

TAO Qiuxiang, LIU Goulin. A New Method for Fine Registration of SAR Images in PS InSAR[J]. Acta Geodaetica et Cartographica Sinica, 2012, 41(1): 69-73. (陶秋香, 刘国林. 永久散射体差分干涉测量技术中 SAR 影像精配准的一种新方法[J]. 测绘学报, 2012, 41(1): 69-73.)

永久散射体差分干涉测量技术中 SAR 影像精配准的一种新方法

陶秋香, 刘国林

山东科技大学 测绘科学与工程学院, 山东 青岛 266510

A New Method for Fine Registration of SAR Images in PS InSAR

TAO Qiuxiang, LIU Goulin

Geomatics College, Shandong University of Science and Technology, Qingdao 266510, China

Abstract: A new method for fine registration of a pair of low-coherent SAR images in PS InSAR was presented and implemented. This method completed original registration of a pair of low-coherent SAR images with the help of the third image that had higher coherence with the both master and slave image, then calculated the coordination mapping function between them using weighted least square method to achieve high precise sub-pixel level registration of the pair of low-coherent SAR images. A registration experiment with ERS-1/2 SAR images was carried out and the results showed that the method could improve the interferogram quality, coherence, registration accuracy of control points and registration effect between a pair of low-coherent SAR images. So the new registration method can to some extent solve the registration problem of a pair of low-coherent SAR images in PS InSAR.

Key words: permanent scatterers; interferometry; low-coherent; fine registration; weighted least square

摘 要: 提出并实现一种基于加权最小二乘的低相干 SAR 影像对精配准新方法。该方法借助一幅与主、辅影像相干性都较高的第 3 幅影像来完成低相干 SAR 影像对的初步配准, 利用加权最小二乘法求出二者间的坐标映射函数, 从而实现低相干 SAR 影像对的高精度亚像素级配准。采用 ERS-1/2 实际数据的配准试验, 验证该方法可以提高低相干 SAR 影像对的干涉图质量, 提高二者之间的相干性和控制点的配准精度, 改善低相干 SAR 影像对的配准效果, 在一定程度上解决 PS InSAR 技术中低相干 SAR 影像对的配准问题。

关键词: 永久散射体; 干涉测量; 低相干; 精配准; 加权最小二乘

中图分类号: TP751.1

文献标识码: A

文章编号: 1001-1595(2012)01-0069-05

基金项目: 国家 863 计划(2009AA12Z147); 国家自然科学基金(40874001); 山东省自然科学基金(ZR2010DQ020); 对地观测技术国家测绘地理信息局重点实验室经费(K201010)

1 引 言

永久散射体差分干涉测量(permanent scatterers synthetic aperture radar interferometry, PS InSAR)技术是基于覆盖同一研究区的多幅 SAR 影像的时序差分干涉处理过程, 需要选取其中一幅作为唯一公共主影像, 其余所有影像均作为辅影像, 分别配准并采样到主影像空间, 与主影像进行差分干涉处理得到多幅时序差分干涉图来获取地表形变信息^[1-3]。现有 SAR 影像精配准方法有很多, 常用的有基于灰度(或幅度)的相干系数法、最大频谱法和基于相位差影像的平均波动(扰动)函数法, 这几种方法的配准效果在不同程度上都受到 SAR 影像对相干性的影响。对于相干性较低的 SAR 影像对, 利用上述几种常用方法

有可能无法进行配准或精度达不到要求^[4-7]。在 PS InSAR 处理中, 由于选取的一些时序 SAR 影像对的时间基线、空间基线或多普勒质心频率基线较长, 使去相关程度过高而使相应相干性降低, 从而使常用配准方法的配准精度较低, 甚至配准失败, 以致无法生成干涉图, 或生成的干涉图质量降低^[8-10]。针对这一问题, 本文提出一种新的基于加权最小二乘的低相干 SAR 影像对配准方法, 该方法的基本思想是借助一幅与主、辅影像相干性都较高的第 3 幅影像来完成低相干 SAR 影像对的初步配准, 然后用一个高阶多项式拟合主、辅影像上控制点和同名点间的坐标映射关系, 并利用加权最小二乘法求解实现低相干 SAR 影像对的高精度亚像素级配准。最后结合具体 SAR 数据进行试验, 从理论分析和数据试验两个方面验

证该方法的可行性和可靠性。

2 基于加权最小二乘的低相干 SAR 影像对的配准方法

2.1 基本思想

假定将主影像 m 与辅影像 s 进行配准, 因 m 和 s 的相干性较低, 从而使常用配准方法直接将二者配准的精度达不到要求或配准无法进行, 因此, 选用另外一幅与 m, s 的相干性都较高的影像 n , 首先将 m 与 n 利用常用的相干系数法等进行配准, 求出二者之间的偏移量 Δx_m^n 和 Δy_m^n ; 然后以 n 为主影像, s 为辅影像利用相干系数法等进行配准, 得到 n 与 s 之间的偏移量 Δx_n^s 和 Δy_n^s 。从理论上来说, 主影像 m 与辅影像 s 之间的偏移量 Δx_m^s 和 Δy_m^s 应为 $\Delta x_m^s = \Delta x_m^n + \Delta x_n^s, \Delta y_m^s = \Delta y_m^n + \Delta y_n^s$; 最后, 用一个高阶 (如二阶) 多项式拟合主影像 m 与辅影像 s 上控制点和同名点间的坐标映射关系, 并利用加权最小二乘法求解, 对所得到的 Δx_m^s 和 Δy_m^s 改正完成二者之间的配准。图 1 简要概括了基于加权最小二乘的低相干 SAR 影像对配准方法的基本思想和步骤。

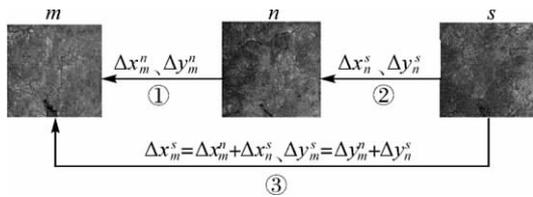


图 1 基于加权最小二乘的低相干 SAR 影像对的配准
Fig. 1 The registration of a pair of low-coherent SAR images based on weighted least square

2.2 基本原理和步骤

首先利用常用粗配准、像素级和亚像素级精配准方法将 m 和 n 配准, 得到两幅影像间的偏移量 Δx_m^n 和 Δy_m^n 。因为二者相干性较高, 所以可采用相干系数法进行配准。在配准过程中, 假设主影像 m 上的控制点坐标 (x, y) 与辅影像 n 上同名点坐标 (\hat{u}, \hat{v}) 之间满足如下二次多项式关系

$$\left. \begin{aligned} \hat{u} &= \hat{a}_{00} + \hat{a}_{10}x + \hat{a}_{01}y + \hat{a}_{20}x^2 + \hat{a}_{02}y^2 + \hat{a}_{11}xy \\ \hat{v} &= \hat{b}_{00} + \hat{b}_{10}x + \hat{b}_{01}y + \hat{b}_{20}x^2 + \hat{b}_{02}y^2 + \hat{b}_{11}xy \end{aligned} \right\} \quad (1)$$

然后以 n 为主影像, s 为辅影像利用相干系数法进行配准, 得到 n 与 s 之间的偏移量 Δx_n^s 和 Δy_n^s , 从而求出主影像 m 与辅影像 s 之间的偏移量 $\Delta x_m^s = \Delta x_m^n + \Delta x_n^s$ 和 $\Delta y_m^s = \Delta y_m^n + \Delta y_n^s$ 。又假定主影像 m 上的控制点坐标 (x, y) 与辅影像 s

上同名点坐标 (\hat{s}, \hat{t}) 之间满足如下二次多项式关系

$$\left. \begin{aligned} \hat{s} &= \hat{a}_{00} + \hat{a}_{10}x + \hat{a}_{01}y + \hat{a}_{20}x^2 + \hat{a}_{02}y^2 + \hat{a}_{11}xy \\ \hat{t} &= \hat{b}_{00} + \hat{b}_{10}x + \hat{b}_{01}y + \hat{b}_{20}x^2 + \hat{b}_{02}y^2 + \hat{b}_{11}xy \end{aligned} \right\} \quad (2)$$

由公式(1)和(2)可知, 第 i 个控制点在配准后的 m, n, s 上的坐标和偏移量之间存在如下关系

$$\left. \begin{aligned} \Delta \hat{x}_{n,i}^s &= \hat{x}_i^s - \hat{x}_i^n = (\hat{a}_{00} + \hat{a}_{10}x_i^m + \hat{a}_{01}y_i^m + \hat{a}_{20}(x_i^m)^2 + \hat{a}_{02}(y_i^m)^2 + \hat{a}_{11}x_i^m y_i^m) - (\hat{a}_{00} + \hat{a}_{10}x_i^n + \hat{a}_{01}y_i^n + \hat{a}_{20}(x_i^n)^2 + \hat{a}_{02}(y_i^n)^2 + \hat{a}_{11}x_i^n y_i^n) \\ \Delta \hat{y}_{n,i}^s &= \hat{y}_i^s - \hat{y}_i^n = (\hat{b}_{00} + \hat{b}_{10}x_i^m + \hat{b}_{01}y_i^m + \hat{b}_{20}(x_i^m)^2 + \hat{b}_{02}(y_i^m)^2 + \hat{b}_{11}x_i^m y_i^m) - (\hat{b}_{00} + \hat{b}_{10}x_i^n + \hat{b}_{01}y_i^n + \hat{b}_{20}(x_i^n)^2 + \hat{b}_{02}(y_i^n)^2 + \hat{b}_{11}x_i^n y_i^n) \end{aligned} \right\} \quad (3)$$

式中, $(x_i^m, y_i^m), (x_i^n, y_i^n)$ 以及 (x_i^s, y_i^s) 分别表示第 i 个控制点在主影像 m 、辅影像 n 以及辅影像 s 上的坐标; $\Delta \hat{x}_{n,i}^s$ 和 $\Delta \hat{y}_{n,i}^s$ 分别为第 i 个控制点的影像 s 相对于影像 n 的距离向和方位向上坐标偏移量。若选取 N 个配准控制点, 就可以构成如下两个线性方程组

$$\begin{bmatrix} \Delta x_{n,1}^s + v_{m,1}^s \\ \vdots \\ \Delta x_{n,N}^s + v_{m,N}^s \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & x_1^m & \cdots & x_1^m y_1^m & -1 & -x_1^m & \cdots & -x_1^m y_1^m \\ \vdots & \vdots & & \vdots & \vdots & \vdots & & \vdots \\ 1 & x_N^m & \cdots & x_N^m y_N^m & -1 & -x_N^m & \cdots & -x_N^m y_N^m \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} \hat{a}_{00} & \hat{a}_{10} & \cdots & \hat{a}_{11} & \hat{a}_{00} & \hat{a}_{10} & \cdots & \hat{a}_{11} \end{bmatrix}^T \quad (4)$$

$$\begin{bmatrix} \Delta y_{n,1}^s + v_{m,1}^s \\ \vdots \\ \Delta y_{n,N}^s + v_{m,N}^s \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & x_1^m & \cdots & x_1^m y_1^m & -1 & -x_1^m & \cdots & -x_1^m y_1^m \\ \vdots & \vdots & & \vdots & \vdots & \vdots & & \vdots \\ 1 & x_N^m & \cdots & x_N^m y_N^m & -1 & -x_N^m & \cdots & -x_N^m y_N^m \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} \hat{b}_{00} & \hat{b}_{10} & \cdots & \hat{b}_{11} & \hat{b}_{00} & \hat{b}_{10} & \cdots & \hat{b}_{11} \end{bmatrix}^T \quad (5)$$

以式(4)为例, 阐述该方程组的解算方法, 把式(4)转化成如下形式

$$\begin{bmatrix} v_{m,1}^s \\ \vdots \\ v_{m,N}^s \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & x_1^m & \cdots & x_1^m y_1^m & -1 & -x_1^m & \cdots & -x_1^m y_1^m \\ \vdots & \vdots & & \vdots & \vdots & \vdots & & \vdots \\ 1 & x_N^m & \cdots & x_N^m y_N^m & -1 & -x_N^m & \cdots & -x_N^m y_N^m \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} \hat{a}_{00} & \hat{a}_{10} & \cdots & \hat{a}_{11} & \hat{a}_{00} & \hat{a}_{10} & \cdots & \hat{a}_{11} \end{bmatrix}^T$$

$$[\hat{a}_{00}^s \quad \hat{a}_{10}^s \quad \cdots \quad \hat{a}_{11}^s \quad \hat{a}_{00}^n \quad \hat{a}_{10}^n \quad \cdots \quad \hat{a}_{11}^n]^T - \begin{bmatrix} \Delta x_{n,1}^s \\ \vdots \\ \Delta x_{n,N}^s \end{bmatrix} \quad (6)$$

式(6)中,方程的个数 N 小于未知数的个数 $(N+12)$,显然有无穷多组解满足该方程组。为此,需要在这无穷多组解中选择一组最佳解,选择的原则为加权最小二乘原则 $V^T P V = \min$ 。如果把式(6)用 $V = B\hat{X} - L$ 表示,求算 \hat{X} 的问题也就转换成求解如下极值问题

$$\left. \begin{aligned} V &= B\hat{X} - L \\ V^T P V &= \min \end{aligned} \right\} \quad (7)$$

式中,权阵 P 的确定方法有两种:一是不考虑各控制点干涉质量(相干性)的高低,认为各配准控制点的精度相同,权阵 P 为 N 阶单位阵;二是利用它们的干涉相干性和信噪比来定权,认为各配准控制点的精度不同,权阵 P 为 N 阶对角阵,对角线上的元素为 $P_{\Delta \hat{x}_i}$, $P_{\Delta \hat{x}_i}$ 可以根据文献[11]推导的公式计算,即

$$P_{\Delta \hat{x}_i} = \frac{1}{\sigma_{\Delta \hat{x}_i}} = \frac{1}{\sqrt{\frac{3}{2t} \frac{\sqrt{1-\gamma_i^2}}{\pi \gamma_i} \text{osf}^{\frac{3}{2}}}} \quad (8)$$

式中, $P_{\Delta \hat{x}_i}$ 为第 i 个控制点坐标偏移量 $\Delta \hat{x}_{n,i}^s$ 的权; $\sigma_{\Delta \hat{x}_i}$ 为 $\Delta \hat{x}_{n,i}^s$ 的标准差; t 为匹配窗口中采样点的个数; osf (oversampling factor) 为影像在距离向上的过采样因子; γ_i 为主、辅影像上第 i 个控制点的相干系数。利用公式(8)确定权阵虽然计算较复杂,但该方法考虑不同精度的控制点对配准结果的影响比重不同,从而可以提高配准的精度。

按照求函数自由极值的方法求解式(7)可得

$$\hat{X} = (B^T P B)^{-1} B^T P L \quad (9)$$

得到 \hat{X} 后,代入 $V = B\hat{X} - L$ 可得 V ,从而完成式(4)的解算。

按照同样的方法,可以求解式(5)。求出 n 与 m 、 s 与 m 之间的坐标映射函数和偏移量 $\Delta \hat{x}_m^n$ 、 $\Delta \hat{y}_m^n$ 、 $\Delta \hat{x}_m^s$ 和 $\Delta \hat{y}_m^s$ 。

求出坐标映射函数后,对于主影像上的任一点 (x, y) ,都可以求出其在辅影像 s 上的位置 (\hat{s}, \hat{t}) ,然后,根据 (\hat{s}, \hat{t}) 周围的 4 个像素进行双线性插值(或利用更多的像素进行双三次 B 样条插值等)完成对辅影像的重采样,实现影像的精配准^[12-13]。

3 试验与精度分析

3.1 配准试验

SAR 复数影像配准质量的高低可以通过干涉条纹的清晰度和一些量化指标表示,最直接的方法就是观察干涉图条纹的清晰度和相应相干图上相干系数的大小。同样的两幅影像,配准精度越高,由此干涉生成的干涉图上的干涉条纹会越清晰,相应相干图上高相干系数的点也会越多^[14-15]。为了使本文提出的基于加权最小二乘的低相干 SAR 影像对配准方法更具普遍性,选取了 3 景时间间隔较大的 ERS-1/2 SLC SAR 影像分别为主影像 m 、辅影像 n 和 s 作配准试验,验证所提出的配准方法是否有效。表 1 给出了 3 景影像的时间基线、空间基线、多普勒质心频率基线和相干性。研究区的大小为 2100×1000 像素。

表 1 3 景 ERS-1/2 SLC SAR 影像的部分参数

Tab. 1 The parameters of three ERS-1/2 SLC SAR images

影像对	时间基线/d	空间基线/m	多普勒质心频率基线/Hz	相干性
$m-n$	175	206	8	0.72
$n-s$	630	97	132	0.53
$m-s$	805	303	141	0.36

表 1 中 SAR 影像对的相干性^[16]为

$$\gamma = \left(1 - \frac{T}{T^c}\right) \left(1 - \frac{B_{\perp}}{B_{\perp}^c}\right) \left(1 - \frac{F_{DC}}{F_{DC}^c}\right) \quad (10)$$

式中, T 、 B_{\perp} 和 F_{DC} 分别为影像对之间的时间基线、空间(垂直)基线和多普勒质心频率基线; γ 表示相干性;上标 c 表示临界参数值,超过这个临界值, SAR 影像对就完全不相干。对 ERS 数据来说, $T^c = 5$ 年, $B_{\perp}^c = 1100$ m, $F_{DC}^c = 1380$ Hz。从式(10)可以看出,影响 SAR 影像对相干性的 3 个因素主要有 T 、 B_{\perp} 和 F_{DC} ,因此,在一系列时序 SAR 影像中选取辅图像 n 时,应使 n 与 m 、 n 与 s 之间的 T 、 B_{\perp} 和 F_{DC} 都较小,从而使选取的影像 n 与 m 、 s 的相干性都较高。

首先将主影像 m 和辅影像 s 利用相干系数法直接配准并进行干涉处理,生成如图 2 所示的干涉条纹图和相应相干图。配准过程中在主影像 m 上选取均匀分布的 88 个配准控制点;然后借助辅影像 n ,利用本文提出的基于加权最小二乘的低相干 SAR 影像对配准方法将主影像 m 和辅影像 s 进行配准,并作干涉处理。为了便于比较,配准过程中仍在主、辅影像上选取均匀分布的 88 个控制点。

图 3 给出利用基于加权最小二乘的低相干 SAR 像对配准方法配准后 88 个控制点在主影像 m 、辅影像 s 上的分布。图 4 为生成的干涉图和相干图。

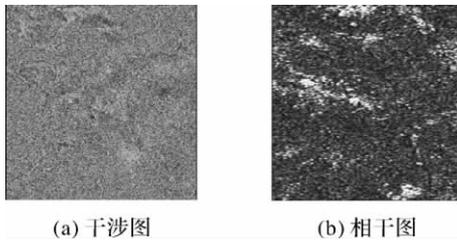


图 2 直接配准并作干涉处理后生成的干涉图和相干图
Fig. 2 The interferogram and coherent image generated from interferometric processing between a pair of directly registered images

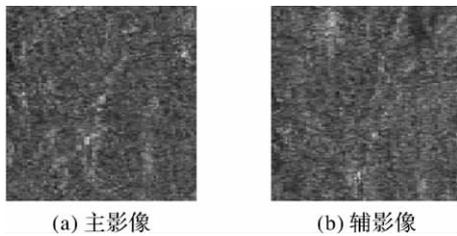


图 3 配准控制点在主、辅影像上的分布
Fig. 3 The distribution of registration controlling points on the master and slave image

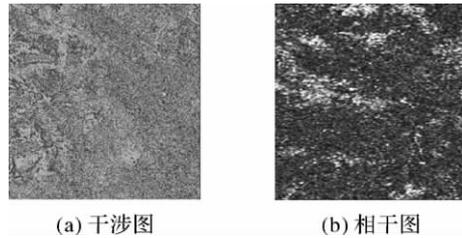


图 4 利用新方法配准并作干涉处理后生成的干涉图和相干图

Fig. 4 The interferogram and coherent image generated from interferometric processing between a pair of images registered using the new method

3.2 精度分析

(1) 干涉图 2(a)和图 4(a)右下侧都几乎没有形成干涉条纹,而图 4(a)左侧的干涉条纹比图 2(a)的要清晰,说明这一区域的配准质量得到了改善。

(2) 从两幅相干图 2(b)和图 4(b)上可以看出,图 4(b)的纹理结构比图 2(b)的要清晰一些,而且,相干系数值高的点(白色区域)也要比图 2(b)上相干系数值高的点多。表 2 总结了相干图 2(b)和图 4(b)上相干系数值的分布情况和所选研究区干涉图的信噪比。

表 2 两幅相干图上相干系数值的分布

Tab. 2 The distribution of coherent coefficient values of two coherent images

相干系数类别	[0, 0.2]	(0.2, 0.4]	(0.4, 0.6]	(0.6, 0.8]	(0.8, 1.0]	总数	信噪比
直接配准	1 599 888	298 286	94 154	40 957	66 715	2 100 000	0.220
改进配准	1 588 071	303 636	96 662	41 476	70 155	2 100 000	0.224

表 2 中相干系数类别中的直接配准是指利用相干系数法对主影像 m 和辅影像 s 直接配准所得相干图上各像素的相干系数分布和研究区干涉图的信噪比;改进配准是指借助辅影像 n ,利用基于加权最小二乘的低相干 SAR 影像对配准方法对主影像 m 和辅影像 s 配准所得相干图上各像素的相干系数分布和研究区干涉图的信噪比。

从表 2 可以明显看出,从 $\gamma > 0.2$ 开始,相干图 4(b)分布于各区间内的像素点都比相干图 2(b)的像素点多,而研究区干涉图的信噪比提高了 0.004,这都说明基于加权最小二乘的低相干 SAR 影像对配准方法改善了主影像 m 和辅影像 s 的配准质量。

(3) 表 3 统计两种配准方法所得 88 个控制点的配准误差。其中 RMSE 为配准的均方根误差。

表 3 两种配准方法的配准误差

Tab. 3 The coregistration error of two methods

误差类别	点数	X 方向 RMSE/像素	Y 方向 RMSE/像素	总的 RMSE /像素
直接配准	88	0.036	0.116	0.121
改进配准	88	0.032	0.101	0.106

从表 3 可以看出,基于加权最小二乘的低相干 SAR 影像对配准方法对 88 个控制点的 X 方向、Y 方向以及总的配准精度都有所提高。这也充分说明了该方法的有效性。

4 结论

通过论文的理论分析和试验分析可见,与利用常用方法对低相干 SAR 影像对进行直接配准相比,本文提出的基于加权最小二乘的低相干

SAR 影像对的配准可以提高干涉图质量,提高二者之间的相干性和控制点的配准精度,在一定程度上改善低相干 SAR 影像对的配准效果,解决 PS InSAR 技术中低相干 SAR 影像对的配准精度较低从而使生成的干涉图质量降低,或配准失败以致无法生成干涉图的问题。因此,在 PS InSAR 技术中,可采用两种配准策略。一是对相干性较高的 SAR 影像对的配准,可先基于精密的 DEOS 轨道数据进行粗配准,然后利用相干系数等方法进行精确配准;二是对于时间间隔较长、相干性较差的 SAR 影像对的配准,可以利用本文方法来完成^[17]。

参考文献:

- [1] JUNG H C, KIM S W, JUNG H S, et al. Satellite Observation of Coal Mining Subsidence by Persistent Scatterer Analysis[J]. *Engineering Geology*, 2007, 92(1-2): 1-13.
- [2] RAUCOULES D, BOURGINE B, MICHELE M D, et al. Validation and Intercomparison of Persistent Scatterers Interferometry: PSIC4 Project Results [J]. *Journal of Applied Geophysics*, 2009, 68(3): 335-347.
- [3] VILARDO G, VENTURA G, TERRANOVA C, et al. Ground Deformation due to Tectonic, Hydrothermal, Gravity, Hydrogeological, and Anthropogenic Processes in the Campania Region (Southern Italy) from Permanent Scatterers Synthetic Aperture Radar Interferometry [J]. *Remote Sensing of Environment*, 2009, 113 (1):197-212.
- [4] BUNTING P, LABROSSE F, LUCAS R. An Area Based Technique for Image-to-Image Registration of Multi-model Remote Sensing Data [C]//Proceedings of the IEEE International Geo-science and Remote Sensing Symposium. Boston:IEEE, 2008:212-215.
- [5] LUO Xiaojun. Theory of Differential SAR Interferometry Based on Permanent Scatterers and Applications to Shanghai's Surface Subsidence Detection [D]. Chengdu: Southwest Jiaotong University, 2007; 40-43. (罗小军. 永久散射体雷达差分干涉理论及在上海地面沉降监测中的应用[D]. 成都:西南交通大学, 2007:40-43.)
- [6] JIAO Minglian, JIANG Tingchen. Discussion on Registration Procedure for InSAR Complex Image [J]. *Geomatics and Spatial Information Technology*, 2008, 31(6): 21-23. (焦明连, 蒋廷臣. InSAR 复数影像配准方法探讨[J]. 测绘与空间地理信息, 2008, 31(6): 21-23.)
- [7] LIU Guoxiang, DING Xiaoli, LI Zhilin, et al. Co-registration of Satellite SAR Complex Images[J]. *Acta Geodaetica et Cartographica Sinica*, 2001, 30(1): 60-66. (刘国祥, 丁晓利, 李志林, 等. 星载 SAR 复数图像的配准[J]. 测绘学报, 2001, 30(1): 60-66.)
- [8] BUNTING P, LABROSSE F, LUCAS R. A Multi-resolution Area-based Technique for Automatic Multi-model Image Registration [J]. *Image and Vision Computing*, 2010, 28(8):1203-1219.
- [9] FALCO I D, CIOPPA A D, MAISTO D, et al. Differential Evolution as a Viable Tool for Satellite Image Registration [J]. *Applied Soft Computing*, 2008, 8(4):1453-1462.
- [10] WANG Lucai, WANG Yaonan, MAO Jianxu. Registration of InSAR Image Based on Integrating Correlation registration and Max-spectrum Image Registration [J]. *Acta Geodaetica et Cartographica Sinica*, 2003, 32(4): 320-324. (汪鲁才, 王耀南, 毛建旭. 基于相关匹配和最大谱图像配准相结合的 InSAR 复图像配准方法[J]. 测绘学报, 2003, 32(4): 320-324.)
- [11] BAMLER R. Interferometric Stereo Radargrammetry: Absolute Height Determination from ERS-ENVISAT Interferograms [C] // Proceedings of International Geoscience and Remote Sensing Symposium. Honolulu: IEEE, 2000; 742-745.
- [12] YIN Shuowen, DENG Ruru. Registration Technology of InSAR Image Processing Based on ASAR Data [J]. *Remote Sensing Information*, 2010(2): 93-97. (殷硕文, 邓孺孺. InSAR 数据的配准技术研究[J]. 遥感信息, 2010(2): 93-97.)
- [13] ZHANG Dengrong, YU Le. A High-precision Co-registration Method for InSAR Image Processing [J]. *Journal of Remote Sensing*, 2007, 11(4): 563-567. (张登荣, 俞乐. 一种高精度的干涉雷达复数影像配准方法[J]. 遥感学报, 2007, 11(4): 563-567.)
- [14] LUO Xiaojun, LIU GuoXiang, HUANG Dingfa, et al. Comparison of Algorithms for Co-registration of Satellite Synthetic Aperture Radar Images [J]. *Science of Surveying and Mapping*, 2006, 31(1): 19-21. (罗小军, 刘国祥, 黄丁发, 等. 几种卫星合成孔径雷达影像配准算法的比较研究[J]. 测绘科学, 2006, 31(1): 19-21.)
- [15] SCHEIBER R, MOREIRA A. Coregistration of Interferometric SAR Images Using Spectral Diversity [J]. *Geoscience and Remote Sensing*, 2000, 38(5): 2179-2191.
- [16] HOOPER A J. Persistent Scatterer Radar Interferometry for Crustal Deformation Studies and Modeling of Volcanic Deformation [D]. California: Stanford University, 2006: 35-37.
- [17] TAO Qiuxiang. Study of Key Techniques of PS InSAR and Its Applications to Monitor Mining Land Subsidence [D]. Qingdao: Shandong University of Science and Technology, 2009. (陶秋香. PS InSAR 关键技术及其在矿区地面沉降监测中的应用研究[D]. 青岛: 山东科技大学, 2009.)

(责任编辑:宋启凡)

收稿日期: 2010-09-29

修回日期: 2011-03-12

第一作者简介: 陶秋香(1977—),女,博士,主要从事微波遥感数据处理及其应用研究。

First author: TAO Qiuxiang (1977—), female, PhD, majors in microwave remote sensing data processing and its application.

E-mail: qiuxiangtao@163.com