



普通高等教育“十一五”国家级规划教材

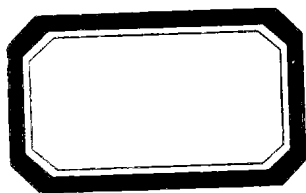
高光谱遥感

Hyperspectral Remote Sensing

张良培 张立福 编著



测绘出版社



育“十一五”国家

高光谱遥感

Hyperspectral Remote Sensing

张良培 张立福 编著

测绘出版社

· 北京 ·

© 张良培 张立福 2011

所有权利(含信息网络传播权)保留,未经许可,不得以任何方式使用。

内容简介

本书是以高光谱信息的获取、处理和应用为线索组织编写的。全书共分七章。第一章是对高光谱遥感概念及发展的介绍,第二章是地物光谱数据的获取与分析,第三章是地物光谱数据的重建,第四章是高光谱遥感数据的处理,第五章是高光谱遥感图像分类,第六章是高光谱定量遥感,第七章是高光谱遥感的应用。

本书可作为高等院校遥感专业及相关专业本科、研究生高光谱遥感课的教材,也可供从事高光谱遥感研究的科研人员与工程技术人员参考。

图书在版编目(CIP)数据

高光谱遥感/张良培,张立福编著. —北京:测绘出版社,2011.6

普通高等教育“十一五”国家级规划教材

ISBN 978-7-5030-2291-3

I. ①高… II. ①张… ②张… III. ①光谱分辨率—光学遥感—高等学校—教材 IV. ①TP722

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2011)第 123169 号

责任编辑	万茜婷	封面设计	李伟	责任校对	董玉珍 李艳
出版发行	测绘出版社				
地址	北京市西城区三里河路 50 号	电话	010—68531160(营销) 010—68531609(门市)		
邮政编码	100045	网址	www.sinomaps.com		
电子邮箱	smp@sinomaps.com	经销	新华书店		
印刷	北京金吉士印刷有限责任公司	字数	380 千字		
成品规格	184mm×260mm	印次	2011 年 6 月第 1 次印刷		
印张	15.75	定价	38.00 元		
版次	2011 年 6 月第 1 版				
印数	0001—3000				

书号 ISBN 978-7-5030-2291-3/P·533

本书如有印装质量问题,请与我社联系调换。

前 言

高光谱遥感技术是 20 世纪 80 年代初出现的新型对地观测综合技术。所谓高光谱,是指传感器获取的数据的光谱分辨率很高,一般将分辨率在波长的 1/100 的光谱定义为高光谱。高光谱遥感技术的发展始于成像光谱技术的发展。成像光谱仪是新一代“图谱合一”的光学遥感器,它具有获取地球目标详细光谱数据的能力,是当前监测地球环境动态变化、遥感定量反演等遥感应用最有效的空间遥感仪器。高光谱遥感技术是当前遥感技术发展的前沿技术之一。

高光谱遥感技术为遥感信息定量应用开辟了新的前景。高光谱遥感技术是一门新型的交叉学科,其发展得益于卫星技术、传感器技术及计算机技术的高速发展。随着国内外一系列空间计划的实施,以及系列高光谱传感器的研制成功,如机载航空成像光谱仪(airborne imaging spectrometer, AIS)系列、航空可见光与红外成像光谱仪(airborne visible/infrared imaging spectrometer, AVIRIS)、中国研制的模块化航空成像光谱仪(module airborne imaging spectrometer, MAIS)、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,这些已经投入使用的高光谱传感器与即将发射的星载系列高光谱传感器,将极大地满足人们对高光谱数据的需求,高光谱遥感数据源在不久的将来有望得以保证,这必将进一步推动遥感信息实用化进程。但是,就目前遥感信息的处理能力来讲,远远落后于遥感信息的获取能力。高光谱遥感同样面临技术、资金、人才三方面的难题。可喜的是,这方面的难题已经引起有关方面的高度重视,一系列国家重点基础发展计划都将遥感应应用列入其中;高光谱遥感研究呈现出了前所未有的新局面,一些关键技术相继得到突破,部分关键技术有望不久得到彻底解决;国内许多高校纷纷成立了各种遥感研究中心和遥感实验室,大量研究成果陆续在各种刊物发表,可以预见,高光谱遥感及应用,必在不久的将来,在我国国民经济各方面发挥越来越重要的作用。据悉,美国劳动部已经把地球空间技术与纳米技术、生物技术一起确定为新出现的和正在飞速发展中的三大最重要技术。地球空间信息产业的欣欣向荣和地球空间信息技术发展的美好前景使我们对未来高光谱技术的发展充满信心。

高光谱遥感技术的发展,既需要航空航天科技的发展及传感器技术的发展作为支撑,也需要一大批有志于从事高光谱遥感理论、应用的科技工作者。国内高光谱遥感的发展与世界先进水平还有一段差距,其应用除了在地质领域已经广泛用于地质填图、矿物蚀变信息提取外,其他领域的应用远没有跟上高光谱遥感技术的发展步伐。鉴于当时国内高光谱遥感方面的教材几乎空白,我们于 2005 年编写了由武汉大学出版社出版的《高光谱遥感》教材,书中系统介绍了高光谱遥感的原理、高光谱处理技术,以及传感器定标、辐射纠正、大气校正等内容,以满足高等院校教材建设的需求。

近年来,国内高光谱遥感技术理论研究与应用得到了快速发展,实用化的高光谱遥感载荷研制步伐也大大加快。为了适应高光谱遥感技术的发展需求,我们在 2005 年教材的基础上,以高光谱信息的获取、处理和应用为线索编写了这本新版《高光谱遥感》。新版《高光谱遥感》

完善了对地物电磁波理论的阐述,并增加了干涉、衍射、偏振等内容;紧密结合近年来航空航天科技及传感器技术的发展,在高光谱载荷部分增加了国内外主要的高光谱卫星载荷和地面成像光谱仪器的详细内容;而在高光谱的数据处理与应用方面,增加了当前新型数据处理算法与模型的介绍,以及高光谱定量应用的内容。

新版《高光谱遥感》共七章,第一章概论,介绍了高光谱遥感的概念及发展;第二章地物光谱数据的获取与分析,介绍了电磁波、电磁辐射等遥感的理论基础,地物光谱数据的获取仪器及获取步骤,分析了地物的光谱特性;第三章地物光谱数据的重建,介绍了由卫星数据重建地物光谱数据的过程及其所涉及的有关知识背景,包括传感器的定标、大气及其影响、大气辐射传输理论、大气校正等内容;第四章高光谱遥感数据的处理,介绍了高光谱遥感数据处理的关键技术,包括光谱的特征选择与提取、光谱匹配、光谱微分、混合像元光谱分解等技术;第五章高光谱遥感图像分类,介绍了高光谱遥感图像的分类方法,包括使用传统的非监督分类、监督分类的各种方法,以及一些针对高光谱数据的分类方法;第六章高光谱定量遥感,介绍了大气辐射传输模型的构建,以及高光谱植被反演与城市热环境定量遥感的内容;第七章高光谱遥感的应用,介绍了高光谱遥感技术在植被、地质、林业、农业等方面的应用实例。

本书可作为高等院校遥感专业及相关专业本科、研究生高光谱遥感课的教材,也可供从事高光谱遥感研究及工程技术人员参考。

武汉大学测绘遥感信息工程国家重点实验室的袁强强等,以及中国科学院遥感应用研究所的黄长平等同学为新版《高光谱遥感》的编写提供了帮助,在此表示感谢。为了保证图书体系结构的完整,书稿编写过程中参考了他人的部分研究成果,在此也一并表示感谢。

本书在编写原则上力求系统全面,但由于学识和时间所限,难免顾此失彼。书中不妥之处,敬请各位专家、同行批评指正。

目 录

第一章 概 论	1
§ 1-1 高光谱遥感的发展	1
§ 1-2 高光谱遥感的研究现状	5
第二章 地物光谱数据的获取与分析	9
§ 2-1 电磁波与电磁辐射	9
§ 2-2 光谱测量仪器	15
§ 2-3 典型地物的光谱特征	30
§ 2-4 高光谱数据分析处理技术及成像光谱仪发展趋势	36
第三章 地物光谱数据的重建	39
§ 3-1 传感器定标	39
§ 3-2 大气及其影响	52
§ 3-3 大气辐射传输理论	58
§ 3-4 大气校正	60
§ 3-5 其他辐射误差校正	67
第四章 高光谱遥感数据的处理	73
§ 4-1 光谱的特征选择与提取	73
§ 4-2 光谱匹配	87
§ 4-3 光谱微分	101
§ 4-4 混合像元光谱分解	102
§ 4-5 目标探测	123
§ 4-6 多源遥感影像融合	126
第五章 高光谱遥感图像分类	130
§ 5-1 非监督分类	130
§ 5-2 监督分类	143
§ 5-3 高光谱数据分类方法	155
§ 5-4 分类精度评价	160
第六章 高光谱定量遥感	164
§ 6-1 高光谱定量遥感综述	164
§ 6-2 大气辐射传输建模	165

§ 6-3 高光谱植被反演	167
§ 6-4 城市热环境定量遥感	191
第七章 高光谱遥感的应用	198
§ 7-1 高光谱遥感在植被监测中的应用	198
§ 7-2 高光谱遥感在地质调查中的应用	203
§ 7-3 高光谱遥感在林业中的应用	209
§ 7-4 高光谱遥感在农业中的应用	212
§ 7-5 高光谱遥感在侦察和国防安全中的应用	215
参考文献	221

第一章 概 论

§ 1-1 高光谱遥感的发展

一、高光谱遥感的基本概念

遥感(remote sensing)是 20 世纪 60 年代发展起来的对地观测综合性技术,是指通过某种装置,不直接接触被研究目标、区域或现象来获取其有关数据,并对所获取的数据进行分析从而得到所需要信息的一种科学和技术(Lillesand et al,2000)。由于它集先进性、科学性、综合性、实用性于一体,涉及信息科学、环境科学、地球科学、空间科学、生物科学等众多科学领域,其发展受到各个部门的格外关注。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。

以 λ 表示波长,一般认为,光谱分辨率在 $\lambda/10$ 数量级范围内的遥感称为多光谱(multi-spectral)遥感,光谱分辨率在 $\lambda/100$ 数量级范围内的遥感称为高光谱(hyperspectral)遥感,光谱分辨率在 $\lambda/1000$ 数量级范围内的遥感称为超光谱(ultraspectral)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、准确、及时、综合地对地观测与监测能力;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,其覆盖的光谱范围也从可见近红外、短波红外,逐步向紫外和中红外拓展。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,使人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。

20 世纪 80 年代兴起的新型对地观测技术——高光谱遥感技术,始于成像光谱仪(imaging spectrometer)的研究计划。该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,并在美国国家航空航天局(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),如航空成像光谱仪(airborne imaging spectrometer,AIS)系列、航空可见光与红外成像光谱仪(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。值得一提的是,我国的成像光谱技术的发展紧跟国际潮流,我国最早研制模块化航空成像光谱仪(module airborne imaging spectrometer,MAIS),在世界成像光谱技术的发展中占有重要的地位。高光谱遥感技术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,

在成功研制出模块化航空成像光谱仪 MAIS 的基础上,陆续研制出了机载实用型模块化成像光谱仪 OMIS(operational modular imaging spectrometer)系列及星载高光谱成像光谱仪 C-HRIS(China high resolution imaging spectrometer)等。

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。当电磁波入射到物质表面时,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(童庆禧等,1990)。

遥感平台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、数据存储及信息处理技术的发展,使遥感技术的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到地下,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,促进了遥感理论、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(徐瑞松等,2003),如植被生物量估计(张良培等,1997c)、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%(梅安新等,2001)。因此,遥感信息处理技术与方法有待深入地研究和开发。

高光谱遥感具有不同于传统遥感的新特点,主要表现在如下方面(张立福,2005)。

(1)波段多:可以为每个像元提供几十、数百甚至上千个波段。

(2)光谱范围窄:波段范围一般小于 10 nm。

(3)波段连续:有些传感器可以在 350~2 500 nm 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,数据量呈指数增加。

(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:而用于特征提取的主分量分析方法、用于分类的最大似然法、用于求植被指数的归一化植被指数(normalized difference vegetation index,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如下(郭华东,1996)。

(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,即通过成像光谱数据的定标、量化并基于大气纠正的模型与算法,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。

二、高光谱遥感发展概况

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 Landsat 上的多光谱扫描仪(multispectral scanner, MSS)仅有4个波段,其平均光谱分辨率为150 nm,而80年代的专题制图仪(thematic mapper, 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137 nm;法国 SPOT 卫星的多光谱波段的光谱分辨率为87 nm。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。

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机载航空成像光谱仪 AIS,是由美国国家航空航天局(NASA)所属的喷气推进实验室(JPL)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,光谱覆盖范围从12~24 μm 。AIS 在美国内华达州 Cuprite 地区的应用中取得了很好的效果。1987年研制成功的航空可见光与红外光成像光谱仪 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(400~2500 nm)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 公司不失时机地成功研制了实用型 GERIS 系统,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傅里叶变换高光谱成像仪(Fourier-transform hyperspectral imager, FTHSI),适合在 Cessna-206 轻型飞机上使用。它的重量为35 kg,采用256通道,光谱范围为400~1050 nm,有2~10 nm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:红外与紫外(IR/UV)扫描仪是为海洋环境航空遥感监测业务系统研制的专用扫描仪;可见光、中红外与红外(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(airborne thermal infrared multispectral scanner, 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。可见,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波段推扫式高光谱成像仪(pushbroom hyperspectral imager, PHI)与128波段机载实用型模块化成像光谱仪 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(Chinese moderate resolution imaging spectroradiometer, CMODIS)于2002年随“神舟三号”飞船发射升空,这是继美国1999年发射 EOS(earth observing system)平台之后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

分辨率成像光谱仪可以一次处理 500 km 范围的信息,精度可以达到 500 m,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 343 km 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、海洋环境与海洋初级生产力调查等服务。此外,我国环境与灾害监测预报小卫星星座 A、B 星(HJ-1-A/B)已于 2008 年 9 月 6 日成功发射,HJ-1-A 搭载了 CCD 相机和超光谱成像仪(hyperspectral imager, HSI),HJ-1-B 搭载了 CCD 相机和红外相机(infrared spectrometer, IRS),而 HJ-1-C 预计 2011 年升空。环境与灾害监测预报小卫星星座的建立,将提高我国环境监测和综合减灾能力,初步建立起先进的环境与灾害监测预警体系,实现大范围、全天候、全天时、动态的环境和灾害监测。

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,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与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,而另一方面,其技术的发展则由以航空系统为主开始转向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,在实验、研究及信息的商业化方面发挥着重要作用。

高光谱遥感正处在由航空遥感为主转向航空和航天高光谱遥感相结合的阶段。卫星平台方面,装载有 MODIS 传感器的 Terra 卫星已于 1999 年 12 月发射升空。继 Terra 之后,美国 NASA EOS 计划中的第二颗卫星 Aqua 也于 2002 年 5 月顺利进入预定轨道。装有全球成像仪(global imager, GLI)传感器的日本 ADEOS-II (advanced earth observation satellite-II)卫星于 2002 年 12 月成功发射。澳大利亚不久将发射一颗以地质探测和矿藏资源作为主要遥感对象,具有在可见光、短波、红外波段、全色波段共 65 个通道的高光谱成像小卫星,即澳大利亚资源信息与环境卫星(Australian resource information and environment satellite, ARIES)。欧洲空间局(European Space Agency, ESA)于 2001 年 10 月在印度发射了紧密型高分辨率成像光谱仪(compact high resolution imaging spectrometer, CHRIS),它是欧洲空间局自主运行计划的主要有效载荷,CHRIS 目前已发回了大量高质量的空间成像光谱数据;同时欧洲空间局于 2002 年 3 月发射的 Envisat 卫星装载了包括 15 个波段的中等分辨率成像光谱仪(medium resolution imaging spectrometer, MERIS)在内的 10 个卫星探测器。为了适应小卫星平台的应用,德国将研制的紧凑型干涉高光谱成像仪 FTIS 应用于月球探测,其光谱分辨率在可见光与近红外波段(VNIR)为 120 波数^①在短波红外波段(SWIR)为 60 波数,空间分辨率 $0.1\text{mrad} \times 0.1\text{mrad}$ 。德国环境制图与分析规划(environmental mapping and analysis program, EnMAP)高光谱地球观测卫星,计划于 2014 年发射,这颗卫星可提供约 200 个光谱波段,至少是现有多种成像光谱仪卫星的两倍。美国 EO-1(earth observing-1)卫星上 10 波段

① 波数就是指在波的传播方向上,单位长度内所含的波长数,通常表示为 cm^{-1} 。

的先进陆地成像仪(advanced land imager, ALI)和 220 波段的 Hyperion 高光谱成像仪,以及美国 HRST(highly reusable space transportation)卫星上 210 波段的海洋海岸成像光谱仪(coastal ocean imaging spectrometer, COIS)等这些已发射或即将发射的高光谱遥感传感器将使人类以更敏锐的眼光洞察世界。人们利用 NASA EOS 计划,以及欧洲空间局的 Envisat 等卫星所提供的丰富的陆地、海洋和大气等信息,配合航空高光谱成像光谱仪所提供的高空间分辨率、高光谱信息,将会给遥感技术及应用带来一场革命性的变革。

§ 1-2 高光谱遥感的研究现状

一、高光谱遥感影像分析

自成像光谱技术提出以来,许多国家都积极投身于成像光谱仪的研制和相关软件产品的开发中。成像光谱技术极大地推动了高光谱遥感技术的发展,高光谱遥感技术的应用也向纵深方向发展,其应用所覆盖的领域和研究的深度都有了突破性的飞跃。尽管成像光谱仪具有其独特的优越性,但海量数据也为应用和分析带来不便。目前,国内外关于成像光谱仪的遥感应用研究中,所采用的分析方法可归纳为两大类。

(一)基于纯像元的分析方法

基于纯像元的分析方法可分为如下三种方式。

(1)从地物光谱特征上发现表征地物的特征光谱区间和参数。这种方法最常用的是各种各样的植被指数,如归一化植被指数、增强植被指数等。高光谱遥感图像出现后,多光谱影像中植被指数的定义被拓展,研究人员通过选取影像的不同波段组合,发展了许多更为精细的窄波段植被指数。

(2)地物光谱重建和重建的光谱与数据库光谱的匹配识别。这一方法通过对比分析地面实测的地物光谱曲线和由成像光谱仪图像得到的光谱曲线来区分地物。但由于野外实际情况的复杂性,很难建立一个比较通用的地物光谱库,这就限制了其应用。这种方法目前仅在比较小的领域内(如岩石成分分析等)取得成功的运用。

(3)视高光谱图像中每一波段的图像为随机变量,利用概率统计理论进行多维随机向量的分类。成像光谱仪图像波段多,分类很大程度上受限于数据的维数。面对数百个波段的数据,为了提高处理效率,在图像分类之前必须压缩波段,同时又要尽可能地保留信息,即进行“降维”的研究。目前,压缩波段有两种途径:一是从众多的波段中挑选感兴趣的若干波段;二是利用所有波段,通过数学变换来压缩波段,最常用的有主成分分析法等。

(二)基于混合像元的分析方法

由于传感器空间分辨率的限制及地物的复杂多样性,一个像元通常由几种地物混合组成。通过对混合像元进行解译,能够更加真实地反应地物覆盖状况。

根据对混合像元的反射率和端元(endmember)的光谱特征和丰度之间的响应关系的假设,以及怎样考虑和包含其他地面特性和影像特征的影响,Ichoku 等(1996)将像元混合模型归结为五种类型,即线性(linear)模型、概率(probabilistic)模型、几何光学(geometric-optical)模型、随机几何(stochastic geometric)模型和模糊分析(fuzzy)模型,其中后面四种属于非线性模型。

在传统混合分解模型的基础上,近年来,国内外学者还提出了不同的混合分解模型。针对传统混合分解模型中存在的“分解端元保持不变”的问题,提出了端元可变的混合像元分解模型,如基于端元可变的模糊神经网络分解(吴柯,2008)等。而为了提高分解精度,克服线性模型通用性差的特点,发展了基于核空间的非线性混合像元分解模型(吴波,2006)等。

线性混合光谱模型是一种较简单而且较合理的模型,因此大多学者在它的基础上对混合像元分解算法进行研究。根据现有算法将这一模型分成三种不同的解译:一为物理学模型解译;二为凸面几何解译;三为基于数学模型解译。在物理解译中,根据对条件满足的不同情况,可以把分解算法分为无限制线性分解、半限制线性分解和全限制线性分解(Heinz et al, 2001)。在凸面几何解译中,根据线性混合模型,混合光谱可以看做各个端元的线性凸组合,高光谱影像数据在其对应的波段数 L 维空间中组成一个凸面单形体,且单形体的顶点即为端元所在。因此在 L 维空间中,越靠近单形体顶点位置的像元光谱,像元纯度就越大。根据凸面几何解译混合光谱的思想,Boardman 等(1995)提出了纯净像元指数(PPI)算法,而 Craig(1994)则提出了最小体积变换(minimum volume transform, MVT)算法。由于最小体积算法通过缩小单形体来寻找外接单形体,所以得到的端元不一定是影像中的端元光谱,因此很多算法通过从数据中外扩单形体以寻找最大内接单形体的方法来获得端元,典型的算法有 N-FINDR (Winter, 1999)、单形体增长算法(simplex growing algorithm, SGA)(Chang et al, 2006)及顶点成分分析(vertex component analysis, VCA)等。在数学模型解译当中,由于线性混合模型与独立成分分析(independent component analysis, ICA)(Nascimento et al, 2004)和非负矩阵分解(nonnegative matrix factorization, NMF)(Lee et al, 2001)模型类似,所以可以通过对高光谱数据进行 ICA 或 NMF 获得端元光谱与端元组分。由于 ICA 和 NMF 不能完全满足线性混合模型,因此直接利用其进行混合像元分解不能得较好的结果。目前已有一些相关研究对其进行改进。例如,提出的约束条件 ICA,即对 ICA 加一些先验信息能取得更好的分离效果(Huang et al, 2007; Sun et al, 2010);对 NMF 加入一些限制条件,如最小单形体体积限制(Miao et al, 2007b)或端元平滑限制(Paura et al, 2006)等。另外,目前也很多文献对凸包分析进行了研究,提出了计算的整体框架(Chan et al, 2008)或加一些限制条件(Chan et al, 2009)都已取得了比较好的效果。

为了更进一步定量地研究混合像元的问题,需要确定混合像元分解后的端元组分在空间上的分布方式,最直观的方法就是利用亚像元定位技术。亚像元定位技术是将混合像元细分为许多更小单元的亚像元,在满足不同端元组分所占亚像元的比例与该端元组分丰度相等的条件下,尽可能地弥补空间细节信息,提高遥感影像的分类精度(吴柯,2008)。遥感影像的亚像元定位技术的研究已经建立了多种模型,如遗传算法(genetic algorithm, GA)(Mertens et al, 2003a; Mertens et al, 2003b)、马尔可夫随机场模型(Tso et al, 1999; Kasetkasem et al, 2005)、元胞自动机模型(凌峰等, 2005)、基于 BP 神经网络的亚像元定位模型(吴柯, 2008)等,但是这些模型的适用性还需要进一步的挖掘、发展和验证。

总之,与高光谱遥感的硬件发展相比,高光谱数据的处理技术显得相对滞后。但由于高光谱数据的巨大优势,世界各国都将继续加强相关研究。在美国, NASA 已把机载 AVIRIS 作为星载的雏形进行研究,并对高光谱图像所特有的一些难题,如高数据维的减小、算法复杂性等,进行重点攻关,并已研究出智能化比较高的实用高光谱图像处理系统,如成像光谱集成软件包 ISIS, 为卫星和航空高光谱遥感数据处理分析而设计的 ENVI 影像处理系统,著名的

ERDAS 影像处理系统等。20 世纪 80 年代中后期,我国开始着手发展高光谱图像处理系统,并积极开展国际合作,承担了一系列成像光谱技术研究,推动了高光谱遥感在国内的发展。但总体来看,国内高光谱图像的应用研究还处于起步阶段,主要集中于成像光谱仪的定标及一些辐射校正研究,目前还没有比较成形的高光谱图像处理系统。

二、高光谱遥感的应用

由于高光谱图像具有很高的光谱分辨率,因而能够提供更为丰富的地物细节,有利于地物的物理化学特性反演。高光谱遥感已经在各方面显示出了巨大的应用潜力,正受到国内外专家学者的广泛关注,今后必将在以下诸多领域发挥越来越重要的作用。

(一)海洋遥感

由于中分辨率成像光谱仪具有光谱覆盖范围广、分辨率高和波段多等许多优点,因此已成为海洋水色、水温的有效探测工具。它不仅可用于海水中叶绿素浓度、悬浮泥沙含量、某些污染物和表层水温的探测,也可用于海冰、海岸带等的探测。

由于海洋光谱特性是海洋遥感的一项重要研究内容,各国在发射海洋遥感卫星前后都开展了海洋波谱特性研究,包括大量的海洋光谱特性测量研究。早期的海洋遥感应用,所使用的传感器波段少,已满足不了现代定量遥感应用研究的需要。随着中分辨率成像光谱仪的应用,不仅促进了高维数据分析方法的研究,也将促进海洋高光谱特性研究的发展。它可以使人们更准确地了解海洋光谱结构,识别海水中不同物质成分的光谱特征,掌握近岸水域光学参数的分布、变化规律,为海洋遥感应用和海洋光学遥感器的评价提供可靠的依据。

(二)植被研究

植被中的非光合作用组分用传统宽带光谱无法测量,而用高光谱对植被组分中的非光合作用组分进行测量和分离则较易实现。因此,可以通过高光谱遥感定量分析植被的化学成分,监测由于大气和环境变化引起的植物功能的变化。植被应用方面还有许多成功的实例,如作物类型识别(Collins, 1978)、森林树种识别(宫鹏等, 1998)、植被荒漠化研究(叶荣华等, 2001)等。

(三)精细农业

土壤的水分含量、有机质含量、土壤粗糙度等特性是精细农业中重要的信息,而传统遥感技术无法提供这些信息。高光谱遥感凭借其极高的光谱分辨率为精细农业的发展提供了技术保障和数据来源。高光谱遥感应用于精细农业已经有许多成功的例子,如刘卫东(2002)利用高光谱提取了土壤信息。利用高光谱遥感技术,可以快速精确地获取作物生长状态及环境胁迫下的各种信息,从而相应调整投入物资的施入量,达到减少浪费、增加产量、保护农业资源和环境质量的目。高光谱遥感是未来精准农业和农业可持续发展的重要手段。

(四)地质调查

地质是高光谱遥感应用中最成功的一个领域。例如,利用航空高光谱数据进行地质填图和岩石鉴别,可以识别出地表不同矿物质的诊断性特性。因为一般矿物质的光谱吸收峰宽度为 30 nm 左右,只有利用光谱分辨率小于 30 nm 的传感器才能够识别出来。高光谱遥感已经在地质领域扮演着重要角色。王青华等人仔细分析了国产光谱仪 MAIS 对河北省张家口地区的高光谱遥感数据,指出可以借助高光谱丰富的光谱信息,依据实测的岩石矿物波谱特征,对不同岩石类型进行直接识别,达到直接提取岩性的目的。

(五)大气与环境遥感

大气中的分子和粒子成分在太阳反射光谱中有强烈反应,这些成分包括水汽、二氧化碳、氧气、臭氧、云和气溶胶等。常规宽波段遥感方法无法识别出由于大气成分的变化而引起的光谱差异,高光谱由于波段很窄,能够识别出光谱曲线的细微差异。

(六)城市下垫面特征与环境研究

由于人类活动,城市下垫面特征与环境显得异常复杂,同物异谱、同谱异物及混合像元现象也非常严重;而高光谱遥感的发展使得人们有能力对城市地物的光谱特性进行深入研究,可以通过对高光谱数据进行处理,得到城市地物的光谱成分,为城市环境遥感分析及制图提供基础(束炯 等,2006)。

(七)军事侦察与识别伪装

根据目标光谱与伪装材料光谱特性的不同,利用高光谱技术可以从伪装的物体中自动发现目标。在调查武器生产方面,超光谱成像光谱仪不但可探测目标的光谱特性、存在状况,甚至可分析其物质成分。根据工厂产生烟雾的光谱特性,直接识别其物质成分,从而可以判定工厂生产武器的种类,特别是攻击性武器。

其他方面诸如自然灾害监测、林业遥感、宇宙和天文学等领域,高光谱遥感都有着广阔的应用前景。随着科学技术的不断进步,高光谱遥感的应用领域将会进一步拓宽,在各个领域的影响也会进一步扩大。

第二章 地物光谱数据的获取与分析

地物光谱数据的获取主要有三种方式：一是通过星载传感器获取；二是通过机载传感器获取；三是地面获取。目前高光谱遥感数据的获取主要是利用机载成像光谱仪获得(星载成像光谱仪如 MODIS, 可以提供中等光谱分辨率的遥感数据)。遥感数据经过预处理后, 再结合研究目的, 对数据进行分析, 进行特征选择与提取。本章首先介绍遥感的电磁波理论基础, 然后介绍光谱数据获取使用的设备, 包括地面光谱测量仪、机载成像光谱仪及星载成像光谱仪。

§ 2-1 电磁波与电磁辐射

一、电磁波的基本原理

(一) 电磁波谱

根据麦克斯韦的电磁场理论, 变化的电场在其周围产生变化的磁场, 而变化的磁场又在其周围产生变化的电场。变化的电磁场在空间以一定的速度传播, 就形成了电磁波。电磁波的传播不依赖任何媒质, 可在真空中以光速传播(如图 2-1-1 所示)。

电磁波的范围很广, 但其本质上是相似的, 都遵循基本波动理论, 只是由于频率(波长)的不同而显示出不同的特性。电磁波包括无线电波、红外线、可见光、紫外线、X 射线、 γ 射线等。可见光只是电磁波谱中很小的一部分。如果按照电磁波在真空中传播的波长或频率递增或递减顺序排列, 就构成了电磁波谱。

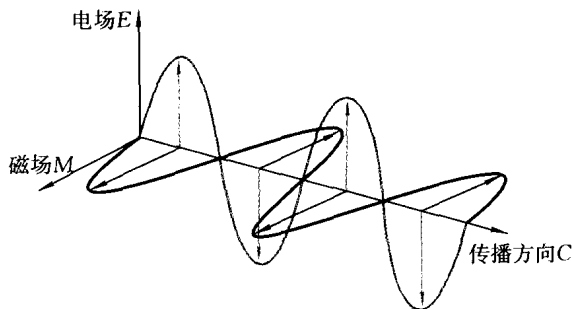


图 2-1-1 电磁波

电磁波谱区段的界限是渐变的, 即没有严格的界限划分。一般按产生电磁波的方法或测量电磁波的方法来划分(见表 2-1-1)。

电磁波在空间的传播也称为电磁辐射。电磁波在传播过程中遇到不同的介质会发生反射、折射、吸收、透射、散射等现象。具体情况与介质的特性有关。高光谱遥感使用的电磁波谱范围一般为 280~2 500 nm。

表 2-1-1 电磁波谱

波 段	波 长
长 波	>3 000 m
中波和短波	10~3 000 m
超 短 波	1~10 m
微 波	0. 001~1 m

续表

波 段		波 长	
红外波段	超远红外	0.76~1 000 μm	15~1 000 μm
	远 红 外		6~15 μm
	中 红 外		3~6 μm
	近 红 外		0.76~3 μm
可见光	红	0.38~0.76 μm	0.62~0.76 μm
	橙		0.59~0.62 μm
	黄		0.56~0.59 μm
	绿		0.50~0.56 μm
	青		0.47~0.50 μm
	蓝		0.43~0.47 μm
	紫	0.38~0.43 μm	
紫外线		0.001~0.38 μm	
X射线		$1 \times 10^{-6} \sim 1 \times 10^{-3} \mu\text{m}$	
γ 射线		$< 1 \times 10^{-6} \mu\text{m}$	

(二)电磁波的干涉

干涉是波动的一个重要特性,它是指当几列同振动方向、同频率、相位差恒定的波在空间相遇时,就会出现有些地方的振动始终加强、有些地方的振动始终减弱的现象。光是一种电磁波,当几列满足干涉条件的光在空间相遇时,也会产生干涉现象。

1. 光的叠加

光波的叠加也遵从波的叠加原理,当两列光波在空间某一点相遇时,该点的光矢量就是各光波单独在该点的光矢量的矢量和。

设真空中两独立的单色点光源的发光频率和振动方向相同, t 时刻在 P 点引起的光振动分别为

$$\left. \begin{aligned} E_1 &= E_{10} \left(\omega t + \alpha_1 - \frac{2\pi}{\lambda} r_1 \right) = E_{10} \cos(\omega t + \varphi_1) \\ E_2 &= E_{20} \left(\omega t + \alpha_2 - \frac{2\pi}{\lambda} r_2 \right) = E_{20} \cos(\omega t + \varphi_2) \end{aligned} \right\} \quad (2-1-1)$$

式中, λ 为波长; ω 为角频率; t 为时间; E_1 、 E_2 为两光波在 P 点引起的光振动的分振幅, E_{10} 、 E_{20} 为其初始值; α_1 、 α_2 为两光源的初相位; r_1 、 r_2 为两光波导电的波程; φ_1 、 φ_2 则是两光波在点引起的光振动的初相位。则 P 点光振动的振幅为

$$E = \sqrt{E_{10}^2 + E_{20}^2 + 2E_{10}E_{20}\cos(\varphi_1 - \varphi_2)} \quad (2-1-2)$$

如果观察或记录时是用眼睛看或照相等方法,需要较长时间 τ 才能测出强度,则测得的强度是光强在 τ 时间内的平均值,可表示为

$$I = \frac{1}{\tau} \int_0^\tau (E_{10}^2 + E_{20}^2 + 2E_{10}E_{20}\cos\varphi) dt = I_1 + I_2 + 2\sqrt{I_1 I_2} \frac{1}{\tau} \int_0^\tau \cos\varphi dt \quad (2-1-3)$$

式中, $I_1 = E_{10}^2$ 、 $I_2 = E_{20}^2$,是两光源在 P 点的分光强,它们不随时间变化。

在光源和 P 点位置确定之后, φ 由 α_1 、 α_2 决定,若光源是两个相干光源,则 φ 就是与时间无关的量,式(2-1-3)可写成

$$I = I_1 + I_2 + 2\sqrt{I_1 I_2} \cos\varphi \quad (2-1-4)$$