMM在SAR图像处理和应用领域的应用,希望对CHMM在更广阔的领域中进行应用起到抛砖引玉的作用。

全书共分6章,内容安排如下:

第1章简要介绍合成孔径雷达的历史、现状与发展趋势,分析雷达的特点、SAR图像的基本特征以及斑点噪声的统计模型和统计特性,是SAR图像处理和应用的基础。

第2章介绍马尔可夫随机场模型、隐马尔可夫模型的概念、原理、应用以及模型训练和参数的解算方法。

第3章从介绍Contourlet变换的基本思想出发,利用直方图等方法分析Contourlet系数之间的统计规律,是建立隐马尔可夫模型不可或缺的理论背景知识。

第4章通过分析隐马尔可夫模型的特点,结合Contourlet系数的高斯混合分布模型和隐马尔可夫模型,介绍如何建立Contourlet域隐马尔可夫模型,以及如

何利用 EM 算法进行模型训练和参数求解;为了提高 CHMM 训练的精度和速度,建立了一种基于粗分类结果的绑定方法;针对 Contourlet 域的特点,建立了一种基于局部上下文关系的 CHMM 上下文因子的选取和计算方法。

第 5 章在分析 SAR 图像斑点噪声特点的基础上,综合运用对数变换、均值校正、循环平移等处理技术和方法,建立 SAR 图像统一滤波框架。利用在第 4 章中建立的基于 Contourlet 域的几种隐马尔可夫模型,对模拟图像和真实 SAR 图像进行滤波处理,并通过目视效果和定量指标与几种常用的滤波算法进行比较和分析。

第 6 章研究如何利用 CHMM 进行遥感图像融合的问题。通过引入通用传感器模型,综合不同传感器图像中的成像数据,利用 CHMM 方法对多传感器图像的训练结果,获得对融合图像的最大后验概率估计值,从而完成图像的融合。随后利用该方法进行了可见光图像之间的融合和 SAR 与可见光图像之间的融合,对该方法和几种常用的方法进行了试验;最后,采用目视比较和定量分析对各种方法的特点进行分析。

本书的部分内容来源于作者主持和参加的中国博士后科学基金(20070420018、200801051)、国家自然科学基金(40801172、40671122)、霍英东教育基金会高等院校青年教师基金(111017)、北京市自然科学基金(4072016)等项目,书中部分阶段性成果已在国内外有关刊物发表。

本书能够顺利完成,与我的博士导师李京教授和陈云浩教授的大力支持、无私帮助和悉心指导是分不开的,在此表示由衷的敬意和感谢。在本书主要内容的研究过程中,还得到了北京师范大学宫阿都博士、蒋卫国博士和北京大学的杜世宏博士等人的帮助,在此致以诚挚的谢意。

本书编著过程中参考了国内外大量优秀书籍、研究论文和相关网站资料。虽然作者试图在参考文献中全部列出并在文中标明出处,但难免有疏漏之处。由于作者的能力和知识面有限,不当之处,恳请各位同行专家和读者提出宝贵意见。

目 录

第 1 章 合成孔径雷达简介	1
§ 1.1 SAR 发展简史	1
§ 1.2 SAR 图像的特点	6
§ 1.3 SAR 图像的相干斑	12
第 2 章 图像随机场模型	18
§ 2.1 马尔可夫随机场	18
§ 2.2 多尺度随机场模型	23
§ 2.3 隐马尔可夫模型	24
第 3 章 Contourlet 变换	29
§ 3.1 基本思想	29
§ 3.2 Contourlet 系数的统计特征	34
第 4 章 Contourlet 域隐马尔可夫模型	39
§ 4.1 Contourlet 域隐马尔可夫树模型	39
§ 4.2 基于局部上下文关系的 CHMM	47
第 5 章 基于 CHMM 的 SAR 图像去噪	51
§ 5.1 斑点噪声滤波器研究进展	51
§ 5.2 SAR 图像统一滤波框架与流程	59
§ 5.3 滤波算法	62
§ 5.4 试验与结果分析	63
第 6 章 基于通用传感器模型和 CHMM 的多源遥感图像融合	85
§ 6.1 图像融合概述	85
§ 6.2 通用传感器模型	95
§ 6.3 基于 USM 与 CHMM 多尺度融合算法	96
§ 6.4 试验与结果分析	99
参考文献	108
后 记	115

Contents

Chapter 1 Introduction to Synthetic Aperture Radar	1
§ 1.1 Brief History of SAR Development	1
§ 1.2 Characteristics of SAR Images	6
§ 1.3 Speckle in SAR Images	12
Chapter 2 Random Field Model on Images	18
§ 2.1 Markov Random Field	18
§ 2.2 Multi-scale Random Field Model	23
§ 2.3 Hidden Markov Model	24
Chapter 3 Contourlet Transform	29
§ 3.1 Basic Theory	29
§ 3.2 Statistical Characteristics of Contourlet Coefficients	34
Chapter 4 CHMM	39
§ 4.1 CHMT Model	39
§ 4.2 Local-context-based CHMM	47
Chapter 5 De-speckling Based on CHMM	51
§ 5.1 Speckle Filter Research Progress	51
§ 5.2 Unified Filter Framework and Process of SAR Images	59
§ 5.3 Filter Algorithm	62
§ 5.4 Results and Analysis	63
Chapter 6 Fusion of Multi-source RS Images Using USM and CHMM	85
§ 6.1 Images Fusion Summary	85
§ 6.2 Universal Sensor Model	95
§ 6.3 Multi-scale Fusion Algorithm Based on USM and CHMM	96
§ 6.4 Results and Analysis	99
References	108
Postscript	115

第 1 章 合成孔径雷达简介

本章首先回顾合成孔径雷达(synthetic aperture radar, SAR)发展的历史,然后简要介绍 SAR 的基础知识并阐述 SAR 图像的特点,最后总结相干斑(speckle)的产生机理及其统计模型和特性。

§ 1.1 SAR 发展简史

1.1.1 历史与现状

雷达应用于地球科学始于 20 世纪 60 年代。自 1967 年美国第一次用双频道微波辐射计测量金星表面温度以来,微波传感器开始用于空间遥感。真实孔径雷达(real aperture radar, RAR)的分辨率很低。1951 年 6 月,固特异航空公司(Goodyear Aircraft)的 Wiley 提出利用多普勒频率分析的方法改善雷达的角分辨率(Wiley, 1985)。与此同时,伊利诺伊大学控制系统实验室的 Sherwin(1962)也证实了这一结论。1957 年 8 月 23 日,密歇根大学与美国军方合作研究的 SAR 实验系统成功地获得了第一幅 SAR 图像,宣告了 SAR 技术由理论走向实践的成功(邓湘金 等, 2000)。

SAR 从其载体上主要分为机载和星载。绝大多数机载 SAR 是军事系统,但也有一部分为民用或科学应用提供数据,并且为星载 SAR 的研究提供试验数据。如美国休斯飞机公司为“环球鹰”高空长航无人侦察机研制的“海萨”合成孔径雷达,其条带模式分辨率为 6 m,聚束模式分辨率达 1.8 m。美国桑迪亚国家实验室(Sandia)为美国通用原子航空系统公司(General Atomics Aeronautical System)制造的 I-Gnat 无人侦察机研制的 Lynx 合成孔径雷达,工作在 Ku 波段,其分辨率达 0.1 m。喷气推进实验室(JPL)安装在 DC-8 飞机上的 AirSAR 系统有多种天线,在 P、L 和 C 波段上可同时获取数据。AirSAR 可探测多个轨迹,特别是用在极化和干涉测量中。加拿大遥感中心拥有的 C 和 X 波段 SAR 系统,其 C 波段具有多种模式(天底模式、窄观测带模式和宽观测带模式),该系统为精确研究 Radarsat-1 的指标参数提供了保证。我国中科院电子所于 1976 年开始 SAR 的研制,并于 80 年代初获得了机载 SAR 图像,其分辨率可达米级。此外,航空航天部 607 所、电子科技集团 38 所、电子科技集团 14 所分别研制了机载 SAR 系统,方位向分辨率可达 1 m,距离向分辨率为 3 m。

星载 SAR 具有更宽的成像视场。星载 SAR 起源于 20 世纪 70 年代末。1978 年由美国国家航空航天局 (National Aeronautics and Space Administration, NASA) 发射的海洋卫星 (Sea Satellite, SeaSAT) 标志着 SAR 进入了太空观测地球的新时代, 是星载 SAR 从实验室研究向应用的关键性转变。1988 年 12 月 2 日世界上第一颗高分辨率雷达成像卫星——长曲棍球卫星 (Lacrosse-1) 被航天飞机送入轨道, 其分辨率高达 1 m, 侦察幅宽 700~1000 m。此后, NASA 又分别于 1991 年 3 月 8 日和 1997 年 10 月 24 日发射了 Lacrosse-2 和 Lacrosse-3 (又名 Indigo)。苏联第一颗 SAR 卫星于 1983 年 6 月发射, 用于金星探测。1984 年 1 月 17 日又发射了第二颗用于金星探测的 SAR 卫星——Venus-16, 然后又分别于 1987 年 7 月和 1990 年发射了钻石 (系列) 卫星。由苏联和东欧国家合作的用于“自然”计划的 SAR“横墙-I”, 已在“和平号”轨道上搭载, 并且其“横墙-II”传感器也已载于 1992 年发射的“资源-F”卫星上。1991 年欧洲空间局 (European Space Agency, ESA) 发射了第一颗地球资源卫星 ERS-1, 其 SAR 传感器工作于 C 波段, 观测带宽 100 km, 分辨率约为 25 m。紧接着 ESA 又于 1995 年发送了 ERS-1 的克隆——ERS-2, 与 ERS-1 组成了串行模式, 可以使得这两颗卫星在一天的时间间隔内飞越地球上的同一点, 为 INSAR 的研究和应用提供了大量的数据。ESA 于 2002 年 3 月发射的 ENVISAT 卫星, 除载有 4 种 ERS-1/2 所载设备的改进型外, 所载最大设备是先进合成孔径雷达 (advanced synthetic aperture radar, ASAR), 具有多观测模式和多极化特性, 观测带宽可从 56 km 到 400 km。加拿大于 1995 年 11 月发射的 Radarsat-1 卫星具有 5 种成像模式, 分辨率从 10 m 到 100 m 可变, 观测带宽 500 km, 全球覆盖一次不超过 5 天, 并具有多种入射角, 可针对不同要求采用不同的成像模式。2007 年 12 月, Radarsat-1 的后续星 Radarsat-2 发射成功。该卫星除继承了 Radarsat-1 的拍摄能力和成像模式外, 还增加了 3 m 分辨率超精细模式和 8 m 全极化模式, 并且可以根据指令在左视和右视之间切换, 由此不仅缩短了重访周期, 还增加了立体成像的能力。此外, Radarsat-2 可以提供 11 种波束模式及大容量的固态记录仪等, 使其运行更加灵活和便捷。日本地球观测卫星 (advanced Land observing satellite, ALOS) 搭载了相控阵型 L 波段合成孔径雷达 (PALSAR), 该传感器具有高分辨率、扫描式合成孔径雷达、极化三种观测模式, 使之能获取比普通 SAR 更宽的地面幅宽。意大利航天局和意大利国防部共同研发的 COSMO-SkyMed-1 和 COSMO-SkyMed-2 分别于 2007 年 6 月和 12 月发射成功, COSMO-SkyMed 系列雷达卫星的最高分辨率为 1 m, 扫描带宽为 10 km, 具有雷达干涉测量能力。德国于 2007 年 6 月发射了 TerraSAR-X 雷达卫星, 它携带高频 X 波段 SAR 传感器, 可以不同模式和极化方式进行工作, 最高分辨率也可达 1 m。

除了上述各种大型的星载 SAR 系统, 目前各国正在发展小型 SAR 卫星。如 1991 年, 美国密歇根大学采用了重 340 kg, L 波段具有“猝发”工作模式的 Medsat

SAR 卫星用于疟疾的早期报警和控制。我国目前正在建设的减灾小卫星星座中,也对 SAR 给予了极大的重视。在“十五”期间,发射了 2 颗光学小卫星和 1 颗合成孔径雷达卫星;而在“十一五”期间,将发射 4 颗光学小卫星和 4 颗合成孔径雷达卫星。表 1-1 列出了几种常见的 SAR 遥感卫星及其主要参数。

表 1-1 几种常见的 SAR 卫星及其主要参数

卫星	波段	传感器	模式	极化方式	分辨率 (m)	成像带宽 (km)
ALOS	L	PALSAR	精细	单极化(HH/VV)	7~44	40~70
		PALSAR	精细	双极化(HH&HV/VH&VV)	14~88	40~70
		PALSAR	扫描	单极化(HH/VV)	100	250~350
		PALSAR	极化	四极化(HH&HV&VH&VV)	24~89	20~65
ENVISAT	C	ASAR	影像	单极化(HH/VV)	30	<100
		ASAR	宽幅扫描	单极化(HH/VV)	150	约 400
		ASAR	全球监视	单极化(HH/VV)	1000	约 400
TerraSAR	X	SAR	聚束	单极化(HH/VV)、 双极化(HH&VV)	1	10
		SAR	条带	单极化(HH/VV)、 双极化(HH&VV/ HH&HV/VH&VV)、 四极化(HH&HV&VH&VV)	3	30
		SAR	扫描	单极化(HH/VV)	16	100
Radarsat-1	C	SAR	精细	单极化(HH)	8	50
		SAR	标准		30	100
		SAR	高入射角		25	75
		SAR	低入射角		35	170
		SAR	窄幅扫描		50	300
		SAR	宽幅扫描		100	500
Radarsat-2	C	SAR	超精细	单极化(HH/HV/VH/VV)	3	20
		SAR	多视精细		8	50
		SAR	精细	单极化(HH/VV/HV/VH)、 双极化(HH&HV/VV&VH)	8	50
		SAR	标准		25	100
		SAR	宽幅扫描		25	150
		SAR	高入射角	单极化(HH)	18	75
		SAR	低入射角		25	170
		SAR	四极化精细	四极化(HH&VV&HV&VH)	8	25
		SAR	四极化标准		8	25
		SAR	窄幅扫描	单极化(HH/VV/HV/VH)、	50	75
		SAR	宽幅扫描	双极化(HH&HV/VV&VH)	100	150

注:& 表示逻辑与,/表示逻辑或。

1.1.2 SAR 特点及应用

作为微波遥感的代表,SAR 自其诞生之日起就受到了普遍关注,这是因为与可见光和红外遥感相比,它具有很多优越特性,具体表现在以下几个方面:

(1)SAR 是主动式遥感,因此可以不受时间限制,使雷达图像具有更好的昼夜和季节的稳定性,而可见光遥感则依赖于发光源(通常为太阳)。虽然红外遥感也可以在夜间获取影像,但是它不能在严酷恶劣的气候下获取清晰的图像。

(2)SAR 是侧视成像,因而可以不直接飞越某一地区就能对该地区进行观测。同时,由于 SAR 的分辨率与距离无关,它不会随着距离的增加而降低,故 SAR 比一般红外和可见光传感器具备更远距离的工作能力。

(3)SAR 的相干成像特性,即以幅度和相位的形式收集信号,可以用来进行孔径的合成,从而可以获得非常高的分辨率;另外,SAR 还可以用于干涉测量,以及非常精确的高度测量。

(4)云雾雨雪等气候现象,对微波的传播几乎没有影响,成像的实施不受气候条件的限制,具有全天候能力。

(5)微波具有一定的穿透能力,能够穿透稀疏的树叶以及识别埋藏在干燥地区下的微弱结构。

(6)微波与可见光和红外属于不同的电磁波段,得出的信息各不相同,可与其他遥感信息相互补充。光学图像对目标的物理和化学属性(发射率、反照率、颜色)比较敏感,而雷达波通常会被极化,介质产生的后向散射波携带着去极化程度这种精细的信息,使得雷达图像对目标的宏观几何属性(朝向、多次反射)、微观几何属性(粗糙度、表面效应)以及“自然属性”(如金属目标)和状态(如土壤的温度、湿度、植被的干燥度等)都极为敏感,这些在光学图像中通常都是不可感知的。

由于上述的这些特点,使得 SAR 有着极其广阔的应用前景,目前已在农业、测绘、海洋、森林、地质、水文、土地利用、海冰调查、军事等众多方面展开全面的应用(舒宁,2000)。

当然,SAR 也有很多不足之处。最突出的问题是雷达影像难以理解。雷达影像基于距离投影成像,与常见的可见光影像的成像方式不同,因此人们必须经过训练才能准确辨认雷达图像所传达的信息。虽然现在有人开始否定这种说法,认为现在的 SAR 图像已经非常完美,与普通照片的相像程度已经达到 85%,但是多数专家认为 SAR 刚开始由抽象图像到直观图像的转变。另一个不足之处是 SAR 对平台轨道的精度要求高,对雷达设备和技术要求的门槛也很高,导致 SAR 的研制和应用的费用很高。回顾 SAR 发展的历史,其寿命周期费用一直比可见光和红外系统高。但现在这种情况已经开始改变,有专家认为目前 SAR 的寿命周期费用已经下降到与红外及较复杂的可见光系统相当的程度(李卫斌,2004)。

1.1.3 SAR 发展趋势

由于合成孔径雷达所具备的特点,在某些情况下能起到其他对地观测卫星起不到的作用。世界各国已经认识到这一点,近十几年来,各国投入了大量的人力和物力,使 SAR 技术得到迅猛发展。

1. 高分辨率

理论上,SAR 的图像分辨率只取决于雷达方位向天线的长度和距离向信号频带的宽度,与搭载平台的高度无关。实际上,SAR 图像的分辨率却要受到发射功率的限制和搭载平台运动及姿态的影响。据报道,美国星载 SAR 的条带式雷达图像的分辨率可达 1 m,聚束式雷达图像的分辨率可达 0.3 m;而其机载的条带式雷达图像的分辨率可达 0.3 m,聚束式雷达图像的分辨率已达 0.1 m。

2. 多波段

当采用不同的雷达工作波段时,同一目标物在雷达图像上反映的特征是不同的。根据不同波段的特点,对于不同的应用应选择合适的波段。如 C 波段比 L 波段更适合于农作物的分类识别和估产,而 L 波段比 C 波段更适合于洪水监测、地质结构勘察等(魏钟铨,2001)。另外,对于很多应用来说,使用单波段的雷达图像,无法得到满意的效果,往往需要融合不同波段的雷达图像。因此,发展多波段的 SAR 是必要的。

3. 多极化

SAR 极化指的是发射和接收电磁波时电场强度的方向,主要有 HH、HV、VH 和 VV4 种(H 表示水平极化,V 表示垂直极化。如 HV 代表发射采用水平极化,接收采用垂直极化,依此类推)。当采用相同波段的雷达时,如果极化方式不同,目标对电磁波的响应也不同。利用不同的极化,可以提高目标的发现和识别率。

4. 多工作模式

SAR 传感器的工作模式有条带式(stripmap)、扫描式(scan)、聚束式(spotlight)、干涉式(INSAR)、多波束等,每种模式有其不同的特点。扫描式是标准的观测工作模式;聚束式可以获得较高的空间分辨率;干涉式可以得到高程信息,对于获取高精度 DEM 有重要的价值;多波束工作模式一般采用宽波束发射,多波束、多通道接收的方式,可以降低 SAR 脉冲重复频率,获得足够宽的条带式观测带宽度,同时获得较高的空间分辨率。

5. 短观测周期

SAR 图像在灾害监测、环境监测以及军事应用等领域有不可替代的作用,同时这些应用对 SAR 卫星的重复观测周期也提出了较高的要求。例如,在对洪水进行监测时,一般要求 SAR 卫星能够每天对重点地区观测 2~4 次,但现有卫星在数量上和观测宽度上,距完全满足类似的需求还有很大的差距。目前正在研制和发

展卫星组网、双侧视、大视角工作模式等,对于缩短观测周期具有重要的现实意义。

21 世纪,合成孔径雷达遥感技术将朝着多平台、高分辨率、多波段、多极化、多工作模式和短观测中期等方向迅速发展。

§ 1.2 SAR 图像的特点

SAR 图像上最显著、最直观的特点是斑点噪声,有关斑点噪声的内容将在 § 1.3 详细论述。本节主要讨论 SAR 图像的几何特征。SAR 图像上表现的地物的空间位置实质上是雷达天线至地物目标之间的空间距离,其构像几何属于斜距投影,其性质与光学影像所遵循的中心投影有很大不同。

(1)二者成像过程不在同一个平面内。SAR 在距离向和方位向构成的平面内成像,而光学传感器一般垂直照射地面,在水平面上成像。

(2)SAR 图像的比例尺在整个测绘带内以斜距计是精确相同的,所代表地块的比例尺是近似相同的,在知道雷达的各种参数(如高度、入射角等)后,经过插值等处理可以容易地得到精确相同的比例尺表示。由于光在成像透镜光轴周围的折射率不同,光学图像将出现畸变,远离航迹的地方将被压缩。

(3)在分辨率方面,SAR 图像分辨率与 SAR 的飞行高度和作用距离无关,而光学图像的分辨率则随着作用距离的加大而降低。

(4)SAR 图像的另一类特征是它反映的是地物目标微波后向散射特性。有许多因素可以影响 SAR 雷达回波的强弱,如工作波长、电磁波入射角、入射波的极化方向、地表粗糙程度、地表目标的几何形状和走向、地表的复介电常数等。如果被照射区域很光滑,如海平面、高速路面等,则入射电波被镜面反射,反射波的能量集中在一个很小的角度范围内。如果地表是粗糙表面,则将产生向各个方向的漫反射。实验表明,表面粗糙程度不同,可使得回波强度变化在 40dB 以上。粗糙表面的回波强,光滑表面的回波弱;水面、平坦公路和机场的回波最弱。另外,SAR 对强点目标成像的时候,其旁瓣电平也能在图像上显现出来,并沿着方位向和距离向呈十字形分布,这在光学图像上是不会出现的。

(5)SAR 图像比在白天拍摄的光学图像有更多的零值区和饱和区。SAR 图像的纹理一般也比光学图像多,SAR 的侧视工作方式带给图像的显著优点是图像轮廓比较清晰,因而图像有较好的对比度,并能呈现较多的细节。

(6)SAR 图像能够比光学图像更好地反映结构信息,而且具有全天时、全天候、穿透性等优点,较光学图像具有更大的侦察范围,可以发现不易被光学传感器发现的目标。

1.2.1 空间分辨率

空间分辨率是指雷达图像上可区分的两个地物目标的最小距离。SAR 的空间分辨率分为距离(range)分辨率和方位(azimuth)分辨率。距离分辨率与航向垂直,方位分辨率与航向平行。

1. 距离分辨率

距离分辨率可用下式表示

$$R_r = \frac{\tau c}{2 \cos \theta} \quad (1-1)$$

式中, τ 为脉冲长度, c 为电磁波速度, θ 为雷达天线俯角。从式(1-1)可以看出,距离分辨率只与俯角和脉冲长度有关,而与目标到雷达传感器的距离无关,即与飞行平台的高度无关。脉冲长度与传感器的设计和性能有关。在脉冲长度一定的情况下,距离分辨率与俯角有很大的关系:侧视时距离分辨率好,近似垂直时分辨率反而很差,这也正是雷达成像必须侧视的原因。

2. 方位分辨率

方位分辨率表示如下

$$R_a = \frac{d}{2} \quad (1-2)$$

式中, d 代表雷达天线的长度。可见, SAR 的方位分辨率近似为天线长度的一半,与 SAR 的工作波段无关,与目标到飞行平台之间的距离也无关。

1.2.2 斜距与地距

雷达图像一般可采用两种成像显示方式,斜距显示方式和地距显示方式。在斜距显示方式下,地物目标的位置由该目标到雷达的距离决定,地面上两个目标之间的距离是这两个目标相应的斜距差在图像上的表示。而地距显示方式表示的是地物目标之间的地面距离,各地物目标之间的距离与其对应的地面距离是成比例的。

理论上来说,斜距图像与地距图像是可以相互转化的,如图 1-1 中, A、B 和 C 代表地面上长度相等的目标。如果用 R_g 表示地距, R_s 表示斜距, H 表示飞行高度,则斜距和地距之间的关系为

$$R_g = \sqrt{R_s^2 - H^2} \quad (1-3)$$

因此,只要知道了飞行高度或者俯角,就可以将斜距图像转换为地距图像。但实际上,由于地形的影响,这种几何关系仅在平坦地区保持得比较好,在地形起伏较大的山区和丘陵地区,将产生叠掩等现象,很难实现精确的转换。对于雷达摄影测量来讲,斜距图像是比较理想的产品,这是因为斜距图像保持了雷达系统成像的

几何关系,为雷达图像的精密几何校正提供了良好的基础。

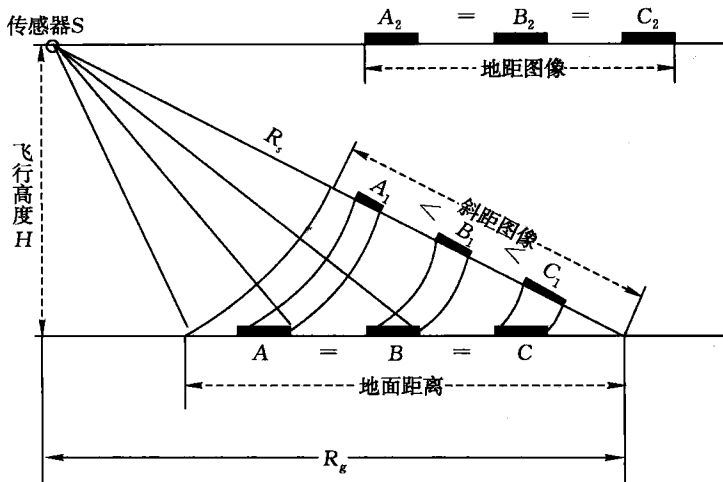


图 1-1 斜距与地距的关系示意图

1.2.3 近距离压缩

由于距离投影的特点,导致在斜距表示的雷达图像中,地面上等间距的物体表现为不同的间距。如图 1-1 所示,地面上有长度相等的 A、B 和 C 三个物体,它们到雷达天线的距离不同,导致它们在斜距图像上的长度不同。距离雷达天线近(近距端)的物体看起来要比距离雷达天线远(远距端)的物体短得多,这种现象被称为近距离压缩。

1.2.4 透视收缩与叠掩

在斜距表示的雷达图像上,斜坡的长度比其实际长度短的现象被称为透视收缩。如图 1-2 所示,地面上的山坡 AB 与 BC 的长度是相等的,但由于 RB 与 RA 之差小于 RC 与 RB 之差,雷达图像上显示的地形是 AB 坡的长度小于 BC 坡的长度。透视收缩现象在雷达图像上总是不同程度地存在着,这是由雷达构像的几何特性所决定的。

叠掩也是一种非常常见的雷达图像几何变形,在图像上表现为一个以上的地物目标成像为一个点。这是由于地距大的地物目标之间的斜距小于或等于地距小的地物目标之间的斜距,因此斜距小的地物目标先于斜距大的地物目标成像。如图 1-3 所示,在一定的入射角下,由于 RB 的长度小于 RA 的长度,B 点的回波将先返回传感器并成像,而 A 点的成像时间晚于 B 点,导致在雷达图像上 A 与 B 的位置发生了偏差,形成叠掩。叠掩现象在近距离比较容易发生,在远距则不太明显。

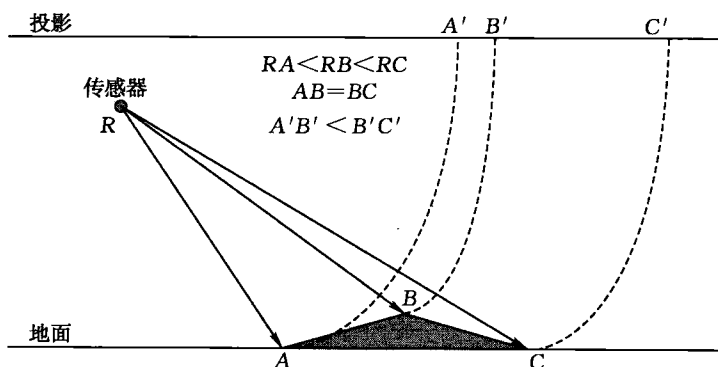


图 1-2 透视收缩原理示意图

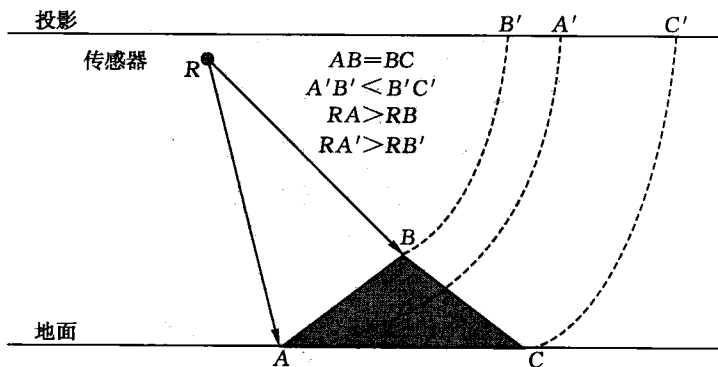


图 1-3 叠掩示意图

1.2.5 地形影响与雷达阴影

由于地形起伏等原因,可能使得地物目标顶部的雷达回波先于底部被天线接收到,在影像上表现为影像向底点方向移位。影像移位只发生在距离向上,而且高出地面的地物目标影像移位的方向是向着底点方向的,这一点与光学影像正好相反。

当入射角比较大的时候,容易形成雷达阴影。由于遮挡,有些地方没有被雷达波照射到,从而没有返回信号,在雷达图像上表现为阴影。图 1-4 是雷达阴影的示意图,而图 1-5 则显示了一幅雷达图像上的阴影,阴影对于雷达图像解译来说非常重要,不用立体像对,就可以从图中感受到地形的起伏。

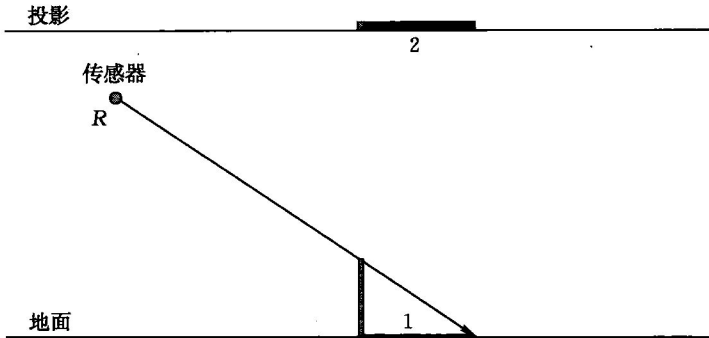


图 1-4 雷达阴影示意图

1. 雷达波无法到达区域 2. 雷达图像上的阴影区域

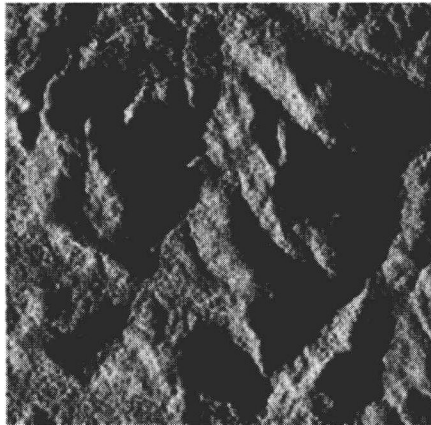


图 1-5 雷达阴影图像

1.2.6 SAR 图像质量评估指标

SAR 图像质量评估在雷达系统设计、系统验证、系统质量控制和系统比较方面有着重要的应用。最初的图像质量评估仅仅通过对图像的目视检测以及对目标的可解译性来判断图像的好坏。与光学图像相比, SAR 图像有相干斑噪声和几何失真, 这些都是 SAR 固有的图像特性。用目视检测方法, 只能定性地说某一 SAR 产生的图像比另一 SAR 产生的图像较好。当涉及图像信息内容时, 可能和目视检测结果不同。因此, 必须对图像质量进行定量评估。

图像在某一方面的质量好坏与应用有关。比如植被分类要求好的辐射分辨率, 常常以损失空间分辨率为代价来获取高的辐射分辨率, 而大炮、坦克、装甲车、飞机等军事目标的识别则要求高的空间分辨率, 相应的可降低对辐射分辨率的要求。这意味着需要一组能够全面衡量 SAR 图像质量的评估参数。