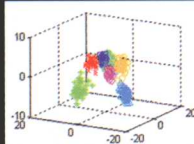
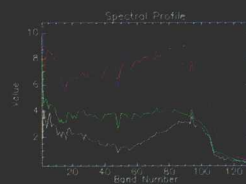
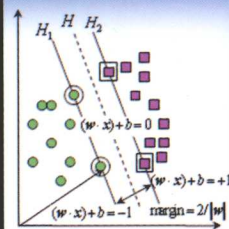
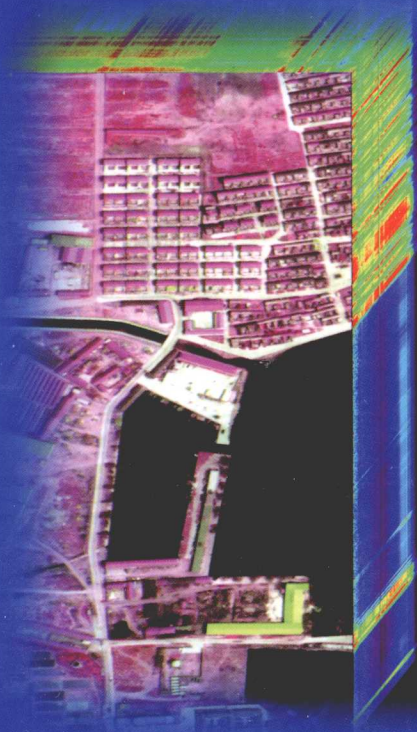


地球观测与导航技术丛书

# 高光谱影像分析与应用

余旭初 冯伍法 杨国鹏 陈伟 著



科学出版社

013046106

TP722  
06



国家出版基金项目  
NATIONAL PUBLICATION FOUNDATION

地球观测与导航技术丛书

# 高光谱影像分析与应用

余旭初 冯伍法 杨国鹏 陈 伟 著



科学出版社  
北 京



北航 C1652868

TP722  
06

## 内 容 简 介

本书在国内外相关研究的基础上,结合作者所在团队十多年来取得的研究成果,讨论和介绍高光谱影像处理与分析的理论和技術。全书共十二章,涉及高光谱遥感影像处理与分析的背景要求、基础理论、关键技术和应用范例。首先,分析了高光谱遥感地理环境探测的潜力,介绍了高光谱遥感成像机理、典型的成像光谱仪及其定标技术。在此基础上,结合高光谱数据特点讨论了辐射和几何校正技术,以及地物光谱数据库的相关技术。接下来,重点介绍了高光谱影像地物探测的关键技术,包括光谱特征分析与匹配、统计模式分类、光谱特征选择与提取、核方法分析、混合像元分解、高光谱与高空间分辨率影像融合等。最后,讨论了高光谱数据处理系统的功能 and 设计问题。

本书可供遥感和地学领域研究人员和技术人员参考,也可作为大专院校相关专业的本科生和研究生的教材或参考书。

### 图书在版编目(CIP)数据

高光谱影像分析与应用/余旭初等著. —北京:科学出版社, 2013  
(地球观测与导航技术丛书)

ISBN 978-7-03-037469-1

I. ①高… II. ①余… III. ①光谱分辨率-光学遥感-遥感图像-研究  
IV. ①TP722

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2013) 第 097410 号

责任编辑:朱海燕 陈婷婷/责任校对:刘小梅

责任印制:钱玉芬/封面设计:王 浩

**科学出版社** 出版

北京东黄城根北街 16 号

邮政编码:100717

<http://www.sciencep.com>

**中国科学院印刷厂** 印刷

科学出版社发行 各地新华书店经销

\*

2013 年 5 月第 一 版 开本:787×1092 1/16

2013 年 5 月第一次印刷 印张:17 1/4 插页:6

字数:380 000

定价:69.00 元

(如有印装质量问题,我社负责调换)

# 《地球观测与导航技术丛书》编委会

## 顾问专家

徐冠华 龚惠兴 童庆禧 刘经南 王家耀  
李小文 叶嘉安

## 主 编

李德仁

## 副主编

郭华东 龚健雅 周成虎 周建华

## 编 委 (按姓氏汉语拼音排序)

|     |     |     |     |     |
|-----|-----|-----|-----|-----|
| 鲍虎军 | 陈 戈 | 陈晓玲 | 程鹏飞 | 房建成 |
| 龚建华 | 顾行发 | 江碧涛 | 江 凯 | 景贵飞 |
| 景 宁 | 李传荣 | 李加洪 | 李 京 | 李 明 |
| 李增元 | 李志林 | 梁顺林 | 廖小罕 | 林 琿 |
| 林 鹏 | 刘耀林 | 卢乃锰 | 孟 波 | 秦其明 |
| 单 杰 | 施 闯 | 史文中 | 吴一戎 | 徐祥德 |
| 许健民 | 尤 政 | 郁文贤 | 张继贤 | 张良培 |
| 周国清 | 周启鸣 |     |     |     |

# 《地球观测与导航技术丛书》出版说明

地球空间信息科学与生物科学和纳米技术三者被认为是当今世界上最重要、发展最快的三大领域。地球观测与导航技术是获得地球空间信息的重要手段，而与之相关的理论与技术是地球空间信息科学的基础。

随着遥感、地理信息、导航定位等空间技术的快速发展和航天、通信和信息科学的有力支撑，地球观测与导航技术相关领域的研究在国家科研中的地位不断提高。我国科技发展中长期规划将高分辨率对地观测系统与新一代卫星导航定位系统列入国家重大专项；国家有关部门高度重视这一领域的发展，国家发展和改革委员会设立产业化专项支持卫星导航产业的发展；工业与信息化部和科学技术部也启动了多个项目支持技术标准化和产业示范；国家高技术研究发展计划（863 计划）将早期的信息获取与处理技术（308、103）主题，首次设立为“地球观测与导航技术”领域。

目前，“十一五”计划正在积极向前推进，“地球观测与导航技术领域”作为 863 计划领域的第一个五年计划也将进入科研成果的收获期。在这种情况下，把地球观测与导航技术领域相关的创新成果编著成书，集中发布，以整体面貌推出，当具有重要意义。它既能展示 973 和 863 主题的丰硕成果，又能促进领域内相关成果传播和交流，并指导未来学科的发展，同时也对地球观测与导航技术领域在我国科学界中地位的提升具有重要的促进作用。

为了适应中国地球观测与导航技术领域的发展，科学出版社依托有关的知名专家支持，凭借科学出版社在学术出版界的品牌启动了《地球观测与导航技术丛书》。

丛书中每一本书的选择标准要求作者具有深厚的科学研究功底、实践经验，主持或参加 863 计划地球观测与导航技术领域的项目、973 相关项目以及其他国家重大相关项目，或者所著图书为其在已有科研或教学成果的基础上高水平的原创性总结，或者是相关领域国外经典专著的翻译。

我们相信，通过丛书编委会和全国地球观测与导航技术领域专家、科学出版社的通力合作，将会有一大批反映我国地球观测与导航技术领域最新研究成果和实践水平的著作面世，成为我国地球空间信息科学中的一个亮点，以推动我国地球空间信息科学的健康和快速发展！

李德仁

2009 年 10 月

# 序

遥感技术自诞生之日起便作为一种科学、技术和应用紧密结合的对地观测手段快速发展和壮大起来。信息时代的遥感技术具有两个显著的特征。一方面,它几乎涵盖了可利用全电磁波谱段,面向全球多尺度,逐步形成了多层次、时空连续的遥感观测体系;另一方面,结合互联网、高速计算和处理技术,遥感已渗透到人类社会科技活动的诸多方面,并引起了社会各行业的青睐,产生了越来越深刻的反响。

从本质上看,遥感技术通过增强人们的地理空间认知能力来扩充和深化人类对地球的认识。地理空间信息是认知地球的基础信息,其丰富和翔实程度必然影响和制约着我们的认识、决策的能力和水平。在过去的半个多世纪里,正是遥感技术这一“遥远的感知”手段使得地理空间信息的获取能力得到了大幅度的提升。起初,遥感在地图测绘、战场侦察、地质解译以及资源与环境调查等几个领域中扮演着辅助性的和验证性的角色,并作为一种有前景的新技术加以培育和发展。随着探测手段的进步和探测空间的扩展,遥感已成为这些领域中占支配地位的信息获取技术。如今,遥感正为适应和满足“智慧地球”的发展需求,向着综合化、全球化、网络化和智能化的新高度迈进。同时,遥感所提供的信息将极大丰富,会有力提升地理空间信息服务的质量与效能。例如,带有地学编码的大范围多分辨率遥感影像既可以是标准的地理信息产品,也可以是用于观察、浏览和分析的基础框架。这一特征在“天地图”和“谷歌地球”中得到了很好的体现。

地理空间信息(Geo-Spatial Information)是近年来形成的一个世界性的新术语,它原指与近地空间有关的、可确定空间位置的一切信息。它可进一步区分为依托坐标系统表述的几何信息,以及描述地物的自然和物理性质的属性信息两大类。地理空间认知既需要准确的几何信息,同样也离不开完整和精细的属性信息,但回顾遥感对地观测的发展历程,不难发现这两类信息的获取一直处于不对称状态。在绝大多数场合,人们的兴趣总放在对目标或地物轮廓的清晰辨认和空间位置的精确测定方面,解决“在哪里”的问题,而对于它们“是什么”只能追求粗略的答案。造成这一局面的根本原因,是过去的传感器系统在设计上都追逐越来越高的空间分辨率指标,而对衡量地物属性分辨能力的光谱特征却没有给予足够的关注。高光谱遥感技术的出现逐渐改变了这一现状。高光谱传感器——成像光谱仪所提供的近似连续的光谱曲线为地物属性的精细探测奠定了基础。

从信息链的角度看,获取高光谱数据只是完成了数据准备,而对数据的处理和分析才真正代表了地物属性信息的提取水平。与传统的光学遥感的区别是,高光谱影像的庞大数据量、数据间光谱强相关以及不同地物在属性识别要求上的差异,使得处理和分析工作变得更加复杂,增加了难度。为此,需要结合地物特征来探索精细化的光谱识别技术,并在传统的模式识别技术的基础上拓展统计学习能力,以及在超高维数据分析中融入新的智能化处理方法,才能有效地提取地物属性信息。

《高光谱影像分析与应用》一书正是围绕上述难题展开讨论的。2001年以来,余旭

初教授及其团队承担了多项高光谱遥感领域的科研项目，取得了一批重要成果，为该书的出版打下了坚实的基础并提供了丰富的素材。作者紧密跟踪国际前沿，对高光谱数据处理和分析的理论和技術问题进行了认真的提炼和归纳，同时，还专门组织了航空高光谱遥感飞行试验，利用开发的软件系统完成了大规模的数据处理和分析任务，验证了相关的理论和算法。这些都在该书中得到充分的体现。

在此，我将该书推荐给读者以供大家探讨。同时，也期待作者所在的团队继续深化高光谱遥感领域的研究并不断取得新成就。

高 俊

中国科学院院士

2012 年 6 月 10 日

# 前 言

新世纪的遥感对地观测拉开了激动人心的大幕。信息时代和互联网的大背景推动着作为大规模信息获取工具的遥感技术迅速迈向全球化和高效化。现代航空航天技术、光学和电子技术以及数据处理技术的发展,不断地催生新的遥感探测原理和模式,使对地观测手段更加精细化和多样化。遥感及其相关技术也以前所未有的速度渗透到人类社会的各个层面,深刻影响并改变着人们的生活、活动乃至思维和认知方式。

高光谱遥感的出现是现代遥感技术发展中影响深远的事件。传统的光学遥感始终在关注对越来越细小的地面物体的探测,高光谱遥感则致力于另一种细分,即以越来越密集的成像波谱段获取观测对象的影像数据集。成像波谱段数量的激增蕴含着巨大的质变,这意味着在获取地物空间分布信息的同时,也描绘出其连续的波谱特性曲线,从而实现了对象沿波长方向的精确描述。这种同时获取地物空间维和光谱维信息的“图谱合一”的成像方式在对地观测方面体现出前所未有的信息优势,并大大增加了对地物全方位探测的筹码。

获取与人类生活和活动密切相关的地理空间信息是遥感对地观测的核心任务。地理空间信息由两部分构成,即几何信息和属性信息,它们从不同的侧面描述了地物或目标的特征和性质。唯有充分挖掘这两类信息的内涵并将两者完整和有机结合,才能达成对观测对象的透彻理解和认知。如果我们对这两类信息的获取能力做一个综合评价,不难发现长期以来人们更关注从空中越来越清晰地辨识地面物体,并以更高的精度测定其空间位置、描绘其几何形态。其结果,便是对地观测的几何信息获取能力远远高于属性信息,这就造成地理空间信息获取能力整体上的不均衡。由于在地物属性信息提取方面具有的独特优势,高光谱遥感技术的应用将有效改变这一状况。高光谱数据能以足够的光谱分辨率区分出地表物质,并可将实验室地物光谱分析模型应用到复杂的分析过程中,从而实现定量化和智能化分析。数量庞大的高光谱成像波段既使得地物探测时的光谱特征选择更加灵活和多样化,又便于依据不同的光谱特性来进行影像融合处理和分类,从而增加了可识别地物的种类和精度。

发挥高光谱遥感的地理空间属性信息探测潜力的关键是对高光谱数据进行充分有效的处理和分析。在完成高光谱数据获取以后,数据处理和分析将真正决定地物属性信息的探测水平。高光谱影像处理与分析是制约高光谱遥感应用的重要瓶颈,其核心在于如何结合各种地物特征以及不同的探测要求,从海量且高度相关的高光谱数据中进行精确的属性信息提取。在过去的二十多年里,高光谱影像处理与分析一直是遥感领域的重要前沿。虽然已经和正在取得令人鼓舞的进展,但总体看还有大量的理论和技术问题有待深入研究。本书正是围绕这些问题,在总结国内外相关研究的基础上,结合作者所在团队十多年来在高光谱遥感领域取得的研究成果,讨论和介绍高光谱影像处理与分析方面的理论和技术。

全书共十二章,涉及高光谱遥感影像处理与分析的背景要求、基础理论、关键技术和应用范例。第1章结合高光谱遥感技术的发展论述了其对于地理空间信息获取的意义,并由此引出高光谱影像处理与分析所涉及的主要问题。第2章分析了五大类地物要素的光谱特性和高光谱探测潜力,提出了具体的指标要求。第3章从成像光谱仪的结构特点入手分析了高光谱遥感的成像机理,讨论了成像光谱仪定标技术并归纳和总结了高光谱影像数据的结构特点和描述模型。第4章重点围绕影像数据校正技术展开讨论,包括主要的辐射校正方法和几何校正方法。第5章介绍了地物光谱数据库的概念、作用、构建流程以及地物光谱数据的获取方法,讨论了这类数据库的系统结构和功能设计问题。第6章讨论光谱特征分析与匹配技术,分别介绍了主要的特征分析算法,以及基于多种光谱相似性度量和基于尺度空间的特征匹配算法。第7章将传统的统计模式识别方面的内容汇集在一起,并结合高光谱影像的分类要求和特点加以介绍。光谱特征选择与提取是降低高光谱影像冗余度,提高分类识别精度和效率的关键步骤,第8章讲述这方面的内容,分别介绍了各种基于分类的和基于表示的特征提取方法。第9章讨论了高光谱影像分析的核方法,先后介绍了核方法原理、支持向量机、核 Fisher 判别以及相关向量机等。第10章从光谱混合模型、端元个数估计、端元提取技术和光谱解混技术等四个方面讨论了高光谱影像的混合像元分解问题。第11章介绍高光谱与高空间分辨率影像的融合处理技术,重点分析了若干影像融合算法及其特点,并介绍了三种影像融合效果评价方法。本书的最后一章从面向应用的观点出发,从结构设计、功能设计以及关键技术分解与实现等方面讨论了高光谱数据处理系统的构建。

本书的第1章、第7章及第8章的部分内容由余旭初编写,第2章、第5章和第12章由冯伍法编写,第3章、第4章、第9章及第8章的其余部分由杨国鹏编写,第6章、第10章和第11章由陈伟编写。全书最后由余旭初、冯伍法统稿,余旭初定稿。张鹏强、路威、谭熊、杨明、刘伟、祝鹏飞、任利华、闻兵工、徐卫霄、付琼莹、秦进春、余岸竹等均参与了本书所涉及的研究或有关章节的撰写。

在本书付印之际,谨向中国科学院院士高俊教授致以由衷的谢意。多年来,他对作者及其团队开展的相关研究一直给予热情的关怀和指导,在本书完稿后又在百忙之中审阅书稿并亲自作序。本书的出版得到了解放军信息工程大学地理空间信息学院出版基金的资助。西安测绘研究所的胡莘总工和方勇研究员、中国科学院上海技术物理研究所的舒嵘研究员长期以来对作者给予了真诚的帮助并为本书提供了丰富的数据和素材,解放军信息工程大学的游雄教授、姜挺教授、张占睦教授、秦志远教授和万刚教授为本书的撰写提出了宝贵的意见和建议,在此一并表示感谢。

高光谱遥感是一个方兴未艾、前景广阔的领域。高光谱遥感影像分析和处理的理论和技术涉及众多学科且处于加速发展阶段,本书将其划分为几个大的方面作了归纳和总结,远未涵盖其所有细节。此外,限于作者的研究深度和学术水平,书中错误及疏漏之处在所难免,恳请广大读者批评指正。

# 目 录

《地球观测与导航技术丛书》出版说明

序

前言

|                         |    |
|-------------------------|----|
| 第 1 章 绪论                | 1  |
| 1.1 对地观测体系中的高光谱遥感技术     | 1  |
| 1.2 高光谱遥感与地理空间信息获取      | 4  |
| 1.3 高光谱影像处理与分析          | 6  |
| 第 2 章 地物光谱特征及探测要求       | 11 |
| 2.1 植被的光谱特征             | 11 |
| 2.1.1 植被光谱的基本特征         | 11 |
| 2.1.2 植被光谱的特征参数         | 11 |
| 2.1.3 影响植被光谱特征的因素       | 12 |
| 2.1.4 绿色涂料与植被光谱的区别      | 14 |
| 2.2 土壤岩石的光谱特征           | 15 |
| 2.2.1 土壤的光谱特征           | 15 |
| 2.2.2 岩石的光谱特征           | 18 |
| 2.3 人工地物的光谱特征           | 19 |
| 2.3.1 建筑物顶部材料的光谱特征      | 19 |
| 2.3.2 道路铺面材料的光谱特征       | 20 |
| 2.4 陆地水体的光谱特征           | 20 |
| 2.4.1 清洁水体的光谱特征         | 21 |
| 2.4.2 含沙量对水体反射光谱特征的影响   | 21 |
| 2.4.3 叶绿素浓度对水体反射光谱特征的影响 | 22 |
| 2.4.4 水体不同深度的光谱反射特征     | 22 |
| 2.4.5 雪的光谱反射特征          | 23 |
| 2.5 海部要素的光谱特征           | 23 |
| 2.5.1 海水的光谱特征           | 23 |
| 2.5.2 海岸带植被的光谱特征        | 24 |
| 2.5.3 海岸基岩和滩涂的光谱特征      | 25 |
| 2.6 高光谱影像地物属性探测要求       | 25 |
| 2.6.1 植被探测要求            | 25 |
| 2.6.2 土壤岩石的探测要求         | 26 |

|              |                  |           |
|--------------|------------------|-----------|
| 2.6.3        | 人工地物的探测要求        | 27        |
| 2.6.4        | 陆地水体和冰川的探测要求     | 27        |
| 2.6.5        | 海部要素的探测要求        | 28        |
| <b>第 3 章</b> | <b>高光谱成像系统</b>   | <b>30</b> |
| 3.1          | 高光谱遥感成像机理        | 30        |
| 3.1.1        | 光学探测             | 30        |
| 3.1.2        | 空间扫描             | 31        |
| 3.1.3        | 光谱分光             | 32        |
| 3.2          | 成像光谱仪发展现状        | 34        |
| 3.2.1        | 国外的成像光谱仪系统       | 34        |
| 3.2.2        | 国内的成像光谱仪系统       | 37        |
| 3.3          | 成像光谱仪定标          | 38        |
| 3.3.1        | 光谱定标             | 39        |
| 3.3.2        | 辐射定标             | 39        |
| 3.3.3        | 几何定标             | 41        |
| 3.4          | 高光谱遥感数据特点        | 43        |
| 3.4.1        | 立方体结构            | 43        |
| 3.4.2        | 数据描述模型           | 43        |
| <b>第 4 章</b> | <b>高光谱影像校正技术</b> | <b>45</b> |
| 4.1          | 太阳辐射及大气传输特性      | 45        |
| 4.1.1        | 太阳辐射             | 45        |
| 4.1.2        | 大气对电磁波传输过程的影响    | 46        |
| 4.1.3        | 辐射传输方程           | 48        |
| 4.2          | 高光谱影像的辐射误差       | 49        |
| 4.2.1        | 传感器的灵敏度特性引起的辐射误差 | 49        |
| 4.2.2        | 光照条件差异引起的辐射误差    | 49        |
| 4.2.3        | 大气条件不同引起的辐射误差    | 50        |
| 4.3          | 基于定标参数的辐射校正      | 51        |
| 4.3.1        | 辐射校正参数获取         | 51        |
| 4.3.2        | 影像辐射校正方法         | 51        |
| 4.4          | 高光谱影像大气辐射校正      | 52        |
| 4.4.1        | 基于辐射传输理论的大气辐射校正  | 52        |
| 4.4.2        | 利用影像数据进行反射率反演    | 53        |
| 4.4.3        | 借助地面特殊地物的光谱反射率方法 | 54        |
| 4.5          | 高光谱影像的几何特性       | 55        |
| 4.5.1        | 几何成像模型           | 55        |
| 4.5.2        | 影像几何变形           | 59        |
| 4.6          | 高光谱影像几何校正        | 60        |
| 4.6.1        | 几何校正的一般方法        | 60        |

|                              |           |
|------------------------------|-----------|
| 4.6.2 基于 POS 的几何校正 .....     | 63        |
| <b>第 5 章 地物光谱数据库技术 .....</b> | <b>68</b> |
| 5.1 概述 .....                 | 68        |
| 5.1.1 地物光谱数据库的概念 .....       | 68        |
| 5.1.2 地物光谱数据库的地位和作用 .....    | 68        |
| 5.1.3 地物光谱数据库建设流程 .....      | 69        |
| 5.2 光谱数据库研究现状 .....          | 69        |
| 5.2.1 国外光谱数据库研究现状 .....      | 69        |
| 5.2.2 国内地物光谱数据库研究进展 .....    | 72        |
| 5.3 地物光谱数据库系统设计 .....        | 73        |
| 5.3.1 系统应用要求分析 .....         | 73        |
| 5.3.2 系统设计原则 .....           | 74        |
| 5.3.3 系统内容设计 .....           | 74        |
| 5.3.4 系统结构设计 .....           | 75        |
| 5.3.5 系统功能设计 .....           | 76        |
| 5.4 地物光谱数据获取 .....           | 77        |
| 5.4.1 实验室光谱测量 .....          | 77        |
| 5.4.2 地面光谱测量 .....           | 78        |
| 5.4.3 遥感影像提取法 .....          | 80        |
| <b>第 6 章 光谱特征分析与匹配 .....</b> | <b>82</b> |
| 6.1 光谱特征增强与定量分析 .....        | 82        |
| 6.1.1 光谱特征增强方法 .....         | 82        |
| 6.1.2 光谱特征参量化 .....          | 84        |
| 6.2 光谱相似性测度 .....            | 86        |
| 6.2.1 几何空间测度 .....           | 86        |
| 6.2.2 概率空间测度 .....           | 88        |
| 6.2.3 变换空间测度 .....           | 89        |
| 6.2.4 综合相似性测度 .....          | 90        |
| 6.2.5 分类试验 .....             | 91        |
| 6.3 光谱匹配技术 .....             | 94        |
| 6.3.1 编码匹配 .....             | 94        |
| 6.3.2 光谱角度匹配 .....           | 95        |
| 6.3.3 交叉相关光谱匹配 .....         | 95        |
| 6.3.4 匹配滤波技术 .....           | 97        |
| 6.4 尺度空间匹配技术 .....           | 97        |
| 6.4.1 尺度空间理论 .....           | 97        |
| 6.4.2 波峰特征提取 .....           | 99        |
| 6.4.3 匹配算法 .....             | 99        |

|              |                    |            |
|--------------|--------------------|------------|
| 6.5          | 决策树匹配分类            | 100        |
| 6.5.1        | 决策树分类方法            | 100        |
| 6.5.2        | 光谱匹配的层次分析模型        | 100        |
| 6.5.3        | 应用实例               | 101        |
| <b>第 7 章</b> | <b>高光谱影像统计模式分类</b> | <b>105</b> |
| 7.1          | 高光谱影像的模式分类原理       | 105        |
| 7.1.1        | 模式识别的概念和方法         | 105        |
| 7.1.2        | 统计模式识别一般过程         | 105        |
| 7.2          | Bayes 统计决策分类       | 107        |
| 7.2.1        | 基本决策规则             | 107        |
| 7.2.2        | 正态分布下的极大似然法分类      | 109        |
| 7.3          | Bayes 非参数决策分类      | 111        |
| 7.3.1        | Fisher 线性判别法       | 111        |
| 7.3.2        | Fisher 判别函数的训练     | 113        |
| 7.3.3        | Fisher 分段线性判别函数    | 117        |
| 7.4          | 聚类分析法与非监督分类        | 118        |
| 7.4.1        | 聚类准则               | 119        |
| 7.4.2        | $K$ -均值聚类法         | 120        |
| 7.4.3        | ISODATA 聚类法        | 121        |
| 7.4.4        | 基于核构造的动态聚类法        | 123        |
| 7.5          | 人工神经网络分类           | 125        |
| 7.5.1        | 多层感知器              | 125        |
| 7.5.2        | BP 算法              | 127        |
| 7.5.3        | 径向基函数网络            | 128        |
| 7.5.4        | Kohonen 网络         | 130        |
| <b>第 8 章</b> | <b>光谱特征选择与提取</b>   | <b>132</b> |
| 8.1          | 高维光谱特征分析基础         | 132        |
| 8.1.1        | 高维特征空间样本分布         | 132        |
| 8.1.2        | “维数灾难”现象           | 134        |
| 8.1.3        | 波段间相关性分析           | 135        |
| 8.2          | 类别可分性准则            | 136        |
| 8.2.1        | 基本特性               | 136        |
| 8.2.2        | 类内类间距离准则           | 137        |
| 8.2.3        | 概率距离准则             | 138        |
| 8.2.4        | 信息熵准则              | 140        |
| 8.3          | 基于类别可分性的特征提取       | 141        |
| 8.3.1        | 依类内类间距离准则的特征提取     | 142        |
| 8.3.2        | 依概率距离准则的特征提取       | 143        |
| 8.3.3        | 依信息熵准则的特征提取        | 145        |

|               |                   |            |
|---------------|-------------------|------------|
| 8.4           | 基于信息压缩的特征提取       | 146        |
| 8.4.1         | 主成分分析             | 146        |
| 8.4.2         | 噪声分离变换            | 149        |
| 8.5           | 独立成分分析特征提取        | 150        |
| 8.5.1         | 模型估计方法            | 151        |
| 8.5.2         | 快速 ICA 算法         | 154        |
| 8.6           | 投影寻踪特征提取          | 156        |
| 8.6.1         | 投影指标              | 157        |
| 8.6.2         | 基于 PP 的高光谱影像特征提取  | 158        |
| 8.7           | 非线性特征提取方法         | 158        |
| <b>第 9 章</b>  | <b>高光谱影像核方法分析</b> | <b>160</b> |
| 9.1           | 核函数与核方法原理         | 160        |
| 9.1.1         | 核函数               | 160        |
| 9.1.2         | 核方法               | 162        |
| 9.2           | 统计学习理论与支持向量机      | 163        |
| 9.2.1         | 统计学习理论            | 163        |
| 9.2.2         | 支持向量机             | 164        |
| 9.3           | 支持向量机分类           | 168        |
| 9.3.1         | 快速训练算法            | 168        |
| 9.3.2         | 多类分类器构造           | 169        |
| 9.3.3         | 核函数及参数选择          | 171        |
| 9.4           | 核 Fisher 判别分类     | 172        |
| 9.4.1         | Fisher 判别分析       | 172        |
| 9.4.2         | 核 Fisher 判别分析     | 173        |
| 9.4.3         | 核 Fisher 判别分类     | 174        |
| 9.5           | 相关向量机分类           | 178        |
| 9.5.1         | 稀疏 Bayes 模型       | 179        |
| 9.5.2         | 模型参数推断            | 180        |
| 9.5.3         | 相关向量机分类           | 181        |
| 9.6           | 非线性特征提取           | 183        |
| 9.6.1         | 核主成分分析            | 183        |
| 9.6.2         | 核巴氏距离投影寻踪         | 184        |
| 9.6.3         | 广义判别分析            | 185        |
| <b>第 10 章</b> | <b>混合像元分解</b>     | <b>188</b> |
| 10.1          | 概述                | 188        |
| 10.1.1        | 混合像元分解的意义         | 188        |
| 10.1.2        | 混合像元分解流程          | 189        |
| 10.2          | 光谱混合模型            | 189        |
| 10.2.1        | 混合光谱的成因           | 189        |

|               |                       |            |
|---------------|-----------------------|------------|
| 10.2.2        | 线性混合模型                | 192        |
| 10.2.3        | 非线性混合模型               | 194        |
| 10.2.4        | 随机混合模型                | 195        |
| 10.3          | 端元个数估计                | 196        |
| 10.3.1        | NPD 算法                | 197        |
| 10.3.2        | 正交子空间投影法              | 198        |
| 10.4          | 端元提取技术                | 201        |
| 10.4.1        | 典型端元提取算法              | 201        |
| 10.4.2        | 空间信息辅助下的端元提取技术        | 203        |
| 10.4.3        | 基于粒子群优化的端元提取算法        | 204        |
| 10.5          | 光谱解混技术                | 206        |
| 10.5.1        | 监督分解算法                | 206        |
| 10.5.2        | 非监督分解算法               | 211        |
| <b>第 11 章</b> | <b>高光谱与高空间分辨率影像融合</b> | <b>213</b> |
| 11.1          | 概述                    | 213        |
| 11.1.1        | 像素级融合                 | 213        |
| 11.1.2        | 特征级融合                 | 214        |
| 11.1.3        | 决策级融合                 | 214        |
| 11.2          | 融合预处理                 | 215        |
| 11.2.1        | 辐射校正                  | 215        |
| 11.2.2        | 几何纠正                  | 216        |
| 11.2.3        | 影像配准                  | 216        |
| 11.3          | 高光谱与高空间分辨率影像融合算法      | 216        |
| 11.3.1        | 通用像素级融合算法             | 217        |
| 11.3.2        | 通用像素级融合算法特点分析         | 220        |
| 11.3.3        | 基于非负矩阵分解的融合算法         | 221        |
| 11.3.4        | 基于遗传算法的融合方法           | 223        |
| 11.3.5        | 基于影像光谱复原的空间域融合方法      | 226        |
| 11.3.6        | 基于混合像元分解的融合算法         | 227        |
| 11.3.7        | 基于边缘信息的光谱信息保持型融合算法    | 228        |
| 11.4          | 融合效果评价                | 229        |
| 11.4.1        | 主观评价方法                | 229        |
| 11.4.2        | 客观评价方法                | 230        |
| 11.4.3        | 综合评价方法                | 232        |
| <b>第 12 章</b> | <b>高光谱数据处理系统设计</b>    | <b>235</b> |
| 12.1          | 高光谱数据处理系统现状分析         | 235        |
| 12.1.1        | 国外高光谱数据处理系统介绍         | 235        |
| 12.1.2        | 国内高光谱数据处理系统介绍         | 237        |
| 12.2          | 高光谱数据处理系统结构设计         | 238        |

|           |                         |     |
|-----------|-------------------------|-----|
| 12.2.1    | 高光谱影像数据结构·····          | 239 |
| 12.2.2    | 数据处理流程设计·····           | 239 |
| 12.2.3    | 系统体系结构设计·····           | 240 |
| 12.3      | 高光谱数据处理系统功能设计·····      | 241 |
| 12.3.1    | 影像数据预处理模块·····          | 242 |
| 12.3.2    | 属性信息分类提取模块·····         | 242 |
| 12.3.3    | 数据融合模块·····             | 243 |
| 12.4      | 高光谱数据处理关键技术及其实现·····    | 243 |
| 12.4.1    | 高光谱影像几何校正技术·····        | 244 |
| 12.4.2    | 高维光谱特征压缩和提取技术·····      | 245 |
| 12.4.3    | 高光谱与高空间分辨率数据融合处理技术····· | 245 |
| 12.4.4    | 高精度的分类提取技术·····         | 246 |
| 12.5      | 高光谱遥感影像分析软件系统·····      | 247 |
| 12.5.1    | 高光谱影像读存显示·····          | 247 |
| 12.5.2    | 高光谱影像预处理·····           | 248 |
| 12.5.3    | 高光谱影像特征分析·····          | 248 |
| 12.5.4    | 高光谱影像分类识别·····          | 248 |
| 12.5.5    | 地物光谱数据库·····            | 251 |
| 参考文献····· |                         | 253 |
| 彩图        |                         |     |

# 第1章 绪 论

在现代遥感技术体系中, 高光谱遥感自 20 世纪 80 年代异军突起。虽然它是个后来者, 但经过近三十年的迅猛发展, 已充分表现出在信息获取方面的巨大优势和潜力, 同时也逐步显露其在数据分析处理、信息融合以及地物与目标精细探测等方面独有的技术特色和魅力。本章首先分析高光谱遥感在对地观测的大体系框架中所扮演的角色, 讨论其对于完整意义上的地理空间信息获取的必要性和有效性, 接下来结合本书相关内容的安排, 介绍高光谱影像处理和分析所面临的主要理论和技术问题。

## 1.1 对地观测体系中的高光谱遥感技术

1948 年, 英国天体物理学家弗莱德·霍伊尔 (Fred Hoyle) 爵士作了这样的预言: “一旦有了从外太空拍摄的地球照片……一个历史上最具威力的新观念就会随之放展开来。”事实上, 他讲这番话时人类尚未进入太空时代。六十多年后的今天, 当我们再回顾现代遥感技术的发展历程, 在惊叹于这项技术成长之迅速、影响之广泛和深入的同时, 也不得不佩服霍伊尔的先见之明。

从字面意义理解, “遥感”(remote sensing) 意为“遥远的感知”。因此, 它是一种远距离的目标探测技术和方法, 即利用从目标反射和辐射的电磁波来获取观测对象的信息, 并进行处理、分析, 从而实现对目标的定性或定量描述。作为一种以非接触探测为主要特征的信息获取手段, 遥感技术已渗透到现代社会的各个角落。可以说, 小到个人的生活、消费, 大到各类经济活动、国家乃至我们地球家园的安全, 遥感技术或作为不可或缺的元素、或作为基本的技术支撑, 发挥着日益显著的作用。同时, 由于它本身就是信息技术大家庭的一个重要成员, 其发展既具备得天独厚的外部条件, 又带有鲜明的信息时代特色。

在我们谈论遥感技术的时候, 常常会涉及一个饶有兴趣的话题, 这便是遥感的起源和发展。对于前一个问题, 即遥感源于何时, 常常会有不同的答案。一种看法是, 遥感技术起源于“遥感”概念的提出。按照这一观点, 遥感技术应诞生于 20 世纪 60 年代初。1960 年, 美国女地质学家布鲁特 (Puritt) 首次提出了“遥感”这一概念。接下来, 在 1962 年美国密执安大学召开的环境科学专题讨论会上, 这一术语被正式采用。自此以后, “遥感”便以特定的含义在科技与学术界中得到流传和使用。

但是, 按照这一标准来界定遥感的起源显然难以获得一致的认同。事实上, 一个更为合理的方法是用“遥感”的定义来追寻它的起源。按照前面对遥感概念的分析, 科学意义上遥感技术的诞生应当与一种远距离的探测技术、手段或设备的产生相联系。诞生于 19 世纪 30 年代的摄影术很好地满足了这一要求。进一步地, 如果把问题限定在从空中对地面的探测, 那么在 1858 年, 两个法国人用装载照相机的气球从巴黎上空首次成功获得地面照片这一事件便可视作航空遥感的诞生标志。在这之后, 随着 1903 年莱特兄弟发明飞机, 航空摄影变得极为便捷而灵活, 再加上军事需求的带动特别是第一次世界大战的爆