

第9章 大区域高分辨率光学卫星遥感 影像镶嵌理论与方法

9.1 引言

对于高分辨率卫星影像而言，生成大区域的镶嵌影像，需要消除多景影像之间存在的不同程度的辐射差异，并尽可能保持典型地物目标的完整性，其中相对辐射校正(relative radiometric calibration)和接缝线生成是两个最关键的处理环节。

相对辐射校正，也称相对辐射归一化(relative radiometric normalization)，是先选定参考影像，然后将其他影像的灰度值逐波段地归一化到参考影像上，使多时相影像具有相同的辐射尺度，不需要大量的卫星同步观测数据和大气属性信息，因此得到了广泛关注。大量文献分别研究了针对镶嵌、变化检测、分类等应用的相对辐射归一化方法，多数方法均是基于线性模型的方法(Schottet al., 1988; Yuan and Elvidge, 1996; Du et al., 2001; Canty and Nielsen, 2008; Hong and Zhang, 2008)，通过影像间重叠区域的像元对或者从中选取的像素样本采用一定的统计方法得出影像间的线性关系，然后对影像进行处理，从而达到辐射归一化的目的。但大部分方法只考虑了两幅影像的情况，由于在计算影像间的线性关系时存在一定误差与不确定性(Guindon, 1997)，当对大区域影像进行处理时，辐射归一化的效果不仅与处理顺序有关，且受误差累积影响较大。为了解决误差累积问题，近年来一些学者在对航空影像处理时，采用了平差的方法(孙明伟, 2009; Paparoditis et al., 2006; Chandelier and Martinoty, 2009; González-Piqueras et al., 2010; López et al., 2011)，但航空影像情况较为简单，获取时间相近，不存在时相差异，且处理区域在空间上较为有限，地物类别相对一致。

接缝线是在影像重叠区按一定规则确定的镶嵌线，其主要目的是确保镶嵌影像中地物目标的完整性。目前接缝线生成方法通常采用一定的测度计算重叠区域的差异，然后采用一定的搜索策略选择一条差异最小的路径作为镶嵌线(Fernandez et al., 1998; Kerschner, 2001; 孙明伟, 2009; 张剑清等, 2009; Chon et al., 2010; Yu et al., 2012; Pan et al., 2015; 袁胜古等, 2015; 袁修孝等, 2015)；或者利用影像分割等使接缝线尽可能的沿着明显地物的边界，用地物的边界“掩盖”镶嵌时可能出现的接缝(Soille, 2006)；或者基于道路矢量、DSM等辅助数据(左志权等, 2011; Wan et al., 2013; Chen et al., 2014)对城市区域镶嵌时接缝线的走向进行优化。这些方法多数只关注两幅影像的情况，直接利用这些方法进行镶嵌时，则需要采用两两镶嵌的方法，存在中间结果，且结果依赖处理顺序。为了避免这些缺点，一些学者在航空影像的镶嵌处理中，提出了接缝线网络的生成与优化方法(Mills and McLeod, 2013; Pan et al., 2009, 2014; Chen et al., 2014; Li et al., 2016)，可从整体上确定各影像的有效镶嵌范围，优化接缝线的走向。

本章主要针对大区域高分辨率卫星影像镶嵌理论与方法展开论述，主要涉及大区域

整体相对辐射校正、基于顾及重叠的面 Voronoi 图的接缝线网络生成、接缝线网络优化、基于接缝线网络的影像镶嵌等，并进行了实验验证。其中大区域整体相对辐射校正是一种相对辐射归一化方法，其主要目的是消除多景影像之间存在的不同程度的辐射差异；基于顾及重叠的面 Voronoi 图的接缝线网络生成、接缝线网络优化以及基于接缝线网络的影像镶嵌主要是为了从整体上优化各条接缝线的走向，尽可能避免穿越典型地物目标，保持典型地物目标的完整性，并使最终镶嵌影像沿接缝线过渡平滑，尽可能消除明显的接缝现象。

9.2 大区域整体相对辐射校正

大区域整体相对辐射校正是为了消除多景影像之间存在的不同程度的辐射差异，这也是进行高分辨率卫星影像镶嵌需要首先解决的问题。多景影像存在的不同程度的辐射差异表现为亮度、色彩等差异，造成这些差异的因素主要有：

- (1) 成像角度存在差异；
- (2) 成像时间存在差异，从而地物发生变化，特别是高分辨率卫星通常覆盖周期也较长，覆盖大区域范围时，通常影像间的时相差异也较大；
- (3) 天气、光照条件、大气状况等不同；
- (4) 相机参数设置不同；
- (5) 不同景成像时传感器响应存在差异。

除上述因素之外，大区域范围内，地物类型多样，云覆盖的情况各不相同，也给大区域多景影像的整体相对辐射校正带来了极大的困难，进而影响镶嵌影像的质量。另外，大区域范围涉及的影像较多，处理误差的累积也是影响处理效果的一个因素。

高分辨率卫星影像的大区域整体相对辐射校正主要采用线性模型来进行整体处理。对于影像间的关系以及大范围的处理，线性模型可以从整体上同时考虑区域范围内的所有影像，处理的结果不依赖于影像的顺序。为了保证处理的精度，尽可能消除误差的累积，本书在影像间的重叠区域采用迭代加权多元变化检测 (iteratively re-weighted multivariate alteration detection, IR-MAD) 方法选取像素样本，依据选取的像素样本采用基于正交回归来确定影像间的线性关系，然后根据影像间的邻接关系，基于最短路径算法确定影像间关系的传递路径，将区域范围内的所有影像纳入到统一的基准下进行处理。

9.2.1 基于线性模型的整体处理

当只进行两幅影像的处理时，假设以影像 1 为参考对影像 2 进行处理，则依据重叠区域得到的影像 1 和影像 2 之间的线性关系可以表示为

$$S_1 = S_2 \times \text{gain}(2)_1 + \text{offset}(2)_1 \quad (9-1)$$

式中， S_1 和 S_2 分别为影像 1 和影像 2； $\text{gain}(2)_1$ 和 $\text{offset}(2)_1$ 分别为基于重叠区计算得到的以影像 1 为参考的线性关系的乘性系数和加性系数。

如果区域范围内具有 n 幅影像时，如图 9-1 所示，设影像 1 到影像 n 依次相互重叠，

显然，对于任意两幅相邻影像 $m-1$ 和 m ，以影像 $m-1$ 为参考则两幅影像间的线性关系可表示为

$$S_{m-1} = S_m \times \text{gain}(m)_{m-1} + \text{offset}(m)_{m-1} \quad (9-2)$$

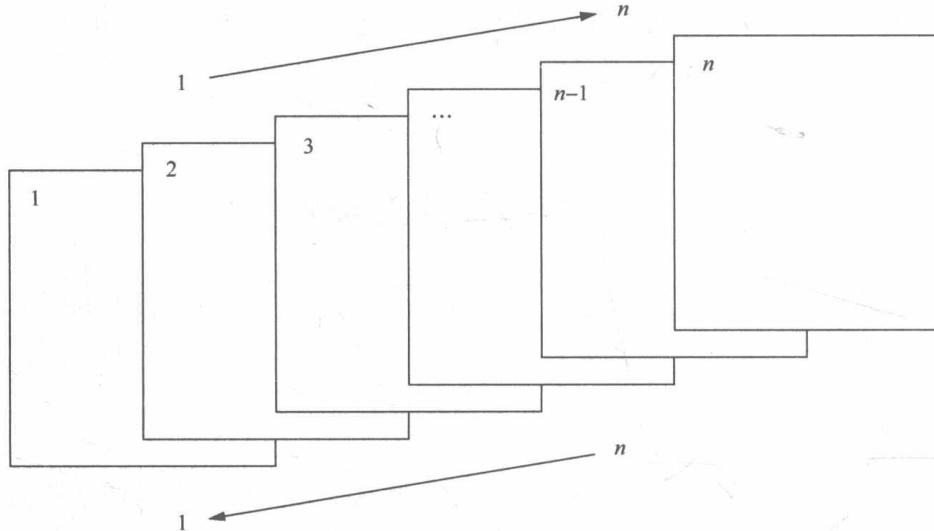


图 9-1 基于线性模型的整体处理

如果对所有 n 幅影像都以影像 1 为参考进行处理，则各影像与影像 1 的线性关系分别如下：

对于影像 1， $S_1 = S_1$ ，故 $\text{gain}(1) = 1$ ， $\text{offset}(1) = 0$ ；

对于影像 2， $S_1 = S_2 \times \text{gain}(2)_1 + \text{offset}(2)_1$ ，即

$\text{gain}(2) = \text{gain}(2)_1$ ， $\text{offset}(2) = \text{offset}(2)_1$ ；

对于影像 3，

$$\begin{aligned} S_1 &= S_2 \times \text{gain}(2)_1 + \text{offset}(2)_1 = [S_3 \times \text{gain}(3)_2 + \text{offset}(3)_2] \times \text{gain}(2)_1 + \text{offset}(2)_1 \\ &= S_3 \times \text{gain}(3)_2 \times \text{gain}(2)_1 + \text{offset}(3)_2 \times \text{gain}(2)_1 + \text{offset}(2)_1 \\ &= S_3 \times \text{gain}(3)_2 \times \text{gain}(2) + \text{offset}(3)_2 \times \text{gain}(2) + \text{offset}(2)_1 \end{aligned}$$

即

$$\text{gain}(3) = \text{gain}(3)_2 \times \text{gain}(2)_1$$

$$\text{offset}(3) = \text{offset}(3)_2 \times \text{gain}(2)_1 + \text{offset}(2)_1$$

同理，对于任意一幅影像 m ，其与影像 1 之间的线性关系为：

$$S_1 = S_m \times \text{gain}(m)_{m-1} \times \text{gain}(m-1) + \text{offset}(m)_{m-1} \times \text{gain}(m-1) + \text{offset}(m-1)$$

即

$$\begin{aligned} \text{gain}(m) &= \text{gain}(m)_{m-1} \times \text{gain}(m-1) = \text{gain}(m)_{m-1} \times \text{gain}(m-1)_{m-2} \times \cdots \times \text{gain}(2)_1 \\ \text{offset}(m) &= \text{offset}(m)_{m-1} \times \text{gain}(m-1) + \text{offset}(m-1) \end{aligned} \quad (9-3)$$

这样便得到了所有影像与影像 1 的线性关系，所有影像都被纳入到了同一个参考基准（ $\text{gain}(m)$ 和 $\text{offset}(m)$ 都是以影像 1 为参考的），据此便可以对各影像进行处理：

$$f_m^*(i, j) = f_m(i, j) \times \text{gain}(m) + \text{offset}(m) \quad (9-4)$$

式中, $f_m(i, j)$ 为处理前影像的像素值; $f_m^*(i, j)$ 为处理后影像的像素值; (i, j) 为影像的行列号。通过这种方式进行处理时, 在计算得到所有影像的乘性系数和加性系数之后, 还需要考虑处理时的质量控制。

因为影像通常都是以 8 位或者 16 位的正整数存储, 如果乘性系数小于 1.0 时, 影像中像素值的变化范围将变小, 采用正整数存储后影像的一些灰度级将丢失, 降低辐射分辨率; 如果加性系数小于 0, 则由于灰度级存储的限制, 较低的像素值所包含的信息将会丢失。因此为了进行质量控制, 在得到所有影像的乘性系数和加性系数之后, 还需要确定一个全局的乘性系数 gain 和加性系数 offset。选取最小的乘性系数和加性系数, 设其分别为 $\text{gain}(p)$, $\text{offset}(q)$, 则 $\text{gain} = 1 / \text{gain}(p)$, $\text{offset} = -\text{offset}(q)$ 。这样对于任意一幅影像 m , 最终进行处理的乘性系数和加性系数分别为: $\text{gain}(m) \times \text{gain}$ 和 $\text{offset}(m) + \text{offset}$ (Du et al., 2001)。

采用这种整体后处理的好处是处理结果与影像的顺序无关。以图 9-1 所示的情况为例, 设影像的顺序为 $1 \rightarrow n$, 则由式(9-3)首先计算各影像与影像 1 之间的线性关系, 设最小的乘性系数和加性系数分别为 $\text{gain}_{1 \rightarrow n}(k)$ 和 $\text{offset}_{1 \rightarrow n}(l)$, 则对于任意一幅影像 m , 最终进行处理的乘性系数和加性系数分别为

$$\text{gain}(m)_{1 \rightarrow n}^* = \text{gain}(m)_{m-1} \times \text{gain}_{1 \rightarrow n}(m-1) \times \frac{1}{\text{gain}_{1 \rightarrow n}(k)}$$

$$\text{offset}(m)_{1 \rightarrow n}^* = \text{offset}(m)_{m-1} \times \text{gain}_{1 \rightarrow n}(m-1) + \text{offset}_{1 \rightarrow n}(m-1) - \text{offset}_{1 \rightarrow n}(l)$$

同理,

$$\text{gain}(1)_{1 \rightarrow n}^* = \frac{1}{\text{gain}_{1 \rightarrow n}(k)}, \quad \text{gain}(k)_{1 \rightarrow n}^* = 1,$$

$$\text{gain}(n)_{1 \rightarrow n}^* = \text{gain}(n)_{n-1} \times \text{gain}_{1 \rightarrow n}(n-1) \times \frac{1}{\text{gain}_{1 \rightarrow n}(k)}$$

$$\text{offset}(l)_{1 \rightarrow n}^* = 0$$

$$\text{offset}(1)_{1 \rightarrow n}^* = -\text{offset}_{1 \rightarrow n}(l)$$

$$\text{offset}(n)_{1 \rightarrow n}^* = \text{offset}(n)_{n-1} \times \text{gain}_{1 \rightarrow n}(n-1) + \text{offset}_{1 \rightarrow n}(n-1) - \text{offset}_{1 \rightarrow n}(l)$$

如果影像的顺序相反, 即 $n \rightarrow 1$, 则相当于在计算各影像与影像 n 之间的线性关系后, 以影像 n 为参考, 设定一个全局的乘性系数 $\text{gain}_{1 \rightarrow n}(n)$ 和加性系数 $\text{offset}_{1 \rightarrow n}(n)$, 则有:

仅供个人科研教学使用!

$$\text{gain}_{n \rightarrow 1}(n) = 1, \quad \text{offset}_{n \rightarrow 1}(n) = 0;$$

$$\text{gain}_{n \rightarrow 1}(m) = \frac{\text{gain}_{1 \rightarrow n}(m)}{\text{gain}_{1 \rightarrow n}(n)}, \quad \text{offset}_{n \rightarrow 1}(m) = \text{offset}_{1 \rightarrow n}(m) - \text{offset}_{1 \rightarrow n}(n);$$

$$\text{gain}_{n \rightarrow l}(1) = \frac{\text{gain}_{l \rightarrow n}(1)}{\text{gain}_{l \rightarrow n}(n)} = \frac{1}{\text{gain}_{l \rightarrow n}(n)}, \quad \text{offset}_{n \rightarrow l}(1) = \text{offset}_{l \rightarrow n}(1) - \text{offset}_{l \rightarrow n}(n)$$

显然，最小的乘性系数和加性系数仍然为 $\text{gain}_{n \rightarrow l}(k)$ 和 $\text{offset}_{n \rightarrow l}(l)$ ，因此最终进行处理的乘性系数和加性系数分别为

$$\text{gain}(1)_{n \rightarrow l}^* = \frac{\text{gain}_{l \rightarrow n}(1)}{\text{gain}_{l \rightarrow n}(n)} \times \frac{1}{\text{gain}_{n \rightarrow l}(k)} = \frac{\text{gain}_{l \rightarrow n}(1)}{\text{gain}_{l \rightarrow n}(k)} = \text{gain}(1)_{l \rightarrow n}^*$$

$$\text{gain}(m)_{n \rightarrow l}^* = \frac{\text{gain}_{l \rightarrow n}(m)}{\text{gain}_{l \rightarrow n}(n)} \times \frac{1}{\text{gain}_{n \rightarrow l}(k)} = \frac{\text{gain}_{l \rightarrow n}(m)}{\text{gain}_{l \rightarrow n}(k)} = \text{gain}(m)_{l \rightarrow n}^*$$

$$\text{gain}(n)_{n \rightarrow l}^* = \frac{1}{\text{gain}_{n \rightarrow l}(k)} = \frac{\text{gain}_{l \rightarrow n}(n)}{\text{gain}_{l \rightarrow n}(k)} = \text{gain}(n)_{l \rightarrow n}^*$$

$$\begin{aligned} \text{offset}(l)_{n \rightarrow l}^* &= \text{offset}_{l \rightarrow n}(1) - \text{offset}_{l \rightarrow n}(n) - \text{offset}_{n \rightarrow l}(l) \\ &= \text{offset}_{l \rightarrow n}(1) - \text{offset}_{l \rightarrow n}(n) + \text{offset}_{l \rightarrow n}(n) - \text{offset}_{l \rightarrow n}(l) = \text{offset}(l)_{l \rightarrow n}^* \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \text{offset}(m)_{n \rightarrow l}^* &= \text{offset}_{l \rightarrow n}(m) - \text{offset}_{l \rightarrow n}(n) - \text{offset}_{n \rightarrow l}(l) \\ &= \text{offset}_{l \rightarrow n}(m) - \text{offset}_{l \rightarrow n}(n) + \text{offset}_{l \rightarrow n}(n) - \text{offset}_{l \rightarrow n}(l) = \text{offset}(m)_{l \rightarrow n}^* \end{aligned}$$

$$\text{offset}(n)_{n \rightarrow l}^* = -\text{offset}_{n \rightarrow l}(l) = \text{offset}_{l \rightarrow n}(n) - \text{offset}_{l \rightarrow n}(l) = \text{offset}(n)_{l \rightarrow n}^*$$

因此，采用线性关系进行色彩一致性处理时，对图 9-1 所示的这种情况，处理的结果与处理顺序无关。由此可知，只要能够找到一个各影像间的传递路径，各影像间的关系就可以在同一参考下计算，这样就可以使色彩一致性处理与影像的顺序无关，便于整体考虑，进行质量控制。

9.2.2 基于 IR-MAD 的像素样本选取

迭代加权多元变化检测 (IR-MAD) 是在多元变化检测 (multivariate alteration detection, MAD) 的基础上，为改善 MAD 变换的灵敏度，采用了迭代加权的方法，它是一种很有效的选取影像间不变像素的方法 (Canty et al., 2004; Nielsen, 2007; Canty and Nielsen, 2008)。对于高分辨率卫星影像，为了排除地物变化引起的辐射差异 (主要由时相差异导致，在较长时间间隔，地表发生了变化，如植被等生长变化、土地利用性质发生变化等)，获得影像间更加稳健的线性关系，本书采用 IR-MAD 在重叠区域选取像素样本，即将 IR-MAD 确定的不变特征区域像素作为计算影像间关系的依据。

对在 t_1 , t_2 时间获取的两幅影像的所有 N 个通道的强度做一个线性组合，分别用随机向量 F 和 G 来表示，则

$$\begin{aligned} U &= a^T F = a_1 F_1 + a_2 F_2 + \dots + a_N F_N \\ V &= b^T G = b_1 G_1 + b_2 G_2 + \dots + b_N G_N \end{aligned} \tag{9-5}$$

式中， U 和 V 分别为两幅影像的强度信息； a 和 b 为常量向量。如果确定这些变换系数以便使 U 和 V 之间的正相关最小，这就意味着最终的差分图像 $U-V$ 在像素强度上会表现出最大的散布。如果假设这种散布主要是由于影像在不同时刻发生的变化所引起的，那么这个过程将会使这些变化最大化。即得到如下的线性组合：

$$\begin{aligned} \text{var}(U-V) &= \text{var}(U) + \text{var}(V) - 2 \text{cov}(U, V) \\ &\rightarrow \max \text{imum} \end{aligned} \quad (9-6)$$

这个线性组合需要满足以下约束条件：

$$\text{var}(U) = \text{var}(V) = 1 \quad \text{以及} \quad \text{cov}(U, V) > 0 \quad (9-7)$$

在这些约束条件下：

$$\text{var}(U-V) = 2(1-\rho) \quad (9-8)$$

式中， ρ 为 U 和 V 的相关系数， $\rho = \text{corr}(U, V) = \frac{\text{cov}(U, V)}{\sqrt{\text{var}(U) \text{var}(V)}}$ ，这样问题就转化为找到使正相关系数 ρ 最小的向量 a 和 b 。 N 个不同的分量：

$$M_i = U_i - V_i = a_i^T F - b_i^T G, \quad i = 1, \dots, N \quad (9-9)$$

即为组合影像的多元变化检测分量。MAD 分量良好的统计特性非常适合进行可视化和分析变化信息。MAD 分量之间正交，各分量的方差为

$$\text{var}(U_i - V_i) = \sigma_{\text{MAD}_i}^2 = 2(1 - \sqrt{\lambda_i}) \quad (9-10)$$

最小特征值对应的变换将使差分图像得到最大的方差，也就是说将会使其对应的 MAD 分量在像素强度值上出现最大的散布，在理想情况下包含最大的变化信息。

MAD 分量是原始影像强度的线性变换的不变量。这意味着这种方法对大气条件的差异或者在不同获取时间传感器检校的差异不敏感。由于 MAD 变量将或多或少的偏离多元正态分布，为了改善 MAD 变换的灵敏度，使之发现真正的变化，在估计样本的均值和协方差矩阵时，IR-MAD 将观测值按不变的概率进行加权。观测值的不变概率由前一次迭代决定，样本的均值和协方差矩阵通过典型相关分析 (canonical correlation analysis, CCA) 决定下一次迭代的 MAD 变量。概率的权重可以直接通过分析 MAD 变量获得。设随机变量 Z 表示标准化的 MAD 变量的平方和：

$$Z = \left(\frac{M_1}{\sigma_{\text{MAD}_1}} \right)^2 + \dots + \left(\frac{M_N}{\sigma_{\text{MAD}_N}} \right)^2 \quad (9-11)$$

式中， σ_{MAD_i} 由式 (9-10) 给出。又由于不变观测值服从正态分布且不相关，则 Z 近似服从自由度为 N 的 χ^2 分布。发生变化的观测值将会有比较反常的较大的 Z 值。对每次迭代，观测值的权值可由 χ^2 分布决定，即

$$\Pr(\text{no-change}) = \Pr(Z \leq z) = 1 - P_{\chi^2, N}(z) \quad (9-12)$$

式中，较小的 z 值意味着较大的不变概率。MAD 变换的迭代将一直持续到迭代停止的条件满足为止，如相关系数的变化小于一定的阈值。

9.2.3 基于正交回归的线性关系确定

在重叠区域获得选取的不变像素样本后，本书采用正交回归来确定相邻影像间的线性关系。这主要是考虑到正交回归可以比常规最小二乘回归取得更好的效果。与常规最小二乘回归相比，正交回归不再以最小化数据点到回归直线在水平或者垂直方向的距离的平方为准则，而是以最小化数据点到回归直线之间的正交距离，也就是垂直距离为准则。常规最小二乘回归与正交回归的比较如图 9-2 所示 (Leng et al., 2007; Canty and Nielsen, 2008)。

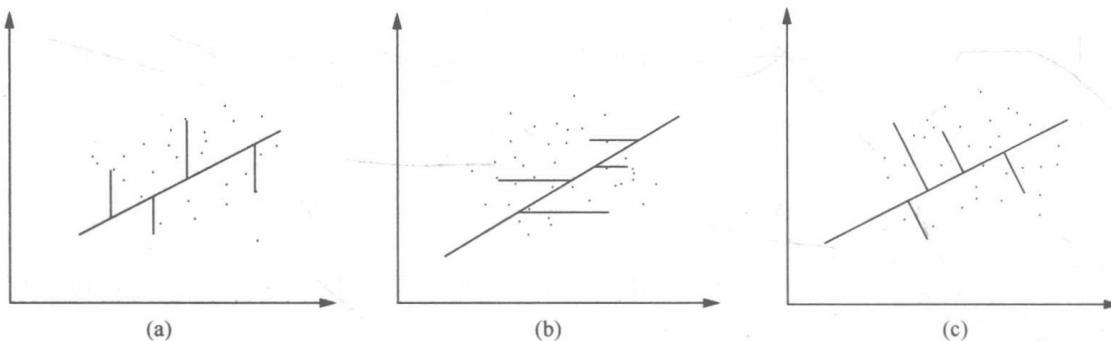


图 9-2 常规最小二乘回归(a、b)和正交回归(c)

设 x 是自变量， y 是因变量，并假定 x 和 y 都具有一定的随机误差， δ 和 ε ，二者不相关，且 $\delta \sim N(0, \sigma_\delta^2)$ ， $\varepsilon \sim N(0, \sigma_\varepsilon^2)$ ，则正交回归模型为

$$y_i - \varepsilon_i = \alpha + \beta(x_i - \delta_i), \quad i = 1, \dots, n \quad (9-13)$$

式中， n 为观测次数。由此可以得到 β 的估计值：

$$\hat{\beta} = \frac{(s_{yy}^2 - s_{xx}^2) + \sqrt{(s_{yy}^2 - s_{xx}^2)^2 + 4s_{xy}^2}}{2s_{xy}} \quad (9-14)$$

其中，

$$s_{xy} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})(y_i - \bar{y})$$

$$s_{xx}^2 = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2$$

$$s_{yy}^2 = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (y_i - \bar{y})^2$$

$$\bar{x} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n x_i$$

$$\bar{y} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n y_i$$

α 的估计值为

$$\hat{\alpha} = \bar{y} - \hat{\beta}\bar{x} \quad (9-15)$$

向量 $[\hat{\alpha} \hat{\beta}]^T$ 的方差矩阵为

$$\frac{\sigma^2 \hat{\beta}(1 + \hat{\beta}^2)}{ns_{xy}} \begin{bmatrix} \bar{x}^2(1 + \hat{\tau}) + s_{xy}/\hat{\beta} & -\bar{x}(1 + \hat{\tau}) \\ -\bar{x}(1 + \hat{\tau}) & 1 + \hat{\tau} \end{bmatrix} \quad (9-16)$$

式中,

$$\hat{\tau} = \frac{\sigma^2 \hat{\beta}}{(1 + \hat{\beta}^2)s_{xy}}$$

$$\hat{\sigma}^2 = \frac{n}{(n-2)(1 + \hat{\beta}^2)} (s_{yy}^2 - 2\hat{\beta}s_{xy} + \hat{\beta}^2 s_{xx}^2)$$

9.2.4 基于 Voronoi 图的影像间邻接关系确定

在获得了相邻影像间的线性关系之后，另一个要解决的问题就是这种线性关系的传递路径问题。只要能够找到一个各影像间的传递路径，各影像间的关系就可以在同一参考下计算，而且处理与影像的顺序无关。但在实际的应用中，对区域范围内多幅影像进行处理时，影像通常都是二维排列的，影像间的重叠关系非常复杂，是一个二维的网络问题，因此在确定传递路径之前必须确定影像间的邻接关系。

Voronoi 图是计算几何中的一个基础数据结构，目前已经被广泛应用到了与空间划分相关的许多领域中。由于 Voronoi 图可以简单的表达邻接关系，因此本书将其用来确定影像间的邻接关系。取每幅影像的中心点形成一个点集，生成常规的 Voronoi 图，并将 Voronoi 图的范围限定在所有影像覆盖范围（所有影像的范围的交集）之内。这样便得到了每个像片中心点的 Voronoi 多边形，由于每个 Voronoi 多边形与其生成元（即各影像的中心点）一一对应，因此根据各 Voronoi 多边形是否邻接，就可以方便地得到各影像间的邻接关系。由于 Voronoi 多边形生成时是以距离像片中心点最近为准则的，因此在通过 Voronoi 图确定的影像间的邻接关系中，那些相互之间具有重叠区但相距较远的影像将不认为它们是相邻的。这实际上对大区域相对辐射校正处理是有好处的，因为相距较远的影像间的重叠区域必然较小，通过这样的重叠区域得到的影像间关系的可靠性必然低于通过较大的重叠区获得的影像间关系。当然，直接基于 Voronoi 图确定影像间的邻接关系并不严密，因为基于各影像的中心点确定的邻接关系不一定准确，还需要进一步判断

对应的影像的有效范围是否具有重叠区。另一种处理方法是基于后面章节的基于顾及重叠的面 Voronoi 图来确定影像间的邻接关系。

图 9-3 是基于 Voronoi 图确定影像间邻接关系的示意图。图 9-3(a)是影像按坐标排列的情况，图 9-3(b)是基于影像范围中心点生成的 Voronoi 图的示意图，由此可见，尽管影像 1 和影像 5 具有重叠，但是由于其相隔较远，通过 Voronoi 图确定邻接关系时，就不认为影像 1 和影像 5 是相邻的。

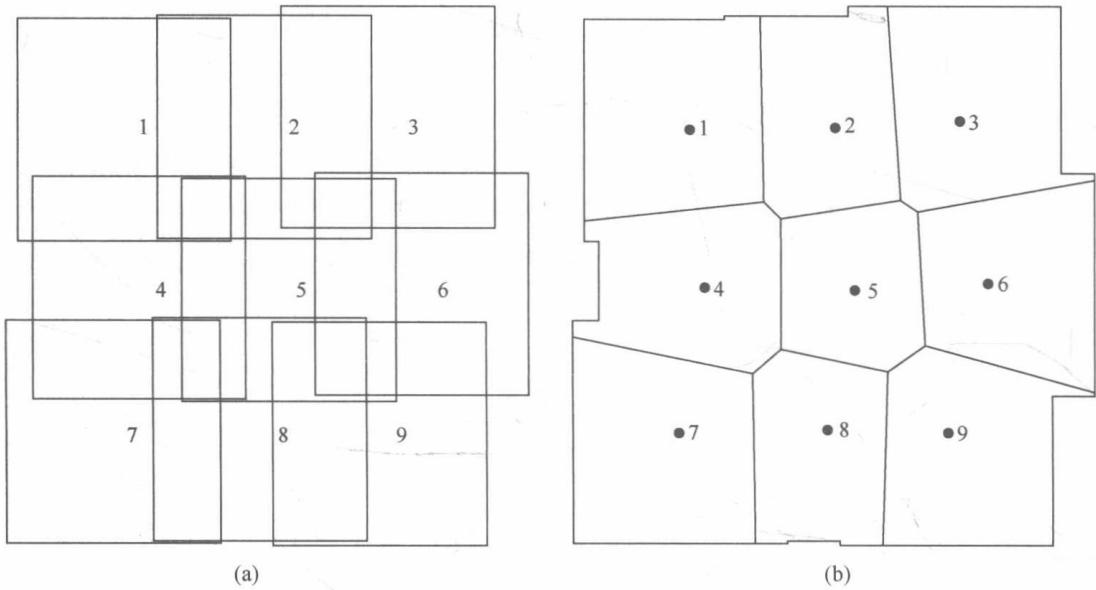


图 9-3 基于 Voronoi 图确定影像间邻接关系的示意图

9.2.5 基于最短路径的影像间关系传递

在确定了影像间的邻接关系之后，就可以在二维的邻接关系网络环境下，确定影像间关系的传递路径。Guindon (1997) 阐述了传递路径对辐射归一化处理的影响，指出影像间的关系在每一次传递的过程中都存在不确定性，并通过卫星影像的实验得出每次传递过程中的不确定性为 0.5~2 个灰度级的结论。尽管本书采用 IR-MAD 方法增强了计算影像间关系的可靠性，但是每次传递过程的不确定性依然存在。因此为了减少这种影像间关系传递过程中的不确定性，必须减少传递路径的长度，减少传递的次数。显然较长的传递路径对应较多的传递次数和较小的重叠区域。在重叠区域一定的情况下，传递次数越多显然误差会越大，因为每次传递所涉及的相邻影像间的线性关系的计算都存在一定的误差，导致每次传递都存在一定的不确定性；在传递次数一定的情况下，较长的传递路径意味着影像间的距离较远，影像间的重叠区域较小，通过较小的重叠区获得的影像间的关系的可靠性就会下降。为了解决这个问题，本书基于最短路径算法，首先在区域范围内选定最中心的影像作为参考影像，然后对每幅影像，搜索该影像到参考影像间的最短路径，将该路径作为这两幅影像间关系的传递路径！

本书采用 Dijkstra 算法计算最短路径。Dijkstra 算法是经典的解决最短路径问题的算法，它可以找出指定节点到其他各个节点间的最短路径，其主要思想是首先从源点求出长度最短的一条路径，然后通过对路径长度迭代得到从源点到其他各目标节点的最短路径。

设 w_j 是从源点 s 到节点 j 的最短路径长度; p_j 是从 s 到 j 的最短路径中 j 点的前一节点。 S 是标识集合; T 是未标识集合; M 是节点集合。 d_{ij} 是节点 i 到节点 j 的距离(i 与 j 直接相连, 否则 $d_{ij} = \infty$)。算法步骤如下所述。

Step0: $S = \{s\}$; $T = M - S$; $w_j = d_{sj}$ ($j \in T$, s 与 j 直接相连)或 $w_j = \infty$ ($j \in T$, s 与 j 不直接相连)。

Step1: 在 T 中找到节点 i , 使 s 到 i 的距离最小, 并将 i 划归到 S (可从与 s 直接相连的 j 中考虑)。

若 $d_{si} = \min_{j \in T} d_{sj}$, j 与 s 直接相连, 则将 i 划归到 S 中, 即 $S = \{s, i\}$, $T = T - \{i\}$; $p_i = s$ 。

Step2: 修改 T 中 j 节点的 w_j 值。

$w_j = \min_{j \in T, i \in S} (w_j, w_i + d_{ij})$; 若 w_j 值改变, 则 $p_j = i$ 。

Step3: 选定所有的 w_j 最小值, 并将其划归到 S 中。

$w_i = \min_{j \in T} w_j$; $S = S \cup \{i\}$; $T = T - \{i\}$; 若 $|S| = n$, 所有节点已标识, 则算法终止,

否则, 转入 Step2。

各影像的像片中心点构成了一个点集, 通过 Voronoi 图可以确定各影像之间也就是各点之间的邻接关系, 这样就构成了一个无向连通图。然后选定区域范围内中心的影像作为参考影像, 然后对每幅影像, 采用 Dijkstra 算法搜索该影像到参考影像间的最短路径, 该路径即为该影像到参考影像之间影像间关系的传递路径。这样可以保证每条路径最短, 尽可能的减小传递次数, 避免传递过程中的不确定性。这样, 通过参考影像, 各影像就被纳入到了同一个基准下, 这样就可以在一个参考下计算各影像间的关系, 并进而确定出各影像进行色彩一致性处理的变换系数。在采用 Dijkstra 算法计算影像间关系的传递路径时, 影像间路径的权值需要考虑重叠像素的数量, 显然重叠像素越多的路径所得到的影像间的关系的可靠性也越高。图 9-4 是图 9-3 所示的区域基于最短路径确定的影像间路径传递示意图。以区域中心影像 5 为参考, 则影像 5 到影像 1 的传递路径如图 9-4 所示。

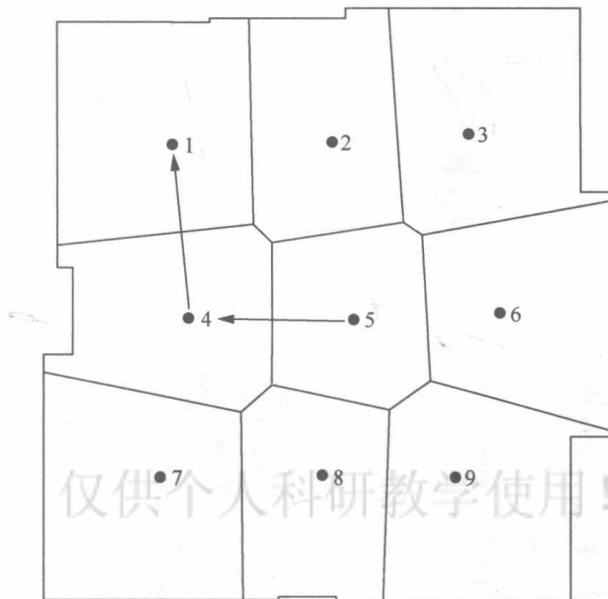


图 9-4 基于最短路径的影像间路径传递示意图

9.3 基于顾及重叠的面 Voronoi 图的接缝线网络生成

基于接缝线的镶嵌方法是广泛使用的影像镶嵌方法。图 9-5 是基于接缝线的镶嵌方法示意图，其中所示是两幅正射影像镶嵌的例子，影像 A 和影像 B。镶嵌时，在两幅影像的重叠区域定义一条接缝线。这样在接缝线的左边取左影像的像素，接缝线的右边取右影像的像素，在最终镶嵌结果影像中的每个像素都可以仅用一幅正射影像中的像素值表示。最后再沿接缝线进行羽化处理即可获得最终的无缝镶嵌影像。在这个过程中，实际上每幅正射影像的范围都被接缝线分割成了一个有效镶嵌多边形。有效镶嵌多边形定义了每幅正射影像中对镶嵌的有用部分，这样镶嵌处理就变成了基于有效镶嵌多边形，将每幅正射影像中有用部分拼贴合成到一起。采用这种方法对于多幅影像进行镶嵌处理时，需要将接缝线扩展成接缝线网络，即需要生成基于整体的接缝线，并将单独的接缝线连接形成接缝线网络，从而确定出每幅影像的有效镶嵌多边形。基于接缝线网络的镶嵌方法示意图如图 9-6 所示，A、B、C 是三幅相互重叠的正射影像，通过连接单独的接缝线形成接缝线网络，每幅正射影像的范围就被划分成了一个有效镶嵌多边形，在有效镶嵌范围内的像素对最终的镶嵌结果有贡献。镶嵌时，在最终镶嵌结果影像中的每个像素仅用一幅正射影像中的像素值表示，这取决于该像素位于哪幅正射影像的有效镶嵌多边形内。这样，我们就可以消除镶嵌过程中的数据冗余，特别是对于具有高重叠度的影像数据。这对于大范围的影像镶嵌应用是非常重要的。因为大范围的影像镶嵌中，高重叠度造成的数据冗余、高分辨率（包括几何分辨率和辐射分辨率）引起的大数据量等因素都使得镶嵌的效率变得更为突出。因此，从效率的角度考虑，对于大范围的影像镶嵌，采用基于接缝线网络的镶嵌方法是非常有必要的；同时，为了保证镶嵌的质量，对接缝线网络根据重叠区影像的内容进行优化也是必需的。

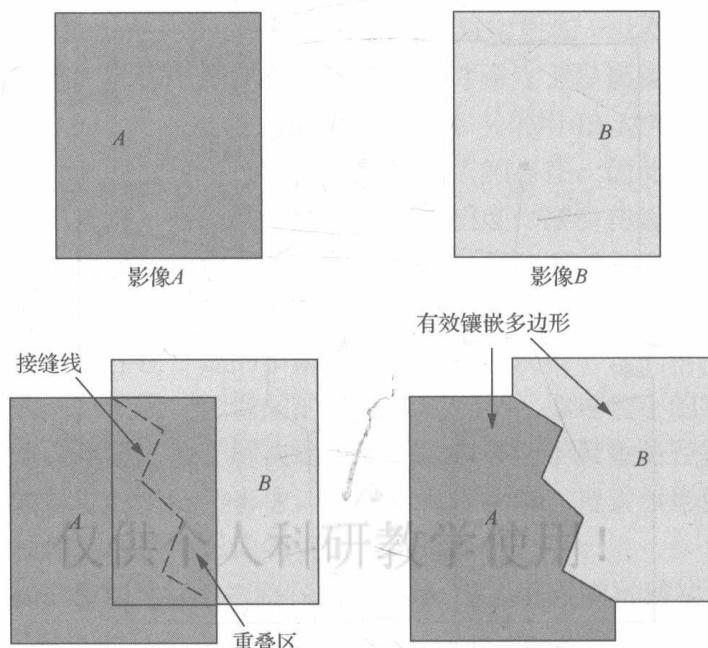


图 9-5 基于接缝线的镶嵌方法示意图

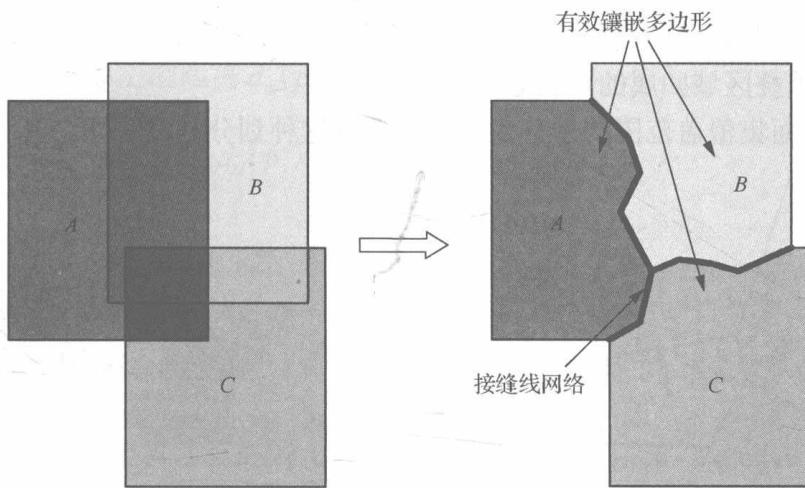


图 9-6 基于接缝线网络的镶嵌方法示意图

Voronoi 图是计算几何中的一个基础数据结构, 目前已经被广泛应用到了与空间划分相关的许多领域中。常规的 Voronoi 图是以点为生成元的, 为了适应各种应用的实际需求, 人们对其进行了深入的研究, 对常规 Voronoi 图进行了各种扩展, 形成了多种广义 Voronoi 图。Aurenhammer(1991)、Aurenhammer 和 Klein(2000)、Okabe 等(1994, 2000)对这些模型以及相关的应用作了综述。本书进一步扩展了面 Voronoi 图, 提出了一种新的顾及重叠的面 Voronoi 图。对大区域的高分辨率光学卫星遥感影像镶嵌, 本书采用基于顾及重叠的面 Voronoi 图生成初始的接缝线网络, 然后在此基础上基于重叠区的影像内容对初始接缝线网络进行优化, 最后基于优化后的接缝线网络进行镶嵌处理。采用这种方法生成的接缝线网络整体考虑了区域范围内的所有影像, 可以方便地将各影像的范围划分成有效镶嵌多边形, 有利于进行大区域的影像镶嵌, 便于直接生成镶嵌结果, 减少中间环节, 提高生产效率, 并可保证镶嵌的质量, 同时在应用中也具有更大的灵活性。

9.3.1 顾及重叠的面 Voronoi 图

在进行影像镶嵌时, 实际上每幅影像的有效范围是一个面, 面之间存在重叠, 用于镶嵌的所有影像的有效范围就构成了一个面的集合, 各影像有效镶嵌多边形的确定其实是一个对面之间具有重叠的面集的空间划分问题, 即如何生成基于整体的接缝线网络, 从而对整个影像覆盖范围进行没有冗余、无缝的划分, 进而确定出每幅影像的有效镶嵌多边形。但现有的 Voronoi 图并不能解决这个问题。常规 Voronoi 图是基于点集的, 生成元为点, 图 9-7 显示了一个基于点集的常规 Voronoi 图的例子。但每幅影像的有效范围是一个面, 用于镶嵌的各影像有效范围构成的是一个面集。如果采用每幅影像中的一个点来构成一个点集, 如像片中心点, 则无法保证生成的接缝线位于影像间的重叠区域, 这会导致镶嵌结果中存在不被任何影像覆盖的地方。而面 Voronoi 图虽然是以面为生成元, 但它不允许面之间具有重叠。图 9-8 显示了一个面 Voronoi 图的例子。因此为了满足影像镶嵌的实际应用, 对面 Voronoi 图进行了扩展, 提出了一种新的顾及重叠的面 Voronoi 图, 其具有如下特点:

- (1) 整个被划分区域是有限的, 即多个面的并集, 且各面之间允许存在重叠;

(2) Voronoi 图的形成以每两个具有重叠的面之间的非重叠部分为控制元素, 它实际上是对面之间重叠区域归属的重新划分;

(3) 这种对面集覆盖范围的划分是唯一的, 且这种划分是没有冗余且无缝的。

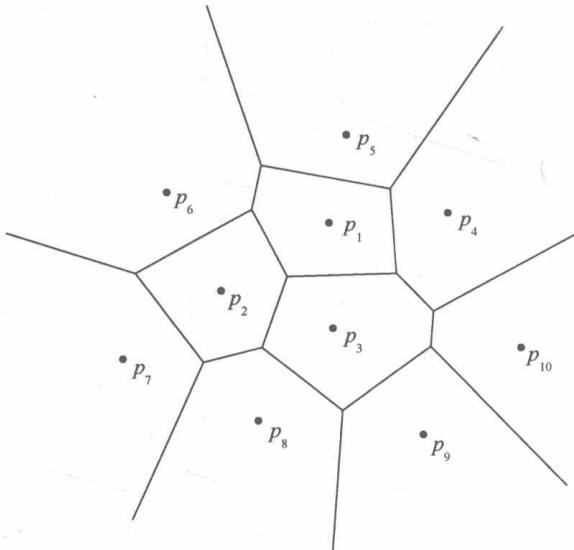


图 9-7 常规 Voronoi 图 (Okabe et al., 1994)

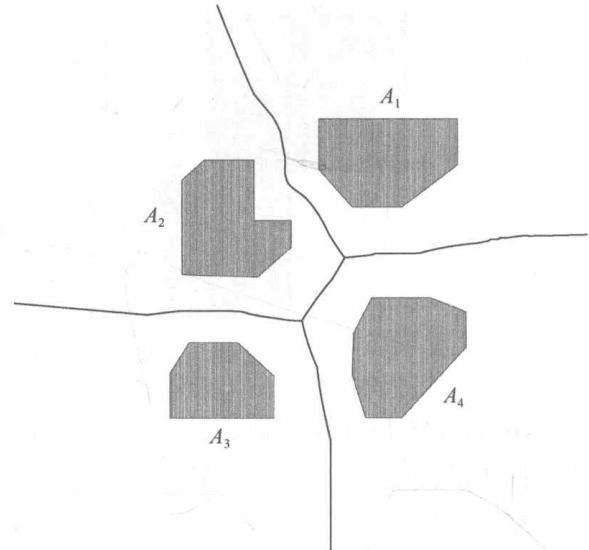


图 9-8 面 Voronoi 图 (Okabe et al., 1994)

1. 定义

设平面上的一个面集 $A = \{A_1, A_2, \dots, A_n\}$, 其中任意一个面都不被其他任何一个面包含, 即 $A_i \not\subset A_j (\forall i \neq j, i, j \in I_n = \{1, 2, \dots, n\})$, 且不同的面之间允许重叠。顾及重叠的面 Voronoi 图中点到面之间的距离是以两个面之间的非重叠部分为控制元素来定义的。设面 A_i 和 A_j 为面集 A 中任意两个面 ($i \neq j, i, j \in I_n = \{1, 2, \dots, n\}$), 若 $A_i \cap A_j \neq \emptyset$, 设 $A_i \cap A_j = O_j$, $A_i = A'_i \cup O_j$, $A_j = A'_j \cup O_j$ (即 A'_i 和 A'_j 分别是 A_i 和 A_j 间不重叠的部分), $\forall p \in A_i \cup A_j$, 点 p 在面 A_j 约束下到面 A_i 的距离 $d_a(p, A_i, A_j)$ 定义为点 p 到 A'_i 中的点的最小距离:

$$d_a(p, A_i, A_j) = \min_{q \in A'_i} d(p, q) \quad (9-17)$$

距离为欧式距离, 显然若 $p \in A'_i$, 则 $d_a(p, A_i, A_j) = 0$, 此时面 A_i 和 A_j 的平分线为

$$B(A_i, A_j) = \{p \mid d_a(p, A_i, A_j) = d_a(p, A_j, A_i), p \in A_i \cup A_j\} \quad (9-18)$$

$B(A_i, A_j)$ 上的点到面 A_i 和 A_j 的距离相等。面 A_i 在面 A_j 约束下的 Voronoi 多边形为

$$V(A_i, A_j) = \{p \mid d_a(p, A_i, A_j) \leq d_a(p, A_j, A_i), p \in A_i \cup A_j\} \quad (9-19)$$

若 $A_i \cap A_j = \emptyset$, 此时 $A_i = A'_i$, $A_j = A'_j$, $\forall p \in A_i \cup A_j$, 点 p 在面 A_j 约束下到面 A_i 的距离为 $d_a(p, A_i, A_j) = \min_{q \in A_i} d(p, q)$, 显然 $\forall p \in A_i$, $d_a(p, A_i, A_j) = 0 < d_a(p, A_j, A_i)$, 则 $V(A_i, A_j) = A_i$, 即与面 A_i 不重叠的面对其 Voronoi 多边形的生成不产生影响, 此时由于

两个面彼此不重叠，因此它们之间不存在平分线。

$\forall p \in A$ ，其到面 A_i 的距离 $d_a(p, A_i)$ 定义为

$$d_a(p, A_i) = \max_{j \in I_n, j \neq i} d_a(p, A_i, A_j) \quad (9-20)$$

任意面 A_i 的 Voronoi 多边形为

$$V(A_i) = \bigcap_{j \in I_n, j \neq i} V(A_i, A_j) = \{p \mid d_a(p, A_i) \leq d_a(p, A_j), j \neq i, j \in I_n, p \in A\} \quad (9-21)$$

即任意面 A_i 的 Voronoi 多边形是面 A_i 在其他各面约束下形成的 Voronoi 多边形的交集，也是距离面 A_i 最近的点的集合。考虑到相互不重叠的面不影响 Voronoi 多边形的生成，任意面 A_i 的 Voronoi 多边形可进一步简化。设有 m 个面与面 A_i 重叠 ($0 \leq m < n$)，分别为 $A_{m1}, A_{m2}, \dots, A_{mm}$ ，其中 $m1, m2, \dots, mm \in I_n$ ，对于任意一个与 A_i 具有重叠的面 $A_{mj}, j \in I_m = \{1, 2, \dots, m\}$ ，任意面 A_i 的 Voronoi 多边形可简化为

$$V(A_i) = \bigcap_{j \in I_m} V(A_i, A_{mj}) \quad (9-22)$$

所有的面 A_1, A_2, \dots, A_n 的 Voronoi 多边形的集合即为面集 A 的 Voronoi 图：

$$V = \{V(A_1), V(A_2), V(A_3), \dots, V(A_n)\} \quad (9-23)$$

Voronoi 边为两个 Voronoi 多边形的公共边 ($V(A_i) \cap V(A_j) \neq \emptyset$)：

$$\begin{aligned} V_E(A_i, A_j) &= V(A_i) \cap V(A_j) = \\ &\{p \mid d_a(p, A_i) = d_a(p, A_j) \leq d_a(p, A_k), k \neq i \neq j, k \in I_n, p \in A\} \end{aligned} \quad (9-24)$$

Voronoi 顶点为三个 Voronoi 多边形的交点 ($V(A_i) \cap V(A_j) \cap V(A_k) \neq \emptyset$)：

$$\begin{aligned} V_V(A_i, A_j, A_k) &= V(A_i) \cap V(A_j) \cap V(A_k) = V_E(A_i, A_j) \cap V_E(A_i, A_k) \cap V_E(A_j, A_k) \\ &= \{p \mid d_a(p, A_i) = d_a(p, A_j) = d_a(p, A_k) \leq d_a(p, A_l), l \neq i \neq j \neq k, l \in I_n, p \in A\} \end{aligned} \quad (9-25)$$

顾及重叠的面 Voronoi 图将相邻的具有重叠的面之间的非重叠部分(包括边界)作为生成元。而且，当采用顾及重叠的面 Voronoi 图对具有重叠的面集进行划分时，被划分区域的范围是有限的，也就是面集中所有面的范围的并集。由于对于面集中的每个面来说，与其不重叠的面对其 Voronoi 多边形的生成不产生影响，因此 Voronoi 多边形的生成实际上是对面之间重叠区域归属的重新划分，且 Voronoi 多边形的范围不超出所属面的范围。Voronoi 边是两个 Voronoi 多边形的公共边，位于相邻面之间的重叠部分，Voronoi 边上任意一点到两个相应面之间距离相等。Voronoi 顶点是至少三个 Voronoi 多边形的公共点，也是至少三条 Voronoi 边的交点，位于面之间的多度(至少三度)重叠部分。图 9-9

是3个面的集合 $A=\{A_1, A_2, A_3\}$ 的Voronoi图的示意图,其中的Voronoi顶点是三条Voronoi边的交点。图9-10是四个面集合 $A=\{A_1, A_2, A_3, A_4\}$ 的Voronoi图的示意图,其中的Voronoi顶点是四条Voronoi边的交点。

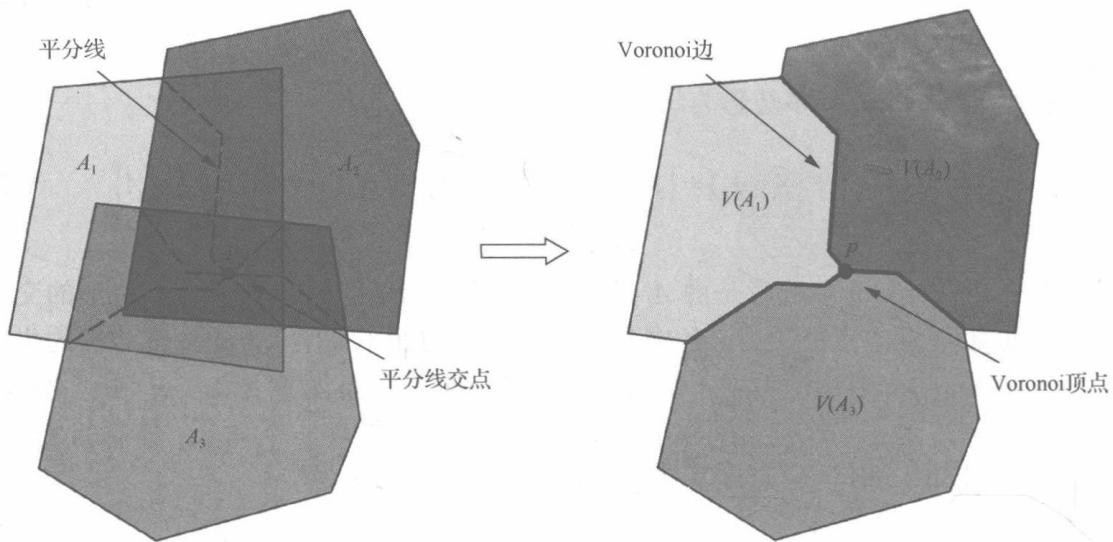


图9-9 面集 $A=\{A_1, A_2, A_3\}$ 的Voronoi图

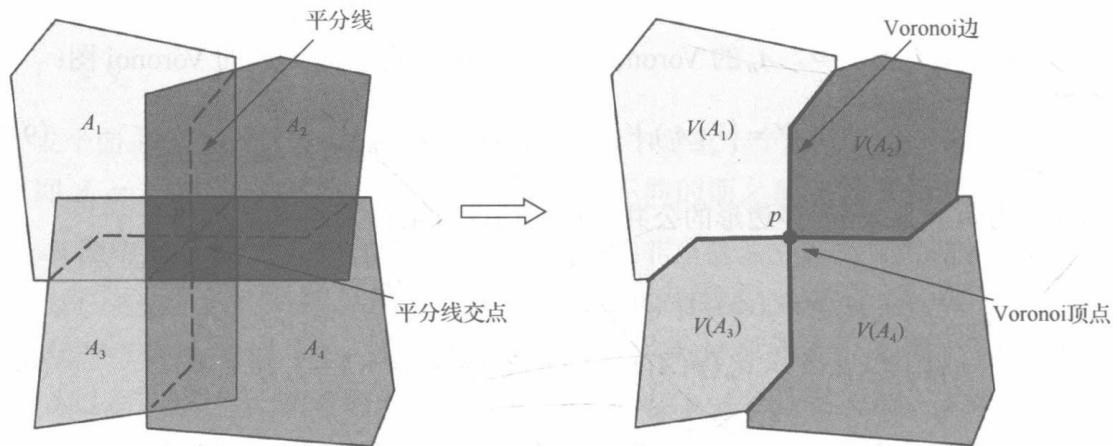


图9-10 面集 $A=\{A_1, A_2, A_3, A_4\}$ 的Voronoi图

对于顾及重叠的面Voronoi图生成过程中面之间的复杂重叠情况采用了通过对面进行分解的方式简化面之间的重叠,从而使顾及重叠的面Voronoi图的生成方法更为通用。通常情况下面之间的重叠比较简单,得到的面的Voronoi多边形是一个简单多边形,图9-9和图9-10给出了两个这样的例子。但有时候,面之间的重叠情况会非常复杂,生成的面的Voronoi多边形可能将不再是一个简单多边形,而是两个或多个简单多边形的组合。图9-11给出了一个复杂重叠情况的例子。图9-11(a)中, $A \cap B = O$,图9-11(b)是图9-11(a)的Voronoi图,显然面B的Voronoi多边形由两个简单多边形构成。对于这种面之间复杂的交叉重叠情况,为了简化计算,可以将其分解为几个面之间简单重叠的组合。图9-11(a)的这种情况可以分解为4个面之间简单重叠的组合,如图9-11(c)所示,即面 A_1, A_2, B_1, B_2 ,其中 $A_1 \cap A_2 \cap B_1 \cap B_2 = O$,此时的Voronoi图如图9-11(d)所示,每个面的Voronoi多边形都是一个简单多边形。

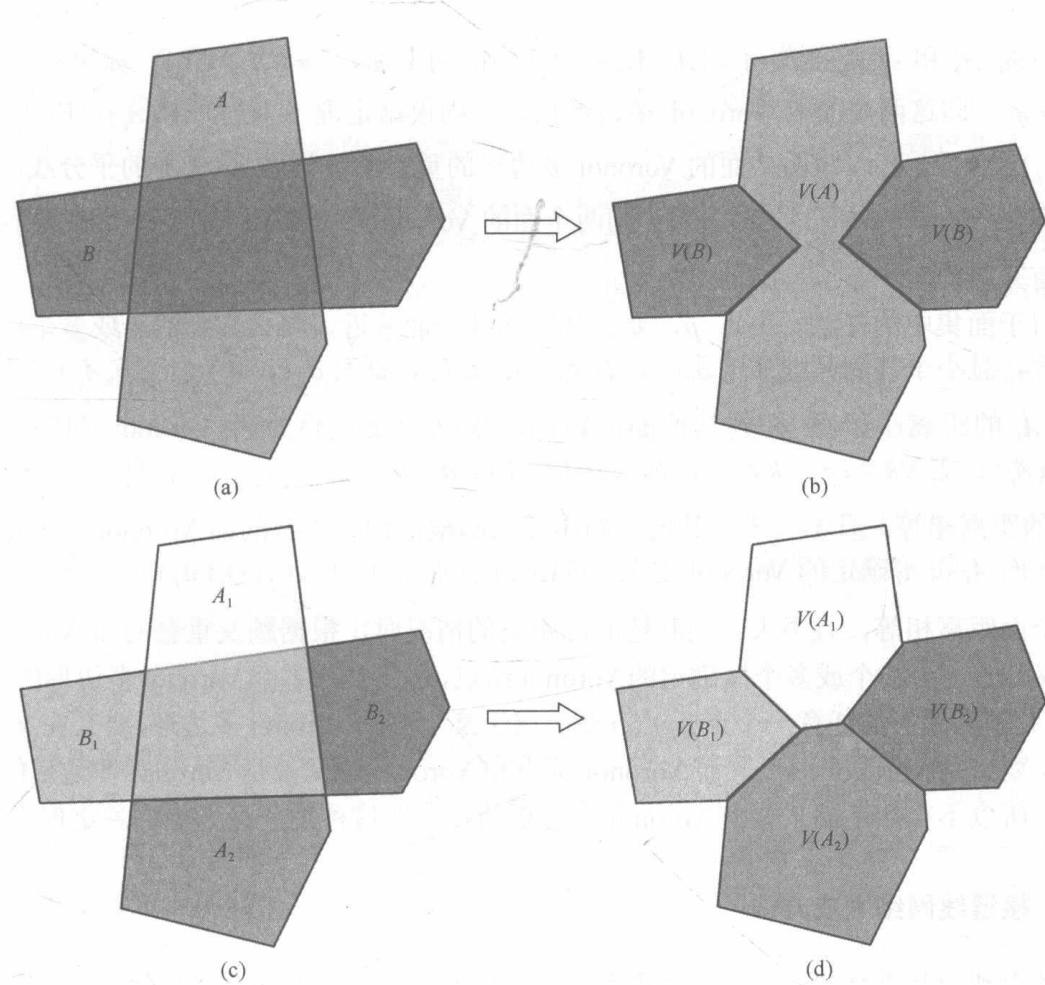


图 9-11 复杂重叠情况的分解及其 Voronoi 图

2. 性质

定理 9-1 如果两个面确定了一条 Voronoi 边，则该边为这两个面的平分线或其中的一部分；如果三个面确定了一个 Voronoi 顶点，则该顶点为这三个面相互之间的平分线的交点。

证明：设面 A_i 和 A_j 确定了一条 Voronoi 边，则根据上述定义有， $V_E(A_i, A_j) = V(A_i) \cap V(A_j) = B(A_i, A_j) \bigcap_{l \in I_n, l \neq j} V(A_i, A_l) \bigcap_{m \in I_n, m \neq i} V(A_j, A_m)$ ，则显然有， $V_E(A_i, A_j) \subseteq B(A_i, A_j)$ ，即 $V_E(A_i, A_j)$ 是这两个面的平分线或其中的一部分。

设面 A_i 、 A_j 和 A_k 确定了一个 Voronoi 顶点，则根据式(9-25)有， $V_V(A_i, A_j, A_k) = V_E(A_i, A_j) \cap V_E(A_i, A_k) \cap V_E(A_j, A_k)$ ，又根据前面的结论，于是有 $V_V(A_i, A_j, A_k) \subseteq B(A_i, A_j) \cap B(A_i, A_k) \cap B(A_j, A_k)$ ，因此 Voronoi 顶点是三个面相互之间的平分线的交点，得证。

定理 9-2 顾及重叠的面 Voronoi 图对面集覆盖范围的划分是唯一的，且这种划分是没有冗余的、无缝的。

证明：根据定义可知，除了 Voronoi 边上的点和 Voronoi 顶点，面集中任意一个点都唯一的属于与其距离最近的面，这种距离的定义是确定的，其具体大小是可以计算的，因此顾及重叠的面 Voronoi 图对面集覆盖范围的划分是唯一的。

设面 A_i 和 A_j 是面集 $A = \{A_1, A_2, \dots, A_n\}$ 中的两个面, $i \neq j, i, j \in I_n$, 如果 $V(A_i) \cap V(A_j) \neq \emptyset$, 即这两个面的 Voronoi 多边形相邻, 则根据定理 9-1 有, $V(A_i) \cap V(A_j) = V_E(A_i, A_j) \subseteq B(A_i, A_j)$, 即两个面的 Voronoi 多边形的重叠部分为面 A_i 与 A_j 的平分线或其中的一部分; 如果 $V(A_i) \cap V(A_j) = \emptyset$, 则两个面的 Voronoi 多边形没有重叠。因此这种划分是没有冗余的。

对于面集中的任意一个点 p , 要么其距离某个面最近, 要么其到两个或多个面的距离相等, 且小于其到其他面的距离。若 $\forall j \neq i, j \in I_n$, 都有 $d_a(p, A_i) < d_a(p, A_j)$, 即点 p 到面 A_i 的距离小于点 p 到其他面的距离, 根据顾及重叠的面 Voronoi 图的定义知 $p \in V(A_i)$; 若 $\forall k \neq i \neq j, k \in I_n$, 都有 $d_a(p, A_i) = d_a(p, A_j) \leq d_a(p, A_k)$, 即点 p 到面 A_i 和 A_j 的距离相等, 且不大于到其他面的距离, 则根据顾及重叠的面 Voronoi 图的定义知点 p 在面 A_i 和 A_j 确定的 Voronoi 边上, 即 $p \in V_E(A_i, A_j) = V(A_i) \cap V(A_j)$; 若点 p 到三个或多个面距离相等, 且不大于到其他面的距离的情况时, 根据顾及重叠的面 Voronoi 图的定义知点 p 为三个或多个面确定的 Voronoi 结点, 是三个或多个 Voronoi 多边形的交点。因此, 对于面集中的任意一个点 p , 点 p 要么属于某个面的 Voronoi 多边形, 要么在 Voronoi 边上, 要么是 Voronoi 顶点, 而 Voronoi 顶点和 Voronoi 边又都是 Voronoi 多边形的公共部分, 所以不存在不属于任何 Voronoi 多边形的点, 即这种划分是无缝的。定理得证。

9.3.2 接缝线网络生成方法

考虑到顾及重叠的面 Voronoi 图允许面之间具有重叠, 是对重叠区域归属的重新划分, 且这种划分是没有冗余的、无缝的, 比较符合影像镶嵌的需求, 本书基于顾及重叠的面 Voronoi 图进行初始接缝线网络的生成, 其生成的接缝线网络可对各影像覆盖范围进行有效的划分, 形成每幅影像的有效镶嵌多边形, 可保证镶嵌处理的灵活性与效率, 避免中间结果的产生, 处理结果也与影像的顺序无关。

接缝线网络是各单独的接缝线相互连接而形成的网络。它一方面起到了划分所有影像覆盖范围的作用, 确定各影像的有效镶嵌多边形; 另一方面, 它是随后进行的羽化处理(即沿接缝线的色彩过渡处理)的基础。基于顾及重叠的面 Voronoi 图进行接缝线网络的生成时, 根据各影像的有效范围生成 Voronoi 图, 各影像的有效镶嵌多边形就是生成的顾及重叠的面 Voronoi 图中各影像所属的 Voronoi 多边形, 其中的每一段接缝线也就是相邻 Voronoi 多边形的公共边。因此有效镶嵌多边形的确定, 也就是 Voronoi 多边形的生成。首先需要获取各影像的有效范围, 形成一个面集; 接着计算每两个重叠影像间的平分线(即面之间的平分线), 据此生成该面集的顾及重叠的面 Voronoi 图, 得到各影像所属的 Voronoi 多边形; 然后求出各 Voronoi 多边形之间的公共边, 即每段接缝线, 各段接缝线彼此相互连接就构成了初始的接缝线网络。

1. 确定影像的有效范围

获取的影像数据在进行几何纠正的过程中会经过一定的旋转, 但是由于影像必须按矩形存储, 旋转之后没有影像数据的地方一般用最小的灰度级或最大灰度级填充(对于 8

位影像，即用 0 或者 255 来进行填充）。所以影像文件的坐标范围并不代表该影像的实际有效范围，影像的四周会存在一些无效像素区域，即没有被影像内容所覆盖的区域。这些无效像素区域如果没有被排除在影像的有效范围内，会对后续镶嵌处理产生不利的影响。例如，生成的接缝线落入某幅影像的无效像素区域，则该影像的有效镶嵌多边形中也会存在这样的无效像素区域，这会使镶嵌结果中也存在一些不被影像内容所覆盖的无效像素区域，不能反映地物的真实情况。因此在进行接缝线网络生成之前，首先需要确定每幅影像的有效范围，将无效像素区域排除。

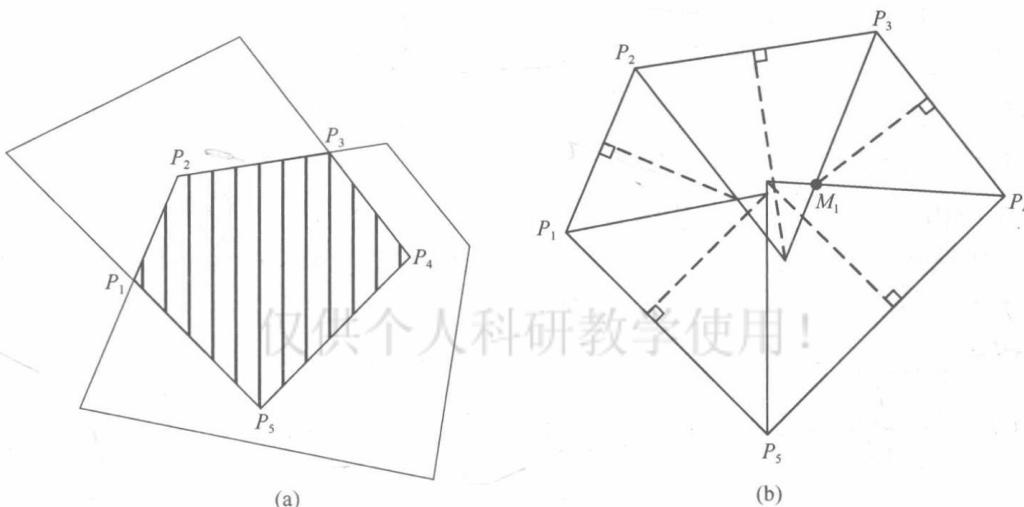
考虑到无效像素区域只位于影像四周的外围区域，本书首先采用边界跟踪的方法获得影像有效范围的外轮廓点集，然后为了减少 Voronoi 多边形生成时的复杂度与计算量，采用 Douglas-Peuker 算法对获得的外轮廓点集进行简化，进而进行凸包运算，获得的凸多边形作为影像近似的有效范围。影像有效范围的外轮廓点集采用边界跟踪方法获得，只涉及外侧边界的跟踪，不存在内侧边界的跟踪。边界跟踪基于 8 邻域进行，边界像素点的定义是在 4 邻域的像素中有一个以上的无效像素存在。

2. 计算重叠影像间的平分线

重叠影像是指影像的有效范围具有重叠区的影像。根据顾及重叠的面 Voronoi 图的定义知，重叠影像间平分线上的点到两影像非重叠部分的距离相等。由于两影像非重叠部分的边界也就是重叠区域的边界，因此这样的点实际上是属于重叠区域边界的中轴，也就是说重叠影像间的平分线是重叠区域多边形中轴的一部分。

在生成重叠影像间平分线时，对于重叠区域的凸多边形，采用了将复杂凸多边形逐步简化的思想，依次计算任意相邻三边的角平分线交点到中间边的距离，根据中轴点（即重叠影像间平分线的顶点）为到中间边距离最短的角平分线交点的原则，逐步确定中轴点，并对重叠区的凸多边形进行简化，直至简化为三角形，从而得到所有的中轴点，然后根据多边形顶点和中轴点、中轴点和中轴点的连通情况，采用二叉树遍历的方法，搜索得到重叠影像间的平分线。其生成方法是以矢量计算的方式来实现的，具体过程如下所述。

(1) 计算相邻影像有效范围的重叠区域，即求相邻影像有效范围凸多边形的公共部分，如采用多边形裁减算法；由于影像有效范围采用凸多边形表示，因此相邻影像有效范围重叠区域的多边形仍然为凸多边形。如图 9-12(a) 所示，设图 9-12(a) 中的一个四边



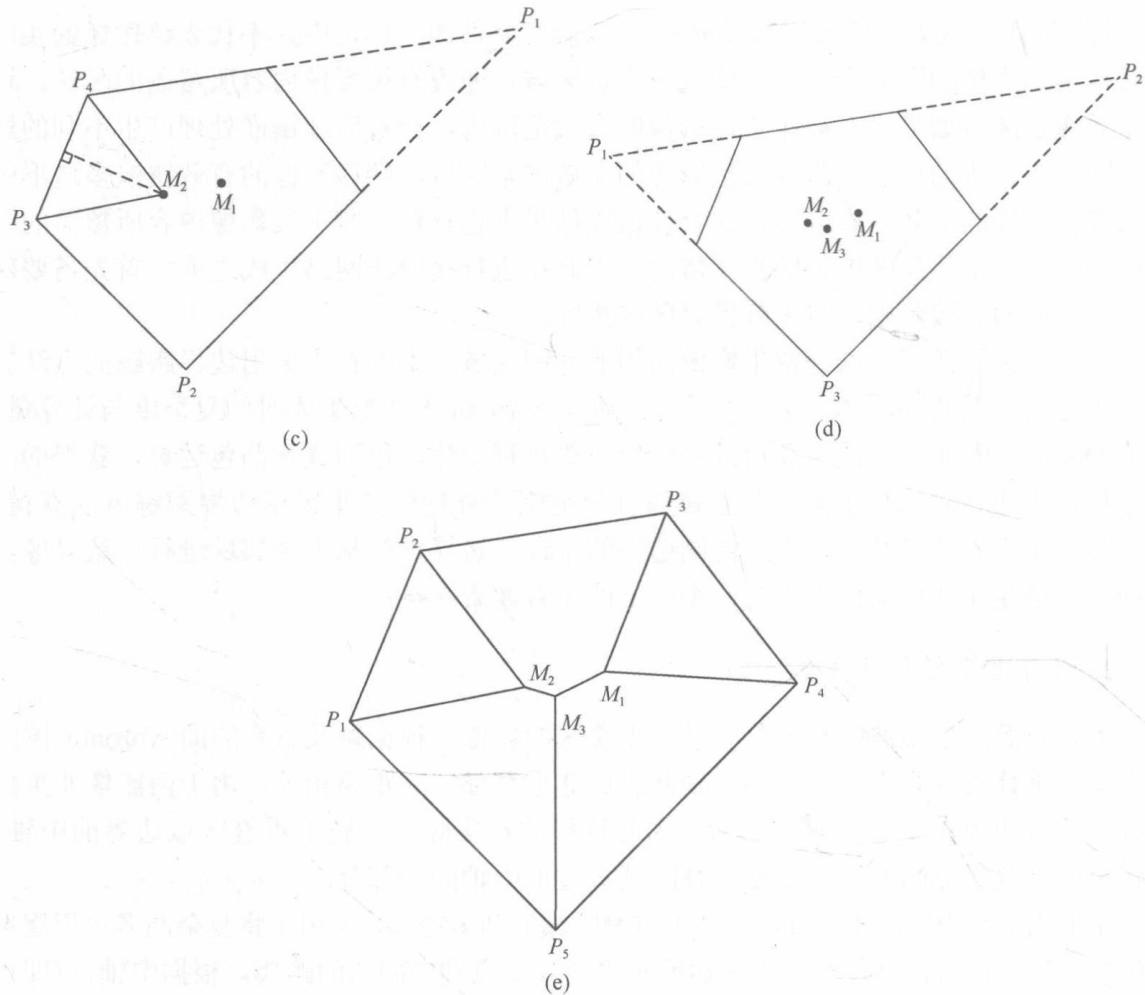


图 9-12 影像间平分线生成示意图

形和一个五边形分别表示两幅影像的有效范围，阴影区域表示两幅影像有效范围的重叠区，则该步骤就是要计算得到阴影区域的多边形，即凸多边形为 $\overline{P_1P_2P_3P_4P_5}$ 。

(2) 设相邻影像有效范围的重叠区域凸多边形为 $\overline{P_1P_2\cdots P_n}$ (n 表示边数)。首先计算任意相邻三边的角平分线交点到中间边的距离，将到中间边距离最短的角平分线交点设为 M_1 ；然后延长对应三边中的第一条边和第三条边并交于某一点，如果第一条边和第三条边是平行线，则规定第一条边和第三条边的延长线交于以第二条边为基准的多边形无边一侧的无穷远处；接着构建新的凸多边形，新的凸多边形去掉了 M_1 对应的三边中的中间边的两个顶点，加入了第一条边和第三条边延长线的交点；最后对新的凸多边形的顶点重新编号，得到新的凸多边形 $P_1P_2\cdots P_{n-1}$ 。

如图 9-12(b) 所示，对于相邻影像有效范围重叠区域的凸多边形 $\overline{P_1P_2P_3P_4P_5}$ ，经计算后，相邻三边 P_2P_3 、 P_3P_4 、 P_4P_5 计算得到的角平分线交点到中间边的距离最短，其对应的交点设为 M_1 ，然后延长 P_2P_3 和 P_4P_5 交于一点，接着构建新凸多边形，并对新凸多边形的顶点重新编号，得到新凸多边形 $\overline{P_1P_2P_3P_4}$ ，如图 9-12(c) 所示。

(3) 对于步骤(2)所得新的凸多边形，重复步骤(2)，依次得到相邻三边的角平分线交点到中间边距离最短的交点 M_2 ， M_3 ， \cdots ， M_{n-3} ，每得到一个交点就产生一个新的凸

多边形，直至新的凸多边形为三角形为止，取三角形内心作为最后一个交点 M_{n-2} ，将依次得到的交点 M_1 、 M_2 、 \dots 、 M_{n-2} 称为中轴点。

如图 9-12(c) 所示，对于新凸多边形 $P_1P_2P_3P_4$ ，相邻三边 P_2P_3 、 P_3P_4 、 P_4P_1 计算得到的角平分线交点到中间边的距离最短，其对应的交点设为 M_2 ，然后延长 P_2P_3 和 P_4P_1 交于一点，并得到新的凸多边形 $P_1P_2P_3$ ，如图 9-12(d) 所示，由于 $P_1P_2P_3$ 为三角形，因此最后取三角形 $P_1P_2P_3$ 的内心作为最后一个交点 M_3 ，这样便得到了图 9-12 所示重叠区凸多边形的所有中轴点 M_1 、 M_2 、 M_3 。

(4) 依据中轴点在相邻影像间的重叠区域凸多边形的顶点所在内角的角平分线上的性质，确定每个中轴点与重叠区域凸多边形各顶点之间的连通关系；同时依据中轴点到任意相邻三边中第一条边和第三条边距离相等的性质，确定各中轴点之间的连通关系。如图 9-12(e) 所示，对于中轴点 M_1 ，由于 M_1 分别在凸多边形 $P_1P_2P_3P_4P_5$ 顶点 P_3 、 P_4 所在内角的角平分线上，因此 M_1 与顶点 P_3 、 P_4 可连通，同理可知 M_2 与顶点 P_1 、 P_2 可连通， M_3 与顶点 P_5 可连通；对于中轴点 M_1 和 M_2 ，由于 M_1 到边 P_2P_3 和 P_4P_5 的距离相等，而 M_2 到边 P_2P_3 和 P_4P_5 的距离不相等，因此 M_1 、 M_2 不可连通，同理可知， M_1 、 M_3 可连通， M_2 、 M_3 可连通。

(5) 确定相邻影像间的分割线的起点和终点，确定方式：如果相邻影像有效范围凸多边形边界的交点为两个，则这两个交点分别为相邻影像间的分割线的起点和终点，如果相邻影像有效范围凸多边形边界的交点多于两个，则起点终点为距离最远的两个交点。如图 9-12(a) 所示，相邻影像有效范围凸多边形边界的交点为 P_1 和 P_3 ，因此相邻影像间的分割线的起点和终点分别为 P_1 和 P_3 。

(6) 根据步骤(4)所得重叠区域凸多边形的各顶点和中轴点、中轴点和中轴点的连通情况，以及步骤(5)所得相邻影像间的分割线的起点和终点，计算相邻影像间的分割线。如图 9-12(e) 所示，相邻影像间的分割线的起点和终点分别为 P_1 和 P_3 ，由于 P_1 和 M_2 可连通， M_2 和 M_3 可连通， M_1 和 M_3 可连通， M_1 和 P_3 可连通，因此相邻影像间的分割线为 $P_1M_2M_3M_1P_3$ 。

3. 生成 Voronoi 多边形

得到每两个重叠影像间的平分线之后，还需要在此基础上生成各影像所属的 Voronoi 多边形（即有效镶嵌多边形），形成 Voronoi 图，以对所有影像的有效范围进行划分。对每幅影像，在生成其所属的 Voronoi 多边形时，需要根据与其具有重叠的影像间的平分线，依次对其有效范围进行划分，具体生成过程如下所述。

(1) 依次计算重叠影像间的平分线。

(2) 计算各影像的有效镶嵌多边形，也就是各影像所属的 Voronoi 多边形。对一幅影像，依次用与其具有重叠的影像间的平分线去裁剪其有效范围。每次裁剪结果作为下一次裁剪操作的输入数据。这样一幅影像的有效范围就被不断划分形成一个多边形，即该影像所属的 Voronoi 多边形。例如，对某一影像 X ，设与影像 X 有重叠的相邻影像为 Y_1 、 $Y_2 \dots Y_N$ (N 为与影像 X 有重叠的相邻影像的个数)，依次用影像 X 与相邻影像 Y_1 、 $Y_2 \dots Y_N$ 间的平分线去裁剪影像 X 的有效范围。由于是采用影像间的平分线进行裁剪处理，因此

裁剪处理结果与顺序无关，依次用影像 X 与相邻影像 Y_1 、 $Y_2 \dots Y_N$ 间的平分线去裁剪时，相邻影像的顺序可以任意指定。每次裁剪时，以相邻影像有效范围的重叠区域为参考，确定相邻影像有效范围凸多边形边界的每个交点（相邻影像有效范围的交点）是出点还是入点，出点和入点成对出现，由入点开始沿平分线追踪，当遇到出点时跳转至影像有效范围的多边形继续追踪，如果再次遇到入点则跳转至平分线继续追踪；重复以上过程，直至回到起始入点，完成裁剪操作，得到当前裁剪影像 X 的有效范围；每次裁剪得到的有效范围作为下一次裁剪处理时影像 X 有效范围的输入数据，最后一次裁剪得到的有效范围作为影像 X 的有效镶嵌多边形，也就是影像 X 所属的 Voronoi 多边形。

图 9-13 给出了用影像间的平分线裁剪影像有效范围的示意图，其中影像 A 和影像 B 的有效范围为矩形，矩形中点的顺序为顺时针方向， a 和 d 点是两个影像有效范围的矩形的交点，折线段 $abcd$ 是两影像间的平分线。当用平分线去裁剪影像 A 的有效范围时，对重叠区域 $a-A_2-d-B_4$ 而言， a 点是入点， d 点是出点。从入点 a 开始追踪，沿平分线 $a \rightarrow b \rightarrow c \rightarrow d$ ，由于 d 点是出点，转至影像的有效范围的多边形继续追踪， $d \rightarrow A_3 \rightarrow A_4 \rightarrow A_1 \rightarrow a$ ，回到初始的入点 a ，追踪结束，得到裁剪结果多边形 $a \rightarrow b \rightarrow c \rightarrow d \rightarrow A_3 \rightarrow A_4 \rightarrow A_1 \rightarrow a$ 。同理，当平分线 $abcd$ 去裁剪影像 B 的有效范围时，可得裁剪结果多边形为 $a \rightarrow b \rightarrow c \rightarrow d \rightarrow B_3 \rightarrow B_2 \rightarrow B_1 \rightarrow a$ 。图 9-14 给出了有效镶嵌多边形生成的示意图，图 9-14(a) 左侧为三幅影像 A 、 B 、 C 的有效范围排列示意图，三幅影像之间相互重叠，虚线 S_{AB} 、 S_{AC} 、 S_{BC} 分别为三幅影像间的分割线，图 9-14(a) 右侧为生成的有效镶嵌多边形的示意图；

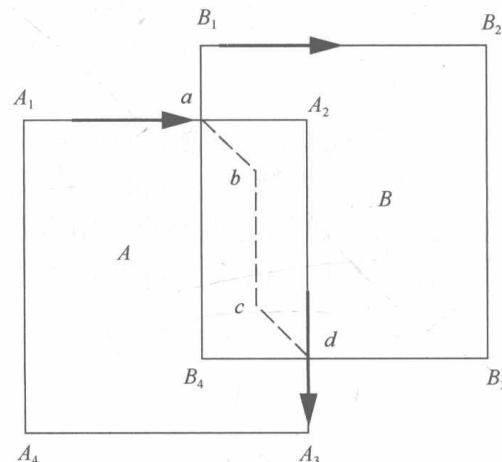
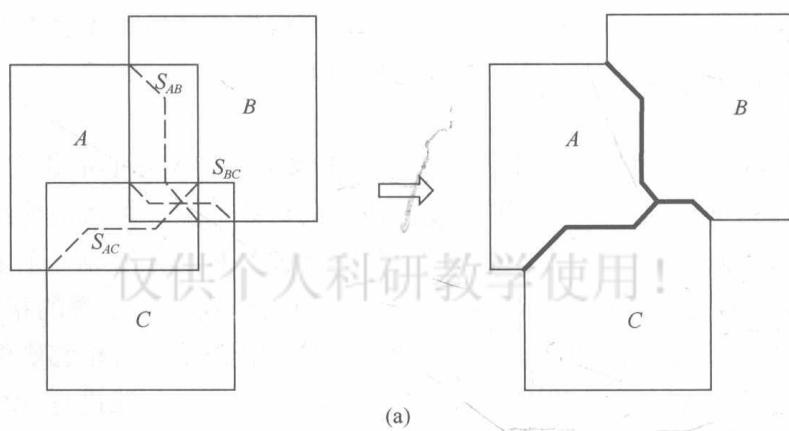


图 9-13 裁剪示意图



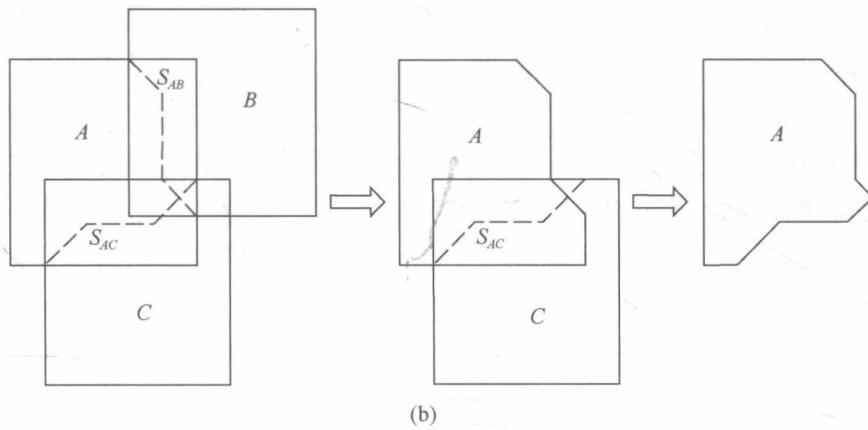


图 9-14 有效镶嵌多边形生成示意图

图 9-14(b)进一步说明了影像 A 的有效镶嵌多边形的生成过程，生成影像 A 的有效镶嵌多边形需要影像 AB 之间的分割线 S_{AB} 和影像 AC 之间的分割线 S_{AC} ，影像 A 的有效范围首先被 S_{AB} 裁剪，得到的结果多边形再被 S_{AC} 裁减，就得到了影像 A 的有效镶嵌多边形，即影像 A 所属的 Voronoi 多边形。

(3)生成接缝线网络。对每幅影像都按上一步的操作进行裁剪处理，计算出每幅影像所属的 Voronoi 多边形，这样就形成了整个区域的 Voronoi 图，所有影像的有效范围就被分割成互不重叠的 Voronoi 多边形，即有效镶嵌多边形。计算所有相邻的有效镶嵌多边形之间的公共边，每一条公共边作为两个相邻的有效镶嵌多边形所属的影像之间的接缝线。得到所有的有效镶嵌多边形之间的公共边就得到了各段接缝线，所有的接缝线彼此连接就形成了接缝线网络，它实际上是所有 Voronoi 多边形中除开影像有效范围边界的 Voronoi 边的集合。

在 Voronoi 多边形的生成过程中，第 2 步用重叠正射影像间的平分线去裁剪正射影像的有效范围时，裁剪操作参考多边形裁剪算法(Weiler and Atherton, 1977)，其主要思想是：对某一正射影像有效范围的多边形，用其与相邻影像间的平分线对其进行裁剪时，以重叠区域为参考来确定出点和入点，出点和入点成对出现，由入点开始沿平分线追踪，当遇到出点时跳转至影像有效范围的多边形继续追踪，如果再次遇到入点则跳转至平分线继续追踪。重复以上过程，直至回到起始入点，即完成了裁剪操作，追踪到的点即为裁剪结果多边形。通过以上步骤生成接缝线网络之后就可以在此基础上进行镶嵌处理，可以方便地得到每幅影像中对镶嵌有贡献的像素，每幅影像涉及的接缝线，以及与每段接缝线相关的影像，便于直接生成镶嵌结果，并可以保证镶嵌的灵活性与效率，避免误差的累积和中间结果的产生，且处理结果与影像的顺序无关。

在获得初始的接缝线网络之后，还需在此基础上同时构建每段接缝线与 Voronoi 多边形(也就是有效镶嵌多边形)、影像，以及重叠区域之间的拓扑关系、从属关系，即确定每段接缝线相邻的有效镶嵌多边形，每个有效镶嵌多边形所属的影像，以及每段接缝线所属的重叠区域，每个重叠区域相关的影像等，便于后续的镶嵌处理步骤。由于采用了这种顾及重叠的面 Voronoi 图，这些接缝线与 Voronoi 多边形、重叠区域，以及影像之间的拓扑关系、从属关系等都变得很容易构建。

不过，这样获得的接缝线网络是从几何意义上对整个镶嵌范围进行的划分，就每一段接缝线而言，并没有考虑到影像的内容，并不是最优的接缝线。影像之间可能存在的辐射差异，在纠正过程中由于所使用 DEM 的因素也会存在投影差现象（使某些地物在重叠区存在几何差异，如建筑物），如果接缝线穿越了辐射差异较大区域，或者存在投影差的区域，就会影响镶嵌影像的质量。因此，对于初始的接缝线网络，还需要基于影像内容进行优化，使接缝线尽可能位于辐射差异最小的部分，并且避免穿越存在几何差异的地物。

接缝线网络优化是为了使生成的接缝线能够避免穿越影像重叠部分差异较大的区域，尽可能避免穿越典型地物目标，保持典型地物目标的完整性。接缝线网络自动优化包括 Voronoi 顶点（也就是多条单独的接缝线的交点）的优化和 Voronoi 边（接缝线）的优化，主要是基于影像重叠区域的差异，以及搜索策略来实现的。

9.3.3 Voronoi 顶点的优化

Voronoi 顶点的优化在相应的多度重叠区域内进行，寻找多幅影像间差异最小的像素。假定 Voronoi 顶点位于 n 度重叠区域 A ，也就是说存在 n 幅 ($n \geq 3$) 影像，它们具有共同的重叠区，像素 (x, y) 是 n 度重叠区域中的一个像素，则该像素处 n 幅影像间的差异定义为

$$D(x, y) = \max_{i, j=1, \dots, n, i \neq j} D_{ij}(x, y) \quad (9-26)$$

式中， $D_{ij}(x, y)$ 为影像 i 和影像 j 在像素 (x, y) 处的差异，其定义如下：

$$D_{ij}(x, y) = \max_{k=1, \dots, c} |F_i^k(x, y) - F_j^k(x, y)| \quad (9-27)$$

式中， k 为影像的波段序号； c 为波段数； $F_i^k(x, y)$ 为影像 i 在像素 (x, y) 处的辐射值。

优化后的 Voronoi 顶点为

$$V(x, y) = \min_{(x, y) \in A} D(x, y) \quad (9-28)$$

9.3.4 Voronoi 边的优化

Voronoi 边就是接缝线，Voronoi 边的优化就是单接缝线的优化，其实上是一个从起点到终点的路径寻找问题，即要寻找一条影像间差异尽可能小的路径。起点与终点是 Voronoi 顶点或者影像有效范围边界间的交点。设影像 m 为左影像，影像 n 为右影像，则每条路径的代价定义为

$$f(PS) = \max \sum D_{mn}(x, y), \quad (x, y) \in PS \quad (9-29)$$

接缝线的优化就是寻找一条从起点到终点代价最小化的路径 PS 。其中 $D_{mn}(x, y)$ 是影像 m 和影像 n 在像素 (x, y) 处的差异。

在进行单接缝线优化时，就可以采用现有众多文献针对两幅影像接缝线优化提出的方法。通常是采用一定的测度计算重叠区域各像素的代价，然后采用一定的搜索策略选择一条代价最小的路径作为优化后的镶嵌线。像素直接差值和基于相关系数的差异表达是比较常用的计算重叠区像素代价的方法。在接缝线优化策略方面，本书首先基于 Bottleneck 模型 (Fernandez et al., 1998) 确定出接缝线的候选像素区域，然后采用基于差分代价的 Dijkstra 算法在候选像素区域进一步搜索代价最小的路径作为最终优化后的接缝线。

1) 基于相关系数的差异表达

相关系数计算，即

$$\rho = \frac{\sum_{i=1}^5 \sum_{j=1}^5 (X[i, j] - \bar{X}) \cdot (Y[i, j] - \bar{Y})}{\sqrt{\sum_{i=1}^5 \sum_{j=1}^5 (X[i, j] - \bar{X})^2 \cdot \sum_{i=1}^5 \sum_{j=1}^5 (Y[i, j] - \bar{Y})^2}} \quad (9-30)$$

式中， $\bar{X} = \frac{1}{25} \sum_{i=1}^5 \sum_{j=1}^5 X[i, j] = \frac{1}{25} \sum_{k=1}^{25} X[k]$; $\bar{Y} = \frac{1}{25} \sum_{i=1}^5 \sum_{j=1}^5 Y[i, j] = \frac{1}{25} \sum_{k=1}^{25} Y[k]$; $X[k]$ ($k=1, 2, \dots, 25$) 为重叠区域中左影像 m 某像元处 5×5 模板序列; $Y[k]$ ($k=1, 2, \dots, 25$) 为右影像 n 对应像元处 5×5 模板序列。由相关系数计算而得的值在 $[-1, 1]$ 之间，影像之间相关性越大(即相似性)越大，相关系数越大，因此在用于差异表达时采用下式作一个转换：

$$D_{mn}(x, y) = (1 - \rho) / 2.0 \quad (9-31)$$

这样定义的差异为 $[0, 1]$ 之间，应用到接缝线优化时，通常不足以使接缝线避开这些差异大的点，因此需要适当的加大高差异和低差异之间的差距 (Chon et al., 2010)：

$$D_{mn}(x, y) = \text{Power}((1 - \rho) / 2.0, \alpha), \quad \alpha > 1 \quad (9-32)$$

2) 基于 Bottleneck 模型的最小化最大差异优化

最小化最大差异优化目的是在使局部值极大值极小化的前提下进行路径搜索，采用的是 Bottleneck 模型，即使路径中的最大差异最小化，从而获得接缝线搜索的候选像素区域。处理思路可以用降水位模型来描述：首先，将差异表达视为的地貌，点位像素坐标(行列号)表示该点平面坐标，该点差异值(代价值)表示高程；然后给定阈值 T ，假设 T 对应水平面高度，则差异值在 T 以下的点处于“水平面”以下，而最小化最大限制就是找最低水平面 T 满足起止点之间有“水路”。当 T 减少，即水位降低时，连通起止点的水路越来越少，最小化最大限制就是逐渐降低水位直至不能再降低，即再降低时找不

出连通起止点的水路。也就是说通过不断降低最大差异值，找到最小化的最大差异值，使得从起点至终点间仍然有连通路径，此时确定的最大差异值也就是优化后接缝线的最大差异值。

为了提高搜索的效率，可采用二分算法。设搜索路径代价（差异值）的上限值和下限值分别为 g 和 h （对于8位的影像数据，最糟糕的情况取值分别为0和255），当前搜索值 z 是搜索区间的中点，即 $z=(g+h)/2$ 。首先依据起点和终点，在左右影像的重叠区域内寻找代价为 z 的路径是否存在。如果存在，则搜索路径代价的上限值变为 z ；如果不存在，则搜索路径代价的下限值变为 $z+1$ 。搜索最大次数不会超过 $\log_2^{(h-g)}$ ，对于8位的影像数据，搜索不会超过8次即可找到最小化的最大差异值。重叠区域中所有差异值不大于确定的最大差异值的像素即为进一步接缝线搜索的候选像素区域（Fernandez et al., 1998; Chon et al., 2010）。

3) 基于差分代价的最短路径搜索

根据Bottleneck模型确定的接缝线最大差异值后，就可以确定接缝线的候选像素区域。在候选像素区域内，采用基于差分的最短路径算法搜索最终的接缝线。在用最短路径算法进行搜索时，不直接使用像素的代价值，而是采用相邻像素代价值的差值（即差分）进行，是为了确保接缝线的走向尽量沿差异较小的区域，同时也尽量避免穿越多种地物特征。其计算方法如下式所示：

$$d_{uv,kl} = |D(u,v) - D(k,l)| \quad (9-33)$$

式中， (u,v) 和 (k,l) 为相邻的两个像素； $D(u,v)$ 和 $D(k,l)$ 分别为像素 (u,v) 和 (k,l) 计算的代价值。令 $\text{NBR}(u,v)$ 为像素 (u,v) 的邻接像素组成的集合； $\text{Cost}(u,v)$ 和 $\text{Cost}(k,l)$ 分别为起始点到像素 (u,v) 和 (k,l) 的最短路径值，则 $\text{Cost}(u,v)$ 的最短路径值如下式所示：

$$\text{Cost}(u,v) = \min \{d_{uv,kl} + \text{Cost}(k,l); (k,l) \in \text{NBR}(u,v)\} \quad (9-34)$$

由于差异矩阵中相邻像素的差值反映了相邻像素差异的增量变化以及这种变化的趋势，对于差异本身不敏感，因此更适合接缝线的优化，也更合理。而且，如果起点和终点具有相近的差值，搜索得到的接缝线可能会属于同种地物特征，这样也有助于接缝线避免穿越多种地物特征。

9.4 基于接缝线网络的影像镶嵌及应用

在获得优化后的接缝线网络后，即可以根据接缝线网络进行影像镶嵌处理，获得最终的无缝镶嵌影像。对于每幅正射影像，根据其有效镶嵌多边形，将有效镶嵌多边形内的像素写入到镶嵌结果影像中的相应位置，丢掉有效镶嵌多边形之外的像素，然后沿着接缝线进行羽化处理，消除明显的接缝，就可以获得无缝的镶嵌影像。比较有代表性的羽化方法有多尺度羽化方法（Burt and Adelson, 1983）、强制改正法（朱述龙和钱曾波，

2002), 以及基于梯度场的方法(Zomet et al., 2006)等。在进行镶嵌写入像素的同时, 可根据大区域整体相对辐射校正处理计算的参数同时进行大区域整体相对辐射校正, 从而提高处理效率。

在进行实际的镶嵌处理时, 具体流程如图 9-15 所示。

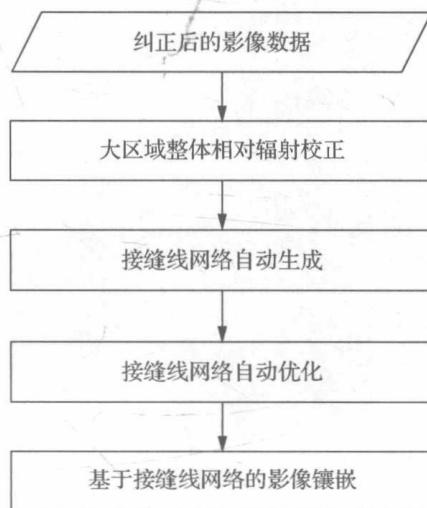
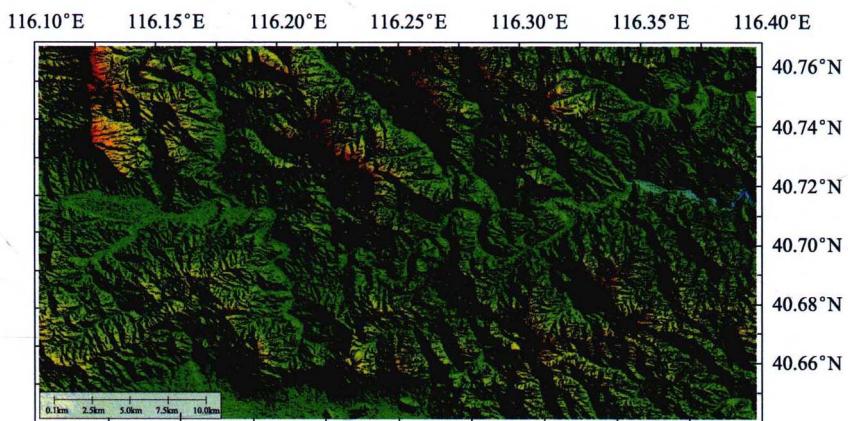


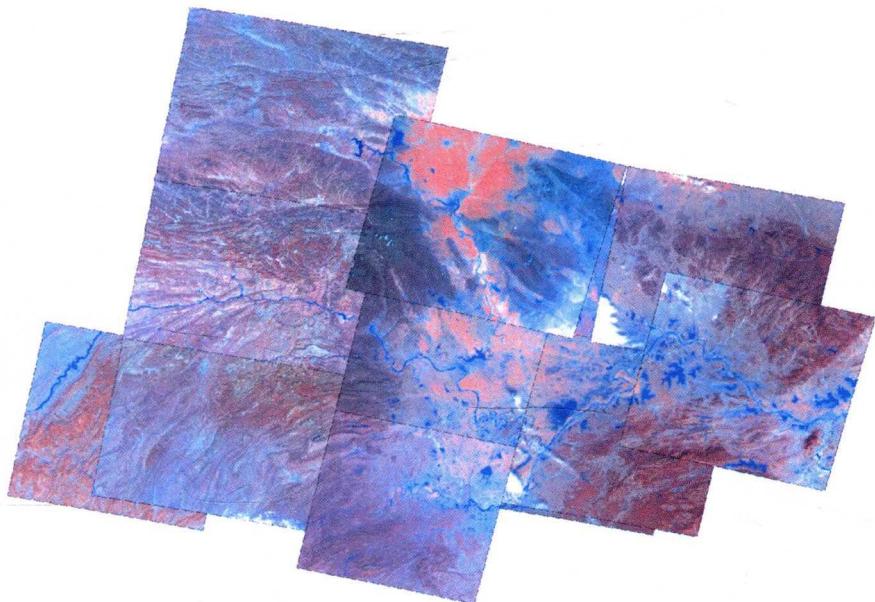
图 9-15 大区域卫星影像镶嵌流程图

图 9-16 给出了覆盖湖北省的高分一号 16m 分辨率多光谱影像的镶嵌实验。图 9-16(a) 是正射纠正后的高分一号影像数据按坐标排列的示意图, 显示波段为近红外、红、绿波段。显然镶嵌处理前不同景影像数据由于获取时间差异、成像角度差异, 以及其他内外部因素的影响, 不同景影像之间存在明显的辐射差异, 不同轨的影像间的辐射差异更为明显。图 9-16(b) 是根据各景影像的有效范围, 基于顾及重叠的面 Voronoi 图生成的接缝线网络的示意图。其中的每一个多边形表示一个有效镶嵌多边形, 即 Voronoi 多边形, 所有 Voronoi 多边形构成了整个 Voronoi 图, 相邻 Voronoi 多边形的公共边就是一段接缝线, 所有接缝线, 以及接缝线与 Voronoi 多边形之间的拓扑关系就构成了接缝线网络。由于生成的接缝线网络是从几何意义上对整个镶嵌范围进行的划分, 就每一段接缝线而言, 它们没有考虑到影像的内容, 并不是最优的接缝线, 从图中也可以看出接缝线基本都是由直线段构成, 因而如果直接基于这样的接缝线进行影像镶嵌, 当其穿越色差较大区域时, 影像间的辐射差异不一定能够很好的消除。图 9-16(c) 是基于影像间重叠区域的像素值进行优化后的接缝线网络, 优化过程是基于计算的重叠区域像素差异进行的, 使得接缝线尽量沿着差异较小区域, 这样有助于提高影像镶嵌质量。这样就可以采用优化后的接缝线网络对图 9-16(a) 所示的高分一号多光谱影像数据进行基于接缝线网络的影像镶嵌, 在镶嵌处理的同时进行大区域整体相对辐射校正以消除影像间的辐射差异, 最终得到的镶嵌结果如图 9-16(d) 所示, 显示波段为近红外、红、绿波段。从图 9-16(d) 可以看出, 经过镶嵌处理后, 不同景影像之间存在的明显辐射差异已被消除。

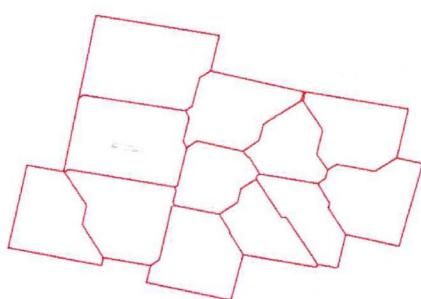


(b) 山地

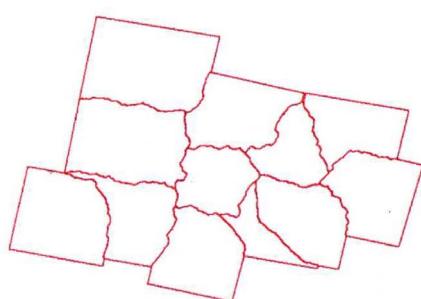
图 8-12 局部地区 DSM 示意图



(a) 镶嵌处理前

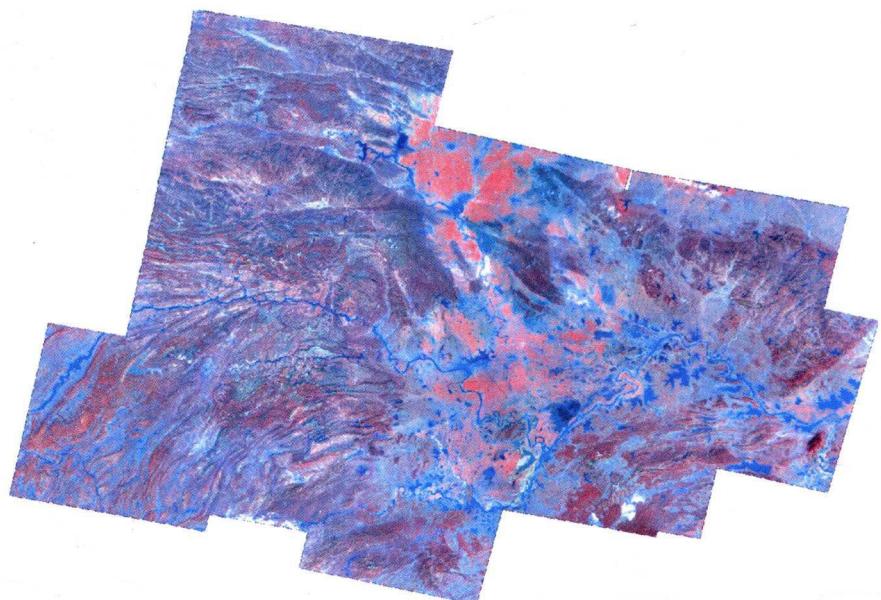


(b) 生成的接缝线网络



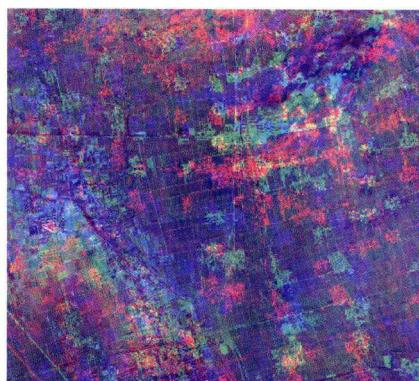
(c) 优化后的接缝线网络

仅供个人科研教学使用!



(d) 镶嵌结果

图 9-16 高分一号卫星影像镶嵌实验



(a) 波段配准前



(b) 波段配准后

图 10-10 资源三号卫星多光谱影像波段配准效果图

9.5 本章小结

本章对大区域高分辨率光学卫星遥感影像镶嵌所面临的不同景影像辐射差异问题，以及镶嵌效率与镶嵌影像质量问题展开了论述。针对不同景影像辐射差异问题，介绍了一种基于线性模型的整体处理方法，通过优化影像间的邻接关系，减少影像间关系的传递次数等措施提高相对辐射校正的效果。针对镶嵌效率问题，介绍了顾及重叠的面 Voronoi 图的理论与生成方法，并将其用于镶嵌过程中接缝线网络的生成。针对镶嵌影像的质量问题，在基于顾及重叠的面 Voronoi 图生成的接缝线网络的基础上，介绍了基于接缝线网络的优化方法，以及基于接缝线网络的影像镶嵌方法。最后用高分一号遥感影像数据进行了实验验证。

参 考 文 献

- 孙明伟. 2009. 正射影像全自动快速制作关键技术研究. 武汉: 武汉大学博士学位论文.
- 袁胜古, 王密, 潘俊, 胡芬, 李东阳. 2015. 航空影像接缝线的分水岭分割优化方法. 测绘学报, (10): 1108-1116.
- 袁修孝, 段梦梦, 曹金山. 2015. 正射影像镶嵌线自动搜索的视差图算法. 测绘学报, (8): 877-883.
- 张剑清, 孙明伟, 张祖勋. 2009. 基于蚁群算法的正射影像镶嵌线自动选择. 武汉大学学报(信息科学版), 34(6): 675-679.
- 朱述龙, 钱曾波. 2002. 遥感影像镶嵌时拼接缝的消除方法. 遥感学报, 183-187.
- 左志权, 张祖勋, 张剑清, 曹辉. 2011. DSM 辅助下城区大比例尺正射影像镶嵌线智能检测. 测绘学报, 40(1): 84-89.
- Aurenhammer F. 1991. Voronoi diagrams—A survey of a fundamental data structure. ACM Computing Surveys, 23: 345-405.
- Aurenhammer F, Klein R. 2000. Voronoi diagrams. In: Sack J, Urrutia J. Handbook of Computational Geometry, Elsevier, Amsterdam, 201-290.
- Burt P J, Adelson E H. 1983. A multiresolution spline with application to image mosaics. ACM Trans Graph, 2: 217-236.
- Canty M J, Nielsen A A, Schmidt M. 2004. Automatic radiometric normalization of multitemporal satellite imagery. Remote Sensing of Environment, 91 (3): 441-451.
- Canty M J, Nielsen A A. 2008. Automatic radiometric normalization of multitemporal satellite imagery with the iteratively re-weighted MAD transformation. Remote Sensing of Environment, 112 (3): 1025-1036.
- Chandelier L, Martinoty G. 2009. Radiometric aerial triangulation for the equalization of digital aerial images and orthoimages. Photogrammetric Engineering and Remote Sensing, 75 (2): 133-146.
- Chen Q, Sun M, Hu X, Zhang Z. 2014. Automatic seamline network generation for urban orthophoto mosaicking with the use of a digital surface model. Remote Sensing, 6 (12): 12334-12359.
- Chon J, Kim H, Lin C S. 2010. Seam-line determination for image mosaicking: A technique minimizing the maximum local mismatch and the global cost. ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing, 65 (1): 86-92.
- Du Y, Cihlar J, Beaubien J, Latifovic R. 2001. Radiometric normalization, compositing, and quality control for satellite high resolution image mosaics over large areas. IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing, 39 (3): 623-634.

仅供个人科研教学使用!

- Fernandez E, Garfinkel R, Arbiol R. 1998. Mosaicking of aerial photographic maps via seams defined by bottleneck shortest paths. *Operations Research*, 46 (3) : 293-304.
- González-Piqueras J, Hernández D, Felipe B, Odi M, Belmar S, Villa G, Domenech E. 2010. Radiometric Aerial Triangulation Approach. A case study for the Z/I DMC. *Proceedings of EuroCOW*, Castelldefels, Spain, February 10-12.
- Guindon B. 1997. Assessing the radiometric fidelity of high resolution satellite image mosaics. *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*, 52 (5) : 229-243.
- Hong G, Zhang Y. 2008. A comparative study on radiometric normalization using high resolution satellite images. *International Journal of Remote Sensing*, 29 (2) : 425-438.
- Kerschner M. 2001. Seamline detection in colour orthoimage mosaicking by use of twin snakes. *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*, 56 (1) : 53-64.
- López D H, García B F, Piqueras J G, Alcázar G V. 2011. An approach to the radiometric aerotriangulation of photogrammetric images. *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*, 66 (6) : 883-893.
- Leng L, Zhang T Y, Kleinman L, Zhu W. 2007. Ordinary least square regression, orthogonal regression, geometric mean regression and their applications in aerosol science. *Journal of Physics: Conference Series*, 78.
- Li L, Yao J, Lu X, Tu J, Shan J. 2016. Optimal seamline detection for multiple image mosaicking via graph cuts. *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*, 113: 1-16.
- Mills S, McLeod P. 2013. Global seamline networks for orthomosaic generation via local search. *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*, 75: 101-111.
- Nielsen A A. 2007. The regularized iteratively reweighted MAD method for change detection in multi- and hyperspectral data. *IEEE Transactions on Image Processing*, 16 (2) : 463-478.
- Okabe A, Boots B, Sugihara K. 1994. Nearest neighborhood operations with generalized Voronoi diagrams: A review. *International Journal of Geographical information Systems*, 8: 43-71.
- Okabe A, Boots B, Sugihara K, Chiu S N. 2000. *Spatial Tesselations: Concepts and Applications of Voronoi Diagrams*. New York: John Wiley & Sons.
- Pan J, Wang M, Ma D, Li J. 2014. Seamline network refinement based on area voronoi diagrams with overlap. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 52 (3) : 1658-1666.
- Pan J, Wang M, Li D, Li J. 2009. Automatic generation of seamline network using area voronoi diagrams with overlap. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 47 (6) : 1737-1744.
- Pan J, Wang M, Li J, Yuan S, Hu F. 2015. Region change rate-driven seamline determination method. *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*, 105: 141-154.
- Paparoditis N, Souchon J P, Martinoty G, Pierrot-Deseilligny M. 2006. High-end aerial digital cameras and their impact on the automation and quality of the production workflow. *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*, 60 (6) : 400-412.
- Schott J R, Salvaggio C, Volchok W J. 1988. Radiometric scene normalization using pseudo-invariant features. *Remote Sensing of Environment*, 26: 1-16.
- Soille P. 2006. Morphological image compositing. *IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence*, 28 (5) : 673-683.
- Wan Y, Wang D, Xiao J, Lai X, Xu J. 2013. Automatic determination of seamlines for aerial image mosaicking based on vector roads alone. *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*, 76: 1-10.
- Weiler K, Atherton P. 1977. Hidden surface removal using polygon area sorting. *Proceedings of the SIGGRAPH' 77*, New York: ACM Press: 214-222.

- Yu L, Holden E J, Dentith M C, Zhang H. 2012. Towards the automatic selection of optimal seam line locations when merging optical remote-sensing images. International Journal of Remote Sensing, 33(4): 1000-1014.
- Yuan D, Elvidge C D. 1996. Comparison of relative radiometric normalization techniques. ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing, 51(3): 117-126.
- Zomet A, Levin A, Peleg S, et al. 2006. Seamless image stitching by minimizing false edges. Image Processing, IEEE Transactions on, 15(4): 969-977.

仅供个人科研教学使用!