

基于外部 DEM 的 InSAR 图像配准方法研究

刘 广, 郭华东, 范景辉

(中国科学院遥感应用研究所遥感科学国家重点实验室, 北京 100101)

摘要: 雷达图像的配准是进行雷达干涉测量(SAR Interferometry, InSAR)处理的关键, 为了保证干涉相位图或形变相位图反映真实地面特性, 需要雷达图像之间亚像元级精度的配准。首先综述了已有的基于外部 DEM 的 InSAR 图像配准方法的思路及其不足之处, 并提出了一种全新的思路: 以图像之间的相干性作为目标函数, 利用搜索的方法实现了雷达成像方位向和距离向的最优时间常数的估计, 从而实现雷达图像之间亚像元级配准; 还进一步推导了数字高程模型(Digital Elevation Model, DEM)的误差对算法精度影响的一个更加严密的表示。结论表明, 在利用精确轨道数据的情况下, 美国航天飞机测地计划 SRTM 获得的地形数据的精度可以满足精确雷达图像配准的要求。结果表明, 利用基于外部 DEM 算法配准雷达图像在山区和大的时间基线情况下要优于常规相干多项式配准方法, 理论上可以达到百分之一一个像素的配准精度。

关 键 词: 干涉测量; 图像配准; 外部 DEM; 亚像元精度

中图分类号: TP722.6; P407.7 **文献标识码:** A **文章编号:** 1004-0323(2008)01-0072-05

1 引 言

合成孔径雷达干涉测量(Interferometric Synthetic Aperture Radar, InSAR)技术融合了合成孔径雷达成像原理以及电磁波干涉技术, 理论上可以获得非常精确的数字高程模型和精度在毫米量级的地表形变信息^[1]。在进行雷达图像的干涉处理过程中, 雷达图像之间的配准是非常关键的一步, 为了准确计算对应的地面目标的干涉相位或形变相位, 获得目标相位的真实变化, 需要实现雷达图像之间亚像元级精度的配准^[2, 3]。

基于相干系数的配准方法^[4]是一种常用的图像配准算法, 广泛应用于医学、遥感等领域。九十年代初期美国的 Goldstein 将相干系数配准方法应用于干涉 SAR 处理中的雷达复数图像配准^[5], 获得了很好的配准精度, 是目前最有效的雷达图像配准方法。相干系数配准方法通过计算主图像上匹配窗口和辅图像上搜索窗口之间的偏移矢量, 构建变换多项式从而实现图像之间的配准。这种方法已经被广泛应用于常规 SAR 干涉测量之中, 并获得很好的结果。随着星载雷达数据的增加, 有的学者开始考虑利用同一地区的所有雷达图像以获得更为精确的干涉

SAR 测量结果^[6, 7], 为了充分利用所有的雷达数据, 需要研究雷达图像之间大时间基线和大空间基线情况下如何获得好的常规干涉 SAR 测量结果, 因为这种情况下由于时间去相关和基线去相关^[8]作用, 相干系数配准方法并不能达到图像之间的最优配准, 为了充分利用这些雷达图像, 需要寻找合适的雷达图像配准方法。

基于卫星轨道和外部数字地面模型的配准方法最早由法国国家空间研究中心的 Massonnet 提出, 他的研究发现利用卫星轨道和外部地形数据可以实现雷达图像的精确配准, 这种配准方法需要确定方位向和距离向两个时间常数, 其特点是对于雷达图像上的所有像元都具有同样的配准精度, 并且相当健壮, 即使在去相干严重的区域也可以获得好的配准精度^[9]; 2003 年德国航天局(DLR)干涉研究小组的 Adam 提出借助美国航天飞机测地计划(SRTM)获得的数字地面模型以及卫星精确轨道数据, 利用点目标分析的方法可以计算上述的两个时间常数^[10], 在实际处理过程中这种算法使用了多项式进行重采样, 然后进行点目标分析, 在重采样的过程中点目标的位置和相位特性会受到影响从而降低配准精度; 2006 年意大利国家研究委员会(CNR)环境电

磁感应研究所 (IREA) 的 Sansosti 提出利用地面控制点的方法计算方位向和时间向的两个常数,并且分析了轨道误差、数字高程模型在垂直雷达斜距方向的误差对基于外部 DEM 干涉 SAR 配准方法的影响^[11],在这种方法中需要选择和配准控制点,很难对大量雷达数据进行自动化处理。

本文针对上述问题,提出了一种自动寻找方位向和距离向时间常数的配准方法。

2 概念介绍及算法流程

雷达图像像元位置一般采用方位向坐标 l 和距离向坐标 p 来描述,像元 (l, p) 与地面目标点 $\mathbf{P}(x, y, z)$ 对应关系可以用雷达成像多普勒方程、斜距方程和参考椭球方程来描述:

$$\begin{cases} \mathbf{V}_s \cdot (\mathbf{S} - \mathbf{P}) = 0 \\ \|\mathbf{S} - \mathbf{P}\| = c \times \tau \\ \frac{x^2 + y^2}{(R_e + h)^2} + \frac{z^2}{R_p^2} = 1 \end{cases} \quad (1)$$

其中: \mathbf{S} 和 \mathbf{V}_s 分别为成像时刻传感器的位置以及速度矢量, c 为光速, τ 为单程距离向时间, R_e 为地球赤道半径, h 为目标相对参考椭球的高度, $R_p = (1 - f)(R_e + h)$, f 为地球的扁率。利用上述 3 个方程可以计算地面目标点 \mathbf{P} 的方位向和距离向成像时间,从而得到目标点在雷达图像上的位置 (l, p) 。

基于外部 DEM 的干涉 SAR 图像配准方法的具体算法流程如图 1 所示:首先利用公式 1 和前面所述方法分别计算同一地面目标点 \mathbf{P} 在主雷达图像上的像元位置 (l_m, p_m) 和辅图像上的像元位置 (l_s, p_s) ,从而得到主图像像元 (l_m, p_m) 对应配准位移矢量 $(\Delta l, \Delta p)$,其中 $\Delta l = l_s - l_m$, $\Delta p = p_s - p_m$ 。一般情况下, l_m, p_m 不是整数,需要将非整数坐标上的配准位移矢量插值到主图像的像元网格上,这样可以得到主图像上每个像元的配准位移矢量;为了获得 SAR 图像的精确配准,需要计算最优的时间误差常数,这一步是最关键的,本文选择主图像和辅图像的平均相干系数作为配准质量评价标准^[12],并通过搜索的方法获取最优的时间误差常数:先分别利用 SAR 图像的轨道数据和常规的相关系数方法计算主图像和辅图像中心点的像素偏移矢量并转换为时间偏移矢量,把这两个时间偏移矢量的差作为初始的方位向和距离向的时间误差常数,然后以初始点为中心,在方位向和时间向建立搜索网格,并在每一格点上计算干涉相干图,获得图像的平均相干系数。最后选择对应最大图像平均相干系数的方位向和距

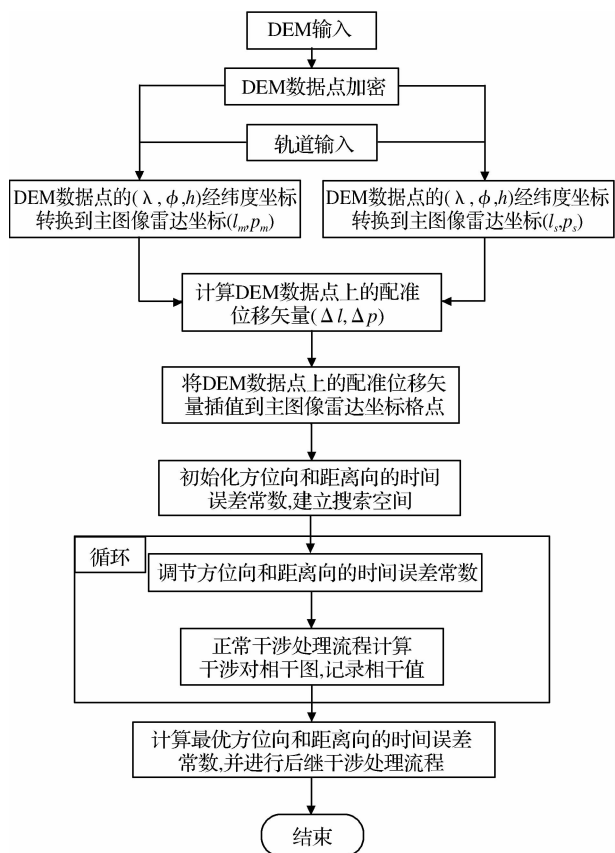


图 1 基于外部 DEM 的干涉图像配准流程

Fig. 1 Process flow of DEM Based SAR image registration

离向时间误差常数为最优误差常数。其中主图像和辅图像相干系数图一般采用式(2)计算^[13]:

$$\gamma = \frac{\left| \sum_{i,j} c_1(i,j) \cdot c_2^*(i,j) \right|}{\sqrt{\left| \sum_{i,j} c_1(i,j) \right|^2 \left| \sum_{i,j} c_2(i,j) \right|^2}} \quad (2)$$

其中: $c_1(i, j)$ 和 $c_2(i, j)$ 是主图像和辅图像的复像素值, γ 为相干系数, 图像的平均相干系数为相干图像的平均值。

3 配准精度分析

基于外部 DEM 的干涉图像配准方法的主要误差来源于轨道误差和外部 DEM 高度误差, Sansosti 给出了轨道误差以及垂直于距离向的外部 DEM 误差对基于外部 DEM 干涉 SAR 图像配准方法的影响^[11],考虑到实际情况下 DEM 误差是垂直水准面而非垂直于雷达距离方向,需要进一步分析外部 DEM 垂向误差对基于外部 DEM 干涉 SAR 图像配准方法的影响。为了便于分析,在下面的推导中,假定干涉 SAR 图像的主辅图像已经精确配准,也就是说已经补偿了对应的时间常数。

一般而言,雷达图像像元成像时间与像元的坐

标 (l, p) 可以用下面的关系来描述:

$$\begin{cases} t_l = t_0 + \frac{l}{\text{PRF}} \\ \tau_p = \tau_0 + \frac{p}{2\text{RSR}} \end{cases} \quad (3)$$

其中: t 为雷达图像方位向成像时间, τ 为雷达单程距离向成像时间, PRF 为雷达脉冲重复频率(Pulse Repeat Frequency), RSR 为雷达距离向采样频率(Range Sampling Rate)。

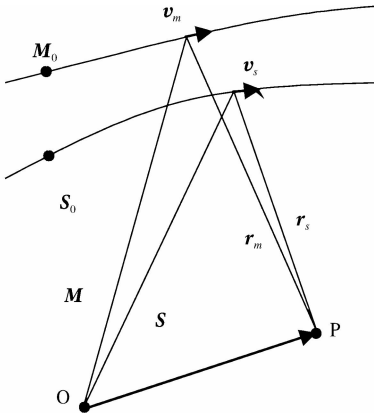


图 2 重复轨道雷达成像示意图

Fig. 2 Repeat Orbit SAR interferometry image geometry

考虑图 2 所表示的重复轨道雷达成像示意图, 其中 O 为坐标系原点, P 指向地面目标的位置, \mathbf{M} 和 \mathbf{S} 为卫星的位置矢量, \mathbf{M}_0 和 \mathbf{S}_0 为图像开始时的卫星位置矢量, \mathbf{v}_m 和 \mathbf{v}_s 为卫星的单位速度矢量, \mathbf{r}_m 和 \mathbf{r}_s 为成像时地面目标指向卫星的矢量。利用卫星飞行轨道与时间的关系, 地面目标点 $\mathbf{P}(x, y, z)$ 对应的配准位移矢量 $(\Delta l, \Delta p)$ 可以写为以下形式:

$$\begin{cases} \Delta l = \frac{\text{PRF}}{v} (\mathbf{v}_s \cdot (\mathbf{P} - \mathbf{S}_0) - \mathbf{v}_m \cdot (\mathbf{P} - \mathbf{M}_0)) \\ \Delta p = \frac{2\text{RSR}}{c} \|\mathbf{S}_0 + \mathbf{v}_s \cdot (\mathbf{P} - \mathbf{S}_0)\mathbf{v}_s - \mathbf{P}\| - \frac{2\text{RSR}}{c} \|\mathbf{M}_0 + \mathbf{v}_m \cdot (\mathbf{P} - \mathbf{M}_0)\mathbf{v}_m - \mathbf{P}\| \end{cases} \quad (4)$$

利用公式(4), 可以得到外部 DEM 高程精度对基于外部 DEM 干涉 SAR 图像配准方法的影响, 考虑平行轨道, 轨道面与水平面的夹角为 β , 轨道交角为 α , 辅图像目标点 P 的雷达入射角度为 θ , 那么有:

$$\delta(\Delta l) = \frac{\text{PRF}}{v} (\mathbf{v}_s - \mathbf{v}_m) \cdot \delta \mathbf{P} = \frac{\text{PRF}}{v} \sin \alpha \sin \beta \delta h \quad (5)$$

$$\begin{aligned} \delta(\Delta p) &= \frac{2\text{RSR}}{c} (\mathbf{r}_s - \mathbf{r}_m) \cdot \delta \mathbf{P} \\ &= \frac{2\text{RSR}}{c} (\cos \theta - \cos(\theta - d\theta)) \delta h \\ &= \frac{2\text{RSR}}{c} \sin \theta \delta h d\theta = \frac{2\text{RSR}}{c} \frac{B_{\perp}}{r} \sin \theta \delta h \end{aligned} \quad (6)$$

从式(5)、式(6)可以看出, 图像之间的配准位移矢量变化与地面高程变化成正比, 这表明如果仅仅利用变换多项式来配准图像, 那么地面高程无规律变化实际上是被忽略了^[9]。从式(5)可以看出, 如果雷达图像的轨道交角为 0, 或者轨道平面与地面平行, 则外部 DEM 的变化不会影响方位向的配准位移矢量。式(6)表明, 距离向的配准位移矢量与垂直基线的大小成正比, 这表明在大的基线情况下, 利用变换多项式配准图像会有更大的误差。

考虑典型的 ERS 雷达数据, PRF 为 1 679.9 Hz, RSR 为 18.96 MHz, 入射角度 θ 为 23° , 轨道平均交角 α 为 0.025° , 轨道与水平面平均交角 β 为 3° , 基线长约为 400 m, 雷达到目标点距离 r 为 850 km。利用式(5)和式(6)可以得到以下结论: 如果仅仅考虑 SRTM 高程误差, 配准精度约为 10^{-4} 个像素。而在仅仅考虑卫星轨道误差的影响时, 配准精度约为 10^{-2} 个像素^[11]。这表明如果使用 SRTM 数据作为外部 DEM 来配准干涉 SAR 图像, 那么其配准精度误差主要来自于卫星轨道误差以及其它可能的误差, 理想情况下配准精度可以达到百分之一一个像素。

4 实验数据处理及分析

实验区域选择在拉斯维加斯北部山区, 这个区域地形起伏较大, 最高最低高程差超过 2 km, 高程在雷达方位距离向坐标上的分布如图 3 所示。实验

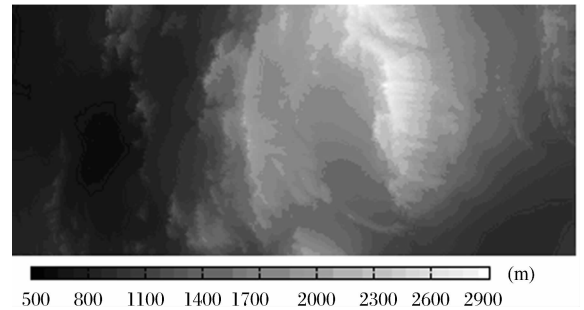


图 3 实验地区地形示意图

Fig. 3 Topography of test area

数据采用欧空局 ERS 卫星获取的雷达图像, 其 Track 号为 356, Frame 号为 2871, 选择主图像轨道号为 09228, 日期为 1997 年 1 月 24 日, 3 景辅图像的对应参数如表 1 所示, DEM 数据选择使用 SRTM 1 ARCS 数据, 轨道数据利用 Delft 大学计算的精确轨道数据。干涉对 09228-03216 具有小的时间和空间基线, 干涉对 09228-04509 和干涉对 09228-07515 时间基线超过 5 a, 而且干涉对 09228-07515 的干涉基线接近临界基线。

表 1 辅图像数据

Table 1 Slave SAR image information

轨道号	03216	04509	07515
获取时间(UTC)	1-Dec-1995	26-May-1992	22-Dec-1992
垂直基线(m)	330	600	1110

表 2 干涉对的平均相干系数

Table 2 Average Coherence of the SAR interferogram pairs

干涉对	09228-03216	09228-04509	09228-07515
基于 DEM 的配准方法	0.399 653	0.229 266	0.257 214
常规配准方法	0.399 650	0.228 630	0.256 919
平均相干系数差异	0.000 003	0.000 636	0.000 295

为了对常规的 SAR 图像配准方法和基于外部 DEM 的 SAR 图像配准方法进行对比,本文分别利用基于外部 DEM 配准方法以及常规配准方法对上述的 3 个干涉对进行了干涉处理。图 4 是利用两种

方法计算的相干系数差异示意图,从图 4 可以看出随着基线的变大,相干系数的差大于 0 的区域增大,其中 4-1 与 4-3 之间的变化非常明显,表 2 给出了定量的利用两种方法进行干涉处理时计算的平均相干系数的数值以及其差异。从表 2 可以看出,具有短的时间基线和空间基线的干涉对具有较高的相干性,而形成干涉对的两景图像其获取的季节对干涉对的相干性有比较大的影响,一般而言相同季节获取的图像会具有较高相干性,而不同季节获得的图像之间相干性相对要低一些。从表 2 的平均相干系数差异可知,基于外部 DEM 配准的方法在大的空间基线时具有一定的优势,并且在处理不同季节的雷达图像干涉时,优势更为明显。原因是当使用常规的配准算法时,大的空间基线和季节差异会导致图像相干性下降,从而使得计算的配准矢量产生偏差,这种现象在图像的低相干区域尤其明显。

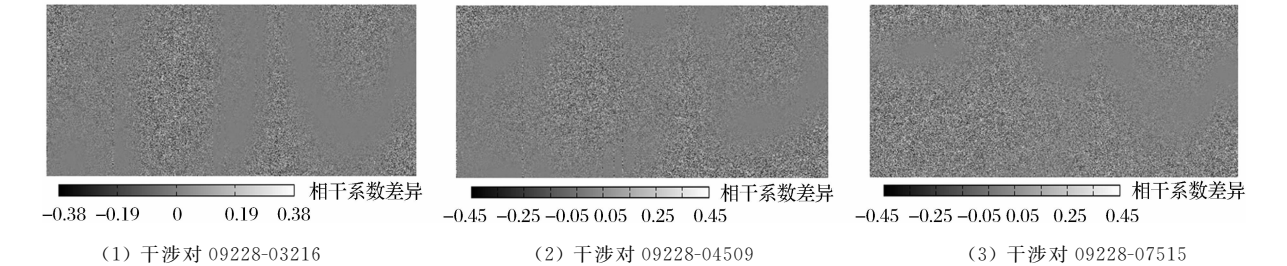


图 4 基于外部 DEM 配准和常规配准方法获得的干涉对相干系数差异示意图

Fig. 4 Coherence difference between DEM based coregistration and conventional registration method

图 5 给出了基于外部 DEM 配准方法计算的干涉图像平均相干系数随方位向和距离向时间误差常数变化的示意图,为了方便描述,时间误差常数采用像素作为单位,选定原始的精确轨道数据的时间误差常数为零点,最优的时间误差常数为平均相干系数最大时对应的方位向和距离向时间误差常数。从图 5-1、图 5-2、图 5-3 可以发现,通过调节方位向和距离向的时间误差常数,干涉对的平均相干系数会随之变化,在平均相干系数峰值周围一个像素范围

以内可以两者近似为二次曲线关系,这表明利用搜索的方法,确实可以获得一个最优的方位向和距离向的时间误差常数。从平均相干系数上看,在平均相干系数的峰值位置附近,平均相干系数 10^{-3} 大小的变化对应十分之一一个像素的时间误差常数的变化,联系表 2 我们发现利用基于外部 DEM 的干涉 SAR 图像配准方法,确实可以获得百分之一一个像素的配准精度。图 5 还表明,虽然每一个干涉对获得的最优的时间误差常数都不相同,但是最优的距离

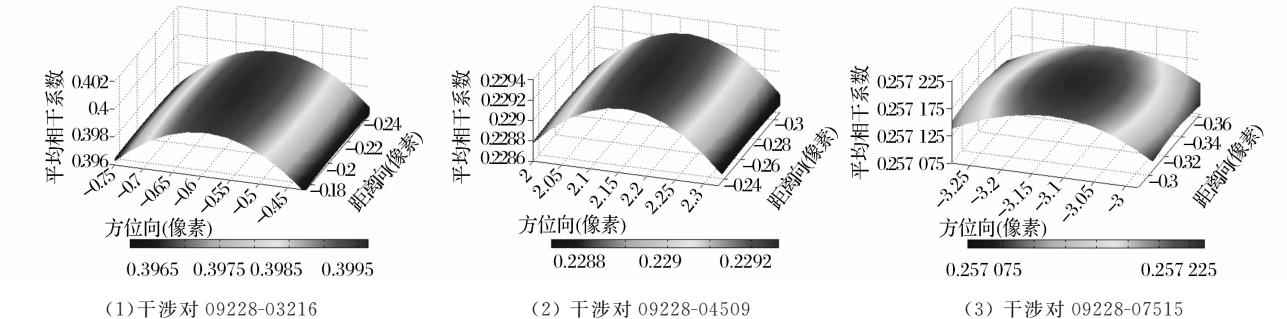


图 5 基于外部 DEM 配准方法获得的干涉图像平均相干系数与时间误差常数关系示意图

Fig. 5 Relationship between average coherence and constant time error for DEM based SAR image registration method

向时间误差常数均小于一个像素,而最优方位向时间误差常数变化较大,这表明精确轨道数据在方位向具有较大的误差,而雷达在成像过程中记录的距离向成像时间相对要更加精确。

5 结 语

基于外部 DEM 的干涉 SAR 图像配准方法通过补偿雷达成像过程中的方位向和距离向时间误差常数达到干涉 SAR 图像之间的亚像素级精度的配准,在大的时间基线和空间基线情况具有相当的优势。这种方法对于雷达图像上的所有像元都具有同样的配准精度,即使在去相干严重的区域也可以获得好的配准精度,避免了常规配准方法的变换多项式不能很好的反映地形变化影响的问题。利用基于外部 DEM 的干涉 SAR 图像配准方法可以获得图像之间的更高的配准精度,理想情况下可以达到百分之一像素级别,这对于充分利用同一地区的多幅雷达图像进行干涉测量研究具有重要作用。在下一步的研究工作中,将利用基于外部 DEM 干涉 SAR 图像配准方法对 SAR 图像进行配准,并应用到永久散射体技术中。

参考文献:

- [1] Rodriguez E, Martin J M. Theory and Design of Interferometric Synthetic Aperture Radars[J]. IEE Proc. F, 1992, 139(2):147-159.
- [2] Massonnet D, Rabaute T. Radar Interferometry: Limits and Potential[J]. IEEE Transactions on Geoscience and Remote

- Sensing, 1993, 31(2):455-464.
- [3] Just D, Bamler R. Phase Statistics of Interferograms with Applications to Synthetic Aperture Radar[J]. Applied Optics, 1994, 33(20):4361-4368.
- [4] Rosenfeld A, Kak A C. Digital Picture Processing[M]. Academic Press, Orlando, FL, USA, 1982.
- [5] Li F K, Goldstein R M. Studies of Multibaseline Spaceborne Interferometric Synthetic Aperture Radars[J]. IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing, 1990, 28(1):88-97.
- [6] Ferretti A, Prati C, Rocca F, *et al.* Nonlinear Subsidence Rate Estimation Using Permanent Scatterers in Differential SAR Interferometry[J]. IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing, 2000, 38(5):2202-2212.
- [7] Ferretti A, Prati C, Rocca F, *et al.* Permanent Scatterers in SAR Interferometry[J]. IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing, 2001, 39(1):8-20.
- [8] Zebker H A, Villasenor J. Décorrelation in Interferometric Radar Echoes[J]. IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing, 1992, 30(5):950-959.
- [9] Massonnet D, Feigl K L. Radar Interferometry and Its Application to Changes in the Earth's Surface[J]. Reviews of Geophysics, 1998, 36(4):441-500.
- [10] Adam N, Kampes B M, Eineder M, *et al.* The Development of a Scientific Permanent Scatterer System[A]. In Proceedings of ISPRS Workshop High Resolution Mapping from Space [C]. Hannover, Germany, 2003.
- [11] Sansosti E, Berardino P, Manunta M, *et al.* Geometrical SAR Image Registration[J]. IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing, 2006, 44(10):2861-2870.
- [12] Gabriel A K, Goldstein R M. Crossed Orbit Interferometry: Theory and Experimental Results from SIR-B[J]. International Journal of Remote Sensing, 1988, 9:857-872.
- [13] Li F, Goldstein R. Studies of Multi-baseline Spaceborne Interferometric Synthetic Aperture Radars[J]. IGARSS '87, 1987, 2:1545-1550.

DEM Based SAR Image Registration Method

LIU Guang, GUO Hua-dong, FAN Jin-hui

(State Key Laboratory of Remote Sensing Science, Institute of Remote Sensing Applications,
Chinese Academy of Sciences and Beijing Normal University, Beijing 100101, China)

Abstract: SAR images registration is an important step in SAR interferometry technology, a sub-pixel accuracy of the registration step is necessary to obtain a phase interferogram that truly reflects the elevation or deformation of the target on the ground. This paper introduces the basic conception of external DEM based SAR image registration method and gives an analytical expression of sensitivity analysis in respect of DEM error effect. The paper realizes the processing flow of SAR registration method and implements the sub-pixel precision registration of SAR images. The ERS datum is used as validation, and the results show that 1% pixels registration accuracy can be achieved by using precise orbit and SRTM as external DEM, this image registration method is especially useful in the situation of big temporal baseline and large geometric baseline.

Key words: SAR Interferometry (InSAR); Image registration; SRTM; Subpixel accuracy