

长基线的机载重轨 InSAR 影像配准方法^①

董小桐^{②*} 韩春明^{③**} 岳昔娟^{***} 赵迎辉^{***}

(* 中国科学院遥感与数字地球研究所 北京 100094)

(** 三亚中科遥感研究所 三亚 572029)

(*** 中国科学院大学 北京 100049)

摘 要 在长基线条件下,机载干涉合成孔径雷达(InSAR)系统重轨测量时由于载机飞行高度和姿态不稳定而偏离理想航迹,导致重轨影像对之间产生相对形变,同名像元对应的地面分辨单元大小不一致,从而造成的高精度配准困难,无法进行干涉处理。通过高精度相对定位,将辅影像按照主影像空间大小重采样,即从 SAR 成像精准几何关系出发,第一步利用少量地面控制点数据对初始斜距和航高进行标定,第二步通过高精度相对定位,计算主影像像元的同名像元的辅影像坐标,并将辅影像按照主影像空间大小重采样。实验采用机载 C 波段 VV 极化 SAR 重轨数据,分辨率为 0.5m。结果表明,该方法适用于长基线机载重轨 SAR 影像的配准。

关键词 长基线,机载重轨雷达,干涉合成孔径雷达(InSAR),影像配准

0 引言

机载重轨干涉合成孔径雷达(repeat-pass interferometric synthetic aperture radar, RP-InSAR)^[1-3]测量是地形测绘、地表活动监测以及地表微量形变测量的重要手段。相较于星载 RP-InSAR,具有测量精度高、灵活性强等优势,并可为星载 SAR 提供测试验证。机载 InSAR 重轨测量时,由于气流不稳等因素的影响,载机飞行过程中会产生位置偏移和姿态变化,受位置与姿态测量精度的限制,雷达天线相位中心位置和雷达波束指向精度仍有一定误差,运动补偿后主辅影像之间会存在不规则的相对形变。主辅影像同名像元对应地距大小不一致,在长基线条件下,从 SAR 影像近距端到远距端,地距大小不一致程度逐渐加大,导致配准失败。

SAR 影像干涉配准方法^[4-14]通常为基于灰度信

息的配准方法,如相关函数法^[15]和序贯相似性检测算法(sequential similarity detection algorithm, SS-DA)^[16];基于变换域信息的配准方法,如傅里叶梅林算法(FMT)^[17,18]和频谱极大值法^[19]。这些配准方法通常都仅仅针对主辅影像较为相近的配准,在主辅影像上等间距选取一定数量的同名点,建立影像对之间的配准测度函数,并通过该函数获取这些点在辅影像上的偏移量,建立变换模型,然后利用某种搜索算法,寻找出使得该测度函数达到最优值的变换模型参数。这些算法难以确定搜索窗口大小。机载 SAR 由于侧视成像,斜距影像不同距离行的像元对应不同地距,且存在主辅影像同名像元对应地距大小不一致现象,在长基线条件下,主辅影像同名像元偏离大,配准搜索窗口设置过小和过大,均容易产生错误匹配,且计算量过大,有效匹配点数少。机载重复轨道影像在多项式拟合后残差值可以达到数个像元,引入新的误差。而基于特征的配准方法,如

① 国家重点研发计划(2016YFB0502502)和海南省重点研发计划(ZDYF2016006)资助项目。
② 女,1993 年生,硕士;研究方向:机载 SAR/InSAR 成像和影像处理;E-mail: dongxt@radi.ac.cn
③ 通信作者,E-mail: hancm@radi.ac.cn
(收稿日期:2017-09-07)

尺度不变特征变换 (scale-invariant feature transform, SIFT) 算法^[20,21], 虽然不受搜索窗口大小的限制, 但由于其特征向量的提取和匹配都严重依赖于主方向, 即使不大的偏差也可能造成特征匹配的放大误差, 而且相干成像机制会使 SAR 影像受到斑点噪声的严重污染, 严重降低该类算法的配准精度。RD 构像模型^[22]具有明确的几何和物理意义, 符合 SAR 成像机理^[23], 可根据飞机位置和速度进行直接地理定位。因此本文提出了一种针对机载重轨 InSAR 影像的配准方法, 利用 POS 数据和少量地面控制点坐标, 基于 RD 定位模型解算每景影像航高和初始斜距改正值, 统一到同一坐标系下, 并将辅影像按照主影像空间大小重采样。本研究用图 1 为正侧视成像的机载重轨 C 波段 VV 极化 0.5m 分辨率的 SAR 影像, 配准精度达到像元级, 获得了清晰的干涉条纹。

1 方法原理和流程

图 1 为机载重轨 InSAR 的成像几何示意图, 其中 RA_1 、 RB_1 和 RA_2 、 RB_2 分别为两次飞行的近距和远距, H_1 、 H_2 分别为两次飞行的航高。由于航迹未完全重合和雷达系统侧视的成像方式, 在共同观测带内, 两次测量得到的距离向像元数不同, 且在距离向上两景影像从近距端到远距端失配越来越明显。

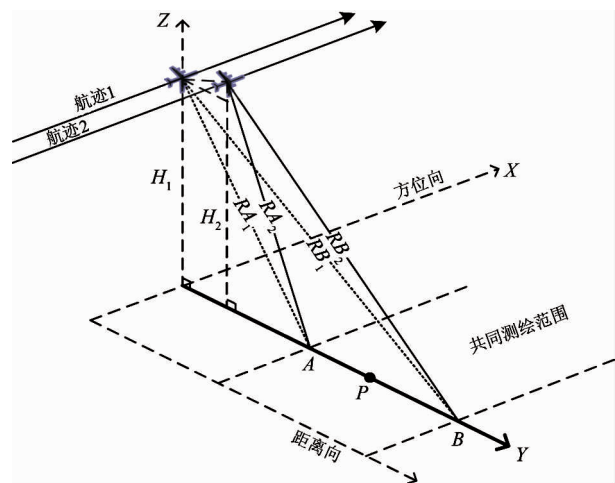


图 1 机载重轨 InSAR 的成像几何示意图

初始斜距和航高是影像坐标计算的关键参数。初始斜距的准确性决定了重采样后同名点 A 是否匹

配, 而航高的准确性决定了重采样后共同测绘带内的其余点是否匹配。初始斜距的改正值代表了 POS 数据在 Y 方向 (距离向) 的改正, 航高的改正值则代表 POS 数据在 Z 方向上进行改正。而 POS 数据 X 方向上的数据在 SAR 影像成像前已经进行过插值处理。

该方法的处理流程如图 2 所示。首先对 POS 数据进行预处理, 包括天线动态偏心改正和相位中心插值^[24]。这是为了获取雷达相位中心的数据, 并保证每个扫面行对应的成像中心都有对应的位置和速度信息。然后, 利用地面控制点信息, 基于 RD 构像模型解算初始斜距和航高的改正值, 获得准确的初始斜距和航高。最后计算主影像像元对应的地面单元在辅影像上的影像坐标并进行重采样, 获得像元一一对应的影像对。

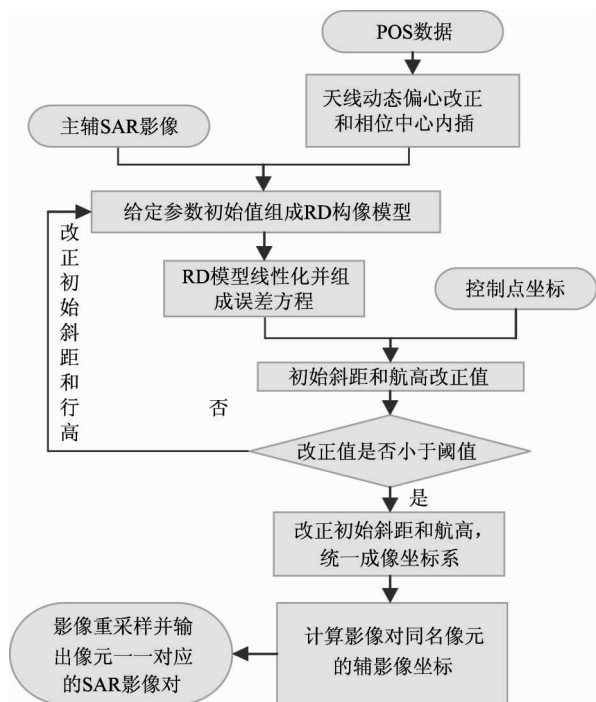


图 2 方法流程图

2 机载重轨 InSAR 配准方法

2.1 初始斜距和航高解算

InSAR 系统利用 SAR 复数据的相位信息、SAR 系统测距信息、基线长度、基线倾角和天线相位中心三维坐标来获取三维地形信息, 且基于机载 InSAR 成像几何关系, 建立起高程信息、InSAR 系统参数与

地面目标点之间的几何关系。距离方程、多普勒方程和椭圆方程描述了 InSAR 基本测量值和地面目标点位置之间的关系,为 RD 主动定位模型的 3 个基本方程:

$$\begin{cases} (X_s - X)^2 + (Y_s - Y)^2 + (Z_s - Z)^2 = R^2 \\ V_x(X_s - X) + V_y(Y_s - Y) + V_z(Z_s - Z) = -\frac{f_{\text{dol}}\lambda R}{2} \\ \frac{X^2 + Y^2}{(R_e + h)^2} + \frac{Z^2}{R_p^2} = 1 \end{cases} \quad (1)$$

其中 R_0 为初始斜距, m 为距离向分辨率, f_{dol} 为多普勒频率偏移, λ 为波长, (X_s, Y_s, Z_s) 、 (V_x, V_y, V_z) 分别为雷达天线中心坐标和速度, (X, Y, Z) 是像元的地面坐标, $R = R_0 + m \cdot j$ 为雷达天线中心到地面点之间的距离, R_e 为地球椭圆赤道半径, R_p 为地球椭圆极半径, h 为地面高程。

代入地面控制点坐标 (X, Y, Z) , 并将 RD 模型线性化,得

$$\begin{cases} F_1 = (X_s - X)^2 + (Y_s - Y)^2 + (Z_s - Z)^2 - (R_0 + m \cdot j)^2 \\ F_2 = \frac{2}{\lambda} \frac{V_x(X_s - X) + V_y(Y_s - Y) + V_z(Z_s - Z)}{\sqrt{(X_s - X)^2 + (Y_s - Y)^2 + (Z_s - Z)^2}} + f_{\text{dol}} \\ F_3 = \frac{X^2 + Y^2}{(R_e + h)^2} + \frac{Z^2}{R_p^2} - 1 \end{cases} \quad (2)$$

一次泰勒展开得到

$$\begin{cases} F_1 = \frac{\partial F_1}{\partial R_0} \Delta R_0 + \frac{\partial F_1}{\partial h} \Delta Z_s + F_1^0 \\ F_2 = \frac{\partial F_2}{\partial R_0} \Delta R_0 + \frac{\partial F_2}{\partial h} \Delta Z_s + F_2^0 \\ F_3 = \frac{\partial F_3}{\partial R_0} \Delta R_0 + \frac{\partial F_3}{\partial h} \Delta Z_s + F_3^0 \end{cases} \quad (3)$$

则误差方程为

$$\begin{cases} V_1 = \frac{\partial F_1}{\partial R_0} \Delta R_0 + \frac{\partial F_1}{\partial Z_s} \Delta Z_s + F_1^0 - F_1 \\ V_2 = \frac{\partial F_2}{\partial R_0} \Delta R_0 + \frac{\partial F_2}{\partial Z_s} \Delta Z_s + F_2^0 - F_2 \\ V_3 = \frac{\partial F_3}{\partial R_0} \Delta R_0 + \frac{\partial F_3}{\partial Z_s} \Delta Z_s + F_3^0 - F_3 \end{cases} \quad (4)$$

$F_1 = F_2 = F_3 = 0$, 得到用矩阵表示的误差方程

$$V = B \cdot dX - L \quad (5)$$

其中,

$$B = \begin{bmatrix} \frac{\partial F_1}{\partial R_0} & \frac{\partial F_1}{\partial Z_s} \\ \frac{\partial F_2}{\partial R_0} & \frac{\partial F_2}{\partial Z_s} \\ \frac{\partial F_3}{\partial R_0} & \frac{\partial F_3}{\partial Z_s} \end{bmatrix}, dX = \begin{bmatrix} \Delta R_0 \\ \Delta Z_s \end{bmatrix}, L = \begin{bmatrix} -F_1^0 \\ -F_2^0 \\ -F_3^0 \end{bmatrix} \quad (6)$$

根据最小二乘法原理,求解改正数

$$dX = (B^T B)^{-1} (B^T L) \quad (7)$$

判断 $\sqrt{\Delta R_0^2 + \Delta Z_s^2}$ 是否小于阈值,若大于阈值,则更新 R_0 和 Z_s 重新代入循环;若小于阈值,则得到最终初始斜距和航高。

2.2 同名像元辅影像坐标重新计算

以图 1 中点 P 为例进行说明,改正初始斜距和航高后, P 在航迹 1 坐标系统的距离向坐标为

$$P_{y1} = \sqrt{(r_{1\text{new}} + m_1 \cdot j_1)^2 - H_{1\text{new}}^2} \quad (8)$$

其中 m_1 为主影像距离向分辨率, j_1 是 P 在主影像上距离向坐标。 $H_{1\text{new}} = H_1 + \Delta h_1$, H_1 主影像航高, Δh_1 为 H_1 的改正值; $r_{1\text{new}} = r_1 + \Delta r_1$, r_1 主影像初始斜距, Δr_1 为 r_1 的改正值,则 P 在航迹 2 坐标系统的距离向坐标为

$$P_{y2} = \sqrt{(r_{1\text{new}} + m_1 \cdot j_1)^2 - H_{1\text{new}}^2} - \Delta Y \quad (9)$$

ΔY 为航迹 1 和航迹 2 的距离向偏移。 P 在辅影像上距离向坐标 $j_{2\text{new}}$ 为

$$j_{2\text{new}} = \frac{\sqrt{P_{y2}^2 + H_{2\text{new}}^2} - r_{2\text{new}}}{m_2} \quad (10)$$

实际处理过程如下:

- (1)在主辅影像各自影像坐标系下,使用新的初试斜距和航高计算像元地距。
- (2)计算辅影像坐标系相对于主影像坐标系的偏移量 ΔY (偏移量 ΔY 通过 POS 数据计算得到),并获得主影像坐标系下的共同测绘范围。
- (3)找出主影像在该范围内的所有像元,并计算这些像元的同名像元在辅影像坐标系下的影像坐标。
- (4)根据该影像坐标,对辅影像进行重采样。

通过上述过程,获得主辅影像像元一一对应的 SAR 影像对,且计算得到的影像像元对应的地面坐标更加准确。

3 实验与分析

实验基本参数为海南省陵水地区于 2014 年 10

月获得,见表 1 的 SAR 重轨数据,C 波段,VV 极化,0.5m分辨率,POS 数据由 POS AV 610 系统获取。影像的基本参数如表 1 所示。

表 1 基本参数

成像方式	正侧视		方位向采样间隔(m)	0.16	
天线孔径(m)	0.75		初始斜距(m)	5644.84	
基线长度(m)	38.99		多普勒中心频率(Hz)	5.4e9	
基线倾角(°)	-20		带宽(Hz)	5e8	
场景中心斜视角(°)	52		脉宽(Hz)	2.0e-5	
影像时间间隔(min)	30		采样率(Hz)	7.5e8	
距离向采样间隔(m)	0.199		脉冲重复频率(Hz)	1.25e3	
飞行高度(m)	主影像	辅影像	飞行速度(m/s)	主影像	辅影像
	4459.97	4446.57		105.36	103.43

使用本文方法对两景影像进行配准和干涉处理。影像对共同测绘区域为 32590 × 16382(距离向 × 方位向)。在距离向上,影像对从近斜距端到远斜距端像元大小不一致,同名像元失配现象逐渐加大,远距端可大于 30 个距离行,根据统计得到的同名像元主辅影像坐标差值,即距离向上主影像像元在辅影像上的坐标与该像元的影像坐标的差值如图 3 所示,纵坐标表示为同名像元的辅影像坐标与主影像坐标的差值。

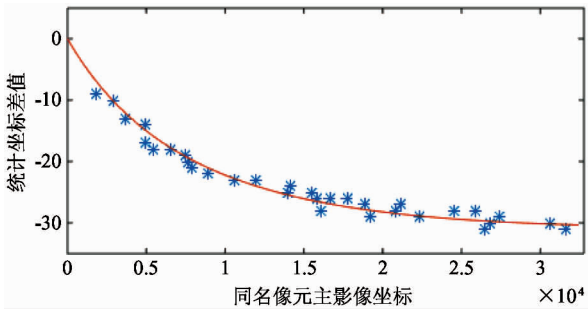


图 3 统计得到的同名像元主辅影像坐标差值

选取测区内在距离向和方位向均匀分布的 9 个 D 级控制点计算初始斜距和航高的改正值并改正,如表 2 所示。改正初始斜距和航高后,计算得到的

距离向上主影像像元在辅影像上的影像坐标与其主影像坐标的差值,即本文方法计算得到的同名像元主辅影像坐标差值,如图 4 所示。

表 2 初始斜距和航高的改正

	参数	改正值	改正后的值
主影像	飞行高度(m)	-8.052001196	5636.790289
	初始斜距(m)	-13.59133839	4446.381262
辅影像	飞行高度(m)	-4.876982114	5639.965308
	初始斜距(m)	-12.05689896	4434.509201

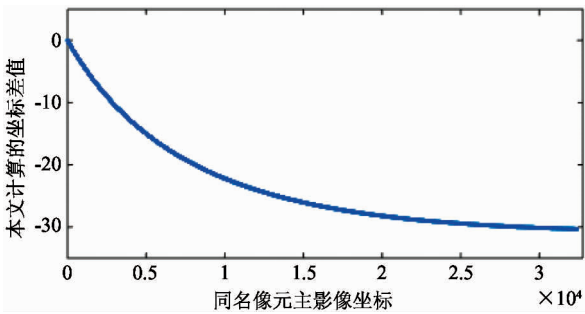


图 4 本文方法计算得到的同名像元主辅影像坐标差值

采样后的辅影像与原始主影像组成新影像对,为比对新影像对相对于原始影像对的变化,使用影

像对的相关性作为评价参数。计算新影像对和原始影像对的相关系数,搜索窗口数目设定为 3000,搜索窗口大小为 16×16 ,相关窗口大小为 4×4 ,将每

个搜索窗口内相关系数的极大值和匹配点(相关系数极大值点)主辅影像距离向坐标的差值作为评价参数,结果如图 5 所示。

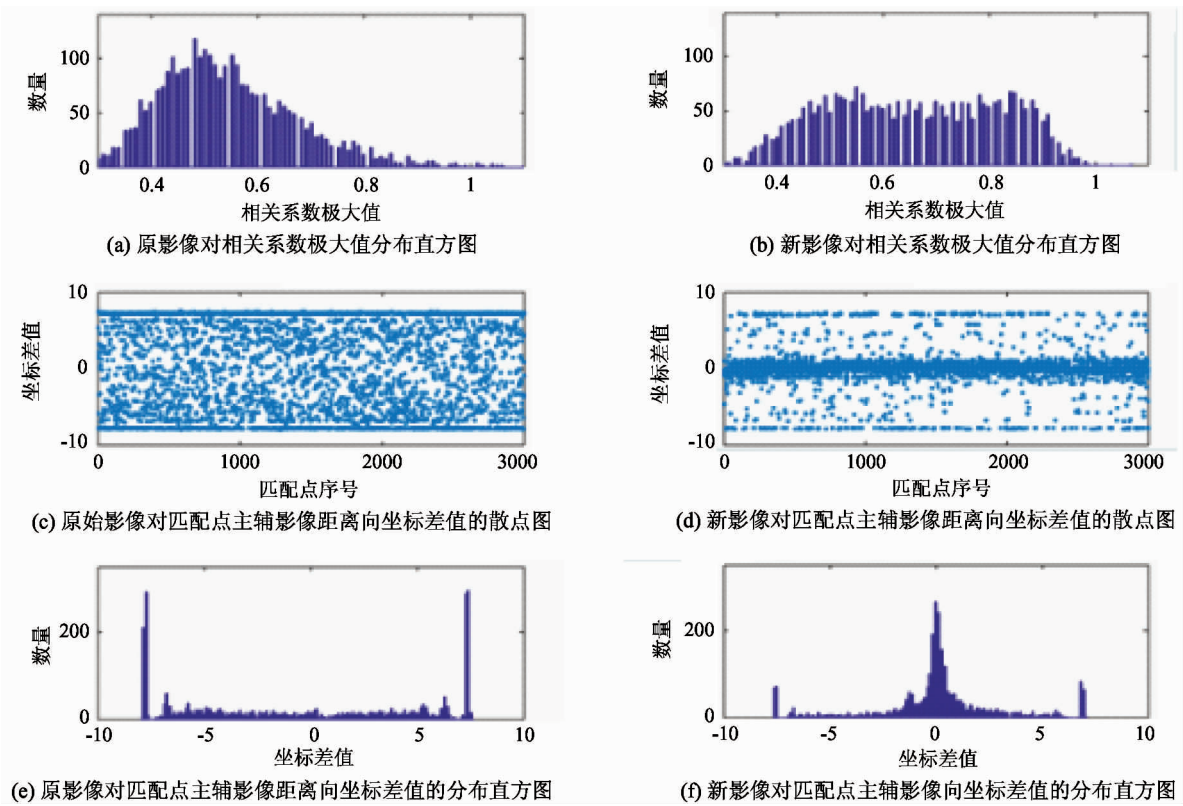


图 5 影像对同名像元匹配程度分析

图 5(a) 中相关系数极大值主要分布在 0.4 ~ 0.6 范围内,在 0.5 左右形成峰值,在 0.8 ~ 1 范围内所占比例极少,而图 5(b) 中,相关系数的极大值在 0.4 ~ 0.6 范围内比例明显降低,在 0.8 ~ 1 范围内所占比例明显提高,说明新影像对相对于原始影响对的相关性明显提高。

从图 5(c)、(e) 可以得出,原始影像对匹配点的距离向坐标差值没有明显规律,且绝大部分分布在搜索窗口的边缘,可靠性差。说明原始影像对在距离向存在很大的相对形变,距离向同名像元坐标偏移问题严重。图 5(d)、(f) 显示,新影像对的匹配点基本不存在或存在较小的距离向坐标差值,大部分匹配点分布于窗口中心及其附近,可靠性强。说明经过本文方法处理,新影像对影像像元匹配程度更高,原始影像对在距离向的相对形变和距离向同名

像元坐标偏移问题得到有效解决。

因而图 5 结果表明,本文方法确实可以有效解决在距离向上,影像对从近斜距端到远斜距端像元大小不一致导致的同名像元失配,并且实现主辅影像像元的一一对应。

本文方法处理完后,直接干涉处理的结果如图 6 所示,其中(a)、(b)、(c) 分别为干涉复图像、相干图和缠绕相位图。从干涉复图像可以看出地表信息保存完整,水体、田地、平地、植被、道路清晰。从相干图可以看出,整幅影像具有很高的相干性,除在水体、植被繁盛和阴影区域相干性低以外,在农田和平地均具有高度的相干性。缠绕相位图的干涉条纹清晰,具有很好的连续性。说明本文方法在保持干涉 SAR 复图像对相干性的同时具有良好的配准效果,特别适用于长基线机载重轨 SAR 影像的配准。

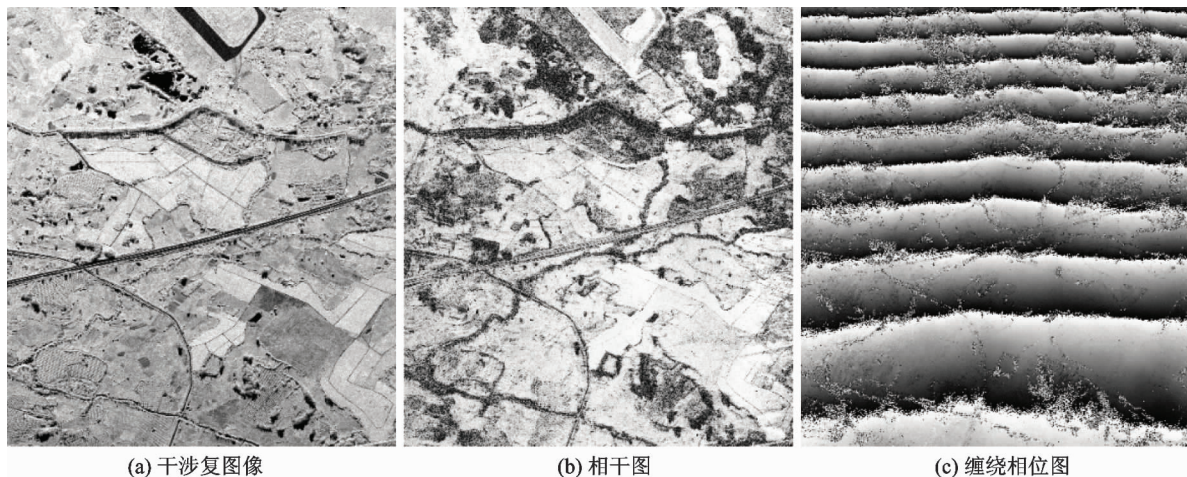


图6 干涉处理结果

4 结 论

本文方法针对机载重轨 SAR 影像在距离向形变较大,传统配准方法在处理大区域影像时无法满足配准精度要求的问题,通过引入地面控制点信息和 RD 构像模型解算误差方程修正成像参数,得到高精度相对定位,并成功解决了长基线机载重轨干涉 SAR 影像的配准问题。影响机载重轨 SAR 影像配准精度的重要原因是载机飞行姿态不稳定,飞行轨迹不完全重合,像元难以精准定位。尤其在长基线的条件下,同名像元对应的地面分辨单元大小不一致现象更加明显,在测绘区域相同的影像上距离向的像元数量不同,高精度配准困难。实验结果表明,本文方法处理后的机载重轨干涉 SAR 影像相关性提高,同名像元的对应关系增强,同时保持了良好的相干性,直接进行干涉处理得到了清晰的干涉条纹。由于实验用图为正侧视成像,主辅影像像元在方位向的偏移量固定在两个像元,因而并没有考虑方位向坐标偏移的影响。实验区方位向实际长度为 2620.96m,对于长条带的重轨机载干涉 SAR 影像,本文方法的有效性还需要进一步研究实验。另外由于试验区域地形平坦,并没有引入外部数字高程模型(DEM),在地形复杂区域可以引入外部 DEM 进行辅助配准^[25]。

参考文献

[1] Raney R K, Runge H, Bamler R, et al. Precision SAR

processing using chirp scaling[J]. *IEEE Transactions on Geoscience & Remote Sensing*, 1994, GRS 32 (4):786-799

[2] Carrara W G, Goodman R S, Majewski R M. Spotlight synthetic aperture radar: signal processing algorithms [J]. *Journal of Atmosphere and solar-Terrestrial Physics*, 1995, 59(5):597-598

[3] Cumming I G, Wong F H. Digital Processing of Synthetic Aperture Radar Data: Algorithms and Implementation [M]. Beijing: Electronic Industry Press Beijing, 2007

[4] Zou B, Hao L, Bao X. An accurate co-registration method of spaceborne repeat-pass InSAR based on matrix transformation[C]. In: Proceedings of the 2005 IEEE International Geoscience and Remote Sensing Symposium. Seoul, Korea, 2005. 4560-4563

[5] 石晓进, 张云华. 基于 Fourier-Mellin 变换和相干系数法的重复轨道干涉 SAR 图像配准新方法[J]. *电子与信息学报*, 2009, 31(4):803-807

[6] Wang F, You H, Fu X Y. Adapted anisotropic gaussian SIFT matching strategy for SAR registration[J]. *IEEE Geoscience and Remote Sensing Letters*, 2015, 12(1):160-164

[7] 邵寿平, 韩春燕, 谢勇, 等. 改进序贯相似性检测算法的遥感图像匹配[J]. *四川大学学报(自然科学版)*, 2013, 50(2):90-94

[8] 赵志伟, 杨汝良, 祁海明. 一种改进的星载干涉 SAR 复图像最大频谱配准算法[J]. *测绘学报*, 2008, 37(1):64-69

[9] Flora D, Julie D, Yann G, et al. SAR-SIFT: A SIFT-Like Algorithm for SAR Images[J]. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 2015, 53(1):453-466

[10] 程海琴, 陈强, 刘国祥, 等. 基于相干曲面移动拟合的 SAR 影像高精度配准方法[J]. *测绘科学*, 2013, 38(5):137-140

- [11] Wu Y. Automatic and reliable registration for SAR complex image[J]. *Proceedings of Spie the International Society for Optical Engineering*, 2009, 7494. doi: 10.1117/12.832434
- [12] 程丹, 范洪冬, 邓喀中, 等. 基于 MSER 的 SAR 影像配准算法[J]. *测绘通报*, 2014, (12):28-31
- [13] 姜文聪, 张继贤, 程春泉, 等. SIFT 与粗差剔除算法相结合的机载 SAR 影像匹配研究[J]. *地球信息科学学报*, 2013, 15(3): 440-445
- [14] 花奋奋, 张继贤, 黄国满, 等. 机载重轨干涉合成孔径雷达数据的一种配准方法[J]. *测绘学报*, 2014, 43(3):298-305
- [15] Li F K, Goldstein R M. Studies of multibaseline space-borne interferometric synthetic aperture radars[J]. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 1990, 28(1): 88-97
- [16] Barnea I D, Silverman H F. A class of algorithms for fast digital image registration[J]. *IEEE Transactions on Computers*, 1970, C-21(1): 179-186
- [17] Reddy B S, Chatterji B N. An FFT-based technique for translation, rotation, and scale-invariant image registration[J]. *IEEE Transactions on Image Processing A Publication of the IEEE Signal Processing Society*, 1996, 5(8):1266-1271
- [18] Chen Q, Defrise M, Deconinck F. Symmetric phase-only matched filtering of Fourier-Mellin transforms for image registration and recognition[J]. *IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence*, 1994, 16(12):1156-1168
- [19] Gabriel A, Goldstein R. Crossed orbit interferometry: theory and experimental results from SIR-B[J]. *International Journal of Remote Sensing*, 1988, 9(5):857-872
- [20] Lowe D G. Object recognition from local scale-invariant features[C]. In: *Proceedings of the 7th IEEE International Conference on Computer Vision*, Kerkira, Greece, 1999. 1150-1157
- [21] Lowe D G. Distinctive image features from scale-invariant key-points[J]. *International Journal of Computer Vision*, 2004, 60(2): 91-110
- [22] Curlander J C. Location of pixels in space-borne SAR imagery[J]. *IEEE Transaction on Geoscience and Remote Sensing*, 1982, 20(3):359-364
- [23] Jihnsen H, Lauknes L, Guneriusen T. Geocoding of fast-delivery ESR-I SAR image mode product using DEM dat[J]. *International Journal of Remote sensing*, 1995, 16(11):1957-1968
- [24] 岳昔娟, 黄国满, 赵争. 机载 SAR 影像主动定位的数学模型研究[J]. *测绘科学*, 2009, 34(2):181-183
- [25] 唐晓青, 向茂生, 吴一戎. 一种改进的基于 DEM 的机载重轨干涉 SAR 运动补偿算法[J]. *电子与信息学报*, 2009, 31(5):1090-1094

An image co-registration method for long-baseline airborne repeat-pass InSAR

Dong Xiaotong^{* ***}, Han Chunming^{* **}, Yue Xijuan^{* **}, Zhao Yinghui^{* **}

(^{*} Institute of Remote Sensing and Digital Earth, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100094)

(^{**} Sanya Institute of Remote Sensing, Sanya 572029)

(^{***} University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049)

Abstract

The paper is aimed to solve long-baseline airborne repeat-pass interferometric synthetic aperture radar (InSAR) system survey's difficulties in accurate co-registration and interference avoidance due to the relative deformation between repeat-pass image pairs and the size difference of the ground resolution cells corresponding to homonymy pixels caused by aircrafts' unsteady flight height and flying attitude. The slave images are resampled according to the size of the main image space by high precision relative positioning. Specifically, based on the precise SAR imaging geometrical model, the first step is calibrating the initial range and flying height by using several ground control point data, and the second step is using high precise relative positioning to calculate the slave image coordinates of the master image pixels and resample the slave image with the same size of main image. Experiment used VV-Polarization C-band airborne repeat-pass InSAR images. The resolution of images is 0.5m. The experiment result shows that the proposed method is feasible and suitable for co-registration of long-baseline airborne repeat-pass SAR images.

Key words: long-baseline, airborne repeat-pass radar, interferometric synthetic aperture radar (InSAR), image co-registration