第一章 绪 论

1.1 遥感的基本概念

遥感（Remote Sensing）是一种远距离的、非接触的目标探测技术和方法。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，从而实现对目标进行定位、定性或定量的描述。目标信息的获取主要是利用从目标反射和辐射来的电磁波，接收从目标反射和辐射来的电磁波信息的设备称之为传感器（Remote Sensor），如航空摄影中的航摄相机等。搭载这些传感器的载体称之为遥感平台（Platform），如航摄飞机、人造地球卫星等。由于地面目标的种类及其所处环境条件的差异，地面目标具有反射或辐射不同波长电磁波信息的特性，遥感正是利用地面目标反射或辐射电磁波的固有特性，通过观察目标的电磁波信息以达到获取目标的几何信息和物理属性的目的。图 1-1-1 表示遥感数据采集时的情况，图 1-1-2 表示不同地面目标所固有的电磁波特性受到太阳及大气等环境条件的影响后，再通过传感器收集并经过数据加工处理，最终应用到各种领域的数据流程。

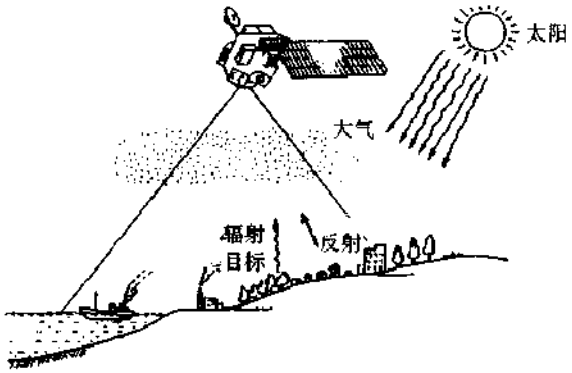
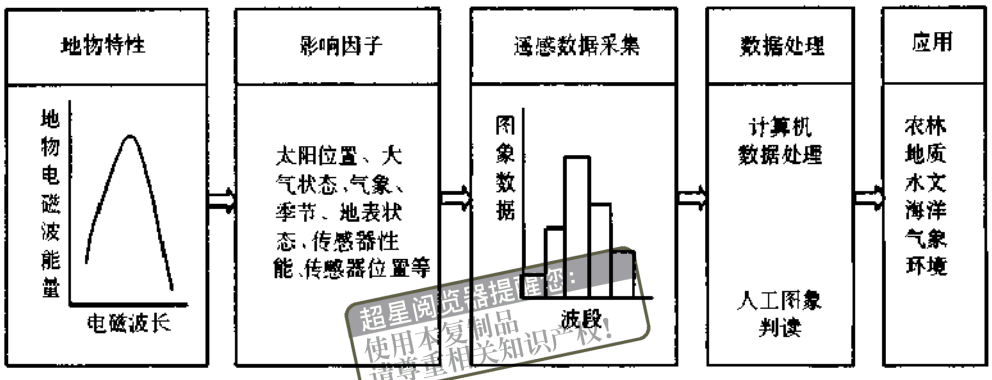


图 1-1-1 遥感数据采集示意图



超星阅览器提醒您：
使用本复制品
请尊重相关知识产权！

图 1-1-2 遥感数据流程图

遥感的应用领域非常广泛，从室内的近景摄影测量到大范围的陆地、海洋信息的采集以至全球范围内的环境变化监测，遥感技术都可以发挥巨大的作用。例如，利用遥感技术可以进行城市绿地植被的变化监测，可以制作全国范围的影象地图，可以掌握全球范围内的沙漠化等自然环境变化的情况。在海洋研究中，利用遥感技术可以收集到海面水位、混浊状况、海面温度等信息。在大气研究中，利用遥感技术可以调查大气中二氧化碳和臭氧等微量元素的组成，分析气象现象等。在环境变化监测等区域性和全球性的问题研究中，只有遥感技术才能从宏观上把握研究对象的变化规律，对其发展状况和发展趋势作出科学的结论。

1.2 遥感的发展历程和趋势

遥感作为一门综合性的技术是 20 世纪 60 年代提出来的。1960 年美国学者 E.L.Pruitt 为了比较全面地概括探测目标的技术和方法，把以摄影方式和以非摄影方式获得被探测目标的图象或数据的技术称作为“遥感（Remote Sensing)”，这个名词在 1962 年美国密执安大学等单位举行的环境科学讨论会上被正式采用。

航空遥感技术最早用在军事上，1903 年莱特兄弟发明了人类历史上第一架飞机，1915 年底世界上又有了第一台航空摄影专用相机，此后航空摄影技术被广泛应用于军事侦察领域，直到 1920 年以后航空摄影方法才开始在地质、土木工程中的勘察和制图、农业中的牧场土地调查等民用领域获得应用。第二次世界大战中，随着伪装技术的不断改进，普通的航空照相技术已不能完全准确地获取敌方目标的信息，因此出现了彩色、红外和光谱带照相技术。

多光谱空中摄影技术是航空遥感技术的重要发展。多波段摄影技术最早是由电影界实现的，20 世纪 60 年代初，科学家们开始把多谱段概念实际应用到地形特征的航空勘测上，最早是采用多相机型传感器获得多光谱图象，然后是采用多镜头型传感器获得多光谱图象，与此同时，还研制成功了多谱段彩色合成系统。

卫星遥感技术的广泛应用始于 20 世纪 70 年代。美国于 1967 年制定了地球资源技术卫星（ERTS）计划，1972 发射了第 1 颗地球资源技术卫星 ERTS-1，1975 年发射了第 2 颗地球资源技术卫星，由于在第 2 颗卫星发射前整个计划更名为陆地卫星（LANDSAT）计划，因此第 1 颗地球资源技术卫星 ERTS-1 被称为 LANDSAT-1，第 2 颗卫星被称为 LANDSAT-2，到目前该计划共发射了 6 颗卫星（第 6 颗卫星 1993 年 10 月发射后脱离轨道失去联系），现在运行的是 5 号卫星，LANDSAT-4、5 上载有多光谱扫描仪（MSS）和专题成图仪（TM）两种传感器，LANDSAT 的数据主要用于陆地资源调查和环境监测等领域。20 世纪 80 年代后，法国相继发射了 SPOT 系列卫星，欧空局相继发射了 ERS 系列卫星，日本发射了 JERS 系列卫星，印度相继发射了 IRS-1 系列卫星，俄罗斯发射了 ALMA22 卫星（1996 年）和 RESOURS-02 卫星（1995 年），加拿大 1995 年 11 月发射了 RADARSAT 雷达卫星，这些卫星多数已进入商业运行阶段，众多商业遥感卫星的应用使航天遥感技术进入了全面发展和应用的新阶段。

热红外成象技术和微波遥感技术是近十几年来发展起来的具有美好应用前景的两类遥感技术。利用热红外成象技术可以探测到地球表面的温度变化情况，而地球表面的温

度又和地表层中热辐射有关，由于热红外成象技术主要是利用地面目标的热辐射信息来成象的，因此可以日夜获得目标的数据，是一种全天时的遥感技术。微波遥感技术是靠地面目标反射从雷达发射来的电磁波成象的，由于它采用主动式的向目标发射电磁波的探测方法，因此可以在阴雨天和夜晚成象，是一种全天候的遥感技术。

随着传感器技术、航空和航天平台技术、数据通讯技术的发展，现代遥感技术已经进入一个能够动态、快速、准确、多手段提供多种对地观测数据的新阶段。新型传感器不断出现，已从过去的单一传感器发展到现在的多种类型的传感器，并能在不同的航天、航空遥感平台上获得不同空间分辨率、时间分辨率和光谱分辨率的遥感影象。现代遥感技术的显著特点是尽可能地集多种传感器、多级分辨率、多谱段和多时相技术于一身，并与全球定位系统（GPS）、地理信息系统（GIS）、惯性导航系统（INS）等高技术系统相结合以形成智能型传感器。

目前遥感应用正由定性向定量、静态向动态方向发展。遥感影象的空间分辨率已达到米级；光谱分辨率已达到纳米级，波段数已增加到数十甚至数百个；回归周期可达几天甚至十几小时，如 NOAA 的一颗卫星每天可对地面同一地区进行两次观测；微波遥感已逐渐采用多极化技术、多波段技术及多种工作模式。例如美国计划在 1999 秋季发射的商业卫星 ORBVIEW 可达到 1m 的空间分辨率，通过 45°任意方向旋转可获得同轨和异轨的高分辨率立体图象；美国计划 1998 年发射的 EOS 卫星上的 MODIS-N 传感器具有 35 个波段；加拿大 1995 年发射的 RADARSAT、欧空局的 ERS-1、日本的 JERS-1 和印度的 IRS-1C 等卫星中的微波遥感器已采用了多极化技术、多波段技术和多种工作模式。与遥感应用紧密相关的遥感信息处理理论和技术也有了实质性的进展。在遥感信息模型研究方面，已有热扩散系数遥感信息模型、表观热惯量遥感信息模型、土壤含水量遥感信息模型、作物旱灾损失估算遥感信息模型、土壤侵蚀量遥感信息模型、土地生产潜力遥感信息模型、三维海洋温度遥感信息模型、地质构造应力场遥感信息模型等许多成熟的研究成果。在遥感数据处理软件方面，国际上相继推出了一批高水平的遥感影象处理商业软件包，如加拿大 ERM 公司研制的 ER MAPPER、美国 ERDAS 公司推出的ERDAS IMAGINE、新加波 3-Link 公司研制的 ENVI 等遥感图象处理系统。所有这些都为遥感的应用奠定了坚实的基础。

我国在航空、航天遥感领域也有了重要的发展。利用航空遥感技术测制地形图已形成了完备的教学、科研和生产体系。此外中国还发展了两套重要的机载航空遥感系统，即高空机载遥感系统和洪水监测遥感系统。高空机载遥感系统以中国科学院 1986 年引进的两架赛斯纳奖状-Ⅱ型飞机为遥感平台，该机最高航速为 760km/h，最大航高为 13000m，最大航程 3300km，机上装有 LTN-72 型惯性导航系统，其中一架飞机安装了可见光和红外传感器，另一架飞机安装了微波传感器，该系统已在我国的资源环境调查、城市监测、工程规划、地质找矿、海岸调查和灾害监测等领域发挥了积极的作用。洪水监测遥感系统是水利部遥感中心 1987 年至 1989 年在国家科委的支持下建立的一套全天候、实时（准实时）洪水灾情监测遥感信息系统，机上安装的是 8mm 真实孔径的侧视雷达，该系统不仅可以使国家防汛指挥部观察到洪水的实况，迅速了解洪水的水位及其变化趋势，而且可以根据传回的洪水图象计算出洪水造成的损失，为科学决策提供依据。

超星网 [illegible]想想你：
[illegible]复制的[illegible]学权！
请尊重相关[illegible]

70 年代以来，我国先后发射了一系列返回式遥感卫星，研制了包括成象光谱仪和多极化合成孔径雷达在内的多种传感器。近年来，制定和实施了以气象卫星和资源卫星为代表的传输型对地观测计划以及雷达卫星计划。代表性的有“风云一号”气象卫星和“资源 1 号”卫星（中国和巴西间的国际合作计划）。进一步将在资源 1 号卫星的基础上发展以星载合成孔径雷达为主要载荷的雷达卫星，这种卫星既具有全球观测能力，又具有对中国七大江河主要洪涝灾区经常性的监测能力。

1.3 遥感技术系统的结构和功能

将遥感技术和方法应用到某个专业领域便构成了一个遥感技术系统。一个完整的遥感技术系统通常由三部分组成：空基系统、地基系统和研究技术支持系统。空基系统主要包括遥感平台、各种传感器、监视控制系统和遥感数据传输系统等，主要完成遥感数据的采集和传输工作。地基系统主要完成遥感数据的接收、处理存档、分发和应用开发工作。研究技术支持系统主要完成定标、地面试验、光谱数据测量等基础性工作以及与遥感发展和应用密切相关的高技术研究和开发任务。遥感技术的三个组成部分既有分工，又相互紧密联系，共同完成遥感技术系统能够对地面目标进行探测、进而实现目标定位、定性或定量描述的目的。图 1-3-1 是中国科学院“七五”期间建立的航空遥感系统的功能和结构框图。

从遥感技术系统的结构和功能来看，遥感技术的研究内容非常广泛，它涉及到电磁波理论、传感器理论、航空航天平台技术、信号接收和处理技术、遥感信息处理技术和专业领域知识等许多学科的内容，遥感工作者应当努力学习有关的知识并跟踪这些领域内的最新进展，及时地将遥感的最新成果应用到自己的专业领域中来。从应用的角度来看，各领域内的遥感科技工作者应重点掌握各种遥感图象的成象机理、各类遥感图象的几何特性和物理特性、遥感数据处理原理和应用方法等内容。本书正是从这一考虑出发，在比较全面地介绍遥感技术主要内容的同时，重点阐述地物光谱知识、传感器及其图象特性、遥感图象几何和辐射处理方法、遥感影象信息增强和遥感图象分类等内容。希望本书的内容能对读者学习和应用遥感技术的基本理论有所帮助。

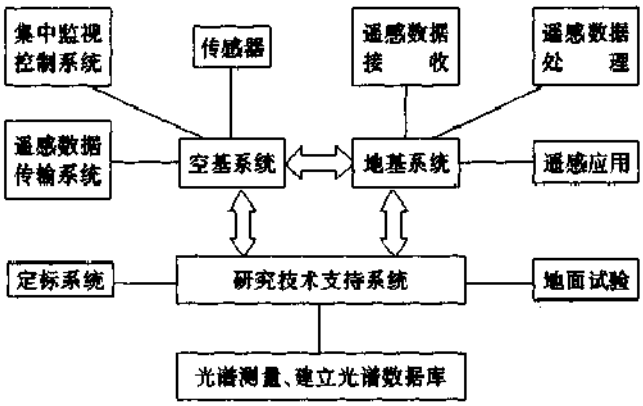


图 1-3-1 航空遥感技术系统的功能和结构框图

1.4 本书的主要内容和安排

遥感作为一门综合性的技术，它涉及到多学科的内容，任何一本书籍要想包含遥感技术的全部内容是不可能的。本书力争把与遥感应用有关的遥感图象获取与处理的基本知识、基本理论和基本方法介绍给读者。本书共分八章，各章节内容安排如下：

第一章，绪论，介绍了遥感的基本概念，回顾并总结了遥感技术的发展历程和发展趋势，分析了遥感技术系统的基本结构和基本功能，使读者建立遥感技术的整体概念。

第二章，系统阐述了电磁波的基本概念、地物反射和辐射电磁波的特性、大气对电磁波传输过程的影响。地物反射或辐射的电磁波信息是遥感成象的基础，也是遥感影象判读、处理和分析的依据。

第三章，介绍了遥感平台的种类，重点讨论了与遥感影象几何处理密切相关的卫星位置和姿态的描述和测量方法、LANDSAT 卫星系统和 SPOT 卫星系统的组成、轨道参数、观测仪器、观测数据和应用范围，还介绍了部分正在和将要实施的遥感卫星计划。

第四章，重点讨论了摄影型传感器、扫描型传感器、侧视成象雷达等传感器的成象机理、成象过程和成象特点以及这些传感器所获取图象的几何特性和物理特性。本章的内容是非常重要的，是遥感图象解译、处理和分析的基础。

第五章，简要介绍了遥感图象的判读特征和目视判读方法。

第六章，简要介绍了遥感图象辐射量误差的来源和校正方法，详细讨论了遥感图象几何误差产生的原因以及画幅式影象、SPOT 影象和 SAR 影象的几何校正方法和过程。

第七章，重点介绍了彩色合成、遥感信息融合、主成分分析、K-T 变换、植被指数特征提取和应用等遥感影象信息处理中的特有方法。

第八章，详细讨论了多光谱遥感图象分类（识别）的原理以及几种监督分类和非监督分类算法，介绍了概率松弛法在遥感图象分类中应用、混合象元分类的概念、非光谱信息的应用和基于知识的遥感图象分类的基本情况。

为了便于读者了解遥感信息处理技术的现状，本书附录部分还简要介绍了遥感图象处理软件的基本情况。

应当指出，遥感图象获取与分析涉及到许多学科中的问题，本书不可能包含这方面的全部内容。希望本书能够帮助读者建立遥感图象处理与分析的理论框架，为进一步应用遥感技术奠定基础。

第二章　遥感基础

不同类型的地物具有反射或辐射不同波长电磁波的特性，遥感技术是利用地物反射和辐射电磁波的固有特性来探测地面目标的。因此，关于电磁波辐射的基本原理就成为遥感技术的理论基础，本章仅从“遥感”的角度简述一些有关问题。

2.1　电磁波与电磁波谱

2.1.1　电磁波的概念

超星阅览器提醒您：
非复制品
请遵重相关版权法规！

在真空中或介质中通过传播电磁场的振动而传输电磁能量的波叫电磁波，如光波、热辐射、微波、无线电波等。电磁波是通过电场和磁场之间的相互联系和转化传播的，是物质运动能量传递的一种特殊形式，即空间任一处只要存在着电磁场，也就存在着能量，任何变化的电场都将在它的周围产生变化的磁场，而变化的磁场又会在它周围感应出变化的电场。在电磁波里，电场强度矢量 E 和磁场强度矢量 H 相互垂直，并且都垂直于电磁波的传播方向 x，故电磁波是一种横波，如图 2-1-1 所示。

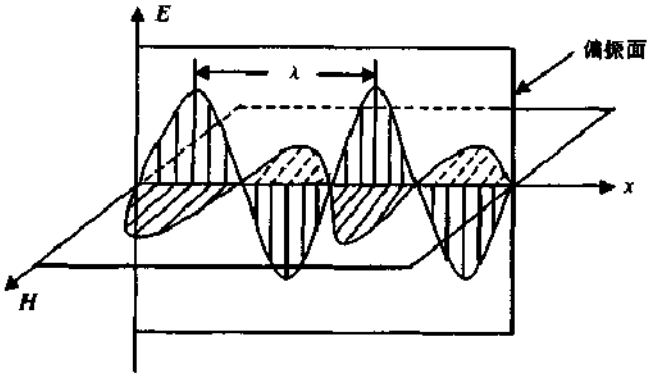


图 2-1-1　电磁波

根据麦克斯的电磁场理论，可写出下列方程组

$$\frac{\mu}{c}\frac{\partial H}{\partial t}=-\frac{\partial E}{\partial x},\qquad \frac{\varepsilon}{c}\frac{\partial E}{\partial t}=-\frac{\partial H}{\partial x} \tag{2-1-1}$$

式中 ε 为介质的相对介电常数，μ 为相对导磁率，c 为光速，t，x 分别为时、空变量。将（2-1-1）中的第一式对 x 微分，第二式对 t 微分，消去 H 项得

$$\frac{\partial^2 E}{\partial t^2}=\frac{c^2}{\varepsilon\mu}\frac{\partial^2 E}{\partial x^2} \tag{2-1-2}$$

这就是电磁波的波动方程，与物理学中波动方程相比，电磁波的电场强度在媒介中沿 x 方向的传播速度 v 为

$$v = \frac{c}{\sqrt{\varepsilon \cdot \mu}}$$

电磁波的波长 λ 与频率 ν 和速度 v 之间有以下关系：

$$\lambda = \frac{v}{\nu}$$

在真空中，$\varepsilon = \mu = 1$，所以电场强度在真空中传播的速度与光速一致。可以证明，磁场强度 $\boldsymbol{H}$ 也具有与 $\boldsymbol{E}$ 相同的波动特性，由于目前遥感中所记录的主要是电磁波的电场强度，此处就不再对 $\boldsymbol{H}$ 作进一步讨论。

2.1.2 电磁波的产生

一切物质都会反射、吸收、透射和辐射电磁波，不同性质、结构的物质会产生不同波长的电磁波。电磁波波长尤其与物质的原子能级、分子能级和固体能级有直接关系。

超星阅览器提醒您
使用本复制品
请尊重相关知识产权!

1. 原子光谱

原子由原子核及核外电子组成。原子核外电子的分布遵循最低能量原理，即电子按其具有能量的大小顺序排列在不同的轨道上。一般电子处于最低能级，称为基态。如果外界供应能量，电子会跃迁到高能级位置，处于激发态。但激发态极不稳定，大约只有 10^{-8}s 就要跳回基态。从激发态跃迁至基态就会放出光子而发光。例如，氢原子由 1 个原子核和 1 个电子组成，如图 2-1-2 所示。氢原子的电子处在低能级（E_1）状态，如果此时该电子被外来电磁波照射，它就会吸收部分能量而造成能级提高使之处于高能级（E_2）状态，同时使电子向上一级轨道移动。这时电子所吸收的能量为 $\Delta E = E_2 - E_1$，根据电磁波频率、波长、速度之间的关系及能量公式有

$$\Delta E = E_2 - E_1 = \frac{hc}{\lambda} \tag{2-1-3}$$

处于激发态的电子在瞬间内又会释放 ΔE 的能量而返回至基态，同时又辐射出光子，该光子的波长 λ_H 为

$$\lambda_H = \frac{hc}{\Delta E} \approx \frac{1.24}{\Delta E} \ (\mu\text{m}) \tag{2-1-4}$$

也就是说，氢原子内部状态的变化是由于吸收了固定波长 λ_H 的电磁波而产生的。相反，当能级从 E_2 向 E_1 变化时，就会从氢原子中辐射出波长为 λ_H 的电磁波，并且由式（2-1-4）就可以算出各能级间电子跃迁放出的光子的波长。

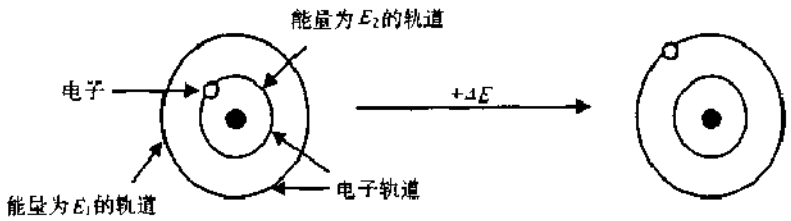


图 2-1-2 吸收电磁波后氢原子的电子状态的变化

一般来说，电子绕核运动处于一个确定的能量运动状态之中时，原子不发光；当原子中的电子能级变化时可能发光。当它从较高能级跃迁到较低能级时形成发射光谱；当

它从较低能级跃迁到较高能级时，形成吸收光谱。原子光谱主要指由于外层电子的跃迁而产生的紫外线、可见光和近红外线。一般因电子能级跃迁而产生的原子光谱范围为0.062～1.24μm。

2. 分子光谱

分子是由一个以上的原子组成的稳定的最小实体。在分子中原子与原子之间靠化学键联结在一起。因此分子内部的电子运动比原子内部的电子运动要复杂得多。除了电子跃迁外，还有分子内的原子振动和整个分子的转动。不同的振动方式产生不同波长的光子。分子同原子一样具有能量 E，它由3部分组成：电子能级的能量 E_e，振动能级的能量 E_v；转动能级的能量 E_r，即

$$E = E_e + E_v + E_r \tag{2-1-5}$$

由于分子的能量包含3种类型的能量，分子光谱也就包括了相应的电子光谱、振动光谱和转动光谱。分子光谱的范围为：

分子光谱	电子光谱	0.062～1.24μm	紫外、可见光、近红外
	振动光谱	1.24～24.8μm	中红外、热红外
	转动光谱	24.8μm～1.24cm	远红外、微波

超星阅览器提示：
此为试读，需要完整PDF请访问：
使用本产品制品
相关知识产权

3. 晶体光谱

在晶体中原子按着一定的规则集聚在一起，在三维空间中形成各种晶格，晶格在三维空间中周期性重复排列，形成晶体。晶体的种类有14种。晶体中的吸收与发射光谱的机理远比原子和分子复杂。产生光子辐射的因素主要是电子能级的跃迁和晶格的振动。晶体的吸收与发射光谱是一个连续光谱，其范围大约在红外区3～30μm处。

2.1.3 电磁波的性质

电磁波既表现出波动性，又表现出粒子性，即所谓的波粒二象性。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的，在一定条件下可以相互转化。

1. 波动性

电磁波（单色）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，其解析表达式如下

$$\Psi = A \cdot \sin\left[(\omega t - kx) + \varphi_0\right] \tag{2-1-6}$$

其中 Ψ 为波函数，A 为振幅，ω 为角频率，t 为时间变量，k 为圆波数$\left(k = \frac{2\pi}{\lambda}\right)$，$x$ 为空间变量，φ_0 为初相位。其波长 λ、频率 ν、传播速度 c 有如下关系

$$c = \frac{\lambda}{T} = \lambda \cdot \nu \tag{2-1-7}$$

由（2-1-6）式可知：波函数是由振幅和相位两部分组成，对电磁波来讲，振幅表示电场振动的强度，振幅的平方与电磁波具有的能量大小成正比。一般成象时只记录振

幅，只有全息成象时才同时记录振幅和相位信息，正是因为记录了振幅与相位全部信息，所以这种成象方法被称作“全息”成象。电磁波的波动性体现在它具有干涉和衍射现象。干涉现象是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振动的叠加合成。衍射是指光线偏离直线路程的现象。

电磁波是横波，由相互垂直的电场矢量 E 和磁场强度矢量 H 来表征，并且电场矢量 E 和磁场强度矢量 H 都与电磁波的传播方向 x 垂直。如果电场矢量 E 在一个固定的平面内沿一个固定方向作振动，则称该电磁波是偏振的，包含电场矢量 E 的平面称为偏振面。对于自然光，由于光源中由大量的分子或原子所发出的光以极快的不规则的次序在所有可能的方向进行振动，不可能保持某些方向上的优势，在所有可能的方向上 E 的振幅可以看作是相等的，所以自然光（如太阳光）是非偏振的。介于自然光和偏振光之间的称为部分偏振光。偏振在微波遥感中又称为“极化”。

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能量，只能不连续地一份一份地吸收或发射能量。光能有一最小单位，叫做光量子或光子，电磁波的这种特性叫做能量的量子化。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

$$E = h \cdot \nu \tag{2-1-8}$$

光子的动量与其波长 λ 成反比，即

超星阅读器提醒你：
使用本复制品
请尊重相关知识产权！

$$P = \frac{h}{\lambda} \tag{2-1-9}$$

式中 $h = 6.625 \times 10^{-27}$ 尔格秒，称为普朗克常数。

2.1.4 电磁波谱

电磁波产生的方式是多种多样的，例如电磁振荡，晶格或分子的热运动，晶体、分子或原子的电子能级跃迁，原子核的振动与转动，内层电子的能级跃迁，原子核内的能级跃迁等等，其波长变化范围很大，主要应用部分约跨 18 个数量级，从 $10^{-11} \sim 10^{6}$ 厘米。尽管电磁波的波长不同，但它们在真空中的传播速度都是相等的。依据 $c = \lambda \cdot \nu$ 和 $E = h \cdot \nu$ 可知，波长愈短，频率愈高，能量愈大。无线电波、微波、红外线、可见光、紫外线、X 射线、γ 射线等都是电磁波。按电磁波在真空中波长或频率依顺序划分成波段，排列成谱即为电磁波谱。如图 2-1-3 及表 2-1-1 所示。

表 2-1-1 电磁波的分类及其名称

名称		波长范围	频率范围
紫外线		10nm～0.4μm	750～3000THz
可见光		0.4～0.7μm	430～750THz
红外线	近红外	0.7～1.3μm	230～430THz
	短波红外	1.3～3μm	100～230THz
	中红外	3～8μm	38～100THz
	热红外	8～14μm	22～38THz
	远红外	14μm～1mm	0.3～22THz

续表

名称			波长范围	频率范围
电波	亚毫米波		0.1mm～10mm	0.3～3THz
	微波	毫米波（EHF）	1～10mm	30～300GHz
		厘米波（SHF）	1～10cm	3～30GHz
		分米波（UHF）	0.1～1m	0.3～3GHz
	超短波（VHF）		1～10m	30～300MHz
	短波（HF）		10～100m	3～30MHz
	中波（MF）		0.1～1km	0.3～3MHz
	长波（LF）		1～10km	30～300KHz
	超长波（VLF）		10～100km	3～30KHz

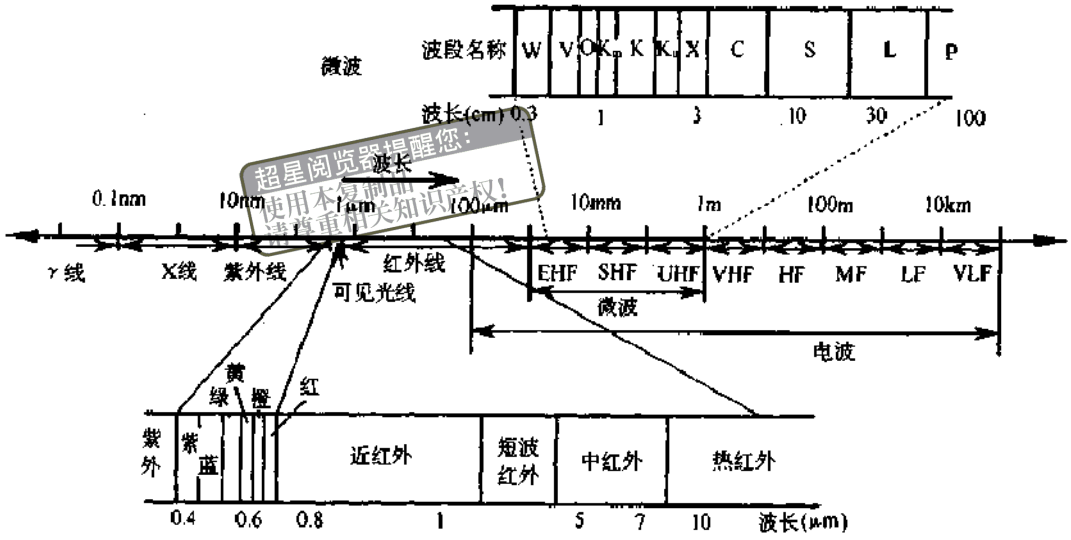


图 2-1-3　电磁波谱

目前遥感应用的各波段及特性如下：

1．紫外线

紫外线的波长在0.01～0.4μm之间，主要源于太阳辐射。由于太阳辐射通过大气层时的被吸收现象，只有0.3～0.4μm的紫外线能部分地穿过大气层，但散射严重。因此大多数地物在该波段的反差较小，仅部分地物如荧石和石油在此波段可以表现出来，除在石油普查勘探中紫外遥感可发挥一定作用外，在其他遥感应用领域较少使用。另外，由于大气层中臭氧对紫外线的强烈吸收与散射作用，紫外遥感通常在2000m高度以下范围进行。

2．可见光

可见光波长在0.4～0.7μm之间，主要源于太阳辐射。尽管大气对它也有一定的吸收和散射作用，它仍是遥感成象所使用的主要波段之一，利用可见光成象的手段有摄影和扫描两种方式。在此波段大部地物都具有良好的亮度反差特性，不同地物在此波段的

图象易于区分。为进一步探测地物间的细微差别，可将此波段分为红（0.6～0.7μm）、绿（0.5～0.6μm）、蓝（0.4～0.5μm）、以及仅有十几埃差的二百多个不同波段分别对地物进行探测，这种分波段成象的方法一般称之为多光谱遥感。航空、航天遥感成象中均用到可见光波段。

3. 红外线

红外线波长在0.7μm～1mm之间，近红外和短波红外主要源于太阳辐射，中红外和热红外主要源于太阳辐射及地物热辐射，而远红外主要源于地物热辐射。红外线波段较宽，在此波段地物间不同的反射特性和发射特性都可以较好地表现出来，因此该波段在遥感成象中有重要的应用。由于摄影胶片感光范围的限制，除近红外波段可用摄影成象外，其他波段不能用于摄影成象，而整个红外线波段均可用于扫描成象。在整个红外线波段内进行的遥感称之为红外遥感，按其内部波段的详细划分又可将红外遥感分为近红外遥感、热红外遥感等。红外线波段均可用于航空和航天遥感。

4. 微波

使用微波的遥感称之为微波遥感。微波波长在0.001～1米之间，由于其波长比可见光、红外线要长，受大气层中云、雾的散射干扰要小，因此能全天候进行遥感。由于地物在微波波段的辐射能量较小，为了能够利用微波的优势进行遥感，一般由传感器主动向地面目标发射微波，然后记录地物反射回来的电磁波能量，因此这种遥感又称为主动遥感。由于微波遥感是采用主动方式进行的，不受光照等条件的限制，白天、晚上均可进行地物的微波特性成象，因此微波遥感是一种全天时的遥感技术。微波波段在航空、航天遥感中均能应用。

2.2 物体的电磁波发射特性

2.2.1 辐射量的定义

超星阅览器提醒您：
使用本复制品
请尊重相关知识产权！

在遥感中需要测量从目标反射或目标本身发射的电磁波的能量，这项工作称之为辐射量的测定。辐射量的测定有两种方式：辐射测量和光度测量，它们使用不同的术语和单位。辐射测量是以γ射线到电波的整个波长范围为对象的物体辐射量的测定，而光度测量是对人类具有视觉感应的波段（即可见光）所引起的知觉的量的测定。为了明确所测量的量，定义了一些基本术语，图2-2-1给出了辐射测量中所使用的基本术语和定义。

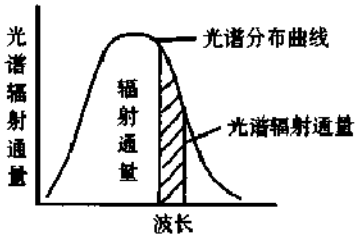
辐照度（Irradiance）是面上接收电磁波时的术语，而辐射出射度（Radiant Emittance）是从面上辐射电磁波时的术语。辐射强度（Radiant Intensity）是关于点辐射源的术语，而辐射亮度（Radiance）是同一概念上关于面辐射源的术语。在辐射亮度的定义中，所谓“外表的单位面积”是指从受到辐射的方向上看过去的单位面积，它是以投射到与辐射方向成正交的平面上的正射投影为单位面积的物体表面部分的面积。在图2-2-1的术语中，辐射亮度是遥感中使用最多的术语，这是因为传感器采集到的数据与辐射亮度有对应关系。

在辐射测量的各个量中，当加上“光谱（Spectral）”这一术语时，则是指单位波长

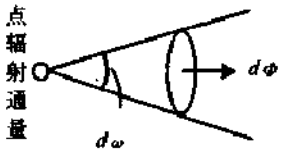
宽度的量，如光谱辐射通量（Spectral Radiant Flux）、光谱辐射亮度（Spectral Radiance）等。

辐射能量 Q_e
以电磁波形式传播的能量。

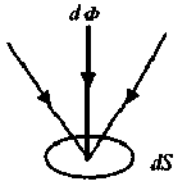
辐射通量 Φ
在单位时间内传送的辐射能量。
$\Phi = dQ_e / dt$



辐射强度 I_e
在单位立体角、单位时间内，从微小辐射源向某一方向辐射的辐射能量。
$I_e = d\Phi / d\omega$

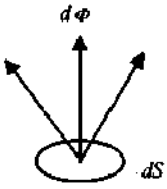


辐射照度 E_e
在单位时间内、单位面积上接受的辐射能量。
$E_e = d\Phi / dS$



超星阅览器提示：
使用本产品
请尊重相关知识产权！

辐射出射度 M_e
在单位时间内、从单位面积上辐射出的辐射能量。
$M_e = d\Phi / dS$



辐射亮度 L_e
在单位立体角、单位时间内、从外表的单位面积上辐射出的辐射能量。
$L_e = d\Phi / (d\omega \cdot dS \cdot \cos\theta)$

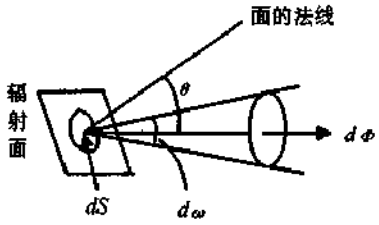


图 2-2-1　辐射测量中的基本术语和定义

2.2.2　黑体辐射

温度大于绝对温度 0K（－273.16℃）的任何物体都具有发射电磁波的能力。地球上的所有物体的温度都大于 0K，因此地球上的所有物体都具有发射电磁波的能力。地物的电磁波发射能力主要与它的温度有关。为了衡量地物发射电磁波能力的大小，常以黑体辐射作为度量的标准。

黑体也称绝对黑体，是指能全部吸收外来电磁波辐射而毫无反射和透射能力的理想物体。1860 年，基尔霍夫得出了好的吸收体也是好的辐射体的定律。黑体不仅能全部

吸收外来电磁波辐射，而且在发射电磁波的能力方面，比同温下的任何其他物体都要强。在黑体辐射中存在各种波长的电磁波，辐射的电磁波波长和能量大小与它自身温度有关。1900 年普朗克用量子论的概念推导出了黑体的热辐射定律，该定律表明了黑体辐射通量密度与其温度和辐射波长有如下关系

$$W_\lambda = \frac{2\pi hc^2}{\lambda^5} \cdot \frac{1}{e^{ch/\lambda kT} - 1} \tag{2-2-1}$$

式中：W_λ 为分子谱辐射通量密度，单位为（W/m^3）；

h 为普朗克常数（$h = 6.626 \times 10^{-34} W \cdot s^2$）；

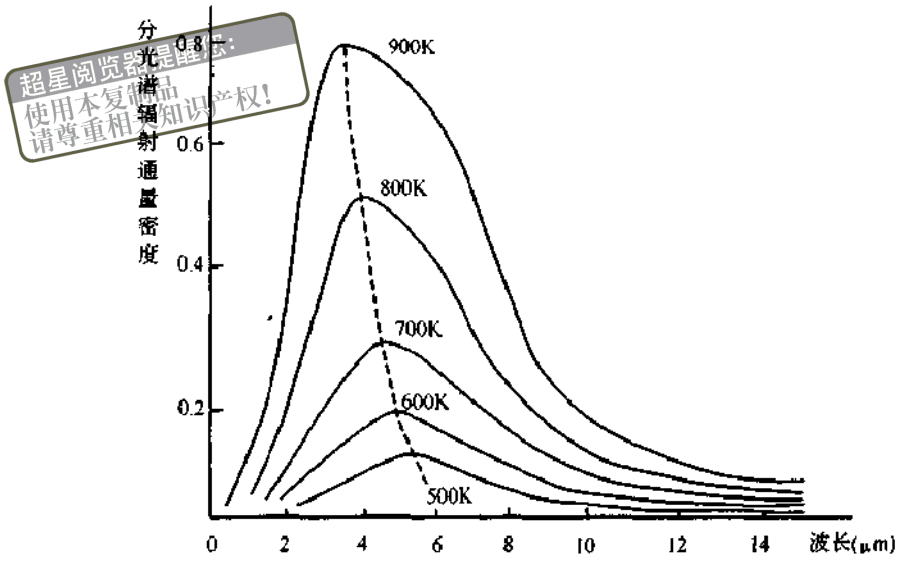
k 为波耳兹曼常数（$k = 1.38 \times 10^{-23} W \cdot s/K$）；

λ 为波长，单位为 m；

c 为光速（$c = 3 \times 10^8 m/s$）；

T 为黑体的绝对温度，单位为 K。

从（2-2-1）式可以看出：W_λ 与 T 和辐射能量的波长 λ 有关。以 T 为第一变量、λ 为第二变量可在直角平面坐标系中绘出 W_λ 与 T、λ 的关系曲线（如图 2-2-2 所示）。该曲线也叫做黑体的波谱辐射曲线。从图 2-2-2 中可以直观地看出黑体辐射的三个特性。



超星阅览器提醒您：
使用本复制品
请尊重相关知识产权！

图 2-2-2　各种温度下的黑体波谱辐射曲线

①与曲线下的面积成正比的总辐射通量密度 W 随温度 T 的增加而迅速增加。总辐射通量密度 W 可在从零到无穷大的波长范围内对普朗公式进行积分求得，即

$$W = \int_0^{+\infty} \frac{2\pi hc^2}{\lambda^5} \cdot \frac{1}{e^{ch/\lambda Tk} - 1} d\lambda$$

于是得到从 $1m^2$ 的面积上黑体辐射到半球空间中的总辐射通量 W 为

$$W = \sigma T^4 \tag{2-2-2}$$

式中 $\sigma = \frac{2\pi^5 k^4}{15c^2 h^3} = 5.67 \times 10^{-8} W/(m^2 \cdot K^4)$，称为斯蒂芬-玻耳兹曼常数，该式也称为斯蒂芬-玻耳兹曼定律。

(2-2-2) 式表明，黑体辐射通量密度的增加与其绝对温度的 4 次方成正比，即温度愈高，黑体辐射的能量愈大，被遥感器记录的能量也愈大；反之亦然。这说明不同温度的物体具有不同的辐射能量，记录下它们之间的辐射能量差别就为区别它们提供了基础。这也是在遥感图象上识别不同物体的基础。

②分谱辐射通量密度的峰值波长 λ_m 随温度的增加而向短波方向移动。对普朗克公式微分并求极值

$$\frac{\partial W_\lambda}{\partial \lambda}=\frac{-2\pi hc^2\left[5\lambda^4\left(e^{\frac{hc}{\lambda kT}}-1\right)-\lambda^5 e^{\frac{hc}{\lambda kT}}\cdot\frac{hc}{\lambda^2 kT}\right]}{\lambda^{10}\left[e^{\frac{hc}{\lambda kT}}-1\right]^2}=0$$

可得：

$$\lambda_m T=2.8978\times10^{-3}\text{m}\cdot\text{K} \tag{2-2-3}$$

(2-2-3) 式也称为维恩位移定律。它表明辐射的峰值波长 λ_m 与黑体的温度成反比，即温度愈高，λ_m 愈小。由图 2-2-2 也可看出，黑（物）体间辐射通量密度区别最明显处就在其 λ_m 附近，所以通过记录某物体的 λ_m 处的辐射特性来识别它最为便利。维恩位移定律为识别特定物体而设计遥感器的响应波段提供了理论基础。

使用本会员知识产权

③ 每根曲线彼此不相交，故温度越高，所有波长上的 W_λ 也越大，即 W_λ 随 T 的增大而增大。该特性表明，不同温度的黑（物）体，在任何波段处的辐射通量密度 W_λ 是不同的；由于不同温度的黑体间的 W_λ 不同，在分波段记录的遥感图象上它们是可区别的。

在长波（微波）区，黑体辐射通量密度 W_λ 已经很小，将普朗克公式中的波长用频率变量代替可得

$$W_v=\frac{2\pi hv^3}{c^2}\cdot\frac{1}{e^{hv/kT}-1} \tag{2-2-4}$$

倘若考虑是朗伯体，则辐射亮度为

$$L_v=\frac{2hv^3}{c^2}\cdot\frac{1}{e^{hv/kT}-1} \tag{2-2-5}$$

在波长大于 1mm 的微波波段的上，$hv\ll kT$，展开 $e^{hv/kT}$ 为级数形式

$$e^{hv/kT}=1+\frac{hv}{kT}+\frac{(hv/kT)^2}{2!}+\frac{(hv/kT)^3}{3!}+\cdots=1+\frac{hv}{kT}$$

则

$$L_v=\frac{2kT}{\lambda^2} \tag{2-2-6}$$

此式表示黑体发射的微波亮度与温度 T 和波长 λ 之间的关系。若在微波波段从 λ_1 到 λ_2 积分，则

$$L=\int_{\lambda_1}^{\lambda_2}\frac{2kT}{\lambda^2}d\lambda=-\frac{2kT}{\lambda}\ (\lambda_2-\lambda_1) \tag{2-2-7}$$

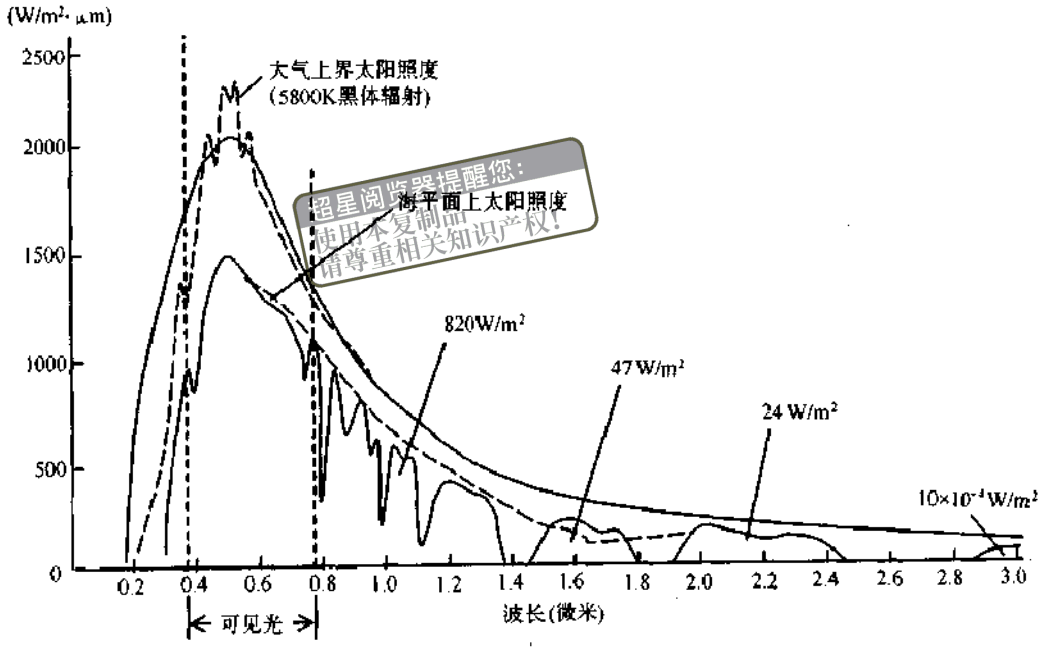
由此可见，黑体的微波辐射亮度与温度的一次方成正比。

2.2.3 太阳的波谱辐射特性

在电磁波遥感技术中，传感器从空中接收地物反射的电磁波主要来源于太阳的电磁

波辐射。地物的电磁波辐射特性也与太阳的照射有密切关系。当把太阳辐射近似地看作是黑体辐射时，它的表面温度约为 5900K，它送到地球的能量约为 1.72×10^{16}J/s，它所辐射的峰值波长 λ_m 在 0.47～0.50μm 之间变动。太阳辐射在大气上界处的垂直入射辐射通量密度称为太阳常数，平均太阳常数为 1.4×10^{3}W/m^2。由于地球围绕太阳沿椭圆轨道运行，在地球大气外层处的日地距离是变化的，所以在单位时间、单位面积上接受的太阳辐射能量也是变化的，即上述太阳常数值是平均值。由于大气中大气成份对电磁波传输的影响，通过大气层到达地面的有效辐射通量密度为 9.03×10^{2}W/m^2，只占太阳直接辐射于大气上界的 64.5%。

图 2-2-3 给出了日地平均距离上太阳辐照度分布曲线。事实上，因地球绕太阳沿椭圆轨道运行，近日点的日地距离为 1.47×10^{11}m，远日点的日地距离为 1.54×10^{11}m，日地距离是随四季变化的。同样，太阳常数值在近日点和远日点分别约为 1.438×10^{3}W/m^2 和 1.345×10^{3}W/m^2。由此可见，由日地距离引起的太阳辐射通量密度的年内变化可达 7%。



超星阅览器提醒您：
使用本复制品
请尊重相关知识产权！

图 2-2-3　太阳光谱辐射照度分布曲线

太阳的辐射光谱从 X 射线一直延伸到无线电波，但绝大部分辐射能量集中在 0.2～3.0μm 之间，在其他波段的辐射能量已经非常微弱。若把太阳对地面的有效辐射通量密度视为 903W/m^2 时，地面接受到的太阳辐射通量密度按波段分布大致如下：

0.2～1.4μm	820W/m^2	占 90.8%
1.4～1.8μm	47W/m^2	占 5.2%
1.8～2.5μm	24W/m^2	占 2.6%
3.0～4.2μm	10W/m^2	占 1.1%
4.5～5.5μm	1.6W/m^2	占 0.18%
7.5～14μm	1.0W/m^2	占 0.11%

2.2.4 地物的波谱发射特性

地物除了自身有一定温度之外，还有因吸收太阳光等外来能量而受热增温的现象。一般地物的温度都高于绝对零度，都会发射电磁波。在相同温度下，地物的电磁波发射能力较同温下黑体的辐射能力要低。地物的发射能力常用波谱发射率来表示。

1. 地物波谱发射率

单位面积上地物发射的某一波长的辐射通量密度 W'_λ 与同温下黑体在同一波长上的辐射通量密度 W_λ 之比，称为地物波谱发射率，记为 ε_λ，即：

$$\varepsilon_\lambda = \frac{W'_\lambda}{W_\lambda} \tag{2-2-8}$$

表 2-2-1 常温下部分地物的 ε_λ

地物名称	ε_λ	地物名称	ε_λ
人体皮肤	0.99	大理石	0.95
木板	0.98	玄武岩	0.69
柏油路	0.93	花岗岩	0.44
土路	0.83	石油	0.27
干沙	0.95	灌木	0.98
混凝土	0.90	麦地	0.93
橡木板	0.90	稻田	0.89
粗钢板	0.82	黑土	0.87
石英	0.89	黄粘土	0.85
铝（光面）	0.04	草地	0.84

一般情况下，不同地物有不同的 ε_λ，同一地物在不同波段的波谱发射率也不相同。不同地物间的波谱发射率的差异也代表了地物间发射能力的不同，发射率大的地物，其发射电磁波的能力强。表 2-2-1 列出了常温下部分地物的发射率，表 2-2-2 列出了岩石在不同的温度时 ε_λ 的变化情况。

表 2-2-2 岩石的 λ_λ 随 T 变化情况

温度 \ 岩石	石英岩	花岗岩	温度 \ 岩石	石英岩	花岗岩
-20℃	0.694	0.787	20℃	0.621	0.780
0℃	0.682	0.783	40℃	0.664	0.777

2. 地物的波谱发射特性曲线

地物在不同波段上发射的辐射通量密度不同，即其波谱发射率 ε_λ 不同，以 ε_λ 为纵轴，以波长 λ 为横轴，将 ε_λ 与 λ 的对应关系在平面直角坐标系中绘制成曲线，该曲线称为地物的波谱发射特性曲线，如图 2-2-4 所示。由图 2-2-4 可以看出，实际地物的发射分两种情况。一种地物的发射率在各波长处不同，即 $\varepsilon_\lambda = f(\lambda)$；另一种地物的发射率在各波长处基本不变，即 $\varepsilon_\lambda = \varepsilon$。按 ε_λ 的变化情况我们把地物分为以下几种类型：

①绝对黑体，$\varepsilon_\lambda = 1$；

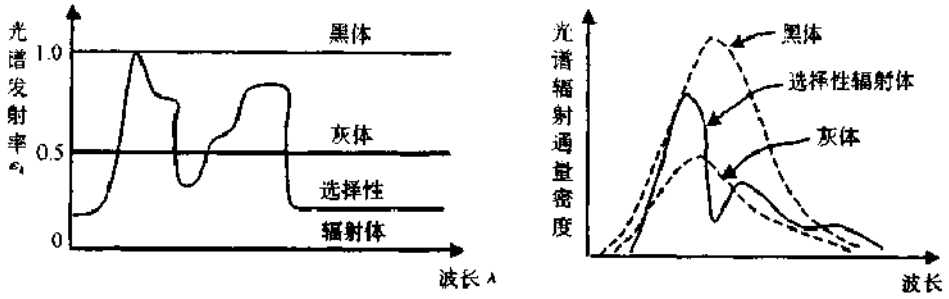


图 2-2-4　地物的波谱发射特性曲线

②灰体，$\varepsilon_\lambda = \varepsilon$ 但 $0 < \varepsilon < 1$；

③选择性辐射体，$\varepsilon_\lambda = f(\lambda)$；

④理想反射体（绝对白体），$\varepsilon_\lambda = 0$。

发射率对同一物体来讲也是一个变值，即在不同波段具有不同的 ε_λ，它与地物性质、表面光滑程度、温度等有关。一般常用平均发射率 ε 来表示它的发射能力：

$$\varepsilon = \frac{\int_0^\infty W'_\lambda d\lambda}{\int_0^\infty W_\lambda d\lambda} = \frac{1}{\sigma T^4}\int_0^\infty W'_\lambda d\lambda \tag{2-2-9}$$

地物之所以发射电磁波是由它自身的温度引起的，地物的电磁波辐射也叫地物热辐射。由于地物热学性质的差异，对太阳辐射的吸收能力不一样，各地物在相同条件下温度不同，随太阳周期变化的幅度也不一样。图 2-2-5 给出了沙地、草地、湖泊、树林一天内的温度变化情况。由于温度的不同，它们的热辐射能力会随温度的变化而变化。

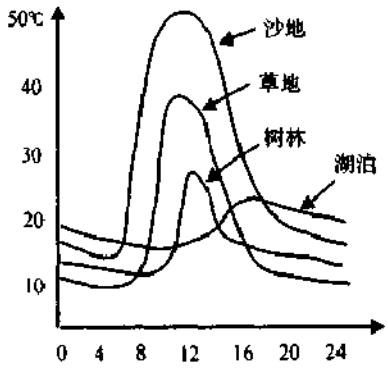


图 2-2-5　一天内地物温度的变化

超星提醒您：
使用时复制品
请尊重相关知识产权！

常温下地物的发射率常用 8～14μm 的辐射计通过量测地物辐射温度 T_r 来测定，T_r 反映了地物的特征，辐射计把接收到来自地物的辐射能量转换成 T_r，T_r 与实际温度 T 和发射率 ε 的关系为：

$$T_r = \varepsilon^{\frac{1}{4}} T \tag{2-2-10}$$

另外，入射到物体表面的电磁波与物体之间产生三种作用：反射（Reflection）、吸收（Absorption）和透射（Transmission）。设入射到物体表面的电磁波能量为 E，被物体反射的能量为 E_ρ，被物体吸收的能量为 E_α，透过物体的电磁波能量为 E_τ，根据能量守恒定理有：

$$E = E_\rho + E_\alpha + E_\tau$$

或

$$1 = \frac{E_\rho}{E} + \frac{E_\alpha}{E} + \frac{E_\tau}{E} \tag{2-2-11}$$

式中 $\frac{E_\rho}{E}$ 称为反射率（记为 ρ），$\frac{E_\alpha}{E}$ 称为吸收率（记为 α），$\frac{E_\tau}{E}$ 称为透射率（记为 τ）。

基尔霍夫（1860年）定律指出：一个物体的波谱发射率等于它的波谱吸收率，即 $\varepsilon_\lambda = \alpha_\lambda$。换句话说就是：好的吸收体也是好的发射体。它说明了凡是吸收热辐射能力强的物体，它们的热发射能力也强；凡是吸收热辐射能力差的物体，它们的热发射能力也就弱。对不透射电磁波的地物而言，它们的透射率 $\tau = 0$，则根据（2-2-9）式有

$$\varepsilon = 1 - \rho \qquad (2\text{-}2\text{-}12)$$

(2-2-12) 式表明了不透射电磁波的物体的发射率与反射率之间的关系，因此在热红外波段温度高的物体与温度低的物体相比，它的反射率要低。

2.2.5 红外波段中的太阳辐射与地物发射情况

地物的热辐射也基本上具备黑体辐射的三个特性，常温下地物热辐射的电磁波主要集中在热红外波段。依据黑体辐射定律，整个红外光谱区由太阳辐射和地物辐射两部分组成。

1．近红外

近红外光谱区为0.7～3.0μm，能量主要来自太阳辐射，其 W_λ 约为 $10^2 W/m^2$ 的数量级，而地物辐射在近红外波段能量很小，其 W_λ 只有 $10^{-1} W/m^2$ 的数量级。太阳辐射通量密度与地物的辐射通量之比约为1000∶1。因此，在此波段只反映地物对太阳辐射的反射，而基本上不反映地物本身热辐射的高低。离开了太阳辐射就不能进行近红外遥感，因此，近红外遥感它只能在白昼成象。

2．中红外

遥感所使用的中红外波段是3～5μm，这个波段既有太阳辐射，又有地物辐射。3～5μm恰好在太阳辐射峰值（0.5μm）与常温地物发射峰值（10μm）之间。在此波段范围内太阳的辐射能量很小，W_λ 只有 $10 W/m^2$ 的数量级；而地物发射更小，W_λ 只有 $1 W/m^2$，二者之比为10∶1，所以地物对太阳辐射能量的反射是主要的遥感信息。由于夜间没有太阳辐射，夜间的遥感信息只能靠地物本身的热辐射，这时对地面上的高温物体效果较好。在此波段昼夜均可成象，但白天成象的影象解译很困难。

3．热红外

遥感使用的热红外波段是8～14μm。在此波段内太阳辐射能量很小，W_λ 约为 $1 W/m^2$ 的数量级。而地物辐射的 W_λ 随温度不同而变化，约在 $10 \sim 10^6 W/m^2$ 数量级之间；当地表温度为40℃时，W_λ 的数量级为 $10^2 W/m^2$。因此在此波段内遥感响应的主要是地物本身的热辐射，地物反射来的太阳辐射能量可以忽略不计。

感谢您选择正版图书！
使用本复制品
请尊重相关知识产权！

4．远红外

远红外即15～30μm波段。此波段的热辐射能量较大，其 W_λ 的数量约为 $10 W/m^2$，而太阳辐射在此波段相对很小。但由于大气的透过率不高，所以远红外波段不能用于远距离遥感。

2.3 物体的电磁波反射特性

入射到物体表面的电磁波与物体之间发生三种作用：反射、吸收和透射。地物对电磁波反射、透射、吸收的能力常用反射率、透射率、吸收率来表示。不同地物的反射、透射和吸收能力是不相同的。目前遥感中传感器记录的主要是地物本身发射的电磁波信息和地物反射太阳光中的电磁波信息，本节主要讨论地物对电磁波的反射特性。

2.3.1 物体反射电磁波的三种形式

1. 镜面反射

镜面反射的电磁波具有严格的方向性，即反射角等于入射角，反射能量集中在反射线方向上，如图 2-3-2（a）所示。对不透明的地物，其反射的能量等于入射总能量减去地物吸收的能量。经地物反射后电磁波的偏振情况会发生变化。如若入射光为自然光，则反射光成为部分偏振光。

超星阅览器提醒您：
使用本复制品
请尊重相关知识产权！

2. 漫反射

在物体表面的各个方向上都有反射能量的分布，这种反射称为漫反射，如图 2-3-2（b）所示。对全漫反射体，在单位面积、单位立体角内的反射功率和测量方向与表面法线的夹角的余弦成正比，这种表面称为朗伯面。综合朗伯面和亮度的定义可知：无论从哪个方向观测朗伯面，看到的朗伯表面的亮度是一样的，即

$$L = \frac{dI}{dA \cdot \cos\theta} = \frac{d\varphi}{dA \cdot d\omega \cdot \cos\theta} = 常数 \tag{2-3-1}$$

式中：L 为辐射亮度；

$d\varphi$ 为朗伯表面的辐射通量（单位时间内的辐射能量）；

dA 为朗伯表面的面积；

dI 为朗伯表面的辐射强度；

$d\omega$ 为辐射立体角；

θ 为测量方向与表面法线的夹角。

由于亮度 L 是个常数，朗伯表面的每单位面积在每单位立体角内的辐射通量正比于发射角 θ 的方向余弦，即

$$\frac{d\varphi}{dA \cdot d\omega} = L \cdot \cos\theta \tag{2-3-2}$$

如图 2-3-1 所示，位于 o 点的朗伯面的 $\frac{d\varphi}{dA \cdot d\omega}$ 值的大小可用切于 o 点的直径为 L 的球来表示。

3. 方向反射

地面反射完全符合朗伯反射的也不多，由于地形起伏和地面结构的复杂性，往往在

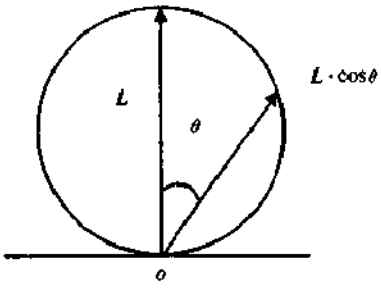
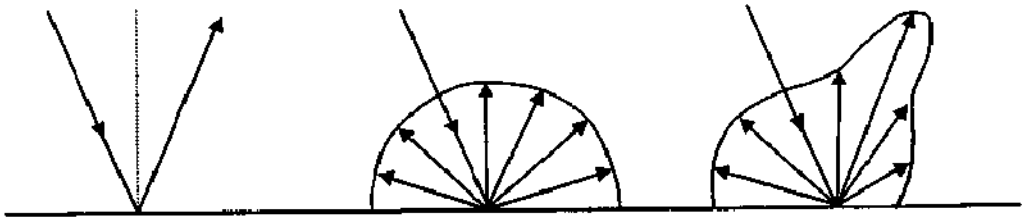


图 2-3-1　朗伯散射体

某些方向上反射最强烈，这种现象称为方向反射，如图 2-3-2（c）所示。发生方向反射时，在不同的观测方向看到地物的亮度是不一样的，所接收到的反射能量也是不一样的。朗伯反射光和方向反射光都是部分偏振光。

地物表面之所以产生这三种反射形式，主要与地物表面的光滑程度有关。通过实验，通常把地物表面分成光滑和粗糙两大类。瑞利准则指出：



(a)镜面反射　　(b)漫反射　　(c)方向反射

图 2-3-2　地物的几种反射形式

如果两条光线入射到某地物的表面上，其反射光线的相位差小于 $\pi/2$ 弧度，则该表面被认为是光滑的。如图 2-3-3 所示，光线 1 和光线 2 同时入射到地面高度差为 h 的两个点上，其反射光线的程差 $\Delta r = 2h \cdot \cos\theta$，相位差为 $\Delta\varphi = \frac{2\pi}{\lambda}\Delta r = \frac{4\pi h}{\lambda}\cos\theta$，则地物表面光滑的条件等价于

$$h < \frac{\lambda}{8 \cdot \cos\theta} \tag{2-3-3}$$

按照瑞利准则只能把地表分为光滑和粗糙两大类，而不能区分不同粗糙程度的表面。1971 年 Peake 和 Oliver 通过理论推导进一步修改了瑞利准则，其判断粗糙程度的条件是：

如果 $h < \frac{\lambda}{25\cos\theta}$，则地物表面是光滑的；

如果 $h > \frac{\lambda}{4.4\cos\theta}$，则地物表面是粗糙的；

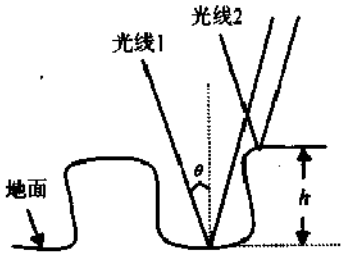


图 2-3-3　瑞利准则的推导

如果 $\frac{\lambda}{25\cos\theta} < h < \frac{\lambda}{4.4\cos\theta}$，则地物表面是中等粗糙的。

由上述准则可知：地物表面的粗糙程度与入射电磁波的波长 λ 和入射角 θ 有关。地物表面的光滑与粗糙是相对于入射电磁波的波长 λ 和入射角 θ 而言的。当地物表面光滑时，入射到其表面的电磁波产生镜面反射；否则会产生漫反射或方向反射。

2.3.2　地物的波谱反射特性

1. 光谱反射率

通常反射率定义为物体的反射通量与入射通量之比，即 $\rho = \frac{E_\rho}{E}$。这是在理想的漫反

射情况下的定义，是指在整个电磁波波长范围的平均反射率。实际上由于物体的固有结构特点，对不同波长的电磁波是有选择性反射的。例如绿色植物的叶子是由上表皮、叶绿素颗粒组成的栅栏组织和多孔薄壁细胞组成，如图 2-3-4 所示。入射到叶子上的太阳辐射透过上表皮，蓝、红光波段的光辐射被叶绿素全部吸收而进行光合作用；绿光大部分也被吸收，但仍有一部分被反射，所以叶子呈绿色；而近红外波段可以穿透叶绿素，被多孔薄壁细胞组织所反射，因此，在近红外波段上形成强反射，所以对绿色植被来讲，它们在可见光的蓝、绿、红及近红外波段处的反射率是不同的。对类似这种性质的地物仅用上述的定义来反映它们的反射率是不客观的。因此，我们定义光谱反射率 ρ_λ 为：地物在某波段的反射通量与该波段的入射通量之比，即

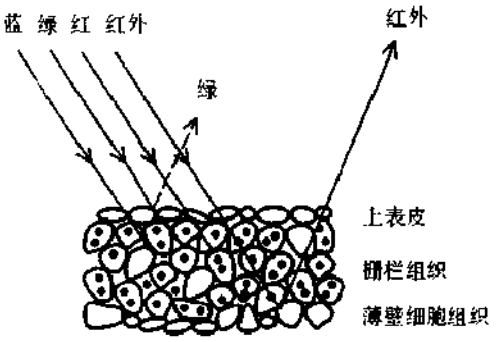


图 2-3-4　叶子的结构及其反射

$$\rho_\lambda = \frac{E_{\rho\lambda}}{E_\lambda} \tag{2-3-4}$$

2. 地物反射波谱特性

地物波谱反射率随波长变化而改变的特性称之为地物反射波谱特性。将地物的波谱反射率与波长的关系在直角坐标系中描绘出的曲线称为地物反射特性曲线。图 2-3-5 绘出了几种主要地物的反射特性曲线。从图中我们可以得出以下基本观点：不同地物有不同的光谱反射率，同一地物在不同波段有不同的光谱反射率。因此在同一幅图象上不同的地物会有不同的色调（彩）；同一地物在不同的波段的图象也会有不同的色调（彩）。同时，依据反射特性曲线的形状我们把地物大致可分为两类：光谱反射率基本不随波长变化而变化的地物——灰体（非选择性反射体），如灰白大理石、湿粘土等；光谱反射率随波长变化而变化的地物——选择性反射体，如针叶树、红砂岩等。

超星数字图书馆提醒您：
请尊重相关知识产权！

由图 2-3-5 可见，几种主要地物有如下不同的反射特性：

①雪在可见光波段基本上是非选择性低吸收体，即高反射体（80%），呈耀眼白色，但在近红外波段吸收强得多，变成选择性吸收体。

②水在蓝光波段反射率稍高，约为 10% 左右，到 0.75μm 以后的近红外波段，变成了全吸收体。

③阔叶树在绿光波段有一个反射小峰，峰值约 15% 左右，所以看上去它呈绿色；在近红外波段反射率很大，可达 60%～70%。

④针叶树与阔叶树反射光谱相似，只是小峰峰值不到 10%，近红外强反射只有 30% 左右。

⑤沙漠在绿、红光波段内可近似看成是非选择性高反射体，反射率接近 60%，而在近红外波段，虽然有两个吸收谷，但也可以近似地看成是 $P=40\%$ 的非选择性反射体。总的看来，在 0.4～1.1μm 光波段中，可把沙漠近似地看成 $\rho=50\%$ 的非选择性高

反射体。

⑥湿粘土反射率低，近于非选择性反射体。

⑦灰白色大理石是反射率接近于40%的非选择性反射体。

⑧红砂岩是反射率随波长增加而增大的选择性反射体。

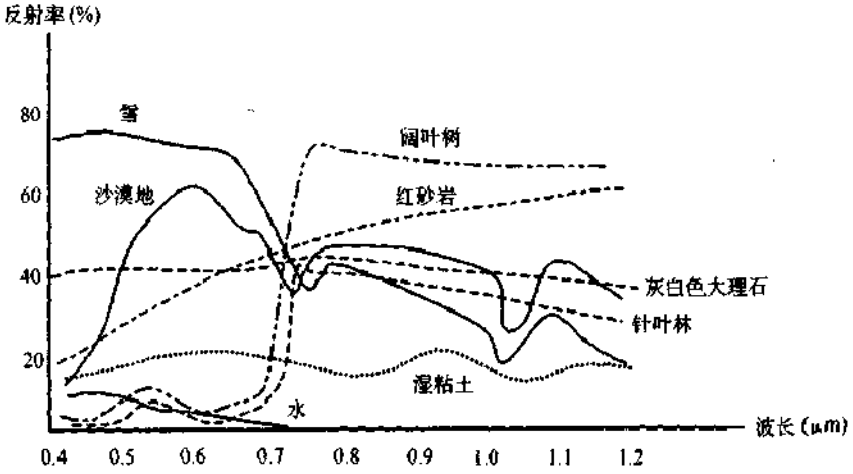


图 2-3-5　几种主要地物的反射特性曲线

3．影响地物反射率变化的因素

由（2-3-4）式可知，地物的光谱反射率与入射电磁波在各波段处的辐射通量及相应的反射通量有关，也就是与入射通量和地物本身性质有关。而很多因素会引起入射通量及地物性质的变化，如太阳位置、遥感器位置、地理位置、地形、季节、气候变化、地面湿度变化、地物本身的变异、大气形状等。

太阳位置主要指太阳高度角和方位角。如果太阳高度角不同，太阳辐射经大气层到达地物所经过的路径不同，传递过程中的能量损失与路径有关。太阳方位角不同，太阳光线在地物表面的入射角不同，也会引起地物反射能量的变化。入射与反射能量的变化，则会引起反射率的变化。为了尽量减小太阳高度角和方位角引起的反射率变化的影响，遥感卫星轨道大多设计成在每天的同一地方时间通过同一地方上空，但由于季节变化和地理纬度的差异造成太阳高度角和方位角的变化是不可避免的。

遥感器位置指遥感器的观测角和方位角，分别用 θ' 和 φ' 来表示，若太阳高度角和方位角分别用 θ 和 φ 表示，则反射率与这四个角度有如下关系：

$$\rho(\theta, \varphi, \theta', \varphi') = \frac{dM(\theta', \varphi')}{dE(\theta, \varphi)} \tag{2-3-5}$$

超星阅览器提醒您：
请勿复制品
请尊重相关知识产权！

式中：$dM(\theta', \varphi')$ 为反射出射度；

$dE(\theta, \varphi)$ 为入射照度。

图 2-3-6 描绘了表面反射作用的几何关系。一般空间遥感用的传感器大部分设计成垂直指向地面，这样反射率的影响较小。由于卫星姿态不稳定会引起遥感器的指向偏离垂直方向，因此反射率变化的影响不容忽视。

不同的地理位置，太阳高度角和方位角也不同；地理景观不同也会引起反射率的差

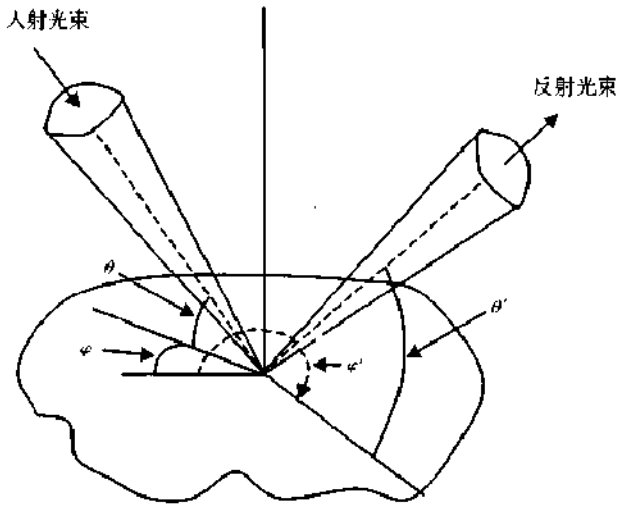


图 2-3-6　表面反射作用的几何关系

异。此外海拔高度、大气透明度等因素也会造成反射率的变化。

地物本射的变异，会使其反射率有很大的变化。如植物的病虫害会造成反射率发生较大的变化，图 2-3-7 反映了健康松树和有不同程度的病虫害松树之间的反射率差异情况。随着病虫害的加剧，光谱反射率变化有两个相反的区段，在 0.58～0.7μm 间反射率增加，而在 0.7μm 以上的近红外区反射率减小。

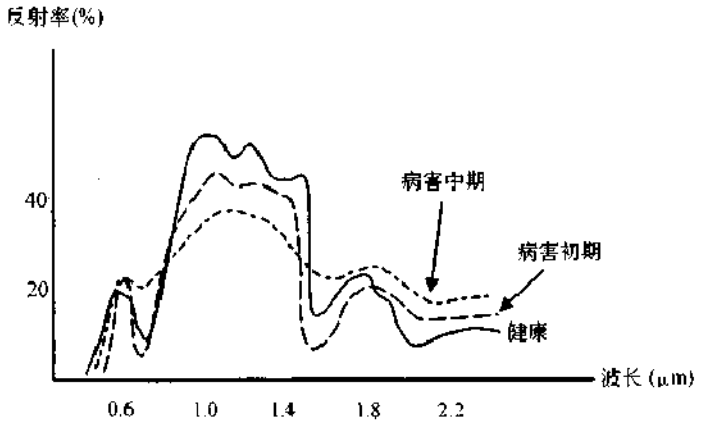


图 2-3-7　不同健康状况松树的反射特性曲线

土壤的含水量也直接影响着土壤的光谱反射率，图 2-3-8 绘出了同一种沙土在三种不同含水量情况下的光谱反射特性曲线，从图 2-3-8 可以看出，含水量越高，反射率越低，特别是在红外区更为明显。

同样，若水中含有泥沙和浮游生物则也会影响水体的光谱反射率，如图 2-3-9 所示。由于沙粒的米氏散射，使水的反射率在各波段都有所提高，尤其是在黄、红波段，反射率随含沙量的增加而增高。水中的浮游生物由于含有叶绿素，所以在红外波段有较高的反射率。洁净的水对蓝绿光波段有一些反射，对其余波段的大部分太阳辐射都表现为吸收；蓝绿光也能穿透一定深度的水层，其穿透深度与水质有关，一般可穿透海水 2～20m。

由于时间的推移也会使同一种地物的光谱反射特性产生变化。图 2-3-10 绘出了新雪和两天后陈雪的光谱反射性曲线。从图 2-3-10 可以看出，在 0.8μm 以下差别不大，但在 0.8μm 以上的红外区变化很大，新雪的反射率明显地比陈雪高。同样，随着时间的变化，植物在不同的生长期反射率也有很大差异，如小麦，在生长期和成熟期它的反

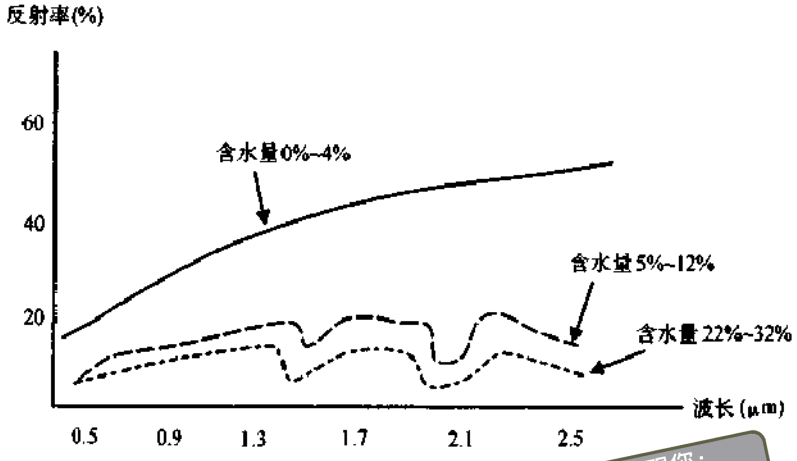


图 2-3-8　不同含水量的沙土的反射特性曲线

超星阅览器提醒您：
使用本复制品
请尊重相关知识产权！

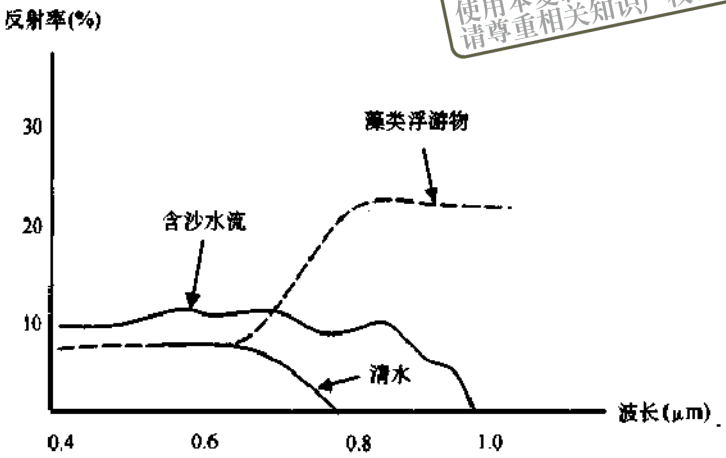


图 2-3-9　水的反射特性曲线

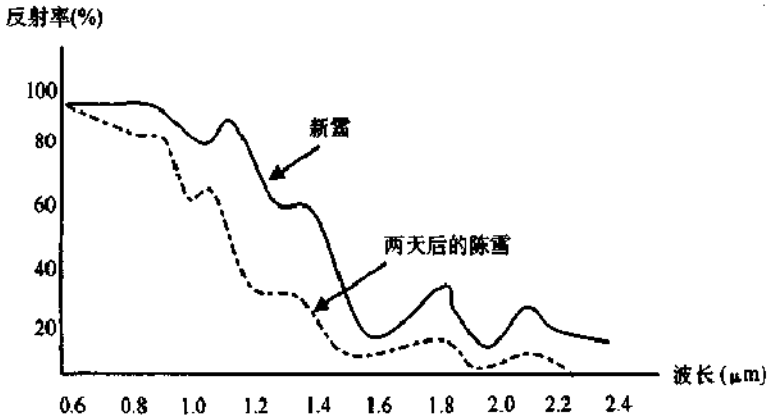


图 2-3-10　新雪和陈雪的反射特性曲线

射特性曲线有明显的不同。

2.3.3 地物反射波谱特性的测量

测量地物反射波谱特性的目的主要有三个方面：

①为选择遥感器的最佳波段（通道）提供依据。这就要求在飞行前或卫星发射前，系统地测量地面各种地物的波谱特性；

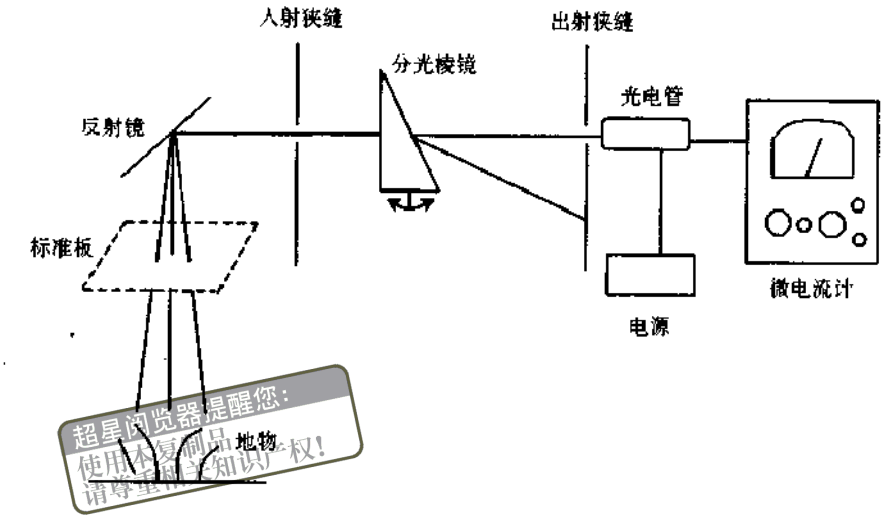
②为遥感数据大气校正提供参考标准，为此地面测量最好与空中遥感同步进行；

③建立地物的标准波谱数据，为计算机图象自动分类和识别提供光谱数据，为遥感图象的解译提供依据。

地物反射波谱特性测量分为实验室测量和野外测量两类。野外测量又分为地面测量和航空测量。实验室测量是在限定的条件下进行的，精度较高，但不是在自然状态下进行，所以与实际状况有一定的差别，所测数据一般仅作参考。野外测量是在实际的自然条件下进行的，因此能反映出测量瞬间实际地物的反射特性。

测定地物反射波谱特性的仪器有分光光度计、光谱仪、摄谱仪等。这类仪器一般由收集器、分光器、探测器和显示记录器组成。其中收集器的作用是收集来自物体或标准板的反射能量，一般由物镜、光栏组成；分光器的作用是将收集器传递过来的复色光进行分光，一般由棱镜、光栅或滤光片来实现；探测器的类型有光电管、硅光二极管、摄影负片等；显示记录器是将探测器上的输出信号显示出来或记录下来，或驱动绘图仪直接绘制成曲线。

图 2-3-11 为一种典型的野外用分光光度计——长春光学仪器厂的 302 型野外分光光度计的结构原理图。地物或标准板的反射光能量经反射镜和入射狭缝进入分光棱镜产



超星阅览器提醒您：
使用本复制品
请尊重作者知识产权！

图 2-3-11　302 型野外分光光度计结构原理

生色散，由分光棱镜旋转螺旋和出射狭缝控制逐一单色进入光电管，最后在微电流计中经放大后在电表上显示光谱反射能量的测量值。其测量原理是：先测量地物的反射辐射通量密度，在分光光度计的视场中收集到的地物反射辐射通量密度为

$$\varphi_\lambda = \frac{1}{\pi}\rho_\lambda \cdot E_\lambda \cdot \tau_\lambda \cdot \beta \cdot G \cdot \Delta\lambda \qquad (2\text{-}3\text{-}6)$$

式中：φ_λ 为物体的反射辐射通量密度；

ρ_λ 为物体的光谱反射率；

E_λ 为太阳入射到地面上的照度；

τ_λ 为大气透过率；

β 为光度计视场角；

G 为光度计有效接收面积；

$\Delta\lambda$ 为单色波长范围。

φ_λ 经光电转换变为电流强度，在电表上指示读数为 I_λ，它与 φ_λ 的关系为

$$I_\lambda = K_\lambda \cdot \varphi_\lambda \tag{2-3-7}$$

式中 K_λ 为仪器的光谱辐射响应灵敏度。

接着是测量标准板的反射辐射通量密度。标准板为一种理想的反射体，它一般由硫酸钡或石膏等物质制成，最理想的标准板的反射率为 1，称绝对白体。但一般只能做出近似的标准板，它的反射率 ρ'_λ 预先经严格测定并经国家计量局鉴定。当仪器观察标准板时，得到的光谱辐射通量密度为

$$\varphi'_\lambda = \frac{1}{\pi}\rho'_\lambda \cdot E_\lambda \cdot \tau_\lambda \cdot \beta \cdot G \cdot \Delta\lambda \tag{2-3-8}$$

同理，电表读数为

$$I'_\lambda = K_\lambda \cdot \varphi'_\lambda \tag{2-3-9}$$

将地物的电流强度与标准板的电流强度相比，并将（2-3-8）式代入有

$$\rho_\lambda = \frac{I_\lambda}{I'_\lambda}\rho'_\lambda \tag{2-3-10}$$

再以波长为横轴、反射率为纵轴，在直角坐标系中就可绘出地物的反射波谱特性曲线。

2.4 大气对电磁波传输过程的影响

遥感过程中对地面物体辐射的探测、收集是在大气中进行的，地物辐射在到达遥感器之前都要穿过厚度不同的大气层。例如对可见光遥感来说，电磁波从太阳照射到地面，再从地面到达摄影仪器，此间需要两次经过大气层。所以大气对电磁波传输过程的影响是遥感需要考虑的问题之一。本节主要讨论大气的组成和大气层的结构、大气对电磁波传输过程的影响、大气窗口和辐射传输方程等问题。

超星阅览器提醒您
请尊重版权，不得复制！

2.4.1 大气的组成和大气层的结构

大气成分主要有氮、氧、氩、二氧化碳、氦、甲烷、氧化氮、氢（这些物质在80km以下的相对比例保持不变，称不变成分）、臭氧、水蒸气、液态和固态水（雨、雾、雪、冰等）、盐粒、尘烟（这些物质的含量随高度、湿度、位置的变化而变化，称为可变成分）等组成。

地球的大气层从垂直方向上可分为四层：对流层、平流层、电离层和外大气层。大气层的区间划分和各种航空、空间飞行器在大气层中的垂直位置如图 2-4-1 所示。

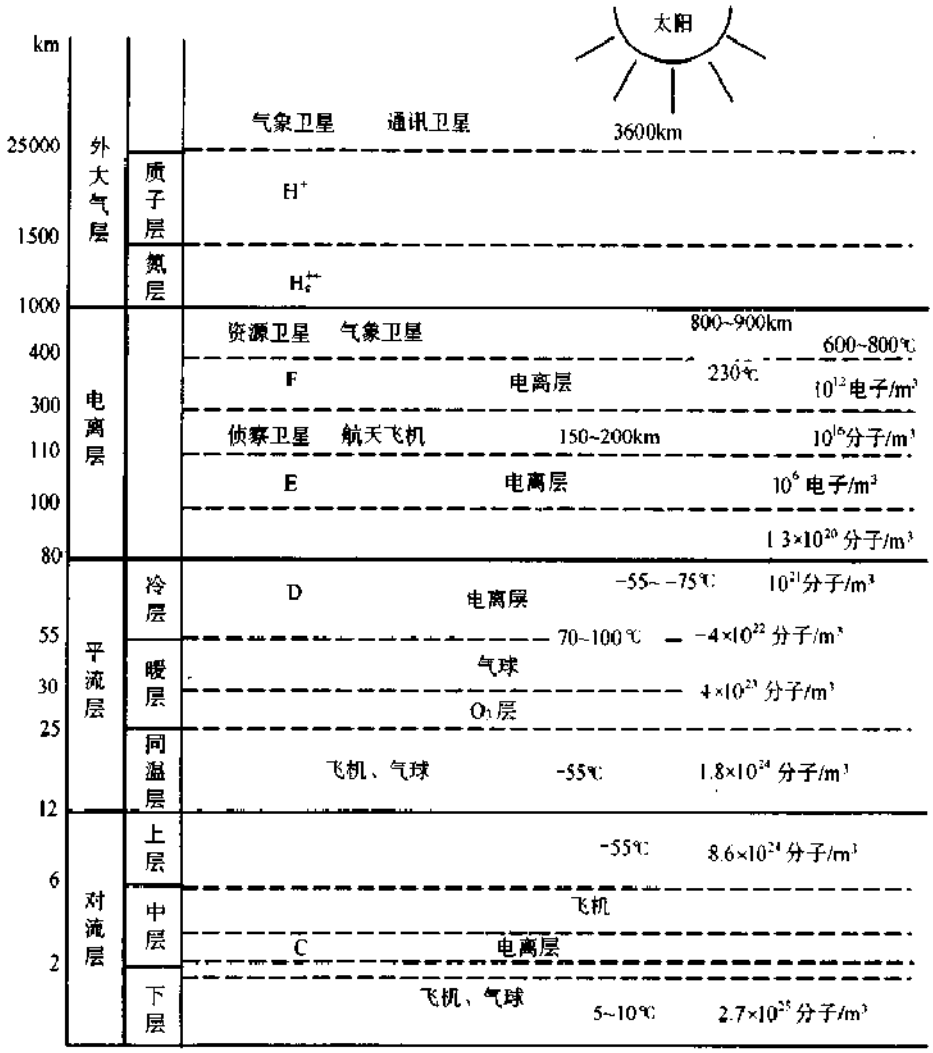


图 2-4-1　大气垂直分层与遥感平台的高度情况

1. 对流层

对流层处于从地表到平均高度 12km 的范围内。相对于 8000km 厚的大气层来说它是个薄层。对流层主要有以下一些特点：

①气温随高度上升而下降，每增高 1km 约下降 6℃。若地面温度为 5～10℃时，则 12km 的对流层顶的温度约降至 -55℃左右。

②对流层的空气密度最大，空气密度和气压随高度升高而减小。地面空气密度为 1.3kg/m^3，气压为 1×10^5Pa，对流层顶部空气密度减小到 0.4kg/m^3，气压降低到 2.6×10^4Pa 左右。

③空气中不变成分的相对含量是氮占 78.9%，氧占 20.95%，氩等其余气体共占不到 1%。可变成分中，臭氧含量较少，水蒸气含量不固定，在海平面潮湿的大气中，水蒸气含量可高达 2%，液态和固态水含量也随气象变化。在 1.2～3.0km 处是最容易形成云团的区域。近海面或盐湖上空含有盐粒，城市上空和干旱无植被覆盖的地区上空有

尘烟微粒。

由于对流层空气密度大，而且有大量的云团、尘烟存在，电磁波在该层内被吸收和散射而引起衰减。因此，电磁波的传输特性主要在对流层内研究。

2. 平流层

平流层在12～80km的垂直区间中。平流层又可分为是温层、暖层和冷层。它们有以下特点：

①在12～25km处的高空为同温层，温度保持在－55℃左右，大气中的分子数减少，每$1m^3$中为1.8×10^{24}个。

②在25～55km处的高空为暖层。但在25～30km高空有一层臭氧层，臭氧层因吸收太阳紫外辐射而升温；在30～50km处，臭氧的含量逐渐减小，大气分子也从4×10^{23}个/m^3减少为4×10^{22}个/m^3。在55km处的温度可达70～100℃，故称暖层。

③在55～80km处的高空称为冷层。因臭氧扩散至55km处含量趋于零，不再有吸收太阳辐射的现象。温度也降至－55～－70℃，大气分子也减少到10^{19}个/m^3。

3. 电离层

电离层在80～1000km区间中。电离层空气稀薄，分子被电离成离子和自由电子状态。无线电波在该层会发生全反射现象（由于电波从高密度介质进入低密度介质的原因）。该层顶部温度可达600～800℃。

4. 外大气层

距地面1000km以上高空称为外大气层。1000～2500km间主要是氦离子，称氦层；2500～25000km处主要成分是氢离子，氢离子又称质子，又称质子层。外大气层的温度高达1000℃。

超星阅览器提醒您：
请尊重相关知识产权！

2.4.2 大气对电磁波传输过程的影响

大气对电磁波传输过程的影响包括五个方面：散射（Scattering）、吸收（Absorption）、扰动（Turbulence）、折射（Refraction）和偏振（Polarization），而对于遥感数据来说，主要的影响因素是散射和吸收。由于大气分子及大气层中气溶胶粒子的影响，太阳辐射的电磁波在大气层中传输时一部分被吸收，一部分被散射，剩下的部分穿过大气层到达地面；地物反射或本身辐射的电磁波在大气层中传输时一部分被吸收，一部分被散射，剩下的部分穿过大气层到达传感器的接收系统，由此引起光线强度的衰减，进而影响传感器成象的质量。下面主要讨论大气对电磁波的散射和吸收作用。

1. 大气散射

大气散射的性质与强度取决于大气中分子或微粒的半径a和被散射光的波长λ。研究表明：若雾滴半径为a，散射面积比为k（$k=A/\pi a^2$，A为散射面积），每cm^3中雾滴数为n，则散射系数γ为

$$\gamma=\pi\cdot n\cdot k\cdot a^2 \tag{2-4-1}$$

由于每 cm^3 中雾滴的个数 n、雾滴半径 a 及其散射面积在实际中很难测定，大气的散射能力难以用稳健的数学模型来表达。实际中往往用定性的方法来描述散射能力的大小。实验表明，随着波长 λ 和雾滴半径 a 之间关系的变化，散射形式主要有两种：瑞利散射和米氏散射。

(1) 瑞利散射

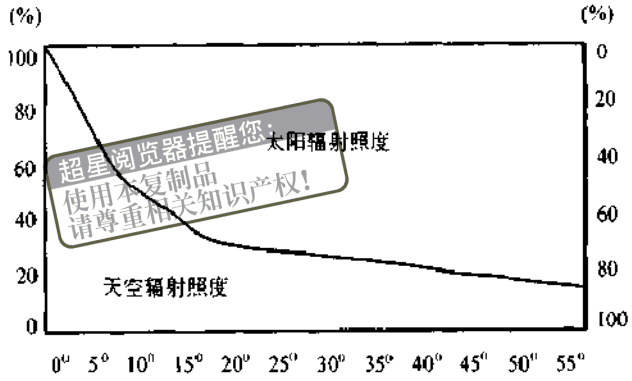
由半径 a 小于波长 λ 的 1/10 以下的微粒引起的散射叫瑞利散射 (Rayleigh Scattering)。其散射能力与波长有如下关系

$$\gamma \propto \lambda^{-4} \tag{2-4-2}$$

由于大气分子的半径是 $10^{-4}\mu m$ 量级，可见光波长为 $10^{-1}\mu m$ 量级，符合 $a \ll \lambda$ 的瑞利散射条件，因此，大气分子对可见光的散射为瑞利散射。并且波长愈短，散射能力愈强。在晴天，天空呈蓝色就是这个原因。由此可见，瑞利散射对不同波长的电磁波有不同的散射能力，属于选择性散射。但是大气分子的密度、大小随着季节、纬度、气候条件而变动，不同地区上空大气的瑞利散射能力也是变化的。

(2) 米氏散射

由半径 a 大于波长 λ 的微粒引起的散射叫米氏散射 (Mie Scattering)。米氏散射与波长几乎无关，是一种非选择性的散射。大气中的晶粒、水滴、尘烟、气溶胶等，它们的半径 a 都大于 λ，使得太阳辐射的各波段都被等强度地散射。由于这种非选择性散射使云、雾呈白色。



超星阅览器提醒您：
使用本复制品
请尊重相关知识产权！

图 2-4-2　太阳辐射照度与天空辐射照度的比例关系

米氏散射有两个特点：一是散射光的强度几乎与波长无关，即散射能力在各波段基本一致；二是散射具有较强的向前散射能力。引起米氏散射的气溶胶来源于海盐、黄砂等从海上、陆地漂浮到大气中的浮游粒子，以及城市灰尘、工厂排烟、火山活动引起的浮游粒子。气溶胶的数量随时间、场合而变化，其大小也与相对湿度、温度有关，要想确切了解米氏散射的特性是很困难的。

由于大气分子的散射，使太阳辐射中的一部分转化为天空辐射（光），它与太阳辐射一起产生了对地面的照度。随着太阳高度角的变化，天空辐照度与太阳辐射度占总辐照度的比例也随之变化，如图 2-4-2 所示。太阳高度角小，太阳辐射所经过的大气路程长，散射机会多，因而天空辐射照度就大。随着太阳高度角增加至 30°以上，太阳辐射照度与天空辐射照度的比例基本稳定在 80%:20% 左右。由于天空辐射的存在，在遥感

中记录的地面辐射信息中也含有天空辐射，这往往使遥感图象出现偏色、反差降低等现象。同时，在有些摄影象片上有时也能得到阴影下的地物的影象。遥感成象中，应尽量消除天空辐射的影响，如航空摄影时常用加滤光片的方法来消除天空光对成象的不良影响。

2. 大气吸收

大气吸收是将辐射能量转换成大气组成分子的运动。大气中对太阳辐射的主要吸收体是水蒸气、二氧化碳和臭氧。这些气体分子或蒸气分子的吸收对波长是有选择性的(见图 2-4-3)，根据实验测定主要的吸收带为：

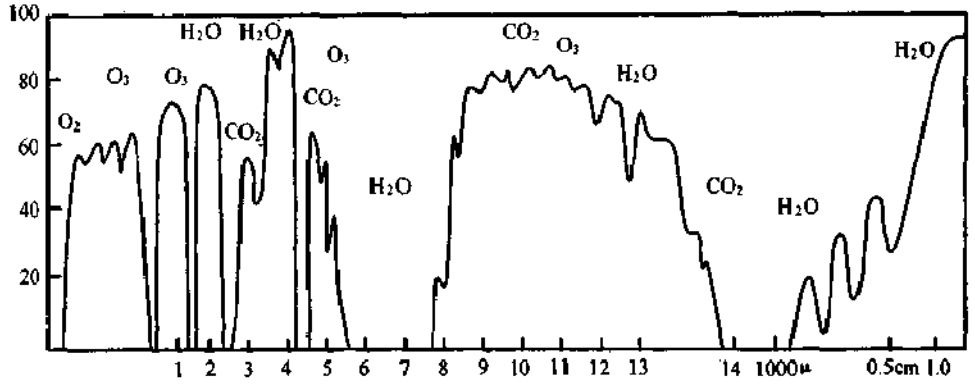


图 2-4-3 大气吸收带

臭氧吸收带：主要在 0.3μm 以下的紫外区的电磁波段，另外在 0.96μm 处有弱吸收，在 4.75μm 和 14μm 处的吸收更弱，已不明显。

二氧化碳吸收带：二氧化碳吸收带有若干个，它们分别是：2.60～2.80μm，其中吸收峰值为 2.70μm 处；4.10～4.45μm，吸收峰值在 4.3μm 处；9.10～10.9μm，吸收峰值在 10.0μm 处；12.9～17.1μm，吸收峰值在 14.4μm 处。二氧化碳的吸收带全在红外区。

水蒸气吸收带分别是：分别为 0.7～1.95μm，吸收峰值在 1.38μm 和 1.87μm 处；2.5～3.0μm，在 2.70μm 处为最强；4.9～8.7μm，在 6.3μm 处为最强；15μm～1mm 的超远红外区；微波中的 0.164cm 和 1.348cm 处。

此外，氧气对微波中 0.253，0.55cm 波长的电磁波也有吸收能力。甲烷、氧化氮、一氧化碳、氨气、硫化氢、氧化硫等也具有吸收电磁波的作用，但吸收率很低，可以忽略不计。

3. 大气的透过率

由于大气分子和大气中的气溶胶粒子的影响，光线在透过大气的同时被吸收和散射，由此引起的电磁波衰减称作消光 (Extinction)。消光程度和电磁波的透过率直接有关。

表示消光程度的系数叫消光系数。若入射光亮度为 I_λ，在吸收和散射物质密度为 ρ 的介质中通过光路长 ds 后，光亮度减弱了 dI_λ，则消光系数表示为

$$K_\lambda = -\frac{dI_\lambda}{\rho \cdot I_\lambda \cdot ds} \tag{2-4-3}$$

当光线通过高度 Z_1 到高度 Z_2 的大气区段时，该区段大气的光学厚度 T（Z_1，Z_2）可由消光系数来定义

$$T(Z_1, Z_2) = \int_{Z_1}^{Z_2} K_\lambda(Z)\rho dZ \tag{2-4-4}$$

当太阳天顶角为 θ 角时，则光线通过的路径会产生变化，这时其透过率 τ（Z_1，Z_2，θ）可表达为

$$\tau(Z_1,\ Z_2,\ \theta) = e^{-T(Z_1, Z_2)\cdot\sec\theta} \tag{2-4-5}$$

若入射光线的辐射照度为 E_0，当通过高度 Z_1 到高度 Z_2 的大气层后，辐射照度为 E_τ，则它们与透过率的关系为

$$E_\tau = E_0 \cdot e^{-T(Z_1, Z_2)\cdot\sec\theta} \tag{2-4-6}$$

有时将 $\delta = T$（Z_1，Z_2）$\cdot\sec\theta$ 叫做衰减系数。它包含大气散射系数和吸收系数，因此又可写为

$$\delta = \gamma + \alpha \tag{2-4-7}$$

式中 γ 是散射系数，它取决于大气中气体分子、液态和固态杂质对电磁波的散射；α 是吸收系数，它取决于大气中气体分子对电磁波的吸收。γ 和 α 随波长不同而变化。可见光辐射的衰减以大气散射为主；紫外辐射与红外辐射的衰减以大气分子的选择性吸收为主。

超星阅览器提醒您：
使用本复制品
请尊重相关知识产权！

4. 大气窗口

由于大气对电磁波散射和吸收等因素的影响，使一部分波段的太阳辐射在大气中的透过率很小或根本无法通过。电磁波辐射在大气传输中透过率较高的波段称为大气窗口。为了利用地面目标反射或辐射的电磁波信息成象，遥感中对地物特性进行探测的电磁波“通道”应选择在大气窗口内。目前在遥感中使用的一些大气窗口为：

①0.3～1.15μm：包括部分紫外光、全部可见光和部分近红光。其中：

0.3～0.4μm，透过率约为70%；

0.4～0.7μm，透过率大于95%；

0.7～1.1μm，透过率约为80%。

②1.4～1.9μm：近红外窗口，透过率在60%～95%之间，其中1.55～1.75μm透过率较高。

③2.0～2.5μm：近红外窗口，透过率为80%。

④3.5～5.0μm：中红外窗口，透过率为60%～70%。

⑤8.0～14.0μm：热红外窗口，透过率为80%。

⑥1.0～1.8mm：微波窗口，透过率约为35%～40%左右。

⑦2.0～5.0mm：微波窗口，透过率在50%～70%之间。

⑧8.0～1000.0mm：微波窗口，透过率为100%。

2.4.3 辐射传输方程

辐射传输方程是指从辐射源经大气层到达传感器的过程中电磁波能量变化的数学模型。依据电磁波经过的路径，其能量变化的过程分为以下几个部分：

①太阳辐射经由大气到达地面的辐射照度

$$E_\tau = E_0 \cdot e^{-T(Z_1, Z_2)\cdot \sec\theta} \qquad (2\text{-}4\text{-}8)$$

式中 Z_1 到 Z_2 为整个地球大气的厚度，θ 为太阳天顶角，E_0 为太阳辐射照度。

②地物辐射（反射、发射）后到达传感器的辐射照度（在正直传感时）

$$E'_\tau = [\rho_\lambda \cdot E_0(\lambda)\, e^{-T(Z_1, Z_2)\cdot \sec\theta} + \varepsilon_\lambda \cdot W_e(\lambda)]\, e^{-T(0, H)} \qquad (2\text{-}4\text{-}9)$$

式中：ρ_λ 为地物的波谱反射系数；

ε_λ 为地物的波谱发射率系数；

H 为平台高度；

$W_e(\lambda)$ 为与地物同温度黑体的发射通量密度。

③若遥感器的光谱响应系数为 K_λ，大气散射和由于大气辐射所形成的天空辐射照度为 b_λ，则传感器的输出为

$$E_\lambda = K_\lambda \cdot \{[\rho_\lambda \cdot E_0(\lambda)\, e^{-T(Z_1, Z_2)\cdot \sec\theta} + \varepsilon_\lambda \cdot W_e(\lambda)]\, e^{-T(0, H)} + b_\lambda\} \qquad (2\text{-}4\text{-}10)$$

超星阅览器提醒您：
使用本复制品
请尊重相关知识产权！

第三章　遥感平台

3.1　遥感平台的种类

遥感中搭载传感器的工具统称为遥感平台（Platform）。遥感平台的种类很多，按平台距地面的高度大体上可分为三类：地面平台、航空平台、航天平台，表3-1-1汇总了可能利用的平台的高度及其使用目的。在这些遥感平台中，高度最高的是气象卫星GMS（Geostationary Meteorological Satellite）所代表的静止卫星，它位于赤道上空36000km的高度上；其次是高度为700～900km左右的Landsat、SPOT、MOS等地球观测卫星，它们大都使用在同一个地方时进行观测的太阳同步轨道；再分别是航天飞机（Space Shuttle）、探空仪、高高度喷气飞机、中低高度飞机等；接着是无线电遥控飞机等；最低的是地面测量车。

超星阅览器提醒您：
使用本复制品，
请尊重相关知识产权！

表3-1-1　可应用的遥感平台

遥感平台	高度	目的和用途	其他
静止卫星	36000km	定点地球观测	气象卫星（GMS等）
圆轨道卫星（地球观测卫星）	500～1000km	定期地球观测	Landsat，SPOT MOS等
航天飞机	240～350km	不定期地球观测 空间实验	
返回式卫星	200～250km	侦察与摄影测量	
无线探空仪	100m～100km	各种调查（气象等）	
高高度喷气机	10 000～12 000m	侦察与大范围调查	
中低高度飞机	500～8 000m	航空摄影测量 各种调查	
飞艇	500～3 000m	空中侦察 各种调查	
直升机	100～2 000m	摄影测量 各种调查	
无线遥控飞机	500m以下	摄影测量 各种调查	飞机 直升机
牵引飞机	50～500m	摄影测量 各种调查	牵引滑翔机
系留气球	800m以下	各种调查	
索道	10～40m	遗址调查	
吊车	5～50m	近距离摄影测量	
地面测量车	0～30m	地面实况调查	车载升降台

地面遥感平台是指用于安置遥感器的三角架、遥感塔、遥感车等，高度在100m以下。通常三角架的放置高度在0.75m至2.0m之间，在三角架上放置地物波谱仪、辐射

计、分光光度计等地物光波测试仪器，用以测定各类地物的野外波谱曲线。遥感车、遥感塔上的悬臂常安置在6～10m甚至更高的高度上，在这样的高度上对各类地物进行波谱测试，可测出地物的综合波谱特性。为了便于研究波谱特性与遥感影象之间的关系，也可将成象传感器置于同高度的平台上，在测定地物波谱特性的同时获取地物的影象。

航空平台主要是指高度在30km以内的遥感飞机等。按照飞机不同的飞行高度，又可分为低空平台、中空平台和高空平台。

低空平台是在离地面2000m以内的对流层下面飞行的。若要取得中等比例尺、大比例尺航空遥感图象时，飞机飞行高度一般在此高度范围内。直升飞机可以进行离地10m以上的遥感；侦察飞机可以进行300～500m的低空大速度遥感；通常遥感试验在1000～1500m的高度范围内进行。

中空平台是在离地面2000～6000m之间的对流层中层飞行的。通常使用这类平台取得中小比例尺的航空遥感图象。

高空平台是在离地面12000m左右的对流层顶层和同温层下层中飞行的。部分用于航空遥感的有人驾驶飞机（如美国的呼唤Ⅱ）的飞行高度在12000m左右，一般用于航空遥感的飞机达不到这个高度，军用高空侦察飞机一般在此高度上飞行，无人驾驶飞机的飞行高度一般在20000～30000m之间。

航空遥感对飞机性能和飞行过程有特殊的要求，如航速不宜过快，稳定性能要好；续航能力强，有较大的实用升限；有足够宽敞的机舱容积；具备在简易机场起飞的能力及先进的导航设备等。有关航空摄影时对飞机及其飞行过程的技术要求请参考有关的“航空摄影”书籍，此处不再详述。

航天平台是指高度在150km以上的人造地球卫星、宇宙飞船、空间轨道站和航天飞机等，目前对地观测中使用的航天平台主要是遥感卫星。

3.2 遥感卫星

3.2.1 卫星在空间中的位置和姿态

遥感卫星是在绕地球的轨道上运行的，其运行规律符合开普勒三大定律，即卫星运行的轨道是一椭圆，地球位于该椭圆的一个焦点上；卫星在椭圆轨道上运行时，卫星与地球的连线在相等的时间内扫过的面积相等；卫星绕地球运转周期的平方与其轨道平均半径的立方成正比。由于卫星是在绕地球的椭圆轨道上运行的，因此卫星在空间中的位置可以用椭圆轨道的空间形状、位置和某一时刻卫星在轨道中位置来确定，而轨道的空间形状、位置和某一时刻卫星在轨道中位置可用下列6个参数来描述（参见图3-2-1）。

（1）轨道长半径 a

卫星轨道远地点到椭圆中心的距离为轨道长半径 a，它确定了卫星距地面的高度，按照高度的不同又可将卫星分为低轨卫星（150～300km）、中轨卫星（约1000km左右）和高轨卫星（36000km处）。

（2）卫星轨道偏心率 e

$$e=\frac{\sqrt{a^2-b^2}}{a} \tag{3-2-1}$$

式中 b 为卫星轨道的短半径。e 确定了卫星轨道的形状，对于大部分对地观测卫星，其轨道的 e 接近于零，即为近圆形轨道。在近圆形轨道上，卫星近似于匀速运行，并且距地面的高度变化不大，有利于曝光时间的控制和在全球范围内获取比例尺基本一致的影象。

（3）轨道面倾角 i

轨道面倾角是指卫星轨道面与地球赤道面之间的夹角，如图 3-2-1 所示。它决定了轨道面与赤道面或与地轴之间的关系。当 $i=0°$ 时轨道面与赤道面重合，这种卫星称为赤轨卫星；当 $0°<i<90°$ 时卫星运行方向与地球自转方向一致，这种卫星称为顺轨卫星；当 $i=90°$ 时轨道面与地轴重合，这种卫星称为极轨卫星；当 $90°<i<180°$ 时卫星运行方向与地球自转方向相反，这种卫星称为逆轨卫星。轨道面倾角 i 确定了卫星对地观测的范围。例如，当 $i<90°$ 时，卫星对地观测范围为北纬 i 至南纬 i 之间的地区。由此可见，只有极轨卫星才能达到对全球观测的要求。另外，轨道面倾角 i 对星下点之间的距离也有影响。

（4）升交点赤经 Ω

升交点赤经是指卫星轨道的升交点向径与春分点向径之间的夹角。所谓升交点是卫星由南向北运行时，与地球赤道面的交点。反之，轨道面与赤道面的另一个交点称为降交点。

升交点赤经确定了轨道面与太阳光线之间的夹角，即决定了星下点在成象时刻的太阳高度角。如图 3-2-2 所示，β_0 为春分时太阳光照角，β_1 为夏至时的太阳光照角。地球一年（365 天）绕太阳转一周，光照角一年变化 360°，则每天变化 0.98565°。为了在成象时保持相应地面的光照度基本不变，即太阳光照角不变，则必经对卫星轨道加以修正。平均每天对升交点赤经修正量为 0.98565°，若卫星每天运行 n 圈，则每圈的修正

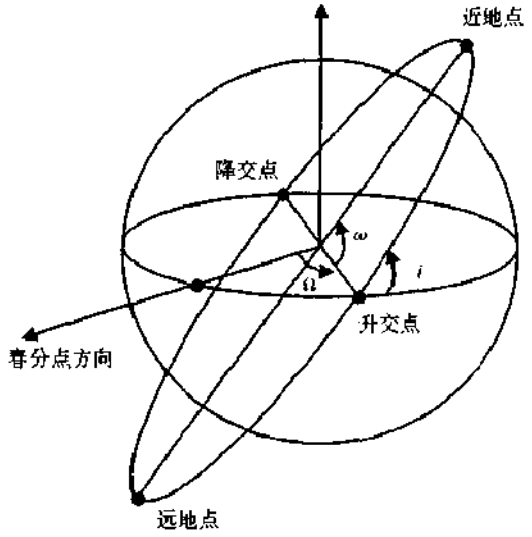


图 3-2-1　卫星空间轨道

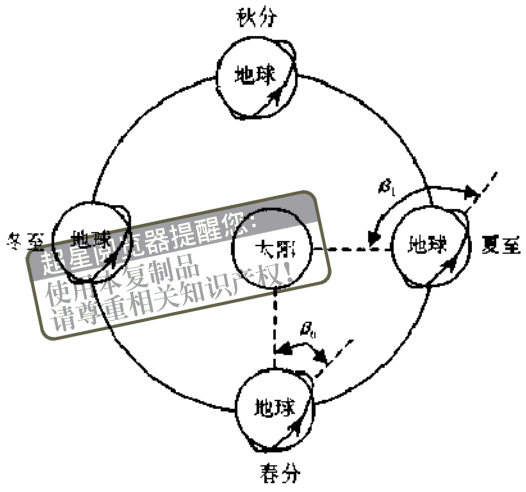


图 3-2-2　地球公转与光照角

遥星网览器提醒您：
使用本复制品
请尊重相关知识产权！

量 $\Delta\Omega=\frac{0.98565}{n}$。这就实现了卫星轨道与太阳同步，即卫星轨道面与太阳地球连线之间的夹角不随地球绕太阳公转而变化，这种轨道称之为太阳同步轨道。

(5) 近地点角距 ω

升交点向经与近地点向径之间的夹角称为近地点角距。

(6) 卫星过近地点时刻 t 和运行周期 T

卫星过近地点的时间称为过近地点时刻。当卫星轨道形状和空间位置确定以后，在某一时间 τ 卫星所在位置与过近地点时刻 t 满足开普勒方程

$$E-e\cdot\sin E=\omega_0\ (\tau-t) \tag{3-2-2}$$

式中 E 为卫星所在位置的偏近点角，e 为轨道偏心率，ω_0 为卫星运转的平均角速度。

卫星从升交点（或降交点）通过时刻到下一个升交点（或降交点）通过时刻之间的平均时间称为卫星轨道周期 T。运行周期 T 与其他轨道参数的关系应满足开普勒第三定律，即 $T=\sqrt{C\cdot(R+H)^3}$，其中 C 为开普勒常数，R 为地球半径，H 为卫星离地面的平均高度。若 $T=24$ 小时，与地球自转周期相同，则这种卫星的轨道叫做地球同步轨道。它要位于地球上空 35860km 处。

设地球自转的角速度为 ω，若 $\omega=\frac{360^\circ}{0.997269}$（恒星日），则卫星在一天内相对地球运行的圈数为 $\frac{360^\circ}{(\omega-\Omega')\cdot T}$，其中 Ω' 为轨道面的进动角速度。若 $\frac{360^\circ}{(\omega-\Omega')\cdot T}$ 等于整数 N，卫星的星下点每天以整数圈 N 经过同一地面点，则称这类轨道为回归轨道。当 $N=1$ 时的回归轨道就是地球同步轨道。回归轨道星下轨迹以等间隔经过赤道，赤道上相邻轨道之间平均间隔为

$$D=\frac{2\pi R}{N} \tag{3-2-3}$$

由于地球大气的影响，卫星高度一般不能低于约 160 公里，因此卫星运行周期不能小于 88 分钟，从而使回归数 N 不能大于 17，通常取 N 为 13，14，15，则在赤道上相邻轨迹之间平均间隔分别为 3078km，2859km 和 2668km。这个距离对大多数的成象传感器来说地面覆盖范围太大了。所以为了能够在相邻轨迹间达到影象覆盖，一般选取准回归轨道，即使 $\frac{360^\circ}{(\omega-\Omega')\cdot T}=N+\frac{K}{M}$，其中 K，M 为整数，且 M 大于 2，M 称为回归周期，以多少天表示。准回归轨道的条件式也可以写成 $(N\cdot M\mp K)(\omega-\Omega')\cdot T=360^\circ\cdot M$，此式表明：卫星运行 M 天的圈数 $(N\cdot M\mp K)$ 乘以卫星轨道周期 T 和地球相对于卫星轨道面的相对角速度，正好等于地球自转量 $360^\circ\cdot M$，即卫星运行 M 天后的星下轨迹与原来的星下轨迹重合。对于准回归轨道，赤道上相邻星下点轨迹之间的距离为

$$D=\frac{2\pi R}{N\cdot M\mp K} \tag{3-2-4}$$

当升交点东进时，式中取“+”；当升交点西退时，式中取“-”。

在上述 6 个轨道参数中，a，e 确定轨道的形状和大小，i，Ω 确定轨道面的方向，ω 确定轨道面中长轴的方向，T 确定任一时刻卫星在轨道中的位置。

卫星的位置数据在遥感影象几何校正等处理中是非常有用的，因此卫星位置的测量

超星阅读器提醒你：
请尊重相关版权！

是航天遥感中的一项重要内容。卫星位置的测量方法主要有两种，一是通过测量卫星到测站的距离和距离的变化率来确定卫星的位置；二是利用来自 GPS 卫星的信号确定卫星的位置，例如在 Landsat-4 星体上设有 GPS 接收机/处理器，通过与 GPS 导航卫星的通信，获取卫星的星历数据。利用上述方法得到的卫星位置数据是离散的，为了得到任意时刻卫星的位置，可以利用这些测量值为基础，按照“二体问题”的数学模型进行数值计算而得到。

航天遥感对地观测图象主要应用于农业、林业、地质、地理、水文、海洋、环境监测、测绘等领域。这些应用对卫星轨道的参数有如下要求：

①卫星轨道应采用近圆形轨道

为了使用一台遥感器在不同地区所获取的图象比例相差不大，或图象的地面分辨率不受卫星高度的影响，卫星轨道通常采用圆形轨道或近圆形轨道。

②卫星轨道应采用太阳同步轨道

太阳同步轨道能使卫星以同一地方时飞过成象地区上空，成象地区在每次成象时都处于基本相同的光照条件，便于监测地物的变化情况。另外，采用太阳同步轨道对卫星工程设计及遥感仪器工作非常有利，如利用太阳同步条件，可以取得较准确的日照条件，简化太阳帆板的设计和提高星上能源系统的利用效果；卫星的日照面和背阳面基本保持不变，有利于温度控制系统的设计。

③卫星轨道应采用准回归轨道

由于遥感器的视场角不能太大，为了获得全球覆盖，常采用准回归轨道。

④卫星轨道面倾角应在 90°附近

影响卫星全球覆盖能力的另一个因素是其轨道面倾角，近极地轨道可以获取包括南、北极在内的全球遥感图象。

⑤升交点赤经的选取应满足良好的光照条件

升交点赤经决定了太阳光线与卫星轨道面的夹角，也决定了星下点（成象地区）的太阳高度角，它保证了成象光照条件的一致性。

⑥卫星轨道周期与遥感器的视场角应匹配

卫星轨道周期决定了星下点轨迹之间的间隔，为了获取卫星所经整个区域的地面覆盖，遥感器视场角对应的地面宽度应大于星下点轨迹之间的距离，以使获取的图象有一定的旁向重叠率。

卫星的姿态对遥感图象的应用也有较大影响，为了修正这些影响，必须在获取数据的同时测量、记录卫星的姿态参数。卫星姿态通常用滚动（横向摇摆）、俯仰（纵向摇摆）和偏航来表示。

确定卫星姿态的常用方法有两种：一是利用姿态测量传感器进行测量；二是利用星相机测定姿态角。用于空间姿态测量的仪器有红外姿态测量仪、星相仪、陀螺姿态仪等。如美国的 Landsat 卫星使用的 AMS（Attitude Measurement Sensor）姿态测量传感器就属于红外姿态测量仪。红外姿态测量仪的基本原理是利用地球与太空温差达 287K 这一特点，以一定的角频率、周期对太空和地球作圆锥扫描，根据热辐射能的相应变化来测定姿态角。一台这样的仪器只能测定一个姿态角，对于俯仰和滚动两个姿态角须用两台仪器测定，航偏姿态角可用陀螺姿态仪测定。AMS 测定姿态角的精度为 $\pm 0.07°$。

版权所有 侵权必究 未经许可 不得复制 违者必究

使用星相机测定姿态角的方法是将星相机与地相机组装在一起，两者的光轴交角在90°～150°之间，在对地照相的同时，星相机对恒星摄影，并精确记录卫星运行时刻，再根据星历表、相机标准光轴指向等数据解算姿态角。但要求每次至少要摄取3～5颗以上的恒星。

3.2.2 几种遥感卫星简介

遥感卫星通常由观测遥感器、数据记录装置、姿态控制系统、通讯系统、电源系统、热控制系统等组成。前者叫功能设备，其余的叫通用设备。遥感卫星的主要功能是：准确记录传感器的位置，可靠地获取探测对象的数据并将获取的数据传送到地面。为了实现这一目标，卫星位置和姿态的测量、观测仪器的监视、数据的传送等是非常重要的，所有这些在整体上构成了一个大规模的系统。一个完整的遥感卫星系统主要由空中部分和地面部分两部分构成，根据各部分的功能又可以将其分为三大部分：跟踪管制系统、运行管制系统和数据获取处理系统。各个部分既有分工，又密切合作，共同完成遥感对地观测的任务。下面主要从应用的角度简要介绍Landsat卫星和SPOT卫星系统的组成、轨道参数、观测仪器、观测数据及其应用范围。

1. Landsat 卫星

美国于1972在世界上第一次发射了第一颗真正的地球观测卫星Landsat-1，到目前为止Landsat计划已经发射了1号～7号卫星，其中第6颗卫星1993年10月发射后脱离轨道失去联系，第7颗卫星1999年4月发射成功，现在正常运行的是4/5号卫星，图3-2-3是Landsat-4系统的概貌。

Landsat-4系统的飞行器部分主要由多用途飞行器组合体、仪器舱、支持跟踪与数据中继卫星天线的高杆支架、太阳帆板等组成。多用途飞行器组合体包括姿态控制、通信和数据处理、电源和推进器子系统，仪器舱装有TM传感器、MSS传感器、宽带波段通信子系统、高增益TDRS天线等。飞行器部分主要完成如下功能：

①用多波段扫描仪（MSS）和主题绘图仪（TM）提供地面图象；

②用无线电频率网直接将图象信息传送给地面站，或通过跟踪与数据中继卫星再传送给地面站；

③给仪器和设备提供电源；

④给仪器提供稳定的姿态和轨道；

⑤飞行器主要功能的遥测遥控；

⑥提供从地面控制飞行器工作的指令。

Landsat-4/5卫星的轨道参数、观测仪器、观测数据及其应用范围如下：

（1）轨道参数

Landsat-4/5号卫星采用高度为705km、轨道倾角为98°的太阳同步准回归轨道，通过赤道时刻为地方平均时上午9:39，它用16天对整个地球观测一遍，第17天返回到同一地点的上空（17日回归）。

超星工业版权提醒您：
使用本复制品
请尊重相关知识产权！

（2）观测仪器

Landsat-4/5号卫星上搭载有多光谱扫描仪（MSS）和专题扫描仪（TM）两种传感

器，MSS 和 TM 的观测参数见表 3-2-1，两种传感器都采用光学机械扫描方式获取地面目标的图象，MSS 的瞬时视场角 IFOV 为 80m，TM 的 IFOV 为 30m，地面上的观测宽度为 185km，数据通过跟踪与数据中继卫星 TDRS（Tracking And Data Relay Satellite）传送到地面。

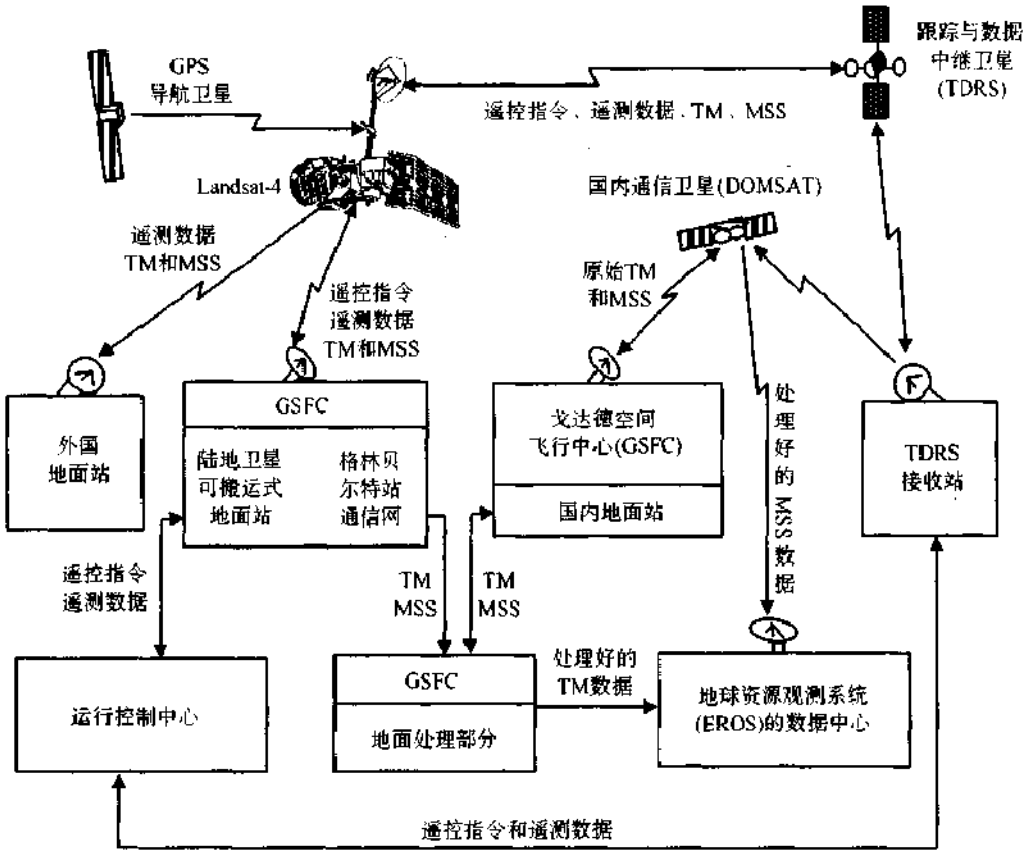


图 3-2-3　Landsat-4 系统的概貌

表 3-2-1　MSS 和 TM 的观测参数

传　感　器	波　　段	波　　长（μm）	IFOV
MSS	4	0.5~0.6　绿色	80m
	5	0.6~0.7　红色	80m
	6	0.7~0.8　近红外	80m
	7	0.8~1.1　近红外	80m
TM	1	0.45~0.52　蓝色	30m
	2	0.52~0.60　绿色	30m
	3	0.63~0.69　红色	30m
	4	0.76~0.90　近红外	30m
	5	1.55~1.75　短波红外	30m
	6	10.4~12.5　热红外	120m
	7	2.08~2.35　短波红外	30m

超星阅览器提醒您
使用本复制品
请尊重相关知识产权!

Landsat-7 于 1999 年 4 月发射成功，该卫星采用高度为 705km、轨道倾角为 98.2° 的太阳同步准回归轨道，重访周期为 16 天。星上搭载的是改进型的主题绘图仪 ETM +

和海洋观测宽视场传感器 SeaWiFs（该传感器的分辨率为 1.13km × 4.5km，带宽为 2800km），其中 ETM + 的观测参数如表 3-2-2 所示。

表 3-2-2 ETM + 的观测参数

波长（μm）		分辨率	覆盖范围
0.45～0.52	蓝色	30m	
0.52～0.60	绿色	30m	
0.63～0.69	红色	30m	
0.76～0.90	近红外	30m	183 × 170km
1.55～1.75	短波红外	30m	
10.4～12.5	热红外	60m	
2.08～2.35	短波红外	30m	
0.50～0.90	全色	15m	

（3）数据参数

MSS，TM 的数据是以景为单位的，一景数据对应地面上 185 × 170（km）^{2} 的面积，各景的数据根据卫星轨道号和由中心纬度所确定的行号进行确定，这种用轨迹和行坐标确定标称景象中心的系统称为全球索引系统 WRS（Worldwide Reference System）。数据通常用 CCT 提供给用户，在 CCT 上，每个数据单位（称为象素）是把与传感器的分辨率几乎相同的地面面积上的反射亮度记录到每个波段上，各波段亮度用 8bit 来表示。

（4）数据的应用范围

Landsat 的数据被世界上 15 个地点的地面站所接收，它是现在利用的最为广泛的地球观测数据，主要用于陆地的资源勘察、环境监测等领域。TM 数据（包括热红外波段）对沿海地区的环境监测也很有效。

2. SPOT 卫星

法国于 1986 年 2 月发射了第一颗高性能地球观测卫星 SPOT-1，到目前为止 SPOT 计划已经发射了 4 颗卫星，SPOT-5 将于 2002 年发射，其影象分辨率设计为 SPOT-4 的 2 倍（即全色波段 5m，多光谱 10m），现在正常运行的是 SPOT-1，2，4 卫星。前 3 颗卫星上搭载的是两台高分辨率传感器 HRV（High Resolution Visible Imaging System），第 4 颗星上搭载的传感器是 HRVIR（High Resolution Visible and Middle Infrared Imaging System），SPOT 卫星具有通过斜视进行立体观测等优点，图 3.2.4 是 SPOT 卫星系统的一般组成。

使用本复制品请尊重相关知识产权！

（1）轨道参数

SPOT 卫星采用高度为 830km、轨道倾角为 98.7°的太阳同步准回归轨道，通过赤道时刻为地方时上午 10：30，回归天数为 26 天，由于采用倾斜观测，所以实际上可以对同一地区用 4～5 天的间隔进行观测。

（2）观测仪器

SPOT-1，2，3 上搭载的传感器 HRV 采用 CCD（Charge Coupled Device）作为探测元件来获取地面目标的图象，HRV 的观测参数见表 3-2-3，它具有多光谱（XS）和全色（PA）两种模式，其全色波段图象具有 10m 的空间分辨率，多光谱图象具有 20m 的

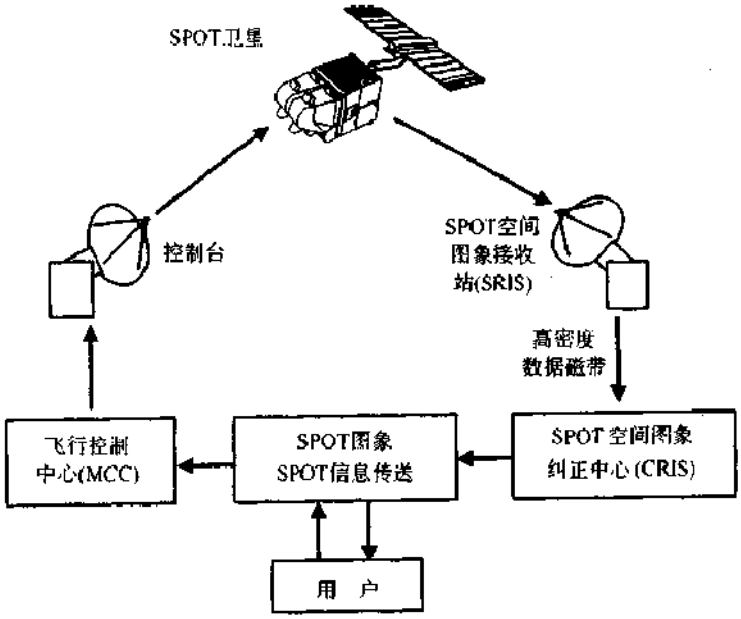


图 3-2-4 SPOT 卫星系统的一般组成

空间分辨率。SPOT-4 上搭载的是 HRVIR 传感器，其观测参数如 3-2-4 所示。

表 3-2-3 SPOT-1，2，3 上 HRV 的观测参数

波 段	波 长 (μm)		IFOV
XS1	0.5~0.59	绿色	20m
XS2	0.61~0.68	红色	20m
XS3	0.78~0.89	近红外	20m
PA	0.51~0.73		10m

表 3-2-4 SPOT-4 上 HRVIR 的观测参数

波 段	波 长 (μm)		IFOV
XS1	0.5~0.59	绿色	20m
XS2	0.61~0.68	红色	20m
XS3	0.78~0.89	近红外	20m
XS4	1.58~1.75	短波近红外	20m
PA	0.61~0.68		10m

(3) 数据参数

SPOT 的一景数据对应地面上 60×60 $(km)^2$ 的面积，在倾斜观测时横向最大可达 81km，各景位置根据 GRS（SPOT Grid Reference System）由列号（K）和行号（J）的交点（节点）来确定。各节点以两台 HRV 传感器同时观测时的位置为基础确定，奇数的 K 对应于 HRV1，偶数的 K 对应于 HRV2。倾斜观测时，由于景的中心和星下点的节点不一致，所以把实际的景中心归并到最近的节点（K，J）上。

超星阅览器提供
使用本文请尊重相关知识产权

(4) 数据的应用范围

SPOT 的数据被世界上 14 个地点的地面站所接收，数据的应用目的和 Landsat 数据相同，以陆地为主。由于它的图象分辨率高，可以用于地图的制作，通过立体观测和高程量测，可以制作 1:50000 的地形图。

3.2.3 部分对地观测卫星计划

卫星遥感可以动态、周期性地提供全球或区域范围内的对地观测数据，世界各国都在积极发展本国的卫星计划。目前美国宇航局（NASA）正在实施以 EOS（Earth Observation System）为核心的行星地球计划 MTPE（Mission to Planet Earth），EOS 的

目的是提供一个完整的太阳周期的对地观测数据序列，它包括地球观测系统的上午经过系列（EOS-AM 系列）、地球观测系统的彩色卫星 EOS-COLOR、地球观测系统的气溶胶计划（EOS-AERO 系列）、地球观测系统的下午经过系列（EOS-PM 系列）、地球观测系统的测高计划（EOS-ALT 系列）、地球观测系统的化学计划（EOS-CHEM 系列）和美国国家海洋与大气局（NOAA）的天气卫星系列等。此外美国还在实施商用小型地球观测卫星计划，这种小卫星一般采用太阳同步、圆形、低高度的极地轨道，具有灵活的指向能力，可以获取高空间分辨率和时相分辨率的图象并以较快的速度传输到地面，因此也倍受遥感界的重视。在美国发展卫星计划的同时，欧空局、日本、法国、加拿大、俄罗斯、印度等国家和国际组织也制定和实施了自己的遥感卫星计划。中国自七十年代以来，先后发射并回收了一系列返回式科学实验卫星，建立了风云系列气象卫星体系，并且已在国民经济的许多领域发挥作用，传输型资源卫星计划正在实施之中，利用小卫星进行对地观测的项目也在顺利研制之中。与此同时我国自行研制了包括全景扫描相机、大幅面框幅相机、恒星相机、CCD 相机、成象光谱仪以及合成孔径侧视雷达等星载传感器。我国的遥感技术正在逐步与国际接轨。表 3-2-5 列出了部分正在和将要实施的遥感卫星系统。

表 3-2-5　部分对地观测卫星

卫星/计划	轨道参数					应用领域	传感器	计划工作期间（y）
	轨道类型	高度（km）	倾斜（°）	重访周期（d）	地方时			
ADEOS 先进的地球观测卫星（日本）	太阳同步	797	98.6	41	10：30A	全球陆地、海洋、大气观测等	OCTS，AVNIR，NSCAT，TOMS，POLDER，IMG，ILAS	1996～1999
ADEOSⅡ 先进的地球观测卫星 2 号（日本）	太阳同步	800	99	3 或 4	10：30A	全球变化监测，服务于 WCRD/GEWEX 等计划	AMSR，GLI，DCS，ILAS-Ⅱ，TOMS，SeaWinds，POLDER，HiRDLS	1999～2004
ALMAZ-1B 地球观测系列卫星“粗制钻石”（俄罗斯）	非太阳同步圆形轨道	400	73			制图、陆地监测、地质、勘察、生态监测、海洋、渔业、航运和突发事件监测等	SLR-3，SAR-3，SAR-10，SAR-70，MSU-E，MSU-SK，SROM，OSSI，BALKOM-2	1996～1998
EOS 改进计划版本（地球观测系统，美国）						全球变化监测、全球和区域环境变化预测等	高度计、GGI，LAWS，NSCATⅡ，SAFIRE 等	1998～
CBERS 中国、巴西地球观测卫星（中国、巴西）	太阳同步	778	98.5	26	10：30A	地球资源和环境监测	WFI，CCD，IR-MSS	1999～
ERS-2 欧洲遥感卫星 2 号（欧空局）	太阳同步	824		3	9：30A	海洋、极冰、陆地生态、地质、林业、气象、大气物理、大气化学等	AMI，RA-1，ATSR，LRR，PRARE	1995～1998

超星阅览器提醒您：
使用本复制品
请尊重相关知识产权

续表

卫星/计划	轨道参数					应用领域	传感器	计划工作期间（y）
	轨道类型	高度（km）	倾斜（°）	重访周期（d）	地方时			
IRS-1C/1D 印度遥感卫星（印度）	太阳同步	817	98.68		10：30A	陆地表面观测	PAN，LISS-Ⅲ，WIFS	1995～1999
SPOT-5（法国）	太阳同步准回归轨道	830	98.7	26		陆地表面观测	HRG，SWIR	2002
Landsat-7（美国）	太阳同步	705.3	98.2	16		陆地资源勘察	ETM+，SeaWiFs	1999～
RADARSAT 加拿大雷达卫星（加拿大）	准圆太阳同步晨暮轨道	798	98.6	24	6：00P	北极冰运动、农林业、地形、海洋和管理	SAR	1995～2000
EarthWatch 地球观测成象系统（美国）	太阳同步轨道（极地）	470	97.3			GIS、制图	EarlyBird，QuickBird	1996～2001
Orbital Science 轨道科学观测成象系统（美国）	太阳同步轨道	460	97.25			制图	OrbView-1	1997～2002
Space Imaging 空间成象系统（美国）	太阳同步轨道	680	98.10			正射影象	SpaceImaging	1997～

超星阅览器提醒您：
使用本复制品
请尊重相关知识产权！

第四章　传感器及其图象特性

传感器是收集、探测、记录地物电磁波辐射信息的工具。它的性能决定了遥感的能力，即传感器对电磁波波段的响应能力（如探测灵敏度和波谱分辨率）、传感器的空间分辨率及图象的几何特性、传感器获取地物电磁波信息量的大小和可靠程度等。本章主要介绍常见的几种传感器的成象原理及其图象的特性。

4.1　传感器的分类及其基本组成

4.1.1　传感器的分类

传感器的种类很多，分类的方式也多种多样，常见的分类方式有以下几种：

按电磁波辐射来源的不同分为两类：即主动式传感器和被动式传感器。主动式传感器本身向目标发射电磁波，然后收集从目标反射回来的电磁波信息，如合成孔径侧视雷达等。被动式传感器收集的是地面目标反射来自太阳光的能量或目标本身辐射的电磁波能量，如摄影相机和多光谱扫描仪等。

按传感器的成象原理和所获取图象的性质不同，可将遥感器分为摄影机、扫描仪和雷达三种。摄影机按所获取图象的特性又可细分为框幅式、缝隙式、全景式三种；扫描类型的传感器按扫描成象方式又可分为光机扫描仪和推帚式扫描仪，雷达按其天线形式分为真实孔径雷达和合成孔径雷达。

按传感器是否获取图象可分为图象方式的传感器和非图象方式的传感器。图象方式的传感器的输出结果是目标的图象；而非图象方式的传感器的输出结果是目标的特征数据，如微波高度计记录的是目标距平台的高度数据。

对传感器更详细的分类情况见图 4-1-1，文献［18］给出了现在和将来主要的航天传感器的名称和主要参数，感兴趣的读者请自己查阅有关资料。

超星阅览器 您
使用本复制品
请尊重相关知识产权!

4.1.2　传感器的组成

传感器的种类很多，但基本上都由收集器、探测器、处理器、输出器等 4 部分组成，如图 4-1-2 所示。

其中各部分的主要功能如下：

收集器：收集来自地物（目标）的辐射能量。常用作收集器的器件有透镜组、反射镜（组）、天线等。

探测器：将收集的辐射能转变成化学能或电能。如摄影感光胶片、光电二极管、光敏和热敏探测元件等。

处理器：将探测后的化学能或电能等信号进行处理，如显影及定影、信号放大、变换、甚至校正和编码等。处理器的类型有摄影处理装置、电子处理装置等。

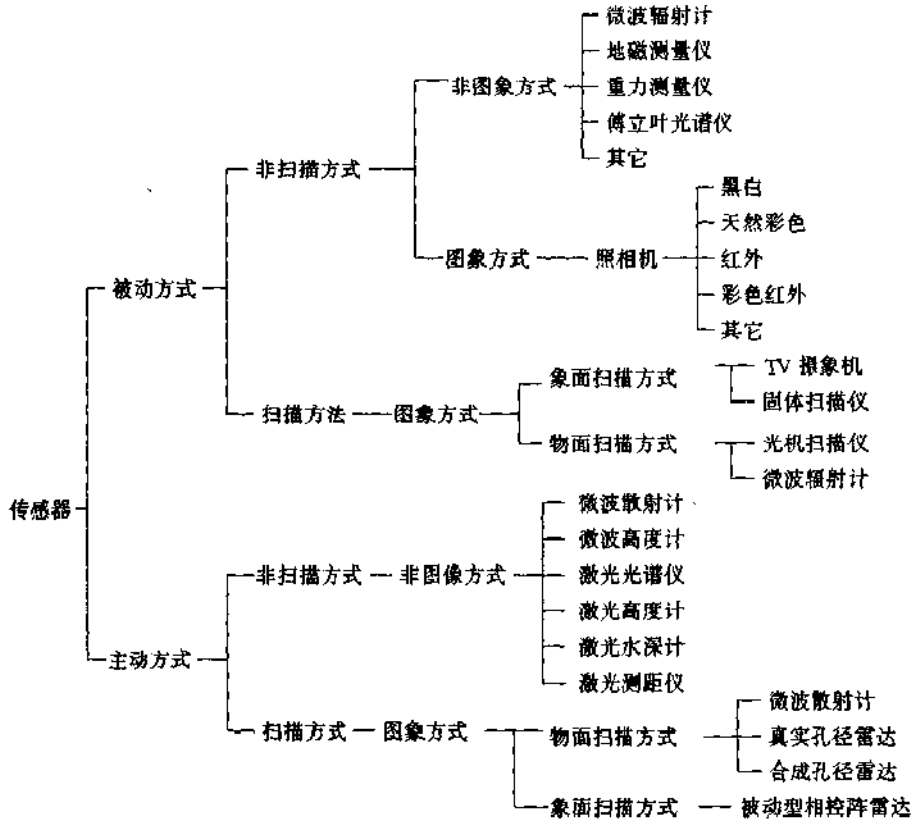


图 4-1-1 传感器的分类情况

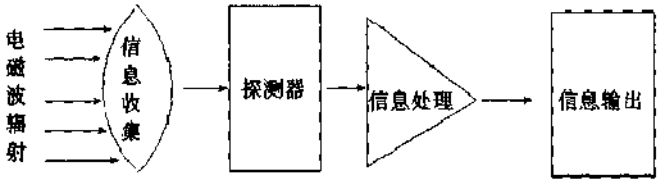


图 4-1-2 传感器的一般构成

输出器：将获取的数据输出出来。用做输出器的有扫描晒象仪、阴极射线管、电视显象管、磁带记录仪、彩色喷墨记录仪等。

超星阅览器为您：
使用本复制品
请尊重相关知识产权！

4.2 摄影型传感器

摄影照相机是较为常用的遥感成象设备，主要由物镜、快门、光圈、暗盒（胶片）、机械传动装置等组成。曝光后的底片只是目标的潜影，须经过摄影处理后才能显示影象。遥感中常见的摄影机有单镜头画幅式摄影机、缝隙式摄影机、全景式摄影机、多光谱摄影机。

4.2.1 单镜头框幅式摄影机

航空、航天摄影测量的相机一般采用单镜头画幅式摄影机，这类相机的成象原理与普通照相机相同，在空间摄站上摄影的瞬间，地面上视场范围内的目标的辐射信息一次

性地通过镜头中心后在焦平面上成象。对于测图用的航空摄影机，要求非常严格，它必须满足很好的光学条件及几何条件：

①镜头畸变要小；

②解象力要高，包括在图象的边缘部分都能得到清晰的图象；

③光轴与胶片平面必须正交；

④可以精密测量出光轴与象面的位置关系，即摄影机的内方位元素；

⑤胶片应具备严格的平面性，要用真空装置将胶片压紧；

⑥为使相机在高速运动中取得清晰的、消除象移的图象，要配有使胶片平面移动的象移补偿装置。

用于航空摄影的摄影机有瑞士徕卡公司的 RC 系列摄影机（如 RC—30），德国蔡司厂的 LMK 系列摄影机（如 LMK2000）、RMK 系列的 TOP 摄影机以及国产的 HS2323 摄影仪。目前较新型的航摄仪都带有 GPS 自动导航和 GPS 控制的摄影系统，它能自动控制飞机按预先设计的航线飞行和控制摄影机按时曝光，并能及时记录曝光时刻的摄站坐标，精度约为 10cm。

对于在太空环境工作的摄影机，在满足上述 6 条基本要求外，它还会遇到以下一些特殊问题需要解决：

①飞行器在空间不容许打开蒙皮，因此摄影窗口成了物镜的一部分。由于外界真空和摄影机内大气之间的差异，会造成窗口变形。再者舱内的合成材料挥发出的沉淀物，会附着于窗口上，降低成象质量。为此必须选择表面质量、光学均匀性和抗弯强度极好的玻璃做为窗口，并有清除窗口污染的装置。

②摄影机在空间摄影地区的地理纬度相差很大，太阳高度角各不相同，且不同地区的地物反射能力也不尽相同。为了随时得到合适的曝光量，必须装备自动曝光控制装置。

③摄影机在空间工作时的环境温度（如卫星向阳和背阳会使相机内部温度差异很大），会直接影响光学系统的性质，改变焦面位置和胶片灵敏度，如温度变化而导致内压力变化，使物镜焦面产生变化，使胶片溶剂挥发产生静电现象和导致窗口结晶等。因此，必须控制窗口内合适的温度、压力和湿度，尽量减少这些因素对空间摄影机光学系统的影响。

超星阅览器提醒您：
使用本复制品
请尊重知识产权！

④由于星体的快速移动、平台高度大，须采用高感光度的胶片。

⑤为了补偿胶片变形，一般带有格网摄影。

用于航天遥感的这类相机也很多，如已在美国航天飞机及空间实验室工作过的 RMK-A30/23 摄影机，焦距为 305.128mm，象幅为 23cm × 23cm，标称卫星高度为 250km，象片比例尺为 1:820000，每幅象片对应地面范围为 189 × 189 $(km)^2$，物镜最大畸变差为 6μm，分辨率为 39 线对/mm，每 4～6 秒或 8～12 秒曝光一次，相机姿态控制在 0.5°以内，取得影象的航向重叠度为 60%～80%。据报道，利用它可以测制 1:50000 和 1:100000 比例尺的地形图。

另外一种有代表性的空间摄影机是美国的大象幅摄影机（LFC），相机焦距为 305.0mm，分辨率为 80 线对/mm，象幅为 23cm × 46cm。航高为 225km 时象片比例尺为 1:738000，对应地面范围为 170 × 340 $(km)^2$。利用星相机测定相机摄影时的姿态，

测定精度可达 ± 5″，整个摄影机的姿态可控制在 0.5°以内。

4.2.2 缝隙式摄影机

缝隙式摄影机又称航带式或推扫式摄影机。缝隙式摄影机安装在飞机或卫星上，摄影瞬间所获取的影象是与航向垂直、且与缝隙等宽的一条地面影象带。如图 4-2-1 所示。当飞机或卫星向前飞行时，在相机焦平面上与飞行方向垂直的狭隙中，出现连续变化的地面影象。若相机内的胶片也不断地卷绕，且卷绕速度与地面影象在缝隙中的移动速度相同，就能得到连续的条带状的航带摄影象片。

这种相机不是一幅一幅地曝光，而是连续曝光，相机上不需要快门。为了摄得清晰、连续的影象，必须使卷片速度 W_p 与景物在相机焦平面内移动的速度 W_i 相等，即

$$W_p = W_i = W \cdot \frac{f}{H} \tag{4-2-1}$$

式中 W 为飞机或卫星的地速，H 为平台高度，f 为相机焦距。

超星阅览器提醒您
使用本资源
请尊重相关知识产权

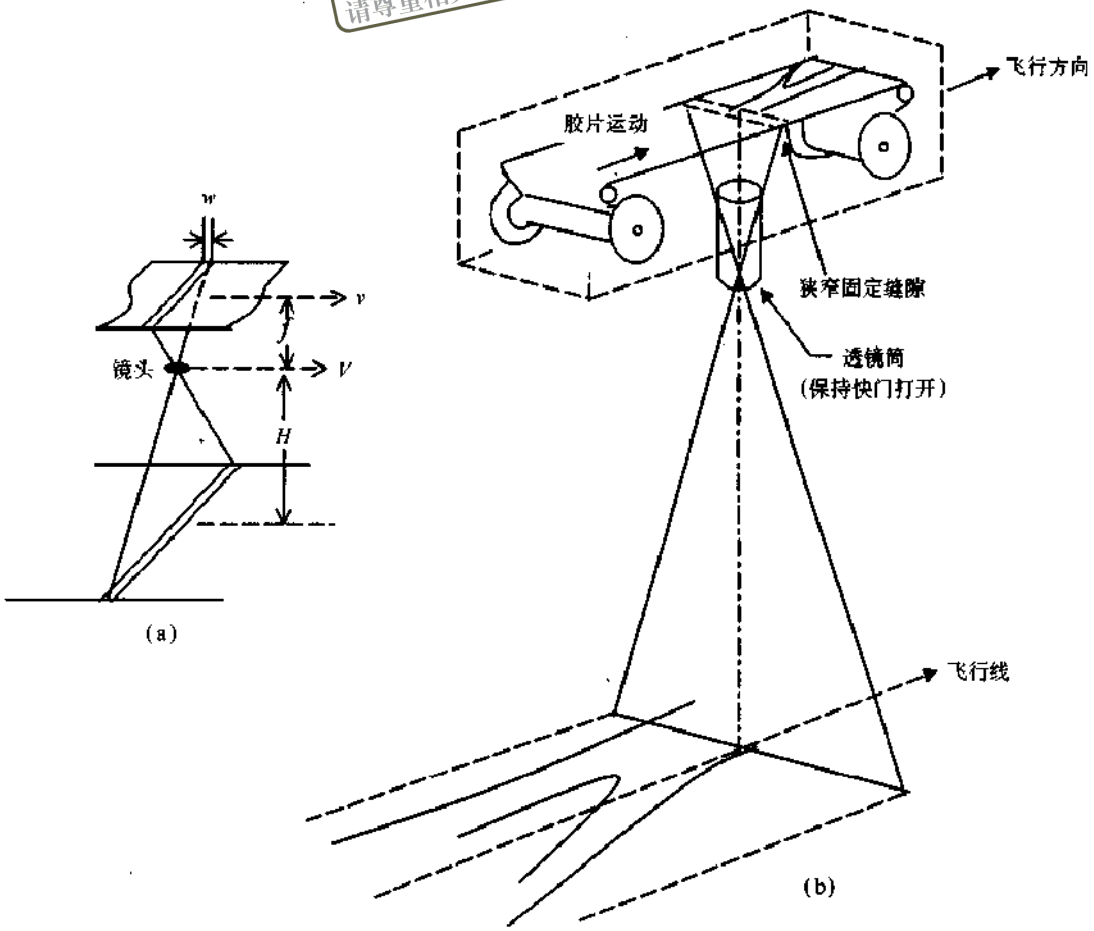


图 4-2-1 缝隙式摄影机成象过程

从上式可以看出，摄影的同步性与平台速高比$\frac{W}{H}$有关。当平台速度与卷片速度不匹配时，尽管它仍是多中心投影（每个缝隙的影象有同一个投影中心），但是条缝间的影象会出现重叠和不连续性。由于在实际摄影中难以保持合适的速高比，相机姿态变化

不易控制，这种摄影机已较少应用，但缝隙式摄影机的思想是目前较流行的线阵 CCD 传感器的基础。

4.2.3 全景式摄影机

全景式摄影机又称摇头相机或扫描相机，其成象原理如图 4-2-2 所示。

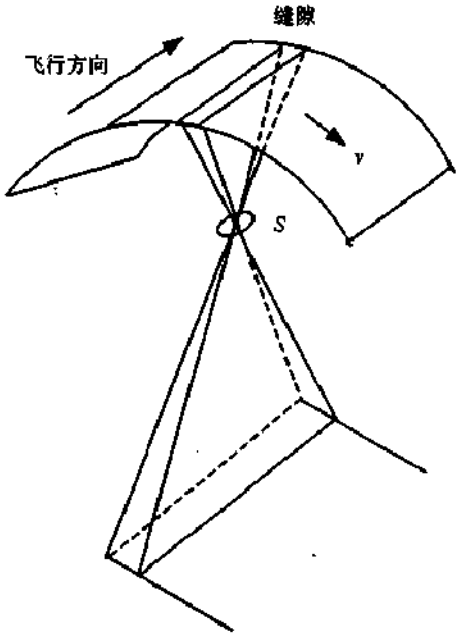


图 4-2-2 全景式摄影机成图原理

全景式摄影机的特点是焦距长，有的长达 600mm 以上，可在长约 23cm、宽达 128cm 的胶片上成象。这种相机的精密透镜既小又轻，它的摄影视场很大，有时能达 180°，可摄取航迹到两边地平线之间的广大地区。这种相机是利用焦平面上一条平行飞行方向的狭缝来限制瞬时视场的，因此，在摄影瞬间得到的是地面上平行于航迹线的一条很窄的影象，当物镜沿垂直航线方向摆动时，就得到一幅全景象片。在这种相机中，胶片呈弧状放置，当物镜扫描一次后，胶片旋进一幅。由于每个瞬间的影象都在物镜中心一个很窄的视场内构象，因此象片上每一部分的影象都很清晰，象幅两边的影象分辨率明显提高。但由于全景相机在成象过程中焦距保持不变，而物距随扫描角的增大而增大，因此在图象上会出现两边比例尺逐渐缩小的现象。

使用本复制品
请尊重相关知识产权!

4.2.4 多光谱摄影机

对同一地区、在同一瞬间摄取多个波段影象的摄影机称为多光谱摄影机。采用多光谱摄影的目的，是充分利用地物在不同光谱区有不同的反射特征，来增加获取目标的信息量，以便提高影象的判读和识别能力。常见的多光谱摄影机有单镜头和多镜头两种形式。

1. 单镜头型多光谱摄影机

单镜头型多光谱摄影机成象原理是在物镜后利用分光装置，将收集的光束分离成不同的光谱成分，然后使它们分别在不同胶片上进行曝光，而形成地物不同波段的影象。这种摄影机常用的分光原理是利用半透明的平面镜的反射和透射现象，将收集的光束分解成所要求的几个光束，然后使它们分别通过不同的滤光片，从而达到分光的目的。图 4-2-3 是一种四波段相机的分光示意图。

由于光束在分离过程中有一部分能量被损失，而且在不同波段的损耗量不等，所以这种摄影机取得的多光谱象片的影象质量会受到不同程度的影响。

2. 多镜头型多光谱摄影机

多镜头型多光谱摄影机成象过程是利用多个物镜获取地物在不同波段的的反射信息

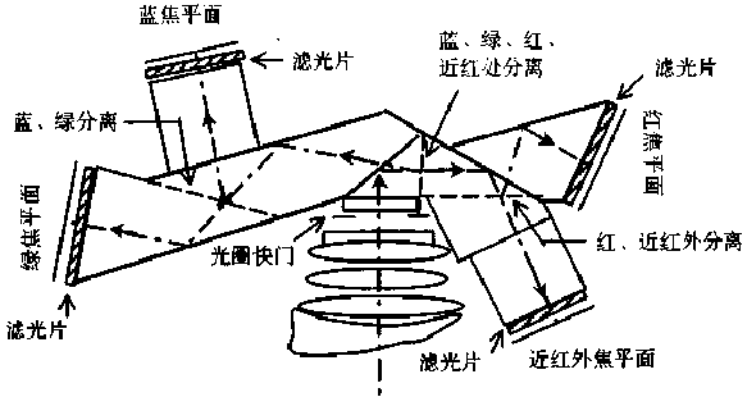


图 4-2-3　多光谱摄影机分光原理

(采用在不同镜头前加不同滤光片的形式)，并同时在不同胶片上曝光而得到地物的多光谱象片。这种相机物镜镜头的数量决定了其获取多光谱象片的波段能力，如四镜头多光谱相机可同时获取四个波段的多光谱象片。图 4-2-4 为四镜头多光谱相机的成象原理图。

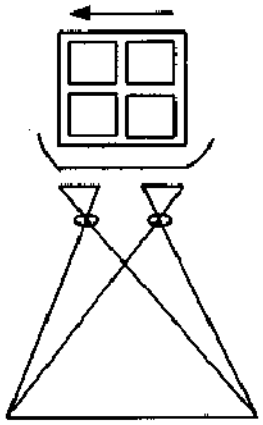


图 4-2-4　多镜头型多光谱摄影机成象原理

这种摄影机在获取象片时还应注意不同滤光片与不同类型感光胶片的配合使用。另外摄影时还应做到以下几点：

①快门的同步性要好。以便在同一时刻获取地物的多光谱象片；

②各物镜的光轴必须严格平行，以保证多光谱象片的套合精度；

③由于不同波长的光聚焦后的实际焦面位置不同，应使地物成象在最清晰的位置上。

摄影相机在成象时要根据不同的目的来选择合适的胶片和对应的滤光片。摄影用的胶片根据其感光特性可分为黑白胶片、彩色胶片和彩色红外胶片。常用的黑白胶片有全色胶片和全色红外胶片，它们的感光范围分别为 0.4～0.7μm 和 0.4～0.8μm。地物在黑白胶片上影象的密度与其反射太阳辐射的能力大小成正比。彩色胶片的感光范围是 0.4～0.7μm，地物在负片上的颜色与地物自身的颜色互补，在晒印象片（正片）上的颜色与地物颜色一致。彩色红外胶片的感光范围是 0.5～0.8μm，仅对绿色、红色和近红外光起作用。在负片上，绿色物体呈黄色，红色物体呈品色，反射近红外光能力强的物体呈青色，而在正片上绿色物体呈蓝色，红色物体呈绿色，反射近红外光能力强的物体呈红色。地物在彩色红外象片的颜色与其自身颜色不一致，所以彩色红外象片又叫假彩色红外象片。

温馨提醒您：
请尊重作者版权！

滤光片是改变光线光谱成分的介质。滤光片按制作材料可分为玻璃滤光片、胶质滤光片、塑料滤光片和液体滤光片。摄影中采用的大多是玻璃滤光片。为了取得理想的影象，滤光片在摄影中是不可缺少的器件。在摄取全色象片和彩色象片时，为了减少大气散射光的影响，增加影象反差和防止偏色，常在摄影机的镜头前加浅黄色滤光片来限制蓝光的通过；假彩色红外摄影时，镜头前一般加黄色滤光片，它可将蓝光成分全部吸

收，仅允许绿、红、红外光通过，达到摄影目的。

摄影照相机是用胶片来记录地物电磁波辐射信息的，胶片记录的灵敏度和分辨率都很高。但是它所响应波段较窄，在 0.4～1.1μm 之间，即它仅能获取地物的 0.4～1.1μm 的电磁波信息；而且它是以胶片形式来记录地物信息的，不便于地物信息的实时传输和数字处理。因此，这种方式的传感器难以进行较长时间的连续工作。

4.3 摄影象片的特性

利用摄影照相机取得的象片统称为摄影象片。用框幅式、缝隙式、全景式、多光谱摄影机摄取的象片又分别称为做框幅式象片、缝隙式象片、全景象片和多光谱象片。摄影象片的特性通常指它的几何特性和物理特性。

4.3.1 框幅式象片的几何特性

框幅式象片是所摄地区的中心投影，地面上各点的反射光线通过一固定点（摄影机物镜中心 S）到达一平面（象平面）上形成影象，如图 4-3-1 所示。

超星阅览器提醒您：
使用本复制品
请尊重相关知识产权！

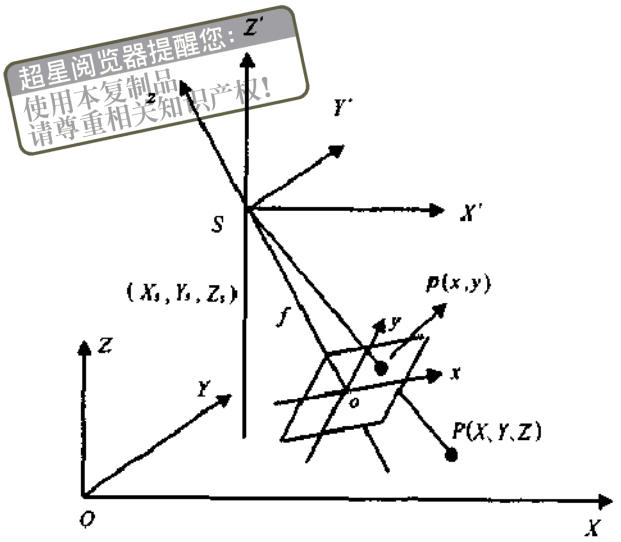


图 4-3-1 框幅式象片的物象关系

1. 象点与对应地面点的坐标关系

根据航空摄影测量学可知象点坐标与对应地面点坐标之间的关系（参考图 4-3-1）为

$$x = -f\frac{a_1(X-X_s)+b_1(Y-Y_s)+c_1(Z-Z_s)}{a_3(X-X_s)+b_3(Y-Y_s)+c_3(Z-Z_s)} \tag{4-3-1}$$

$$y = -f\frac{a_2(X-X_s)+b_2(Y-Y_s)+c_2(Z-Z_s)}{a_3(X-X_s)+b_3(Y-Y_s)+c_3(Z-Z_s)} \tag{4-3-2}$$

其中 f 为摄影象机的焦距，可从相机资料中查出，为已知值；

(x, y) 为象点 p 在象坐标系 $o-xy$ 中的坐标；

(X, Y, Z) 是与 (x, y) 对应的地面点 P 在地面坐标系 $O\text{-}XYZ$ 中的坐标；

(X_s, Y_s, Z_s) 为摄站 S 在地面坐标系 $O\text{-}XYZ$ 中的坐标；

$(a_i, b_i, c_i, i=1, 2, 3)$ 为外方位角元素所确定的旋转矩阵中的元素。

参数 (X_s, Y_s, Z_s)、$(a_i, b_i, c_i, i=1, 2, 3)$ 是框幅式象片的姿态参数，可用象片上的控制点（即其地面坐标已知的点）用解析摄影测量的方法解算出来。

2. 象片的比例尺

象片的比例尺是象片上某线段长度与地面相应长度之比。根据航空摄影测量学可知当象片水平、地面平坦时象片的比例尺为一常数，即

$$\frac{1}{m}=\frac{f}{H} \tag{4-3-3}$$

式中 m 为象片比例尺分母，f 为摄影相机的焦距，H 为相对航高（即平台高度）。当象片不水平、地面有起伏时，象片比例尺为

$$\frac{1}{m}=\frac{(f-y_c\sin\alpha)^2}{H\cdot\sqrt{[(f-y_c\cdot\sin\alpha)\cos\varphi+x_c\cdot\sin\alpha\cdot\sin\varphi]^2+f^2\cdot\sin^2\alpha}} \tag{4-3-4}$$

式中 x_c，y_c 是以等角点为原点，以等比线为 x 轴、以主纵线为 y 轴的坐标系中的象点坐标，α 为象片倾斜角，φ 为象片上线段与 X 轴的夹角。

此为试读，需要完整PDF请访问：www.ertongbook.com

从式中看出，象片比例尺与象点位置 (x_c, y_c)、平台高度 H、象点所处线段的方向及象片倾角 α 有关，它有如下三个特点：

①倾斜象片上的比例尺随点位不同而不同；

②象点的比例尺是有方向的；

③当地面有起伏时，象点对应的 H 值发生变化，象比例尺也发生变化。

3. 影象的变形规律

在成象时由于多种因素的影响，影象本身的几何形状与相应地物的几何形状往往是不一致的。影响影象形状即象点成象位置的因素很多，如摄影材料伸缩变形、底片未压平、物镜畸变差、大气折光差及地球弯曲等。这里仅考虑中心投影所固有的两种象点移位现象，即倾斜误差和投影误差。

摄影时因象面倾斜而引起的象点移位称为象点的倾斜误差，如图 4-3-2 所示。

倾斜误差 δ_α 的计算公式如下

$$\delta_\alpha=-\frac{r_c^2\sin\varphi\cdot\sin\alpha}{f-r_c\cdot\sin\varphi\cdot\sin\alpha} \tag{4-3-5}$$

式中 α 为象片倾斜角，φ 是象点和等角点的连线与等比线的夹角，r_c 是象点 p 到等角点 c 的线段长，f 为焦距。

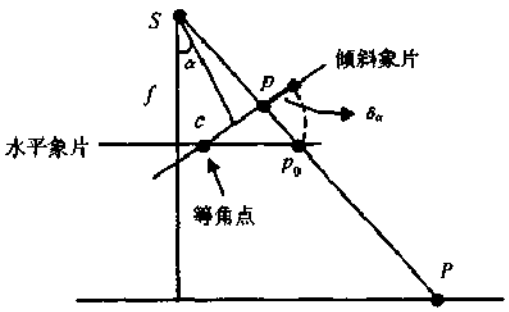


图 4-3-2 倾斜误差示意图

从上式中可以看出，倾斜误差具有以下特性：倾斜误差发生在等角点辐射线上，等比线（即象片上等角点

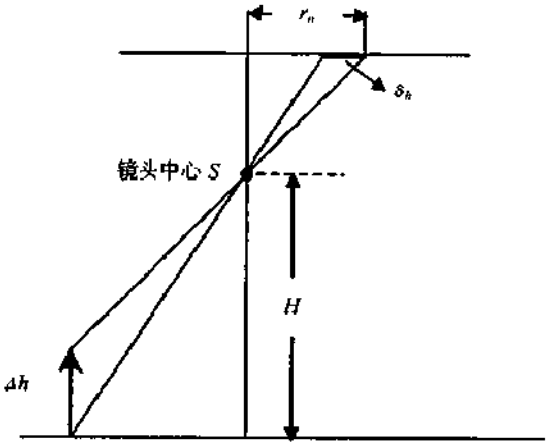


图 4-3-3　投影误差示意图

的连线）上没有倾斜误差；象点距等角点愈远，倾斜误差愈大，在等角点辐射距相等的条件下，在主纵线（即通过主光轴和主垂线所作的主垂面与象片的交线）上象点的倾斜误差最大；等比线将象片分为两部，包含主点部分的所有象点都向着等角点移位，包含底点部分的所有象点都背着等角点移位。

投影误差是由于地面起伏所引起的象点移位。无论象片是否水平，当地面有起伏时，对高于或低于某一基准面的地面点，它在象片上的象点与该点在基准面上垂直投影点在象片上的构象点之间有着直线移位，如图 4-3-3 所示。在近似垂直摄影象片上投影误差可按下式来计算

$$\delta_h = \frac{\Delta h}{H} r_n \tag{4-3-6}$$

式中 Δh 为象点所对应地面点与基准面间的高差，H 为相对基准面的平台高度，r_n 是象点至底点的距离（即底点辐射距）。

超星阅览器提醒您：
请尊重相关版权！

投影误差的大小与底点辐射距、相对于基准面的高差成正比，与平台高度成反比。投影误差发生在底点辐射线方向上，对于高于基准面的地面点，其象点向背着底点的方向移位；对于低于基准面的地面点，其象点向朝着底点的方向移位。对于起伏地区，由于投影误差的影响，地物的影象形状和地面实际形状是不一致的，但对航天象片而言，因地面高差相对于平台高度较小，投影误差也较小，对影象形状影响不大。

4.3.2　缝隙式象片的几何特性

缝隙式象片的成象过程与画幅式象片是不同的，在每个成象的瞬间，只有一个条带的地面辐射通过镜头在胶片上曝光成象，所以对整张缝隙式象片来讲，它是所摄地区的行中心投影。

1. 成象瞬间象点与对应地面点的坐标关系

设地面坐标系为 $D\text{-}XYZ$，传感器坐标系为 $s\text{-}uvw$，象空间坐标系为 $s\text{-}xyz$，传感器坐标系和象空间坐标系各轴相互平行，如图 4-3-4 所示，在缝隙连续摄影的情况下，地面点 P 在地面坐标系中的坐标为（X，Y，Z），其象点 p 在象空间坐标中的坐标为（0，y，$-f$），则利用共线条件方程可以写出地面点 P 与其在缝隙影象中的象点 p 之间的关系式为

$$\begin{bmatrix} 0 \\ y \\ -f \end{bmatrix} = \frac{1}{\lambda} \begin{bmatrix} a_1(t) & b_1(t) & c_1(t) \\ a_2(t) & b_2(t) & c_2(t) \\ a_3(t) & b_3(t) & c_3(t) \end{bmatrix} \begin{bmatrix} X - X_S(t) \\ Y - Y_S(t) \\ Z - Z_S(t) \end{bmatrix} \tag{4-3-7}$$

式中 $a_i(t), b_i(t), c_i(t)$，$i=1$，2，3 是 t 时刻地面坐标系与传感器坐标系之间变换的

方向余弦，在不同的成象时刻它们的值是变化的，是时间的函数。$X_s(t)$, $Y_s(t)$, $Z_s(t)$ 是 t 时刻摄站 S 在地面坐标系中的坐标，它们也是时间的函数。

缝隙式遥感器成象属于动态摄影，在不同的时刻其外方位元素是不同的，每条缝隙都有自己的外方位元素，很难正确解算。在实际工作中一般是采用以时间为变量的多项式作为外方位元素的表征函数，由于在缝隙式象片上 t 与飞行方向的图象坐标 x 成正比（如图 4-3-5 所示），因此外方位元素常写成象坐标 x 的函数

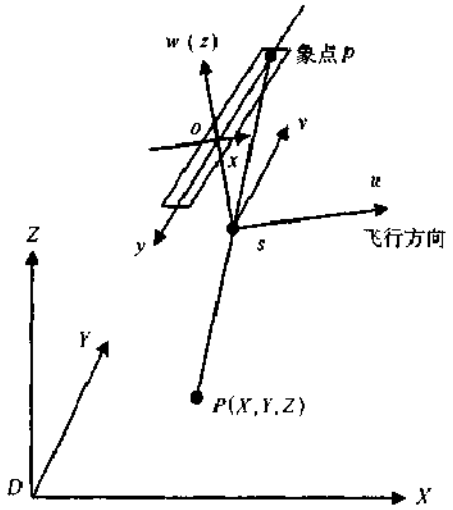


图 4-3-4　缝隙影象成象瞬间的物象关系

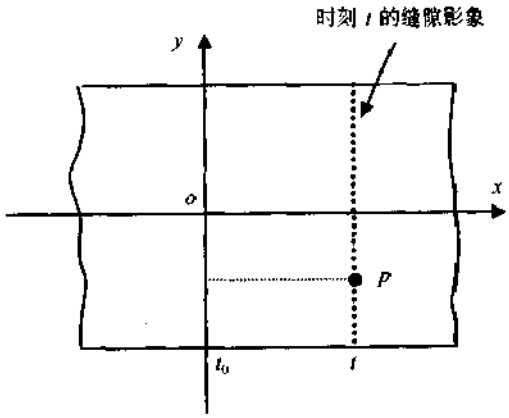


图 4-3-5　时间 t 与位置 x 的关系

$$
\begin{aligned}
X_s(t) &= X_S(t_0) + d_1x + d_2x^2 + \cdots \\
Y_s(t) &= Y_S(t_0) + e_1x + e_2x^2 + \cdots \\
Z_s(t) &= Z_S(t_0) + f_1x + f_2x^2 + \cdots \\
\alpha_x(t) &= \alpha_x(t_0) + g_1x + g_2x^2 + \cdots \\
\omega(t) &= \omega(t_0) + h_1x + h_2x^2 + \cdots \\
\kappa(t) &= \kappa(t_0) + k_1x + k_2x^2 + \cdots
\end{aligned}
\tag{4-3-8}
$$

超星阅览器提醒您：
使用本复制品
请尊重相关知识产权！

式中 $X_s(t_0)$, $Y_s(t_0)$, $Z_s(t_0)$, $\alpha_x(t_0)$, $\omega(t_0)$, $\kappa(t_0)$，是时刻 t_0 时成象缝隙的外方位元素。

有些情况下需在缝隙式象片上建立一个统一的象平面坐标系，这个坐标系以某一起始时刻 t_0 的缝隙影象为 y 轴，缝隙中点为坐标原点，x 轴的正方向则与平台前进方向一致，如图 4-3-5 所示。在这个坐标系中任一象点 p 的 x 坐标和时间 t 的依赖关系为

$$x = (t - t_0) \cdot W_p \tag{4-3-9}$$

式中 W_p 是胶片移动速度，t 是象点 p 成象时的时刻。

若在缝隙式摄影成象时胶片移动速度 W_p 与卫星的地速 W 相匹配，则

$$x = \frac{f}{H} \cdot W \cdot t \tag{4-3-10}$$

若地面坐标系的 X 轴与飞行方向平行，则 $W \cdot t = X - X_0$，X，X_0 分别为 t，t_0 时刻星下点在地面坐标系中的 X 坐标。在传感器倾斜角为零的情况下，象点坐标 x 与地

面点坐标有下列关系

$$x = \frac{f}{H} \cdot W \cdot t = \frac{f}{H}(X - X_0) \tag{4-3-11}$$

当然，在一般情况下，由于姿态角的存在，上式不是严格成立的。

2. 象片的比例尺

若取

$$\begin{bmatrix} X' \\ Y' \\ Z' \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} X - X_S(t) \\ Y - Y_S(t) \\ Z - Z_S(t) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} a_1 & a_2 & a_3 \\ b_1 & b_2 & b_3 \\ c_1 & c_2 & c_3 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 0 \\ y \\ -f \end{bmatrix} \tag{4-3-12}$$

且假定地面平坦（即有相同的航高 H），综合（4-3-7）式和（4-3-11）式可得

$$X - X_S(t_0) = \frac{H}{f} \cdot x - H\frac{X'}{Z'} \tag{4-3-13}$$

$$Y - Y_S(t_0) = -H\frac{Y'}{Z'} \tag{4-3-14}$$

按照象片比例尺的推导过程有

$$\frac{1}{m} = \frac{dl}{dS} = \frac{f}{H \cdot \sqrt{\sin^2 r - \frac{f(a_2Z' - c_2X')}{(Z')^2}\sin 2r + \frac{f^2}{(Z')^4}[(a_2Z' - c_2X')^2 + (b_2Z' - c_2Y')^2]\cos r}} \tag{4-3-15}$$

式中 dl，DS 分别是象片和地面上相应线段的微分，r 为 dy 与 dl 在象片上的夹角，如图 4-3-6 所示。

由此可见，缝隙式象片的比例尺具有随多种因素变化的特性，它与平台高度、平台姿态角、在象片上的位置及方向有关，在象片上不同的位置、不同的方向具有不同的象比例尺。

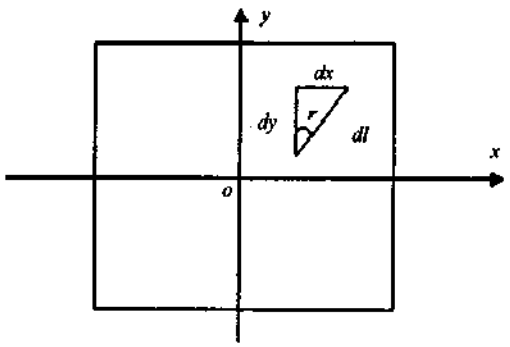


图 4-3-6　r 与 dy，dl 之间的关系

当 $r = 0°$ 时的象比例尺（即在平行于缝隙方向上的象点的比例尺）为

$$\frac{1}{m} = \frac{(Z')^2}{H \cdot \sqrt{(a_2Z' - c_2X')^2 + (b_2Z' - c_2Y')^2}} \tag{4-3-16}$$

此时它与画幅式象片具有相同的比例尺特性。

当 $r = 90°$ 时，$\frac{1}{m} = \frac{f}{H}$，即在平坦地区的象片上沿飞行方向的比例尺处处一致。

超星阅览器提醒您：
使用本复制品
请尊重相关版权！

3. 影象的变形规律

缝隙式象片因自身的行中心投影特性也存在影象的变形，主要表现为因传感器外方位

元素而引起的象点移位和因地形起伏而引起象点移位（即投影误差）两种变形形式。

对每个缝隙而言，由外方位元素引起的象点位移相当于画幅式象片上 $x=0$ 的情况，因此象点的位移为

$$dx = -\frac{f}{H}dX_s - f\cdot a_x + y\cdot\kappa \tag{4-3-17}$$

$$dy = -\frac{f}{H}dY_s - \frac{y}{H}dZ_s - f\cdot\left(1+\frac{y^2}{f^2}\right)\omega \tag{4-3-18}$$

由于缝隙式象片为行中心投影，每个缝隙的外方位元素是不同的，因此对整张象片来说，因外方位元素引起的象点位移难以准确地加以描述。

由于地形起伏引起的影象变形可分为两种情况，一是由此引起的象点移位，二是由此引起的缝隙影象之间的重叠和遗漏。

缝隙式象片的每条缝隙是地面的行中心投影，因地形起伏在象片上 y 方向引起的象点移位情况同框幅式象片相同。位移的方向与缝隙的方向平行。位移的大小与象点在象片上的 y 坐标、平台高度 H、地面相对高差 Δh 的关系为

$$\begin{cases} dx = 0 \\ dy = \dfrac{\Delta h}{H}\cdot y \end{cases} \tag{4-3-19}$$

由于地形起伏的影响，在成象时缝隙之间的影象会出现不连续的现象，即影象的重叠和遗漏现象，如图 4-3-7 所示。若地面相对于起始面的高差为 Δh，在地面上被遗漏（重叠）的条带宽度为 l，每条缝隙在起始面上的摄影宽度为 L，则 l 与 L 之比定义为在某点处因地形起伏而引起的遗漏（重叠）率，用 γ 表示

$$\gamma = \frac{l}{L} \approx \frac{\Delta h}{H} \tag{4-3-20}$$

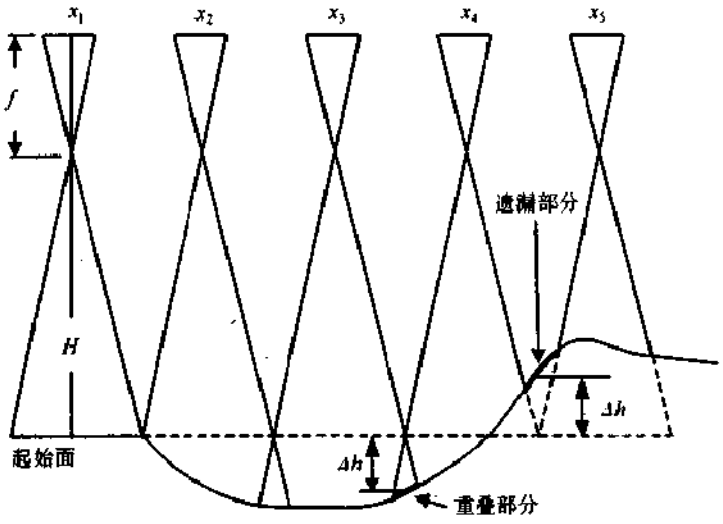


图 4-3-7　影象的重叠和遗漏

式中若 $\Delta h>0$，γ 表示遗漏率；$\Delta h<0$，γ 示重叠率。从式中看出：要得到地面连续的影象，要求平台高度 H 远远大于地面高差。在航天遥感成象时，γ 值基本为零。

4.3.3 全景象片的几何特性

1. 成象瞬间象点与对应地面点的坐标关系

设 $s\text{-}\bar{u}\bar{v}\bar{w}$ 为传感器坐标系，$s\text{-}uvw$ 为成象瞬间的象空间坐标，$O\text{-}XYZ$ 为地面坐标系，$s\text{-}\bar{u}\bar{v}\bar{w}$ 和 $O-XYZ$ 的各轴方向一致，摄站 s 在 $O\text{-}XYZ$ 中的坐标为 $(X_S,\ Y_S,\ Z_S)$，在扫描角为 θ_t 的曝光缝隙中的象点 p 在 $s\text{-}uvw$ 坐标系中的坐标为 $(x,\ 0,\ -f)$，而 $s\text{-}uvw$ 坐标系绕 u 轴旋转 θ_t 角后与 $s\text{-}\bar{u}\bar{v}\bar{w}$ 坐标系重合，如图 4-3-8 所示。则象点 p 与对应地面点 P 之间的坐标关系为

$$\begin{bmatrix} X \\ Y \\ Z \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} X_s \\ Y_s \\ Z_s \end{bmatrix} + \lambda \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & \cos\theta_t & -\sin\theta_t \\ 0 & \sin\theta_t & \cos\theta_t \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x \\ 0 \\ -f \end{bmatrix} \tag{4-3-21}$$

超星阅览器提醒您：使用本复制品请尊重版权！

在全景片上象点的 $(x,\ y)$ 坐标可直接量测，而扫描角 $\theta_t = \dfrac{y}{f}$。

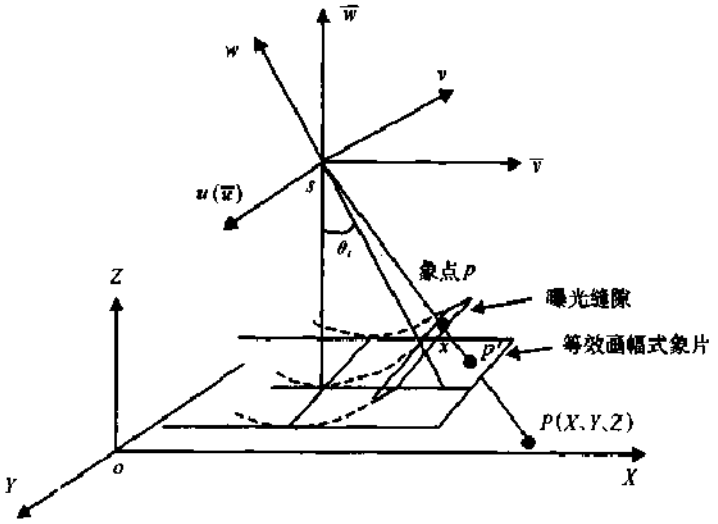


图 4-3-8 全景相机摄影瞬间的物象关系

2. 象片比例尺

全景象片的比例尺公式比较复杂，当外方位角元素 $\alpha=\omega=\kappa=0$ 时，在 x，y 方向的象比例尺的公式为

$$\frac{1}{m_x} = \frac{f}{H}\cos\theta_t \tag{4-3-22}$$

$$\frac{1}{m_y} = \frac{f}{H}\cos^2\theta_t \tag{4-3-23}$$

尽管上式是在某些假定条件下得到的，但它仍能说明全景象片比例尺有以下特性：在全景象片上，象比例尺随象点位置和扫描角的变化而变化，特别是随着扫描角的增大而减小，当 $\theta_t \to 90°$ 时，象比例尺趋向无穷小，并且象片在 x、y 方向有不同的比例尺。

3. 影象的变形规律

全景象片的影象变形包括外方位元素引起的误差、投影误差和投影方式引起的全景

畸变三种形式。全景象片上因外方位元素引起的误差表达式为

$$\begin{cases} dx = -\dfrac{f}{H}\cos\theta_t \cdot dX_s - \dfrac{x}{H}dZ_s - f\cos\theta_t\left(1+\dfrac{x^2}{f^2\cos^2\theta_t}\right)d\alpha - x\cdot \mathrm{tg}\theta_t\, d\omega + f\sin\theta_t\, d\kappa \\ dy = -\dfrac{f}{H}\cos^2\theta_t \cdot dY_s - \dfrac{f}{H}\sin\theta_t\cos\theta_t\, dZ_s - x\sin\theta_t\, d\alpha - f\cdot d\omega - x\cos\theta_t\, d\kappa \end{cases} \tag{4-3-24}$$

根据全景象片的取得过程，参照画幅式象片的投影误差公式，地面点在全景象片上的投影误差可表示为

$$\begin{cases} \delta x = \dfrac{x}{H}\cdot \Delta h \\ \delta y = \dfrac{f\cdot \sin\theta_t \cdot \cos\theta_t}{H}\cdot \Delta h \end{cases} \tag{4-3-25}$$

式中 Δh 为地面点相对地底点的高差，θ_t 为地面点成象时的扫描角。

全景畸变是指同摄站获取的同一地区的全景象片相对于同时获取的画幅式象片的影象变形。设地面点 P 在等效画幅式象片上的象点为 p'，在全景象片上的象点为 p，如图 4-3-8 所示。在不考虑外方位元素的影响时，p' 点在等效画幅式象片上的坐标（x'，y'）与 p 点在全景象片上的坐标（x，y）的关系为

$$x' = \frac{x}{\cos\theta_t} \tag{4-3-26}$$

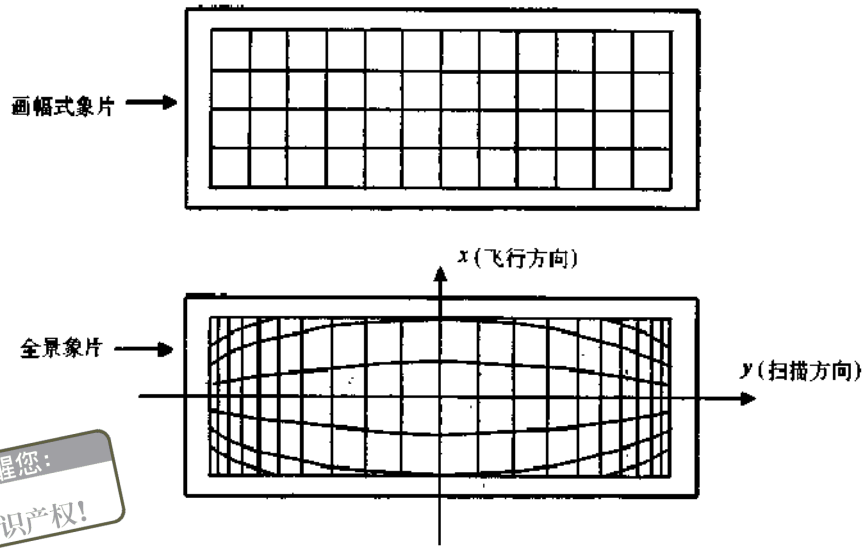
$$y' = f\cdot \mathrm{tg}\theta_t \tag{4-3-27}$$

全景象片影象相对于画幅式象片影象的变形为

$$dx = x' - x = x\cdot(\sec\theta_t - 1) \tag{4-3-28}$$

$$dy = y' - y = f\cdot(\mathrm{tg}\theta_t - \theta_t) \tag{4-3-29}$$

全景畸变如图 4-3-9 所示，这种变形也叫全景静态畸变。



超星阅览器提醒您：
使用本复制品
请尊重相关知识产权！

图 4-3-9　静态全景影象的变形规律

实际上在一幅全景图象的获取过程中摄站坐标是变化的，由此而产生的影象变形

称为动态变形。当平台前进时，若前进速度为 v，在每条缝隙成象的时间 dt 内，平台相对于地面的移动距离 dX_s 为

$$dX_s = v \cdot dt \tag{4-3-30}$$

在图象上造成的坐标移动量为

$$\begin{cases} dx = -\dfrac{f}{H} \cdot \cos\theta_t \cdot v \cdot dt \\ dy = 0 \end{cases} \tag{4-3-31}$$

在动态全景摄影条件下，dt 必然引起扫描角 θ_t 的改变量 $d\theta_t$，若扫描角速度为 $\dot{\theta}_t$，则

$$dt = \frac{d\theta_t}{\dot{\theta}_t} \tag{4-3-32}$$

将（4-3-32）式代入（4-3-31）式得

$$\begin{cases} dx = \dfrac{f \cdot v}{H\dot{\theta}_t} \cdot \cos\theta_t \cdot d\theta_t \\ dy = 0 \end{cases} \tag{4-3-33}$$

考虑到后一个缝隙是在前一个缝隙的基础上移位的，所以在飞行方向上到某一扫描角为 θ_t 的缝隙影象的总移位可表示为

$$dx = \int_0^{\theta_t} \frac{f \cdot v}{H\dot{\theta}_t} \cdot \cos\theta_t \cdot d\theta_t \tag{4-3-34}$$

动态全景变形的形状如图 4-3-10 所示。应当强调说明的是：如果在卫星全景摄影的同时，为了消除象移模糊而严格按（4-3-34）式进行了象移改正，则几何上的动态全景变形就不存在，应视具体情况加以分析。

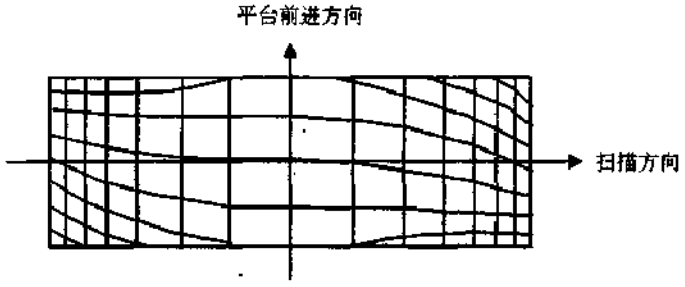


图 4-3-10　动态全景影象的变形情况

4.3.4　摄影象片的地面分辨率

地面分辨率 D 是图象上能与背影区别开来的最小象点所对应的地面尺寸，地面尺寸愈小，地面分辨率愈高。

超星阅览器提醒您
使用本复制品
请尊重相关知识产权

对摄影象片来说，其地面分辨率 D 与其影象分辨率 R 和象片比例尺有关。由航空摄影学可知，影象分辨率 R 由下列公式求出

$$R = \frac{R_{静态}}{\sqrt{1 + (R_{静态} \cdot \delta)^2}} \tag{4-3-35}$$

其中$\frac{1}{R_{静态}^2}=\frac{1}{R_{镜头}^2}+\frac{1}{R_{胶片}^2}$，$R_{镜头}$和$R_{胶片}$分别是摄影机的镜头分辨率和摄影胶片分辨率，$\delta$是曝光瞬间物点在象面上的移位。摄影象片的地面分辨率是影象分辨率的线对宽度所对应的地面距离，可表示为

$$D=\frac{m}{R} \tag{4-3-36}$$

式中 m 为象片的比例尺分母。

假设摄影姿态标准、地面平坦，则框幅式象片和缝隙式象片的地面分辨率主要与相机焦距 f 及平台高度 H 有关

$$D=\frac{H}{R\cdot f} \tag{4-3-37}$$

全景象片的比例尺随扫描角 θ_t 而变化，其地面分辨率可表示为

$$D_x=\frac{H}{R\cdot f\cdot\cos\theta_t} \tag{4-3-38}$$

$$D_y=\frac{H}{R\cdot f\cdot\cos^2\theta_t} \tag{4-3-39}$$

式中 D_x、D_y 分别是 x 方向和 y 方向的地面分辨率，它们都随扫描角的增加而降低。

4.3.5 摄影象片的物理特性

象片物理特性是指地物辐射的电磁波在象片上反映出的色调、色彩特性。由辐射传递方程可得，摄影胶片在波长 $\lambda_1\sim\lambda_2$ 的范围内受到的地物反射光照度是地物在 $\lambda_1\sim\lambda_2$ 的波长内辐射照度的总和，即

$$E=\int_{\lambda_1}^{\lambda_2}K_\lambda\cdot\left[E_0(\lambda)\,e^{-T(Z_1Z_2)\sec\theta}\cdot\rho_\lambda\cdot e^{-T(0,H)}+b_\lambda\right]d\lambda \tag{4-3-40}$$

式中各量的含义与第二章相同。胶片的曝光量 H 是象面照度与曝光时间 Δt 的乘积，即

$$H=E\cdot\Delta t \tag{4-3-41}$$

在黑白胶片上的影象密度 D 为

$$D=D_0+\gamma\cdot\log H \tag{4-3-42}$$

式中 D_0 为胶片灰雾，γ 为胶片的反差系数。

由以上几式可以看出：在曝光、冲洗正常的条件下，地物在黑白象片的影象色调主要与太阳辐射照度、大气透过率、地物本身在胶片记录波长范围内的光谱反射率、大气辐射亮度等有关。在相同的太阳辐射、大气条件下，光谱反射率大的地物较光谱反射率小的地物色调浅。如干燥的耕地在全色象片上呈浅灰色调，而水域在全色象片上呈深灰色或浅黑色。对于近红外黑白象片来讲，其影象色调同样取决太阳辐射照度、大气条件和所摄目标自身在近红外波段的反射能力。一般来说，地物在近红外波段的反射能力强，其影象就呈浅色调，但地物在近红外象片上呈现的色调与人眼的视觉经验有一定的差异，如土壤和植被在象片分别呈浅灰色和白色。由于大气散射对近红外光的影响小，对存在一定大气污染的城市来说，它在近红外象片上的影象比全色象片上的影象清晰。

超星阅览器提醒你：
使用本复制品
请尊重相关知识产权！

由于大气散射引起了天空光的存在，使得在黑白象片上地物间的影象反差比实际反差要小。由电磁波在大气中的传输特性可知，大气对短波光的散射较为严重，而且随着

平台高度的增加，短波光的透过率变小，因此，航天摄影象片上影象间的反差较实际景物反差要小。为了减小大气散射对影象质量的影响，常采用反差系数较大的胶片摄影，或者根据实际情况在摄影时加滤光片以减弱蓝色光的通过量。

多光谱象片是利用多光谱摄影机获取的地物的多波段象片，在可见光至近红外波段内，通常将其分为蓝光波段、绿光波段、红光波段和近红外波段的多光谱象片。当然，可以根据不同的摄影目的来划分多光谱的成象波段。多光谱象片分别记录的是同一地物在不同波段上的光谱反射特性。地物在不同波段象片上的影象色调通常是不一致的，如水体，在蓝光波段的象片上呈灰色，在其他波段象片呈浅黑色；植被在蓝光波段的象片上呈浅黑色，在绿光波段象片上呈浅灰色，在红光波段的象片上呈浅黑，在近红外波段象片上呈亮白色。在实际应用中，往往很少利用单一波段的多光谱象片来判读目标，而是利用多光谱彩色图象合成手段，将多光谱象片合成为彩色象片或假彩色象片，来提高其识别目标的效果。

彩色象片上影象的颜色主要与感光材料、地物光谱特性、大气条件、日照条件、洗印条件等因素有关。彩色象片一般分为天然彩色象片和假彩色象片。

天然彩色象片上影象的颜色与地物颜色基本一致。由于不同的摄影时间、季节、气候条件不一致，太阳照射到地面的光谱成份不同，地物反射的光谱成份也必然不同；不同的地理位置和摄影季节，地物的光谱反射率会随之变化，地物自身的生长等状况变化也使光谱反射率发生变化。所以要做到地物与其影象完全一致是困难的。另外，无论是航空或航天摄影，都将受到大气吸收和散射的影响，它会使影象色彩的饱和度降低，影象偏蓝、偏青。天然彩色象片的优点是用与地物基本相同的颜色表示地物，符合人的视觉习惯，便于目视识别。

假彩色象片是指象片上影象的色调与实际地物色调不一致的象片。遥感中最常见的假彩色象片是彩色红外合成象片，它是在彩色合成时，把近红外波段的影象作为红色分量、把红色波段的影象作为绿色分量、把绿色波段的影象作为蓝色分量进行合成的结果。

由于假彩色红外象片包含了人眼看不见的地物的近红外反射电磁波信息，因此某些地物在此象片能更加明显地表现出它的特性。如针叶树与阔叶树，它们在全色象片上影象基本一致，不易区分，但它们在近红外波段上的反射率不同，阔叶树比针叶树的反射率高，针叶树在假彩色红外象片上呈红色，阔叶树在假彩色红外象片上呈鲜红色。由于植被的种类、生长期和健康状况不同，它们在假彩色红外象片上的色调、饱和度上也不一样，所以彩红外象片用于林业资源的调查，监测非常方便。另外，由于彩红外影象对生长正常的植被、带绿色的死亡植被等目标的判读有利，彩红外象片常用于军事目标侦察。当然，影响地物波谱的反射率变化的因素很多，这些因素也会引起影象颜色的变化。

超星阅览器提醒你：
使用本复制品
请尊重相关知识产权！

4.4 扫描方式的传感器

由于受胶片感光范围的限制，摄影象片一般仅能记录波长在 1.1μm 以内的电磁波辐射能量。另外由于在航天遥感时采用摄影型相机的卫星所带的胶片有限，这类遥感卫

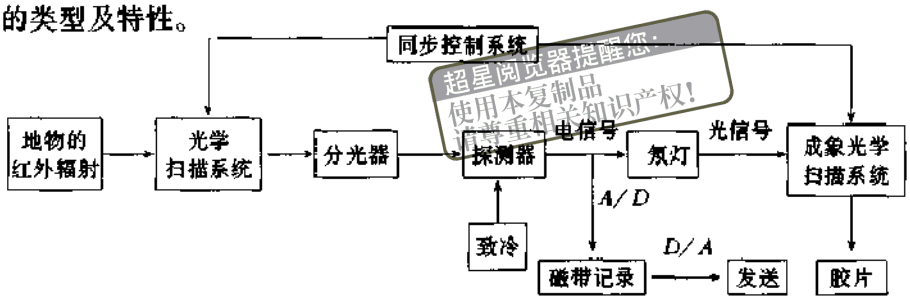
星工作寿命也较短。而扫描方式的传感器的探测范围可以从可见光区至整个红外区，并且它采用专门的光敏或热敏探测器把收集到的地物电磁波能量变成电信号记录下来，然后可通过无线电频道向地面发送，从而实现遥感信息的实时传输。

常见的扫描方式的遥感器有光机扫描仪、CCD 固体扫描仪和电视摄象机等。电视摄象机是象面电子扫描方式的扫描仪，在遥感使用较少，此处不作介绍，本节仅介绍光机扫描仪和推帚式扫描仪的成象原理。

4.4.1 光机扫描仪

1. 光机扫描仪的结构组成

光机扫描仪的全称是光学机械扫描仪，它是借助于遥感平台沿飞行方向运动和遥感器本身光学机械横向扫描达到地面覆盖、得到地面条带图象的成象装置。光机扫描仪主要有红外扫描仪和多光谱扫描仪两种，它们主要由收集器、分光器、探测器、处理器和输出器等几部分组成，如图 4-4-1 所示。这几种器件本身的种类也很多，下面简要介绍各部件的类型及特性。



超星阅览器提醒您：
使用本复制品
请尊重知识产权！

图 4-4-1 光机扫描仪的结构图

(1) 收集器

在航天遥感中常用透镜系统或反射镜系统做为光机扫描仪收集地面电磁波辐射信息的器件。在可见光和近红外区，可用透镜系统也可用反射镜系统作为收集器。但在热红外区，电磁波的大部分被透镜介质吸收，透过率很低，因此一般采用反射镜系统。制作反射镜的常用材料有熔凝石英和特种金属（如铍）。使用熔凝石英材料可以降低光学表面的变形，但空间用的大反射镜要求质量高、重量轻，因此其骨架做成蜂窝状结构而不做成实体。用金属反射镜可满足重量轻、尺寸稳定和硬度强的要求，但它的晶体特性妨碍了满意的光学抛光。因此，一般在抛光前，镀一层非结晶的镍混合物，抛光后在反射镜上镀一层铝膜或金膜，以得到最大的反射系数。

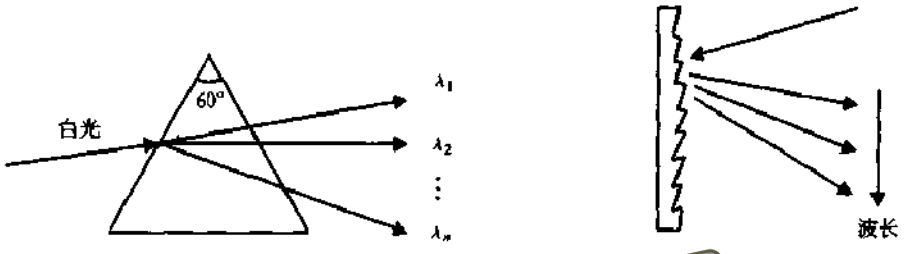
(2) 分光器

分光器的目的是将收集器收集的地面电磁波信息分解成所需要的光谱成份。常用的分光元器件有分光棱镜、衍射光栅和分光滤光片。

分光棱镜是依据物质折射率随波长变化的原理来进行分光的。当光波从物质表面入射到其内部时，物质对光波的折射率会随波长改变。所以入射到棱镜上的光经棱镜透射或经其内部反射出来后，就会按不同波长向不同的方向传播出去，从而实现分光。常见的分光棱镜有 60°棱镜、30°棱镜等。图 4-4-2 (a) 为 60°棱镜的分光原理，当一束白光通过棱镜后，在不同的方向透射出不同波长 λ_1，λ_2，…，λ_n 的光，且有 $\lambda_1 > \lambda_2 > \cdots >$

λ_n 的规律。

光线照射到光栅上就会引起衍射，若将光栅设计为使相邻光栅的衍射光的相位差为某波长的整数倍，则光栅在某方向的衍射光均为该波长的光。由于光的波长不同，形成不同波长的衍射光分布在不同方向的现象，这种分光元件叫衍射光栅。由于光栅也存在对入射光的镜面反射现象，所以在镜面反射方向上光的光谱与入射光一致。为了便于分光，反射型的衍射光栅常设计为反射面略带倾斜的光栅。图 4-4-2（b）为进行红外分光的衍射光栅，衍射后的光波波长依箭头方向逐渐减小。常用的衍射光栅有红外光栅、阶梯光栅、薄片光栅等。



（a）60°棱镜　　（b）衍射光栅

图 4-4-2　分光器的分光原理示意图

超星阅览器提醒您：使用本复制品请尊重知识产权！

分光滤光片是能从某一光束中透射或反射特定波长的元件。从其分光功能上看，可分为三种形式：长波通滤光片、短波通滤光片和带通滤光片。长波通滤光片和短波通滤光片是仅让某波长以上的光通过和仅让某波长以内的光通过的滤光片。常用的短波通滤光片是热红外区的热反射镜和吸收滤光片。热反射镜反射特定的短波波段，供探测器探测使用，而长波被透射出去。吸收滤光片是用玻璃或在明胶基板上涂抹着色剂或染料制作而成的，它可以吸收某些特定波长的光。常见的长波通滤光片是吸收滤光片和热红外区用的低温反射镜。低温反射镜反射大于某波长的波段，供探测器探测使用，而短波被透射掉。带通滤光片的作用是仅让特定波段电磁波通过，常见的有干涉滤光片、偏振光干涉滤光片。干涉滤光片的原理是：如果光入射到薄膜上，就会在薄膜内发生多重反射，形成光的干涉，从而让特定波长间隔的光透射出去。偏振光干涉滤光片仅透射特定波长的光，并且它可以得到较窄波段（0.1nm）的透射光。另外，对长波通和短波通滤光片进行组合也可得到带通滤光片。

（3）探测器

探测分光后的电磁波并把它变换成电信号的元件叫探测器。探测器的种类较多，按光电转换方式可分为三类：光电子发射型、光激发载流子型和热效率型。

光电子发射型的探测元件有光电管和光电倍增管二种。它利用某些材料在光的照射下会发出电子的特性，当光照射在光电管的阴极上时，这种材料会发出电子，在外电场的作用下，电子流向光电管的阳极，在光电管的输出电路中形成电流，且电路中的电流强度与光照度成函数关系。这种类型的探测器主要应用于探测从紫外到可见光区的地物波谱反射特性。

利用光激发载流子的探测元件有光电二极管、光电晶体管、光电导管、线阵列传感器等。这些元件按其不同的探测原理可分为两类：PC 型和 PV 型。PC 型元件一般是晶体结构，当它受到外来热辐射时会在晶体内产生电子-空穴对，产生电子-空穴对的数量

与热辐射的强弱有正比关系。在外加电压的作用下，电子向阳极、空穴向阴极移动而形成电流。PV 型元件的典型例子是电视摄象机，电视摄象机中使用的光电发射材料为银、硒、锑、铅的硫化物、氧化物等。一般将这种类型的材料制成很小的光敏粒，逐点逐行排列镶嵌成光敏层，光敏粒之间有绝缘物隔开。光敏层装在电视摄象机中的光电变换靶后面，前面是云母层，再前面是一层透光的金属导电膜。变换靶的前方是物镜，景物通过物镜后，在靶面上成象，并透过变换靶的导电膜和云母层，照射在光敏层上。光敏粒在光的作用下溢出电子，溢出的电子数与光的强度成正比。整个光敏层上，由于影象各处的光强不同，溢出的电子数也不一样，这时在光敏层上形成一个由正电子描绘的电子影象。在电池的作用下，电子流向导电膜，在导电膜上形成一个负电子影象与正电子影象对应。以后在电子枪发出的电子束的作用下，可取出影象的视频信号。利用光激发载流子类型的探测器可以探测地物从可见光至红外区的电磁波辐射信息。

利用热效应（PEM）型的探测器是一种热红外探测器，如热电耦探测器和热释电探测器，它能把红外辐射能转换变成电能。热红外探测器的种类很多，表 4-4-1 列出了几种常用的红外探测器及它们的特性参数。

超星阅览器提醒您：
使用本复制品
请尊重相关知识产权

表 4-4-1　几种常用的红外探测器及它们的特性参数

探测器材料	工作类型	使用波段（μm）	峰值响应波长（μm）	工作温度（K）
硫化铅（pbs）	PC	0.6～3.0	2.3～2.7	室温
砷化铟（InAs）	PEM	1.3～3.6	3.2	195
锑化铅（InSb）	PC	0.5～6.5	5.1	195
碲化汞（Te-Cd-Hg）	PV	6～15	10.6	77
锗掺汞（GeiHg）	PC	3～14	11	30

大多数热红外探测器必须在低温下工作，在遥感器中要有致冷装置。致冷的方法有：液化气体制冷、固体致冷剂制冷和辐射致冷器致冷。液化气体致冷用于机载热红外遥感器，固体致冷用于空间工作的热探测器致冷，卫星上更多的用辐射致冷器。辐射制冷器是将一根铜棒的一端与探测器室相联，另一端做成半球状，并加以黑化，伸向外空间，探测器室的热量经铜棒传导向外空间，达到制冷目的。这种致冷器可将探测器室的温度致冷到 100°K 左右。

评价探测器的探测性能常用它的噪声等效功率 *NEP* 和探测灵敏度 D^* 来描述。在任何探测器的输出端，总存在着一些毫无规律的、事前无法预测的电压起伏，这种探测器固有的、不可避免的现象称之为“噪声”。*NEP* 是表示得到与噪声输出相等的信号输出时的输入信号的大小。要真正肯定辐射信号的存在，入射辐射功率应为 *NEP* 的 2～6 倍。*NEP* 基本能表达一个探测器的探测能力，但它的大小依赖于探测器的面积 A，也依赖于放大器带宽 Δf，为了比较探测器的优劣，须用探测灵敏度 D^* 来衡量。D^* 是与 *NEP* 成反比的量，由下式求出

$$D^* = \frac{\sqrt{A \cdot \Delta f}}{NEP} \tag{4-4-1}$$

式中 D^* 为探测灵敏度，A 为元件的面积，*NEP* 为噪声等效功率，Δf 为频带宽度。当元件面积为 1（cm）^{2}、频带宽度为 1Hz、照射光的入射功率为 1W 时，D^* 的值

等于探测器输出信号与其噪声之比，即信噪比$\left(\frac{S}{N}\right)$。

另外，还常用光谱分辨率来表达遥感器的光谱探测能力。它包括遥感器总的探测波谱的宽度、波段数、各波段的波长范围和间隔。若遥感器所探测的波段愈多，每个波段的波长范围愈小，波段间的间隔愈小，则它的光谱分辨率愈高。遥感器的光谱分辨率高，它取得的图象就能很好地反映出地物的光谱特性，不同地物间差别在图象上就能很好地体现出来，遥感器探测地物的能力就强。目前成象光谱仪可把可见光至近红外光谱区分成288个波段。

(4) 处理器

从探测器出来的低电平信号，需放大和限制带宽。一般在探测器后面设置低噪声的前置放大器来进行这项工作。前置放大器随电子元件不同，分为真空管、晶体管和集成电路三种形式。对于多元探测器的遥感器，每个探测器上要安置一个前置放大器，形成多路输出。为了使其变为一维时序信号，可采用对每一个通道进行周期性采样的“时分多路传输制”。目前更多地使用CCD电荷耦合器件。将CCD元件置于探测器后面，直接将多路信号变成一维的时序信号，这时只需用一个前置放大器。

前置放大器出来的视频信号可输往磁带机，将模拟信号记录在磁带上。如果需将信号记录在胶片上，则必须设计电光转换电路，将电讯号转变成辉光管或阴极射线管上显示的光信号，这时输出器上的光强度正好与目标辐强度一致。

如果要求输出信号为数字形式，则必须将视频信号数字化，一般使用模/数变换器，对连续的模拟信号进行采样、量化和编码，变成离散的数字信号。

(5) 输出器

输出器种类也很多，目前输出形式主要有两种，一种是胶片，另一种是磁带。在信号处理器一节中已讲到，要把探测器输出的视频信号记录在胶片上，须经电光变换线路来调制一些发光器件，这时发光器件上的光信号强度与视频信号强度一致。当胶片曝光时，数据就被记录下来。

输出数据用磁带记录仪记录在磁带上。磁带记录仪与普通的视频带记录仪相仿。有的磁带记录仪作遥感器收集数据的暂存器，如Landsat上用的宽带视频带记录仪，在地面接收站上地空时，将贮存的数据读出，向地面发送。

磁带记录的形式分模拟磁带和数字磁带两种。模拟磁带记录数据后形成的磁场强度与视频信号强度一致。数字磁带记录的是已采样、量化和编码了的数字数据。数字磁带又分高密度数字磁带（HDDT）和计算机兼容磁带（CCT）两种。

2. 光机扫描仪的成象过程

如图4-4-3所示，当旋转棱镜旋转时，第一个镜面对地面横越航线（垂直于飞行）方向扫视一次，在地面瞬时视场内的地面辐射能由旋转棱镜反射到反射镜组，经其反射、聚焦在分光器上，经分光器分光后分别照射到相应的探测器上。探测器则将辐射能转变为视频信号，再经电子放大器放大和调整，在阴极射管上显示瞬时视场的地面影象，在底片曝光后记录下来（称为一个象元），或者视频信号经模/数转换器转换，变成数字的电信号，经采样、量化和编码，变成数据流，向地面作实时发送或由磁带记录仪

记录后作延时回放，随着棱镜的旋转，垂直于飞行方向上的地面依次成象形成一条影象线被记录下来。平台在飞行过程中，扫描旋转棱镜依次对地面扫描，形成一条条相互衔接的地面影象，最后形成连续的地面条带影象。在取得地面影象的同时，还要获取图象的校标数据。地面辐射经转换变成电信号时，会受到探测元件灵敏度变化的影响，使得相同电磁波辐射强度的地物产生不同的信号。为此，将辐射强度和温度一定的辐射源（或热源）装入扫描仪，在获取地面图象的同时，每隔一定的时间探测器也对仪器内的辐射体（或热体）进行探测，把探测的结果变成电信号或图象，由此可做为校正因探测误差而引起的辐射误差，以保持图象的灰度测量精度。

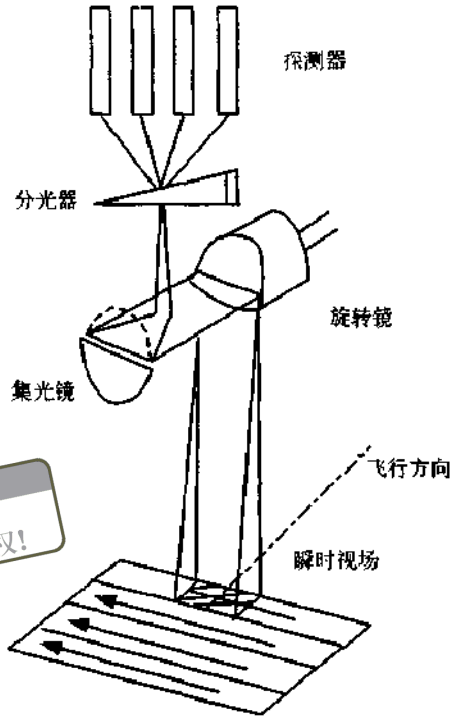


图 4-4-3　光机扫描仪的成象过程

3．MSS 多光谱扫描仪的结构和成象过程

陆地卫星上的 MSS（Multispectral Scanner）多光谱扫描仪的结构如图 4-4-4 所示。它由扫描反射镜、校正器、聚光系统、旋转快门、光学纤维、滤光器和检波器等组成。

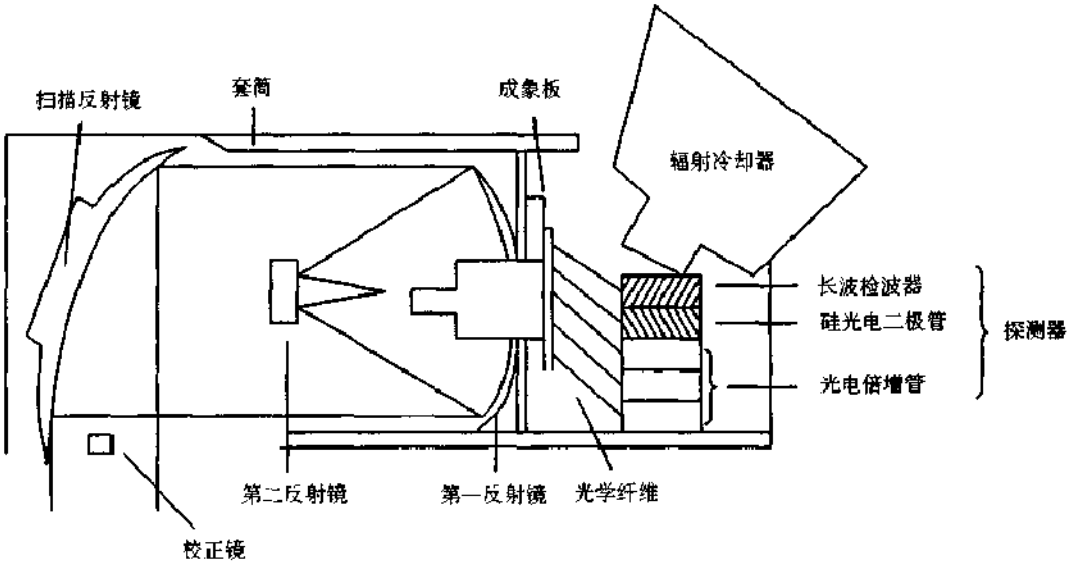


图 4-4-4　MSS 多光谱扫描仪的结构

扫描仪反射镜是一个表面镀银的椭圆形铍反射镜，长轴 33cm，短轴 23cm，它与地面和聚光镜的光轴均成 45°角，扫描镜围绕正常位置摆动的幅度为 2.89°，摆动频率为 13.62Hz，对垂直于卫星轨迹方向的地面进行扫描（横向扫描），星下视场角为 11.56°

(0.202 弧度)，被扫的地面宽度约为 185km，沿卫星轨迹方向的扫描（纵向扫描）由卫星沿轨迹的运动来实现。由于卫星的运行周期为 103.267min，星下地面点相对卫星沿轨迹方向的移动速度为 6.47km/s。扫描镜摆动一次（一个摆动周期）的时间为 7.342×10^{-2}s，在摆动周期内星下地面点相对移动了约 474m，为了使扫描能连续地进行，并保持一定的分辨力，MSS 扫描仪每个探测器的瞬时视场，设计成从标称轨道上对地面为 $79\times779m^2$ 的地区（即为 8.8×10^{-4}rad）。共用六个探测器排成一列，列长相应地面上的长度也约为 474m，这样，第一条横向扫描经过一个周期回扫至起点，进行下一次横向扫描时，正好与上一次横向扫描的第六条扫描线相邻连接，形成连续对地面扫描，即在进行横向扫描的同时，利用卫星的运行速度实现纵向扫描（如图 4-4-5 所示）。连续扫描得到的影象，是地面上 185km 宽的一条连续的条带，而不象摄影机那样每次获取地面一定范围内的一幅影象。

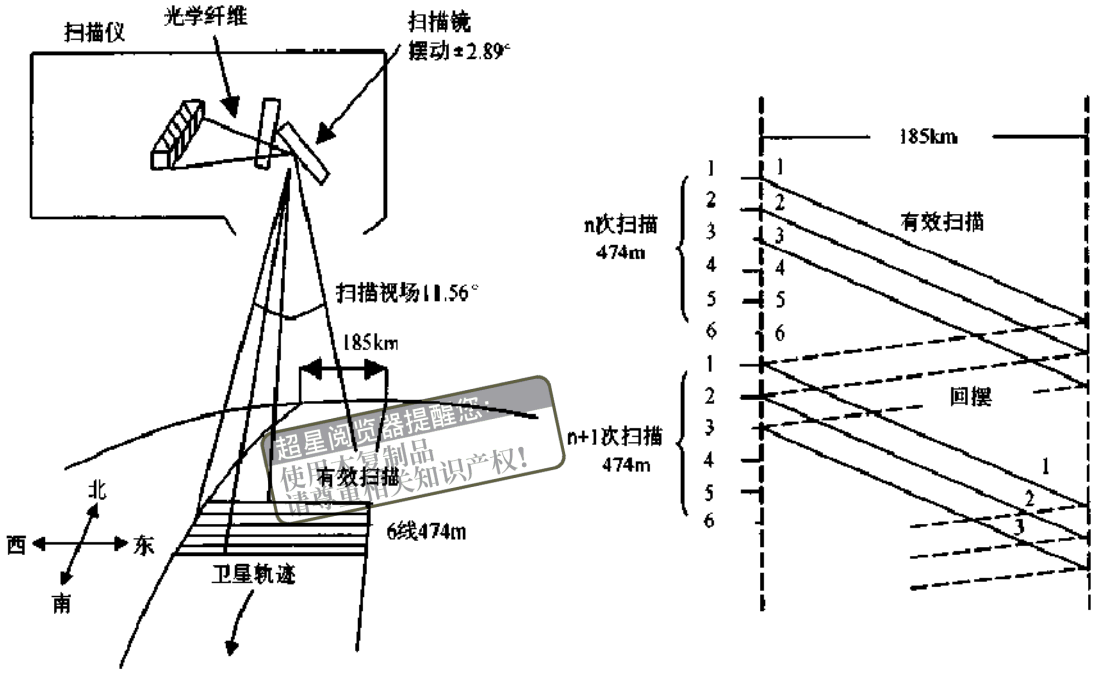


图 4-4-5　扫描过程

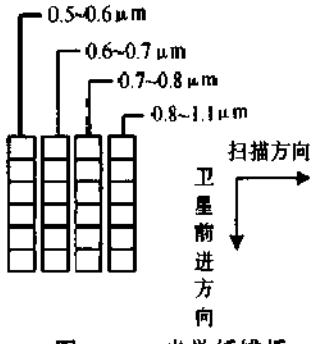


图 4-4-6　光学纤维板

回扫期间（即扫描镜从东向西摆动时），快门轮关闭了光学纤维板对地球的通视，校准灯光源通过安装在快门轮上的一个可变中性密度滤光器投射到光学纤维板上。这样，在回扫间隔中便把一个校准楔（灰度楔）引入到光谱带 1～4 的视频数据里来。对每幅景象提供一个 15 级的灰标，在地面处理时用于纠正象片的辐射误差和避免象片上出现由于六个探测器可能出现的增益变化而造成的条纹。

地面目标光学信号经扫描反射镜，反射至由第二反射镜组成的光学聚焦系统，聚焦在光学纤维上，光学纤维按照 4×6 的矩阵形式排列，共有 24 个象元，如图 4-4-6 所示。在扫描过程中，每条扫描线所摄影象都依次掠过与

超星阅览器提醒您：
使用本复制品
请遵重相关知识产权！

之相应的四个象元，它们的光谱范围如表 3-2-1 所示。Landsat-3 上增加了一个热红外通道 MSS-8，它的光谱范围为 10.4～12.6μm。瞬时视场较前四个大 3 倍，因此光学纤维板上排成两块，其地面分辨力也变为 120m×120m。

光学纤维板上各象元的光信号经滤光器分光后，由光学纤维传导至 24 个探测元件（陆地卫星-3 有 26 个探测元件），其中 MSS-4,5,6 谱段为 18 个光电倍增管，MSS-7 为 6 个硅光电二极管，其光谱响应特性如图 4-4-7 所示。MSS-8 采用 2 个汞-镉-碲红外探测元件，其能量是通过靠近纤维矩阵的一条缝隙来接收的，并由中继光学系统传入构成场光阑的探测器中，热探测器用一个无源辐射冷却器使之冷却到大约 100°K 左右。

对于 24 个通道中的每一个而言，在扫描仪输出端产生一路视频信号，这些信号进入模/数转换器，以 9.958μs 的间隔进行采样和数字化，采样间隔相应地面上为 56m，编码用 6 个 bit 表示一个象元的亮度值，再通过一个多路调制器编入串联的数据流，向地面作实时发送，当位于地面接收站视界以外时，贮存在宽带视频带记录器中，作延时回放。

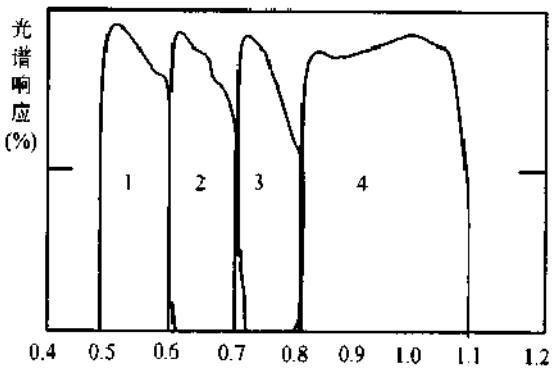


图 4-4-7　MSS 探测器光谱响应曲线

Landsat-4，5 卫星上的 TM（Thematic Mapper）专题制图仪也属于多光谱扫描。与 MSS 相比，它的瞬时视场对应在地面为 30m×30m，探测波段增加到 7 个，如表 3-2-1 所示。另外，TM 中增加了一个扫描改正器，目的之一是使扫描行垂直于飞行轨道（MSS 不垂直于飞行轨道。它从西向东扫完一行后，最末一个象元相对于第一个象元在飞行方向上移位 $\Delta X = V \cdot \Delta t$）；目的之二是使往返双向都对地面进行扫描，收集影象数据。TM 图象每个象元的亮度值用 2^8 编码，数据通过中继卫星做实时发送。

4.4.2　推帚式扫描仪

1. 推帚式扫描仪的结构

CCD 固体扫描仪按其探测器的排列形式不同，目前有两种形式：线阵列扫描仪和面阵扫描仪。表 4-4-2 列出了几种面阵 CCD 数字产品的技术指标，从表 4-4-2 可以看出：由于制造工艺上的原因，目前面阵 CCD 阵列还难以做得很大，其几何尺寸还很有限，达不到航空或航天遥感对其幅面的要求，因此这里暂不做介绍。线阵列扫描仪一般称为推帚式扫描仪，是获取遥感图象的主要遥感器之一，SPOT 卫星的 HRV，MOS-1 卫星的 MESSR，JERS-1 的 OPS 等都采用这种类型的遥感器。

表 4-4-2　几种面阵 CCD 数字产品的技术指标

公司名称	产品型号	CCD 阵列尺寸（mm×mm）	象元数（横向×纵向）	每个 CCD 尺寸（μm×μm）
Valvo	NXA1010	6.0×4.5	604×576	10.0×7.8
Sony	XC-77	8.8×6.6	768×493	17.0×13.0
Aqua	SM72	8.8×6.6	384×576	23.0×23.0

续表

公司名称	产品型号	CCD 阵列尺寸 (mm×mm)	象元数 (横向×纵向)	每个 CCD 尺寸 (μm×μm)
Pulnix	TM-560	8.8×6.6	500×582	17.6×11.3
Kodak	DC50/40		756×504	
CIDTEC	2710	8.8×6.6	776×512	12.0×13.7
Videk	Megaplus	9.0×7.0	1320×1035	6.8×6.8
Thomson-ESF	THX31156	19.5×19.5	1024×1024	19.0×19.0
Tektronix	TK1024M	24.6×24.6	1024×1024	24.0×24.0
Kodak	DCS 5_420	14×9.3	1524×1012	9.2×9.2
Hasseblad	DBS400	30.5×30.5	2048×2048	14.8×14.8
Kodak	DCS-460		3048×2024	
Tektronix	TK2048	55.3×55.3	2048×2048	27.0×27.0
Kontron	Prog Res	9.0×7.0	2994×2320	2.8×2.8
FordAerosp		30.7×30.7	4096×4096	7.5×7.5
Rollei	RSC	55.0×55.0	5500×7050	10.0×7.8

推帚式扫描仪也由收集器、分光器、探测器、处理器和输出器等部分组成。与光机扫描仪相比，没有机械装置，探测器的探测原理也不同，其他部分使用的元件及其原理与光机扫描仪相同。

推帚式扫描仪使用的是固体探测器件，固体器件是由硅等半导体材料制成的探测器件。在这种器件中，受光或电激发产生的电荷靠电子或空穴运载，在固体内移动。固体器件种类也有很多，目前传感器中普遍使用的是 CCD（Charge Coupled Device）电荷耦合器件。

超星阅览器提醒您：
使用本复制品请尊重相关知识产权

图 4-4-8（a）是一块 p 型硅片的纵截面的一部分，p 型硅片的表面覆盖一层厚约 0.1μm 的二氧化硅绝缘层，再上面是一层金属电极。电荷耦合器件的工作原理如图 4-4-8（b），（c），（d）所示。当突然在电极上相对于硅基片加正电压（如 +15 伏）时，按照半导体原理，硅片与二氧化硅层相接触的表面层内将完全没有自由活动的电子或空穴，但表面层相对于体内是正电压，它将吸引电子，也就是说，电子在表面层内会具有较低的能量（图 4-4-8（a）中用虚线表示），通常称为电子沟道。如果在硅片上有许多互相分离的电极，分别加上不同的电压（例如图 4-4-8（b）中电极 1、3、4 加 +15V，而电极 2、5 加 +20V），则处在电极 2，5 下面的表面层内的电子的能量就应当低于它们相邻电极 1，3，4 下面的电子的能量，也可以说电极 2，5 下面形成了电子“能阱”。如果用适当方法把电子引入表面层，那么电子就会就近进入电极 2，5 下面的能阱，如图 4-4-8（b）所示。

现在突然改变外加电压，如图 4-4-8（c）中电极 3 加 +20 伏，电极 1，2，4，5 都是 +15 伏，则电极 3 下面的电子能量突然降低。由于电极 3 下面的电子能量低于电极 2 下面的电子能量，这时电极 2 下面的电子就会流向能量更低的电极 3 下面。由于电极 1 下面的电子能量暂时还是高于电极 2 的，因而电极 2 下面的电子只会单向地流向电极 3，其结果如图 4-4-8（d）所示，原来电极 2 下面的能阱里的电子现在都迁移到电极 3 下面的能阱里面了。同样，改变外加电场，又可以把电极 3 下面能阱里的电子迁移到电极 4 下面的能阱中去。这样通过外加电压的变动，就可以把电荷从硅表面层内的一处迁

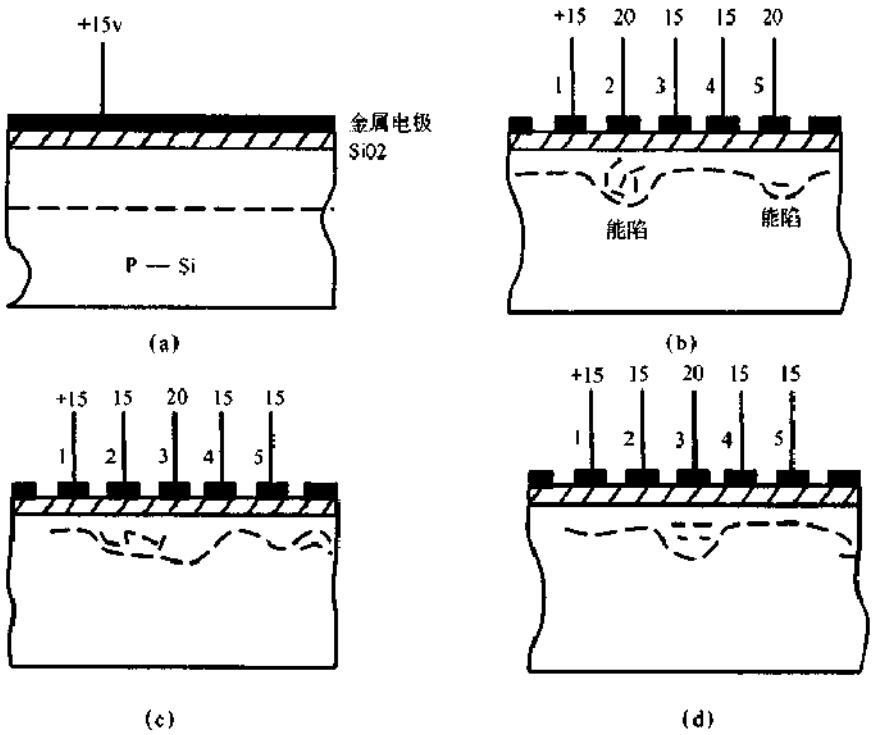


图 4-4-8　电荷耦合器件的结构和工作原理

移到另一处。

如果把电荷耦合器件做成电极数目相当多的一个线列阵，就可用来作为一维的成象器件，如图 4-4-9 所示。电极 1，4，7 等联在一起，加同一电压 φ_1；电极 2，5，8 等联在一起加同一电压 φ_2；电极 3，6，9 等联在一起，加同一电压 φ_3。每三个电极作为一组，称为“一位”，当硅片的另一面接受到从目标来的辐射照射时，由于不同目标的辐射特性不一样，线阵列电极上各点的照度也不一样（在图 4-4-9 中用箭头的疏密表示照度的强弱），当这些辐射进入硅片后，只要波长合适，就产生电子空穴对。电子经扩散到达表面层附近，进入最近的能阱，空穴被排斥掉。其结果是 2，5，8 等电极下面的能阱里，积累了一些入射辐射所激发的电子。电子的数目则与该能阱附近的照度成正比。

清星阅览器提醒您：
使用本复制品，请尊重相关知识产权！

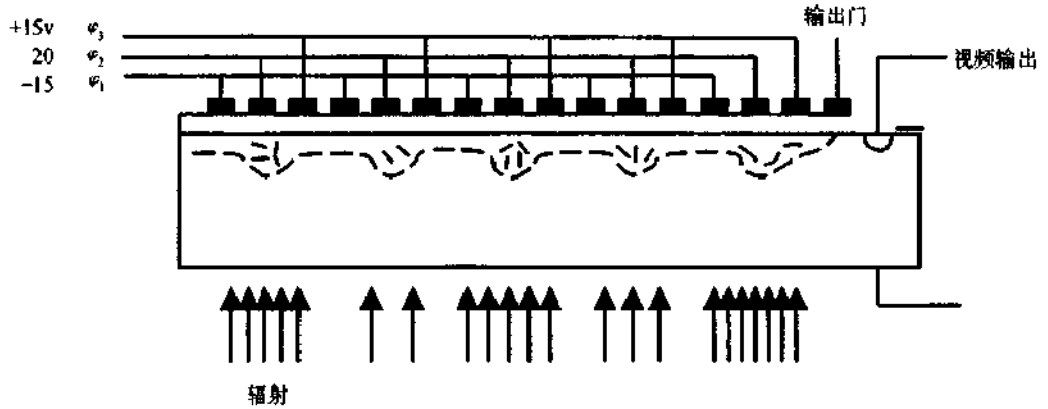


图 4-4-9　一维线阵列电荷耦合器件成象示意图

现在转换外加电压，使 $\varphi_1 = 15V$，$\varphi_2 = 15V$，$\varphi_3 = 20V$，则根据图 4-4-8 所示的原

理，原来在2，5，8等电极下面的电子包就迁移到3、6、9等电极下面。再转换外加电压，使 $\varphi_1=20V$，$\varphi_2=15V$，$\varphi_3=15V$，电子包就转移到1、4、7等电极下面。在转换电压的同时，打开输出门，最后一个电极下的电子包就进入p-n结，成为输出信号。当 φ_1，φ_2，φ_3 的电压连续转换时，p-n结就把图中从右至左的各个电子包变成信号输出。这样输出的信号随时间的变化，就相当于图面上自右至左的照度变化。

2. 推帚式扫描仪的成象过程

如图4-4-10所示，地面上扫描线对应的辐射信息经光学系统收集，聚焦在CCD线阵列元件上（若要取得多光谱图象要先经过分光器），CCD的输出端以一路时序视频信号输出，在瞬间能同时得到垂直于航线的一条影象线。随着平台的向前移动，像缝隙摄影机那样，以“推帚”方式获取沿轨道的连续影象条带。

推帚式扫描仪可以实现对地面的立体观测，即获取地面的立体影象。立体观测的形式有两种：同轨立体观测和异轨立体观测。

超星阅览器提醒您
使用本复制
请尊重相关知识产

同轨立体观测是指在同一条轨道的方向上获取立体影象。具体方法是：在卫星上安置两台以上的推扫式扫描仪，一台垂直指向天底方向，其他的指向前进方向的前方或后方，且遥感器之间的光轴保持一定的夹角，如图4-4-11所示，随着平台的移动，这样三台扫描仪就可获取同一地区的立体影象。但是，为了便于观察或测图，不同扫描仪获取的影象应有相同的比例尺，所以前后视扫描仪光学系统的焦距应与正视扫描仪的光学系统的焦距不同。如美国的立体测图卫星，前视和后视线阵列扫描仪的主光轴与正视线阵列扫描仪的主光轴之间的夹角均为26.57°。卫星高度设计为705km，正视扫描仪的焦距设计为705mm，前视和后视扫描仪焦距均设计为775mm，三台扫描仪获取的影象比例尺均为1:1000000。

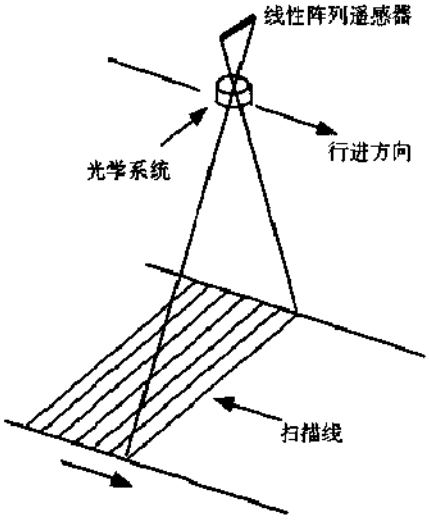


图4-4-10 推帚式扫描仪的数据采集原理

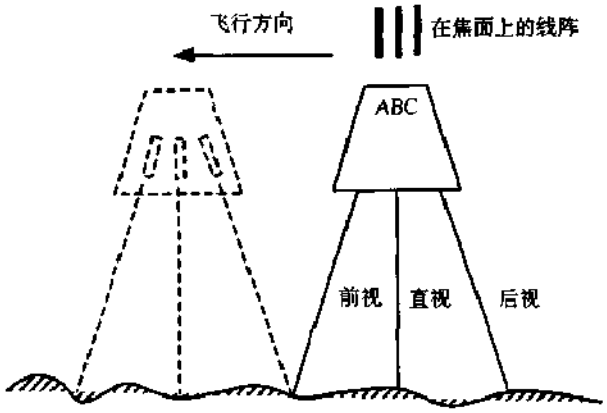


图4-4-11 同轨立体观测方式

异轨立体观测是在不同轨道上获取立体影象。在立体观测时，可以使用两台以上的扫描仪，也可以使用一台扫描仪。SPOT卫星使用一台扫描仪获取立体影象，该扫描仪的平面反射镜可绕指向卫星前进方向的滚动轴旋转，从而实现在不同轨道间的立体观测

（如图 4-4-12 所示）。由于平台反射镜向左右两侧偏离垂直方向最大可达 ±27°，从天底点向轨道任意一侧可观测 450km 范围内的景物，这样在相邻的许多轨道间都可以获取立体影象。由于轨道的偏移系数为 5，所以相邻轨道差 5 天，也就是说，如果第一天垂直地面观测，则第一次立体观测要待到第 6 天实现。由于气候条件的限制，这种立体观测方式形成的立体影象有时影象质量不好。

推帚式扫描仪没有机械装置，重量较轻，图象与地面的几何关系稳定；可以取得可见光和近红外（1.2μm 以内）的全色和多光谱影象；由于采用 CCD 做为探测器件，便于图象的实时传输。

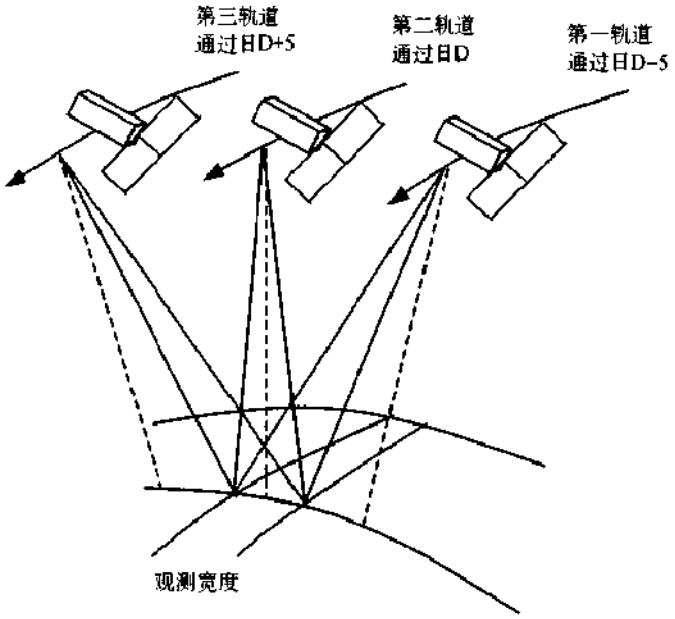


图 4-4-12　异轨立体观测方式

3.SPOT 卫星 HRV 扫描仪

法国 SPOT-1，2，3 卫星上装载的 HRV（High Resolution Visible Imaging System）是一种线阵列推扫式扫描仪。其简单的结构如图 4-4-13 所示。仪器中有一个平面反射镜，将地面辐射来的电磁波反射到反射镜组，然后聚焦在 CCD 线阵列元件上，CCD 的输出端以一路时序视频信号输出。

注意览器提醒您：使用本复制品请尊重相关知识产权！

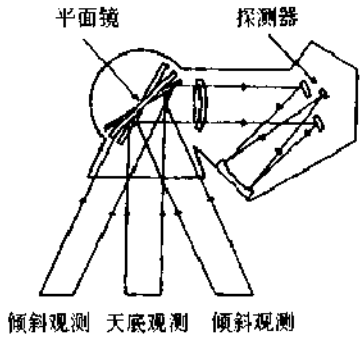


图 4-4-13 SPOT 卫星上 HRV 的简单的结构

由于使用线阵列的 CCD 元件作探测器，在瞬间能同时得到垂直航线的一条影象线，不需要用摆动的扫描镜，像缝隙摄影机那样，以“推扫”方式获取沿轨道的连续影象条带。

SPOT 卫星上的 HRV 分成两种形式，一种是多光谱型式的 HRV，每个波段的线阵列探测器组由 3000 个 CCD 元件组成，每个元件形成的象元相对地面上为 20m ×20m。因此一行 CCD 探测器形成的影象线，相对地面上为 20m ×60km。每个象元用

8bit 对亮度进行编码。另一种是全色 HRV，它用 6000 个 CCD 元件组成一行，地面上总的宽度仍为 60km，因此每个象元对应地面的大小为 10m × 10m。编码采用相邻象元亮度差进行，以压缩数据量，由于相邻象元亮度差值很小，因此只需用 6bit 的二进制数进行编码。SPOT 卫星上的 HRV 的观测数据的光谱范围见表 3-2-3。

4.5 扫描图象的特性

扫描图象包括光机扫描图象，CCD 固体扫描图象，电子束扫描图象等几种形式。本节主要介绍光机扫描图象和 CCD 固体扫描图象的几何和物理特性。

4.5.1 光机扫描图象的几何特性

光机扫描图象是对应地面的多中心投影。根据光机扫描仪的成象过程可知，在每次成象的瞬间，只有瞬时视场对应的地面范围内的目标在图象上成为一个象元。由于平台的运动，图象上每个象元都有自己的投影中心。此外，对于光机扫描的光学聚焦系统来说，它有一个固定的焦距，因此光机扫描图象又具有全景摄影象片的某些特点。

1. 成象瞬间象点与对应地面点的坐标关系

光机扫描仪在成象瞬间的构象几何形态相当于地面点在全景摄影机摄影时主光轴上构象。设 $s\text{-}\bar{u}\bar{v}\bar{w}$ 为传感器坐标系，$s\text{-}uvw$ 为成象瞬间的象空间坐标系，$O\text{-}XYZ$ 为地面坐标系，$s\text{-}\bar{u}\bar{v}\bar{w}$ 和 $O\text{-}XYZ$ 的各轴方向一致，摄站 s 在 $O\text{-}XYZ$ 中的坐标为 (X_S, Y_S, Z_S)，在扫描角为 θ_t 的瞬时象点 p 在 $s\text{-}uvw$ 坐标系中的坐标为 $(0, 0, -f)$，而 $s\text{-}uvw$ 坐标系绕 u 轴旋转 θ_t 角后与 $s\text{-}\bar{u}\bar{v}\bar{w}$ 坐标系重合，如图 4-5-1 所示。则象点 p 与地面上瞬时视场内的景物 p 之间的坐标关系为

超星阅览器提醒您
使用本复制品
请尊重相关知识产权!

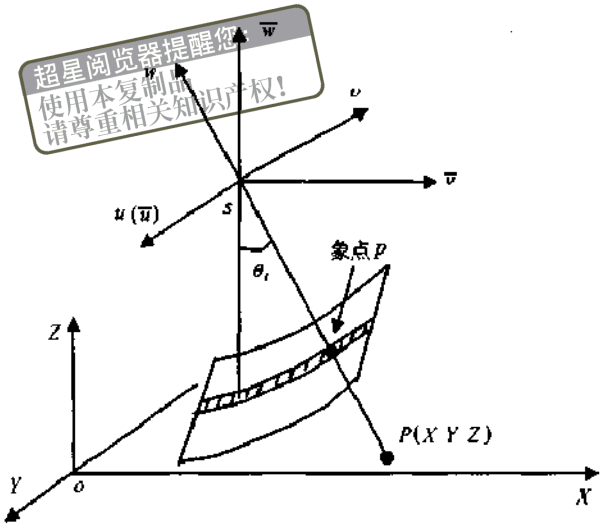


图 4-5-1 光机扫描图象的物象关系

$$\begin{bmatrix} X \\ Y \\ Z \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} X_s \\ Y_s \\ Z_s \end{bmatrix} + \lambda \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & \cos\theta_t & -\sin\theta_t \\ 0 & \sin\theta_t & \cos\theta_t \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ -f \end{bmatrix} \tag{4-5-1}$$

式中 λ 为比例尺因子。由于不同的象元在成象瞬间有不同的摄站坐标（X_S，Y_S，Z_S）、扫描角 θ_t 和外方位角元素，对整张图象来说，难以用有固定参数的数学模型来表达。在应用中除仿照共线条件建立象点与地面点间的关系式，还常用多项式形式来表达象点与地面点的坐标关系式

$$\begin{cases} x' = a_{00} + a_{01}X + a_{10}Y + a_{20}X^2 + a_{11}XY + a_{02}Y^2 + a_{30}X^3 + a_{21}X^2Y + a_{12}XY^2 + a_{30}Y^3 + \cdots \\ y' = b_{00} + b_{01}X + b_{10}Y + b_{20}X^2 + b_{11}XY + b_{02}Y^2 + b_{30}X^3 + b_{21}X^2Y + b_{12}XY^2 + b_{30}Y^3 + \cdots \end{cases} \tag{4-5-2}$$

$$x' = x$$

$$y' = f \cdot \tan\left(\frac{y}{f}\right)$$

式中 x，y 为象点在扫描图象上的坐标，坐标系的 x 轴为图象上扫描角为零的象元连线，y 轴为扫描方向；X，Y 为对应的地面点坐标；a_{ij}，b_{ij} 为多项式系数。(4-5-2) 式仅为表达象点与地面点坐标多项式关系的一种形式，多项式的阶数是可变的，不同地区的光机扫描图象，多项式的阶数可以是不同的。另外，也可以用勒让德多项式和切比雪夫多项式来表达其象点与地面点间的坐标关系。

2. 图象的比例尺

光机扫描图象的比例尺也具有变化的特点，在图象上不同位置、不同方向上的象比例尺是不同的。为明晰它的变化特点，我们将它分解成两个方向的象比例尺：沿飞行方向上的象比例尺（即图象的纵向比例尺）和与飞行方向垂直的象比例尺（即图象的横向比例尺）。

纵向比例尺为记录胶片移动距离与扫描仪沿飞行方向前进距离之比。由光机扫描仪的成象过程可知，若要使扫描图象的行与行影象之间严格衔接，必须使平台的平行移动速度 W 与胶片移动速度 v 应相匹配。设在扫描一行的时间内，胶片移动的距离为象元尺寸 d，在地面上相应的距离为 $\Delta\theta \cdot H$（$\Delta\theta$ 为瞬时视场角，H 为平台高度），则在消除了纵向重叠现象的图象上纵向比例尺为

$$\frac{1}{m_{纵}} = \frac{v}{W} = \frac{d}{\Delta\theta \cdot H} \tag{4-5-3}$$

横向比例尺等于象元尺寸 d 与瞬时视场沿扫描方向长度 l 之比。当扫描角为 θ 时，象元在地面上的对应线长度 l 为（参见图 4-5-2）

超星提醒您：
使用本复制品
请尊重相关知识产权！

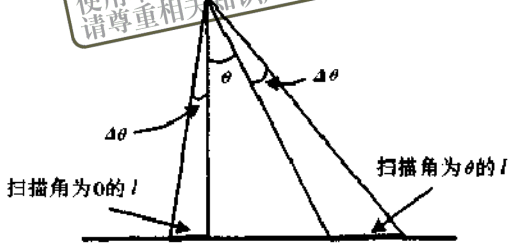


图 4-5-2　长度 l 和扫描角 θ 的关系

$$l = \Delta\theta \cdot H \cdot \sec^2\theta \tag{4-5-4}$$

则横向比例尺为

$$\frac{1}{m_{横}} = \frac{d}{l} = \frac{d}{\Delta\theta \cdot H \cdot \sec^2\theta} = \frac{1}{m_{纵}}\cos^2\theta \tag{4-5-5}$$

从公式（4-5-3）和（4-5-5）可以看出：对平坦地区，沿飞行方向各处的比例尺是一致的。而横向比例尺，除中间部分与纵向比例尺相等外，其他位置随扫描角的大小而变化，从中间向两则逐渐变小。在实际应用中，往往要对象比例尺进行改正，使其全片的象比例尺基本一致。如 Landsat 的 MSS 图象，其中间比例尺为 $1:3.369\times10^6$，扫描角为 $\mp 5.78°$的边缘部分比例尺为 $1:3.404\times10^6$，但经图象处理后可将比例尺统一起来。

3. 影象变形的规律

光机扫描图象的影象变形主要由外方位元素变化、地形起伏和图象比例尺变化等因素引起的。

光机扫描图象的每一行相当于全景象片上 $x=0$ 的情况，因此光机扫描图象的每一行受外方位元素影响而产生的误差可用 $x=0$ 代入（4-3-24）式求出

$$\begin{cases} dx = -\dfrac{f}{H}\cos\theta \cdot dX_s - f\cos\theta \cdot d\alpha + f\sin\theta \cdot d\kappa \\ dy = -\dfrac{f}{H}\cos^2\theta \cdot dY_s - \dfrac{f}{H}\sin\theta \cdot \cos\theta \cdot dZ_s - f \cdot d\omega \end{cases} \tag{4-5-6}$$

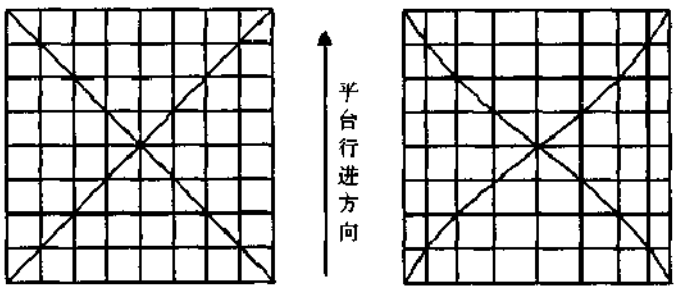
超星阅览器提醒您：
使用本复制品
请重视相关知识产权！

由于光机扫描成象时平台姿态变化无准确规律可循，实际应用中假设整幅图象的外方位元素保持一致，并且航天成象时的扫描角 θ 很小，注意到 $\theta = \frac{y}{f}$，此时整幅光机扫描图象受外方位元素影响而产生的误差为

$$\begin{cases} dx = -\dfrac{f}{H}dX_s - f \cdot d\alpha + y \cdot d\kappa \\ dy = -\dfrac{f}{H}dY_s - \dfrac{y}{H}dZ_s - f \cdot d\omega \end{cases} \tag{4-5-7}$$

地面起伏的地表在图象上会出现影象变形。由成象过程可知，飞行方向（图象的 x 方向）没有投影误差，在扫描方向（图象的 y 方向）存在投影误差

$$\begin{cases} dx = 0 \\ dy = \dfrac{f \cdot \sin\theta \cdot \cos\theta}{H}\Delta h \end{cases} \tag{4-5-8}$$



(a)地面形状　　(b)扫描影象形状

图 4-5-3　光机扫描图象的变形规律

式中 Δh 为地面点相对地底点的高差，θ 为地面点成象时的扫描角。

由于图象在两个方向的象比例尺不一致，由此引起的影象变形十分明显。因纵向影象比例尺处处一致，横向象比例尺由中间至两侧逐渐变小，所以图象中间的目标以及与飞行方向平行的线状目标没有变形，垂直于飞行方向的线状目标方向不变，而距离被压缩，与飞行方向交叉的线状目标逐渐向内弯曲，如图 4-5-3 所示。当扫描角比较小时，影象变形不明显。

4. 地面分辨率

光机扫描图象的地面分辨率是指象元所对应的地面大小。扫描成象时象元所对应的地面范围称之为瞬时视场。对一台扫描仪来说，瞬时视场的大小除了和瞬时视场角有关外，还与平台高度和扫描角的大小有关。由图 4-5-4 可得

$$D_{纵} = \Delta\theta \cdot H \cdot \sec\theta \qquad (4\text{-}5\text{-}9)$$

$$D_{横} = \Delta\theta \cdot H \cdot \sec^2\theta \qquad (4\text{-}5\text{-}10)$$

式中 $D_{纵}$，$D_{横}$ 分别为沿飞行和扫描方向上的地面分辨率，$\Delta\theta$ 为瞬时视场角，H 为平台高度，θ 为扫描角。

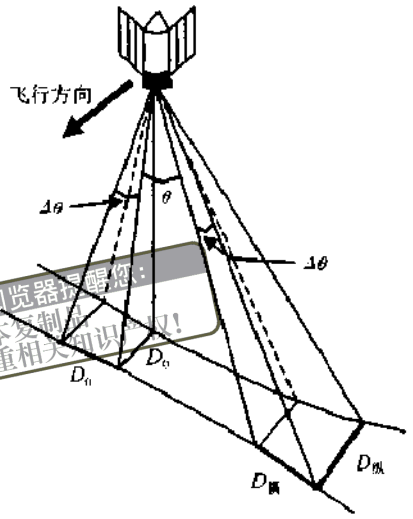


图 4-5-4　光机扫描图象的分辨率

超星阅览器提醒您：使用本复制品请尊重相关知识产权！

从公式可以看出：在光机扫描图象上，地面分辨率随象点的位置不同而变化，在象底点处（即 $\theta=0$ 时）最高，且纵向分辨率与横向分辨率相等；其他位置的地面分辨率从中间向两边逐渐降低，且纵向分辨率和横向分辨率不等。

4.5.2　CCD 固体扫描图象的几何特性

CCD 固体扫描仪上的探测器有两种排列方式：线阵排列和面阵排列。面阵 CCD 扫描仪成象时，成象区域地物的电磁波辐射信息通过同一镜头中心一次性地聚焦在 CCD 面阵上成象，因此面阵 CCD 图象与框幅式象片有相同的投影关系，是地面的中心投影，此处不再叙述。线阵 CCD 扫描仪成象时探测器线阵列与平台飞行方向垂直安置，每次成象时同一扫描行通过投影中心聚焦成象，不同的扫描行有不同的投影中心，所以线阵 CCD 扫描图象是行中心投影，这一点恰好与缝隙成象的原理相同。

1. 成象瞬间点与对应地面点的坐标关系

线阵 CCD 扫描仪在垂直成象的情况下，与垂直式缝隙连续摄影象片有同样的性质。因此，时刻 t 的扫描行中的象点 p（在遥感器坐标系中的坐标为（0，y，$-f$））与地面点 P（在地面坐标系中的坐标为（X，Y，Z））的坐标关系式为

$$\begin{bmatrix} 0 \\ y \\ -f \end{bmatrix} = \frac{1}{\lambda} \begin{bmatrix} a_1(t) & b_1(t) & c_1(t) \\ a_2(t) & b_2(t) & c_2(t) \\ a_3(t) & b_3(t) & c_3(t) \end{bmatrix} \begin{bmatrix} X - X_S(t) \\ Y - Y_S(t) \\ Z - Z_S(t) \end{bmatrix} \qquad (4\text{-}5\text{-}11)$$

式中$a_i(t), b_i(t), c_i(t)(i=1,2,3)$是由时刻 t 的扫描行的外方位角元素$\alpha_s(t)$, $\omega_s(t)$, $\kappa_s(t)$所确定的旋转矩阵中的九个元素, $X_s(t)$, $Y_s(t)$, $Z_s(t)$是时刻 t 的扫描行的摄站坐标。不同的扫描行有不同的外方位元素, 它们之间的关系一般用下面的公式近似表达

$$\begin{aligned}
X_s(t) &= X_s(t_0) + a_1' x + a_2' x^2 + \cdots \\
Y_s(t) &= Y_s(t_0) + b_1' x + b_2' x^2 + \cdots \\
Z_s(t) &= Z_s(t_0) + c_1' x + c_2' x^2 + \cdots \\
\alpha_s(t) &= \alpha_s(t_0) + d_1' x + d_2' x^2 + \cdots \\
\omega_s(t) &= \omega_s(t_0) + e_1' x + e_2' x^2 + \cdots \\
\kappa_s(t) &= \kappa_s(t_0) + f_1' x + f_2' x^2 + \cdots
\end{aligned} \tag{4-5-12}$$

式中 x 是图象上沿平台前进方向的象坐标。

当线阵 CCD 作侧视成象（侧视角为 θ，如图 4-5-5 所示）时，此时相当于传感器坐标系 $s\text{-}\bar{u}\bar{v}\bar{w}$ 绕 $\bar{u}$ 轴旋转一个角度θ。若象点在侧视角为 θ 的传感器坐标系 $s\text{-}uvw$ 中的坐标为（0，y，$-f$），并设同一时刻象点在垂直成象时的传感器坐标系 $s\text{-}\bar{u}\bar{v}\bar{w}$ 中的坐标为（0，y'，z'），则

$$\begin{bmatrix} 0 \\ y' \\ -z' \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & \cos\theta & -\sin\theta \\ 0 & \sin\theta & -\cos\theta \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 0 \\ y \\ -f \end{bmatrix} \tag{4-5-13}$$

式（4-5-13）和式（4-5-11）共同表达了侧视情况下象点与地面点的坐标关系式。

当线阵 CCD 作前、后视成象，前（后）视角为 φ 时（如图 4-5-6 所示）的传感器坐标系 $s\text{-}uvw$ 可以认为是垂直成象时的传感器坐标系 $s\text{-}\bar{u}\bar{v}\bar{w}$ 绕 $\bar{v}$ 轴旋转 φ 角而得的。若象点在前（后）视角为 φ 的传感器坐标系 $s\text{-}uvw$ 中的坐标为（0，y，$-f$），并设同一时刻象点在垂直成象时的传感器坐标系 $s\text{-}\bar{u}\bar{v}\bar{w}$ 中的坐标为（0，y'，z'），则

$$\begin{bmatrix} 0 \\ y' \\ -z' \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos\varphi & 0 & \sin\varphi \\ 0 & 1 & 0 \\ -\sin\varphi & 0 & \cos\varphi \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 0 \\ y \\ -f \end{bmatrix} \tag{4-5-14}$$

式（4-5-14）和（4-5-11）共同表达了前（后）视情况下象点与地面点的坐标关系式。

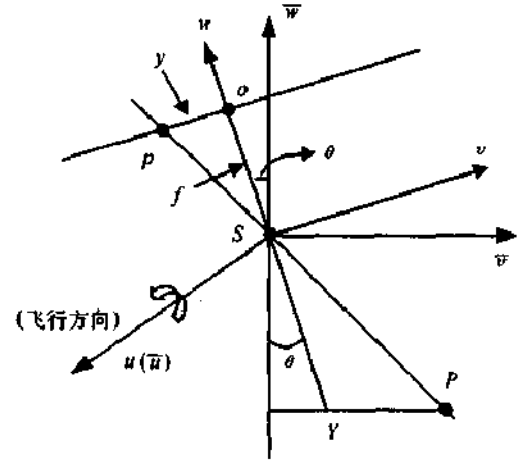


图 4-5-5　线阵 CCD 侧视成象

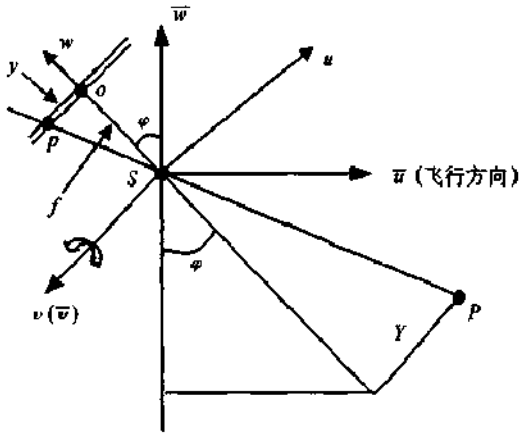


图 4-5-6　线阵 CCD 前（后）视成象

2. 图象比例尺

线阵 CCD 扫描描仪在垂直成象时的图象与缝隙式象片具有相同的比例尺特性。当图象的外方位角元素为零时，图象比例尺为

$$\frac{1}{m}=\frac{f}{H}$$

当地面平坦、外方位角元素为零、侧视角为 θ 时，图象比例尺为

$$\frac{1}{m}=\frac{f}{H}\cos\theta$$

3. 影象的变形规律

线阵 CCD 扫描图象的影象变形主要表现为因传感器姿态角引起的象点移位（即倾斜误差）和因地形起伏引起的象点移位（即投影误差）两种变形形式。

由于线阵 CCD 图象的投影性质是行中心投影，它的倾斜误差形式与缝隙式象片相同。若图象的倾斜角很小时，因此而引起的象点位移可用（4-3-17）式和（4-3-18）式表达。

因地形起伏而引起的象点移位也仅在扫描方向上，移位大小与平台高度、地面高差和象点的 y 坐标值有关，可用（4-3-19）式表达。在航天扫描成象时，由于平台高度远远大于地面起伏的高差值，因此在图象上不会出现重叠和遗漏现象。

4. 地面分辨率

CCD 固体扫描图象的地面分辨率是指象元所对应的地面大小。它也是由平台高度 H 和象元探测角（瞬时视场角）$\Delta\theta$ 决定

$$D=\Delta\theta\cdot H \tag{4-5-15}$$

例如 SPOT 卫星 HRV 线阵全色探测单元的瞬时视场角为 1.2×10^{-5}rad，卫星高度 832km，星下地面分辨率为 10m，全色波段的线阵由 6000 个 CCD 光敏元件组成，星下地面覆盖 60km。多光谱探测单元的瞬时视场角为 2.4×10^{-5}rad，星下地面分辨率为 20m，线阵由 3000 个 CCD 光敏元件组成，星下地面覆盖 60km。

4.5.3 扫描图象的物理特性

扫描图象记录的电磁波辐射信息的范围较宽，可以记录从可见光至热红外各波段的信息。下面分别介绍各波段图象能够反映的地物特性。

0.4～0.5μm 波段图象：它记录的是地物在蓝光波段的反射信息。该波段对水体有较好的穿透能力，所以在蓝光波段图象有利于浅水底地貌的判读，可用于浅水底地貌的测绘。不同纯度的水体在此波段有不同的反射能力，当水中含有浮生物时，因浮生物含有一定的叶绿素，它对蓝光的反射能力差，因此该波段图象可用于水体浮生物含量的判读。同时被造纸厂、化工厂污染的水体其反射率也会发生变化，对水体污染监测有利。另外，一般地物在此波段的反射率较低，而雪山反射率最大，所以在蓝光波段图象上雪地与其他地物分界明显。但是，蓝光波段的影象受大气散射影响最严重，有时影象会模

超星阅览器提醒您：使用本复制品，请尊重相关知识产权

糊不清。

0.5～0.6μm 波段图象：它记录的是地物在绿光波段的反射信息。它对水体也有一定的穿透能力，一般可透视水深 10～20m，当水体清澈时，透视水深超过 50m，因此可适宜测绘浅水区的水底地貌。植被在此波段的反射率相对出现峰值，图象上易于区分植被的分布范围，可用于林业资料分布、草场分布情况的调查。水体在波段反射率较低，容易与其他地物相区别，可用于水域分布的调查。另外在 0.4～0.5μm 波段和 0.5～0.6μm 波段的比值图象上，可反映出水体的蓝绿比值，能估算水体中的可溶性有机物和浮生物含量，用于渔业资源调查。

0.6～0.7μm 波段图象：属红光波段图象，受大气散射的影响较小，地物影象清晰，对人文地物判读有利，此波段图象在考古方面有一定应用。不同地质构造的边界在图象上有明显的反映。在此波段，植物和水体的反射率较低，可用于植被范围及水域范围的确定。

0.7～1.1μm 波段图象：记录地物的近红外反射信息。水体、湿地反射率低，而植被的反射率较高。在此波段，不同植被的反射率有一定的差异，它们在图象上表现出不同的色调，可用于植被类型的分布调查。健康树木与病虫害树木的影象有明显差别，病虫害树叶的叶绿素破坏严重，反射近红外的能力差，在图象上比健康树色调暗，因此该波段图象可用于植物健康情况调查。对于生长期的农作物来说，长势良好、枝叶茂密的植物反射近红外光的能力强，在图象上表现较亮的色调，而长势不好的作物其影象色调较浅，在红外假彩色片上长势好的作物呈鲜红色，因此该波段图象也可用于农作物长势情况的调查。另外，由于此波段图象对在绿色伪装下的物体有揭露作用，它常被用来进行军事目标侦察。

1.55～1.75μm 波段图象：也属于近红外波段图象。地物在此波段的反射率与其含水量有很大关系，常于土壤含水量监测、植被长势调查、地质调查中的岩石分类。土壤含水量的大小对此波段红外光的反射影响较大，含水量高反射率下降，因此该波段常用于农业旱情调查；植被的含水量差别也会在其反射率大小上体现出来，所以用它调查植被长势情况是有利的；不同类型的岩石会因反射率的变化而呈现不同的影象色调。

2.08～2.35μm 波段图象：它记录的是地物短波红外的辐射信息，它主要用于地质制图，特别是用于热液变岩环的制图。由于地物含水量不同而表现为反射能力的差异，因此也可用于识别植物的长势。

温馨阅览器提醒您：
使用本复制品，请尊重知识产权。

8～14μm 波段图象：属于热红外图象，它记录的不是地面目标反射太阳光的信息，而是地物自身的热辐射信息。色调浅的影象表明其相应地物热辐射能量强，热辐射能与物体发射率和温度成正比，因此热红外图象上的影象色调不仅表现了地物温度变化的情况，而且还能提供目标活动特性、所处状态等信息。例如，根据飞机发动机处和尾部的影象色调、以及起飞后留下的阴影，可判读飞机所处状态。

热红外图象的影象色调受太阳辐射的影响很大，摄影时间和天气的不同，影象色调会有很大的变化。例如，水体比陆地有较大的热惯性，白天升温时水体的温度比陆地低，水体的色调比土壤深；晚上降温时，水体的温度比陆地高，水体色调比土壤浅。在有较厚的云层遮挡时，地物间温差很小，尤其是长时间连续阴天，各地物温度趋于相等，这时获取的图象色调差很小，不易区分目标。

热红图象可用森林火灾的监测。常温森林的热辐射能量主要集中在 8～12μm，而森林火灾区的热辐射能量主要集中在 3～5μm，因此不同波段的热红外图象可用于森林火灾的监测。热红外图象和近红外图象配合使用，可监测农作物的长势和收成情况，进而可进行农作物的估产。另外，热红外图象可用于地热调查、军事目标侦察等领域。

4.6 侧视雷达成象

侧视雷达属于主动式遥感器。在成象时，雷达本身发射一定波长和功率的高频电磁波波束，然后接收该波束被目标散射返回的信号，返回信号的强度取决于目标的特性，从而达到探测目标的目的。侧视雷达发射的波长大都在微波（0.1～100cm）范围内，所以又把雷达图象叫做微波图象。

由于侧视雷达使用的是微波波段的电磁波，大气对它的影响极小，可以全天候取得地面的雷达图象；并且侧视雷达图象的地面分辨率与平台高度无关，因此侧视雷达遥感器越来越被广泛使用。表 4-6-1 列出了国外主要星载雷达的特性与应用领域。

超星阅览器提醒您：使用本资料请勿外传

表 4-6-1 国外主要星载 SAR 的特性与应用

参数	Seasat	SIR-A	SIR-B	钻石-1	ERS-1	JERS-1	SIR-C/XSAR	Radarsat	EOS-SAR
国家或组织	美国	美国	美国	前苏联	欧空局	日本	美国/德国、意大利	加拿大	美国
发射年份	1978	1981	1984	1991	1991	1992	1999，1996	1995	1999
高度(km)	800	260	225	270～380	785	570	225	798	800
波段 极化 视角	L HH 20°	L HH 47°	L HH 15～60°	S 30～60°	C VV 23°	L HH 35°	L、C/X 四种极化/VV 20～55°	C VV <20°或 >20°	L，C，X 四种极化 15～50°
分辨率(m)	25	40	25	10～15	6～30	18	25/10～30	10～100	10～30
遥感应用	海冰与海洋监测，摄取海波图形、地质学与森林学应用	验证对极贫瘠地区流沙层的微波穿透能力，地质和水文学应用	验证星载 SAR 的立体成象能力、测图	用于海洋学、地质学、制图学等	海岸区与全球海洋调查，干涉测量等	收集有助于地球资源探测的地表地形信息，灾情监测	促进地球科学及环境变化的研究，极化性能研究，干涉测量，火山表面移动	观测北极海冰移动，地形测量和海洋学	全球环境监测

成象雷达按成象机理可分为真实孔径侧视雷达（SLAR）和合成孔径侧视雷达（SAR），下面分别加以介绍。

4.6.1 侧视雷达的一般结构

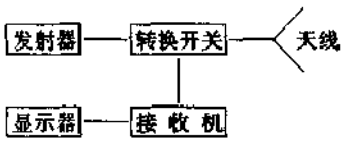


图 4-6-1 侧视雷达一般结构

侧视雷达一般由脉冲发射机、接收机、发射接收转换开关、天线和显示记录器组成，如图 4-6-1 所示。脉冲发射机产生脉冲信号，由转换开关控制，经天线向观测地区发射。地物反射脉冲信号，也由转换开关控制进入接收机。接收的信号在显示器上显示或记录在磁带上。

雷达接收到的回波中，含有多种信息，如雷达到达目标的距离、方位、雷达与目标的相对速度（即作相对运动时产生的多普勒频移）、目标的反射特性等。其中距离信息可用下式表示

$$R = \frac{1}{2} C \cdot t \qquad (4\text{-}6\text{-}1)$$

超星阅览器提醒您：
使用本复制品
请尊重相关知识产权！

式中：R 为雷达到目标的距离，C 为电磁波传播速度，t 为雷达和目标间脉冲信号往返的时间。

雷达接收到的回波强度是系统参数和地面目标参数的复杂函数，雷达探测单个目标的回波功率 P_r 由下式给定

$$P_r = \frac{P_t G_t G_r \lambda^2 \delta}{(4\pi)^3 R^4} \qquad (4\text{-}6\text{-}2)$$

式中：P_t 为发射功率，G_t 为发射天线的功率增益，G_r 为接收天线的功率增益，λ 为雷达波波长，δ 为雷达截面积（雷达接收天线的方向上目标的有效面积），R 为目标至天线间的距离。

雷达波波长一般在 0.1～100cm 之间，通常需要根据特定的探测目的而选用特定波长的微波，表 4-6-2 列出了成象雷达常用的几个波段及其频率和探测对象。

表 4-6-2 成象雷达常用的几个波段

波段名称	频　率（GHz）	测量对象
L	1～2	波浪
S	3～4	地质
C	4～8	土壤水分
X	8～12	降雨
Ku	12～18	风、冰、大地水准面
K	18～27	植被
Ka	27～40	雪
W	75 附近	云

4.6.2 真实孔径侧视雷达

真实孔径侧视雷达的工作原理如图 4-6-2 所示。天线装在飞机或卫星的侧面，雷达发射天线向平台行进方向（称为方位方向）的侧向（称为距离方向）发射一束宽度很窄的脉冲电磁波束，然后接收从目标地物反射回来的后向散射波，进而从接收的信号中获

取地表的图象。由于地面各点到平台的距离不同，地物后向反射信号被天线接收的时间也不同，依它们到达接收天线的先后顺序记录，即距离近者先记录，距离远者后记录，这样根据后向反射电磁波返回的时间排列就可以实现距离方向扫描。通过平台的前进，扫描面在地面上移动，进而实现方位方向上的扫描。

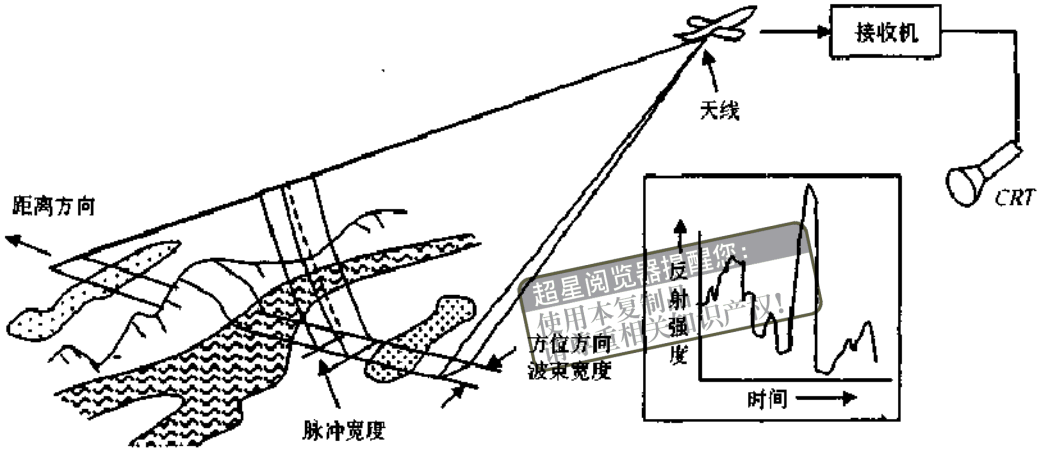


图 4-6-2　真实孔径雷达工作原理

真实孔径侧视雷达在距离方向和方位方向的地面分辨率是不一样的。距离分辨率（记为 ΔR）是在距离方向上能分辨的最小目标的尺寸。它可表示为

$$\Delta R = \frac{\tau \cdot c}{2\sin\theta} \tag{4-6-3}$$

式中 τ 为脉冲宽度，c 为光速，θ 为雷达波的侧视角，如图 4-6-3 所示。

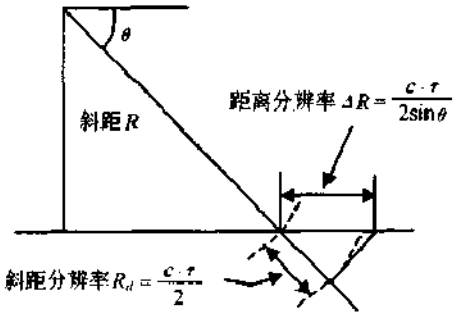


图 4-6-3　距离分辨率

从公式（4-6-3）可以看出：脉冲的持续时间（脉冲宽度）越短，距离分辨率越高。若要提高距离分辨率，需减小脉冲宽度。但脉冲宽度过小会使雷达发射功率下降，回波信号的信噪比降低，由于两者矛盾，使得距离分辨率难以提高。为了解决这一矛盾，一般采用脉冲压缩技术来提高距离分辨率。

脉冲压缩技术是指利用线性调频调制技术将较宽的脉冲调制成振幅大、宽度窄的脉冲的技术。如图 4-6-4 所示，若原脉冲的宽度为 τ、振幅为 A_0，经线性调频调制后，将它用天线发射并接收目标后向散射的电磁波，对接收的信号用与发射时具有相反频率特性的匹配滤波器处理后，就相当于用较窄脉冲宽度的发射电磁波得到了振幅是原来

$\sqrt{\tau \cdot \Delta f}$倍、脉冲宽度为原来$\frac{1}{\tau \cdot \Delta f}$的输出波形。为了提高距离方向上的分辨率，在真实孔径雷达和合成孔径雷达中都采用这种“距离压缩”方法。

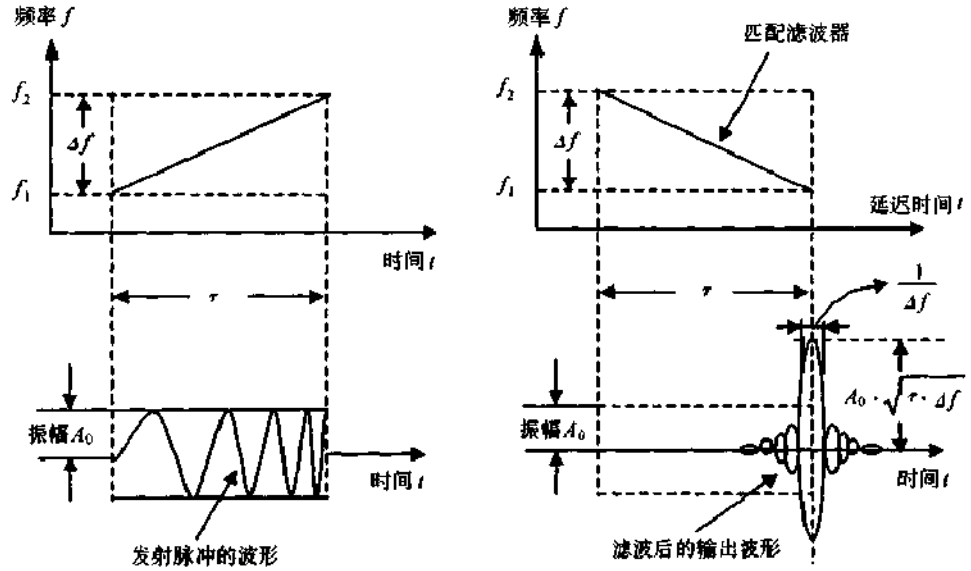


图 4-6-4　脉冲压缩原理

方位分辨率（记为 ΔL）是在方位方向上能分辨的最小目标的尺寸。它可表示为

$$\Delta L = \beta \cdot R = \frac{\lambda \cdot R}{D} \tag{4-6-4}$$

式中 β 为波束宽度，D 为雷达天线的孔径，R 为雷达天线到地面目标的距离，如图 4-6-5所示。

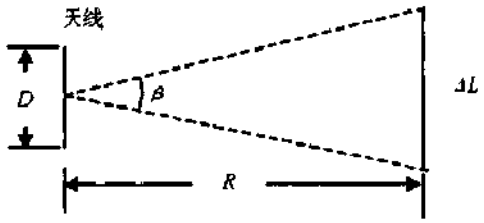


图 4-6-5　方位分辨率

从（4-6-4）式看出：要提高方位分辨率，需采用较短波长的电磁波，或加大天线孔径，或缩短观测距离。这几项措施无论在飞机上或卫星上使用时都受到限制。例如，要求图象的方位向地面分辨率为 25m，当波长为 5.7cm，卫星高度为 600km，侧视角为 40°时，天线有效孔径长度应为 1790m 才能达到要求，但在卫星平台上安装这样大的雷达天线几乎是不可能的。由此可见，真实孔径侧视雷达难以在航天遥感中应用就是这个原因。为了解决这个矛盾，目前采用合成孔径技术来提高侧视雷达的方位分辨率。

超星阅览器未能显示此图像，可能是因为内存不足或图像已损坏。请重新打开此文档或重启阅览器。如果问题仍然存在，请与技术支持人员联系。

4.6.3 合成孔径侧视雷达

合成孔径侧视雷达的特点是：在距离方向上采用脉冲压缩来提高分辨率，在方位方向上通过合成孔径原理来提高分辨率

合成孔径技术的基本思想是对在平台前进方向的不同位置上所接收的包含相位信息的信号进行记录和处理，得到比采用实际天线更长的假设天线进行观测的同样结果，如图 4-6-6 所示。

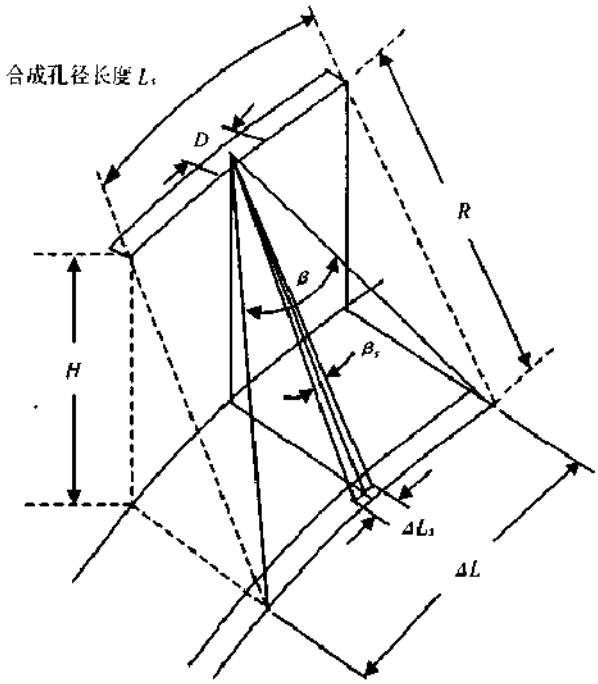


图 4-6-6　合成孔径雷达的原理

在合成孔径雷达中，来自地表目标的反射脉冲在波束能照射到的时间内都会不断地被接收，随着平台的前进，平台和目标的相对位置关系会发生变化，在不同时刻和位置接收到同一地面目标信号的频率会发生变化，即出现多普勒频移效应。频率偏移对于时间而言是线性的，如图 4-6-7 所示，对于目标 A，天线在与它不同的相对位置上，随着时间的增加，依次接收的信号频率降低。所以反射脉冲可以解释成是经过线性调频调制处理而得到的。因此，将在不同位置接收的 A 目标的信号，通过频率偏移具有逆特性的匹配滤波器滤波调制，就得 A 目标的唯一象点。通过调制处理，改善了方位方向上的分辨率，这种处理也叫方位压缩。

利用合成孔径技术，合成后的天线长度为 L_s，则其方位分辨率为

$$\Delta L_s = \beta_s \cdot R \tag{4-6-5}$$

由于合成孔径长度 L_s 等于真实孔径长度的天线能够照射到的范围，即

$$L_s = \beta \cdot R \tag{4-6-6}$$

它等于实际分辨率 ΔL_s。而合成波束宽度 β_s 为

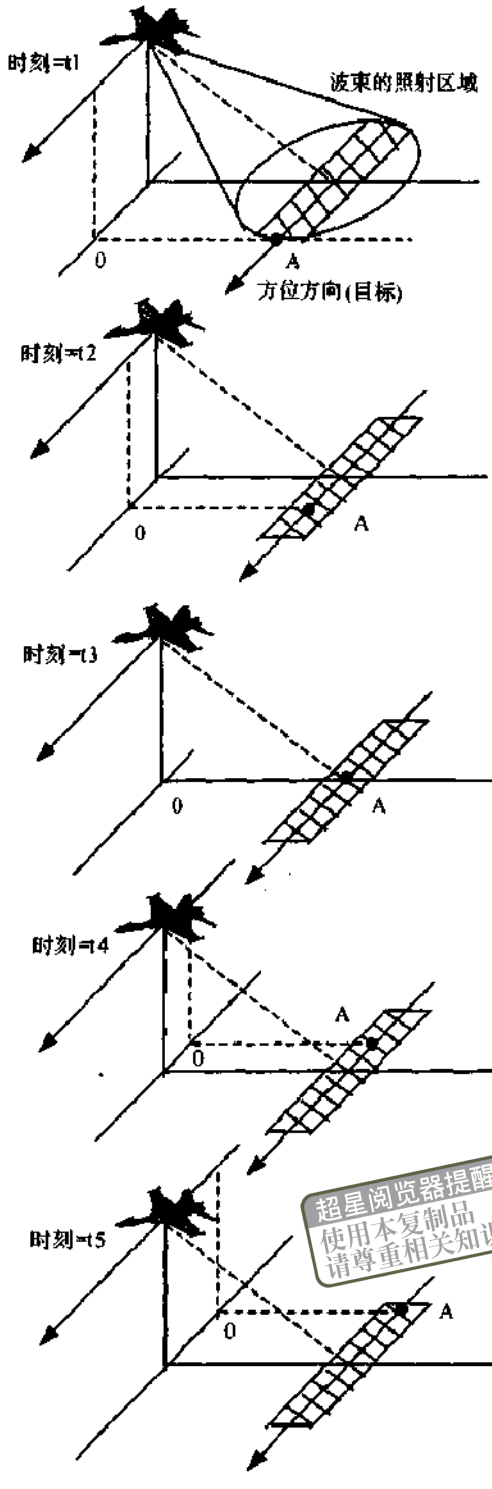
超星阅览器提醒您：
使用本复制品
请尊重相关知识产权！

$$\beta_s = \frac{\lambda}{2 \cdot L_s} \tag{4-6-7}$$

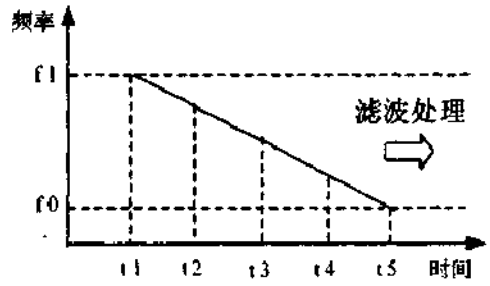
所以

$$\Delta L_s = \beta_s \cdot R = \frac{\lambda \cdot R}{2 \cdot L_s} = \frac{\lambda}{2 \cdot \beta} = \frac{D}{2} \tag{4-6-8}$$

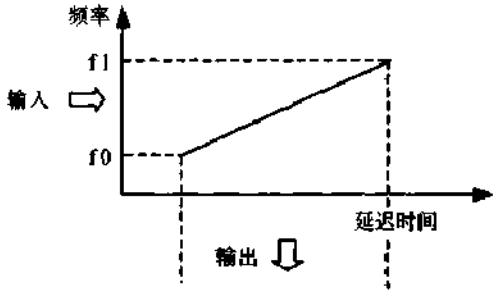
上式表明合成孔径雷达的方位分辨率与距离无关，仅与实际天线的孔径有关，且天线愈短，分辨率愈高。例如天线孔径为 8m，波长为 4cm，目标与平台间的距离为 400km 时，真实孔径侧视雷达的方位向分辨率为 2km，而合成孔径侧视雷达的方位向分辨率仅为为 4m。



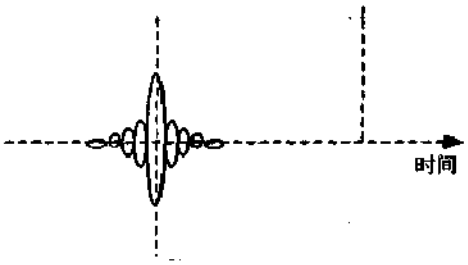
(a) SAR的观测过程



(b) SAR接收信号的频率随时间变化
(多普勒效应)



(c) 匹配滤波器的特性
(频率，延迟时间特性)



(d) A点的信号经匹配滤波
器后的结果(方位方向压缩)

超星阅览器提醒您：
使用本复制品
请尊重相关知识产权!

图 4-6-7　利用多普勒效应的合成孔径雷达的成象原理

4.6.4 合成孔径侧视雷达的数字成象处理

SAR 的观测数据是把雷达天线发射出的宽幅脉冲到达地表后的后向散射信号以时间序列记录下来的数据，如图 4-6-8 所示。在原始数据中，来自地表某一点 P 的后向散射信号被拉长记录到仅相当于脉冲宽度的距离向上。此外随着平台的移动，在微波波束穿过 P 点期间的不同摄站上都可以接收到 P 的后向散射信号，所以其反射信号在方位向上也被拉长记录下来。SAR 的原始数据必须经过处理，才能变成如图 4-6-9 所示的通常意义上的图象。

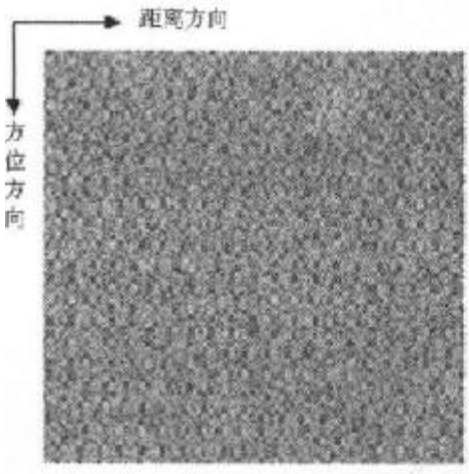


图 4-6-8 SAR 的原始数据

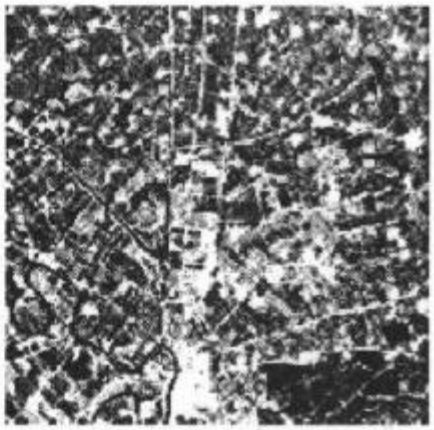


图 4-6-9 SAR 重建图象

通过距离压缩和方位压缩可以把距离方向和方位方向上分布记录的地面上一点的接收信号压缩到一点上（参考 4.6.2 节和 4.6.3 节）。为了进行压缩，一般先求出接收信号与参考函数的互相关。距离压缩时的参考函数是与发射信号复共轭的信号，方位压缩时的参考函数是与多普勒效应引起的线性调频信号的复共轭信号。为了提高处理速度，接收信号与参考函数互相关的计算通常在频率域中进行。随着平台的移动，地面上一点到雷达天线的距离是以时间为自变量的二次函数，这样雷达在不同时刻和位置接收到的同一地面目标的信号不是在一条直线上，这种现象称为距离迁移（Range Migration）。由于距离迁移的影响，在与方位向有关的二次曲线上分布记录了地面上一点的信号，把这些信号纠正到一条直线上的处理过程称之为距离单元迁移改正（Range Cell Migration correction）。图 4-6-10 和图 4-6-11 给出了 SAR 数据成象处理的流程和这一处理过程的示意图。

由于 SAR 图象每个象元的灰度值服从指数分布，每个象元点都有一个灰度的随机涨落性，结果出现了颗粒状的光斑（Speckle）噪声，因此消除图象上这些光斑噪声成为 SAR 数据成象处理的另一项主要内容。通常是将合成孔径分为若干个子孔径，在每个子孔径内分别进行方位压缩，再将多个子孔径的处理结果求和平均，就可以消除或减少光斑噪声，但这样做的同时降低了方位向上的分辨率。这种处理方法称为多视处理，子孔径的数目称为视数，多视处理一般在频域内进行。

超星阅读器 请登录 相关产品

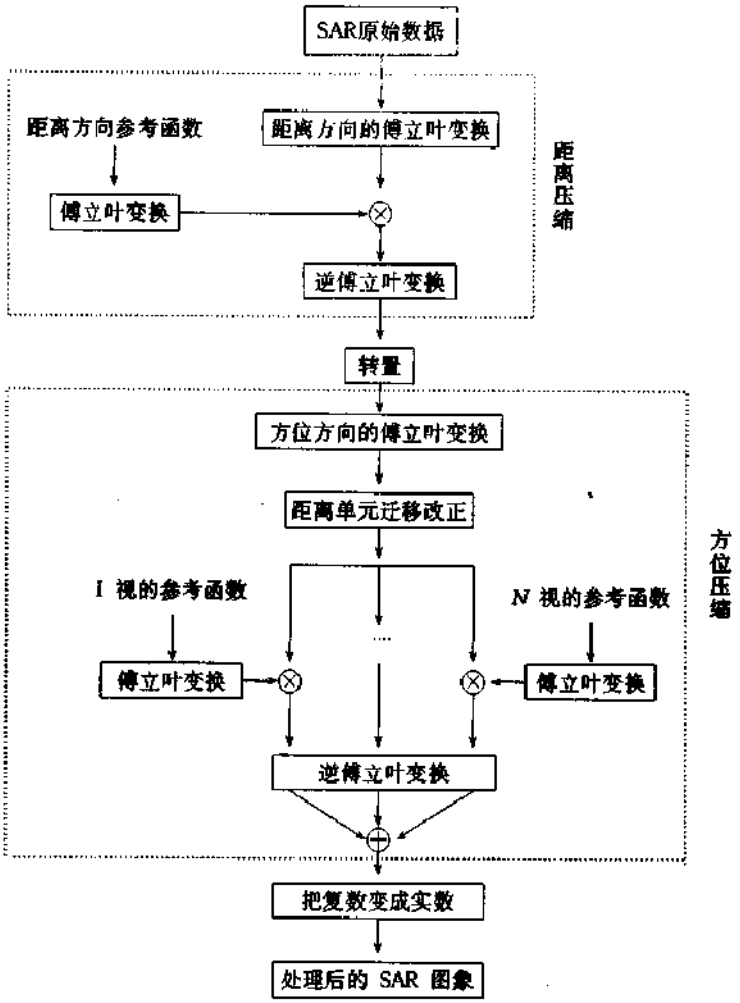
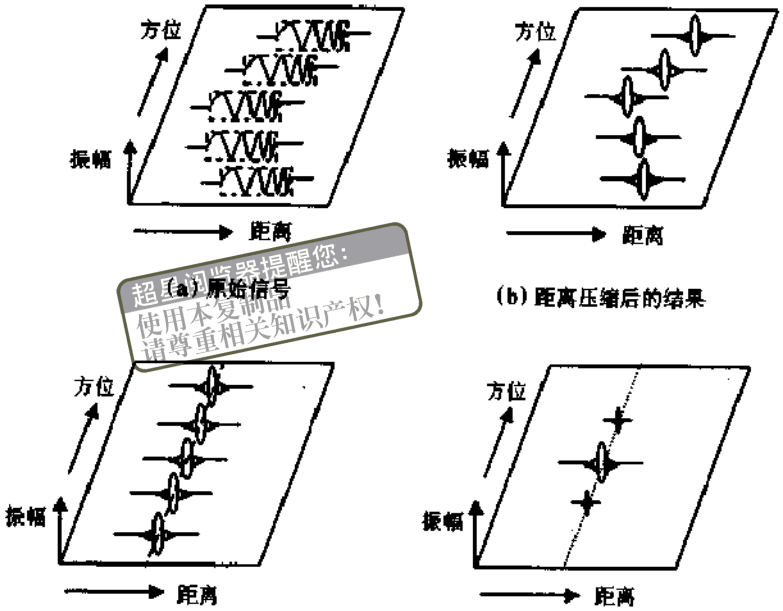


图 4-6-10　SAR 数据成象处理的流程



超星阅览器提醒您:
使用本复制品
请尊重相关知识产权!

图 4-6-11　SAR 数据成象处理过程的示意图

4.6.5 INSAR 的基本原理

INSAR 技术是合成孔径雷达的一个重要应用，在近十几年中得到了迅速的发展。它是利用合成孔径雷达数据的相位信息提取地面的三维信息，其主要应用于测量地面的高程和监测变形。

理论上，单幅 SAR 影象的相位信息是没有实际用途的。如果两幅同一地区、不同视角、并能产生干涉的 SAR 影象，就可以得到该地区的干涉相位，进而获得其三维信息。

INSAR 数据获取方法有两种：一是在同一次飞行中，使用两个相隔一定距离的天线同时接收地面的回波；二是多次对同一地区进行 SAR 成象。在机载 SAR 系统中多采用第一种方法获得 INSAR 数据，而后者是目前星载 SAR 中获取 INSAR 数据的唯一方法。由于 INSAR 数据获取方法有两种，因而 INSAR 的名称有两种解释，即干涉合成孔径雷达（Interferometric Synthetic Aperture Radar）和合成孔径雷达干涉测量（Synthetic Aperture Radar Interferometry）。

超星阅览器提醒您：使用本复制品，请尊重相关知识产权！

干涉合成孔径雷达是指双天线的合成孔径雷达，它是在 SAR 系统中安装两部间隔一定距离的天线，一部天线发射并接收信号，另一部天线只接收信号。两部天线接收的信号采用相同的多普勒中心频率滤波成象。由于两部天线所接收的是同一地区反射回来的后向散射回波，但它们到达天线的距离不同，即所接收的回波信号相位不同，因而可以通过干涉获得干涉相位（相位差），由于干涉相位与 SAR 系统的波长、两天线的位置、入射角、地面高度有密切的关系，而 SAR 系统的波长、两天线的位置、入射角是已知的，所以在得到干涉相位后就可以得到地面的高程信息。

利用重复飞行的方法进行 INSAR 数据获取和地面三维信息提取的方法一般称作合成孔径雷达干涉测量。它与双天线的原理、目的相同，只是数据获取和处理的方法有所区别。

在双天线的情况下，如果两部天线平行于飞行方向获取地面的影象并进行干涉处理的过程称为顺迹干涉（Along-trace Interferometry），如果两部天线垂直于飞行方向获取地面的影象并进行干涉处理的过程称为横迹干涉（Across-trace Interferometry）。前者只能测定水平距离，而后者才能获得地面的三维信息。在采用重复轨道干涉（Repeat-pass Interferometry）的情况下，获取两幅图象的时间上有所差异，为避免由于时间差异引起不良效果，一般要求时间间隔应尽量短；基线长一般不超过 1000m。下面介绍采用重复轨道干涉测量的原理。

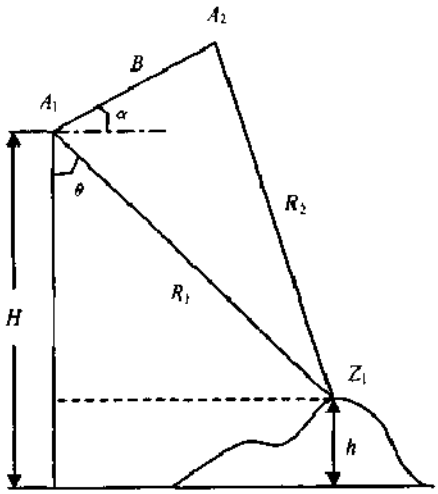


图 4-6-12 INSAR 原理

如图 4-6-12 所示，假设 A_1，A_2 是卫星两次对同一地区成象的位置（即天线的位

置），A_1 位置的轨道高度为 H，两个摄站之间的基线长为 B，基线的水平角为 α，入射角为 θ，则地面目标 Z_1 的高程 h 为

$$h = H - R_1 \cdot \cos\theta \tag{4-6-9}$$

式中 R_1 为 A_1 至目标 Z_1 的距离。根据余弦定理得

$$\begin{aligned} R_2^2 &= R_1^2 + B^2 - 2 \cdot R_1 \cdot B \cdot \cos(\alpha + 90^\circ - \theta) \\ &= R_1^2 + B^2 + 2 \cdot R_1 \cdot B \cdot \sin(\theta - \alpha) \end{aligned} \tag{4-6-10}$$

式中 R_2 为 A_2 至目标 Z_1 的距离。

若令 $\Delta R = R_2 - R_1$，则由（4-6-10）式可得

$$\sin(\theta - \alpha) = \frac{(R_1 + \Delta R)^2 - R_1^2 - B^2}{2 \cdot B \cdot R_1} \tag{4-6-11}$$

整理（4-6-11）式得到

$$R_1 = \frac{\Delta R^2 - B^2}{2 \cdot B \cdot \sin(\theta - \alpha) - 2\Delta R} \tag{4-6-12}$$

使用阅览器提醒您：
仅供阅览，请勿侵犯知识产权

干涉相位是指目标在 A_1 和 A_2 处接收的回波的相位差 $\Delta\varphi$，而相位差 $\Delta\varphi$ 与距离差 ΔR、波长 λ 有如下关系

$$\Delta\varphi = \frac{2\pi}{\lambda}\Delta R \tag{4-6-13}$$

考虑到雷达所接收的回波信号是经过发射和返回路程的信号，所以有

$$\Delta R = \frac{\lambda}{4\pi}\Delta\varphi \tag{4-6-14}$$

将（4-6-14）式和（4-6-12）式代入（4-6-9）式得

$$h = H - \frac{\left(\frac{\lambda \cdot \Delta\varphi}{4\pi}\right)^2 - B^2}{2B \cdot \sin(\theta - \alpha) - \frac{\lambda \cdot \Delta\varphi}{2\pi}} \cdot \cos\theta \tag{4-6-15}$$

上式表明了干涉相位信息与雷达参数、天线位置、入射角以及地面点高程的关系。这就是 INSAR 能够从干涉相位中得到地面高程的原理。

根据 INSAR 的基本原理，INSAR 数据处理的基本过程如图 4-6-13 所示，其关键步骤可概括为

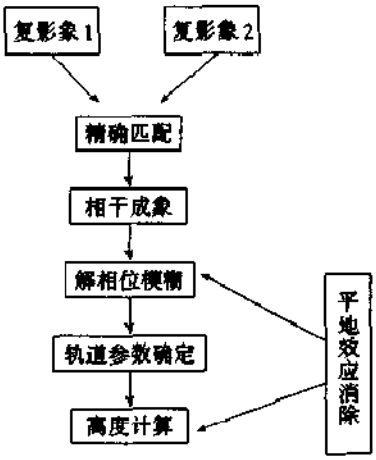


图 4-6-13　INSAR 数据处理的基本过程

（1）匹配

为了求取地面点的高度信息，必须先要确知地面点的干涉相位信息。由于我们所取得的两幅 SAR 图象是在不同的时刻、由不同的轨道所获取的。它们虽然是对同一地区成象，但是由于其成象时 SAR 系统的位置不同、微波入射角的不同，两幅图象相对应的象点并不是地面的同一目标点。因而，只

有在先对不同轨道的SAR图象进行精匹配后，才能得到地面点的干涉相位信息。从匹配的角度来说，两幅图象的匹配精度应达到子象元级。否则，所得到的干涉相位不能保证是同一地面点的，从而影响所求地面高度的准确性，甚至不能获取地面的高程信息。

(2) 相位解模糊

经匹配后的两SAR图象进行相干，得到我们所需的干涉相位。但是，我们所取得的干涉相位只是其主值 φ_m，即其值的范围为 $[-\pi, \pi]$，而并不是其真实值 φ。真实值与主值之间相差 $2m\pi$ ($\varphi = \varphi_m + 2m\pi$)，这就是相位模糊的问题。为了获取地面高度信息，我们必须先获得干涉相位的真实值，即要求出 $2m\pi$ 中的 m 的值，这就是相位解模糊的过程。

(3) 轨道参数求解

从INSAR原理中，我们知道两天线的相隔距离（基线长）B 和天线的连线与水平线的夹角 α，都是求取地面高程的不可少缺的重要参数。为了获取 B 和 α，必须要知道 SAR 成象时卫星的位置，即通常所说的轨道参数。轨道参数的确定，可以通过星历表参数来估算，但它精度不高。我们采用的是通过一定数量的地面已知点（控制点），根据其成象原理，来解算成象时的轨道参数。

(4) 平地效应消除

平地效应是高度不变的平地在干涉条纹图中所表现出来的随距离向和方位向的变化而呈周期性变化的现象。干涉条纹图象中有很严重的平地效应，在相位解模糊前可进行平地效应的消除，以便顺利解相位模糊；并且，对于某些高程解算的方法，要求必需进行平地效应消除工作。因此，平地效应消除步骤在INSAR数据处理中有非常重要的作用，但并不是必须的。

平地效应消除可以通过估计距离向和方位向的条纹频率来作相应的补偿。对于平行轨道的重复轨道干涉，可以只作距离向的平地效应消除。平地效应在频谱中表现出一个很强的峰值，通过在干涉图中沿距离方向减去其峰值所对应的频率，即可对距离向的平地效应进行消除。

超星阅览器提醒您：
请勿用本复制品
请尊重知识产权！

(5) 高度计算

在获得干涉相位的真实值和轨道参数后，就能解算出成象区的地面点的高度。最后可以形成数字高程模型（DEM）或进行变形检测等应用。

4.7 侧视雷达图象的特性

侧视雷达在记录地面目标的影象位置时是按其回波的到达时间顺序记录在相应位置上的，即依照目标与天线之间的距离大小按顺序记录，所以雷达图象是地面的距离投影。地物在雷达图象上的影象色调取决它对微波的散射特性，地物与其影象的色调关系并不完全一致。本节主要介绍雷达图象的有关几何特性及物理特性。

4.7.1 侧视雷达图象的几何特性

1. 侧视雷达图象的投影方式

侧视雷达构象的几何形态是按地面点到天线中心的斜距进行投影的。如图4-7-1所

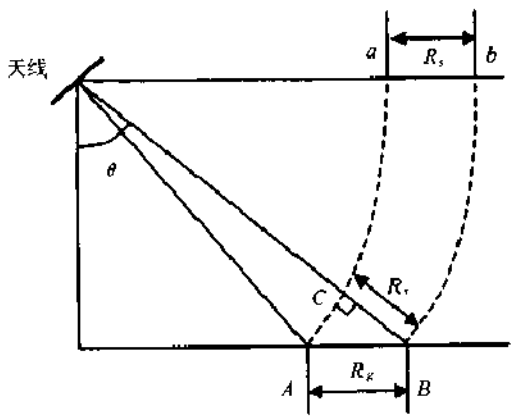


图 4-7-1　侧视雷达的斜距投影

雷达图象是地面的斜距投影，当成象姿态标准时，图象在距离向上的比例尺主要与侧视角有关。从（4-7-1）式可以看出：在斜距投影方式的雷达图象上，距离方向上比例尺是变化的，随着侧视角的增大，图象比例尺变大，所以在图象上有近地点被压缩、远地点被拉长的感觉，如图 4-7-2 所示。在飞行方向的比例尺是固定的，它取决于平台飞行的速度和胶片记录的速度。

在记录回波信号时，如果雷达系统中采用延时斜距传播的时差，此时雷达图象显示的为地面距离，在平坦地区以平距显示的雷达图象上比例尺处处一致。

示，地面上两个目标 A，B 在象平面上的相应象点为 a，b，如果 A，B 相距很近，可认为$\angle ACB$ 是直角，则地面距离 R_g 与其在电磁波传播方向上的距离 R_s 之间的关系为

$$R_s \approx R_g \cdot \sin\theta \qquad (4\text{-}7\text{-}1)$$

所以斜距 R_s 比地面距离 R_g 小，而且同样大小的地面目标，离天线正下方越近，在象片上的尺寸越小。

2. 雷达图象的比例尺特性

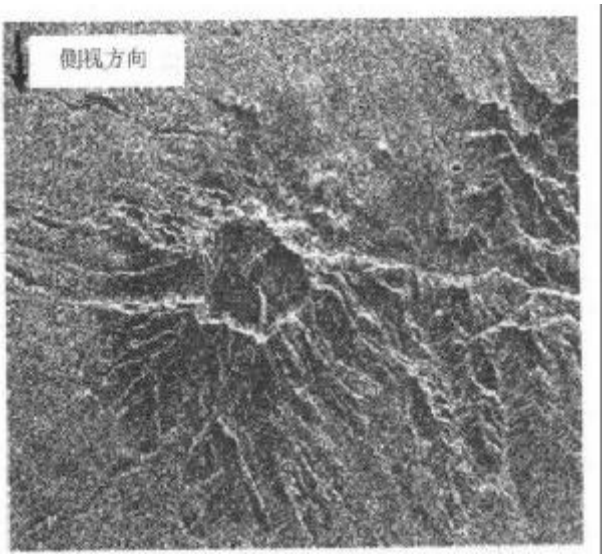


图 4-7-2　斜距投影图象的几何变形

3. 透视收缩与顶底位移

超星阅览器提醒您：
使用本复制品
请尊重相关知识产权！

当雷达波束照射到位于雷达天线同一侧的斜面时，雷达波束到达斜面顶部的斜距 R_s 和到达底部的斜距 R'_s 之差 ΔR 要比斜面对应的地面距离 ΔX 小。所以在图象上的斜面长度被缩短了，这种现象称为透视收缩。由图 4-7-3 可知

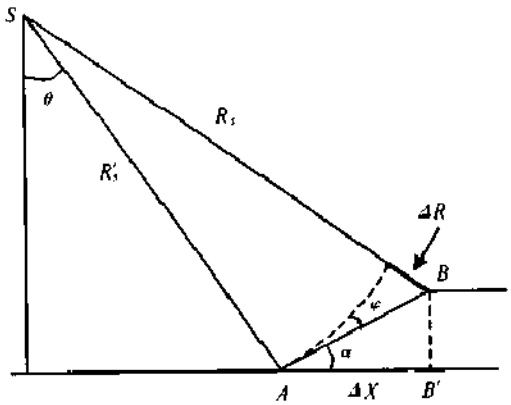


图 4-7-3　透视收缩

$$\varphi = \theta - \alpha$$

$$\Delta R \approx \Delta X \cdot \frac{\sin\varphi}{\cos\alpha}$$

则收缩比 l 为

$$l = \frac{\Delta R}{\Delta X} = \frac{\sin\varphi}{\cos\alpha} \qquad (4\text{-}7\text{-}2)$$

式中：θ 为侧视角，α 为斜面的坡度。由

此可以看出：当侧视角 θ 大于地面坡度 θ 时会出现透视收缩现象；而 $\theta=\alpha$ 时 l 达到极小值。

另外，当雷达波束到斜坡顶部的时间比雷达波束到斜坡底部的时间短的时候，顶部影象被先记录，底部影象被后记录，这种斜坡顶部影象和底部影象被颠倒显示的现象（和中心投影时的点位关系相比较而言）称为顶底位移，如图 4-7-4 所示。它是透视收缩的进一步发展，由式（4-7-2）可以看出：当 $\theta<\alpha$ 时会发生顶底位移现象。

同样，对于背向天线的地面斜坡也存在透视收缩，只不过斜面长度看起来被拉长，如图 4-7-5 所示。当 $\theta+\alpha\leq 90^\circ$ 时会出现背坡的透视收缩，此时有

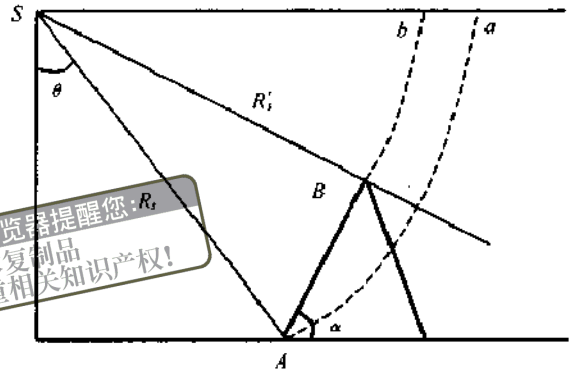
$$\varphi=\theta+\alpha$$

$$\Delta R\approx\Delta X\cdot\frac{\sin\varphi}{\cos\alpha}$$

则收缩比 l 为

$$l=\frac{\Delta}{\Delta X}=\frac{\sin\varphi}{\cos\alpha} \tag{4-7-3}$$

由此可以看出：当 $\theta+\alpha<90^\circ$ 时会出现背坡的透视收缩现象。



超星阅览器提醒您：
使用本复制品
请尊重相关知识产权！

图 4-7-4　顶底位移

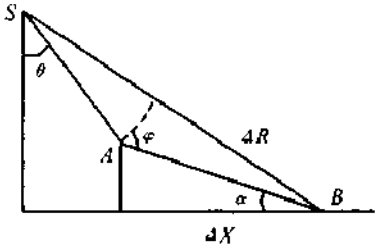


图 4-7-5　背坡的透视收缩

4．雷达阴影

摄影象片上阴影的方向取决太阳的方位，阴影的长度取决于地物自身的高度和太阳高度角。而侧视雷达象片上阴影的方向和长短与太阳方位和太阳高度角无关。如图 4-7-6 所示，当 $\theta+\alpha>90^\circ$ 时，在斜坡的背后有一地段雷达波束不能到达(如图中晕线部分)，

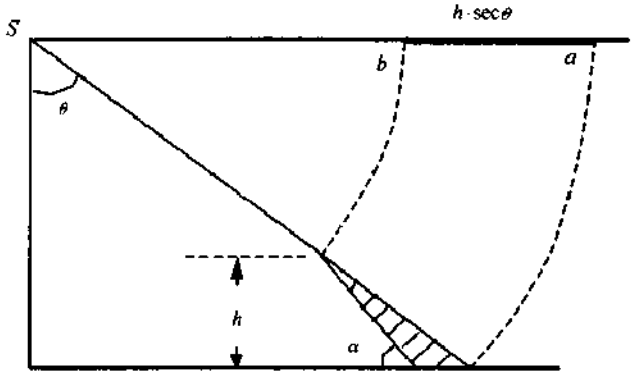
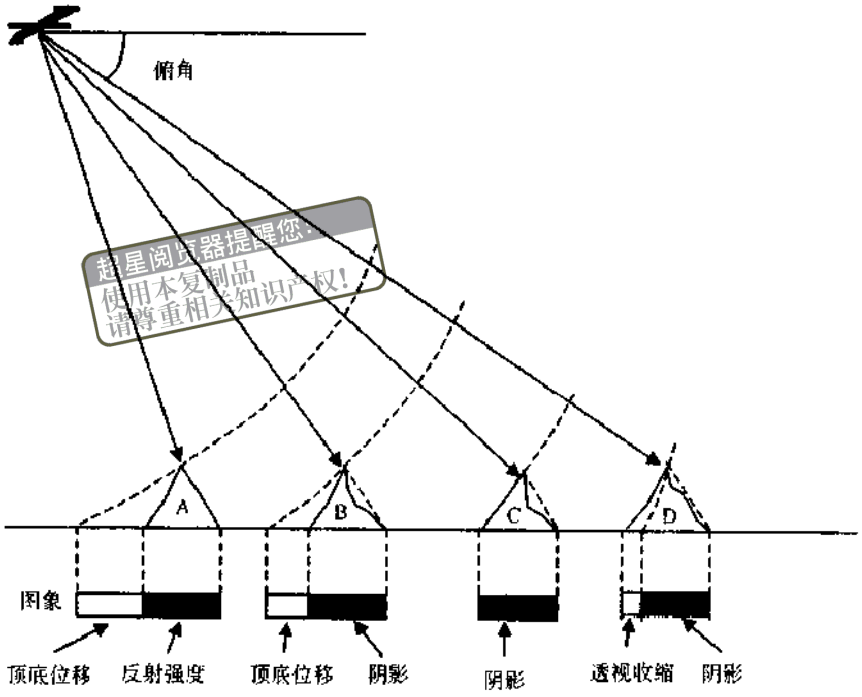


图 4-7-6　雷达阴影

因此地面上该部分没有回波返回到雷达天线，从而在图象上形成阴影。阴影的影象呈黑色。阴影的长度 L 与地物高度 h 和侧视角 θ 有如下关系

$$L = h \cdot \sec\theta \tag{4-7-4}$$

总之，无论顶底位移、透视收缩及阴影都是由于地形起伏所致。图 4-7-7 表示了地形不同起伏状态与其影象之间的关系。A 处前坡出现顶底位移，而后坡拉长且能够成象；B 处前坡出现顶底位移，而后坡为雷达盲区，雷达图象上对应位置出现阴影；C 处前坡完全重合为一点，而后坡被阴影遮盖；D 处前坡出现透视收缩，而后坡被阴影遮盖。



超星阅览器提醒您：
使用本复制品
请尊重相关知识产权！

图 4-7-7　SAR 图象中的地形影响

4.7.2　侧视雷达图象的色调特性

地面目标在雷达图象上的影象色调取决于天线接收到的目标回波的强度，回波功率强，影象色调浅，回波信号弱，则影象色调深。由（4-6-2）式可知：回波信号的强弱主要与雷达发射功率、天线功率增益、雷达波长、目标本身的微波散射特性及极化方式等因素有关。除雷达本身的发射功率及天线特性外，主要有以下因素影响地物在图象上的影象色调：

（1）平台高度

平台高度的大小会影响微波在大气中传播路程的长短，从而会影响微波传输的透过率。微波在大气中传播时，会受到大气分子的吸收和散射。大气对微波吸收的主要因素是氧分子和水蒸气，波长愈短被吸收的愈多；大气中粒子引起的散射主要由雾、雨滴引起，且波长愈短，散射影响愈大。在相同大气条件下，微波的衰减量随距离的增大而增加。所以同一目标，在不同高度上被成象时，其影象色调会发生变化，平台高度越高，其影象色调会相对深一些。

(2) 侧视角

侧视角的变化会引起地物影象色调和形状的变化。由第一章中影响地物波谱反射系数的因素可知，对大部分反射体来说，入射角的变化会引起反射率的变化。雷达的侧视角小，地物的反射率大，因此同一地物在侧视角小的图象上其影象色调浅，在同一幅图象上，相同性质的地物在近底点处可能比远底点处的色调浅。另外，在相同的地形条件下，侧视角的大小与透视收缩、顶底位移和阴影的发生有直接关系，当侧视角大时，发生上述影象变形的可能性增大。但是随着侧视角的增加，方位向上的阴影效果被突出了，它会压盖许多地物而造成判读的困难。

(3) 雷达波长与目标表面粗糙度

在其他条件相同的情况下，雷达波长不同，其影象的色调也不一样。如图 4-7-8 所示的四幅同一地区的雷达图象，左边两幅都是 HH 图象，但上面一幅是 L 波段的图象，下面一幅是 C 波段的图象，它们的色调明显不同；右边两幅都是 HV 图象，但上面一幅是 L 波段的图象，下面一幅是 C 波段的图象，它们的色调也明显不同。

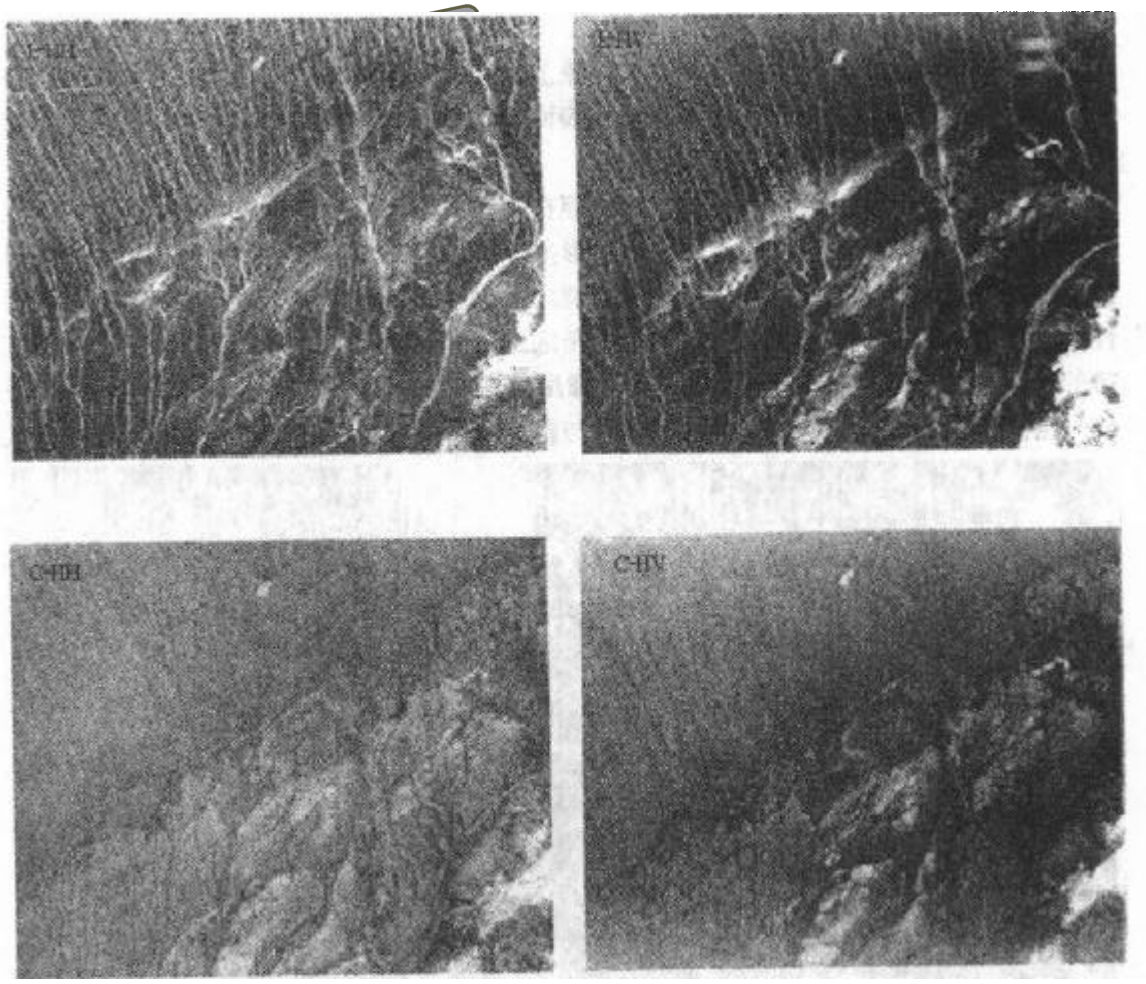


图 4-7-8　不同波长和极化方式的 SAR 图象

雷达波长可从两个方面影响目标的回波功率，第一，按波长去衡量地物表面的有效粗糙度，对同一地物表面粗糙度，波长不同，其有效粗糙度不同，对雷达波束的作用不同。第二，波长不同，复介电常数不同，复介电常数不同会影响到地物目标的反射能力

的大小和电磁波穿透力的大小。

地物表面粗糙度是决定雷达回波功率强弱的基本因素。地表的光滑程度决定了它对电磁波的反射形式。若地面目标是光滑的，对入射到其表面的电磁波产生镜面反射作用，使回波信号很弱，此时地面目标在雷达图象上呈暗色调。若地面目标是粗糙的，对入射到其表面的电磁波产生漫反射或方向反射，回波信号相对较强，此时地面目标在雷达图象上呈浅色调。

(4) 复介电常数

复介电常数是表示物体导电、导磁性能的一个参数。复介电常数越大，反射雷达波束的作用越强，穿透作用越小。复介电常数相对于单位体积内的液态水含量呈线性变化，水分含量底，雷达波束穿透力大，反射小，当地物含水量大时，穿透力就大大减小，反射能量增大。在雷达图象解译中，含水量常常是复介电常数的代名词。一般情况下，金属物体比非金属物体的复介电常数大；潮湿的土壤比干燥的土壤复介电常数大。复介电常数大的物体比复介电常数小的物体在雷达图象上色调浅。

(5) 硬目标

具有较大的散射截面，在侧视雷达图象上呈亮白色影象的物体统称硬目标。与雷达波方向垂直的金属板、略呈圆拱形的金属表面、与入射方向垂直的线导体以及角反射物体等都为硬目标。

金属塔架、铁路、桥梁、飞机、坦克等在侧视雷达图象是亮白色影象。高压输电线路除金属塔架在侧视雷达图象上为亮白色影象外，当线路与雷达波方向垂直，也为亮白色线状影象。建筑物群中墙与地面、墙与墙之间也构成角反射器，使雷达波返回的可能性大大增加，因此，在侧视雷达图象上的街区式居民地、与侧视雷达波垂直的街道和成排的房屋色调很亮，如图 4-7-9 所示。单幢房屋在侧视雷达图象上也是较浅的色调。另外，当高于地面的堤、行树和沟堑等目标与雷达波垂直时，在侧视雷达图象上也呈线状

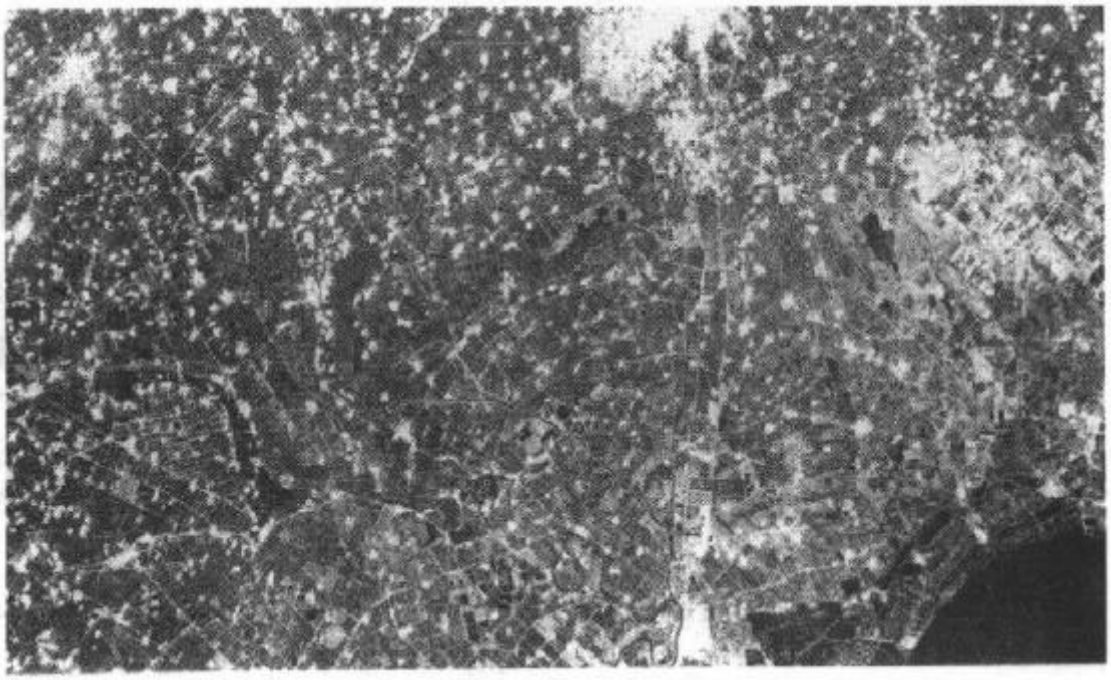


图 4-7-9 SAR 图象（角反射器的存在使建筑物群呈白色）

的白色影象。

值得注意的是，硬目标都有很强的雷达回波，由于光晕的影响，在侧视雷达图象上的影象尺寸一般比按比例尺缩小的尺寸要大。

(6) 极化方式

极化是指电磁波的偏振方式。水平极化是指电磁波的电场矢量与入射面（入射波与目标表面入射波处的法线所组成的平面）垂直，垂直极化是指电磁波的电场矢量与入射面平行。改变雷达发射天线的方向，就可以改变发射电磁波的极化方式，如图 4-7-10 所示。

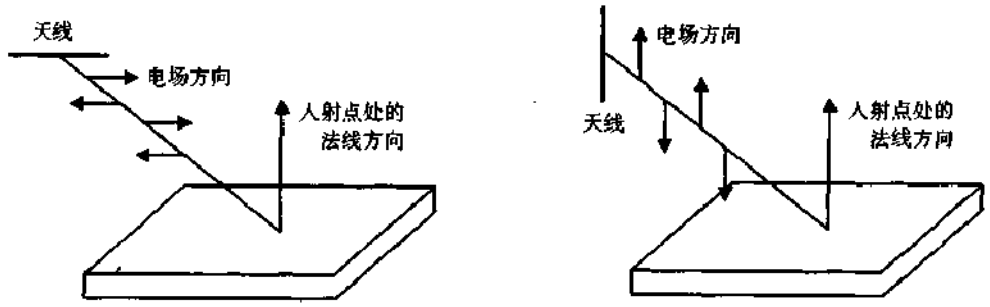


图 4-7-10 水平极化和垂直极化

若雷达发射的是水平极化方式的电磁波，当这种电磁波与地物表面发生作用时，会使电磁波的极化方向产生不同程度的旋转，形成水平和垂直两个分量，可用不同极化方式的天线去接收，从而形成 HH 和 HV 两种极化方式的图象。若雷达发射的是垂直极化方式的电磁波，同样可以接收到水平和垂直两个分量的信号，产生 VV 和 VH 两极化方式的图象。雷达成象系统一般发射水平极化方式的电磁波。

地物在不同极化方式的雷达图象上所表现出的影象色调是不一样的。如图 4-7-8 所示的 4 幅同一地区的雷达图象，上面两幅都是 L 波段的图象，但左边一幅是 HH 图象，右边一幅是 HV 图象，它们的色调明显不同；下面两幅都是 C 波段的图象，但左边一幅是 HH 图象，右边一幅是 HV 图象，它们的色调也明显不同。一般地物在 HH 极化方式下回波信号最强。由于极化方式对目标回波强度影响较大，有时为了识别某些特定目标（如海浪、道路性质等），也采用正交极化方式（指发射和接收的电磁波具有不同的极化方式）获取图象。

超星阅览器提醒您：
使用本复制品
请尊重相关知识产权！

第五章　遥感图象目视判读

遥感图象目视判读是指根据作业人员的经验和知识，按照应用的目的识别图象上的目标，并定性、定量地提取目标的形态、构造、功能、性质等信息的技术过程。由于目视判读可以充分利用判读人员的经验和知识，对于提取目标的空间信息、语义信息特别有效，因此目视判读仍是遥感图象应用过程中的主要作业方法之一。由于遥感图象的计算机识别技术还没有发展到可以完全替代人工判读作业的程度，尤其是计算机逻辑推理和空间分析的能力还十分脆弱，只能依据一定的数学模型完成大量、重复性的数值计算工作，得到目标的位置、形状、大小等定位和定量的信息，而目标的性质主要还是通过目视判读的方法来确定。实际上人和计算机的优缺点是相辅相成的，只有把两者结合起来，充分发挥各自的长处，才能获得最佳的效果。在许多实际应用中，通常是利用计算机数字图象处理技术对遥感图象进行增强，突出对判读有用的信息，然后由作业人员进行目视判读，确定目标的性质，再由计算机进行一系列复杂的定位、定量计算处理，最后得到目标的定性和定量描述。另一方面，目视判读的思想和方法在计算机图象识别中具有重要的意义，特别是在基于知识的遥感图象识别系统中，如何将判读人员的知识和经验用计算机语言表达出来（即知识的总结、描述和推理机制的建立）是建立遥感图象解译专家系统的核心。本章主要从目视判读的角度阐述遥感图象判读特征、判读方法和判读过程。

超星版权提醒你：
使用本复制品
请尊重相关知识产权！

5.1　遥感图象的判读特征

由于象片记录了地面物体的电磁波辐射特性，所以地面目标的各种特征必然在象片上有所反映，人们正是利用这些特征从影象上来识别目标的。广义地说，地面物体在象片上反映出的所有影象特征或影象标志，都能够作为从象片上解释目标性质的依据，这些影象特征或影象标志称为判读特征。不同类型的传感器所获得的图象的判读特征是不一样的，它是由传感器的成象方式、特点和地面目标本身的特性决定的。判读特征主要有七个：形状（Shape）特征、大小（Size）特征、色调（Tone）特征、阴影（Shadow）特征、纹理（Texture）特征、位置布局特征和活动特征等，其中形状、大小、色调、阴影是地物属性在影象上的直接反映，称为直接特征，而纹理特征、位置布局特征、活动特征是被分析对象与其周围环境在影象上的综合表现，称为间接特征。直接特征和间接特征是相对的，不同的判读特征是从不同的角度反映目标的性质，它们之间既有区别又有联系，只有综合运用各种判读特征才能得到正确的判读结果。

1．形状特征

形状特征是指地物外部轮廓的形状在影象上的反映，不同类型的地面目标有其特定的形状，因此地物影象的形状是目标识别的重要依据。影象上的地物形状除了与地物本

身的形状和所处的位置有关外，还与传感器的成象机理、成象方式有关。在近似垂直摄影的中心投影象片上，目标影象形状和地物本身的形状保持着一定的相似关系，如图5-1-3中的机场跑道的形状与地面上的形状基本一致。但高出地面的目标的形状由于投影误差的存在会产生变形，如图5-1-1中油罐的形状变形较大。

2. 大小特征

大小特征是指地物的影象尺寸，如长、宽、面积、体积等。地物的大小特征主要取决于影象比例尺，有了影象的比例尺，就能够建立物体和影象的大小联系。在中心投影的象片上，地形起伏会使影象比例尺处处不一致，对影象的大小有较大的影响，处于高处的地物，相对航高低，影象比例尺大，处于低处的物体，相对航高大，影象比例尺小。所以同样大小的地物当分别位于山顶和山脚时，其影象大小是不同的。地物和背景的反差有时也影响影象尺寸，当景物和背景的反差较大时，由于光晕现象，影象尺寸往往大于实际应有的尺寸。如在航空象片上成象的林间小路，由于和其背景的亮度差较大，其影象尺寸将被扩大。由于地物是三维空间中的物体，而影象是二维的，所以在观察象片时，影象的大小和地物的大小有时是不对应的。例如在中心投影的象片上，一个高大的水塔，当位于象片中心时，影象很小，这个影象只反映了水塔顶部的大小，并没有表现水塔的真实尺寸。在进行判读时，为了全面了解地物的空间尺寸，必须进行立体观察，这样不但能确定物体的顶部尺寸，还能用视差确定其高度。

3. 色调特征

色调特征是指地物的色调在影象上的表现形式，包括黑白影象上目标的亮度（即灰度）和彩色影象上目标的颜色。地物的形状、大小在影象上都要通过色调显示出来，所以色调特征是最基本的判读特征。地物影象的色调不仅和地物本身的色调有关，而且还与成象机理有关。同一地面目标在全色图象、多光谱图象、假彩色图象和真彩色图象上的色调特征是不一样的，例如绿色植被在假彩色红外图象上表现为红色，而在真彩色图象上却表现为绿色。

超星阅览器提醒您：使用本复制品请尊重相关知识产权！

人眼对黑白色调的区分能力是很有限的，一般在目视判读中把象片上的色调概略分为亮白、白色、浅灰、灰色、深灰、浅黑和黑色七级。在全色摄影象片上，影象色调主要取决于地物的表面亮度，而地物的表面亮度与地物的表面照度、地物的亮度系数及地物表面粗糙度有关。人眼对彩色的区分能力比黑白色调的区分能力要强得多。有人做过这样的统计，利用彩色图象进行地形要素判读，要比利用黑白象片多判出15%的地物。

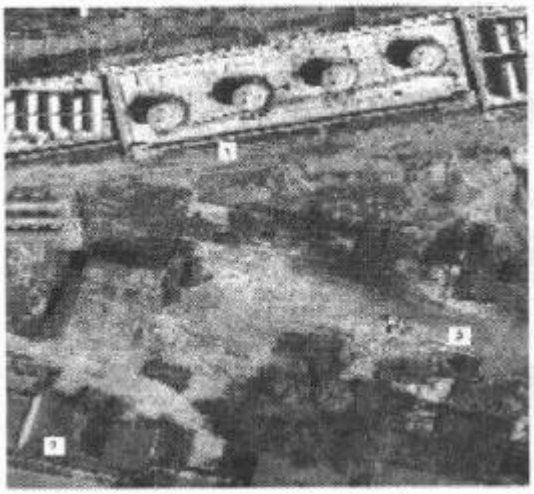
在对多光谱图象进行判读时，最重要的是掌握地物目标在各个光谱段的波谱特性，这样才能建立地物在地面上的颜色和在影象上的色调之间的关系。为了利用人眼对彩色分辨的优势，通常将多光谱图象中的若干个波段影象进行彩色合成，此时不仅要了解地物的波谱特性，而且要知道彩色合成时波段影象与红、绿、蓝三色的对应关系。

4. 阴影特征

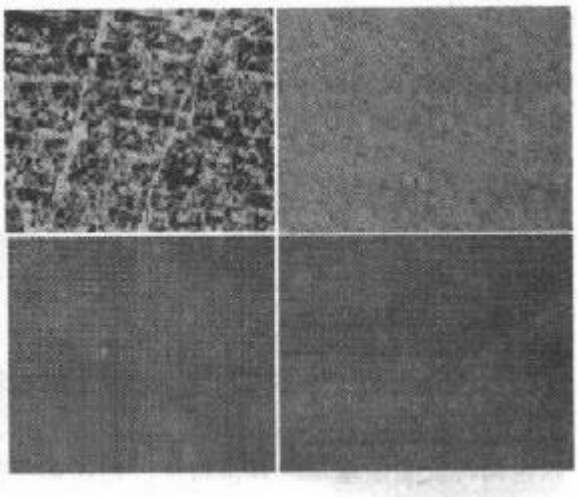
阴影的存在对目标判读具有两方面的效果，一是阴影的存在对于判读目标的形状等几何特性非常有利，二是对于落在阴影中的地物进行判读增加了困难。

阴影又可以分为本影和落影，本影是指物体未被阳光直接照射到的阴暗部分，本影有助于获得立体感。落影是指地物投射到地面的影子，在下面的讨论中阴影指的是落影。

如图 5-1-1 所示，当太阳光照射在物体的侧面时，所产生的阴影形状反映了地物的侧面形状，甚至可以根据地物的侧面形状确定地物的性质，特别是高出地面的细长目标，如烟囱、水塔、电线杆架等，顶部影象很小，区分很困难，但根据阴影的形状就较容易识别这类地物。阴影的长度可以用于确定地物的高度。阴影方向和太阳光照射方向是一致的，对于同一张象片，其上地物的阴影方向相同。我国大部分地区在北回归线以北，中午前后太阳总是在南边，各地物阴影的方向都是指向北、西北或东北，因此在不知道象片的方位时，可以根据摄影时间和阴影的方向大致确定象片的方位。一般情况下，高于地面的目标的阴影和它的影象是不会重合的，此时阴影和影象的交点即是该地物在象片上的准确位置。



（根据位置 2 处的阴影形状
可以推断房屋侧面的形状）
图 5-1-1　地物的影阴



左上为农村居民地纹理，右上为植被纹理
左下为垂直田块纹理，右下为水平田块纹理
图 5-1-2　纹理影象

5．纹理特征

细小物体在象片上大量地重复出现所形成的特征，它是大量个体的形状、大小、阴影、色调的综合反映。在地物的光谱特性比较接近的情况下，纹理特征对区分目标可能起到重要的作用，例如针叶林和阔叶林的在影象上的色调基本一致，但阔叶林的影象颗粒粗，而针叶林的影象颗粒细。纹理特征受象片比例尺的影响较大，地面上一定范围内的目标，在大比例尺象片上，区域内的每个个体都能在象片上清晰地表现出来，纹理特征不明显，而在小比例尺象片上，纹理特征要明显得多，因此纹理特征在小比例尺象片的判读中更有意义。

纹理的表现形式有两种，一种是结构纹理，结构纹理可以由纹理单元按一定的规律生成，一种是随机纹理，随机纹理中个体在空间上重复出现的规律性不强，自然纹理基本上表现为随机纹理。衡量纹理特征的参数主要有纹理的粗糙度和方向性。如图 5-1-2 中的植被纹理要比居民地纹理细，两个田块纹理虽然粗糙度基本相同，但条纹的方向明

显不同、即纹理的方向性存在差异。在数字图象处理中，纹理图案的粗糙度和方向性特征可以用统计的方法定量的表达出来，具体方法将在第八章加以介绍。

6. 位置布局特征

位置布局特征是指地物的环境位置以及地物间的空间位置配置关系在象片的反映，也称为相关特征，它是重要的间接判读特征。

地面上的各种地物都有它存在的环境位置，并且与其周围的其他地物有着某种联系，如图 5-1-3 中停放飞机的“机窝”可以根据周围机场等信息判断出来，如果仅靠单个目标的信息则很难确定其性质。再如，造船厂一般设置在江、河、湖、海边，不会在没有水域的地方出现；公路与河流相交处一般都有桥梁等设施。特别是组合目标，它们的每一个组成单元都是按一定的关系进行位置配置的。如火力发电厂由燃料场、主厂房、变电所和供水设备等组成；水厂则由按一定顺序建造的水池组成。因此，了解地物间的位置布局特征有利于识别集团目标的性质和作用。在军事目标判读中，用位置布局特征可以判断军事基地的类型、部队的兵种、建制等。

相关判读特征有利于对一些没有影象的目标进行判读。如草原上的水井，有的影象很小或根本没有影象，不能直接判读出来，但可以根据多条小路相交于一处来识别；又如当田间的机井房没有影象时，可以根据机井房和水渠的相关位置来判读。

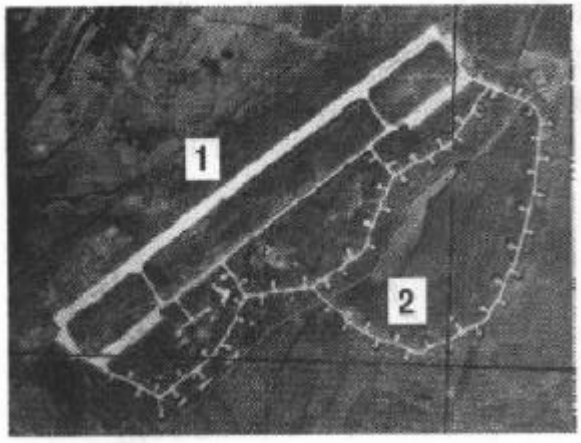


图 5-1-3　机场影象

(1) 跑道的形状与地面基本一致（形状特征），(2) 根据机场跑道等相关信息判断停放飞机的“机窝”（相关特征）



图 5-1-4　根据河流中沙洲滴水状尖端方向判断河流中水的流向

7. 活动特征

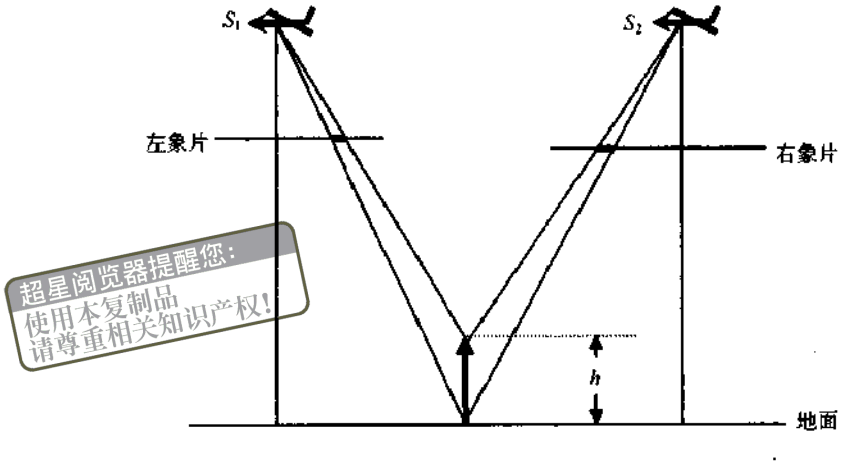
目标活动所形成的征候在象片上的反映称为活动特征。飞机起飞后，由于飞机的余热，在热红外象片上会留下飞机的影象；坦克在地面运动后的履带痕迹也会在象片上有所反映，这些活动特征对认识目标的状态和发展趋势有很重要的意义。在图 5-1-4 中，由于河流中流水的作用，使得河流中沙洲沿流水方向形成滴水状尖端，因此可以根据河流中沙洲滴水状尖端方向判断出河流中水的流向，这样一些在影象上不能明显和直接反映出来的目标性质经过上述综合推理后就可以获得。

5.2 遥感图象的目视判读方法

遥感图象目视判读包括图象识别和图象量测两部分工作，图象识别通过观察图象，综合运用判读特征，确定判读对象的性质，图象量测是以遥感图象为基础测量、计算目标的大小、形状等数量特征。遥感图象目视判读是以图象识别、图象量测为基础，通过演绎和归纳，从影象中提取目标的信息的过程。

利用单张象片（或单景图象）进行判读时，主要是综合利用判读特征确定图象上目标的性质和大小、形状等数量特征，然后按照技术要求将其用专门的符号在象片或图纸上表示出来。如果目视判读是在计算机屏幕上进行的，则可以在遥感图象处理软件的支持下，利用鼠标将判读结果采集下来。如果在判读以前已经将图象规划到了某个地理坐标系中（这个过程称之为图象的地理编码），则采集到的数据可以直接进入 GIS 等信息系统。为了提高目视判读的效果，在判读以前还可以对图象进行增强处理，突出对判读有用的信息。如果是多光谱图象，可以利用彩色合成等方法（参考第七章的内容）对其进行增强处理，这样在增强以后的图象上进行判读比在单波段图象上进行判读要容易得多。

从单幅（景）遥感图象上只能获得目标在二维平面中尺寸、数量多少等信息，通过立体观察才能获得目标的三维信息。立体观察需要借助一些专门的设备才能进行。立体观察是根据生理视差可以产生立体视觉的原理，利用在空间两个摄站对同一地区进行摄影而得到的具有一定重叠度的两张象片（称之为立体象对，如图 5-2-1 中的左象片、右象片），采用立体观察设备，实现左眼看左影象、右眼看右影象，从而获得目标的立体信息，如图 5-2-2 所示。



超星阅览器提醒您：
使用本复制品
请尊重相关知识产权！

图 5-2-1 立体象对的获取

为了获得较好的立体效果，立体观察必须满足以下几个条件：

①两张象片必须是在不同摄站对同一地面区域进行摄影得到的；

②两眼必须分别观看左右片上的相应地物影象（即分象）；

③象片安置时，相应象点的连线必须和眼基线平行；两张象片的距离必须和眼睛的交会角（目标影象与两只眼睛连线的夹角）相适应，交会角最好为 15°，不能大于 32°；

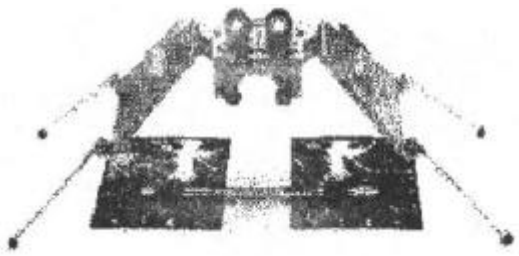


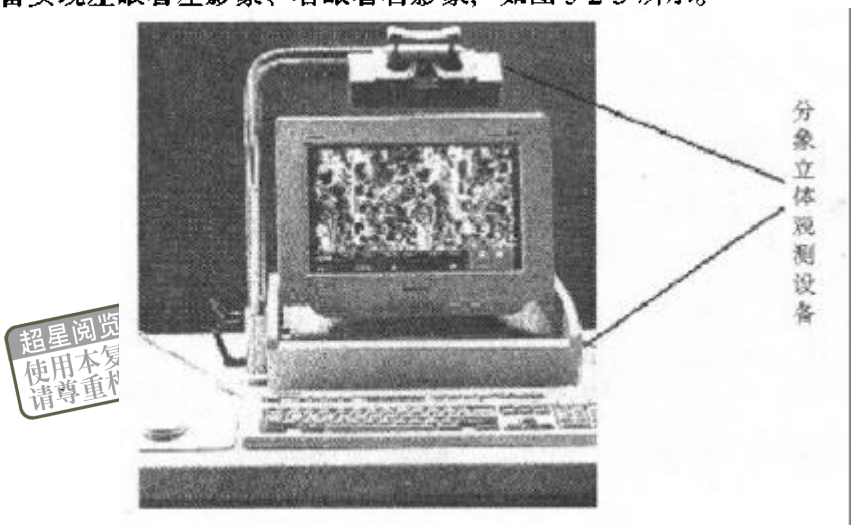
图 5-2-2　利用反光立体镜对立体象对进行观察

④两张象片的比例尺相对误差不超过 16%，如果超过这个数值，则只能用变焦判读仪进行观察方能看到立体。

对模拟象片进行立体观察的设备很多，如图 5-2-2 中的反光立体镜就是比较简单的一种。立体观察设备的功能主要有两点，一是观察目镜具有影象放大功能，二是实现分象，即实现左眼看左影象、右眼看右影象的功能。对模拟象片上的目标进行量测一般需要专门的测量设备，如摄影测量专业中的模拟测图仪器和解析测图仪器等，此处不再详述。

随着计算机技术的发展，在计算机上进行立体观察的条件日益成熟，出现了多种用于计算机屏幕立体观察的设备和方法，其中主要有：

①分光法：分光法与模拟象片立体观察的方法相似，它是在计算机屏幕上创建两个视窗，将立体象对中的左、右影象同时显示在左、右两个视窗中，然后借助光学分象观察设备实现左眼看左影象、右眼看右影象，如图 5-2-3 所示。



超星阅览
使用本复
请尊重

图 5-2-3　分光法屏幕立体观察

②场（幅）分割视频立体观察：这种方法的原理是左、右视图按场（幅）序交替显示在计算机屏幕的同一位置上，然后采用同步控制信号使左、右视图的交替显示操作与液晶眼镜的光阀开启和关闭操作同步，当作业人员戴上液晶眼镜后，左眼只能看到左影象、右眼只能看到右影象，如图 5-2-4 所示。场（幅）分割视频立体观察是目前国际上最流行的一种方法，在数字摄影测量系统和地形仿真系统中已经被广泛采用。

对于隔行扫描的显示器，左、右视图按场序交替显示在计算机屏幕的同一位置上。

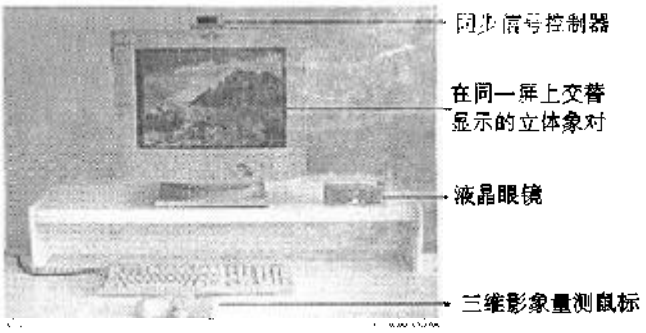


图 5-2-4　场（幅）分割视频立体观察

对于逐行扫描的显示器，左、右视图按幅交替显示在计算机屏幕的同一位置上。为了克服这种立体显示方式特有的闪烁感，帧频应尽可能提高到 100Hz 以上（此时基本上与人眼的刷新频率一致）。

③补色法：这种方法的原理是左、右视图用红、绿两种互补色同时显示在计算机屏幕的同一位置上，然后用互补色眼镜进行分光，使左眼只能看到左影象、右眼只能看到右影象。

④偏振光法：这种立体观察方法与场（幅）分割视频立体观察的原理相似，场（幅）分割视频立体观察是采用同步眼镜进行分光观察的，而偏振光法是通过液晶偏振快门和偏振眼镜来实现的。液晶调制器分别为左眼影象和右眼影象提供不同的极化方式，判读人员使用特制的偏振眼镜将不同极化方式的影象分别提供给左眼和右眼进行观察，如图 5-2-5 所示。

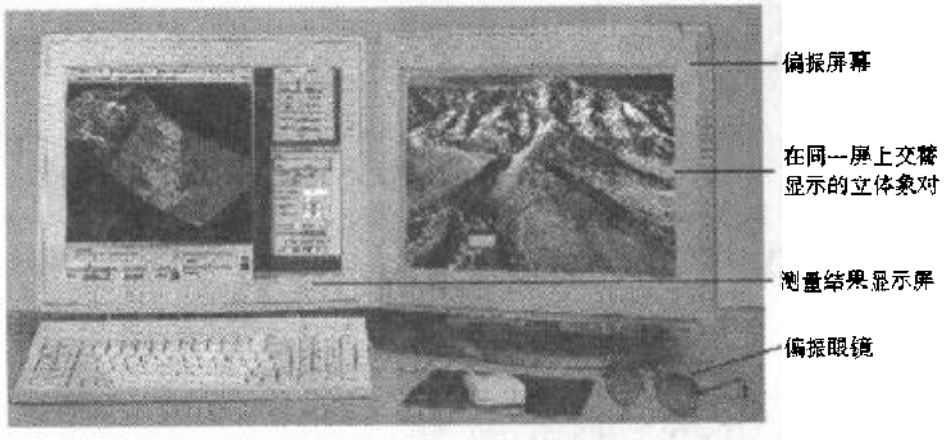


图 5-2-5　偏振光方式立体观察

由于后三种立体观察方式都是将立体象对中的左、右影象显示在计算机屏幕的同一位置上，为了获得较大视场范围内的立体视觉效果，一般需要利用立体象对中左、右影象之间的相对方位元素对左、右影象进行重采样处理，得到核线影象对（核线影象对是指左、右影象上所有同名点之间只存在左、右平移关系，而没有上、下错位的立体象对），使整个视场范围内的影象只存在左右视差，而没有上下视差。在计算机立体观察条件下，可以利用摄影测量软件包提供的工具将目视判读的结果（包括三维几何数据和

属性信息）采集下来，供GIS等地理信息系统使用。目前立体观察主要用于从航摄影象和具有立体观测方式的卫星影象上测量地面目标的三维几何信息。由于卫星遥感主要是从宏观上研究区域性或全球性的问题，其影象分辨率较低和比例尺较小，从卫星影象上主要是获取被调查对象的性质以及位置、面积等数量特性，因此卫星图象的判读一般是单景进行的。

在计算机上进行遥感图象判读的优势是可以方便地进行多源遥感数据的融合处理，由于融合数据的信息量比单一类型图象的信息量更加丰富，因此可以有效地提高遥感影象解译的质量。

在影象判读过程中，判读标志的充分利用是十分重要的。所谓判读标志（Interpretation Key）是指识别目标所依据的影象特征。由于判读结果主要依靠判读人员的经验和知识，不同熟练程度的判读人员的判读结果存在差异。为了减少由于判读经验和知识的差异而产生的误差，通常在判读前准备好判读标志。判读标志是依据判读特征以及成象时间、季节、图象种类、比例尺等因素制作而成的。判读标志的使用就是充分利用了判读专家的知识和经验。在基于知识的遥感影象判读系统中，可以将各种判读标志用计算机语言描述出来，作为知识库中的知识，供计算机自动解译图象时使用。对于大规模作业，为了统一标准，判读标志的制作和使用尤为重要。表5-2-1是利用航空象片进行判读时部分树种的判读标志，表5-2-2是利用Landsat MSS图象进行判读时部分目标的判读标志。

表5-2-1　航空象片上部分树种的判读标志

种　类	形　状	色　调	阴　影	图　案	纹　理	备　注
杉树	圆形，顶部尖，也呈圆锥形	黑灰色	深，向阳部分和背阳部分反差大	斑粒状，人工林图案规则	硬、粗	人工林多沿湿洼地分布
柏树	钝顶圆形，顶部呈鸡蛋形	浅黑灰色	比杉树略浅，北面背光部分深	斑状	硬、细密、光滑，	疏林，北面与杉树相似
红松	伞形圆顶，圆形，疏林则形状不整齐	灰色	浅，不明显	略微不整齐的斑状	柔和、粗	通过树冠层可以看出地表
落叶松	圆锥形，顶部易消失，不清晰	春秋：黑白色 夏季：暗灰色	浅，但比红松明显	斑状，人工林多，树冠排列明显	柔和、细粒状	季节变化大、在红叶期类似红松
枫树 铁杉	圆形，但往往不整齐	枫树：浅黑灰色 铁杉：黑灰色	深，可以较好地显示树形	不整齐	粗	多与阔叶树混交
山毛榉	不整齐	灰白色	浅，但比较明显	不整齐	柔和	次生林、密生林较难区分
桦树 杨树	不整齐的块状	灰色或灰白色	浅，但比较明显	不整齐	柔和、略粗	多为低地林

超星阅览器提醒您：
此为未复制品
请尊重相关知识产权

表 5-2-2　Landsat MSS 图象上部分目标的判读标志

图象 / 目标物	4 波段	5 波段	6 波段	7 波段	(BGR) 457	(RBG) 457
雪	洁白	洁白	洁白	洁白	洁白	洁白
厚云	洁白	洁白	洁白	洁白	洁白	洁白
薄云	白	白	略白	—	白	白
雪	白	洁白	—	—	略白	略白
森林	暗灰	黑	白	白	红	绿
耕地、草地	灰	暗灰	白	白	粉	黄褐
裸地	灰	白	白	白	白	白
市街地	灰	白	灰	暗灰	淡蓝色	红紫
湿地	灰	白	灰	暗灰	淡蓝色	红紫
浑浊水域	灰	灰	黑	黑	淡蓝色	红紫
普通水域	暗灰	黑	黑	黑	深蓝	蓝紫
阴影	黑	黑	黑	黑	黑	黑

注：BGR 457 是指分别用蓝、绿、红对 4，5，7 波段进行彩色合成的图象

RBG 457 是指分别用红、蓝、绿对 4，5，7 波段进行彩色合成的图象

超星阅览器提醒您：
使用本复制品
请尊重相关知识产权！

第六章　遥感图象校正

在遥感成象时，由于各种因素的影响，使得遥感图象存在一定的几何畸变和辐射量的失真现象。这些畸变和失真影响了图象的质量和应用，必须进行消除。几何变形是指图象上的象元在图象坐标系中的坐标与其在地图坐标系等参考系统中的坐标之间的差异，消除这种差异的过程称为几何校正（Geometric Correction）。利用传感器观测目标的反射或辐射能量时，传感器得到的测量值与目标的光谱反射率或光谱辐射亮度等物理量是不一致的，这是因为测量值中包含了太阳位置和角度条件、薄雾等大气条件所引起的失真。为了正确评价目标的反射或辐射特性，也必须清除这些失真。消除图象数据中依附在辐射亮度中的各种失真的过程称为辐射量校正（Radiometric Correction）。在卫星影象数据提供给用户使用前，有些已经经过辐射量校正和必要的几何校正，在实际问题中，应视具体情况加以处理。

6.1　遥感图象的辐射量校正

由辐射传输方程可知，遥感器的输出 E_λ 为

$$E_\lambda = K_\lambda \cdot \{[\rho_\lambda \cdot E_0(\lambda) e^{-T(Z_1, Z_2)\sec\theta} + \varepsilon_\lambda \cdot W_e(\lambda)] e^{-T(0,H)} + b_\lambda\} \qquad (6\text{-}1\text{-}1)$$

式中：T（Z_1，Z_2）为 Z_1 到 Z_2 区段大气层的光学厚度；

θ 为太阳天顶角；

E_0 为太阳辐射照度；

ρ_λ 为地物的波谱反射系数；

ε_λ 为地物的波谱发射率系数；

H 为平台高度；

W_e（λ）为与地物同温度黑体的发射通量密度。

K_λ 为遥感器的光谱响应系数；

b_λ 为大气辐射所形成的天空辐射照度。

超星阅览器提醒您：
使用本复制品
请尊重相关知识产权！

从（6-1-1）式可以看出：遥感器的输出 E_λ 除了与地物本身的反射和发射波谱特性有关外，还与传感器的光谱响应特性、大气条件、光照情况等因素有关。因此遥感影象辐射误差的改正主要包括三个方面：

①传感器的灵敏度特性引起的辐射误差改正，如光学镜头的非均匀性引起的边缘减光现象的改正、光电变换系统的灵敏度特性引起的辐射畸变校正等。

②光照条件的差异引起的辐射误差改正，如太阳高度角的不同引起的辐射畸变校正、地面的倾斜引起的辐射畸变校正等。

③大气的散射和吸收引起的辐射误差改正。

6.1.1 光学镜头的非均匀性引起的边缘减光现象的改正

在使用透镜的光学系统中，由于镜头光学特性的非均匀性，在其成象平面上存在着边缘部分比中间部分暗的现象，称为边缘减光。如图 6-1-1 所示，如果光线以平行于主光轴的方向通过镜头到达象平面 o 点的光强度为 E_0，以与主光轴成 θ 角度的方向通过镜头到达象平面 p 点的光强度为 E_p，则 $E_p = E_o\cos^4\theta$。按照这一性质可以进行边缘减光现象造成的辐射畸变校正。

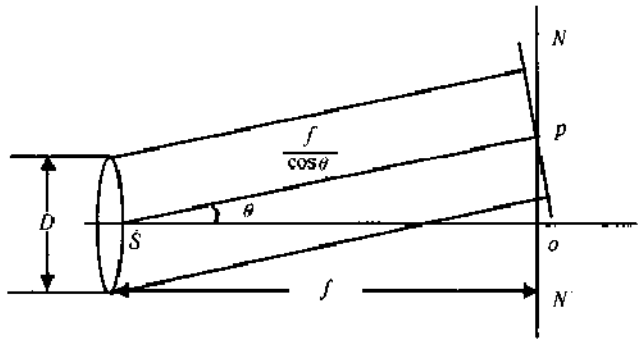


图 6-1-1 镜头的辐射畸变

另外，视场较大的成象光谱仪图象在扫描方向上也存在明显的辐射亮度不均匀的现象。这种辐射误差主要是光线路径长短不同造成的，扫描角较大时，光线路径长，大气衰减越严重；星（机）下点位置的地物辐射信息的光线路径最短，大气衰减所产生的影响也最小。

6.1.2 光电变换系统的特性引起的辐射误差校正

传感器的光谱响应特性和传感器的输出有直接的关系。在扫描方式的传感器中，传感器接收系统收集到的电磁波信号需经光电转换系统变成电信号记录下来，这个过程也会引起辐射量的误差。由于这种光电变换系统的灵敏度特性通常有很高的重复性，所以可以定期地在地面测量其特性，根据测量值可以对其进行辐射畸变校正。例如对于 Landsat 卫星的 MSS 图象和 TM 图象可以按（6-1-2）式对传感器的输出（R）进行校正

$$V = \frac{D_{max}}{(R_{max} - R_{min})} \cdot R - R_{min} \qquad (6\text{-}1\text{-}2)$$

式中 R 是传感器输出的辐射亮度，V 是已校正过的数据，R_{max}和 R_{min}分别为探测器能够输出的最大和最小辐射亮度，表 6-1-1 和表 6-1-2 列出了 MSS 和 TM 的 R_{max}，R_{min} 值，D_{max}对于 MSS 和 TM 分别为 127 和 255。

表 6-1-1 TM 的 R_{min}和 R_{max}

波　　段	R_{min} / R_{max}
1	-0.0099 / 1.004
2	-0.0227 / 2.404
3	-0.0083 / 1.410
4	-0.0194 / 2.660
5	-0.00799 / 0.5873
6	-0.00375 / 0.3595
7	0.1534 / 1.896

超星阅览器提醒您
使用本复制品
请尊重相关知识产权!

表 6-1-2 MSS 的最小、最大辐射亮度（R_{min}/R_{max}）

波　段	Landsat-2	Landsat-3	Landsat-4	Landsat-5
4	0.08/2.63	0.04/2.50	0.04/2.38	0.04/2.38
5	0.06/1.76	0.03/2.00	0.04/1.64	0.04/1.64
6	0.06/1.52	0.03/1.65	0.05/1.42	0.05/1.42
7	0.11/3.91	0.03/4.50	0.12/3.49	0.12/3.49

6.1.3 太阳高度引起的辐射误差校正

太阳高度角引起的畸变校正是将太阳光线倾斜照射时获取的图象校正为太阳光线垂直照射时获取的图象。太阳的高度角 θ 可根据成象时刻的时间、季节和地理位置来确定

$$\sin\theta = \sin\varphi \cdot \sin\delta \pm \cos\varphi \cdot \cos\delta \cdot \cos t \tag{6-1-3}$$

式中，φ 为图象对应地区的地理纬度，δ 为太阳赤纬（成象时太阳直射点的地理纬度），t 为时角（地区经度与成象时太阳直射点地区经度的经差）。

太阳高度角的校正是通过调整一幅图象内的平均灰度来实现的，在太阳高度求出后，太阳以高度角 θ 斜射时得到的图象 $g(x, y)$ 与直射时得到的图象 $f(x, y)$ 有如下关系

$$f(x,y) = \frac{g(x,y)}{\sin\theta} \tag{6-1-4}$$

如果不考虑天空光的影响，各波段图象可采用相同的 θ 角进行校正。

太阳方位角的变化也会改变光照条件，它也随成象季节、地理纬度的变化而变化。太阳方位角引起的图象辐射值误差通常只对图象细部特征产生影响，它可以采用与太阳高度角校正相类似的方法进行处理。

由于太阳高度角的影响，在图象上会产生阴影而压盖地物。一般情况下，图象上地形和地物的阴影是难以消除的，但是多光谱图象上的阴影可以通过图象之间的比值予以消除。比值图象是用同步获取的相同地区的任意两个波段图象相除而得到的新图象。在多光谱图象上，地物阴影区的灰度值可以认为是无阴影时的影象灰度值再加上对各波段影响相同的阴影亮度值，所以，当两个波段相除时，阴影的影响在比值图象上基本被消除。阴影的消除对图象的定量分析和自动识别是非常重要的，因为它消除了非地物辐射而引起的图象灰度值的误差，有利于提高定量分析和自动识别的精度。

6.1.4 地形坡度引起的辐射误差校正

太阳光线和地表作用以后再反射到传感器的太阳光的辐射亮度和地面倾斜度有关。如果光线垂直入射时水平地表受到的光照强度为 I_0，则光线垂直入射时倾斜角为 α 的坡面上入射点处的光强度 I 为

此为试读，需要完整PDF请访问：www.ertongbook.com

$$I = I_0 \cdot \cos\alpha \tag{6-1-5}$$

因此若处在坡度为 α 的倾斜面上的地物影象为 $g(x, y)$，则校正后的图象 $f(x, y)$ 为

$$f(x,y) = \frac{g(x,y)}{\cos\alpha} \tag{6-1-6}$$

由上式看出，地形坡度引起的辐射校正方法需要有图象对应地区的 DEM 数据，校正较为麻烦，一般情况下对地形坡度引起的误差不做校正。另外，此项校正也可采用比值图象来消除地形坡度所产生的辐射量误差。

6.1.5 大气校正

太阳光在到达地面目标之前，大气会对其产生吸收和散射作用。同样，来自目标物的反射光和散射光在到达传感器之前也会被吸收和散射。入射到传感器的电磁波能量除了地物本身的辐射以外还有大气引起的散射光，消除这些影响的处理过程称为大气校正。大气校正的方法主要有：

(1) 利用辐射传递方程进行大气校正

若地面目标的辐射能量为 E_0，它通过高度为 H 的大气层后，传感器接收系统所能收集到的电磁波能量为 E，则由辐射传递方程可得

$$E = E_0 \cdot e^{-T(0,H)} \tag{6-1-7}$$

式中 $e^{-T(0,H)}$ 称为大气的衰减系数。如果对 (6-1-7) 式能够给出适当的近似解，可以求出地面目标的真实辐射能量 E_0。在可见光和近红外区，大气的影响主要是由气溶胶引起的散射造成的。在热红外区，大气的影响主要是由水蒸气的吸收造成的。为了消除大气的影响，需要测定可见光和近红外区的气溶胶的密度以及热红外区的水蒸气浓度。但是仅从图象数据中很难正确测定这些数据，因此在利用辐射传递方程时，通常只能得到近似解。

(2) 利用地面实况数据进行大气校正

在获取地面目标图象的同时，预先在地面设置反射率已知的标志，或事先测出若干地面目标的反射率，把由此得到的地面实况数据和传感器的输出值进行比较，以消除大气的影响。由于遥感过程是动态的，在地面特定地区、特定条件和一定时间段内测定的地面目标反射率不具有普遍性，因此该方法仅适用于包含地面实况数据的图象。

(3) 利用辅助数据进行大气校正

在获取地面目标图象的同时，利用达载在同一平台上测量气溶胶和水蒸气浓度的传感器获取气溶胶和水蒸气的浓度数据，利用这些数据可以进行大气校正。

在 Landsat 4/5 的 MSS 数据处理中，采用了一种简单的大气散射补偿方法：从全部图象象元亮度值中减去一个辐射偏置量，辐射偏置量等于图象直方图中最小的亮度值。这种偏置量随不同的景象而有所差异，同一景象的不同波段也很可能具有不同的偏置量，因为景象辐射中的大气散射成分与波长成反比，第一波段的偏置量最大，第四波段的偏置量最小。

在 SPOT 的数据处理中，由于瑞利散射（分子散射）在 0.89μm 处（近红外区）比在可见光的 0.5μm 处要低 10 倍，所以由瑞利散射引起的辐射改正只涉及到 SPOT HRV 的多光谱数据中的第一、第二波段和全色波段的一部分，多数情况下分子散射的影响可以得到满意的改正。而米氏散射（悬浮微粒散射）只随波长逐渐变化，因此所有成象的光谱段都受到微粒散射的影响。要想正确改正米氏散射对辐射量的影响，需要知道米氏散射的三个特征：视觉上的微粒密度（与水平可见度有关）、微粒类型和米氏散射的相

超星图书馆提醒你：
请遵守相关法律，谢谢！

位函数。米氏散射的影响比瑞利散射的影响要更难改正些。大气吸收对辐射量的影响只发生在第三波段（主要是由水蒸气的吸收造成的）和第一波段（由臭氧的吸收造成的），而水蒸气和臭氧含量可从与观测地区的季节和地理位置有关的统计资料中估算出来，水蒸气的含量也可以通过查阅气象资料来估算，利用这些数据可按辐射传递方程改正大气吸收对辐射量的影响。

6.2 遥感图象的几何变形

遥感图象的几何变形是指图象上象元在图象坐标中的坐标与其在地图坐标系等参考系统中的坐标之间的差异。遥感图象上的几何变形可分为静态变形和动态变形两大类。静态变形是指在一景图象的形成过程中传感器相对于地球表面呈静止状态时所具有的各种变形误差，动态变形是指在一景图象的形成过程中传感器的运动造成的图象变形。在静态变形中，又可分为内部误差和外部误差两类。内部误差是由传感器结构等因素引起的，如摄影机的焦距变动、象主点偏移、镜头畸变，光机扫描仪的扫描线首末点成象时间差、不同波段上相同位置的扫描线成象时间差、扫描棱镜旋转速度不均匀、扫描线的非直线性和非平行性等等。内部误差大小因遥感器结构而异，一般误差不大，本节不再讨论。外部误差是指遥感器本身处在正常工作的条件下，由遥感器以外的各因素所造成的误差，如传感器的外方位变化、传感介质的不均匀、地球曲率、地形起伏、地球旋转等因素所引起的误差。本节主要讨论外部误差对图象变形的影响。

6.2.1 成象投影方式引起的图象变形

传感器成象的投影方式主要有中心投影和非中心投影两种形式。中心投影又可分为点中心投影（如 Landsat 上的 MSS 和 TM）、线中心投影（如 SPOT 的 HRV）和面中心投影（如画幅式摄影机）三种。非中心投影的传感器主要有侧视雷达。由于中心投影图象在垂直摄影和地面平坦的情况下，地面物体与其影象之间具有相似性，因此下面把中心投影的图象作为基准图象来讨论其他方式投影图象的变形规律。

1. 全景投影变形

全景投影是一种特殊形式的线中心投影，全景投影的影象面不是一个平面，而是一个圆柱面 MON（如图 6-2-1 所示）。地物点 P 在全景面上的象点 p 在扫描方向上的坐标 y_p

$$y_p = f \cdot \theta \tag{6-2-1}$$

其中：f 为焦距，θ 为成象角（以度为单位）。

设 L 是一个等效的中心投影成象面，P 点在 L 上的象点 p' 的坐标 y'_p 为

$$y'_p = f \cdot \mathrm{tg}\theta \tag{6-2-2}$$

从而可导出全景变形公式

$$dy = y_p - y'_p = f \cdot (\theta - \mathrm{tg}\theta) \tag{6-2-3}$$

全景变形的图形变化情况如图 6-2-3（b）所示。另外，全景图象还存在着动态变形，全景图象的动态变形情况已在 §4.3.3 节作了讨论，此处不再详述。

超星阅览器提醒您：
请用本复制品
请尊重相关知识产权！

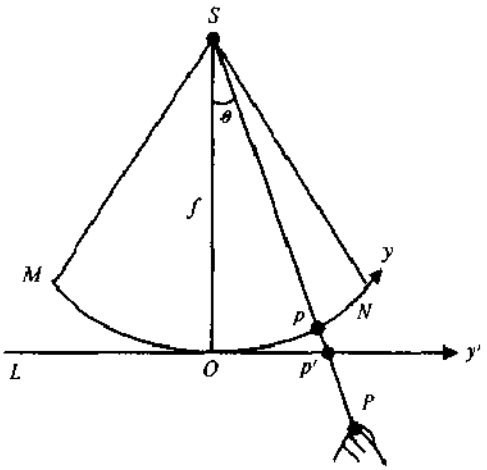


图 6-2-1　全景投影时的物象关系

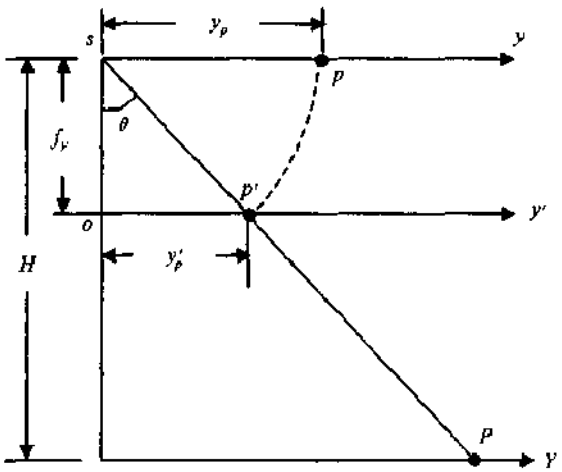


图 6-2-2　斜距投影时的物象关系

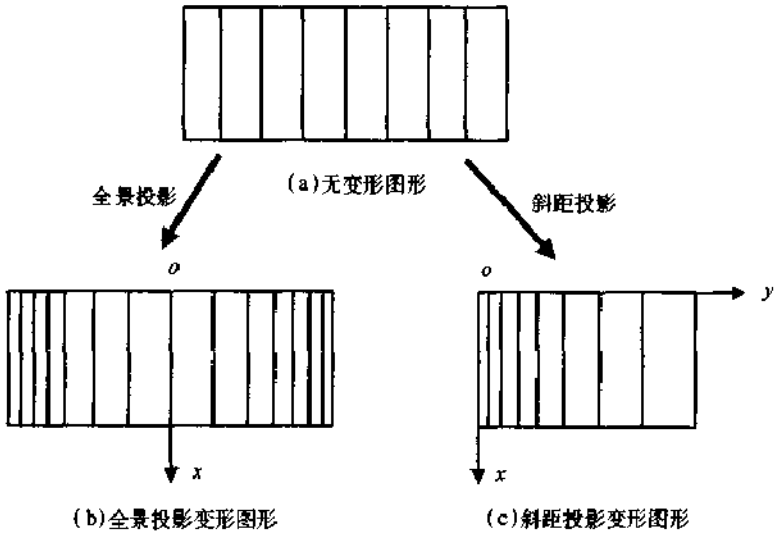


图 6-2-3　不同投影方式引起的图象变形情况

2. 斜距投影变形

侧视雷达是一种斜距投影类型的传感器。如图 6-2-2 所示，s 为雷达天线中心，sy 为雷达成象面，地物点 P 在斜距投影图象上的影象坐标 y_p 取决于斜距 R_p 和成象比例尺 $\frac{1}{m}$，由于有

$$\frac{1}{m} = \frac{f_y}{H} \tag{6-2-4}$$

$$R_p = \frac{H}{\cos\theta} \tag{6-2-5}$$

式中 H 为传感器航高，f_y 为等效焦距。因此斜距投影图象上的影象坐标 y_p 为

$$y_p = \frac{R_p}{m} = \frac{f_y \cdot H}{H \cdot \cos\theta} = \frac{f_y}{\cos\theta} \tag{6-2-6}$$

超星阅览器提醒您
使用本复制品
请尊重相关知识产权

而地面点 P 在等效中心投影影象 oy' 上的象点 p' 的坐标 y'_p 可表达为

$$y'_p = f_y \cdot \mathrm{tg}\theta \tag{6-2-7}$$

于是，斜距投影的变形误差为

$$dy = y_p - y'_p = f_y \cdot \left(\frac{1}{\cos\theta} - \mathrm{tg}\theta\right) \tag{6-2-8}$$

斜距变形的图形变化情况如图 6-2-3（c）所示。

6.2.2 传感器外方位元素变化引起的图象变形

传感器的外方位元素指的是传感器成象时的位置（X_s，Y_s，Z_s）和姿态角（α，ω，κ）。当外方位元素偏离标准位置而出现变动时，就会使图象产生变形。这种变形的影响可以通过构象方程推导出来。

由摄影测量学可知，画幅式象片的物象关系可用如下共线方程来表达

$$x = -f\frac{a_1(X - X_s) + b_1(Y - Y_s) + c_1(Z - Z_s)}{a_3(X - X_s) + b_3(Y - Y_s) + c_3(Z - Z_s)} \tag{6-2-9}$$

$$y = -f\frac{a_2(X - X_s) + b_2(Y - Y_s) + c_2(Z - Z_s)}{a_3(X - X_s) + b_3(Y - Y_s) + c_3(Z - Z_s)} \tag{6-2-10}$$

式中：f 为摄影象机的焦距；

（x，y）为象点在象坐标系中的象坐标；

（X，Y，Z）是与象点坐标（x，y）对应的地面点的坐标；

（X_s，Y_s，Z_s）为摄站坐标；

（a_i，b_i，c_i，$i=1$，2，3）为外方位角元素（α，ω，κ）所确定的旋转矩阵中的元素。

超星阅览器提醒您：
使用复制品
请尊重相关知识产权！

以外方位元素为变量，对（6-2-9），（6-2-10）式进行微分处理，同时考虑到在近似垂直摄影条件下 α，ω 和 κ 都为小角度，可以得到外方位元素变化对象点坐标影响的一次项公式

$$dx = -\frac{f}{H}dX_s - \frac{x}{H}dZ_s - f\cdot\left(1 + \frac{x^2}{f^2}\right)\cdot d\alpha - \frac{xy}{f}d\omega + y\cdot d\kappa \tag{6-2-11}$$

$$dy = -\frac{f}{H}dY_s - \frac{y}{H}dZ_s - \frac{xy}{f}d\alpha - f\cdot\left(1 + \frac{y^2}{f^2}\right)\cdot d\omega - x\cdot d\kappa \tag{6-2-12}$$

其中各单个外方位元素引起的图象变形情况如图 6-2-4 所示。

由外方位元素对画幅式图象的影响公式，并根据不同类型传感器的成象特点，可得出缝隙式摄影象片、全景摄影象片、光机扫描图象和线阵 CCD 图象上外方位元素变化而引起的象点坐标误差公式。这些内容已在第四章进行了讨论，此处不再详述。

需要指出的是，对于动态扫描类型的传感器（如光机扫描仪），其构象方程是对于一个扫描瞬间（相应于某一象素或某一条扫描线）而建立的，同一象幅上不同成象瞬间所成图象的外方位元素是不相同的，因而相应的变形误差式只表达该扫描瞬间象幅上相应点、线所在位置的局部变形，整个图象的变形将是各瞬间局部变形的综合结果。例如在一幅多光谱扫描图象内，假设各条扫描行所对应的各外方位元素，是从第一扫描行起按线性规律变化的，则地面上一个方格网图形成象后，将出现如图 6-2-5（a）所示的综

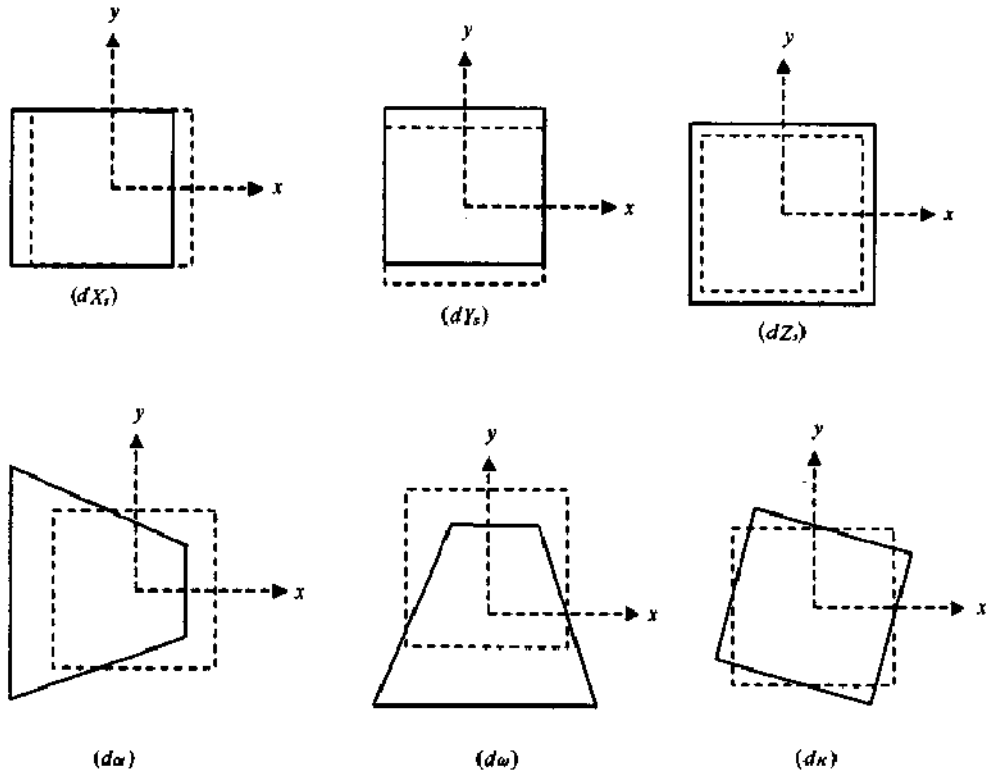
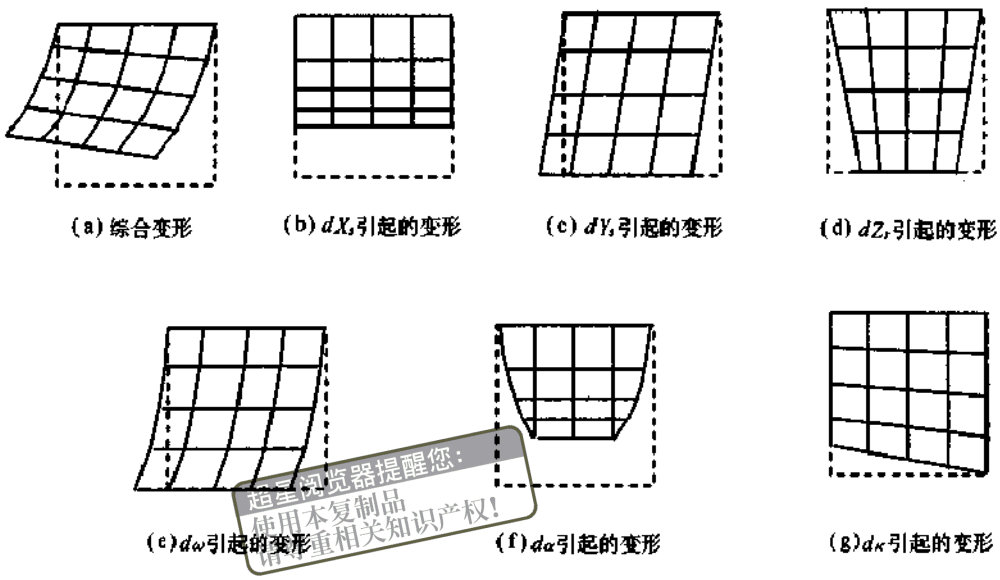


图 6-2-4　各单个外方位元素引起的图象变形

合变形，相应地，各外方位元素单独造成的图象变形将分别由图 6-2-5（b）～（g）所示。它与常规框幅摄影机的情况不同，它的每个外方位元素变化都可能使整幅图象产生非线性变形，而且这种变形在常规的航测光学纠正仪上很难严格的纠正掉，唯有数字纠正法才能满足解析上的严密性要求。

对于侧视雷达（特别是合成孔径侧视雷达），其外方位元素对图象变形的影响情况



超星阅览器提醒您：
使用本复制品
请尊重相关知识产权！

图 6-2-5　外方位元素引起的动态扫描图象的变形

比较复杂，这里不作讨论。

6.2.3 地形起伏引起的图象变形

地形起伏引起的象点移位情况在第四章也已进行了讨论，现归纳如下：

1. 地形起伏对画幅式象片的影响

$$dx = \frac{\Delta h}{H} \cdot x \tag{6-2-13}$$

$$dy = \frac{\Delta h}{H} \cdot y \tag{6-2-14}$$

式中 dx，dy 分别为象点在 x 方向和 y 方向的位移，x，y 为象点的坐标，Δh 为对应地面点相对于基准面的高差，H 为航高。

2. 地形起伏对光机扫描图象的影响

$$dx = 0 \tag{6-2-15}$$

$$dy = \frac{f \cdot \sin\theta_t \cdot \cos\theta_t}{H} \cdot \Delta h \tag{6-2-16}$$

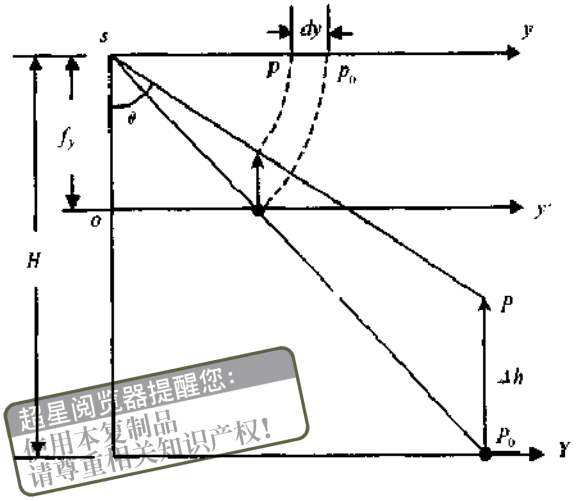
式中 dx，dy 分别为象点在 x 方向和 y 方向的位移，x，y 为象点的坐标，Δh 为对应的地面点相对于基准面的高差，H 为航高，θ_t 为扫描角。

3. 地形起伏对侧视雷达图象的影响

$$dx = 0 \tag{6-2-17}$$

$$dy \approx -\lambda \cdot \Delta h \cdot \cos\theta \tag{6-2-18}$$

式中 dx，dy 分别为象点在 x 方向和 y 方向的位移，Δh 为对应的地面点相对于基准面的高差，θ 为侧视角，λ 是雷达图象的比例尺因子，如图 6-2-6 所示。和画幅式象片相比，地形起伏对侧视雷达图象的影响只发生在 y 方向上，且位移的方向和画幅式相反。



超星阅览器提醒您：
使用本复制品
请尊重相关知识产权！

图 6-2-6　侧视雷达图象上的投影误差

6.2.4 地球曲率引起的图象变形

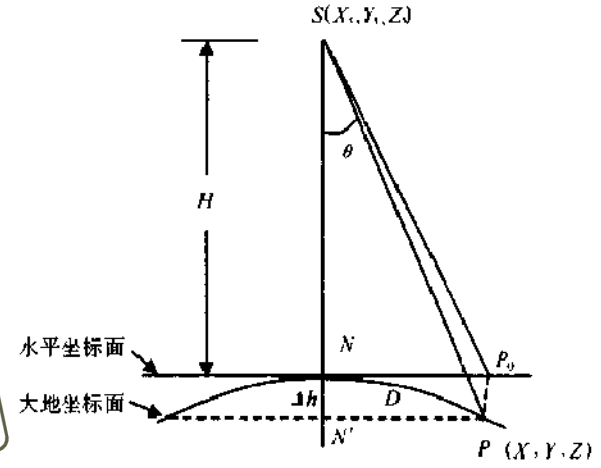
地球曲率引起的象点位移类似于地形起伏引起的象点位移。只要把地球表面（假设地球表面是球面）上的点到地球切平面的正射投影距离（Δh）看作是一种系统的地形起伏，就可以利用以前所介绍的象点位移公式来估计地球曲率所引起的象点位移。如图6-2-7所示，设地球的半球为 R，P 为地面点，如不考虑地球曲率的影响，在水平坐标面上的点应为 P_0，且弧 NP 的长度 D 等于 NP_0 的长度，又因地球半径 R 很大，可认为角 PP_0N 是直角，$NN' = PP_0$。则根据圆直径与弦线交割线段间的固定数学关系可得

$$D^2 = (2R - \Delta h) \cdot \Delta h \tag{6-2-19}$$

考虑到 Δh 相对于 $2R$ 是一个很小的数值，对上式简化后可得

$$\Delta h \approx \frac{D^2}{2R} \approx \frac{(X - X_s)^2 + (Y - Y_s)^2}{2R} \tag{6-2-20}$$

现将 Δh 作为地形起伏量代入相应传感器的投影误差公式，考虑到地球曲面总是低于切平面，把 Δh 代入相应投影误差公式时，需要将 Δh 反号，由此可以得到地球曲率对各种图象影响的表达式。



超星阅览器提醒您：
使用本复制品
请尊重相关知识产权！

图 6-2-7 地球曲率的影响

1. 地球曲率对画幅式图象的影响

令 $r = \frac{f}{H}\sqrt{(X - X_s)^2 + (Y - Y_s)^2}$，则有

$$\begin{cases} dx = \dfrac{x \cdot H \cdot r^2}{2R \cdot f^2} \\ dy = \dfrac{y \cdot H \cdot r^2}{2R \cdot f^2} \end{cases} \tag{6-2-21}$$

2. 地球曲率对光机扫描图象的影响

$$\begin{cases} dx = 0 \\ dy = -\dfrac{f \cdot \mathrm{tg}\theta \cdot \sin^2\theta}{2R \cdot f^2} \cdot H \end{cases} \tag{6-2-22}$$

式中 θ 为地面点所对应的扫描角。

3. 地球曲率对侧视雷达图象的影响

$$\begin{cases} dx = 0 \\ dy = \lambda \dfrac{H^2}{2R} \cdot \mathrm{tg}^2\theta \cdot \cos\theta \end{cases} \tag{6-2-23}$$

式中 θ 为地面点所对应的侧视角，λ 是雷达图象的比例尺因子（$\lambda = \dfrac{y \cdot \cos\theta}{H}$）。

在航天摄影测量中，地球曲率造成的象点误差通常是不能忽视的。以画幅式航天摄影象片为例，当焦距 $f = 300\text{mm}$，$H = 150\text{km}$，$r = 200\text{mm}$ 时，由此引起的象点误差在1mm左右。当利用共线方程进行几何校正等处理时，由于已知控制点的大地坐标是以平面作为水准面的，而地球表面是一个椭球面，为了解决两者之间的差异，一般先按上述方法对象点坐标进行改正，使改正后的象点位置与已知控制点坐标之间满足共线关系。

6.2.5 大气折射引起的图象变形

整个大气层不是一个均匀的介质，因此电磁波在大气层中传播时的折射率也随高度的变化而变化，使电磁波传播的路径不是一条直线而变成了曲线，从而引起象点的位移，这种象点移位就是大气折射的影响。

1. 对画幅式图象的影响

对于中心投影图象，在无大气折射影响时，地物点 A 以直线光线 AS 成象于 a_0 点，当有大气折射影响时，A 点以曲线光线 AS 成象于 a_1 点，由此而引起的象点位移 $\Delta r = a_1a_0$，如图 6-2-8 所示。显然

$$\Delta r = a_0a_2 \cdot \sec\alpha_H \tag{6-2-24}$$

$$a_0a_2 = \frac{f \cdot \sin\beta_H}{\cos(\alpha_H - \beta_H)} \tag{6-2-25}$$

超星阅览器提醒您：
使用本复制品
请尊重相关知识产权！

综合以上两式，并考虑到 β_H 是一个小角，得

$$\Delta r = \frac{f \cdot \beta_H}{\cos^2\alpha_H} = f \cdot (1 + \mathrm{tg}^2\alpha_H) \cdot \beta_H \tag{6-2-26}$$

其中 α_H 是实际光线离开最后一层大气层时的出射角，β_H 是实际光线在最后一层大气时具有的折光角差。下面讨论 $\mathrm{tg}\alpha_H$ 和 β_H 的具体表达式。

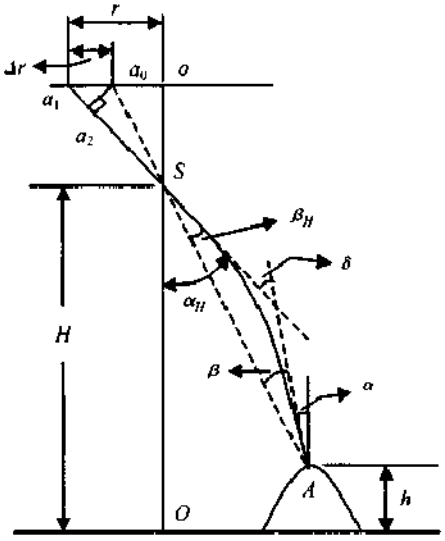


图 6-2-8 大气折光差

设实际象点 a_1 距象幅中心幅射距离为 r，则

$$\mathrm{tg}\alpha_H = \frac{r}{f} \tag{6-2-27}$$

又设大气底层（高程为 h）和大气高层（航高为 H）的折射率分别为 n 和 n_H，并设实际光线离开底层大气时的出射角和折光角差分别为 α 和 β。则根据折射定理

$$n \cdot \sin\alpha = \cdots = n_i \cdot \sin\alpha_i = \cdots n_H \cdot \sin\alpha_H \tag{6-2-28}$$

所以有

$$\sin\alpha_H = \frac{n}{n_H} \cdot \sin\alpha \tag{6-2-29}$$

如果令出自 A 点光线与进入 S 点光线方向间的夹角为 δ，从图 6-2-8 不难看出

$$\left.\begin{aligned} \alpha &= \alpha_H - \delta \\ \delta &= \beta_H + \beta \end{aligned}\right\} \tag{6-2-30}$$

把（6-2-30）第一式代入第（6-2-29）式，同时考虑到 δ 是一个小角得

$$\delta = \frac{n - n_H}{n} \mathrm{tg}\alpha_H \tag{6-2-31}$$

把（6-2-31）式代入（6-2-30）第二式，并考虑到以下近似关系

$$\frac{\beta_H}{\beta} \approx \frac{n_H}{n} \tag{6-2-32}$$

可得到 β_H 的表达式

$$\beta_H = \frac{n_H}{n + n_H} \cdot \delta = \frac{n_H \cdot (n - n_H)}{n \cdot (n + n_H)} \cdot \mathrm{tg}\alpha_H \tag{6-2-33}$$

把（6-2-33）和（6-2-27）式代入（6-2-26）式得

$$\Delta r = \frac{n_H \cdot (n - n_H)}{n \cdot (n + n_H)} \cdot r \cdot \left(1 + \frac{r^2}{f}\right) = K \cdot \left(r + \frac{r^3}{f}\right) \tag{6-2-34}$$

式中系数 K 是一个与传感器高度 H 和地面点高程 h 有关的大气条件常数。许多学者对 K 的实用表达式作过研究，其中 Bertram 博士根据 ARDC 大气模型导出的 K 的表达式如下

$$K = \frac{2410H}{H^2 - 6H + 250} - \frac{2410h}{h^2 - 6h + 250} \cdot \frac{h}{H} \tag{6-2-35}$$

超星阅览器提醒您：
使用本复制品
请尊重相关知识产权！

当需要在 x 和 y 方向分别考察大气折射影响时，可按下式计算

$$\left\{\begin{aligned} dx &= K \cdot x \cdot \left(1 + \frac{r^2}{f}\right) \\ dy &= K \cdot y \cdot \left(1 + \frac{r^2}{f}\right) \end{aligned}\right. \tag{6-2-36}$$

大气折射对画幅式象片上象点移位的影响在量级上比地球曲率的影响要小得多。

2. 对侧视雷达图象的影响

侧视雷达是按斜距投影原理成象的。雷达电磁波在大气中传播时，一方面会因大气折射率的变化而产生路径弯曲，使传播路径变长；另一方面使电磁波传播速度减慢，传播时间增加。

如图 6-2-9 所示，在无大气折射影响下，地面点 P 的斜距为 R，而有大气折射时，电磁波则通过弧距 R_c 到达接收天线，其等效斜距为 R'（$R' = R_c$），相应地影象点从 p 位移到 p'，由此而产生的象点误差 $\Delta y = pp'$。显然有

$$\Delta y = \frac{1}{m}(R' - R) = \frac{1}{m}(R_c - R) \tag{6-2-37}$$

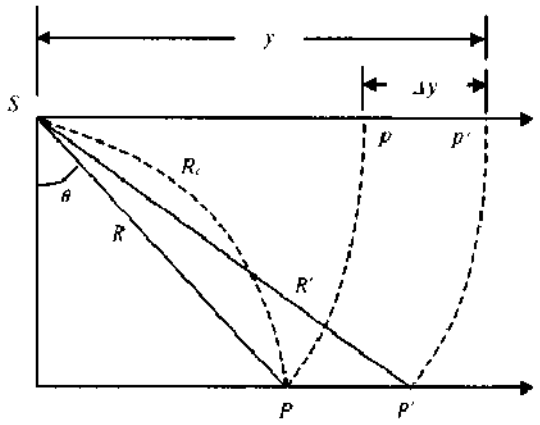


图 6-2-9　大气折光差对雷达图象的影象

现设弧线 R_c 的曲率半径为 δ，则

$$\Delta R = R_c - R = R_c - 2 \cdot \delta \cdot \sin\left(\frac{R_c}{2\delta}\right) \approx \frac{R_c^3}{24\delta^2} \tag{6-2-38}$$

式中 δ 可用下式来估计

$$\delta = \frac{n}{\left|\frac{\partial n}{\partial H}\right| \cdot \sin\theta} \tag{6-2-39}$$

超星阅览器提醒您：
使用本复制品
请尊重相关知识产权！

其中 n 为海平面大气折射系数，其值为 1.00035；θ 为 P 点的成象角，$\sin\theta = \frac{\sqrt{y^2 - f^2}}{y}$；$\frac{\partial n}{\partial H}$ 为折射率随高度变化的梯度，其值为 -4×10^{-8}；若同时考虑到 $y = \frac{R_c}{m}$ 和 $\frac{1}{m} = \frac{f}{H}$，把（6-2-39）和（6-2-38）代入（6-2-37）后可得象点位移的估计公式

$$\Delta y = \frac{H^2}{24} \cdot \left(\frac{4 \times 10^{-8}}{1.00035}\right)^2 \cdot y \cdot \left(\frac{y^2}{f^2} - 1\right) \tag{6-2-40}$$

上式就是大气折射对雷达图象的第一种影响，在高空成象时这种影响对斜距也只能带来米级的误差，所以可以忽略不计。

关于第二种影响，由于电磁波传播时间的增加而引起的斜距变化为

$$\Delta R_i = R' \cdot (\bar{n} - 1) \tag{6-2-41}$$

其中 $\bar{n} \approx n + \frac{H}{2} \cdot \frac{\partial n}{\partial H}$，称为大气层中的平均折射系数，所以由此引起的象点位移为

$$\Delta y_i = \lambda \cdot \Delta R_i \approx (0.00035 - 2 \times 10^{-8} \cdot H) \cdot y \tag{6-2-42}$$

这种影响是显著的，设 $H = 20\text{km}$，$R_c = 100\text{km}$，则 $\Delta R_i \approx 35\text{m}$，可见在高空成象时是不能忽略的。

6.2.6　地球自转引起的图象变形

在静态遥感器（如常规画幅式摄影机）成象的情况下，地球自转不会引起图象变

形，因为其整幅图象是在瞬间一次曝光成象的。地球自转主要是对动态遥感器的图象产生变形影响，特别是对卫星遥感图象。以陆地卫星多光谱扫描仪为例，当卫星由北向南运行的同时，地球表面也在由西向东自转，由于卫星图象每条扫描线的成象时间不同，因而造成扫描线在地面上的投影依次向西平移，最终使得图象发生扭曲。图 6-2-10 表示了地球静止时的图象（$oncba$）与地球自转时的图象（$onc'b'a'$）在地面上的投影情况。由图可见，由于地球自转的影响，产生了图象底边中点的坐标位移 Δx 和 Δy，以及平均航偏角 θ。显然

$$\begin{cases} \Delta x = bb' \cdot \sin\alpha \cdot \dfrac{1}{m_x} \\ \Delta y = bb' \cdot \cos\alpha \cdot \dfrac{1}{m_y} \\ \theta = \dfrac{\Delta y}{l} \end{cases} \tag{6-2-43}$$

式中 bb' 是由地球自转引起的影象底边中点的地面偏移；α 是卫星运行到影象中心点位置时的航向角；l 是影象 y 方向边长；$\dfrac{1}{m_x}$，$\dfrac{1}{m_y}$ 是影象 x 和 y 方向的比例尺。

设卫星从图象首行到末行的运行时间为 t，则

$$t = \frac{m_y \cdot l}{R_e \cdot \omega_s} \tag{6-2-44}$$

式中 R_e 为地球平均曲率半径；ω_s 为卫星轨道运行角速度。于是得

$$bb' = (R_e \cdot \cos\Phi) \cdot \omega_e \cdot t = (m_y \cdot l) \cdot \left(\frac{\omega_e}{\omega_s}\right) \cdot \cos\Phi \tag{6-2-45}$$

式中 ω_e 为地球自转角速度；Φ 影象底边中点的地理纬度。

超星阅览器提醒您：
使用本复制品
请尊重相关知识产权！

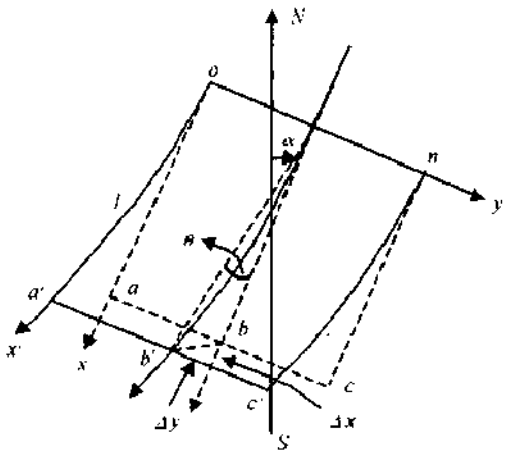


图 6-2-10　地球自转的影响

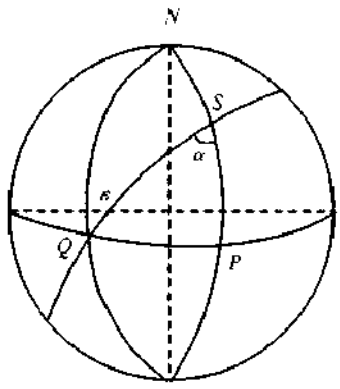


图 6-2-11　球面三角形△SQP

设卫星轨道面的偏角为 ε，则由图 6-2-11 的球面三角形△SQP 中可知

$$\sin\alpha = \frac{\sin\varepsilon}{\cos\Phi} \tag{6-2-46}$$

于是得

$$\cos\alpha = \frac{\sqrt{\cos^2\Phi - \sin^2\varepsilon}}{\cos\Phi} \tag{6-2-47}$$

现将（6-2-45），（6-2-46），（6-2-47）式代入（6-2-43）式，并令 $l = x$ 或 $l = y$，则可得地球自转引起的图象变形误差公式

$$\begin{cases} \Delta x = \left(\dfrac{m_y}{m_x}\right) \cdot \left(\dfrac{\omega_e}{\omega_s}\right) \cdot \sin\varepsilon \cdot x \\ \Delta y = \left(\dfrac{\omega_e}{\omega_s}\right) \cdot \sqrt{\cos^2\Phi - \sin^2\varepsilon} \cdot y \\ \theta = \left(\dfrac{\omega_e}{\omega_s}\right) \cdot \sqrt{\cos^2\Phi - \sin^2\varepsilon} \end{cases} \tag{6-2-48}$$

6.3 遥感图象的几何校正

6.3.1 遥感图象几何校正的一般过程

图象的几何校正是指从具有几何变形的图象中消除变形的过程。遥感图象几何校正的一般步骤如下：

①确定校正方法：根据遥感图象几何畸变的性质和可用于校正的数据确定几何校正的方法；

②确定校正公式：确定原始输入图象上的象点和几何校正后的图象上的象点之间的变换公式，并根据控制点等数据确定变换公式中的未知参数；

③验证校正方法、校正公式的有效性：检查几何畸变能否得到充分得校正，若几何畸变不能得到有效地校正，分析其原因，提出其他的几何校正方法；

④对原始输入图象进行重采样，得到消除几何畸变的图象。

当图象几何畸变的理论校正公式已知时，可以把校正公式中与传感器有关的校正数据（如焦距）、传感器的位置和姿态等数据代入理论校正公式对原始图象进行几何校正，这种校正方法称为系统性校正。通常情况下系统性校正对传感器内部畸变的改正是非常有效的。当传感器位置和姿态参数的测量精度不高时，由此得到的校正公式对外部畸变的校正精度也不高。

由于引起航天影象几何变形的因素是多方面的，特别是动态遥感器获取的影象，除了遥感器高度和姿态角的变化、大气折光、地球曲率、地形起伏等因素引起影象几何变形外，还要考虑动态扫描过程中地球旋转和遥感器本身结构性能引起的影象几何变形。上述因素引起影象的几何变形，有的是系统畸变，而有的是随机畸变，但总的效果是使图象中的几何图形与该物体在所选定的地图投影中的几何图形产生差异，使图象产生了几何形状或位置的失真。主要表现为位移、旋转、缩放、仿射、弯曲和更高阶的歪曲，或者表现为象元相对地面实际位置产生挤压、伸展、扭曲或偏移。对于系统畸变，可以用严格的数学表达式来描述，但对于随机畸变，则难以用明确的数学表达式来描述，此时通常选择一个适当的多项式来近似地描述纠正前后相应点的坐标关系，并利用控制点的图象坐标和参考坐标系中理论坐标按最小二乘原理求解出多项式中的系数，然后以此

多项式对图象进行几何校正。在航天影象的数字几何纠正中，常用的多项式形式有：一般多项式、勒让德正交多项式、切比雪夫正交多项式、分块插值多项式等。

6.3.2 图象几何校正中的重采样和内插方法

在图象几何校正中，需要对原始输入图象进行重采样，以便得到消除了几何畸变的图象。重采样的方法有直接法和间接法，如图 6-3-1 所示。

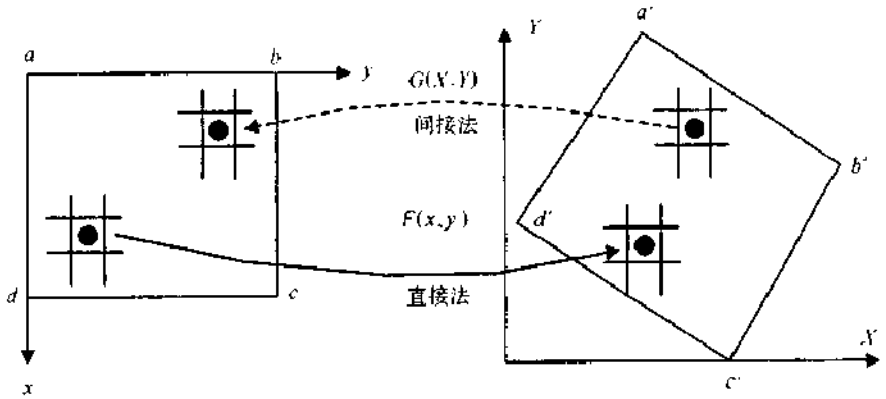


图 6-3-1 直接法纠正和间接法纠正

所谓直接法校正，是从原始影象上的象点坐标出发，按下列公式求出校正后的影象上的象点坐标

$$\begin{cases} X = F_x(x, y) \\ Y = F_y(x, y) \end{cases} \tag{6-3-1}$$

然后将原始影象上象点（x，y）处的灰度值赋给校正后的影象上（X，Y）处的象点，式中 F_y 和 F_x 为直接校正的坐标变换函数。

所谓间接法校正，是从校正后影象上象点坐标出发，按下列公式求出原始影象上的象点坐标，

超星阅览器提醒：
使用本复制品
请尊重相关知识产权!

$$\begin{cases} x = G_x(X, Y) \\ y = G_y(X, Y) \end{cases} \tag{6-3-2}$$

然后将原始影象上象点（x，y）处的灰度值赋给校正后的影象上（X，Y）处的象点，式中 G_x 和 G_y 为间接校正的坐标变换函数。

对于直接法校正，可以逐行逐列计算原始影象上每个象素在校正后影象上象点坐标（X、Y），由于 X 和 Y 可能不是整数值，所以校正后影象上整数象点位置的灰度值必须通过内插的方法获得。同样对于间接法校正，可以逐行逐列计算校正后影象上每个象素在原始影象上的象点坐标（x，y），由于 x 和 y 可能不是整数值，所以必须通过内插的方法求出原始影象上该位置的灰度值。利用象素周围多个象点的灰度值求出该象素灰度值的过程称为灰度内插。常用的内插方法有：

1. 三次卷积法

该方法是用一个三次重采样函数 $\omega(t)$ 来近似表示灰度内插时周围象点的灰度值

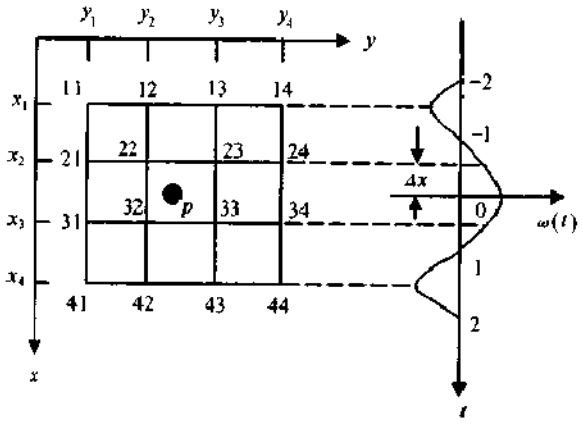


图 6-3-2　三次褶积法（y 方向权函数未画）

对内插点灰度值的贡献大小，如图 6-3-2 所示。

$$\omega(t)=\begin{cases}1-2\cdot|t|^2+|t|^3 & 0\leqslant|t|<1\\ 4-8\cdot|t|+5\cdot t^2-|t|^3 & 1\leqslant|t|<2\\ 0 & |t|\geqslant 2\end{cases}\tag{6-3-3}$$

设内插点 p 的最近象素点为 22，象素之间的间隔为 1，且 p 点到象素点 22 间的距离在 x 和 y 方向的投影分别为 Δx 和 Δy，则内插点 p 的灰度值 D_p 为

$$D_p=[\omega(1+\Delta x)\omega(\Delta x)\omega(1-\Delta x)\omega(2-\Delta x)]\begin{bmatrix}D_{11}&D_{12}&D_{13}&D_{14}\\D_{21}&D_{22}&D_{23}&D_{24}\\D_{31}&D_{32}&D_{33}&D_{34}\\D_{41}&D_{42}&D_{43}&D_{44}\end{bmatrix}\begin{bmatrix}\omega(1+\Delta y)\\\omega(\Delta y)\\\omega(1-\Delta y)\\\omega(2-\Delta y)\end{bmatrix}\tag{6-3-4}$$

式中 D_{ij} 为象素点 ij 的灰度值。三次卷积法的内插精度较高，缺点是运算量很大。

超星阅览器提醒您：
使用本资源请遵守相关知识产权！

2. 双线性内插法

该方法是用一个分段线性函数来近似表示灰度内插时周围象点的灰度值对内插点灰度值的贡献大小，该分段线性函数为

$$\omega(t)=\begin{cases}1-|t| & 0\leqslant|t|\leqslant 1\\ 0 & \text{其他}\end{cases}\tag{6-3-5}$$

设内插点 p 点与周围 4 个最近象素点的关系如图 6-3-3 所示，象素之间的间隔为 1，且 p 点到象素点 11 间的距离在 x 和 y 方向的投影分别为 Δx 和 Δy，则内插点 p 的灰度值 D_p 为

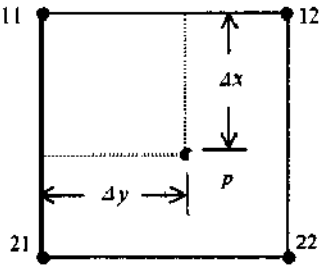


图 6-3-3　双线性内插法

$$D_p=[\omega(\Delta x)\omega(1-\Delta x)]\begin{bmatrix}D_{11}&D_{12}\\D_{21}&D_{22}\end{bmatrix}\begin{bmatrix}\omega(\Delta y)\\\omega(1-\Delta y)\end{bmatrix}\tag{6-3-6}$$

式中 D_{ij} 为象素点 ij 的灰度值。双线性内插法的内插精度和运算量都比较适中。

3. 最邻近内插法

该方法是取与内插点 p 距离最近的象素 n 的灰度值 D_n 作为 p 点的灰度值 D_p，即

$$D_p = D_n \tag{6-3-7}$$

其中
$$\begin{cases} x_n = \text{取整}\ (x_p + 0.5) \\ y_n = \text{取整}\ (y_p + 0.5) \end{cases}$$

最邻近内插法的运算量最小，缺点是内插精度较低。

6.3.3 遥感图象的多项式校正

前面提到：当遥感影象的几何变形是多种因素引起的，并且其变形规律难以用严格的数学表达式来描述时，通常选择一个适当的多项式来近似地描述纠正前后相应点的坐标关系，并利用控制点的图象坐标和参考坐标系中理论坐标按最小二乘原理求解出多项式中的系数，然后以此多项式对图象进行几何校正。

设待纠正图象上的象点坐标（X，Y）和纠正后相应象点的坐标（x，y）可用下面的多项式来近似表示

$$\begin{cases} x = a_{00} + a_{10}X + a_{01}Y + a_{20}X^2 + a_{11}XY + a_{02}Y^2 + a_{30}X^3 + a_{21}X^2Y + a_{12}XY^2 + a_{03}Y^3 + \cdots \\ y = b_{00} + b_{10}X + ba_{01}Y + b_{20}X^2 + ba_{11}XY + b_{02}Y^2 + b_{30}X^3 + b_{21}X^2Y + b_{12}XY^2 + b_{03}Y^3 + \cdots \end{cases} \tag{6-3-8}$$

超星阅览器提醒您：
使用本复制品
请尊重相关知识产权！

式中 a_{ij}，b_{ij} 为待求系数。利用一定数量的控制点在图象坐标系中的坐标和在参考坐标系中的理论坐标可以列出一组误差方程，按最小二乘法原理求解出多项式中的系数，然后以此多项式为校正公式对图象进行几何校正。注意在使用多项式纠正时图象坐标系中的坐标（x，y）和参考坐标系中的理论坐标（X，Y）的量纲和单位应该一致。

6.3.4 几种遥感图象的精确校正

共线方程纠正法建立在对遥感器成象时的位置和姿态进行模拟和解算的基础上，即构象瞬间的象点与其相应地面点应位于通过遥感器投影中心的一条直线上。共线方程的参数可以预测给定，也可根据控制点按最小二乘法原理求解，进而可求得各象点的改正数，达到纠正之目的。该方法理论上严密，同时考虑了地面点高程的影响，因此纠正精度较高，特别是对地形起伏较大的地区和静态遥感器的影象纠正，更能显示其优越性。但采用该法纠正时，需要有地面点的高程信息，且计算量比多项式纠正法要大。在动态遥感器中，由于在一幅影象内，遥感器的位置和姿态角是随时间而变化的，此时外方位元素在扫描运行过程中的变化规律只能近似表达，因此共线方程本身理论上的严密性就难以严格保持，因此动态扫描影象的共线方程纠正法相对于多项式纠正法的精度提高并不显著。

1. 画幅式摄影影象的几何校正

画幅式摄影影象通常按共线方程（6-3-9）式建立象点坐标和地面点坐标之间的对应关系

$$\begin{cases} x = -f\dfrac{a_1(X-X_s)+b_1(Y-Y_s)+c_1(Z-Z_s)}{a_3(X-X_s)+b_3(Y-Y_s)+c_3(Z-Z_s)} \\ y = -f\dfrac{a_2(X-X_s)+b_2(Y-Y_s)+c_2(Z-Z_s)}{a_3(X-X_s)+b_3(Y-Y_s)+c_3(Z-Z_s)} \end{cases} \tag{6-3-9}$$

式中（x，y）为象坐标系中的坐标，（X，Y，Z）为地面坐标，（X_s，Y_s，Z_s）为摄站坐标，（a_i，b_i，c_i，$i=1$，2，3）为外方位角元素所确定的旋转矩阵中的元素。

数字图象是以象素为单位的，因此需要按（6-3-10）式建立象片上以象素为单位扫描坐标（i，j）和以 mm 为单位的象坐标（x，y）之间的对应关系

$$\begin{cases} x = m_0 + m_1 \cdot i + m_2 \cdot j \\ y = n_0 + n_1 \cdot i + n_2 \cdot j \end{cases} \tag{6-3-10}$$

式中（m_i，n_i，$i=0$，1，2）可根据象片上框标点的实际量测坐标（以象素为单位）和理论坐标（以 mm 为单位）按最小二乘法原理求得。

对（6-3-9）式作线性化处理，并取其一次项可得下列误差方程式

$$-\left(\frac{x}{f}X' - Z'\right)da_3 - \frac{x}{f}Y'db_3 + Y'da_2 + dX_s + \frac{x}{f}dZ_s - \frac{\overline{Z}}{f}(x - x_c) = v_x \tag{6-3-11}$$

$$-\frac{y}{f}X'da_3 - \left(\frac{y}{f}Y' - Z'\right)db_3 + X'da_2 + dY_s + \frac{y}{f}dZ_s - \frac{\overline{Z}}{f}(y - y_c) = v_y \tag{6-3-12}$$

超星阅览器提醒您：
使用本复制品
请尊重相关知识产权

其中 $\begin{bmatrix} X' \\ Y' \\ Z' \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} X-X_s \\ Y-Y_s \\ Z-Z_s \end{bmatrix}$，$\begin{bmatrix} \overline{X} \\ \overline{Y} \\ \overline{Z} \end{bmatrix} = M \cdot \begin{bmatrix} X-X_s \\ Y-Y_s \\ Z-Z_s \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} a_1 & b_1 & c_1 \\ a_2 & b_2 & c_2 \\ a_3 & b_3 & c_3 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} X-X_s \\ Y-Y_s \\ Z-Z_s \end{bmatrix}$

$$x_c = -f\frac{\overline{X}}{\overline{Z}}, \qquad y_c = -f\frac{\overline{Y}}{\overline{Z}}$$

x，y 是控制点的象坐标。

对于每一个控制点可以按（6-3-11）式、（6-3-12）式列出两个误差方程式，利用象片上 3 个以上的控制点，可列出一组误差方程式，然后按照最小二乘原理可以解算出象片的 6 个外方位元素，即 a_3，b_3，a_2 和摄站坐标（X_s，Y_s，Z_s）。旋转矩阵 M 中的其他 6 个元素可按下面的公式求出：

$$\begin{cases} a_1 = \sqrt{1 - a_2^2 - a_3^2} \\ c_3 = \sqrt{1 - a_3^2 - b_3^2} \\ b_1 = \dfrac{-a_1a_3b_3 - a_2c_3}{1 - a_3^2} \\ b_2 = \sqrt{1 - b_1^2 - b_3^2} \\ c_1 = a_2b_3 - a_3b_2 \\ c_2 = a_3b_1 - a_1b_3 \end{cases} \tag{6-3-13}$$

在（6-3-9）式中的参数全部解算出来以后，通常采用间接校正法获得纠正图象。对纠正射象片上的每一个象点 $X_0 = X/M$，$Y_0 = Y/M$，M 正射影象的比例尺分母，求

出（X，Y，Z）所对应的原象片上的象点（x，y）所对应的象素（i，j）处的灰度值，并赋给正射象片上的对应象元。由于（i，j）可能不是整数位置，所以要采用内插的方法，根据其周围若干个邻点来求解该位置的灰度值。考虑到计算速度和计算精度的要求，一般采用双线性内插的方法来求（i，j）处的灰度值。

2．SPOT 影象的几何校正

线阵 CCD 扫描仪在垂直成象的情况下，所获得的图象为行中心投影的图象，即图象上每一行都有自己的外方位元素，不同的扫描行的外方位元素不同。若定义象坐标系的 x 轴与飞行方向一致，象坐标系的原点在图象的中心位置，则 SPOT 影象上象点 p（在象坐标系中的坐标为（x_i，y_i））与地面点 P（在地面坐标系中的坐标为（X_i，Y_i，Z_i））的坐标关系式为

$$\begin{cases} x_i = 0 = -f\dfrac{a_1\cdot(X_i-X_{si})+b_1\cdot(Y_i-Y_{si})+c_1\cdot(Z_i-Z_{si})}{a_3\cdot(X_i-X_{si})+b_3\cdot(Y_i-Y_{si})+c_3\cdot(Z_i-Z_{si})} \\ y_i = -f\dfrac{a_2\cdot(X_i-X_{si})+b_2\cdot(Y_i-Y_{si})+c_2\cdot(Z_i-Z_{si})}{a_3\cdot(X_i-X_{si})+b_3\cdot(Y_i-Y_{si})+c_3\cdot(Z_i-Z_{si})} \end{cases} \tag{6-3-14}$$

式中 f 为等效焦距，X_{si}，Y_{si}，Z_{si}是 l_i 行的摄站坐标，a_i，b_i，c_i（$i=1$，2，3）是由 l_i 行的外方位角元素 α_i，ω_i，κ_i 所确定的旋转矩阵中的九个元素，其表达式如下

超星阅览器提醒您：
使用本复制品
请尊重相关知识产权！

$$\begin{cases} a_1 = \cos\alpha_i\cos\kappa_i - \sin\omega_i\sin\alpha_i\sin\kappa_i \\ b_1 = \cos\omega_i\sin\kappa_i \\ c_1 = \sin\alpha_i\cos\kappa_i + \cos\alpha_i\sin\omega_i\sin\kappa_i \\ a_2 = -\cos\alpha_i\sin\kappa_i - \sin\alpha_i\sin\omega_i\cos\kappa_i \\ b_2 = \cos\omega_i\cos\kappa_i \\ c_2 = -\sin\alpha_i\sin\kappa_i + \cos\alpha_i\sin\omega_i\cos\kappa_i \\ a_3 = -\sin\alpha_i\cos\omega_i \\ b_3 = -\sin\omega_i \\ c_3 = \cos\alpha_i\cos\omega_i \end{cases} \tag{6-3-15}$$

虽然不同扫描行的外方位元素不同，但由于 SPOT 卫星运行速度、姿态非常平稳，运行速度和轨迹得到严格控制，因此 l_i 行的外方位元素可用下面的公式近似表达

$$\begin{cases} X_{si} = X_{s0} + (l_i - l_0)\cdot\dot{X}_s \\ Y_{si} = Y_{s0} + (l_i - l_0)\cdot\dot{Y}_s \\ Z_{si} = Z_{s0} + (l_i - l_0)\cdot\dot{Z}_s \\ \alpha_i = \alpha_0 + (l_i - l_0)\cdot\dot{\alpha} \\ \omega_i = \omega_0 + (l_i - l_0)\cdot\dot{\omega} \\ \kappa_i = \kappa_0 + (l_i - l_0)\cdot\dot{\kappa} \end{cases} \tag{6-3-16}$$

式中 X_{s0}，Y_{s0}，Z_{s0}，α_0，ω_0，κ_0 是影象上中心行 l_0 的外方位元素，$\dot{X}_s$，$\dot{Y}_s$，$\dot{Z}_s$，$\dot{\alpha}$，

$\dot{\omega}$，$\dot{\kappa}$是外方位元素的一阶变化率。对于数字影象，其象素坐标通常按照CCD探测元件的几何尺寸将其转化为象坐标系中的坐标。如果不同扫描行的外方位元素用（6-3-16）式近似表达，则（6-3-14）式只包含了12个参数，其中6个是影象上中心行的外方位元素 X_{s0}，Y_{s0}，Z_{s0}，α_0，ω_0，κ_0，另6个是外方位元素的一阶变化率 $\dot{X}_s$，$\dot{Y}_s$，$\dot{Z}_s$，$\dot{\alpha}$，$\dot{\omega}$，$\dot{\kappa}$。对（6-3-14）式作线性化处理，得到如下误差方程式

$$\begin{cases} v_{xi} = a_{11}d\alpha_0 + a_{12}d\omega_0 + a_{13}d\kappa_0 + a_{14}dX_{s0} + a_{15}dY_{s0} + a_{16}dZ_{s0} \\ \quad + a_{11}\Delta x d\dot{\alpha} + a_{12}\Delta x d\dot{\omega} + a_{13}\Delta x d\dot{\kappa} + a_{14}\Delta x d\dot{X}_s + a_{15}\Delta x d\dot{Y}_s + a_{16}\Delta x d\dot{Z}_s - l_{xi} \\ v_{yi} = a_{21}d\alpha_0 + a_{22}d\omega_0 + a_{23}d\kappa_0 + a_{24}dX_{s0} + a_{25}dY_{s0} + a_{26}dZ_{s0} \\ \quad + a_{21}\Delta x d\dot{\alpha} + a_{22}\Delta x d\dot{\omega} + a_{23}\Delta x d\dot{\kappa} + a_{24}\Delta x d\dot{X}_s + a_{25}\Delta x d\dot{Y}_s + a_{26}\Delta x d\dot{Z}_s - l_{yi} \end{cases} \tag{6-3-17}$$

式中：$a_{11} = \dfrac{\partial x}{\partial \alpha} = [(y_i^2/f)\cos\kappa + f\cos\kappa]\cos\alpha$

$a_{12} = \dfrac{\partial x}{\partial \omega} = -[f + (y_i^2/f)]\sin\kappa\cos\alpha$

$a_{13} = \dfrac{\partial x}{\partial \kappa} = y_i$

$a_{14} = \dfrac{\partial x}{\partial X_s} = \dfrac{1}{Z^*}(a_1 f + a_3 y_i)$

$a_{15} = \dfrac{\partial x}{\partial Y_s} = \dfrac{1}{Z^*}(b_1 f + b_3 y_i)$

$a_{16} = \dfrac{\partial x}{\partial Z_s} = \dfrac{1}{Z^*}(c_1 f + c_3 y_i)$

$a_{21} = \dfrac{\partial y}{\partial \alpha} = y_i\sin\omega + f\sin\kappa\sin\omega$

$a_{22} = \dfrac{\partial y}{\partial \omega} = -f\cos\kappa$

$a_{23} = \dfrac{\partial y}{\partial \kappa} = 0$

$a_{24} = \dfrac{\partial y}{\partial X_s} = \dfrac{1}{Z^*}a_2 f$

$a_{25} = \dfrac{\partial y}{\partial Y_s} = \dfrac{1}{Z^*}b_2 f$

$a_{26} = \dfrac{\partial y}{\partial Z_s} = \dfrac{1}{Z^*}c_2 f$

$l_{xi} = 0 - (x_i)$

$l_{yi} = 0 - (y_i)$

$\Delta x = x_i - x_0$

$Z^* = a_3(X_i - X_{si}) + b_3(Y_i - Y_{si}) + c_3(Z_i - Z_{si})$

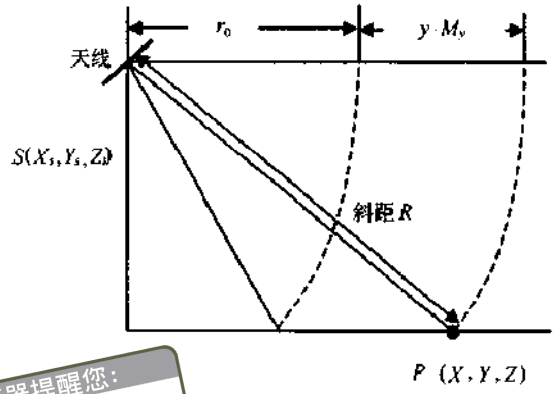
公式中的 (x_i)，(y_i) 是用未知参数的当前值代入（6-3-14）式求得的近似值，x_i 是控

超星阅览器提醒您：
使用本复制品
请尊重相关知识产权！

动点在飞行方向上的影象坐标，x_0 是中心行在飞行方向上的影象坐标。从 SPOT 磁带“头”文件可以读出星历参数和姿态角变化率，因而可以计算影象中心行的外方位元素的近似值（包括它们的变化率），然后利用6个以上的控制点就可以求出该影象的12个未知参数。同画幅式影象的几何校正一样，在校正公式（6-3-14）式完全确定以后，可以采用间接校正法对原始 SPOT 图象进行几何和灰度重采样，得到校正后的 SPOT 图象。

3. SAR 影象的几何校正

侧视雷达是按地面点至雷达天线中心的斜距进行投影的，常用的 SAR 图象物象关系式有两个，一个是 F.Leberl 等人提出的构象模型，该模型只考虑了外方位元素中摄站坐标的变化，而没有考虑外方位元素中角元素的变化，因此只是一个近似公式；另一个是 G. Konecny 提出的平距投影的构象模型，该模型同时考虑了外方位元素中摄站坐标和姿态元素的影响，相对 F.Leberl 构象模型要严密得多。下面分别讨论采用 F.Leberl 构象模型和 G. Konecny 构象模型时几何校正公式的确定方法。



超星阅览器提醒您：
使用本复制品
请尊重相关知识产权！

图 6-3-4　雷达成象的几何关系

(1) F.Leberl 构象模型

F.Leberl 构象模型是依据距离条件和零多普勒条件推导出来的象点和地面点之间的坐标关系模型。如图 6-3-4 所示，摄站 S 和地面点 P 之间满足如下距离条件

$$(X - X_s)^2 + (Y - Y_s)^2 + (Z - Z_s)^2 = R^2 \tag{6-3-18}$$

在平台飞行速度稳定的情况下，摄站坐标可用下面的公式近似表达

$$\begin{cases} X_s = X_{s0} + \dot{X}_s \cdot t \\ Y_s = Y_{s0} + \dot{Y}_s \cdot t \\ Z_s = Z_{s0} + \dot{Z}_s \cdot t \end{cases} \tag{6-3-19}$$

式中 X_{s0}，Y_{s0}，Z_{s0} 为起始行的摄站坐标，$\dot{X}_s$，$\dot{Y}_s$，$\dot{Z}_s$ 为摄站坐标的一阶变率，t 为当前行的成象时间（相对于起始行而言）。而斜距 R 又可表示为

$$R = r_0 + y \cdot M_y \tag{6-3-20}$$

式中 r_0 为扫描延迟，M_y 为距离向上雷达图象的比例尺分母，y 为图象上象点在距离方

向上的坐标。

由于 SAR 图象成象时，雷达天线的运动速度矢量 $(\dot{X}_s,\ \dot{Y}_s,\ \dot{Z}_s)^T$ 与天线到达地面成象点的矢量垂直，因此垂直于飞行方向的射线的多普勒频移为零，即

$$\dot{X}_s \cdot (X - X_s) + \dot{Y}_s \cdot (Y - Y_s) + \dot{Z}_s \cdot (Z - Z_s) = 0 \tag{6-3-21}$$

由 (6-3-18) 式、(6-3-19) 式、(6-3-20) 式和 (6-3-21) 式得

$$\begin{cases} t = \dfrac{\dot{X}_s \cdot (X - X_{s0}) + \dot{Y}_s \cdot (Y - Y_{s0}) + \dot{Z}_s \cdot (Z - Z_{s0})}{\dot{X}_s^2 + \dot{Y}_s^2 + \dot{Z}_s^2} \\ y = \dfrac{R - r_0}{M_y} \\ x = \dfrac{t \cdot \dot{X}_s}{M_x} \end{cases} \tag{6-3-22}$$

式中 M_x 为方位向上雷达图象的比例尺分母，式 (6-3-22) 就是 F.Leberl 构象模型，它包括九个参数 X_{s0}，Y_{s0}，Z_{s0}，$\dot{X}_s$，$\dot{Y}_s$，$\dot{Z}_s$，r_0，M_x，M_y。该模型的缺点是只考虑了外方位元素中摄站坐标的变化，没有考虑外方位元素中角元素的变化，因此只是一个近似公式。由于 F.Leberl 构象模型的近似性，在实际中应用不多，此处不再介绍其误差方程式的具体表达式，有兴趣的读者请自己查阅有关资料。

超星阅览器提醒您：
使用本复制品
请尊重相关知识产权！

(2) G.Konecny 构象模型

G.Konecny 雷达成象模型是 1988 年在京都举行的国际摄影测量与遥感学会会议上，由 G.Konecny 和 W.Schuhr 提出的平距投影的 SAR 图象成象模型，其形式上接近于摄影测量的投影方程。

如图 6-3-5 所示，N-XYZ 为空间直角坐标系，N_0-$X_0Y_0Z_0$ 是与 N-XYZ 平行的数据归化面 ($NN_0 = Z_0$)，S-$x'y'z'$ 为象空间坐标系。地面点 P_i (X_i，Y_i，Z_i) 位于扫描面 $SN'N''$ 内，P_i 点在数据归化面上的垂直投影为 P_{i0} 点，当外方位角元素 $\varphi \neq 0$ 时，P_{i0} 点不在 $SN'N''$ 内，$N'N''$ 是扫描面与数据归化面的交线。以 S 为中心，以斜距 R 为半径在扫描面内划弧与 $N'N''$ 交于 P_{ir} 点，该点的成象与 P_i 点成象一致，也就是说 P_{ir} 为等效地面点。

过 P_{i0} 作平行于 X_0 轴的线段 $P_{i0}P'_{i0}$，它与 $P_{ir}P_{ir}$ 的延长线的交点为 P'_{i0}，过 P_{ir} 作平行于 X_0 轴的线段 $P_{ir}P_{is}$，它与 $N_0P'_{i0}$ 的延长线的交点为 P_{is}，令

$$P'_{i0}P_{ir} = \Delta Y,\ P'_{i0}P_{i0} = \Delta X,\ P'_{i0}P_{is} \approx (Y_i - Y_g),$$

$$P_{ir}N_0 \approx P_{is}N_0,\ P'_{i0}N_0 \approx \sqrt{(X_i - X_g)^2 + (Y_i - Y_g)^2},$$

$$P_{is}N_0 = \sqrt{(X_i - X_g)^2 + (Y_i - Y_g)^2 + (Z_i - Z_g)^2 - H^2}$$

则

$$\frac{\Delta Y}{Y_i - Y_g} = \frac{P'_{i0}N_0 - P_{is}N_0}{P'_{i0}N_0}$$

所以

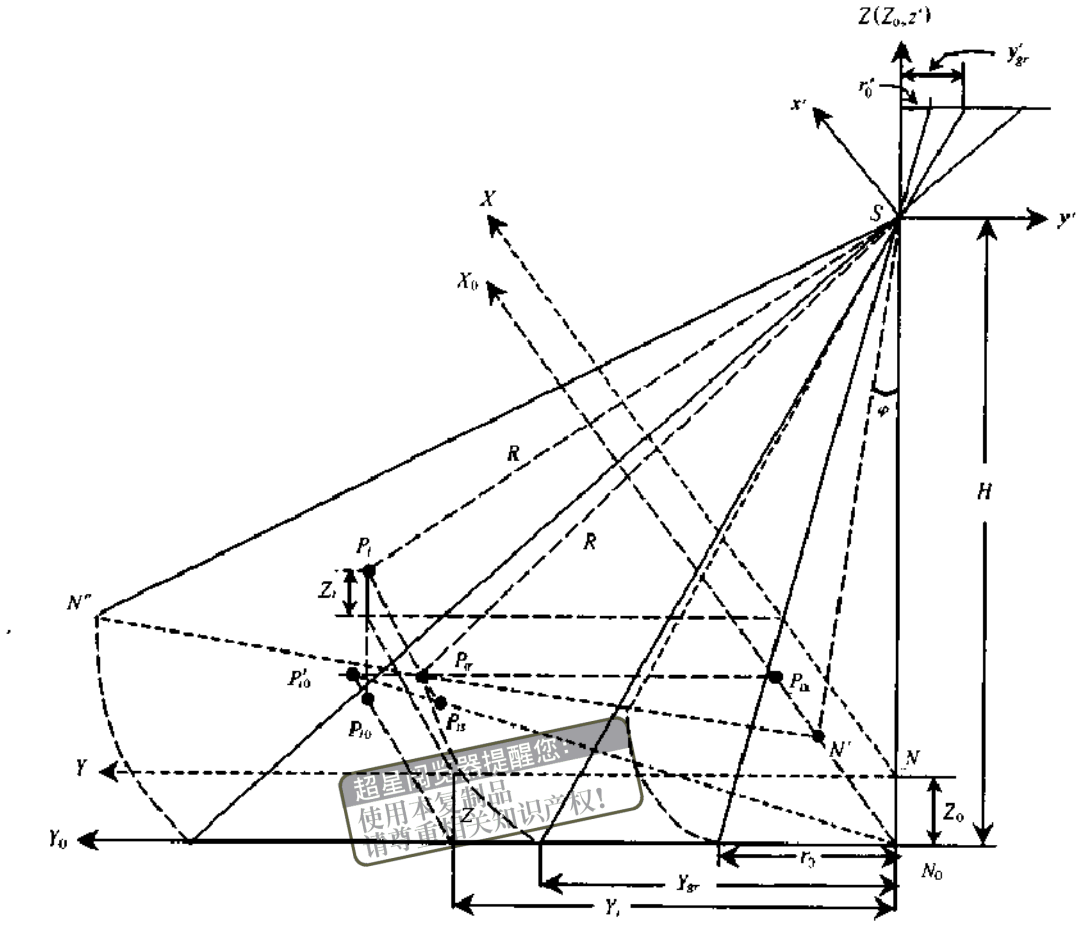


图 6-3-5　斜距与平距的关系

$$\Delta Y = \frac{\sqrt{(X_i - X_{sj})^2 + (Y_i - Y_{sj})^2} - \sqrt{(X_i - X_{sj})^2 + (Y_i - Y_{sj})^2 + (Z_i - Z_{sj})^2 - H^2}}{\sqrt{(X_i - X_{sj})^2 + (Y_i - Y_{sj})^2}} \cdot (Y_i - Y_{sj})$$

令

$$P = \frac{\sqrt{(X_i - X_{sj})^2 + (Y_i - Y_{sj})^2} - \sqrt{(X_i - X_{sj})^2 + (Y_i - Y_{sj})^2 + (Z_i - Z_{sj})^2 - H^2}}{\sqrt{(X_i - X_{sj})^2 + (Y_i - Y_{sj})^2}}$$

则

$$\Delta Y = P \cdot (Y_i - Y_{sj}) \tag{6-3-23}$$

同理可得

$$\Delta X = P \cdot (X_i - X_{sj}) \tag{6-3-24}$$

于是得到平距图象的象点坐标与地面点坐标之间的关系如下

超星阅览器提醒您：
使用本复制品
请遵守相关知识产权！

$$\begin{cases} x'_{gr} = 0 = -f_x \dfrac{a_{1j}(X_i - \Delta X - X_{sj}) + a_{2j}(Y_i - \Delta Y - Y_{sj}) + a_{3j}(Z_0 - Z_{sj})}{c_{1j}(X_i - \Delta X - X_{sj}) + c_{2j}(Y_i - \Delta Y - Y_{sj}) + c_{3j}(Z_0 - Z_{sj})} \\ y'_{gr} = -f_y \dfrac{b_{1j}(X_i - \Delta X - X_{sj}) + b_{2j}(Y_i - \Delta Y - Y_{sj}) + b_{3j}(Z_0 - Z_{sj})}{c_{1j}(X_i - \Delta X - X_{sj}) + c_{2j}(Y_i - \Delta Y - Y_{sj}) + c_{3j}(Z_0 - Z_{sj})} \end{cases} \tag{6-3-25}$$

式中：$H = Z_{sj} + Z_0$；

x'_{gr}，y'_{gr} 为按平距投影的象点坐标；

X_i，Y_i，Z_i 为地面点在空间坐标系中的坐标；

X_{sj}，Y_{sj}，Z_{sj} 为天线几何中心在 j 时刻的位置；

f_x，f_y 为等效焦距；

Z_0 为数据规化面相对与 N-XY 面的高度；

H 为数据规化面的相对航高；

a_{ij}，b_{ij}，c_{ij}（$i=1$，2，3）是第 j 行传感器的方向余弦，其表达式如下

$$\begin{cases} a_{1j} = \cos\varphi_j\cos\kappa_j - \sin\omega_j\sin\varphi_j\sin\kappa_j \\ b_{1j} = \cos\omega_j\sin\kappa_j \\ c_{1j} = \sin\varphi_j\cos\kappa_j + \cos\varphi_j\sin\omega_j\sin\kappa_j \\ a_{2j} = -\cos\varphi_j\sin\kappa_j - \sin\varphi_j\sin\omega_j\cos\kappa_j \\ b_{2j} = \cos\omega_j\cos\kappa_j \\ c_{2j} = -\sin\varphi_j\sin\kappa_j + \cos\varphi_j\sin\omega_j\cos\kappa_j \\ a_{3j} = -\sin\varphi_j\cos\omega_j \\ b_{3j} = -\sin\omega_j \\ c_{3j} = \cos\varphi_j\cos\omega_j \end{cases} \tag{6-3-26}$$

超星阅览器提醒您：
请尊重相关产品版权！

对于星载 SAR 图象，考虑卫星平台运行相对稳定，任意时刻的外方位元素可表示为时间或图象上飞行方向的象坐标 x 的线性函数，即

$$\begin{cases} X_{sj} = X_{s0} + \dot{X}_s \cdot x \\ Y_{sj} = Y_{s0} + \dot{Y}_s \cdot x \\ Z_{sj} = Z_{s0} + \dot{Z}_s \cdot x \\ \varphi_j = \varphi_0 + \dot{\varphi} \cdot x \\ \omega_j = \omega_0 + \dot{\omega} \cdot x \\ \kappa_j = \kappa_0 + \dot{\kappa} \cdot x \end{cases} \tag{6-3-27}$$

式中：X_{s0}，Y_{s0}，Z_{s0}，φ_0，ω_0，κ_0 为 $x=0$ 处的外方位元素；

$\dot{X}_s$，$\dot{Y}_s$，$\dot{Z}_s$，$\dot{\varphi}$，$\dot{\omega}$，$\dot{\kappa}$ 为外方位元素的一阶变化率；

x，y 为雷达图象的象坐标，设雷达图象上的扫描延迟为 r'_0，则象坐标 y，平距投影的象点纵坐标 y'_{gr}，斜距投影的象点纵坐标 y'_s 之间有如下关系

$$\begin{cases} y'_{ge} = y + r'_0 \\ y'_d = \sqrt{(y'_{ge})^2 + f_y^2} \end{cases} \tag{6-3-28}$$

当任意时刻的外方位元素只用图象上飞行方向的象坐标 x 的线性函数近似表示时，G.Konecny 模型中共有 15 个未知参数：X_{s0}，Y_{s0}，Z_{s0}，φ_0，ω_0，κ_0，$\dot{X}_s$，$\dot{Y}_s$，$\dot{Z}_s$，$\dot{\varphi}$，$\dot{\omega}$，$\dot{\kappa}$，r'_0，f_x，f_y，因此进行雷达图象的几何校正至少要有 8 个以上的控制点。若将地面点的坐标也视为观测值，则将（6-3-25）式线性化后的误差方程式为

$$V = A \cdot \Delta X - L \tag{6-3-29}$$

式中：

$$V = \begin{bmatrix} V_x \\ V_y \end{bmatrix}, \quad L = \begin{bmatrix} l_x \\ l_y \end{bmatrix}$$

$$\Delta X = [\Delta\varphi_0\ \Delta\omega_0\ \Delta\kappa_0\ \Delta X_{s0}\ \Delta Y_{s0}\ \Delta Z_{s0}\ \Delta\dot{\varphi}\ \Delta\dot{\omega}\ \Delta\dot{\kappa}\ \Delta\dot{X}_s\ \Delta\dot{Y}_s\ \Delta\dot{Z}_s\ \Delta f_x\ \Delta f_y\ \Delta r'_0\ \Delta X_i\ \Delta Y_i\ \Delta Z_i]$$

$$A = \begin{bmatrix} c_{11} & c_{12} & c_{13} & c_{14} & c_{15} & c_{16} & c_{11}x & c_{12}x & c_{13}x & c_{14}x & c_{15}x & c_{16}x & c_{17} & c_{18} & c_{19} & -c_{14} & -c_{15} & -c_{16} \\ c_{21} & c_{22} & c_{23} & c_{24} & c_{25} & c_{26} & c_{21}x & c_{22}x & c_{23}x & c_{24}x & c_{25}x & c_{26}x & c_{27} & c_{28} & c_{29} & -c_{24} & -c_{25} & -c_{26} \end{bmatrix}$$

其中各系数和常数表达式如下（为了书写方便，在下面的公式中平距图象上象点坐标与对应的地面点坐标都省略了下标 i，即 (X_i, Y_i, Z_i) 简写为 (X, Y, Z)，(x_i, y_i) 简写为 (x, y)；在对 x 求偏导数的公式中 f_x 省略了下标 x，在对 y 求偏导数的公式中 f_y 省略了下标 y）

$$l_x = 0 + f_x \cdot \frac{\overline{X}}{\overline{Z}}, \quad l_y = y + f_y \cdot \frac{\overline{X}}{\overline{Z}}$$

$$\begin{bmatrix} \overline{X} \\ \overline{Y} \\ \overline{Z} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} a_1 & b_1 & c_1 \\ a_2 & b_2 & c_2 \\ a_3 & b_3 & c_3 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} X - \Delta X - X_s \\ Y - \Delta Y - Y_s \\ Z_0 - Z_s \end{bmatrix}$$

$$c_{11} = \frac{\partial x}{\partial \varphi} = -fb_2 - yc_2$$

$$c_{12} = \frac{\partial x}{\partial \omega} = -f\sin\kappa$$

$$c_{13} = \frac{\partial x}{\partial \kappa} = y$$

$$c_{14} = \frac{\partial x}{\partial X_s} = \frac{a_1 f}{Z}(1 + DXX_s) + \frac{a_2 f}{Z} DYX_s$$

$$c_{15} = \frac{\partial x}{\partial Y_s} = \frac{a_2 f}{Z}(1 + DYY_s) + \frac{a_1 f}{Z} DXY_s$$

$$c_{16} = \frac{\partial x}{\partial Z_s} = \frac{1}{Z}(a_3 + a_1 DXZ_s + a_2 DYZ_s)$$

$$c_{17} = \frac{\partial x}{\partial f_x} = \frac{\overline{X}}{\overline{Z}}$$

$$c_{18} = \frac{\partial x}{\partial f_y} = 0.0$$

$$c_{19} = \frac{\partial x}{\partial r'_0} = 0.0$$

超星阅览器提醒：
使用本复制品
请尊重相关知识产权！

$$c_{21} = \frac{\partial y}{\partial \varphi} = \left(f + \frac{y^2}{f}\right)a_2$$

$$c_{22} = \frac{\partial y}{\partial \omega} = -\left(f + \frac{y^2}{f}\right)\cos\kappa$$

$$c_{23} = \frac{\partial y}{\partial \kappa} = 0.0$$

$$c_{24} = \frac{\partial y}{\partial X_s} = \frac{1}{Z}(c_1 y + b_1 f)(1 + DXX_s) + \frac{1}{Z}(b_2 f + c_2 y)DYX_s$$

$$c_{25} = \frac{\partial y}{\partial Y_s} = \frac{1}{Z}(c_2 y + b_2 f)(1 + DYY_s) + \frac{1}{Z}(b_1 f + c_1 f)DXY_s$$

$$c_{26} = \frac{\partial y}{\partial Z_s} = \frac{1}{Z}[(c_3 y + b_3 f) + (c_1 y + b_1 f)DXZ_s + (b_2 f + c_2 y)DYZ_s]$$

$$c_{27} = \frac{\partial y}{\partial f_x} = 0.0$$

$$c_{28} = \frac{\partial y}{\partial f_y} = -\frac{\overline{Y}}{Z}$$

$$c_{29} = \frac{\partial y}{\partial r'_0} = 1.0$$

$$DXX_s = \frac{\partial \Delta X}{\partial X_s} = P_{XS} \cdot DX - P \qquad DYX_s = \frac{\partial \Delta Y}{\partial X_s} = P_{XS} \cdot DY$$

$$DXY_s = \frac{\partial \Delta X}{\partial Y_s} = P_{YS} \cdot DX \qquad DYY_s = \frac{\partial \Delta Y}{\partial Y_s} = P_{YS} \cdot DY - P$$

$$DXZ_s = \frac{\partial \Delta X}{\partial Z_s} = P_{ZS} \cdot DX \qquad DYZ_s = \frac{\partial \Delta Y}{\partial Z_s} = P_{ZS} \cdot DY$$

$$DXZ = \frac{\partial \Delta X}{\partial Z} = P_Z \cdot DX \qquad DYZ = \frac{\partial \Delta Y}{\partial Z} = P_Z \cdot Y$$

超星阅览器提醒您：
使用本资源
请尊重相关知识产权！

$$DX = X - X_S \qquad DZ_1 = Z_0 - Z_S$$

$$DY = Y - Y_S \qquad A_m = DX^2 + DY^2$$

$$DZ = Z - Z_S \qquad C_m = DZ^2 - H^2$$

$$P_{XS} = \frac{\partial P}{\partial X_S} = \frac{AX_s \cdot C_m}{2\sqrt{A_m^4\left(1 + \frac{C_m}{A_m}\right)}} \qquad P_{YS} = \frac{\partial P}{\partial Y_S} = \frac{AY_s \cdot C_m}{2\sqrt{A_m^4\left(1 + \frac{C_m}{A_m}\right)}}$$

$$P_{ZS} = \frac{\partial P}{\partial Z_S} = \frac{-CZ_S}{2\sqrt{A_m^4\left(1 + \frac{C_m}{A_m}\right)}} \qquad P_Z = \frac{\partial P}{\partial Z} = \frac{-CZ}{2\sqrt{A_m^4\left(1 + \frac{C_m}{A_m}\right)}}$$

$$P = \frac{\sqrt{A_m} - \sqrt{A_m + C_m}}{A_m} \qquad CZ = \frac{\partial C_m}{\partial Z} = 2DZ$$

$$AX_s = \frac{\partial A_m}{\partial X_S} = -2DX \qquad AY_s = \frac{\partial A_m}{\partial Y_S} = -2DY \qquad AZ_s = \frac{\partial A_m}{\partial Z_S} = 0.0$$

$$CX_s = \frac{\partial C_m}{\partial X_S} = 0.0 \qquad CY_s = \frac{\partial C_m}{\partial Y_S} = 0.0 \qquad CZ_s = \frac{\partial C_m}{\partial Z_S} = 2DZ$$

利用一定数量的控制点采用最小二乘原理可以求出雷达构象方程中的未知参数，然后利用（6-3-25）式和（6-3-28）式对原始斜距 SAR 图象进行几何和灰度重采样，就可以得到校正后的 SAR 图象。

6.3.5 图象的镶嵌处理

数字影象镶嵌（Mosaicking）是将两幅或多幅数字影象（它们有可能是在不同的摄影条件下获取的）拼在一起，构成一幅整体图象的技术过程。在遥感应用中，影象镶嵌有着重要的应用，例如，为了获得更大范围的地面影象，通常需要将多幅（景）遥感图象拼成一幅影象图。影象镶嵌的技术问题之一是如何将多幅影象从几何上拼接起来，这一步通常是先对每幅图象进行几何校正，将它们规划到统一的坐标系中，然后对它们进行裁剪，去掉重叠的部分，再将裁剪后的多幅影象装配起来形成一幅大幅面的影象。几何拼接的核心问题是影象校正，在前面的章节已进行过阐述，此处不再进行讨论。影象镶嵌的技术问题之二是如何使多幅图象在拼接以后不出现明显的灰度和色彩拼接缝，下面着重讨论拼接缝的消除问题。

1. 拼接缝消除的严密算法

一般地，在拼接的边界上，两幅图象灰度上的细微差别都会导致明显的拼接缝，而在实际的成象过程中，被拼接的图象在拼接边界附近的灰度细微差别几乎是不可避免的。摄影角度的差异、背景的微小变化、成象手段的改变等等都可能造成这种灰度上的差异。因此在拼接中，需要一种技术能够修正待拼接影象在拼接缝附近的灰度值，使之在拼接缝处的灰度有一个光滑的过渡。传统的解决方法是在拼接缝处及其附近采用平滑处理，而这样处理的结果会使影象的分辨率下降，产生影象模糊。从数学上讲，这个过程相当于图象灰度曲面的光滑连接，但实际上图象的拼接与曲面的光滑连接不同，图象灰度曲面的光滑化表现为对图象的模糊化，从而导致图象模糊不清。实践表明：在拼接的部分，若图象的空间频率的改变由 W_{min} 到 W_{max}，记 T_l 和 T_s 分别为 W_{min} 与 W_{max} 对应的波长，则为使拼接后的图象不出现拼接缝，灰度值修改影响的范围应不小于 T_1，而为了使拼接后的图象清晰，灰度值修正影响的范围又要大于 T_S 的两倍。显然当图象在拼接边界附近的空间频率的频带稍宽一点的话，要找出一个合适的灰度值修正影响范围是不可能的。

武汉大学的王建忠教授等人成功地利用小波变换解决了上述矛盾。由于小波变换函数实际上是一个带通滤波器，在不同尺度下的小波分量，实际上占有一定的频宽，j 越大，该分量的频率越高，因此每一个小波分量所具有的频宽是不大的。把待拼接的两幅图象先按小波分解的方法，将它们分解为不同频带的小波分量，然后在不同的尺度下选择不同的灰度值修正影响范围，把两幅图象按不同尺度下的小波分量先拼接起来，然后再用恢度算法，恢复整个图象，这样拼接的结果可以很好地兼顾清晰度和光滑度两个方面的要求。具体做法如下：

设图象 A 与图象 B 是需要拼接或镶嵌的两幅图象，它们的数据分别是 $C_A^0 = C_A^0(n, m)$，$C_B^0 = C_B^0(n, m)$，利用正交小波变换，可以得到各小波分量如下

$$(d_A^{l1}, d_A^{l2}, d_A^{l3}), \cdots, (d_A^{N1}, d_A^{N2}, d_A^{N3}), C_A^N$$

$$(d_B^{l1}, d_B^{l2}, d_B^{l3}), \cdots, (d_B^{N1}, d_B^{N2}, d_B^{N3}), C_B^N$$

现假设要把图象 B 中的一部分 Ω_B 镶嵌到图象 A 中，如图 6-3-6 所示，则令

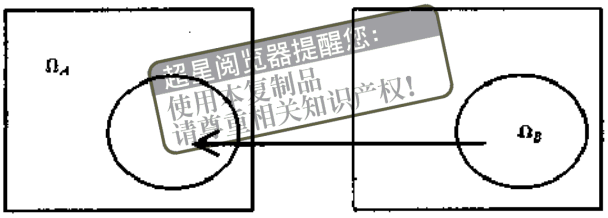
$$K(x,y) = \chi_{\Omega A}(x,y) = \begin{cases} 1 & \text{如果}(x,y) \in \Omega_A \\ 0 & \text{如果}(x,y) \in \Omega_B \end{cases}$$

如果令 K (x, y) 的样本值为 C_Ω^0，它在各个尺度下的光滑化分量为 C_Ω^1，C_Ω^2，……，C_Ω^N，令

$$d^{ij}(k,l) = C_\Omega^{ij}(k,l)d_A^{ij}(k,l) + [1 - C_\Omega^{ij}(k,l)]d_B^{ij}(k,l)$$

$$C^N(k,l) = C_\Omega^N(k,l)C_A^N(k,l) + [1 - C_\Omega^N(k,l)]C_B^N(k,l)$$

其中 $i = 1, 2, \cdots\cdots, N$，$j = 1, 2, 3$，取 $\{(d^{11}, d^{12}, d^{13}), \cdots, (d^{N1}, d^{N2}, d^{N3}), C^N\}$ 为拼接后图象的正交小波变换，则由恢复算法可以得到拼接图象。值得注意的是在做小波变换时要对图象边界进行处理，否则会产生信息丢失。



超星阅览器提醒您：
使用本复制品
请尊重相关知识产权！

图 6-3-6　影象镶嵌示意图

基于小波理论的影象镶嵌算法虽然是严密的，但它是一种并行算法，同时在计算过程中涉及到大量的浮点运算，对于实际生产中的大容量影象进行处理，是不方便的。此外该方法没有给出多幅图象之间的拼接缝消除算法，只能两两进行处理。

2．拼接缝消除的强制改正方法

该方法是先统计拼接缝上任意位置两侧的灰度差，然后将灰度差在该位置两侧的一定范围内强制改正掉。

如图 6-3-7 所示，*abcdef* 是裁剪线 (Cutline)，由于多种因素的影响，在裁剪线位置会形成明显的拼接缝（Seamline）。强制改正法首先统计裁剪线上任意位置在其法线方向上的两侧一定范围内的灰度差 Δg，为了避免改正结果出现条纹效应，每个位置的灰度差 Δg 应在该位置前后的多个位置上统计得到。然后将灰度差 Δg 在该位置法线方向上的两侧一定范围 w 内改正掉，参数 w 称作改正宽度（Feathering Width），它的大小与灰度差 Δg 成正比，Δg 越大，改正宽度 w 也越大。灰度改正时，离拼接缝越近的象点，灰度值改正得越多，离拼接缝越远，改正得越少。

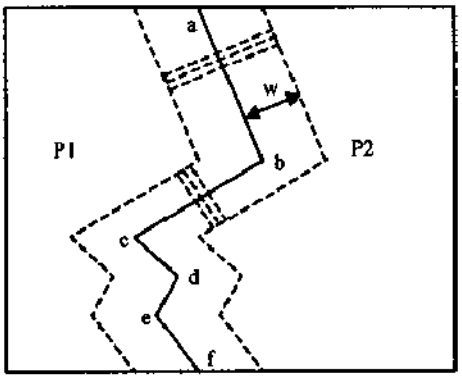


图 6-3-7　拼接缝的强制改正

另一种拼接缝的强制改正方法是基于重叠区影像的拼接缝平滑算法，该算法对拼接点两侧的灰度按如下公式进行处理

$$INi = IAi + (IBi - IAi) \times K$$

$$K = \frac{i}{W} \qquad 0 \leqslant i \leqslant W - 1$$

其中 INi 为平滑处理后得到的象元灰度值，IAi、IBi 分别为重叠区上相同位置两景被镶嵌图象的象元灰度值，W 为灰度平滑宽度，K 为权数。W 由用户给出，其值小于重叠区的宽度，K 在平滑范围内呈线性反向变化。

该算法在图象的几何拼接精度较高（拼接误差在 1 个象元以内）时是非常有效的。对于遥感图象，由于多种因素的影响，如控制点的误差、DIM 的误差、计算过程中的重采样误差等，几何拼接精度很难保证在 1 个象元以内，在这种情况下这种方法的效果不是十分理想。此外对于隔片作业的情况，影象重叠度很小，此时就不能用该算法进行处理。

超星阅览器提醒您：
使用本复制品
请尊重相关知识产权！

第七章　遥感信息增强处理

7.1　彩色合成

人眼对黑白密度的分辨能力有限，大致只有 10 个灰度级，而对彩色影象的分辨能力则要高得多。如果以平均分辨率的 $\Delta\lambda = 3nm$ 计算，人眼可察觉出上百中颜色差别来。这还仅仅是讨论了色别的一个要素，如果加上颜色的其他两个要素：饱和度和亮度，人眼能够辨别彩色差异的级数要远远大于黑白差异的级数。为了充分利用色彩在遥感图象判读中的优势，常常利用彩色合成的方法对多光谱图象进行处理，以得到彩色图象。

彩色图象又可以分为真彩色图象和假彩色图象。真彩色图象上影象的颜色与地物颜色基本一致，假彩色图象是指图象上影象的色调与实际地物色调不一致的图象。利用数字技术合成真彩色图象时，是把红色波段的影象作为合成图象中的红色分量、把绿色波段的影象作为合成图象中的绿色分量、把蓝色波段的影象作为合成图象中的蓝色分量进行合成的结果。遥感中最常见的假彩色图象是彩色红外合成图象，它是在彩色合成时，把近红外波段的影象作为合成图象中的红色分量、把红色波段的影象作为合成图象中的绿色分量、把绿色波段的影象作为合成图象中的蓝色分量进行合成的结果。下面来分析一下植被在真彩色图象和假彩色红外图象上的表现形式。

由图 7-1-1 可知：植被在近红外波段有较高的反射率，其次是在绿色波段。按上述

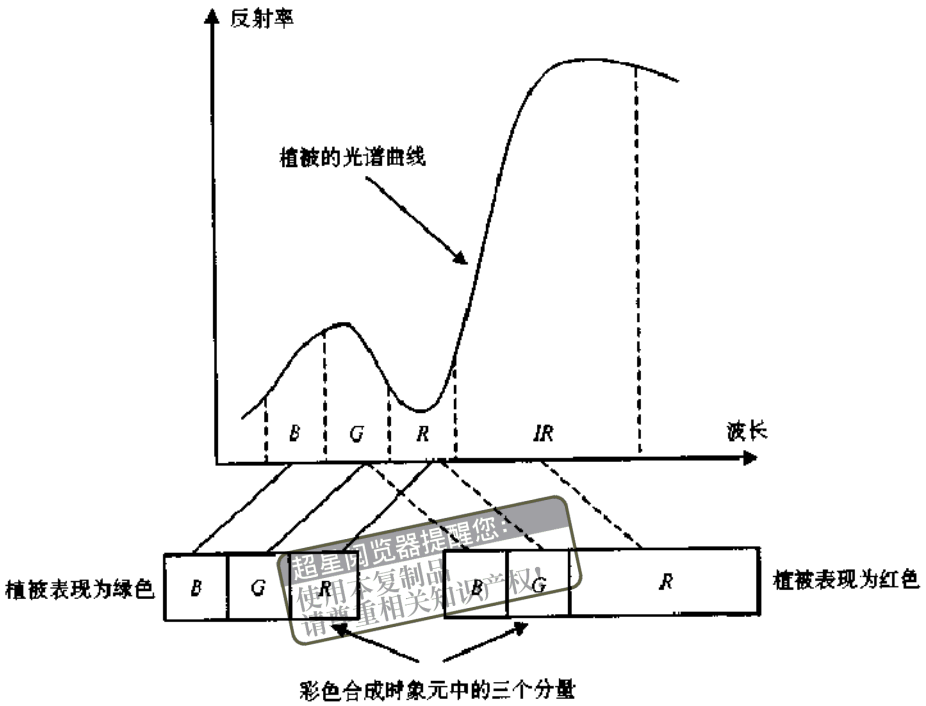


图 7-1-1　真彩色和假彩色合成时象元三个分量的颜色分配情况

方法进行真彩色合成时，绿色分量（对应于植被在绿色波段的反射）在整个象素的三个分量中占得比重最大，所以该象素表现为绿色；而按上述方法进行假彩色红外图象合成时，红色分量（对应于植被在近红外波段的反射）在整个象素的三个分量中占得比重最大，所以该象素表现为红色。假彩色红外图象可以有效地突出植被要素，有利于植被的判读。

7.2 遥感影象信息融合

遥感图象信息融合（Fusion）是将多源遥感数据在统一地理坐标系中，采用一定的算法生成一组新的信息或合成图象的过程。不同的遥感数据具有不同的空间分辨率、波谱分辨率和时相分辨率，如果能将它们各自的优势综合起来，可以弥补单一图象上信息的不足，这样不仅扩大了各自信息的应用范围，而且大大提高了遥感影象分析的精度。

遥感图象信息融合不仅仅表现在多源遥感图象信息之间的叠加方面，还表现在利用多源遥感图象信息进行目标的识别决策上。例如在基于 Bayes 模型的目标识别方案中，可以利用不同平台、不同类型传感器、不同时相的遥感数据通过计算得到目标的融合概率，最后以融合概率为基础实现目标的识别决策。再如在基于 Dempster-Shafer 证据理论（简称为 D-S 理论）的目标识别方案中，可以利用不同平台、不同类型传感器、不同时相的遥感数据通过计算得到目标的综合可信度，以综合可信度为基础就可以实现目标的识别决策。这种以 Bayes 模型、D-S 理论为基础的信息融合方法称之为“信息融合的模型方法”。

多种遥感数据融合的技术关键是：①充分认识研究对象的地学规律；②充分考虑不同遥感数据之间波谱信息的相关性而引起的有用信息的增加和噪声误差的增加，对多源遥感数据作出合理的选择；③解决遥感影象的几何畸变问题，使各种遥感影象在空间位置上能精确配准起来；④选择适当的融合算法，最大限度地利用多种遥感数据中的有用信息。只有对研究对象的地学规律、遥感影象几何和物理特性、成象机理这三者有深刻的认识，并把它们有机的结合起来，信息融合才能达到预期的效果。

遥感数据融合的算法很多，如植被指数算法、缨帽变换、主成分分析、基于模型的方法等等，但总的来说，目前还没有统一的数据融合模型和融合结果的有效评价方法。本节主要介绍几种利用原始遥感数据生成新的信息量更加丰富的遥感影象的算法。

超星阅览器提醒您：
本书为有版权
请尊重相关知识产权！

7.2.1 基于 HIS 变换的遥感影象信息融合

在计算机内定量处理色彩时通常采用 RGB 表色系统，但在视觉上定性的描述色彩时，采用 HIS 显色系统更直观些。HIS 显色系统采用色调（Hue）、饱和度（Saturation）、亮度（Intensity）表示颜色。为了实现两套色彩表示系统之间的转换，必须建立 RGB 空间和 HIS 空间之间的关系模型，RGB 空间和 HIS 空间相互转化的处理过程称之为 HIS 变换。利用 HIS 变换，可以进行多源遥感图象之间的信息融合。

1.HIS 变换的正变换（由 RGB 到 HIS）

令 $M=\max(R, G, B)$，$m=\min(R, G, B)$

$$r=\frac{(M-R)}{(M-m)}, g=\frac{(M-G)}{(M-m)}, b=\frac{(M-B)}{(M-m)}$$

r，g，b 中至少有一个为零或 1。

①$I=\frac{(M+m)}{2.0}$；

②当 $M=m$ 时，$S=0.0$，

当 $M\neq m$，$I\leqslant 0.5$ 时，$S=\frac{(M-m)}{(M+m)}$，

当 $M\neq m$，$I>0.5$ 时，$S=\frac{(M-m)}{(2.0-M-m)}$；

③当 $S=0.0$ 时，$H=0.0$，

当 $S\neq 0.0$，$R=M$ 时，$H=60\cdot(2+b-g)$，

当 $S\neq 0.0$，$G=M$ 时，$H=60\cdot(4+r-b)$，

当 $S\neq 0.0$，$B=M$ 时，$H=60\cdot(6+g-r)$。

超星阅览器提醒您：使用本复制品，请尊重相关知识产权！

2.HIS 变换的逆变换（由 HIS 到 RGB）

当 $I\leqslant 0.5$ 时，令 $M=I\cdot(1.0+S)$，

当 $I>0.5$ 时，令 $M=I+S-I\cdot S$，

令 $m=2.0\cdot I-M$

①$R=f(m, M, H)$；

②$G=f(m, M, H-120)$；

③$B=f(m, M, H-240)$。

上面三式的右端可以改写成函数 $f(m, M, h)$ 的形式，当 h 为负数时，可加上 360 使之为正，f 的具体形式为

当 $0\leqslant h<60$ 时，$f=m+\frac{(M-m)\cdot h}{60}$；

当 $60\leqslant h<180$ 时，$f=M$；

当 $180\leqslant h<240$ 时，$f=m+\frac{(M-m)(240-h)}{60}$；

当 $240\leqslant h<360$ 时，$f=m$。

3.HIS 变换在遥感影象信息融合中的应用

利用 HIS 变换，可以实现不同空间分辨率的遥感图象之间的几何信息的叠加。例如，对于 SPOT 全色波段的图象（分辨率为 10m，图象大小为 6000 象元×6000 象元）和多光谱图象（分辨率为 20m，图象大小为 3000 象元×3000 象元），可先对多光谱图象进行重采样，使其在图象大小方面和全色波段的图象相一致。然后对三个波段的多光谱实施 HIS 正变换，并用 10m 分辨率的全色波段图象替换经 HIS 正变换以后得到的亮度分量 I，最后进行 HIS 逆变换可得到 10m 分辨率的多光谱图象，这个过程如图 7-2-1 所示。

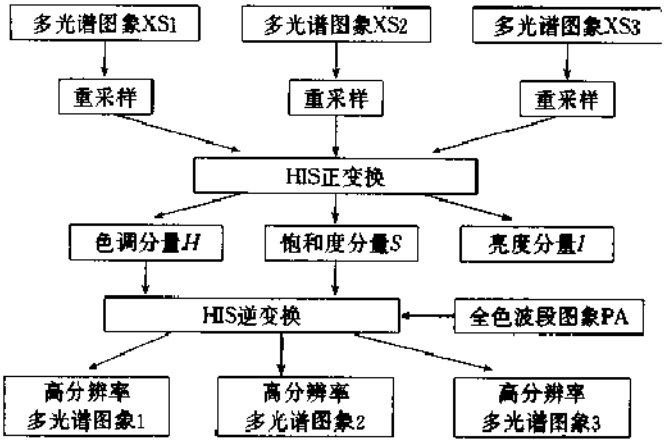


图 7-2-1 SPOT 全色波段和多光谱图象的信息融合

在多种遥感数据融合处理中，最重要的是掌握信息融合的机理。例如在上面的处理中，利用 HIS 正变换把三个波段的多光谱图象变成了具有明确物理意义的三个量：亮度、饱和度和色调。而亮度分量图象上的象素值反映了地物在 0.50～0.59μm、0.61～0.68μm、0.79～0.89μm 三个波段上辐射强度的总和，全色波段图象上的象素值反映了地物在 0.51～0.73μm 波段上的辐射强度，物理意义基本相同，因此这种替换是合理的。

此外由于 SPOT 多光谱图象中的红、绿波段与全色波段的相关性很强，也可以采用相关系数的方法将全色波段的信息融合到多光谱图象中去，具体方法如下：

①对多光谱图象进行重采样，使其大小和全色波段图象一致。

②计算多光谱图象各波段与全色波段图象的相关系数

$$r(P,X_k)=\frac{\sum_{i=1}^{m}\sum_{j=1}^{n}(P(i,j)-\overline{P})\cdot(X_k(i,j)-\overline{X_k})}{\sqrt{\sum_{i=1}^{m}\sum_{j=1}^{n}(P(i,j)-\overline{P})^2\cdot\sum_{i=1}^{m}\sum_{j=1}^{n}(X_k(i,j)-\overline{X_k})^2}} \tag{7-2-1}$$

式中 $k=1,2,3$，图象的长、宽分别为 m，n，$P(i,j)$ 表示全色波段图象上 (i,j) 处的象素值，$\overline{P}$ 为全色波段图象的灰度平均值，$X_k(i,j)$ 表示重采样后的多光谱中第 k 波段图象上 (i,j) 处的象素值，$\overline{X_k}$ 为重采样后的多光谱中第 k 波段图象的灰度平均值。

③按下式将全色波段图象的信息融合到多光谱图象各波段中

$$X_k^*(i,j)=\frac{1}{2}[(1+|r(P,X_k)|)\times P(i,j)+(1-|r(p,X_k)|)\times X_k(i,j)] \tag{7-2-2}$$

超星阅览器提醒您：
使用本复制品
请尊重相关知识产权！

式中 $k=1,2,3$，$i=1,2,\cdots,m$，$j=1,2,\cdots,n$。$X_k^*(i,j)$ 即是融合了全色波段信息后第 k 波段图象上 (i,j) 处的灰度值。

7.2.2 基于小波变换的遥感影象信息融合

1. 正交二进小波变换

假设有一个二维图象 $f(x,y)\in V_{j+1}^2$，$\{c_{m,n}^{j+1},\ m,n\in Z\}$ 是 $f(x,y)$ 在分辨

率 $j+1$ 上的近似表示，则二维信号 $\{c^{j+1}_{n,n},\ m,\ n\in\mathbf{Z}\}$ 的有限正交小波分解公式为

$$\begin{cases} c^{j}_{m,n} = \dfrac{1}{2}\displaystyle\sum_{k,l\in Z} c^{j+1}_{k,l}h_{k-2m}h_{l-2n} \\ d^{j1}_{m,n} = \dfrac{1}{2}\displaystyle\sum_{k,l\in Z} c^{j+1}_{k,l}h_{k-2m}g_{l-2n} \\ d^{j2}_{m,n} = \dfrac{1}{2}\displaystyle\sum_{k,l\in Z} c^{j+1}_{k,l}g_{k-2m}h_{l-2n} \\ d^{j3}_{m,n} = \dfrac{1}{2}\displaystyle\sum_{k,l\in Z} c^{j+1}_{k,l}g_{k-2m}g_{l-2n} \end{cases} \tag{7-2-3}$$

相应的重建公式为

$$c^{j+1}_{m,n} = \frac{1}{2}\Big(\sum_{k,l\in Z} c^{j}_{k,l}\tilde{h}_{2k-m}\tilde{h}_{2l-n} + \sum_{k,l\in Z} d^{j1}_{k,l}\tilde{h}_{2k-m}\tilde{g}_{2l-n} + \sum_{k,l\in Z} d^{j2}_{k,l}\tilde{g}_{2k-m}\tilde{h}_{2l-n} + \sum_{k,l\in Z} d^{j3}_{k,l}\tilde{g}_{2k-m}\tilde{g}_{2l-n}\Big) \tag{7-2-4}$$

公式（7-2-3）和（7-2-4）即为正交二进小波变换的正变换和反变换公式。在实际计算中，通常给出滤波器系数数列 $\{h_k,\ k\in\mathbf{Z}\}$，其余的滤波器系数按下面的公式求出

$$\begin{cases} g_k = (-1)^{-1+k}h_{1-k} \\ \tilde{h}_n = h_{1-n} \\ \tilde{g}_n = g_{1-n} \end{cases} \tag{7-2-5}$$

对于一幅数字图象 c^{j+1}，按（7-2-3）式分解后可形成 4 幅子图象 c^j，d^{j1}，d^{j2}，d^{j3}，并且由这 4 幅子图象可以按（7-2-4）合成原图象 c^{j+1}，这个过程可形象地用图 7-2-2 来表示。

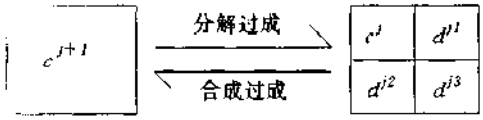


图 7-2-2　图象的小波分解与重构

图象 c^{j+1} 分解后各分量的含义如下：

c^j：集中了原始影象 c^{j+1} 中的主要低频成分；

d^{j1}：对应着 c^{j+1} 中垂直方向的高频边缘信息；

d^{j2}：对应着 c^{j+1} 中水平方向的高频边缘信息；

d^{j3}：对应着 c^{j+1} 中 45°方向的高频边缘信息。

超星阅览器提醒您
使用本复制品
请尊重相关知识产权

2. 小波变换在遥感影象信息融合中的应用

采用小波变换的方法进行遥感图象信息融合的思想是：首先将待融合的图象重采样成尺度大小一致的图象，再将它们用小波正变换算法分解为不同分辨率的子图象，信息融合一般在分解后的高频子图象上进行，最常用的信息融合方法是：计算高频子图象上每个象素的局部平均梯度（或局部方差、局部能量），以该象素的局部平均梯度（或局部方差、局部能量）为准则，确定融合后的高频子图象上象素的值。例如设待融合的两

幅图象分别为$A(x, y)$和$B(x, y)$，不同分辨率的高频子图象分别为$A_j^k(x, y)$和$B_j^k(x, y)$（$k=1, 2, 3$，j为尺度参数），由不同分辨率的高频子图象得到的梯度图象分别为$GA_j^k(x, y)$和$GB_j^k(x, y)$，则不同分辨率上的高频融合子图象$F_j^k(x, y)$为

当$GA_j^k(x, y) \geqslant GB_j^k(x, y)$时，$F_j^k(x, y) = GA_j^k(x, y)$；

当$GA_j^k(x, y) < GB_j^k(x, y)$时，$F_j^k(x, y) = GB_j^k(x, y)$。

以高频融合子图象$F_j^k(x, y)$作为小波分解后的高频信息，利用小波逆变换就可以得到包含$A(x, y)$和$B(x, y)$两幅图象信息的融合图象。

7.2.3 遥感影象和DTM数据之间的复合

用于信息融合的原始数据可以是遥感影象，也可以是非遥感数据，如地面的高程数据DTM（Digital Terrain Model）等。利用地面的DTM数据，可以消除遥感影象上由于地形起伏而产生的几何变形，提高遥感影象的定位精度。地面的DTM数据也可以作为辅助数据用于遥感图象的分类识别，以提高遥感影象的分类精度。对于二维的遥感影象，在有了相应地区的DTM数据以后，利用计算机图形学的算法，可以生成具有真实感的三维立体图象（如图7-2-3所示），并且可以从多角度或从指定路线上进行动态漫游和观察。



图7-2-3 遥感影象与DTM数据的复合结果

7.3 主成分分析

7.3.1 主成分分析算法及其应用

主成分分析是基于变量之间的相互关系，在尽量不丢失信息的前提下利用线性变换的方法实现数据压缩。

设有向量$X \in R^n$可用一组正交规一化的基向量$\{u_i, i=1, 2, \cdots, n\}$来表示，即

$$X = \sum_{j=1}^{n} c_j u_j \tag{7-3-1}$$

将上式两边同乘以 u_i'（u_i' 表示 u_i 的转置，以下类同）得

$$u_i' X = u_i' \cdot \sum_{j=1}^{n} c_j u_j = c_i \tag{7-3-2}$$

假如只用 X 中的$d(d<n)$ 个分量来估计 X，即

$$\hat{X} = \sum_{j=1}^{d} c_j u_j \tag{7-3-3}$$

则由此引起的均方误差为

$$\varepsilon = (X - \hat{X})' \cdot (X - \hat{X})$$

$$= \sum_{j=d+1}^{n} c_j u_j' u_j c_j = \sum_{j=d+1}^{n} c_j^2$$

将（7-3-2）式代入上式得

$$\varepsilon = \sum_{j=d+1}^{n} u_j' X X' u_j \tag{7-3-4}$$

令 $S = X \cdot X'$，则

$$\varepsilon = \sum_{j=d+1}^{n} u_j' S u_j \tag{7-3-5}$$

要使用 $\hat{X}$ 估计 X 产生的平方误差 ε 最小，可用拉格朗日乘数法，求出满足

$$u_i' u_j = \begin{cases} 1 & j = i \\ 0 & j \neq i \end{cases} \tag{7-3-6}$$

超星阅览器提醒您：
使用本复制品
请尊重相关知识产权！

的 u_j（$j = 1, 2, \cdots, n$）的解为

$$(S - \lambda_j I) \cdot u_j = 0 \tag{7-3-7}$$

或

$$\lambda_j = u_j' S u_j \tag{7-3-8}$$

式中 I 为单位矩阵，λ_j 为 S 的特征根，u_j 为 S 的特征向量。将（7-3-8）式代入（7-3-5）式得

$$\varepsilon = \sum_{j=d+1}^{n} \lambda_j \tag{7-3-9}$$

要使用 $\hat{X}$ 估计 X 产生的平方误差 ε 最小，需将 n 个特征向量按照特征根由大到小的顺序排列构成一组正交规一化的基向量 $\{u_j,\ i = 1, 2, \cdots, n\}$，向量 $X \in R^n$ 在此基向量组上表示出来后，仅用 X 中的$d(d<n)$ 个分量来近似表示 X 所产生的平方误差最小。

根据上面的推导，得到主成分分析算法如下：

设有向量集 $X = \{X_i,\ i = 1, 2, \cdots, N\} \in R^n$，$E(X)$ 为 X 的数学期望，U 是 X 的协方差矩阵 C 的特征向量按其特征根由大到小的顺序排列而构成的变换矩阵，则称

$$Y_i = UX_i \tag{7-3-10}$$

和

$$X_i = U^T Y_i \tag{7-3-11}$$

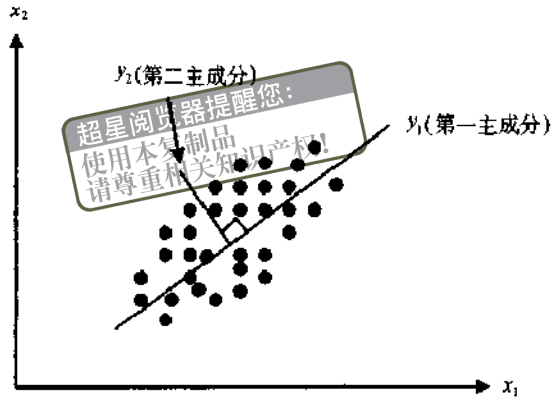
为主成分分析算法，其中 $Y = \{Y_i,\ i = 1, 2, \cdots, N\} \in R^n$。主成分分析算法的性质如下：

①主成分分析算法是一正交变换；

②主成分分析后所得到的向量 $\boldsymbol{Y}_i$ 中各元素互不相关；

③从离散主成分分析后所得到的向量 $\boldsymbol{Y}_i$ 中删除后面的（$n-d$）个元素而只保留前 $d(d<n)$ 个元素时所产生的误差满足平方误差最小的准则。

主成分分析的原理如图 7-3-1 所示，原始数据为二维数据，两个分量 x_1，x_2 之间存在相关性，具有如图所示的分布，通过投影，各数据可以表示为 y_1 轴上的一维点数据，从二维空间中的数据变成一维空间中的数据会产生信息损失，为了使信息损失最小，必须按照使一维数据的信息量（方差）最大的原则确定 y_1 轴的取向，新轴 y_1 称作第一主成分。为了进一步汇集剩余的信息，可求出与第一轴 y_1 正交、且尽可能多地汇集剩余信息第二轴 y_2，新轴 y_2 称作第二主成分。



超星阅览器提醒您：
使用本复制品
请尊重相关知识产权!

图 7-3-1　主成分分析的原理

对多光谱图象作主成分分析以后保留多少个主分量比较适合？通常情况下采用指标 V 进行衡量

$$V=\sum_{i=1}^{d}\lambda_i/\sum_{i=1}^{n}\lambda_i \tag{7-3-12}$$

在给出 V 值的情况下可确定 d 的大小。

在遥感图象分类中，常常利用主成分分析算法来消除特征向量中各特征之间的相关性并进行特征选择。主成分分析算法还可以被用来进行高光谱图象（Hyperspectral Images）数据的压缩和信息融合。例如，对 Landsat TM 的 6 个波段的多光谱图象（热红外波段除外）进行主成分分析，然后把得到的第 1，2，3 主分量图象进行彩色合成，可以获得信息量非常丰富的彩色图象。

7.3.2　快速近似主成分分析算法

1. 主成分分析算法的缺点

为了在下面的讨论中符号统一，现将传统的主成分分析算法归纳如下：

设有向量集 $\boldsymbol{X}=\{\boldsymbol{X}_n,\ n=1,\ 2,\ \cdots,\ N\}\in R^d$，$E(X)$ 为 $\boldsymbol{X}$ 的数学期望，U 是 $\boldsymbol{X}$ 的协方差矩阵 C 的特征向量按其特征根的大小的顺序排列而构成的变换矩阵，则称

$$Y_n = UX_n \tag{7-3-13}$$

和

$$X_n = U^T Y_n \tag{7-3-14}$$

为主成分分析算法，其中 $Y = \{Y_n,\ n = 1, 2, \cdots, N\} \in R^d$。

上面介绍的主成分分析的缺点是：当 X_n 维数 d 很大时，求 X 的协方差阵所对应的特征向量的计算量十分庞大，即使已得到变换矩阵 U，要实施（7-3-13）式和（7-3-14）式的正、反变换计算量也很大，且没有快速算法的支持，这就限制了主成分分析算法的应用范围。研究表明：利用小波包算法作主成分分析，其近似性较好，而且计算量较少。下面讨论利用小波包算法作近似主成分分析时小波包基的选取准则和方法。

2. 小波包变换

小波包是由许多小波函数组成的集合。设有函数族 $\{w_n(x),\ n \in N\}$，它们满足如下关系

$$w_{2n}(x) = \sum_k h_k w_n(2x - k) \tag{7-3-15}$$

$$w_{2n+1}(x) = \sum_k g_k w_n(2x - k) \tag{7-3-16}$$

超星阅览器提醒：
使用本复制品
请尊重相关知识产权！

当 $n = 0$ 时，$w_0(x) = \phi(x)$，$w_1(x) = \psi(x)$，其中 $\phi(x)$ 为尺度函数，$\psi(x)$ 为小波函数，$\{h_k\}$ 和 $\{g_k\}$ 是与尺度函数和小波函数相对应的低通和高通滤波器 QMF 的系数。则称函数族 $\{w_n(x),\ x \in N\}$ 是由 $w_0(x) = \phi(x)$ 所确定的小波包。根据（7-3-15），（7-3-16）式可得由 $w_{2n}(x)$，$w_{2n+1}(x)$ 重构 $w_n(x)$ 的公式如下

$$w_n(2x - l) = \sum_k \{p_{l-2k} w_{2n}(x - k) + q_{l-2k} w_{2n+1}(x - k)\} \tag{7-3-17}$$

其中（$\{p_k\}$，$\{q_k\}$）是和（$\{h_k\}$，$\{g_k\}$）对应的 QMF 滤波器。

同小波的分解与重构一样，可以得到基于小波包的分解与重构算法如下：

设 $A_n^{2^j} f(x)$ 是函数 $f(x)$ 在分辨率为 2^j 的小波包 w_n 的近似表示，即

$$A_n^{2^j} f(x) = \sum_k S_{n,k}^j \cdot w_n(2^j x - k) \tag{7-3-18}$$

其中 $S_{n,k}^j = 2^{\frac{j}{2}} \int_{-\infty}^{+\infty} f(x)\ w_n(2^j x - k)\ dx$

则由（7-3-15），（7-3-16）式可得分解公式如下

$$\begin{cases} S_{2n,l}^{j-1} = \sum_m h_{m-2l} S_{n,m}^j \\ S_{2n+1,l}^{j-1} = \sum_m g_{m-2l} S_{n,m}^j \end{cases} \tag{7-3-19}$$

由（7-3-17）式可得重构公式如下

$$S_{n,k}^j = \sum_l p_{k-2l} S_{2n,l}^{j-1} + \sum_l q_{k-2l} S_{2n+1,l}^{j-1} \tag{7-3-20}$$

实际上，小波分解是小波包分解的特例，当仅使用小波包的 $w_0(x)$ 和 $w_1(x)$ 时，小波包变换就变成小波变换，若对小波分解后的各个高频成分也进行小波分解，就转化为小波包变换，因此小波包变换是小波变换的直接延伸。

3. 快速近似主成分分析算法的变换矩阵构造

快速近似主成分分析算法的变换矩阵构造的基本思想是：对于向量集 $\boldsymbol{X}$，从其对应的小波库中按一定的准则选取一组正交基（或称小波包基）来组成主成分分析算法的变换核 U，这组正交基称为该准则下的最佳基。下面先来讨论一下从小波库中选取最佳基的准则。

设$\delta(\boldsymbol{X})$ 为向量集 $\boldsymbol{X}$ 的方差向量，即有

$$\delta(\boldsymbol{X})(i) = \frac{1}{2}\sum_{n=1}^{N}[\boldsymbol{X}_n(i) - \overline{\boldsymbol{X}}(i)]^2, i = 1,2,\cdots,d \tag{7-3-21}$$

其中

$$\overline{\boldsymbol{X}} = E(\boldsymbol{X}) = \frac{1}{N}\sum_{n=1}^{N}\boldsymbol{X}_n$$

令

$$Var(\boldsymbol{X}) = \|\delta(\boldsymbol{X})\|^2 = \sum_{k=1}^{d}[\delta(\boldsymbol{X})(k)]^2$$

则定义正交变换矩阵 U 的变换码增益（Transform Coding Gain）$G_{TC}(U)$ 为

$$G_{TC}(U) = \frac{Var(U\boldsymbol{X})}{\exp H(U\boldsymbol{X})} \tag{7-3-22}$$

式中

$$H(\boldsymbol{X}) = \frac{1}{d}\sum_{i=1}^{d}\log\delta(\boldsymbol{X})(i) \tag{7-3-23}$$

可以证明：主成分分析算法对应于 $G_{TC}(U)$ 最大或$H(U\boldsymbol{X})$ 最小。现在用小波包变换来代替主成分分析算法，很自然应该用（7-3-23）式作为从小波库中挑选最佳基的准则或称为代价函数。下面给出信号按小波包算法分解后所形成的二叉树上的每个节点所对应的代价函数的计算公式。

设有信号 X_n，把它按小波包算法分解后第 S 层上第 f 个节点中的系数序列为 $\{\lambda_{sf}^{(n)}(p)\}$，则对信号集 $\boldsymbol{X}$ 中的所有元素 $\boldsymbol{X}_n$，$n = 1, 2, \cdots, N$，按下式计算后可以得到一个方差二叉树

$$\delta_{sf}^2(\boldsymbol{X})(p) = \frac{1}{N}\sum_{n=1}^{N}[\lambda_{sf}^{(n)}(p)]^2 - \left[\frac{1}{N}\sum\lambda_{sf}^{(n)}(p)\right]^2 \tag{7-3-24}$$

则定义该方差二叉树中第 S 层上第 f 个节点所对应的代价函数$H(V_{sf})$ 为

$$H(V_{sf}) = \sum_{p=1}^{d/2^s}\delta_{sf}(\boldsymbol{X})(p) \tag{7-3-25}$$

则以代价函数 $H(V_{sf})$ 为准则搜索该方差二叉树就可以从小波库中找到一组最佳基。关于在代价函数最小的准则下如何寻找最佳基，有如下的定理：

定理 1 设有一代价函数 M，对于 $x \in V$，如果$M(Bx)$ 是最小的，则 $\boldsymbol{B}$ 为最好基，它可用如下的方式找到：

令 $\boldsymbol{B}_{k,n}$是与信号集$\boldsymbol{X}$ 对应的二叉树上第 k 层第 n 个节点相对应的标准基，固定尺度参数 k，对于所有的$0 \leqslant n \leqslant 2^k$，$\boldsymbol{A}_{k,n}$为从相对于$x \in span\{\boldsymbol{B}_{k,n}\}$ 的小波库中挑选出的最好基，很显然对于二叉树最顶层的节点有 $\boldsymbol{A}_{0,0} = \boldsymbol{B}_{0,0}$（因为该层只有一个节点），则第 $(k+1)$ 层上的最佳基可用下述递归公式得到

超星阅读器
请勿用于商业用途
侵权请联系删除!

$$\boldsymbol{A}_{k+1,n}=\begin{cases}\boldsymbol{A}_{k,2n}\oplus\boldsymbol{A}_{k,2n+1} & M(\boldsymbol{A}_{k,2n}x)+M(\boldsymbol{A}_{k,2n+1}x)<M(\boldsymbol{B}_{k+1,n}x)\\ \boldsymbol{B}_{k+1,n} & \text{其他}\end{cases}$$

定理 1 可以用归纳法加以证明，此处不再详述。下面仅用图示的方法说明方差二叉树上每个节点的代价函数值按（7-3-25）式计算出来后如何用定理 1 去寻找最佳基。图 7-3-2 为信号的方差的二叉树，块中的数字为该节点的代价函数值，搜索最佳基的过程分为三步：

①标记方差二叉树的最底层的所有节点，如图 7-3-3 所示。

②由下而上，如方差二叉树中的一个父结点的代价函数值小于其子结点的代价函数值之和，则标记该结点，否则不标记该结点，而用其子结点的代价函数值之和取代该父结点的代价函数值，如图 7-3-4 所示。这样做是为了保证每个节点只比较两次，一次是作为父节点，一次是作为子节点。

③取所有已标记过节点中的最高层节点所对应的基构成一组最佳基，如图 7-3-5 中的晕线块所示。

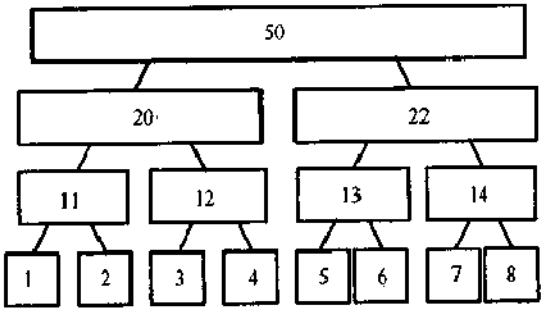


图 7-3-2　方差二叉树，方块中的数字为该节点的代价函数值

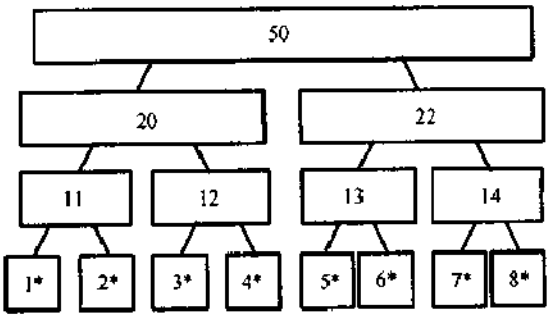


图 7-3-3　第一步：用“*”标记最底层所有节点

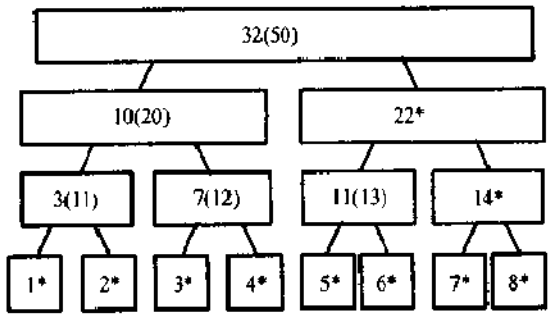


图 7-3-4　第二步：用“×”标记所有具有较低代价的节点

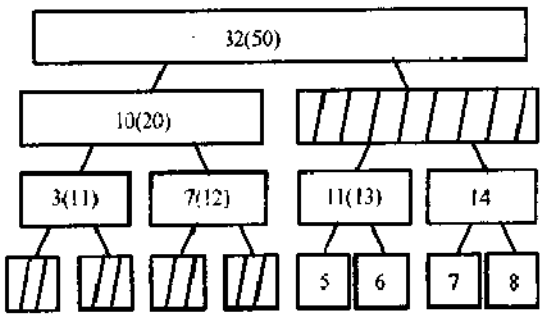


图 7-3-5　第三步：保留已标记过节点中的最高层节点（如晕线块所示）

假如把按方差二叉树搜索到的最佳基用矩阵 U 表示，为了获得类似 K-L 变换在数据压缩中具有平方误差最小的性质，需要将 U 的每一行 U_i，$i=1,2,\cdots,d$，按照使 $\delta(UX)$ 递减的顺序排列。这一步和通过把 UX 的各个元素值按照其绝对值递减的顺序来排列的效果是一致的。

超星阅览器提醒您：
非版本复制品
请尊重版权！

应当指出：严格的主成分分析算法是基于 $H(UX)$ 最小而得到的，它是对向量集 X 中所有向量的变换值来计算 $H(UX)$ 的，因此它是基于总体 $H(UX)$ 最小而得到的。

而本文所用的代价函数都是基于二叉树上每个节点的，因此所得到的变换矩阵和基于总体$H(UX)$最小而得到的矩阵相比具有一定的误差，所以本文的快速主成分分析算法是近似的。美国联邦调查局 FBI 用这种方法对 700000 象素大小的指纹图象（$d \approx 10^6$）和 128×128 象素大小的面部图象（$d = 128^2$）作了近似的主成分分析试验研究，在精度和速度方面都取得了令人满意的结果。

4. 快速近似主成分分析算法的复杂度分析

设信号集 X 的维数为d，则按传统的方法构造主成分分析算法的变换矩阵的复杂度为$O(Nd^2)$，N 为X 中的样本个数。而按本文的方法来构造近似主成分分析算法的变换矩阵，则每步的计算复杂度如下：

①将 N 个样本 $\{X_n \in R^d,\ n=1,\ 2,\ \cdots,\ N\}$ 用小波包算法展开成小波包系数的复杂度为$O(N \cdot d \cdot \log d)$；

②按照（7-3-25）式构造方差二叉树的复杂度为$O(d \cdot \log d)$；

③按最小代价准则从方差二叉树中寻找最佳基的复杂度最大为$O(d + d \cdot \log d)$；

④将最佳基按照使$\delta(UX)$递减顺序排序的复杂度为$O(d \cdot \log d)$。

上述四步加起来总的复杂度为$O(N \cdot d \cdot \log d)$。由此可见，当 X 的维数为d 很大时有$O(N \cdot d \cdot \log d) \ll O(Nd^2)$。此外，对一个 d 维的矢量作严格的主成分分析算法，其计算复杂度为$O(d^2)$，而本文的方法只要用最佳基把该矢量展开成小波包系数即可，其计算复杂度最大为$O(d \cdot \log d)$，同理当 d 很大时有$O(d \cdot \log d) \ll O(d^2)$。

超星阅览器提醒您
使用本复制品
请尊重相关知识产权

7.4 K-T 变换及其应用

上面所述的主成分分析是线性变换的一种。1976 年，Kauth 和 Thomas 发现了另一种线性变换，它使坐标空间发生旋转，但旋转后的坐标轴不是指向主成分的方向，而是指向另外的方向，这些方向与地面景物有密切的关系，特别是与植物生长过程和土壤有关。这种变换既可以实现信息压缩，又可以帮助解译分析农业特征，因此有很大的实际应用意义。目前对这个变换的研究主要集中在 MSS 与 TM 两种遥感数据的应用分析方面。下面先以 MSS 为例进行介绍，然后再推广到 TM 数据。

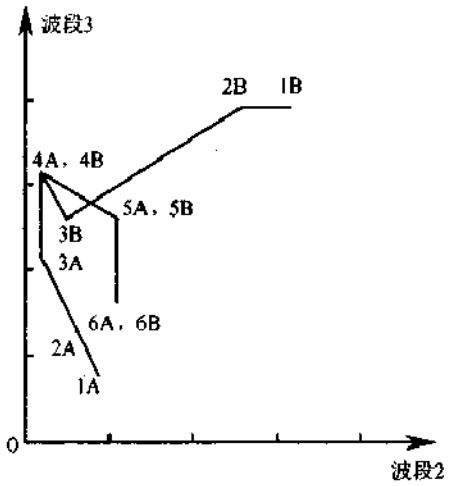
Kauth-Thomas 变换，简称 K-T 变换，又形象地称为“缨帽变换”，这种变换着眼点在于农作物生长过程而区别于其他植被覆盖，力争抓住地面景物在多光谱空间中的特征。

7.4.1 K-T 变换在 MSS 数据分析中的应用

首先研究 MSS 数据，以 MSS2 和 MSS3 为例，选择两种不同的土壤样本，一种深色土壤，光谱特性是暗的，另一种浅色土壤是亮的。在这两种不同土壤上种植小麦，选择小麦不同生长期的图象，把图象中的象元放在 2 维光谱空间相应的位置上，于是形成了两条农作物小麦的生命发展线，构成一个三角形的形状，如图 7-4-1 所示。从暗土生长线可以看出，由于叶绿素在植物生长过程中的增加，覆盖度加大，土壤较暗，表现为第 3 波段亮度加大而第 2 波段亮度减小（即近红外反射强而红光反射低的规律）。到了

4 的位置便是绿色小麦生长的顶峰，小麦光谱占上风，土壤被覆盖，因此，4A 和 4B 交合到一点，然后一起变黄和衰老。

将这个例子推广，对于一般农作物的生长过程有如图 7-4-2 所示的规律。首先，在第 2 波段和第 3 波段组成的子空间中（如图 7-4-2（a）所示），当植物还没发芽时，各种裸露的土壤，由深色土壤逐步过渡到浅色土壤形成一条土壤线，由土壤线上各点作起始点都能勾绘出一条农作物的生长线（图中只画出了从最深和最浅的两点开始的生长线）。1 处为裸土，只反映了土壤本身的光谱特性；2 处为农作物破土出露，随着农作物生长，植被覆盖面也越来越大。与此同时，由于太阳光从偏东方向入射时，使得植物阴影的影响增加，象元的光谱值是作物、阴影和土壤的综合反映，这时，对于深色土壤，阴影影响不大，所以随着作物覆盖的增加，波段 3 上绿色植物近红外的反射急剧增大，生长线上升；对于浅色土壤，阴影影响较大，减少了原象元中高亮度的土壤光谱的影响，所以尽管绿色作物近红外光谱反射随着覆盖的增加而增加，但综合效应并没有使这条生长线升高。直到农作物成熟期的到来（即图中标号 4 处），绿色覆盖达到高峰，几乎不



A. 暗土　B. 亮土

1. 裸土　2. 发芽　3. 生长期　4. 成熟期　5. 变黄期　6. 衰老期

图 7-4-1　小麦生长线实例

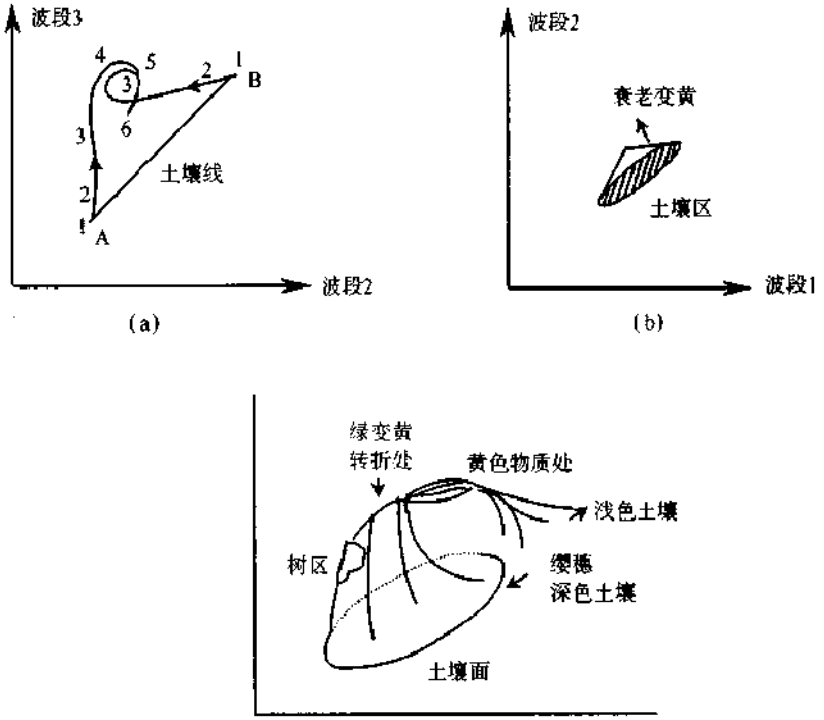


图 7-4-2　缓帽的分析

图 A，B 中，1～6 含义同图 7-4-1

能得到土壤的信息，也没有明显的阴影区，两条生长线才合为一点，不再有区别。可以推理，其他土壤类型的生长线也必定到达这里，汇合后一起继续发展，当农作物成熟变黄时，生长线向回折返，离开绿色生物量点，经过标号5处后光谱特性继续变化，直到农作物衰老死亡到达标号6处。待农作物全部收获完毕，地面状态恢复，从标号6处应该各自回到土壤线上的起点位置（深色土壤1A处或浅色土壤1B等等）。

这种发展变化的过程如果表示在波段1和波段2所构成的子光谱空间，则形态发生变化，土壤线变成了土壤区域，而且农作物从生长到成熟前的过程也发生在同一区内，只有变黄以后才离开这个区向外发展，如图7-4-2（b）所示。

把土壤和农作物生长过程在MSS2-MSS3和MSS1-MSS2两个平面的投影综合并画到三维空间，便形成了图7-4-2（c）所描绘的形态。这里土壤反射光谱形成土壤面，农作物则从土壤面开始生长，几乎沿着垂直于土壤面的方向沿不同路线，形成绿色植物区，到交汇处开始折返，并会聚于黄色植物区，最后又应回到它原来出发的土壤面起点处。这样的三维立体形态看起来很像一顶带着缨穗的帽子，衰老处象一束缨子，土壤面就象帽口，由这一外观的想象形成了另一个名字“缨帽变换”。帽子的前部有一特殊的树区，这是由于树冠的光谱特性决定的。

缨帽在三维空间中的位置不是完全不变的，首先在生长过程中，由于作物种植的密度和叶子覆盖的多寡影响阴影的大小，从而路径有所不同；另外大气中的雾霾、水蒸气、云层都不同程度地影响缨帽，造成土壤面的位移和旋转以及整体形态的变化；不同地区的资料以及不同的农作物也会产生差异，但无论怎样不同，缨帽形态的规律是相同的。

为了最大限度地观察这种规律，并用规律进行土壤和农作物的判断，必须对坐标空间做一变换使坐标系实现平移和旋转。通俗地说，变换后我们能够看到缨帽的最大剖面，而不是只看到某一方向或某平面上的较小投影。这一变换是线性变换，变换后新的坐标轴将代表明确的景观意义，可以与地物直接联系。变换公式为：

$$\boldsymbol{U} = \boldsymbol{R}_1 \cdot \boldsymbol{X} + \boldsymbol{r} \tag{7-4-1}$$

式中 $\boldsymbol{X}$ 为象元的光谱矢量，$\boldsymbol{U}$ 为变换后新空间的象元矢量，其各分量表示变换后每一通道的象元亮度值，$\boldsymbol{r}$ 为避免出现负值而加的常数，R_1 为一变换矩阵，行与行之间相互正交，可以取

$$R_1 = \begin{bmatrix} 0.433 & 0.632 & 0.586 & 0.264 \\ -0.290 & -0.562 & 0.600 & 0.491 \\ -0.829 & 0.522 & -0.039 & 0.194 \\ 0.223 & 0.012 & -0.543 & 0.810 \end{bmatrix}$$

变换后 $\boldsymbol{U} = (u_1, u_2, u_3, u_4)^T$ 中的4个分量多数有明确的物理意义。u_1 叫亮度分量，主要反映了土壤信息，是土壤反射率变化的方向；u_2 叫绿色物质分量；u_3 叫黄色物质分量，它们分别反映了植物的绿度和黄度，黄度说明了植物的枯萎程度；只有最后1个分量 u_4 没有什么意义，在几何坐标中是一个无意义轴（non-such）。K-T变换后的几个坐标轴都相互垂直。K-T变换在实际应用时舍掉第4个分量，只取前3个分量。在新的空间里数据结构更加清楚，分布面加大，而且数据量受到压缩，还可以从中研究大气散射等物理影响，因此K-T变换有很大实际意义。

7.4.2 K-T 变换在 TM 数据分析中的应用

1984 年，Crist 和 Cicone 提出了对 TM 数据作 K-T 变换的公式如下

$$\boldsymbol{U} = R_2 \cdot \boldsymbol{X} + \boldsymbol{r} \tag{7-4-2}$$

$$R_2 = \begin{bmatrix} 0.3037 & 0.2793 & 0.4743 & 0.5585 & 0.5082 & 0.1863 \\ -0.2848 & -0.2435 & -0.5436 & 0.7243 & 0.0840 & -0.1800 \\ 0.1509 & 0.1973 & 0.3273 & 0.3406 & -0.7112 & -0.4573 \\ -0.8242 & -0.0849 & 0.4392 & -0.0580 & 0.2012 & -0.2768 \\ -0.3280 & -0.0549 & 0.1075 & 0.1855 & -0.4357 & 0.8085 \\ 0.1084 & -0.9022 & 0.4120 & 0.0573 & -0.0251 & 0.0238 \end{bmatrix}$$

式中 $\boldsymbol{X} = (x_1, x_2, x_3, x_4, x_5, x_6)^T$ 是 TM 的第 1，2，3，4，5，7 波段图象上的灰度值组成的光谱矢量；$\boldsymbol{U} = (u_1, u_2, u_3, u_4, u_5, u_6)^T$ 是变换后的光谱矢量，在这 6 个新的分量中前 3 个分量与地面景物有明确的关系，u_1 为亮度，u_2 为绿度，而 u_3 与 MSS 不同，定义为湿度；其他 3 个分量 u_4，u_5，u_6 还没发现与景物的明确关系，没有定义。采用 K-T 变换可以将 TM 的 6 个波段（热红外波段除外）压缩成 3 个分量（或波段）。下面分析前 3 个分量的实际物理意义。

超星阅览器提醒您：
此为试读，需要完整PDF请访问：www.ertongbook.com
本复制品
请尊重相关知识产权！

亮度，实际是 TM6 个波段的加权和，反映了总体的反射值。由于中红外波段的影响，TM 的亮度值与 MSS 的亮度值不完全相等，但两者有很大的相关性。TM 的亮度不等于土壤变化的主要方向，这一点与 MSS 数据不同；

绿度，TM 的绿度与 MSS 的绿色物质分量很相近，甚至几乎相同。因为从变换矩阵 R_2 中第二行系数看，较长的红外波段 5 和 7 有很大抵消，剩下是近红外与可见光部分的差值，反映了绿色生物量的特征。用亮度和绿度 2 分量组成的二维平面可叫做“植被视面”。

湿度，与 MSS 相比，这个分量定义了一个完全不同的特征，对变换矩阵中第三行数据分析可知，这个分量反映了可见光和近红外（1～4 波段）与较长的红外（第 5，7 波段）的差值。定义为湿度的根据是第 5，7 两个波段对土壤湿度和植物湿度最为敏感。湿度和亮度 2 分量值组成的二维平面可定义为“土壤视面”。

湿度与绿度组成的第三个面称为“过渡区视面”。这样的三维空间就是 TM 数据进行 K-T 变换后的新空间，可以在这样一个空间，对植被、土壤等地面景物作更为细致、准确的分析。

7.5 植被指数特征及其应用

7.5.1 植被指数模型

植被指数作为一种简单而有效的参考量，在资源环境遥感中有着广泛的应用。植被指数（VI）是基于植被叶绿素在 0.69μm 处的强吸收，通过红外与近红外波段的比值或线性组合实现对植被信息状态的表达。植被指数可以用于诊断植被的一系列生物物理量，如叶面积指数（*LAI*）、植被覆盖度、生物量、光合有效辐射吸收系数 *APAR* 等。

而各种植被指数的建立由于受到大气效应、土壤背景、仪器定标、植被本身光化学变化等内外因素的影响，往往具有地域性和时效性。常规多光谱植被指数通常表达为近红外波段与可见光红波段的差值和比值的组合，例如：

加权差值植被指数

$$WNVI = \rho_{nir} - \alpha \cdot \rho_{red} \tag{7-5-1}$$

归一化植被指数

$$NDVI = \frac{\rho_{nir} - \rho_{red}}{\rho_{nir} + \alpha \cdot \rho_{red}} \tag{7-5-2}$$

对于高光谱分辨率数据来说，可见近红外植被光谱可以被看作一个梯级函数，来表达植被反射率在 $\lambda = \lambda_0 = 0.7\mu m$ 处的突变递增，其归一化植被指数可表示为

$$NDVI = \frac{R(\lambda_0 + \Delta\lambda) - R(\lambda_0 - \Delta\lambda)}{R(\lambda_0 + \Delta\lambda) + R(\lambda_0 - \Delta\lambda)} \tag{7-5-3}$$

式中 $R(x)$ 表示植被在波长 x 处的反射值。实际上植被光谱随波长的变化是连续的过程，若将 $NDVI$ 这种离散形式变为连续的形式，则在 $\Delta\lambda \to 0$ 时有

$$NDVI = \frac{1}{2 \cdot R(\lambda)} \cdot \frac{dR}{d\lambda} \tag{7-5-4}$$

同样其它形式的植被指数也可以变为如下连续的形式：

垂直植被指数

$$PVI = \frac{1}{\sqrt{a^2 - 1}} \cdot \frac{dR}{d\lambda} \tag{7-5-5}$$

加权植被指数

$$WDVI = \frac{dR}{d\lambda} \tag{7-5-6}$$

超星阅览器提醒您：
未经复制品
请尊重相关知识产权！

土壤修正植被指数

$$SAVI = \frac{dR}{d\lambda}\left\{\frac{1 + L}{2 \cdot R(\lambda) + L}\right\} \tag{7-5-7}$$

转换土壤修正植被指数

$$TSAVI = \frac{dR}{d\lambda}\left\{\frac{a}{(1 + a) \cdot R(\lambda) - ab + x(1 + a^2)}\right\} \tag{7-5-8}$$

全球环境监测植被指数

$$GEMI = \frac{dR^2}{d\lambda}\left\{\frac{2}{2 \cdot R(\lambda) + 0.5}\right\} \tag{7-5-9}$$

大气残差植被指数

$$ARVI = \frac{d^2R}{d\lambda^2}\left\{\frac{1 + L}{2 \cdot R(\lambda)}\right\} \tag{7-5-10}$$

土壤纠正大气残差植被指数

$$SARVI = \frac{d^2R}{d\lambda^2}\left\{\frac{1 + L}{2 \cdot R(\lambda) + L}\right\} \tag{7-5-11}$$

根据上述表达式，所有传统的植被指数都可以表达为反映光谱反射率波形变化的反射率光谱的 n 阶导数的形式，而这种光谱 n 阶导数的实质是表达了植被叶绿素、水、氮等生物化学元素吸收波形的变化，是这些吸收物质的吸收程度和状态的光谱指

标。

7.5.2 植被指数特征的应用

1. 利用植被指数进行地表覆盖分析

我国于1983年至1992年开展了地表覆盖动态区域分异规律的研究，所用的遥感数据是NOAA-AVHRR数据。由于地表覆盖在很大程度上取决于地表的植被状态，而从遥感的角度揭示地表植被覆盖情况，最有价值的是植被指数。因此建立植被指数与地表覆盖指数的关系成为研究地表覆盖规律的关键。

归一化植被指数 $NDVI$ 与植物的长势和生产率成正比。$NDVI$ 的累计值基本上反映了地表覆盖的生物量和覆盖类型对于所处环境和季节变化的响应。因此该研究以旬、月和季为时间单位作出地表覆盖指数分布图。以地表覆盖指数图为基础可以进行我国地表覆盖的空间分异特征的分析。其中地表覆盖指数的计算过程如下：

对于任一象元位置，首先计算指定时间间隔内的累计 $NDVI$ 值，例如取月为时间间隔单位，则对于第 j 年有

$$NDVI_j^{(k)} = \sum_{i=1}^{3} NDVI_{ij}^{(j)} \quad k = 1,2,\cdots,12;\ j = 1,2,\cdots,10 \tag{7-5-12}$$

其中 i 为旬号，j 为时间序列中的年号，k 为月号。定义地表覆盖指数为

$$LC^{(k)} = \frac{1}{T}\sum_{j=1}^{T} NDVI_j^{(k)} \tag{7-5-13}$$

其中 T 为以年为单位的时间序列长度，$k=1,2,\cdots,12$ 为月号。综合（7-5-12）式和（7-5-13）式，得到地表覆盖指数计算公式如下

尊贵阅览器提醒您：
使用本复制品
请尊重相关知识产权！

$$LC^{(k)} = \frac{1}{T}\sum_{j=1}^{T}\sum_{i=1}^{3} NDVI_{ij}^{(k)} \tag{7-5-14}$$

根据（7-5-14）式利用1983年至1992年之间的NOAA-AVHRR数据可以制作出按月平均的地表覆盖分布图，同理可以制作出按季和年平均的地表覆盖分布图。从这些图中可以反映出地表覆盖的区域分异情况及其随季节变化的规律。

2. 利用植被指数进行玉米长势的动态监测

玉米长势的好坏由一系列生物参数来描述，如叶面积指数、叶绿素含量、株高等。如果能够建立遥感数据和这些参数之间的关系，利用周期性的遥感资料（如NOAA-AVHRR数据），就可以达到动态监测玉米长势的目的。下面介绍东北师范大学地理系针对松辽平原玉米生长情况建立的生物参数与植被指数关系的模型。

(1) 叶面积指数与植被指数的关系

叶面积指数（LAI）是指单位面积上植被叶片的面积，即

$$LAI = \text{单株叶片的面积} \times \text{单位面积内植被的株数}$$

叶面积指数 LAI 在整个玉米生长阶段是不断变化的，许多研究表明：光谱植被指数（VI）和叶面积指数之间有着十分密切的关系。一般地，随着叶面积指数的增大，植被指数也增大，但是叶面积指数增大到一定的值时，植被指数趋于饱和，在植被指数达到饱和前，LAI 和 VI 之间基本上是一种线性关系（如表7-5-1）。

表 7-5-1　*LAI* 和 *VI* 之间的关系

VI 和 *LAI* 之间的关系式	相关系数 *r*
$NDVI = -0.007 + 4.823LAI$	0.9676
$SAVI = -0.4379 + 5.968LAI$	0.9661
$TSAVI = 0.001 + 5.175LAI$	0.9935
$RVI = 1.961 + 0.203LAI$	0.9095

(2) 株高与植被指数的关系

玉米株高的差异与长势优劣是密切相关的，因此可以作为玉米长势的一个指标。该研究确定的玉米株高（h）与植被指数（VI）的关系为

$$h = \exp(a + b \cdot VI) \tag{7-5-15}$$

其中系数 a，b 如表 7-5-2 所示。

表 7-5-2　系数 *a*，*b*

VI	*a*	*b*	相关系数 *r*
PVI	−0.542	8.042	0.912
WDVI	−0.629	3.635	0.900
NDVI	−1.946	3.404	0.869
RVI	−0.318	0.124	0.803

(3) 叶绿素含量与植被指数的关系

叶绿素将太阳能转化为化学能，使玉米株吸收水分、二氧化碳、矿物质养分等合成有机物，因此叶绿素含量是玉米长势好坏的一个重要指标。由于叶子色素特别是叶绿浓度决定了玉米叶片在可见光波段的反射特性，因此可以选用植被指数（VI）与叶绿素含量（y）建立如下关系

$$y = \exp(a + b \cdot VI) \tag{7-5-16}$$

其中系数 a，b 如表 7-5-3 所示。

表 7-5-3　系数 *a*，*b*

VI	*a*	*b*	相关系数 *r*
EVI	−1.339	8.992	0.926
PVI	8.165	14.845	0.930
WDVI	−0.863	0.147	0.920
TVI	−0.109	0.110	0.910

第八章　遥感图象分类

8.1　遥感图象分类的基本原理

遥感图象分类（Classification）是将图象的所有象元按其性质分为若干个类别（Class）的技术过程。多光谱遥感图象分类是以每个象元的多光谱矢量数据为基础进行的，如图8-1-1所示，假设多光谱图象有 n 个波段，则（i，j）位置的象元在每个波段上的灰度值可以构成一个矢量 $\boldsymbol{X}=(x_1, x_2, \cdots, x_n)^T$，$\boldsymbol{X}$ 称作该象元的特征值，包含 $\boldsymbol{X}$ 的 n 维空间称为特征空间，这样 n 个波段的多光谱图象便可以用 n 维特征空间中的一系列点来表示。在遥感图象分类问题中，常把图象中的某一类目标称为模式，而把属于该类中的象素称为样本，多光谱矢量 $\boldsymbol{X}=(x_1, x_2, \cdots, x_n)^T$ 称为样本的观测值。下面以两个波段（二维）的多光谱图象为例，说明遥感图象分类所涉及到的概念。

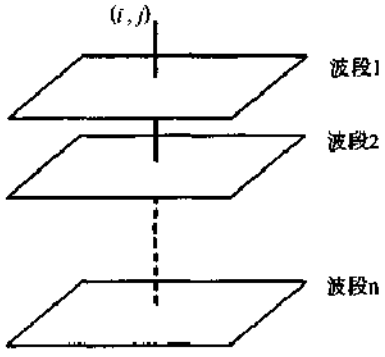


图8-1-1　多光谱图象的例子

如果将多光谱图象上的每个象素用特征空间中的一个点表示出来，这样多光谱图象和特征空间中的点集具有等价关系。通常情况下，同一类地面目标的光谱特性比较接近，因此在特征空间中的点聚集在该类的中心附近，多类目标在特征空间中形成多个点族。如图8-1-2所示，假设图象上只包含三类目标，记为 ω_A，ω_B，ω_C，则在特征空间中形成 A，B，C 三个相互分开的点集，这样将图象中三类目标区分开来等价于在特征空间中找到若干条曲线（对于高光谱图象，需找到若干个曲面）将 A，B，C 三个点集分割开来。假如分割 A，B 两个点集的曲线（图中为直线）表达式为 $f_{AB}(\boldsymbol{X})$，则方程

$$f_{AB}(\boldsymbol{X})=0 \tag{8-1-1}$$

称为 A，B 两类之间的判别界面（Decision Boundary）。

在 $f_{AB}(\boldsymbol{X})$ 已经确定以后，特征空间中的任意一点是属于 A 类？还是属于 B 类？根据几何学的知识可知

如果当 $f_{AB}(\boldsymbol{X})>0$ 时 $X\in\omega_A$，那么当 $f_{AB}(\boldsymbol{X})<0$ 时 $X\in\omega_B$　　(8-1-2)

式（8-1-2）称为确定未知类别样本所属类别的判别准则（Decision Criteria），$f_{AB}(\boldsymbol{X})$ 称为判别函数（Decision Function）。在上述分类的基础上，可以进一步确定属于 ω_C 类的象素。

遥感图象分类算法的核心就是确定判别函数 $f_{AB}(\boldsymbol{X})$ 和相应的判别准则，但在多（高）光谱遥感图象的分类中，情况要复杂得多。为了保证所确定的 $f_{AB}(\boldsymbol{X})$ 能够较好地将各类地面目标在特性空间中的点分割开来，通常是在一定的准则（例如 Bayes 分类

遥感版权所有 未经许可 禁止复制 请尊重知识产权

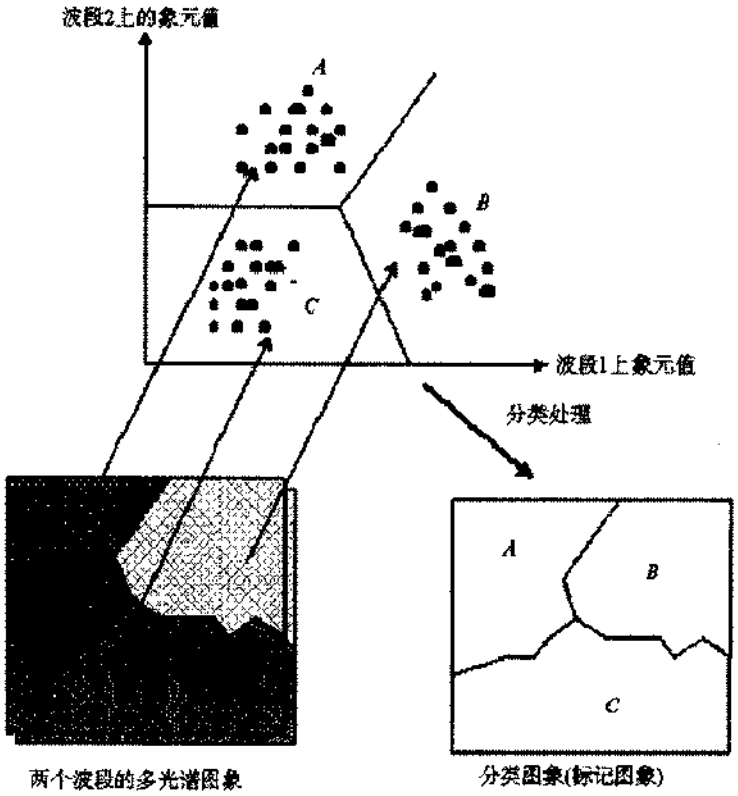


图 8-1-2　多光谱图象分类的原理

器中的错误分类的概率最小准则等）下求解判别函数 $f_{AB}(X)$ 和相应的判别准则。如果我们事先已经知道类别的有关信息（即类别的先验知识），在这种情况下对未知类别的样本进行分类的方法称之为监督分类（Supervised Classification）。通过监督分类，不仅可以知道样本的类别，甚至可以给出样本的一些描述。类别的先验知识可以用若干已知类别的样本通过学习的方法来获得。如果我们事先没有类别的先验知识，在这种情况下对未知类别的样本进行分类的方法称之为非监督分类（Unsupervised Classification）。非监督分类只能把样本区分为若干类别，而不能给出样本的一些描述。

在遥感图象分类以前，通常需要进行特征选择（Feature Selection）和特征提取（Feature Extraction）。特征选择是从众多特征中挑选出可以参加分类运算的若干个特征，如对于 7 个波段的 TM 多光谱图象，由于第 6 波段图象记录的是地面目标的热辐射信息，而其他 6 个波段图象记录的是地面目标的反射光谱信息，因此在 TM 图象分类时通常只采用除第 6 波段图象以外的其他 6 个波段图象。特征提取是在特征选择以后，利用特征提取算法（如主成分分析算法）从原始特征中求出最能反映其类别特征的一组新特征，通过特征提取，既可以达到数据压缩的目的，又提高了不同类别特征之间的可区分性。

针对 n 个波段的多光谱图象的特征选择问题，美国的查维茨教授提出了最佳指数公式（*OIF*）为

$$OIF = \frac{\sum_{i=1}^{n} S_i}{\sum_{i=1}^{n}\sum_{j=i+1}^{n} |R_{ij}|} \tag{8-1-3}$$

式中 S_i 为第 i 个波段的标准差，S_i 越大，该波段图象的信息量越大；R_{ij} 表示第 i 个波段与第 j 个波段之间的相关系数，R_{ij} 越小，两个波段数据之间的独立性越高。综合起来，OIF 值越大，波段组合越优。

最后是分类结果的质量评价。在遥感图象分类问题中通常以混淆矩阵（Confusion Matrix）来表示分类结果的精度。混淆矩阵的定义如下：

$$M = \begin{bmatrix} m_{11} & m_{12} & \cdots & m_{1n} \\ m_{21} & m_{22} & \cdots & m_{2n} \\ \cdots\cdots & & & \\ m_{n1} & m_{n2} & \cdots & m_{nn} \end{bmatrix} \tag{8-1-4}$$

式中 m_{ij} 表示试验区内应属于 ω_i 类的象素被分到 ω_j 类中去的象素总数，n 为类别数。如果混淆矩阵中对角线上的元素值愈大，则表示分类结果的可靠性愈高，如果混淆矩阵中非对角线上的元素值愈大，则表示错误分类的现象愈严重。在监督分类中，如果错误分类的现象很严重，应考虑训练区的选择是否恰当，每类的训练样本是否能够反映该类的类别特征，其次应考虑判别函数是否与各类样本在特征空间中的分布情况相符。

8.2 遥感图象监督分类

监督分类的思想是：首先根据类别的先验知识确定判别函数和相应的判别准则，其中利用一定数量的已知类别的样本（称为训练样本）的观测值确定判别函数中待定参数的过程称之为学习（Learning）或训练（Training），然后将未知类别的样本的观测值代入判别函数，再依据判别准则对该样本的所属类别作出判定。监督分类的算法很多，下面只讨论几种典型的监督分类算法。

8.2.1 基于最小错误概率的 Bayes 分类器

设有 s 个类别，用 ω_1，ω_2，…，ω_s 来表示，每个类别发生的概率（先验概率）分别为 $P(\omega_1)$，$P(\omega_2)$，…，$P(\omega_s)$；设有未知类别的样本 X，其类条件概率分别为 $P(X|\omega_1)$，$P(X|\omega_2)$，…，$P(X|\omega_s)$；则根据 Bayes 定理可以得到样本 X 出现的后验概率为

$$P(\omega_i|X) = \frac{P(X|\omega_i)\cdot P(\omega_i)}{P(X)} = \frac{P(X|\omega_i)\cdot P(\omega_i)}{\sum_{i=1}^{s} P(X|\omega_i)\cdot P(\omega_i)} \tag{8-2-1}$$

Bayes 分类器是以样本 X 出现的后验概率为判别函数来确定样本 X 的所属类别。

(1) 如果 $P(\omega_i|X) = \max_{j=1}^{s} P(\omega_j|X)$，则 $X \in \omega_i$。 (8-2-2)

在 (8-2-1) 式中，分母 $\sum_{i=1}^{s} P(X|\omega_i)P(\omega_i)$ 是与类别无关的常数，因此可以不考

虑分母对$P(\omega_i|X)$的影响，所以（8-2-2）式还可以写成

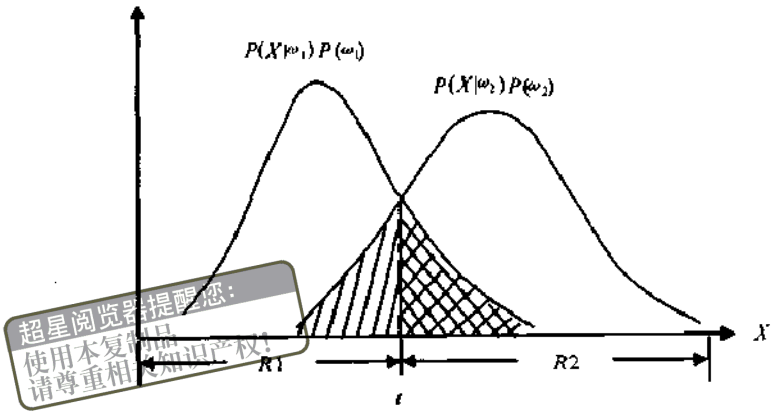
(2) 如果$P(X|\omega_i)P(\omega_i) = \max_{j=1}^{s} P(X|\omega_j)P(\omega_j)$，则$X \in \omega_i$。 (8-2-3)

Bayes 分类器是通过观测样本 X 把它的先验概率$P(\omega_i)$转化为它的后验概率$P(\omega_i|X)$，并以此确定样本 X 的所属类别。按照 Bayes 分类器对样本 X 进行分类，可以使错误分类的概率$P(e)$最小。以两类别问题为例（如图 8-2-1 所示），错误分类的概率$P(e)$可表示为

$$P(e) = P(\omega_1)P(X\text{判入}\omega_2\text{类}|X\text{应属}\omega_1\text{类}) + P(\omega_2)P(X\text{判入}\omega_1\text{类}|X\text{应属}\omega_2\text{类})$$

$$= \int_{R2} P(\omega_1)P(X|\omega_1)dX + \int_{R1} P(\omega_2)P(X|\omega_2)dX \quad (8\text{-}2\text{-}4)$$

错误分类的概率$P(e)$为图 8-2-1 中斜线部分的面积和纹线部分的面积之和，当区间 $R1$ 和区间 $R2$ 的分界线在 t 位置时错误分类的概率$P(e)$最小，而 t 位置正是判别界面（判别界面的方程为$P(X|\omega_1)P(\omega_1) = P(X|\omega_2)P(\omega_2)$）所在的位置。



超星阅览器提醒您：
使用本复制品
请尊重相关知识产权！

图 8-2-1 判别界面的选择

在 Bayes 分类器中，先验概率$P(\omega_i)$通常可以根据统计资料给出，而类条件概率$P(X|\omega_i)$则需要根据问题的实际情况作出合理的假设。从实用的角度来看，如果在特征空间中某一类的特征较多地分布在这一类均值附近，远离均值的点较少，此时假设$P(X|\omega_i)$为正态分布是合理的。下面研究一下 X 服从高维正态分布时 Bayes 分类器的表达形式。

设$X = (x_1, x_2, \cdots, x_n)^T$，且 X 服从高维正态分布，即有

$$P(X|\omega_i) = \frac{1}{(2\pi)^{\frac{n}{2}}|\sum_i|^{\frac{1}{2}}}\exp\left[\frac{1}{2}(X - M_i)^T\sum_i^{-1}(X - M_i)\right] \quad (8\text{-}2\text{-}5)$$

式中 M_i 是ω_i类特征向量X的均值，$\sum_i$是ω_i类特征向量X的方差。

令$d_i^*(X) = P(X|\omega_i)P(\omega_i)$，将（8-2-5）式代入$d_i^*(X)$，两边取对数后得

$$\ln d_i^*(X) = \ln P(\omega_i) - \frac{n}{2}\ln(2\pi) - \frac{1}{2}\ln|\sum_i| - \frac{1}{2}(X - M_i)^T\sum_i^T(X - M_i) \quad (8\text{-}2\text{-}6)$$

取掉（8-2-6）式中与 ω_i 和X 无关的常数项，并令$d_i(X) = \ln d_i^*(X)$得

$$d_i(X) = \ln P(\omega_i) - \frac{1}{2}\ln|\sum_i| - \frac{1}{2}(X - M_i)^T \sum_i^{-1}(X - M_i) \qquad (8\text{-}2\text{-}7)$$

式（8-2-7）就是类条件概率$P(X|\omega_i)$服从正态分布时的判别函数，此时判别规则如下：

$$\text{如果 } d_i(X) = \max_{j=1}^{s} d_j(X), \text{则 } X \in \omega_i \qquad (8\text{-}2\text{-}8)$$

进一步，如果对所有类别 i（$i=1$、2、…、s）存在

$$\sum_i = \sum, \text{且 } P(\omega_i) = P(\omega) = \frac{1}{s} \qquad (8\text{-}2\text{-}9)$$

则从（8-2-7）式除去与 ω_i 和 X 无关的常数项得

$$d_i(X) = -\frac{1}{2}(X - M_i)^T \sum_i^{-1}(X - M_i) \qquad (8\text{-}2\text{-}10)$$

令
$$d_i'(X) = -2 \cdot d_i(X) = (X - M_i)^T \sum_i^{-1}(X - M_i) \qquad (8\text{-}2\text{-}11)$$

$d_i'(X)$ 实际上是样本 X 到ω_i 类中心的距离，由此得到最小距离分类器如下

$$\text{如果 } d_i'(X) = \min_{j=1}^{s} d_j'(X), \text{则 } X \in \omega_i \qquad (8\text{-}2\text{-}12)$$

采用最小距离分类器的遥感图象分类过程如下

第一步：根据待分类区域地面目标的实际情况，合理确定类别数 s，对每一类别的地面目标，在遥感影象上选择一定数量的能反映该类特性的象素作为训练样本。以训练样本为基础，求每类的 M_i，$\sum_i$，$i=1$，2，…，s。

第二步：对多光谱图象上的每一象素，将其多光谱矢量 X 代入（8-2-11）式，求得该象素在特征空间中的点到每类中心的距离 $d'_i(X)$，$i=1$，2，…，s。然后依据（8-2-12）式确定该象素的所属类别。若对每一类中所有象素赋以同一种颜色，就得到分类图象。

8.2.2 子空间分类器

在遥感图象分类时，分类器的选择一般要考虑两个因素，一是分类的准确度，二是分类的速度，在保证分类准确性的前提下，分类速度是很重要的，因为多光谱遥感图象数据量十分庞大，如果分类器的精度很高，而速度很慢，仍然是不适用的。业已证明子空间分类器（Subspace Classifier）是一种分类准确性高、速度快的分类算法。下面介绍子空间分类器和改进的对偶子空间分类器的原理。

设有 s 个类别用$\omega^{(1)}$，$\omega^{(2)}$，…，$\omega^{(s)}$，来表示；每个样本有 n 个特征，用 $X=(x_1, x_2, \cdots, x_n)^T$ 来表示；$\omega^{(i)}$类的 $l^{(i)}$个样本用 $\{X_1^{(i)}, X_2^{(i)}, \cdots, X_{l^{(i)}}^{(i)}\}$ 来表示，则 $\omega^{(i)}$类的自相关矩阵可以按如下公式计算

$$S^{(i)} = \frac{1}{l^{(i)}} \sum_j^{l^{(i)}} X_j^{(i)} (X_j^{(i)})^T \qquad (8\text{-}2\text{-}13)$$

利用 K-L 展开的原理，可以求得 $S^{(i)}$的 n 个特征根$\lambda_1^{(i)}$，$\lambda_2^{(i)}$，…，$\lambda_n^{(i)}$ 和相应的特征向量。如果把特征根按大小排列，并求其对应的前 $p^{(i)}$个正交归一化的特征向量 $u_j^{(i)}$，$j=1$，2，…，$p^{(i)}$，则 $\omega^{(i)}$类的子空间 $L^{(i)}$可用 $u_j^{(i)}$（$j=1$，2，…，$p^{(i)}$）来表示，记为

$$L^{(i)} = \{u_j^{(i)}, j = 1, 2, \cdots, p^{(i)}\}$$

令
$$P^{(i)} = \sum_{j=1}^{p^{(i)}} u_j^{(i)} (u_j^{(i)})^T \tag{8-2-14}$$

称 $P^{(i)}$ 为 $\omega^{(i)}$ 类的投影矩阵。如果有一个样本点 X，对所有的类别 $j(j \neq i)$ 满足

$$X^T P^{(i)} X > X^T P^{(j)} X, \text{则 } X \in \omega^{(i)} \tag{8-2-15}$$

由 (8-2-14)，(8-2-15) 式可得 $X^T P^{(i)} X$ 的实际计算公式如下

$$X^T P^{(i)} X = \sum_{j=1}^{p^{(i)}} (X^T \cdot u_j^{(i)})^2 \tag{8-2-16}$$

从 (8-2-16) 式可以看出：求 $X^T P^{(i)} X$ 时只用到了子空间 $L^{(i)}$ 中的 $p^{(i)}$ 个向量 $u_j^{(i)}$ ($j = 1, 2, \cdots, p^{(i)}$)，在 n 较大时通常有 $p^{(i)} \ll n$，所以计算速度是很快的。

设 $\omega^{(i)}$ 类和 $\omega^{(j)}$ 类之间的判别界面为 $F(X)$，即

$$F(X) = X^T P^{(i)} X - X^T P^{(j)} X = X^T (P^{(i)} - P^{(j)}) X \tag{8-2-17}$$

从 (8-2-17) 式可以看出：类和类之间的判别界面 $F(X)$ 是关于 X 的二次函数，以此作为样本类别划分的依据，其精度是较高的。

在实际应用中，$\omega^{(i)}$ 类的子空间 $L^{(i)}$ 的维数 $p^{(i)}$ 可用可按下式来确定

超星阅读器是醒你：
使用本复制品
请尊重相关知识产权！

$$V = \sum_{j=1}^{p^{(i)}} \lambda_j^{(i)} \Big/ \sum_{j=1}^{n} \lambda_j^{(i)} \tag{8-2-18}$$

V 为给定的指标，在已知 V 的情况下可求出 $p^{(i)}$ 值。

在上面讨论的子空间分类器中，一般只用到了 $\omega^{(i)}$ 类的前 $p^{(i)}$ 个主分量，而认为主分量以外的 $n-p^{(i)}$ 个镜向分量是不重要的或是噪声。实际上镜向分量和主分量是同样重要的，模式类不仅可以在由主分量基生成的子空间上来表示，而且可以在由镜向分量基生成的补子空间 $\overline{L}^{(i)}$ 上来表示

$$\overline{L}^{(i)} = \{u_j^{(i)}, j = p^{(i)} + 1, p^{(i)} + 2, \cdots, n\} \tag{8-2-19}$$

令

$$\overline{P}^{(i)} = \sum_{j=p^{(i)}+1}^{n} u_j^{(i)} (u_j^{(i)})^T \tag{8-2-20}$$

则

$$X^T P^{(i)} X = X^T (I - \overline{P}^{(i)}) X \tag{8-2-21}$$

其中 I 为单位阵。(8-2-21) 式说明 X 在子空间上的距离可用其在补子空间上的距离来表示，因此上述判别规则也可以写成：

如果有一个样本点 X，对所有的类别 j ($j \neq i$) 满足

$$X^T \overline{P}^{(i)} X < X^T \overline{P}^{(j)} X, \text{则 } X \in \omega^{(i)}。 \tag{8-2-22}$$

显然，如果 $p^{(i)} > \frac{n}{2}$，采用补子空间进行分类计算量比较小，否则采用子空间进行分类计算量比较小。我们把子空间 $L^{(i)}$ 和补子空间 $\overline{L}^{(i)}$ 混合表示的模式空间称为对偶空间，建立在对偶子空间上的分类器称为对偶子空间分类器 (Dual Subspace Classifier)。

从上面的讨论还可以看出：子空间分类器和对偶子空间分类器具有特征提取和分类决策于一体的功能。

现将对偶子空间法遥感图象分类过程归纳如下：

第一步：根据待分类区域地面目标的实际情况，合理确定类别数 s，对每一类别的地面目标，在遥感影象上选择一定数量的能反映该类特性的象素作为训练样本。以训练样本为基础，统计每类的自相关矩阵 $S^{(i)}$，进而求得每类的 n 个特征根和 n 个特征向量。再依据（8-2-18）式确定求出每类子空间的维数 $p^{(i)}$。

第二步：对多光谱图象上的每一象素，当 $p^{(i)} \leqslant \frac{n}{2}$ 时，将其多光谱矢量 X 代入(8-2-16)式，求得该象素在每类子空间中的投影距离 $X^T P^{(i)} X$，$i=1, 2, \cdots, s$，再依据（8-2-15）式确定该象素的所属类别；当 $p^{(i)} > \frac{n}{2}$ 时，求得该象素在每类补子空间中的投影距离 $X^T \overline{P}^{(i)} X$，$i=1, 2, \cdots, s$，再依据（8-2-22）式确定该象素的所属类别。若对每一类中所有象素赋以同一种颜色，就得到分类图象。

8.2.3 概率松弛算法

在一般的遥感图象分类中只利用了光谱信息，而且是单象素进行的。实际上，由于散射作用的影响，遥感图象象元记录的是观测目标与其周围一定范围内目标的电磁波辐射能量的和，这就是说在遥感图象的分类过程中只有正确考虑目标象素与其周围象素的关系问题，才能得到满意的结果，这种分类方法统称为上下文分类。上下文分类有许多实现方案，例如在多光谱特征中引入纹理特征进行分类识别等。下面介绍的概率松弛法（Probabilistic Relaxation），是在考虑某个象素与其邻域内象素的相关性的基础上进行迭代计算，最后按最大概率进行分类的。

设有一组目标 A_1，A_2，…，A_n，要把它们分到 C_1，C_2，…，C_m 个类别中去；假设目标的分类是相关联的，用 $C(i, j, h, k)$ 表示把目标 A_h 分到 C_k 类对把目标 A_i 分到 C_j 类的影响程度（如图 8-2-2 所示）；设 $P_{ij}^{(0)}$ 表示 $A_i \in C_j$ 的初始概率，$i=1, 2, \cdots, n$，$j=1, 2, \cdots, m$；对每一个 i 有

$$0 \leqslant P_{ij}^{(0)} \leqslant 1 \quad \text{且} \sum_{j=1}^{m} P_{ij}^{(0)} = 1$$

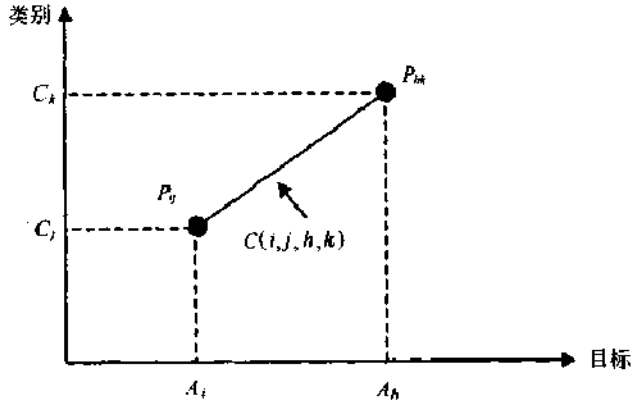


图 8-2-2 目标分类的关联性

我们希望用迭代的方法求取迭代 r 次以后的概率 $P_{ij}^{(r)}$，$r=1, 2, \cdots$。求 $P_{ij}^{(r)}$ 时用到初始概率和相关系数，并且第 r 步的概率 $P_{ij}^{(r)}$ 满足

$$0 \leqslant P_{ij}^{(r)} \leqslant 1 \quad 且 \sum_{j=1}^{m} P_{ij}^{(r)} = 1$$

最后对目标 A_i 依最大概率准则进行分类决策，即如果有

$$P_{ij}^{(r)} = \max\{P_{ik}^{(r)}, k = 1,2,\cdots,m\}$$

则

$$A_i \in C_j$$

针对上述迭代方案，许多学者提出了自己的迭代公式，其中最常用的是 Peley S. 于 1980 年提出的如下迭代公式：

对于 A_i 的一个给定的邻域点 A_h，得到 $A_i \in C_j$ 的概率估计为

$$P_{ij}^{(r+1)} = \frac{P_{ij}^{(r)} \cdot \sum_{k=1}^{m} P_{hk}^{(r)} \cdot C(i,j,h,k)}{\sum_{j=1}^{m} P_{ij}^{(r)} \cdot \sum_{k=1}^{m} P_{hk}^{(r)} \cdot C(i,j,h,k)} \tag{8-2-23}$$

一般情况下相关系数和初始概率是根据具体问题给出的，通常相关系数用互信息量 $\log R$ 来代替；当它大于零时，可用 R 来近似代替相关系数 $C(i, j, h, k)$。R 定义如下

$$R(i,j,h,k) = \frac{P(A_i \in C_j \mid A_h \in C_k)}{P(A_i \in C_j)} = \frac{P(A_i \in C_j, A_h \in C_k)}{P(A_k \in C_j) \cdot P(A_h \in C_k)} \tag{8-2-24}$$

在遥感图象分类中，概率松弛法通常作为其他分类算法的后处理过程，初始概率和相关系数在初始分类的基础上计算得到。例如把概率松弛法作为 Bayes 分类算法的后处理过程时，如果把多光谱图象中的象素 A_i 所对应的多光谱矢量记为 X_i，要把它们分到 C_1，C_2，…，C_m 个类别中去，则 $A_i \in C_j$ 类的初始概率可用象素的后验概率 $P(\omega_j \mid X_i)$ 来估计，即

$$P_{ij}^{(0)} = P(C_j \mid X_i) \tag{8-2-25}$$

遥感数据提醒您：
使用本复制品
请尊重相关知识产权！

下面讨论相关系数的估计方法。

令象素 A_i 的 8 邻域象素为 A_h，如图 8-2-3 所示，即 A_h 可为 0，1，…，7 号象素，定义 R_l 是遥感图象上满足如下关系式的所有“象素对”的集合

$$R_l = \{(A_i, A_h) \mid A_i \sigma_l A_h\} \qquad l = 0,1,\cdots,7$$

3	2	1
4	A_i	0
5	6	7

图 8-2-3 象素之间的相邻关系

式中 σ_l 表示象素空间位置的相邻关系，如 σ_0 表示右邻关系，即图 8-2-3 中的 0 号元素与象素 A_i 的位置关系为 σ_0，其余以此类推。迭代中只考虑象素 A_h 对 A_i 的影响，当然邻域还可以定义成其他形式，这要根据实际情况来确定。则相关系数可以按照下式来确定：

$$P(A_i \in C_j) = P(C_j) = \frac{1}{N_i} \sum_{A_i \in C_j} P(C_j \mid X_i) \tag{8-2-26}$$

$$P(A_i \in C_j, A_h \in C_k) = \frac{1}{\| R_l \|} \sum_{(A_i, A_h) \in R_l} P(C_j \mid X_i) \cdot P(C_k \mid X_h) \tag{8-2-27}$$

$$C(i,j,h,k) = \frac{P(A_i \in C_j, A_h \in C_k)}{P(A_i \in C_j) \cdot P(A_h \in C_k)} \tag{8-2-28}$$

式中 N_i 表示图象上属于 C_i 类的象素个数；$\| R_l \|$ 表示集合 R_l 的元素个数，$l = 0, 1, \cdots, 7$；$j, k = 1, 2, \cdots, m$，m 为类别数；“$A_i \in C_j$ 类”的判断以初始分类的结果为依据。如果迭代中只考虑 8 邻域内象元的影响，则相关系数矩阵共有 8 个，每个为 $m \times m$ 阶矩阵。

8.3 遥感图象非监督分类

上面讨论的是监督分类方法，它需要在分类前知道类别的先验知识，以此为基础求出判别函数中的未知参数。在实际问题中有时事先无法知道类别的先验知识，在没有类别先验知识的情况下将所有样本划分为若干个类别的方法称之为非监督分类，也称聚类(Clustering)。

8.3.1 聚类中的相似性度量

在聚类的过程中，通常是按照某种相似性准则对样本进行合并或分离的。在统计模式识别中常用的相似性度量有：

(1) 欧氏距离

$$D = \| X - Z \| = [(X - Z)^T (X - Z)]^{\frac{1}{2}} \tag{8-3-1}$$

其中 X，Z 为待比较的两个样本的特征矢量。

(2) 马氏距离

$$D = (X - Z)^T \sum^{-1} (X - Z) \tag{8-3-2}$$

其中 X，Z 为待比较的两个样本的特征矢量，$\sum^{-1}$ 为 X，Z 的互相关矩阵。

(3) 特征矢量 X、Z 的角度

$$S(X,Z) = \frac{X^T Z}{\| X \| \cdot \| Z \|} \tag{8-3-3}$$

遇到问题请联系你：
请尊重作者版权，勿复制传播

在多光谱遥感图象分类中，最常用的是各种距离相似性度量。在相似性度量选定以后，必须再定义一个评价聚类结果质量的准则函数。按照定义的准则函数进行样本的聚类分析必须保证在分类结果中类内距离最小，而类间距离最大。也就是说，在分类结果中同一类中的点在特征空间中聚集得比较紧密，而不同类别中的点在特征空间中相距较远。例如可定义如下的最小误差平方和准则

$$J = \sum_{j=1}^{N_c} \sum_{X \in S_j} \| X - M_j \|^2 \tag{8-3-4}$$

式中 N_c 为类别数，S_j 为第 j 类样本的集合 ($j = 1, 2, \cdots, N_c$)，M_j 为第 j 类的均值向量。如果按照使 J 最小的原则进行聚类，可以保证在分类结果中类内距离最小，而

类间距离最大。

聚类分析有两种实现途径：迭代方法和非迭代方法。迭代方法首先给定某个初始分类，然后采用迭代算法找出使准则函数取极值的最好聚类结果，因此聚类分析的过程是动态的。在遥感图象分类中，通常使用这种动态聚类方法。

8.3.2 K-均值算法（K-means Algorithm）

K-均值算法也称C-均值算法，其基本思想是：通过迭代，逐次移动各类的中心，直至得到最好的聚类结果为止。

假设图象上的目标要分为 c 类别，c 为已知数，则K-均值算法如下：

第一步：适当地选取 c 个类的初始中心 $Z_1^{(1)}$，$Z_2^{(1)}$，…，$Z_c^{(1)}$，初始中心的选择对聚类结果有一定的影响，初始中心的选择一般有以下几种方法：

①根据问题的性质，用经验的方法确定类别数 c，从数据中找出从直观上看来比较适合的 c 个类的初始中心。

②将全部数据随机地分为 c 个类别，计算每类的重心，将这些重心作为 c 个类的初始中心。

第二步：在第 k 次迭代中，对任一样本 X 按如下的方法把它调整到 c 个类别中的某一类中去。

对于所有的 $i \neq j$，$i = 1, 2, \cdots, c$，如果 $\| X - Z_j^{(k)} \| < \| X - Z_i^{(k)} \|$，则 $X \in S_j^{(k)}$，其中 $S_j^{(k)}$ 是以 $Z_j^{(k)}$ 为中心的类。

第三步：由第二步得到 $S_j^{(k)}$ 类新的中心 $Z_j^{(k+1)}$，

$$Z_j^{(k+1)} = \frac{1}{N_j} \sum_{X \in S_j^{(k)}} X$$

式中 N_j 为 $S_j^{(k)}$ 类中的样本数。$Z_j^{(k+1)}$ 是按照使 J 最小的原则确定的，J 的表达式为：

$$J = \sum_{j=1}^{c} \sum_{X \in S_j^{(k)}} \| X - Z_j^{(k+1)} \|^2$$

第四步：对于所有的 $j = 1, 2, \cdots, c$，如果 $Z_j^{(k+1)} = Z_j^{(k)}$，则迭代结束，否则转到第二步继续进行迭代。

K-均值算法是一个迭代算法，迭代过程中类别中心按最小二乘误差的原则进行移动，因此类别中心的移动是合理的。其缺点是要事先已知类别数 c，在实际中类别数 c 通常根据实验的方法来确定。

超星阅览器提醒您：
使用本复制品
请尊重相关知识产权！

8.3.3 ISODATA 算法

ISODATA（Iterative Self-Organizing Data Analysis Techniques Algorithm）算法亦称迭代自组数据分析算法，它与K-均值算法有两点不同，第一，它不是每调整一个样本的类别就重新计算一次各类样本的均值，而是在每次把所有样本都调整完毕之后才重新计算一次各类样本的均值，前者称为逐个样本修正法，后者称为成批样本修正法；第二，ISODATA算法不仅可以通过调整样本所属类别完成样本的聚类分析，而且可以自动地进行类别的“合并”和“分裂”，从而得到类数比较合理的聚类结果。

ISODATA 算法描述如下：

第一步：给出下列控制参数：

K：希望得到的类别数（近似值）；

θ_N：所希望的一个类中样本的最小数目；

θ_S：关于类的分散程度的参数（如标准差）；

θ_C：关于类间距离的参数（如最小距离）；

L：每次允许合并的类的对数；

I：允许迭代的次数。

第二步：适当地选取 N_c 个类的初始中心 $\{Z_i,\ i=1,\ 2,\ \cdots,\ N_c\}$。

第三步：把所有样本 X 按如下的方法分到 N_c 个类别中的某一类中去：

对于所有的 $i\neq j$，$i=1,\ 2,\ \cdots,\ N_c$，如果 $\| X-Z_j \| < \| X-Z_i \|$，则 $X\in S_j$，其中 S_j 是以 Z_j 为中心的类。

第四步：如果 S_j 类中的样本数 $N_j<\theta_N$，则去掉 S_j 类，$N_c=N_c-1$，返回“第三步”。

第五步：按下式重新计算各类的中心

$$Z_j=\frac{1}{N_j}\sum_{X\in S_j}X,\qquad j=1,2,\cdots,N_c$$

第六步：计算 S_j 类内的平均距离

$$\overline{D_j}=\frac{1}{N_j}\sum_{X\in S_j}\| X-Z_j \|,\qquad j=1,2,\cdots,N_c$$

第七步：计算所有样本离开其相应的聚类中心的平均距离

$$\overline{D}=\frac{1}{N}\sum_{j=1}^{N_c}N_j\cdot\overline{D_j},$$

式中 N 为样本总数。

第八步：如果迭代次数大于 I，则转向“第十二步”，检查类间最小距离，判断是否进行合并。

如果 $N_c\leqslant\frac{K}{2}$，则转向“第九步”，检查每类中各分量的标准差（分裂）。

如果迭代次数为偶数，或 $N_c\geqslant 2K$，则转向“第十二步”，检查类间最小距离，判断是否进行合并。

否则则转向“第九步”。

超星阅览器提醒您：
使用本复制品
请尊重相关知识产权！

第九步：计算每类中各分量的标准差 δ_{ij}

$$\delta_{ij}=\sqrt{\frac{1}{N_j}\sum_{X\in S_j}(x_{ik}-z_{ij})^2}$$

式中 $i=1,\ 2,\ \cdots,\ n$，n 为样本 X 的维数；

$j=1,\ 2,\ \cdots,\ N_c$，N_c 为类别数；

$k=1,\ 2,\ \cdots,\ N_j$，N_j 为 S_j 类中的样本数；

x_{ik} 为第 k 个样本的第 i 个分量；

z_{ij} 为第 j 个聚类中心 Z_j 的第 i 个分量；

第十步：对每一个聚类 S_j，找出标准差最大的分量 $\delta_{j\max}$

$$\delta_{j\max} = \max(\delta_{1j}, \delta_{2j}, \cdots, \delta_{nj}), j = 1、2、\cdots、N_c$$

第十一步：如果条件 1 和条件 2 有一个成立，则把 S_j 分裂成两个聚类，两个新类的中心分别为 Z_j^+ 和 Z_j^-，原来的 Z_j 取消，使 $N_c = N_c + 1$，然后转向“第三步”，重新分配样本。其中：

条件 1：$\delta_{j\max} > \theta_s$ 且 $\overline{D}_j > \overline{D}$ 且 $N_j > 2 \cdot (\theta_N + 1)$

条件 2：$\delta_{j\max} > \theta_s$ 且 $N_c \leqslant \dfrac{K}{2}$

$Z_j^+ = Z_j + \gamma_j$，

$Z_j^- = Z_j - \gamma_j$

$\gamma_j = k \cdot \delta_{j\max}$，$k$ 是人为给定的常数，且 $0 < k \leqslant 1$

第十二步：计算所有聚类中心之间的两两距离

$$D_{ij} = \| Z_i - Z_j \|, i = 1, 2, \cdots, N_c - 1, j = i + 1, \cdots, N_c$$

第十三步：比较 D_{ij} 和 θ_C，把小于 θ_C 的 D_{ij} 按由小到大的顺序排列

$$D_{i_1 j_1} < D_{i_2 j_2} < \cdots < D_{i_L j_L}$$

其中 L 为每次允许合并的类的对数

第十四步：按照 $l = 1, 2, \cdots, L$ 的顺序，把 $D_{i_l j_l}$ 所对应的两个聚类中心 Z_{i_l} 和 Z_{j_l} 合并成一个新的聚类中心 Z_l^*，并使 $N_c = N_c - 1$

$$Z_l^* = \frac{1}{N_{i_l} + N_{j_l}}(N_{i_l} Z_{i_l} + N_{j_l} Z_{j_l})$$

超星阅览器提醒您：
请尊重知识产权

在对 D_{ij} 所对应的两个聚类中心 Z_{i_l} 和 Z_{j_l} 进行合并时，如果其中至少有一个聚类中心已经被合并过，则越过该项，继续进行后面的合并处理。

第十五步：若迭代次数大于 I，或者迭代中的参数的变化在差限以内，则迭代结束，否则转向“第三步”继续进行迭代处理。

8.3.4 模糊聚类算法

设有 n 个样本，记为 $U = \{U_i, i = 1, 2, \cdots, n\}$，要将它们分成 m 类，这一过程实际上是求一划分矩阵（Partition Matrix）$A = [a_{ij}]$，其中

$$a_{ij} = \begin{cases} 1 & \text{表示第 } j \text{ 个样本属于第 } i \text{ 类} \\ 0 & \text{否则} \end{cases}$$

矩阵 A 称作样本集 U 的一个划分，显然不同的 A 对应样本集 U 上不同的划分，给出了不同的分类结果，把对样本集 U 的所有划分称作 U 的划分空间，记为 M，这样聚类过程就是从样本集 U 的划分空间 M 中找出最佳划分矩阵的过程。

在实际问题中，确定样本归属的问题存在模糊性，因此分类矩阵最好是一个模糊矩阵，即 $A = [a_{ij}]$ 满足以下条件：

①$a_{ij} \in [0, 1]$，它表示样本 U_j 属于第 i 类的隶属度；

②A 中每列元素之和为 1，即一个样本对各类的隶属度之和为 1；

③A 中每行元素之和大于 0，即表示每类不为空集。

以模糊矩阵 A 对样本集 U 进行分类的过程称作软分类。为了得到合理的软分类，定义聚类准则如下

$$J_b(A,V)=\sum_{k=1}^{n}\sum_{i=1}^{m}(a_{ik})^b\cdot\|U_k-V_i\|^2 \tag{8-3-5}$$

式中 A 为软分类矩阵，V 表示聚类中心，m 为类别数，n 为样本数，$\|U_k-V_i\|$ 表示样本 U_j 到第 i 类的聚类中心 V_i 的距离（如欧氏距离等），b 是权系数，b 越大，分类越模糊，一般情况下 $b\geqslant 1$，当 $b=1$ 时就是硬分类。

在聚类准则最优的情况下可以求得软划分矩阵和聚类中心，当 $b>1$ 和 $U_k\neq V_i$ 时，可用下面的公式求 a_{ij} 和 V_i

$$a_{ij}=\frac{1}{\sum_{k=1}^{m}\left(\frac{\|U_j-V_i\|}{\|U_j-V_k\|}\right)^{\frac{2}{b-1}}},\ i\leqslant m;j\leqslant n \tag{8-3-6}$$

$$V_i=\frac{\sum_{k=1}^{n}(a_{ik})^bU_k}{\sum_{k=1}^{n}(a_{ik})^b},\ i\leqslant m \tag{8-3-7}$$

具体计算步骤如下：

第一步：给出初始划分 A；

第二步：按照（8-3-7）式计算聚类中心 V_i（$i=1,2,\cdots,m$）；

第三步：根据 V_i 和（8-3-6）式计算出新的分类矩阵 A^*；

第四步：如果 $\max\{a_{ij}^*-a_{ij}\}<\delta$，则 A^* 和 V 即为所求，否则转到第二步，继续进行迭代处理，其中 δ 是预先给定的阈值；

超星阅览器提醒您：
使用本复制品
请尊重相关知识产权！

第五步：以模糊矩阵 A^* 为基础对样本集 U 中的样本进行分类。方法之一就是将 U_j 分到 A^* 的第 j 列中数值最大的元素所对应的类别中去。

8.4 基于混合象元的遥感图象分类

遥感图象象元记录的是探测单元的瞬时视场角所对应的地面范围内的目标的辐射能量的总和。如果探测单元的瞬时视场角所对应的地面范围仅包含了同一类性质的目标，则该象元记录的是同一性质的地面目标的辐射能量的总和，这样的象元称为纯象元（Pure Pixel）。上面讨论的监督分类和非监督分类方法对纯象元的分类和识别是非常有效的。如果探测单元的瞬时视场角所对应的地面范围包含了多类不同性质性质的目标，则该象元记录的是多类不同性质的地面目标的辐射能量的总和，这样的象元称为混合象元（Mixed Pixel）。如图 8-4-1 所示，设象元的地面分辨率为 30m，而地面上 900m^2 范围内包含了水塘、土路和稻田三种不同性质的目标，如果这 900m^2 范围内三种不同性质的目标成象为一个象元，则该象元就是混合象元。此外由于地物散射等因素的影响，在多类地物交界处附近的象元，也有可能是混合象元。混合象元是客观存在的，如果用传统的统计模式识别方法（如最小距离分类器按象元到各类中心之间的最小距离来确定象元的类别等），往往会发生误分类。近年来一些学者提出了类型分解的思想，它根据

各类地物在混合象元中所占的比例（称为类型比，Category Proportion）来确定混合象元的类型，即把混合象元分配到类型比最大的那一类地物中去。混合象元的分类方法有最小二乘法、二次规划法、模糊数学法等多种方法，下面仅介绍用最小二乘法求解混合象元类型比的原理。

设某个混合象元 P 的包含 n 类地面目标的信息，其多光谱矢量为 I，该象元中的类型比为 B，n 类地面目标的分光反射特性记为 A，则 I，A，B 有下列关系式

$$I = A \cdot B \tag{8-4-1}$$

其中 $I = (I_1, I_2, \cdots, I_m)^T$

$$B = (B_1, B_2, \cdots, B_n)^T; 0 \leqslant B_i \leqslant 1, \sum_{i=1}^{n} B_i = 1, i = 1、2、\cdots、n;$$

$$A = \begin{bmatrix} A_{11} & A_{12} & \cdots & A_{1n} \\ A_{21} & A_{22} & \cdots & A_{2n} \\ \cdots\cdots & & & \\ A_{m1} & A_{m2} & \cdots & A_{mn} \end{bmatrix}$$

m 为多光谱图象的波段数，n 为类别总数。

A_{ij}（$i=1, 2, \cdots, m$，$j=1, 2, \cdots, n$）可以在地面上用仪器测量得到，但地面上的测量值与卫星上摄影时的分光反射特性是不一样的，因为有大气层、地形起伏等多种因素的影响。为了回避这些问题，可以用多光谱图象中的第 i 个波段中第 j 个类别的训练样本的平均值来代替 A_{ij}。

超星阅览器提醒您：
使用本复制品
请尊重相关知识产权！

设

$$E = (E_1, E_2, \cdots, E_m)^T = I - A \cdot B \tag{8-4-2}$$

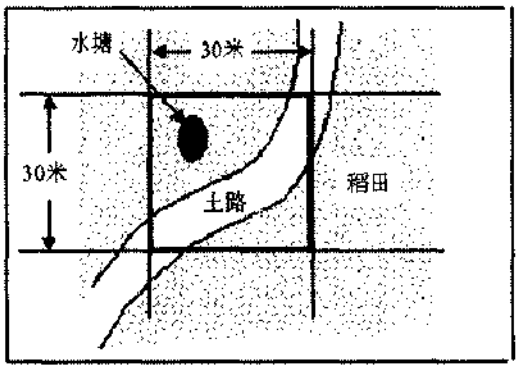


图 8-4-1　混合象元的例子

则按照最小二乘法的原理在 $\sum_i E_i$ 最小的情况下可求出 B

$$B = (A^TA)^{-1}A^TI \tag{8-4-3}$$

设 n 类地面目标分别用 C_1，C_2，$\cdots$，C_n 来表示，当混合象元 P 的类型比 $B = (B_1, B_2, \cdots, B_n)^T$ 已知时，如果有

$$B_j = \max\{B_1, B_2, \cdots, B_n\}$$

则将混合象元 P 分到第 j 个类别中去，即 $P \in C_j$。

上述分类准则说明将混合象元划分到类别比最大的那一类地面目标中去。

8.5　非光谱信息在遥感图象分类中的应用

前面讨论的遥感图象分类算法都是基于光谱信息进行的，如果能引入除光谱信息以外的其他信息，可以进一步提高遥感图象的分类精度。同目视判读一样，图象上的灰度和色调只是从遥感影象上识别目标的主要依据之一，目标的形状、大小、纹理结构、目

标之间的相互关系以及活动目标的演变规律都可以作为目标识别的重要依据，在基于知识的遥感图象分类系统中这些特征都可以以知识的形式存储在知识库中，在进行目标识别的推理中被采用。下面仅讨论在遥感图象分类算法中易于使用的高程信息和纹理特征的应用情况。

8.5.1 高程信息在遥感图象分类中的应用

将地面高程信息作为辅助信息引入遥感图象分类中，是提高分类精度的有效措施之一。由于地形起伏的影响，使地物的光谱特征发生变化，如位于不同坡面上的同类地物在图象上可能表现为不同的光谱响应特性，位于不同坡面上的不同类型的地物在图象上可能表现为相同的光谱响应特性。另外，不同地物的生长地域，往往受到海拔高度、坡度和坡向等因素的制约。如果在分类的过程中忽视高程等因素的影响，就会影响分类结果的精度。

在分类过程中引入高程信息的有效性的基本条件是：类别的先验概率$P(\omega_i)$ 和在某个高程带区 h 中分布的先验概率$P(\omega_i|r_n)$ 不相同，即$P(\omega_i) \neq P(\omega_i|r_n)$。利用高程信息辅助分类的方法很多，例如：将 Bayes 分类器中的判别函数改写为

$$P(\omega_i \mid X, r_n) = \frac{P(X \mid \omega_i, r_n) \cdot P(\omega_i \mid r_n)}{P(X)} \tag{8-5-1}$$

假设高程信息的引入并不显著地改变随机变量 X 的统计分布特性，即$P(X|\omega_i, r_n) \approx P(X|\omega_i)$，则带有高程信息的 Bayes 分类器中的判别函数为

$$P(\omega_i \mid X, r_n) = \frac{P(X \mid \omega_i) \cdot P(\omega_i \mid r_n)}{P(X)} \tag{8-5-2}$$

超星阅览器提醒您：
使用本复制品
请尊重相关知识产权！

在实际应用中，是利用与遥感图象配准后的 DTM 数据确定每个象素所对应的高程值 h，再按高程值 h 选择相应的类别先验概率$P(\omega_i|r_n)$。

此外还可以把高程分带图象中的每一个带区作为掩膜图象，并用数字过滤的方法把原始高程图象分割成不同的区域图象。每个区域对应一个高程带，并在每个区域实施常规的分类处理，最后把各个带区的分类结果图象合成起来形成最终的分类图象。这种类似于把高程信息引入类别先验概率之中的分类方法称为“按高程分层分类法”。

8.5.2 纹理信息在遥感图象分类中的应用

当目标的光谱特性比较接近时，纹理特征对于区分目标可能会起到积极的作用。例如要区分图象上的针叶林和阔叶林时，仅依据光谱信息是不够的，因为针叶林和阔叶林的光谱特性基本相同，但是针叶林和阔叶林的纹理特征有明显的区别，针叶林的纹理比较细，而阔叶林的纹理比较粗，如果在遥感图象的光谱分类过程之中或光谱分类过程之后引入纹理信息，就可以达到区分针叶林和阔叶林的目的。

遥感图象上的目标通常以随机纹理的形式出现，描述随机纹理的有效方法是统计的方法。基于统计特性的纹理特征提取算法既可以在空间域中进行，也可以在频率域中进行，下面仅介绍空间域中几种纹理特征的提取算法及其在遥感图象分类中的应用。

1. 纹理能量法

纹理特征主要表现为高频信息在图象上的空间分布情况，因此以图象上的高频信息

为基础，可以得到数字形式的纹理特征值。图象上的高频信息可以用高通滤波器检测出来，为了反映纹理图案的方向性，高通滤波器一般选用具有明显方向性的算子，例如可用下面的0°，45°，90°，135°四个方向的高通滤波算子 M_1，M_2，M_3，M_4 进行边缘检测，得到四个方向的微观统计特征图象，对每一方向的微观统计特征图象，以该图象上每个象素位置为中心取一窗口，以该窗口范围内所有象素的灰度值之和或平均值作为该象素位置上的纹理特征值。若不考虑纹理的方向性，可取四个方向的纹理特征的平均值作为该象素位置的纹理特征值。

$$M_1=\begin{bmatrix}-1 & -1 & -1\\ 0 & 0 & 0\\ 1 & 1 & 1\end{bmatrix},\ M_2=\begin{bmatrix}1 & 1 & 0\\ 1 & 0 & -1\\ 0 & -1 & -1\end{bmatrix},\ M_3=\begin{bmatrix}-1 & 0 & 1\\ -1 & 0 & 1\\ -1 & 0 & 1\end{bmatrix},\ M_4=\begin{bmatrix}0 & -1 & -1\\ 1 & 0 & -1\\ 1 & 1 & 0\end{bmatrix}$$

2．基于共生矩阵的纹理特征提取算法

图象中相距位置为（Δx，Δy）的两个象素（又称“象素对”）同时出现的次数可用一个灰度共生矩阵来表示，记为 $M=|m_{hk}|$，其中 m_{hk} 表示图象中这样的“象素对”出现的次数，即两个象素相距位置为（Δx，Δy），其中一个的象素的灰度为 h，另一个象素的灰度为 k。如果图象有 n 个灰度级，则共生矩阵的大小为 $n\times n$。如果图象的纹理是粗纹理，那么对于 $\sqrt{(\Delta x)^2+(\Delta y)^2}$ 值小的情况，其灰度共生矩阵中 m_{hk} 数值较集中于主对角线附近，对于细纹理，其灰度共生矩阵中 m_{hk} 数值却散布在远离对角线的位置上。对于具有方向性的纹理，其灰度共生矩阵中 m_{hk} 数值散离对角线的程度与 $\mathrm{tg}^{-1}(\Delta y/\Delta x)$ 有关。因此灰度共生矩阵的各种统计值可作为纹理特性的度量。常用的统计量有：

超星阅览器提醒您：
受版权保护的电子资源
请遵守相关法规！

（1）反差或称为相对主对角线的惯性矩

$$f_1=CON=\sum_h\sum_k(h-k)^2\cdot m_{hk}$$

（2）角二阶矩或称能量

$$f_2=ASM=\sum_h\sum_k(m_{hk})^2$$

（3）熵

$$f_3=ASM=-\sum_h\sum_k m_{hk}\log m_{hk}$$

（4）相关

$$f_4=COR=\left[\sum_h\sum_k h\cdot k\cdot m_{hk}-\mu_x\cdot\mu_y\right]/(\delta_x\cdot\delta_y)$$

式中 μ_x，μ_y，δ_x，δ_y 分别为 m_x，m_y 的均值和方差，$m_x=\sum_k m_{hk}$，$m_y=\sum_h m_{hk}$。对于不同的（Δx，Δy），可以得到不同方向上的一组纹理特征值，其中 $\mathrm{tg}^{-1}(\Delta y/\Delta x)$ 反映了纹理图案的方向性，纹理特征值反映了纹理图案的粗糙度。若不考虑纹理的方向时，可将多个方向上的纹理特征的均值、方差来表示纹理的特征，如 $(ASM)_{均值}$，$(ASM)_{方差}$，$(COR)_{均值}$，$(COR)_{方差}$ 等。

基于二维灰度共生矩阵的纹理特征提取算法的运算量很大，为了克服共生矩阵法的这一缺陷，可以将二维灰度共生矩阵简化为一维的象素对灰度值差的绝对值矢量，记为

$M' = |m'_{h-k}|$，其中 m'_{h-k}表示图象中相距位置为（Δx，Δy）、且其灰度值差的绝对值为$|h-k|$的象素对出现的次数，如果图象有 n 个灰度级，则该矢量为 n 维。同样该矢量的各种统计值可作为纹理特性的度量。由于它是一维的，因此从该矢量中获得各种统计值的计算量明显减少。业已证明这样得到纹理特征值和基于灰度共生矩阵的纹理特征值比较接近。

2. 基于边缘信息的纹理特征提取算法

基于灰度共生矩阵的纹理特征都是基于窗口图象而得到的，而窗口的大小很难根据图象上的内容来自动地确定，窗口太大，区分细纹理的能力变弱，窗口太小，纹理特征的随机性增大，并且所提特征在纹理区域交界处的局部化程度随窗口的大小而变化，窗口越大，纹理特征的边界局部化能力减弱。由于纹理特征主要表现在边缘等高频信息上，因此边缘信息对描述纹理是十分重要的。为了克服基于窗口的纹理特征之不足，应采用基于边缘信息的纹理特征提取算法。下面介绍的 Envelop 算法，其边缘信息是采用小波包变换的方法得到的。一维 Envelop 算法描述如下：

对于一维信号，寻找其上任意相邻两个边缘点（对应于小波变换模值为局部极大值的点）之间的小波变换模值的最大值，并把它作为这两个边缘点之间的所有点的纹理特征值。图 8-5-1 为一维信号及其小波变换和相应的纹理特征。

超星阅览器提醒您：
使用本复制品
请尊重相关知识产权！

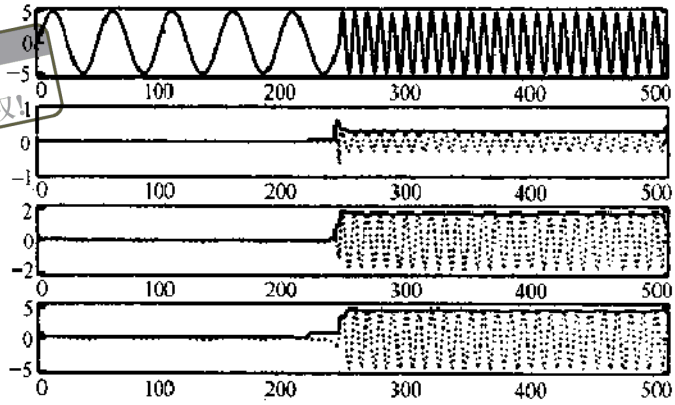


图 8-5-1　一维信号及其小波变换和相应的纹理特征

（第 1 行为原始信号，第 2—4 行为不同分辨率上的小波变换和相应的 Envelop 特征，虚线为小波变换系数，实线为 Envelop 特征值）

对于二维图象经小波包分解后所得到的高频子图象，其上的高频信息具有明显的方向性，因此可以直接将一维 Envelop 算法应用于二维图象，算法如下：

Envelop - 2D（wh，wv，wd）

wh：用高通滤波器对列、低通滤波器对行作用所得到的水平边缘图象。

wv：用高通滤波器对行、低通滤波器对列作用所得到的垂直边缘图象。

wd：用高通滤波器对行、高通滤波器对列作用所得到的斜方向的边缘图象。

begin

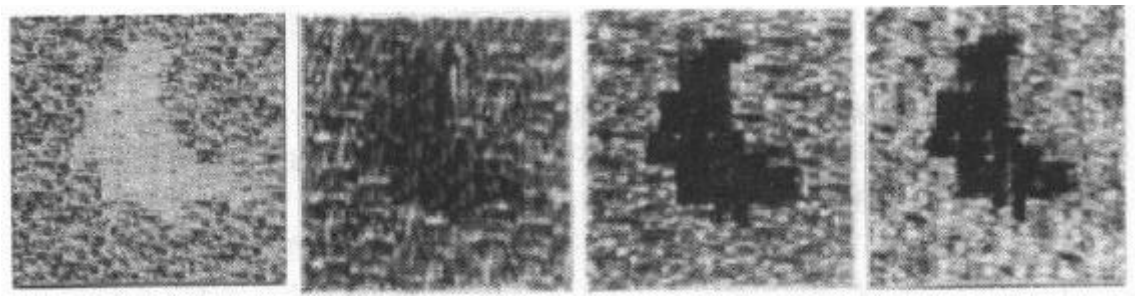
对 wh 的每一列实施一维 Envelop 算法。

对 wv 的每一行实施一维 Envelop 算法。

对 wd 的每一列实施一维 Envelop 算法。

End

这样通过对原始影象实施小波包分解，然后在每个高频通道上用 Envelop－2D 算法提取纹理特征，再将其量化为 8 比特的图象，就可以得到纹理图象的多分辨率、多方向性的纹理特征表示。图 8-5-2（a）为原始纹理图象，图 8-5-2（b），图 8-5-2（c），图 8-5-2（d)分别是从第一级分辨率上的三个高频子图象上提取到的水平、垂直和斜方向上的三幅纹理特征图象。从图 8-5-2 可以看出：基于 Envelop 算法的纹理特征在纹理区域内部的一致性较好，在各类纹理区域交界处的局部化程度较高，可见这种基于边缘的纹理特征对纹理图象上的内容有较好的适应性。另一优点是该特征的计算量较小。



(a) 原始纹理图象　(b) 水平纹理特征　(c) 垂直纹理特征　(d) 斜方向纹理特征

图 8-5-2　基于边缘信息的纹理特征

超星阅览器提醒您：
使用本复制[illegible]
请尊重[illegible]知识产权

利用小波包算法进行边缘检测，可以得到多尺度、多方向性的高频边缘图象，在此基础上利用 Envelop 算法可以得到多尺度、多方向性的纹理特征图象，这是采用小波包算法进行图象边缘检测的主要原因。

3．纹理特征辅助的遥感图象分类方法

纹理特征辅助的遥感图象分类方法类似于高程信息辅助的遥感图象分类方案。一是把某个纹理特征参数作为 Bayes 分类器中类别的先验概率 $P(\omega_i | r_t)$ 中的条件 r_t 直接引入分类过程。二是先利用多光谱信息对遥感图象进行分类，再利用纹理特征对光谱分类的结果进行进一步的细分，例如可在光谱数据分类的基础上，对属于每一类的象素，再利用纹理特征进行二次分类等。

把纹理特征引入到遥感图象分类过程中，最重要的是对所采用的纹理特征的物理意义有清楚的理解，并结合实际的地物情况作出合理的解释，这样才可能把光谱特征和纹理特征综合起来，增强地物的可区分性，否则会起到画蛇添足的负作用，甚至把原本可以正确分类的结果变成错误的分类结果。

8.6　基于知识的遥感图象分类

遥感图象分类的发展方向之一是研制基于知识的遥感影象分析系统，在这方面已有许多探索，积累了许多宝贵的经验。基于知识的遥感影象分析系统主要包括两个核心内容，一是知识库（Knowledge Base），二是推理机（Inference Engine）。知识库中存储着多种与遥感图象解译有关的知识和经验，它既包括地面目标本身的知识，也有遥感专家

长期积累起来的有关遥感判读方面的经验和方法，而且这些知识和经验都必须表示成计算机能够识别的形式。推理机主要包括数字遥感影象处理和分析算法、根据识别对象的特点挑选算法的策略以及负责将各种算法组合成具有一定逻辑顺序的算法序列的能力。当遥感影象等数据输入基于知识的遥感影象分析系统后，推理机在知识库的支持下完成影象上目标的识别和解译。在图象识别过程中，知识库中知识的丰富程度是十分关键的，推理机的空间分析能力、逻辑推理能力和综合分析能力等也是十分重要的。知识的多少和推理能力的强弱是相辅相成的，两者缺一不可。下面以“基于知识的陆地卫星影象识别系统（*Knowledge Based Segmentation of Landsat Images*，IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing，Vol.29，No.2，1991，pp222～231）”为例说明基于知识的遥感影象分析系统的基本情况。

基于知识的陆地卫星影象识别系统的目标是从美国 Michigan 地区的陆地卫星 TM 影象上分割和解译出 256 象元×256 象元大小的地面目标。表 8-6-1 列出了该地区地面覆盖的类型，表 8-6-2 列出了陆地卫星影象各波段的光谱范围，图 8-6-1 是系统的结构框图，图 8-6-2 是该系统进行目标分割和识别的流程图。

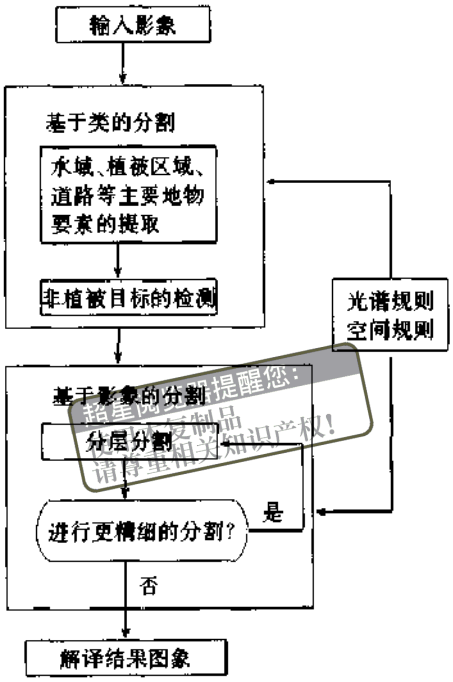


图 8-6-1　系统的结构框图

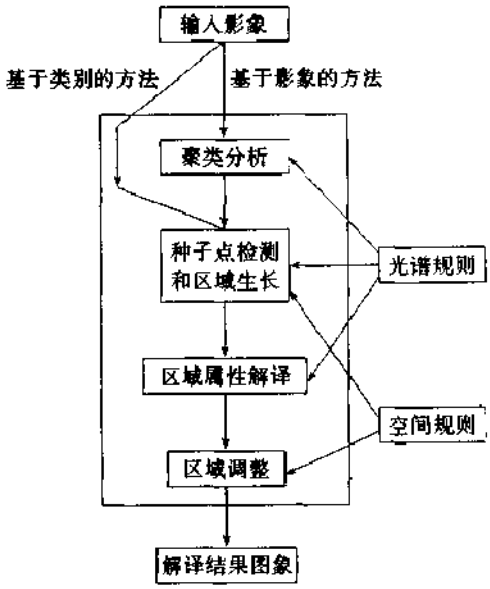


图 8-6-2　系统识别目标的过程

表 8-6-1　该地区北部地面覆盖类型

落叶林（Deciduous）	灌木林（Shrub）
红松（Red Pine）	城区（Urban）
矮松（Jack Pine）	水域（Water）
砍伐地（Clearcut）	裸露地（Bare Land）

表 8-6-2　TM 影象各波段的光谱范围

波　　段	光　谱　范　围
1	0.45～0.52
2	0.52～0.60
3	0.63～0.69
4	0.76～0.90
5	1.55～1.75
6	10.4～12.5
7	2.08～2.35

在该系统中的知识库中，主要包括两种类型的知识：光谱知识和空间知识。知识的使用主要表现在三个方面，一是将专业领域内的知识融入区域的探测过程（例如种子点的自动选取等），二是将专业领域内的知识表示为光谱规则用于解释区域目标的性质，三是利用空间知识进行区域属性的调整（例如在植被区域中面积较小的非植被区域的属性应改为植被等）。光谱知识是利用一定数量的样本数据通过训练的方法得到的，光谱知识库中包括许多规则，每条规则用条件语句的形式表示出来，例如：

规则 1：如果某个区域 R 的植被指数值 I_R 很大，则区域 R 的属性为植被。

规则 2：如果某个区域 R 的多光谱数据满足：

$b_R^1 > b_R^2 > b_R^3 > b_R^4 > b_R^5 > b_R^7$，其中 b_R^i 表示第 i 波段上区域 R 的灰度均值，则区域 R 的属性为水域。

……

规则 n：……

在基于知识的遥感影象判读系统中，判读知识的总结和表示是十分关键的，也是最困难的，特别是有些专家的判读经验很难用数值的方法或计算机语言表达出来，因此在许多系统的知识库中，知识是不全面的。此外在知识的使用方面也还存在一些问题，遥感专家进行影象解译的过程，是综合利用判读特征并进行复杂的逻辑推理和抽象思维的过程。由于人类认识事物的生理学机理和心理学机理还不十分清楚，并且目前的计算机（包括人工智能语言）智能化程度还不高，因此利用计算机模拟人类进行影象解译目前还不可能做到非常实用的程度。

版权所有 侵权必究 请尊重知识产权！

附录　遥感图象处理软件包简介

数字遥感影象的处理与分析通常是在遥感图象处理软件包的基础上进行的。目前比较流行的遥感图象处理软件包有：加拿大 ERM 公司研制的 ER Mapper，美国 ERDAS 公司推出的 ERDAS Imagine、新加波 3-Link 公司研制的 ENVI 等。这些软件通常可以提供三级打包方法，即基础级（Essentials）、高级（Advantage）和专业级（Professional）。基础级遥感图象处理软件包提供最低成本的影象制图和可视化工具，如几何纠正、影象分析、可视化和自动专题地图输出等功能。高级遥感图象处理软件包除了具有基础级软件包的全部功能外，还增加更高级且精确的遥感制图、影象处理和地理信息分析等功能。专业级遥感图象处理软件包是在高级软件包的基础上，增加用于遥感与地理分析专业的综合工具，如混合分类技术、雷达分析、可视化空间建模工具等。此外还有另外一类遥感图象处理软件，它们更侧重于目标的精确定位和三维量测，如美国 Intergraph 公司的 Image Station 数字摄影测量系统、瑞士 Helave 公司的 DPW（Digital Photogrammetric Workstation）数字摄影测量系统等。这些系统的软件功能主要包括：数字空中三角测量（即利用少量控制点加密出数量较多的控制点的作业过程），数字地面模型 DTM 的自动生成和编辑、正射影象图制作、地物要素采集（在立体观察条件下）、三维景观图生成、栅格数据与矢量数据的综合成图等功能。为了帮助读者掌握遥感信息处理系统的基本情况，现将遥感图象处理系统的软件功能归纳如下。

超星阅览器提醒您：
使用本复制品
请尊重相关知识产权！

1. 图象文件管理

包括多种格式的遥感图象或多种传感器的遥感图象数据的输入、输出、存储以及图象文件管理等功能。

2. 图象操作工具

①图象显示和漫游；

②读点操作，即可用鼠标对显示图象进行坐标及灰度读取，并可实时显示，当图象地理编码后，可显示图象上任意位置的地理坐标；

③感兴趣区（ROI）的定义，提供方便灵活的 ROI 编辑功能，可交互式或指定域值进行 ROI 生成，并利用 ROI 进行各种处理及分析；

④掩模，用户可以方便的定义掩模，并利用掩模来达到特殊处理效果；

⑤统计，可以完成相关统计、直方图统计、方差及中值统计、二阶灰度统计、回归预测、面积统计、长度统计及体积计算等；

⑥波段运算，支持复杂的波段运算功能，不仅可进行波段的算术、逻辑、布尔运算，而且可进行复杂的三角、积分、微分、矩阵分析等运算，这些功能使遥感软件的分析能力大大增强；

⑦影象任意裁剪、整饰和注记。

3. 基本图象处理功能

①基本图象处理功能，如图象重采样（包括空间及波谱重采样）、图象旋转、剪贴及镜象处理、多种图象格式之间的转换、图象通道的创建、管理、演算合成等操作；

②图象滤波，如空间和频率滤波（包括多种高通、低通滤波等）、形态学滤波（形态扩张、骨骼化、开区处理、闭区处理等）；

③影象增强，如分段线性拉伸、对数变换、指数变换、均值方差变换、直方图均衡化、直方图规定化和正态化、基于小波的影象增强、高斯模糊影象的清晰化处理；

④单幅图象的正交变换，如快速 Fourier 正反变换、Hadamard 正反变换、正弦（或余弦）变换、快速正交小波变换等；

⑤纹理分析，如纹理能量提取、基于边缘信息的纹理特征提取、一阶及二阶灰度统计纹理分析等；

⑥线状目标检测，如线性算子检测、半线性算子检测、非线性算子检测；

⑦边缘检测和线状目标检测的后处理，如细化、检测噪声的删除、按域值（或连通性）进行线段连接、线跟踪并以方向链码或以拐点坐标的形式存储检测的结果；

⑧图象数据压缩，如 JPEG 压缩、预测编码压缩、行程编码压缩、基于小波的图象数据压缩等。

4. 遥感图象处理功能

超星阅览器提醒您
使用本资源
请尊重相关知识产权

①多种地图投影（通用横墨卡托投影、墨卡托投影、等纬度经度投影、兰勃特等角圆锥投影、地极立体投影等）之间的转换；

②波谱库管理和编辑（如查看、建立、重采样标准波谱库），波谱分割（水平、垂直和任意方向的波谱分割分析），各种复杂波谱曲线运算，穿越提取（即提取任一穿越线上各点的多光谱数据并进行分析），利用波谱分析工具进行波谱特征的分析和确定目标的性质等；

③多光谱矢量空间变换，如波段之间的代数运算（如波段比值等）、主成份分析和基于小波包算法的快速近似主成份分析、真彩色和任意三个波段的假彩色合成、RGB 和 HIS 之间的变换、HIS 增强及饱和度拉伸、NDVI 植被指数及缨帽变换等；

④多光谱图象分类，如非监督分类（如 ISOData 骤类、K-Mean 骤类等）、监督分类（如最小距离分类器、Mahalanobis 距离分类器、最大似然分类器、波谱角分类器、子空间分类器、基于混合象元的分类器等）、分类后处理（类别合并、类别统计、面积统计、分类叠合、等值区分析、功能区分析，并能自动提取每类的范围并以图件的形式输出等）；

⑤辐射校正（如大气精校正等）和定标；

⑥图象几何校正，包括交互式控制点（GCP）量测、图象到图象之间的变换、图象到地图之间的变换、遥感图象的精确校正（如画幅式影象、光学机械扫描图象、SPOT 线阵 CCD 影象、SAR 图象的校正等）；

⑦影象镶嵌，包括交互式图象镶嵌、多个波段影象的镶嵌、拼接缝的自动消除等功能；

⑧SAR 图象分析，如合成孔径雷达成象处理、雷达图象的多普勒分析、侧视雷达图象的斜距校正、雷达图象的自适应滤波、雷达图象的纹理滤波、幅度图分析及相位图分析、极化信息分析及提取等；

⑨遥感专题图制作，如黑白正射影象图、彩色正射影象图、基于影象的线划图制作（在影象上交互式采集地物要素并以地形图符号表示）、真实感静态（或动态）三维景观图、其他类型的遥感专题图（土地利用分类图、植被分布图、洪水淹没状况图、水土保持状况图等）。

5. 矢量、栅格混合处理以及与地理信息系统的接口

①光栅-矢量之间的转换（可以把分类图和其他光栅数据转成矢量数据）；

②矢量数据编辑和成图；

③矢量层控制（如编辑矢量层名、矢量投影转换和编辑等）；

④矢量属性查询、编辑；

⑤为 GIS 等系统提供多种标准格式的已校正过的航空和卫星遥感影象；

⑥为 GIS 等系统提供多种标准格式的遥感分析数据（如可为 MicroStation 提供从正射遥感影象上采集到的标准格式的 DGN 矢量数据）；

⑦可读取 MicroStation 、Arc/Info、ArcView，MapInfo 等系统的多种格式的数据，进行坐标转换后可与遥感影象进行叠置分析。

超星阅览器提醒您：
使用本复制品
请尊重相关知识产权！

参 考 文 献

[1] 刘勇卫，贺雪鸿译．日本遥感研究会．遥感精解．测绘出版社，1993

[2] 马蔼乃．遥感概论．科学出版社，1984

[3] 李德熊．遥感技术．北京工业学院出版社，1987

[4] 李树楷．全球资源环境遥感分析．测绘出版社，1992

[5] 陈述彭，赵英时．遥感地学分析．测绘出版社，1990

[6] 马俊如．中国遥感进展．万国学术出版社，1992

[7] 潘析哲．陆地卫星在中国．见：中国遥感卫星地面站第二届用户论文集，北京：中国遥感卫星地面站 1994，322～326

[8] 钱曾波，刘静宇，肖国超．航天摄影测量．解放军出版社，1992

[9] 潘时祥．象片判绘．解放军出版社，1992

[10] 王之卓．摄影测量原理续编．测绘出版社，1986

[11] 孙家柄，舒宁，关泽群．遥感原理、方法和应用．测绘出版社，1997

[12] 马蔼乃．遥感信息模型．北京大学出版社，1997

[13] 法国国家空间研究中心（CNES）、SPOT IMAGE 公司．SPOT 用户手册，1992

[14] 王新民等译．美国地质调查局，美国大气海洋局，陆地卫星 4/5 数据用户手则，1987

[15] 总装卫星有效载荷及应用技术专业组．卫星微波遥感技术研讨会论文．见：卫星微波遥感技术研讨会论文集，1998，46～49

[16] 郭华东，徐冠华．星载雷达应用研究．中国科学技术出版社，1996

[17] 舒宁．雷达遥感原理．测绘出版社，1997

[18] 宫鹏，史培军，浦瑞良等．对地观测技术与地球系统科学．科学出版社，1996

[19] 王一谋．再生资源遥感应用研究．科学出版社，1991

[20] 陈述彭，童庆喜，郭华东．遥感信息机理研究．科学出版社，1998

[21] 康耀红．数据融合理论与应用．西安电子科技大学出版社，1997

[22] 刘同明，夏祖勋，解洪成．数据融合技术及其应用．国防工业出版社，1998

[23] 朱述龙．小波理论在图象处理中的应用．解放军出版社，1999

[24] 潘析哲．星载 SAR 图象处理．科学出版社，1996

[25] 刘智．航天合成孔径雷达数据干涉处理及 DEM 生成的研究．见：解放军测绘学院博士论文，郑州：解放军测绘学院，1999，19～23

[26] 朱述龙．快速近似主成分分析．遥感学报，1999（3）：43～47

[27] Peter F. Fisher, Visualization of the Re Liabiliby in Classified Remotely Sensed Images, Photogrammetric Engineering and Remote Sensing, 1994 (7): 905～910.

[28] Jezcheng Ton, Jon Sticklen, Anil K. Jain, Knowledge based Segmentation of Landsat Images, IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing, 1991 (29): 222～231

[29] Tadahiro Hayasake, Dong Liang Wu, Ya-Qiu Jin et al. Microwave Remote Sensing of the Atmosphere and Environment, Proceeding of SPIE, 1998 (3503): 196～245

超星阅览器提醒您：
使用本复制品
请尊重相关知识产权！