

遥感技术是一门广泛应用于地球科学、环境科学、资源管理等领域的技术,它的过程涉及数据获取、传输、接收和处理,以及数据解译、分析与应用。这些部分相互交织,相辅相成,构成了遥感技术的完整流程,如图 5-1 所示。

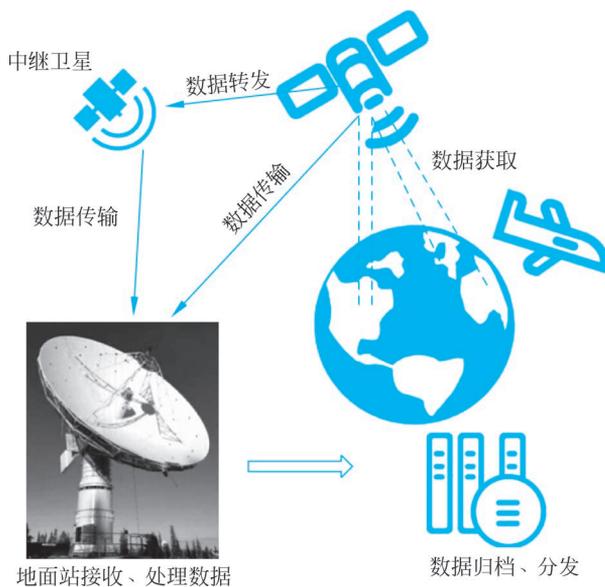


图 5-1 遥感技术的完整流程

首先,数据获取是遥感技术的核心环节。各种遥感平台(包括卫星、飞机、无人机等)搭载的传感器以成像或者非成像的方式获取不同波段和分辨率的遥感数据,存储在不同介质上。这些数据反映了地球表面的各种特征和变化,如地形、植被、土壤类型、水体分布等。

其次,数据传输、接收和处理是将采集到的遥感数据传输至地面接收站,并进行处理和存储的过程。在数据传输过程中,需要考虑到数据的传输速度、稳定性,以及对数据完整性和质量的保障。一旦数据到达地面接收站,就需要进行数据解压、处理和存储等操作,这一过程广泛运用了数学、计算机科学等领域的理论与方法,包括数据压缩、图像处理、数据融合等技术。

最后,数据解译、分析与应用是遥感技术的最终目的和价值所在。通过对遥感数据的解译和分析,可以获得地表的信息,了解地表的变化和特征,从而为环境监测、资源管理、灾害预警等提供数据支持。遥感应用以地学规律为基本分析方法,涉及地球科学、生物科学等学科知识的应用,例如利用遥感技术监测农作物的生长情况、调查森林覆盖变化、监测城市扩张等。

遥感技术的任务首先是数据获取,即通过不同的遥感系统来获取目标对象的数据。这里所说的遥感系统是指由遥感平台和传感器共同组成的数据获取系统。

数据获取涉及电磁波的发射、传播、接收和信号处理等环节。我们可以从电磁波的辐射源、传播过程,以及与大气的相互作用等方面解释遥感的工作原理,如图 5-2 所示。

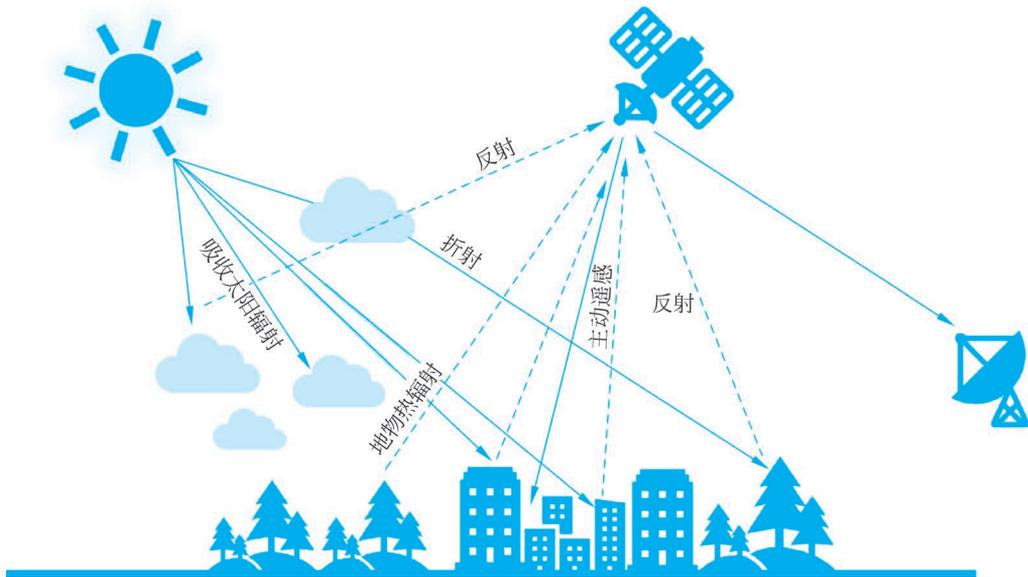


图 5-2 遥感的工作原理

电磁辐射源(电磁振源)是产生电磁辐射的物体和装置。电磁辐射以电磁波的形式向外传送能量。任何物体都可以是辐射源,它既可能自身发射能量(即发射辐射,又称热辐射),又可能被外部能源激发而辐射能量(即反射辐射)。不同辐射源可以向外辐射不同强度和不同波长的辐射能量。电磁波通过大气层,部分太阳辐射能被大气中的微粒散射和吸收,这种大气衰减效应随波长、时间、地点而变化。到达地表的能量与地表物质相互作用,由于地表特征的复杂和多变,不同波长的能量到达地表后,被选择性地反射、吸收、透射、折射等。地表反射或发射的能量蕴含着不同地表特征——波谱响应特性。大气的又一次吸收和散射作用导致辐射能量衰减。通过传感器获取并传输到地面接收站的遥感信息,通常会受到多种因素的影响,如传感器性能、平台姿态的稳定性、大气的影、地球曲率、地物本身及周围环境等,这些因素使遥感影像记录的地物发生辐射畸变和几何畸变。因此,接收站接收的遥感图像必须经过地面数据处理中心的预处理才能提交给用户使用。

## 5.1 物体的辐射特性与大气效应

物体在地球表面或大气中发出、反射和吸收辐射,其辐射特性直接影响遥感数据的获取和解释。同时,大气的存在会引起辐射的散射和吸收,改变从物体到传感器的辐射路径。在研究遥感技术时,了解物体的辐射特性,以及大气对辐射的影响至关重要。

### 5.1.1 物体的辐射特性

电磁波是一种伴随变化的电场和磁场产生的横波,是物质运动、能量传递的一种特殊形

式。将各种电磁波按照波长(频率)的大小,依次排列成图表,这个图表就叫电磁波谱,如图 5-3 所示。遥感中使用的电磁波覆盖了广泛的波长范围,不同波长的电磁波被用于获取不同类型的地表和大气信息。

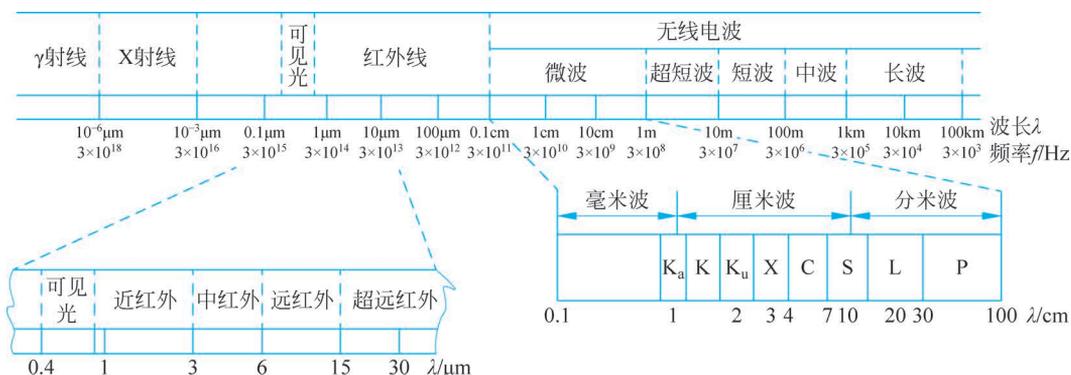


图 5-3 电磁波谱示意

电磁辐射是指电磁波通过空间传播能量的过程,过程中携带着能量。这种能量的传递方式就是电磁辐射。当电磁波与物质发生接触时,会发生吸收、发射、反射或透射等现象。这些相互作用是电磁辐射表现出来的结果。利用遥感手段探测物体,实际上是对物体辐射能量的测定与分析。

黑体是一个理想的辐射体,在任何温度下对任何波长的电磁辐射全部吸收,毫无反射和透射能力。黑体的热辐射称为黑体辐射,通常把黑体辐射作为度量其他地物发射电磁波能力的基准,通过研究黑体热辐射,进而研究实际地物热辐射规律。

1900 年,普朗克推导黑体辐射通量密度  $W_\lambda$  和其温度的关系,以及按波长  $\lambda$  分布的辐射定律:

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

式中,  $W_\lambda$  为光谱辐射的辐射通量密度,单位为  $W/(m^2 \cdot \mu m)$ ;  $\lambda$  为波长,单位为  $\mu m$ ;  $h = 6.626 \times 10^{-34} J \cdot s$ , 为普朗克常量;  $k = 1.38 \times 10^{-23} J/K$ , 为玻尔兹曼常数;  $c = 2.9981 \times 10^8 m/s$ , 为光速;  $T$  为黑体的绝对温度,单位为 K。

依据普朗克公式,不同温度下黑体的辐射光谱曲线如图 5-4 所示。

在图 5-4 中可直观地看出黑体辐射的 3 个特性。

(1) 辐射通量密度随波长连续变化,温度的微小变化会引起与曲线下面积成正比的、很大的辐射通量密度变化。根据斯特藩-玻尔兹曼定律,在特定温度下,  $1cm^2$  面积的黑体辐射到半球空间里的总辐射通量密度为

$$W = \frac{2\pi^5 k^4}{15c^2 h^3} T^4 = \sigma T^4 \quad (5-2)$$

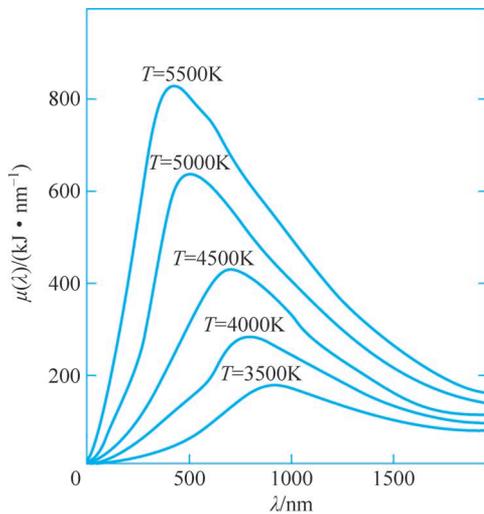


图 5-4 几种温度下的黑体波辐射幅度曲线

式中,  $\sigma = 2\pi^5 k^4 / 15c^2 h^3 = 5.6697 \times 10^{-12} \text{ W}/(\text{cm}^2 \cdot \text{K}^4)$ , 为斯特藩-玻尔兹曼常数,  $T$  为绝对黑体的绝对温度, 单位为 K。在传感器具备同等敏感度的情况下, 如果波段处于曲线峰值部位, 传感器将获得较大的电磁波功率, 可以正常工作; 如果波段若处于远离曲线峰值的部位, 传感器可能因得到较小的电磁波功率而无法工作。故可以参考黑体辐射特性曲线设置合理的工作波段。

(2) 光谱辐射通量的峰值波长  $\lambda_m$  随温度的增加向短波方向移动。对普朗克公式微分后求极大值, 表达式为

$$\frac{\partial W_\lambda}{\partial \lambda} = \frac{-2\pi hc^2 \left[ 5\lambda^4 (e^{\frac{hc}{\lambda kT}} - 1) + \lambda^5 e^{\frac{hc}{\lambda kT}} \left( -\frac{hc}{kT\lambda^2} \right) \right]}{\lambda^{10} (e^{\frac{hc}{\lambda kT}} - 1)^2} = 0 \quad (5-3)$$

令  $X = \frac{hc}{\lambda kT}$ , 解出  $X = 4.96511$ , 根据维恩位移定律, 得出黑体最大辐射能所对应的波长 ( $\lambda_m$ ) 及其绝对温度 ( $T$ ) 的关系式为

$$\lambda_m T = \frac{hc}{4.96511k} = 2897.8 \times 10^{-3} \mu\text{m} \cdot \text{K} \quad (5-4)$$

根据维恩定律可知, 可以通过物体温度推算出辐射功率密度最大的波段, 据此原理选择传感器和对特定的目标选择红外遥感的最佳波段。人体的正常体温是 310K, 相应的辐射功率密度的峰值波长为  $9.35 \mu\text{m}$ , 使用这一波长区域作为红外体温测试仪的工作波段最为合理。此外, 还可以通过物体辐射特性曲线峰值波长估计物体的表面温度。

(3) 每根曲线彼此不相交, 所有波长上的光谱辐射通量密度随温度的升高而增大。故不同温度的黑体在任何波段处的辐射通量密度  $W_\lambda$  是不同的, 可在分波段记录的遥感图像中进行区分。

**【例 5-1】** 利用普朗克公式计算太阳 (6000K) 在红 ( $0.62 \mu\text{m}$ )、绿 ( $0.5 \mu\text{m}$ )、蓝 ( $0.43 \mu\text{m}$ ) 3 个波长上的辐射出射度 (辐射通量密度)。

**【解 5-1】** 普朗克公式表示为  $M = \frac{2\pi hc^2}{\lambda^5} \times \frac{1}{e^{\frac{hc}{\lambda kT}} - 1}$ , 式中,  $M$  为辐射出射度, 单位为  $\text{W}/(\text{m}^2 \cdot \mu\text{m})$ ;  $\lambda$  为波长, 单位为  $\mu\text{m}$ ;  $h$  为普朗克常量,  $h = 6.626 \times 10^{-34} \text{ J} \cdot \text{s}$ ;  $k$  为玻尔兹曼常数,  $k = 1.38 \times 10^{-23} \text{ J}/\text{K}$ ;  $c$  为光速,  $c = 2.9981 \times 10^8 \text{ m}/\text{s}$ ;  $T$  为黑体的热力学温度, 单位为 K; 普朗克第一常数  $c_1 = 2\pi hc^2 = 3.7418 \times 10^8 \text{ W} \cdot \text{m}^2$ , 普朗克第二常数  $c_2 = \frac{hc}{k} = 1.439 \times 10^4 \mu\text{m} \cdot \text{K}$ 。

当  $\lambda = 0.62 \mu\text{m}$  时,

$$M = \frac{2\pi hc^2}{\lambda^5} \times \frac{1}{e^{\frac{hc}{\lambda kT}} - 1} = \frac{c_1}{\lambda^5} \times \frac{1}{e^{\frac{c_2}{\lambda T}} - 1} = 8.73 \times 10^7 \text{ W}/(\text{m}^2 \cdot \mu\text{m})$$

当  $\lambda = 0.5 \mu\text{m}$  时,

$$M = \frac{2\pi hc^2}{\lambda^5} \times \frac{1}{e^{\frac{hc}{\lambda kT}} - 1} = \frac{c_1}{\lambda^5} \times \frac{1}{e^{\frac{c_2}{\lambda T}} - 1} = 9.99 \times 10^7 \text{ W}/(\text{m}^2 \cdot \mu\text{m})$$

当  $\lambda = 0.43 \mu\text{m}$  时,

$$M = \frac{2\pi hc^2}{\lambda^5} \times \frac{1}{e^{\frac{hc}{\lambda T}} - 1} = \frac{c_1}{\lambda^5} \times \frac{1}{e^{\frac{c_2}{\lambda T}} - 1} = 9.69 \times 10^7 \text{ W}/(\text{m}^2 \cdot \mu\text{m})$$

**【例 5-2】** 已知由太阳常数推算出太阳表面的辐射出射度  $M = 6.284 \times 10^7 \text{ W}/\text{m}^2$ , 求太阳的有效温度和太阳光谱中辐射最强波长  $\lambda_{\max}$ 。

**【解 5-2】**

(1) 求太阳的有效温度  $T$ 。

斯特藩-玻尔兹曼定律表示为:  $M = \sigma T^4$ , 其中, 斯特藩-玻尔兹曼常数为  $\sigma = 5.6697 \times 10^{-12} \text{ W}/(\text{cm}^2 \cdot \text{K}^4)$ 。因此,

$$T = \sqrt[4]{\frac{M}{\sigma}} = \left( \frac{6.284 \times 10^7}{5.6697 \times 10^{-8}} \right)^{\frac{1}{4}} = 5770 \text{ K}$$

(2) 求太阳光谱中辐射最强波长  $\lambda_{\max}$ 。维恩定律表示为  $\lambda_{\max} \cdot T = b$ 。式中,  $b$  为常数,  $b = 2.898 \times 10^{-3} \mu\text{m} \cdot \text{K}$ 。因此,

$$\lambda_{\max} = \frac{b}{T} = \frac{2.898 \times 10^{-3}}{5770} = 0.50 \mu\text{m}$$

太阳是地球生物的能量,也是遥感最重要的辐射源。太阳的辐射波谱从 X 射线一直延伸到无线电波,是个综合波谱。太阳辐射的大部分能量集中于近紫-中红外区内,占全部能量的 97.5%,其中可见光占 43.5%、近红外占 36.8%。而近紫外-短波红外(0.31~2.5 $\mu\text{m}$ ),占全部能量的 95%左右。由此可见,太阳辐射主要为短波辐射。在此光谱内,太阳辐射的强度变化很小,可以当作很稳定的辐射源;而 X 射线、 $\gamma$  射线、远紫外,以及微波波段的太阳辐射能小于 1%,它们受太阳黑子和耀斑的影响,强度变化很大。在被动遥感中,白天遥感成像都是利用太阳作为辐射源,从探测物体对太阳辐射的反射能力来获取物体的信息。

自然界中的一切物体在一定温度下都不仅具有反射太阳辐射的能力,还具有向外辐射电磁波的能力。地球辐射接近温度为 300K 的黑体辐射,峰值波长为 9.66 $\mu\text{m}$ ,因此,地球是红外遥感的主要辐射源,而地球的短波辐射可以忽略不计。地物对太阳的辐射反射和自身的电磁辐射交织在一起会影响遥感探测时间和波段的选择。

实际物体的辐射不仅依赖于波长和温度,还与构成物体的材料、表面状况等因素有关。地物的发射率  $\epsilon$  也成为比辐射率或发射系数。比辐射率是指地物发射的辐射量  $W'$  与同温度下黑体的辐射通量  $W$  之比,是温度和波长的函数,即

$$\epsilon = \frac{W'}{W} \quad (5-5)$$

同一地物在不同波段的光谱发射率也不相同。根据光谱发射率随波长的变化形式,将实际物体分为两类:一类是选择性辐射体,在各波长处的光谱发射率不同;另一类是灰体,在各波长处的光谱发射率相等。

根据基尔霍夫定律,在任一给定的温度和波长条件下,辐射通量密度和吸收率之比对任何材料都是一个常数,并且等于该温度下绝对黑体的辐射通量密度,用公式表示为

$$\frac{W'}{\alpha} = W \quad (5-6)$$

式中,  $\alpha$  为吸收率,由式(5-5)可知,根据发射率的定义,得出

$$\epsilon = \alpha \quad (5-7)$$

即在给定温度下,任何地物的发射率在数据上等于同温度、同波长下的吸收率,故一个好的吸收体也是一个好的发射体。

遥感探测就是利用物体对太阳辐射的反射和自身辐射的特性,获取物体反射率随波长变化的特征,并经过一系列的处理和纠正,反映地面物体本身的特性。

### 5.1.2 大气效应

根据大气层垂直方向上温度梯度变化的特征,一般把大气层划分为对流层、平流层、中间层、热层和散逸层 5 个层次。

#### 1. 大气对太阳辐射的反射

大气中有云层,当电磁波到达云层时产生反射现象。云层越厚反射量越大,厚度大于 50m 时,反射量达 50% 以上;厚度为 500m 时,反射量超过 80%。大气层中直径大于  $10^{-6}$  m 的其他微粒也会产生反射作用,使电磁波各波段受到不同程度的影响,削弱了电磁波到达地面的程度,因此应尽量选择无云的天气接收遥感信号。

#### 2. 大气吸收

在紫外、红外与微波区,引起电磁波衰减的主要原因是大气吸收,而引起大气吸收的主要成分是氧气、臭氧、水、二氧化碳等。大气中的各种成分对太阳辐射有选择性吸收,形成大气吸收带,如表 5-1 所示。

表 5-1 大气吸收带的主要成分

吸收带	主要成份
O <sub>2</sub> 吸收带	小于 0.2 $\mu$ m, 0.76 $\mu$ m 窄带吸收(对航空遥感影响较小)
O <sub>3</sub> 吸收带	0.2~0.36 $\mu$ m(紫外,高空遥感很少使用紫外波段)
H <sub>2</sub> O 吸收带	在 0.5~0.9 $\mu$ m 有 4 个窄吸收带,在 0.95~2.85 $\mu$ m 有 5 个宽吸收带,在 6.25 $\mu$ m 附近有一个强吸收带。(红外和可见光的红光部分,对红外遥感影响很大)
CO <sub>2</sub> 吸收带	在 1.35~2.85 $\mu$ m 有 3 个宽的弱吸收带,在 2.7 $\mu$ m、4.3 $\mu$ m 与 14.5 $\mu$ m 为强吸收带(量少,吸收作用主要在红外区,可以忽略不计)
尘埃	吸收量很小

#### 3. 大气散射

太阳辐射在传播过程中受到大气中微粒(大气分子或气溶胶等)的影响而改变原来传播方向的现象称为散射。大气散射强度与微粒大小、微粒含量、辐射波长和能量传播所穿过的大气层厚度有关。大气散射改变了电磁波的传播方向,并干扰传感器接收,降低遥感数据质量,从而导致遥感影像模糊,影响判读。在可见光波段,引起电磁波衰减的主要原因是分子散射。

散射强度可用散射系数( $\gamma$ )表示,与电磁波波长的关系如下:

$$\gamma \propto 1/\lambda^\varphi \quad (5-8)$$

式中, $\varphi$  为波长的指数,它由大气微粒直径  $d$  与波长  $\lambda$  的关系决定。散射的性质和强度取决于微粒的直径  $d$  与电磁波波长  $\lambda$  之间的关系。

根据大气中微粒的直径大小与电磁波波长的对比关系,通常把大气散射分为瑞利散射、米氏散射和非选择性散射 3 种主要类型。

当大气粒子的直径远小于入射电磁波波长( $d \ll \lambda$ )时,出现瑞利散射,此时散射系数与波长的 4 次方成反比,对红外波段影响很小,可以忽略不计,但是对波长较短的可见光影响

较大。瑞利散射降低了图像的“清晰度”或“对比度”，是造成遥感图像辐射畸变、图像模糊的主要原因。瑞利散射还对高空摄影图像的质量有一定影响，能使彩色图像略带蓝灰色。

当大气粒子的直径约等于入射电磁波波长( $d \approx \lambda$ )时，出现米氏散射。米氏散射主要由大气中的烟尘、气溶胶、小水滴等引起。云雾的粒子大小与红外线(0.76~15 $\mu\text{m}$ )的波长接近，故米氏散射不可忽略。在一般大气条件下，瑞利散射起主导作用，但米氏散射能叠加于瑞利散射之上，使天空变得阴暗。在多云条件下，米氏散射更多地发生在低层大气空间，这里微粒更大、数量更多，散射强度也最大。

当大气粒子的直径远大于入射电磁波波长( $d \gg \lambda$ )时，出现非选择性散射。非选择性散射与波长无关，对任何波长的散射强度相同。大气中的云、雾、烟、尘埃等气溶胶引起的散射多属于非选择性散射，使云和雾呈现白色或灰色。近红外、中红外也满足  $d \gg \lambda$ 。非选择性散射使传感器接收到的数据严重衰减。

#### 4. 大气窗口和大气屏障

太阳辐射在到达地面之前穿过大气层，大气折射只是改变太阳辐射的方向，并不改变辐射的强度。但是大气反射、吸收和散射对共同造成了辐射强度的衰减，剩余辐射才为透射部分。

不同电磁波段通过大气后衰减的程度是不一样的，因而遥感能使用的电磁波是有限的，有些波段的电磁辐射通过大气后衰减较小，透过率高，对遥感十分有利，这些波段通常称为大气窗口。相对大气窗口而言，有些波段受大气影响作用极大，透过率很小，甚至完全无法透过云层。这些波段就难于或者不能被遥感所使用，称为大气屏障。

## 5.2 地物反射及其反射波谱特性

电磁波从较稀疏的空气介质进入较紧密的物体介质的界面上时，将产生反射。按照界面的平滑程度不同，可分为镜面反射、漫反射和方向反射。

### 5.2.1 电磁波的地物反射

当界面起伏高度相对入射电磁波波长较小时，发生镜面反射。镜面反射光线很强，例如在摄影时，镜面反射光线会在照片上生成亮眼的白斑，应避免镜面反射光线。当界面较粗糙时，发生漫反射，电磁波向各方向均匀反射，各方向上反射的亮度值是一样的。当界面起伏介于上述两种情况之间，处于中等粗糙度时，产生方向反射，入射电磁波向各方向反射出去，但不同方向亮度值不同，一般镜面反射方向辐射亮度较强，其他方向较弱。

反射率是物体的反射辐射通量与入射辐射通量之比，这个反射率是在理想漫反射的情况下，地物在整个电磁波长范围内的平均反射率。实际上，由于地物固有的结构特点，以及受环境因素的影响，不同波长的电磁波会选择性反射。因此，地物的反射率通常指的是光谱反射率  $\rho_\lambda$ ，即地物在某波段的反射通量  $E_{\rho_\lambda}$  与该波段的入射通量  $E_\lambda$  之比。光谱反射用公式可表示为

$$\rho_\lambda = \frac{E_{\rho_\lambda}}{E_\lambda} \quad (5-9)$$

## 5.2.2 反射波谱特性

地物的反射率随入射波长变化而变化的规律,叫作地物反射波谱。按地物反射率随波长变化绘成的曲线(横轴为波长,纵轴为反射率)称为地物反射波谱曲线。以下是一些地物类型的典型波谱特点。

水体对可见光波段中的蓝色和绿色光线具有较高的反射能力。水体在近红外、中红外波段具有较强的吸收能力,反射率几乎为零,在此波段的黑白正片上,水体的色调很黑,与周围土壤有明显区别,据此可确定水体的位置和轮廓。

雪在可见光波段的电磁反射率很高,并且和太阳的能量光谱接近,因而表现为白色,又因为在紫光和蓝光波段反射率较大,几乎接近 100%,所以颜色偏蓝白。随着波长的增加,雪的反射率逐渐降低,在近红外波段具有很强的吸收能力。

土壤在自然状态下的反射率没有明显的峰值和谷值,反射波谱特性曲线较为平滑,在不同光谱段的遥感影像上亮度区别不明显。一般来说,土壤的光谱特性曲线与土壤类别、含水量、土壤表面粗糙度、粉砂相对百分含量等因素有关。此外,土壤的肥力也对反射率有一定的影响。

波谱特性可用于遥感图像分析和地物分类。通过分析地物在不同波段的反射率和吸收率,可以区分和识别不同类型的地物覆盖,这在农业、生态学、地质勘探、环境监测和城市规划等领域具有广泛的应用。

很多因素会引起地物反射率的变化,如地物本身的变异、太阳位置、传感器位置、地理位置、气候变化、大气状况等。不同地物具有不同的反射波谱特性,可以根据传感器接收到的电磁波波谱特征的差异来识别不同地物,这是遥感的基本出发点。地物存在“同物异谱”和“异物同谱”现象。“同物异谱”是指同种类型的个体地物,在某个波段上波谱特征不同。同一地物的光谱特性受制于所处的时间和空间。以春小麦为例,处于不同地理区域的春小麦具有不同的光谱响应。处于花期的春小麦反射明显高于灌浆期和乳熟期,而到了黄叶期,不再具备绿色植物特征,反射光谱接近一条直线。此外,同类地物反射波谱相似,但随着地物内在差异而有所变化,如植物叶片缺水或遭遇病虫害时,波谱特征会异于平常。“异物同谱”是指不同类型的地物在某个波段具有相同的波谱特征。地物反射率的变化是一种重要的遥感信息,分析其变化的原因和规律,为遥感监测地物的变化过程提供主要依据,对遥感图像的解译和信息提取有重要意义。

## 5.3 遥感传感器及成像原理

### 5.3.1 遥感传感器

#### 1. 传感器的组成

传感器是在电磁波谱的多个波段上,采集感兴趣的目标或区域的电磁辐射信息,并将其转换为输出信号的设备,是遥感工作系统的主要部分。

遥感传感器一般由 4 部分构成:收集器、探测器、处理器和输出器。遥感传感器的一般构成如图 5-5 所示。

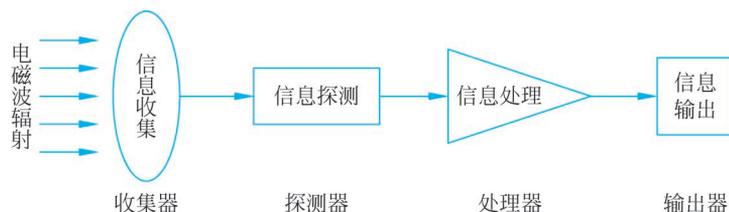


图 5-5 遥感传感器的一般构成

### 1) 收集器

收集来自目标物的辐射能量。基本的收集元件如：摄影机的透镜组、扫描仪的反射镜组、天线等。如果是多波段遥感，其收集系统中包含按波段分波束的元件，如滤色镜、棱镜、光栅、分光镜、滤光片等。

### 2) 探测器

实现能量转换。将收集的辐射能转变成化学能或电能，测量和记录接收到的电磁辐射能量。具体的元件如感光胶片、光电敏感元件、固体敏感元件、热探测器、波导等。

### 3) 处理器

对收集的信号进行处理，如胶片的显影及定影，信号放大与变换、编码等。处理器的转换系统一般都是电光转换器。

### 4) 输出器

输出获得的图像、数据，如扫描晒像仪、阴极射线管、磁带记录仪、电视显像管、光盘、硬盘等。

## 2. 传感器的分类

卫星遥感传感器可以根据工作方式、波段范围和成像原理进行不同的分类。

按照工作方式可以分为被动式传感器和主动式传感器。被动式传感器接收地面目标反射的来自太阳的能量或目标地物自身辐射的电磁波能量，如可见光与近红外传感器、热红外扫描成像传感器、多光谱扫描传感器、微波辐射计等。主动式传感器本身向目标发射电磁波，收集从目标物反射回的电磁波，如雷达传感器、激光雷达、声呐雷达等。

按波段范围可分为可见光传感器、红外传感器、雷达传感器和微波传感器。可见光传感器用于捕捉可见光波段（通常是 380~750nm）的光谱信息，生成彩色或黑白图像。红外传感器用于捕捉红外光波段的光谱信息，包括近红外、中红外和热红外波段。雷达传感器利用雷达波（无线电波）进行成像，通常包括合成孔径雷达（Synthetic Aperture Radar, SAR）和真实孔径雷达（Real Aperture Radar, RAR）。微波传感器用于捕捉微波波段的信号，通常用于海洋监测、大气研究、土壤湿度估算等。

另外，还可以按成像原理和所获取图像性质分类，可以分为摄影成像传感器、扫描成像传感器、微波遥感传感器。表 5-2 列出了按成像原理划分的 3 种传感器及常见设备。

表 5-2 按照成像原理划分的 3 种传感器及常见设备

传感器类型	常见设备
摄影成像传感器	框幅式摄影机
	缝隙式摄影机
	全景摄影机
	多光谱摄影机

续表

传感器类型	常见设备
扫描成像传感器	光机扫描仪
	推扫式扫描仪
	成像光谱仪
微波遥感传感器	雷达
	微波辐射计

### 5.3.2 遥感成像原理

#### 1. 摄影成像

**定义 5.1 摄影成像：**摄影成像传感器通过成像设备来获取物体影像，在快门打开后几乎瞬间同时接收目标的电磁波能量，聚焦后记录下来成为一幅影像。

##### 1) 摄影成像的基本原理

摄影成像传感器包括框幅摄影机、缝隙摄影机、全景摄影机、多光谱摄影机等，摄影机的工作波段在 290~1400nm，覆盖紫外、可见光、近红外短波段，它获取的图像信息量大，分辨率高。但是航空摄影和航天摄影往往在晴朗的白天工作，不能进行全天候遥感。

最初的摄影成像方式与传统的照相机成像方式相同，传统摄影成像是通过镜头将地物反射或发射的电磁波聚焦在感光胶片上(曝光)成潜像，经显影和定影处理后产生图像即照片。以黑白摄影为例，黑白程度由胶片上卤化银聚集密度决定；密度越大，图像越黑；密度越小，图像越白。黑和白的强度与地物反射或发射电磁波强弱有密切关系，而且变化是逐渐过渡的。通过这种方式形成的图像是模拟图像，经扫描数字化后才能产生数字图像。而现在的数字摄像通过放置在焦平面的光敏元件经光电转换，以数字信号来记录物体的图像。

##### 2) 摄影像片的几何特征

###### (1) 平面角与立体角。

在遥感技术中，物体辐射规律是遥感的物理基础之一，而定量表述物体辐射强度的一个基本物理量是立体角。立体角由弧度制下的平面角概念衍生而来，平面角的定义如下。

**定义 5.2 平面角：**以任意一个角的顶点为圆心，以任意长度为半径  $r$  作圆，角的两个边线所夹含的圆弧长度  $s$  与半径之比，单位为弧度。

$$\theta = \frac{s}{r} \quad (5-10)$$

将这一定义扩展到三维，即可得到立体角的定义。

**定义 5.3 立体角：**以锥或类锥体的顶点为球心，半径为  $r$  的球面被锥面或类锥体所截得的面积与整个球面的面积之比来度量的，其度量单位为球面度。

$$\Omega = \frac{A}{r^2} \quad (5-11)$$

式中， $A$  是锥面或类锥体所截得的球面面积， $r$  为球的半径。由式(5-11)可知，半个球体所张的立体角为  $2\pi$  球面度。平面角和立体角的定义示意如图 5-6 所示。

任意一个矩形平面  $A'$  与平面外的一点  $c$  都可以构成立体角。此时，类锥体的顶点就设在点  $c$ ，类锥体的曲面外接矩形平面  $A'$ 。以点  $c$  为球心，以  $r$  为半径作一个球面，而类锥体

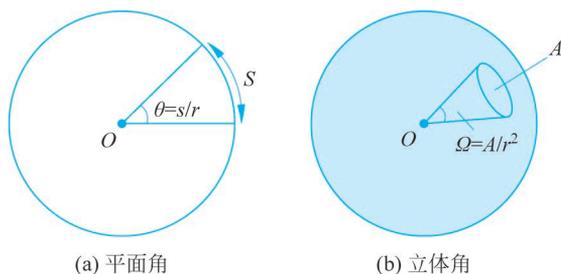


图 5-6 平面角和立体角的定义示意

截获球面的面积,也就是矩形平面  $A'$  在类锥体方向在球面上的投影,即为面元  $A$ 。根据式(5-11)可计算出矩形平面  $A'$  与平面外的一点  $c$  构成立体角的数值。点  $c$  不一定要设在矩形平面  $A'$  的正上方,设在平面外的任意位置都可以形成类锥体。进一步扩展,  $A'$  也可以不是平面,而是任意一个三维实体的曲面,立体角的定义仍然成立。

理论上,面元  $A$  应当是一个球面,当  $r$  充分大,  $r^2$  远大于面元  $A$  面积时,面元  $A$  就可以用平面代替。比如在遥感拍摄影像时,  $r$  为数千米甚至数百千米,而面元  $A$  只有几个平方千米,或小到仅数平方米,甚至不足  $1\text{m}^2$ ,此时由式(5-11)可以看出,  $r$  增大,立体角减小。

点状地物向外各个方向辐射电磁波能量,立体角定义了在这个特定空间范围内接收到的辐射能量占点状地物总辐射能量的比例。随着立体角增大,捕获到的点状地物辐射能量也会增加。同理,对于球面上的局部区域(在遥感领域即地面单元)辐射出的能量,立体角表示在其垂直方位上角顶点接收到辐射能量的比例。对比飞机载荷的遥感传感器与卫星载荷的遥感传感器,对于相同的地面单元,前者与地面形成的立体角通常远大于后者。因此,飞机载荷的遥感传感器接收到的地面辐射能量,包括反射能量,比卫星载荷的遥感传感器要大得多。这也是飞机遥感影像数据相较于卫星遥感影像数据具有更高信噪比和更好图像质量的原因。为了获得更高质量的卫星遥感图像数据,通常需要采取多种措施来提升传感器的性能。例如,将传感器置于液态氮的恒低温环境下,尽可能降低热噪声,以解决图像数据信噪比较低的问题。

(2) 受光截面。

相对一个点光源  $O$ ,一个受光四边形  $G$  及其截面  $G'$  的几何关系如图 5-7 所示。四边形  $G$  相对点  $O$  构成一个立体角,将其投影到面  $G'$  的方向,面  $G'$  的法线通过点  $O$ ,面  $G$  与面  $G'$  的两面角为  $\varphi$ ,容易看到,四边形  $G$  的投影面  $G'$  还是四边形。四边形  $G$  的面积为  $A$ ,投影面  $G'$  的面积为  $A'$ 。面积  $A$  与面积  $A'$  的关系为

$$A' = A \cos \varphi \tag{5-12}$$

式中,  $\varphi$  为矩形平面  $G$  与面元  $G'$  的夹角。显然,  $\varphi$  越大,矩形平面  $G$  产生的有效面元  $G'$  就越小,甚至当  $\varphi$  为  $90^\circ$  时,其有效面元面积为零。

考虑遥感中的实际情况:点  $O$  为遥感传感器,四边形  $G$  为地面辐射或反射单元,点  $O$  与四边形  $G$  构成一个立体角,四边形  $G$  与其截面  $G'$  相对于传感器  $O$  的辐射或反射效果是等效的。因此,地面单元相对于传感器的方位非常重要,方位不同,有效截面不同,传感器接

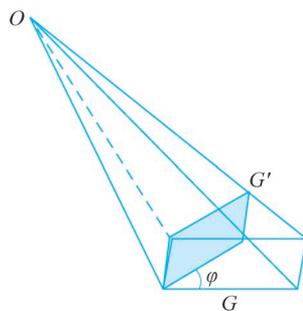


图 5-7 受光四边形  $G$  及其截面  $G'$  的几何关系

收其辐射或反射效果有很大的差别。

卫星遥感中多数是等立体角成像,也就是说在遥感影像中,每一个像元与地面对应单元构成的立体角是相等的。但是图像中间部位的像元与左右两侧的像元同地面对应单元的距离是不一样的:图像中间部位像元同地面对应单元的距离小于左右两侧像元同地面对应单元的距离,根据式(5-11)对立体角的定义,为保持立体角 $\Omega$ 不变,当像元同地面对应单元的距离 $r$ 增大时,地面对应单元的面积 $A$ 势必要随之相应增大。这就是说,在一幅卫星遥感影像上,每个像元因其在图像的部位不同,对应地面单元的面积也随之不同:靠近图像南北中轴线像元的地面对应单元面积要小,成像精度要高;反之远离图像南北中轴线像元,即靠近图像东西两侧像元的地面对应单元面积要大,成像精度要低。此外,由于各像元与地面单元构成的立体角 $\Omega$ 相同,因而各地面单元相对于像元的散射截面是相同的。

## 2. 扫描成像

**定义 5.4 扫描成像:**扫描成像传感器依靠探测元件和扫描镜对目标地物或目标地物形成的影像进行逐点、逐行取样,以得到目标地物电磁辐射信息,形成一定谱段的图像。

扫描成像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。探测范围包括紫外、红外、可见光和微波波段。扫描成像传感器包括光机扫描仪、推扫式扫描仪和成像光谱仪。

### 1) 光机扫描仪

光学/机械扫描仪是利用光学机械(扫描镜)在垂直于航向的方向(舷向)上向地面作横向扫描,通过飞行完成航向扫描,其扫描速度与飞行速度相适应,在终端形成一幅在航向上延伸、在舷向上有一定宽度的、连续的条带影像,并通过信息转换记录在磁带上。依靠探测元件和扫描镜对目标地物以瞬时视场为单位进行逐行取样,以得到目标地物电磁辐射特性

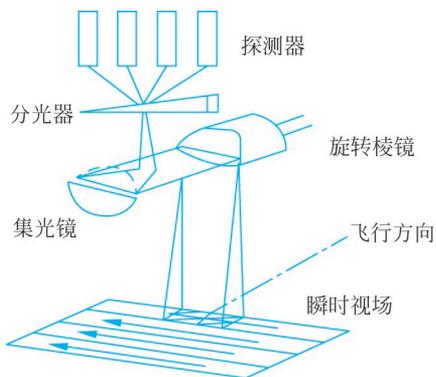


图 5-8 光机扫描仪成像过程

信息,形成一定谱段的影像。光机扫描仪的成像过程如图 5-8 所示。

当旋转棱镜旋转时,第一个镜面对地面横越航向方向扫视一次,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、聚焦到分光器上,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像,在底片曝光后记录下来,称为一个像元;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,向地面实时

发送或由磁带记录仪记录后做时延回放。随着棱镜的旋转,垂直于航向上的地面依次成像形成一条影像线,并被记录下来。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像,最后形成连续的地面条带影像。因此光机扫描成像方式也称垂直航迹扫描系统。

光机扫描仪按工作波段可分为红外扫描仪和多光谱扫描仪。

#### (1) 红外扫描仪。

红外扫描仪的成像原理是基于物体并根据其温度发射红外辐射的特性,使用红外探测

器逐行扫描被观测区域,探测器对不同温度下发射的红外能量敏感,能够捕捉这些能量差异。随着扫描仪或平台(如卫星或飞机)的移动,红外探测器覆盖新的区域,逐步构建起整个场景的热图。探测到的红外辐射被转换成电信号,这些信号随后被数字化并处理,以生成表征目标区域温度分布的图像。通过这些图像,可以揭示物体的热特性,例如植被的健康状况、水体的温度分布或地表的热岛效应等。

红外扫描仪具有隐蔽性和夜间能见度高的优点,可以探测热辐射,因此不依赖于可见光,可在夜间或低光条件下工作,适用于军事监测、夜视和安全应用。此外,红外辐射可以穿透大气中的雾、烟雾和云层,因此对于一些恶劣天气条件下的观测和监测任务非常有用。但红外扫描仪存在一些不足,如:红外扫描仪的性能受环境温度变化的影响较大,需要进行校准和温度补偿;空间分辨率通常较低,不适用于需要高分辨率图像的应用。

## (2) 多光谱扫描仪。

多光谱扫描仪使用一系列并排的探测器,每个探测器专门对应不同的光谱波段,比如可见光的红、绿、蓝波段,以及可能包括的近红外、远红外或其他光谱范围。在飞机或卫星移动的同时,对同一地区,在同一瞬间摄取多个波段影像,充分利用地物在不同光谱区有不同的反射这一特征,增多获取目标的信息量,并通过分光镜或滤光片将接收到的光分成不同的光谱组分,然后分别记录下各组分的光强。记录的信号转换为电信号,并经过放大、数字化后形成图像。这些图像随后可以被叠加处理,生成能够反映地表不同物质和对象光谱特性的彩色图像。因此,不仅可以依据扫描影像的形态和结构识别地物,而且可以利用不同谱段的差别来区分地物,为遥感数据的分析与识别提供了非常有利的条件。多光谱扫描仪常用于收集农作物、植物、土壤、森林、地质、水文和环境监测等方面的遥感资料。

## 2) 推扫式扫描仪

推扫式扫描仪是一种高分辨率的遥感成像设备,能够进行广域覆盖的成像。这种仪器的核心是一组线性排列的探测器阵列,它们能够捕获来自地表的光谱信息。与光机扫描仪相比,推扫式扫描仪没有机械装置,探测器的探测原理也不同。推扫式扫描仪使用的固体探测器件是电荷耦合器件(Charge-Coupled Device, CCD),是一种用于探测光的硅片,由时钟脉冲电压产生,并通过控制半导体势阱的变化,实现存储和传递电荷信息的固态电子器件。在 CCD 中,用电荷来表示信息,对信息的表达具有更高的灵敏度,在固体成像、信息处理和大容量存储器方面大有用途。

在成像过程中,推扫式扫描仪依靠载体(如卫星或飞机)的前进运动来逐行捕获图像,并聚焦在 CCD 线阵列元件上,然后,经过分光器,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向的一条影像线,并随着平台的向前移动,以“推扫”方式获取沿轨道的连续影像条带。每一行的探测器同时记录下它们对准的地面上一细长条带的电磁波信息。

由于扫描仪本身不进行横向机械扫描,因此相较于传统的机械扫描仪器,推扫式扫描仪可以提供更加稳定和一致的成像质量。在推扫过程中,不同探测器元素对不同的光谱波段敏感,这就允许了多光谱或者高光谱的成像能力,每个波段都可以揭示地物的不同特性。探测器收集的数据在被数字化后,需经过复杂的处理以校正大气干扰、运动畸变和其他潜在的误差源。经过这些处理后,推扫式扫描仪生成的图像能够为研究者提供关于地面情况的详细视图,这对于环境监测、资源管理和地图制作等领域至关重要。

由于推扫式扫描仪能够捕捉到细致的地面细节并提供多光谱信息,因此在精密农业、城

市规划、地质勘探和环境科学中扮演着日益重要的角色。另外,推扫式扫描仪能够提供高质量数据,是进行时间序列分析和变化检测的强有力基础。

### 3) 成像光谱仪

不同于普通的多光谱扫描仪,成像光谱仪具有更多更窄的连续光谱波段,为更全面地理解地物提供了帮助。成像光谱仪把可见光、红外波谱分割成几十到几百个波段,每个波段都可以取得目标图像,同时对多个目标图像进行同名地物点取样,取样点的波谱特征值随着波段数越多越接近连续波谱曲线,既能成像又能获取目标光谱曲线,实现“谱像合一”。

成像光谱仪利用一排排的探测器阵列捕获来自地球表面的电磁辐射,每个探测器元素专门对应特定的光谱波段,当载体移动时,探测器能逐行收集对应波段的地表信息。这些数据随后被转换成电信号,并进行数字化处理以形成图像。

成像光谱仪的光谱分辨率高,使研究者能够分辨细微的物质组成差异,例如区分不同类型的矿物、植被和其他地表材料。通过这些详细的光谱信息,可以对物体的化学成分、健康状况等进行分析 and 解释。成像光谱仪对于环境监测、地质勘探、精密农业,以及军事侦察等领域尤其有价值,它能够揭示通常不可见的物质特性和变化过程。

## 3. 微波遥感

**定义 5.5 微波遥感:**微波遥感传感器用微波设备来探测、接收被测物体在微波波段的电磁辐射和散射特性,以识别远距离物体。

微波遥感有两种工作方式:一是主动方式,利用传感器向地面发射微波后接收其散射波,这种工作方式的传感器有雷达;二是被动方式,这种方式的传感器有微波辐射计。

### 1) 雷达

雷达可以大体分为全景雷达和侧视雷达两种。全景雷达通常采用旋转天线或多个相控阵天线实现全方位监视,但不一定提供高分辨率成像。侧视雷达(Side Looking Radar, SLR)分为 RAR 和 SAR,由于 RAR 的分辨率较低,很少作为成像雷达使用,现在的 SLR 一般指视野方向与飞行器前进方向垂直、用来探测飞行器两侧地带的 SAR。

雷达成像需要有一个基本条件,即雷达发射出来的波束照在目标不同部位的时间有先后差异,从而从目标反射的回波也出现时间差,这样才能区分目标的不同部位。因此,雷达必须具备二维方向上的扫描。雷达天线在飞行器上,与飞行器同方向前进,发出的波束依次向前扫描,即航向扫描;天线发出的能量脉冲指向飞行器的一侧,与航线垂直方向的地面物体各部分反射的回波便可产生时间差,即距离向扫描。SLR 就是以这种连续带状形式对地表进行二维扫描,逐行成像。具体地说,SLR 的天线不转,固定后,在矩形荧光屏或感光胶片上形成一个纵(航)向条带的图像。侧视雷达由发射机向侧面发射一束窄脉冲,地物反射的微波脉冲(又称回波)被接收机接收。由于地面各点到发射机/接收机的距离不同,接收机收到的信号具有先后不同的次序,而信号的强度与窄脉冲带内各种地物的特性、形状和坡向等有关。接收到的信号经处理后在阴极射线管上形成一条表示地物反射特征的图像线,并记录在胶片上。遥感平台向前飞行时,不断地向侧面发射窄脉冲,在阴极射线管上形成一条条的图像线,胶片与遥感平台速度同步,就得到了由强弱不同的回波信号组成的图像。记录在胶片上的雷达图像属于遥感模拟图像。

#### (1) RAR。

RAR 的天线装在平台的侧面,发射机向侧向面内发射一束窄脉冲,经地物反射的微波

脉冲由天线收集后,被接收机接收。由于地面各点到平台的距离不同,接收机接收到的相应信号以它们到平台距离的远近被记录,从而实现距离方向上的扫描。通过平台的前移,实现方位上的扫描,获取地表的二维影像。信号的强度与辐照带内各种地物的特性、形状和坡向等有关。

## (2) SAR。

SAR 用一个小天线作为辐射单元,将此单元沿一直线不断移动。在移动中选择若干位置,在每个位置上发射一个信号,并接收相应发射位置的回波信号存储记录下来,在存储时保存接收信号的幅度和相位。当辐射单元移动一段距离  $L$  后,存储的信号和实际天线阵列诸单元接收的信号非常相似。SAR 是在不同位置上接收同一地物的回波信号,而 RAR 则在一个位置上接收目标的回波。如果把 RAR 划分成许多小单元,则每个单元接收回波信号的过程与 SAR 在不同位置上接收回波的过程十分相似。RAR 与 SAR 接收信号的相似性如图 5-9 所示。真实孔径天线接收目标回波后,就像物镜聚合成像;而合成孔径天线对同一目标的信号不是在同一时刻得到,在每一个位置上都要记录一个回波信号。由于目标到平台之间球面波的距离不同,每个信号相位和强度也不同。这样形成的整个影像,并不像 RAR 影像那样能看到实际的地面影像,而是得到相干影像,须经处理后才能恢复地面的实际影像。

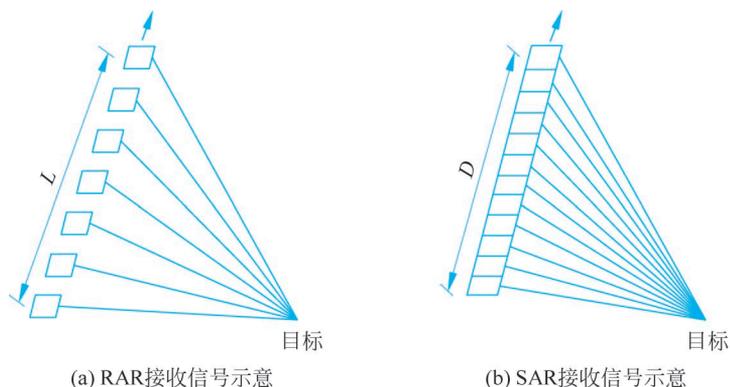


图 5-9 RAR 与 SAR 接收信号的相似性

## 2) 微波辐射计

微波辐射计是一种被动遥感仪器,主要用于测量地球表面或大气发射的微波辐射能量。其成像原理不同于活动雷达系统,微波辐射计不发射任何辐射,而是仅仅侦测自然辐射的微波信号,因此不容易被发现,具有良好的保密性。同时辐射计的体积、功耗都很小。

微波辐射计是能够测量低电平微波辐射的高灵敏接收机。成像的过程如下。首先,微波辐射计接收从地表或大气中自然发射的微波能量,这种能量与物体的温度和介电特性有关。其次进行频率选择,辐射计通常在微波光谱中的特定频率上工作,它根据分子和材料的特定辐射特性来探测大气成分、水汽、陆地或海洋表面温度等。然后计算辐射温度,通过测量辐射强度,辐射计可以计算出辐射体的辐射温度,这可以通过普朗克辐射定律转换为辐射体的实际温度。之后生成图像,通过对从不同区域收集的辐射强度数据进行分析,可以生成显示温度变化和物质成分差异的图像。

微波辐射计可以连续监测,因此可以用来研究动态变化,如天气系统、海洋表面温度变

化等。微波辐射计能在任何天气条件下进行观测,包括云层和雨雾,因此非常适合进行全天候的环境监测和气候研究。

## 5.4 遥感影像的4种分辨率及其相互作用

遥感技术的发展、遥感采集手段的多样性、观测条件的可控性,确保了所获得的遥感数据的多源性,即多平台、多波段、多角度等,多维的遥感数据通过不同的分辨率和特性来度量 and 描述。

### 5.4.1 空间分辨率

**定义 5.6 空间分辨率:**是指图像上能够详细区分的最小单元的尺寸或大小,或指遥感器区分两个目标的最小角度或线性距离的度量。它们均反映对两个非常靠近的目标物的识别、区分能力,有时也称分辨力或解像力。

一般来说,遥感系统的空间分辨率越高,其识别物体的能力越强。但是实际上,每一目标在图像的可分辨程度不完全取决于空间分辨率的具体值,而是和目标的形状、大小,以及它与周围物体亮度、结构的相对差异有关。例如,Landsat/MSS的空间分辨率为80m,但是宽度仅15~20m的铁路甚至仅10m宽的公路,当它们通过沙漠、水域、草原、农作区等背景光谱较单调或与道路光谱差异大的地区,往往清晰可辨。这是它独特的形状和较单一的背景值导致的。

### 5.4.2 光谱分辨率

**定义 5.7 光谱分辨率:**指遥感器所选用的波段数量的多少、各波段的波长位置及波段间隔的大小,即选择的通道数、每个通道的中心波长(遥感器最大光谱响应所对应的波长)、带宽(用最大光谱响应的半宽度来表示),这3个因素共同确定光谱分辨率。

光谱波段的中心波长与光谱响应函数的最大值相对应。狭义的光谱分辨率仅指波段宽度(带宽)。

对于黑/白全色航空照片,照相机用一个综合的宽波段(0.4~0.7 $\mu\text{m}$ ,波段间隔为0.3 $\mu\text{m}$ )记录下整个可见光红、绿、蓝的反射辐射;Landsat/TM有7个波段,能较好地地区分同一物体或不同物体在7个不同波段的光谱响应特性的差异;航空可见、红外成像光谱仪AVIRIS,有224个波段(0.4~2.45 $\mu\text{m}$ ,波段间隔近10nm),可以捕捉到多种物质特征谱段的微小差异。可见,光谱分辨率越高,专题研究的针对性越强,可以更好地改善识别和提取信息特征的概率和精度。但是,波段分得越细,各波段数据间的相关性可能越大,因此造成的数据冗余,也会给数据传输、处理和鉴别带来新的困难。

### 5.4.3 辐射分辨率

任何图像目标的识别,最终依赖于探测目标和特征的亮度差异。这里有两个前提条件:一是地面景物本身必须有充足的对比度(指在一定波谱范围内亮度上的对比度);二是遥感仪器必须有能力记录下这个对比度。因此,在遥感调查中,仪器的灵敏度以及地面目标与背景间存在的对比度总是至关重要的。

**定义 5.8 辐射分辨率：**指遥感器对光谱信号强弱的敏感程度、区分能力，即探测器的灵敏度——遥感器感测元件在接收光谱信号时能分辨的最小辐射度差，或指对两个不同辐射源的辐射量的分辨能力。

辐射分辨率一般用灰度的量化级数表示，即最暗到最亮灰度值(亮度值)之间的分级数目，Landsat/MSS 传感器起初以 6bit 记录反射辐射值，经数据处理把其中 3 个波段扩展到 7bit；而 Landsat/TM，6 个反射波段以 8bit 记录数据，显然 TM 比 MSS 的辐射分辨率高，图像的可检测能力增强。

#### 5.4.4 时间分辨率

**定义 5.9 时间分辨率：**遥感探测器重复采集数据的最小周期，是遥感影像时间间隔的一项性能指标。

该周期由飞行器的轨道高度、轨道倾角、运行周期等参数所决定，与遥感传感器没有关系。

根据遥感系统探测周期的长短可将时间分辨率分为 3 种类型。超短或短周期时间分辨率以“小时”为单位，如气象卫星系列(极轨和静止气象卫星)，可以用于探测大气海洋物理现象、突发性灾害监测、污染源监测等。中周期时间分辨率以“天”为单位，如对地观测的资源环境卫星系列(Landsat、SPOT、ERS、JERS、CBERS-1 等)，可以用于探测植物的季相节律，捕捉某地域农时历关键时刻的遥感数据，以获取一定的农学参数，进行作物估产与动态监测、旱涝灾害监测及气候学、大气、海洋动力学分析等。长周期时间分辨率反映以“年”为单位的的变化，如湖泊消长、河道迁徙、海岸进退、城市扩展、灾情调查、资源变化等。

#### 5.4.5 4 种分辨率的关系

空间分辨率、光谱分辨率、辐射分辨率是相互协同又相互制约的关系，它们共同决定遥感影像表达与分辨地物的能力，同时又需要维持平衡。遥感传感器对于入射光能量变化的测试敏感程度有限。遥感传感器接收到的辐射能量变化有一个最小的限度，不满足限度，传感器就接收不到带有信息的电磁波信号了。在这一限度下，如果地面单元反射或自身辐射的能量积分起来，不到这一限度，只有扩大地面单元面积，在更大一点面积上对辐射能量积分，使接收的辐射能量达到限度。这就是说，在光谱分辨率一定的情况下，为了保证地物有足够的反射或自身辐射能量，只能放宽空间分辨率。对于空间分辨率与辐射分辨率而言，遥感器内单个探测元件的受光角度或观测视野，即瞬时视场(Instantaneous Field of View, IFOV)越大，最小可分像素越大，空间分辨率越低；但是，IFOV 越大，光通量即瞬时获得的入射能量越大，辐射测量越敏感，对微弱能量差异的检测能力越强，则辐射分辨率越高。因此，空间分辨率的增大，将伴之以辐射分辨率的降低。可见，高空间分辨率与高辐射分辨率难以两全，它们之间必须有个折中。

时间分辨率体现遥感影像表达地物形态的能力受时间影响的大小，不受传感器的影响。时间分辨率还受到重访周期的影响。重访周期指首次拍摄某地后依然能够利用传感器上的侧摆角拍摄到此地的影像所需要的时间间隔，即利用卫星的侧摆快速拍摄同一地点图像所需要的最短时间，是根据应用要求人为设计的时间。如果传感器不能侧摆(垂直观测)，就无须考虑重访周期。如果传感器具有侧视功能，则具有重访周期，如 OrbView 和 QuickBird

(快鸟)的传感器等,高分辨率卫星传感器一般具备重访周期。

## 章节习题

- 5-1 遥感技术中常用的电磁波波段有哪些? 各有哪些特性?
- 5-2 电磁辐射的度量有哪些?
- 5-3 什么是黑体? 试述黑体辐射特性。
- 5-4 自然界中有哪些主要的辐射源? 各有什么特点?
- 5-5 请详细阐述太阳辐射穿过大气层能量衰减的原因。
- 5-6 什么是大气窗口和大气屏障? 常用于遥感的大气窗口有哪些?
- 5-7 什么是地物的波谱特性? 水、植被、土壤、雪和湿地的反射光谱各有哪些特点?
- 5-8 简述扫描成像的原理。
- 5-9 根据图 5-8 描述光机扫描仪的工作原理。
- 5-10 雷达成像的条件是什么?
- 5-11 遥感的 4 种分辨率对于遥感的实际应用有什么影响?
- 5-12 遥感的光谱分辨率、辐射分辨率、空间分辨率相互制约的根本原因是什么? 这种制约对影像的技术参数设计有什么影响?

## 习题解答

- 5-1 解: (1) 可见光波段。波长范围:  $0.4\mu\text{m}$ (紫外线)~ $0.7\mu\text{m}$ (红光)。特性: 可见光波段对人类眼睛可见,广泛用于拍摄彩色图像,用于地物识别和植被监测。
- (2) 红外波段。①近红外波段。波长范围:  $0.7\sim 1.4\mu\text{m}$ 。特性: 近红外波段对于植被健康和土地覆盖分类非常敏感,用于植被监测和土地利用规划。②热红外波段。波长范围:  $3\sim 14\mu\text{m}$ 。特性: 热红外波段对于物体的温度和热分布敏感,用于热像仪和火灾监测。
- (3) 微波波段。微波波段分为 C 波段、X 波段、Ku 波段、Ka 波段等。波长范围:  $0.01\sim 1\text{m}$ 。特性: 微波波段具有穿透云层和大气的的能力,适用于地形测绘、海洋监测、降水估算和地表变形监测。
- 每个波段都有其独特的特性和应用,遥感科学家和工程师根据研究目标和应用需求选择适当的波段进行数据采集和分析。不同波段的数据可以用于地质勘探、农业监测、环境保护、气象预测等各种领域。
- 5-2 解: 波长、频率、振幅、辐射能量、辐射通量、辐射出射度、辐射照度、辐射强度、辐射亮度等。
- 5-3 解: 黑体是理想化的物体,它在热平衡状态下,对所有波长的电磁辐射都是完全吸收并完全辐射的,不会反射或透射任何辐射,因此被称为“黑体”。黑体是热辐射研究的重要理论模型,它的辐射特性由普朗克辐射定律和斯特藩-玻尔兹曼定律等公式描述。黑体辐射的主要特性如下。
- (1) 吸收和辐射。黑体吸收所有入射的电磁辐射,无论波长如何,不反射也不透射。

然后,黑体以相同的方式辐射出热辐射,产生一个连续的辐射谱。

(2) 连续谱。黑体辐射谱是连续的,覆盖了广泛的波长范围,从长波辐射(红外)到短波辐射(紫外)都有。这个谱线在不同温度下呈现不同的形状。

(3) 普朗克辐射定律。这是描述黑体辐射强度的基本定律。普朗克辐射定律表明,黑体辐射强度与波长和温度有关。在不同温度下,黑体的辐射强度分布呈现出不同的形状,但总的积分辐射强度会随温度升高而增加。

(4) 斯特藩-玻尔兹曼定律。这个定律描述了黑体辐射功率与温度之间的关系。它表明,黑体辐射功率正比于绝对温度的4次方。这意味着随着温度升高,黑体的辐射功率迅速增加。

**5-4 解:** (1) 太阳辐射。太阳是地球上最重要的辐射源之一。它主要以可见光和近红外光的形式辐射能量。太阳辐射是自然界中最强大的辐射源,它提供了地球上所有生命的能源,并对气候和天气产生重要影响。

(2) 地球热辐射。地球释放热辐射,主要在红外波段,包括远红外和短波红外。地球热辐射是地球表面温度的表现,被用于气象学、地球科学和遥感应用,如热红外遥感。

(3) 大气辐射。大气中的气体和云层会吸收和辐射能量,产生大气辐射。大气辐射对于地球的热平衡和气候变化至关重要,也是遥感中需要考虑的因素之一。

(4) 地球自然辐射。地球内部放射性元素的衰变会释放地球自然辐射,包括伽马辐射、阿尔法辐射和贝塔辐射。地球自然辐射是地球内部热量的来源,也会影响地下水和土壤的辐射水平。

(5) 生物辐射。生物体内的放射性同位素,如钾-40、碳-14等会产生内部辐射。这些辐射是生物体内的一部分,对人体健康和用放射性碳定年等方面有影响。

这些自然辐射源在地球上的分布和性质各不相同,它们对地球的能量平衡、气候和环境产生深远的影响,并在科学研究和工程应用中具有重要价值。

**5-5 解:** (1) 大气反射。大气中有云层,当电磁波到达云层时,产生反射现象。这种反射同样满足反射定律,云层越厚反射量越大:厚度大于50m时,反射量达50%以上;厚度为500m时,反射量超过80%。大气层中直径大于 $10^{-6}$ m的其他微粒也会产生反射作用。

(2) 大气散射。一部分太阳辐射会在大气分子和气溶胶颗粒上发生散射。这种散射会将一部分光线分散到不同的方向,导致光线的传播方向改变。这会减少光线直接到达地面的数量,使地表接收到的光强度减小。

(3) 大气吸收。大气层中的气体和云层中的水滴会吸收特定波长的太阳辐射。例如,臭氧分子会吸收紫外线辐射,水蒸气会吸收特定的红外辐射波段。这些吸收过程将能量转换为热量,并减少到达地表的太阳辐射。

(4) 大气折射。大气中的密度和温度变化会导致太阳辐射发生折射,从而改变光线的传播路径。这种折射也会分散太阳辐射,使其更广泛地分布在大气中。

**5-6 解:** 大气窗口:通过大气而较少被反射、吸收和散射,透射率较高的电磁辐射波段。大气屏障:通过大气时被严重反射、吸收和散射,几乎不能到达地面的电磁辐射波段。从紫外线到微波,目前用于遥感的大气窗口大体有5个。

(1)  $0.3\sim 1.3\mu\text{m}$ :包括全部可见光、部分紫外和摄影红外波段。是摄影成像的最佳波

段,也是扫描成像的常用波段。这个波段应用范围广,如 Landsat 卫星的 TM 的 1-4 波段,SPOT 卫星的 HRV 波段。属地物的反射光谱,透射率达 90% 以上。

(2)  $1.5\sim 2.5\mu\text{m}$ : 近红外波段。属地物反射光谱,只能用光谱仪和扫描仪记录地物的电磁波信息,白天强光照射下扫描成像。在波段( $1.55\sim 1.75\mu\text{m}$ )和波段( $2.1\sim 2.4\mu\text{m}$ ),透射率都近 80%,如 TM( $1.55\sim 1.75\mu\text{m}$ )和( $2.08\sim 2.35\mu\text{m}$ )波段的影像可用于探测植物含水量,以及云、雪或用于地质制图等。

(3)  $3.5\sim 5.5\mu\text{m}$ : 中红外波段,可全天工作,扫描方式成像。该波段除了反射外,地面物体也可以自身发射热辐射能量,如 NOAA 卫星的 AVHRR 传感器用  $3.55\sim 3.93\mu\text{m}$  探测海面温度,获得昼夜云图,透射率仅约为 70%。

(4)  $8\sim 14\mu\text{m}$ : 远红外(热红外)波段。该波段属热辐射波段范围内,采用扫描或红外辐射计检测,可全天工作。由于氧气、水汽、二氧化碳的影响,透射率仅为 60%~70%。

(5)  $0.8\sim 2.5\text{cm}$ : 属微波段,不受大气干扰,透射率可达 100%。采用雷达成像或微波辐射计检测,可全天候工作。

**5-7 解:** 地物的波谱特性指的是不同类型的地表覆盖物体(如水、植被、土壤、雪和湿地)对不同波长光线(即不同颜色的光)的吸收、反射和透射的行为。这些特性是遥感技术中用于识别和分类地物的重要依据。以下是这些地物类型的典型波谱特点。

(1) 水体对可见光波段中的蓝色和绿色光线具有较高的反射能力。水体在近红外、中红外波段具有较强的吸收能力,反射率几乎为零,在此波段的黑白正片上,水体的色调很黑,与周围土壤有明显区别,据此可确定水体的位置和轮廓。

(2) 雪在可见光波段的电磁反射率很高,并且和太阳的能量光谱接近,因而表现为白色,在紫光和蓝光波段反射率较大,几乎接近 100%,颜色偏蓝白。随着波长的增加,雪的反射率逐渐降低,在近红外波段具有很强的吸收能力。

(3) 土壤在自然状态下的反射率没有明显的峰值和谷值,反射波谱特性曲线较为平滑,在不同光谱段的遥感影像上亮度区别不明显。一般来说,土壤的光谱特性曲线与以下因素有关:土壤类别、含水量、土壤表面粗糙度、粉砂相对百分含量等。此外,肥力也对反射率有一定的影响。

这些波谱特性可用于遥感图像分析和地物分类。通过分析地物在不同波段的反射率和吸收率,可以识别和区分不同类型的地物覆盖,这在农业、生态学、地质勘探、环境监测和城市规划等领域具有广泛的应用。

**5-8 解:** 扫描成像方式是传感器逐点逐行地收集信息,地表各点的信息按一定顺序先后进入传感器,经过一段时间后才能生成一幅图像。

**5-9 解:** 依靠探测元件和扫描镜对目标地物以 IFOV 为单位进行逐行取样,以得到目标地物电磁辐射特性信息,形成一定谱段的影像。当旋转棱镜旋转时,第一个镜面对地面横越航向方向扫视一次,在地面 IFOV 内的地面辐射能由旋转棱镜反射到反射镜组,经其反射、聚焦到分光器上,再经分光器分光后分别照射到相应的探测器上。探测器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 IFOV 的地面影像,在底片曝光后记录下来,称为一个像元;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,向地面实时发送或由磁带记录仪记录后作时延回放。随着棱镜的旋转,垂直于航向上的地面依次成像,形成一条影

像线,并被记录下来。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像,最后形成连续的地面条带影像。

**5-10** 解: 雷达发射出来的波束照在目标不同部位的时间有先后差异,因此从目标反射的回波也出现时间差,从而区分目标的不同部位。为此,雷达必须具备二维方向上的扫描。雷达天线在飞行器上,与飞行器同方向前进,发出的波束依次向前扫描,即航向扫描;天线发出的能量脉冲指向飞行器的一侧,与航线垂直方向的地面物体各部分反射的回波便可产生时间差,即距离向扫描。

**5-11** 解: 遥感的4种分辨率对实际应用有重要的影响,它们各自提供了不同方面的信息,可以满足不同领域和应用的需求。

(1) 更高的空间分辨率能够提供更详细的地表信息,例如建筑物、道路、植被类型等,对于城市规划、土地利用监测等高精度要求的应用尤为重要。在环境监测中,高空间分辨率可以帮助识别和监测小范围内的环境变化,如湖泊边缘、河流岸线等,对于水资源管理和生态保护具有重要意义。

(2) 光谱分辨率决定了遥感数据在不同波段上提供的信息量,可以用于地物分类、植被健康监测、土地覆盖分类等。对于农业领域,光谱分辨率能够帮助监测作物的生长状态、识别病害和营养不良等问题,指导农业生产管理。

(3) 较高的时间分辨率有助于监测地表的动态变化,例如城市扩展、植被生长、自然灾害等,对于紧急救援和灾害监测具有重要意义。在农业领域,定期获取遥感数据可以帮助农民监测作物生长情况、调整农业活动,提高农作物产量和质量。

(4) 辐射分辨率影响着遥感数据的灵敏度和精确度,高辐射分辨率可以提供更精确的地表反射率或辐射率信息。在大气和气候研究中,辐射分辨率的高低直接影响着对大气成分和能量平衡的监测与分析。

综合利用这些分辨率的信息,可以实现更全面、准确的遥感应用,从而为资源管理、环境保护、灾害监测、农业生产等领域提供支持和决策依据。

**5-12** 解: 遥感传感器对入射光能量变化的测试敏感度有限。遥感传感器接收到的辐射能量变化有一个最小的限度,超过了限度,传感器就接收不到带有信息的电磁波信号了。在这个限度下,如果地面单元反射或自身辐射的能量积分起来,还达不到该限度,只有扩大地面单元面积,在更大一点面积上对辐射能量积分,从而使接收的辐射能量达到限度。这就是说,在光谱分辨率一定的情况下,为了保证地物有足够的反射或自身辐射能量,只能放宽空间分辨率。

对于空间分辨率与辐射分辨率而言,一般IFOV越大,最小可分像素越大,空间分辨率越低。但是,IFOV越大,光通量即瞬时获得的入射能量越大,辐射测量越敏感,对微弱能量差异的检测能力越强,则辐射分辨率越高。因此,空间分辨率的增大,将伴之以辐射分辨率的降低。可见,高空间分辨率与高辐射分辨率难以两全,它们之间必须有个折中。

光谱分辨率影响传感器的波段设置和光学设计,决定了传感器可以提供的光谱信息的丰富程度。较高的光谱分辨率可提供更多的地物光谱信息,有助于更精确地识别和分类地物。

辐射分辨率影响传感器的灵敏度和测量精度,决定了传感器可以提供的辐射信息的

精确程度。较高的辐射分辨率可提供更准确的地表反射或辐射信息,有助于更精确地定量分析地物特征。

空间分辨率影响传感器的光学设计和观测平台,决定了传感器可以提供的图像空间细节的清晰程度。较高的空间分辨率可提供更清晰的地物图像,有助于更精细地辨识地物和提取特征。

## 参考文献

- [1] 陈述彭. 遥感大辞典[M]. 北京: 科学出版社,1990.
- [2] 邓良基. 遥感基础与应用[M]. 北京: 清华大学出版社,2002.
- [3] 彭望球. 遥感概论[M]. 北京: 高等教育出版社,2002.
- [4] 戴昌达,姜小光,唐伶俐. 遥感影像应用处理与分析[M]. 北京: 清华大学出版社,2004.
- [5] 杨龙士,雷祖强,周天颖. 遥感探测理论与分析实例[M]. 台北: 文魁电脑图书资料股份有限公司,2008.
- [6] 周天颖. 地理资讯系统理论与实务[M]. 台北: 儒林图书出版公司,2008.
- [7] 赵英时. 遥感应用分析原理与方法[M]. 北京: 科学出版社,2013.
- [8] 周军其. 遥感原理与应用[M]. 武汉: 武汉大学出版社,2014.
- [9] 柯樱海,甄贞,李小娟,等. 遥感导论[M]. 北京: 中国水利水电出版社,2019.
- [10] 贾坤,李强子,田亦陈,等. 遥感影像分类方法研究进展[J]. 光谱学与光谱分析,2011,31(10): 18-23.
- [11] 赵忠明. 空间信息技术原理及其应用[M]. 北京: 科学出版社,2013.
- [12] 孙家柄. 遥感原理与应用[M]. 武汉: 武汉大学出版社,2003.
- [13] 关履墓,元金明. 遥感基础与应用[M]. 广州: 中山大学出版社,1987.
- [14] ELACHI C. 遥感的物理学和技术概论[M]. 王松皋,等译. 北京: 气象出版社,1995.
- [15] 陈述彭,童庆禧,郭华东. 遥感信息机理研究[M]. 北京: 科学出版社,1998.
- [16] 日本遥感研究会. 遥感精解[M]. 北京: 测绘出版社,2011.
- [17] 王桥,魏斌,王昌佐,等. 基于环境一号卫星的生态环境遥感监测[M]. 北京: 科学出版社,2010.
- [18] 郑公望. 地貌学野外实习指导[M]. 北京: 北京大学出版社,2005.
- [19] 刘高焕,汉斯·德罗斯特. 黄河三角洲可持续发展图集[M]. 北京: 测绘出版社,1997.