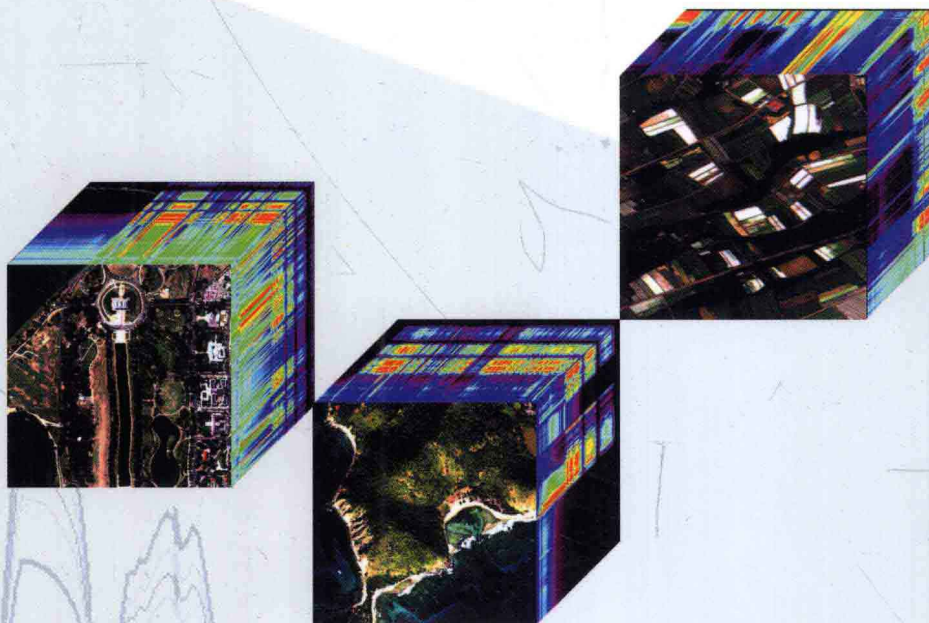


# 高光谱图像分类 与目标探测

Hyperspectral Image Classification  
And Target Detection

● 张 兵 高连如 编著



# 高光谱图像分类与目标探测

张 兵 高连如 编著

科 学 出 版 社

北 京

# 序

20 世纪中叶,人们开始尝试用气球、风筝甚至鸽子等将照相机带到空中对地面照相,开创了最原始的遥感活动。飞机的发明将空中摄影变成了一种常态性的测量和制图技术,并很快在军事侦察和战争中确立了自己的位置。在经历了漫长的发展道路之后,在 20 世纪 60 年代,随着人造地球卫星成功发射,“遥感”这一术语问世了。随着美国 1960 年发射气象卫星和 1972 年发射地球资源技术卫星(后更名为陆地卫星)及其广泛应用,遥感才逐渐被人们所认识,开始发展成为一个新的学科领域。从广义上说,以对地观测为主要目标的遥感有两个主要探测方向,即地物的几何空间特性和物理特性。前者是测绘科学中摄影测量学的发展方向。除地图测绘以外,通过对地物几何特性、空间关系以及物体的纹理结构特征的分析达到对地物的分类和识别的目的,这就是模式识别的范畴。

遥感的另一个重要方向就是研究和了解物体的光谱特性,进而研究其物性,而这正是物理学研究的范畴。在这一目标的驱动下,空中摄影从全色(黑白)发展到彩色、彩色红外和多光谱。在 20 世纪 60 年代,美国就将多光谱技术广泛用于航空摄影并进而在卫星遥感中得以实现。然而,多光谱技术难以完全满足人们深层次地揭示物体物理特性的需求,一些科学家在 20 世纪中叶开始注意对地物光谱特性的研究。这种研究从宏观到微观,从实验室、地面到航空航天的广泛尺度上首先以非成像的方式得以开展,揭示了许多物体所具备的独特、甚至是唯一的光谱特征。地物光谱特性研究遂成为遥感的重要基础之一。

20 世纪 80 年代前,成像方式的遥感波段太少,难以构成对地物光谱特性的概念;而非成像方式的光谱测量,又难以将光谱信息准确地匹配到具体的地物上。因而,发展一种能将光谱和影像融合并集成于一体的技术——成像光谱技术,就历史性地被提到了遥感发展的日程上。

成像光谱遥感又称为高光谱遥感,它是以遥感影像与光谱的合一为特征的新型遥感技术,它可在  $1/10\sim 1/1000$  的波长范围对地物成像,其光谱分辨率高可达纳米级,这是概念和技术上的创新,是 20 世纪 80 年代以来地球观测技术所取得的重大技术突破之一,是光学遥感技术又迈出的崭新一步,是遥感发展新阶段的重要标志。

高光谱遥感图像以及从每个像元上提取的精细光谱曲线都包含着丰富的地物信息内容,以往全色以及多光谱图像的一些处理算法甚至主要分析手段都已经难以满足高光谱遥感图像处理的要求。高光谱图像处理是高光谱数据应用基础,高光谱图像分类与目标探测是高光谱图像处理的主要目标。

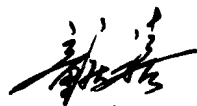
与以往常规光学遥感图像不同,拥有数十、成百、上千波段的高光谱遥感以图谱合一的图像立方体的形式作为表达方式。一方面,通过这种特殊的数据表达方式,人们可以从每一个构成图像的像元中提取对应地物的光谱曲线。高光谱遥感的这种海量信息内涵为人们研究地表物体的物理特性,特别对地物的识别提供了巨大的潜力。另一方面,以海量信息和特殊的数据结构为基础的高光谱遥感,又在图像处理、信息分析、分类和提取等方

面向人们提出了严峻的挑战,也就要求人们从光谱维去理解和揭示地物在空间维上所表现出来的物理特征及其变化。因此,在常规以几何距离和高度为表征的二维和三维空间图像的处理与分析方法的基础上,引入光谱维的处理和分析技术就成为遥感技术发展的必然。这样,高光谱遥感影像的辐射和光谱定标就成为高光谱遥感信息处理最为重要的基础,而对每个像元所提取出的光谱曲线在辐射和光谱维的定量化精确处理也就成为最能体现高光谱遥感特色的技术方法。

高光谱遥感图像处理和地物目标探测技术的发展对于其在各个领域的应用都有着重要的意义。如何从如此众多的波段、海量的光谱图像数据中通过处理并提取我们需要的信息,又如何平衡光谱的高维数与有限图像训练样本之间的关系,成为当前高光谱遥感技术与应用领域研究的热点。高光谱遥感技术的重要优势之一是对低概率出露目标的有效探测。从统计分析的角度出发,这种低概率目标往往既具有出露面积小的特征,甚至经常以亚像元的形式存在于图像背景中,又具有信号微弱的特征。因而如何通过对微弱信息的检出、分析和提取,最终识别和提取这些地物目标的空间位置和分布就成为了高光谱遥感的终极目标之一。正是上述特征决定了现代成像式的高光谱遥感无法完全沿用传统的图像处理和特征识别技术直接对这类目标进行提取,迫切需要加强在新理论、新技术和新方法的研究、发展和创新。

2006年我们出版的《高光谱遥感——原理、技术与应用》一书,系统地论述了高光谱遥感科学、技术与信息处理的共性理论与方法问题,出版后受到广大读者的欢迎,并很快再版。《高光谱图像分类与目标探测》的编著主要在前者的基础上,归纳和总结当前高光谱遥感领域的最新科技发展动态,特别是作者们近年来在高光谱图像分类与目标探测方面的一些重要科研成果,着重针对高光谱图像精细分类和目标探测的相关理论和关键问题进行较系统和详尽的阐述。参与该书撰写的是一批长期从事高光谱遥感数据处理与应用研究的青年科技工作者,他们充满活力和进取精神,长期密切跟踪国际发展前沿,坚持不懈地在高光谱遥感图像分类和目标探测方面进行深入研究和应用试验,坚持理论与实践的紧密结合以及理论创新和技术创新,研究和建立了一系列的高光谱图像处理模型算法和软件系统,形成了自己的特色。

我赞赏该书作者们在这一新领域的不懈努力、不停追求和不断的进步,祝贺他们在高光谱遥感图像分类和目标探测方面所取得的重要成果!我推荐该书的出版,相信它的问世将成为我国高光谱遥感领域发展的重要基石,并必将在我国高光谱遥感发展中发挥重要的促进作用!



2010年9月1日

# 前 言

在过去的 20 多年里,高光谱遥感系统尤其是航空高光谱遥感系统在北美洲、欧洲、亚洲和大洋洲等地区获得迅猛发展,高光谱遥感数据也越来越普及并为人们广泛使用。近年来,航天高光谱遥感也逐渐从数十米的中分辨率(如 EO-1 搭载的 Hyperion)向数米的高空间分辨率(如 TacSat-3 搭载的 ARTEMIS)发展。在高光谱数据处理与分析领域,尽管许多经典的遥感数据处理方法仍被广泛使用,但是这些方法往往不能有效和充分地满足海量高光谱数据处理以及精确地物信息提取的要求,而且传统分析方法在处理上百个谱段的数据时也面临着诸如计算效率、谱分析等技术问题。高光谱遥感所蕴含的丰富信息不仅仅体现在一个个独立的光谱波段上,更重要的是体现在从一个波段到另一个波段之间光谱响应的连续变化上,因而这就需要一些有别于传统图像处理方法的创新和发展。例如,连续光谱波段使得通过导数运算来突出一些精细的光谱曲线突变点成为可能,而包络线分析可以使我们进一步归一化和量化一些地物的光谱吸收特征。因此,高光谱图像数据为我们打开了一扇新的窗户,使人们可以更多地开拓和发展一些新的数学工具,将图像从“光谱空间”变换到“特征空间”,这也必然会带来一些新的遥感应领域的拓展。

遥感图像处理与分析技术起源于信息科学、模式识别和信号处理的相关理论和模型,它们为高光谱图像处理技术的发展打下了坚实的基础。当前高光谱图像处理发展的一个重要特征和趋势就是高光谱图像的自适应和实时处理技术。相对于传统的图像处理而言,高光谱遥感在图像的自动化、智能化处理和目标探测方面具有巨大优势。一个非常典型的实例就是,20 世纪末在美国海军高光谱遥感技术发展计划(HRST)下由美国海军实验室提出的光学遥感实时自适应光谱识别系统(optical real-time adaptive spectral identification system, ORASIS),它旨在实现高光谱图像的自适应光谱特征提取、数据降维、背景压制和目标识别的一体化综合处理和系统建设。其中,凸面几何学分析与正交投影变换被有效地应用于光谱分析领域,光谱匹配滤波和异常检测被用来进行高光谱图像的目标探测和识别。另一方面,高光谱遥感在获取地物丰富信息的同时,其巨大的数据量也给卫星下行数传和后处理带来巨大压力,通过飞机上或者卫星上实时处理可以减少数据传输量,也就相应减少了数据压缩下传而导致的信息损失,减少了地面数据存储和处理工作量,提高了图像分类和目标探测的效率和时效性。目前现场可编程门阵列(FPGA)被有效使用作为星上数据实时处理的核心组件,与数字信号处理器(DSP)相比,FPGA 的优势主要体现在它的并行运算特性、编程灵活和资源可配置等特点,而且随着性能的不断提高,FPGA 能够满足未来复杂数字信号高速实时处理的要求,因此 FPGA 将在未来海量高光谱遥感图像处理与应用工程中发挥越来越大的作用。但是,目前在某些高性能实时处理系统中仍然需要通过 FPGA 和 DSP 的组合结构来满足实际需求。所以,在充分挖掘 FPGA 自身性能的同时,考虑其与 DSP 组合结

构也是一种过渡解决方案。

高光谱图像分类是主要基于图像像元的光谱和空间特性,对每个像元或比较匀质的像元组进行地物类别属性确定和标注的过程。高光谱图像分类在探究不同以往的传统数学分析模式和手段的同时,其空间分辨率的局限造成图像数据不确定性和混合像元现象的普遍存在,使得基于像元的遥感分类和面积量测精度难以达到更高要求。但是,恰恰又得益于高光谱图像所提供的丰富光谱信息,从而精确的高光谱图像端元提取和混合像元分解成为可能。因此,讨论高光谱图像分类与目标探测问题不能脱离混合像元光谱分解问题。传统的图像分析方法很难准确描述这种复杂关系,而利用地物的纯像元光谱或从图像中提取端元,通过分析各像元光谱曲线的组成,引入模糊集理论,确定各像元地物组成类别的比例以及隶属度关系,可实现混合像元分解,即基于亚像元的高光谱图像的软分类。目前,高光谱图像分类一个重要的发展趋势是逐步引入智能学习和仿生学方法,深化混合像元中模糊集分类,进一步挖掘高光谱图像特征,将光谱信息与图像空间几何特征信息结合作为分类输入集来提高高光谱图像分类精度。

基于高光谱图像的目标探测在实际应用中通常情况下是一种针对低概率出露目标的探测,尤其是卫星高光谱遥感,所要探测的目标往往仅能占据几个像元,甚至小于一个像元。很多时候我们无法从像元和像元组中准确把握目标的几何形态,因此目标探测也主要依赖于其像元级光谱的诊断性特征,或者通过亚像元级的光谱分解和特征检测来实现。目标探测与图像的区域背景分析密切相关,根据先验知识的不同,高光谱目标探测算法可划分为四种情况或类别:已知目标、已知背景,已知目标、未知背景,未知目标、已知背景,未知目标、未知背景。而依据模型算法不同,高光谱遥感目标探测又可分为原始空间模型、子空间模型和概率统计(白化空间)模型三类。高光谱遥感目标探测技术的发展对于其在军事领域的实际应用有着十分重要的意义,相关技术的改进和创新也一直是高光谱遥感技术发展的重要内容。

本书旨在论述高光谱图像分类和目标探测中的主要数据处理模型和方法。全书分为7章。第1章高度概括地介绍高光谱遥感的一般性原理和知识,并论述高光谱图像处理与分析的主要特点;第2章针对高光谱图像噪声和信息冗余问题,介绍高光谱图像噪声评估和数据降维的一些算法及其改进优化;第3章系统论述高光谱图像的混合像元问题,重点对线性光谱混合模型展开讨论,介绍线性光谱解混的一般流程以及端元提取和丰度反演的一些算法;第4章和第5章分别就高光谱图像监督分类和非监督分类的特点、流程、算法和精度评价等方面的问题进行论述;第6章和第7章讨论高光谱图像目标探测的概念和特点,分析目标探测中存在的一些核心问题,介绍目标探测算法的设计思路、数学模型和选择依据。

本书的出版见证了一批青年科技工作者成长的足迹,也凝聚了他们在高光谱遥感图像处理和分析领域的丰硕成果,他们是张文娟、孙旭、李山山、罗文斐、刘翔、倪丽、刘轶群、高建威、吴远峰、李利伟、张靓和沙建军等。他们为本书的编写和出版作出了重要贡献,在此一并表示感谢。同时,本书也得到了中国科学院科学出版基金、国家973计划课题“空间智能观测理论与陆面敏感因子参量反演”(2009CB723902)、国家863计划课题“高光谱影像地物精细分类与原型系统开发”(2008AA12Z113)的资助。

本书是国内第一本系统和详尽论述高光谱图像分类和目标探测问题的专著,在力求

全面性和系统性的同时,也尽力期望将国内外最新成果进行归纳和总结,但不可避免地会存在一些重要内容遗漏等问题,书中不当之处在所难免,望广大读者不吝赐教。

最后,我要衷心感谢我的博士生导师童庆禧院士,他不仅开创了中国的高光谱遥感科技领域,而且培养了一大批优秀学子,为国内外高光谱遥感技术和应用的发展作出了不可磨灭的贡献,本书的出版也是对他遥感科学的大舞台上辛勤耕耘数十载的最好回报。



2010年9月1日

# 目 录

序

前言

第 1 章 高光谱遥感原理及图像特点	1
1.1 高光谱遥感理论基础	1
1.1.1 太阳辐射	2
1.1.2 电磁波与地物的相互作用	2
1.1.3 电磁辐射与大气的相互作用	6
1.2 高光谱遥感成像技术	9
1.2.1 光谱分光	9
1.2.2 空间成像	12
1.2.3 探测器	14
1.3 高光谱图像处理与分析的特点	15
1.3.1 高光谱图像分析的核心是光谱分析	16
1.3.2 高光谱图像分析是一种量化分析	18
1.3.3 特征选择与提取对海量高光谱数据处理尤为重要	19
1.3.4 混合像元是高光谱图像处理面临的一个重要问题	20
参考文献	21
第 2 章 高光谱图像噪声评估与数据降维	25
2.1 高光谱图像噪声评估的常用方法	25
2.1.1 均匀区域法	26
2.1.2 地学统计法	29
2.1.3 局部均值与局部标准差法	32
2.1.4 空间/光谱维去相关法	34
2.2 高光谱图像噪声评估方法优化	38
2.2.1 基于均匀块局部标准差的方法	38
2.2.2 基于残差调整的局部均值与局部标准差法	42
2.2.3 基于均匀区域划分的噪声评估方法	46
2.3 高光谱图像数据降维的常用方法	51
2.3.1 主成分分析	52
2.3.2 最小/最大自相关因子分析	58
2.3.3 最大噪声分数	60
2.3.4 噪声调整的主成分分析	63
2.3.5 典型分析	66
2.3.6 独立成分分析	67



2.3.7	投影寻踪	69
2.3.8	典型判别分析	70
2.3.9	典型相关分析	70
2.3.10	非负矩阵分解	71
2.3.11	非线性主成分分析	72
2.3.12	基于“流形学习”的非线性降维方法	74
2.4	最大噪声分数降维方法优化	75
2.4.1	MNF 变换中广义特征值求解	76
2.4.2	MNF 对于图像数值变化的敏感性	77
2.4.3	地物空间分布对 MNF 变换的影响	81
2.4.4	噪声评估结果对 MNF 的影响	82
2.4.5	优化的 MNF 变换及其图像分类应用	85
2.5	高光谱图像降维方法分析与评价	91
2.5.1	高光谱图像降维方法关联分析	92
2.5.2	高光谱图像降维方法选择策略	96
	参考文献	99
<b>第 3 章</b>	<b>高光谱图像混合像元分解</b>	<b>102</b>
3.1	混合像元问题与光谱混合模型	102
3.1.1	混合像元产生的机理	102
3.1.2	非线性光谱混合模型	104
3.1.3	线性光谱混合模型	108
3.2	高光谱图像线性光谱解混流程	112
3.2.1	线性光谱解混技术流程	112
3.2.2	端元数目确认	113
3.2.3	数据降维方法选择	115
3.2.4	端元光谱变异性与端元束	116
3.3	高光谱图像端元提取方法	118
3.3.1	纯像元指数	118
3.3.2	内部最大体积法	121
3.3.3	顶点成分分析	123
3.3.4	单形体投影方法	124
3.3.5	顺序最大角凸锥	125
3.3.6	迭代误差分析	126
3.3.7	外包单形体收缩	127
3.3.8	最小体积单形体分析	129
3.3.9	凸锥分析	130
3.3.10	光学实时自适应光谱识别系统	131
3.3.11	自动形态学	132
3.3.12	最大距离法	134

3.3.13	最大体积法	135
3.3.14	最大零空间投影距离法	137
3.3.15	量化独立成分分析法	139
3.4	高光谱图像端元丰度反演方法	145
3.4.1	最小二乘法	145
3.4.2	滤波向量法	148
3.4.3	迭代光谱混合分析	148
3.4.4	基于端元投影向量的丰度反演方法	149
3.4.5	基于单形体体积的丰度反演方法	150
3.5	空间信息在混合像元分解中的应用	151
3.5.1	空间信息辅助下的端元快速提取	151
3.5.2	空间信息辅助下的混合光谱分解	152
3.6	高光谱图像混合光谱分解方法分析与评价	153
3.6.1	高光谱图像端元提取方法定量评价	153
3.6.2	线性光谱解混对不同空间分辨率图像的适应性评价	160
	参考文献	173
<b>第4章</b>	<b>高光谱图像监督分类</b>	176
4.1	高光谱图像分类的概念及特点	176
4.1.1	高光谱图像分类的概念	176
4.1.2	高光谱图像分类的特点	176
4.1.3	高光谱图像数据描述模型	178
4.2	高光谱图像监督分类流程及步骤	178
4.3	基于光谱特征空间的高光谱图像分类	179
4.3.1	光谱特征匹配分类方法	179
4.3.2	遥感图像统计模型分类方法	185
4.3.3	高光谱图像神经网络分类方法	185
4.3.4	高光谱图像支持向量机分类方法	192
4.4	几何空间与光谱特征空间结合的高光谱图像分类	196
4.4.1	基于图像上下文的高光谱图像分类	197
4.4.2	基于同质地物提取的高光谱图像分类	197
4.4.3	纹理信息辅助下的高光谱图像分类	200
4.4.4	面向对象的高光谱图像分类	208
4.5	高光谱图像分类精度评价	209
4.5.1	误差矩阵	210
4.5.2	漏分误差和分误差	211
4.5.3	Kappa 分析	211
	参考文献	212
<b>第5章</b>	<b>高光谱图像非监督分类</b>	214
5.1	非监督分类方法框架	214

5.2	典型非监督分类算法	215
5.2.1	K 均值算法	215
5.2.2	ISODATA 算法	216
5.3	模糊 K 均值聚类	218
5.4	蚁群算法优化的 K 均值聚类	219
	参考文献	221
<b>第 6 章</b>	<b>高光谱图像目标探测理论与模型</b>	<b>223</b>
6.1	高光谱图像目标探测的概念及特点	223
6.1.1	高光谱图像中目标存在的几种形式	223
6.1.2	高光谱图像目标探测与图像分类的差异	224
6.1.3	高光谱图像目标探测与传统空间维目标探测比较	225
6.1.4	高光谱图像目标探测中的几个关键问题	226
6.2	高光谱图像目标探测中的影响因素	227
6.2.1	目标的光谱伪装特性与揭露	227
6.2.2	遥感器成像特性与成像方式	230
6.2.3	高光谱图像噪声	235
6.2.4	高光谱数据降维	238
6.3	高光谱目标探测算法设计的一般过程	238
6.4	高光谱目标探测的子空间模型	239
6.5	高光谱目标探测的概率统计模型	240
6.5.1	NP 决策规则	241
6.5.2	Fisher 准则	243
	参考文献	244
<b>第 7 章</b>	<b>高光谱图像目标探测算法</b>	<b>245</b>
7.1	高光谱图像目标探测算法选择	245
7.1.1	依据算法参数	245
7.1.2	依据算法模型	247
7.2	未知目标、未知背景的目标探测算法	247
7.2.1	RX 异常探测算法	247
7.2.2	低概率目标探测算法	249
7.2.3	均衡目标探测算法	249
7.2.4	基于数据白化距离的异常探测算法	250
7.3	已知目标、未知背景的目标探测算法	251
7.3.1	约束最小能量算子	251
7.3.2	自适应余弦一致性评估器算法	252
7.3.3	自适应匹配滤波算法	254
7.3.4	椭圆轮廓分布模型探测器	254
7.3.5	基于 ECD 的双曲线决策门限型目标探测算法	256
7.3.6	基于 ECD 的抛物线决策门限型目标探测算法	256

7.3.7	非监督目标生成处理 .....	257
7.3.8	非监督向量量化目标子空间投影法 .....	258
7.3.9	基于加权自相关矩阵的 CEM 算法 .....	261
7.3.10	基于加权自相关矩阵的 OSP 算法 .....	262
7.4	已知目标、已知背景的目标探测算法 .....	263
7.4.1	正交子空间投影 .....	263
7.4.2	目标约束下的干扰最小化滤波算法 .....	265
7.4.3	广义似然比算法 .....	265
7.4.4	特征子空间投影算法 .....	267
7.4.5	目标子空间投影算法 .....	267
7.4.6	斜子空间投影算法 .....	268
7.4.7	基于斜交子空间投影的 GLRT 探测算法 .....	269
7.5	未知目标、已知背景的目标探测算法 .....	270
7.6	多源信息辅助下的高光谱图像目标探测 .....	271
7.6.1	HSI-HRI 融合 .....	271
7.6.2	HSI-SAR 融合 .....	272
7.7	高光谱图像目标探测算法性能评价 .....	272
7.7.1	接收器曲线计算 .....	272
7.7.2	线性混合光谱模拟实验 .....	273
7.7.3	真实场景高光谱图像实验 .....	289
	参考文献 .....	295
	索引 .....	296
	彩图	

# 第 1 章 高光谱遥感原理及图像特点

高光谱遥感是将成像技术和光谱技术相结合的多维信息获取技术,同时探测目标的二维几何空间与一维光谱信息,获取高光谱分辨率的连续、窄波段的图像数据。高光谱遥感成像技术是 20 世纪 80 年代初在多光谱遥感成像技术基础上发展而来,高光谱遥感的出现可以称得上是遥感技术的一场革命。它使原本在多光谱遥感中无法有效探测的地物得以探测。高光谱遥感数据的光谱分辨率高达  $10^{-2}\lambda$  数量级,在可见光到短波红外波段范围内光谱分辨率为纳米(nm)级,光谱波段数多达数十个甚至数百个以上,各光谱波段间通常连续,因此高光谱遥感通常又被称为成像光谱遥感(童庆禧等,2006)。

## 1.1 高光谱遥感理论基础

所有物体在绝对零度以上都会吸收、反射和发射电磁波,高光谱遥感通过接收、记录电磁波与不同物体相互作用后的高光谱分辨率的辐射信号,分析处理得到丰富的专题信息。在不同的电磁波谱段,遥感器所应用的电磁波辐射源不同,与地物、大气间发生的相互作用、辐射信号传输过程也有所不同,太阳辐射谱段情况如图 1.1 所示。

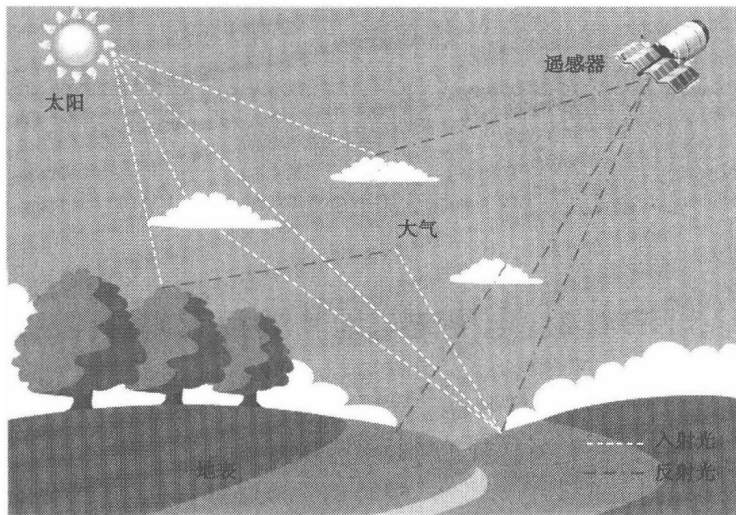


图 1.1 太阳辐射谱段遥感器成像过程

太阳辐射谱段遥感器成像过程主要包括以下几个部分:太阳辐射穿过大气到达地表,在该过程中太阳辐射与大气发生散射、吸收等作用,辐射信号被地物反射(地物的方向和光谱反射特性使辐射信号在空间和光谱分布发生变化)后,再次穿过大气到达遥感器,遥感器入瞳光谱辐亮度通过前置光学系统,并被空间成像、光谱分光,最后到达探测器,通过光电转换及模数转换,记录为原始的 DN 值图像数据。

## 1.1.1 太阳辐射

地球上的电磁辐射主要来自于太阳,太阳辐射光谱从 X 射线一直延伸到无线电波,但太阳辐射的大部分能量集中于近紫外-中红外( $0.31\sim 5.6\mu\text{m}$ )范围,其中可见光占 43.5%,近红外占 36.8%。

当太阳辐射穿过大气层到达地面时,部分被大气层反射回太空(约 30%),部分被大气吸收(约 17%),部分被散射成为漫辐射到达地表(约 22%);只有约 31%的太阳辐射作为直射太阳辐射到达地球表面,这部分电磁辐射有一部分被地表反射,剩余的部分被地物吸收。图 1.2 表明由于大气影响使得原本近似于 5900K 黑体辐射的太阳辐照度光谱曲线变得非常复杂,存在多个吸收通道。

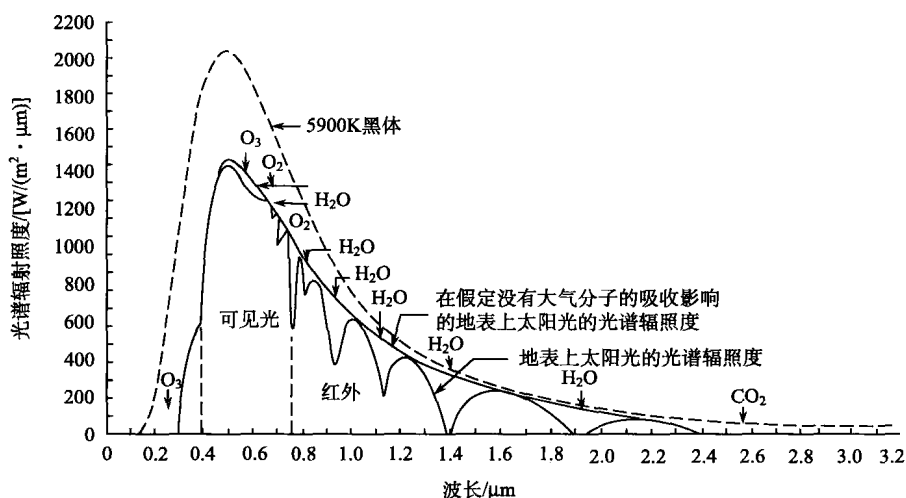


图 1.2 地球表面的太阳电磁辐射(Valley, 1965)

## 1.1.2 电磁波与地物的相互作用

太阳辐射到达地表后,自然界中的地物以其固有的特性发生反射、吸收和透射三种基本的相互作用,其中反射辐射穿过大气被遥感器接受与记录,反射光谱( $0.4\sim 2.5\mu\text{m}$ )已成为人们获得地物信息的重要组成部分。物体的光谱反射率随波长变化的曲线称为光谱反射率曲线,其形状反映了地物的反射光谱特征。影响地物反射率的因素包括地物类别、组成、结构、电学性质(电导、介电、磁学性质)及其表面特征(粗糙度、质地)等因素。因此,任何物体的反射光谱都蕴涵着自身本质信息,这是基于地物反射光谱特征进行物质识别与反演研究的物理基础。本小节将详细地论述自然界中典型地物类型的反射光谱特征、产生机理及影响因素。

## 1. 植被的反射光谱特性

植被叶片的光谱反射特性是由其化学和形态学特征决定,这种特征与植被的发育、健康状况以及生长条件密切相关(Boochs et al., 1990),典型植物叶片光谱反射率曲线主要是由叶绿素、水和其他生物化学成分对光线吸收形成。如图 1.3 所示,与土壤、水体等其他典型地物相比,绿色植被的光谱反射率具有明显的光谱特征。

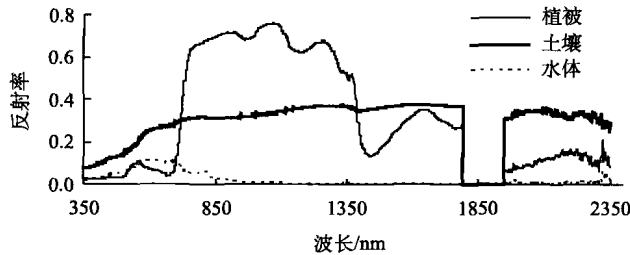


图 1.3 典型地物的光谱反射率曲线

在可见光波段,叶片光谱特性受各种色素影响,其中叶绿素起主要作用。叶绿素在以  $0.45\mu\text{m}$  和  $0.65\mu\text{m}$  为中心的蓝、红两个谱段内吸收大部分入射能量(Gates et al., 1965),在这两个叶绿素吸收谷间即  $0.54\mu\text{m}$  附近形成一个反射峰,使得叶片呈现绿色。叶红素和叶黄素(两种黄颜色的色素)在  $0.45\mu\text{m}$  附近也存在一个吸收带,但被叶绿素的吸收带所掩盖。当叶片受到某种胁迫使其叶绿素含量降低时,叶绿素在蓝、红波段的反射率升高,特别是红波区域,使得植物看上去呈淡黄色。当植物衰老时,由于叶绿素逐渐消失,叶红素和叶黄素开始起主导作用,这就是秋季植物叶子变黄的主要原因(Davis et al., 1978)。

在近红外波段,植物光谱特性主要取决于叶片内部构造(Gates et al., 1965; Knipling, 1967),叶片的反射率与透射率都很高(各占  $45\% \sim 50\%$ ),吸收率低(小于  $5\%$ )(Davis et al., 1978)。在红波段与近红外波段间反射率急剧上升,形成所谓的“红边”,这是植物光谱反射率最明显的特征,也是植被遥感中最为重要的谱段范围(Miller et al., 1990; 1991)。

在短波红外波段,绿色植物的光谱特性主要取决于叶片的总含水量,  $1.4\mu\text{m}$ 、 $1.9\mu\text{m}$  和  $2.7\mu\text{m}$  是水吸收带,受大气水汽吸收影响,该谱段通常不被应用。而  $0.96\mu\text{m}$  和  $1.1\mu\text{m}$  处水的吸收带强度虽小,但多层叶片时,对反射率存在显著影响(Davis et al., 1978)。

## 2. 土壤的反射光谱特性

从图 1.3 可以看出,土壤光谱反射率总体呈现随波长变大而升高的趋势,在可见光与近红外谱段尤为明显。土壤的光谱特性由土壤本身性质决定,但土壤是一种复杂的混合物,具有极其复杂的多孔体系,由不同含量的矿物质、水分、气体和土壤有机质组成,影响土壤光谱反射特性的主要因素包括土壤的有机质、氧化铁和水分含量以及土壤质地和母质等(刘伟东, 2002)。由于土壤光谱特性情况非常复杂,多种影响因素密切相关,在具体

研究中,需要对土壤内在与外在特性及各种影响因素进行综合分析。

土壤水分是土壤的重要组成部分,也是评价土壤资源优劣的主要指标之一。干燥土壤具有较高的反射率,这种变化在长波部分尤其明显,特别是在水汽吸收波段( $1.4\mu\text{m}$ 与 $1.9\mu\text{m}$ ),当土壤水分含量达到一定数值时,土壤的反射率随土壤水分的增加而增加(Nee-ma et al., 1987; Patel, 1979)。

土壤质地是指土壤中各种粒径的颗粒所占的相对比例。它对土壤光谱反射特性的影响主要表现在两个方面:一是通过影响土壤持水能力,进而影响土壤光谱反射率;二是土壤颗粒大小本身也影响土壤光谱反射率(Bedidi et al., 1992)。而不同粒径的土壤颗粒其化学组成也不同,对于黏粒部分,由于其具有很强的吸湿作用,故在 $1.4\mu\text{m}$ 、 $1.9\mu\text{m}$ 、 $2.2\mu\text{m}$ 等处的水分吸收带异常明显。

土壤有机质是土壤重要的组成物质。它虽然含量很少,但对土壤形成过程以及土壤的物理、化学和生物学等性质影响很大。在同一类土壤中,通常有机质含量越高,其光谱反射率就越低,反之亦然。有研究表明,当土壤中有有机质含量为1%时,其光谱反射率可达55%;当土壤中有有机质含量为5%时,其光谱反射率为25%,还不到有机质含量为1%时的一半。

土壤矿物一般占土壤固相部分重量的95%~98%,其组成、结构和性质对土壤物理、化学性质以及生物化学性质均有深刻影响。铁作为土壤矿物中的主要元素之一,是最重要的过渡元素。氧化铁是土壤赋色的重要成分,也是可见光谱中最活跃的因素。氧化铁含量对土壤光谱特性有重要的影响,通常土壤中氧化铁的含量越高,其光谱反射率则越低,反之亦然。这与氧化铁能强烈吸收太阳能有关。

### 3. 水体的反射光谱特性

相对于绝大多数其他地物,在太阳辐射谱段水体对入射能量吸收率明显要高,水体的光谱特征决定于其中的各种光学活性物质对光辐射的吸收和散射性质。在可见光-近红外波段,光谱反射特性可能由三个方面贡献,即水的表面反射、水体底部物质的反射和水中悬浮物质的反射;而光谱吸收和透射特性不仅与水体本身的性质有关,而且还明显的受到水中各种类型和大小物质影响(Davis et al., 1978)。在近红外和短波红外波段,水体几乎吸收所有入射能量,反射率很低,几乎趋近于零。水色遥感中将影响水体光谱反射特性的成分主要分为三种:叶绿素、无机悬浮物(悬浮泥沙)和黄色物质。

叶绿素浓度是衡量水体初级生产力和富营养化作用的重要指标。对特定的藻类,光谱反射率是色素吸收与细胞表面散射相互作用的结果,而藻类中都含有叶绿素,不同叶绿素含量下的水体遥感反射率如彩图1所示,反射率光谱曲线的大致形态基本相似。叶绿素在蓝、紫光波段( $0.4\sim 0.5\mu\text{m}$ )和 $0.67\mu\text{m}$ 附近都有吸收谷,当水中藻类密度较高时光谱反射率在这两处出现谷值; $0.55\sim 0.57\mu\text{m}$ 范围内的反射峰是由于叶绿素和胡萝卜素弱吸收和细胞的散射作用而形成的,因此可以作为叶绿素定量标志; $0.685\sim 0.715\mu\text{m}$ 范围内出现的反射峰是含藻类水体最显著的光谱特征,其存在与否通常被认为是判定水体中是否含有藻类叶绿素的依据,反射峰的位置和数值是叶绿素a浓度的重要指示(Gitel-son, 1992)。

在自然环境下测量的清水和浊水的光谱反射率曲线存在显著差异,浊水的反射率比



清水高得多,且与清水相比浊水的反射峰值出现在更长的波段。随着悬浮物浓度的增加,水体在可见光及近红外波段的反射亮度增加,水体由暗变得越来越亮,同时反射峰值波长向长波方向移动,即从蓝→绿→更长波段( $0.5\mu\text{m}$ 以上)移动,而且反射峰值本身形态变得更宽。一般说来,对可见光遥感而言, $0.58\sim 0.68\mu\text{m}$ 对应不同悬浮泥沙浓度的辐射峰值范围,即对水中悬浮泥沙反应最敏感,是遥感监测水体混浊度的最佳波段。图 1.4 是对法国西南部吉伦特(Gironde)河口地区 6 种不同悬浮物浓度的水体进行反射率测定得到的光谱曲线。

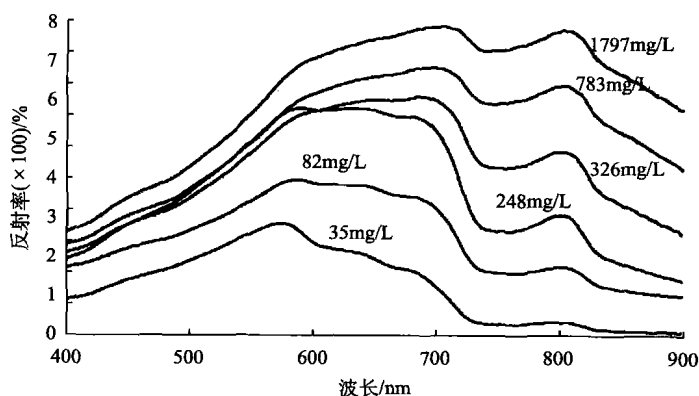


图 1.4 不同悬浮物浓度(mg/L)的典型水体反射光谱曲线(Doxaran et al., 2002)

黄色物质对水体光学特征的影响最为简单,黄色物质的吸收主要集中在小于 $0.55\mu\text{m}$ 的短波区域,长波区域的吸收系数接近为零,因此进行黄色物质遥感监测的波段范围是短波区域(Bricaud et al., 1981)。

#### 4. 岩矿的反射光谱特性

高光谱遥感矿物识别主要依赖于矿物成分的吸收特征,研究表明,具有稳定化学组分和物理结构的矿物具有稳定的本征光谱吸收特征(张杰林和曹代勇, 2002),在 $0.4\sim 2.5\mu\text{m}$ 范围内具有一系列可诊断性光谱特征信息,包括金属阳离子在可见光区域的电子过程以及阴离子基团在近红外区域的振动过程所形成的矿物光谱吸收特征(Hunt, 1977, 1979; 燕守勋等, 2003),其中电子过程主要包括晶体场效应、电荷转移、导带和色心(张兵, 2002)。电子过程产生的光谱吸收谱带一般较宽缓,而分子振动过程产生的吸收谱带较尖锐。燕守勋等(2003)给出了常见阳离子( $\text{Fe}^{2+}$ 、 $\text{Fe}^{3+}$ 、 $\text{Ni}^{2+}$ 、 $\text{Cu}^{2+}$ 、 $\text{Mn}^{2+}$ 、 $\text{Cr}^{3+}$ 、 $\text{Ti}^{4+}$ 和 $\text{La}^{2+}$ 等)及主要阴离子基团(水、羟基、碳酸盐)等的光谱吸收特征位置,这些特征带宽多为 $10\sim 20\text{nm}$ ,高光谱遥感数据可以反映这些光谱特征,进行矿物识别与成分分析。图 1.5 给出的是几种典型矿物在 $1.5\sim 2.5\mu\text{m}$ 范围的光谱反射率曲线,从中可以看出,化学成分不同的矿物类型具有不同的典型光谱特征。

岩石的光谱特征相对矿物较为复杂,岩石是由矿物组成的集合体,岩石的光谱特征常常不像矿物那样具有可鉴定的、清晰的光谱特征,对于自然界客观存在的岩石矿物来说,影响光谱变化的因素很复杂(陈述彭等, 1998)。其波谱特征还与矿物风化作用、表面形