



工业和信息化部“十二五”规划专著
国防电子信息技术丛书

Hyperspectral Remote Sensing Images Processing
Methods and Applications

高光谱遥感 图像处理方法及应用

赵春晖 王立国 齐 滨 著

 中国工信出版集团



电子工业出版社
PUBLISHING HOUSE OF ELECTRONICS INDUSTRY
<http://www.phei.com.cn>

工业和信息化部“十二五”规划专著
国防电子信息技术丛书

高光谱遥感图像处理方法及应用

Hyperspectral Remote Sensing Images Processing
Methods and Applications

赵春晖 王立国 齐 滨 著

电子工业出版社
Publishing House of Electronics Industry
北京·BEIJING

内 容 简 介

随着成像光谱技术及遥感处理技术的不断发展, 高光谱遥感数据被广泛应用于各个领域。与多光谱图像相比, 高光谱成像光谱仪能够在较宽的波谱范围内, 利用狭窄的光谱间隔成像, 得到上百幅通道、波段连续的图像, 每个像素均可提取一条完整的高分辨率光谱曲线, 使得许多原本在多光谱图像中无法发现的地物特征得以被探测。本书简要介绍了高光谱遥感图像的成像原理和图像特点, 主要分析了各种高光谱图像处理技术在使用中遇到的问题, 并提出了相应的处理方法; 论述内容主要包括高光谱遥感的特征选择, 高光谱遥感的端元选择, 混合光谱理论与光谱解混, 高光谱图像的监督分类和半监督分类, 高光谱图像的匹配目标检测、异常目标检测以及实时目标检测, 高光谱数据压缩技术和可视化技术, 最后概括地介绍了高光谱遥感图像在各个领域的应用。本书包括了著者多年来取得的科研成果, 可以使读者比较全面地了解高光谱图像处理的各个领域以及最新研究进展。

本书既可作为高等院校遥感专业相关师生的参考书, 又可作为不同信息系统中对高光谱遥感进行研究的科研人员的参考书, 也可供从事环境监测、农业管理、海洋开发等应用层面的决策者阅读参考。

未经许可, 不得以任何方式复制或抄袭本书之部分或全部内容。

版权所有, 侵权必究。

图书在版编目(CIP)数据

高光谱遥感图像处理方法及应用 / 赵春晖, 王立国, 齐滨著. —北京: 电子工业出版社, 2016.4

(国防电子信息技术丛书)

ISBN 978-7-121-27908-9

I. ①高… II. ①赵… ②王… ③齐… III. ①遥感图象—图象处理—方法 IV. ①TP751

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2015) 第 307544 号

策划编辑: 马 岚

责任编辑: 马 岚 特约编辑: 姚 旭

印 刷: 涿州市京南印刷厂

装 订: 涿州市京南印刷厂

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: 24.75 字数: 634 千字

版 次: 2016 年 4 月第 1 版

印 次: 2016 年 4 月第 1 次印刷

定 价: 89.00 元

凡所购买电子工业出版社图书有缺损问题, 请向购买书店调换。若书店售缺, 请与本社发行部联系, 联系及邮购电话: (010)88254888, 88258888。

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。

本书咨询联系方式: classic-series-info@phei.com.cn。

前 言

高光谱遥感技术(Hyperspectral Remote Sensing Technology)起源于多光谱遥感,是20世纪80年代开始发展的一种新兴遥感技术,其突出的优势在于提供了丰富的地物光谱波段,较高的光谱分辨率可以解决许多在全色和多光谱遥感中无法解决的问题。高光谱图像有效地结合了代表地物辐射属性的光谱信息和反映空间几何关系的图像信息,其所携带的光谱信息提供了区别地物光谱细微差别的能力,使得许多原本在多光谱遥感图像中无法获取的光谱信息得以探测。高光谱图像的光谱分辨率为纳米级,成像光谱仪将成像传感器的空间表示与光谱仪的分析能力相结合,在可见光、近红外、短波红外以及中红外等电磁波谱范围内,利用狭窄的光谱间隔成像,可以为每个像素提供数十至数百个窄波段,从而产生一条完整而连续的光谱曲线,使得地物的精确定量分析与细节提取成为可能,为人们对各种地物的分析提供了重要的依据。

随着高光谱遥感技术光谱分辨率的不断递增,人们对地物光谱属性特征的认知也不断随之深入,许多隐藏在狭窄光谱范围内的地物特性逐渐被人们所发现,这些因素大大加速了遥感技术的发展,使高光谱遥感成为21世纪遥感技术领域重要的研究方向之一。与多光谱遥感相比,高光谱遥感提供了更加丰富的地物光谱,其较宽的波谱覆盖范围使得高光谱数据处理时,可以根据需要选择特定的波段突显地物特征,为高光谱数据处理算法提供更多的地物原始数据,因此,高光谱遥感技术被广泛应用在矿物成分含量识别、植被识别与分类、植物的长势与化学成分估测、大气中各成分含量分析、水域环境污染程度分析、土壤调查、城市监测和规划等方面,且取得了显著成果。

高光谱遥感成像是一门新兴的交叉学科,以计算机、传感器、航空航天等技术为基础,涉及电磁波理论、物理科学、光谱学与几何光学、信息学、电子工程、地质学、地理与地球科学、大气科学、海洋科学、农学和林学等多个学科。其中,电磁波理论是最重要的基础,通过准确接收和记录电磁波与地物间复杂的相互作用,可以提供丰富的地物信息,进而得到高光谱图像数据立方体。目前,许多国家开展大量的科研项目对高光谱遥感进行研究,研制出许多不同类型的成像光谱仪,在光谱分光方式、空间成像方式和光电转换探测器的研究中不断深入,逐步从地面遥感发展到与航空、航天遥感应应用平台相结合的阶段。另外,高光谱遥感技术在与全球定位系统融合的过程中,形成新型的地物信息获取与对地信息观测平台,极大地拓展了高光谱遥感技术的应用领域,为地学的研究提供了新的技术支持和科研方法。

全书共分12章,分别讲述高光谱遥感的特征选择、高光谱遥感的端元选择、混合光谱理论与光谱解混、高光谱图像的监督分类和半监督分类、高光谱图像的匹配目标检测、异常目标检测以及实时目标检测、高光谱数据压缩技术和可视化技术,最后概括地介绍了高光谱遥感在农作物病虫害检测、农作物产量估计、矿物识别和矿物填图、草地监测及草地种类识别、森林调查、海洋环境监测、大气污染监测,土壤侵蚀监测、水环境监测、灾害的预警分析和实时监测等方面的应用。本书以主要篇幅论述高光谱遥感图像处理过程和信息处理过程中出现的各种问题,对高光谱数据在各个应用领域的处理方法提出改进措施,在高光谱遥感处理

的理论基础、成像机理、处理算法、应用领域及各种困难都进行了较为详细和全面的阐述。

本书为工业和信息化部“十二五”规划专著，是在著者承担国家自然科学基金(61077079、61275010、61405041、61571145)，高等学校博士学科点专项基金(20062302170021、20102304110013、20132304110007)，黑龙江省自然科学基金重点项目(ZJG0606-01、ZD201216)，中国博士后基金(2014M551221)，黑龙江省博士后基金(LBH-Z13057)，黑龙江省博士后科研启动金(LBH-Q15025)和黑龙江省留学归国人员科学基金资助项目(JJ2016LX0051)所取得成果的基础上撰写而成的。博士生刘春红、王玉磊、梅峰、李晓慧、成宝芝、刘丹凤、郝思媛为本书的算法设计及仿真实验做了大量工作，在此表示感谢。另外，本书撰写过程中，参阅了有关书籍和文献，同时也向这些作者致以诚挚的谢意！最后，感谢电子工业出版社对本书的出版给予的配合与支持。

由于著者水平有限，以及研究内容跨度大、编程软硬件条件差异大、涉及研究人员多等实际问题，在理论和技术方面还有很多不足、还未能将国内外更多的最新研究成果涵盖其中，衷心希望广大读者批评指正和不吝赐教，著者将在后续的工作中进一步完善。

著 者

2015 年 7 月于哈尔滨

目 录

第 1 章 高光谱遥感的理论基础	1
1.1 高光谱遥感概述	1
1.2 高光谱遥感成像机理	5
1.3 高光谱遥感图像的特点	8
1.4 高光谱遥感图像数据表达	9
1.5 高光谱遥感与多光谱遥感的联系与区别	10
参考文献	11
第 2 章 高光谱图像特征提取技术	12
2.1 特征提取技术概述	12
2.2 高光谱图像基本特征提取算法	16
2.2.1 主成分分析	16
2.2.2 线性判别分析	17
2.2.3 基于核的非线性特征提取算法	18
2.2.4 基于流形学习的非监督特征提取算法	18
2.2.5 F -分值特征提取方法	22
2.2.6 递归特征消除方法	22
2.2.7 最小噪声分数	23
2.2.8 独立成分分析	24
2.3 高光谱图像波段提取算法	25
2.3.1 半监督局部稀疏嵌入特征提取算法	25
2.3.2 基于全局和局部流形结构的特征提取算法	27
2.3.3 结合遗传算法和蚁群算法的特征提取算法	29
2.3.4 高光谱图像蒙特卡罗特征提取算法	31
2.4 高光谱图像波段提取算法性能评价	34
2.4.1 半监督局部稀疏嵌入特征提取算法的性能评价	35
2.4.2 基于全局和局部流形结构的特征提取算法的性能评价	38
2.4.3 结合遗传算法和蚁群算法的特征提取算法的性能评价	41
2.4.4 高光谱图像蒙特卡罗特征提取算法的性能评价	46
参考文献	48
第 3 章 高光谱图像端元提取技术	49
3.1 端元提取技术概述	49
3.2 高光谱图像基本端元提取方法	49
3.2.1 N-FINDR 端元提取算法	49

3.2.2	纯像素索引法	50
3.2.3	凸锥分析	51
3.2.4	迭代误差分析	52
3.2.5	ORASIS 算法	52
3.2.6	自动形态学端元提取算法	52
3.2.7	顶点成分分析法	54
3.3	高光谱图像端元提取算法	55
3.3.1	改进的 N-FINDR 高光谱端元提取算法	55
3.3.2	改进的 IEA 端元提取算法	58
3.4	高光谱图像端元提取方法的性能评价	60
3.4.1	改进的 N-FINDR 高光谱端元提取算法的性能评价	60
3.4.2	改进的 IEA 端元提取算法的性能评价	61
	参考文献	65
第 4 章	高光谱图像光谱解混技术	66
4.1	光谱解混技术概述	66
4.2	高光谱图像基本光谱解混算法	68
4.2.1	线性光谱混合模型	68
4.2.2	丰度反演算法	69
4.2.3	解混误差理论分析	70
4.2.4	解决端元可变问题算法	72
4.2.5	光谱解混精度评价	76
4.3	高光谱图像光谱解混算法	77
4.3.1	基于正交子空间投影的多端元高光谱解混算法	77
4.3.2	基于分层的多端元高光谱解混算法	79
4.3.3	基于全约束 OMP 的多端元高光谱解混算法	81
4.3.4	基于稀疏表示的高光谱解混算法	83
4.3.5	改进的 OMP 高光谱稀疏解混算法	87
4.3.6	自适应稀疏度的 OMP 高光谱稀疏解混算法	90
4.4	高光谱图像光谱解混算法评价	91
4.4.1	基于 OSP 的多端元高光谱解混算法评价	91
4.4.2	基于分层的多端元高光谱解混算法评价	95
4.4.3	基于全约束 OMP 的多端元高光谱解混算法评价	100
4.4.4	基于稀疏表示的高光谱解混算法评价	103
4.4.5	改进的 OMP 高光谱稀疏解混算法评价	105
4.4.6	自适应稀疏度的 OMP 高光谱稀疏解混算法评价	110
	参考文献	112
第 5 章	高光谱图像监督分类技术	114
5.1	高光谱图像分类技术概述	114
5.2	高光谱图像基本分类算法	116

5.2.1	光谱角匹配	116
5.2.2	最大似然分类	117
5.2.3	Fisher 判别分析	117
5.2.4	支持向量机分类器	118
5.2.5	相关向量机分类器	126
5.3	高光谱图像分类的评价准则	128
5.4	高光谱图像分类算法	129
5.4.1	基于高斯低通滤波的最大似然分类	129
5.4.2	基于小波核函数的高光谱图像分类	131
5.4.3	基于第二代小波融合的高光谱图像分类	134
5.4.4	基于特征加权的高光谱图像分类	141
5.4.5	基于定制核稀疏表示的高光谱图像分类	143
5.4.6	基于模糊加权核 C-均值聚类的高光谱图像分类	147
5.4.7	模糊特征加权支持向量机	151
5.5	高光谱图像分类算法的性能评价	153
5.5.1	基于高斯低通滤波的最大似然分类性能评价	154
5.5.2	基于小波核函数的高光谱图像分类性能评价	158
5.5.3	基于第二代小波融合的高光谱分类性能评价	160
5.5.4	基于特征加权的高光谱分类性能评价	164
5.5.5	基于定制核稀疏表示的分类评价	168
5.5.6	模糊加权核 C-均值聚类算法的分类评价	173
5.5.7	模糊特征加权支持向量机的分类评价	175
	参考文献	178
第 6 章	高光谱图像半监督分类技术	181
6.1	高光谱图像半监督分类技术概述	181
6.2	高光谱图像基本半监督分类算法	182
6.2.1	图论的基础概念	182
6.2.2	基于图的半监督分类算法	184
6.3	高光谱图像半监督分类算法	187
6.3.1	结合 LLGC 和 LS-SVM 的半监督分类算法	187
6.3.2	引入负相似的 LapSVM 半监督分类	191
6.3.3	基于空-谱信息的高光谱半监督分类算法	196
6.3.4	基于空-谱标签传递的高光谱半监督分类算法	200
6.4	高光谱图像半监督分类算法的性能评价	202
6.4.1	结合 LLGC 和 LS-SVM 半监督分类算法的性能评价	202
6.4.2	引入负相似的 LapSVM 半监督分类的性能评价	206
6.4.3	基于空-谱信息的高光谱半监督分类的性能评价	211
6.4.4	基于空-谱标签传递的高光谱半监督分类的性能评价	217
	参考文献	227

第 7 章	高光谱图像目标匹配检测技术	229
7.1	目标匹配检测技术概述	229
7.2	高光谱图像基本目标匹配检测算法	231
7.2.1	高光谱图像目标匹配检测的关键问题	231
7.2.2	高光谱图像目标检测的一般过程与评价标准	232
7.2.3	经典的高光谱图像目标匹配检测方法	232
7.3	高光谱图像目标匹配检测算法	234
7.3.1	基于空间支持的稀疏表示目标检测	234
7.3.2	基于 StOMP 算法的 HSI 目标稀疏检测	239
7.3.3	基于无监督字典的 HSI 目标稀疏检测	242
7.4	高光谱图像目标匹配检测算法评价	245
7.4.1	基于空间支持的稀疏表示目标检测算法评价	245
7.4.2	基于 StOMP 算法的 HSI 目标稀疏检测算法评价	254
7.4.3	基于无监督字典的 HSI 目标稀疏检测	257
	参考文献	259
第 8 章	高光谱图像异常目标检测技术	261
8.1	异常目标检测技术概述	261
8.2	高光谱图像异常目标检测基本理论	265
8.3	高光谱图像异常目标检测算法	268
8.3.1	基于空域滤波的核 RX 高光谱异常检测算法	268
8.3.2	自适应核高光谱异常检测算法	272
8.3.3	基于光谱相似度量核的高光谱异常检测算法	277
8.4	高光谱图像异常目标检测算法评价	281
8.4.1	基于空域滤波的核 RX 高光谱异常检测算法评价	281
8.4.2	自适应核高光谱异常检测算法评价	282
8.4.3	基于光谱相似度量核的高光谱异常检测算法评价	284
	参考文献	289
第 9 章	高光谱实时目标检测技术	292
9.1	高光谱遥感目标检测概念及特点	292
9.1.1	目标存在形式	292
9.1.2	高光谱图像目标检测特点	292
9.1.3	高光谱图像目标检测分类	293
9.1.4	高光谱图像目标检测关键问题	293
9.2	基于像素递归的高光谱实时目标检测	295
9.2.1	Woodbury 矩阵引理	296
9.2.2	基于 R-RXD 的递归实时算子	297
9.2.3	基于 K-RXD 的递归实时算子	298
9.2.4	算法复杂性分析	299
9.2.5	仿真实验结果与分析	300

9.3	采用滑动实时窗的高光谱局部实时检测	305
9.3.1	高光谱局部异常检测常用算法	306
9.3.2	采用滑动实时窗口的局部异常检测	308
9.3.3	仿真实验结果与分析	311
9.4	基于波段递归更新的高光谱目标检测算法	315
9.4.1	分块矩阵求逆引理	315
9.4.2	基于波段递归的高光谱目标检测	316
9.4.3	仿真实验结果与分析	319
	参考文献	321
第 10 章	高光谱图像压缩处理技术	324
10.1	高光谱压缩处理技术概述	324
10.2	图像压缩质量评价标准	326
10.3	高光谱图像压缩处理算法	327
10.3.1	基于目标分布改进 DCT 的图像压缩	327
10.3.2	多元向量量化的图像压缩	329
10.3.3	基于提升格式的图像压缩	332
10.3.4	基于向量量化的图像压缩	335
10.4	高光谱图像压缩性能评价	337
10.4.1	基于目标分布的图像压缩性能评价	337
10.4.2	多元向量量化的图像压缩性能评价	343
10.4.3	基于提升格式的图像压缩性能评价	350
10.4.4	基于向量量化的图像压缩性能评价	351
	参考文献	352
第 11 章	高光谱图像可视化技术	354
11.1	可视化技术概述	354
11.2	面向类别分析结果的可视化方法	358
11.2.1	基于硬分类结果的数据可视化	359
11.2.2	基于软分类结果的自动彩色分配方法	361
11.3	高光谱图像可视化方法性能评价	364
11.3.1	硬分类类别彩色标签的选择及分配	364
11.3.2	基于光谱解混结果的可视化结果	366
	参考文献	368
第 12 章	高光谱遥感应用简介	369
12.1	高光谱遥感在农业方面的应用	369
12.1.1	农作物疾病监测、病虫害监测以及入侵物种监测	369
12.1.2	农作物产量估计	370
12.1.3	农作物分类	370
12.2	高光谱遥感在地质领域方面的应用	370
12.2.1	高光谱矿物识别与矿物填图	371

12.2.2	高光谱地质成因信息探测研究	371
12.2.3	高光谱成矿预测研究	371
12.2.4	高光谱植被地化信息探测研究	372
12.2.5	高光谱矿山环境分析研究	372
12.3	高光谱遥感在草原监测方面的应用	372
12.3.1	草地生物量估算	373
12.3.2	草地种类识别	374
12.3.3	草地化学成分估测	374
12.4	高光谱遥感在森林研究方面的应用	375
12.4.1	森林调查	375
12.4.2	森林生化组成与森林健康状态	376
12.5	高光谱遥感在海洋研究方面的应用	377
12.5.1	海洋遥感中的基础研究	377
12.5.2	海洋与海岸带资源环境监测中的应用研究	378
12.5.3	高光谱海洋研究国际发展相关动态	378
12.6	高光谱遥感在环境监测方面的应用	379
12.6.1	大气污染监测	379
12.6.2	土壤侵蚀监测	379
12.6.3	水环境监测	379
12.7	高光谱遥感在减灾方面的应用	380
12.7.1	干旱	380
12.7.2	洪涝	381
12.7.3	低温雨雪冰冻灾害	381
12.7.4	火灾	382
12.7.5	地质灾害	383
12.7.6	生物灾害	384
12.7.7	其他灾害	384
	参考文献	385

第1章 高光谱遥感的理论基础

1.1 高光谱遥感概述

遥感(Remote Sensing)指通过某种装置,不直接接触被研究目标和区域来获取地物光谱数据,并对所获取数据进行分析从而得到所需信息的一种技术(童庆禧,2006)。通常为空对地的遥感,即从远离地面的不同工作平台上(如高塔、气球、飞机、火箭、人造地球卫星、宇宙飞船、航天飞机等),通过传感器对地球表面的电磁波信息进行探测,并经信息的传输、处理和判读分析,对地球资源与环境进行探测和监测的综合性技术。遥感一词1960年首次出现在美国一项军事科研计划中,并在1962年第一届环境遥感学术讨论会上正式采用。1972年美国发射第一颗陆地卫星,标志着航天遥感时代的开始,此后,遥感技术得以快速发展。现代遥感技术主要包括信息的获取、传输、存储和处理等环节,完成上述功能的全套系统称为遥感系统,其核心组成部分是获取信息的传感器。遥感技术有多种分类方法,按照成像光谱仪所选用的波谱性质可分为电磁波遥感技术(可见光、红外、微波遥感技术),声呐遥感技术和物理场遥感技术(如重力和磁力场)。按照信息记录的表现形式可分为图像方式遥感技术和非图像方式遥感技术。按照成像光谱仪使用的平台可分为航天遥感技术、航空遥感技术、地面遥感技术。按照遥感的应用领域可分为地球资源遥感技术、环境遥感技术、气象遥感技术和海洋遥感技术等。

20世纪80年代初期,在多光谱遥感技术的基础之上出现了高光谱遥感(Hyperspectral Remote Sensing)技术,通过成像光谱仪记录带有地物光谱信息的太阳辐射信号,在可见光、近红外、短波红外、中红外等电磁波谱范围内利用狭窄的光谱间隔成像(Zhong, 2006; 张兵, 2011),获取近似连续、反映地物属性的光谱特征曲线,将表征地物属性特征的光谱信息与表征地物几何位置关系的空间信息有机地结合在一起,使得地物的精确定量分析与细节提取成为可能(Melgani, 2004; Sedaghat, 2011)。高光谱遥感是高光谱分辨率遥感的简称,可以同时获取描述地物分布的二维空间信息与描述地物光谱特征属性的一维光谱信息,其光谱分辨率为纳米级,使得许多原本在多光谱遥感图像中无法获取的光谱信息能够得以探测。高光谱遥感最初是根据成像光谱学的概念提出的,成像光谱仪是将成像传感器的空间表示与光谱仪的分析能力相结合的遥感仪器,为每个像素提供数十至数百个窄波段的光谱信息,能产生一条完整而连续的光谱曲线。高光谱遥感图像是将反映目标辐射的光谱信息与反映目标二维空间的图像信息集于一体,实现“图谱合一”,即在二维空间信息的基础上添加了一维光谱信息,波段宽度一般在10 nm以下。高光谱图像数据是二维图像空间和一维光谱的图像立方体,在图像空间中每个波段是一幅二维图像,在光谱空间中每个像素反映为一条连续光谱响应曲线,不同的物质在高光谱图像中表现为不同的辐射强度,如图1.1所示。由于高光谱遥感图像数据图谱合一的形式,它具有波段数多、波段宽度窄的特点,所以能对同一目标地物连续成像,可以反映出目标地物的光谱特征,而多光谱遥感不具有这一特征,这也是高光谱遥感与多光谱遥感的主要区别。随着高光谱遥感技术光谱分辨率的不断递增,人们对地物光谱属性特征

的认知也不断随之深入,许多隐藏在狭窄光谱范围内的地物特性逐渐被人们所发现,这些因素大大加速了遥感技术的发展,使高光谱遥感成为 21 世纪遥感技术领域重要的研究方向之一。

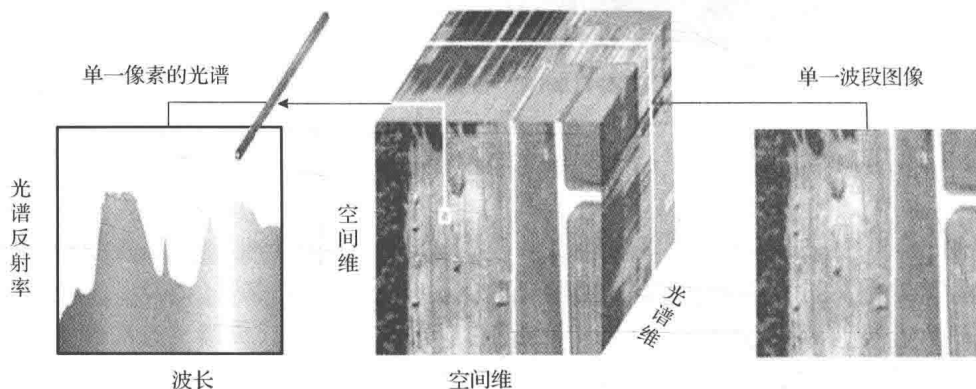


图 1.1 高光谱图像数据示意图

遥感成像技术的发展伴随着两方面的进步:一方面是通过缩小遥感器瞬时视场角来提高图像空间分辨率,另一方面是通过缩小波段的宽度和增多波段数量来提高图像光谱分辨率。由于成像光谱仪能够获得从紫外到热红外光谱区域的上百连续波段的图像,所以高光谱遥感技术被广泛应用在矿物成分含量识别、植被识别与分类、植物的长势与化学成分估测、大气中各成分含量分析、水域环境污染程度分析、土壤调查,以及城市监测和规划等,并取得了显著成果。

相对于多光谱遥感,高光谱遥感具有更加丰富的地物光谱信息,可以详细反映待测地物细微的光谱属性,其较宽的波谱覆盖范围使得在处理高光谱数据时,可以根据需要选择特定的波段来凸显地物特征,为高光谱数据处理算法提供更多的地物原始数据,使地物光谱信息的精确处理与分析成为可能。目前,许多国家开展大量的科研项目对高光谱遥感进行研究,研制出许多不同类型的成像光谱仪,在光谱分光方式、空间成像方式和光电转换探测器的研究中不断深入,逐步从地面遥感发展到航空和航天遥感应用平台相结合的阶段,并在地图绘制、资源勘探、农作物监测、精细农业、灾害调查、目标侦查、海洋环境监测和战场环境监测等领域发挥重要的作用。另外,高光谱遥感技术在与全球定位系统融合的过程中,形成新型的地物信息获取与对地信息观测平台,极大地拓展了高光谱遥感技术的应用领域,为地学的研究提供了新的技术支持和科研方法。

20 世纪 70 年代末,Goetz 等人在美国加州理工学院喷气推进实验室(Jet Propulsion Laboratory, JPL)首先提出将遥感用于成像光谱技术的研究计划,并在美国国家航空航天局(National Aeronautics and Space Administration, NASA)的支持下开始成像光谱仪的设计和研究。最早的航空成像光谱仪是 1983 年由美国喷气推进实验室研制的 AIS-1,在 $0.4 \sim 1.2 \mu\text{m}$ 波谱范围内,提供 128 个窄波段光谱信息,产生了一条近似完整而连续的光谱曲线,并在矿物填图、植被、化学等方面的应用中取得了成功,显示了成像光谱仪的巨大潜力。在 AIS 之后出现荧光成像仪(FLI)和固体阵列光谱辐射仪(ASAS),这两种成像光谱仪主要覆盖可见光和近红外光谱区。1987 年,航空可见光/红外光成像光谱仪(Airborne Visible InfraRed Imaging Spectrometer, AVIRIS)研制成功,AVIRIS 是首次测量全部太阳辐射覆盖波长范围 $0.4 \sim 2.5 \mu\text{m}$ 的成像光谱仪。与 AVIRIS 同一时间研制出的成像光谱仪还有加拿大的小型机载成像光谱仪(CASI),其光谱分辨率为 1.8 nm ,在可见光和部分近红外区域有 288 个波段。1996 年,由美国研制的高光谱数字实验图像仪(HYDICE)开始投入使用,它的探测范围为 $0.4 \sim 2.5 \mu\text{m}$,有

波段宽度为 3~20 nm 不等的 210 个波段。1999 年 12 月 8 日第一台中分辨率成像光谱辐射计 (MODerate-resolution Imaging Spectroradiometer, MODIS) 随美国地球观测系统 (Earth Observation System, EOS) 的 AM-1 平台进入轨道, 并于 2000 年 2 月完成仪器调试。经过 20 世纪 80 年代的起步和十几年的发展, 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广泛的应用。迄今为止, 国际上已有 40 余套航空成像光谱仪处于运行状态, 各类高光谱成像光谱仪的主要技术参数如表 1.1 所示。随着成像光谱硬件发展的成熟, 国内外研究人员已开发出多种遥感处理软件, 如加拿大的 PCI 和 Moridian 图像处理系统、美国 RSI 公司的 ENVI(The ENvironment for Visualizing Images)、ERDAS IMAGINE 图像与可视化系统、ER Mapper 等。PCI 的旗舰产品 Geomatica 目前已集成了遥感影像处理、GIS/空间分析、制图和桌面数字摄影测量系统, 成为一个独立的生产工作平台。ENVI 是一套功能齐全的遥感图像处理系统, 可以处理、分析并显示多光谱数据、高光谱数据和雷达数据。ER Mapper 是大型专业遥感图像处理软件, 能够处理遥感图像压缩, 数据网上发布等。与此同时, 我国的具代表性遥感处理软件包括中国科学院遥感应应用研究所的 ISRA 图像处理软件、北京大学的 Spaceman、石油部遥感应应用研究所和地矿部遥感中心开发的图像处理软件等。

表 1.1 高光谱成像光谱仪主要技术参数

卫星传感器	制 造 商	波 段 数	光谱范围 (μm)
FTHSI on MightySat II	美国空军研究实验室	256	0.35 ~ 1.05
Hyperion on EO-1	NASA 哥达德航天飞行中心	220	0.4 ~ 2.5
航天传感器	制 造 商	波 段 数	光谱范围 (μm)
AVIRIS	NASA 喷气推进实验室	224	0.4 ~ 2.5
HYDICE	美国海军研究院	210	0.4 ~ 2.5
PROBE-1	地球研究科学公司	128	0.4 ~ 2.5
CASI	ITRES 研究公司	228	0.4 ~ 1.0
HyMap	Integrated Spectronics 公司	100 ~ 200	VIS ~ TIR
EPS-H	GER 公司	VES/NIR (76) SWIR1 (32) SWIR2 (32) TIR (12)	VIS/NIR (0.43 ~ 1.05) SWIR1 (1.5 ~ 1.8) SWIR2 (2.0 ~ 2.5) TIR (8 ~ 12.5)
DAIS 7915	GER 公司	VES/NIR (32) SWIR1 (8) SWIR2 (32) MIR (1) TIR (6)	VIS/NIR (0.43 ~ 1.05) SWIR1 (1.5 ~ 1.8) SWIR2 (2.0 ~ 2.5) MIR (3.0 ~ 5.0) TIR (8.7 ~ 12.3)
DAIS 21115	GER 公司	VES/NIR (76) SWIR1 (64) SWIR2 (64) MIR (1) TIR (6)	VIS/NIR (0.40 ~ 1.0) SWIR1 (1.0 ~ 1.8) SWIR2 (2.0 ~ 2.5) MIR (3.0 ~ 5.0) TIR (8.0 ~ 12.0)
AISA	Spectral Imaging 公司	288	0.43 ~ 1.0

注: VIS (Visible) 表示可见光, NIR (Near Infrared) 表示近红外, SWIR (Shortwave Infrared) 表示短波红外, TIR (Thermal Infrared) 表示热红外, MIR (Mid Infrared) 表示中红外。

我国成像光谱仪的研制工作起步较早, 在国家重大科技发展计划的支持下, 相关研究机构和科研人员开展了高光谱成像技术的研究和成像光谱仪的研制。80 年代中后期, 我国开始着手发展高光谱成像系统。在自然科学基金研究的推动下, 上海技术物理研究所研制成功了

我国第一台 224 波段的推扫式高光谱成像仪 (Pushbroom Hyperspectral Imager, PHI), 取得了很好的效果。自此, 我国成像光谱仪的发展, 经历了从多谱带扫描到成像光谱扫描, 从光机扫描到面阵 CCD 扫描的发展过程, 为陆地科学、海洋科学和大气科学、自然灾害监测、海洋环境监测、农作物估产、森林调查等方面的研究提供了强有力的支持。我国于 2002 年 3 月发射的神舟 3 号无人飞船中就搭载了中分辨率的成像光谱仪 (CMODIS), 包含 34 个波段, 波长范围为 $0.4 \sim 12.5 \mu\text{m}$ 。2007 年我国发射了首颗探月卫星“嫦娥一号”, 搭载了由西安光机所研制的干涉式成像光谱仪, 其主幅宽 25.6 km, 月表像素分辨率 200 m, 光谱范围为 $0.48 \sim 0.96 \mu\text{m}$, 光谱波段数为 32, 标志着我国成像光谱仪的研究已经日趋成熟。

高光谱遥感并不是简单的数据量的增加, 而是信息量的增加, 信息量可以增加十倍至数百倍。高光谱遥感的出现使原本在宽波段遥感中不可探测的物质, 在高光谱遥感中可以被探知。由于成像光谱系统获得的连续波段宽度一般在 10 nm 以内, 因此这种数据能以足够的光谱分辨率区分出那些具有诊断性光谱特征的地表物质。在成像过程中, 高光谱遥感技术利用成像光谱仪以纳米级的光谱分辨率, 在几十或几百个波段同时对地表、地物成像, 能够获得地物的连续光谱信息, 实现地物空间信息、辐射信息、光谱信息的同步获取, 因而在相关领域具有巨大的应用价值和广阔的发展前景。按照高光谱应用的领域不同, 将高光谱图像应用划分为如表 1.2 所示。

表 1.2 高光谱遥感的应用领域

应用领域	具体应用
农田	资源调查、资源监测、作物估产、病虫害灾害预报
环境	水污染、空气污染和地表污染监测、酸雨的危害评估、地震和火山活动的监测和预报
地学	矿床勘探、岩石种类鉴定、海岸地形测定、浅海底地貌、浮游生物区等、水资源探测、旱涝灾害监测和预报等
测绘	制作地形图、制作影像地图、制作专题地图
公共安全	公共场所有毒气体监测
军事	伪装识别、自动目标检测与识别、军事侦察和探测

高光谱图像较高的光谱维数和光谱分辨率为地物识别带来巨大机遇的同时, 也向传统图像处理算法提出了挑战。数据的急剧膨胀不但给数据的存储与传输带来巨大的困难, 同时也加剧了数据处理过程的复杂性, 降低了数据处理的效率, 其过多冗余特征的存在也严重影响了传统图像处理算法的精度。在训练样本有限的情况下, 高光谱图像处理过程会遇到“维数灾难 (Hughes)”现象 (Bruce, 2002)。为提高数据处理的效率, 保障处理结果精度, 通常需要对原始数据进行降维处理, 选择数据中的重要波段或用较少的综合变量代替原有的波段信息, 即选择或强化最具可分性的光谱波段, 使得被选择的特征波段可以尽可能多地反映待测地物的特征属性。波段特征选择是一个对光谱特征空间进行降维处理的过程, 它根据某种映射准则, 将数据从原始特征空间投影到一个新的低维特征空间, 在降维处理后的特征空间中, 选择出的光谱特征可以突出地反映待测地物区别于其他地物的某一光谱属性。这种特征选择的准则主要是基于数据的光谱特征或者空间几何特征, 既可以对待测地物进行光谱维特征挖掘, 又可以从图像空间维进行特征挖掘。但在高光谱数据处理过程中, 仅使用某些选择的波段是不够的, 更重要的是获取隐藏在原始数据中的数据空间分布规则和光谱特征关系, 从而进行智能化处理。

信息处理技术的快速发展, 使得金融数据、医药数据、环境监查数据、地质探测数据、互联网数据的分析与解译成为亟待解决的问题。正是在这些实际问题的推动下, 引起了对统计分析与机器学习研究的广泛关注, 解决性质复杂、多元变量、结构烦琐、海量数据的模式

识别与预测分析成为相关领域的研究热点。模式识别、数据挖掘、统计学习、核空间映射等智能处理技术的快速发展,为解决高光谱图像的非线性分类问题提供了新的思路。将传统影像信息和地物光谱信息综合起来的成像光谱思想出现后,短短的几十年内高光谱遥感图像处理已经形成了一个具有独特特色的研究领域,并孕育发展了新兴学科门类——成像光谱学。随着成像光谱技术的发展和光谱分辨率的不断提高,高光谱遥感数据能够提供更加丰富的对地观测信息,可以解决许多在单波段图像和多光谱遥感图像中难以或无法解决的问题,因而得到了国内外众多学者的广泛关注并应用于各个领域。随着传感器技术、航空和航天平台技术以及通信技术的飞速发展,现代遥感对地观测已经达到能够动态、快速、多手段提供对地观测数据的新阶段。新型的传感器能够以不同空间分辨率、时间分辨率和光谱分辨率观测地面。目前遥感应用正由定性向定量、静态向动态发展。遥感对地观测技术目前已广泛应用于战场情报侦察、地面目标识别、气候变化监测、臭氧层损耗监测、土地利用和植被覆盖监测、植物生长监测、灾害监测、数字地球等方面。

1.2 高光谱遥感成像机理

遥感在 20 世纪得到了广泛的发展并成为最具有标志性的成就之一,它的基础是电磁波理论。按照波长范围的不同,其波谱可分为不同的光谱区间,遥感采用的电磁波波谱范围可以从紫外线到微波波段,如图 1.2 所示。高光谱遥感成像是指具有较高的光谱分辨率的遥感科学和成像技术,它是一门新兴的交叉学科并且以计算机、传感器、航空航天等技术为基础,涉及电磁波理论、物理科学、光谱学与几何光学、信息学、电子工程、地质学、地理与地球科学、大气科学、海洋科学、农学和林学等多个学科。其中,电磁波理论为最重要的基础,通过准确接收和记录电磁波与地物间复杂的相互作用提供丰富的地物信息,进而得到高光谱图像数据立方体。

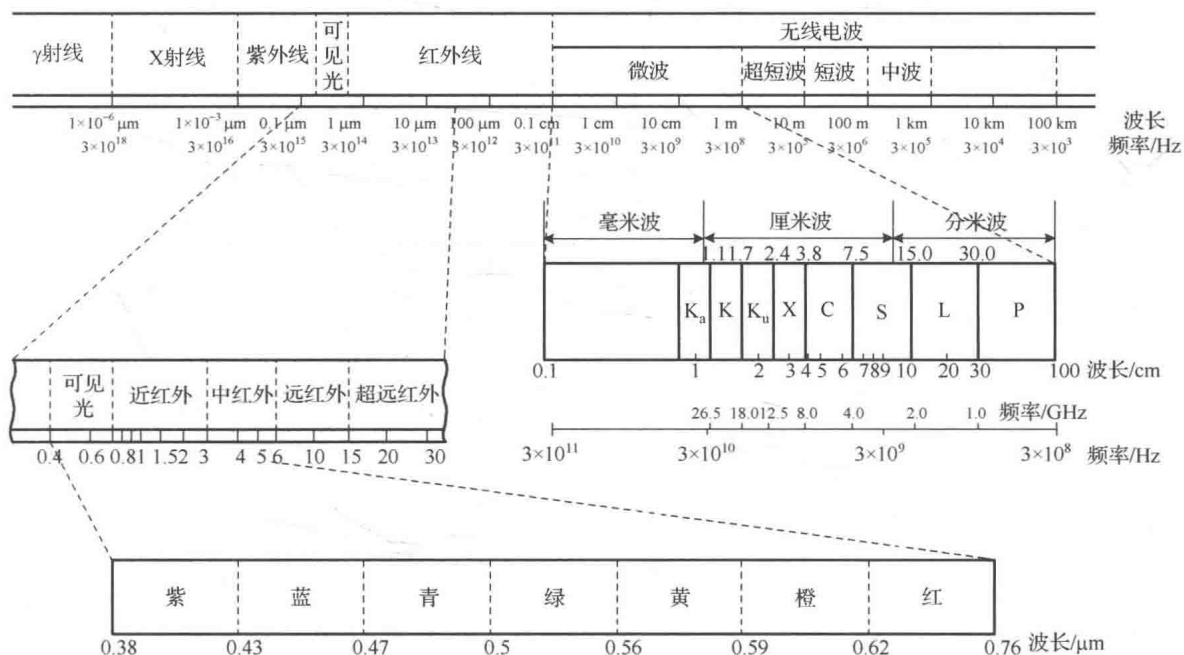


图 1.2 电磁波谱图

高光谱成像技术是建立在成像光谱学基础上的全新的综合性遥感技术，集光谱分光技术、光电转换技术、空间成像技术、探测器技术、精密光学技术、微弱信号检测技术、光学成像技术与计算机处理技术于一体(刘春红，2005)。以纳米级的光谱分辨率在可见光、近红外等电磁波谱范围，对待测地物地表的几十个甚至上百个波段同时成像，并对地物的光谱信息与空间几何分布信息进行同步获取，可以使得遥感技术的定量分析在光谱维和空间维上联合开展。图 1.3 为高光谱成像示意图。成像光谱仪将视域中观测到的各种地物以完整的光谱曲线记录下来，并将其应用于多学科研究。

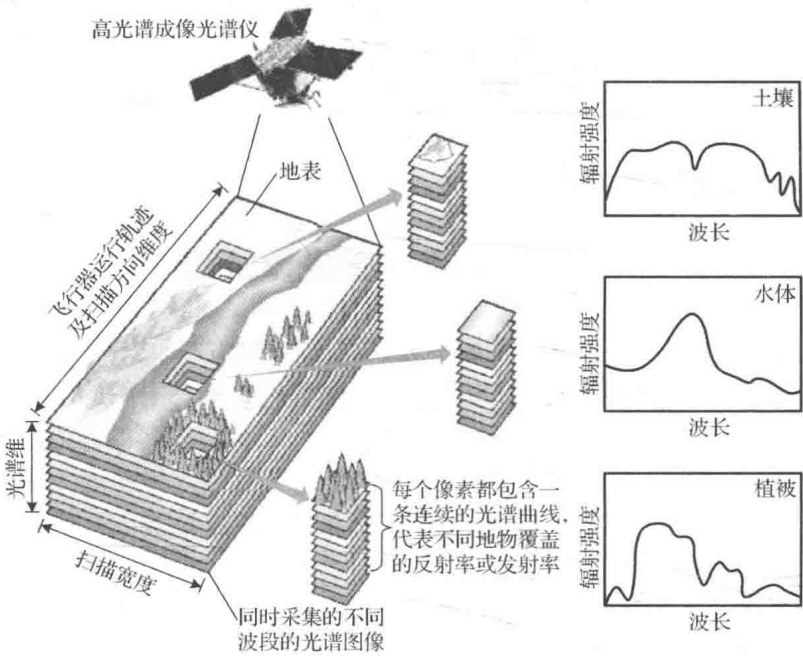


图 1.3 高光谱成像示意图

携带地物属性信息的太阳辐射信号经过“太阳—大气—地物—大气—高光谱扫描仪”的辐射信号传递过程到达高光谱扫描仪，通过前置光学器件，被光谱分光系统分解成不同波长、近似连续的高分辨率光谱信号，由与之对应的光电探测器接收并转变成电信号，实现光电转换过程，最后通过模数转换器件，得到获取的原始高光谱信号，高光谱扫描仪光谱成像的主要过程如图 1.4 所示。

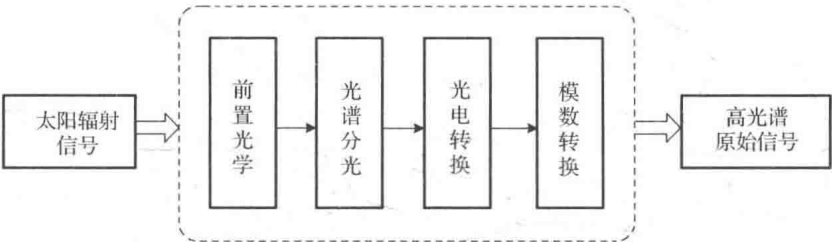


图 1.4 高光谱成像仪的主要成像过程

目前成像光谱仪根据光谱分光原理的不同，发展出多种光谱分光方法，从光谱分光原理上划分，主要包括色散型、干涉型及滤光片型光谱分光技术(杨国鹏，2010)。色散型光谱分光技术的分光器件主要包括入射狭缝、准直镜、色散棱镜、物镜以及光谱探测器(张兵，2002)。