测绘科技专著出版基金资助
CEHUI KEJI ZHUANZHU CHUBAN JIJIN ZIZHU

ACTIVE RADAR AND LIDAR REMOTE SENSING

陈立春 编著

主动式雷达遥感



测绘出版社

需要全本请访问 www.ertongbook.com

测绘科技专著出版基金资助

主动式雷达遥感

Active Radar and Lidar Remote Sensing

隋立春　编著

测绘出版社

·北京·

©隋立春　2009
所有权利(含信息网络传播权)保留,未经许可,不得以任何方式使用。

内 容 提 要

本书从微波合成孔径雷达和航空激光雷达两方面系统地介绍了主动式遥感的原理及其应用。全书共分13章,前10章分别介绍了几类雷达遥感系统、雷达遥感基础、雷达图像特征、雷达成像原理及构像方程、雷达图像纠正方法、InSAR技术原理及应用、SAR图像相位解缠方法、D-InSAR技术原理及应用、雷达图像的解译和判读等方面内容;后3章系统地介绍了航空激光雷达技术及其数据处理的理论和方法,重点介绍了精度检测的方法和精度检测的结果。

本书可作为摄影测量与遥感专业研究生或高年级本科生的教材或参考书,也可以供从事遥感等研究的工程技术人员参考。

图书在版编目(CIP)数据

主动式雷达遥感/隋立春编著.—北京:测绘出版社,
2009.5(2011.8重印)
ISBN 978-7-5030-1913-5

Ⅰ.主…　Ⅱ.隋…　Ⅲ.雷达-主动式遥感　Ⅳ.TN953

中国版本图书馆CIP数据核字(2009)第057425号

责任编辑	贾晓林	封面设计	李　伟	责任校对	董玉珍
出版发行	测绘出版社				
地　　址	北京市西城区三里河路50号			电　　话	010-68531160(营销)
邮政编码	100045				010-68531609(门市)
电子邮箱	smp@sinomaps.com			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	184mm×260mm				
印　　张	15.5			字　　数	385千字
印　　次	2011年8月第2次修订印刷			版　　次	2009年5月第1版
印　　数	1301-3300			定　　价	38.00元

书　　号　ISBN 978-7-5030-1913-5/P·424
本书如有印装质量问题,请与我社联系调换。

序

信息获取与处理技术主题(308)是我国高技术研究发展计划(863)最早设立的主题之一。20多年来,由于航空、航天技术和计算机技术日新月异的发展,地球科学进入了一个全新的天地。遥感为各种地学应用提供了新的数据来源,为探索地球提供了一种新的方式,也为全球监测提供了动态信息,并成为研究人口、资源、环境的全球变化,以及它们之间的联系的有效手段。

从王之卓院士开始,众多的摄影测量学者、遥感和计算机领域的专家为我国遥感影像的图像分析与应用方面作出了卓越的贡献,为我国遥感领域在全球范围占有令人尊敬的地位和享有影响作出了卓越的贡献,为遥感信息领域的研究打下了深厚的理论基础。在此基础上,一些受到全球同行瞩目的全数字化图像处理技术和软件系统走向市场,并享有盛誉。

20世纪90年代形成规模研究的地球科学,面临着信息时代的机遇和挑战。与地球科学有关的学科与现代计算机技术、信息技术、航天技术、数据压缩和传输技术等的交叉和融合,产生了许多新的理论、概念和方法,推进了地球科学信息化研究的发展。融合了地球科学、数学、物理学、计算机科学和信息科学为一体的遥感信息科学正在形成,在这个领域,微波雷达遥感占有重要的地位。

包括雷达和合成孔径雷达(SAR 和 InSAR)、被动式微波遥感系统以及航空激光雷达(Airborne LIDAR 或称为 Airborne Laser Scanning)是国外20多年来研究的重点领域。在合成孔径雷达方面,因为微波的全天时、全天候以及其高效的穿透性,因而这种方式的传感器具有可见光遥感方式所不可替代和不具备的优势。当今,在微波雷达遥感传感器技术和微波雷达遥感影像处理理论和算法方面,各国的学者近十几年来一直给予关注,并进行了不懈的研究。第一,我国遥感卫星迅速发展,特别是气象卫星、海洋和资源卫星的成功发射,为我们提供了丰富的自主遥感数据源,因此,对遥感图像数据的理解和分析是提高我们遥感领域研究水平的需要;第二,遥感信息传输和成像机理的研究不仅是基础性的研究,也是提高遥感成像精度、影像纠正以及推广和普及遥感技术在国家建设中的应用的需要,同时,这些基础性和应用性的研究为发展高光谱、多极化成像雷达的波谱纠正和影像分析,为三维影像获取和多源信息的融合,为定量遥感研究,以及遥感影像的地学理解和分析提供了新的理论依据;第三,遥感数据为以地理信息系统为依托的三维综合信息系统提供了高精度的影像数据,大大提高了图像识别和空间分析的能力;第四,基于机载或星载三线阵 CCD 影像成像机理的研究、影像处理方法的研究、系统的研制,为开展月球和火星探测提供了可能的技术手段,大大提高了我国在这方面的研究水平。

在这本书中,隋立春博士用一定的篇幅介绍了主动式雷达遥感的另外一个重要分支,即航空激光雷达技术。他在德国柏林工业大学攻读博士学位和在慕尼黑工业大学及德国制图与大地测量局做博士后研究期间,在这一领域进行了深入的研究,所涉及的方面包括航空激光雷达数据处理的方法、软件的研制以及基于激光雷达扫描数据提取地面特征信息的研究,这些基于实际研究的成果对于阅读本书的读者掌握国际上的最新发展、开阔视野与放眼未来,相信可以

起到有益的帮助。

在当代遥感领域，主动式雷达遥感是一种新型的数据获取技术。迄今为止，国内还没有比较全面介绍主动式雷达遥感原理和数据处理的专著，因此，本专著在一定程度上弥补了这方面的缺陷。作者基于长期而丰富的实际研究工作经验及国内外工作和学习经历，吸收国外在本领域的研究成果，总结作者本人的研究经验，将主动式雷达遥感的两部分内容有机地结合在一起进行介绍，将有助于阅读本书的读者比较全面地了解主动式遥感的发展。

在本书出版之前，我有幸先睹为快，为此写下这点感想，供有关的读者参考。

王佐享

2007-08-28

需要全本请访问 www.ertongbook.com

前　言

20 多年来，由于航空、航天技术和计算机技术日新月异的发展，地球科学进入了一个全新的天地。遥感是对资源环境监测的有效手段，可提供全球监测所需的动态信息，为研究人口、资源、环境的全球变化，以及它们之间的联系创造了可靠的条件。遥感技术的发展为各种地学应用提供了新的数据来源和探索地球的方式。对地球表面进行全天候、全天时、全方位、高动态和实时的航天遥感，获取多波段、多时相、多分辨率的遥感数据，已经成为地理信息系统数据采集的重要手段。同时，以遥感影像为主要数据源的地理信息产品，已经成为地理信息产业服务方式的延伸，成为全社会可持续发展服务保障的最新方向。

微波雷达遥感是摄影测量与遥感领域的重要组成部分，微波雷达的全天时、全天候及其高效的穿透性，使得这种主动式的雷达传感器具有可见光遥感方式所不可替代和不具备的优势。因此，微波雷达遥感传感器技术、微波雷达遥感影像处理理论和算法的研究成为近十几年来各国遥感和摄影测量界的研究重点和热点。航空激光雷达是近几年来遥感数据获取领域最新的技术，它提供了高精度获取地面三维数据的最新手段，是数字高程模型采集和三维数字城市构建的理想技术。

作者在给遥感科学与技术专业本科和研究生讲授主动式遥感课程时，发现在国内很难有一本既适合于摄影测量与遥感专业本科教学需求，又兼顾国内外主动式遥感领域最新发展和研究成果的教材，特别是在主动式激光雷达遥感方面，国内还没有这方面的教材和专著。鉴于此，作者总结国内外同行在微波雷达遥感方面的经验，结合作者在航空激光雷达遥感方面多年的研究经验和研究成果，编写了这本书，旨在为感兴趣的读者提供一本比较系统地介绍主动式遥感技术的专著。

本书分 13 章，前 10 章介绍主动式微波雷达及合成孔径雷达的基本原理，主要介绍了现有的星载雷达系统和几种新型星载雷达遥感系统，对雷达图像的辐射特性、几何特性和几何纠正方法给予了详细介绍，对几类合成孔径雷达图像相位解缠方法进行了整理、归纳和总结，同时，也简单介绍了雷达图像解译和判读方面的内容。后 3 章介绍了主动式航空激光雷达遥感的原理，重点介绍航空激光雷达数据的处理方法，特别是在航空激光雷达系统和航空激光雷达点云数据精度分析方面，本书给出了比较系统的介绍和试验结果，希望可以给有关人员以有益的启发和帮助。

微波雷达和激光雷达是遥感领域的新兴技术，涉及的内容比较多，由于作者水平有限，错误、遗漏和其他表达不恰当的地方在所难免，恳请读者和专家批评指正。

作　　者

2008 年 9 月

目　录

第 1 章　绪　言 …… (1)
§1.1　遥　感 …… (1)
§1.2　主动式遥感 …… (2)
§1.3　雷达和合成孔径雷达的发展 …… (3)
第 2 章　雷达遥感系统 …… (9)
§2.1　星载雷达遥感系统 …… (9)
§2.2　其他新型星载雷达遥感系统 …… (16)
§2.3　机载雷达遥感系统 …… (28)
§2.4　非成像类微波传感器简介 …… (33)
第 3 章　雷达遥感基础 …… (35)
§3.1　雷达遥感的物理基础 …… (35)
§3.2　微波雷达遥感的特点 …… (38)
§3.3　真实孔径雷达 …… (40)
§3.4　合成孔径雷达 …… (42)
§3.5　雷达参数的选择 …… (44)
第 4 章　雷达图像特征 …… (49)
§4.1　雷达图像的辐射特性 …… (49)
§4.2　雷达图像的几何特性 …… (56)
§4.3　雷达立体图像 …… (61)
§4.4　典型地面目标的散射特性 …… (64)
§4.5　典型地面目标的亮度温度特性 …… (70)
§4.6　雷达图像与光学影像的差异 …… (70)
第 5 章　雷达图像的构像方程 …… (73)
§5.1　雷达图像处理中常用的坐标系统 …… (73)
§5.2　雷达图像处理中坐标系之间的转换 …… (74)
§5.3　侧视雷达图像的构像方程 …… (76)
第 6 章　侧视雷达图像的纠正 …… (82)
§6.1　侧视雷达图像几何变形分析 …… (82)
§6.2　侧视雷达图像几何变形纠正 …… (86)
§6.3　侧视雷达图像辐射畸变纠正 …… (92)
§6.4　侧视雷达图像斑点噪声消除方法 …… (94)
第 7 章　干涉合成孔径雷达 …… (98)
§7.1　干涉合成孔径雷达概述 …… (98)
§7.2　干涉合成孔径雷达测量原理 …… (99)

§7.3 干涉合成孔径雷达数据处理 …… (102)
§7.4 利用合成孔径雷达图像生成 DEM …… (119)
第 8 章 相位解缠…… (126)
§8.1 概 述 …… (126)
§8.2 相位解缠基本原理 …… (127)
§8.3 基于路径积分的相位解缠方法 …… (130)
§8.4 最小二乘相位解缠方法 …… (135)
§8.5 基于网络规划的相位解缠方法 …… (137)
第 9 章 差分干涉合成孔径雷达及其应用…… (140)
§9.1 差分干涉合成孔径雷达简述 …… (140)
§9.2 D-InSAR 数据处理方法 …… (141)
§9.3 D-InSAR 数据处理间接方法 …… (142)
§9.4 D-InSAR 技术用于获取地形形变 …… (143)
§9.5 D-InSAR 技术用于地形监测 …… (150)
第 10 章 雷达图像解译 …… (153)
§10.1 雷达图像的解译标志特点…… (153)
§10.2 雷达图像中各类地物的解译简介…… (154)
第 11 章 航空激光雷达系统原理介绍 …… (164)
§11.1 概 述…… (164)
§11.2 航空激光雷达系统数据获取基本原理…… (168)
§11.3 航空激光雷达数据初级处理…… (182)
第 12 章 航空激光雷达数据后处理方法 …… (200)
§12.1 航空激光雷达系统应用领域和潜力…… (200)
§12.2 数据后处理方法一般描述…… (202)
§12.3 数学形态学模型用于数据处理…… (203)
§12.4 稳健估计模型用于数据后处理…… (210)
第 13 章 航空激光雷达系统和数据精度分析 …… (215)
§13.1 引 言…… (215)
§13.2 航空激光雷达系统硬件精度分析…… (216)
§13.3 航空激光雷达数据精度研究和分析方法…… (219)
参考文献…… (234)
后 记…… (236)

Contents

CHAPTER 1 Introduction …… (1)
§1.1 Remote Sensing …… (1)
§1.2 Active Remote Sensing …… (2)
§1.3 Introduction and Progress of SAR and InSAR …… (3)
CHAPTER 2 Radar Remote Sensing System …… (9)
§2.1 Satellite Radar Remote Sensing System …… (9)
§2.2 New Satellite Radar Remote Sensing System …… (16)
§2.3 Airborne Radar Remote Sensing System …… (28)
§2.4 Nonimaging Microwave Remote Sensing System …… (33)
CHAPTER 3 Basis of Radar Remote Sensing …… (35)
§3.1 Physical Basis of Radar Remote Sensing …… (35)
§3.2 Characteristics of Microwave Radar Remote Sensing …… (38)
§3.3 Real Aperture Radar …… (40)
§3.4 Synthetic Aperture Radar-SAR …… (42)
§3.5 Selection of Radar Parameters …… (44)
CHAPTER 4 Radar Image Characteristics …… (49)
§4.1 Radiation Characteristics of Radar Image …… (49)
§4.2 Geometric Characteristics of Radar Image …… (56)
§4.3 Stereo Radar Image …… (61)
§4.4 Scattering Characteristics of Objects upon Land Surface …… (64)
§4.5 Brightness-Temperature Characteristics of Objects upon Land Surface … (70)
§4.6 Difference of Radar Image and Optical Image …… (70)
CHAPTER 5 Collinearity Equation of Radar Image …… (73)
§5.1 Common Coordinate Systems of Radar Image Processing …… (73)
§5.2 Transformation between Coordinate System …… (74)
§5.3 Collinearity Equation of Side Looking Radar(SLR) …… (76)
CHAPTER 6 Rectification of Side Looking Radar Image …… (82)
§6.1 Geometric Morphing Analysis of Side Looking Radar Image …… (82)
§6.2 Geometric Morphing Rectification of Side Looking Radar Image …… (86)
§6.3 Radiometric Morphing Rectification of Side Looking Radar Image …… (92)
§6.4 Speckle Noise Reduction of Side Looking Radar Image …… (94)
CHAPTER 7 Interferometric Synthetic Aperture Radar-InSAR …… (98)
§7.1 General Description of InSAR …… (98)
§7.2 Principle of InSAR …… (99)

需要全本请访问 www.ertongbook.com

§7.3 InSAR Data Processing …… (102)
§7.4 DEM Generation by Using InSAR Data …… (119)
CHAPTER 8 Phase Unwrapping …… (126)
§8.1 General Description …… (126)
§8.2 Principle of Phase Unwrapping …… (127)
§8.3 Phase Unwrapping Methods Based on Path-Following Algorithm …… (130)
§8.4 Least Squares Phase Unwrapping Algorithms …… (135)
§8.5 Phase Unwrapping Algorithms Based on Network Planning …… (137)
CHAPTER 9 Differential InSAR (D-InSAR) Technology and Its Application …… (140)
§9.1 General Description of D-InSAR …… (140)
§9.2 D-InSAR Data Processing Methods …… (141)
§9.3 Indirect Methods for D-InSAR Data Processing …… (142)
§9.4 Detecting Ground Deformation with D-InSAR Technology …… (143)
§9.5 Ground Monitoring with D-InSAR Technology …… (150)
CHAPTER 10 Radar Image Interpretation …… (153)
§10.1 Interpretation Mark and Characteristics of Radar Image …… (153)
§10.2 General Description of Radar Image Interpretation …… (154)
CHAPTER 11 Principle of Airborne Lidar System …… (164)
§11.1 General Description …… (164)
§11.2 Data Acquisition Principle of Airborne Lidar System …… (168)
§11.3 Pre-Processing of Airborne Lidar Data …… (182)
CHAPTER 12 Post-Processing of Airborne Lidar Data …… (200)
§12.1 Application Fields and Potential of Airborne Lidar System …… (200)
§12.2 General Description of Post-processing Methods …… (202)
§12.3 Airborne Lidar Data Processing Based on Mathematical Morphology …… (203)
§12.4 Robust Estimation Algorithms for Processing of Airborne Lidar Data …… (210)
CHAPTER 13 Analysis of Systematical Accuracy and Data Accuracy of Airborne Lidar System …… (215)
§13.1 Introduction …… (215)
§13.2 Hardware Accuracy Analysis of Airborne Lidar System …… (216)
§13.3 Study and Analysis Methods about Data Accuracy of Airborne Lidar …… (219)
Reference …… (234)
Acknowledgements …… (236)

第1章 绪 言

主动式遥感是遥感的一部分，因此，在介绍主动式遥感之前，本章简单回顾一下遥感的发展、微波遥感的现状和特点以及雷达的有关情况。

§1.1 遥 感

遥感，广义上可以这样定义：在不与物体、区域或现象直接接触的情况下对目标或者自然现象远距离感知，获取调查数据（影像），并对数据（影像）进行分析，从而得到物体、区域或现象的有关信息的一门科学和技术。英文 Remote Sensing，法文 Teledetection，德文 Fernerkundung，以及其他一些语言上的描述，从字面上表达的都是远距离探测的意思。

在许多方面，遥感可以被看成是一种阅读过程，即利用各种传感器收集描述目标的数据（影像），分析这些数据（影像），从而可以获取被调查的物体、区域或现象的信息。远距离收集数据有多种形式，包括力分布、声波分布或电磁能量分布的变化等。例如，重力计获得重力分布变化的数据，声纳就像蝙蝠的导航系统一样获得声波分布的变化数据，我们的眼睛则获得电磁能量分布的变化数据等。

在卫星遥感方面，自从 1957 年 10 月苏联把第一颗人造地球卫星送入环绕地球轨道开始，世界各国成功地实施了一系列空间计划。截至 1997 年年底已经累计有约 5 000 颗各类卫星发射升空，见表 1.1。其中，通讯卫星、导航卫星的数量居于首位，紧跟其后的便是各类对地观测遥感卫星，这些遥感卫星又以服务于军事和资源环境监测居多，表 1.2 是截至 1998 年 1 月的统计结果。1998 年至 2007 年遥感卫星发射情况见表 1.3（张永生等，1998；张健壮，2005；范永辉等，2007；2008）。

表 1.1 截至 1997 年年底全球卫星发射情况表

	1957—1960	1961—1965	1966—1970	1971—1975	1976—1980	1981—1985	1986—1990	1991—1995	1996—1997	合计
苏联/俄国	9	143	338	484	549	590	529	320	55	3 017
美国	35	311	324	139	108	127	104	173	129	1 450
英国		2	3	6	1	3	7	3		25
加拿大		2	1	4	2	5		4	1	19
意大利		1	1	2	1		1	4	3	13
法国		2	5	12	1	3	5	11	1	40
国际通信卫星组织		1	11	8	5	11	5	9	7	57
澳大利亚			2			2	1	3		8
欧洲空间局			4	4	7	7	5	7	3	37
德国			2	3	1	3	5	7	1	22
国际宇宙卫星组织			4	10	6	2	1	1		24
日本			1	6	13	12	20	15	10	77
中国			1	4	3	9	13	8	4	42
其他			1	4	11	17	20	46	33	132
合计	44	462	698	686	708	791	716	611	247	4 963

表 1.2 截至 1998 年 1 月遥感卫星分类情况

类别	成像侦察	电子侦察	海洋监测	导弹预警	测地	雷达校正	通用遥感	通信	导航	气象	其他	合计
数量	10	16	14	14	11	13	17	387	54	17	68	618

表 1.3 1998 年至 2007 年遥感卫星发射情况

	俄罗斯	美国	欧洲	中国	日本	印度	以色列
1998—2005 年	127	106	39	26	8	6	2
2006 年	25	23	5	6	6	1	
2007 年	26	20	6	10	2	3	1

随着空间技术的快速发展，目前空间遥感中所使用的传感器的工作波段几乎扩展到电磁波谱的各个部分，在夜晚也可以没有任何困难地获取所需地区的各种影像数据。在光谱探测方面，成像光谱仪的出现，使每个波段的波区变得越来越窄，已经可以达到 10 nm 以下，波段数多达 288 个以上(机载成像光谱仪)，这使得获取的光谱信号更加丰富，可以更有效地反映地物的真实谱貌。与此同时，遥感传感器的空间分辨率也在不断地迅速提高，目前有些民用遥感传感器的空间分辨率可以达到 1 m 以下，其影像数据已经可以测制 1∶2.5 万比例尺的地形图，可以用于修测 1∶1 万比例尺的地形图。

最新的主动式雷达微波遥感开辟了一种新型的数据及信息获取手段，在航天遥感领域，微波遥感传感器已经被大量地安装在各类遥感卫星上，如日本 JERS-1、欧洲空间局 ERS 及加拿大发射的雷达卫星 Radarsat 系列等，使微波遥感成像技术得到了进一步的发展。多平台、多传感器、多时相遥感数据获取和综合应用试验已经取得很大的进展。

§1.2 主动式遥感

人们越来越多地使用工作在电磁波的微波波段的雷达技术来获取地面或其他行星的数据或影像。在传感器部分，我们知道，所谓的微波并不是表示微小的意思。微波波段的波长大约在 1 mm～1 m 波长范围之间，而最长的微波波长比最短的可见光波长要长大约 250 万倍。

从遥感的角度来看，微波能量有两个明显的特征：

(1)微波能够穿透大气层，在其包含的波长范围内，微波能“看穿”云雾、小雨、小雪、烟尘等。

(2)来自地面物体的微波反射或者发射，与类似的可见光或者(热)红外光谱波段的发射或反射没有直接的关系。例如，光谱在可见光看来是“粗糙”的平面，而在微波看来可能是“平滑”的，这种特性使我们可以得到与常规遥感影像有明显区别的“图像”。

微波遥感包括主动式与被动式两种方式。术语“主动”指一个传感器使用本身的能源获取能量或者照明，如雷达就是一种主动的微波传感器，在本书中只介绍主动式的微波遥感部分。作为一个简单的延伸，将简单介绍一下与雷达相对应的其他类型的主动式传感器，例如雷达高度计等。

除了主动式微波遥感外，本书将用一定的篇幅介绍航空激光雷达遥感系统 Airborne Lidar(Light Detection and Ranging，Lidar)的知识。航空激光雷达也是一种主动式遥感系统，它是近 20 年来发展起来的一种新型的遥感数据获取技术，主要用于高效、高速地获取高精度

的数字高程模型(Digital Elevation Model,DEM)。与雷达类似的地方是,它们都是主动式的遥感系统,所不同的是航空激光雷达遥感是用激光脉冲代替微波能量来照射地面。该系统在差分 GPS(DGPS)、惯性导航系统(INS)支持下,通过测量激光脉冲发射和返回的时间,经过一系列数据处理,计算地面目标的三维坐标。这种主动式的三维数据获取技术能够在困难地区快速和高精度地完成数字高程模型数据的采集,具有被动式遥感技术所不具备的优势。

航空激光雷达技术的发展和应用始于 20 世纪 70 至 80 年代,到 20 世纪 90 年代已经成熟。截至 2007 年,全球约有 100 多个公司使用该系统用于获取高精度数字高程模型,其高效性能不仅体现在常规的测绘领域,在水利线路规划、电力线监测、城市三维模型构建和公路规划设计领域越来越受到重视。

§1.3 雷达和合成孔径雷达的发展

雷达(Radio Detection and Ranging,Radar)与激光雷达的区别是其能量源的不同。就像其名字所表明的一样,雷达是一种使用无线电波作为其能量源的传感器,主要用于探测目标是否存在并确定其距离,有时也要确定目标的角度位置。这个工作过程要求在所感兴趣的方向上发射短波脉冲,并记录下系统观察范围内目标反射回来的脉冲强度和其来源。

雷达系统有的能够产生图像,有的不能。它可以在地面上,也可以安装在航空飞行器或航天飞行器上。一种普通形式的非成像雷达的典型应用是用雷达测量车辆的速度,这种系统称为多普勒雷达系统,因为它们在发射或接收信号时利用了多普勒频移效应。多普勒频移是传感器系统和反射物的相对速度的函数,例如,我们能够感觉到从身旁驶过的车辆的喇叭声和火车鸣笛声有一个音调的变化,这就是声波多普勒频移效应。多普勒频移原理经常也用来分析成像雷达系统所获取的数据。

另外一种普通的雷达系统是平面位置显示器(Plan Position Indicator,PPI)系统,它是雷达终端显示器的一种,它以极坐标的方式表示目标的斜距和方位。这种系统有一个圆形的显示屏幕,径向扫描将雷达回应显示在此屏幕上,本质上 PPI 系统使旋转天线周围的目标平面视图连续更新。PPI 系统通常应用于天气预报、空中交通控制和海上导航。由于 PPI 系统的空间分辨率较差,它不适合于遥感测绘应用。

通过在航空器内或航天器的下方固定一个雷达天线并指向一侧,航空和航天雷达就完成了雷达遥感系统的安装,这种系统称为侧视雷达(Side Looking Radar,SLR)。在航空系统中叫机载侧视雷达(Side Looking Airborne Radar,SLAR),机载侧视雷达系统能够产生与飞机航线平行的广大地面区域的连续图像带。

机载侧视雷达系统最初于 20 世纪 40 年代开发并用于军事目的,它能够成为一个理想的军事侦察系统,不仅因为它具有几乎全天候的工作能力,还因为它是一个主动的昼夜成像系统。

第一个使用机载侧视雷达系统制作大范围地形图的工程是对巴拿马的达连省的地形测量,那次测量从 1967 年开始,测量的结果是一个 2 万平方千米地区的镶嵌图。在这之前,因为长期覆盖云层(几乎是永久的),这片地区从来没有被照过相或完整地被测绘过。巴拿马雷达测绘工程的成功,引发了全球性的对雷达技术的利用。从 20 世纪 70 年代开始,大范围的雷达制图项目被一些政府完成,也被大规模应用于采矿和石油工业。

1971 年，委内瑞拉为了对一片接近 50 万平方千米的地区进行制图，进行了一次雷达测量，借助于这次工程，委内瑞拉与邻国的边界得到精确定位，并且对国家的水资源，包括几条主要的河流进行了准确的勘测。

同样始于 1971 年的还有亚马孙河流的雷达测量工程，对亚马孙河流和巴西东北部地区进行了全面的地质勘测，那次雷达测量制图工程之大超过以往任何一次。到 1976 年年底，工程完成了大约 850 万平方千米区域内超过 160 幅雷达镶嵌图。科学人员把这些雷达镶嵌图作为基本图进行了大量翔实的分析研究，包括地质分析、木材总量分析、交通线路的重新定位以及矿产探测等，由此，发现了大量重要的地矿分布。

雷达制图还被广泛应用于海洋的海面监测，确定海上风、浪和冰冻的状况，监测台风的发生、运动、强度、方向等。

而合成孔径雷达是一种先进的主动式微波遥感系统，一种用于提供地面（水面）固定目标、移动目标位置和地形资料的新型雷达。在众多的航天遥感平台中应用最多，它可以安装在有人驾驶和无人驾驶飞机上，也可以安装在航天飞行器（卫星、飞船）上。其探测目标的真实性、准确性、可靠性和及时性是其他雷达系统无法比拟的，不失为空中探测的夺目“明星”。这种雷达在设计中通过雷达与目标的相对运动及单元雷达波合成技术，使其在普通雷达中可傲视群雄。因为就理论而言，雷达天线越大，其探测监视范围也越大，但从隐藏性、机动性和生存需要等因素考虑，又不能将天线做得过大，而合成孔径雷达正是在这样一种技术需求与客观现实的矛盾中另辟蹊径，它在方位向探测上采用合成孔径技术，即利用雷达与目标的相对运动，来合成一较大的等效天线孔径，解决了雷达发展中的天线难题。

合成孔径雷达的分辨率高，与可见光、红外传感器相比具有独特的优势和无法替代的作用，被广泛应用于工农业生产、科研和军事等领域。目前，在航空测量、遥感、卫星海洋观测、航天侦察、图像匹配制导中正发挥着突出作用。归纳起来合成孔径雷达具有以下几种功能：

（1）全天候、全天时观测能力。当雷达工作于高频波段时，能在云层、雨、雾和烟尘环境下获得清晰的目标图像。

（2）穿透探测。选用合适的工作频率，可探测到一定厚度植被中的目标，还可探测地表以下一定深处的地道、加固掩体和地下管道等目标，在地质矿藏探测、考古中同样具有重要作用。

（3）识别目标。使用多种工作模式，即通过不同的极化方式，不同的波束入射角，不同的观测次数和测绘走向，获取同一目标的几种图像并加以对比分析，可鉴别出目标的真伪，对不同目标进行分类。

（4）纵深探测。在不飞越目标上空的情况下可探测到纵深 100～200 km 的目标，如天基合成孔径雷达。

（5）运动目标显示。合成孔径雷达不仅能对地面（海面）固定目标进行探测，而且能够监视和跟踪地面移动目标及低空飞行的目标，诸如巡航导弹之类飞行物也将尽收“眼底”。

（6）雷达成像。用这种雷达系统获取的目标图像与空间照相的效果相近，其图像分辨率可以达到 0.7 m 甚至几个厘米，在军事上可在导弹图像匹配制导中，采用合成孔径雷达摄图，能使导弹顺利地击中目标。

（7）信息时效处理。能将高分辨率的数据流在飞机或空间飞行器上进行实时处理，也可通过高速数据传输系统发送到地面站进行处理。

雷达遥感技术的全天候、全天时以及不受气象条件的制约的特性从图 1.1 可以清楚地看出。

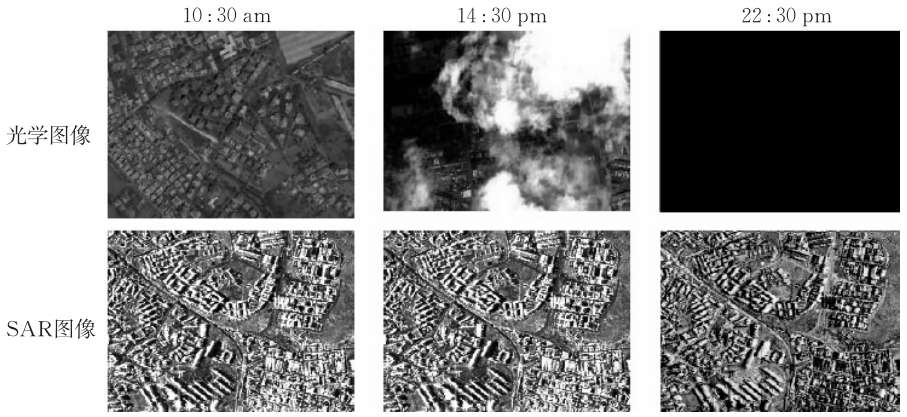


图 1.1　不同时段和天气条件下的雷达图像和光学图像的区别

美国于 20 世纪 50 年代初期研制成功世界上第一台工作在微波频率的、能够产生地面图像的机载真实孔径侧视雷达(Real Aperture Side Looking Airborne Radar,RA-SLAR)。真实孔径侧视雷达虽然可以通过脉冲压缩技术获取雷达图像距离向的高分辨率,但是方位向的分辨率与波长和观测距离成反比,与雷达的天线孔径成正比。若要提高方位向的分辨率,则飞行平台或者必须要携带一个孔径很大的雷达天线,或者要缩短雷达的工作波长。携带一个孔径很大的雷达天线的选择显然在飞行器及传感器的结构上受到限制,而以缩短雷达的工作波长的方式提高分辨率的选择则会大大削弱雷达天线的全天候工作能力,因而,机载真实孔径侧视雷达在遥感中的应用有较大的局限性。

为了解决雷达天线设计中高分辨率的要求与大天线、短波长之间的矛盾,1951 年 6 月,美国 Goodyear 宇航公司的 Carl Wiley 首先提出了所谓的合成孔径侧视雷达(Synthetic Aperture Radar,SAR)的概念,并于 1952 年研制成功一种称为“多普勒波束锐化”的系统,这是合成孔径雷达的最初形式。1953 年 7 月,伊利诺伊大学(University of Illinois)控制系统实验室用机载 X 波段相干脉冲雷达对地面和海面的反射信号进行了研究,第一次证明了合成孔径雷达的原理,并获取了第一张合成孔径雷达的图像。

从数据处理方面来看,早期主要是基于光学处理的方法,将胶片形式的雷达信号转换成图像。从 20 世纪 60 年代中期开始,逐步引入了数字处理的方法。从 70 年代开始,人们实现了带运动补偿的实时数字式合成孔径雷达。

星载雷达遥感一直是雷达遥感的重点。从 1972 年 12 月美国“阿波罗 17 号”登月计划将 SAR 投入遥感开始,到 1978 年 6 月 28 日美国航空航天局(NASA)发射第一颗 SAR 海洋雷达卫星 Seasat,标志着 SAR 时代的开始。Seasat 雷达卫星系统采用近极地轨道,轨道高度 800 km、波长 23.5 cm(L 波段)、水平极化方式(HH)、固定视角 20°、扫描带宽 100 km,系统采用光学和数字处理两种方式,光学处理后的图像分辨率在距离向为 45 m,在方位向为 25 m,数字处理后两个方向的分辨率都为 25 m。

1987 年 7 月苏联成功发射了钻石雷达卫星(Almaz),1991 年 3 月又发射了另外一颗钻石雷达卫星,分辨率达到 15～30 m,波长 9.6 cm(S 波段),HH 极化方式,可对地球上 78°N～78°S 的地区成像。

1991 年,欧洲空间局(ESA)发射了第一颗自己的雷达遥感卫星 ERS-1(European Remote Sensing Satellite)。该卫星高度为 785 km,轨道周期为 100 min,轨道倾角为 98.5°。ERS-1 携

带的 SAR 传感器为右侧视，视角为 23°，工作频率为 C 波段，VV 极化方式，距离向分辨率为 26 m，方位向分辨率为 30 m，辐射宽度为 100 km，采用数字记录和数字处理。该卫星主要用于研究海洋环流、洋流、潮汐，分析全球风浪的变化，分析极地冰层覆盖以及海冰和海面温度等。1995 年发射的 ERS-2 号雷达卫星与 ERS-1 的 SAR 的参数相同，两颗雷达卫星在同一轨道上以一天的时差飞过同一地区，这样就可以产生干涉图像。

日本宇宙开发事业团于 1992 年 2 月发射了地球资源卫星 JERS-1(Japanese Earth Resources Satellite-1)。该卫星轨道高度为 568 km，轨道倾角为 97.662°，偏心率小于0.001 5，半长轴为 6 946.165 km，轨道重复周期为 44 d，轨道周期为 96.146 min。该卫星安装有两种传感器，即光学传感器和合成孔径雷达传感器。SAR 的侧视角为 35°，工作波段为 23.5 cm(L 波段)，HH 极化模式，距离向和方位向的分辨率都为 18 m，成像宽度为 75 km。卫星上由高密度磁带机记录数据，然后传输到地面处理，具有获取全球雷达图像的能力。该卫星主要用于资源探测，森林和农业部门环境保护、灾害预防和海洋监测等目的。

加拿大于 1995 年 11 月发射了其第一颗雷达遥感卫星 Radarsat。卫星轨道为 796 km，倾角 98.6°，周期为 100.7 min，重复周期为 24 d。Radarsat 的一个特点是它在早晨 6 时和傍晚 6 时过境，目的是为了使卫星上升和下降阶段总是处于太阳光照下，以便能充分利用太阳能，节省能源。同时，上升和下降的方式能更好地对农作物进行监测，因为在夜晚植被的水分含量最高，所以适合于夜晚对农作物进行监测。

航天飞机雷达是雷达遥感的另外一个受到重视和取得成就的系统。美国航天飞机雷达系统有 3 种型号：SIR-A、SIR-B 和 SIR-C。1981 年 11 月，美国“哥伦比亚号”航天飞机第二次飞行时携带的 SIR-A 与海洋 SAR 基本相同，也是一台具有单一工作频率(L 波段，波长 23.5 cm)和单一极化模式(HH)的合成孔径雷达，不同之处是它们的信号记录方式和天线波束的入射角。SIR-A 接收数据采用机上光学记录，然后在地面上进行成像处理，为了适应地质遥感领域的要求，其视角增大到 50°。

美国航空航天局于 1984 年 7 月发射的“挑战者号”航天飞机携带了另外一种雷达传感器 SIR-B，SIR-B 的主要目的是研究在轨道上不同视角情况下的后向散射特性和立体成像能力。SIR-B 与 SIR-A 的工作参数基本相同，区别则有两点：其一是 SIR-B 采用了可变的多视角技术，通过改变航天飞机的姿态，其视角可以在 15°～60°的范围内变动，从而实现了立体成像；其二是 SIR-B 增加了数字记录方式。

1994 年 4 月，美国航空航天局与德国和意大利联合进行了两次航天飞机雷达遥感试验，这次试验使用了 SIR-C 及 X 波段的 SAR 传感器系统(SIR-C 和 X-SAR)。该系统有 3 个波段，美国研制了 L、C 波段雷达系统，德国和意大利研制了 X 波段雷达。L、C 波段有 4 种极化方式，即 HH、VV、HV、VH 极化方式，X 波段有两种方式，即 HH 和 HV 方式。每个波段可以独立工作，也可以同时工作，视角在 15°～60°之间可变。数据主要以记录在磁带上为主，也可以通过中继卫星实时地传输到地面处理。SIR-C 和 X-SAR 发展了 4 种先进技术，即干涉雷达成像技术、扫描雷达成像技术、定标技术和 SAR 数据实时处理技术。

美国航空航天局于 2000 年 2 月 12 日使用 SIR-C 进行了 10 天轰动性的航天飞机雷达遥感飞行，那次飞行完成了一次所谓的“航天飞机雷达地形测绘任务”(Shuttle Radar Topography Mission，SRTM)。此次使命的主要目的是使用雷达干涉技术采集北纬 60°至南纬 56°之间约占地球表面 80%区域的地形数据，从而生成地面的三维地形图。SRTM 采用了

1994 年 SIR-C 两次飞行中成熟的硬件设备，同时，在航天飞机上安装了一根直径为 1.12 m、长度为60 m的天线杆，在航天飞机的内部安置了一副天线，在航天飞机左侧的天线杆末端安置了另外一副天线，这样就构成了具有固定基线的单轨式横跨轨迹干涉测量系统，见图 1.2。

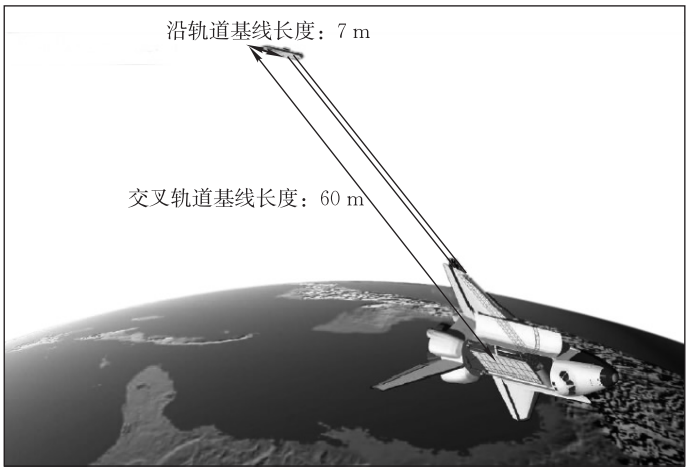


图 1.2 航天飞机雷达地形测量(SRTM)

自 20 世纪 50 年代初期出现天线合成孔径概念以来，合成孔径雷达已有 50 多年的发展历史，我国从 20 世纪 70 年代中期开始对机载、星载合成孔径雷达技术进行研究，这也是我国的重大科研工程项目，先后取得了很多成果。1979 年 9 月使用 X 波段的机载遥感雷达获取了第一批合成孔径雷达图像，由于没有采用脉冲压缩技术，距离向分辨率只有 180 m，方位向为 30 m。1980 年 10 月采用了线性调频脉冲压缩技术的雷达传感器后，所获取的雷达影像的空间分辨率达到了 15m×15 m。1987 年研制成功了新一代机载合成孔径雷达。在星载雷达遥感系统方面，我国第一颗合成孔径雷达卫星已跻身于国际先进行列，目前已进入实际应用阶段，并在国土测绘、资源普查、城市规划、重点工程选址、抢险救灾等领域发挥了重要作用，它标志着我国的综合国力和科技水平业已达到了一个崭新的高度。未来的合成孔径雷达将向着作用距离更远、探测范围更广、抗干扰性能更强、造价便宜、多种极化方式、多种平台、多波段和小型化的方向发展。可以预见，未来的合成孔径雷达将成为“空地一体化”、全天候、立体探测监视系统的主力军。

在雷达遥感系统试验方面，20 世纪 70 年代只有一颗 SAR 雷达遥感发射升空，80 年代世界上也只有两次航天飞机合成孔径雷达飞行试验，而 90 年代则已经有 6 颗星载 SAR 升空。这期间发射的部分遥感雷达系统的性能、参数等用表 1.4 来说明(不包含 2006 年以后发射的 ALOS 系统、TerraSAR-X 系统和 Cosmos-Skymed 系统等)。

表 1.4 部分星载雷达遥感系统的参数

型号 / 性能	Seasat 美国	SIR-A 美国	SIR-B 美国	SIR-C/X 美国等	Almaz-1 苏联	ERS-1 欧洲空间局	ERS-2 欧洲空间局	JERS-1 日本	Radarsat 加拿大
发射时间	1978-06	1981-11	1984-10	1994-04	1991-03	1991-07	1995-04	1992-02	1995-11
数据处理类型	光学/数字	光学	光学/数字	数字	数字	数字	数字	数字	数字

需要全本请访问 www.ertongbook.com