

海洋遥感导论

An Introduction to
Ocean Remote Sensing

(美) Seelye Martin 著
蒋兴伟 等 译



海洋出版社

海洋遥感导论

An Introduction to Ocean Remote Sensing

(美) Seelye Martin 著

蒋兴伟等 译

海洋出版社

2008年·北京

图书在版编目(CIP)数据

海洋遥感导论/(美)马丁(Martin, S.)著;蒋兴伟等译. —北京:海洋出版社,2008.5

书名原文:An Introduction to Ocean Remote Sensing
ISBN 978-7-5027-7186-7

I. 海… II. ①马…②蒋… III. 海洋观测卫星-卫星遥感 IV. P715.6

中国版本图书馆CIP数据核字(2008)第074375号

© Cambridge University Press 2004

This book is in copyright. Subject to statutory exception and to the provisions of relevant collective licensing agreements, no reproduction of any part may take place without the written permission of Cambridge University Press.

责任编辑:杨传霞

责任印制:刘志恒

海洋出版社 出版发行

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

北京市海淀区大慧寺路8号 邮编:100081

北京画中画印刷有限公司印刷 新华书店北京发行所经销

2008年5月第1版 2008年5月北京第1次印刷

开本:787 mm × 1092 mm 1/16 印张:24.5(彩色插页:10)

字数:500千字 定价:98.00元

发行部:62147016 邮购部:68038093 总编室:62114335

海洋版图书印、装错误可随时退换

为了纪念我的母亲

Lucy Gray Martin

(1915年4月19日—2002年6月13日)

——Seelye Martin

译者介绍



蒋兴伟,男,1959年3月生,理学博士,研究员,现任国家海洋环境预报中心、国家卫星海洋应用中心主任,海洋一号卫星工程地面应用系统总设计师,中国海洋学会、中国海洋与湖沼学会海洋遥感专业委员会主任委员,中国海洋学会常务理事,中国遥感应用协会副理事长。

长期从事物理海洋、航天遥感和信息系统等方面工作,主持或承担国家多项重点科研任务。曾获国家科技进步特等奖(集体)、二等奖,国家海洋局科技海洋创新成果一等奖、科技进步二等奖、三等奖;1992年起享受政府特殊津贴,并荣获“全国优秀科技工作者”称号,国家中青年有突出贡献专家,全国先进工作者。

中文版序

非常高兴我的书被翻译成中文。中国的空间计划以及以“海洋”和“风云”卫星为代表的地球和海洋卫星观测的静止与极轨平台计划十分成功。这归功于科学团体富有成效的工作。本书能够为这些计划做些贡献,我感到非常自豪。

很遗憾,本书 2003 年出版时,书中所描述的计划有些延迟了,有些取消了。首先,特别要指出的是,ICESat 的后续计划——在第 14 章中描述的载有激光高度计系统(GLAS)——用于格陵兰岛和极地冰盖测量的卫星,将延迟到 2012 年。其次,在第 12 章中描述的宽幅海洋高度计(WSOA)任务已经取消。第三,在海表面风测量方面,美国还没有决定是否继续发射第 11 章中描述的主动微波 QuikSCAT 仪器,欧空局仍计划在其极轨 METOP 卫星上继续装载先进的微波散射计(ASCAT)。第 9 章和第 14 章中描述的被动微波风传感器(WINDSAT)已经工作,但被动微波辐射计在低风速时灵敏度较差。

由于上述变化,意味着表 1.1 和第 14 章中某些卫星计划的时间不是很确切。书中一些网站的网址(URL)列表也发生了变化。如果读者需要更多这些卫星的信息,我推荐使用搜索引擎如 Google 进行搜索。

最后,书中提供的诸如全球气候变化、海洋初级生产力与海平面上升、多国参与的海洋遥感和天气预报等信息,将有益于地球上的所有人。希望本书的成功翻译可为卫星观测原理的国际普及和海洋研究的多国合作做出贡献。

Seelye Martin

2005 年 7 月

译者序

21世纪是海洋的世纪,也是世界航天活动蓬勃发展的世纪。海洋和空间是重要的发展领域和科技发展的前沿技术阵地。在全球海洋环境的观测中,卫星无疑扮演了重要的角色。从卫星平台观测和研究海洋学已经成为一门新兴的学科。

近年来,卫星观测海洋在技术上取得了许多重要的新成果,在可见光、红外和微波遥感等探测方面都有新的进展,海洋空间观测计划大量增多,目前在全球对地观测中占有重要的地位。海洋遥感是海洋环境监测必不可少的手段,是海洋立体监测系统的重要组成部分。利用卫星对海洋的监测具有全天时、全天候的工作能力和范围大、时效性高等特点,进行大面积、同步的海洋环境监测,可连续不断地提供全球海洋环境多频段、高时空分辨率的遥感资料,已成为探测海洋环境要素的主导手段。

本书是一本非常系统而全面地介绍海洋遥感理论和方法的专著,特别是在提供目前最新的理论研究成果的同时,详细介绍了全球各种的海洋卫星观测计划。本书作者 Seelye Martin 是物理海洋领域的知名专家,著有数篇学术论文。本书介绍了目前海洋遥感领域主要卫星遥感的原理、方法和未来发展趋势。每章后都给出了最新的参考信息源。本书体系完整,内容全面,理论与实际应用并举,可供国内从事海洋遥感领域研究的人员和有关院校专业的师生参考。

完成本书翻译和审定的人员有:蒋兴伟、林明森、刘建强、唐军武、王其茂、张有广、吴奎桥、彭海龙、王晓慧、冯倩、丁静、马超飞、邹斌等。

由于翻译时间匆忙,书中难免会有错误和不当之处,恳切读者提出宝贵的建议和批评。

译者

2008年1月

前 言

在过去的 20 多年中,海洋观测卫星在数量和种类上都有了很大发展。这种发展结合了计算资源和接收分发网络的发展,已经极大地加深了我们对海洋和大气特性的了解。在同一时期,越来越多的国家发射海洋卫星或者研制海洋卫星上的仪器。20 世纪 80 年代早期,只有美国和前苏联拥有海洋观测计划。而 2000 年,拥有海洋观测计划的国家或地区包括巴西、加拿大、中国、欧洲、印度、日本、韩国、中国台湾地区、俄罗斯、乌克兰、美国,此外还有多家私人公司。

电磁波谱在海洋观测中的应用,结合我们对海洋表面和大气性质的了解是大量新仪器研制的出发点。许多在 20 世纪 80 年代还是试验性的仪器现在已经是海洋学研究的基本工具,包括使用窄波段光学传感器估计生物初级生产力和观测浮游生物相关的荧光特性;用红外波段测量海面温度达到观测气候变化需要的精度;被动微波遥感器提供了全球不受云影响的海面温度观测;高度计测量海面高度的精度达到 2 cm。由于计算机资源的高效利用,可以迅速获得这些数据并且经常发布在公共网站上。

遥感主要是使用电磁波谱观测海洋,其次是观测与重力场相关的洋流和潮汐。遥感包括很多学科,本书提供了涵盖电磁理论的背景知识、大气和海洋性质、物理和生物海洋学、海面物理特性和卫星轨道理论。所讨论的内容从云以及泡沫的反射和发射特性到海洋波浪的雷达散射特性及浮游生物相关的色素光学特性。本书讲述了 1975—2004 年卫星海洋学的发展,并展望了到 2019 年的遥感卫星计划。根据书中所涉及的内容,本书只介绍电磁理论和微分方程的基本知识。

本书正文分五大部分,第 1~3 章提供卫星系统、海洋表面性质和电磁理论的介绍。第 4~7 章讨论可见光和红外波段谱段遥感,包括大气性质、海洋/大气界面、可见光海洋水色反演和红外波段海面温度反演。第 8~9 章讨论被动微波遥感,包括天线、仪器、大气性质及海面和大气要素反演。第 9~13 章讨论主动微波遥感,包括使用各种类型雷达反演风速和风向、海面高度和海面成像。最后,第 14 章讲述了 2004—2019 年间已批准和已建议的卫星计划。

我在 1993—1994 年间完成了本书的初稿,那时我是东京国家极地研究所的

访问学者。我非常感谢研究所给我提供的机会,并感谢 Takao Hoshiai 和 Nobuo Ono 邀请了我。也感谢日本教育科学和体育文化部以及华盛顿大学海洋和渔业科学学院院长 Ross Heath 提供的财政资助。

这本书也得益于我在 NASA 的工作经验,我特别感谢 Dixon Butler 和其他 EOS 指导委员会的成员在 3 年的工作期间对我的帮助,对 NASA 总部的海洋和海冰部的 Robert Thomas、Kim Partington 及 Waleed Abdalati 提供的研究帮助表示感谢。我与 Miles Logsdon 一起教授本书的主要内容。谢谢 Miles 和所有的学生,他们给予了我很大的帮助。在我的教学中,我也得益于 Dudley Chelton、James Mueller 和 Carlyle Wash 的笔记,以及 Charles Elachi、George Maul、Ian Robinson 和 Robert Stewart 的教科书。

在 GSFC 工作期间,我感谢 William Barnes、Don Cavalieri、Josephino Comiso、Wayne Esaias、Antony Liu、Charles Koblinsky、Charles McClain、Claire Parkinson 和 Menghua Wang;感谢 Brigham Young 大学的 David Long、JPL 的 Robert Benada、Ben Holt、Ron Kwok、Lee Fu、Timothy Liu、Son Nghiem、William Patzert、Ernesto Rodriguez 和 Simon Yueh。同时我也特别感谢 GSFC 的 Gene Feldman 在 SeaWiFS 上的帮助。感谢在 NOAA 的 Pablo Clemente - Colon、Maria Colton、Michael、Mignogno、Stan Wilson 和 Michael Van Woert,在欧洲空间局(ESA)的 Mark Drinkwater, CNES 的 Yann Kerr,SeQuoia Scientific 的 Curtis Mobley。感谢海军研究实验室(NRL)的 Gene Poe 和 Karen St. Germain,俄勒冈州立大学的 Dudley Chelton 和 Michael Freilich,蒙特罗湾水族馆研究中心的 Francisco Chavez,地球和空间研究所的 Gary Lagerloef,国家极轨业务化环境卫星系统(NPOESS)集成计划办公室的 James Jolley 及遥感系统的 Chelle Gentemann、Tom Meissner 和 Frank Wentz。感谢阿拉斯加大学的 Kevin Engle 和 Nettie LaBelle - Hamer,加州圣地亚哥大学的 Detlef Stammer 和 William Melville,加州欧文大学的 Djamel Khelif 和 Jon Stairs。感谢 Scott 极地研究所的 Peter Wadhams,南开普顿海洋中心的 Paolo Cipollini 和 Meric Srokosz,东京 Mercantile 海洋大学的 Manami Ide 和 Shogo Hayashi,佛罗里达州立大学的 James J. O'Brien、Mark Bourassa 和 Josh Grant,迈阿密大学的 Peter Minnett,缅甸州立大学的 Mary Jane Perry 和 Brandon Sackmann。感谢 Leonid Mitnik 提供俄罗斯和乌克兰的空间计划,感谢 Alcatel 空间、Ball 宇航技术公司、波音卫星系统、Northrop Grumman 公司、Orbimage 和 Raytheon 公司允许使用它们的图片和数据。其他的致谢见正文。

在华盛顿大学(UW),我感谢原海洋学院主任、现院长 Arthur Nowell 的支持。我也感谢现在的主任 Bruce Frost,更感谢 Neal Bogue、Robert Brown、Laurie Bryan、Robert Drucker、David English、Charles Eriksen、Rita Horner、Andrew Jessup、Kristina Katsaros、Evelyn Lessard、Ellen Lettvin、David Martin、Jerome Patoux、William Plant、Penny Rowe、Drew Rothrock、Kittie Tucker 和 Dale Winebrenner。感谢 UW 图书馆的工作人员,谢谢他们迅速恢复了海洋工程图书馆。

我也感谢 Lin Robinovitch 在图表制作中提供的帮助,并感谢 NASA 允许使用 NAGW - 6894 的资金支持她的工作,感谢海洋学院在图表准备上的帮助。感谢我的堂妹 Ann Warren Turner 提供的写作计划,感谢 Anne Lamott 建议我把 *Bird by Bird* 一书作为文章组织结构和写作的模版。感谢 Mary Jane Perry 在生物学上的帮助并认真阅读了生物学章节的初稿,感谢 Ted Straub 读了其中的几章,感谢 Mike Alfultis 对全书的仔细批注,我也十分感谢 Gary Mineart 对整书进行了编辑整理,还有 Chaumin Hu 对书中的几个公式进行了修正。

本书中引用的许多文章、报告和讲稿来自网站中,这些网站由 NASA、ESA 和 JAXA 等机构维护。因为它们网址可能会改变,在这种情况下,这些资料可以用 Google 等搜索引擎找到。感谢剑桥大学出版社的 Jayne Aldhouse、Susan Francis、Matt Lloyd、Margaret Patterson 和 Sally Thomas。

感谢我的父母 William Ted Martin 和 Lucy Gray Martin,是他们的大力支持使得本书能够顺利完成。感谢我的儿子和女儿,Carl William Coryell - Martin 和 Maria Elizabeth Coryell - Martin,他们对全书做了统稿。感谢我的妻子 Julie Esther Coryell 对我的鼎力支持,她认真阅读了全书草稿。最后,请读者记住本书中的每个卫星、仪器和算法都是从一个人或一个小组产生的想法开始的。

Seelye Martin

目 次

化学符号	(1)
数学符号	(2)
英文缩写词	(10)
1 绪论	(17)
1.1 概述	(17)
1.2 遥感的定义	(18)
1.3 卫星轨道	(19)
1.4 地球同步轨道卫星	(23)
1.5 美国太阳同步轨道卫星	(23)
1.6 成像技术	(26)
1.6.1 观察地球表面	(26)
1.6.2 交叉轨道或垂直轨道扫描仪	(27)
1.6.3 沿轨或推扫式扫描仪	(29)
1.6.4 混合垂直轨道扫描仪	(29)
1.6.5 分辨率	(30)
1.7 图像数据处理	(31)
1.8 过去、现在和将来的卫星计划	(31)
1.8.1 美国海洋卫星研究计划的发展	(32)
1.8.2 直到 2007 年的卫星计划	(33)
1.9 更多参考资料和致谢	(37)
2 海洋表面现象	(38)
2.1 概述	(38)
2.2 海洋表面的风和波	(38)
2.2.1 随着振幅的增加波浪外形的变化	(41)
2.2.2 波浪破碎、能量吸收和泡沫的特性	(42)
2.2.3 波浪的均方根振幅和有效波高	(44)
2.2.4 海表面波面斜率的方位分布	(45)
2.2.5 表面油膜	(46)
2.3 洋流、地转流和海面高度	(46)
2.4 海冰	(50)

2.5	更多参考资料和致谢	(51)
3	电磁辐射	(53)
3.1	概述	(53)
3.2	电磁辐射的描述	(53)
3.2.1	电磁波谱的应用	(54)
3.2.2	色散关系和折射系数	(56)
3.2.3	立体几何回顾	(57)
3.3	描述电磁辐射的方法	(60)
3.3.1	朗伯面	(62)
3.3.2	光谱特性	(62)
3.4	理想发射体的辐射	(63)
3.4.1	普朗克公式的特性	(64)
3.4.2	普朗克公式的频率形式	(65)
3.4.3	普朗克公式的一些极限形式	(66)
3.4.4	吸收与发射	(66)
3.4.5	基尔霍夫(Kirchoff)定律	(67)
3.5	理想仪器	(67)
3.5.1	瑞利准则	(68)
3.5.2	简单望远镜	(69)
3.5.3	倾斜观察仪器	(70)
3.5.4	有限带宽仪器和噪声处理	(72)
3.6	更多参考材料和致谢	(73)
4	大气特性与辐射传输	(74)
4.1	概述	(74)
4.2	大气特性	(74)
4.2.1	大气中的水	(76)
4.2.2	云	(77)
4.2.3	大气气溶胶	(77)
4.2.4	臭氧	(78)
4.2.5	电离层的自由电子	(78)
4.3	分子吸收与发射特性	(79)
4.3.1	分子消光特性	(80)
4.3.2	光学厚度与透过率	(82)
4.3.3	发射特性	(82)
4.4	散射	(83)

4.4.1	各向同性散射与散射相函数	(84)
4.4.2	瑞利散射和气溶胶散射	(84)
4.4.3	分子散射或瑞利散射	(85)
4.4.4	气溶胶散射或米散射	(86)
4.5	大气衰减	(86)
4.6	对理想仪器的应用	(90)
4.7	辐射传输方程	(91)
4.7.1	热发射源项	(92)
4.7.2	散射源项	(92)
4.7.3	穿过大气层的辐亮度传输方程的普遍解	(93)
4.8	特定条件下的 RTE 求解	(94)
4.8.1	以吸收 - 发射为主的情形	(95)
4.8.2	单次散射近似	(96)
4.8.3	气溶胶单次散射	(99)
4.9	漫射透过率和天空光	(99)
4.9.1	漫射透过率	(100)
4.9.2	天空光	(101)
4.10	更多参考资料和致谢	(101)
5	大气/海洋界面处的反射、透射和吸收	(102)
5.1	概述	(102)
5.2	界面	(103)
5.2.1	一般情况下的散射	(104)
5.2.2	平面界面的镜面反射与透射	(105)
5.2.3	菲涅耳方程	(106)
5.2.4	毛细波表面的反射	(107)
5.3	穿过界面的透射	(109)
5.3.1	从水下入射的辐射	(109)
5.3.2	折射的汇聚与发散	(110)
5.4	海水的吸收和散射特性	(112)
5.4.1	纯海水的光学特性	(113)
5.4.2	辐照度反射率	(114)
5.4.3	离水辐亮度	(116)
5.5	两种遥感反射率	(117)
5.6	白帽反射	(118)
5.7	更多参考资料和致谢	(118)

6	海洋水色	(119)
6.1	概述	(119)
6.2	浮游植物,颗粒和溶解物的散射和吸收	(121)
6.2.1	散射	(122)
6.2.2	吸收	(124)
6.3	海洋水色卫星遥感器	(127)
6.3.1	SeaWiFS	(131)
6.3.2	MODIS	(134)
6.4	大气校正和离水辐亮度的反演	(135)
6.4.1	总辐亮度的贡献因子	(135)
6.4.2	气溶胶散射辐亮度的确定	(139)
6.4.3	海洋气溶胶的分布	(141)
6.4.4	CZCS 大气校正算法	(142)
6.5	叶绿素反射与荧光	(142)
6.5.1	反射率	(142)
6.5.2	荧光	(143)
6.6	水色算法	(144)
6.6.1	两种算法及其反射率基础	(144)
6.6.2	SeaWiFS 最大波段比值经验算法	(145)
6.6.3	MODIS 经验算法	(148)
6.6.4	半分析算法	(149)
6.6.5	特定种类算法	(150)
6.7	卫星图像举例	(150)
6.7.1	OC4 处理的 SeaWiFS 图像	(151)
6.7.2	MODIS 反演举例	(153)
6.8	更多参考资料和致谢	(155)
7	红外遥感海表面温度	(156)
7.1	概述	(156)
7.2	什么是 SST	(158)
7.3	用于 SST 反演的 AVHRR 和 MODIS 波段特征	(160)
7.3.1	AVHRR 和 MODIS 热红外波段	(160)
7.3.2	AVHRR 数据形式	(162)
7.4	大气和海洋的红外特性	(162)
7.4.1	热红外波段的发射和反射	(163)
7.4.2	太阳辐射反射的贡献	(165)

7.5	SST 业务化算法	(167)
7.5.1	背景知识	(167)
7.5.2	AVHRR 业务化 SST 算法	(169)
7.5.3	表面匹配数据集	(170)
7.5.4	误差的环境来源	(171)
7.5.5	雷诺兹 SST 产品	(174)
7.5.6	MODIS 的 SST 算法	(174)
7.6	沿轨迹扫描辐射计	(175)
7.7	云检测算法	(176)
7.7.1	AVHRR 云检测算法	(176)
7.7.2	MODIS 云检测算法	(178)
7.8	图解和例子	(179)
7.8.1	AVHRR 图像分析	(180)
7.8.2	厄尔尼诺到拉尼娜的转换	(180)
7.8.3	全球 MODIS SST 图像	(182)
7.9	更多的参考资料和致谢	(182)
8	微波影像介绍	(183)
8.1	概述	(183)
8.2	一般的天线特性	(184)
8.2.1	功率模式	(185)
8.2.2	与功率模式相关的立体角	(187)
8.2.3	Gain	(187)
8.3	用天线测量表面辐射量	(187)
8.4	圆锥扫描仪和微波表面发射	(189)
8.5	天线模式校正 (APC)	(190)
8.6	被动微波成像仪	(192)
8.6.1	多光谱扫描微波辐射计 (SMMR)	(193)
8.6.2	特殊传感器微波/成像仪 (SMM/I)	(194)
8.6.3	TRMM 微波成像仪 (TMI)	(197)
8.6.4	高级微波扫描辐射计 - EOS (AMSR - E)	(198)
8.6.5	未来的被动微波辐射计	(199)
8.7	更多参考资料和致谢	(200)
9	大气和海洋表面被动微波观测	(201)
9.1	概述	(201)
9.2	微波的大气吸收和透射	(202)

9.2.1	氧气和水蒸气的大气吸收	(202)
9.2.2	氧气和水蒸气的大气透过率	(203)
9.2.3	水滴的透射率	(205)
9.3	微波中的辐射传输	(206)
9.4	发射率对表面波和泡沫的依存关系	(209)
9.4.1	对海浪引起的发射率的贡献	(209)
9.4.2	无粗糙泡沫表面的平均方位发射率	(210)
9.4.3	泡沫的贡献	(212)
9.4.4	方位角与 V 极化和 H 极化发射率的依存关系	(213)
9.4.5	四个斯托克斯参数的方位角特性	(214)
9.5	温度和盐度	(217)
9.6	开阔海域算法	(219)
9.6.1	SSM/I 算法	(219)
9.6.2	TMI 和 AMSR - E 算法	(220)
9.7	海冰算法	(221)
9.8	更多参考资料和致谢	(223)
10	雷达	(227)
10.1	概述	(227)
10.2	雷达方程	(227)
10.2.1	点目标和面目标的雷达后向散射	(228)
10.2.2	极化	(230)
10.2.3	海洋和大气对雷达回波信号的影响	(230)
10.3	视场内 σ_0 的确定	(231)
10.4	距离分辨	(232)
10.4.1	调频	(234)
10.4.2	脉冲重复频率	(235)
10.5	多普勒分辨	(236)
10.5.1	与观测角有关的多普勒频移	(236)
10.5.2	多普勒分辨率	(239)
10.5.3	地球的转动	(239)
10.6	海洋的后向散射	(240)
10.6.1	镜面和角反射	(240)
10.6.2	两种类型的海洋后向散射	(241)
10.6.3	机载观测实验	(242)
11	散射计	(246)

11.1	概述	(246)
11.2	背景知识	(248)
11.3	散射计反演海面风场的原理	(251)
11.3.1	地球物理模式函数	(251)
11.3.2	利用模式函数反演海面风矢量	(254)
11.4	NSCAT 散射计	(255)
11.5	AMI 散射计	(256)
11.6	SeaWinds 散射计	(258)
11.6.1	定标和噪声消除	(261)
11.6.2	大气透射率和降雨	(261)
11.7	散射计 AMI、NSCAT 和 SeaWinds 的性能比较	(262)
11.8	风场的反演精度	(263)
11.9	应用举例	(266)
11.9.1	锋面	(266)
11.9.2	半球风场	(266)
11.9.3	特旺特佩克海湾	(266)
11.9.4	极地海冰研究	(267)
11.10	更多参考资料和致谢	(268)
12	高度计	(269)
12.1	概述	(269)
12.2	地球的形状	(270)
12.3	卫星高度计的发展历程	(274)
12.4	TOPEX/POSEIDON 高度计	(274)
12.4.1	TOPEX/POSEIDON 高度计轨道	(274)
12.4.2	TOPEX 微波辐射计(TMR)	(276)
12.4.3	电离层	(278)
12.4.4	精密定轨(POD)	(278)
12.4.5	海上定标	(281)
12.5	JASON-1	(282)
12.6	高度计脉冲与平坦海面的相互作用	(283)
12.6.1	天线指向角对测高反演的影响	(283)
12.6.2	脉冲有限的足印	(284)
12.6.3	脉冲往返时间的确定	(286)
12.7	波浪对高度计回波的影响	(287)
12.7.1	小尺度的粗糙度和 U 的确定	(287)