

无有效重叠区域的 SAR 图像拼接方法

郑世友 周 晔

(中国航空工业集团公司雷达与电子设备研究院第六研究室, 无锡 214063)

摘 要 机载 SAR 雷达在成像时,由于受各种随机噪声因素的影响,在其所生成的相邻图像帧间存在小的重叠、断裂或者错位,因此常常不能提取出满足独特性要求的特征子图像。针对此类 SAR 图像序列的拼接,给出了一种新的无有效重叠区域的 SAR 图像拼接方法,该方法先利用图像特定点地理坐标以及载机航迹角进行粗拼接;然后提取邻接处附近的显著线状特征,同时对这些特征进行较精确的匹配定位;最后对拼接处的像素灰度进行融合,以避免出现明显的接缝。实验结果表明,新方法在进行无有效重叠区域的 SAR 图像拼接时,取得了较好的拼接效果。

关键词 合成孔径雷达图像 线状特征 斑点噪声 图像拼接 机载合成孔径雷达

中图法分类号: TP391.41, TP751.1 文献标识码: A 文章编号: 1006-8961(2009)10-2054-07

A Novel Mosaic Method for SAR Image Sequences with Deficiency of Overlap Portion

ZHENG Shi-you, ZHOU Ye

(The Six Laboratory, Radar and Avionics Institute of Aviation Industry Corporation of China, Wuxi, 214063)

Abstract It is usually difficult to extract feature regions from two successive frames of SAR imagery which lack overlapping portion, because the effects of different random noise during the flight when forming SAR images. A new mosaic method for this sort of SAR sequential imagery is presented. Firstly, the flight information of the plane and geographical coordinates of several feature points in SAR images are used to conduct a rough match. And then, a detailed approach based on remarkable linear features extracted in adjacent areas of two images is used to determine the corresponding positions of two images, which can subtly mosaic the sequential images. Finally, the gray levels between two stitched images are fused to eliminate the remarkable seam. Experimental results testify that this algorithm is able to seamlessly stitch two successive images automatically.

Keywords SAR images, linear feature, speckle, image mosaic, airborne SAR

1 引 言

由于受成像设备的物理限制,通常需要将不同角度的多帧图像进行拼接融合,才能反应广角场景的全貌。军事上,合成孔径雷达(SAR)情报系统需要构造全景图时,就需要平滑无缝的拼接融合技术的支持。为了节省载机资源,以尽可能多地获取情报信息,理想的相邻的 SAR 图像帧间应没有重

叠、没有断裂和错位,但是由于载机受各种随机噪声因素的影响,其不是沿理想的水平直线匀速飞行,因此它所生成的 SAR 图像就可能存在小的重叠、断裂或者错位。通常将这类由于待拼图像帧的重叠区域过小或没有重叠而无法提取满足独特性要求的子部分序列,称为无有效重叠区域的图像序列,因此需要研究特殊的处理方法,方能使拼接后的图像取得较好的视觉效果。

目前国内外对图像拼接技术的研究主要是针对

光学图像^[1-4],通常采用的方法有特征无关的方法^[1-2]和基于特征的方法^[3-4]两类。其中特征无关的方法是首先建立描述两幅图像相似程度的方差函数,这个函数中包含两幅图像的变换参数;然后通过求得此函数的最小值来确定图像间的变换关系。这类方法虽不依赖于图像中的明显特征,但它要求一幅图像到另一幅图像的变换(平移、旋转等)的幅度要小,另外,变换参数初值的估计对方法的效果也有很大的影响。基于特征的方法是首先找出图像中的特征点(如边界、拐点),并确定图像间特征点的对应关系;然后利用这种对应关系找到两幅图像间的变换关系。

总的说来,这些方法都要求待拼接帧间具有一定的重叠区域,它们之间的差异在于子图像相似性的定义、判断方法以及相似子图像的搜索方法不同。但是在现有的文献中尚未见到适合无有效重叠区域的图像序列的拼接方法报道。特别是受 SAR 成像机制带来的固有斑点噪声影响,传统的针对光学图像的处理方法常常会失去作用,使拼接变得更加困难。

虽然无有效重叠区域的 SAR 图像拼接存在很多难题,但是对于 SAR 信息情报处理这种特定的应用场景来说,待拼接图像帧存在以下一些有利于拼接的特点:(1)在相邻的图像帧间,距离向的偏移量很小,可以将它的偏移搜索限定在很小范围,以减少计算量;(2)对于 SAR 图像来说,由于不受光照、昼夜等易变条件的影响,如果采用相同的量化方法,则其相邻帧间的灰度变化比较小,因而有利于接缝处图像灰度平滑;(3)帧间旋转比较小,并且可以预知其变化范围;(4)由于 SAR 图像独特的成像方式,不用考虑图像的变焦放缩。因此可以认为,相邻图像帧间的共有部分的子图像只有平移和轻微旋转,没有几何变形。

本文对无有效重叠区域的 SAR 图像序列进行了研究,提出了一种新的 SAR 图像拼接方法。该方法先利用图像特定点的地理坐标以及载机航迹角进行粗拼接;然后通过提取邻接处附近的显著特征(本文只考虑明显的线状特征)来对这些特征进行精拼接;最后通过对拼接处的像素灰度进行融合来避免出现明显的接缝,以改善视觉效果。实验结果表明,这种方法可以生成拼接效果良好的 SAR 条带图像。

2 帧间重叠区域判断

由于载机在相邻 SAR 图像帧的成像期内飞行平稳,并且成像时采用了平台稳定和运动补偿技术,可以近似地认为在相邻帧的成像期间,其是匀速直线飞行,因此 SAR 图像相邻帧间也只有平移和轻微旋转,且图像间不考虑放缩变化;假设距离向为竖直方向,方位向为水平方向。

拼接时,首先根据成像时的载机参数确定图像特定点的地理坐标,并据此判断待拼接帧是否是相邻帧,以完成粗匹配;然后再判断相邻帧间是否存在有效重叠区域。对于如何根据载机参数确定图像的特定点坐标,可在相关文献[5]中找到,本文不再详述。

本文是采用基于曲线匹配的方法来判断待拼接帧间是否存在有效重叠区域,详细判断方法如下:

(1) SAR 图像预处理

由于 SAR 图像相干斑对图像拼接过程中的子图像的相似性定义和选择有很大的负面影响,因此在拼接前应尽可能地对它进行抑制。通常可以根据预知的重叠区域范围(如方位向的重叠区域不超过整个方位向的 25%,距离向的重叠区为整个距离向)来确定需要进行滤波的图像区域,以减少滤波的计算量。滤波可以选用经典的 Lee 滤波^[6]、Kuan 滤波^[7]或者 Frost 滤波^[8]等,也可以采用其他新颖的滤波器^[9]。其选取的原则为在平滑斑点噪声的同时,尽量减少图像细节的损失。

(2)按列的梯度最大点和两条曲线的相似程度进行匹配^[3]

将待拼接的左、右两幅图像分别记为 I_L, I_R , 图像的宽和高分别为 W_L, W_R 和 H_L, H_R , 取图像的左上角作为图像坐标的原点。对于每幅图像,首先求出图像每一列的梯度最大的点,并记录该点的纵坐标。其中,对于图像中的任意一点 (i, j) , 梯度值由下式给出:

$$\nabla I(i, j) = \left(\left(\frac{I(i+1, j) - I(i-1, j)}{2} \right)^2 + \left(\frac{I(i, j+1) - I(i, j-1)}{2} \right)^2 \right)^{1/2} \quad (1)$$

$I(i, j)$ 是图像 I 中点 (i, j) 的灰度值。这样即可得到两个宽度分别为 W_L 和 W_R 的数列 G_L 和 G_R , 其元素是对应于图像中该列上梯度最大点的纵坐

标,根据这两个数列就可得到反映两幅图像按列的最大梯度特征点分布的两条曲线。在确定每列的梯度最大点时,需遵循以下原则:

① 当该列中的梯度最大点有两个或两个以上时,则取离图像的水平中线距离最近的点作为该列的梯度最大点;

② 当两个点离图像的水平中线的距离相等时,则取上方的点作为该列的梯度最大点。若两幅图像具有重叠的公共部分,则意味着这两条曲线中的某一段具有很好的相似性,所以,确定图像的匹配位置就是在两条曲线中各寻找一段等长的曲线,使它们的相似程度在所有其他可能的组合中是最好的。这样,就把对 2 维图像的匹配问题转化为对 1 维曲线的匹配问题。

在图像成像过程中,难免会发生倾斜、平移等运动。由于这样会使两幅图像对应列中的两个梯度最大点的纵坐标有很大出入,致使曲线产生强烈的锯齿效应。本文采用文献[3]介绍的方法消除这种干扰。接下来的工作就是对两条曲线进行匹配,并且不需额外的计算就可同时确定匹配点的横纵坐标。

由于两幅图像的重叠部分一般不超过 25%, 所以为减小计算量,可先只在左图像的右半部分和右图像的左半部分进行计算,即算法的循环起始位置为左图像的垂直中线和右图像的最左端;然后确定两条曲线中相似性最好的两段。这两段的起始位置,也就是两幅图像的最佳匹配点。在代表左、右图像的两个数列中分别取一长度为 l 的子数列,记为 \mathbf{V}_L 和 \mathbf{V}_R 。 \mathbf{V}_L 和 \mathbf{V}_R 的相似程度 $S_l(\mathbf{V}_L, \mathbf{V}_R)$ 可由 \mathbf{V}_L 和 \mathbf{V}_R 的方差来描述,即

$$S_l(\mathbf{V}_L, \mathbf{V}_R) = \sigma_l(\mathbf{V}_L - \mathbf{V}_R) \quad (2)$$

其中方差为

$$\sigma_l(\mathbf{V}_L - \mathbf{V}_R) = \sum_{i=1}^l [(V_L[i] - V_R[i]) - \bar{V}]^2$$

$$\bar{V} = \sum_{i=1}^l (V_L[i] - V_R[i]) / l。$$

$S_l(\mathbf{V}_L, \mathbf{V}_R)$ 越小,说明 \mathbf{V}_L 和 \mathbf{V}_R 越相似。那么必然可以找到这样的 \mathbf{V}_L^0 和 \mathbf{V}_R^0 ,使得

$$S_l(\mathbf{V}_L^0, \mathbf{V}_R^0) = \min_{\substack{\mathbf{V}_L \subset G_L \\ \mathbf{V}_R \subset G_R}} \{S_l(\mathbf{V}_L, \mathbf{V}_R)\} \quad (3)$$

\mathbf{V}_L^0 和 \mathbf{V}_R^0 的起始位置就是在长度 l 下两幅图像的最佳匹配位置的横坐标。由于数列 G_L 和 G_R 中的元素值是按列的梯度最大点的纵坐标排列的,所以,在确定了列的匹配位置的坐标时候,也同时确定

了行的匹配位置。文献[3]对如何确定 l 的最优值进行了比较详尽的描述。

当确定的 l 只有几个像素长度,其最小相似度为

$S_l^{\min} = \min_{i \in Z} \{S_l^{(i)}(\mathbf{V}_L^0, \mathbf{V}_R^0) / Z_i\} \geq T$ 时,则认为图像帧间无有效重叠区域,其中 Z 为长度 l 的取值集合, Z_i 为第 i 个 l 值。

3 无有效重叠区域图像拼接方法

当重叠区很小时,由于不能选取出能与其他图像部分有明显不同的特征子图像,或者因最大梯度曲线段的点数过少,因此曲线匹配结果不可信。当有轻微断裂时,由于需要对属于具有明显特征的目标像素点的灰度值进行一定外推,以便使拼接后的接缝处的典型特征目标完整连续,因此拼接难点在于如何获取帧间的准确运动参数(平移和旋转)、外推平滑有断裂后的特征点的灰度以及建立特征连续性的评价准则等。

本文给出的无有效重叠区域的图像拼接方法主要涉及如下几项关键技术:(1)线段提取;(2)不同图像帧的线特征配对;(3)精拼接方法;(4)有轻微断裂时的典型线特征的外推。

3.1 线特征提取

由于 SAR 特殊的成像机制带来的相干斑噪声,造成针对光学图像的传统线段检测方法^[10](如差分算子、Canny 算子、Prewitt 算子等)在处理 SAR 图像时效果很不好,因此本系统采用由 Touzi 和 Lopes 等人提出的均值比率(ratio-of-averages, RoA)算子^[11-12]来检测 SAR 图像的阶跃型边缘。RoA 算法是一种通过计算相邻两区域的均值比来确定目标像素是否为边缘点的算法。该方法利用的是相邻区域的强度均值,由于其降低了因斑点噪声而引起的单个像素的强度波动,因此可以获得比较可靠的线特征结果。为了减少计算量,这里只提取左图的一定区域内的右部分和右图的一定区域内的左部分的线特征。原算法是通过比较 4 个相邻方向区域来完成(如图 1 所示),而对图像拼接的特定应用来说,可以不提取 90°方向的线段,而增加其他方向的模板数量,其中 c 为中心像素点,其坐标为 (x, y) 。设 $L(x, y)$ 和 $R(x, y)$ 分别为左、右图像中点 (x, y) 沿某一个方向的左、右相邻区域的平均灰度值,则均值比率的估计为

$$RoA(x, y) = \max \{ R(x, y) / L(x, y), L(x, y) / R(x, y) \} \quad (4)$$

然后将 $RoA(x, y)$ 与预先确定的阈值 T_1 进行比较,如果满足

$$RoA(x, y) > T_1 \quad (5)$$

则认为点 (x, y) 为边界点。Touzi 和 Lopes 等人从数学上推导出了 $RoA(x, y)$ 的解析形式^[11],而且在给定虚警率的条件下,即可以确定相应的阈值。

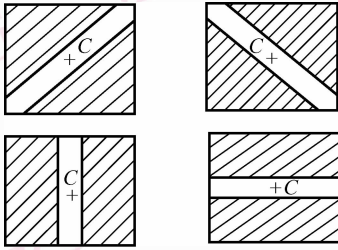


图 1 RoA 检测算子
Fig. 1 RoA detector

然后将提取的线片段组织成有意义的线特征。对于如何组织线特征,学术界已经提出了很多方法^[12-15],如启发式连接、Hough 变换、相位编组等,但在设计或选取组织线特征方法时,应在考虑算法有效性的同时,也要考虑算法的时效性。

3.2 图像帧间线特征配对

一般来说,位于待拼接左图像中的最右狭小区域内的稳定线特征(平行于距离向的线特征除外),其在右图像左半部分中应有后续部分,而线特征正好止于拼接处的概率极小,因此此处可以忽略。

线段配对后可忽略如下几种特殊线特征:①止于图像接缝处线特征;②在接缝处发生突变的线特征;③太短的线特征;④竖直线特征。也就是说,这几类线特征都可认为是虚假特征。

不同帧间的线特征配对方法如下:

拟合左图像候选拼接区域内的线特征,记剔除③、④两类后的表征线段的函数集合为 $L_L = \{f_1^L, f_2^L, \dots, f_m^L\}$,同样拟合右图像中的线特征,记线段函数集合为 $L_R = \{f_1^R, f_2^R, \dots, f_n^R\}$ 。设 \hat{d} 为 L_L 沿方位向右向外推扩展的点数(\hat{d} 为负数时,为左向缩减),如果 f_i^L 和 f_j^R 满足

$$|f_j^R(0) - f_i^L(N + \hat{d})| < T_2 \quad (6)$$

则称 $C_{\hat{d}}(i, j) = \{f_j^R, f_i^L\}$ 为在扩展点数为 \hat{d} 时的一个候选配对。其中 N 为图像方位向的总点数。

如果 f_i^L 可以和 L_R 中的 s ($1 < s \leq n$) 个线段

$\{f_1^R, f_2^R, \dots, f_s^R\}$ 构成配对,则选取第 j 条线段 f_j^R 和第 i 条线段 f_i^L 构成有效配对, j 按如下条件选取:

$$j = \arg \min_{j=1}^s \left\{ \frac{1}{D_j} \sum_{x_R=0}^{D_j-1} |f_j^R(x_R) - f_i^L(N + \hat{d} + x_R)| \right\} \quad (7)$$

其中, $\arg(*)$ 为取参数操作, D_j 为线段 f_j^R 中参与比较的点数, x_R 为右图像中线段 f_j^R 的 x 坐标值。

如果 f_i^L 只能和 L_R 中的 1 个线段 f_j^R 构成配对,则它们就是有效配对。处理时,已经获得有效配对的线段就不再参与新的配对。

在给定的范围内改变 \hat{d} 的值,即取 d 为可使 L_L 和 L_R 中的线段有效配对数量最大的 \hat{d} 值,记此时的有效配对的数量为 m_c (下角 c 代表 counterpart) ($(m_c \leq m) \cap (m_c \leq n)$),由 f_j^R, f_i^L 组成的第 k 个配对的集合为 $C_d(k, i, j) = \{f_j^R(x_R, k), f_i^L(x_L, k)\}$,则有效配对集合为 $C_d = \{C_d(k, i, j)\}_{k=1}^{m_c}$ 。而没有有效配对的线特征,则作为虚假特征,不予处理。

3.3 图像精拼接方法

当通过优化算法求取出最大有效线段配对集合 C_d 及其对应的外推扩展参数 d (即外推扩展点数)后,则可以 d 作为拼接基准来对待拼接图像进行精细拼接,拼接思路是使选定的能量函数最小。设 Δx 为最终拼接点与外推扩展参数 d 的偏差, Δy 为最终拼接图像沿距离向的错位,定义能量函数为

$$E(d, \Delta x, \Delta y, x_R) = \frac{1}{m_c} \sum_{k=1}^{m_c} \left(\sum_{x_R=0}^{D_j-1} \omega(x_R) \left| f_i^L(N + d + \Delta x + x_R, k) - f_j^R(x_R, k) - \Delta y \right|^2 \right) \quad (8)$$

求解

$$(\Delta \bar{x}, \Delta \bar{y}) = \arg \min_{(\Delta x, \Delta y)} [E(d, \Delta x, \Delta y, x_R)] \quad (9)$$

则左图中的点 $(N + d + \Delta \bar{x}, M/2)$ 与右图中的点 $(0, M/2 - \Delta \bar{y})$ 为拼接时的对应基准点。其中,由于连续图像错位很小,因此可将 $\Delta \bar{y}$ 限定在很小范围内; D_j 为 f_j^R 中参与比较的点数, $\omega(x_R)$ 是按 x_R 递减的离散权重函数,其取值范围在 $(0 \sim 1)$ 之间,且满足如下条件:

$$\sum_{x_R=0}^{D_j-1} \omega(x_R) = 1 \quad (10)$$

$$0 \leq \omega(x_R) \leq 1 \quad (11)$$

本系统选取的权重函数为以下线性形式:

$$\omega(x_R) = -kx_R + b \quad x_R = 0, 1, \dots, D_j - 1 \quad (12)$$

$$\omega(D_j - 1) = 0 \quad (13)$$

联立式(10)~式(13)可以得

$$k = \frac{2}{(D_j - 1)(D_j)} \quad (14)$$

$$b = \frac{2}{D_j} \quad (15)$$

但是对于如图 2 所示的特殊情形(阴影为断裂部分),由于线特征的变化正处于图像帧间的断裂处,因此使用上述能量函数最小的优化原则,不能获得准确的偏差量($\Delta\tilde{x}, \Delta\tilde{y}$),从而会带来一定的拼接误差,幸运的是:工程实践表明,这种误判率是在工程可接受的范围内。

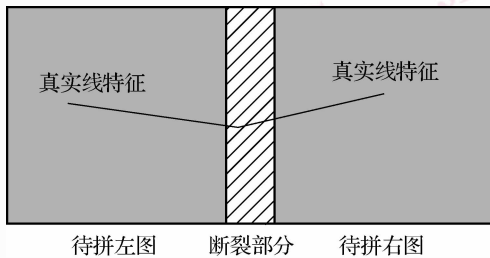


图 2 精拼接造成误处理的特殊情况

Fig. 2 Special case which could not be treated accurately by minimizing the energy function

3.4 有轻微断裂时典型线特征外推

当 $(d + \Delta\tilde{x}) > 0$ 时,则预示相邻图像帧间存在断裂,需根据接缝处的图像进行平滑外推,以避免出现明显的裂缝。对于线段的有效配对 $C_d(k_{i,j}) = \{f_j^R(x_R, k), f_i^L(x_L, k)\}$,首先将 $f_j^R(x_R, k)$ 的点变换到拼接后的对应位置,然后联合 $f_i^L(x_L, k)$ 上的点重新进行拟合,并用新拟合出的线段来外推断裂处线特征的所在位置;最后即可对所有的有效配对进行类似处理。断裂区间内线段上的灰度值需要与原待拼接图像中的线段对应的灰度值进行融合后填补;而断裂区域的其他部分则用相邻部分的灰度值融合后填补。

3.5 接缝处的灰度融合

由于相邻图像帧间的灰度总会存在一些差异,虽然 SAR 图像没有光学图像那么明显,但是还是足以在图像拼接处产生灰度不连续现象,这将会影响生成的条带图像效果。目前已有许多方法用来解决这一问题。本系统采用 Szeliski 提出的方法^[1],因其简单有效。在这个方法中,两幅图像重合部分中的任意一点 p 的灰度值为

$$g(p) = \frac{\xi(x)\xi(y)g_L(x,y) + \xi(\tilde{x})\xi(\tilde{y})g_R(\tilde{x},\tilde{y})}{\xi(x)\xi(y) + \xi(\tilde{x})\xi(\tilde{y})} \quad (16)$$

其中, $g_L(x,y), g_R(\tilde{x},\tilde{y})$ 是点 p 在两幅图像中的对应点 $(x,y), (\tilde{x},\tilde{y})$ 的灰度值。 $\xi(*)$ 是线性权重函数,在图像的中心取值为 1,而在图像边缘取值为 0。

整个拼接算法流程如图 3 所示:

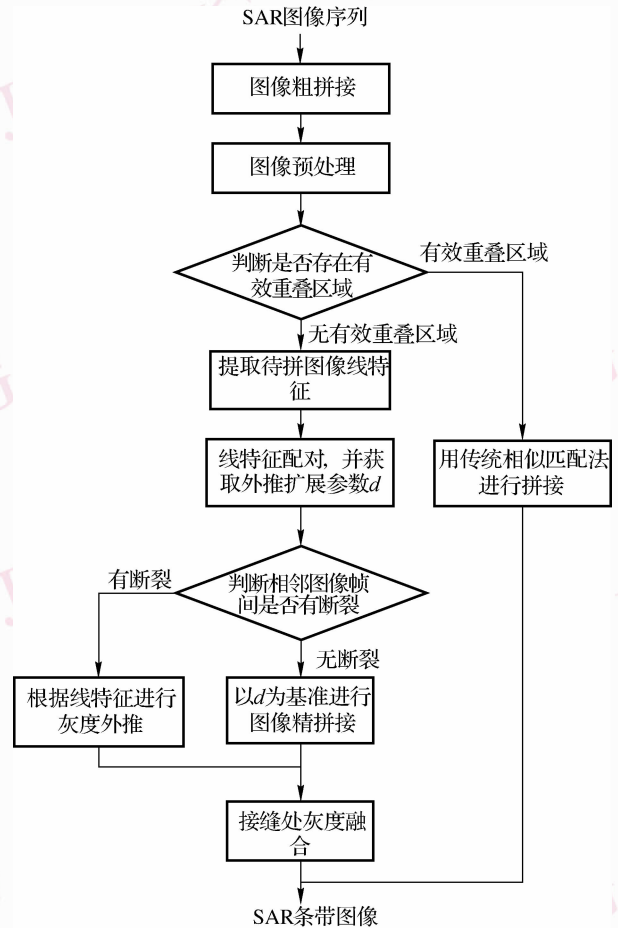


图 3 无有效重叠区域图像拼接流程图

Fig. 3 Flow chart of stitching SAR image sequence which lacks overlap portion

4 实验与分析

为验证本文新拼接算法的有效性,选用了实际飞行的连续两帧 SAR 图像进行了拼接处理实验。其中图 4(a)为待拼接左图,图 4(b)为待拼接右图。两图的待拼接处存在两组明显的线特征(如图 4 中的 1,2 箭头所指处)。

由于两帧图像的重叠区域很小,不能选取出满足独特性要求的特征子图像,因此传统的拼接方法

只能直接将它们对接。图 5(a)为将待拼接图像直接对接后的图像,由该图可以看出,在拼接处,1(1')和 2(2')号线特征存在明显错位(详见图5(a)中椭圆内的部分),而其他线特征因为接近水平方向,所以

以拼接错位效果表现不明显。图 5(b)为采用本文新算法拼接后的图像,由该图可以看出,图5(a)中的错位现象得到了较好的改善,在拼接处几乎看不到错位现象。

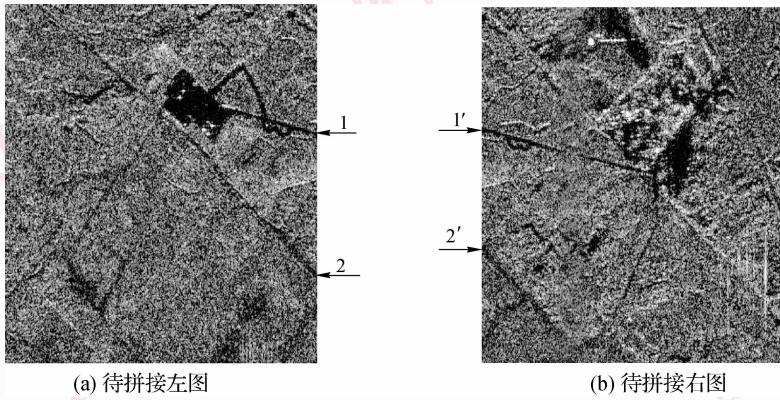


图 4 待拼接原图像
Fig. 4 Original image

拼接错位线特征

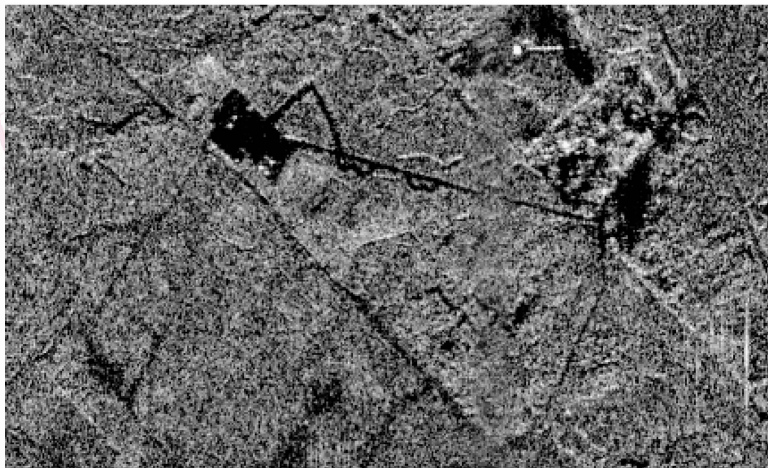
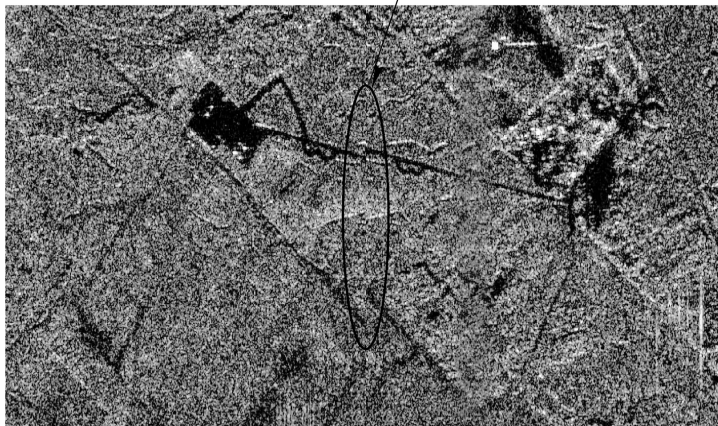


图 5 拼接对比试验结果

Fig. 5 Experimental results of using different methods

5 结 论

本文对无有效重叠区域的 SAR 图像的拼接技术进行了探索性研究,给出了一种适合工程实现的方法,较好地解决了此类 SAR 图像的拼接问题。但是本文方法仍存在以下技术风险:首先,由于这种方法需比较紧密地依赖于 SAR 图像线特征的提取,因此线特征的提取、组织以及拟合结果的好坏,将直接影响拼接的成败;其次,在进行精拼接时,采用的能量函数,由于没有考虑线特征在拼接处突变的特殊情况,因此使其最小化时可能会带来误判,但这种误判率是在工程可接受的范围内。

参考文献 (References)

- 1 Szeliski R. Video mosaics for virtual environments [J]. *Computer Graphics and Applications*, 1996, **16**(2):22-30.
- 2 Szeliski R, Shum H. Creating full view panoramic image mosaics and environment maps [A]. In: *Proceedings of SIGGRAPH'97* [C], Los Angeles, California, USA, 1997: 251-258.
- 3 Feng Jing-bo, Su Zhi-xun, Liu Xiu-ping. A similar-curve based automatic mosaic algorithm of panoramic image [J]. *Chinese Journal of Computer*, 2003, **26**(11): 1604-1608. [封靖波,苏志勋,刘秀平.一种基于相似曲线的全景图自动拼接算法[J].*计算机学报*, 2003, **26**(11): 1604-1608.]
- 4 Zhao Xiang-yang, Du Li-min. An automatic and robust image mosaic algorithm [J]. *Journal of Image and Graphics*, 2004, **9**(4): 417-422. [赵向阳,杜利民.一种全自动稳健的图像拼接融合算法[J].*中国图象图形学报*, 2004, **9**(4): 417-422.]
- 5 Shen Ting. Studies on geocoding system for airborne SAR image based on INS/GPS data [J]. *Journal of Electronics and Information Technology*, 2001, **23**(1): 68-74. [沈汀.基于 INS/GPS 数据的机载 SAR 图像地理编码系统研究[J].*电子与信息学报*, 2001, **23**(1): 68-74.]
- 6 Lee Jong-sen. A simple speckle smoothing algorithm for synthetic aperture radar images [J]. *IEEE Transactions on System, Man, and Cybernetics*, 1983, **13**(1): 85-89.
- 7 Kuan D T, Sawchuk A A, Strand T C, *et al.* Adaptive noise smoothing filter for images with signal-dependent noise [J]. *IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence*, 1985, **7**(3): 165-177.
- 8 Frost Victor S, Stiles Josephine Abbott. A model for radar images and its application to adaptive digital filtering of multiplicative noise [J]. *IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence*, 1982, **4**(2): 157-165.
- 9 Foucher S, Béné G B, Boucher J M. Multiscale MAP filtering of SAR images [J]. *IEEE Transactions on Image Processing*, 2001, **10**(1): 49-60.
- 10 Canny J. A computational approach to edge detection [J]. *IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence*, 1986, **8**(2): 679-698.
- 11 Touzi R, Lopes A. A statistical and geometrical edge detector for SAR images [J]. *IEEE Transactions on Geosciences Remote Sensing*, 1988, **26**(6): 764-773.
- 12 Lopes A, Nezry E, Touzi R. Structure detection and statistical adaptive speckle filtering in SAR images [J]. *International Journal of Remote Sensing*, 1993, **14**(9):1735-1758.
- 13 Tupin F, Maître H, Mangin J F, *et al.* Detection of linear features in SAR images: Applications to road network extraction [J]. *IEEE Transactions on Geosciences Remote Sensing*, 1998, **36**(3): 434-453.
- 14 Bentabet Layachi, Jodouin Sylvie, Ziou Djemel, *et al.* Road vectors update using SAR imagery: A snake-based method [J]. *IEEE Transactions on Geosciences and Remote Sensing*, 2003, **41**(8): 1785-1803.
- 15 Czerwinski R N, Jones D L, O'Brien W D. Line and boundary detection in speckle images [J]. *IEEE Transactions on Image Processing*, 1998, **12**(7): 1700-1713.