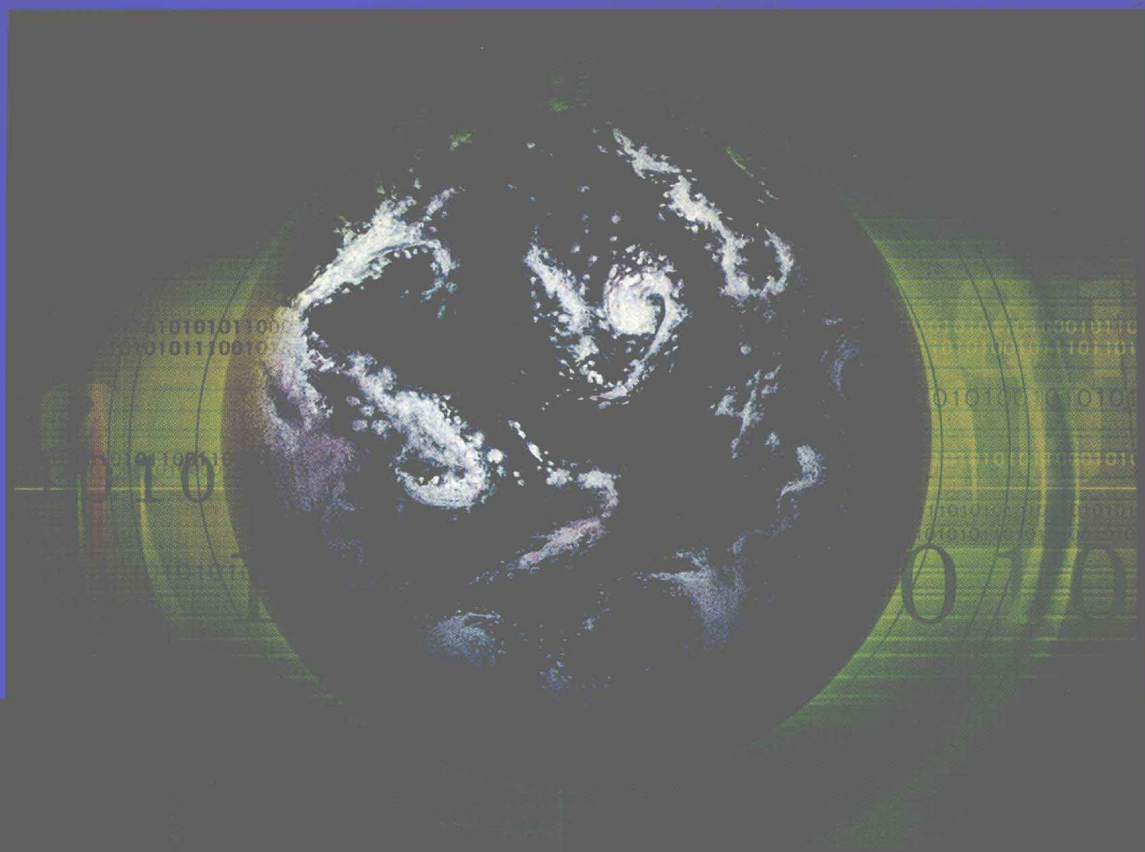




遥感数字图像 处理与应用

冯学
余江峰 安 如 储征伟 等编著



商务印书馆

国家高技术研究发展计划(863 计划)课题(200812Z106)

国家自然科学基金项目(40801166)

联合资助

遥感数字图像处理与应用

冯学智 肖鹏峰 赵书河
佘江峰 安 如 储征伟 等编著

商 务 印 书 馆

2011 年·北京

图书在版编目(CIP)数据

遥感数字图像处理与应用/冯学智等编著. —北京:商务印书馆, 2011

ISBN 978-7-100-08554-0

I. ①遥… II. ①冯… III. ①遥感图像-数字图像处理 IV. ①TP751.1

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2011)第 173916 号

所有权利保留。

未经许可,不得以任何方式使用。

遥感数字图像处理与应用

冯学智 肖鹏峰 赵书河
余江峰 安 如 储征伟 等编著

商 务 印 书 馆 出 版

(北京王府井大街36号 邮政编码 100710)

商 务 印 书 馆 发 行

北京瑞古冠中印刷厂印刷

ISBN 978-7-100-08554-0

2011年10月第1版

开本 787×1092 1/16

2011年10月北京第1次印刷

印张 20 1/4

定价: 39.00 元

内 容 简 介

《遥感数字图像处理与应用》是南京大学“985 学科建设”项目的主要研究成果之一,同时也是南京大学地理教学丛书的重要组成部分。本书基于遥感数字图像的成像原理和信息表征,首先系统介绍了遥感数字图像恢复处理、增强处理、融合处理和分类处理的相关理论、技术方法与基本内涵,然后根据遥感数字图像应用的最新研究成果和应用实践,着重论述遥感数字图像分割与遥感数字图像匹配的主要学术思想与技术路线。内容共分九章,第一章介绍遥感数字图像的成像原理,第二章阐述遥感数字图像的信息特征,第三章至第六章介绍遥感数字图像的恢复处理、增强处理、融合处理和分类处理的基本理论与技术方法,第七章和第八章分别介绍遥感数字图像的分割处理和匹配技术,第九章主要介绍与遥感数字图像处理相关的一些主要应用技术。

本书紧跟遥感数字图像处理技术发展的步伐,内容新颖丰富,知识覆盖面广,概念清晰,结构合理。可作为大专院校相关专业本科生的学习教材和研究生的主要参考书,同时也可供相关科技人员阅读参考。

编 撰 委 员 会

冯学智	南京大学地理信息科学系
肖鹏峰	南京大学地理信息科学系
赵书河	南京大学地理信息科学系
余江峰	南京大学地理信息科学系
安 如	河海大学地球科学与工程学院
储征伟	南京市测绘勘察研究院
阮仁宗	河海大学地球科学与工程学院
张秀英	南京大学国际地球系统科学研究所
王得玉	南京邮电大学地理与生物信息学院
王培法	南京信息工程大学遥感学院
张 运	安徽师范大学国土资源与旅游学院
周立国	复旦大学环境科学与工程系
赵好好	南京信息工程大学遥感学院
韩文泉	南京市测绘勘察研究院
黄秋燕	广西师范学院资源与环境科学学院
吴桂平	南京大学地理信息科学系

前言

遥感是以军事为目的的空对地观测技术而逐渐演化为民用的一种高新科学技术,它将不同性能的传感器以不同的运载方式送入距地球一定高度的运行轨道,实现对地表物体与过程的空对地观测,并借助信息传输工具将观测结果实时发送到地面,通过地面的接收、解码与分析系统的处理、认知,获取观测信息,为进一步认知地球、合理开发和利用地球资源与环境保护提供强有力的技术支撑。遥感已经形成一套较为完整的“应用卫星和卫星应用”的理论体系,技术方法也不断完善,并逐步向“遥感科学”过渡。

目前,遥感的多平台已逐步形成从不同高度对地进行观测的立体观测网,遥感的多传感器已从框幅式光学相机、全景相机到光电扫描仪、CCD 扫描仪直至微波散射计、激光扫描仪和合成孔径雷达,几乎覆盖了可透过大气窗口的所有电磁波段。遥感的多角度则从三行的 CCD 阵列同时得到三个角度的扫描成像到 EOS AM-1(Terra)卫星上的 MISR 同时从九个角度对地成像,使多星种、多尺度的对地观测信息获取成为可能。

同时,传感器的分辨率已基本完成了从中分辨率到高分辨率的改进,IKONOS 和 QuickBird 的空间分辨率已达到米级和亚米级。时间分辨率已从单星 30 天左右的重复观测周期提高到 $4\sim 1/4$ 天的多星往返过程的补充。波谱分辨率则主要反映在由可见光、近红外向微波波段的进一步延伸,由多光谱向高光谱波段的进一步细化,在轨的 EOS AM-1(Terra)和 EOS DM-1(Aqua)卫星上的 MODIS 传感器已具有 36 个波段的中分辨率成像光谱仪,EOS-1 高光谱遥感卫星已具有 220 个波段。这些发展使得全天候、多极化的卫星探测信息成为可能,它不仅可直接获得地表的几何形态信息,还可间接获得地表的物化参数信息,全色波段的完善还可以获得地表的真三维信息。

随着遥感图像空间分辨率、波谱分辨率和时间分辨率的不断提高,遥感信息的分析与处理技术也得到长足的发展,从遥感图像中提取定量生物物理参数和土地利用与覆盖信息的能力大大增强。在图像匹配的基础上,遥感图像信息的智能化或自动识别技术将主要集中在图像数据的融合及基于统计和结构的目标识别与分类技术。在这一发展过程中,应用卫星将逐步从静态、二维、三维的信息获取向三

维动态方向演化,定性描述将逐步向定量的表达过渡,资源探测的应用将逐渐迈向环境研究的实践。而且,随着各类空间数据库的建立和大量新的遥感数据的出现,实时的自动化监测已成为研究的热点。若将图像目标的三维重建与变化监测同步进行,可实现三维变化监测和数据库的自动更新。通过对地表的遥感和全定量化遥感技术的反演,可获得有关地物目标的几何与物理特性。随着成像机理、波谱特征和大气模型研究的进一步深入,几何与物理方程式的全定量化遥感方法正逐步从理论研究走向实用化。

在此背景下,作为多年研究成果的总结和“遥感数字图像处理”等本科课程的教学经验积累,《遥感数字图像处理与应用》基于遥感数字图像的成像原理和信息表征,首先系统介绍了遥感数字图像恢复处理、增强处理、融合处理和分类处理的相关理论、技术方法与基本内涵,然后根据遥感数字图像应用的最新研究成果和应用实践,着重论述遥感数字图像分割与遥感数字图像匹配的主要学术思想与技术路线。内容共分九章,第一章介绍遥感数字图像的成像原理,第二章阐述遥感数字图像的信息特征,第三章至第六章介绍遥感数字图像的恢复处理、增强处理、融合处理和分类处理等的基本理论与技术方法,第七章和第八章则分别介绍遥感数字图像的分割处理和匹配技术,第九章则主要介绍与遥感数字图像处理相关的一些主要应用技术。内容上力求“新、广、深”,即不仅要有一定的深度和广度,还要反映本学科的新动向和新内容,强调其内容的科学性、系统性和完整性。

本书是南京大学“985 学科建设”项目的研究成果之一,同时也是南京大学地理教学丛书的组成部分。在编撰和出版过程中,得到国家高技术研究发展计划(863 计划)课题“高空间分辨率卫星图像分割的新型技术研究”(200812Z106)、国家自然科学基金项目“基于频域特征的高空间分辨率卫星图像多尺度分割方法研究”(40801166)、国家自然科学基金项目“飞行器导航图像匹配理论与方法研究”(40771137)、国家自然科学基金项目“高分辨率遥感数据决策级融合方法研究”(40501047)的资助和支持。

本书是南京大学地理信息系统与遥感实验室全体科研人员共同努力的结果,由实验室主任冯学智教授拟定编撰大纲,并以他长期讲授的“遥感数字图像处理”课程讲稿为蓝本,几经讨论和修改,增加了部分博士学位论文的最新研究成果,形成本书的基本框架和内容,由编撰人员分别撰写。其中:第一章由冯学智、周立国、黄秋燕、赵书河、储征伟执笔,第二章由冯学智、张秀英、张运执笔,第三章由王得玉、赵好好执笔,第四章由王培法、肖鹏峰、储征伟执笔,第五章由赵书河执笔,第六章由余江峰、张运、吴桂平、黄秋燕、韩文泉执笔,第七章由肖鹏峰、王培法执笔,第八章由安如执笔,第九章由阮仁宗执笔。

本书在编写过程中得到学校、院系有关领导的关心和支持。黄杏元、李满春、柯长青等教授给予指导和帮助,王周龙、邱新法、康国定、李虎、谢士杰、林广发、赵萍、Behara Satyanarayana、Elnazir Ramadan、张友水、徐春燕、叶盛等博士及 Rami Badawi、冯莉等博士研究生提供了相关素材,为本书的完稿做了有益的工作。闻春晶、姜红丹、肖凯等研究生参与了资料整理和部分撰写工作,在此一并致以诚挚的谢意。本书由冯学智、肖鹏峰进行了最后统稿与定稿,黄秋燕、吴桂平、王珂、李晖、林金堂、王剑庚、李云等博士生参与了统稿、校核及部分插图的编辑与修改工作。

本书与已出版的《“3S”技术与集成》、《数字地球导论》等教材关系密切,既相互补充,又相对独立。同时,本书与《“3S”技术与集成》一书中的个别内容略有重叠,仅为了便于读者阅读和查阅。此外,限于作者的水平和经验,书中错谬之处在所难免,抛砖引玉,恳请读者批评指正。

作 者

2009年9月

目 录

第一章 遥感图像的成像原理	1
§ 1.1 电磁波谱特性	2
1.1.1 电磁波谱概述	2
1.1.2 电磁波谱特性	6
§ 1.2 地物波谱特性.....	12
1.2.1 地物的光谱特征.....	13
1.2.2 典型地物的光谱特征.....	15
§ 1.3 遥感的波段选择.....	19
1.3.1 遥感波段的设置.....	20
1.3.2 常用的传感器与遥感卫星.....	22
§ 1.4 遥感成像过程.....	29
1.4.1 传感器工作原理.....	29
1.4.2 遥感图像传输模型.....	31
1.4.3 遥感图像处理简介.....	32
参考文献	34
第二章 遥感图像的信息特征	35
§ 2.1 遥感图像的数学表达.....	35
2.1.1 遥感图像的函数形式.....	35
2.1.2 遥感图像的参数特点.....	36
§ 2.2 遥感图像的亮度响应.....	42
2.2.1 亮度的数值表示.....	42
2.2.2 亮度的统计分析.....	44
§ 2.3 遥感图像的特征描述.....	48
2.3.1 空间位置关系特征.....	48
2.3.2 纹理特征.....	54
2.3.3 几何特征(形状特征).....	61
参考文献	65

第三章 遥感图像的恢复处理	66
§ 3.1 几何校正	67
3.1.1 几何精校正过程	67
3.1.2 几何校正中的几个问题	71
§ 3.2 辐射校正	73
3.2.1 传感器端的辐射校正	73
3.2.2 噪音消除	74
3.2.3 日地距离校正和太阳高度角校正	76
3.2.4 地形辐射校正	77
§ 3.3 大气校正	78
3.3.1 大气对遥感的影响	78
3.3.2 常用的大气校正方法	80
3.3.3 大气校正的实例	81
§ 3.4 投影校正	87
3.4.1 中心投影	88
3.4.2 多中心投影	89
3.4.3 中心投影图像的投影校正	95
3.4.4 多中心投影图像的投影校正	96
3.4.5 SAR 图像的投影校正	97
§ 3.5 阴影去除	98
3.5.1 阴影检测	98
3.5.2 阴影消除	101
参考文献	103
第四章 遥感图像的增强处理	105
§ 4.1 对比度增强	105
4.1.1 线性变换	106
4.1.2 非线性变换	107
4.1.3 直方图调整	108
§ 4.2 空域滤波	112
4.2.1 空域滤波基础	113
4.2.2 平滑滤波	115
4.2.3 边缘增强	117
§ 4.3 频域滤波	122

4.3.1 傅立叶变换及相关性质	122
4.3.2 图像频谱分析	125
4.3.3 频域平滑	128
4.3.4 频域锐化	130
4.3.5 同态滤波	131
§ 4.4 波谱增强	132
4.4.1 图像特征空间及多元统计	132
4.4.2 K-L 变换	134
4.4.3 K-T 变换	136
参考文献	137
第五章 遥感图像的融合处理	138
§ 5.1 图像融合的原理	139
5.1.1 图像融合的含义	139
5.1.2 图像融合的内容	141
§ 5.2 图像融合的方法	142
5.2.1 像元级图像融合方法	142
5.2.2 特征级图像融合方法	147
5.2.3 决策级图像融合方法	150
§ 5.3 融合示例	153
§ 5.4 方法的评价	155
5.4.1 定性的评价	155
5.4.2 定量的评价	156
5.4.3 方法的比较	159
参考文献	160
第六章 遥感图像的分类处理	164
§ 6.1 图像分类的原理	164
6.1.1 分类问题的提出	164
6.1.2 分类的内容	166
§ 6.2 非监督分类	166
6.2.1 ISODATA 分类方法	167
6.2.2 Cluster 分类方法	171
6.2.3 数据挖掘技术的应用	175
§ 6.3 监督分类	182

6.3.1 监督分类原理	182
6.3.2 分类过程	184
6.3.3 最大似然比方法	187
6.3.4 神经网络的分类方法	189
6.3.5 专家分类器的应用	192
参考文献.....	196
第七章 遥感图像的分割技术.....	197
§ 7.1 图像分割的原理	197
7.1.1 图像分割的含义	197
7.1.2 图像分割的内容	198
§ 7.2 基于边界的分割	199
7.2.1 边缘检测	199
7.2.2 边缘连接	205
§ 7.3 基于区域的分割	210
7.3.1 阈值分割	210
7.3.2 区域生长	214
7.3.3 分裂-合并	215
§ 7.4 边界与区域结合的分割	216
7.4.1 分水岭变换	217
7.4.2 区域标记	220
§ 7.5 图像分割评价	221
参考文献.....	223
第八章 遥感图像的匹配技术.....	226
§ 8.1 图像匹配的原理	226
8.1.1 匹配的定义	226
8.1.2 匹配的描述	229
8.1.3 匹配的内容	229
§ 8.2 基于像元亮度的匹配	232
8.2.1 互相关方法	232
8.2.2 傅立叶变换方法	233
8.2.3 互信息方法	234
8.2.4 优化方法	237
§ 8.3 基于图像特征的匹配	238

8.3.1 特征探测	239
8.3.2 利用空间关系的匹配	240
8.3.3 利用不变描述子的匹配	242
8.3.4 利用松弛算法的匹配	245
8.3.5 金字塔与小波方法的应用	247
§ 8.4 匹配示例与应用	248
8.4.1 匹配示例	249
8.4.2 技术应用	255
参考文献	262
第九章 遥感图像的应用技术	267
§ 9.1 遥感在资源调查中的应用	267
9.1.1 土地资源调查	267
9.1.2 水资源调查	269
9.1.3 草地资源调查	272
9.1.4 渔业资源调查	272
§ 9.2 遥感在环境评价中的应用	274
9.2.1 水环境遥感	274
9.2.2 生态环境遥感	276
9.2.3 大气环境遥感	278
§ 9.3 遥感在灾害监测中的应用	279
9.3.1 水灾监测	279
9.3.2 旱灾监测	281
9.3.3 雪灾监测	287
9.3.4 沙漠化监测	291
9.3.5 地震监测	295
§ 9.4 遥感在城市研究中的应用	297
9.4.1 遥感用于城市空间信息提取	297
9.4.2 城市热岛效应的研究	301
9.4.3 遥感在城市人口方面的应用	303
9.4.4 遥感在城市规划中的应用	306
参考文献	311

第一章

遥感图像的成像原理

遥感(RS)是以军事为目的的空对地观测技术而逐渐演化为民用的一种高新技术。遥感的主体是将不同性能的观测仪器用不同的载体送入距地球一定的高度实现对地表的空对地观测,并将观测结果发送地面,通过地面接收系统的接收、解码及分析系统的处理、认识获取观测信息,为进一步认识地球、合理开发利用地球资源和整治环境提供强有力的技术支撑。遥感的主要内容可概括为以下几个方面:(1)植被、土壤、水体、岩石等地物的电磁波特性研究,特别是地物在可见光-近红外、热红外和微波(包括雷达)等电磁波谱段的反射、辐射特性研究;(2)运载工具和遥感传感器的研究,运载工具主要涉及卫星、飞机、气球、地面铁塔等遥感平台,传感器则主要指多光谱、高光谱和微波等遥感类型;(3)地面接收系统和预处理系统的研究;(4)遥感应应用技术的研究,主要指为特定应用目的而发展的遥感图像的处理、分析技术以及遥感信息的应用技术。

利用遥感技术,人们总能得到反映对地观测的如下信息:

$$R. S. IMAGE = f(x, y, z, \lambda, t)$$

式中 x, y 为空间位置参数, z 为对应于 (x, y) 的观测值, λ 为获取观测值时所使用的电磁波长, t 为观测周期。

从对地观测信息的表达式中可以看出,地物的电磁波特性是遥感图像表征的重要参数之一,也就是说遥感图像是特定条件下电磁波与地表相互作用的一种记录。因此,掌握被观测物体的电磁波谱特性及地物的反射光谱特征是理解遥感信息的基础,它是正确、有效地分析和处理遥感图像的必备内容。基于这一前提,本章主要介绍遥感图像(主要指遥感数字图像,下同)处理的部分物理基础,即遥感图像的成像原理,首先概述电磁波谱特性,并简要阐述典型地物的反射光谱与反射光谱特征;在此基础上分析遥感波段的设置,并介绍常用的遥感卫星与卫星传感器;最后从遥感传感器的工作原理、遥感的成像过程及遥感图像传输模型推出遥感图像处理所涉及的主要内容和科学技术方法。

§ 1.1 电磁波谱特性

1.1.1 电磁波谱概述

遥感是指不直接接触物体,应用各种传感仪器对远距离目标所辐射和反射的电磁波信息,进行收集、处理,并最后成像,实现对地面各种景物进行探测和识别的一种对地观测综合技术。任何物体具有不同的电磁波反射或辐射特征,地物反射或发射的电磁波信息经过地球大气到达遥感传感器,传感器根据地物对电磁波的反射强度以不同的亮度记录下来,形成遥感图像。因此,遥感图像实质上是电磁辐射与地表相互作用的一种记录。电磁波及其基本特性是理解遥感图像成像原理的基础。

电磁波是电磁场的一种运动形态。根据麦克斯韦电磁场理论,空间任何一处只要存在着场,也就存在着能量,变化的电场能够在它的周围空间激起磁场,而变化的磁场又会在它的周围感应出变化的电场。这种变化的电磁场在空间传播,形成电磁波。实际上电磁振荡是沿着各个不同方向传播的。这种电磁能量的传递过程(包括辐射、吸收、反射和透射等)称为电磁辐射。

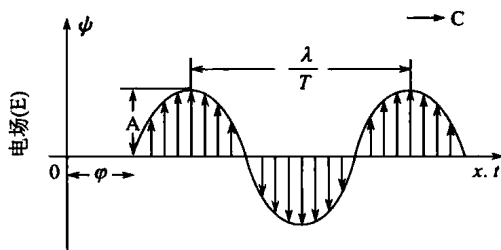


图 1-1 波函数图解^[1]

电磁波属横波,具有时、空周期性。电磁波的时、空周期性可以由波动方程的波函数来表示,如图 1-1 所示。

单一波长电磁波的一般函数表达式为:

$$\psi = A \sin[(\omega t - kx) + \varphi] \quad (1-1)$$

式中, ψ —波函数(表示电场强度); A —振幅; $(\omega t - kx) + \varphi$ —位相; φ —初相位; $\omega = 2\pi/T$ —圆频率; $k = 2\pi/\lambda$ —圆波数;

t, x —时、空变量(t 表示时间, x 表示距离)。波函数由振幅和相位组成。一般传感器仅记录电磁波的振幅信息,舍弃相位信息;在全息摄影中,除了记录电磁波的振幅信息,同时也记录相位信息。

按电磁波在真空中的波长或频率来划分,称电磁波谱。波谱区的划分没有明确的物理定义,因而界线并非严格、固定,是一种相互渗透的过渡关系,电磁波谱图如图 1-2 所示。如将电磁波的波段频率由低至高依次排列,分别是无线电波、红外线(远红外、中红外、近红外)、可见光、紫外线、X 射线、 γ 射线及宇宙射线。各种电磁波的波长之所以不同,是由于产生电磁波的波源不同。如无线电波是由电磁振荡发射的,微波利用谐振腔及波导管激励与传输,通过微波天线向空间发射产生;红外辐射由分子的振动和转动能级跃迁时产生;可见光与近紫外辐射是由于原子、分子中的外层电

子跃迁产生;紫外线、X射线和 γ 射线是由内层电子的跃迁和原子核内状态的变化产生;宇宙射线则是来自宇宙空间。

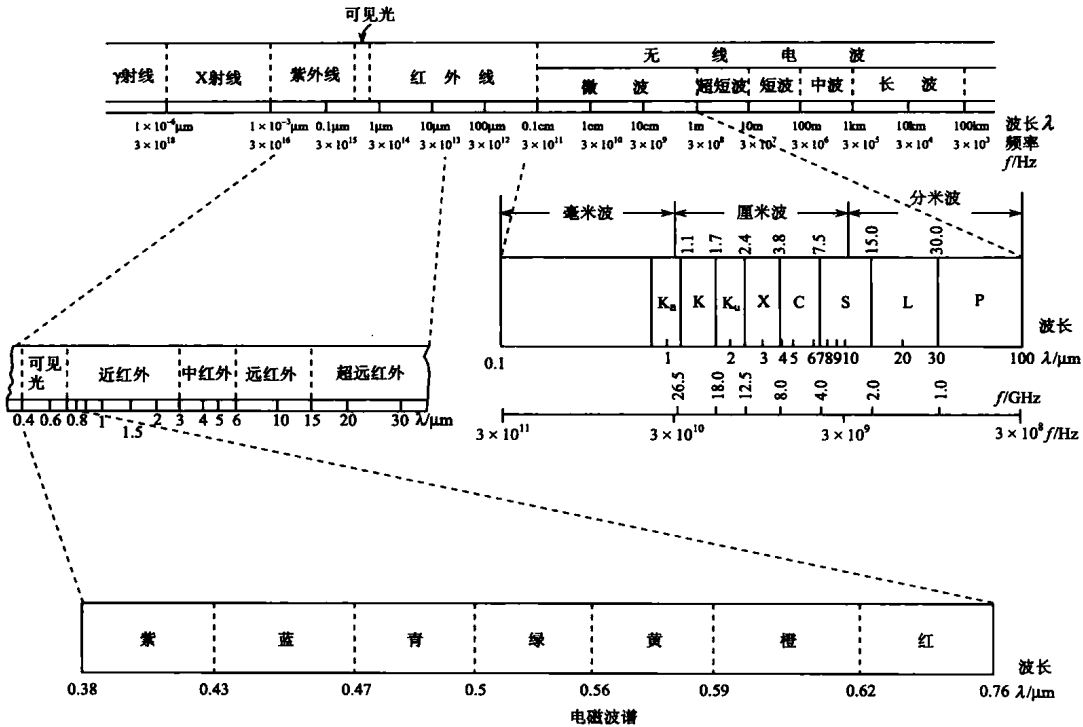


图 1-2 电磁波谱图^[2]

在电磁波谱中,各种类型的电磁波,由于波长(或频率)的不同,它们的性质有较大的差别。如可见光可被人眼直接感觉到,看到物体各种颜色;红外线能克服夜障;微波可穿透云、雾、烟、雨等。但它们也具有共同性:

- (1) 各种类型电磁波在真空(或空气)中传播的速度相同,都等于光速: $c = 3 \times 10^8 \text{ m/s}$ 。
- (2) 遵守统一的反射、折射、干涉、衍射及偏振定律。
- (3) 电磁波具有波粒二象性。干涉、衍射、偏振和色散等现象均是电磁辐射波动性的表现。电磁波的粒子(量子)性,是指电磁波是由密集的光子微粒组成的,电磁辐射实质上是光子微粒流的有规律运动,波是光子微粒流的宏观统计平均状态,粒子是波的微观量子化。电磁辐射在传播过程中,主要表现为波动性;当电磁辐射与物质相互作用时,主要表现为粒子性,这即谓电磁波的波粒二象性。遥感传感器所探测到的是目标物在单位时间辐射(反射或发射)的能量,由于电磁辐射的粒子性,所以某时刻

到达传感器的电磁辐射能量才具有统计性。电磁波的波长不同,其波动性和粒子性所表现的程度也不同,一般而言,波长愈短,辐射的粒子特性愈明显,波长愈长,辐射波动特性愈明显。充分利用电磁波波粒二象性这两方面特性,遥感技术就可探测到目标物电磁辐射信息。

遥感技术采用的电磁波波段主要集中在紫外波段到微波波段。可见光波段、红外波段和微波波段是目前遥感技术最常使用的波段,其中红外波段又可进一步划分为近红外、中红外、远红外波段。由于电磁波的波长不同,遥感技术使用的电磁波波段对地观测的特点也有较明显的差别。

1. 可见光

可见光波长为 $0.38\sim0.76\mu\text{m}$ 。在电磁波谱中,可见光仅占一个极狭窄的区间。可见光是原子或分子内的电子运动状态改变时所发出的电磁波。可见光是人视觉能感受到“光亮”的电磁波。当可见光进入人眼时,人眼的主观感觉依波长从长到短表现为红色($0.62\sim0.76\mu\text{m}$)、橙色($0.59\sim0.62\mu\text{m}$)、黄色($0.56\sim0.59\mu\text{m}$)、绿色($0.50\sim0.56\mu\text{m}$)、青色($0.47\sim0.50\mu\text{m}$)、蓝色($0.43\sim0.47\mu\text{m}$)和紫色($0.38\sim0.43\mu\text{m}$)。可见光属电磁波,具有反射、透射、散射和吸收等特性,且不同地物反射、透射、散射和吸收可见光的特性不同。人眼对可见光波段的电磁辐射具有连续响应的能力,对可见光不同波段的单色光也可直接感应。因此,利用各种不同地物在可见光波段的辐射特性及人眼感应可见光波段电磁辐射的特性,便可将不同地物区分出来。可见光是遥感技术中鉴别物质特征的主要波段。可见光主要来自反射太阳的短波辐射,只能在白天有日照的情况下工作,不能透过云、雨、烟雾等。

2. 近红外

近红外波长在 $0.76\sim3.0\mu\text{m}$,介于可见光和中红外区间的电磁波,在性质上与可见光十分相似,故又称光红外。由于近红外主要是地表面反射太阳的红外辐射,因此也称为反射红外。近红外是人们最早发现的非可见光区域,其中的 $0.76\sim1.2\mu\text{m}$ 可以使胶片感光,又称摄影红外。 $1.2\sim3.0\mu\text{m}$ 处于发射红外波段内,主要反映地物的热辐射特性。近红外也是遥感技术中常用的波段。

3. 中红外

中红外的波长在 $3.0\sim6.0\mu\text{m}$ 之间,在电磁波谱中位于近红外的外侧。与近红外反射特性不同,中红外属热辐射。自然界中任何物体,当温度高于绝对温度(-273.15°C)时,均能向外辐射红外线。其辐射能量的强度和波谱分布位置与物质