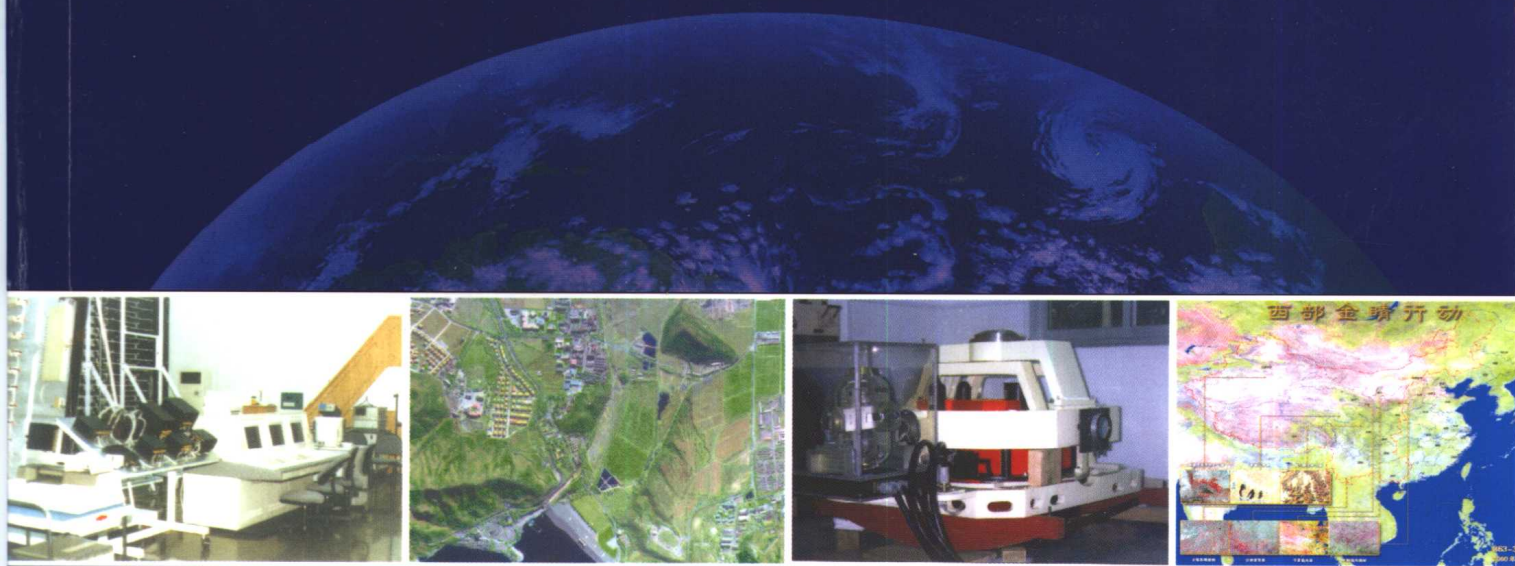


空间信息获取与处理系列专著

MODIS遥感信息 处理原理与算法



刘玉洁 杨忠东 等 编著



科学出版社

空间信息获取与处理系列专著

MODIS 遥感 信息处理原理与算法

刘玉洁 杨忠东 等 编著

科学出版社

2001

内 容 简 介

本书是国家高技术计划信息领域信息获取与处理技术(863-308)主题成果系列专著之一。专著从汇总中分辨率成像光谱仪(MODIS)资料处理和信息提取的最新技术入手,收入了国外大气-陆地-海洋遥感应用的新思维、新方法和最新研究成果。全书共分五章。第一章简要介绍了美国 Terra/EOS 卫星的科学目标和观测仪器。第二章概括了 MODIS 资料的预处理技术和资料格式。第三章为大气遥感信息的处理原理和算法,包括气溶胶、水汽、云和大气廓线反演算法的理论基础。第四章给出了陆地遥感算法,包括地面反照率、积雪、海冰、地表温度、火灾监测和大气订正技术。第五章介绍了海洋遥感信息处理原理和算法,给出了海洋初级生产率、海面温度、叶绿素荧光产品、净水比辐射率、浮游生物瞬时光合作用有效辐射和吸收等提取技术。

本书内容丰富,技术新颖。可供大气、陆地、海洋遥感,环境和生态等学科的科研人员以及大专院校相关专业的师生阅读、参考。

图书在版编目(CIP)数据

MODIS 遥感信息处理原理与算法/刘玉洁等编著. -北京:科学出版社,2001
空间信息获取与处理系列专著
ISBN 7-03-009229-5

I. M… II. 刘… III. 红外成像系统-光谱仪-应用-遥感图像-图像处理
IV. TP751.2

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2001)第 07447 号

科学出版社 出版

北京东黄城根北街 16 号
邮政编码:100717

源海印刷厂 印刷

科学出版社发行 各地新华书店经销

*

2001 年 4 月第 一 版	开本:787×1092 1/16
2001 年 4 月第一次印刷	印张:22 1/2 插页:4
印数:1—2 500	字数:513 000

定价:55.00 元

(如有印装质量问题,我社负责调换〈北燕〉)

国家 863 计划 308 主题

空间信息获取与处理系列专著

编辑委员会

名誉主编：匡定波

主 编：郭华东

副 主 编：许健民 倪国强

编 委（按姓氏笔画为序）

王长耀	王建宇	王德纯	朱敏慧	刘玉洁
刘永坦	孙文新	巫英坚	杨家德	杨震明
李小文	李文友	吴一戎	张光义	张永生
张钧屏	张意红	张澄波	郁文贤	林行刚
周心铁	郇辛樵	孟宪文	侯朝焕	姜文汉
姚岁寒	顾怀瑾	阎吉祥	龚雅谦	梁甸农
彭胜潮	景贵飞	强小哲	缪家駟	魏钟铨

国家 863 计划 308 主题

空间信息获取与处理系列专著

- 对地观测技术与可持续发展
- 合成孔径雷达卫星
- 空间探测相控阵雷达
- 对地观测与对空监视
- 航天遥感工程
- 对地观测技术与数字城市
- 对地观测技术与精细农业
- 多角度与热红外对地遥感
- 环境监测激光雷达
- MODIS 遥感信息处理原理与算法
- 对地观测系统与应用

空间信息获取与处理系列专著

序

信息获取与处理技术(308)主题是我国高技术计划最早设立的15个主题之一。20世纪80年代初,美国政府推出“星球大战计划”,接着欧洲出台了“尤里卡计划”。在亚洲,日本率先提出了“未来10年振兴科学技术政策大纲”。面对严峻的国际形势和世界的发展趋势,中国于1986年形成自己的高技术研究发展计划,明确提出308主题重点发展面向空间目标监视和空间对地观测的军民两用技术。

随着20世纪90年代初前苏联的解体、冷战的结束及其后“信息高速公路”、“知识经济”、“数字地球”的出现,308主题根据国际形势的发展和国家现代化建设的需要,科学地调整战略目标,卓有成效地部署实施研究计划。

15年来,308主题围绕对地观测和对空监视两大系统,突破了以新型对地观测系统星载合成孔径雷达、红外焦平面列阵成像和自适应光学为代表的六大关键技术,配套发展了超高速实时成像信息处理专用技术,取得一系列重大成果。星载合成孔径雷达等重大对地、对空关键技术成功地向国家建设主战场转移,实现了863计划与其他计划的有机衔接,带动了我国在这些领域的一系列技术进步和设备研制,开拓了我国对地观测技术和对空探测技术发展的新局面。

在863计划15年工作行将完成之际,308主题专家组决定撰写出版空间信息获取与处理系列专著,这是一项非常重要的举措:一是科研人员通过系统总结而进一步提高水平,二是可以让更多的人分享多年来的重要科研成果,三是对发展下一期的863计划建立了坚实的基础。这套系列专著的作者,包括了战略型科学家和工程

技术专家,他们长期工作在第一线,对该领域有直接的发言权。该系列专著包括 11 部书,从不同角度在不同程度上介绍了我国对地观测、对空监视高技术领域的发展,并对下一步的工作提出了设想与建议。本套专著的出版,是我国信息获取领域的一件大事,有重要的学术和实用意义。

我高兴地向读者们推荐这套高技术领域的系列专著。

2001 年 2 月

空间信息获取与处理系列专著

前 言

新世纪到来之际,我国的 863 计划——高技术研究发展计划,历经 15 年的辉煌,将完成第一期庄严的历史使命。863 计划信息领域信息获取与处理技术主题,经过各级领导和五届专家组及全体参研人员的共同努力,也圆满地实现了她的预期目标。

作为 863 计划信息领域 4 个主题之一的“信息获取与处理技术主题”,1986 年立题伊始即明确其战略目标:发展各种信息获取与处理技术,重点是掌握高速、高精度的新型信息获取和实时图像处理技术,促进信息技术在各个领域的应用。1990 年提出,在重视对空监视的基础上,加强对地观测;1993 年进一步提出,在重视星载对地观测的同时,加强机载对地观测技术的发展。进入“九五”,进一步凝炼战略方向:以中国数字地球战略空间信息资源重大需求为导向,研究发展对空、对地观测技术,形成具有我国自主产权的实用化机载对地观测技术系统,开展数字图像处理及信息挖掘方法研究,研究对地观测小卫星有效载荷及卫星数据处理技术,进行应用示范,为我国数字地球战略铺垫基础,为国家可持续发展、国家安全战略服务。

15 年来,308 主题五届专家组在国家科技部领导下,依靠来自 20 多个部、委,分布在 19 个省、区、市的 61 个单位 3000 余名科技人员的精诚奉献,围绕对地观测与对空监测两大系统,突破 7 项关键技术,探索信息获取前沿,取得机载对地观测系统技术、星载合成孔径雷达技术、自适应光学望远镜技术等四大标志性成果;获得 X-SAR 系统样机、SAR 实时成像器、激光测污雷达、激光测风雷达、对地观测小卫星相机、MODIS 接收处理系统、InSb 红外焦平面组件及逆合成孔径雷达等 8 项代表性重点成果;在前沿信息获取方面,取

得新型光学传感器、聚束雷达、微型自适应光学技术等 5 类成果。成功开展机载对地观测系统应用示范,在城市、农业应用等领域取得显著成效,及时开展了“九八”抗洪、“九九”澳门回归、“西部金睛行动”和中关村科技园区遥感飞行等服务国家重大需求的专项。这些成果提高了我国信息获取与处理技术领域发展水平,缩短了我国在该领域与世界先进水平的差距,为国民经济建设、国家安全战略做出重要贡献。

在 15 年研究即将完成之际,对长期以来的科研成果进行科学的、系统的总结,这对未来发展十分有益,为此我们决定出版这套空间信息获取与处理系列专著。本系列书由 11 部著作组成,书名分别是:《对地观测技术与可持续发展》、《合成孔径雷达卫星》、《空间探测相控阵雷达》、《对地观测与对空监视》、《航天遥感工程》、《对地观测技术与数字城市》、《对地观测技术与精细农业》、《多角度与热红外对地遥感》、《环境监测激光雷达》、《MODIS 遥感信息处理原理与算法》及《对地观测系统与应用》。对地观测内容构成本系列书的主体,介绍了对地观测原理、技术、应用与发展;侧重论述 308 主题近年来研究发展的光学传感器、成像雷达系统、信息处理方法及其在城市、农业、环境、资源、灾害等领域的应用,提出了 21 世纪初以可持续发展为牵引发展对地观测技术的建议及战略思考;空间监视内容是本系列书的又一重要方面,概述了空间目标探测与监视技术,介绍了空间探测相控阵雷达技术;激光雷达是信息获取技术的前沿领域之一,书中阐述了环境监测激光雷达原理与技术。

我们期望,这套专著能起到理论总结的作用、学术交流的作用;同时,我们也期望着她能对下一期国家高技术发展起到有益的参考作用。

15 年来,信息获取与处理技术主题工作受到科技部、科技部高新技术司、863 联合办公室、信息领域办公室各级领导的大力支持,得到各承研单位及课题组和关心 308 主题同志们的全力支持,在此谨代表主题五届专家组向以上领导与同志们致以真诚的谢意。诚然,没有大家的支持,本系列书也不可能问世,值此系列专著出版之际,向大家表示衷心的感谢。863 计划发起者之一的王大珩院士在百忙之中亲自为系列专著作序,我们向推动我国高技术计划的元勋

王大珩先生致以崇高的敬意。11部专著的数十位作者都是工作在863计划第一线的优秀科学家,在繁忙的工作之余,他们将高技术成果进行理论总结,为国家高技术“书写”奉献,亦特向各位辛勤的作者致以敬意。在本系列专著出版时又受到科学出版社的鼎力相助,特别是姚岁寒等先生付出了十分艰辛的劳动,谨此一并鸣谢。

系列专著不久将与大家见面了,鉴于水平与时间所限,书中不妥乃至错误之处在所难免,恳望读者不吝批评指正。

2001年元月

编者的话

美国 Terra/EOS 卫星的升空和业务运营,为对地遥感观测的进一步发展提供了新的机会。Terra/EOS 星上搭载的中分辨率成像光谱仪(MODIS)使我们能够有机会同时获得 36 个覆盖可见光、近红外和远红外波段的百米量级的遥感资料,从而为把大气-陆地-海洋作为一个整体来综合探讨地球环境演化变迁的内在科学机理提供了新的数据来源。新型遥感信息带来的不仅仅是新的科学议题,也带来了新思维和新方法。

20 世纪 90 年代中期,国家卫星气象中心从事遥感信息提取及综合应用技术研究的科研人员开始关注国际上对 EOS(MODIS)资料处理及信息提取技术的发展,在 863 国家高技术项目的支持下,充分利用网络通信,系统地开展了 MODIS 资料处理和信息提取技术的方法预研及方案设计工作。几年来,在课题组全体研究人员的共同努力下,解决了许多技术难点。然而,中国的遥感事业任重道远。我们把对新型遥感信息提取及应用技术研究的理解和思考汇编成册,希望它能在我国卫星气象遥感事业的发展和应用推广,以及在国内同行开展 Terra/EOS MODIS 资料处理和信息提取技术研究中发挥一定作用。

本书有关的整个项目的研究工作是在刘玉洁研究员和杨忠东博士的主持指导下开展的,其中大气部分的工作由刘健和邱红完成;陆地部分的工作由杨忠东、郭炜、王丽波、谷松岩、刘玉洁和刘瑞霞完成;海洋部分的工作由谷松岩和罗东风完成;邱红还完成了 MODIS 资料预处理的方法研究工作;阎静完成了 MODIS 1B HDF 信息格式及相应的资料处理工作。

项目执行过程中,国家卫星气象中心的各位领导、专家及同行给予了大量的技术指导和支持,作者在此深表感谢。同时,作者向国家高技术研究与发展计划信息获取与处理技术(863-308)主题专家组的全体专家和主题办公室全体工作人员致以真诚的感谢,他们

对相关课题的研究和本书的出版给予了多方面的技术指导和宝贵的支持。在本书即将完稿之时,国家卫星气象中心成功地完成了MODIS资料接收预处理系统的开发研制工作,为本书增添了亮丽的一笔。

本书涉及内容较广泛,虽经一再努力,在整理编辑过程中,仍难免会出现一些错误,敬请专家同行不吝赐教。

目 录

第一章 概 述	1
§ 1.1 EOS Terra 卫星和仪器	1
§ 1.2 地球系统科学(ESS)背景	3
第二章 MODIS 预处理简介	5
§ 2.1 地球定位方法	5
§ 2.2 辐射定标	9
§ 2.3 HDF 文件格式	12
第三章 MODIS 大气遥感信息处理原理和算法	17
§ 3.1 对流层气溶胶	17
§ 3.2 近红外水汽	66
§ 3.3 云顶性质及相态反演	74
§ 3.4 云的光学厚度、有效粒子半径及热力学相态反演	84
§ 3.5 云检测	109
§ 3.6 大气廓线反演	130
第四章 MODIS 陆地遥感信息处理原理和算法	144
§ 4.1 大气校正	144
§ 4.2 反照率	166
§ 4.3 积雪、湖冰和海冰	180
§ 4.4 地表温度	198
§ 4.5 植被指数	232
§ 4.6 火灾监测	260
第五章 MODIS 海洋遥感信息处理原理和算法	278
§ 5.1 海洋初级生产率	278
§ 5.2 海面温度	287
§ 5.3 叶绿素	298
§ 5.4 净水比辐射率	311
§ 5.5 浮游植物瞬时光合作用有效辐射和吸收辐射	315
主要参考文献	321

第一章 概述

§ 1.1 EOS Terra 卫星和仪器

1999 年 12 月 18 日, 美国成功地发射了地球观测系统(EOS)的第一颗先进的极地轨道环境遥感卫星 Terra (EOS - AM1)。这颗卫星是美国国家宇航局(NASA)地球行星使命计划中总数 15 颗卫星的第一颗, 也是第一个提供对地球过程进行整体观测的系统。它的主要目标是实现从单系列极轨空间平台上对太阳辐射、大气、海洋和陆地进行综合观测, 获取有关海洋、陆地、冰雪圈和太阳动力系统等信息, 进行土地利用和土地覆盖研究、气候季节和年际变化研究、自然灾害监测和分析研究、长期气候变率和变化研究以及大气臭氧变化研究等, 进而实现对大气和地球环境变化的长期观测和研究的总体(战略)目标。

Terra 卫星上载有下列五种对地观测仪器:

- 先进的空间热辐射反射辐射计(ASTER)。
- 云和地球辐射能量系统(CERES)(两个相同的扫描器)。
- 多角度成像光谱辐射计(MISR)。
- 中分辨率成像光谱仪(MODIS)。
- 对流层污染探测装置(MOPITT)。

为了充分了解地球系统的变化, EOS 观测系统将提供系统的、连续的地球观测信息。表 1.1 列出了仪器的主要观测能力和观测内容。

表 1.1 EOS AM1 各类仪器的主要观测能力和观测内容

学科	探测物理量内容	EOS AM1 仪器
大气	云性质	MODIS, MISR, ASTER
	辐射能	CERES, MODIS, MISR
	降水	
	平流层化学	MOPITT
	对流层化学	
	气溶胶性质	MISR, MODIS
陆地	大气温度	MODIS
	大气湿度	MODIS
	陆地覆盖和土地应用变化	MODIS, MISR, ASTER
	植被	MODIS, MISR, ASTER
	地表温度	MODIS, ASTER
	火灾发生率	MODIS, ASTER
	火山效应	MODIS, ASTER
	地表湿度	
海洋	表面温度	MODIS
	浮游植物和可溶性有机物	MODIS, MISR
	表面风场	
	表面地形	
冰雪圈	陆地冰的变化	ASTER
	海冰	MODIS, ASTER
	雪覆盖	MODIS, ASTER
太阳辐射	太阳总辐射率	CERES, MODIS, MISR

表 1.2 MODIS 仪器特性和主要用途

通 道	光 谱 范 围 1 ~ 19nm 通道, 20 ~ 36 μ m 通道	信噪比 $NE\Delta T$	主要用途	分辨率/m
1	620 ~ 670	128	陆地、云边界	250
2	841 ~ 876	201		250
3	459 ~ 479	243	陆地、云特性	500
4	545 ~ 565	228		500
5	1 230 ~ 1 250	74		500
6	1 628 ~ 1 652	275		500
7	2 105 ~ 2 135	110		500
8	405 ~ 420	880	海洋水色、 浮游植物、 生物地理、 化学	1 000
9	438 ~ 448	8 380		1 000
10	483 ~ 493	802		1 000
11	526 ~ 536	754		1 000
12	546 ~ 556	750		1 000
13	662 ~ 672	910		1 000
14	673 ~ 683	1 087		1 000
15	743 ~ 753	586		1 000
16	862 ~ 877	516		1 000
17	890 ~ 920	167	大气水汽	1 000
18	931 ~ 941	57		1 000
19	915 ~ 965	250		1 000
20	3.660 ~ 3.840	0.05	地球表面和云顶温度	1 000
21	3.929 ~ 3.989	2.00		1 000
22	3.929 ~ 3.989	0.07		1 000
23	4.020 ~ 4.080	0.07		1 000
24	4.433 ~ 4.498	0.25	大气温度	1 000
25	4.482 ~ 4.549	0.25		1 000
26	1.360 ~ 1.390	1504	卷云、水汽	1 000
27	6.535 ~ 6.895	0.25		1 000
28	7.175 ~ 7.475	0.25		1 000
29	8.400 ~ 8.700	0.05		1 000
30	9.580 ~ 9.880	0.25	臭氧	1 000
31	10.780 ~ 11.280	0.05	地球表面和云顶温度	1 000
32	11.770 ~ 12.270	0.05		1 000
33	13.185 ~ 13.485	0.25	云顶高度	1 000
34	13.485 ~ 13.785	0.25		1 000
35	13.785 ~ 14.085	0.25		1 000
36	14.085 ~ 14.385	0.35		1 000

MODIS 是 EOS-AM1 系列卫星的主要探测仪器,也是 EOS Terra 平台上唯一进行直接广播的对地观测仪器。MODIS 是当前世界上新一代“图谱合一”的光学遥感仪器,具有 36 个光谱通道,分布在 $0.4 \sim 14\mu\text{m}$ 的电磁波谱范围内,波段范围和主要用途如表 1.2 所示。MODIS 仪器的地面分辨率分别为 250m、500m 和 1 000m,扫描宽度为 2 330km,在对地观测过程中,每秒可同时获得 6.1 兆比特的来自大气、海洋和陆地表面信息,每日或每两日可获取一次全球观测数据。多波段数据可以同时提供反映陆地、云边界,云特性,海洋水色,浮游植物、生物地理、化学,大气中水汽,地表温度,云顶温度,大气温度,臭氧和云顶高度等特征的信息,用于对陆表、生物圈、固态地球、大气和海洋进行长期全球观测。每一个 MODIS 仪器的设计寿命为 5 年,将计划发射 4 颗卫星。由此估计,利用 MODIS 仪器至少将获得 15 年、36 个光谱波段的地球综合信息,这些数据对于开展自然灾害与生态环境监测、全球环境和气候变化研究以及进行全球变化的综合性研究等将是非常有意义的。

§ 1.2 地球系统科学(ESS)背景

众所周知,了解全球环境的关键在于明确地球大气、陆地以及水与生物之间的相互作用和相互影响,我们将其称为地球系统科学(ESS),它与气象学、海洋科学、生物学以及大气科学一起构成一个整体。

美国国家宇航局于 1991 年发起了一个综合性的项目,称为地球科学事业,简称为 ESE。目的是要通过卫星及其它工具,对地球进行更深入的研究,扩展对它的认识,更加明确自然界与人类的相互影响,以便更好地了解人类赖以生存的地球环境,为人们提供更准确的天气预报,提供对农业和森林监测的工具,为渔民和地区规划者提供更多的信息,提高对未来气候变化的预测能力。

ESE 包括三个主要部分:一是地球观测卫星系列;二是先进的数据系统;三是进行资料分析研究的科学队伍。主要研究领域包括:云、海洋、陆表、大气化学、水和能量循环、水和生态系统过程、冰河及极地冰原、固态地球等。

为了建立资料处理模式和算法,并指导对 MODIS 资料的科学讨论和应用,ESE 计划专门组建了 MODIS 资料处理和应用的国际研究队,它由来自美国、澳大利亚和法国的 24 位科学家组成。MODIS 科学研究队分为 4 个学科组:大气、陆地、海洋和定标,定标组主要是为 MODIS 资料的定量应用而开展的标定研究,并且监测 MODIS 仪器状态,确定观测数据的精确性和有效性。

ESE 计划分两个阶段完成:第一阶段主要集中在对 EOS-AM1 发射前各种机载仪器飞行试验数据的处理、分析和处理模式及算法的建立,处理结果的检验和在检验基础上对处理模式的改进,以便建立 EOS-AM1 系列数据处理基础。第二阶段始于第一颗 EOS 卫星 AM1 发射之后,利用卫星观测数据开展大气、陆地、海洋和定标实验,以便尽早提供大气、陆地、海洋和太阳的辐射观测数据和分析结果,在以下几方面的全球观测中发挥作用:

(1) 地表覆盖变化和全球生产力

包括区域性地表覆盖变化的趋势和模式、作物种类,以及全球初级生产力。

(2) 短期气候预测

季到年的气候预测,以便改进对短期气候异常发生时间、地点的预报。

(3) 自然灾害监测

包括灾害性质及洪涝、干旱、森林草原火灾、雪灾及减灾。

(4) 长期气候变化研究

帮助科学家识别长期气候变化及其趋势的机制和因子,包括人类影响。

(5) 大气臭氧监测

帮助科学家监测大气臭氧的变化,分析变化产生的原因及对地球系统的影响。

正如第一颗气象卫星从根本上改变了这些领域的发展进程,人们有理由期待 ESE 计划会拓宽全球环境和气候研究的发展前景,增加人们对地球的认识,并运用这些知识造福于人类。