

4.3.2 遥感图像的精纠正处理

遥感图像的精纠正是指消除图像中的几何变形,产生一幅符合某种地图投影或图形表达要求的新图像。它包括两个环节:一是像素坐标的变换,即将图像坐标转变为地图或地面坐标;二是对坐标变换后的像素亮度值进行重采样。数字图像纠正主要处理过程如下:

- (1) 根据图像的成像方式确定图像坐标和地面坐标之间的数学模型。
- (2) 根据地面控制点和对应像点坐标进行平差计算变换参数,评定精度。
- (3) 对原始图像进行几何变换计算,像素亮度值重采样。

目前的纠正方法有多项式法、共线方程法和有理函数模型法等。

1. 基于多项式的遥感图像纠正

多项式纠正回避成像的空间几何过程,直接对图像变形的本身进行数学模拟。多项式法对各种类型传感器图像的纠正是适用的。利用地面控制点的图像坐标和其同名点的地面坐标通过平差原理计算多项式中的系数,然后用该多项式对图像进行纠正。

常用的多项式有一般多项式、勒让德多项式以及双变量分区插值多项式等。

一般多项式纠正变换公式为:

$$\left. \begin{aligned} x &= a_0 + (a_1 X + a_2 Y) + (a_3 X^2 + a_4 XY + a_5 Y^2) \\ &\quad + (a_6 X^3 + a_7 X^2 Y + a_8 XY^2 + a_9 Y^3) + \cdots \\ y &= b_0 + (b_1 X + b_2 Y) + (b_3 X^2 + b_4 XY + b_5 Y^2) \\ &\quad + (b_6 X^3 + b_7 X^2 Y + b_8 XY^2 + b_9 Y^3) + \cdots \end{aligned} \right\} \quad (4-70)$$

式中: x, y 为某像素原始图像坐标; X, Y 为同名像素的地面(或地图)坐标。

多项式的项数(即系数个数) N 与其阶数 n 有着固定的关系:

$$N = \frac{(n+1)(n+2)}{2}$$

多项式的系数 $a_i, b_i (i, j=0, 1, 2, \dots, N-1)$ 一般可由两种办法求得:

- (1) 用可预测的图像变形参数构成。
- (2) 利用已知控制点的坐标值按最小二乘法原理求解。

根据纠正图像要求的不同选用不同的阶数,当选用一次项纠正时,可以纠正图像因平移、旋转、比例尺变化和仿射变形等引起的线性变形。当选用二次项纠正时,则在改正一次项各种变形的基础上,还改正二次非线性变形。如选用三次项纠正则改正更高次的非线性变形。对参加计算的同名点的要求:

- (1) 在图像上为明显的地物点,易于判读;
- (2) 在图像上均匀分布;
- (3) 数量要足够。

1) 利用已知地面控制点求解多项式系数

(1) 列误差方程式:

$$\begin{aligned} V_x &= A\Delta a - L_x \\ V_y &= A\Delta b - L_y \end{aligned}$$

式中:

$$\begin{aligned}
V_x &= [V_{x_1} \quad V_{x_1} \quad \dots]^T \\
V_y &= [V_{y_1} \quad V_{y_1} \quad \dots]^T
\end{aligned}
\quad \text{为改正数向量;}$$

$$A = \begin{bmatrix} 1 & X_1 & Y_1 & X_1 Y_1 & \dots \\ \vdots & & & & \vdots \\ 1 & X_m & Y_m & X_m Y_m & \dots \end{bmatrix}
\quad \text{为系数矩阵;}$$

$$\begin{aligned}
\Delta a &= [a_0 \quad a_1 \quad a_2 \quad \dots] \\
\Delta b &= [b_0 \quad b_1 \quad b_2 \quad \dots]
\end{aligned}
\quad \text{为所求的变换系数;}$$

$$\begin{aligned}
L_x &= [x_0 \quad x_1 \quad x_2 \quad \dots] \\
L_y &= [y_0 \quad y_1 \quad y_2 \quad \dots]
\end{aligned}
\quad \text{为像点坐标。}$$

(2) 构成法方程:

$$\begin{aligned}
(A^T A) \Delta a &= A^T L_x \\
(A^T A) \Delta b &= A^T L_y
\end{aligned}$$

(3) 计算多项式系数:

$$\begin{aligned}
\Delta a &= (A^T A)^{-1} A^T L_x \\
\Delta b &= (A^T A)^{-1} A^T L_y
\end{aligned}$$

(4) 精度评定:

$$\begin{aligned}
\delta x &= \pm \left(\frac{[V_x^T V_x]}{n - N} \right)^{1/2} \\
\delta y &= \pm \left(\frac{[V_y^T V_y]}{n - N} \right)^{1/2}
\end{aligned}$$

式中: n 为控制点个数; N 为系数个数; $n - N$ 为多余观测。

设定一个限差 ϵ 作为评定精度的标准。若 $\delta > \epsilon$, 则说明存在粗差, 精度不可取, 应对每个控制点上的平差残余误差 V_{x_i}, V_{y_i} 进行比较检查, 视最大者为粗差, 将其剔除或重新选点后再进行平差, 直至满足 $\delta < \epsilon$ 为止。限差 ϵ 按成图比例尺规范执行。

2) 遥感图像的纠正变换

当用上述方法解求变换参数后, 就可以对遥感图像进行几何纠正。

(1) 纠正后数字图像的边界范围的确定

纠正后图像的边界范围, 指的是在计算机存储器中为输出图像所开出的储存空间大小, 以及该空间边界(首行、首列、末行和末列)的地图(或地面)坐标定义值。图 4-21(a) 为一幅原始图像 $(abcd)$, 定义在图像坐标系 $a-xy$ 中, 图 4-21(b) 中 $O-XY$ 是地图坐标系, $(a'b'c'd')$ 为纠正后的图像, $(ABCD)$ 表示在计算机中为纠正后图像开出的储存范围及相应的地面位置。显然, 由于图像边界定义得不恰当, 造成了纠正后图像未被全部包括, 以及出现了过多空白图像空间的不合理现象。因而, 输出图像边界范围的确定原则, 应是图 4-22 所示那样, 既包括了纠正后图像的全部内容, 又使空白图像空间尽可能地少。

纠正后图像边界范围的确定过程如下:

① 把原始图像的四个角点 a, b, c, d 按纠正变换函数投影到地图坐标系统中去, 得到 8 个坐标值:

$$(X'_a, Y'_a), (X'_b, Y'_b), (X'_c, Y'_c), (X'_d, Y'_d)$$

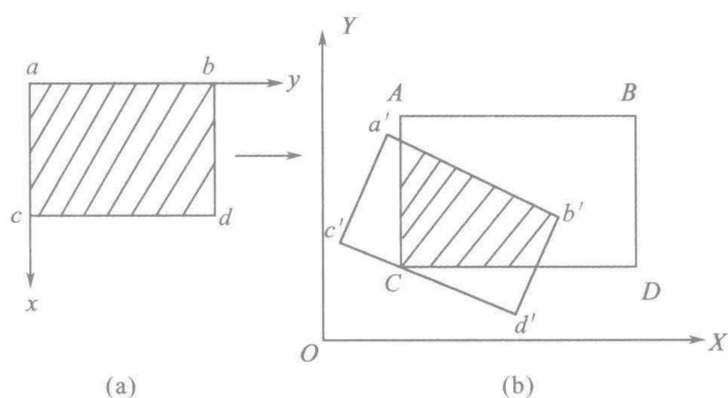


图 4-21 不正确边界范围

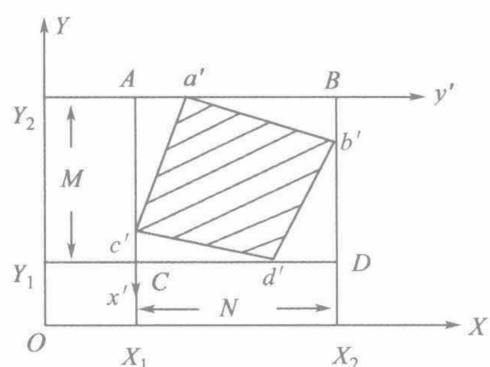


图 4-22 正确边界范围

② 对这 8 个坐标值按 X 和 Y 两个坐标组分别求其最小值(X_1, Y_1)和最大值(X_2, Y_2):

$$X_1 = \min(X'_a, X'_b, X'_c, X'_d)$$

$$X_2 = \max(X'_a, X'_b, X'_c, X'_d)$$

$$Y_1 = \min(Y'_a, Y'_b, Y'_c, Y'_d)$$

$$Y_2 = \max(Y'_a, Y'_b, Y'_c, Y'_d)$$

并令 X_1, Y_1, X_2, Y_2 为纠正后图像范围四条边界的地图坐标值。

③ 为了把该边界范围转换为计算机中纠正后图像的储存数组空间,必须在其划分出格网,每个网点代表一个输出像素,为此,要根据精度要求定义输出像素的地面尺寸 ΔX 和 ΔY 。与此同时,以边界范围左上角(见图 4-22)A 点为输出数字图像的坐标原点,以 AC 边为 x' 坐标轴,表示图像行号,以 AB 边为 y' 坐标轴,表示图像列号,图像总的行列数 M 和 N 由下式确定:

$$M = \frac{Y_2 - Y_1}{\Delta Y} + 1$$

$$N = \frac{X_2 - X_1}{\Delta X} + 1$$

至此,在输出图像坐标系 $A-x'y'$ 中,每个像素都可以其所在的行列号来确定其位置。行列号的取值范围可为:

$$x' = 1, 2, \dots, M$$

$$y' = 1, 2, \dots, N$$

④ 由于图像纠正变换函数一般只表达原始图像坐标(x, y)和地面坐标(X, Y)之间的关系,为了进一步表达原始图像与输出图像坐标间的关系,则需要把地面坐标转换为输出图像坐标(x'_p, y'_p):

$$x'_p = \frac{Y_2 - Y_p}{\Delta Y} + 1$$

$$y'_p = \frac{X_p - X_1}{\Delta X} + 1$$

或

$$X_p = X_1 + (y'_p - 1)\Delta X$$

$$Y_p = Y_2 - (x'_p - 1)\Delta Y$$

式中: X_p, Y_p ——纠正后像素 P 的地面坐标;

x'_p, y'_p ——纠正后像素 p 的图像坐标(行列号)。

(2) 直接法和间接法纠正方案

在输出图像边界及其坐标系确立后,就可以按照选定的纠正变换函数把原始数字图像逐个像素变换到图像储存空间中去。这里有两种可供选择的纠正方案,即直接法方案和间接法方案,如图 4-23 所示。

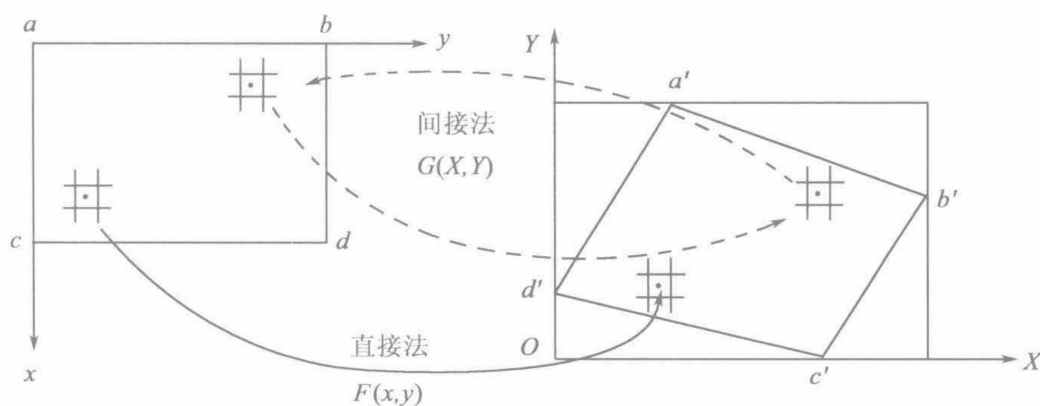


图 4-23 直接法和间接法纠正方案

所谓直接法方案,是从原始图像阵列出发,按行列的顺序依次对每个原始像素点位求其在地面坐标系(也是输出图像坐标系)中的正确位置:

$$X = F_x(x, y)$$

$$Y = F_y(x, y) \quad (4-71)$$

式中: F_x 和 F_y 为直接纠正变换函数。同时,将该像素的亮度值移置到由式(4-71)算得的输出图像中的相应点位上去。

所谓间接法方案,是从空白的输出图像阵列出发,亦按行列的顺序依次对每个输出像素点位反求原始图像坐标中的位置:

$$x = G_x(X, Y)$$

$$y = G_y(X, Y) \quad (4-72)$$

式中: G_x 和 G_y 是间接纠正变换函数。然后把由式(4-72)所算得的原始图像点位上的亮度值取出填回到空白图像点阵中相应的像素点位上去。

这两种方案本质上并无差别,主要不同仅在于所用的纠正变换函数不同,互为逆变换;其次,纠正后像素获得的亮度值的办法,对于直接法方案,称为亮度重配置,而对间接法方案,称为亮度重采样。由于直接法纠正方案要进行像元的重新排列,要求内存空间大一倍,计算时间也长,所以在实践中通常使用的方案是间接法方案。

3) 数字图像亮度(或灰度)值的重采样

以间接法纠正方案为例,假如输出图像阵列中的任一像素在原始图像中的投影点位坐标

值为整数时,便可简单地将整数点位上的原始图像的已有亮度值直接取出填入输出图像。但若该投影点位的坐标计算值不为整数时,原始图像阵列中该非整数点位上并无现成的亮度存在,于是就必须采用适当的方法把该点位周围邻近整数点位上亮度值对该点的亮度贡献累积起来,构成该点位的新亮度值。这个过程即称为数字图像亮度(或图像灰度)值的重采样。

图像亮度(或图像灰度)值重采样时,周围像素亮度值对被采样点(非整数点位)贡献的权可用重采样函数来表达。理想的重采样函数是如图 4-24 所示的辛克(SINC)函数,其横轴上各点的幅值代表了相应点对其原点(O)处亮度贡献的权。但由于辛克函数是定义在无穷域上的,又包括三角函数的计算,实际使用不方便,因此人们采用了一些近似函数代替它,据此产生了三种常用的重采样算法。

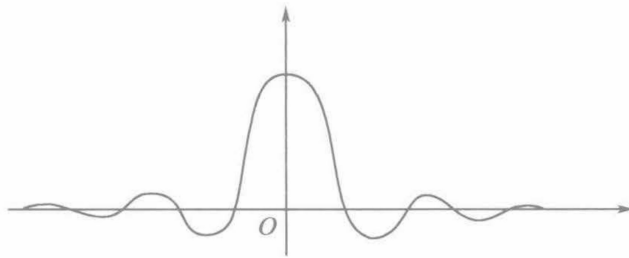


图 4-24 SINC 函数

(1) 最邻近像元采样法

该法实质是取距离被采样点最近的已知像素元素的(N)亮度 I_N 作为采样亮度。采样函数为:

$$W(x_c, y_c) = 1 \quad (x_c = x_N, y_c = y_N) \quad (4-73)$$

采样亮度为:

$$I_p = W(x_c, y_c) \cdot I_N = I_N \quad (4-74)$$

式中:

$$x_N = \text{取整}(x_p + 0.5)$$

$$y_N = \text{取整}(y_p + 0.5)$$

最邻近像元采样法最简单,辐射保真度较好,但它将造成像点在一个像素范围内的位移,其几何精度较其他两种方法差。

(2) 双线性内插法

该法的重采样函数是对辛克函数的更粗略近似,可以用如图 4-25 所示的一个三角形线性函数表达:

$$W(x_c) = 1 - |x_c| \quad (0 \leq |x_c| \leq 1) \quad (4-75)$$

当实施双线性内插时,需要有被采样点 p 周围 4 个已知像素的亮度值参加计算,即

$$I_p = W_x \cdot I \cdot W_y^T = [W_{x_1} \quad W_{x_2}] \begin{bmatrix} I_{11} & I_{12} \\ I_{21} & I_{22} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} W_{y_1} \\ W_{y_2} \end{bmatrix} \quad (4-76)$$

式中:

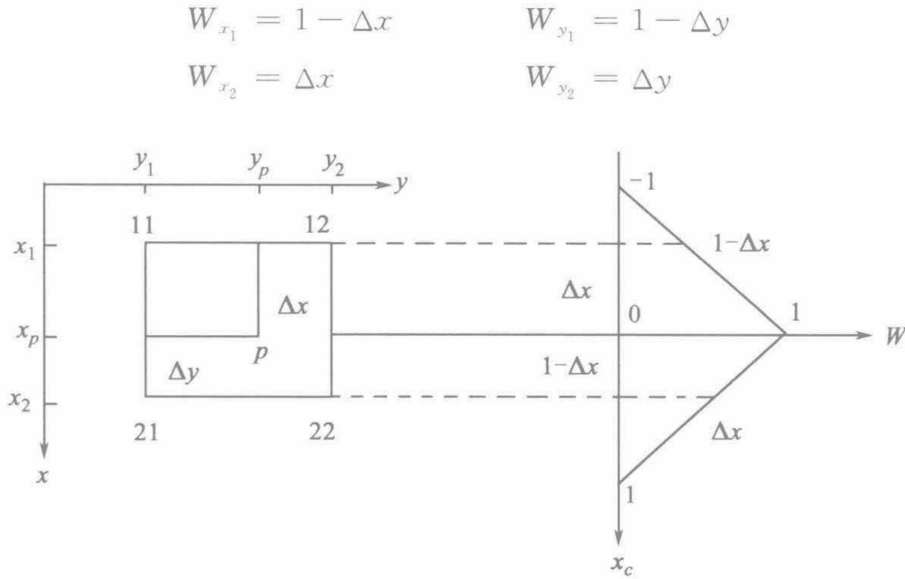


图 4-25 双线性插值法亮度重采样

由于该法的计算较为简单,并具有一定的亮度采样精度,所以它是实践中常用的方法,但图像略变模糊。

(3) 双三次卷积重采样法

该法用一个三次重采样函数来近似表示辛克函数(如图 4-26 所示):

$$\left. \begin{aligned} W(x_c) &= 1 - 2x_c^2 + |x_c|^3 & (0 \leq |x_c| \leq 1) \\ W(x_c) &= 4 - 8|x_c| + 5x_c^2 - |x_c|^3 & (1 \leq |x_c| \leq 2) \\ W(x_c) &= 0 & (|x_c| > 2) \end{aligned} \right\} \quad (4-77)$$

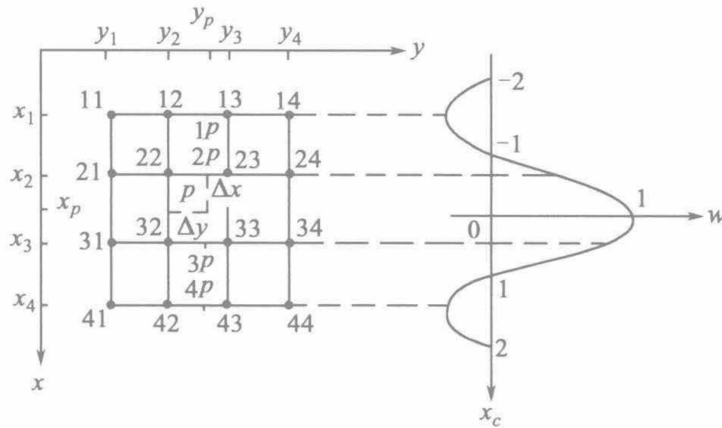


图 4-26 双三次卷积法亮度重采样

式中: x_c 定义为以被采样点 p 为原点的邻近像素 x 坐标值,其像素间隔为 1,当把(4-77)函数作用于图像 y 方向时,只需把 x 换为 y 即可。

设 p 点为被采样点,它距离左上方最近像素(22)的坐标差 $\Delta x, \Delta y$ 是一个小数值,即:

$$\Delta x = x_p - \text{取整}(x_p) = x_p - x_{22}$$

$$\Delta y = y_p - \text{取整}(y_p) = y_p - y_{22}$$

当利用三次函数对 p 点亮度重采样时,需要 p 点邻近的 4×4 个已知像素 (i, j) ($i=1, 2, 3, 4; j=1, 2, 3, 4$) 的亮度值 (I_{ij}) 参加计算。

内插点 p 的亮度值为:

$$I_p = W_x \cdot I \cdot W_y^T \quad (4-78)$$

式中:

$$\begin{aligned} W_x &= [W_{x_1} \quad W_{x_2} \quad W_{x_3} \quad W_{x_4}]; \\ I &= \begin{bmatrix} I_{11} & I_{12} & I_{13} & I_{14} \\ I_{21} & I_{22} & I_{23} & I_{24} \\ I_{31} & I_{32} & I_{33} & I_{34} \\ I_{41} & I_{42} & I_{43} & I_{44} \end{bmatrix}; \\ W_y &= [W_{y_1} \quad W_{y_2} \quad W_{y_3} \quad W_{y_4}]^T. \\ W_{x_1} &= -\Delta x + 2\Delta x^2 - \Delta x^3 & W_{y_1} &= -\Delta y + 2\Delta y^2 - \Delta y^3 \\ W_{x_2} &= 1 - 2\Delta x^2 + \Delta x^3 & W_{y_2} &= 1 - 2\Delta y^2 + \Delta y^3 \\ W_{x_3} &= \Delta x + \Delta x^2 - \Delta x^3 & W_{y_3} &= \Delta y + \Delta y^2 - \Delta y^3 \\ W_{x_4} &= -\Delta x^2 + \Delta x^3 & W_{y_4} &= -\Delta y^2 + \Delta y^3 \end{aligned}$$

双三次卷积的内插精度较高,但计算量大。

4) 纠正结果评价

利用现有的资料,根据相应的规范,对纠正结果进行精度评价。只有符合精度要求,遥感图像的几何纠正才能完成。

通过上述完整的纠正过程,就获得了具有地理编码的遥感图像。

2. 基于共线方程的遥感图像纠正

共线方程纠正是建立在图像坐标与地面坐标严格数学变换关系的基础上,是对成像空间几何形态的直接描述。该方法纠正过程需要有地面高程信息(DEM),可以改正因地形起伏而引起的投影差。因此当地形起伏较大,且多项式纠正的精度不能满足要求时,要用共线方程进行纠正。

共线方程纠正时需要有数字高程信息,计算量比多项式纠正要大。同时,在动态扫描成像时,由于传感器的外方位元素是随时间变化的,因此外方位元素在扫描过程中的变化只能近似地表达,此时共线方程本身的严密性就存在问题。所以动态扫描图像的共线方程纠正与多项式纠正相比精度不会有大的提高。

SPOT 图像是扫描行上的中心投影构像方式,外方位元素随时间或扫描行而变,因此共线方程的形式为:

$$\begin{aligned} x_i = 0 &= -f \frac{a_1(X_i - X_{S_i}) + b_1(Y_i - Y_{S_i}) + c_1(Z_i - Z_{S_i})}{a_3(X_i - X_{S_i}) + b_3(Y_i - Y_{S_i}) + c_3(Z_i - Z_{S_i})} \\ y_i &= -f \frac{a_2(X_i - X_{S_i}) + b_2(Y_i - Y_{S_i}) + c_2(Z_i - Z_{S_i})}{a_3(X_i - X_{S_i}) + b_3(Y_i - Y_{S_i}) + c_3(Z_i - Z_{S_i})} \end{aligned} \quad (4-79)$$

这里 x 为飞行方向, X_i, Y_i, Z_i 为地面点 i 的地面坐标, x_i, y_i 为其相应的图像坐标, $X_{S_i}, Y_{S_i}, Z_{S_i}$ 为 l_i 行上外方位元素(即传感器地面坐标), a_i, b_i, c_i 为姿态角 $\varphi_i, \omega_i, \kappa_i$ 的函数。

虽然不同扫描行的外方位元素不同,但 SPOT 卫星运行姿态平稳,运行速度和轨迹得到严格控制,为此 l_i 的外方位元素又可以表示为时间或行的线性函数:

$$\begin{aligned}\varphi_i &= \varphi_0 + (l_i - l_0) \Delta\varphi \\ \omega_i &= \omega_0 + (l_i - l_0) \Delta\omega \\ \kappa_i &= \kappa_0 + (l_i - l_0) \Delta\kappa \\ X_i &= X_{S_0} + (l_i - l_0) \Delta X_S \\ Y_i &= Y_{S_0} + (l_i - l_0) \Delta Y_S \\ Z_i &= Z_{S_0} + (l_i - l_0) \Delta Z_S\end{aligned}\quad (4-80)$$

式中: $\varphi_0, \omega_0, \kappa_0, X_{S_0}, Y_{S_0}, Z_{S_0}$ 是图像中心行的外方位元素; l_0 是中心行号; $\Delta\varphi, \Delta\omega, \Delta\kappa, \Delta X_S, \Delta Y_S, \Delta Z_S$ 为外方位元素的变化率。对于数字图像,其像素坐标可以按照 CCD 探测元件的几何尺寸将其转化为像坐标系中的坐标。

当考虑扫描角 Ω 时,共线方程中的第二式应改写为:

$$y_i = f \frac{y \cos \Omega + f \sin \Omega}{f \cos \Omega - y \sin \Omega} \quad (4-81)$$

式中: y 为原始图像坐标。

利用上述共线方程时必须注意:地面坐标是以图像中心相应地面点为原点的切平面坐标系;原始图像必须是 1A 级图像,即未作任何几何处理的图像;共线方程式只适用于所确定的一个具有一定间距的地面格网上的点,而不是针对每一个点(这里一个点相应于图像上的一个像素);切平面坐标系朝北方向为 X 正方向,朝东方向为 Y 正方向;解算外方位元素时,因图像坐标必须变换为以图像中心为原点,故飞行方向为 x 负方向的图像坐标,将坐标单位换算为毫米。

将式(4-79)线性化,得到误差方程式:

$$\begin{aligned}V_{x_i} &= a_{11} \Delta\varphi_0 + a_{12} \Delta\omega_0 + a_{13} \Delta\kappa_0 + a_{14} \Delta X_{S_0} + a_{15} \Delta Y_{S_0} + a_{16} \Delta Z_{S_0} + \\ &\quad a_{11} \Delta x \Delta\varphi' + a_{12} \Delta x \Delta\omega' + a_{13} \Delta x \Delta\kappa' + a_{14} \Delta x \Delta X_S' + a_{15} \Delta x \Delta Y_S' + a_{16} \Delta x \Delta Z_S' - \\ &\quad a_{14} \Delta X_i - a_{15} \Delta Y_i - a_{16} \Delta Z_i - l_{x_i} \\ V_{y_i} &= b_{11} \Delta\varphi_0 + b_{12} \Delta\omega_0 + b_{13} \Delta\kappa_0 + b_{14} \Delta X_{S_0} + b_{15} \Delta Y_{S_0} + b_{16} \Delta Z_{S_0} + \\ &\quad b_{11} \Delta x \Delta\varphi' + b_{12} \Delta x \Delta\omega' + b_{13} \Delta x \Delta\kappa' + b_{14} \Delta x \Delta X_S' + b_{15} \Delta x \Delta Y_S' + b_{16} \Delta x \Delta Z_S' - \\ &\quad b_{14} \Delta X_i - b_{15} \Delta Y_i - b_{16} \Delta Z_i - l_{y_i}\end{aligned}\quad (4-82)$$

式中: $a_{1i}, b_{1i} (i=1, 2, \dots, 6)$ 为 x, y 分别对六个外方位元素的微分; (x_i) 与 (y_i) 为将各未知数当前近似值代入式(4-79)所得。 x_i 为控制点图像坐标(飞行方向),它不应为 0,除非它是中心行的坐标。上式中带有'的均为各外方位元素变化率之参量。

而 $l_{x_i} = 0 - (x_i), l_{y_i} = y_i - (y_i), \Delta x = x_i - x_0$

两类附加的误差方程:

(1) 对于控制点的误差方程:

考虑到地面点坐标有误差时,需要加入控制点的误差方程。

$$\begin{bmatrix} V_{X_i} \\ V_{Y_i} \\ V_{Z_i} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \Delta X_i \\ \Delta Y_i \\ \Delta Z_i \end{bmatrix} - \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix}, \text{权 } P_{T_i} \quad (4-83)$$

(2) 对于外方位元素及其变化率的误差方程:

由于星载 CCD 传感器飞行高度很大,视场角很小,造成共线方程的参数之间存在很强的相关性,如 X_{S_0} 与 φ_0 , Y_{S_0} 与 ω_0 ,从而导致误差方程系数矩阵的列向量之间有近似的线性关系。导致解的不稳定性。为保证在定向参数高度相关的情况下解的稳定性,其中一个措施是对定向参数有必要引进伪观测值。把这些伪观测值作为带权观测值,有伪观测值的误差方程:

$$\begin{bmatrix} V_{\varphi_0} \\ V_{\omega_0} \\ \vdots \\ V_{Z_S} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \Delta\varphi \\ \Delta\omega \\ \vdots \\ \Delta Z_S \end{bmatrix} - \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ \vdots \\ 0 \end{bmatrix}, \text{权 } P_{S_i} \quad (4-84)$$

由此得到总的误差方程,其矩阵形式为:

$$\begin{aligned} V_{xy} &= A_1 X_1 + A_2 X_2 + A_3 X_3 - L_{xy}, P_{xy} \\ V_{XYZ} &= B_1 X_2 - 0, P_{T_i} \\ V_S &= B_2 X_1 - 0, P_{S_i} \end{aligned} \quad (4-85)$$

式中: X_1 为定向参数, X_2 为控制点的坐标改正数, X_3 为未知地面点的坐标改正数。

总的误差方程矩阵形式为:

$$V = AX - L, \text{权 } P \quad (4-86)$$

由此可以求得相应的参数:

$$X = (A^T P A)^{-1} C^T P L \quad (4-87)$$

3. 基于有理函数的遥感图像纠正

1) 最小二乘求解 RFM 参数算法

将式(4-25)变形为:

$$\begin{aligned} F_X &= \text{Num}_S(P, L, H) - X \cdot \text{Den}_S(P, L, H) = 0 \\ F_Y &= \text{Num}_L(P, L, H) - Y \cdot \text{Den}_L(P, L, H) = 0 \end{aligned} \quad (4-88)$$

则误差方程为:

$$V = Bx - l, \quad W \quad (4-89)$$

式中:

$$\begin{aligned} B &= \begin{bmatrix} \frac{\partial F_X}{\partial a_i} & \frac{\partial F_X}{\partial b_j} & \frac{\partial F_X}{\partial c_i} & \frac{\partial F_X}{\partial d_j} \\ \frac{\partial F_Y}{\partial a_i} & \frac{\partial F_Y}{\partial b_j} & \frac{\partial F_Y}{\partial c_i} & \frac{\partial F_Y}{\partial d_j} \end{bmatrix}, \quad (i = 1, 20, j = 2, 20) \\ l &= \begin{bmatrix} -F_X^0 \\ -F_Y^0 \end{bmatrix} \\ x &= [a_i \quad b_j \quad c_i \quad d_j]^T \end{aligned}$$

W 为权矩阵。

根据最小二乘平差原理,可以求解:

$$\mathbf{x} = (\mathbf{B}^T \mathbf{B})^{-1} \mathbf{B}^T \mathbf{l} \tag{4-90}$$

经过变形的 RFM 形式,平差的误差方程为线性模型,因此在求解 RFC 过程中不需要初值。

当用于解算 RFC 的控制点非均匀分布或模型过度参数化,RFM 中分母的变化非常剧烈,这样就导致设计矩阵 $(\mathbf{B}^T \mathbf{B})$ 的状态变差,设计矩阵变为奇异矩阵,导致最小二乘平差不能收敛。为了克服最小二乘估计的缺点,可用岭估计的方式获得有偏的符合精度要求的计算结果。

2) 与地形无关的最小二乘法求解 RFC

RFM 参数求解有与地形无关和与地形相关两种求解方式。在严格成像模型已知的情
况下,采用与地形无关的求解方式,否则采用与地形相关的求解方式,该方式需要给定一定
数目的控制点。

当严格成像模型参数已知,用严格成像模型建立地面点的立体空间格网和影像面之间的
对应关系作为控制点来求解 RFC,该方法求解 RFC 而不需要详细的地面控制信息,仅仅
需要该影像覆盖地区的最大高程和最小高程,因此称之为与地形无关的方法。

其流程如图 4-27 所示,包含如下步骤:

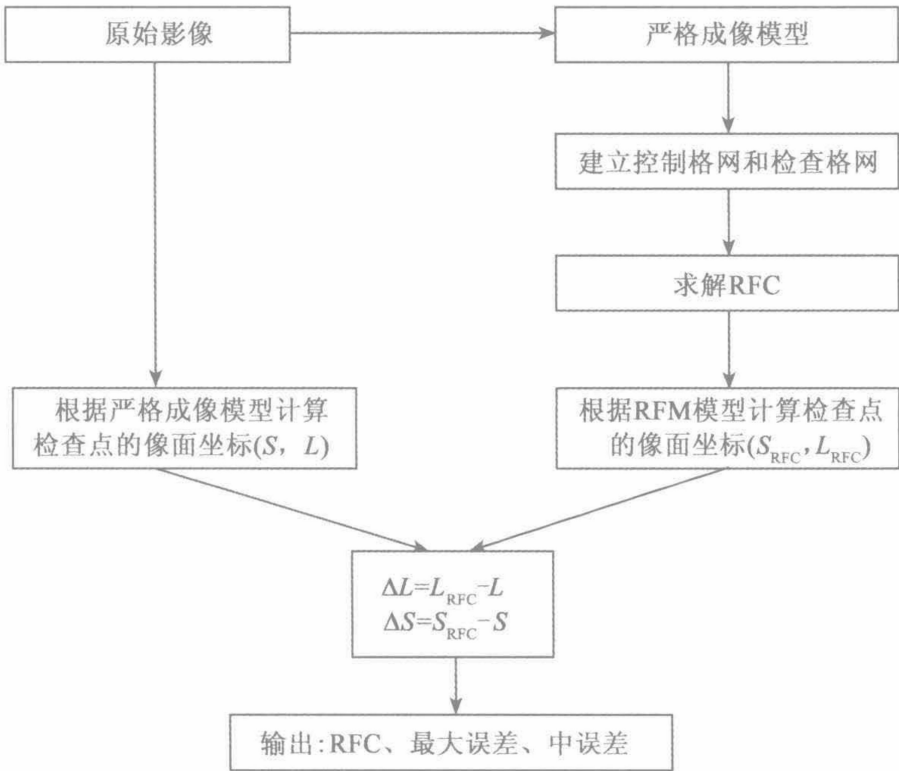


图 4-27 求解 RFC 流程以及精度分析

(1) 建立空间格网

由严格成像模型的正变换,计算影像的四个角点对应的地面范围;根据美国地质调查局

提供的全球 1km 分辨率 DEM(Global 30-arc-second Digital Elevation Model), 计算该地区的最大及最小椭球高。然后, 在高程方向以一定的间隔分层, 在平面上, 以一定的格网大小建立地面规则格网(如平面分为 15×15 格网, 就是将该影像对应影像范围分成 15×15 的格子, 共有 16×16 个格网点), 生成控制点地面坐标, 最后利用严格成像模型的反变换, 计算控制点的影像坐标。为了防止设计矩阵状态恶化, 一般高程方向分层的层数超过 2, 如图 4-28 所示。

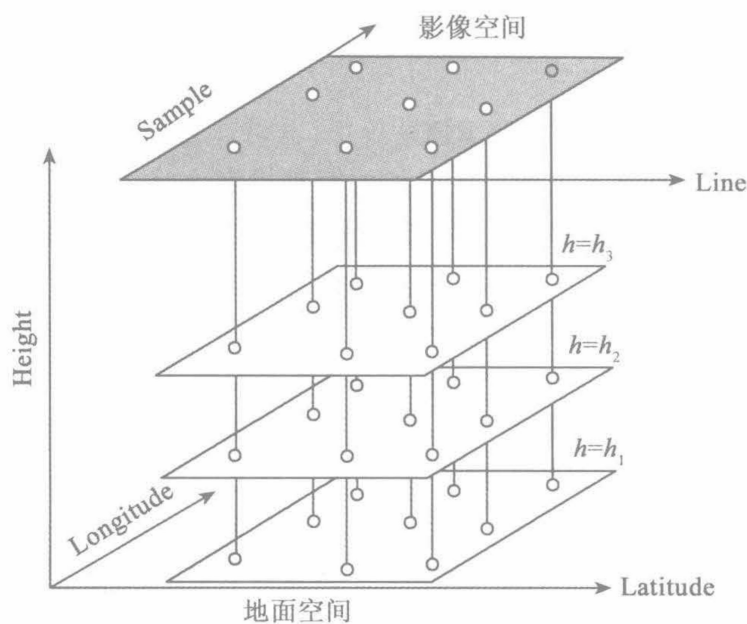


图 4-28 空间格网例图

加密控制格网和层, 建立独立检查点。然后利用控制点坐标用公式(4-91)、(4-92)计算影像坐标和地面坐标的正则化参数, 由公式(4-26)和公式(4-27)将控制点和检查点坐标正则化。

$$\begin{aligned}
 \text{LAT_OFF} &= \frac{\sum \text{Latitude}}{n} \\
 \text{LONG_OFF} &= \frac{\sum \text{Longitude}}{n} \\
 \text{HEIGHT_OFF} &= \frac{\sum \text{Height}}{n} \\
 \text{LINE_OFF} &= \frac{\sum \text{Line}}{n} \\
 \text{SAMP_OFF} &= \frac{\sum \text{Sample}}{n}
 \end{aligned} \tag{4-91}$$

式中:

$$\text{LAT_SCALE} = \max(|\text{Latitude}_{\max} - \text{LAT_OFF}|, |\text{Latitude}_{\min} - \text{LAT_OFF}|)$$

$$\text{LONG_SCALE} = \max(|\text{Longitude}_{\max} - \text{LONG_OFF}|, |\text{Longitude}_{\min} - \text{LONG_OFF}|)$$

$$\begin{aligned}
\text{HEIGHT_SCALE} &= \max(|\text{Height}_{\max} - \text{HEIGHT_OFF}|, |\text{Height}_{\min} - \text{HEIGHT_OFF}|) \\
\text{LINE_SCALE} &= \max(|\text{Line}_{\max} - \text{LINE_OFF}|, |\text{Line}_{\min} - \text{LINE_OFF}|) \\
\text{SAMP_SCALE} &= \max(|\text{Sample}_{\max} - \text{SAMP_OFF}|, |\text{Sample}_{\min} - \text{SAMP_OFF}|)
\end{aligned}
\tag{4-92}$$

(2) RFC 解算

利用控制点来估计 $\text{RFC}(a_i, b_j, c_i, d_j)$ 。

(3) 精度检查

用求解的 RFC 来计算检查点对应的影像坐标,通过由严格成像模型计算的检查点影像坐标的差值来评定求解 RFC 参数的精度。

3) 与地形相关的方案最小二乘法求解 RFC

如果没有严格传感器模型的定向参数,为了解算 RFM 的未知系数,必须通过从地图上量测或者野外实测的方式获取若干真实的地面控制点。在这种情况下,解决完全决定于实际的地形起伏以及控制点的数量与分布,因此这种方法与地形严格有关。当传感器的模型过于复杂很难建立或者精度要求不是很高的时候,这种方法已经被广泛地应用于摄影测量与遥感领域。由于高阶 RFM 需要的控制点比较多,故当控制点数目不足时,可视当地地形变化程度,考虑仅使用 RFM 的二阶形式。

4) 利用 RFM 进行卫星遥感影像的几何纠正

(1) 利用控制点提高 RFM 精度

可采用两种方式利用控制点提高 RFM 的精度,一种方式是利用控制点直接对 RFC 进行校正,该方法需要使用大量的控制点来解求 RFM 中的 80 个参数,且参数间可能存在相关性,使求解比较困难;另外一种方式是通过少量的地面控制点来计算影像的变换参数,而不校正 RFC,该方法需要求解像点的量测坐标与利用 RFM 计算影像坐标之间的变换关系,使用少量的控制点就足够了。

分析卫星系统参数对影像几何纠正精度的影响,需要改正两类误差:一类参数纠正行方向的误差;一类参数纠正列方向的误差。其中行参数吸收轨道、姿态在行方向上的影响,列参数吸收轨道、姿态在列方向上的影响,因此可以采用定义在影像面的仿射变换来校正此类误差。

在影像上定义仿射变换:

$$\begin{aligned}
y &= e_0 + e_1 \cdot \text{Sample} + e_2 \cdot \text{Line} \\
x &= f_0 + f_1 \cdot \text{Sample} + f_2 \cdot \text{Line}
\end{aligned}
\tag{4-93}$$

式中: (x, y) 是控制点在影像上的量测坐标。

根据公式(4-93)可以对每个控制点列出如下线性方程,根据最小二乘平差求解影像面的仿射变换参数,完成利用控制点提高 RFM 的精度。

$$\begin{aligned}
v_x &= \left(\frac{\partial x}{\partial e_0} \cdot \Delta e_0 + \frac{\partial x}{\partial e_1} \cdot \Delta e_1 + \frac{\partial x}{\partial e_2} \cdot \Delta e_2 + \frac{\partial x}{\partial f_0} \cdot \Delta f_0 + \frac{\partial x}{\partial f_1} \cdot \Delta f_1 + \frac{\partial x}{\partial f_2} \cdot \Delta f_2 \right) + F_{x_0} \\
v_y &= \left(\frac{\partial y}{\partial e_0} \cdot \Delta e_0 + \frac{\partial y}{\partial e_1} \cdot \Delta e_1 + \frac{\partial y}{\partial e_2} \cdot \Delta e_2 + \frac{\partial y}{\partial f_0} \cdot \Delta f_0 + \frac{\partial y}{\partial f_1} \cdot \Delta f_1 + \frac{\partial y}{\partial f_2} \cdot \Delta f_2 \right) + F_{y_0}
\end{aligned}
\tag{4-94}$$

在缺少控制点(控制点小于 3 个)条件下,为了获得较好的精度,待求解的仿射变换参数

需要分析。根据严格成像模型求解的 RFC 的精度和严格成像模型的精度一致,如果仅有 1 个控制点,求解偏移参数 e_0 和 f_0 来消除平移误差;而单线阵推扫式卫星遥感影像在行方向 (CCD 线阵) 的变形比列方向 (卫星运动方向) 的变形小,当有两个控制点,求解平移参数 (e_0 和 f_0) 和 Line 方向的系数 (e_2 和 f_2) 可以获得较高的精度。

(2) 运用 RFM 行正反变换

与利用严格成像模型对高分辨率卫星遥感影像进行纠正一样,基于 RFM 的影像几何纠正同样需要正反变换。

① 正变换

分析式(4-25)的 RFM,为了进行正变换,像点坐标可通过像片量测获得,像点坐标对应的高程可人工给定。为求解像点的地面坐标,该公式中所要解求的未知数仅为地面点坐标,也就是两个方程求解两个未知数。但是 RFM 模型对地面点的正则化坐标 (P, L) 为非线性方程,所以需要将其线性化,然后利用最小二乘迭代的方式获得其准确的地面正则化坐标。

基于 RFM 模型的影像纠正正变换的步骤为:

- a. 根据公式(4-93),将图像量测坐标 (x, y) 变换为 (Line, Sample);
- b. 根据公式(4-26)、(4-27)将 (Line, Sample) 和该点高程正则化,并假定 P 和 L 的初值为 0;
- c. 根据公式(4-89)组建误差方程;
- d. 由公式(4-90)迭代求解 P 和 L ;
- e. 由公式(4-26)求解该点的经纬度;
- f. 将该点投影到一定的投影系统中获取其平面坐标。

② 反变换:

RFM 的反变换比较简单,具体流程为:

- a. 将平面坐标和该点高程变换为 WGS84 下的经纬度和椭球高;
- b. 根据公式(4-26),将地面坐标正则化;
- c. 由公式(4-25),计算像点的正则化坐标 X, Y ;
- d. 由公式(4-27),计算像点的 (Line, Sample);
- e. 由公式(4-93),将 (Line, Sample) 变换为 (x, y)。

4. 基于自动配准的小面元微分纠正

遥感图像配准融合系统软件 CyberLand 采用图像配准方法:采用遥感图像间相互校正的大面元微分纠正,在其基础上又提出了小面元微分纠正算法。该算法利用了摄影测量中图像匹配的研究成果,即图像特征提取与基于松弛法的整体图像匹配,全自动地获取密集同名点对作为控制点,由密集同名点对构成密集三角网(小面元),利用小三角形面元进行微分纠正,实现图像精确配准。特点是可在两个任意图像上快速匹配出密集、均匀分布的数万个乃至数十万个同名点。通过小面元微分纠正,实现不同遥感图像间的精确相对纠正,检测中误差一般不超过 1.5 个像素。可以解决山区因图像融合后出现的图像模糊与重影问题,同时适用于平坦地区和丘陵地区图像的配准。

小面元微分纠正的算法如下:

1) 图像特征点提取

将目标图像中的明显点提取出来作为配准的控制点。这些点特征的提取是利用兴趣算子提取的。

2) 预处理

不同的遥感图像间存在着平面位置、方位与比例的差异,因而需要对其进行平移、旋转与缩放等预处理,以便于图像匹配。当图像的差异较大时,需要人工选取一到三对同名点的概略位置,根据这些同名点解算图像间概略的平移、旋转与缩放等预处理参数。

通过预处理可以使低分辨率图像的比例尺和方位与目标图像基本接近,使图像匹配容易进行。

3) 粗匹配

以特征点为中心,取一矩形窗口作为目标窗口。根据先验知识的预测,从图像中取一较大的矩形窗口作为搜索窗口。将目标窗口的灰度矩阵和搜索窗口中等大的子窗口灰度矩阵进行比较。其中最相似的子窗口的中心为该特征点的同名点。

粗匹配的结果将被作为控制,用于后续的精匹配,因此具有较高的可靠性,其分布应尽量均匀。为了检测其粗差,可对同名点的位置之差进行多项式拟合,将拟合残差大的点剔除。为了提高可靠性,可以用由粗到细的匹配策略,特征提取与粗匹配按分层多级图像金字塔结构进行。

4) 几何条件约束的整体松弛匹配

(1) 改正地面坡度产生的畸变

地面坡度产生不同的畸变是图像间最重要的差别。粗匹配的方法是以特征点为窗口的中心。这种中心窗口模式不考虑上述差别,因而不能解决地面坡度产生不同畸变的问题。改变这个中心模式的窗口为边缘模式的窗口,即以两相邻的特征作为左右两边构成窗口。在评价相似性之前,先将搜索子窗口重采样,使其与目标窗口等大,然后再评价其相似性,这样可以克服坡度引起的畸变差对匹配的不利影响。

(2) 几何约束条件

大部分地表是连续光滑的,因此在匹配的过程中应先考虑连续光滑的几何约束条件。包括:第一,目标点的顺序与其同名点的顺序应相当,不应当有逆序;第二,同名点的左右横坐标差不应有突变,有突变者,一般粗差应剔除;第三,同名点的左右横坐标应当相差不大,它们离一拟合曲面的距离不大。

(3) 整体松弛匹配

传统的图像匹配是孤立的单点匹配,它以相似性测度最大或最小为评价标准,取该测度为其唯一的结果,它不考虑周围点的匹配结果的一致性。由于图像变形的复杂性,相似性测度最大者有时不是对应的同名点。根据相关分析,互相关是一多峰值函数,其最大值不一定对应着同名点,而非峰值则有可能是同名点,因此同名点的判定必须借助其邻近的点,且它们的影响是相互的。利用整体松弛匹配法能较好地解决这个问题。

根据模式识别理论,设有目标集合 $O = \{O_1, O_2, \dots, O_n\}$ 与类别集合 $C = \{C_1, C_2, \dots, C_n\}$, 其中目标图像的像素 i 为目标 O_i , 从图像上对应的像素 j 为类别 C_j , 而图像匹配就是要解决 $O_i \in C_j$ 是否成立的问题。

为提高其可靠性,必须考虑结果的全局一致性,即分类结果是否互相协调一致。设 O_i 与 O_j 的相关系数为 $\rho(i, j)$, 并将其换算为 $O_i \in C_j$ 的概率 P_{ij} , O_h 为与 O_i 相邻的像素, C_k 为与 C_j 相邻的像素。利用概率松弛法必须引入 $O_i \in C_j$ 与 $O_h \in C_k$ 的相容系数 $C(i, j; h, k)$, 可将其定义为目标图像中的区间 $[i, h]$ 和从图像中的区间 $[i, j]$ 的相关系数 $\rho(ih, jk)$, 即:

$$C(i, j; h, k) \propto \rho(ih, jk)$$

一旦确定了 P_{ij} 和 $C(i, j; h, k)$, 就可根据下列公式进行松弛迭代运算:

$$\begin{aligned} Q(i, j) &= \sum_{h=1}^{n(H)} \left(\sum_{k=1}^{m(K)} C(i, j; h, k) \cdot P(i, j) \right) \\ P^{(r)}(i, j) &= P^{(r-1)}(i, j) \cdot (1 + B \cdot Q(i, j)) \\ P^{(r)}(i, j) &= \frac{P^{(r)}(i, j)}{\sum_{j=1}^{m(J)} P^{(r)}(i, j)} \end{aligned} \quad (4-95)$$

式中: $n(H)$ 为相邻目标点的个数; $m(K)$ 和 $m(J)$ 为从图像匹配候选点的个数; r 为迭代次数。如果 $P^{(r)} > T$ (T 为事先给定阈值), 则停止迭代, 并确定可靠的对应点。此外, 图像的金字塔数据结构应用于这个匹配过程, 以进一步提高数据处理的速度和配准的可靠性。

5) 小面元微分纠正

由以上方法, 在一幅图像中, 通常可以提取数万至数十万对同名点, 这些点分布在山脊、山谷等特征线上, 或者它们本身就是明显的特征点。将其构成相互对应的三角网。因为点数多, 所以三角网的三角形面积都较小。对三角网的每一对三角形, 设为 $\triangle P_1 P_2 P_3$ 和 $\triangle P'_1 P'_2 P'_3$, 利用其三顶点的对应坐标 (x_i, y_i) , (x'_i, y'_i) , $i=1, 2, 3$, 解求仿射变换:

$$\begin{aligned} x' &= a_0 + a_1 x + a_2 y \\ y' &= b_0 + b_1 x + b_2 y \end{aligned} \quad (4-96)$$

求得式(4-96)中的系数 $a_0, a_1, a_2, b_0, b_1, b_2$ 。然后按式(4-96), 将待纠正图像上的三角形 $P'_1 P'_2 P'_3$ 纠正成与目标图像对应的三角形 $P_1 P_2 P_3$ 。

该方法所用的控制点沿图像特征密集分布, 对不同的遥感图像间的几何变形进行了精确的相对纠正, 因而能很好地解决山区遥感图像的纠正问题。

5. 加入高差改正的 CCD 线阵影像的多项式纠正

多项式纠正对地面相对平坦的地区具有足够好的纠正精度, 计算方便, 应用广泛。但对地形起伏较大的地区, 尤其当传感器的倾斜角较大时, 效果就不明显, 甚至不能用多项式来进行纠正。采用多项式纠正时要引入纠正地区的高程信息, 即引入投影差改正的多项式纠正法。其基本思想是先改正因地形引起的变形, 然后用一般多项式来拟合, 改正其他的变形。重采样时则相反, 先根据多项式参数求得未受高差影响的像点坐标, 然后加上投影差, 从而获得真实的像点坐标。

1) 高差引起的投影差计算

当传感器有固定的旁向倾斜角 α 时, 如图 4-29 所示, S 为传感器投影中心, N 为底点, O 为像主点, 地面点 A 的像为 a , A 在基准面上的正射投影 A_0 的像为 a_0 , 则 aa_0 就是由高差引起的投影差 δ_h , 当以像底点 n 为像坐标原点时, 设 $na = r$, $SN = H$, 作如图辅助线 $a_0 a' // AA_0$, $a_0 k // A_0 N$, 分别交 SA 和 SN 于 a' 、 k 。根据三角形的关系可以得到如下关系:

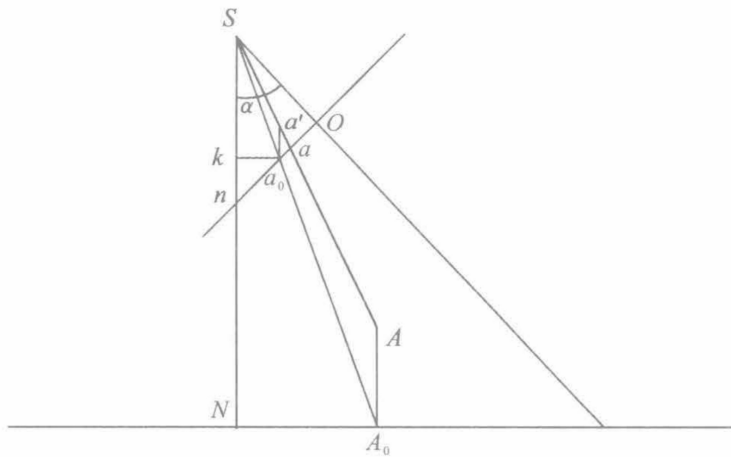


图 4-29 高差引起的投影差

由
$$\frac{\delta_h}{a_0 a'} = \frac{an}{Sn} = \frac{r}{f \sec \theta}$$

得
$$\delta_h = \frac{a_0 a' r}{f \sec \theta}$$

由
$$\frac{a_0 a'}{h} = \frac{Sa_0}{SA_0} = \frac{Sk}{SN} = \frac{Sn - nk}{H}$$

得
$$a_0 a' = \frac{h}{H} (Sn - nk) = \frac{h}{H} (f \sec \theta - nk)$$

而
$$nk = a_0 n \cos(90^\circ - \alpha) = (r - \delta_h) \sin \alpha$$

由上述公式可以得到 δ_h :

$$\delta_h = \frac{rh}{H} \frac{1 - \left(\frac{r}{2f}\right) \sin 2\alpha}{1 - \left(\frac{rh}{2fH}\right) \sin 2\alpha} \quad (4-97)$$

当 y 表示以 O 为原点的像点坐标时,则有:

$$r = y + f \tan \alpha$$

δ_h 中的一 $rh \sin 2\alpha / (2fH)$ 对 δ_h 的影响很小,可以忽略不计(以 SPOT 为例,当 $f = 1.082\text{m}$, $H = 830\text{km}$, $x \leq 3000 \times 13 \times 10^{-6}\text{m}$, $|\alpha| < 45^\circ$, $|h| < 1000\text{m}$ 时,该值为 6.24×10^{-4} 。)

得到高差引起的投影差的近似公式:

$$\delta_h = \frac{rh}{H} \left(1 - \frac{r \sin 2\alpha}{2f}\right) \quad (4-98)$$

2) 倾斜角 α 较大时的改进

当 α 较大时,地面点离 N 就很远,此时地球曲率对投影差的影响很大,需要考虑纠正。地球曲率对投影差的影响可以通过修正倾斜角和航高来加以改善。

如图 4-30 所示,将地球水准面视为半径为 R 的球

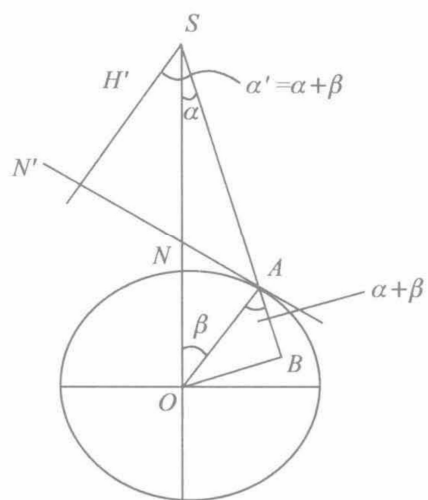


图 4-30 倾角和航高的修正

体, A 为像主点对应的地面点在水准面上的投影, N 为地底点, 记 $\angle AOS$ 为 β , 在面 AOS 内, 过 A 作球 O 的切线 AN' , 过 S 作 $SN' \perp AN'$, 垂足为 N' , 以 N' 为修正后的地底点, 则修正后的航高为 H' , 修正后的倾斜角为 α' 。

作 $OB \perp SA$, 垂足为 B , 因为 $SN' \parallel AO$, 所以有:

$$\begin{aligned}\alpha' &= \alpha + \beta \\ \angle BAO &= \alpha' \\ \alpha' &= \arcsin \left[\frac{(R+H)\sin\alpha}{r} \right] \\ H' &= \frac{R\sin\beta\cos(\alpha+\beta)}{\sin\alpha}\end{aligned}$$

用修正后的 α' , H' 分别代替式(4-98)中的 α 和 H , 即可得到修正后的投影差修正公式。

当倾斜角 α 已知时可以把像点改正 δ_h 加入多项式中一起平差计算, 方法与一般多项式纠正相同。当倾斜角 α 未知时, 就要把倾斜角作为多项式系数一起按未知数求解。

设像点坐标为 (x, y) , 对应地面点坐标为 (X, Y, h) , 则多项式可写为

$$\begin{aligned}x &= a_0 + a_1X + a_2Y + a_3X^2 + a_4XY + a_5Y^2 \\ y - \delta_h &= b_0 + b_1X + b_2Y + b_3X^2 + b_4XY + b_5Y^2\end{aligned}\quad (4-99)$$

从式(4-99)可以看出, 对 x 的拟合与一般多项式相同, 对 y 的拟合与一般多项式不同, 由于 y 是 α 的非线性函数, 要对其进行微分, 再建立误差方程式:

$$d\delta_h = \frac{\left[f - y\tan\alpha - \left(\frac{y}{f} + \tan\alpha \right) (y\cos 2\alpha + f\sin 2\alpha) \right] h d\alpha}{H}$$

令

$$Fy = b_0 + b_1X + b_2Y + b_3X^2 + b_4XY + b_5Y^2 - (y - \delta_h)$$

则

$$dFy = db_0 + Xdb_1 + Ydb_2 + X^2db_3 + XYdb_4 + Y^2db_5 + Kd\alpha$$

其中:

$$K = \frac{\left[f - y\tan\alpha - \left(\frac{y}{f} + \tan\alpha \right) (y\cos 2\alpha + f\sin 2\alpha) \right] h}{H}$$

每个控制点可以列出相应的误差方程式, 按照最小二乘平差原理求解多项式系数。

求得多项式系数后, 则可根据式(4-99)求得任意地面点 (X, Y) 的不带投影差的像点坐标, 再根据该地面点的高程和图像倾角、航高求得投影差, 就可求得地面点对应像点的实际坐标。

4.3.3 侧视雷达图像的几何纠正

雷达图像几何纠正是在粗校正图像的基础上, 消除由地形引起的几何位置的误差, 生成地理编码的正射图像。对于 SAR 图像, 由地形引起的几何位置误差要比摄影类型成像的图像严重, 在相同观测角的条件下, 高程引起的 SAR 图像几何位置的误差是 SPOT 卫星图像的 4~5 倍, 对于高差在 400~500m 的地形, 高程引起的视差将是主要的误差, 而在同等条件下的 Landsat 和 SPOT 图像的误差主要是由系统误差引起的。这些几何畸变将引起与地形相关的当地入射角和距离压缩的变化, 从而引起 SAR 图像的辐射变化。

目前 SAR 图像几何校正方法可分为两类:

- (1) 由常规摄影测量的共线方程定向方法转化而来的;
- (2) 根据 SAR 本身的构像几何特点进行的纠正。

在第一类方法中有以下几种纠正方法:

- (1) Leberl 构像模型,该模型比较简单,也是最常用的一种构像模型;
- (2) Konecny 等提出的平距显示的雷达图像的数学模型和斜距显示的雷达图像的数学模型,其公式形式与摄影测量中常用的共线方程类似,便于应用;
- (3) 美国工程兵研究所采用的侧视雷达测图模型;
- (4) 苏联采用的数学模型,该模型理论上较严密,不仅适合于合成孔径雷达图像,也适合于真实孔径雷达图像,但其数学模型复杂;
- (5) 把雷达图像视为线阵列 CCD 扫描图像,故直接采用行中心投影的数学模型。

基于 Leberl 构像模型的纠正基本思想如下:

Leberl 构像模型是国际著名摄影测量学者 Leberl 提出的,该模型是根据雷达图像像点的距离条件和零多普勒条件来表达雷达图像瞬间构像的数学模型,它描述了 SAR 图像坐标与相应地面点坐标之间的严密几何关系。

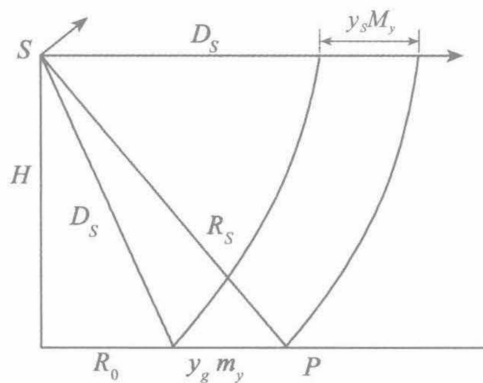
1) 距离条件

如图 4-31 所示, D_s 为扫描延迟, R_s 为天线中心 S 到地面点 P 的斜距, H 为天线中心 S 到数据归化平面(基准面)的航高, y_s 为地面点 P 在斜距显示图像上的距离向像坐标, y_g 为地面点 P 在地距显示图像上的距离向像坐标, R_0 为扫描延迟在数据归化平面上的投影, M_y 为斜距显示图像的距离向像元分辨率, m_y 为平距显示图像的距离向像元分辨率。

对于斜距显示图像有:

$$(X - X_s)^2 + (Y - Y_s)^2 + (Z - Z_s)^2 = (y_s M_y + D_s)^2 \quad (4-100)$$

图 4-31 距离条件



式中: (X, Y, Z) 为地面点 P 的物方空间坐标, (X_s, Y_s, Z_s) 为天线中心瞬时位置 S 的物方空间坐标。当卫星在轨道空间运行时,其姿态受到很多因素的影响,故把其轨迹考虑成飞行时间 T 的多项式函数,即轨道时间多项式,可表示为:

$$\begin{aligned} X_s &= X_{s_0} + \dot{X}_{s_0} T + \ddot{X}_{s_0} T^2 + \dots \\ Y_s &= Y_{s_0} + \dot{Y}_{s_0} T + \ddot{Y}_{s_0} T^2 + \dots \\ Z_s &= Z_{s_0} + \dot{Z}_{s_0} T + \ddot{Z}_{s_0} T^2 + \dots \\ T &= m_x \cdot x \end{aligned} \quad (4-101)$$

式中: $X_{s_0}, Y_{s_0}, Z_{s_0}$ 为对应于像坐标原点的雷达天线中心瞬时物方空间坐标, $\dot{X}_{s_0}, \dot{Y}_{s_0}, \dot{Z}_{s_0}$ 为飞行器对应于像坐标原点的速度矢量的分量(外方位元素的一阶变率), $\ddot{X}_{s_0}, \ddot{Y}_{s_0}, \ddot{Z}_{s_0}$ 为飞

行器对应于像坐标原点的加速度矢量的分量(外方位元素的二阶变率)…… T 为像坐标 x 相对于原点时刻的飞行时间, x 为雷达图像的方位向像平面坐标, m_x 为平距显示图像的方位向像元分辨率。

设任意时刻天线中心的速度矢量为 (X_v, Y_v, Z_v) ,由式(4-101)可得:

$$\begin{aligned} X_v &= \frac{\partial X_s}{\partial T} = \dot{X}_{s_0} + 2\ddot{X}_{s_0}T + \dots \\ Y_v &= \frac{\partial Y_s}{\partial T} = \dot{Y}_{s_0} + 2\ddot{Y}_{s_0}T + \dots \\ Z_v &= \frac{\partial Z_s}{\partial T} = \dot{Z}_{s_0} + 2\ddot{Z}_{s_0}T + \dots \end{aligned} \quad (4-102)$$

同理,对于平距显示图像有:

$$(X - X_s)^2 + (Y - Y_s)^2 + (Z - Z_s)^2 = (y_s m_y + R_0)^2 + H^2 \quad (4-103)$$

2) 零多普勒条件

由于卫星飞行速度矢量与天线至地面点矢量保持垂直,此时多普勒频移为零,故称零多普勒条件,用公式表示为:

$$\dot{X}_s(X - X_s) + \dot{Y}_s(Y - Y_s) + \dot{Z}_s(Z - Z_s) = 0 \quad (4-104)$$

当轨道时间多项式选用二次方程时,构像方程中共有 $X_{s_0}, Y_{s_0}, Z_{s_0}, \dot{X}_{s_0}, \dot{Y}_{s_0}, \dot{Z}_{s_0}, \ddot{X}_{s_0}, \ddot{Y}_{s_0}, \ddot{Z}_{s_0}, D_s, m_x, M_y$ (或 m_y)12个定向参数,至少需要6个已知地面控制点进行解答。通常, D_s, m_x, M_y (或 m_y)3个参数能够由雷达的系统参数直接给定,只需解算参数 $X_{s_0}, Y_{s_0}, Z_{s_0}, \dot{X}_{s_0}, \dot{Y}_{s_0}, \dot{Z}_{s_0}, \ddot{X}_{s_0}, \ddot{Y}_{s_0}, \ddot{Z}_{s_0}$ 即可。

第二类方法是按SAR本身的构像几何特点进行的纠正,对于地面控制点容易得到的地区,则是利用SAR成像参数(如平台高角,雷达波入射角,飞行路线的方位,航迹参考点,信号的延迟等)和地面控制点来精确估计飞行路线参数,并以此为基础建立正射纠正变换公式。而对于地面控制点不易得到的地区,可利用DEM产生模拟图像,将模拟图像与原始图像配准,从而建立DEM坐标与原始图像间的变换关系。

4.4 图像间的自动配准和数字镶嵌

4.4.1 图像间的自动配准

随着遥感技术的发展,得到的遥感图像越来越多,形成了观测地球空间的图像金字塔。遥感传感器的分辨率(空间分辨率、时间分辨率、辐射分辨率和光谱分辨率)得到进一步的提高。在许多遥感图像处理中,需要对这些多源数据进行比较和分析,如进行图像的融合、变化检测、统计模式识别、三维重构和地图修正等,都要求多源图像间必须保证在几何上是相互配准的。这些多源图像包括不同时间同一地区的图像,不同传感器同一地区的图像以及不同时段段的图像等,它们一般存在相对的几何差异和辐射差异。

图像配准的实质就是前述的遥感图像的几何纠正,根据图像的几何畸变特点,采用一种