

国防电子信息技术丛书



Synthetic Aperture Radar:
Systems and Signal Processing

合成孔径雷达

——系统与信号处理

[美] John C. Curlander 著
Robert N. Mcdonough

韩传钊 等译
文江平 审校



电子工业出版社
PUBLISHING HOUSE OF ELECTRONICS INDUSTRY

<http://www.phei.com.cn>

国防电子信息技术丛书

合成孔径雷达

——系统与信号处理

Synthetic Aperture Radar
Systems and Signal Processing

[美] John C. Curlander 著
Robert N. Mcdonough

韩传钊 等译

文江平 审校

电子工业出版社
PUBLISHING HOUSE OF ELECTRONICS INDUSTRY

北京 · BEIJING

内 容 简 介

本书是SAR系统和信号处理方面的经典著作之一,从SAR信号处理的角度研究了SAR系统设计和实现的有关问题,既包括SAR的基础入门知识,又包括大量的SAR系统工程实现及成像处理方面的细节。书中详细探讨了SAR系统设计和研制、SAR成像处理以及系统辐射定标和几何定标等方面的基础知识,并总结了作者多年在SAR系统研制和开发方面的实际工程经验。这些内容对于雷达工程师和SAR数据应用单位的研究人员都很有帮助。作者在解释概念的过程中采用了大量数据和图像,使概念更易于理解和接受。

本书适合作为SAR系统设计、数据处理以及SAR遥感应用方向的工程技术人员和研究人员的参考用书,也适合作为高等院校相关专业方向的教学用书。

John C. Curlander, Robert N. Mcdonough: **Synthetic Aperture Radar: Systems and Signal Processing.**

ISBN 0-471-85770-X

Copyright © 1991, John Wiley & Sons, Inc.

All Rights Reserved. Authorized translation from the English language edition published by John Wiley & Sons, Inc.

No part of this book may be reproduced in any form without the written permission of John Wiley & Sons, Inc.

Simplified Chinese translation edition Copyright © 2006 by John Wiley & Sons, Inc. and Publishing House of Electronics Industry.

本书中文简体字翻译版由 John Wiley & Sons 授予电子工业出版社。未经出版者预先书面许可,不得以任何方式复制或抄袭本书的任何部分。

版权贸易合同登记号 图字: 01-2002-5603

图书在版编目(CIP)数据

合成孔径雷达:系统与信号处理/(美)柯兰德(Curlander, J. C.)等著;韩传钊等译.

北京:电子工业出版社,2006.12

(国防电子信息技术丛书)

书名原文:Synthetic Aperture Radar: Systems and Signal Processing

ISBN 7-121-03263-5

I. 合... II. ①柯... ②韩... III. ①合成孔径雷达-信号系统 ②合成孔径雷达-信号处理 IV. TN958

中国版本图书馆CIP数据核字(2006)第118352号

责任编辑:马 岚

印 刷:北京市天竺颖华印刷厂

装 订:三河市金马印装有限公司

出版发行:电子工业出版社

北京市海淀区万寿路173信箱 邮编:100036

开 本:787×1092 1/16 印张:30.5 字数:781千字

印 次:2006年12月第1次印刷

定 价:68.00元

凡所购买电子工业出版社的图书有缺损问题,请向购买书店调换;若书店售缺,请与本社发行部联系。联系电话:(010)68279077。邮购电话:(010)88254888。

质量投诉请发邮件至 zltz@phei.com.cn, 盗版侵权举报请发邮件至 dbqq@phei.com.cn。

服务热线:(010)88258888。

译者序

合成孔径雷达(简称SAR)是一种主动式的对地观测系统,可安装在飞机、卫星、宇宙飞船等飞行平台上,全天时、全天候对地实施观测,并具有一定的地表穿透能力。因此,SAR系统在灾害监测、环境监测、海洋观测、资源勘察、农作物估产、测绘和军事等方面的应用上具有独特的优势,可发挥其他遥感手段难以发挥的作用,因此越来越受到世界各国的重视。

自1978年世界上第一颗合成孔径雷达卫星——美国的Seasat发射成功以来,苏联、欧洲航天局、日本、加拿大等都成功发射了合成孔径雷达卫星,其获取的数据已经得到了广泛应用。我国也非常重视SAR技术的研究,将“星载合成孔径雷达及其成像处理技术”专题列入国家高技术研究发展计划(简称“863计划”),开创了国内合成孔径雷达及其应用的新局面。经过十几年的不断探索,我国在SAR系统领域已进入快速发展期。在实际工作过程中,无论是SAR系统的研制人员和SAR地面系统的工程设计人员,还是各个应用领域的SAR图像研究人员,都希望有一本系统全面地描述SAR系统及其数据处理的专著,既可以了解SAR系统基本知识,也可以作为工程实践的参考。John C. Curlander和Robert N. Mcdonough合著的这本书正满足了这种技术需求。

本书的两位作者在NASA的航天飞机成像雷达项目中有长期工作经验,用五年时间写成了本书。虽然原著的出版时间是上世纪90年代,但作为一本SAR方面的经典著作,该书在SAR基本理论和工程实现上的种种考虑对我们仍然具有其他书籍难以替代的指导作用。因此,为推动我国雷达成像遥感技术的发展,我们组织翻译了本书。书中详细探讨了SAR系统设计和研制、SAR成像处理以及系统辐射定标和几何定标等方面的基础知识,并总结了作者多年在SAR系统研制和开发方面的实际工程经验。这些内容对于雷达工程师和SAR数据应用单位的研究人员都很有帮助。作者在解释概念的过程中采用了大量数据和图像,使概念更易于理解和接受。另外,本书附录中还给出了SAR信号处理所需的基础知识,并专题介绍了阿拉斯加的SAR地面系统。我们深信,本书将为更多的读者打开SAR成像技术之门,为SAR系统研制和数据的应用研究提供重要的参考。

本书的译者都是多年工作在SAR领域一线的研究人员,他们在紧张的工作之余,结合自身实践完成了这本经典著作的翻译。全书共分10章和4个附录,其中第1章由沈成忠翻译,第2章、第5章、第6章及第10章由韩传钊翻译,第3章和第4章及附录A由刘铁成翻译,第7章及附录C和附录D由康利鸿翻译,第8章由邵洁翻译,第9章由彭仲秋翻译,附录B由胡卫民翻译。韩传钊完成了全书的统稿工作。之后,译稿分别由中国科学院电子学研究所和北京航空航天大学的有关专家进行了审阅,他们对本书的译稿提出了许多中肯的意见,在此表示衷心感谢!最后,文江平研究员审定了全书。

SAR技术领域涉及的专业面较广,而目前我国的SAR技术,特别是星载SAR技术的研究和应用尚处于起步阶段,因此我们对于原著内容的理解难免不够透彻。翻译不当之处,希望得到各位同行和专家的批评指正。

前 言

到20世纪90年代初,合成孔径雷达已经发展了40年。在这40年中,全世界仅发射了一颗装载SAR传感器的卫星,该卫星的SAR主要用于遥感应用。这个称为Seasat-A SAR的系统在20世纪70年代末工作了不到100天。从Seasat卫星以及航天飞机成像雷达系列和机载SAR系统所收集的数据可以发现,SAR是测量地球表面特征的一种非常有用的工具。作为有源微波传感器,SAR能够连续监视与地球表面(及表层以下)结构和电特征有关的地球物理参数。而且,通过进一步的信号处理,这些观测可以达到很高的分辨率(量级为米),而分辨率的高低与传感器高度无关。

这些早期系统的成功,使遥感进入了一个新时代——将合成孔径雷达用于遥感的时代。认识到SAR对地球资源进行全球监视的潜在效益后,欧洲航天局、日本航天开发局、加拿大航天局与美国航空航天局在20世纪90年代联合开发了一系列极轨SAR系统。这些遥感SAR系统的主要目的是在一段较长时期内完成地表的地球物理学特征的测量,并将测量结果输入到全球变化模型中。为了达到此目的,SAR系统必须能够可靠地产生高质量图像数据产品,基本上没有人为造成的图像噪声(或图像失真),并需要在目标散射特征方面对图像进行精确定标。

预期这些数据集会在SAR数据潜在应用领域相关的科学界引起广泛兴趣。然而,SAR数据的解译工作极具挑战性,因为在这些数据产品中可能存在严重的几何和辐射畸变,并存在虚假目标(这是由雷达脉冲工作体制造成的)。尽管通过合理设计雷达系统并采用系统误差源校正等技术可以尽量减小一些影响,但对SAR数据全面利用的要求又使科学家们不得不担心这些影响可能会造成对图像的错误解译。完全理解SAR图像特征需要有传感器设计、任务操作和地面信号处理等方面的知识。

本书具体研究了与星载系统的设计和实现有关的问题(重点放在信号处理技术上)。读者将发现本书是从两个角度编写的,这反映了每个作者对SAR系统和信号处理的看法。我们相信这两种看法是互为补充的,并有助于提供对SAR的完整描述,包括从基础理论到实际系统的实现和测试等方面。在准备书稿时,我们希望它能覆盖3个主要的领域。

首先,对合成孔径雷达这样的正处于发展阶段的技术领域,我们应该意识到新进入的工作者需要有这种技术的入门基础知识,因此本书在重点阐述作为成像处理方法核心的专用信号处理算法的同时,还包括了许多关于常规雷达方面的知识。其次,与SAR关系密切的各相关学科的工程师通过已汇编在一起的各种工程上的考虑可以大大受益,因为这些汇编在一起的材料说明了SAR系统与常规雷达系统的区别。第三,SAR图像的用户可能希望了解一些成像处理程序的细节,以帮助他们理解待分析的图像。

为了服务于这些方方面面的潜在读者,我们根据假定的各种读者背景,按照不同的详细程度编写了本书。第1章是面对所有读者的,提供了SAR在遥感科学方面通用性能的一个概述,并简单介绍了SAR实现其优良的空间分辨率的基本原理,包括对已有SAR系统的概述和对近期将开发的系统的介绍。本章最后论述了建模的某些重要问题,这些模型可以将SAR图像与感兴趣的地球物理特性联系起来。

第2章专门由一些最基本的理论较详细地推导出了雷达方程,而这些基本原理是工程师和遥感学方面的专家都应该了解的。这一章也是为初次涉猎雷达领域的读者准备的。本章在

2.8 节中总结了适用于遥感工作的各种雷达方程表示形式。第 3 章中将继续讨论基础知识方面的问题,但是重点放在信号处理技术上,这些技术是处理数字接收机中形成的雷达信号的基础。3.2.2 节从 SAR 成像的角度专门讨论了匹配滤波器。

第 4 章是本书详细描述 SAR 系统的第一章,探讨了以原始雷达信号生成 SAR 图像的核心问题,也就是将雷达系统获得的在空间和时间上均为散布的点目标响应“压缩”成图像中的点。4.1 节概述了从原始信号至“原始”(未定标)图像的 SAR 的逐步成像过程,并在 4.1.4 节中列举了一个实例。4.2 节详细介绍了较为成熟的用来实现相应数字信号处理的各种算法;第 5 章与第 4 章相辅相成,介绍了实现第 4 章中描述的一些主要程序所必需的若干辅助算法。在第 10 章中讨论的成像算法可替代第 4 章和第 5 章中的算法,但到本书落笔时为止这些算法在遥感界用得还很少。然而,它们已引起了广泛关注,并且已经在机载 SAR 系统中得到了大量的应用。

第 6 章对 SAR 系统中与传感器和数据通道相关的部分进行了端到端的阐述,重点阐述了空间平台。按照从发射信号的生成到将接收的回波信号数据传输到地面站等全部环节,以一个常用的 SAR 系统为例,分析了各种误差源的特征和影响。这些分析是从系统设计者的角度出发的,在 6.5 节中还介绍了一些重要的折中设计方法。

第 7 章和第 8 章详细介绍了一些 SAR 系统定标和图像定标的方法。第 7 章介绍的是如下概念上的定标,即以图像的单一分辨单元来正确复制每一系统分辨单元中的表面后向散射强度(辐射定标)。第 8 章则讨论了几何定标的相关问题。几何定标技术旨在保证雷达图像上特定的分辨单元能正确地对应到其地表位置。8.3 节讨论了 SAR 图像与地图的对应关系问题。这样可以保证将来自多个传感器的图像进行编目,8.4 节论述了这一问题的。

第 9 章和第 6 章是对应的,后者主要介绍了飞行硬件设备,而前者则介绍了地面硬件设备。第 9 章阐述了前几章所述的成像处理以及几何和辐射定标算法所需的系统实现方面的考虑,介绍了一些特定的系统以及影响其设计的各种折中考虑。子系统的介绍范围包括了从原始信号的初始处理一直到图像归档、编目以及分发等处理。

第 10 章阐述了与前面几章不同的成像算法。本书最后有 4 个附录。附录 A 讨论了基本的数字信号处理方法,主要是快速傅里叶算法。附录 B 介绍了卫星轨道机理,在 B.4 节中总结出了几种成像处理所需的经过简化的参数模型。附录 C 介绍了 NASA SAR 数据的接收、成像方式和图像归档系统,该系统位于阿拉斯加费尔班克斯的阿拉斯加大学。最后,附录 D 介绍了非线性系统的特性。在本书中,重要的公式都用星号进行标记。

我们相信,本书提供了一些在 SAR 文献中容易遗漏但又非常必要的材料。书中详细说明了设计和研制 SAR 系统所需的技术,重点是信号处理方面技术。其中包括 SAR 成像过程涉及的大量基础理论和从真实 SAR 系统中产生高质量图像所必需的实践系统工程技术。这些内容对于雷达工程师和科学家都很有帮助。我们在解释概念的过程中采用了大量数据和图像,以使概念更易理解和接受。我们深信,本书将使围绕 SAR 图像的生成所产生的神秘感得以减少,从而为更多的读者打开 SAR 成像之门,为 SAR 数据的新的应用创造更好的环境。

John C. Curlander
Robert N. McDonough
Pasadena, California
Laurel, Maryland
April, 1991

目 录

第 1 章	SAR 导论	1
1.1	SAR 在遥感中的作用	3
1.1.1	电磁频谱的遥感应用	5
1.1.2	遥感计划	6
1.2	SAR 理论概述	9
1.2.1	沿航迹方向（方位向）的分辨率	11
1.2.2	多普勒滤波	14
1.3	合成孔径雷达的历史	18
1.3.1	早期历史	18
1.3.2	成像雷达：从 SLAR 到 SAR	18
1.3.3	SAR 处理器的发展	20
1.3.4	SAR 系统的现在和未来	22
1.4	SAR 数据应用	29
1.4.1	SAR 数据特性	29
1.4.2	电磁波与地表的相互作用	30
1.4.3	面散射：模型和应用	32
1.4.4	体散射：模型和应用	36
1.5	小结	42
	参考文献	42
第 2 章	雷达方程	47
2.1	雷达功率	47
2.2	天线性能	50
2.2.1	天线增益	53
2.2.2	天线方向图	56
2.3	目标的雷达截面积	60
2.4	天线接收孔径	62
2.5	热噪声	64
2.6	源噪声和接收机噪声描述	66
2.6.1	信号源噪声	67
2.6.2	接收机噪声	72
2.6.3	实例	77
2.7	点目标雷达方程	80

2.8 分布目标雷达方程	81
参考文献	83
第3章 匹配滤波器和脉冲压缩	85
3.1 匹配滤波器	85
3.1.1 匹配滤波器的起源	86
3.1.2 分辨率问题	88
3.2 脉冲压缩	91
3.2.1 线性度、格林函数和压缩	91
3.2.2 匹配滤波器和脉冲压缩	95
3.2.3 时间旁瓣和滤波器加权	99
参考文献	103
第4章 成像和正交算法	104
4.1 成像算法的引入和综述	104
4.1.1 数据坐标系和系统冲激响应	105
4.1.2 成像算法综述	111
4.1.3 距离徙动和聚焦深度	116
4.1.4 实例	120
4.2 压缩处理	123
4.2.1 距离压缩处理	123
4.2.2 时域方位处理	127
4.2.3 时域距离徙动补偿	128
4.2.4 频域方位处理	133
参考文献	142
第5章 成像中的辅助处理	144
5.1 数字距离处理	144
5.2 斑点和多视处理	147
5.3 杂波锁定和自聚焦	152
5.3.1 杂波锁定	153
5.3.2 自聚焦	161
5.4 方位模糊的解决	163
参考文献	170
第6章 SAR飞行系统	172
6.1 系统概述	172
6.2 雷达性能测量	176
6.2.1 线性系统分析	176
6.2.2 非线性系统分析	180
6.3 雷达子系统	182

6.3.1	时序与控制	182
6.3.2	射频电路	182
6.3.3	天线	189
6.3.4	数字电路和数据路由	193
6.4	平台和数传	197
6.4.1	信道误差	197
6.4.2	下传数据率降低技术	198
6.4.3	数据压缩	200
6.4.4	分块浮点量化	201
6.5	系统设计考虑	205
6.5.1	模糊分析	206
6.5.2	PRF 选择	212
6.6	小结	214
	参考文献	215
第 7 章	SAR 数据辐射定标	217
7.1	术语的定义	217
7.1.1	一般术语	218
7.1.2	定标性能参数	218
7.1.3	参数特性	219
7.2	定标误差源	219
7.2.1	传感器子系统	220
7.2.2	平台和数传子系统	223
7.2.3	信号处理子系统	223
7.3	辐射误差模型	224
7.4	雷达方程	226
7.5	辐射定标技术	227
7.5.1	内定标	228
7.5.2	外定标技术	234
7.5.3	极化雷达定标	243
7.6	辐射定标处理	246
7.6.1	定标处理器	247
7.6.2	定标算法设计	249
7.7	极化数据定标	254
7.8	小结	255
	参考文献	256
第 8 章	SAR 数据的几何定标	259
8.1	术语定义	259
8.2	几何失真	260

8.2.1	传感器误差	260
8.2.2	目标定位误差	262
8.2.3	平台星历误差	264
8.2.4	目标距离误差	265
8.3	几何校正	271
8.3.1	图像的重采样	271
8.3.2	地平面, 扭曲的投影	273
8.3.3	光滑椭球体的地理编码	275
8.3.4	地形测量图的地理编码	279
8.4	图像配准	286
8.4.1	拼接图像	287
8.4.2	多传感器图像配准	288
8.5	小结	294
	参考文献	295
第9章	SAR 地面系统	298
9.1	相关器技术要求的确定	299
9.1.1	多普勒参数分析	299
9.1.2	方位处理带宽	303
9.1.3	距离参考函数	304
9.2	相关器算法选择和计算分析	304
9.2.1	谱分析算法	305
9.2.2	频域快速卷积	308
9.2.3	时域卷积	309
9.2.4	方位相关器的比较	310
9.2.5	距离相关	313
9.3	SAR 相关器结构	314
9.3.1	结构设计要求	315
9.3.2	流水运算处理器	316
9.3.3	公共节点结构	320
9.3.4	并发处理器结构	325
9.4	后处理系统	329
9.4.1	后处理技术要求	330
9.4.2	辐射校正	332
9.4.3	几何校正	333
9.4.4	后处理器结构	338
9.5	图像数据浏览系统	339
9.5.1	浏览系统的技术要求	340
9.5.2	在线归档系统的排队分析	340

9.5.3 图像质量	341
9.5.4 压缩算法复杂度分析	343
参考文献	347
第 10 章 其他成像算法	350
10.1 解斜压缩处理	351
10.2 分步变换处理	353
10.3 极坐标处理	362
10.3.1 极坐标处理的基本思想	363
10.3.2 极坐标处理的细节	366
10.3.3 极坐标处理的一种自聚焦过程	369
参考文献	373
附录 A 数字信号处理	375
附录 B 卫星轨道和压缩滤波器参数	396
附录 C 阿拉斯加 SAR 设施	415
附录 D 非线性失真分析	430
参考资料	433
数学符号	435
缩略语对照表	444
中英文术语对照表	448

第1章 SAR 导论

1951年, Wiley第一次发现侧视雷达通过利用回波信号中的多普勒频移可以改善方位分辨率。这个里程碑式的发现标志着现在称为合成孔径雷达(synthetic aperture radar, 简称 SAR)技术的诞生。在此后的数年间, 展开了一系列研究工作, 使传感器和信号处理两部分的性能都得以稳步提高。尽管大多数早期工作的目的是探测和跟踪运动目标之类的军事应用, 但把这种设备用来作为科学应用中的成像传感器的潜力还是得到了广泛认同。

在成像雷达出现之前, 绝大多数的高分辨率传感器是具有检测器的照相系统, 这些检测器能够感应到地球表面反射的太阳能或热辐射。SAR则代表对地观测的另一种完全不同的技术。雷达是一个有源系统, 它发射一束电磁频谱中微波段的电磁波, 使我们能观察以前无法观察的地球表面特征。作为一种有源系统, SAR主动发射能量而不依赖太阳光照, 确保了全天时观察。而且, 云、雾和降水对微波影响都不大, 保证了全天候成像。这样, SAR系统就具备了连续观测运动现象的能力, 如洋流、海洋冰山运动和植物生长情况等(Elachi et al., 1982a)。

传感器系统通过用一个一定物理尺寸孔径的天线来接收地面辐射。在常规(非SAR)系统中, 角度分辨率由电磁波辐射波长和天线尺寸之比来决定。图像的空间分辨率等于角度分辨率与传感器至地球表面的距离之积。当传感器高度增加时, 如果不加大孔径尺寸, 则空间分辨率将下降。对于微波设备, 由于一般情况下其波长比光波长100 000倍, 用常规尺寸孔径得到高分辨率图像是不可能的。例如, 考虑一个安装在800 km高度上的海洋卫星(Seasat) SAR系统, 天线尺寸为10 m(见图1.1), 雷达波长为24 cm, 则实际孔径分辨率约20 km。为了达到类似于Landsat热成像设备的25 m分辨率, 天线长度需达到8 km。

为了不增加天线物理尺寸而提高分辨率, 需要采用合成孔径技术。合成孔径雷达由于保持了后向散射回波的幅度和相位, 所以是一个全相参的系统。在这个系统中, 通过信号处理将非常长的天线孔径合成起来, 以获得高分辨率。一般情况下是通过在地面计算机中进行数字化处理来实现的, 其方法是补偿二次相位特性, 而该特性与实际上使用的长合成阵列的近场成像相关联。最终效果是SAR系统能够得到与传感器高度无关的分辨率。这一特性使得SAR在空间观察中非常有价值。

为了实现一个监测地球表面的SAR运行系统, 要解决一系列技术问题, 在本书中将详细阐述其中两个特殊领域:(1)设计并建立一个可靠的高速地面数据系统;(2)端到端的系统定标方法和技术。

地面数据系统

设计用于全球覆盖的任何一个高分辨率遥感传感器必定要产生海量数据。对于SAR来说, 还有另外一个因素, 即为了从下行信号数据形成图像, 对每个采样数据必须进行数以百计的数学运算。例如, 15 s(100 km × 100 km)的海洋卫星图像帧包含了数亿个采样数据。把这些数据实时地数字化处理成图像, 需要使用每秒几十亿次浮点运算的计算机系统。因此, 早期的

数据处理使用了采用激光源的光学处理、傅里叶光学透镜和胶片。早期的数字相关器仅能处理所获得数据的很小一部分,而且通常只是近似地运用精确匹配滤波成像算法,以适应计算机硬件能力的限制。这些信号处理器性能限制的结果是图像质量下降,其动态范围很有限,而且不能可靠地定标。由于光学处理的图像不一致,存在质量问题,而且数字产品的性能和数量有限,所以限制了 SAR 数据在形成初期的科学应用。

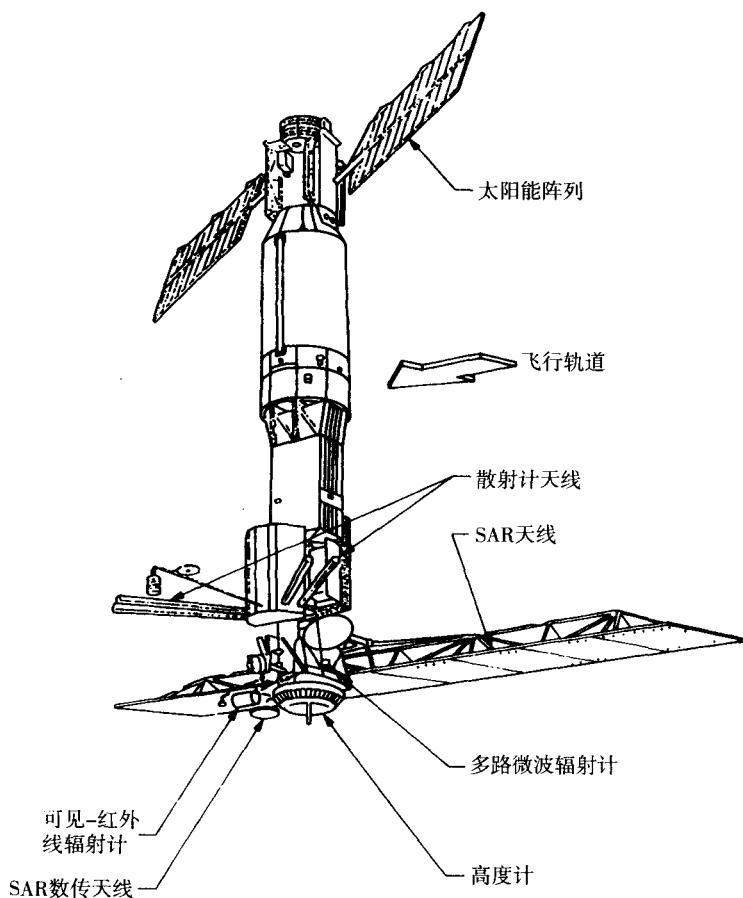


图 1.1 Seasat-A SAR 卫星说明

几何定标和辐射定标

图像的几何定标 (geometric calibration) 指的是将一个图像像素与地面上的固定网格精确配准。辐射定标 (radiometric calibration) 指的是一个图像像素与目标散射特征的精确相关。对于侧视测距设备,如 SAR,地面起伏引起的几何畸变尤为严重。精确校正需要另一个成像通道 (立体成像或干涉成像) 或地形图。辐射畸变主要由系统效应引起,需要定标设备精确地测量,以推导出处理器校正因子。为了达到大多数科学分析所需的定标精度,需要一个利用内部 (机内装置) 测量和外部 (地面配备装置) 测量的复杂处理过程。由于这些定标方式操作起来很困难,所以仅在特殊情况下才让 SAR 系统产生辐射定标和几何定标数据。未定标好的数据对于数据的科学应用的影响是深远的。没有定标好的数据,就不能实现 SAR 数据的定量分析,因而无法实现数据集的全部价值。

在过去的几十年中,在数字计算技术、SAR信号处理和系统定标算法等方面已取得了重要进展。与作为这些算法的基础的技术发展同样具有挑战性的是其在真实系统中的实际实现。在本书中,我们首先从原理入手,推导出雷达方程和相参孔径理论,然后将这些概念直接引入SAR成像方法所需的信号处理算法。随后讨论对最终数据产品实施辐射和几何定标所需的后处理算法。对不同的雷达系统误差源以及满足这些算法计算量所要求的处理器结构,本书也进行了论述。

1.1 SAR 在遥感中的作用

在前言中已经提到了使SAR成为遥感方面独特设备的几个重要特性:(1)全天时和全天候成像;(2)几何分辨率与传感器高度及波长无关;(3)电磁频谱中微波波段独有的信号数据特性。在后面的章节中会讨论合成孔径包含的理论和实现高分辨率的脉冲压缩技术理论。这一节主要介绍SAR数据与其他地面观测传感器的不同特点。作为一个有源系统,SAR属于包含了所有雷达(如高度计、散射计和激光器)的一类设备。与无源传感器(如照相机或辐射计)不同的是,这些设备发射一个信号并测量反射波。有源系统不依赖外界辐射源,如太阳和核辐射,因此太阳的存在与成像处理无关,尽管有可能对目标散射特性有影响。而且,雷达频率是可以选择的,以使它由于大气分子(氧或水蒸气)造成的吸收(衰减)很小。图1.2说明了以大气透射百分率与频率(波长)的关系反映的吸收带。可以看到,在1~10 GHz(3~30 cm),透射率接近100%。因此,不管有没有云和降水,工作在这一频段上的SAR都能对地面成像。

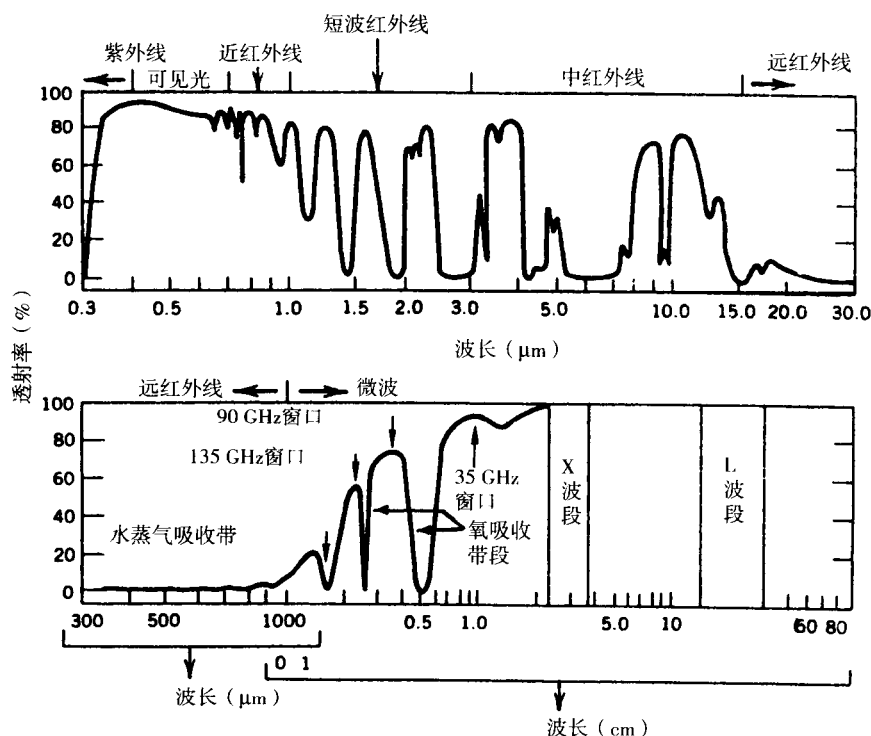


图 1.2 电磁频带微波段的大气透射百分率

随着雷达频率的升高,传播衰减也增加了。在 22 GHz 处为水蒸气吸收带,单程有近 85% 的传播衰减,而在 60 GHz 附近,氧吸收带基本上阻止了任何信号到达地面。在这些吸收带附近有若干窗口,在这些窗口处,地面的高频微波成像是可能的。这些窗口对于一些实孔径系统,如高度计和微波辐射计是有用的(它们依靠较短的波长,即较窄的辐射波束来实现高分辨率)。此外,对于干涉 SAR 系统而言,地形高度的测量精度随着天线基线间隔的增大而提高,或等效于随着波长的降低而提高(Li and Goldstein, 1989)。对这种应用来说,35 GHz 窗口是个有吸引力的频率。

然而,雷达波长的选择并不单从分辨率和大气吸收特性来考虑。发射的电磁波和地面之间的相互作用机理与波长有很大的相关性。电磁波与地面通过不同的机理相互作用,这种机理与地面组成和结构都是相关的。在星载 SAR 系统工作的微波频段(1~10 GHz),散射波的特征(频率、相位和极化)与两个因素相关:地面的电特性(介电常数)和地面的起伏程度。

作为一个例子,考虑一个荒凉(无植被)的目标区,表面散射是主要的相互作用机理。对于侧视状态(即雷达波束以偏离星下点大于 20° 的角度指向地面),假如雷达波长大于地面起伏度,则可以认为地表是平滑的,此时地面后向散射能量就很小。反过来,当雷达波长与地面的均方根高度成比例时,入射能量中的很大一部分将反射回雷达系统。这种散射特征作为波长的函数示于图 1.3 中(Ulaby et al., 1986)。注意,作为均方根高度和入射角函数的后向散射与雷达频率或波长密切相关。人们发现,波长与介电常数也有相似的关系。通常,一部分入射波将穿透地表,被地表下的物质吸收。这种穿透特征主要与雷达波长和地面介电特性有关。在土壤湿度测量和地下探测应用方面,这是很重要的,雷达波长的适当选择将确定它对地面介电特性的敏感度。

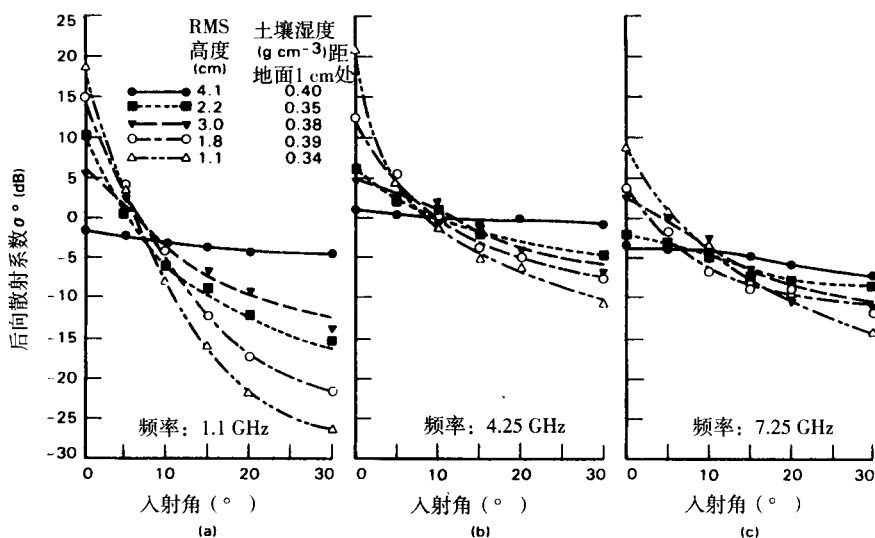


图 1.3 3 种雷达频率下的归一化后向散射系数与地面粗糙度的关系(Ulaby et al., 1986)

因此,雷达波长的选择受大气效应和地面散射特性的影响。除了雷达波长和地面特征(如粗糙度和介电常数)之间的关系以外,还有其他一些可用来进一步确定地面特征的系统参数,如成像几何学和波的极化等。这些应用及其所基于的散射机理将在 1.4 节中讨论。还有一些影响雷达工作频率选择的传感器设计的约束因素将在第 6 章中讨论。

1.1.1 电磁频谱的遥感应用

尽管SAR对于测量地面特征有独特的能力,但它的工作频段仅占电磁频谱的一小部分,因此不可能用单个设备(如SAR)全部测定地表面特征。为了获得地表面的化学、热、电和物理等特性的全部描述,需要一组覆盖大部分电磁频谱的传感器。图1.4给出了不同频谱设备,从无线电频段($25\text{ cm} \leq \lambda \leq 1\text{ km}$)到紫外频段($0.3\text{ }\mu\text{m} \leq \lambda \leq 0.4\text{ }\mu\text{m}$)。

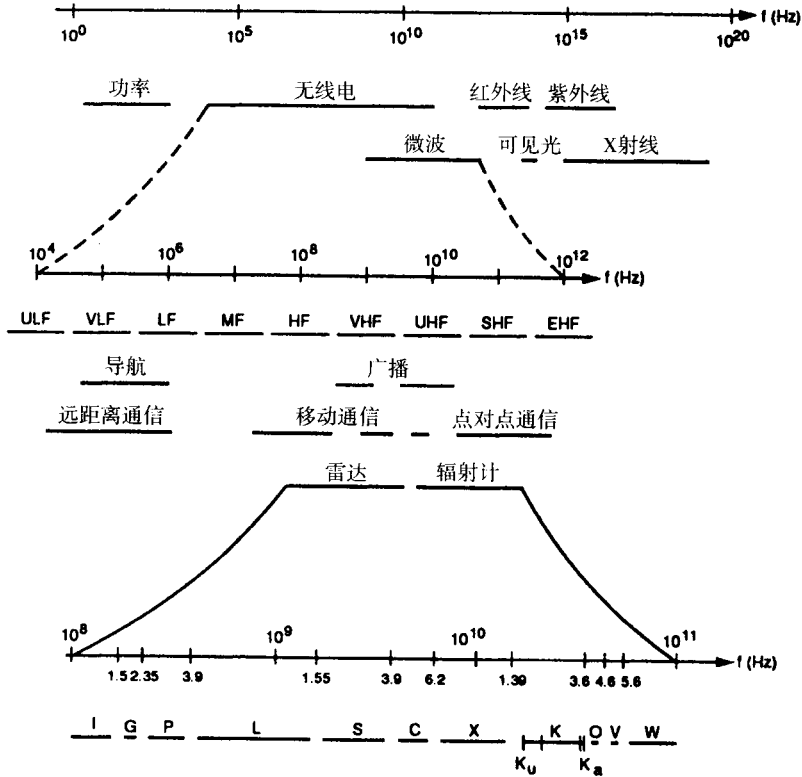


图 1.4 电磁频谱上各频段的定义

每个电磁频段都在遥感的某一方面起着重要的作用。为了测定地面特性,除微波频段以外,最有用的频段是红外($3\sim 30\text{ }\mu\text{m}$)和可见光/近红外($0.4\sim 3\text{ }\mu\text{m}$)。在低于1 GHz的频段,电离层扰动和地面干扰控制了接收信号特征,而在毫米波和亚毫米波段($100\text{ GHz}\sim 10\text{ THz}$),很多分子吸收带提供了大气构成信息,但有关地表特征的信息很少或几乎没有;在热红外波段,担任测量的传感器,如热容量测绘任务(Heat Capacity Mapping Mission, 简称 HCMM)辐射计(Kahle et al., 1981),以及那些可见光/近红外区的传感器,如SPOT和Landsat热测绘仪(Thematic Mapper, 简称 TM)(Freden and Gordon, 1983),可测出地表特征。它们与SAR测量数据互为补充,热红外带($10\sim 15\text{ }\mu\text{m}$)能探测与观测物体的分子振荡和旋转特征有关的表面(和大气)辐射。物体的表面温度和比热信息能根据测量数据给出。在可见光和近红外区,能测量振动和电子分子运动。通过这些信息能推断出地表面的化学组成、植被和生物特征。

在微波段($1\sim 300\text{ GHz}$),在标称的SAR频段 $1\sim 10\text{ GHz}$ 外,在大气吸收带中存在几个窗口。大多数有源孔径雷达系统,如散射计和高度计,工作在 $10\sim 20\text{ GHz}$ 频段(Ulaby et al.,

1982)。这些都不是成像设备,更确切地说,它们收集时间序列数据,主要用于海洋成像和气象应用。在微波频谱(30~300 GHz)的极高频率范围,仅有35 GHz,90 GHz和135 GHz大气窗口用于地表特征观测。除少数例外,仅有无源系统(如微波辐射计)工作在此区域。这些传感器测量地表亮度温度(物体辐射强度),这些数据连同地表辐射信息模型可用来确定地表特征。极高频星载辐射计的一个重要应用是测量极区冰山范围,并确定冰的类型。其他应用还有测量陆地表面特征,如积雪覆盖和土壤湿度。这些数据已很少与SAR数据一起采用,因为其分辨率比典型的SAR系统差了几个数量级。对于辐射计图像的每个分辨单元,SAR图像可能包含1000~10 000个单元。尽管分辨率差异很大,但是星载辐射计在SAR数据的地球物理解译中仍然起着重要作用,尤其是在SAR系统的绝对定标方面非常有用。

1.1.2 遥感计划

假如在每个关键的电磁波段上都有一组定标了的遥感传感器对地表进行测量,就可以建立起很宽范围的地表特征。这些数据能够比任何单台设备提供更详细的地表特征描述。实施对地表和大气进行探测和监视的综合计划时,遇到的实际困难是大多数科学研究所用的设备很有限,其原因是受经费和政治、技术等诸多因素的约束。而且,就其系统定标和信号处理而言,SAR技术已经比较成熟,可认为SAR数据能够进入这些多传感器数据的协同应用中。然而,导致综合多传感器遥感计划启动的最重要原因是人们对地球环境变化的担忧(臭氧层减少、地球变暖、酸雨和污染等)日益增加。

在这个全球都在关注环境变化的时代,大家已经认识到,需要一个遥感计划来定量监视制约环境变化的表象过程。即使采用最先进的SAR技术,以及分布在很宽电磁频谱的其他一些传感器的改进,测出这些变化的特征仍然是极其困难的任务。遥感仅使我们能提取到生物信息和地理信息。为了理解其中包含的控制全球变化的机理,还需要利用这些观测数据建立一个参数化的大尺度模型。

在开发这些过程的全球模型之前(例如,水文或碳的循环),必须研究了解各个仪器的性能。例如,每个仪器对某一特定的地球物理参数是否灵敏,诸如土壤的含水量或森林的生物量密度;哪些环境参数是完成可靠测量的关键变量。为此目的,在利用航空及航天遥感数据方面已取得明显进展。对这一领域的进展进行详细评论已超出本书的范围,相关内容已有技术期刊收录,如*Journal of Geophysical Research*, *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*,也可参见一些专题论文(Colwell, 1983a, b; Elachi, 1987)。

地球观测系统

在进一步理解这些传感器系统,以及将这些测量集成到对大气、海洋和陆地同时观测的协同工作框架的努力下,最近已启动了国际遥感计划(Butler et al., 1984)。美国航空航天局(United States National Aeronautics and Space Administration, 简称NASA)与欧洲航天局(European Space Agency, 简称ESA)以及日本航天开发局(National Space Development Agency of Japan, 简称NASDA)共同致力于该计划(NASA, 1988)。这项计划称为地球观测系统(Earth Observing System, 简称EOS),该系统将在轨道上布置一系列遥感平台,装载有分布在很宽频谱的各种设备。图1.5所示的第一个平台计划于1998年开始使用。该计划的主要目的是监视地球的变化,这些变化包括人类的影响和自然影响两部分。更进一步的目的是理解产生这些变化的机理和预测未来变化的趋势。