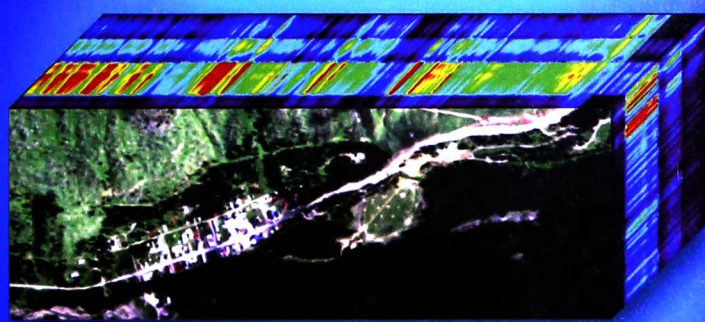




地球观测与导航技术丛书

高光谱遥感影像处理

张良培 杜博 张乐飞 著



科学出版社

014023443

TP722
07



国家出版基金项目
NATIONAL PUBLICATION FOUNDATION

地球观测与导航技术丛书

高光谱遥感影像处理

张良培 杜 博 张乐飞 著



科学出版社
北京

TP722
07



北航 C1709379

内 容 简 介

本书系统阐述高光谱遥感影像处理的基本问题和解决方法,介绍高光谱遥感影像处理的最新理论进展和研究成果。全书围绕利用信号处理理论进行高光谱遥感影像信息提取,共分6章:第1章概述高光谱遥感影像处理技术;第2章主要介绍高光谱遥感影像自动端元提取;第3章开展光谱分解方面的研究;第4章针对高光谱影像中普遍存在的亚像元目标探测问题深入研讨;第5章全面深入开展高光谱遥感影像特征提取和分类问题研究;第6章详细介绍基于计算机视觉中最新的张量分析方法。

本书不但可以作为研究生、高年级本科生高光谱遥感专业教材,而且对遥感、地球科学、模式识别等领域的研究人员也有较大的参考价值。

图书在版编目(CIP)数据

高光谱遥感影像处理 / 张良培, 杜博, 张乐飞著. —北京: 科学出版社, 2014. 1

(地球观测与导航技术丛书)

ISBN 978-7-03-036377-0

I. ①高… II. ①张…②杜…③张… III. ①光谱分辨率-光学遥感-遥感图象-图象处理 IV. ①TP722

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2012) 第 318851 号

责任编辑: 彭胜潮 苗李莉 朱海燕 / 责任校对: 郑金红

责任印制: 赵德静 / 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

*

2014 年 1 月第 一 版 开本: 787×1092 1/16

2014 年 1 月第一次印刷 印张: 16 3/4 插页: 8

字数: 375 000

定价: **89.00 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 凯 江碧涛 景 宁

景贵飞 李 京 李 明 李传荣 李加洪

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；工业和信息化部、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 计划和 863 计划主题的丰硕成果，又能促进领域内相关成果的传播和交流，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 计划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

前 言

高光谱遥感是 20 世纪 80 年代发展起来的对地观测新技术，被列为遥感技术在 20 世纪最后 20 年三个最显著的进展之一。高光谱遥感技术首次将图像特征与丰富的光谱特征结合，具有单波段、多波段影像的图像信息，同时其光谱分辨率高达数纳米。因此“图谱合一”“波段数目众多”和“光谱连续”是高光谱遥感影像的突出特点。遥感影像信息处理技术是一门以信号和图像处理、模式识别等理论为基础提取地学信息的学科。传统遥感影像处理方法以单波段、多波段遥感影像为研究对象，不能适应高光谱遥感影像所呈现的巨大波段维数、波段相关性极高等特点，因此发展高光谱遥感影像处理技术，已成为信号处理、模式识别等领域的研究热点。

光谱特征是 高光谱遥感影像的最重要特征，其基本原理在于：不同类型物质对太阳电磁波具有不同的反射特性，表现为不同形状的光谱曲线；相同物质对太阳电磁波的反射特性则是相同的。找到这些不同的典型物质光谱形状，就成为解译高光谱影像的基础。相应地，提取并识别高光谱遥感影像上纯净像元的光谱即端元，成为高光谱影像处理的基本问题之一，也是高光谱影像处理的一个重要思路。端元提取结果可以为地物类型识别提供依据。在端元概念基础上建立的混合像元模型是高光谱影像处理中应用最为广泛的模型，将对影像的描述转化为对每个像元包含端元及其组分比例的描述。混合像元模型与地表电磁波传输和反射规律相符合，同时很好地描述像元光谱变化现象。确定该模型中的端元组分信息，可以实现亚像元信息解译、软分类等应用。其思路有两种：一是在端元光谱的基础上，进行基于最小二乘等方法的反演；二是利用独立成分分析、非负矩阵分解等优化方法，将端元、组分同时求出。亚像元目标探测是一种特殊的地物信号识别问题，仅对混合像元内单一端元感兴趣。端元提取、光谱分解和亚像元目标探测是高光谱遥感影像处理的基本问题，其理论基础是信号处理理论。高光谱遥感影像作为一类特殊的模式识别问题，其特征提取、分类、变化检测也是重要的研究内容。人工智能、模式识别和机器视觉方法主要用以解决上述问题，成为高光谱遥感影像处理的另一个理论来源。以 DNA 计算、免疫系统、神经网络为代表的人工智能理论方法极大地丰富了高光谱遥感影像处理技术方法。流形学习、张量分析和半监督学习等模式识别和机器视觉理论也被逐渐引入高光谱遥感影像信息处理中，并显示出巨大的优势。

本书为武汉大学测绘遥感信息工程国家重点实验室遥感研究小组在高光谱影像处理领域二十余年研究成果的系统集成。本书首次完整地阐述高光谱影像处理的主要研究内容、解决方法和面临的难题等，介绍高光谱影像处理的最新研究成果，展望高光谱影像处理未来的发展方向，对高光谱遥感影像处理、模式识别、信号处理等领域的研究人员具有一定的借鉴意义。

全书由张良培教授执笔，杜博、张乐飞协助撰写。本书编写过程中，得到武汉大学测绘遥感信息工程国家重点实验室钟燕飞教授、黄昕教授和李华丽、焦洪赞、王挺、王楠、武辰、石茜、许明明、张玉香等研究生的帮助，本书的部分内容来自本小组已经毕业的博士生的研究成果，主要包括吴波、吴柯、黄远程，在这里一并表示感谢。

地球观测与导航技术丛书已出版图书

序号	书名	作者	出版时间
1	地理信息共享技术与标准	龚健雅, 等	2009
2	遥感数据智能处理方法与程序设计 (第二版)	马建文	2010
3	面向任务的遥感信息聚焦服务	李德仁, 等	2010
4	遥感数据自动化处理方法与程序设计	马建文	2011
5	轨道力学	周建华, 等	2011
6	GPS 增强参考站网络理论	黄丁发, 等	2011
7	空间聚类分析及应用	邓敏, 等	2011
8	遥感影像信息库	陈圣波, 等	2011
9	基于几何代数的多维统一 GIS——理论·算法·应用	袁林旺, 等	2012
10	内陆水体高光谱遥感	张兵, 等	2012
11	空间信息剖分组织导论	程承旗, 等	2012
12	交通地理信息系统技术与前沿进展	李清泉, 等	2012
13	永久散射体雷达干涉理论与方法	刘国祥, 等	2012
14	海洋地理信息系统原理与实践	周成虎, 等	2013
15	航天光学遥感器辐射定标原理与方法	顾行发, 等	2013
16	环境一号卫星遥感数据处理	余涛, 等	2013
17	星载雷达干涉测量及时间序列分析的原理、方法与应用	陈富龙, 等	2013
18	卫星高光谱红外大气遥感原理和应用	董超华, 等	2013
19	高光谱影像分析与应用	余旭初, 等	2013
20	城市环境遥感方法与实践	杜培军, 等	2013
21	空间数据挖掘理论与应用 (第二版)	李德仁, 等	2013
22	高光谱遥感影像处理	张良培, 等	2013

目 录

《地球观测与导航技术丛书》出版说明

前言

第 1 章 高光谱影像处理技术概述	1
1.1 成像光谱仪概述	1
1.1.1 成像光谱仪	1
1.1.2 国内外主要成像光谱仪	5
1.2 高光谱遥感影像信息提取的现状与难点	7
1.3 高光谱遥感信号处理理论	9
1.3.1 端元获取与光谱分解	9
1.3.2 目标探测	10
1.3.3 高光谱遥感影像处理中的信号处理方法	11
1.4 高光谱遥感影像智能处理方法	18
1.4.1 人工免疫系统理论	18
1.4.2 特征提取与降维理论	23
1.4.3 智能化分类器理论	28
参考文献	34
第 2 章 高光谱遥感影像自动端元提取	37
2.1 高光谱遥感影像混合像元模型	37
2.1.1 光谱线性混合模型	38
2.1.2 非线性混合模型	40
2.1.3 线性光谱分解方法的拓展	40
2.1.4 基于多项式拟合的非线性混合光谱模型	43
2.2 非监督正交子空间投影方法	45
2.2.1 正交子空间投影	45
2.2.2 UOSP 迭代提取端元光谱	46
2.2.3 结合空间关系的 UOSP 提取端元	48
2.2.4 实验分析	48
2.3 融合空间信息的端元提取方法	55
2.3.1 研究背景和意义	55
2.3.2 融合空间特征的端元光谱混合自动提取方法 HEEA	55
2.3.3 实验分析	57

参考文献	64
第 3 章 高光谱遥感影像光谱分解	67
3.1 基于总体最小二乘的混合光谱线性扩展模型	67
3.1.1 混合光谱线性扩展模型	67
3.1.2 TLS 扩展模型的算法	69
3.1.3 线性扩展模型的混合像元分解实验	71
3.1.4 扩展模型分解结果与端元类内变化的关系	76
3.1.5 基于光谱维小波特征的混合像元扩展模型	77
3.2 基于核最小二乘回归的非线性扩展模型	78
3.2.1 核空间理论及其应用	78
3.2.2 核最小二乘 (KLS) 回归分解模型与算法	80
3.2.3 神经网络与支持向量回归	84
3.2.4 实验分析	87
3.3 基于稀疏约束的混合光谱分解	96
3.3.1 混合光谱分解的稀疏问题	97
3.3.2 混合光谱分解稀疏约束的基本形式	97
3.3.3 混合光谱分解的稀疏约束方法	98
3.3.4 混合光谱分解的稀疏约束求解的分析	102
参考文献	113
第 4 章 高光谱遥感影像目标探测	115
4.1 目标探测器的设计原则	115
4.1.1 目标探测方法的分类	119
4.1.2 基于统计决策的探测器	121
4.1.3 探测器性能标准	122
4.1.4 恒定虚警率方法	123
4.1.5 最优探测器设计	126
4.2 结构化目标探测方法	127
4.2.1 约束能量最小化方法	129
4.2.2 正交子空间投影方法	130
4.2.3 目标约束下的干扰最小化滤波算法	131
4.2.4 基于特征变换的目标探测方法	132
4.3 非结构化目标探测方法	143
4.3.1 Kelly 广义化似然比的探测算子	144
4.3.2 自适应余弦估计探测器	145
4.3.3 自适应匹配滤波器	146
4.4 端元可变的混合探测器	147

4.4.1	端元类型确定	147
4.4.2	混合探测器	149
4.4.3	端元可变的混合探测器的构造	149
4.4.4	实验分析	151
4.5	基于子空间的高光谱变化检测方法	156
4.5.1	变化检测算法	156
4.5.2	实验分析	157
	参考文献	161
第5章	高光谱遥感影像特征提取与分类	165
5.1	基于克隆选择的高光谱遥感影像特征选择方法	165
5.1.1	克隆选择理论与算法	165
5.1.2	克隆选择特征选择算法	167
5.1.3	带权的克隆选择特征选择算法	171
5.1.4	常州市夏桥 PHI 影像特征选择实验与分析	172
5.1.5	结论	179
5.2	资源限制性人工免疫系统的高光谱遥感影像分类方法	180
5.2.1	资源限制性人工免疫系统	180
5.2.2	基于资源限制性人工免疫系统的遥感影像分类方法	181
5.2.3	常州市夏桥 PHI 影像分类实验与分析	186
5.2.4	结论	188
5.3	人工 DNA 计算的高光谱遥感影像编码与匹配分类方法	188
5.3.1	人工 DNA 计算基本概念	189
5.3.2	高光谱遥感影像的 DNA 计算模型与方法	190
5.3.3	常州市夏桥 PHI 影像光谱匹配分类实验与分析	195
5.3.4	结论	197
5.4	基于流形学习的特征提取与分类	198
5.4.1	传统流形学习算法回顾	199
5.4.2	块排列框架	200
5.4.3	判别局部排列	201
5.4.4	判别局部正切排列	202
5.4.5	实验分析	204
	参考文献	209
第6章	高光谱遥感影像的张量分析方法	212
6.1	张量代数	212
6.2	张量最优子空间理论	215
6.2.1	高光谱遥感影像降噪的概述	215

6.2.2	基于张量最优子空间的多维滤波算法	216
6.2.3	实验分析	218
6.2.4	结论	225
6.3	高光谱遥感影像多特征一体化张量表达方法	225
6.3.1	高光谱影像的多特征张量描述方法概述	226
6.3.2	实验分析	230
6.3.3	结论	233
6.4	张量流形理论	233
6.4.1	张量判别局部排列	234
6.4.2	实验分析	238
6.4.3	结论	243
6.5	张量学习	243
6.5.1	张量学习的一般框架	244
6.5.2	支持张量机	245
6.5.3	实验分析	247
6.5.4	结论	250
	参考文献	250

彩图

第 1 章 高光谱影像处理技术概述

1.1 成像光谱仪概述

1.1.1 成像光谱仪

高光谱成像技术是 20 世纪 80 年代兴起的新型成像技术，典型的硬件设备是成像光谱仪。成像光谱仪通过响应物质表面反射或发射的不同波长电磁波来获取影像，具体到遥感领域，主要是通过机载或星载成像光谱仪对地表物质反射的太阳电磁波信号进行响应（张良培和张立福，2005）。通过这种方式获取的遥感影像即高光谱遥感影像。高光谱遥感影像与多光谱遥感影像的显著区别在于，成像光谱仪通过分光技术，将电磁波信号分解为许多微小、相邻的波段，对应波段上的能量被不同的传感器捕获，因此高光谱遥感影像具有波段数目众多、光谱分辨率极高的数据特点（浦瑞良和宫鹏，2003）。成像光谱仪的分光过程示意图如图 1.1 所示。一般认为，光谱分辨率在 $10^{-1} \mu\text{m}$ 数量级范围内的遥感称为多光谱（multi-spectral）遥感，光谱分辨率在 $10^{-2} \mu\text{m}$ 数量级范围内的遥感称为高光谱（hyper-spectral）遥感，光谱分辨率在 $10^{-3} \mu\text{m}$ 数量级范围内的遥感称为超光谱（ultra-spectral）遥感（王长耀等，2001）。遥感技术把人们研究地表信息的能力由陆地推向太空，拓宽了人们的研究视野，极大地提高了人们宏观地进行对地观测的能力；成像光谱技术则把遥感波段从几个、几十个推向数百个、上千个。高光谱遥感数据每个像元可以提供几乎连续的地物光谱曲线，使我们利用高光谱反演陆地细节成为可能。高光谱遥感技术已经成为当前遥感领域的前沿技术。

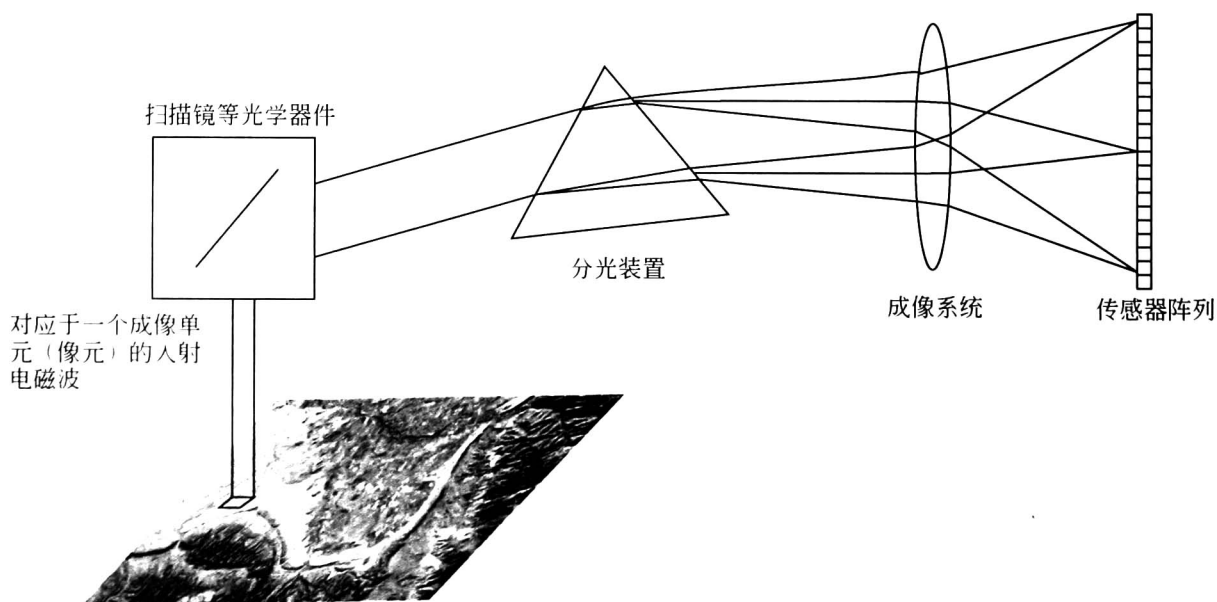


图 1.1 成像光谱仪的分光过程示意图

资料来源：Introduction to Hyperspectral Imaging, MicrolImages, Inc., 2006

高光谱遥感的基础是波谱学。早在 20 世纪初，波谱学就被用于识别分子和原子的结构。由于物质是由分子、原子构成的，组成物质的分子、原子的种类及其排列方式决定了该物质区别于其他物质的本质特征。当电磁波入射物质表面时，物质内部的电子跃迁，原子、分子的振动、转动等作用使物质在特定的波长形成特有的吸收和反射特征，能够通过物质的反射（或吸收）光谱反映出物质的组成成分与结构的差异，然而这些吸收和反射特征在传统的多光谱遥感数据上很难清楚地体现（童庆禧和田国良，1990）。

高光谱遥感影像的光谱分辨率可低于 10nm，波段数目高达数百个，甚至上千个。所谓光谱，是指复色光经过色散系统（如棱镜、光栅）分光后，被色散开的单色光按波长（或频率）大小而依次排列的图案，全称为光学频谱。光谱分辨率是指成像光谱仪中不同波段在光谱上的波长间隔。光谱中的可见光谱是电磁波谱中人眼可见的一部分，在这个波长范围内的电磁辐射被称做可见光。成像光谱仪可以捕获电磁波谱中的全部波长，并且光谱分辨率很高，这就是高光谱遥感影像光谱分辨率高、光谱连续的特点。此外，高光谱遥感影像的另一个显著特点是图谱合一，即同时记录了地物的图像信息和光谱信息：其中每个波段分别成像、将各个波段影像叠合组成一个数据立方体，每个波段都是一幅特定波长上的图像，而每个像元在每一幅影像上的辐射值则又组成了连续的光谱信息（张良培和张立福，2005）。图 1.2 显示了高光谱遥感影像图谱合一的特点。

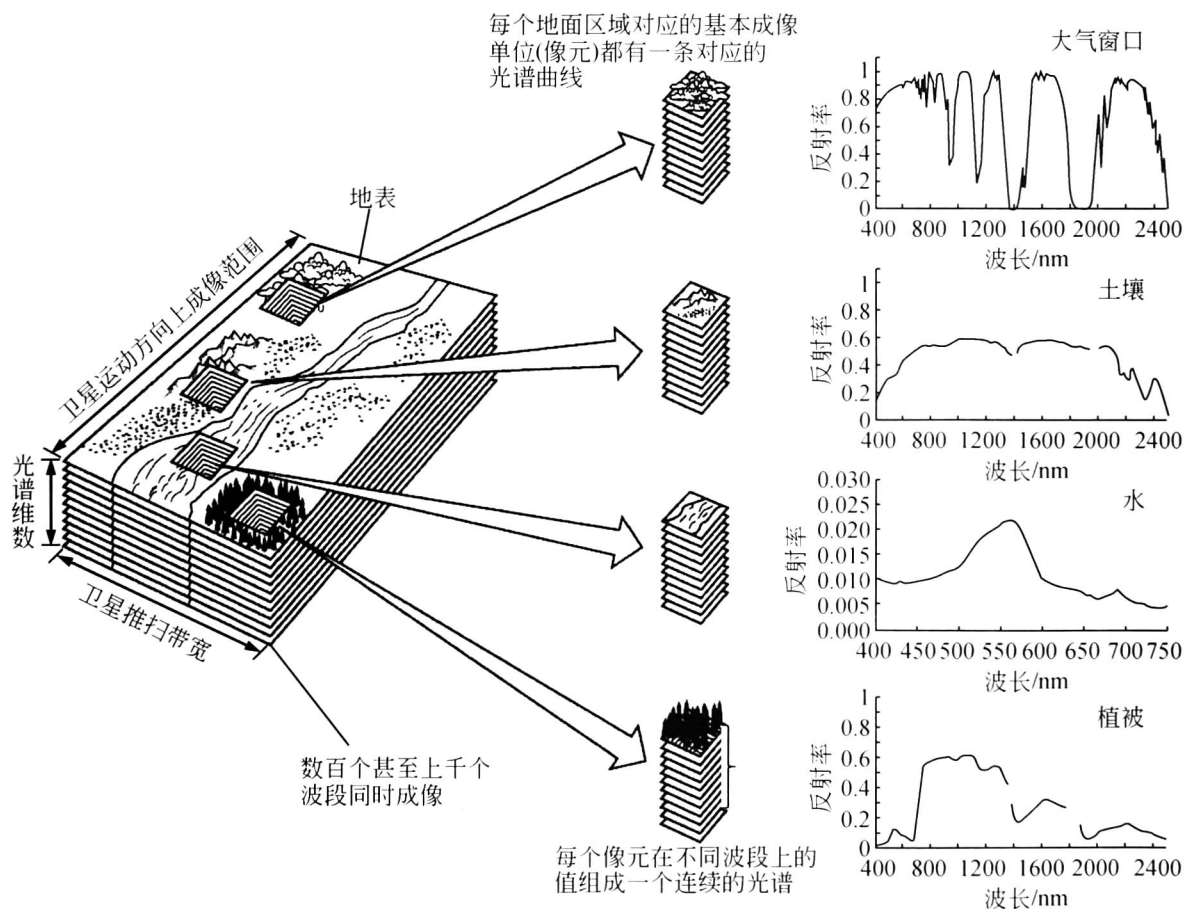


图 1.2 高光谱遥感原理图

高光谱遥感技术深刻地改变了人们认识世界的方式，这不仅是由于其同时表征了地物的空间信息与光谱信息，更重要的是其第一次以极高的精度细致描绘了地物的光谱特征。地物的光谱特征是指，不同材质的地物对不同波长电磁波的吸收和反射情况的差别。将地

物对不同波长电磁波的反射率连续绘制在波长-反射率坐标系中就得到光谱曲线，不同地物光谱特征在光谱曲线上可以得到较好地反映，如图 1.3 所示。在光谱曲线上，那些急剧下降的波谷位置反映了地物对特定波长上入射电磁波的选择性吸收，这称为吸收特征，相应的波长位置称为吸收波段（童庆禧等，2006a）。研究表明，许多地表物质的吸收特征在吸收峰深度一半处的宽度为 20~40nm。而成像光谱仪可获得的连续波段宽度一般都小于 10nm，因此高光谱遥感影像足以反映地物光谱曲线上的吸收特性（Landgrebe，2002）。在不同的波长上，不同物质会呈现出不同的吸收特征，利用这一点，高光谱遥感影像在诸多应用领域显示出巨大的应用价值（张良培和黄昕，2009），如图 1.4 所示为高光谱技术

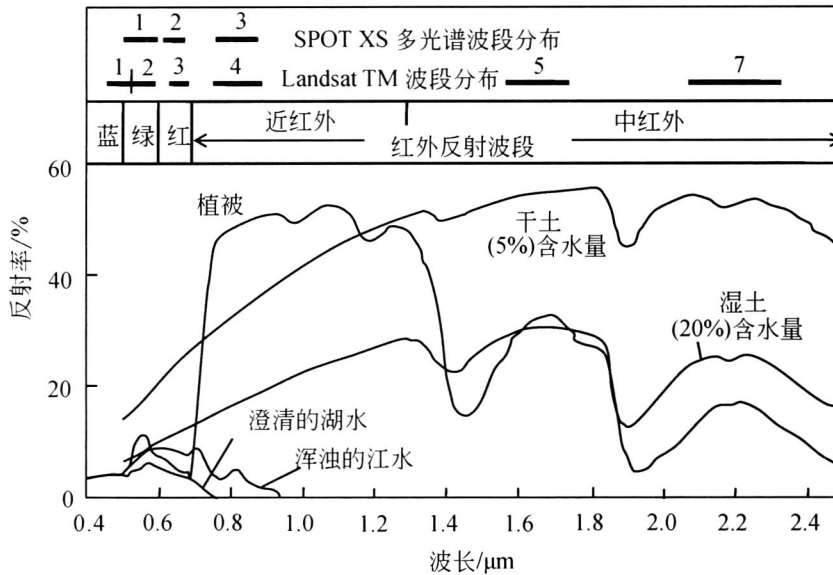


图 1.3 典型地物的光谱曲线与多光谱影像波段分布

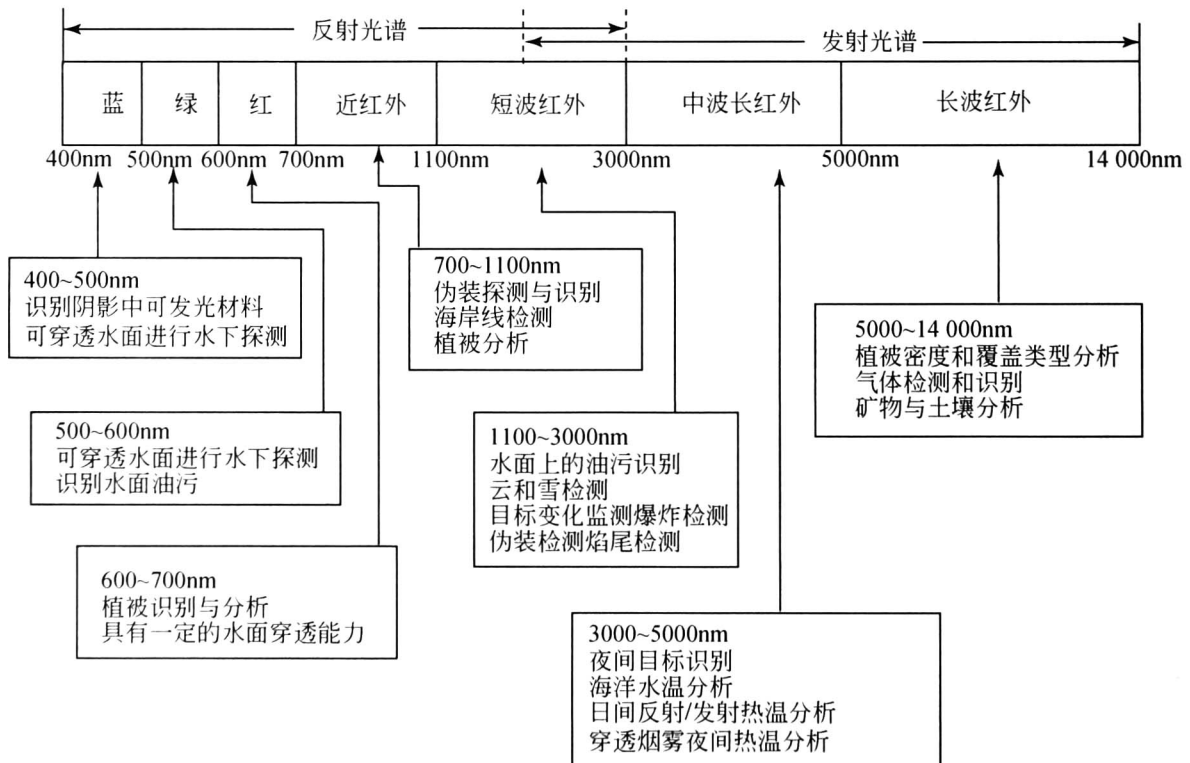


图 1.4 高光谱遥感技术在不同波长上的应用 (400 ~ 14 000nm)

在不同波长上可进行的应用 (Michael and Farrell, 2005)。此外, 光谱曲线的整个曲线形状也是重要的光谱特征, 利用吸收特性或光谱曲线形状, 就可以区分与识别不同的物质, 这就是高光谱遥感影像可以反映物质诊断性光谱的特点 (张良培等, 1997)。

20 世纪 80 年代的成像光谱仪 (imaging spectrometer) 的研究计划, 最早由美国加州理工学院喷气推进实验室 (Jet Propulsion Lab, JPL) 的一些学者提出, 并在美国国家航空和航天管理局 (National Aeronautics and Space Administration, NASA) 的支持下, 相继推出了系列成像光谱仪产品 (叶荣华等, 2001), 如机载航空成像光谱仪 (airborne imaging spectrometer, AIS) 系列、航空可见光/红外成像光谱仪 (airborne visible/infrared imaging spectrometer, AVIRIS)、星载中分辨率成像光谱仪 (moderate resolution imaging spectroradiometer, MODIS)、高分辨率成像光谱仪 (high resolution imaging spectrometer, HIRIS) 等。它是指在特定光谱域以高光谱分辨率同时获得连续的地物光谱图像, 使得遥感应用可以在光谱维上进行空间展开, 定量分析地球表层生物物理化学过程与参数。之后, 成像光谱技术的研究进入了一个高速发展期, 各国纷纷投入资金加大成像光谱仪的研究。加拿大、日本、澳大利亚等国相继研制出了不同应用目的的成像光谱仪。我国在成像光谱仪的研究开发方面也取得了令人瞩目的成绩, 相继成功研制出机载成像光谱仪 (modular airborne imaging spectrometer, MAIS)、航空成像光谱仪 (operational modular imaging spectrometer, OMIS) 系列以及星载高光谱成像光谱仪 (China high resolution imaging spectrometer, C-HRIS) 等。

遥感平台以及传感器技术的发展, 推动了遥感技术的快速发展, 计算机技术、数据存储以及信息处理技术的发展, 使遥感技术应用渗透到国民经济的各个领域, 对推动经济建设、社会进步、环境的改善和国防建设起到了重大作用。高光谱遥感硬件及软件技术的发展, 推动遥感应用由地表深入地下, 丰富了遥感的内涵, 拓宽了遥感的应用领域, 给遥感注入了新的活力, 推动了遥感理论、技术及应用研究的发展。尤其是近年来遥感技术在生物地球化学方面, 如植被生物量估计 (张良培等, 1997)、矿产资源探测、环境监测、海洋调查、精细农业 (王长耀等, 2001) 等领域的成功应用, 使高光谱遥感技术呈现出美好的应用前景。

尽管遥感信息处理技术在全数字化、可视化、智能化和网络化等方面有了很大的发展, 但就目前遥感技术的发展状况来看, 硬件技术的发展远远超前于遥感信息的处理, 海量光谱遥感信息远没有被充分挖掘和处理, 信息处理还远不能满足现实需要。据估计, 空间遥感获取的遥感数据, 经过计算机处理的还不足 5%。因此, 遥感信息处理方法与技术有待于深入研究和开发。

高光谱遥感具有不同于传统遥感的新特点, 主要表现在: ①波段多——可以为每个像元提供几十个、数百个甚至上千个波段; ②光谱范围窄——波段范围一般小于 10nm; ③波段连续——有些传感器可以在 350 ~ 2500nm 的太阳光谱范围内提供几乎连续的地物光谱; ④数据量大——随着波段数的增加, 数据量成指数增加; ⑤信息冗余增加——由于相邻波段高度相关, 冗余信息也相对增加。因此, 一些针对传统遥感数据的图像处理算法和技术, 如特征选择与提取、图像分类等技术面临挑战。如用于特征提取的主成分分析方法, 用于分类的最大似然法、用于求植被指数的 NDVI 算法等, 不能简单地直接应用于高光谱数据。

高光谱分辨率遥感信息的分析与处理, 侧重于从光谱维角度对遥感图像信息进行展开

和定量分析，其图像处理模式的关键技术有：①超多维光谱图像信息的显示，如图像立方体的生成；②光谱重建，即成像光谱数据的定标、定量化和大气纠正模型与算法，依此实现成像光谱信息的图像-光谱转换；③光谱编码，尤其指光谱吸收位置、深度、对称性等光谱特征参数的算法；④基于光谱数据库的地物光谱匹配识别算法；⑤混合光谱分解模型；⑥基于光谱模型的地表生物物理化学过程与参数的识别和反演算法。

1.1.2 国内外主要成像光谱仪

至今为止，世界各国都竞相发展高光谱成像技术。从最早 1984 年由美国 JPL 研制的机载成像光谱仪（被认为是得到最好定标和研究的成像光谱仪），到 1994 年美国海军实验室（The Naval Research Lab）研制的 HYDICE，到 2000 年搭载在 NASA 的 EO-1 卫星上的 Hyperion，2001 年欧洲空间局包含 18 个近红外波段的 PROBA/CHRIS，到由澳大利亚 HyVista Corporation 发射的星载商用的 HYMAP 成像光谱仪，再到中国 2007 年的嫦娥 1 号和 2008 年的 HY-1。表 1.1 是世界主要的高光谱遥感传感器。随着高光谱遥感传感器的精度逐渐增加和高光谱传感器的商业化、普及化，高光谱遥感技术在农业、环境、军事、交通、勘测、规划等领域发挥着越来越大的作用，成为国民经济建设不可或缺的有力技术手段（田庆久和宫鹏，2002；童庆禧等，2006b；张良培和黄昕，2009）。光谱分辨率与空间分辨率的提高是遥感技术发展的重要趋势。20 世纪 70 年代初美国发射的陆地卫星仅有 4 个波段，其平均光谱分辨率为 150nm；80 年代的 TM 则增加到 7 个波段，在可见光到近红外光谱范围的平均光谱分辨率为 137nm；法国 SPOT 卫星的多光谱波段的光谱分辨率为 87nm。高光谱成像遥感技术的发展是 20 世纪 80 年代遥感技术的最大成就之一。

表 1.1 世界主要高光谱遥感传感器

高光谱传感器	所属机构	国家/地区	波段数目	波长/ μm
AVIRIS	NASA	美国	224	0.4 ~ 2.5
AISA	光谱成像公司 (Spectral Imaging Ltd.)	芬兰	286	0.45 ~ 0.9
CASI	Itres Research 公司	加拿大	288	0.43 ~ 0.87
DAIS 2115	GER 公司	美国	211	0.4 ~ 12.0
HYMAP	集成分光专营公司 (Integrated Spectronics Pty Ltd.)	澳大利亚	128	0.4 ~ 2.45
PROBE-1	地球研究科学专营公司 (Earth Search Sciences Pty Ltd.)	美国	128	0.4 ~ 2.45
PHI	中国科学院上海技术物理研究所	中国	224	0.46 ~ 0.85
OMIS	中国科学院上海技术物理研究所	中国	128/68	0.46 ~ 12.5
CHRIS	欧洲空间局	欧洲	18	0.415 ~ 1.05
HJ-1	中国资源卫星应用中心	中国	110 ~ 120	0.4 ~ 0.95

美国的成像技术发展较早，从 20 世纪 80 年代至今已经研制了三代高光谱成像光谱仪。第一代成像光谱仪为航空成像光谱仪（AIS），是由 NASA 所属的喷气推进实验室设

计，并于1984~1986年装在NASA的C-1300飞机上使用。这是一台装有二维、近红外阵列探测器的实验仪器，有128个通道，光谱覆盖范围为12~24 μm 。AIS在内华达州Cuprite地区的应用中取得很好的效果。1987年研制成功的航空可见光/红外光成像光谱仪(AVIRIS)为成像光谱仪的第二代产品。AVIRIS是首次测量全部太阳辐射光谱范围(400~2500nm)的成像光谱仪，共有224个通道。它已经为科学研究和实际应用提供了大量的图像数据。AVIRIS与AIS相比，在传感器设计以及定标、数据系统、飞行高度等方面都有很大改进，以满足科研和应用AVIRIS数据质量的需要。与此同时，加拿大、澳大利亚、日本等国家竞相投入力量研究成像光谱仪，美国GER公司不失时机地研制成功实用型GERIS，并投入商业运行，其中63个通道为高光谱分辨率扫描仪，第64通道是用来存储航空陀螺信息。该仪器由3个单独的线性阵列探测器的光栅分光计组成。它与其他仪器的区别是在不同的光谱范围区内，通道的光谱宽度是不同的。第三代高光谱成像光谱仪为克里斯特里尔傅里叶变换高光谱成像仪(FTHSI)，适合在Cessna-206轻型飞机上使用。它的重量为35kg，采用256通道，光谱范围为400~1050nm，有2~10nm的光谱分辨率，视场角为150°。

与此同时，国内成像光谱仪的发展也取得了长足的进步。“七五”期间研制了各自专题应用扫描仪：IR/UV是为海洋环境航空遥感监测业务系统研制的专用扫描仪；VIS/MIR/IR三波段扫描仪是探测森林火灾的专题扫描仪；早期的6波段红外细分光谱扫描仪(FIMS)和热红外多光谱扫描仪(ATIMS)以遥感地质为目标，是识别蚀变岩性的主要工具，并在新疆寻找金矿和塔里木石油勘探应用中取得了重要进展。高光谱遥感技术取得了突飞猛进的发展。在此基础上，“八五”期间又发展了71波段的模块化航空成像光谱仪(MAIS)系统。目前，我国第一台224波段推帚式高光谱成像仪(PHI)与128波段实用型模块化机载成像光谱仪(OMIS)已研制成功并进行了多次成功的航空遥感实验。

另外，中国科学院上海技术物理研究所研制的中分辨率成像光谱仪于2002年随“神舟”三号飞船发射升空，这是继美国1999年发射EOS平台之后人类第二次将中分辨率成像光谱仪送上太空，从而使中国成为世界上第二个拥有航天载成像光谱仪的国家。我国目前研制的中分辨率成像光谱仪可以一次处理500km范围的信息，精度可以达到500m，光谱通道为34个，图像清晰度和层次与美国EOS平台同类成像光谱仪图像的分辨率相同、通道质量相当，技术已达到了世界先进水平。这台中分辨率成像光谱仪是“神舟”三号飞船轨道舱的主载荷，飞船返回地面后，成像光谱仪在343km高度的非太阳同步轨道上稳定运行了半年，其探测内容包括海洋、大气和陆地三个部分：海洋以海洋水色、水温探测为主，兼顾海冰和海岸带探测，重点探测叶绿素浓度、悬浮泥沙含量、污染物；大气以水汽和气溶胶探测为主；陆地以大尺度土壤和植被分布等地表探测为主。所获得地球目标的不同光谱影像，可以为农业估产、可再生资源的动态调查、实时自然灾害的监测以及海洋环境与海洋初级生产力调查等提供服务。

经过20世纪80年代的起步与90年代的发展，一系列高光谱成像系统在国际上研制成功并在航空平台上获得了广泛的应用。至20世纪90年代后期，在高光谱遥感应用的一系列重要技术问题，如图像-光谱变换和光谱信息提取、大数据量信息处理、光谱匹配和光谱识别、分类等问题得到基本解决之后，高光谱遥感一方面由实验研究阶段逐步转向实际应用阶段，而在技术发展方面则由以航空系统为主开始转向于航空和航天高光谱分辨率遥感系统相结合的阶段。迄今为止，国际上已有许多套航空成像光谱仪处于运行状态，在