

GEO-SPATIAL INFORMATION SCIENCE

● 高等学校摄影测量与遥感系列教材

(第三版)

遥感原理与应用

Principles and Applications
of Remote Sensing

孙家柄 主编



WUHAN UNIVERSITY PRESS

武汉大学出版社

014002640

TP7
20-3

高等学校摄影测量与遥感系系列教材

遥感原理与应用

Principles and Applications of Remote Sensing

(第三版)

主 编 孙家柄
参 编 倪 玲 周军其
潘 斌 管玉娟



TP7
20-3



WUHAN UNIVERSITY PRESS
武汉大学出版社



北航 C1688123

014003840

图书在版编目(CIP)数据

遥感原理与应用/孙家柄主编. —3版. —武汉:武汉大学出版社,2013.6
高等学校摄影测量与遥感系列教材
ISBN 978-7-307-10761-8

I. 遥… II. 孙… III. 遥感技术—高等学校—教材 IV. TP7

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2013)第 100331 号

责任编辑:王金龙 责任校对:刘欣 版式设计:马佳

出版发行:武汉大学出版社 (430072 武昌 珞珈山)

(电子邮件:chs22@whu.edu.cn 网址:www.wdp.com.cn)

印刷:湖北睿智印务有限公司

开本:787×1092 1/16 印张:20.75 字数:517千字 插页:6

版次:2003年2月第1版 2009年6月第2版

2013年6月第3版 2013年6月第3版第1次印刷

ISBN 978-7-307-10761-8 定价:40.00元

版权所有,不得翻印;凡购买我社的图书,如有质量问题,请与当地图书销售部门联系调换。

第三版前言

在创新科学思想的指导下，我国科学技术水平迅猛发展，经济实力高速增长，航天事业也出现空前繁荣的局面，让世界刮目相看。2020年前我国将发射100多颗卫星，今后我国的遥感研究和应用必将主要使用我国的遥感资料和数据。为此，本书第三版修订的主要内容是将我国自主发射的各类系列卫星，如北斗导航定位卫星、资源卫星、遥感卫星、环境卫星、测绘卫星、雷达卫星和嫦娥绕月卫星等的系统特点、数据参数和应用实例编入第2章、第7章和第9章，并对第1章作了部分补充，第9章增加了遥感探测地外星空一节。一些长期监测的遥感项目，如寻找南极陨石、南极冰川延伸和冰山的漂移(中山站地区的极记录冰川流速已监测了近40年)再版时将及时公布近期用我国遥感卫星监测的数据并更新遥感图像。

“遥感原理和应用”作为国家精品课程，将随着遥感技术的发展及时更新再版。在修订过程中，许多大专院校的师生、科研单位的研究人员和生产单位的工程技术人员对本书提出了很多宝贵的意见和有益的建议，在此深表谢意。再版书中难免还有不足及不妥之处，恳请读者批评指正。

作者

2013年3月

第二版前言

《遥感原理与应用》作为国家精品课程——遥感原理及应用专业教材，受到广大本科生、硕士生及相关专业技术人员的普遍认同，被全国许多大学相关专业指定为教材使用。

随着科学技术的发展，新型平台及传感器的研制和先进的处理技术提高，开拓了人们的视野，为遥感进一步的发展及广泛应用提供了保障。为了适应遥感技术的发展，满足不同层次专业人员的需求，原有书中有关的章节必然要加以修改及补充，以保证书中内容的先进性和完整性。

此次修订主要在第2章补充了当今先进的传感器类型，并对其特征作了详细的叙述；第4章新增了遥感坐标系统及 Geotiff 图像格式介绍，另外对国外著名遥感软件 ERDAS、PCI、ENVI 等相关内容作了修改或补充；第5章遥感图像的几何处理主要增加了针对高空间分辨率卫星影像的有理函数模型；第8章增加面向对象的影像分类新方法；第9章应用部分主要结合科研与生产补加了一些实例。此外，也对第1、3、6、7章节相关内容进行了订正及补充。

本书修订后，原有结构及风格不变，增加了新的、与科研和生产紧密相关的内容，与本学科发展同步。在修订过程中，许多读者提出了很多有益的建议及意见，在此表示感谢。本教材在编写过程中，在遥感考古应用中参考了部分古文献：《史记·楚世家》、《史记·白起列传》、《史记·六国年表·秦表》、《史记·货殖列传》、《左传·昭公二十三年》、《左传·襄公十四年》、《唐书·括地志》、《唐书·元和志》、《水经注·沔水中》、《汉书·地理志》、《资治通鉴》。引用的研究成果，部分未能在参考文献中一一列出，在此深表谢意。再版书中不足及不妥之处在所难免，还恳请读者批评指正。

作者

2009年3月

前 言

遥感是在不直接接触的情况下,对目标物或自然现象远距离感知的一门探测技术。具体地讲,是指在高空和外层空间的各种平台上,运用各种传感器获取反映地表特征的各种数据,通过传输,变换和处理,提取有用的信息,实现研究地物空间形状、位置、性质、变化及其与环境的相互关系的一门现代应用技术科学。

1858年世界上第一张航空像片获得后,出现的航片判读技术是现代遥感技术的雏形,由于技术上的限制,在整整一个世纪中,一直发展十分缓慢,仅仅是在航片几何处理上有很大的突破,航空摄影测量的理论和光学机械模拟测图仪器发展到比较完善的地步。

1956年世界上第一颗人造地球卫星发射成功,为遥感技术的发展创造了新的条件,科学家对随后发射的卫星上回收的成千上万张地球照片进行分析,注意到卫星摄影拍摄范围大,速度快,成本低,在短期内能重复观测,有利于监测地表的动态变化。并发现了许多在地面或近距离内无法看到的宏观自然现象。在这同时传感器技术长足发展,出现了多光谱扫描仪、热红外传感器和雷达成像仪等,使得获取信息所利用的电磁波谱的波长范围大大扩展,显示信息的能力增强,一些传感器的工作能力达到全日时、全天候,并且获取图像的方式更适应现代数据传输和处理的要求。计算机技术的发展和运用,使海量卫星图像数据的处理、存储和检索快速而有效,尤其在图像的压缩、变换、复原、增强和信息提取方面,更显示了它的优越性。这样就大大突破了原先航片目视判读的狭隘性,“遥感”(Remote Sensing)这一更加广义和恰当的新名词,很自然地在20世纪60年代出现。

美国在“双子星座”(Gemini)、“天空实验室”(Skylab)和“雨云”(Nimbus)等卫星和宇宙飞船上进行遥感试验的基础上,1972年7月23日发射了第一颗地球资源卫星(ERTS-1),后改称陆地卫星(Landsat),星上载有MSS多光谱扫描仪和RBV多光谱电视摄影仪两种传感器系统,空间分辨率80m,是一颗遥感专用卫星,五年多发送下来的大量地表图像经各国科学家分析和应用,得到了大量成果,可称为遥感技术发展的第一个里程碑。

1982年美国发射的陆地卫星4号(Landsat-4)上装载的TM专题制图仪,将光谱段从MSS 4个波段增加到7个波段,空间分辨率提高到30m。1986年法国发射的Spot卫星上装载的HRV线阵列推扫式成像仪将空间分辨率提高到10m,被称为第二代遥感卫星。目前已发展到第三代遥感卫星,Ikonos卫星上遥感传感器空间分辨率达到1m,快鸟(Quick Bird)卫星达到0.61m。

遥感技术的发展不仅仅表现在传感器空间分辨率的提高上,其他各个方面发展也十分快速,遥感平台由遥感卫星,宇宙飞船,航天飞机有一定时间间隔的短中期观测,发展为以国际空间站为主的多平台、多层面、长期的动态观测。还计划发射小卫星群,获取任意时相的卫星影像,以适应不同遥感监测项目的要求。遥感传感器的光谱探测能力也在急速提高,成像光谱仪的出现,能探测到地物在某些狭窄波段光谱辐射特性的差别,目前已在运行的有36个波段的MODIS成像光谱仪,未来成像光谱仪的波段个数将达到384个波段,每个波段

的波长区间窄到 5nm。在立体成像方面,由邻轨立体观测发展到同轨立体观测,使立体影像能在很短时间内获得,并且几何关系相对简单,处理更方便,侧视雷达立体成像和相干雷达(INSAR)的出现,使立体测量方法更多样化,同时实现全天候作业。

遥感图像处理硬件系统也从光学处理设备全面转向数字处理系统,内外容量的迅速扩大,处理速度急速增加,使处理海量遥感数据成为现实,网络的出现将使数据实时传输和实时处理成为现实。遥感图像处理软件系统更是不断翻新,从开始的人机对话操作方式(ARIESI²S101等),发展到视窗方式(ERDAS, PCI, ENVI等),未来将向智能化方向发展。另一个特点是与GIS集成,有代表性的是ERDAS与ARC/INFO的集成。遥感软件的组件化也是一个发展方向,遥感软件的网络化,实现遥感软件和数据资源的共享和实时传输。

大量多种分辨率遥感影像形成了影像金字塔,再加上高光谱、多时相和立体观测影像,出现海量数据,使影像的检索和处理发生困难,建立遥感影像数据库系统已迫在眉睫。目前,遥感影像数据的研究是以影像金字塔为主体的无缝数据库,影像数据库涉及影像纠正、数据压缩和数据变换等理论和方法,还产生了“数据挖掘”(或知识发现)之类的新的理论和方法。为了能将海量遥感数据中的所需信息富集在少数几个特征上,又形成了多源遥感影像融合(指多种传感器、多分辨率、多波段、多时相间)的理论和方法。

在遥感图像识别和分类方面,开始大量使用统计模式识别,后来出现了结构模式识别、模糊分类、神经网络分类,半自动人机交互分类和遥感图像识别的专家系统。但在遥感图像识别和分类中尚有许多不确定性因素需作深入研究。

在遥感的应用方面有大量成果,有些领域有突破性进展,总的看来是从定性分析走向定量分析,如从作物类型的识别到作物估产。另外是从宏观分析到微观分析,从农业生产的宏观分析如大面积干旱探测到微观分析的精细农业,即用遥感方法指导和实施作物的技术管理措施。

未来要建立的数字地球是对真实地球及其相关现象数字化描述的一个虚拟地球。遥感技术将为数字地球提供动态的高分辨率、高光谱影像,用遥感影像生成的三维数字地面模型(DEM),以及地物和环境的各种属性数据等一些数字地球中最基础的数据。

随着遥感技术日新月异的发展,尤其在许多领域里的应用有新的突破的情况下,原来的教材已不适应现在的本科教学。在这次的教材编写中,我们突出当今遥感的新成就,注入新内容,如遥感平台和新型传感器方面,介绍了空间站、小卫星、高空间分辨率传感器(IKONOS等)、高光谱传感器(MODIS成像光谱仪等)、相干雷达(INSAR)等;在处理方法方面编入了多源遥感影像融合、数字影像镶嵌、辐射校准处理、自动分类中的新方法以及新的遥感图像处理软硬件和3S集成系统等;尤其在遥感技术应用一章中,编入了许多国内外有重大影响的遥感成果,如遥感探测南极陨石、遥感监测1998年长江特大洪水、沙尘暴、臭氧空洞、山体滑坡、大兴安岭森林火灾、南极冰川流速以及遥感方法快速修测和更新地形图等。对于一些曾使用过一段时间的、陈旧的光学处理方法和过时的图像处理系统等被淘汰的技术不再编入本书。

本书可用作遥感及相关专业本科教材和攻读硕士研究生的参考教材,还可以作为从事遥感教学、科研和生产的指导书。教材以讲解遥感的基本理论、成熟的已商品化的和普遍使用的遥感技术和方法为主,同时具体介绍遥感在各个领域中的应用实例,帮助学生掌握实际技能。书中还引导学生关注遥感新技术和发展趋势,紧跟国际上遥感发展的步伐。

本书共分九章,第1章“电磁波及遥感物理基础”由管玉娟编写;第2章“遥感平台及运

行特点”和第3章“遥感传感器及其成像原理”由倪玲编写；第4章“遥感图像数字处理的基础知识”和第8章“遥感图像自动识别分类”由潘斌编写；第5章“遥感图像的几何处理”和第6章“遥感图像辐射处理”由周军其编写；孙家柄教授编写了第7章“遥感图像判读”和第9章“遥感技术的应用”，并且对全书进行了统一编审。

由于受编写时间和作者水平之限，全书难免存在缺点甚至错误，敬请读者批评指正。

作 者

2002年3月

目 录

第 1 章 电磁波及遥感物理基础	1
§ 1.1 概述	1
1.1.1 电磁波	1
1.1.2 电磁波谱	5
§ 1.2 物体的发射辐射	7
1.2.1 黑体辐射	7
1.2.2 太阳辐射	9
1.2.3 大气对辐射的影响	10
1.2.4 一般物体的发射辐射	15
1.2.5 有关热传导理论	16
§ 1.3 地物的反射辐射	18
1.3.1 地物的反射类别	18
1.3.2 光谱反射率以及地物的反射光谱特性	18
1.3.3 影响地物光谱反射率变化的因素	22
§ 1.4 地物波谱特性的测定	23
1.4.1 地物波谱特性的概念	23
1.4.2 地物波谱特性的测定原理	23
1.4.3 地物波谱特性的测定步骤	25
第 2 章 遥感平台及运行特点	26
§ 2.1 遥感平台的种类	26
§ 2.2 卫星轨道及运行特点	27
2.2.1 轨道参数	27
2.2.2 卫星坐标的测定和解算	27
2.2.3 卫星姿态角	32
2.2.4 其他一些常用参数	33
§ 2.3 陆地卫星及轨道特征	34
2.3.1 系列陆地卫星类	34
2.3.2 高空间分辨率陆地卫星	47
2.3.3 高光谱类卫星	48
2.3.4 SAR 类卫星	51
2.3.5 小卫星	61

第3章 遥感传感器及其成像原理	63
§ 3.1 扫描成像类传感器	63
3.1.1 对物面扫描的成像仪	64
3.1.2 对像面扫描的成像仪	74
3.1.3 成像光谱仪(Imaging Spectrometer)	75
§ 3.2 雷达成像仪	77
3.2.1 真实孔径雷达	77
3.2.2 合成孔径雷达	79
3.2.3 侧视雷达图像的几何特征	80
3.2.4 相干雷达(INSAR)	83
第4章 遥感图像数字处理的基础知识	86
§ 4.1 图像的表达形式	86
§ 4.2 遥感图像的坐标系统	91
4.2.1 地理坐标系(Geographic coordinate system)	92
4.2.2 投影坐标系(Projection coordinate system)	92
§ 4.3 遥感数字图像的存储	93
4.3.1 存储介质	94
4.3.2 存储格式	94
§ 4.4 遥感数字图像处理系统	99
4.4.1 遥感数字图像处理的硬件系统	99
4.4.2 遥感数字图像处理的软件系统	101
§ 4.5 遥感图像处理系统与 GIS 和 GPS 的集成	106
第5章 遥感图像的几何处理	108
§ 5.1 遥感传感器的构像方程	108
5.1.1 遥感图像通用构像方程	108
5.1.2 中心投影构像方程	109
5.1.3 全景摄影机的构像方程	110
5.1.4 推扫式传感器的构像方程	110
5.1.5 扫描式传感器的构像方程	112
5.1.6 侧视雷达图像的构像方程	114
5.1.7 基于多项式的传感器模型	115
5.1.8 基于有理函数的传感器模型	116
§ 5.2 遥感图像的几何变形	118
5.2.1 传感器成像方式引起的图像变形	118
5.2.2 传感器外方位元素变化的影响	120
5.2.3 地形起伏引起的像点位移	123
5.2.4 地球曲率引起的图像变形	124
5.2.5 大气折射引起的图像变形	125

5.2.6	地球自转的影响	127
§ 5.3	遥感图像的几何处理	128
5.3.1	遥感图像的粗加工处理	128
5.3.2	遥感图像的精纠正处理	129
5.3.3	侧视雷达图像的几何纠正	146
§ 5.4	图像间的自动配准和数字镶嵌	148
5.4.1	图像间的自动配准	148
5.4.2	数字图像镶嵌	150
5.4.3	基于小波变换的图像镶嵌	152
第 6 章	遥感图像辐射处理	154
§ 6.1	遥感图像的辐射处理	154
6.1.1	辐射误差	154
6.1.2	传感器辐射定标	154
6.1.3	大气校正	155
6.1.4	太阳高度角、日地距离校正和地形影响引起的辐射误差校正	157
6.1.5	像元灰度值 DN 和辐射率的转换	159
6.1.6	地面辐射校正场	159
§ 6.2	遥感图像辐射增强	160
6.2.1	图像灰度的直方图	160
6.2.2	图像反差调正	162
§ 6.3	多光谱图像四则运算	167
§ 6.4	图像融合	168
6.4.1	图像融合	168
6.4.2	遥感图像和 DEM 复合	173
第 7 章	遥感图像判读	174
§ 7.1	景物特征和判读标志	174
7.1.1	光谱特征及其判读标志	174
7.1.2	空间特征及其判读标志	175
7.1.3	时间特征及其判读标志	176
7.1.4	影响景物特征及其判读的因素	176
§ 7.2	目视判读的一般过程和方法	186
7.2.1	判读前的准备	186
7.2.2	判读的一般过程	188
§ 7.3	遥感图像目视判读举例	189
7.3.1	单波段像片的判读	189
7.3.2	多光谱像片的判读	190
7.3.3	热红外像片的判读	194
7.3.4	侧视雷达像片的判读	195

7.3.5	多时域图像的判读	198
第8章	遥感图像自动识别分类	202
§ 8.1	基础知识	202
8.1.1	模式与模式识别	202
8.1.2	光谱特征空间及地物在特征空间中聚类的统计特性	203
§ 8.2	特征变换及特征选择	204
8.2.1	特征变换	205
8.2.2	特征选择	209
§ 8.3	监督分类	210
8.3.1	判别函数和判别规则	211
8.3.2	分类过程	213
§ 8.4	非监督分类	214
8.4.1	K-均值聚类法	215
8.4.2	ISODATA 算法聚类分析	216
8.4.3	平行管道法聚类分析	218
§ 8.5	非监督分类与监督分类的结合	219
§ 8.6	分类后处理和精度评定	220
8.6.1	分类后处理	220
8.6.2	分类后的精度评定	220
§ 8.7	非光谱信息在遥感图像分类中的应用	222
8.7.1	高程信息在遥感图像分类中的应用	222
8.7.2	纹理信息在遥感图像分类中的应用	222
§ 8.8	计算机自动分类的新方法简介	223
8.8.1	模糊聚类算法	223
8.8.2	神经网络方法	223
8.8.3	面向对象分类技术	224
第9章	遥感技术的应用	230
§ 9.1	遥感技术在测绘中的应用	230
9.1.1	制作卫星影像地图	230
9.1.2	卫星影像修测地形图	232
9.1.3	陆地地形图测绘	233
9.1.4	浅水区的地形测绘	237
9.1.5	南极冰面地形地貌测绘	238
§ 9.2	遥感技术在环境和灾害监测中的应用	245
9.2.1	遥感方法快速监测洪涝灾情	246
9.2.2	遥感方法监测沙尘暴	246
9.2.3	遥感在森林火灾监测中的应用	247
9.2.4	臭氧层监测	249

9.2.5	卫星遥感监测南极冰川流速	250
9.2.6	遥感方法观测海洋赤潮	252
9.2.7	遥感监测海啸	253
9.2.8	武汉市水面和城区变化的遥感监测	254
§ 9.3	遥感技术在其他领域中的应用	256
9.3.1	遥感技术在地质调查中的应用	256
9.3.2	遥感技术在农林牧等方面的应用	265
9.3.3	遥感技术在考古和旅游资源开发中的应用	289
9.3.4	遥感方法探测南极陨石分布	299
9.3.5	遥感探测地外星空	301
参 考 文 献		308

第1章 电磁波及遥感物理基础

§ 1.1 概 述

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。空间中的电磁场、声场、势场等由于物体的存在而发生变化，测量这些场的变化就可以获得物体的信息，因而电磁波、机械波（声波）、重力场、地磁场等都可以用作遥感。例如：蝙蝠可以发射 25 000 ~ 70 000 Hz 的超强声波并接收这些声波的反射回波，进而它可以觅食或自由地飞行；人们利用重力场来探测地形变化或地质构造。但目前人们所说的“遥感”，一般是指电磁波遥感，它是利用电磁波获取物体的信息。本书着重讨论电磁波遥感技术。

遥感之所以能够根据收集到的电磁波来判断地物目标和自然现象，是因为一切物体，由于其种类、特征和环境条件的不同，而具有完全不同的电磁波的反射或发射辐射特征。因此遥感技术主要是建立在物体反射或发射电磁波的原理之上的。要深入学习遥感技术，首先要学习和掌握电磁波以及电磁波谱的性质。本章主要介绍电磁波的发射和反射特性、地物波谱特性曲线及应用等。

1.1.1 电磁波

根据麦克斯韦电磁场理论，变化的电场能够在它周围引起变化的磁场，这一变化的磁场又在较远的区域内引起新的变化电场，并在更远的区域内引起新的变化磁场。这种变化的电场和磁场交替产生，以有限的速度由近及远在空间内传播的过程称为电磁波。 γ 射线、X射线、紫外线、可见光、红外线、微波、无线电波等都是电磁波。电磁波是一种横波，如图 1-1 所示。

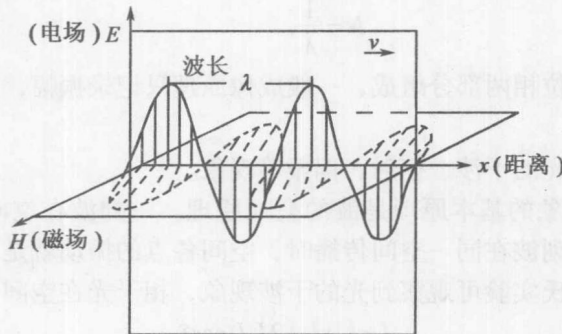


图 1-1 电磁波——横波

它还可以用下列方程组表示：

$$\begin{aligned} \frac{\mu}{c} \frac{\partial H}{\partial t} &= -\frac{\partial E}{\partial x} \\ \frac{\varepsilon}{c} \frac{\partial E}{\partial t} &= -\frac{\partial H}{\partial x} \end{aligned} \quad (1-1)$$

式中： ε ——介质的相对介电常数；

μ ——相对导磁率；

t ——时间；

c ——光速 (2.988×10^8 米/秒)；

E ——电场强度矢量；

H ——磁场强度矢量。

公式 (1-1) 说明随时间变化的磁场能激发电场，反之随时间变化的电场能激发磁场。

经分别对 x 和 t 微分，消去 H 项，电磁波在介质中传播速度则为

$$V = \frac{c}{\sqrt{\varepsilon\mu}} \quad (\varepsilon \geq 1, \mu \geq 1) \quad (1-2)$$

可见，电磁波在介质中的传播速度小于光速 c ，但在真空中的传播速度等于 c 。

电磁波既表现出波动性，又表现出粒子性，称波粒二象性。连续的波动性和不连续的粒子性是相互排斥，相互对立的；但两者又是相互联系并在一定的条件下可以相互转化的。可以说波是粒子流的统计平均，粒子是波的量子化。

1. 波动性

单色波的波动性可用波函数来描述，波函数是一个时空的周期性函数。其解析式如下：

$$\psi = A \sin [(\omega t - kx) + \varphi] \quad (1-3)$$

波	振	角时	圆空	初
函	幅	频间	波间	相
数		率变	数变	位
量	量	量	量	量

其中：

$$\omega = \frac{2\pi}{T} = 2\pi\nu;$$

$$k = \frac{2\pi}{\lambda} = 2\pi N;$$

$$N = \frac{1}{\lambda}.$$

波函数是由振幅和位相两部分组成，一般成像原理只记录振幅，只有全息成像时，才既记录振幅又记录位相。

光的波动性形成了光的干涉、衍射、偏振等现象。

(1) 干涉。干涉现象的基本原理是波的叠加原理。一列波在空间传播时，在空间的每一点都引起振动，当两列波在同一空间传播时，空间各点的振动就是各列波单独在该点产生的振动的叠加合成。杨氏实验可观察到光的干涉现象，相干光在空间一点叠加后的强度为：

$$I = I_1 + I_2 + 2I_1 I_2 \cos\delta \quad (1-4)$$

式中： I_1 和 I_2 为两列频率相同、振动方向相同，且具有固定位相关系的光波的强度；

δ 为上面所述两列光波的位相差；

I 为叠加后的强度。

一般地，凡是单色波都是相干波。取得时间和空间相干波对于利用干涉进行距离测量是相当重要的。激光就是相干波，它是光波测距仪的理想光源。微波遥感中的雷达也是应用了干涉原理成像的，其影像上会出现颗粒状或斑点状的特征，这是一般非相干波的可见光影像所没有的，对微波遥感的判读意义重大。

(2) 衍射。光线偏离直线路径的现象称为光的衍射。夫朗和费衍射装置的单缝衍射实验，可以观察到衍射现象。在入射光垂直于单缝平面时的单缝衍射图样中，可以看到中央有特别明亮的亮纹，两侧对称地排列着一些强度较小的亮纹，各条亮线的强度为：

$$I_{\theta} = I_0 \left(\frac{\sin \alpha}{\alpha} \right)^2 \quad (1-5)$$

式中： θ 为衍射角；

I_0 为衍射角等于 0 时的光强度；

I_{θ} 为衍射角等于 θ 时的光强度；

$\alpha = \frac{\delta}{2}$ ，即位相差的一半；

$$\delta = \frac{2\pi}{\lambda} \Delta L = \frac{2\pi a \cdot \sin \theta}{\lambda}$$

(ΔL 为衍射角 θ 时，单缝两端光线偏离直线后引起的光程差) (a 为单缝的宽度)。

如果单缝变成小孔，则单色平行光束照射小孔后，由于小孔衍射，在屏幕上出现的是一个亮斑，而是一个亮斑，亮斑周围还有逐渐减弱的明暗相间的条纹，其强度分布如图 1-2 所示。

一个物体通过物镜成像，实际上是物体上各点发出的光线，在屏幕上形成的亮斑组合而成。如距离很近的两个物点发出的光，经透镜在屏幕上形成两个亮斑，其叠加后的亮度分布如图 1-3 所示，当两个亮斑靠近到一定距离时，就叠合成一个峰值，也就是说原来两个物点在屏幕上已无法分辨。光学仪器刚刚能分辨两个物点的张角 θ_0 称为光学仪器的最小分辨角，它与物镜的孔径 d 成反比，与入射光的波长 λ 成正比，可由下式表示：

$$\theta_0 = 1.22 \frac{\lambda}{d} \quad (1-6)$$

最小分辨角的倒数称光学仪器的分辨本领。

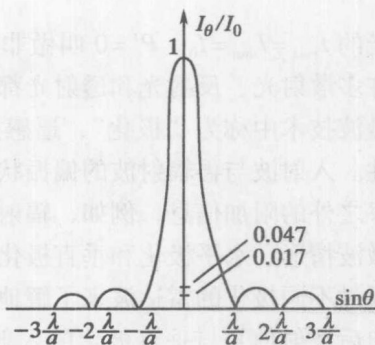


图 1-2 衍射光强度分布

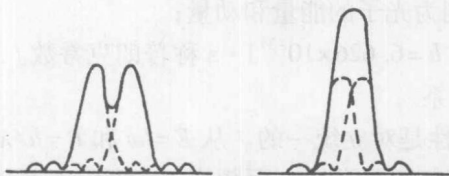


图 1-3 衍射引起的亮斑叠合与光学仪器的分辨能力

研究电磁波的衍射现象对设计遥感仪器和提高遥感图像几何分辨率具有重要的意义。另外，在数字影像的处理中也要考虑光的衍射现象。

(3) 偏振。电磁波是横波，由两个相互垂直的振动矢量即电场强度 E 和磁场强度 H 来表征。而 E 和 H 都与电磁波的传播方向相垂直，光是电磁波的特例。在光波中，产生感光作用和生理作用的是电场强度 E ，因此，将 E 称为光矢量， E 的振动称为光振动。

如果光矢量 E 在一个固定平面内只沿一个固定方向作振动，则这种光称为偏振光，和振动方向相垂直且包含传播方向的面称偏振面。分子、原子在某一瞬间所发出的光本是偏振的，光矢量具有一定的方向，但光源中由大量的分子或原子所发出的光，一个接一个以极快的不规则的次序取所有可能的方向，不可能保持一定的优势方向，所以自然光，如太阳光是非偏振的，在所有可能的方向上， E 的振幅都可以看作完全相等的。介于自然光和偏振光之间的称为部分偏振光，其偏振程度可以用偏振度 P' 来衡量：

$$P' = \frac{I_{\max} - I_{\min}}{I_{\max} + I_{\min}} \quad (1-7)$$

自然光的 $I_{\max} = I_{\min} = I_0$ ， $P' = 0$ 叫做非偏振光；偏振光的 $I_{\min} = 0$ 时， $P' = 1$ 叫全偏振光。

许多散射光、反射光和透射光都是部分偏振光，且其偏振度与有关物质的性质有关。偏振在微波技术中称为“极化”，遥感技术中的偏振摄影和雷达成像就利用了电磁波的偏振这一特性。入射波与再辐射波的偏振状态，在信息传递时起着重要的作用。它们提供除了强度和频率之外的附加信息，例如，辐射发射或散射性质。

微波情形、水平极化和垂直极化波照在同一地物目标界面上，反射率和相位是不同的。可以通过不同极化的雷达波来了解地面目标的信息。例如，当地面目标粗糙度小于辐射波长时，向后散射信号与垂直极化的入射角 ($20^\circ \sim 70^\circ$) 无关，而水平极化雷达向后散射强度依赖于入射角。像草地和道路两种地面目标，若采用水平极化波，它们的后向散射回波差异很大。如果地面粗糙度比波长大很多，则不存在这种关系。

2. 粒子性

粒子性的基本特点是能量分布的量子化。一个原子不能连续地吸收或发射辐射能，只能不连续地一份一份地吸收或发射能量，即光能有一最小单位，叫做光量子或光子，这种情况叫做能量的量子化。光子不仅具有一定的能量，而且还有一定的动量，能量与动量都是粒子的属性，因此，光子也是一种基本粒子。

实验证明，光子的能量 E 与其频率 ν 成正比，即

$$E = h\nu \quad (1-8)$$

光子的动量与其波长 λ 成反比，即

$$P = \frac{h}{\lambda} \quad (1-9)$$

上面两式中， E 、 P 分别为光子的能量和动量；

$$h = 6.626 \times 10^{-34} \text{ J} \cdot \text{s} \text{ 称普朗克常数。}$$

3. 波动性和粒子性的关系

电磁波的波动性与粒子性是对立统一的。从 $E = h\nu$ 和 $P = h/\lambda$ 两式中可以看出，能量 E 、动量 P 是粒子性的属性，可表征粒子性；而频率 ν ，波长 λ 是波动性的属性，可表征波动性，两者通过普朗克常数 h 联系起来，将此二式代入式 (1-3) 的单色波函数式则得

$$\psi = A \sin \frac{2\pi}{h} [(E_t - P_x) + \varphi_0] \quad (1-10)$$

式中：