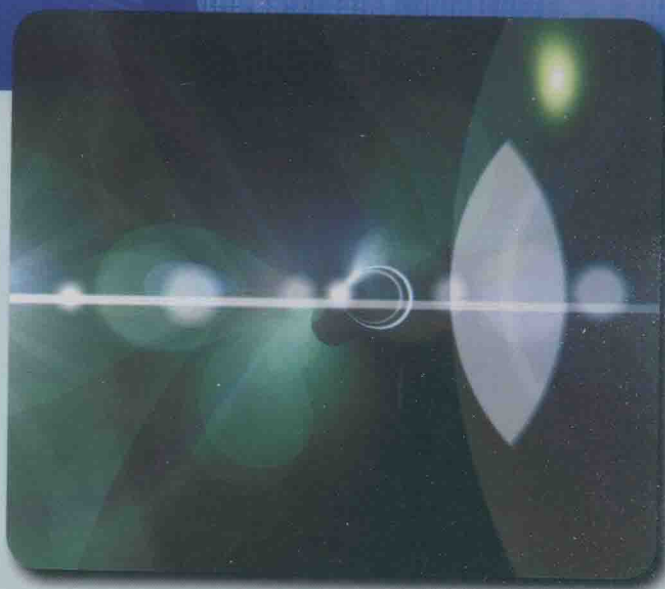


高光谱图像混合像元非线性 分解技术

唐晓燕 著

GAO GUANG PU TUXIANG
HUN HE XIANGYUAN
FEI XIAN XING FEN JIE JI SHU



电子科技大学出版社

University of Electronic Science and Technology of China Press

3) 目录

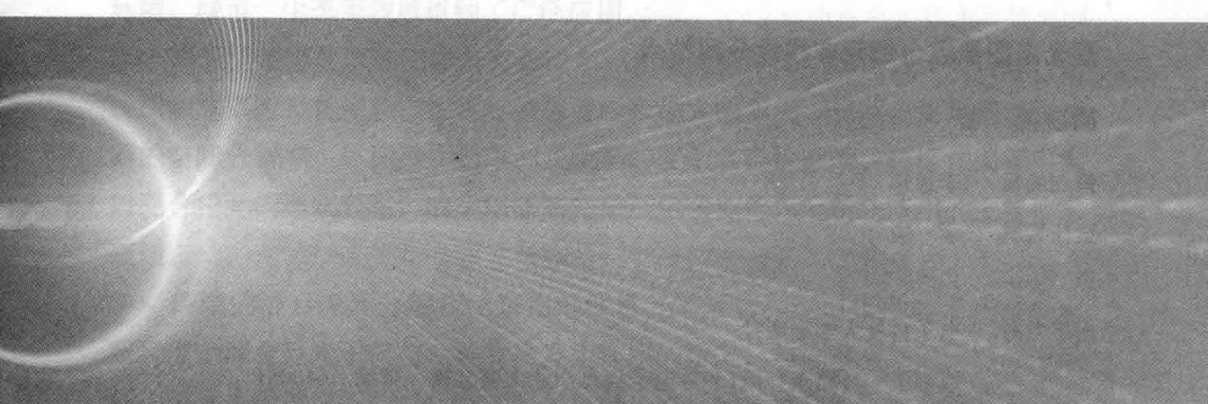
合数

2010-5-10

2010-5-10

高光谱图像混合像元非线性 分解技术

唐晓燕 著



RFID



电子科技大学出版社
University of Electronic Science and Technology of China Press

· 成都 ·

图书在版编目(CIP)数据

高光谱图像混合像元非线性分解技术 / 唐晓燕著

— 成都 : 电子科技大学出版社, 2018.4

ISBN 978-7-5647-5949-0

I. ①高… II. ①唐… III. ①光谱-图象处理-谱分析(数学)-研究 IV. ①TP75

中国版本图书馆CIP数据核字(2018)第054170号

高光谱图像混合像元非线性分解技术

唐晓燕 著

策划编辑 李述娜

责任编辑 李倩

出版发行 电子科技大学出版社

成都市一环路东一段159号电子信息产业大厦九楼 邮编 610051

主 页 www.uestcp.com.cn

服务电话 028-83203399

邮购电话 028-83201495

印 刷 三河市华晨印务有限公司

成品尺寸 170mm × 240mm

印 张 14

字 数 260千字

版 次 2019年3月第一版

印 次 2019年3月第一次印刷

书 号 ISBN 978-7-5647-5949-0

定 价 58.00元

版权所有, 侵权必究



唐晓燕（1979— ），女，汉族，籍贯河南省南阳市，博士研究生，副教授，主要研究方向为遥感图像处理。南阳理工学院教师，2001 年参加工作以来，多次获得学校优秀教师称号。

近5年来发表核心及以上学术论文8篇，其中2篇被SCI收录；出版教材1部；主持河南省科技攻关项目1项、河南省教育厅项目1项、教育部重点实验室开放基金1项，作为第三参与者完成国家自然科学基金1项；申请国家发明专利1项；2015年获南阳市第八届自然科学优秀学术成果一等奖1项。

前言

从 20 世纪 90 年代开始, 高光谱遥感已成为国际遥感技术研究的热门课题和光电遥感的主要手段。目前, 它主要是在电磁波谱的紫外、可见光、近红外和短波红外区域(波长在 $0.4\sim 2.5\mu\text{m}$ 之间), 利用成像光谱仪获取许多非常窄且谱段连续的图像数据。高光谱遥感技术克服了传统单波段、多光谱遥感在谱段数、谱段范围、精细信息表达等方面的局限性, 以较窄的谱段区间、较多的谱段数量提供遥感信息, 能够从光谱空间中对地物予以细分和鉴别, 在资源、环境、城市、生态等领域得到了广泛应用。

高光谱遥感获取的图像具有谱段多、光谱分辨率高、图谱合一的特点, 在民用和军事定量遥感应用领域发挥着越来越大的作用。然而, 受高光谱传感器的空间分辨率、目标尺寸的限制及地物的复杂多样性影响, 目标在图像中常以混合像元的形式存在, 成为阻碍高光谱遥感精细化、量化应用的主要技术瓶颈。

传统的混合像元分解广泛采用的线性光谱混合模型, 仅考虑了端元在宏观尺度上混合且光子仅与一种物质发生作用的情况, 与许多实际的遥感成像条件, 如非均质背景下的二次和多路径反射、水环境、致密物质混合等并不完全一致, 影响了光谱解混精度和后续处理应用的效果。

本书围绕非线性光谱混合模型对非均质背景下混合像元分解的若干理论与算法, 进行了深入分析和研究, 并对高光谱数据分类、目标检测和异常检测做了一定的研究。

全书共 10 章。第 1 章介绍了高光谱非线性光谱分解技术及目标检测相关技术的研究进展。第 2 章介绍了高光谱端元提取及非线性光谱分解的基础理论。第 3 章分析了高光谱数据的非线性结构, 介绍了经典的流形学习算法, 将流形学习非线性降维算法与 N-FINDR 算法结合, 研究了流形学习算法在高光谱图像端元提取中的性能特点。第 4 章针对基于 Isomap 流形学习的 N-FINDR 端元提取算法计算量较大、占用内存多、效率较低的缺点, 提出一种基于标志点选择 Isomap 的快速端元提取算法。第 5 章针对实际高光谱图像背景的非均质性, 根据地物在空间的连续分布, 提出基于 Isomap 和背景空间信息的 N-FINDR 算

法, 基于 LTSA 和背景空间信息的 N-FINDR 算法。算法考虑高光谱遥感图像数据的非线性结构和非均质背景, 结合地物分布的空间特性从不同背景的中心位置进行端元提取。第 6 章针对非均质背景下存在的阴影影响、端元的可变性和光谱的非线性混合, 提出一种基于端元优化的非线性光谱解混算法; 加入阴影端元对混合像元的端元集进行优化, 并用优化端元子集采用基于分层贝叶斯模型的双线性光谱解混算法进行光谱解混。第 7 章介绍了常用的非监督算法 K-均值、ISODATA 算法, 经典的监督分类方法, 如最小距离、最大似然、光谱角制图 (SAM), 分析了各个算法的特点; 又重点介绍了新的分类方法支持向量机和分类精度评价方法。第 8 章提出了基于 C5.0 决策树的多分类器组合的分类方法。第 9 章介绍了高光谱异常探测的 RX 算法和 LPD 算法。在研究三维高斯马尔可夫矢量的基础上, 提出了一种基于三维马尔可夫模型的 RX 算法, 改进了传统 RX 算法仅能使用光谱维信息的缺点, 能够有效地利用像素空间维的信息; 针对高光谱图像微小目标检测中存在的严重背景干扰问题, 实现了利用背景残差数据的 RX 异常探测算法。第 10 章主要介绍了高光谱目标探测经典算法 CEM 算子及其改进算法; 针对传统的 CEM 等高光谱算法在未知目标、未知非均质背景条件下无法使用的缺点, 提出了一种基于端元提取的全像素目标探测算法。该算法能够在异常探测后对异常点进行端元提取, 通过提取出的端元进行全像素目标探测。

本书由南阳理工学院唐晓燕博士执笔编写, 主要内容为笔者在北京理工大学读博期间在倪国强教授、高昆副教授的指导下完成的, 因此对母校和两位导师表示特别感谢。本书也包含程新满硕士、王蒙硕士和王丽静硕士的部分研究成果, 在此表示感谢。也对本书所有参考文献的作者表示衷心的感谢。

本书的出版受国家自然科学基金项目 (61340018)、河南省高等学校重点科研项目 (16A510020, 17A510014) 资助, 在此表示感谢!

由于作者水平有限, 书中难免存在不妥之处, 恳请读者批评指正。

唐晓燕

2018 年 1 月

目 录

第 1 章 高光谱图像遥感基本理论及主要处理技术 / 001

1.1 光谱成像技术的发展与应用 / 003

1.2 高光谱图像混合像元光谱分解技术 / 005

1.3 高光谱分类方法研究进展 / 015

1.4 高光谱异常目标探测技术 / 017

1.5 高光谱目标探测研究进展 / 018

1.6 高光谱图像降维技术 / 019

本章参考文献 / 024

第 2 章 高光谱非线性光谱分解的研究基础 / 035

2.1 引言 / 037

2.2 线性光谱分解 / 037

2.3 非线性光谱分解 / 043

2.4 端元提取算法 / 051

2.5 混合像元分解的精度评价 / 058

2.6 端元提取算法验证 / 060

2.7 本章小结 / 063

本章参考文献 / 064

第 3 章 基于流形学习的非线性降维算法的研究 / 069

3.1 引言 / 071

3.2 高光谱数据的非线性结构 / 072

3.3 流形学习算法 / 073

3.4 基于流形学习的非线性降维算法的实验结果及分析 / 078

3.5 本章小结 / 094

本章参考文献 / 094

第4章 基于标志点选择的快速端元提取算法 / 097

4.1 引言 / 099

4.2 基于标志点的 Isomap 算法 / 099

4.3 基于区域分割和空间信息的标志点选择算法 / 101

4.4 基于标志点选择的快速端元提取算法 / 103

4.5 实验结果及分析 / 104

4.6 本章小结 / 108

本章参考文献 / 108

第5章 基于非均质背景的端元信息提取方法的研究 / 111

5.1 引言 / 113

5.2 空间预处理 / 114

5.3 基于等距映射和背景空间信息的端元提取算法 / 116

5.4 基于局部切空间排列和背景空间信息的端元提取算法 / 118

5.5 实验结果及分析 / 119

5.6 本章小结 / 123

本章参考文献 / 125

第6章 基于端元优化的非线性光谱分解算法 / 127

6.1 引言 / 129

6.2 基于分层贝叶斯模型的参数估计 / 129

6.3 基于端元优化的非线性光谱解混算法 / 135

6.4 实验结果及分析 / 136

6.5 本章小结 / 142

本章参考文献 / 143

第7章 高光谱遥感影像分类方法 / 145

7.1 非监督分类 / 147

7.2 高光谱图像分类精度评价 / 153

7.3 高光谱遥感影像非监督分类算法验证 / 154

7.4 监督分类 / 156

7.5 本章小结 / 163

本章参考文献 / 163

第8章 多分类器组合的高光谱分类新方法 / 165

8.1 多分类器组合的高光谱分类新方法 / 167

8.2 决策树组合分类算法 / 168

8.3 高光谱分类实验与结果分析 / 171

8.4 本章小结 / 176

本章参考文献 / 176

第9章 高光谱影像亚像元级目标识别技术 / 177

9.1 高光谱影像概述 / 179

9.2 高光谱图像的背景高斯化 / 182

9.3 RX 异常探测算法 / 185

9.4 低概率探测算法 / 187

9.5 基于三维高斯马尔可夫模型的异常探测算法 / 188

9.6 利用背景残差数据的异常探测算法 (ERX) / 193

9.7 异常探测算法性能评价及实验结果 / 194

9.8 本章小结 / 196

本章参考文献 / 196

第10章 基于高光谱的目标探测方法 / 199

10.1 引言 / 201

10.2	光谱角填图 /	202
10.3	约束最小能量算子目标识别算法 /	204
10.4	基于欧氏距离加权样本自相关矩阵的目标探测算法 /	209
10.5	基于端元提取的全像素目标探测算法 /	212
10.6	本章小结 /	215
本章参考文献 /		215

1.1 光谱成像技术的发展与应用

对地遥感是指从航天或航空平台上,运用各种传感器(如可见光、红外、微波等)对地进行观测,接收并记录电磁波信号,根据电磁波与地表物体的作用原理及对探测目标的电磁特性进行分析,进而获取各种特征信息及其存在信息的技术。随着科学技术的发展,遥感对地观测技术日趋成熟,已经逐渐成为获取地物信息的重要手段之一。

第1章 高光谱图像遥感 基本理论及主要处理技术

第二代高光谱成像仪以美国哈里斯公司研制的 AVIRIS (Airborne Visible Infrared Imaging Spectrometer) 为代表,其光谱分辨率高达 220 个波段的高光谱分辨率成像光谱仪 HYPRON 为代表。其中,最具代表性的 AVIRIS 成像光谱仪波段为 0.4~2.5 μm , 以平均 10 nm 的光谱分辨率采集 224 个波段的数据,地面空间分辨率约为 30 m。目前研制成像光谱仪的主要厂家有: AVIRIS 采用扫描式线阵探测器。

此后,高光谱成像仪的研发热潮并未停止,相继研制成功并投入使用的有: 1998 年 12 月第一台中型分辨率光谱仪 MODIS (Moderate Resolution Imaging Spectroradiometer) 随美国地球资源卫星 EOS (Earth Observing System) 的 ATO-1 卫星平台进入轨道。2000 年 11 月, NASA 发射的地球观测卫星 (EO-1) 上搭载的 HYPERION 有 220 个波段波段,光谱分辨率 10 nm, 光谱范围 0.4~2.5 μm , 地面空间分辨率为 30 m。2001 年发射的 OrbView-2 是搭载在商业卫星成像光谱仪可获取 200 个波段高光谱数据,其地面空间分辨率为 30 m。2003 年发射的“资源一号”卫星搭载飞行平台上搭载的辐射计/可

1.1 光谱成像技术的发展与应用

对地遥感是指在航天或航空平台上,运用各种传感器(如可见光、红外、微波等)对地进行观测,接收并记录电磁波信号,根据电磁波与地表物体的作用机理及对探测目标的电磁特性进行分析,进而获取物体特征性质及其变化信息的技术^[1]。随着科学技术的发展,遥感对地观测技术日益成熟,已经逐渐成为获取地球空间地理信息的重要手段之一^[2]。

光谱成像技术源于20世纪70年代。Goet Z.等人在美国加州理工学院喷气推进实验室(Jet Propulsion Laboratory, JPL)首先提出遥感用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)的支持下开始了成像光谱仪的概念设计和研究。1983年,世界第一台高分辨率航空成像光谱仪(AIS-1)在JPL研制成功,标志着第一代高光谱分辨率成像传感器的问世。它在矿物填图、植被与化学成分分析等应用中取得了成功,显示了成像光谱仪的巨大潜力。

第二代高光谱成像仪以美国喷气推进实验室(JPL)于1983年开始研制的224个谱段的航空可见光/红外成像光谱仪(AVIRIS)和美国海军实验室(Naval Research Laboratory, NRL)1991年研制的210个谱段的高光谱数字图像收集实验仪HYDICE为代表。其中,最具代表性的AVIRIS成像光谱范围为 $0.4\sim 2.5\ \mu\text{m}$,以平均10nm的光谱间隔收集224个谱段的数据,地面空间分辨率约为20 m。与前期成像光谱仪的主要区别为,AVIRIS采用扫描式线阵列成像^[3]。

此后,高光谱成像仪的研制由机载为主转向机载和星载相结合的阶段。例如,1999年12月第一台中分辨率成像光谱仪MODIS(Moderate-resolution Imaging Spectralradiometer)随美国地球观测系统EOS(Earth Observation System)的AM-1卫星平台进入轨道。2000年11月,NASA发射的地球观测卫星(EO-1)上搭载的HYPERION有220个成像谱段,光谱分辨率10 nm,成像光谱范围为 $0.4\sim 2.5\ \mu\text{m}$,地面空间分辨率为30 m;2001年发射的OrbView卫星搭载的高光谱成像光谱仪可获取200个谱段高光谱数据,其地面空间分辨率为8 m^[3]。2005年发射的火星勘测轨道飞行器上搭载的红外线/可

见光频谱仪 CRISM，在 300 km 的高空中分辨率约为 18 m，成像光谱范围为 0.4~4.05 μm ，共有 558 个成像谱段。2006 年 10 月，欧洲第 1 颗极轨卫星 METOP-A 发射成功，携带的干涉式红外大气探测仪 IASI 可在 3.62~15.5 μm 红外光谱范围内进行连续观测，光谱分辨率为 0.5 cm^{-1} ，共 8 461 个通道。2008 年发射的月球探测器 Chandrayaan-1 上的 M3 成像光谱仪有 261 个成像谱段，成像光谱范围为 0.4~3.0 μm ，地面空间分辨率为 70 m^[4]。德国计划于 2015 年发射的 Enmap 卫星上搭载的高光谱成像光谱仪共 220 个成像谱段，成像光谱范围为 0.42~2.45 μm ，空间分辨率为 30 m。

我国的高光谱成像技术也有很大进展。从 20 世纪 80 年代以来经历了从多谱带扫描到成像光谱扫描、从光机扫描到面阵器件推扫的发展过程，为陆地、海洋与大气科学，自然灾害监测，环境监测，农作物估产，资源调查等方面的研究提供了强大的支持。在机载成像光谱仪方面，主要有中国科学院上海技术物理研究所研制的推扫式成像光谱仪 PHI（Pushbroom Hyperspectral Imager）系列，该系列成像光谱仪采用面阵 CCD 推扫成像，反射 / 透射光栅分光，可见光到近红外光谱区共有 224 个谱段，具有结构紧凑、体积小特点；实用型模块化成像光谱仪 OMIS（Operative Modular Airborne Imaging Spectrometer）系列。OMIS 是先进的可见光近红外 / 短波红外 / 热红外机载高光谱成像系统，可获取 128 个谱段的光谱图像数据。在星载方面，有中国科学院长春光机所高分辨率成像光谱仪（C-HRIS）和西安光机所研制的稳态大视场偏振干涉成像光谱仪（SLPIIS）。2007 年，我国发射了首颗探月卫星“嫦娥一号”，其中搭载了由西安光机所研制的干涉式成像光谱仪，其主要技术指标：在飞行高度 200 km 时幅宽 25.6 km，月表像元分辨率 200 m，光谱范围 0.48~0.96 μm ，谱段数为 32。同年发射的环境与减灾小卫星 A 星（HJ-1A）上的可见 - 近红外成像光谱仪，在 0.45~0.95 μm 波段范围内设置了 115 个通道，空间分辨率为 100 m，这标志着我国成像光谱仪的研究已经日趋成熟。表 1.1 给出了世界各国典型的光谱成像系统。

表 1.1 光谱成像系统

传感器	所属机构	国家	光谱范围	谱段数
AHI	Hawaii Institute of Geophysics and Planetology	美国	7.9~11.5	32/256

续 表

传感器	所属机构	国家	光谱范围	谱段数
AISA	光谱成像公司 (Spectral Imaging Ltd.)	芬兰	1.2~2.4	1218
ARCHER	NOVASOL 公司	美国	0.5~1.1	512
AVIRIS	NASA	美国	0.4~2.5	224
CASI	Itres Research 公司	加拿大	0.43~0.87	288
HYDICE	海军研究实验室	美国	0.4~2.5	210
HypMAP	集成分光专营公司 (Integrated Spectronics Pty Ltd)	澳大利亚	0.4~2.45	128
Hyperion	NASA Goddard 空间飞行中心	美国	0.4~2.5	200
TRWIS III	TRW 公司	美国	0.3~2.5	384
PHI	中国科学院上海技术物理研究所	中国	0.46~0.85	224
OMIS	中国科学院上海技术物理研究所	中国	0.46~12.5	128/68

1.2 高光谱图像混合像元光谱分解技术

高分辨率对地观测系统是《国家中长期科学技术发展规划纲要(2006—2020年)》中规划的16个重大专项之一,其目标是培育和形成具有自主知识产权的高空间分辨率、高光谱分辨率、高时间分辨率和高辐射分辨率的卫星对地观测能力,解决制约我国国民经济发展和保障国家安全的瓶颈问题^[6]。

从20世纪90年代开始,高光谱遥感(Hyperspectral Remote Sensing)已成为国际遥感技术研究的热门课题和光电遥感的最主要手段^[7-8]。目前,它主要是在电磁波谱的紫外、可见光、近红外和短波红外区域(波长在0.4~2.5 μm 之间),利用成像光谱仪获取许多非常窄且谱段连续的图像数据。高光谱遥感技术克服了传统单波段、多光谱遥感在谱段数、谱段范围、精细信息表达等方面的局限性,以较窄的谱段区间、较多的谱段数量提供遥

感信息，能够从光谱空间中对地物予以细分和鉴别，在资源、环境、城市、生态等领域得到了广泛应用^[9-10]。

高光谱图像具有图谱合一的特点，同时记录了地物的光谱和图像信息，在每个谱段分别成像，将各个谱段影像叠合组成一个数据立方体，每个谱段都是一幅特定波长上的图像，而在每一幅影像上的每个像元辐射值则又组成了连续的光谱曲线。图 1.1 为高光谱遥感的原理图^[11]，该图也充分体现了高光谱图像图谱合一的特点。

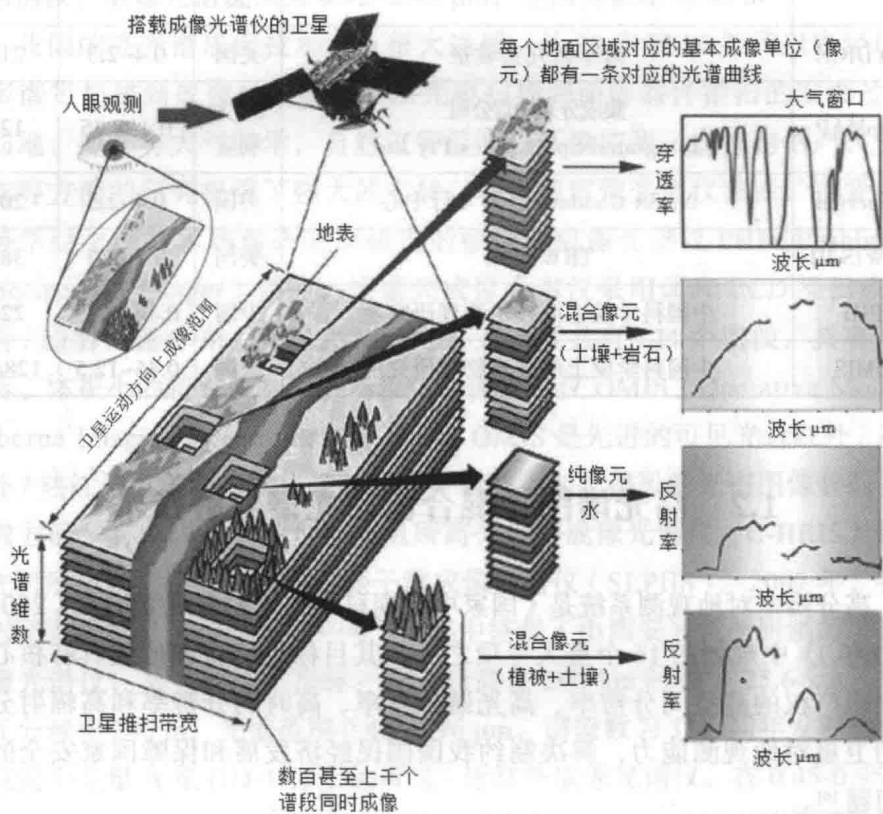


图 1.1 高光谱遥感原理图

但是由于高光谱成像光谱仪的空间分辨率限制以及自然界地物的复杂多样性，使得在单像元点处得到的光谱反映的不一定只是一种物质的特性，而可能甚至往往是几种不同物质光谱的混合，这样的像元点被称为混合像元^[12]。混合像元在高光谱图像上广泛存在，它不但影响了高光谱图像地物分类和识别的精度，而且已经成为高光谱遥感向定量化发展的主要障碍。因

此, 如何有效地解决混合像元问题是高光谱图像处理技术面临的难题之一。

为了提高遥感应用的精度, 必须解决混合像元的分解问题, 使遥感应用由像元级达到亚像元级。光谱解混, 即将混合像元分解为不同的“基本组成单元(端元)”, 并求得这些基本组分所占的比例(丰度)^[2]。高光谱遥感获取的图像数据在一个波段内通常具有几十个甚至上百个谱段, 这为获得更多、更精细的端元提取提供了可能, 也使高光谱遥感在光谱解混方面具有更大的优势^[12]。以高光谱图像混合像元分解为主题的国际学术会议、国际研讨会逐年增加。国际光学工程学会(International Society for Optical Engineering, SPIE)每年召开的遥感年会(SPIE Remote Sensing)中包含的高光谱图像混合像元分解的文章越来越多。SPIE的“多光谱、高光谱和超光谱图像的算法和技术(Algorithms and Technologies for Multispectral, Hyperspectral and Ultraspectral Imagery)”国际会议中与高光谱图像混合像元分解算法和应用的文章也逐年增多。

此外, 国际知名期刊包含高光谱图像混合像元分解算法研究的文章数也日益增多, 主要的期刊包括:

- ① *Remote Sensing of Environment*
- ② *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*
- ③ *IEEE Transactions on Signal Processing*
- ④ *IEEE Sensors Journal, IEEE Signal Processing*
- ⑤ *IEEE Transaction on Pattern Analysis and Machine Intelligence*
- ⑥ *IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems*
- ⑦ *IEEE Geoscience and Remote Sensing Letters*
- ⑧ *International Journal of Remote Sensing*
- ⑨ *Sensors*
- ⑩ *International Journal of Remote Sensing*
- ⑪ *Canadian Journal of Remote Sensing*
- ⑫ *Photogrammetric Engineering and Remote Sensing*
- ⑬ *Pattern Recognition*

高光谱图像混合像元分解技术不但在理论研究中成为高光谱图像处理的一个较热的方向, 而且在实际中也应用得越来越广泛。IEEE电子文库的相关论文主要偏重各种信息处理方面的研究, 而环境遥感(*Remote Sensing*