



# 遥感数字图像处理

Remote Sensing Digital Image Processing

潘竞虎

西北师范大学 地理与环境科学学院

2009年3月



## 第四章 遥感图像的辐射校正

### 4.1 概述

#### 1. 辐射畸变

进入遥感器的辐射强度反映在图像上就是亮度值（灰度值）。  
辐射强度越大，亮度值（灰度值）越大。

亮度值（灰度值）主要受两个物理量影响：

- 一是太阳辐射照射到地面的辐射强度。
- 二是地物的光谱反射率。

所以当太阳辐射相同时，图像上像元亮度值（灰度值）的差异就直接反映了地物目标光谱反射率的差异，但实际测量时，辐射强度值还受到其他因素的影响而发生改变，称为辐射畸变。





## 辐射校正

由于传感器响应特性和大气的吸收、散射以及其它随机因素影响，导致图像模糊失真，造成图像的分辨率和对比度相对下降，这些都需要通过辐射校正复原。

消除图像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 calibration**）。





## 2. 辐射传输方程 (radiative transfer equation)

传感器的输出 $E_\lambda$

$$E_\lambda = K_\lambda \left\{ \rho_\lambda \cdot E_0(\lambda) e^{-T(z_1, z_2) \sec \theta} + \varepsilon_\lambda \cdot W_e(\lambda) \right\} e^{-T(0, H)} + b_\lambda$$

$K_\lambda$  为传感器的光谱响应系数

$\rho_\lambda$  为地物的波谱反射系数;

$E_0$  为太阳辐射照度  $T(z_1, z_2)$  为 $z_1$ 到 $z_2$ 区段大气层的光学厚度 (消光系数的积分); ;

$\theta$  为太阳天顶角;  $\varepsilon_\lambda$  为地物的波谱发射率系数;

$W_e(\lambda)$  为与地物同温度黑体的发射通量密度;

$H$  为平台高度;  $b_\lambda$  为大气辐射所形成的天空辐射照度。





### 3. 辐射误差产生的原因

#### (1) 因传感器的响应特性引起的辐射误差

##### 1) 光学摄影机内部辐射误差

镜头中心和边缘透射光的强度不一致，造成图像上不同位置的同一类地物有不同的灰度值（传感器的光学镜头的非均匀性引起边缘减光效应）。

##### 2) 光电扫描仪内部辐射误差

A) 光电转换误差； B) 探测器增益变化引起的误差

#### (2) 因大气影响引起的辐射误差

地物（目标物）的辐射（反射）经过大气层时，与大气层发生散射作用和吸收作用，主要是由气溶胶引起的散射（可见光近红外区）及水蒸气引起的吸收（热红外区）。由于大气的存在，辐射经过大气吸收和散射，通过率小于1，从而减弱了原始信号的强度，同时大气的散射光也有一部分直接或经过地物反射进入到遥感器，这两部分辐射又增强了信号，但却不是有用的。



大气的主要影响是减少了图像的对比度，使原始信号和背景信号都增加了因子。

(3) 因太阳辐射引起的辐射误差（光照条件的不同）

1) 太阳位置引起的辐射误差

太阳高度角和方位角不同，地物的反射率随之改变。

2) 地形起伏引起的辐射误差

(4) 因检测器特性的差别、干扰、故障或磁带的误码率引起的不正常的条纹和斑点



## 4. 辐射校正的目的

尽可能消除因传感器自身条件、薄雾等大气条件、太阳位置和角度条件及某些不可避免的噪声，而引起的传感器的测量值与目标的光谱反射率或光谱辐射亮度等物理量之间的差异，尽可能恢复图像的本来面目，为遥感图像的识别、分类、解译等后续工作打下基础。

用定标系数可将原始DN值转换为大气层顶太阳辐亮度 $L_\lambda$ 。  
绝对光谱辐亮度可以从发射前的标定值获得,其关系如下:

$$L_\lambda = DN * gain + bias$$

式中: $L_\lambda$  为测量的光谱辐亮度,  $DN$ 为记录的电信号数值,  $gain$  为响应函数的斜率(通道增益),  $bias$  为响应函数的截距。

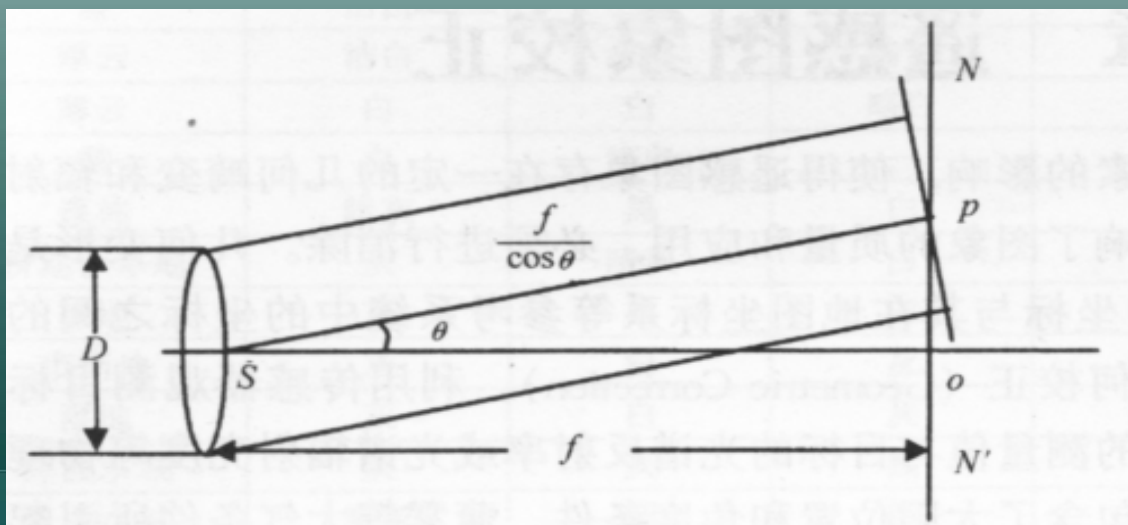


## 4.2 辐射误差校正的原理与方法

### 1. 因传感器的灵敏度特性引起的辐射误差校正

#### 1) 光学镜头的非均匀性引起边缘减光现象的校正

在使用透镜的光学系统中，由于透镜光学特性，其镜头中心和边缘的透射光强度不一致，使同类地物在图像上不同位置有不同的灰度值，一般是边缘部分比中间部分暗。在这类光学系统中，一幅图像上各像点光的强度分布符合以下规律： $E_p = E_0 \cos^4 \theta$ ， $\theta$ 为光轴到摄影面边缘部的视场角。







## 2) 光电变换系统的特性引起的辐射误差校正

由于能量转换系统的灵敏度特性有很好的重复性，可以在地面定期测量其特性，根据测量值对其进行辐射误差校正。对于Landsat卫星的MSS图像和TM图像按下式对传感器的输出进行校正：

$$V = \frac{D_{\max}}{(R_{\max} - R_{\min})} \times R - R_{\min}$$

式中：V —— 已校正过的数据；

$D_{\max}$  —— 校正系数，对于MSS为127，对TM为255；

$R_{\max}$  —— 探测器能够输出的最大辐射亮度；

$R_{\min}$  —— 探测器能够输出的最小辐射亮度；

R —— 传感器输出的未校正辐射亮度。



## MSS的 $R_{max}$ 和 $R_{min}$ (单位: $mW/cm^2$ )



西北师范大学  
GIS开发应用研究中心

波段	$R_{max}$ 和 $R_{min}$			
	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



## TM的 $R_{max}$ 和 $R_{min}$

波段	$R_{max}$ 和 $R_{min}$
1	-0.009 9/1.004
2	-0.022 7/2.404
3	-0.008 3/1.410
4	-0.019 4/2.660
5	-0.007 99/0.587 3
6	-0.003 75/0.359 5
7	0.153 4/1.896



### 3) 探测器增益变化引起的辐射误差校正

通常采用楔校准模型加以消减。

■以陆地卫星 (Landsat) 可见光波段为例, 校准模型为 :

$$V_c = \frac{K}{\hat{b}_{s(n)}} [V_r - \hat{a}_{s(n)}]$$
$$\hat{a} = \sum_{i=1}^n C_i V_i$$
$$\hat{b} = \sum_{i=1}^n D_i V_i$$

■ 式中:  $V_r$ 为未校正的输入亮度值;  $V_c$ 为校准后的输出亮度值;  $\hat{a}_{s(n)}$ 为滤波偏移值, 是大气散射影响或其他原因产生的附加辐射值, 决定于检测系统的大气的干扰,  $\hat{b}_{s(n)}$ 为滤波增益, 决定于检测系统的波谱响应因素;  $K$ 为太阳角校正系数 (常数)。



### (3) 处理过程中引起的畸变

计算的过程为滤波。当卫星上的传感器对地面正向扫描时，传感器接收目标的辐射光谱，而当传感器回归扫描时，则传感器不接收目标辐射能量，而是接收系统内的人工辐射光源发出的标准信号（校正楔，随时间而改变辐射的强弱），此时传感器对标准楔进

$$\hat{a} = \sum_{i=1}^n C_i V_i$$
$$\hat{b} = \sum_{i=1}^n D_i V_i$$

行取样，输出Vi值，该值和遥感图像数据一起传至地面站进行处理。地面站进行校正处理时，对Vi值作回归运算得到。

**C<sub>i</sub>**，**D<sub>i</sub>**为回归系数，它们决定于检测器、波段和高增益等因素。这些因素不同，其差别也较大。通过事先对各个传感器进行大量的测试实验来确定。

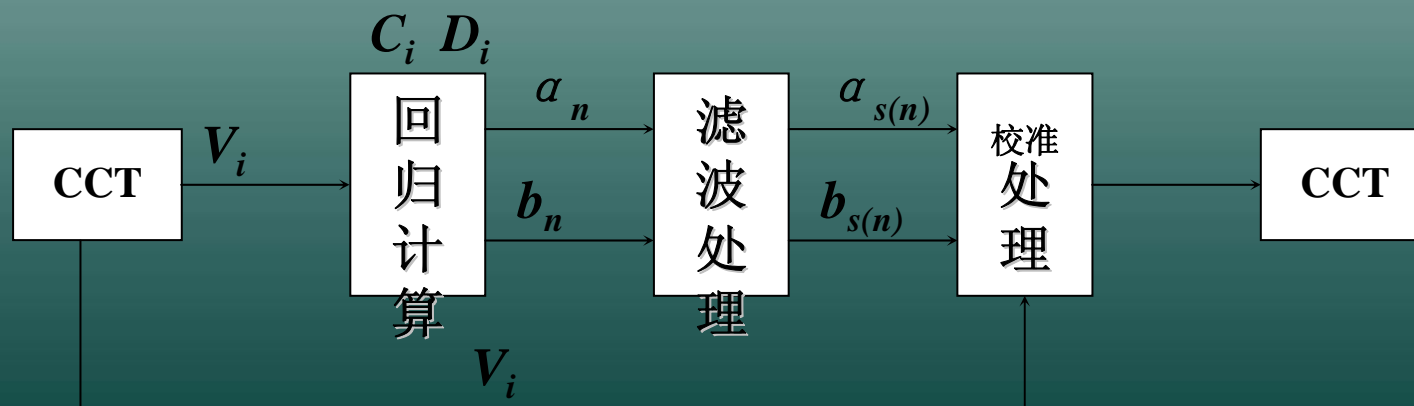


### 3. 几何校正的原理

$$\hat{a}_s(n) = \hat{a}_s(n-1) + \frac{1}{n}(\hat{a}_s - \hat{a}_s(n-1)) \quad (6-4)$$

$$\hat{b}_s(n) = \hat{b}_s(n-1) + \frac{1}{n}(\hat{b}_s - \hat{b}_s(n-1)) \quad (6-5)$$

$\hat{a}_s(n), \hat{b}_s(n)$  为随机变量，可以通过对  $\hat{a}_s(n), \hat{b}_s(n)$  的逐次估计进行统计运算，以求得接近于实际的估计量。当进行第  $n$  次观测时，得到观测量  $\hat{a}_s, \hat{b}_s$ ，用  $\hat{a}_s(n), \hat{b}_s(n)$  来修改第  $(n-1)$  次的估计量  $\hat{a}_s(n-1), \hat{b}_s(n-1)$ ，得到第  $n$  次的估计量  $\hat{a}_s(n), \hat{b}_s(n)$ ，第  $n$  次估计量比第  $n-1$  次估计量更接近正确值。 $\hat{a}_s(n), \hat{b}_s(n)$  计算采用逐次估计： $\hat{a}_s(n), \hat{b}_s(n), \hat{a}_s(n-1), \hat{b}_s(n-1)$  分别为第  $n$  和  $n-1$  次观测的估计值， $\hat{a}_s, \hat{b}_s$  为第  $n$  次的观测值， $n$  为观测次数，一般取值 32。



辐射值校准流程图



## 2. 因大气影响引起的辐射误差校正

■大气校正就是指消除由大气散射引起的辐射误差的处理过程。主要指对天空散射光的校正。

■大气校正的方法：

- ❖利用辐射传递方程进行大气校正；
- ❖利用地面实况数据进行大气校正；
- ❖利用辅助数据进行大气校正。

■实际像场大气的校正：

- ❖野外现场波谱测试（回归分析法）；
- ❖大气参数测量；
- ❖波段对比分析（直方图法）。



## 具体方法

### (一) 野外波谱测试回归分析法

与卫星扫描同步进行野外波谱测试，将地面测量结果与卫星影像对应像元亮度值进行回归分析，回归方程为：

$$L_{Ai} = a + bR_i \quad (4-1)$$

式中： $L_{Ai}$  为卫星观测值， $R_i$ 为地面反射率， $a$ 和 $b$ 为回归系数。系数 $a$ 为大气散射引起对辐射的干扰部分：

$$a = S_i L_{Bi} \quad (4-2)$$

$S_i$ 为系统增益因素， $L_{Bi}$ 为大气路径辐射率。

(4-1)式中的系数 $b$ 表示辐射率 $L_{Ai}$ 随地面反射率 $R_i$ 递增而增长的程度大小，从数学意义上说，它是表示公式(4-1)所描述的直线的斜率。





由(4-1)式可得:

$$bR_i = L_{Ai} - a$$

令:  $L'_{Ai} = bR_i = L_{Ai} - a$

$L'_{Ai}$ 即为校正后图像灰度值,  $a$ 为大气附加辐射部分。

## (二) 辐射传递方程算法

### 1) .求解辐射传递方程式

$$L_i = L_0 + \frac{r_i}{1 - r_i S} F$$

$L_i$ 为传感器接收到的辐射亮度;  $L_0$ 为观测方向的路径辐射项;  $r_i$ 为地表反射率;  $S$ 为大气下界的半球反射率;  $F$ 为大气层顶与太阳光垂直方向的通量密度;

需测定气溶胶密度和水蒸气浓度, 仅从图像数据中很难获取这些参数。



## 2) .利用大气模型软件包

- 针对不同尺度分辨率大气传输标准码MODTRAN ( Moderate Resolution Transmission ) 和LOWTRAN ( Low Resolution Transmission ) ;
- 标准高纬度辐射码SHARC(Standard High Altitude Radiation Code) ;
- 紫外与可见光辐射模型UVRAD (Ultraviolet and Visible Radiation);
- 大气恢复程ATREM (The Atmosphere Removal program ) ;
- 6S 模型(Second Simulation of the Satellite Signal in the Solar Spectrum radiative code) ;
- 快速计算大气辐射模型ATCOR

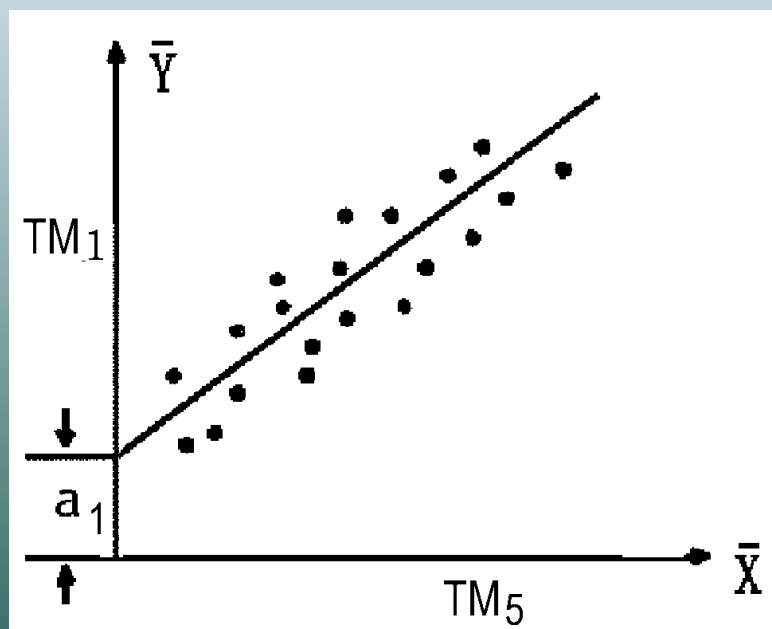
$$\rho_{\rho}(\text{Measurement}) = \frac{\pi L(\lambda) d^2}{E_s(\lambda) \cos \theta_s} = \frac{\pi d^2}{E_s(\lambda) \cos \theta_s} [c_0(i) + c_1(i) \times DN]$$

$$\rho_{\rho}(\text{Model}) = a_0(A_{tm}, \theta, \theta, \varphi) + \frac{a_0(A_{tm}, \theta, \theta) \times \rho}{\cos \theta_s} \quad a_0 = \frac{\pi \int_{\lambda_2}^{\lambda_1} \Phi(\lambda) L_o(\lambda) d\lambda}{\int_{\lambda_2}^{\lambda_1} \Phi(\lambda) E_s(\lambda) d\lambda} \quad a_1 = \frac{1}{\cos \theta_s} \frac{\int_{\lambda_2}^{\lambda_1} \Phi(\lambda) E_s(\lambda) [\tau_{air}(\lambda) + \tau_{air}(\lambda)] d\lambda}{\int_{\lambda_2}^{\lambda_1} \Phi(\lambda) E_s(\lambda) d\lambda}$$

$$\rho^{(1)} = \frac{1}{a_1} \left| \frac{\pi d^2}{E_s(\lambda) \cos \theta_s} \{c_0(i) + c_1(i) \times DN\} - a_0 \right|$$



### (三) 回归分析法



由于大气散射主要影响短波部分，波长较长波段几乎不受影响，因此可用其校正其它波段数据。作法如下：在不受大气影响的波段（如TM7）和待校正的某一波段图像中，选择由最亮至最暗的一系列目标，将每一目标的两个待比较的波段灰度值提取出来进行回归分析。例如用TM1波段与TM5波段比较，作出回归直线，回归方程为：

$$Y = a_1 + b_1 X$$

其中即TM5波段的亮度均值，即TM1亮度均值， $a_1$ 、 $b_1$ 计算如下：



$$b_1 = \frac{\sum[(T_5 - \bar{T}_5)(T_1 - \bar{T}_1)]}{\sum(T_5 - \bar{T}_5)^2}$$

$$a_1 = \bar{T}_1 - b_1 \bar{T}_5$$

$$T'_1 = T_1 - a_1$$

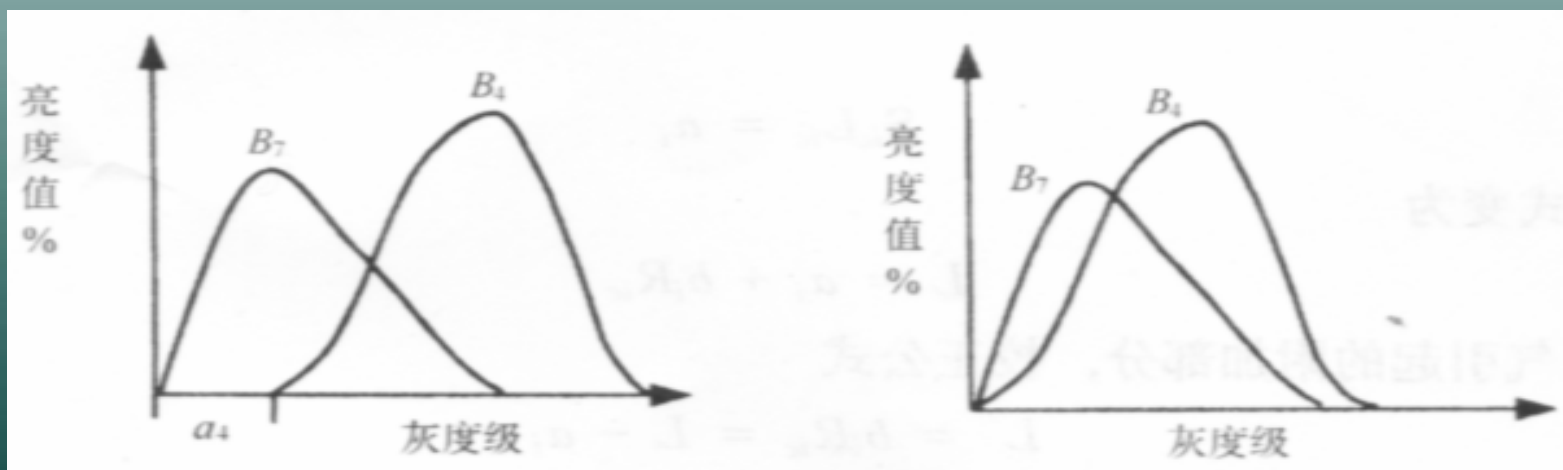
以上各式中T1、T5表示TM1与TM5波段灰度值，T'为TM1波段校正后的灰度值，对于任一波段其校正量ai是第i波段回归分析的截距。

实际校正时只要依据以上公式通过TM1、TM5波段灰度值计算出a<sub>1</sub>、b<sub>1</sub>值，再减去改正量即可求出每个像元TM1波段校正后灰度值。



### (三) 直方图校正法

另一种简单方法是通过灰度直方图对比找出校正量。由于大气散射影响只作用于短波段，对可见光以外红外波段几乎没有影响（如TM5波段），因此如果影像范围内存在灰度值为零的地物（例如深水体，高山背阴处等），其灰度直方图往往从原点开始，而其它波段灰度直方图离原点有一段距离（例如图中线段a1），这段距离即为大气散射引起的灰度直方图漂移值。依此为改正量进行校正，相当于从每个像元灰度值中减去这个数值。其它波段的校正量可以由此类推求得。



调整前直方图

调整后直方图



## (4) 灰度的重采样

### 1) 太阳高度角的辐射误差校正

#### A. 太阳位置引起的辐射误差校正

太阳高度角引起的畸变校正就是将太阳光线倾斜照射时获取的图像校正为太阳光线垂直照射时获取的图像。

太阳的高度角  $\theta$  可根据成像时刻的时间、季节和地理位置来确定，即：
$$\sin \theta = \sin \varphi \cdot \sin \delta \pm \cos \varphi \cdot \cos \delta \cdot \cos t$$

$\varphi$ 为图像对应地区的地理纬度； $\delta$ 为太阳赤纬（成像时太阳直射点的地理纬度）； $t$ 为时角（地区经度与成像时太阳直射点地区经度的经差）。

太阳高度角的校正就是通过调整一幅图像内的平均灰度来实现的。



当研究相邻地区跨越不同时期的两幅图像时，为了使两个部分便于衔接或镶嵌，也可作太阳高度角校正。方法是以其中一幅图像为标准（或叫参考图像），而校正另一幅图像，使之与参考图像相近似。

$$DN' = DN \frac{\cos i_1}{\cos i_2}$$

$i_1$ 、 $i_2$ 分别为参考图像和待校正图像的天顶角， $DN$ 为灰度值。



## 2) 地形坡度辐射误差校正

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。

若处在坡度为  $\alpha$  的倾斜面上的地物影像为  $g(x, y)$ ，则校正后的图像  $f(x, y)$  为：

$$f(x, y) = \frac{g(x, y)}{\cos \alpha}$$

由上式看出，地形坡度引起的辐射校正方法需要有图像对应地区的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。





## 4. 噪声消除

遥感图像的噪声源主要有大气传输信道的噪声及传感器内所产生的噪声。大气传输信道中由于大气的湍流扰动影响产生随机噪声；传感器的噪声源包含有转换和滤波过程中产生的噪声，例如光电检测系统的电流不稳定性所表现的散粒噪声，即电流的无规则起伏现象，低光亮时为泊松分布，高光亮时为高斯分布。

传感器的另一噪声源为滤波器电路中电阻、电容产生的热噪声，这种噪声也具有高斯分布、零均值的随机特性；热红外波段传感器因各部分的温度变化也产生噪声效应；此外，摄影胶片记录信息时存在的胶片颗粒噪声，即胶片上溴化银颗粒受等值曝光时因银颗粒的大小、形状不完全一致，而且分布不均匀引起的。以上这些噪音均属于对图像的高频干扰，因此可以采用滤波方法予以消除。



## 4.3 图像镶嵌

- 图像镶嵌 (MOSAIC) 是将多个具有重叠部分的图像制作成一个没有重叠的新图像;
- 有基于像元的镶嵌和基于地理坐标的镶嵌;

### 图像的镶嵌注意的问题

- 镶嵌要有足够宽的重叠区, 最好不少于图像的 $1/5$ , 否则会影响精度
- 相邻图像往往色调或灰度值不一致, 需要进行灰度一致化
- 如果镶嵌后需要进行某种地图投影变换, 最好先根据该投影方式分幅校正, 然后再镶嵌



## 4.4 SAR影像的辐射校正与增强

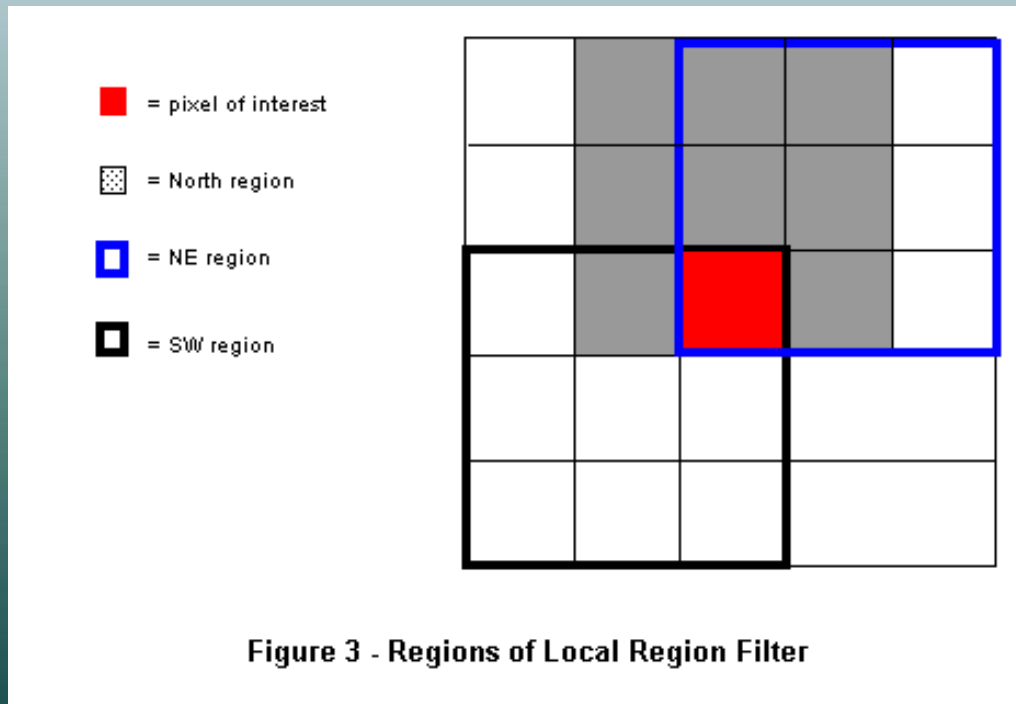
- 雷达图像中的亮斑

雷达图像上常常会产生许多不同亮度的斑点，影响图像解译，这些亮斑点的产生是因为信号从地面返回被传感器接收时，这些点的信号特别强于周围像元点的信号而形成，一般来说，这种现象产生的地物目标有面目标（也叫分布目标），点目标和“硬”目标。**面目标或分布目标**是指同类的点或物质随机分布，并且表面粗糙的大块地区。例如：草地，草地中的草可以认为是随机分布的。由于位置不同，它们接收到的雷达波位相不同，回波的初位相和振幅都不相同。这样雷达天线所接收的电磁波就有最强信号和最弱信号之间的周期性变化，在图像上表现为亮点和暗点相间的图斑。由于亮点突出，这一现象叫做“光斑”效应。几何分辨率越高，这种效应越强，所以常常用降低分辨率的方法来减少光斑效应。





## 2) Local Region Filter





## 航片的立体模型

### 2. 亮度调整

- 原始雷达图像由于各种原因存在辐射误差，如雷达天线在接收和传送图像时有缺陷，或由于距离目标的远近产生强弱不同的信号。亮度调整功能通过调整每个像元的灰度值，使每条等斜距线上的像元都取该线的平均值，把图像像元全部调整到平均亮度。

### 3. 边缘增强

- 执行边缘增强前，首先要进行斑点噪声处理。
- 1) 邻域增强
- 2) Wallis自适应滤波（局部对比度拉伸）

**Banbdwise、HIS、PC**

### 3) 影像融合



## 4.5 遥感卫星辐射校正场概述

- 80年代初由美国Arizona大学光学中心的P. N. Slater先生首先提出来的。该方法是在卫星飞越试验场地上空时，在若干选好的像元内测定探测器对应波段内的地物反射率 $\rho$ ，同时测出气象要素和大气光学特征。再根据卫星过顶时太阳几何位置、仪器视场角、探测器光谱响应函数等，通过大气辐射传输模式正演出到达传感器入瞳处各光谱通道的辐射亮度 $L_t = E \times BRF \times \tau / \tau + L_p = AC$
- 基本原理
- 1) VIS/NIR:
- C为探测器的输出信号数字量。
- 2) TIR: 清洁水面作为目标



## 多中心投影影像的构像方程

### 1. 辐射校正场的国外发展概况

美国NASA 和亚利桑那(Arizona) 大学在美国新墨西哥州的白沙(WSMR)和加利福尼亚州的爱德华空军基地的干湖床(EAFB)建立了辐射校正场,并已对多颗卫星进行了场地标定工作。

法国在马塞市附近也建立了La crau 辐射校正场,并开展了多次辐射校正工作。

欧空局在非洲撒哈拉沙漠,日本与澳大利亚合作在澳大利亚北部沙漠地区建立了地面辐射校正场,通过星地同步观测,实现对卫星遥感仪器的定标。

根据美、法公布的资料,目前用辐射校正场的方法对可见光和近红外波段的标正精度可达6~3%左右。除成功地对Landsat - 4、5 的TM, SPOT 的HRV, NOAA - 9、10、11 的AVHRR, Nimbus - 7 的CZCS 进行辐射校正外,目前正在进一步研究高分辨率成像光谱仪(AVIRIS) 和中分辨率成像光谱仪(MODIS) 的辐射校正,并对法国偏光照相机(POLDER) 进行辐射校正。加拿大在北部大草原也开展卫星、飞机积雪同步观测,以便对卫星传感器作出客观评价。





## 2. 建立辐射校正场的目的

### 1) . 遥感数据的定量化要求

建立遥感器测量数字信号与对应的辐射能量之间的数量关系。对于一种遥感器来说,就是确定一个灰度值(DN) 对应多少辐射度值(L); 或者确定一个辐射度(L) 对应多少灰度值(DN)。

### 2) . 监测在轨传感器变化并不断提供修正系数

遥感卫星在发射前,卫星研制单位已利用地面设备对遥感器进行了绝对辐射校正。然而遥感卫星在轨运行后,由于元器件所处空间环境的改变和随卫星运行时间的增加而使光器件老化,使灵敏度下降。例如,1979年美国根据海色扫描仪(CZCS)的工作特性,以海水作为绝对校正场,重新对CZCS辐射特性进行了评价。根据船上和飞机上的测量结果发现,CZCS短波部分在4年后其灵敏度下降了25%;1984年美国在白沙试验场对Landsat - 5进行大气辐射校正,发现卫星在轨运行600 d后,TM2、TM3、TM4波段的灵敏度分别变化了6.6%、2.0%和12.9%;SPOT卫星探测器也有同样的结果。所以,遥感卫星探测器在轨飞行标定是具有实用价值的。



## 2. 建立辐射校正场的目的

- 3) . 补充星上定标的不足
- 4) . 多种遥感器和不同时间遥感资料的综合运用

### 2. 我国的辐射校正场

在国家计委、原国防科工委和原航天总公司领导的支持下,于**1993**年和**1994**年先后组织有关专家通过现场考察,确定甘肃省敦煌市西部党和洪积扇区为可见光和近红外波段的绝对辐射校正场,青海省的青海湖为热红外波段的绝对辐射校正场。



表 8 敦煌辐射校正场与美、法两国辐射校正场的比较表

特 征 \ 地 点	敦 煌 场	美 国 White Sands	法 国 La Crau
面积(km <sup>2</sup> )	40 ×60	60 ×30	60
地表物质组成	戈壁(含砾砂土)	石膏沙	鹅卵石
纬 度	N40°12′	N32°55′	N43°30′
经 度	E94°26′	E106°22′	E4°52′
海拔高度(m)	1160	1196	20
平均气压(mb)	891.3	870.0	
年平均气温(℃)	8.7	13	
年平均相对湿度(%)	41	55	
气候类型	干燥大陆西风气候带	干燥大陆性气候	干燥地中海气候



谢 谢 !  
Thank you very much

