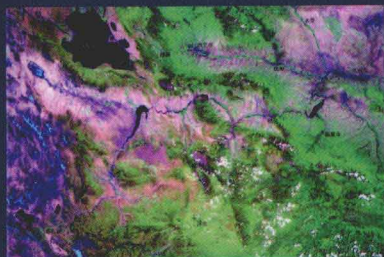


Remote sensing image Intelligent classification and its application

遥感图像 智能分类及其应用



——罗小波等◎著



电子工业出版社

PUBLISHING HOUSE OF ELECTRONICS INDUSTRY

<http://www.phei.com.cn>

重庆邮电大学出版基金资助

遥感图像智能分类及其应用

罗小波 赵春晖 潘建平 周春艳 王云安 著

電子工業出版社

Publishing House of Electronics Industry

北京 • BEIJING

前 言

现代遥感史以 20 世纪 60 年代末人类首次登上月球为重要里程碑，随后美国宇航局（NASA）、欧空局（ESA）和其他一些国家，如加拿大、日本、印度和中国先后建立了各自的遥感系统。信息技术和传感器技术的飞速发展带来了遥感数据源的极大丰富，每天都有数量庞大的不同分辨率的遥感信息，从各种传感器上接收下来。这些高分辨率、高光谱的遥感数据为遥感定量化、动态化、网络化、实用化、产业化及利用遥感数据进行地物特征的提取，提供了丰富的数据源。经过几十年的发展，遥感已经成为当今最活跃的科技领域之一，在国民经济的各个领域有着广泛的应用和深远的意义。

遥感图像分类是遥感应用系统中的关键技术之一，快速、高精度的遥感图像分类算法是实现各种实际应用的前提。正因为遥感图像分类有着非常重要的作用，所以遥感图像分类一直被从事遥感信息处理的广大科技人员所重视。许多研究者都在不断试用、改进乃至探索新的方法，不断提高遥感图像自动分类算法的精度和速度。

本书围绕遥感图像分类这一主线，将其分为基于像元的分类、基于对象的分类，以及混合像元分解三个方面，并从这三个方面对不同的遥感分类算法进行研究、完善与总结，从而构建一个具有层次结构的遥感图像智能分类体系，并反映该领域目前最新研究成果与研究趋势。在理论研究的基础上，结合实例，详细阐述新兴智能算法及其在遥感分类处理中的应用情况。本书是几位作者在完成 863 项目、国家自然科学基金、重庆市自然科学基金等项目的基础之上，结合人工智能理论与遥感信息学科交叉领域的实践，不断探索所取得的成果的总结。

全书共分 6 章,第 1 章主要介绍遥感分类主要数据源与特征,以及遥感分类现状与存在的问题等内容;第 2 章主要介绍传统的分类方法,以及分类特征变换与选取、分类精度评价等内容,为后续内容打下一定的基础;第 3 章在深入理解各种神经网络理论的基础上,对 BP、RBF、Kohonen 和 ART 四种神经网络遥感图像分类算法进行研究,并利用 TM、HJ-1B/CCD 等中分辨率图像进行实例研究;第 4 章主要对高光谱遥感影像分类中加权最小二乘支持向量机分类算法、模糊支持向量机分类算法等若干问题进行研究;第 5 章主要针对高空间分辨率遥感图像,基于面向对象的思想进行遥感图像分类,并以实际的案例分析比较面向对象分类与基于像元分类的各自优势;第 6 章深入探讨线性混合像元分解模型,以及基于数学形态学的端元提取算法,并以实际的案例分析方法的可行性,以及对分类精度的影响。

其中,第 1、2 章由罗小波、王云安编写,第 3 章由罗小波、赵春晖编写,第 4 章由赵春晖编写,第 5 章由周春艳编写,第 6 章由潘建平、郑丽、罗小波编写,张昊、王耀星参与了文字校对等工作,整书的统稿工作由罗小波完成。

由于作者的水平有限,书中难免有疏漏和不足之处,敬请读者与同行专家批评指正。

作者
2011 年 5 月

目 录

第 1 章 绪论	1
1.1 遥感技术概述	1
1.1.1 相关概念	1
1.1.2 遥感技术的发展与应用	3
1.1.3 遥感图像分类的意义	4
1.2 遥感图像分类主要数据源	5
1.2.1 中低分辨率卫星数据	6
1.2.2 高分辨率卫星数据	8
1.2.3 高光谱卫星数据	10
1.2.4 雷达卫星数据	11
1.3 遥感图像分类使用的主要特征	12
1.3.1 光谱特征	12
1.3.2 纹理特征	14
1.3.3 空间形状特征	18
1.3.4 高程特征	19
1.4 遥感图像分类现状及存在的问题	20
1.4.1 基于像元的分类	21
1.4.2 混合像元的分解	22
1.4.3 面向对象的分类	25
1.4.4 遥感图像分类所存在的问题	27
1.5 遥感图像智能分类研究思路与本书结构安排	28
1.6 本章总结	31
参考文献	32

第 2 章 遥感图像分类基础与传统分类方法	39
2.1 遥感图像分类概述	39
2.2 特征变换	41
2.2.1 主分量变换	41
2.2.2 最小噪声分离变换	44
2.3 最大似然监督分类	46
2.3.1 监督分类的基本过程	46
2.3.2 最大似然监督分类算法	47
2.3.3 训练样本的选取与纯化	51
2.4 ISODATA 非监督分类	55
2.5 分类精度评价	58
2.6 本章总结	63
参考文献	64
第 3 章 基于神经网络的遥感图像分类	68
3.1 人工神经网络遥感分类概述	68
3.2 BP 神经网络遥感影像分类	70
3.2.1 BP 网络基本理论	71
3.2.2 基于遗传算法优化的网络学习算法	73
3.2.3 BP 神经网络遥感分类模型	74
3.2.4 实验与精度评价	77
3.2.5 小结	81
3.3 RBF 神经网络遥感影像分类	82
3.3.1 RBF 网络基本理论	83
3.3.2 网络结构简化与 RBF 中心优化	85
3.3.3 实验与精度评价	87
3.3.4 小结	90
3.4 自组织神经网络遥感影像分类	90

3.4.1	Kohonen 神经网络基础	91
3.4.2	基于 Kohonen 网络的遥感监督分类模型	93
3.4.3	实验与精度评价	97
3.5	自适应共振神经网络遥感影像分类	100
3.5.1	ART1 神经网络学习过程	102
3.5.2	ART1 神经网络的具体算法	105
3.5.3	自适应共振网络在高光谱中的应用	106
3.5.4	实验与精度评价	110
3.6	本章总结	115
	参考文献	117
第 4 章	基于支持向量机的遥感图像分类	122
4.1	支持向量机发展概述	122
4.2	统计学习理论和支持向量机	123
4.2.1	统计学习理论	124
4.2.2	支持向量机	130
4.2.3	改进核函数及高光谱图像分类仿真实验	137
4.2.4	小结	142
4.3	最小二乘支持向量机高光谱图像分类	142
4.3.1	LS-SVM 的原理	143
4.3.2	LS-SVM 的训练样本选择以及模型参数选择 ..	146
4.3.3	双边加权 LS-SVM	147
4.3.4	仿真实验	150
4.3.5	小结	154
4.4	多类支持向量机图像分类	155
4.4.1	多类支持向量机	155
4.4.2	各种多类 SVM 的性能对比	161
4.4.3	仿真实验	165
4.4.4	小结	167

4.5 基于模糊 SVM 的高光谱图像分类	168
4.5.1 多类支持向量机存在的局限性	169
4.5.2 模糊集的基本概念	170
4.5.3 基于 1-v-1 SVM 的模糊支持向量机	171
4.5.4 仿真实验	173
4.5.5 小结	175
4.6 本章总结	175
参考文献	178
第 5 章 面向对象的遥感图像分类	182
5.1 面向对象的遥感图像分类概述	182
5.2 多尺度影像分割	185
5.2.1 基于区域的影像分割	185
5.2.2 多尺度影像分割	187
5.3 模糊分类	193
5.3.1 模糊理论基础	193
5.3.2 基于多特征的模糊分类模型	196
5.4 实例研究	198
5.4.1 数据源概况	198
5.4.2 基于像元的最大似然分类	198
5.4.3 面向对象分类	200
5.4.4 二者分类度比较与分析	208
5.5 本章总结	210
参考文献	211
第 6 章 遥感图像混合像元分解	216
6.1 混合像元分解概述	216
6.2 混合像元分解模型	220
6.2.1 光谱混合的成像机理	220

6.2.2	概念的提出	221
6.2.3	光谱混合模型	222
6.3	线性模型及其混合像元分解	227
6.3.1	线性光谱混合模型	228
6.3.2	端元组分确定	235
6.3.3	端元提取算法	237
6.3.4	实例研究	242
6.3.5	小结	250
6.4	基于数学形态学的端元提取算法	251
6.4.1	数学形态学概述	252
6.4.2	数学形态学的基本原理与运算	253
6.4.3	基于数学形态学的端元提取	256
6.4.4	不同方法分解结果比较	264
6.4.5	小结	266
6.5	本章总结	267
	参考文献	271

第1章 绪 论

1.1 遥感技术概述

1.1.1 相关概念

遥感即遥远感知，是在不直接接触的情况下，对目标或自然现象远距离探测和感知的一种技术，通常有广义和狭义的理解。广义的遥感，泛指一切无接触的远距离探测，包括对电磁场、力场、机械波（声波、地震波）等的探测；狭义的遥感是指应用探测仪器，不与探测目标相接触，从远处把探测目标的电磁波特性记录下来，通过分析，揭示出物体的特征性质及其变化的对地观测技术^[1]。

遥感是从远离地面的不同工作平台上，如高塔、飞机、卫星、宇宙飞船和航天飞机等，通过传感器对地球表面反射与辐射的电磁波信息进行探测，然后经信息的传输、处理和判读分析，对地球的资源与环境进行探测与监测^[2]。遥感技术从远距离采用高空鸟瞰的形式进行探测，包括多谱段、多时段和多角度的遥感影像，以及多次增强的遥感信息，能提供综合系统性、瞬时或同步性的连续区域性同步信息，特别适合于大范围、动态监测，是目前最主要的对地观测技术之一。

根据所利用的电磁波的光谱段的差异，可将遥感分为可见光-近红外遥感、热红外遥感、微波遥感三种类型^[3]。可见光-近红外遥感，主要指利用可见光（ $0.4\sim 0.7\mu\text{m}$ ）和近红外（ $0.7\sim 2.5\mu\text{m}$ ）波段的遥感技术，前者是人眼可见的波段，后者是反射红外波段，

人眼虽不能直接看见,但其信息能被特殊传感器所接收^[4]。它们的共同的特点是,其辐射源是太阳,在这两个波段上只反映地物对太阳辐射的反射,根据地物反射率的差异,就可以获得有关目标物的信息,它们都可以用摄影方式和扫描方式成像。

热红外遥感,指通过红外敏感元件,探测物体的热辐射能量,显示目标的辐射温度或热场图像的遥感技术^[5],主要指 $8\sim 14\mu\text{m}$ 波段范围。地物在常温(约 300K)下热辐射的绝大部分能量位于此波段,在此波段地物的热辐射能量大于太阳的反射能量,热红外遥感具有昼夜工作的能力。

微波遥感,指利用波长为 $1\sim 1000\text{mm}$ 的电磁波的遥感技术,通过接收地面物体发射的微波辐射能量,或接收遥感仪器本身发出的电磁波束的回波信号,对物体进行探测、识别和分析^[6]。微波遥感的特点是对云层、地表植被、松散沙层和干燥冰雪具有一定的穿透能力,又能全天候工作。目前,遥感图像分类所利用的波段主要集中在可见光-近红外遥感波段,以及微波中的部分波段。

在遥感图像预处理、融合、分类等应用研究中,需要考虑几个基本要素,即空间分辨率、光谱分辨率、时间分辨率。空间分辨率是指遥感图像上能够识别的两个相邻地物的最小距离,空间分辨率在地面上的实际尺寸称为地面分辨率,如 TM 图像的空间分辨率或地面分辨率为 30 米(像元大小为 $30\times 30\text{m}^2$),空间分辨率是评价传感器性能和遥感信息的重要指标之一,也是识别地物形状大小的重要依据。

光谱分辨率指成像的波段范围,分得越细、波段越多,光谱分辨率就越高,目前高光谱可以达到 $5\sim 6\text{nm}$ 量级、400 多个波段,细分光谱可以提高自动区分和识别目标性质和组成成分的能力。

时间分辨率是指在同一区域进行的相邻两次遥感观测的最小时间间隔,对轨道卫星,也称为覆盖周期,时间分辨率是评价遥感系统动态监测能力的重要指标。其中,由于传感器成像需要接收一定强度的反射或者辐射信息,因此,空间分辨率与光谱分辨

率往往是相互矛盾的,不能同时无限制提高^[3]。

1.1.2 遥感技术的发展与应用

现代遥感史以 20 世纪 60 年代末人类首次登上月球为重要里程碑,随后美国宇航局(NASA)、欧空局(ESA)和其他一些国家,如加拿大、日本、印度和中国先后建立了各自的遥感系统。1972 年美国发射了第一颗地球资源技术卫星(ERTS-1),后更名为陆地卫星 1 号(Landsat-1),标志着地球遥感新时代的开始。1972 年以后,美国发射了一系列陆地卫星,包括陆地卫星 1~7 号。到 20 世纪 80 年代后期至 90 年代初,法国发射的 SPOT 卫星上载有 20m(10m)的高分辨率传感器(HRV 分辨率为 20m,全色波段为 10m)。1999 年 9 月,美国空间成像公司(Space Imaging Inc.)发射成功的小卫星上载有 IKONOS 传感器,能够提供 1m 的全色波段和 4m 的多光谱波段,是世界上第一颗商用 1m 分辨率的遥感卫星。2008 年 9 月成功发射了迄今技术最先进、分辨率最高的商业对地成像卫星 GeoEye-1,GeoEye-1 高分辨率卫星影像在实现大面积成图、细微地物的解译与判读等方面优势突出。

信息技术和传感器技术的飞速发展带来了遥感数据源的极大丰富,每天都有数量庞大的不同分辨率的遥感信息,从各种传感器上接收下来。这些高分辨率、高光谱的遥感数据为遥感量化、动态化、网络化、实用化、产业化及利用遥感数据进行地物特征的提取,提供了丰富的数据源。经过几十年的发展,无论是遥感平台、传感器方面,还是遥感信息处理、遥感应用方面,都获得了飞速的发展,遥感已经成为当今最活跃的科技领域之一,在国民经济的各个领域有着广泛的应用和深远的意义。

在遥感应用方面,经过几十年的发展,遥感技术已经广泛地渗透到国民经济各个领域,对于推动社会进步、经济建设、环境保护、资源开发以及国防建设起了重大的作用。比如,由遥感观

测到的全球气候变化和厄尔尼诺现象,以及全球荒漠化、绿波(指植被)推移、海洋冰山漂流等动态现象已经引起了人们的广泛关注和重视;在海洋渔业、海上交通、海洋生态等研究中,遥感技术已经成为了重要的工具;矿产资源、土地资源、森林操场资源、野生动物资源、资源的调查和农作物估产都缺少不了遥感手段的应用;此外,在灾害监测,如火灾、地震、农作物病虫害和气象灾害等的预测、预报和灾后评估中,遥感技术都发挥了重大的作用。

1.1.3 遥感图像分类的意义

遥感作为一种远距离的、非接触的目标探测技术和方法,它通过对目标进行探测,获取目标的信息,然后对所获取的信息进行加工处理,从而进行定位、定性或者定量的描述。目前,利用遥感技术对区域性土地进行调查、定量提取土地利用信息、监测与评价环境等是资源环境科学的重要研究领域之一。

遥感图像分类、动态检测中最主要的应用就是土地利用/土地覆盖的动态监测、数据更新。以往由于一个地区缺乏现在和过去土地利用的最新地图,以及缺乏处理大量资料的分析方法,土地利用和覆盖变化的研究工作工期长、误差大、费用高,使土地利用规划受到严重影响。遥感技术则以其快速、准确、准时、周期短等优点在大中尺度的土地利用动态监测中具有明显的优势,在国内外已经得到了广泛应用^[7]。

20世纪90年代以来,环境遥感技术应用越来越深入。从陆地的土地覆被变化,城市扩展动态监测评价,土壤侵蚀与地面水污染负荷产生量估算,生物栖息地评价和保护,工程选址以及防护林保护、规划和建设;到水域的海洋和海岸带生态环境变迁分析,海面悬浮泥沙、叶绿素含量、黄色物质、海上溢油、赤潮以及热污染等的发现和监测,珊瑚和红树林的现状调查与变化监测,堤

坝的规划与水沙平衡分析,水下地形遥感调查及水域初级生产率的估算;再到大气环境遥感中的城市热岛效应分析,大气污染范围识别与定量评价,大气气溶胶污染特征参数化,全球水、气和化学元素等的循环研究,全球环境变化以及重大自然灾害的评估等,几乎覆盖了整个地球系统。在上述各类环境监测、分析与评估的应用中,土地类型是一个基本参数,也需要遥感图像分类技术的支撑。

遥感图像分类是遥感图像信息处理中最基本的问题之一,遥感技术很多方面的应用都涉及遥感图像分类问题的研究,所以说,遥感图像分类方法的提高直接制约着遥感技术的应用发展^[8, 9]。无论是专题信息提取、变化监测,还是专题地图制作、遥感数据库的建立等都离不开遥感图像分类技术^[10]。

遥感图像分类是遥感应用系统中的关键技术,其主要任务是根据地物电磁波辐射信息在遥感图像上的特征,判读识别地面物体的类属及其分布状况。快速、高精度的遥感图像分类算法是实现各种实际应用的前提。正因为遥感图像分类有着非常重要的作用,所以遥感图像分类一直被从事遥感信息处理的广大科技人员所重视。许多研究者都在不断试用、改进,以及探索新的方法,不断提高遥感图像自动分类算法的精度和速度。

1.2 遥感图像分类主要数据源

目前,遥感图像分类所使用的数据源主要集中在可见光-近红外波段图像,包括中低分辨率的 Landsat TM/ETM+数据、HJ-1A/1B 卫星数据,高分辨率的 IKONOS 卫星数据、QuickBird 卫星数据,以及 AVIRIS 等高光谱卫星数据。而对雷达卫星图像进行的分类研究相对要少得多。下面分别对常见遥感分类数据源进行简要介绍。

1.2.1 中低分辨率卫星数据

中低分辨率卫星数据是遥感分类中研究得最为成熟、最为深入的数据源,传统的数理统计分类,以及大量新型分类算法都是最先针对中低分辨率卫星数据而提出并发展起来的。

1. Landsat TM/ETM+数据

Landsat 是美国陆地探测卫星系统, Landsat 4、5 装载有 Thematic Mapper (TM) 传感器, Landsat 7 卫星于 1999 年发射, 装载有 Enhanced Thematic Mapper (ETM+) 传感器。TM 可见光—短波红外的空间分辨率为 30m, TM6 热红外波段的空间分辨率为 120m。ETM+在 TM 的 7 个波段的基础上增加了一个全色波段 $0.5\sim 0.9\mu\text{m}$, 空间分辨率为 15m, 且 ETM+把热红外波段的空间分辨率提高到了 60m, 另外, 还改善了探测器设计, 使所有波段数据可自动配准。

Landsat TM/ETM+数据是在土地利用、动态监测、数据更新等方面应用得最为广泛的遥感数据, 同时也是在大量遥感图像分类算法研究中使用最多的实验数据。

2. HJ-1A/1B 卫星数据

HJ-1A/1B 是我国于 2008 年 9 月成功发射的环境与灾害监测预报小卫星星座, HJ-1A 卫星搭载了 CCD 相机和超光谱成像仪 (HSI), HJ-1B 卫星搭载了 CCD 相机和红外相机 (IRS), 各载荷的主要参数见表 1.1^[11]。

表1.1 HJ-1A、HJ-1B卫星主要载荷参数

平台	有效载荷	波段号	光谱范围 (μm)	空间分辨率 (m)	幅宽 (km)	重访时间 (天)
HJ-1A 卫星	CCD相机	1	0.43~0.52	30	360 (单台), 700 (两台)	4
		2	0.52~0.60	30		
		3	0.63~0.69	30		
		4	0.76~0.90	30		
	高光谱成像仪	—	0.45~0.95 (110~128 个谱段)	100	50	4
HJ-1B 卫星	CCD相机	1	0.43~0.52	30	360 (单台), 700 (两台)	4
		2	0.52~0.60	30		
		3	0.63~0.69	30		
		4	0.76~0.90	30		
	红外多 光谱相机	5	0.75~1.10	150 (近红外)	720	4
		6	1.55~1.75			
		7	3.50~3.90			
		8	10.5~12.5	300 (10.5~ 12.5 μm)		

在 HJ-1A 卫星和 HJ-1B 卫星上装载的两台 CCD 相机设计原理完全相同,以星下点对称放置,平分视场、并行观测,联合完成对地刈幅宽度为 700km、地面像元分辨率为 30m、4 个谱段的推扫成像。此外,在 HJ-1A 卫星装载有一台超光谱成像仪,完成对地刈幅宽度为 50km、地面像元分辨率为 100m、110~128 个光谱谱段的推扫成像,具有 $\pm 30^\circ$ 侧视能力和星上定标功能。在 HJ-1B 卫星上还装载有一台红外多光谱相机,完成对地刈幅宽度为 720km、地面像元分辨率为 150m/300m、4 个光谱谱段的推扫成像。

HJ-1A/1B 卫星数据广泛应用于土地沙化、盐碱化、石漠化监



测, 冰雪灾害与森林、草原火灾探测, 农业估产、病虫害监测, 以及环境与灾害的监测、评估及定量化分析等领域, 为我国环境与灾害监测预报提供及时、可靠和科学的信息支持。

1.2.2 高分辨率卫星数据

随着遥感获取技术的快速发展, 遥感数据的空间分辨率也不断提高, 针对以 IKONOS、QuickBird 为代表的高分辨率数据分类也成为了目前的研究热点。

1. IKONOS 卫星数据

IKONOS (伊科诺斯) 卫星于 1999 年 9 月发射成功, 是世界上第一颗提供高分辨率卫星图像的商业遥感卫星。IKONOS 卫星的成功发射不仅实现了提供高清晰度且分辨率达 1m 的卫星影像, 而且开拓了一条新的更快捷、更经济获得最新基础地理信息的途径, 更是创立了崭新的商业化卫星图像的标准。IKONOS 是可采集 1m 分辨率全色和 4m 分辨率多光谱影像的商业卫星, 同时全色和多光谱影像可融合成 1m 分辨率的彩色影像。从 681km 高度的轨道上, IKONOS 的重访周期为 3 天, 并且可从卫星直接向全球 12 个地面站传输数据。

2. QuickBird 卫星数据

QuickBird 卫星于 2001 年 10 月由美国 Digital Globe 公司发射, 是目前世界上最先提供亚米级分辨率的商业卫星, 具有引领行业的地理定位精度, 海量数据星上存储, 单景影像比同时期其他的商业高分辨率卫星图像高出 2~10 倍。QuickBird 全色波段分辨率为 0.61m, 其多光谱波段图像分辨率为 2.44m。而且 QuickBird 卫星系统每年能采集 7500 万 km^2 的卫星图像数据, 在中国境内每天至少有 2~3 个过境轨道, 存档数据约有 500 万 km^2 。QuickBird