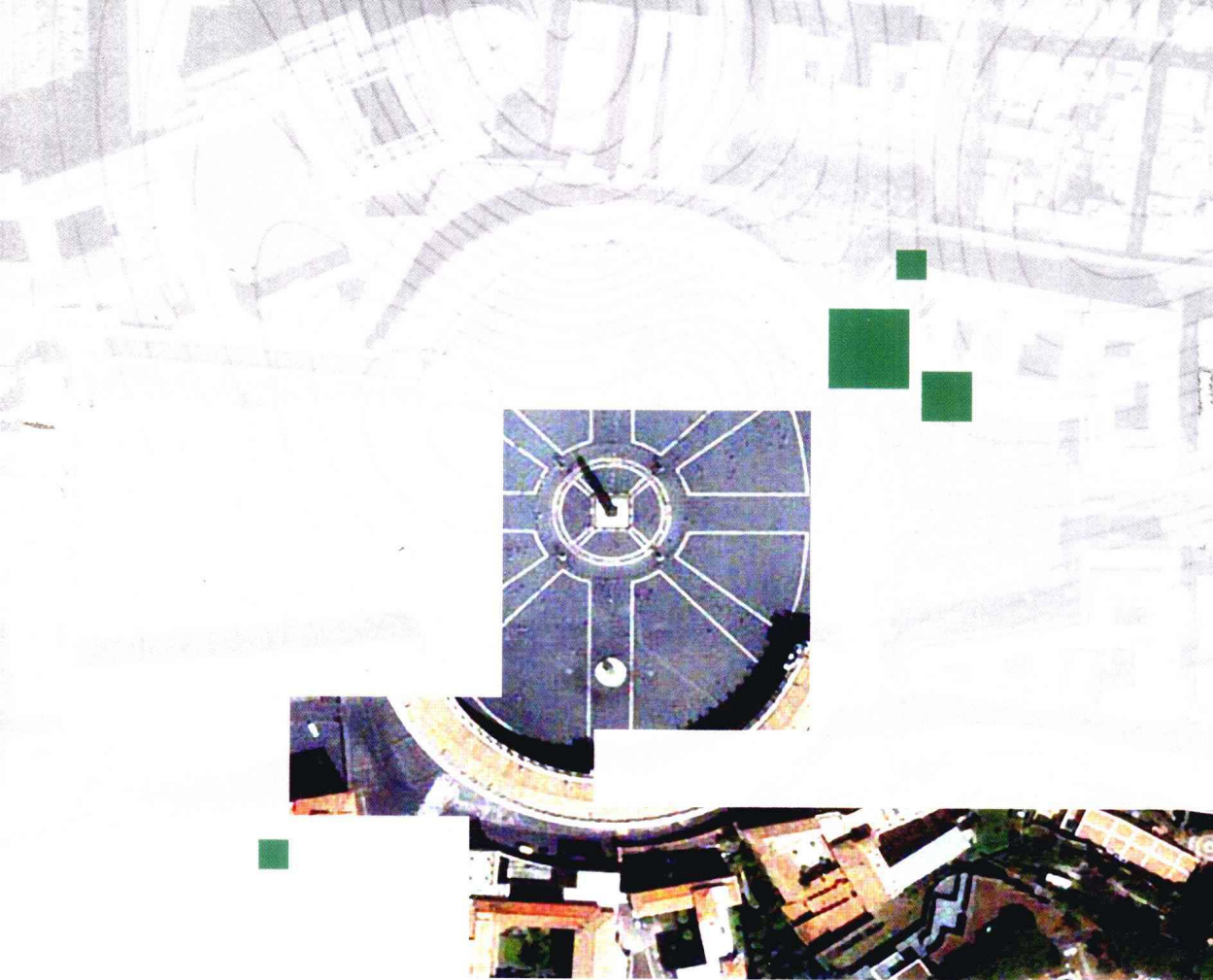




高分辨率 遥感图像理解

HIGH RESOLUTION REMOTE SENSING
IMAGE UNDERSTANDING

孙 显 付 琨 王宏琦 著



科学出版社

高分辨率遥感图像理解

孙 显 付 琨 王宏琦 著

科学出版社

北 京

内 容 简 介

高分辨率遥感图像理解是近年来遥感应用领域的研究热点。本书系统阐述了高分辨率遥感图像理解的基本概念、模型方法和应用技术。首先结合高分辨率遥感图像的特点及其应用背景,叙述高分辨率遥感图像理解的研究框架;其次分别介绍特征信息表达和统计学习模型,以此作为整个遥感图像理解任务的方法基础,并以高分辨率遥感图像理解的研究内容为导向,重点论述精细化目标检测与识别、复杂场景描述与分类、空间语义分析与计算三大任务中采用的技术流程和关键算法;最后结合实际需求,给出高分辨率遥感图像理解的若干应用实例。

本书可供从事遥感测绘、图像处理、模式识别等领域的研究和技术人员参考使用,也可作为高等院校相关专业的教学和研究资料。

图书在版编目(CIP)数据

高分辨率遥感图像理解/孙显,付琨,王宏琦著. —北京:科学出版社, 2011. 11

ISBN 978-7-03-032768-0

I. ①高… II. ①孙… ②付… ③王… III. ①高分辨率-遥感图像-图象分析 IV. ①TP751

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2011) 第 231692 号

责任编辑: 韩 鹏 马云川 李 静 / 责任校对: 包志虹

责任印制: 钱玉芬 / 封面设计: 耕者设计工作室

科学出版社 出版

北京东黄城根北街 16 号

邮政编码: 100717

<http://www.sciencep.com>

骏主印刷厂印刷

科学出版社发行 各地新华书店经销

*

2011 年 11 月第 一 版 开本: B5 (720 × 1000)

2011 年 11 月第一次印刷 印张: 23

字数: 455 000

定价: 69.00 元

(如有印装质量问题, 我社负责调换)

前 言

20 世纪 60 年代以来, 遥感观测技术得到迅速发展, 遥感观测系统运行逐步成熟, 人类初步实现了综合性、全方位的对地观测和监测, 并且随着科技的进步, 这种观测能力还在不断提高与改进。高空间分辨率是遥感观测技术发展的总体趋势, 特别是近年来, 高空间分辨率遥感的优势更加明显, 目前已经广泛应用于测绘制图、交通建设、资源环境、农业林业、军事解译、灾害监测等各个领域, 成为经济建设、国家安全和大众信息服务等方面不可或缺的重要手段。在本书中, 为了便于描述, 将高空间分辨率遥感简称为“高分辨率遥感”。

高分辨率遥感以一种非常精细的方式来观测地面, 所获取的高分辨率图像能够表达更多地物目标的纹理尺寸、几何结构和空间布局等特征信息, 为解译分析提供良好的条件和基础。然而, 随着遥感图像应用范围的变化, 以及高分辨率遥感图像中存在的信息来源多样、目标结构多变、复杂背景干扰等特殊特性, 使得传统的针对中低分辨率图像的处理方法已经很难满足高分辨率遥感应用的需求。

与传统的处理方法不同, 高分辨率遥感图像理解以图像为对象, 以知识为核心, 研究图像中包含的目标类别、场景归属以及目标之间的相互关系, 实现对图像的语义解释。它属于图像研究领域的较高层内容, 与机器视觉领域中的计算机视觉、人工智能和认知学等理论方法有着密切的联系。伴随着遥感技术的飞速进步, 机器视觉领域的理论和方法研究也在迅猛发展, 为遥感图像理解提供了良好的技术支撑。早期的遥感图像分辨率较低, 体现的主要是地物目标在大尺度下的特征信息, 这与自然场景中重点关注小尺度目标的布局结构存在较大差异, 导致机器视觉领域的方法很难直接应用于遥感地物目标的提取和分类中。随着成像分辨率的不断增高, 自然场景图像和遥感场景图像的尺度差异正在逐渐缩小, 这使得将机器视觉领域的理论方法引入高分辨率遥感图像理解中具备可行性。

本书结合高分辨率遥感图像的特性及其应用背景, 将传统判读方法与机器视觉领域的计算理论相结合, 叙述高分辨率遥感图像理解的基本概念及研究框架; 随后分别介绍特征信息表达和统计学习模型, 以此作为整个遥感图像理解任务的方法基础; 并以高分辨率遥感图像理解的研究内容为导向, 重点阐述精细化目标检测与识别、复杂场景描述与分类、空间语义分析与计算这三大任务中采用的技术流程和关键算法; 最后给出高分辨率遥感图像理解的若干典型应用实例。本书

是作者对近年来在高分辨率遥感图像理解方面研究成果的一个阶段性总结，同时也是对高分辨率遥感图像理解技术的一个初步诠释。

本书的主要内容如下：第1章概述遥感技术发展现状，分析了高分辨率遥感图像的特点和应用中遇到的挑战，阐述了高分辨率遥感图像理解的基本概念、研究内容和研究方法；第2章介绍图像的特征信息表达方法，包括图像存储的数据结构和语义知识的表示形式，以及常用的纹理、色彩、形状和感兴趣点等特征提取技术；第3章介绍图像的统计学习模型理论，主要有自下而上的判别式模型，包括 Boosting 集成学习、支持向量机、条件随机场等，以及自上而下的产生式模型，包括图模型、主题语义模型和标记点过程模型等；第4章介绍高分辨率遥感图像中的精细化目标检测与识别技术，从图像前背景分割、精细化目标检测、精细化目标识别等三个方面入手，以第2章和第3章的理论方法为基础，详细叙述了各个方法的基本原理和关键算法；第5章介绍高分辨率遥感图像中的复杂场景描述与分类技术，简要分析复杂图像场景的描述方式，重点叙述了基于低层特征和高层语义建模的遥感场景分类方法；第6章介绍高分辨率遥感图像中的空间语义分析和计算技术，分别阐述了目标之间的各种关联结构及对应的空间关系分析模型，探讨了图像语义的学习和推理过程，并给出了遥感图像空间语义构建和计算的解决方案；第7章结合实际需求，简要介绍了高分辨率遥感图像理解在城市建设和军事解译两大领域的若干典型应用实例。

本书的出版得到了国家自然科学基金（项目号：41001285）和国家重点基础研究发展计划（项目号：2010CB327906）的支持。参加本书撰写的人员还有刘嘉、张正、吴波等博士。孙皓、李宇、李湘眷、陈刚等博士/硕士也先后参与了部分研究工作，为本书作出了贡献。陈克明博士为本书的撰写提供了丰富的图片资料。在本书的撰写和研究过程中还得到了中国科学院电子学研究所的丁赤飏研究员、尤红建研究员、胡岩峰副研究员、张道兵博士等领导和同志的悉心指导和帮助，在此一并致谢。

限于作者的水平和时间的仓促，书中难免存在一些不妥之处，敬请广大同行读者批评指正。

作 者
2011 年 7 月

目 录

前言

第1章 绪论	1
1.1 遥感技术发展概况	2
1.1.1 遥感成像机理	2
1.1.2 遥感观测系统	3
1.1.3 遥感技术发展现状及趋势	4
1.2 高分辨率遥感图像的特点	9
1.3 高分辨率遥感应用的挑战	11
1.4 遥感图像理解的基本概念	14
1.4.1 图像理解	14
1.4.2 遥感图像理解的研究进展	15
1.4.3 高分辨率遥感图像理解	17
1.5 遥感图像理解的研究内容	19
1.5.1 地物目标检测与识别	20
1.5.2 图像场景描述与分类	22
1.5.3 目标空间语义分析与计算	23
1.6 遥感图像理解的研究方法	25
1.6.1 图像特征信息表达	25
1.6.2 统计学习模型方法	27
参考文献	29
第2章 特征信息表达	31
2.1 图像信息表达	31
2.1.1 图像数据结构	31
2.1.2 知识信息表示	34
2.1.3 多尺度空间	36
2.1.4 尺度计算与转换	39
2.2 图像特征提取	44
2.2.1 颜色特征提取	44
2.2.2 纹理特征提取	49
2.2.3 形状特征提取	56

2.2.4 感兴趣点特征提取	62
2.3 性能评判准则	74
2.3.1 特征有效性分析	75
2.3.2 分类性能评价	76
参考文献	78
第3章 统计学习模型	82
3.1 判别式模型	82
3.1.1 SVM 模型	83
3.1.2 Boosting 方法	89
3.1.3 CRF 模型	96
3.2 产生式模型	101
3.2.1 图模型相关理论	101
3.2.2 主题语义模型	106
3.2.3 标记点过程模型	114
3.3 产生式和判别式混合模型	122
3.3.1 混合法	122
3.3.2 混合学习	125
参考文献	127
第4章 精细化目标检测与识别	131
4.1 遥感图像前背景分割	131
4.1.1 基于图割模型的遥感图像交互式分割	132
4.1.2 基于高斯混合模型的遥感图像目标分割	141
4.2 精细化遥感目标检测	149
4.2.1 基于 Boosting 级联学习的遥感目标检测	150
4.2.2 基于随机几何模型的遥感目标检测	159
4.2.3 基于主题语义模型的遥感目标提取	169
4.3 精细化遥感目标识别	179
4.3.1 基于区域对象概率标记的遥感目标识别	179
4.3.2 基于形状统计模型的遥感目标识别	191
4.3.3 基于语义树匹配学习的遥感目标识别	201
参考文献	212
第5章 复杂场景描述与分类	217
5.1 复杂场景的分层描述	217
5.1.1 低层图像场景描述	219
5.1.2 中层图像场景描述	221
5.2 高分辨率遥感图像场景分类	229

5.2.1 基于自适应核函数组合的遥感图像场景分类	229
5.2.2 基于空间语义向量的遥感图像场景分类	240
参考文献	250
第6章 空间语义分析与计算	253
6.1 目标空间关系	253
6.1.1 空间对象	254
6.1.2 拓扑空间关系	257
6.1.3 与或图和解析图	262
6.1.4 目标关联和结构	263
6.2 图像语义计算	267
6.2.1 句法语言	267
6.2.2 词汇网络	270
6.2.3 统计句法模型	272
6.2.4 图像句法语义	275
6.2.5 图像语义学习与推理	281
6.3 高分辨率遥感图像的空间语义计算	286
6.3.1 基于空间一致的遥感图像语义计算	287
6.3.2 基于分等级对象语义图的遥感目标语义计算	297
参考文献	312
第7章 高分辨率遥感图像理解的应用实例	316
7.1 城市建设应用	316
7.1.1 建筑物目标自动提取	317
7.1.2 道路目标自动提取	322
7.1.3 城市场景综合解译	328
7.2 军事解译应用	335
7.2.1 港口目标自动检测	336
7.2.2 机场目标自动检测	340
7.2.3 舰船目标自动检测识别	345
7.2.4 飞机目标自动检测识别	352
参考文献	358

第1章 绪 论

遥感，顾名思义，即遥远的感知，它是一种远离目标，通过某种遥感装置，主要利用目标反射或者辐射的电磁波，在非直接接触研究对象的情况下进行测量、分析并判定目标性质的一门科学和技术（Mather, 1999）。

20 世纪 60 年代以来，随着计算机科学和空间科学的进步，传感器技术、航空航天平台技术、数据通信技术得到飞跃的发展，因此遥感技术同时也得到了迅速的发展。作为大范围综合性的对地观测手段，遥感技术体现出多平台、多传感器和多角度的发展趋势，所获得的遥感图像也呈现出高空间分辨率、高光谱分辨率和高时间分辨率的特点（李德仁等，1995；2002）。本书所叙述的高分辨率遥感图像主要是指高空间分辨率（high spatial resolution）的遥感图像，其度量方法是单位像素（pixel）所对应的地面面积大小，单位为米（m）或者公里（km）。

与传统的中低分辨率遥感图像相比，高分辨率遥感图像可以清楚地表达地物目标的特征分布和空间关联，可分辨出地物目标内部更为详细的结构组成，为解译分析提供良好的条件和基础。目前，高分辨率遥感图像已经广泛应用于交通、环境、农林、环境监测、灾害评估和预测等各个方面，并且在城市建设、军事解译等新领域也体现出重要的应用价值（徐青，2007）。

然而，随着遥感图像应用范围的变化，以及高分辨率遥感图像中存在的信息来源多样、目标结构多变、复杂背景干扰等特殊特性，传统的针对中低分辨率图像的处理方法已经很难满足高分辨率遥感应用的需求。因此，迫切需要在充分认识高分辨率遥感图像数据特点的基础上，研究有针对性的数据处理和分析方法，提高遥感图像解译系统的自动化程度。这不但可以将人从枯燥繁杂的图像判读工作中解放出来，而且能够提高遥感图像信息处理的时效性和准确性，在一定程度上突破图像数据向有价值信息转化的瓶颈。

本质上，遥感图像理解作为一门基础应用学科，与机器视觉领域中的计算机视觉、人工智能和认知学等方法 and 理论有着密切的联系。近年来，机器视觉领域的理论研究得到了迅猛的发展，许多生产技术和成果已经投入使用。而随着成像分辨率的增高，自然场景图像和遥感场景图像间原本存在的尺度差异正在逐渐缩小，这为将机器视觉方法引入到高分辨率遥感图像理解中提供了良好的可行性。本书所论述的遥感图像理解理论和方法建立在各种遥感判读处理技术之上，同时

结合了人工智能中的模式识别和机器学习方法,在认知学中人类视觉和心理学研究的指引下,通过借鉴计算机视觉分析目标场景的机制,将中低层的数据处理分析与高层的知识表达推理有效结合,重点关注并解决高分辨率遥感图像场景中的精细化目标检测与识别、复杂场景描述与分类,以及空间语义分析与计算等问题。

1.1 遥感技术发展概况

遥感技术能够迅速、及时地提供大量多时相、多波段的地物观测数据和信息。随着第一颗人造地球卫星的成功发射,遥感技术进入了一个新的发展时期,部分遥感图像的空间分辨率已经达到米级,甚至厘米级,信息源相当广泛,信息量非常丰富(彭望碌等,2002)。遥感对地观测技术在随后的时间里也正式地发展为一门新兴的综合性技术学科,它集合了航天、电子、光学、计算机、生物、地质等多学科的最新成果,成长为高新科技领域的一个重要组成部分。目前,遥感技术的发展与应用存在两个趋势:一是遥感数据探测范围的扩大;二是遥感数据空间分辨率的提高和不同空间分辨率遥感数据的丰富。高分辨率遥感图像除了包含普通遥感图像的光谱信息之外,还包含着大量地物目标的形状结构、纹理信息、上下文信息等,具有广阔的应用前景。

本节中首先概述遥感成像机理和遥感观测系统的基本知识和应用现状,在此基础上介绍遥感技术的发展状况和发展趋势。

1.1.1 遥感成像机理

电磁波是生成遥感图像的基础,遥感装置通过探测或者感测电磁波谱不同波段的发射、反射辐射能级而成像。遥感采用电磁波可以从紫外波段延伸到微波波段(邵振峰,2009)。

电磁波是在真空或介质中通过电磁场的振动而传输电磁能量的波,包括光波、热辐射波、微波、无线电波等。它是空间传播的交变电磁场,属于能量的一种动态形式。从客观上讲,凡是温度高于绝对零度(-273°C)的物体都会发射电磁波。各种类型的电磁波由于波长范围不同,性质也有很大的差别,因此常将电磁波谱划分成若干波段。按照在真空中的波长或者频率依顺序可以将电磁波划分成不同的波段,排列成谱即为电磁波谱,如图1.1所示;按照波长顺序可以分为 γ 射线、X射线、紫外线、可见光、红外线和无线电波等。

自然界中任何地物都具有其自身的电磁辐射规律,如具有反射,吸收外来的

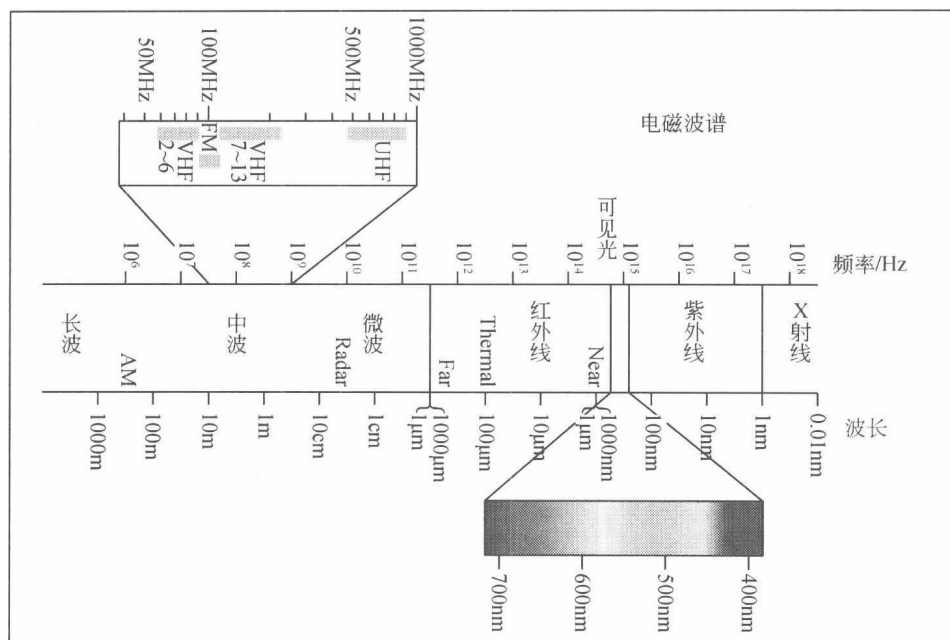


图 1.1 电磁波谱图

紫外线、可见光、红外线和微波的某些波段的特性，它们又都具有发射某些红外线、微波的特性；少数地物还具有透射电磁波的特性，这种特性称为地物的光谱特性。不同的地物目标具有不同的光谱特性曲线。

当电磁辐射能量入射到地物表面上，将会出现三种过程：一部分入射能量被地物反射；一部分入射能量被地物吸收，成为地物本身内能或部分再发射出来；一部分入射能量被地物透射。因此，地物的光谱特征主要包括三类：反射特征、发射特征和透射特征。在遥感技术中，可以根据它们的特性，选择适当的传感器来探测水下、冰下某些地物的信息。

1.1.2 遥感观测系统

遥感观测系统由传感器和平台组成，用于收集、量测和记录地物辐射电磁波特性，获取遥感图像数据（王明远，2002）。

遥感技术中电磁能量的测量是通过装置于静止或运动遥感平台上的传感器实现的。为了适应不同的应用，目前已经开发出不同类型的传感器，可用于遥感的传感器包括被动传感器和主动传感器两类。被动传感器依赖来自外界的能量来

源,通常是太阳,有时是地球本身。较为常见的被动传感器有航空相机、摄像机、多光谱扫描仪等。其中,数码相机系统、透镜和胶片是航空或航天摄影测量的主要组成部分。低轨道卫星和美国国家航空航天局(National Aeronautics and Space Administration, NASA)执行的空间航天任务也使用此类相机技术。航空像片严格而规则的几何性质和获得立体图像的可能性确保了摄影测量过程的发展,从而能够获得精确的三维坐标。目前,航空像片主要用于中、大比例尺绘图和地籍制图。主动传感器一般有自己的能量来源,由于不依赖于不同的照明条件,因而其测量受到更多的控制。较为常见的主动传感器有激光扫描仪、成像雷达、雷达高度计等。

遥感平台是一种运载工具,装载有某种特定的传感器。目前,技术较为成熟且能够服务于综合应用的主要有航空遥感平台和航天遥感平台。航空遥感平台的实现需要不同类型飞机的支持。飞机的高度和飞行姿态会对比例尺和获取的图像产生影响。在航空摄影测量中,图像主要记录在硬拷贝材质或数码相机中。对于数字传感器,获取的数据可以存储在磁带上和其他的海量存储设备里,或者直接传输到接收站。航天遥感平台主要是指人造卫星、航天飞机和空间站。传感器的监测需要知道卫星的轨道参数、轨道倾角、轨道周期、重复周期等指标。卫星传感器需要将遥感图像数据发送到地面进行分析和处理。获得的高分辨率全色图像和成像光谱仪数据将能对城市空间数据的快速更新提供服务。特别是多波段和多极化方式的雷达数据,将能解决阴雨多雾情况下的全天候和全天时对地观测。

1.1.3 遥感技术发展现状及趋势

遥感技术是20世纪60年代兴起,在摄影测量学的基础上,并在航空航天技术、计算机技术、传感器技术等当代科技的推动下而迅速发展起来的一门综合性空间探测技术。遥感技术的发展总体上可以分为以下四个阶段(柳稼航,2003)。

无记录的地面遥感阶段(1608~1838年):1608~1609年,科学望远镜的出现,开了远距离观测目标的先河。

有记录的地面遥感阶段(1838~1857年):对探测目标的记录和成像始于摄影技术的发明,并与望远镜相结合发展成为远距离摄影。1839年Daguarre和Nieoce成功拍摄到的世界上第一张像片,以及1849年法国人Laussedat制订的摄影测量计划,成为了有目的、有记录的地面遥感发展阶段的标志。

空中摄影测量阶段(1858~1956年):研究人员于1858年和1860年分别从气球上拍摄得到的法国巴黎市的鸟瞰像片和美国波士顿市的像片,以及1903年利用飞鸽携带微型相机的空间摄影实验,为后来的实用化航空摄影遥感打下了基

础。航空遥感真正实用化是从1903年飞机出现后开始的。1913年维也纳国际摄影测量学会议的召开,促进了航空遥感技术在地学和军事方面的应用,并成为第一、第二次世界大战中军事侦察的重要手段。第二次世界大战以后,各国研究人员对航空遥感的方法和理论做了总结,为遥感在理论上和应用上发展成为独立的科学奠定了良好的基础。

航天遥感阶段(1957年至今):1957年人类第一颗人造地球卫星的成功发射,标志着人类空间对地观测进入了一个新的发展时期。此时,航空遥感已经完成进入到实用化和业务化的阶段,并且还在不断发展之中。1960年,美国成功发射了TIROS-1和NOAA-1卫星,标志着人类从航天器上对地进行长期观测的开始。基于军事方面的考虑,各主要航天大国相继研制出各种以对地观测为目的的遥感卫星,并逐步向商用化转移。随着计算机技术、光电技术和航天技术的不断发展,卫星遥感技术逐步进入一个能快速、及时提供多种对地观测海量数据的新阶段以及应用研究的新领域。以下简单列举了该阶段国内外主要的遥感卫星。

1. 美国资源卫星

美国于1961年发射了第一颗试验型极轨气象卫星,到70年代,在气象卫星的基础上研制发射了第一代试验型地球资源卫星(陆地-1、2、3)。这三颗卫星上装有返束光导摄像机和多光谱扫描仪(MSS),分别有3个和4个谱段,分辨率为80m。各国从卫星上接收了约45万幅遥感图像。

20世纪80年代,美国分别发射了第二代试验型地球资源卫星(陆地-4、5)。卫星技术有了较大改进,平台采用新设计的多任务模块,增加了新型的专题绘图仪(TM),可通过中继卫星传送数据。TM的波谱范围比MSS大,每个波段范围较窄,因而波谱分辨率比MSS图像高,其地面分辨率为30m(TM6的地面分辨率只有120m)。陆地-5卫星是1984年发射的,目前仍在运行。

20世纪90年代,美国又分别发射了第三代资源卫星(陆地-6、7)。陆地-6卫星是1993年发射的,因未能进入轨道而失败。由于政府资金的支持,1999年发射了陆地-7卫星,以保持地球图像和全球变化的长期连续监测。陆地-7卫星装备了一台增强型专题绘图仪ETM+,该设备增加了一个15m分辨率的全色波段,热红外信道的空间分辨率也提高了一倍,达到60m。美国资源卫星每一景图像对应的实际地面面积均为 $185\text{km} \times 185\text{km}$,16天即可覆盖全球一次。

2. 法国遥感卫星

1986年以来,法国先后发射了SPOT-1、2、3、4对地观测卫星。SPOT-1、2、3采用832km高度的太阳同步轨道,轨道重复周期为26天。卫星上装有两台

高分辨率可见光相机,可获取 10m 分辨率的全遥感图像以及 20m 分辨率的三波段遥感图像。这些相机有侧视观测能力,可横向摆动 27° ,卫星还能进行立体观测。SPOT-4 卫星传感器增加了新的中红外波段,可用于估测植物水分,增强对植物的分类识别能力,并有助于冰雪探测。该卫星还装载了一个植被仪,可连续监测植被情况。

3. 加拿大雷达卫星-1

加拿大雷达卫星-1 于 1995 年发射,它标志着卫星微波遥感技术的重大进展。雷达卫星-1 除了有一个地面卫星数据接收站外,卫星上还载有磁带记录器,可覆盖全球。该星为地面分辨率、成像行宽和波束入射角提供了更宽的选择范围。除在陆地及海洋应用外,其重要任务一是对南极大陆提供第一个完全的高分辨率卫星覆盖;二是对全球产生多次卫星覆盖。

4. “奋进”号航天飞机

NASA 的“奋进”号航天飞机于 1992 年 5 月首次发射成功。该飞机上装有一个 X 波段合成孔径雷达和一个 C 波段梭动成像雷达。其中一个雷达上装有一根碳纤维复合材料制成的 60m 长的波段天线,天线伸向机身外,与另一雷达构成一个视角。两个雷达从不同位置聚焦到地面,即航天飞机雷达地形测绘可获取地球的立体图像。

5. IKONOS 遥感卫星

IKONOS 卫星是美国空间成像(space image)公司于 1999 年 9 月发射的高分辨率商用卫星,卫星飞行高度 680km,每天绕地球 14 圈,卫星上装有柯达公司制造的数字相机。相机的扫描宽度为 11km,可采集 1m 分辨率的黑白图像和 4m 分辨率的多波段(红、绿、蓝、近红外)图像。由于其分辨率高、覆盖周期短,故在军事和民用方面均有重要的用途。

6. 中国遥感卫星

中国和巴西联合研制的中巴地球资源卫星即资源一号卫星,于 1999 年 10 月 14 日发射成功。经过在轨测试后转入应用运行阶段。由北京、广州和乌鲁木齐三个地面接收站接收该卫星获取的我国境内遥感数据。所接收图像的地面分辨率分别有 19.5m、78m 和 256m 三种。资源二号卫星现已在轨运行,为我国遥感事业的发展以及在国民生活中的应用提供了地面分辨率更高的卫星图像。

进入 21 世纪,随着航天技术的持续发展和遥感观测系统性能的不断改进,

遥感技术的发展出现了新的高潮,世界各国竞相研究、开发和发射高分辨率遥感卫星。目前,在轨运行的各种民用高分辨率遥感卫星就有十多颗。其中,法国 SPOT-5 的可见光传感器地面分辨率从之前系列的 10m 提高到了 2.5m;俄罗斯的侦察卫星 SIS 和俄罗斯国家资源机关属下由军方开发的 Resource 系列卫星所用的 KVR-1000、DK-5 和 KFA-3000 型的分辨率均达到了 2~3m;美国数字地球公司继“QuickBird”系列卫星的成功运作后,分别于 2006 年、2008 年发射了具备优秀机动性和几何定位精度、分辨率优于 0.5m 的商业遥感卫星 WoldView-1 和 WorldView-2 (周成虎等, 2009)。南非、西班牙、韩国、日本、中国台湾等国家和地区也都已经或计划发射各自的高分辨率小卫星。

此外,不仅高分辨率光学卫星发展迅速,高分辨率的合成孔径雷达卫星也得到了不断发展。例如,加拿大的 Radarsat 系列雷达卫星在精细模式下已经能达到 3m 的分辨能力。而德国发射的 Terra-SAR 雷达卫星,其点模式地面分辨率达到 1~3m,幅宽为 10km;而条带模式地面分辨率为 3~15m,幅宽为 40~60km;宽扫描式地面分辨率为 15~30m,幅宽为 100~200km。

表 1.1 对现有的一些具有代表性的高分辨率遥感卫星系统进行了总结。遥感技术的不断进步,遥感观测系统运行的逐步成熟,为遥感手段的大范围商业化应用创造了有利条件。同时,经济的飞速发展也使得遥感资料的应用范围逐渐扩大,除了传统的测绘、土地、农业等部门外,通信、交通、生态等领域的需求也不断增加或出现,拓宽了遥感数据的应用领域(孙家柄, 2003)。

表 1.1 典型的高分辨率遥感卫星一览表

卫星名称	国家	发射时间/年	载荷类型	空间分辨率/m	其他特点
IKONOS-2	美国	1999	光学	全色 1, 多光谱 4	全色波谱范围为 400 ~ 900nm, 包括蓝、绿、红、近红外四个波段
EROS-A1	以色列	2000	光学	1.8	全色波谱范围为 500 ~ 900nm
OrbView-4	美国	2001	光学	全色 1, 多光谱 4	全色波谱范围为 450 ~ 900nm, 包括蓝、绿、红、近红外四个波段
QuickBird-2	美国	2001	光学	全色 0.62, 多光谱 2.44	全色波谱范围为 450 ~ 900nm, 包括蓝、绿、红、近红外四个波段
SPOT-5	法国	2002	光学	全色 2.5, 多光谱 10, 短波红外 20	全色波谱范围为 450 ~ 900nm, 多光谱波谱范围为 500 ~ 890nm, 短波红外波谱范围为 1580 ~ 1750nm

续表

卫星名称	国家	发射时间/年	载荷类型	空间分辨率/m	其他特点
Resource-DK	俄罗斯	2005	光学	全色 1, 多光谱 2 ~ 3	星上记录能力 140G
WorldView-2	美国	2008	光学	0.5	机动性强, 几何定位精度高
Radarsat-2	加拿大	2007	雷达	3	多视角、C-全极化
Terra-SAR	德国	2007	雷达	1	干涉、X-全极化
Pleiades	法国	2009	光学	0.7	机动性强
COSMO-SkyMed	意大利	2007	雷达	1	干涉、X-全极化

综合现阶段遥感技术研究的最新进展, 其主要发展趋势体现在以下几个方面(李德仁, 2002)。

(1) 多数据源。从空中和太空观测地球获取图像是遥感技术取得的重大成果之一, 短短几十年, 遥感数据获取手段迅猛发展。遥感平台有地球同步轨道卫星(35 000km)、太阳同步卫星(600 ~ 1000km)、太空飞船(200 ~ 300km)、航天飞机(240 ~ 350km)、探空火箭(200 ~ 1000km), 并且还有高、中、低飞机、无人飞机等。传感器也几乎覆盖了可透过大气窗口的所有电磁波段。同时, 卫星遥感的空间分辨率从 IKONOS 的 1m 提高到 QuickBird 的 0.62m, 小卫星技术的发展进一步提高了时间分辨率, 通过发射地球同步轨道卫星和合理分布的小卫星星座, 以及传感器的大角度倾斜, 可以以 1 ~ 3 天的周期获得感兴趣地区的遥感图像。由于具有全天候、全天时的特点, 合成孔径雷达卫星也被世界各国普遍关注。美国、加拿大、德国、日本、印度等国家和地区已经先后建立了各自的遥感系统, 我国也正在全方位地推进遥感数据获取手段, 形成自主的高分辨率资源卫星、雷达卫星、测图卫星和对环境与灾害进行实时监测的小卫星群。随着这些遥感系统的成功应用, 遥感进入到一个能够动态、快速、多平台、多时相提供各种对地观测数据的新阶段, 为开拓更广阔的遥感应用领域创造了前所未有的有利条件。

(2) 智能化。遥感技术的智能化表现为遥感传感器的可编程和遥感数据的自动化处理。一方面, 传感器不仅可以按设定的方式进行扫描, 而且可以根据具体要求由地面进行控制编程, 使用户可以获得多角度、多分辨率的数据。另一方面, 遥感数据自动处理技术也取得重大突破, 包括图像自动融合、图像自动配准、基于统计和基于结构的目标识别与分类等, 能够从遥感图像数据中自动提取地物目标, 并挖掘其属性和语义信息, 改善了数据处理精度, 提高了数据生产效率。

(3) 实时化。利用遥感图像实时地进行变化监测关系到国家的经济建设和国防建设。过去人工方法投入大、周期长。小卫星技术的发展降低了卫星造价,使得卫星网络计划得以顺利实施,用户在获取更高分辨率数据的同时,也能获取更高时间分辨率的遥感数据。而雷达微波技术的发展,更使用户可以获得全天候的遥感数据,这一切都为遥感实时监测创造了条件。同时,随着各类空间数据库的建立和大量新图像数据源的出现,自动化变化监测技术也已成为研究的一个热点。自动变化监测研究包括利用新旧遥感图像的对比、新遥感图像与旧数字地图的对比来自动发现变化和更新数据库。最理想的实时处理方法是图像目标三维重建与变化监测一起进行,实现三维变化监测和自动更新,进一步的发展则是利用智能传感器,将数据处理在轨完成,发送回来的直接为信息,而不一定为图像数据。

(4) 定量化。从遥感科学的本质讲,通过对地球表层(包括岩石圈、水圈、大气圈和生物圈四大圈层)的遥感,其目的是获得有关地物目标的几何与物理特性,所以需要全定量化遥感方法进行反演。几何方程是有显式表示的数学方程,而物理方程一直是隐式的。目前的遥感解译与目标识别大多还是采用基于灰度或加上一定知识的统计、结构和纹理的图像分析方法。但随着对成像机理、地物波谱反射特征、大气模型和气溶胶研究的深入和数据的积累,以及多角度、多传感器、高光谱及雷达卫星遥感技术的成熟,全定量化遥感方法将逐步由理论研究走向实用化,遥感基础理论研究将逐步走上新的台阶。只有实现了遥感定量化,才能真正实现自动化和实时化。

1.2 高分辨率遥感图像的特点

遥感图像是地面发射或发射电磁波特征的记录,是地面景物真实的瞬间写照。遥感图像分辨率高低的定义与遥感观测技术的发展密切相关。

20世纪80~90年代,美国陆地卫星(Landsat)数据和法国SPOT卫星是主要的遥感数据源,人们普遍把这些空间分辨率为10~30m的数据称为高分辨率遥感图像,但随着90年代末期IKONOS和QuickBird卫星的发射,遥感图像的空间分辨率开始提高到10m以内(张钧屏等,2001)。近两年来,人们普遍认为高分辨率遥感图像应该具有5m左右,甚至优于5m的空间分辨率。随着遥感技术的进一步发展,该技术指标还会得到不断提高,甚至达到亚米、厘米级(朱光良,2004)。

图1.2分别给出了来自于QuickBird和IKONOS的高分辨率遥感图像。可以发现,与传统的中低分辨率遥感图像相比,高分辨率遥感图像主要具有以下特点。