

## 遥感物理讲座

### 第三讲 可见至红外的遥感器

吕 斯 骅

(北京大学物理系)

遥感器是遥感技术中最核心的部分,是直接用于测量探测对象的电磁辐射或反射特性的系统。现在,人们已经能够制造多种性能优良的遥感器,而且正在设计更多的能适应不同需要的遥感器。

可见和红外遥感器中的绝大部分是被动式遥感器,即接收目标自身的热辐射或反射太阳的辐射。它的成象方式有两种:一种是摄影方式,即一次曝光同时把某一区域的象记录在底片上,如同制图相机和多波段相机的工作方式。另一种是扫描方式,即一点一点地成象,象电视机工作的方式,从左上角向右移动,扫完一行再往下移动一点,再从左至右扫描,也可以一行一行地扫。扫描的方式可以是光-机扫描、电子束扫描或自扫描。

描述遥感器性能的主要参数是空间分辨率、光谱分辨率和辐射度分辨率。

空间分辨率是指遥感器每次取样时所对应的地面尺寸,如陆地卫星上多波段扫描仪(MSS)的空间分辨率为 79 m,专题制图仪为 30 m,法国 SPOT 卫星为 20 m 或 10 m。

光谱分辨率是指遥感器每个波段的波段间隔,如 MSS 中的 4, 5, 6 波段光谱分辨率为 0.1  $\mu\text{m}$ , 7 波段为 0.3  $\mu\text{m}$ , SPOT 为 0.09  $\mu\text{m}$  或 0.4  $\mu\text{m}$ 。

辐射度分辨率是指遥感器输出信号所分的级别数,如 MSS 中的 4, 5, 6 波段输出信号分为 128 等级, 7 波段为 64 等级, SPOT 为 256 等级。

目前,遥感器向高空间分辨率、多波段及高辐射度分辨率的方向发展,但遥感的信息量也

空前膨胀,增加了信息传输和处理的能力,例如 MSS 的空间分辨率为 79 m、四个波段、128 等级,而专题制图仪(TM)的空间分辨率是 30m、七个波段、256 等级,其信息量增加了 24 倍左右。

#### 一、摄影方式

摄影方式是遥感技术中使用历史最长、发展较完善的一种成象方式。用摄影方式得到的照片信息量大、灵敏度高、空间分辨率高。例如美国的大鸟军事卫星使用的就是一台焦距为 2.44 m 的大型相机,它在 160 km 的高空时分辨本领为 0.3 m,即可明显地区分各种车辆和坦克,也能数出一个个士兵。但由于感光乳胶的限制,它只能用于波长小于 1  $\mu\text{m}$  的紫外、可见、近红外波段,而且只能在晴朗的白天工作,不能全天候工作。此外,由于使用了胶片作为记录介质,一旦胶片用完,该遥感器也就失效了,故工作寿命较短;而且还必须把胶片回收后才能得到测量结果,不能实时传送。虽然如此,但它还是目前各类遥感器中空间分辨率最高和灵敏度最高的遥感器,故仍受到重视。

用摄影方式工作的遥感器主要是由相机和胶片来决定它的工作特性。

相机的基本结构包括三部分:底片匣、机身和镜头系统。

底片匣内装有转轮。转轮上放有底片,其中一个转轮卷有未曝光的底片,另一转轮接收曝光后的底片。底片匣内还有压平底片及转动底片的机构,通常用抽真空的办法把底片压在一平板玻璃上。

机身内装有操纵照象系统机械动作的部分机件，如底片的推进、压平、快门等，这些动作可以手控也可以自控。

镜头系统是相机中最重要的部件，镜头的性能主要由焦距、相对孔径( $F$ 数)及象差来描述。

当飞行高度确定后，相片的比例尺取决于焦距  $f$  的大小， $f$  越大比例尺也越大，地面的精细结构就越清楚，但相片的视场将缩小。例如，飞行高度为 435km，焦距  $f$  为 150 mm，相机分辨本领  $n$  为 80 L/mm (线/毫米)，则对应的地面分辨率为 36 m，如改用焦距为 300 mm 的镜头，地面分辨率可提高到 18 m。

相对孔径  $F$  数是透镜焦距  $f$  与透镜的最大直径  $D$  的比值  $f/D$ 。 $F$  数越小，象平面上的照度越大，即能在弱光下工作，此外镜头孔的衍射限制了镜头的分辨本领，由衍射理论可知分辨本领  $n$  为

$$n = \frac{1}{1.22\lambda F}$$

当  $\lambda$  取  $0.555 \mu\text{m}$  时，

$$n = 1475/F(1/\text{mm})$$

如  $F = 2$   $n$  可达 738 l/mm，但实际上分辨本领要比此值低得多。这是由于镜头除了衍射作用外，还存在象差及缺陷、气泡等各种光学不均匀性。

象差有球差、彗差、象散、场曲、畸变和色散等六种。任何一个实际的镜头系统不可能完全消除这六种象差，只能把象差减小。各种不同的镜头有各自的特殊要求，例如测绘用的镜头主要要求消除畸变，而侦察用的镜头对消除畸变的要求不高；广角镜头中主要要求消除彗差，而普通镜头彗差的影响不大。

相机装上黑白胶片、彩色胶片或彩色红外胶片，可得到不同波段的地物影像。黑白胶片对可见光区感光。彩色胶片也对可见光区感光，它实际上由三层乳胶构成，其中一层感蓝光，一层感绿光，一层感红光，彩色片的信息量比黑白片丰富，提高了判别能力。彩色红外片也是由三层构成，其中一层是对自然光中的蓝、绿波段起作用，显示黄色(蓝色的补色)，一层对

自然光中的红波段起作用，显示品红色(绿色的补色)，一层对红外光起作用，显示青色(红色的补色)。由于红外波段大气散射的影响较小，所以彩红外图象的清晰度比真彩色和黑白片的好，植物在图上显示红色，是因为植被在红外的反射率极高。

除了一般的相机外，遥感中常用多波段相机。最初的多波段相机是由多个相机构成的，如阿波罗-9号用四台 Hasselblad 相机排列起来，使它们的快门联动，每个镜头前选用不同的滤光片，对同一地区可同时得到四张不同波段的象片。它的优点是可以根据地物波谱特征选择最佳波段，使不同地物的差异突出出来，同时不同波段的象片可任意组合，合成各种假彩色象片，为判读提供了方便。

另一类是多镜型多波段相机，它有多多个镜头，只有一个机身，各个镜头在胶片的不同部位成象，与多相机型一样，各波段象片的几何位置不易对准。

图 1 是一台单镜头分光束型多波段相机。光束从镜头入射后被第一个棱镜面全反射到一个二向分色面，二向分色面上涂有多层介质

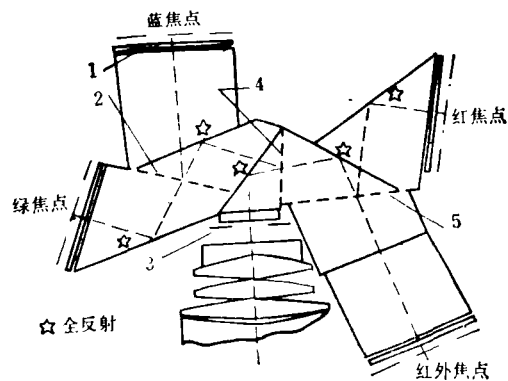


图 1 单镜头分光束多波段相机  
1. 滤光片; 2. 蓝-绿二向色分裂器; 3. 光阑与快门; 4. 蓝、绿-红、红外二向色分裂器; 5. 红-红外二向色分裂器

膜，它能透过红光和红外光，只反射蓝光和绿光，从而把一束光分为不同波段的两束光。此两束光又经过一些全反射面与二向分色面把光束分为蓝、绿、红、红外四束，并分别射到不同的方位。在每束光的焦面前均装有不同滤光

片，以限制波段的范围。滤光片的后面安放胶片。由于只用了一个镜头，四个波段象片的视场一致，但由于多次分光，光强有所减弱。

## 二、光机扫描方式

光机扫描成象方式是用一扫描镜左右摆动或转动，将地面景物逐点、逐行地送至光学系统，光学系统经过分光系统分成不同的波段，再由光电探测器将光信号转换成电信号，电信号记录在磁带上或通过发射机传送至地面接收站。地面站经过处理将信号扫描成象在胶片上，所以它的成象方式和相机的成象方式很不一样。

光机扫描系统由聚焦系统、扫描系统、分光系统与检测系统几部分构成。在多波段扫描仪中的聚焦系统多采用反射式望远系统，这是由于反射镜的波段覆盖范围广，从紫外至红外均能工作，而且没有色差，反射率高，制作简单。扫描系统可用旋转镜式和摆动镜式。旋转镜式的运动稳定，抗振能力强，扫描频率高，多用于机载多波段扫描仪。摆动镜式多用于运动状态稳定的星载多波段扫描仪，不宜用于振动较大的机载多波段扫描仪。分光系统所采用的色散元件有滤光片、棱镜及光栅。滤光片结构简单，工作可靠，常用于波段较宽的一些多波段扫描仪中。探测系统由探测器、放大器及记录仪器构成。探测器的选择与要探测的波长范围有关。要探测的波长在  $0.3\text{--}0.8\ \mu\text{m}$  时一般用光电倍增管； $0.6\text{--}1.1\ \mu\text{m}$  时选用硅光电二极管； $1\text{--}3\ \mu\text{m}$  时选用硫化铅元件； $3\text{--}5\ \mu\text{m}$  时选用碲化铜元件； $8\text{--}14\ \mu\text{m}$  时常选用碲镉汞元件或镉掺汞元件。红外器件需要制冷，还需要一套制冷与控温系统。

图2为陆地卫星上使用的多波段扫描仪(MSS)的光路图。它的扫描镜是一个长轴为33 cm、短轴为23 cm、表面镀铍的椭圆形平面镜。扫描镜与地面和聚光系统均成 $45^\circ$ 。扫描镜的摆幅为 $\pm 2.89^\circ$ ，总的扫描角为 $11.56^\circ$ 。

聚光系统为卡塞标林式的反射望远镜，望

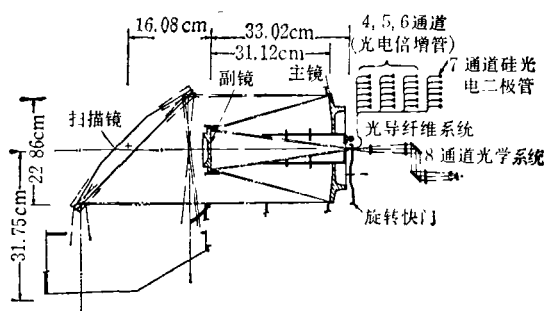


图2 陆地卫星 MSS 的光路

远镜由一个主反射镜与一个副反射镜组成。它的焦距是820 mm，相对孔径 $f/D$ 是3.6。地面景象通过聚光系统成象于成象板上，在成象板的位置，排列着 $4 \times 6$ 根面积为 $71 \times 71\ \mu\text{m}^2$ 的光导管，把图象引到探测器的光敏面。光导管以六根为一列与扫描方向垂直，配有相同的滤光片，光导管共分为四列组成四个波段，即 $0.5\text{--}0.6\ \mu\text{m}$ ， $0.6\text{--}0.7\ \mu\text{m}$ ， $0.7\text{--}0.8\ \mu\text{m}$ ， $0.8\text{--}1.1\ \mu\text{m}$ 。此外，通过红外成象系统与红外滤光片构成一热红外通道( $10.4\text{--}12.6\ \mu\text{m}$ )。热红外通道的两个HgCdTe器件以对角形排列，器件冷却到100 K。前三个通道用的探测器是光电倍增管，第四个通道用硅光电二极管。

前四个通道的瞬时视场为 $86\ \mu\text{rad}$ ，卫星高度为918 km，对应的地面分辨率为79 m。热红外通道的瞬时视场为 $260\ \mu\text{rad}$ ，对应的地面分辨率为237 m。卫星星下点在地面投影的速率是6.47 km/s，扫描镜摆动的频率是13.62 Hz，因此扫描周期是73.42 ms，在一个扫描周期内，星下点在地面移动了473 m，而每次扫描的宽度是 $79 \times 6 = 474\ \text{m}$ ，两者配合得很好。每次扫描的宽度为185 km，方向自西向东。当扫描镜回扫时，快门轮关闭了光导管与地面景象的通路，由校准光源通过安装在快门轮上的一个可变中性密度滤光器，来测量仪器的灵敏度。

图3为陆地卫星4上的专题制图仪(TM)工作的示意图。它是第二代的多波段扫描仪。其特点是地面分辨率从79 m提高到30 m，其中热红外通道从240 m提高到120 m；波段数由原来的五个增加到七个，并根据地物波谱的特

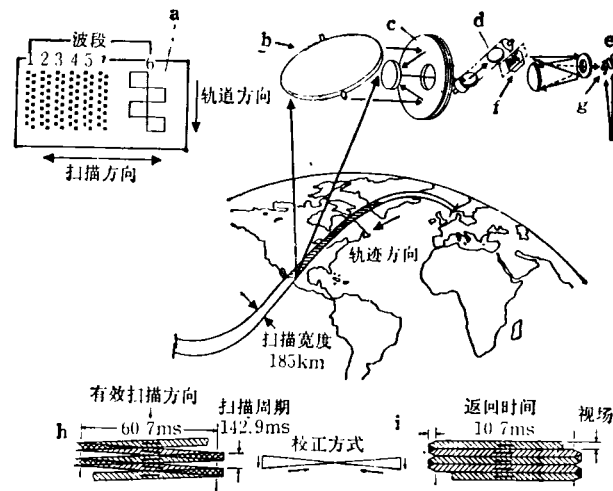


图3 陆地卫星4上的专题制图仪(TM)示意图。

a——TM 探测器排列方式;b——扫描镜;c——主望远镜;d——扫描线校正器;e——中继球面镜;f——1,2,3,4波段的硅探测器和滤光片;g——5,6,7波段的探测器和滤光片;h——未校正的情况;i——校正后的情况

性将波段的范围选择得更合理,使各波段均有其独特的用途,如表1所示。

TM扫描镜是椭圆形的,长轴为0.53 m短轴为0.41 m。主望远镜的焦距为2.28 m,相对孔径为5.6。在焦平面前有一扫描线校正器,使扫描时来回的轨迹互相平行,实现双向扫描,从

而可使扫描频率降至7Hz。在焦平面上有四个探测器阵列,每个阵列有16个硅探测器,并与滤光片配合成为1—4通道。其他三个通道成像于中继球面镜的焦面上,5,7两个中红外通道各有16个InSb探测器,热红外通道有四个HgCdTe探测器,这些探测器需要制冷至95 K。

表1 TM 各光谱波段及其应用

波段	光谱范围 ( $\mu\text{m}$ )	主要应用	地面分辨率(m)
1	0.45—0.52(蓝)	沿海岸线水域制图,土壤/植物分类,落叶树/针叶树分类	30
2	0.52—0.60(绿)	探测健康植物的绿色反射率	30
3	0.63—0.69(红)	探测不同植物的叶绿素的吸收率	30
4	0.76—0.90(近红外)	生物量测定,绘制水体图	30
5	1.55—1.75(中红外)	植物含水量及湿度测量,区分云和雪	30
6	10.40—12.50(热红外)	植物热强度测量,其它热制图	120
7	2.08—2.35(中红外)	水热法制图,地质探矿	30

陆地卫星飞行高度为705 km,扫描角为 $\pm 7.5^\circ$ ,对应地面的扫描宽度为185 km。1—5,7通道的瞬时视场为 $42.5 \mu\text{rad}$ ,对应地面分辨率

为30 m,6通道的瞬时视场为 $170 \mu\text{rad}$ ,对应地面分辨率为120 m。每个通道分为256等级,因此成象质量较MSS有大幅度的提高。

### 三、电子束扫描方式

电子束扫描系统实际上就是电子摄像机，它由光学聚焦系统、电视摄像系统及放大、控制电路等几部分组成。光学聚焦系统把要拍摄的地面景物成像在摄像管的靶面上，镜头设计的要求与相机镜头没有多大差别。景物在靶面上成像后由斑点很小的电子束对象逐点逐行扫描，把光信号变成电信号，所以电子束是对象平面进行扫描。放大电路把视频信号记录在磁带上，或经过电光转换记录在乳胶底片上。

系统的光谱灵敏范围由电视摄像管靶面的光谱灵敏范围决定，在聚焦系统前面配上滤光片，还可以进一步控制系统的光谱灵敏波段。用于遥感的电视摄像管要有极高的分辨本领、较高的灵敏度和较大的动态范围，而对滞后特性要求不高。

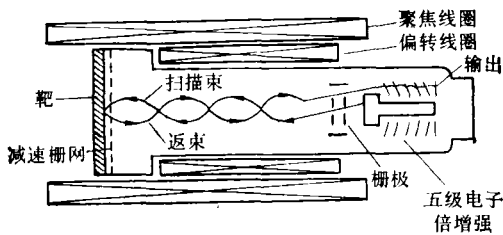


图4 反束光导管结构示意图

图4为陆地卫星上用的反束光导管(RBV)结构示意图。RBV是光导摄像管的变形。电子枪发射的电子经栅极加速射向靶，电子束由聚焦线圈聚成小点，电子束的位置由偏转线圈产生的磁场控制。RBV的靶面所用的光电导材料是ASOS(硫化铟、硫氧化物)，光强处的电导增加，光弱处的电导减小，故电子束射在光强较强的区域时通过靶流过的电子数目较多，因而返回的电子束中的电子数目减小；反之射在光强较弱的区域时，返回电子束中的电子数目较多。返回的电子经过电子倍增器放大，可以提高RBV灵敏度。

RBV的靶面有极高的分辨本领，靶面的有效面积约  $25.4 \times 25.4 \text{ mm}^2$ ，每帧图象扫4125

行，它对应地面  $185 \times 185 \text{ km}^2$  的面积，对应的地面宽度是45m。在陆地卫星1,2号上装有三台RBV，同时对准同一区域，如图5所示。镜头的焦距是125.9mm，相对孔径是2.8，快门速度分为8, 12和16ms三档。三块滤光片把三台RBV分为三个波段： $0.475\text{--}0.575 \mu\text{m}$ ,  $0.580\text{--}0.680 \mu\text{m}$ ,  $0.690\text{--}0.830 \mu\text{m}$ 。

RBV在8—16ms的时间内对地物曝光，由于ASOS靶的电容值较大，靶面的光电导分布在很长的时间内不会消失，电子束以每秒1250行的扫描速度把图象的视频信号记录在磁带上，每帧读出的时间为3.5s，三台摄像机共需10.5s读完。读完后对靶面进行清除，等待下一次曝光，两次曝光的间隔时间是25s，相邻两张照片沿航向有12.5%的重叠。

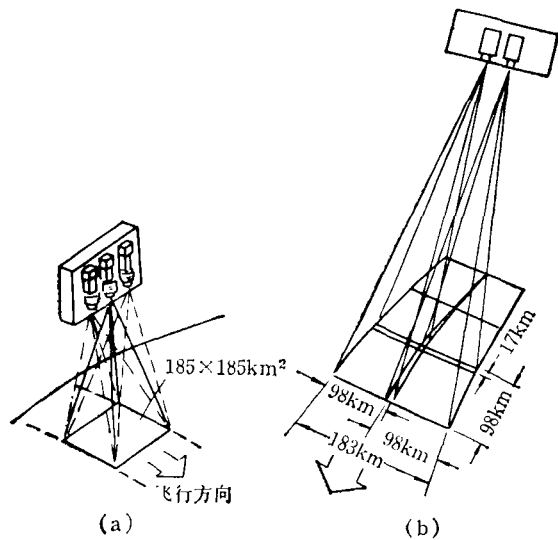


图5 RBV的工作示意图

- (a) 安装在1,2号飞船上的三个照相机；
- (b) 安装在3号飞船上的照相机

陆地卫星3号上采用的是两台RBV，各自成象宽度为98km，中间有一定的重叠，总的成象宽度为183km。它只有一个光谱段，即  $0.505\text{--}0.750 \mu\text{m}$ 。镜头焦距为236mm。每幅有4125行扫描线，每行取5375个点，它对应的地面分辨率约为24m，它的特点就是几何分辨率高，这是牺牲了波段数目而换来的结果。

电视摄像管的结构复杂，不耐震动，功耗

大,从而限制了它的发展,也推动了更先进的自扫描方式的发展。

#### 四、自扫描方式

采用自扫描方式成象的电荷耦合器件 (CCD),是一种用电量表示信号大小,用耦合方式传输的新型器件。它具有自扫描、光谱范围宽、功耗小、动态范围宽、无畸变、体积小、重量轻、寿命长、机械性能好、可靠性高等一系列

优点,是一种理想的全固体化的成象器件。

CCD 基本结构与 MOS (金属-氧化物-半导体) 器件一样,如图 6(a) 所示。它的衬底是 P 型半导体,硅的表面有一层绝缘的二氧化硅层,再上面是一层金属作成的电极,这样在 P 型硅和电极之间形成一小电容。三个器件构成一个图象单元,各象元的  $\phi_1$  电极接同一时钟脉冲线,各象元的  $\phi_2$  和  $\phi_3$  分别连在一起。三时钟脉冲的波形如图 6(c) 所示。在  $t = t_1$  时刻, $\phi_1$  电位最高,  $\phi_2, \phi_3$  的电位为零,此时若光透过衬底

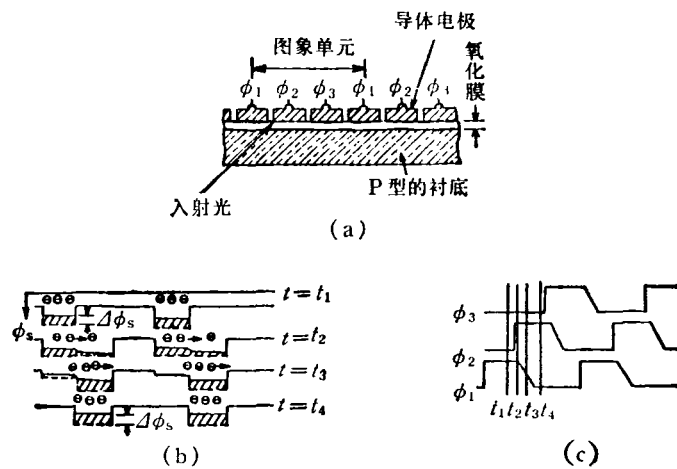


图 6 三相 CCD 器件的工作过程

(a) CCD 截面; (b) 电荷传输过程; (c) 时钟脉冲波形

射到半导体上产生电子-空穴对,则产生的光电子被吸引到  $\phi_1$  下面的电场区内,在该电场区内的光电子数与光强成正比。当  $t = t_2$  时,  $\phi_2$  的电位升至与  $\phi_1$  相同,  $\phi_1$  电极下的电荷包(光电子)开始向  $\phi_2$  扩散。当  $t = t_3$  时,  $\phi_1$  的电位下降,  $\phi_2$  电位最高,电荷包则从  $\phi_1$  完全移向  $\phi_2$ 。当  $t = t_4$  时,  $\phi_1, \phi_3$  的电位均为零,  $\phi_2$  的电位最高,为下一次传输作准备。时钟脉冲不断地重复,电荷包就从左边向右边传递,最后从输出二极管输出。

CCD 工作时,其积分时间(即曝光时间)要远大于传输时间,以免在传输过程中使信号发生畸变。CCD 除了做成一维阵列外,还可以做成二维阵列。CCD 器件的光谱区与所用的材料有关,如目前发展较完善的硅 CCD,其工作区为  $0.4-1.1 \mu\text{m}$ ,如用 InSb 的 CCD,则可用于

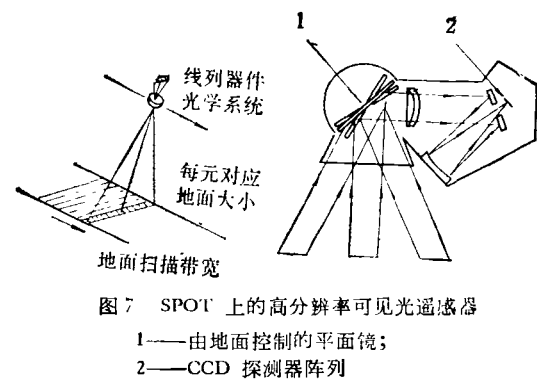


图 7 SPOT 上的高分辨率可见光传感器

1——由地面控制的平面镜;  
2——CCD 探测器阵列

$3-5 \mu\text{m}$ 。

图 7 为法国制造的 SPOT 卫星上的高分辨率可见光传感器 (HRV),卫星上并排安装两台 HRV。硅 CCD 安放在光学系统的成象面上,排列方向与飞行方向垂直,扫描带的宽度由 CCD (下转第 751 页)