

第四章 遥感传感器

§ 4.0 概述

遥感传感器是获取遥感数据的关键设备，由于设计和获取数据的特点不同，传感器的种类也就繁多，就其基本结构原理来看，目前遥感中使用的传感器大体上可分为如下一些类型：

- (1) 摄影类型的传感器；
- (2) 扫描成像类型的传感器；
- (3) 雷达成像类型的传感器；
- (4) 非图像类型的传感器。

无论哪种类型遥感传感器，它们都由如图 4-1 所示的基本部分组成：

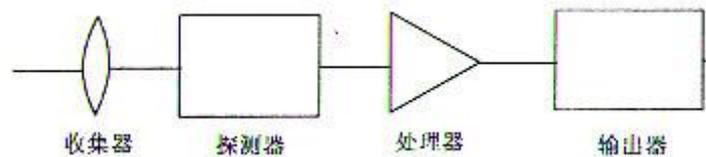


图 4-1 遥感传感器的一般结构

- 1、收集器：收集地物辐射来的能量。具体的元件如透镜组、反射镜组、天线等。
- 2、探测器：将收集的辐射能转变成化学能或电能。具体的无器件如感光胶片、光电管、光敏和热敏探测元件、共振腔谐振器等。
- 3、处理器：对收集的信号进行处理。如显影、定影、信号放大、变换、校正和编码等。具体的处理器类型有摄影处理装置和电子处理装置。
- 4、输出器：输出获取的数据。输出器类型有扫描晒像仪、阴极射线管、电视显像管、磁带记录仪、XY 彩色喷笔记录仪等等。

§ 4.1 扫描成像类传感器

扫描成像类型的传感器是逐点逐行地以时序方式获取二维图像，有两种主要的形式，一是对物面扫描的成像仪，它的特点是对地面直接扫描成像，这类仪器如红外扫描仪、多光谱扫描仪、成像光谱仪、自旋和步进式成像仪及多频段频谱仪等；二是瞬间在像面上先形成一条线图像，甚至是一幅二维影像，然后对影像进行扫描成像，这类仪器有线阵列 CCD 推扫式成像仪，电视摄像机等。

4.1.1 对物面扫描的成像仪

一、红外扫描仪

(一) 红外扫描仪

一种典型的机载红外扫描仪的结构如图 3-2 所示。它由本节前言中所叙述的几个部件组成。具体结构元件有一个旋转扫描镜，一个反射镜系统，一个探测器，一个制冷设备，一个电子处理装置和一个输出装置。

旋转扫描镜的作用是实现对地面横越航线方向的扫描，并将地面辐射来的电磁波反射到反射镜组。反射镜组的作用是将地面辐射来的电磁波聚焦在探测器上。探测器则是将辐射能转变成电能。探测器通常做成一个很小面积的点元，有的小到几个微米。随输入辐射能的变化，探测器输出的电流强度（视频信号）发生相应的变化。致冷器为了隔离周围的红外辐射直接照射探测器，一般机载传感器可使用液氧或液氮致冷。电子处理装置主要是对探测器输出的视频信号放大和进行光电变换，它由低噪声前置放大器和电光变换线路等组成。输出端是一个阴极射线管和胶片传动装置。视频信号经电光变换线路调制阴极射线管的阴极，这时阴极射线管屏幕上扫描线的亮度变化相应于地面扫描现场内的辐射量变化。胶片曝光后得到扫描线的影像

(二) 扫描成像过程及图像特征

1、扫描成像过程

如图 4-2 所示，当旋转棱镜旋转时，第一个镜面对地面横越航线方向扫视一次，在扫描视场内的地面辐射能，由刈幅的一边到另一边依次进入传感器，经探测器输出视频信号，再经电子放大器放大和调制，在阴极射线管上显示出一条相应于地面扫描视场内的景物的图像线，这条图像线经曝光后在底片上记录下来。接着第二个扫描镜面扫视地面，由于飞机向前运动，胶片也作同步旋转，记录的第二条图像正好与第一条衔接。依次下去，就得到一条与地面范围相应的二维条带图像。

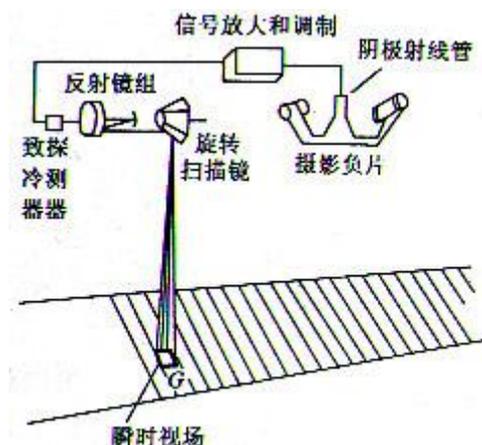


图 4-2 机载红外扫描仪结构原理图

2、红外扫描仪的分辨力

红外扫描仪的瞬时视场 β ，与探测器尺寸 d (直径或宽度) 和扫描仪的焦距的关系为： $\beta = d/f$
(4-1)

红外扫描仪垂直指向地面的地面空间分辨力 a ，则由瞬时视场和航高决定，即：

$$a = \beta H \quad (4-2)$$

将 (4-1) 式代入 (4-2) 式则为：

$$a = \frac{d}{f} H \quad (4-3)$$

β 在设计仪器时已确定，所以对于一个使用着的传感器，其地面分辨力的变化只与航高有关。航高值大， a 值自然就大，则地面分辨力差。(4-3) 式是指垂直指向地面观测时的空间分辨力，当观测视线倾斜时，即在某一个不等于 0 的扫描角下观测时，其地面分辨力将发生变化。现设垂直指向观测时，扫描角 $\theta = 0$ ，航高为 H_0 ，地面分辨力为 a_0 。当扫描角为 θ 时，仪器至观测点中心的距离为 H_θ ，其地面分辨力平行于航线方向的为 a_θ ，垂直于航线方向的为 a'_θ 。如图 4-3 所示。

$$H_\theta = H_0 / \cos \theta = H_0 \sec \theta \quad (4-4)$$

$$a_\theta = \beta H_\theta = a_0 \sec \theta \quad (4-5)$$

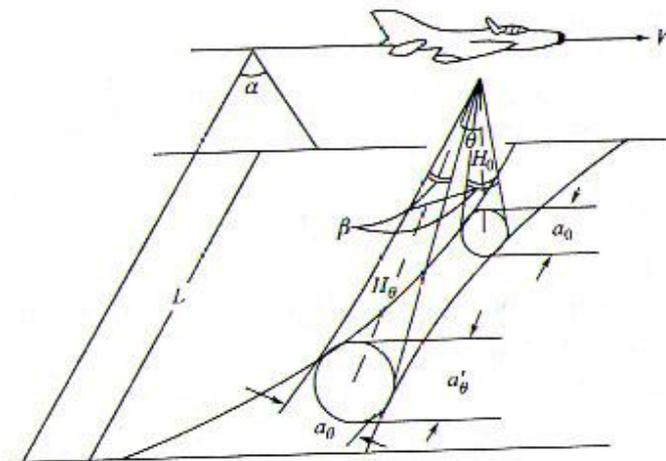


图 4-3 扫描仪的地面分辨力

对于垂直航线方向，由于传感器观测视线与地面不垂直，斜倾一个 θ 角，因此

$$a'_\theta = a_\theta \sec \theta = a_0 \sec^2 \theta \quad (3-6)$$

由于地面分辨力随扫描角发生变化，而使红外扫描影像产生畸变，这种畸变通常称之为全景畸变，其形成的原因与全景摄影机类似。图 3-4 是取一段红外扫描仪图像与同一地区航空像片比较，可明显看出全景畸变的影响。

红外扫描仪还存在一个温度分辨力的问题，温度分辨力与探测器的响应率 R 和传感器系统内的噪声 N 有直接关系。为了获得较好的温度鉴别力，红外系统的噪声等效温度限制在 0.1~0.5K 之间。而系统的温度分辨力一般为等效噪声温度的 2~6 倍。

3、扫描线的衔接

当扫描镜的某一个反射镜面扫完一次后，第二个反射镜面接着重复扫描，飞机的飞行使得两次扫描衔接。如何让每相邻两条带很好地衔接，可由以下的关系式来确定。假定旋转棱镜扫描一次的时间为 t，一个探测器地面分辨力为 a，若要使两条扫描带的重叠度为零，但又不能有空隙，则必须

$$W = \frac{a}{t} \quad (4-7)$$

式中，W 为飞机的地速。

当 $Wt > a$ 时，将出现扫描漏洞，当 $Wt < a$ 时，则有部分重叠。将 $a = \beta H$ 代入 (4-7) 式得：

$$Wt = \beta H \quad (4-8)$$

$$\text{经移项后得：} \frac{W}{H} = \frac{\beta}{t} \quad (4-9)$$

其中瞬时视场和扫描周期都为常数，所以只要速度 W 与航高 H 之比为一常数，就能使扫描线正确衔接，不出现条纹图像。

4、热红外像片的色调特征

热红外像片上的色调变化与相应的地物的辐射强度变化成函数关系。第一章中已讲到，地物发射电磁波的功率和地物的发射率 ϵ 成正比，与地物温度的四次方成正比，因此图像上的色调也与这两个因素成相应关系。图 3-5 是拍摄一个机场的停机坪的热红外像片，像片中飞

机已发动的发动机温度较高，色调很浅，显得亮。尾喷温度更高，色调显得更亮。未发动的飞机发动机，温度较低，显得很暗。水泥跑道发射率较高，出现灰色调。飞机的金属蒙皮，发射率很低，显得很黑。从像片上可看出，热红外扫描仪对温度比对发射本领的敏感性更高，因为它与温度的四次方成正比，温度的变化能产生较高的色调差别。

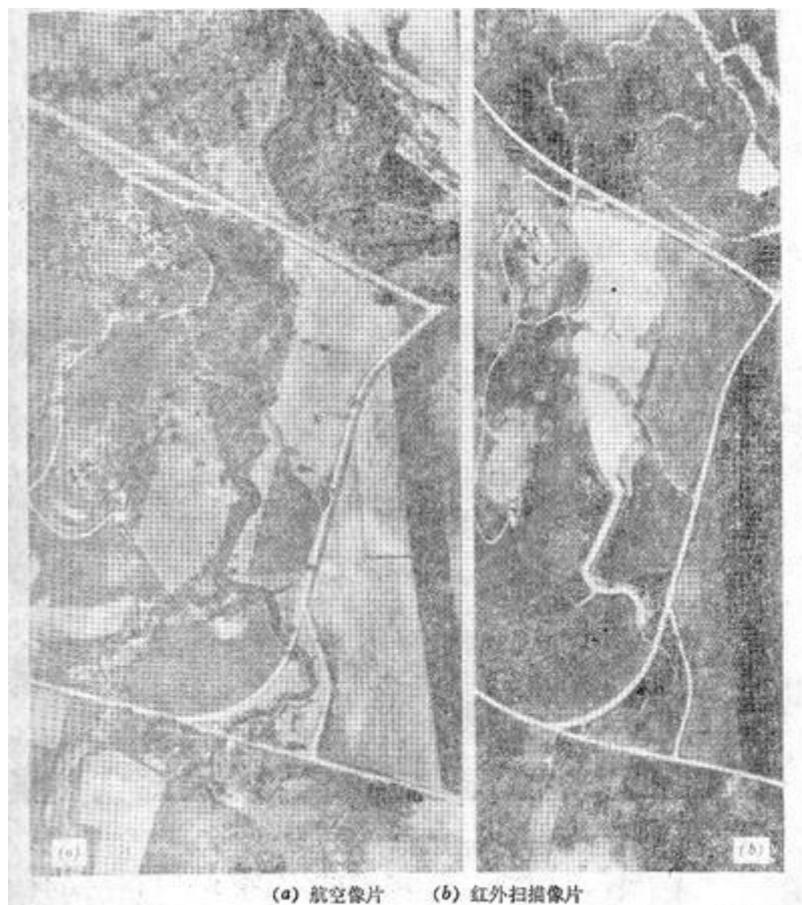


图 4-4 红外扫描像片与普通航片的比较

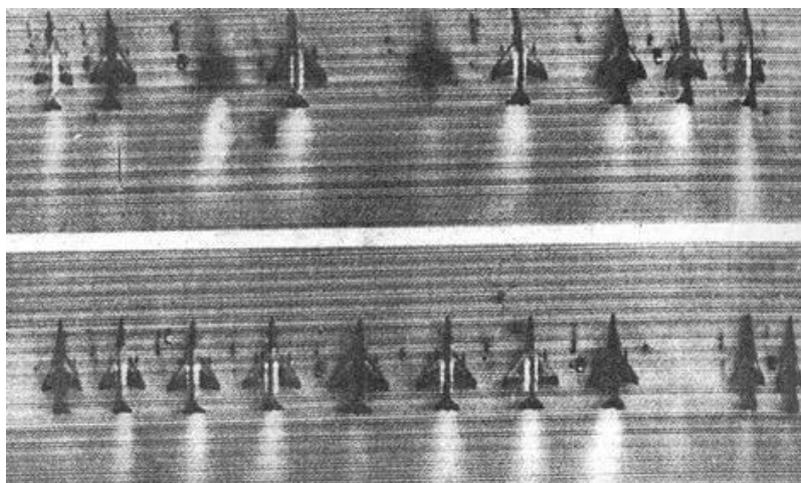


图 4-5 红外像片

二、MSS 多光谱扫描仪

陆地卫星上的 MSS (Multispectral Scanner) 多光谱扫描仪的结构和实体如图 4-6 和图 4-7 所示。它由扫描反射镜、校正器、聚光系统、旋转快门、成像板、光学纤维、滤光器和探测器等组成。

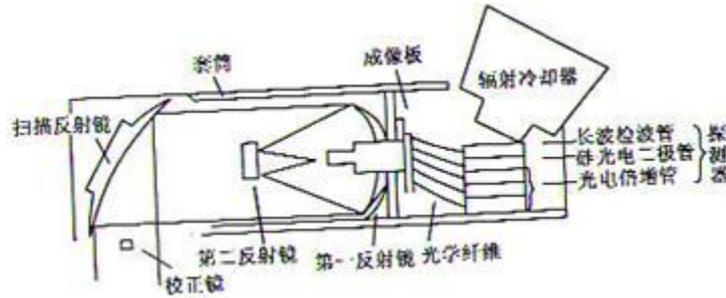


图 4-6 MSS 多光谱扫描仪结构

(一) 扫描仪的结构

1、扫描反射镜

扫描反射镜是一个表面镀银的椭圆形的铍反射镜，长轴为 33cm，短轴为 23cm。当仪器垂直观察地面时，来自地面的光线与进入聚光镜的光线成 90° 。扫描镜摆动的幅度为 $\pm 2.89^\circ$ ，摆动频率为 13.62Hz，周期为 73.42ms，它的总观测视场角为 11.56° 。扫描镜的作用是获取垂直飞行方向两边共 185km 范围内的来自景物的辐射能量，配合飞行器的往前运行获得地表的二维图像。

2、反射镜组

反射镜组由主反射镜和次反射镜组成，焦距为 82.3cm，第一反射镜的孔径为 22.9cm，第二反射镜的孔径为 8.9cm，相对孔径为 3.6。反射镜组的作用是将扫描镜反射进入的地面景物聚集在成像面上。

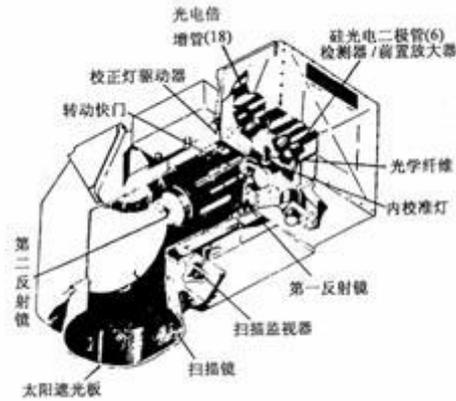


图 4-7 MSS 多光谱扫描仪

3、成像板

成像板上排列有 24+2 个玻璃纤维元，如图 4-8 所示。按波段排列成四列，每列有六个纤维单元，每个纤维单元为扫描仪的瞬时视场的构像范围，由于瞬时视场为 86μ rad，而卫星高度为 915km，因此它观察到地面上的面积为 $79m \times 79m$ 。四列的波段编号和光谱范围如表 3-1。光谱响应曲线如图 3-9 所示。Landsat-4/5 的轨道高度下降为 705km，其瞬时视场为 $83m \times 83m$ 。在遥感中称为空间分辨力。Landsat-2 和 3 上增加一个热红外通道，编号 MSS-8，波长范围为 $10.4 \sim 12.6\mu m$ ，分辨力为 $240m \times 240m$ ，仅用两个纤维元构成。纤维元后面有关学纤维将成像面上接收的能量传递到探测器上去。

MSS 波段编号和范围表 4—1

Landsat-1~3	Landsat-4/5	波长范围 / μm
MSS-4	MSS-1	0.5—0.6
MSS-5	MSS-2	0.6—0.7
MSS-6	MSS-3	0.7—0.8
MSS-7	MSS-4	0.8—1.1

4、探测器

探测器的作用是将辐射能转变成电信号输出。它的数量与成像板上的光学纤维元的个数相同，所使用的类型与响应波长有关，MSS4, 5, 6 采用 18 个光电倍增管，MSS7 使用六个硅光电二极管，Landsat-2, 3 上的 MSS8 采用 2 个汞镉碲热敏感探测器。其致冷方式采用辐射致

冷器致冷。经探测器检波后输出的模拟信号进入模数变换器进行数字化，再由发射机内调制器调制后向地面发送或记录在宽带磁带记录仪上。

(二) 成像过程

扫描仪每个探测器的瞬时视场为 86μ rad，卫星高为 915km，因此扫描瞬间每个像元的地面分辨力为 $79m \times 79m$ ，每个波段由六个相同大小的探测元与飞行方向平行排列，

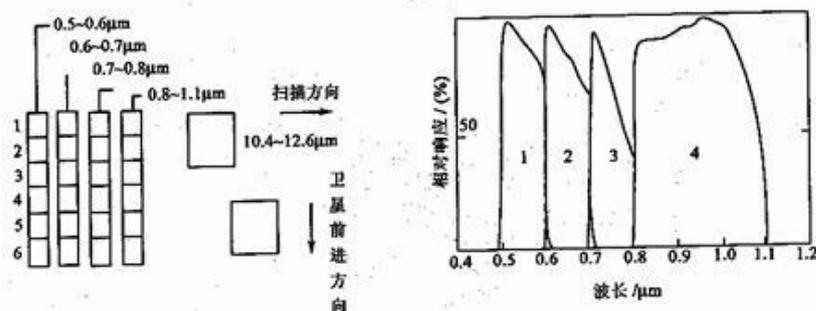


图 4-8 成像板图 3-9 MSS 探测器光谱响应曲线

这样在瞬间看到的地面大小为 $474m \times 79m$ 。又由于扫描总视场为 11.56° ，地面宽度为 185km，因此扫描一次每个波段获取六条扫描线图像，其地面范围为 $474m \times 185km$ 。又因扫描周期为 73.42ms，卫星速度（地速）为 6.5km/s，在扫描一次的时间里卫星往前正好移动 474m，因此扫描线恰好衔接，如图 4-10 所示

实际上在扫描的同时地球自西往东自转，下一次扫描所观测到的地面景象相对上一次扫描应往西移位，其移位量 $\Delta Y = VEt$ ，VE 为地面的自转线速度，它是纬度的函数；t 为扫描一次的时间。具体计算方法见几何处理一章。

成像板上的光学纤维元接收的辐射能，经光学纤维传递至探测器，探测器对信号波后有 24 路输出，采用脉码多路调制方式每 9.958μ s 对每个信道作一次抽样，由于扫描镜频率为 13.62Hz，周期为 73.42ms，而自西往东对地面的有效扫描时间为 33ms（即在 33ms 内扫描地面的宽度为 185km），按以上宽度计算，每 9.958μ s 内扫描镜视轴仅在地面上移动了 56m，因此采样后的 MSS 像元空间分辨率为 $56m \times 79m$ （Landsat-4/5 为 $68m \times 83m$ ）。采样后对每个像元（每个信道的一次采样）采用 6bit 进行编码，（像元亮度值在 0—63 间），24 路输出共需 144bit 都在 9.958μ s 内生成，反算成每个字节（6bit）所需的时间为 0.3983μ s（其中包括同步信号约占 0.3983μ s），每个 bit 为 0.0664μ s，因此，bit 速率约为 15Mbit/s，每个 bit 为 0.0664μ s，因此，bit 速率约为 15Mbit/s (15MHz)。采样后的数据用脉码调制方式以 2229.5MHz 或 2265.5MHz 的频率馈入天线向地面发送。

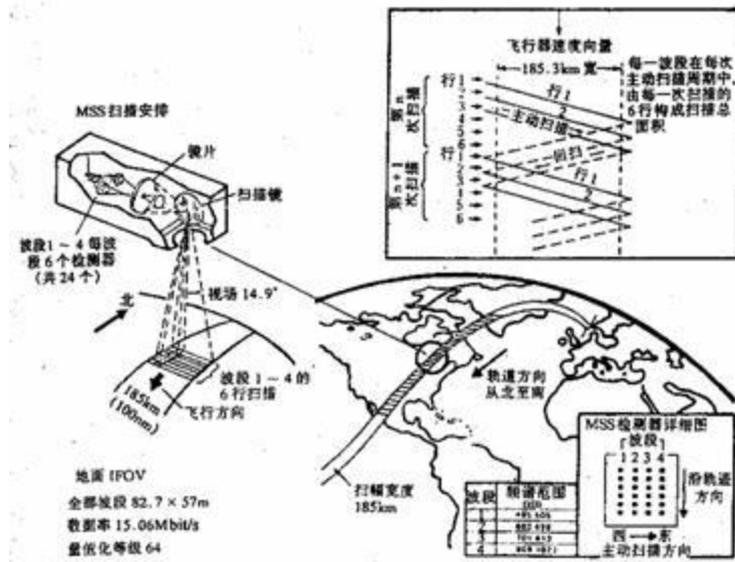


图 4-10 陆地卫星-4 MSS 扫描的几何关系

三、TM 专题制图仪

Landsat-4/5 上的 TM (Thematic Mapper) 是一个高级的多波段扫描型的地球资源敏感仪器, 与多波段扫描仪 MSS 性能相比, 它具有更高的空间分辨力, 更好的频谱选择性, 更好的几何保真度, 更高的辐射准确度和分辨力。仪器的结构如图 4-11 所示。它的太阳遮光板安装在指向地球的一个水平位置上, 其上面装有扫描镜, 扫描镜周围是驱动机构, 即控制电子设备及扫描监视器硬件。主镜装在望远镜轴线的下方, 在光学挡板和二次镜的后面。在主镜的后面是扫描行改正器, 内部校正器, 以及可见光谱检测器聚焦平面和它的安装硬件与对准机构, 在仪器的尾端安装有辐射冷却室 (内装有冷焦平面装配件), 中继镜片和红外检测器阵列。在望远镜上方的一个楔形箱体, 装有作为插件形式的电子设备、多路转换器、电源、信号放大器以及各波道的滤波器。

TM 中增加一个扫描改正器, 使扫描行垂直于飞行轨道 (MSS 扫描不垂直于飞行轨道), 另外使往返双向都对地面扫描 (MSS 仅仅从西向东扫描时收集图像数据, 从东向西时, 关闭望远镜与地面之间的光路)。

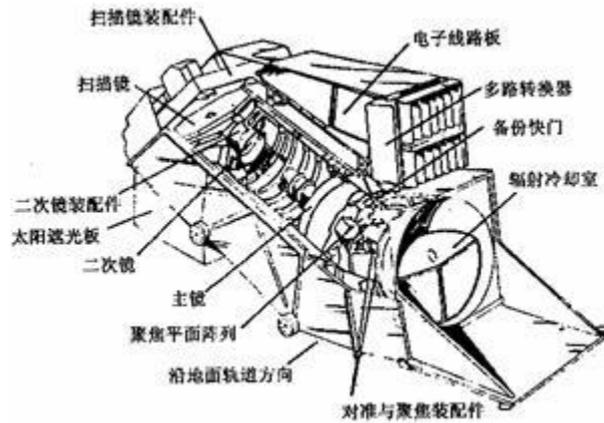


图 4-11 TM 截面视图

TM 的探测器共有 100 个，分七个波段，采用带通滤光片分光，滤光片紧贴于探测器阵列的前面。探测器每组 16 个，呈错开排列，如图 3-12 所示。TM1~4 用硅探测器（即 CCD 探测阵列），TM5 和 TM7 各用 16 个锑化铟红外探测器，其排列同 TM1~4 一样。TM6 用 4 个汞镉碲热红外探测器，也成两行排列，致冷温度为 95K。TM1~5 及 TM7 每个探测器的瞬时视场在地面上为 $30 \times 30 \text{ m}^2$ ，TM6 为 $120 \times 120 \text{ m}^2$ 。摄影瞬间 16 个探测器（TM6 为 4 个）观测地面的长度为 480m，扫描线的长度仍为 185km，一次扫描成像为地面的 $480\text{m} \times 185\text{km}$ 。半个扫描周期，即单向扫描所用的时间为 71.46ms，卫星正好飞过地面 480m，下半个扫描周期获取的 16 条图像线正好与上半个扫描周期的图像线衔接。由于 TM5, 6, 7 的波长较长，因此焦深加长，采用分光折光镜，使其在红外焦平面上构像，见图 4-13。

为作辐射校正，扫描仪内设有一个白炽灯作可见光和近红外波段的标准源，TM6 的校正源，是一个按地面指令控制温度的黑体源。

扫描仪中的电子处理器件，对全部波段的探测器输出信号作前置放大、编码和传输，每个像元的亮度值用 2 bit 编码。卫星向地面传送数据是通过中继通讯卫星作实时发送，星上不再带磁带记录仪，数据传输率为 $84 \times 108\text{bit/s}$ 。

TM 七个波段的波长范围、辐射灵敏度和图像特征示于表 4-2。

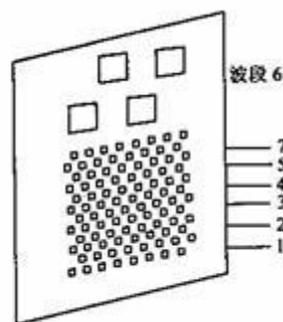


图 4-12TM 探测器阵列图

4.1.2 对像面扫描的成像仪

一、HRV 线阵列推扫式扫描仪

1、HRV 的结构和成像原理

法国 SPOT 卫星上装载的 HRV (High Resolution Visible range instrument) 是一种线阵列推扫式扫描仪。其简单的结构如图 3-14 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。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图像线，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图像条带。

CCD (Charge Coupled Device) 称电荷耦合器件，是一种由硅等半导体材料制成的固体器件，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，达到一路时序输出信号。

由于 CCD 的光谱灵敏度的限制，只能在可见光和近红外 ($1.2\mu\text{m}$ 以内) 区能直接响应地物辐射来的电磁波。对于热红外区没有反应。但如果与多元列阵热红外探测器结合使用，则可使多路输出信号变成一路时序信号，因为它对电能的强度有响应。

SPOT 卫星上的 HRV 分成两种形式，一种是多光谱型的 HRV，共分三个谱段，分别为：

波段 1 $0.5\text{—}0.59\mu\text{m}$

波段 2 $0.61\text{—}0.68\mu\text{m}$

波段 3 $0.79\text{—}0.89\mu\text{ms}$

每个波段的线阵列探测器组，由 3000 个 CCD 元件组成。每个元件形成的像元，相对地面上为 $20\text{m}\times 20\text{m}$ 。因此一行 CCD 探测器形成的图像线，相对地面上为 $20\text{m}\times 60\text{km}$ 。每个像元用 8bit 对亮度进行编码。

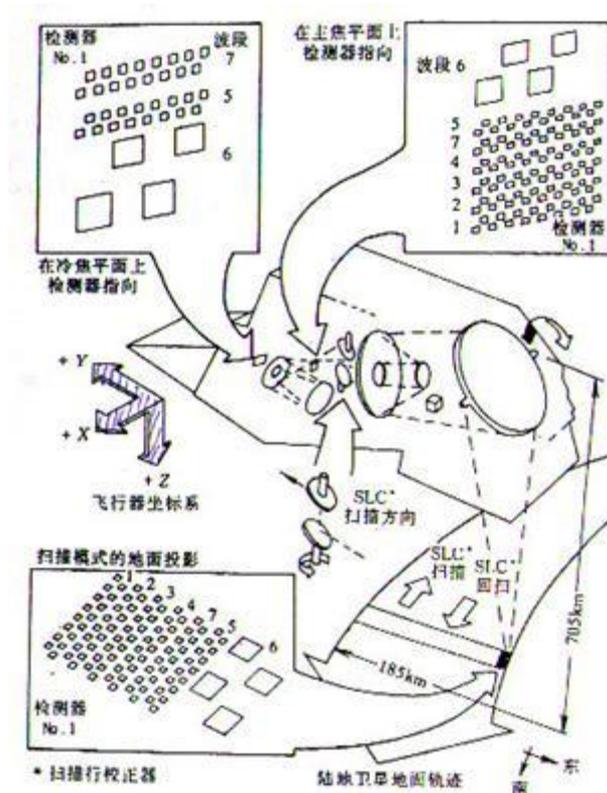


图 4-13 检测器元件的相互位置

另一种是全色的 HRV，它有 6000 个 CCD 元件组成一行。地面上总的视场宽度仍为 60km，因此每个像元地面的大小为 10m×10m。编码采用相邻像元亮度差进行，以压缩数据量，由于相邻像元亮度差值很小，因此只需要 6bit 的二进制数进行编码。波段范围 0.51—0.73μ m。

为了在 26 天内达到全球覆盖一遍，SPOT 卫星上平排安装二台 HPV 仪器。每台仪器视场宽度都为 60km，两者之间有 3km 重叠，因此总的视场宽度为 117km。如图 3-15 所示。相邻轨道间的间隔约为 108km（赤道处），垂直地面观测时，相邻轨道间的影像约有 9km 重叠。这样共观测 369 圈，全球在北纬 81.3° 和南纬 81.3° 之间的地表面全部覆盖一遍。

TM 各波段的图像特征表 4-2

通道	波长范围 μ m	辐射灵敏度 度 NE Δ P%	特征
TM1	0.45—0.52 (蓝)	0.8	这个波段的短波端相应于清洁水的峰值，长波端在叶绿素吸收区，这个蓝波段对针叶林的识别比

			Landsat-1, 2, 3 的能力更强
TM2	0.52—0.60 (绿)	0.5	这个波段在两个叶绿素吸收带之间，因此相应于健康植物的绿色。波段 1 和 2 合成，类似于水溶性航空彩色胶片 S0-224，它显示水体的蓝绿比值，能估测可溶性有机物和浮游生物
TM3	0.63—0.690 (红)	0.5	这个波段为红色区，在叶绿素吸收区内。在可见光中这个波段是识别土壤边界和地质界线的最有利的光谱区，在这个区段，表面特征经常展现出高的反差，大气朦雾的影响比其它可见光谱段低。这样影像的分辨能力较好
TM4	0.76—0.90 (红外)	0.5	这个波段相应于植物的反射峰值，它对于植物的鉴别和评价十分有用。TM2 与 TM4 的比值对绿色生物量和植物含水量敏感
TM5	1.55—1.75(红外)	1.0	在这个波段中叶面反射强烈地依赖于叶湿度。一般地说，这个波段在对收成中干旱的监测和植物生物量的确定是有用的，另外，1.55—1.75 μ m 区段水的吸收率很高，所以区分不同类型的岩石，区分云、地面冰和雪就十分有利。湿土和土壤的温度从这个波段上也很容易看出
TM6	10.4—12.6 (热红外)	(NE Δ TK) 0.5	这个波段对于植物分类和估算收成很有用。在这个波段来自表面发射的辐射量，按照发射本领和温度

			(表面的) 来测定, 这个波段可用于热制图和热惯量制图实验
TM7	2.08—2.35 (红外)	(NE Δ TK) 2.0	这个波段主要的价值是用于地质制图, 特别是热液变岩环的制图, 它同样可用于识别植物的长势

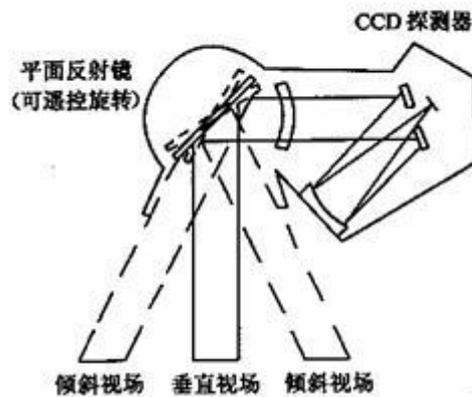


图 4-14 HRV 扫描仪的结构原理图

2、HPV 的立体观测

HRV 的平面反射镜可绕指向卫星前进方向的滚动轴(x)轴旋转, 如图 3-15 所示。从而在不同的轨道间实现立体观测。平面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到 450km 附近的景物。这样在邻近的许多轨道间都可以获取立体影像。在赤道附近, 分别在七条轨道间可进行立体观测。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。纬度 45° 处轨道间距变小, 因此重复观测的机会增多, 这时可在 11 条轨道间进行立体观测。

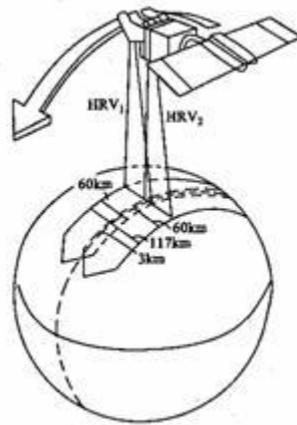


图 4-15 SPOT 卫星的 HRV 扫描仪扫描过程

立体图像的基线高度比在 0.5—1.0 之间。不同轨道间，对同一地区进行重复观测，除了建立立体模型，进行立体量测外，主要用来获取多时相图像，分析图像信息的时间特性，监视地表的动态变化。

4.1.3 成像光谱仪 (Imaging Spectrometer)

目前国际上正在迅速发展的一种新型传感器称为成像光谱仪，它是以多路、连续并具有高光谱分辨率方式获取图像信息的仪器。通过将传统的空间成像技术与地物光谱技术有机地结合在一起，可以实现对同一地区同时获取几十个到几百个波段的地物反射光谱图像。

成像光谱仪基本上属于多光谱扫描仪，其构造与 CCD 线阵列推扫式扫描仪和多光谱扫描仪相同，区别仅在于通道数多，各通道的波段宽度很窄。

成像光谱仪按其结构的不同，可分为两种类型。一种是面阵探测器加推扫式扫描仪的成像光谱仪（图 3-16），它利用线阵列探测器进行扫描，利用色散元件将收集到的光谱信息分散成若干个波段后，分别成像于面阵列的不同行。这种仪器利用色散元件和面阵探测器完成光谱扫描，利用线阵列探测器及沿轨道方向的运动完成空间扫描，它具有空间分辨率高（不低于 10~30m 等特点，主要用于航天遥感。另一种是用线阵列探测器加光机扫描仪的成像光谱仪（图 4-17），它利用点探测器收集光谱信息，经色散元件后分成不同的波段，分别成像于线阵列探测器的不同元件上，通过点扫描镜在垂直于轨道方向的面内摆动以及沿轨道方向的运行完成空间扫描，而利用线探测器完成光谱扫描。

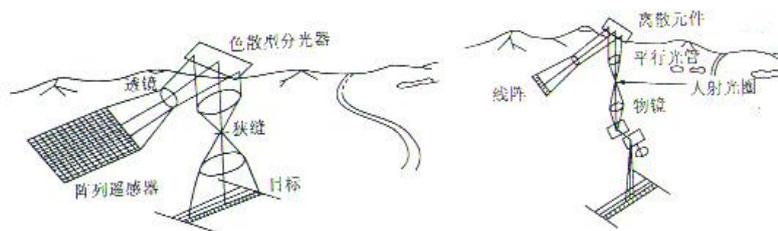


图 4-16 带面阵的成像光谱仪图 3-17 带线阵的成像光谱仪

目前机载成像光谱仪已具备 288 个通道。各通道波段宽度较窄，波谱分辨力要求在 10nm 以下，甚至是接近于连续的光谱分辨力。其空间分辨力也较高，在 10m 以内。在这种情况下，它与一般的像面扫描仪（如 SPOT 上的 HRV）或物面扫描仪（如 Landsat 上的 MSS 和 TM）相比，要有更高的技术要求。一是集光系统要求尽量使用反射式光学系统，并且要求具有消去球面像差、像散差及畸变像差的非球面补偿镜头的光学系统。二是分光系统，使用目前的分光滤光片和干涉滤光片已行不通。必须使用由狭缝、平行光管、棱镜以及绕射光栅组成的分光方式，绕射光栅能对由光导纤维导入的各波谱带的入射光进行高精度的分光，能用于从紫外至红外范围，绕射光栅可用全息技术精确制作。三是探测器敏感元件，要求由成千上万个探测元件组成的线阵，并且能够感受可见光和红外谱区的电磁波。

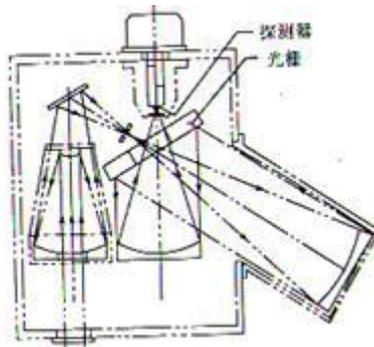


图 4-18 是机载成像光谱仪结构图

图中，前置光学系统是由 M1 和 M2 构成的 Schwarzschild 型望远镜。光谱仪由反射镜 M3、M4 和衍射光栅组成。

§ 4.2 微波成像类传感器（侧视雷达）

侧视雷达成像与航空摄影不同，航空摄影利用太阳光作为照明源，而侧视雷达利用发射的电磁波作为照射源。它与普通脉冲式雷达的结构大体上相近。图 3-19 为脉冲式雷达的一般组成格式。它由一个发射机，一个接收机，一个转换开关和一根天线等构成。

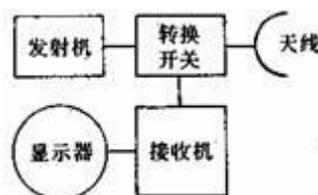


图 4-19 脉冲式雷达的一般结构

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：

$$R = \frac{1}{2} \upsilon t \quad (3-10)$$

式中： R ——雷达到目标的距离；

式中： υ ——电磁波传播速度；

式中： t ——雷达和目标间脉冲往返的时间。

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。系统参数包括雷达波的波长，发射功率，照射面积和方向，极化等。地面目标参数与地物的复介电常数，地面粗糙度等有关。

4.2.1 真实孔径雷达

真实孔径侧视雷达的工作原理如图 3-20 所示。天线装在飞机的侧面，发射机向侧向面内发射一束窄脉冲，地物反射的微波脉冲，由天线收集后，被接收机接收。由于地面各点到飞机的距离不同，接收机接收到许多信号，以它们到飞机距离的远近，先后依序记录。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。如图 4-20 中的 a、b、c、d、e 等各处的地物，a 处由于地物隆起，反射面朝向天线，出现强反射。b 处为阴影，无反射。c 处为草地，是中等反射。d 处为金属结构，导电率大，出现最强的反射。e 处为平滑表面，出现镜面反射，回波很弱。

回波信号经电子处理器的处理，在阴极射线管上形成一条相应于辐照带内各种地物反射性的图像线，记录在胶片上。飞机向前飞行时，对一条一条辐照带连续扫描，在阴极射线管处的胶片与飞机速度同步转动，就得到沿飞机航线侧面的由回波信号强弱表示的条带图像。

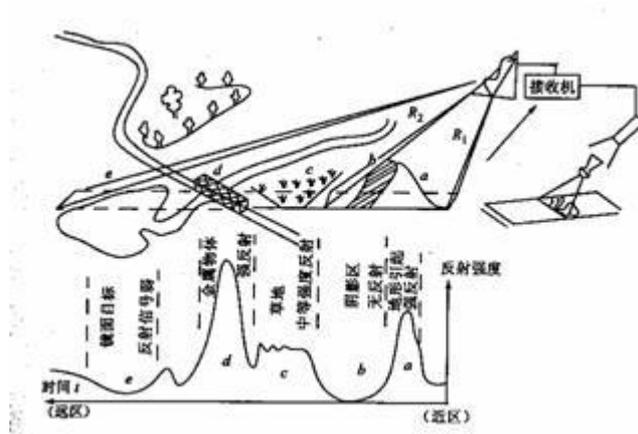


图 4-20 真实孔径侧视雷达的工作原理

真实孔径侧视雷达的分辨力包括距离分辨力和方位分辨力两种。距离分辨力是在脉冲发射的方向上，能分辨两个目标的最小距离，它与脉冲宽度有关，可用下式表示：

$$R_r = \frac{c\tau}{2} \sec\varphi \text{ (地距分辨率) 或 } R_r = \frac{c\tau}{2} \text{ (斜距分辨率)} \quad (4-11)$$

式中： R_r ——地距分辨率；

R_d ——斜距分辨率；

τ ——脉冲宽度；

φ ——俯角。

式 (4-11) 还说明了距离分辨力与距离无关。若要提高距离分辨力，从式中看来，需减小脉冲宽度，但这样将使作用距离减小。为了保持一定的作用距离，这时需加大发射功率，造成设备庞大，费用昂贵。目前一般是采用脉冲压缩技术来提高距离分辨力。

方位分辨力是指相邻的两束脉冲之间，能分辨两个目标的最小距离。它与波瓣角 β 有关，

这时的方位分辨力为：

$$R_\beta = \beta R \quad (4-12)$$

式中： β ——波瓣角；

式中： R ——斜距。

波瓣角 β 与波长 λ 成正比，与天线孔径 d 成反比，因此方位分辨力又为：

$$R_{\beta} = \frac{\lambda}{d} R \quad (4-13)$$

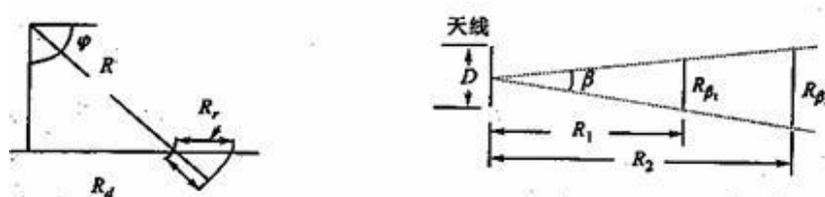


图 3-21 距离向分辨率图 4-22 方位向分辨率

从式 (4-13) 中看出，要提高方位分辨力，需采用波长较短的电磁波，加大天线孔径和缩短观测距离。这几项措施无论在飞机上或卫星上使用都受到限制。目前是利用合成孔径侧视雷达来提高侧视雷达的方位分辨力。

4.2.2 合成孔径雷达

合成孔径技术的基本思想，是用一个小天线作为单个辐射单元，将此单元沿一直线不断移动。如图 4-23 所示。在移动中选择若干个位置，在每个位置上发射一个信号，接收相应发射位置的回波信号贮存记录下来。存贮时必须同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_s 后，存贮的信号和实际天线阵列诸单元所接收的信号非常相似。可用图 3-24 来说明。合成孔径天线是在不同位置上接收同一地物的回波信号，真实孔径天线则在一个位置上接收目标的回波。如果把真实孔径天线划分成许多小单元，则每个单元接收回波信号的过程与合成孔径天线在不同位置上接收回波的过程十分相似。真实孔径天线接收目标回波后，好像物镜那样聚合成像。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。每个信号由于目标到飞机之间球面波的距离不同，其相位和强度也不同，如图 4-25 所示。然而，这种变化是有规律地进行的，当飞机向前移动时，飞机与目标之间的球面波数逐步减小，目标在飞机航线的法线上时距离最小。当飞机

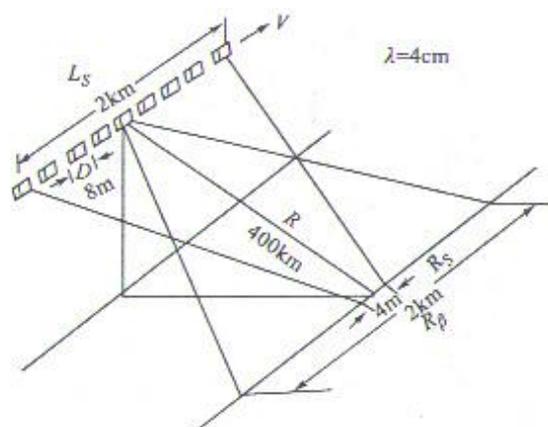


图 44-23 合成孔径侧视雷达工作过程

越过这条法线时又有规律地增加。在这个过程中，每个反射信号在数据胶片上，连续记录成间距变化的一条光栅状截面，相当于光学菲涅耳环的一部分，在胶片上呈一条一维相干图像。这样形成的整个图像，不像真实孔径雷达图像那样，能看到实际的地面图像，而是相干图像，它需经处理后，见 3-26，才能恢复地面的实际图像。

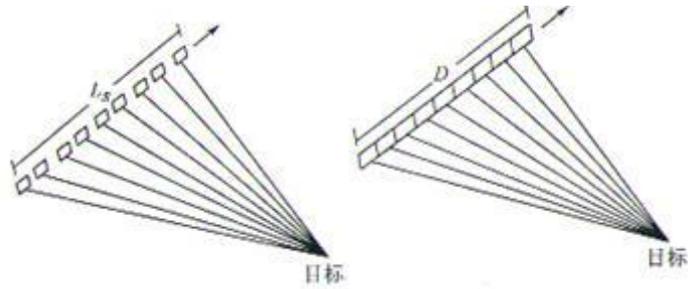


图 4-24 两种天线接收信号的相似性

合成孔径雷达的方位分辨力可从图 4-23 中看出。若用合成孔径雷达的实际天线孔径来成像，则其分辨力将很差。如图中所列，天线孔径为 8m，波长为 4cm，目标与飞机间的距离为 400km 时，按式 (4-13) 计算，其方位分辨力为 2km。现在若用合成孔径技术，合成后的天线孔径为 L_s ，则其方位分辨力为：

$$R_s = \frac{\lambda}{L_s} R \quad (4-14)$$

由于天线最大的合成孔径为：

$$L_s = R_s = \frac{\lambda}{d} R \quad (4-15)$$

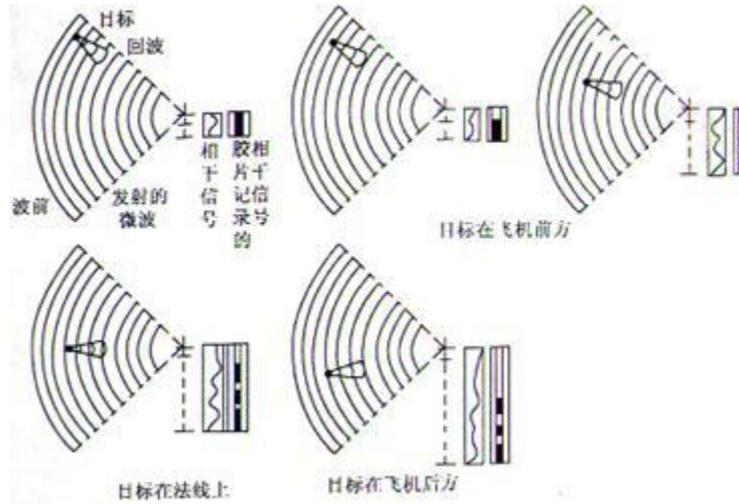


图 4-25 合成孔径雷达在不同位置上接收反射波

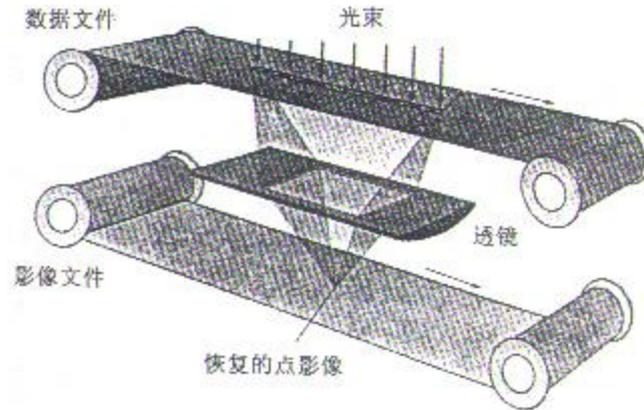


图 4-26 雷达影像的恢复

将式 (4-15) 代入式 (4-14) 则 $R_s = d$ (4-16)

式 (4-16) 说明合成孔径雷达的方位分辨力与距离无关，只与实际使用的天线孔径有关。此外由于双程相移，方位分辨力还可提高一倍，即 $R_s = d/2$ 。

3.2.3 侧视雷达图像的几何特征

侧视雷达图像在垂直飞行方向 (y) 的像点位置是以飞机的目标的斜距来确定，见图 4-27 所示，称之为斜距投影。图像点的斜距算至地面距离为：

$$G = R \cos \varphi = \sqrt{R^2 - H^2} \quad (4-17)$$

飞行方向 (x) 则与推扫式扫描仪同。由于斜距投影的特性，产生以下几种图像的几何特点：

1、垂直飞行方向 (y) 的比例尺由小变大, 见图 4-28 所示。地面上有 A、B、C 三段距

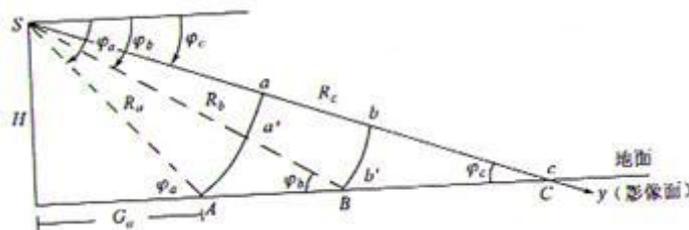


图 4-27 斜距投影

离相等, 投影至雷达图像上为 a、b、c。由于 $c > b > a$, 因此 $\frac{1}{m_c} > \frac{1}{m_b} > \frac{1}{m_a}$ 。显然这是由于 $\cos \varphi$ 的作用造成的。从图 3-27 中可知: 地面上 AB 线段投影到影像上为 ab,

$$\text{比例尺为: } \frac{1}{m_{ab}} = \frac{ab}{AB} = \frac{a'b'}{AB} \quad (4-18)$$

弧线 $Aa' \perp SB$ 。假定: 弧线近假为直线段, 并且 $\angle Aa'B$ 也近似为直角。

$$\text{则 } \frac{a'b'}{AB} = \cos \varphi \text{ 所以 } \frac{1}{m_{ab}} = \cos \varphi \text{ 同理 } \frac{1}{m_{bc}} = \cos \varphi$$

$$\text{变成通式 } \frac{1}{m} = \cos \varphi \quad (4-19)$$

考虑到实测的斜距是按 $\frac{1}{m_r}$ 比例尺缩小为影像, 因此在侧视方向上的比例尺为:

$$\frac{1}{m_y} = \frac{1}{m_r} \cos \varphi \quad (4-20)$$

可见, $\varphi \rightarrow 0^\circ$, $\cos \varphi \rightarrow 1$, 即 φ 趋于 0° 时比例尺大, 而 $\varphi \rightarrow 90^\circ$, $\cos \varphi \rightarrow 0$, 即 φ 趋于 90° 时比例尺小。

2、山体前倾, 朝向传感器的山坡影像被压缩, 而背向传感器的山坡被拉长, 与中心投影相反, 还会出现不同地物点重影现象。如图 3-29 所示, 地物点 AC 之间的山坡在雷达

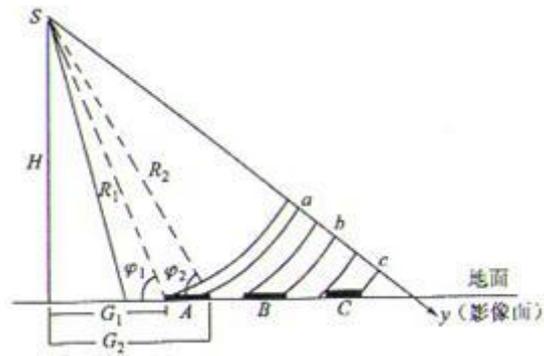


图 4-28 侧视雷达影像的比例尺

图像上被压缩，在中心投影像片上是拉伸，CD 之间的山坡出现的现象正好相反。地物点 A 和 B 在雷达图像上出现重影，在中心投影像片中不会出现这种现象。

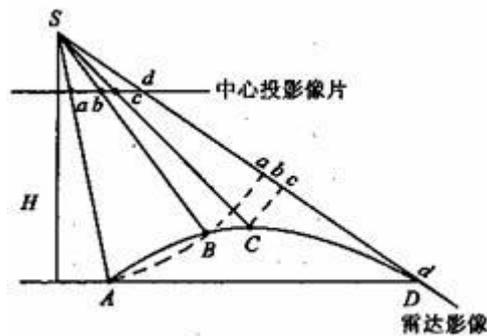


图 4-29 重影现象

3、高差产生的投影差亦与中心投影影像投影差位移的方向相反，位移量也不同。见图 4-30 所示。

$$\text{投影差 } \delta_s = R_{P_0} - R_p \quad (4-21)$$

$$\text{而 } G_p^2 = R_{P_0}^2 - H^2 = R_p^2 - (H - \Delta h)^2 \quad (4-22)$$

$$R_{P_0}^2 - R_p^2 = -H^2 + 2H\Delta h - \Delta h^2 + H^2$$

$$(R_{P_0} - R_p)(R_{P_0} + R_p) = 2H\Delta h - \Delta h^2$$

$$\delta_s (R_{P_0} - R_p + 2R_p) = 2H\Delta h - \Delta h^2$$

$$\delta_h^2 + 2R_p\delta_h + (\Delta h^2 - 2H\Delta h) = 0$$

$$\delta_h = \frac{-2R_p \pm \sqrt{4R_p^2 - 4\Delta h^2 + 8H\Delta h}}{2}$$

$$= -R_p \pm \sqrt{R_p^2 - \Delta h^2 + 2H\Delta h}$$

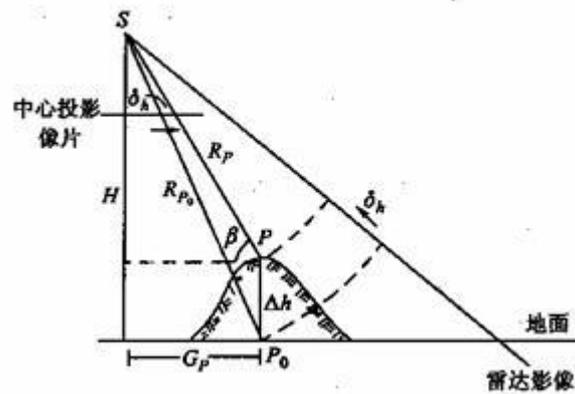


图 4-30 投影差

由于 $\delta_h \ll R_p$

$$\text{所以取 } \delta_h = -R_p + \sqrt{R_p^2 - \Delta h^2 + 2H\Delta h} \quad (4-23)$$

当 $\Delta h > 0$ 时, δ_h 也大于 0 为正值, 反之为负值。投影差改正时用加法:

$$R_{p_0} = R_p + \delta_h$$

4、雷达立体图像的构像特点:

从不同摄站对同一地区获取的雷达图像也能构成立体影像。由于是侧视, 所以同一侧或异侧都能获取和构成立体像对。对同侧获取的雷达图像立体对, 由于高差引起的投影差与中心投影片方向相反, 如果按摄影位置放置像片进行立体观测, 看到的将是反立体图像, 图 3-31 已将左右立体图像换位放置, 看到的是正立体。

4.2.4 相干雷达 (INSAR)

INSAR 就是利用 SAR 在平行轨道上对同一地区获取两幅（或两幅以上）的单视复数影像来形成干涉，进而得到该地区的三维地表信息。该方法充分利用了雷达回波信号所携带的相位信息，其原理是通过两幅天线同时观测（单轨道双天线横向或纵向模式）或两次平行的观测（单天线重复轨道模式），获得同一区域的重复观测数据（复数影像对），综合起来形成干涉，得到相应的相位差，结合观测平台的轨道参数等提取高程信息，可以获取高精度、高分辨的地面高程信息，而且利用差分干涉技术可以精密测定地表沉降。对单轨双天线横向模式，

基线 B 的方向是与飞机方向正交的。这种模式的时间基线(temporal baseline)为零，排除了不同时间所成像对之间地表变化的影响，影响间的配准也相对容易解决。但是空间基线 B 的

选择余地很小，受到飞行平台的几何尺寸限制。该模式上前主要用于机载平台的干涉实验中。对双天线单轨纵向模式，天线顺着平台飞行方向来安装。前后两副天线间的基线通常为 2—20m。这种模式可以用来精确测定地物的运动，如运动物体的变化检测，海洋洋流的速度场等。对重复轨道单天线模式，即用相邻轨道上的两次对同一地区获取的影像来形成干涉。

为了克服时间基线的影响，采用双星串联飞行模式，可以获得间隔为一天左右的像对，如 ERS-1/2 组合和 ERS-2/ENVISAT-1 的组合。下面简要介绍其基本原理和数据处理过程。

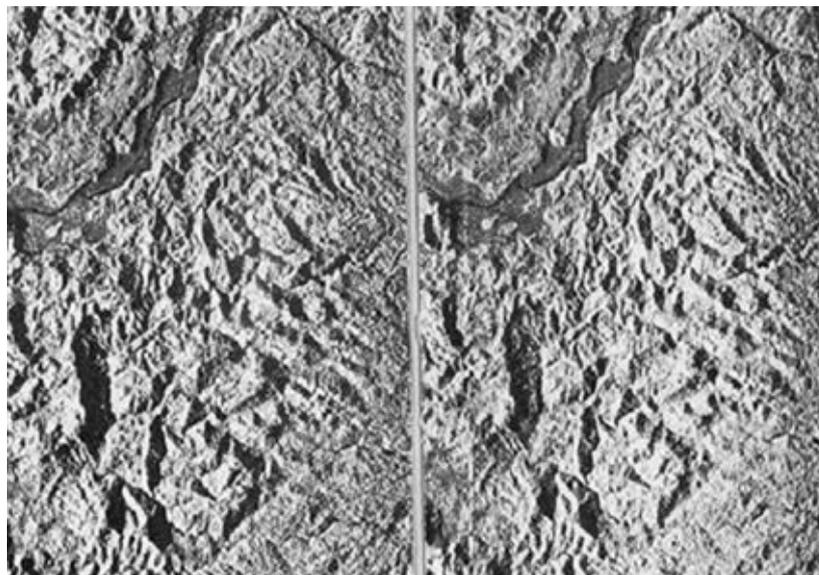


图 4-31 雷达图像立体对（同侧立体影像）

假设飞行平台上同时架设了两部天线 S1、S2，若由 S1 发射电磁波，S1、S2 同时接收从目标返回的信号，天线相对位置如图 4-32 所示。由 S1 或 2 接收到的从目标 T 返回的信号之相位可以表示为：

$$\varphi = \frac{2\pi}{\lambda} (\rho_s + \rho_r) = \varphi_s + \varphi_r \quad (4-24)$$

这里下标 t, r 分别表示发射(transmission)和接收(reception)信号的相关参数。 λ 为波长, ρ 为天线到目标 T 的斜距。两幅天线所接收到的信号的相位差为:

$$\varphi = \varphi_1 - \varphi_2 = \frac{2\pi}{\lambda} P(\rho_1 - \rho_2) \quad (4-25)$$

这里 P 为系数, 若是一副天线用于发射信号, 在干涉图中只反映出单程(信号的返程)的相位差(单轨道双天线模式); 若是两副天线都发射和接收信号, 则 P=2, 即反映出往返双程的相位差(单天线重复轨道模式)。当二副天线所形成的复数影像精确配准后, 对应像素值共轭相乘就可以在每个像素上得到如式(4-25)所示的相位差, 形成通常我们所论的干涉图或干涉条纹图(interferogram), 即有:

$$\text{复数影像 1: } \mu_1 = |\mu_1| e^{j\varphi_1}$$

$$\text{复数影像 2: } \mu_2 = |\mu_2| e^{j\varphi_2}$$

$$\text{干涉图: } \mu_{\text{int}} = \mu_1 \mu_2^* = |\mu_1| |\mu_2| e^{j(\varphi_1 - \varphi_2)} \quad (4-26)$$

$$\varphi = \arctan \left[\frac{\text{Im}(\mu_{\text{int}})}{\text{Re}(\mu_{\text{int}})} \right]$$

其中: 相位差为:

从式 4-27 中可以看出, 从复数影像 μ_1 、 μ_2 中求得的相位差, 实际上只是 $[0, 2\pi]$ 区间的主值, 即对 2π 取模的值 φ_M 。确切地说(4-27)应写成

$$\varphi_M = \text{mod}(\varphi, 2\pi) = \arctan \left[\frac{\text{Im}(\mu_{\text{int}})}{\text{Re}(\mu_{\text{int}})} \right] \quad (4-28)$$

这种现象称为相位缠绕(phase wrapping)。那么从主值 φ_M 推算出绝对的相位差 φ 的过程称为相位解缠或相位展开(phase unwrapping)。由图 3-32 所示的几何关系模型, 有

$$\rho_2^2 = \rho_1^2 + B^2 - 2\rho_1 B \cos(\theta - \theta_{21}) \quad (4-29)$$

B 为天线之间的距离，称为空间基线（spatial baseline），简称基线。设 $\alpha = \theta_{21} - \frac{\pi}{2}$ ，称为

水平方向基线角。则有

$$\begin{aligned} \sin(\theta - \alpha) &= \cos(\vartheta - \theta_{21}) \\ &= \frac{\rho_1^2 - \rho_2^2 + B^2}{2 \rho_1 B} \\ &= \frac{(\rho_1 - \rho_2)(\rho_1 + \rho_2)}{2 \rho_1 B} + \frac{B}{2 \rho_1} \\ &\cong \frac{(\rho_1 - \rho_2)}{B} = \frac{-\lambda \varphi}{2\pi B} \quad (4-30) \end{aligned}$$

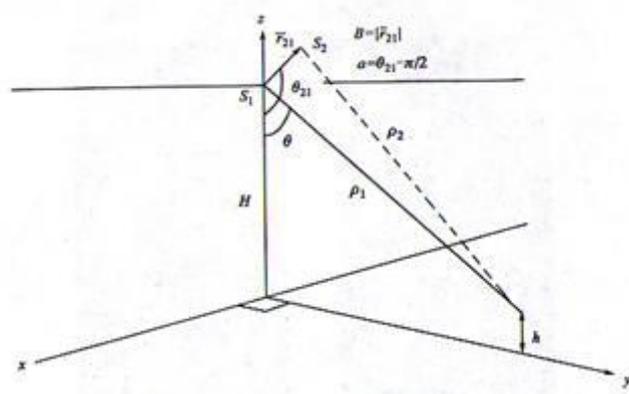


图 4-32 雷达干涉测量原理

(4-30) 式中的近似是为了将各变量之间的关系表达得更加简明直观 (Madsen1993) 由于通常 $\rho_1 \gg B$ ，可以得出：

$$\theta = \alpha - \arcsin \left[\frac{\lambda \varphi}{2\pi B} \right] \quad (4-31)$$

$$h = H - \rho_1 \cos \theta \quad (4-32)$$

(4-31) 式和 (4-32) 式揭示了干涉相位差 ϕ 与高程 h 之间的数学关系。也就是说，如果已知天线位置（参数 H , B , a ）和雷达成像系统的参数（ θ ）等，就可以从 ϕ 计算出地面的高程值 h 。

INSAR 数据处理的一般流程主要步骤包括：影像配准、干涉图生成、噪声滤除，基线估算，平地效应消除，相位解缠，高程计算和纠正（地理编码处理）等。