

## 基于成像和相干信息的 InSAR 图像同名点提取方法

李银伟<sup>\*①②</sup> 向茂生<sup>①</sup> 韦立登<sup>①</sup>

<sup>①</sup>(中国科学院电子学研究所微波成像技术国家级重点实验室 北京 100190)

<sup>②</sup>(中国科学院大学 北京 100039)

**摘要:** 对于重叠区域较小的相邻两条带 SAR 图像, 严重几何畸变使得难以直接提取同名点(Tie Points, TPs)。该文基于 InSAR 图像成像信息和相干信息提出一种新的同名点提取方法。该方法首先根据成像信息对原始图像进行仿射变换, 然后利用光学影像特征匹配的方法获得同名点, 最后以相干系数图为指导对同名点进行筛选。通过对实际 InSAR 数据(重叠区域<15%)的处理, 该方法不仅能够自动提取同名点, 而且提取的同名点满足高精度的干涉测图要求。同时使得一幅高精度正射图像由 5 个条带减少到 3 个条带拼接, 大大降低了测图作业量和测图成本。

**关键词:** InSAR 图像; 成像信息; 同名点; 相干系数图; 干涉测图

中图分类号: TN959.73

文献标识码: A

文章编号: 1009-5896(2013)09-2141-06

DOI: 10.3724/SP.J.1146.2012.01581

## Method of Tie Points Extraction Based on Imaging and Coherent Information

Li Yin-wei<sup>①②</sup> Xiang Mao-sheng<sup>①</sup> Wei Li-deng<sup>①</sup>

<sup>①</sup>(National Key Laboratory of Science and Technology on Microwave Imaging, Institute of Electronics, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100190, China)

<sup>②</sup>(University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100039, China)

**Abstract:** For SAR images of two adjacent strips with the smaller overlapping area, the severe geometric distortion makes it difficult to extract directly the Tie Points (TPs). Based on imaging information and coherent information of the InSAR images, this paper puts forward a new method for extracting TPs. First, it makes the raw image process the affine transformation with the imaging information; and then it uses the feature matching method of optical image to obtain TPs; finally, the TPs are selected according to the quality map. Experiments on the real InSAR data (overlap region <15%) demonstrate that it can not only automatically extract TPs, but also the extracted TPs meet the requirements for the interferometric mapping of some scale. At the same time, it makes the number of strips reduce from five to three joining together for an image of some scale, which decrease greatly the mapping work and mapping cost.

**Key words:** InSAR image; Imaging information; Tie Points (TPs); Quality map; Interferometric mapping

### 1 引言

干涉SAR(Interferometric Synthetic Aperture Radar, InSAR)能够利用两天线与目标点的相位差来获取数字高程模型(Digital Elevation Model, DEM)<sup>[1]</sup>。在由干涉相位反演DEM时, 需要先利用已知高程信息的地面控制点(Ground Control Points, GCPs)对各干涉参数(基线长度、基线倾角和干涉相位偏置)进行定标<sup>[2-4]</sup>, 以提高DEM精度。而通常在大区域地形测绘时, 机载InSAR系统采取分若干条带获取数据, 每条带又分若干场景进行处

理的方式来作业。由于在作业过程中难以实地布放足量且分布合理的GCPs, 现有的定标方法几乎都是利用相邻影像之间的TPs并联合少量的GCPs, 对测绘区域内所有场景进行整体标定。因此, 这使得TPs的提取显得尤为重要。

现在基本上都是利用光学影像中具有不变性的检测子和描述子匹配特征点的方法(如SIFT<sup>[5]</sup>算法或SURF<sup>[6]</sup>算法)来对SAR图像进行同名点提取<sup>[7,8]</sup>。这些特征提取算法虽然具有旋转、尺度以及局部仿射和灰度不变性等特性, 但是它们忽略了SAR图像特有的侧视成像模式。SAR侧视成像几何和斜距投影使得重叠区在两航带的地距采样间隔不一样, 进而造成相邻影像重叠区的几何畸变不一致。当两航

2012-12-07 收到, 2013-04-27 改回

国家 973 计划项目(2009CB724003)资助课题

\*通信作者: 李银伟 liyinwei19@163.com

带的重叠范围非常小(小于15%)时,该局部几何畸变将更加显著。这使得光学影像的特征提取算法在几何畸变严重不一致的两图像上无法提取到同名点。另一方面,这些算法完全基于SAR图像的幅度信息,忽略了其至关重要的相位信息。干涉定标是利用同名点的高度相等来连接相邻两图像的,而反映高度信息的正是其相位信息。因此,利用这些算法提取得到的同名点其干涉相位精度不能保证,无法直接在干涉定标中使用。

为了克服上述缺点,本文基于成像信息和相干信息提出了一种新的同名点提取方法。首先根据SAR图像的成像信息(航向角、斜视角)对SAR图像进行旋转、拉伸等仿射变换,然后利用尺度不变特征变换(SIFT)实现不变特征检测,采用双向匹配策略获得同名点,最后以相干系数图为导引进行同名点的筛选,获得能直接用来干涉定标的同名点。通过对实际数据的处理,此方法获得同名点能够满足高精度的干涉测图要求,验证了该方法的有效性。

## 2 基于成像信息的仿射变换

通常在大区域地形测绘时,机载InSAR系统采取分若干条带获取数据,每条带分若干场景进行处理的方式来作业。因此,TPs的提取分为两类:同航带相邻场景和同航向相邻航带。其中,同航带相邻场景属于同一飞行航迹。相邻场景的重叠区域是同一数据先后经过两次成像处理获得,只是处理时的理想运动轨迹、多普勒中心等不一致造成其存在较小的尺度缩放、角度缩放及仿射变形等,利用光学影像的特征提取算法很容易直接提取同名点,不必先进行仿射变换。在此不做考虑,本文主要考虑同航向相邻航带的同名点提取。

同航向相邻航带属于两次飞行航迹,成像几何如图1(a)所示。重叠区位于航带I的远距端,航带II的近距端。在SAR成像时两航带的理想运动轨迹不平行,同时在两次飞行中天线指向不一致,使得两图像的斜视角不一致,造成两幅图像间存在旋转变换,如图1(b)所示,其中航带I和航带II的成像结果分别记为图像I和图像II。为简化起见,假设航迹1航向为正北方向,斜视角为0;航带2航向与之夹角为 $\theta_h$ ,同时两天线之间存在斜视角差 $\theta_{sq}$ 。两图像之间存在旋转角度 $\theta$ 。

$$\theta = \theta_h + \theta_{sq} \quad (1)$$

因此,图像II  $f(x, y)$  经过旋转可以得到与图像I航迹平行且斜视角相同的图像III  $g(x, y)$ , 即

$$g(x, y) = \mathbf{M}_\theta \cdot f(x, y) \quad (2)$$

其中旋转矩阵

$$\mathbf{M}_\theta = \begin{bmatrix} \cos \theta & \sin \theta \\ -\sin \theta & \cos \theta \end{bmatrix}$$

SAR侧视成像几何和斜距投影使得重叠区在航带II的地距采样间隔大于航带I。同航向相邻航带SAR的斜距-地距关系剖面图如图1(c)所示,其中, $A_1, A_2$ 分别表示获取图像I和图像II时的APC(Antenna Phase Center)位置, $h_1, h_2$ 分别表示APC  $A_1, A_2$ 的高度, $R_1, R_2$ 分别表示APC位置 $A_1, A_2$ 与重叠区域左边缘 $P_0$ 的最近斜距, $dR_1$ 表示图像I的斜距采样间隔。对于图像I上与点 $P_0$ 在斜距向上相隔 $n$ 点的点 $P_n$ ,可以通过式(3)计算点 $P_0$ 和点 $P_n$ 的地距距离。

$$|P_0 P_n| = \sqrt{(R_1 + n \cdot dR_1)^2 - h_1^2} - \sqrt{R_1^2 - h_1^2} \quad (3)$$

然后由式(4)可以计算在图像II中点 $P_n$ 与点 $P_0$ 的斜距差 $\Delta R_2$ 。

$$\Delta R_2 = \sqrt{(\sqrt{R_2^2 - h_2^2} + |P_0 P_n|)^2 + h_2^2} - R_2 \quad (4)$$

最后由式(5)可以获得 $P_n$ 在图像II中与点 $P_0$ 相隔的点数 $\Delta n$ 。

$$\Delta n = \Delta R_2 / dR_2 \quad (5)$$

这样,可以把图像II重采样至图像I的斜距坐标系下。通过以上旋转、拉伸两步仿射变换,大大降低了两图像的几何畸变差异。

## 3 基于相干信息的同名点筛选

在干涉定标中,除了利用GCPs的绝对位置信息建立定标约束方程外,还利用相邻场景之间的同名点信息建立定标约束方程。式(6)表征了同名点之间的高程约束条件,其中 $(B, \alpha, \phi), (B', \alpha', \phi')$ 表示同名点所在相邻场景的待定标参数(基线长度、基线倾角和干涉相位偏置), $\varphi_k, \varphi'_k$ 表示同名点在不同场景中的干涉相位值(已解缠)。

$$h(B, \alpha, \phi, \varphi_k) = h(B', \alpha', \phi', \varphi'_k) \quad (6)$$

从式(6)可以看出,在干涉定标中,虽然是利用同名点的高程相等,但最终还是转化到同名点的干涉相位。因此必须减少TPs处的干涉相位噪声,以得到精确的干涉定标参数。

干涉相位标准差 $\sigma_\phi$ 与相关系数 $\gamma$ 及多视视数 $L$ 的关系满足Cramer-Rao界<sup>[9,10]</sup>

$$\sigma_\phi = \frac{1}{\sqrt{2L}} \sqrt{\frac{1-\gamma^2}{\gamma^2}} \quad (7)$$

图2给出了在多视视数 $L = 1, 2, 4, 8, 12, 16, 32$ 时,干涉相位标准差 $\sigma_\phi$ 随相关系数 $\gamma$ 的变化曲线。从式(7)和图2都明显发现, $\sigma_\phi$ 随 $\gamma$ 的增大而减少。因此本文基于相干系数图为导引来剔除干涉相位噪声大的

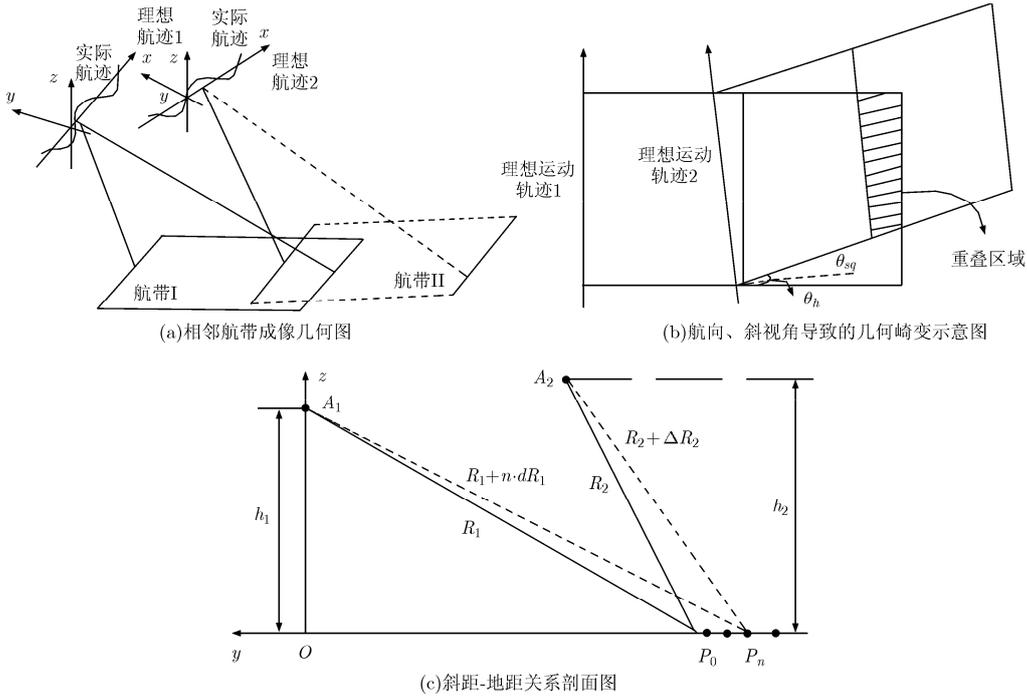


图1 相邻航带几何示意图

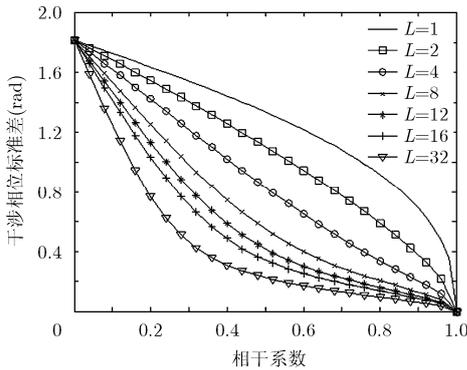


图2 L不同时  $\sigma_\phi$  随  $\gamma$  的变化关系

匹配点对，以保证 TP 的相位质量。

对于零均值高斯随机变量的复干涉像对  $s_1, s_2$ ，可以通过式(8)对相关系数  $\gamma$  进行快速估计计算<sup>[11]</sup>。

$$\bar{\gamma} = \begin{cases} \sqrt{2\bar{\rho} - 1}, & \bar{\rho} > 0.5 \\ 0, & \bar{\rho} \leq 0.5 \end{cases} \quad (8)$$

其中

$$\bar{\rho} = \frac{\sum_{n=0}^N \sum_{m=0}^M |u_1(n, m)|^2 |u_2(n, m)|^2}{\sqrt{\sum_{n=0}^N \sum_{m=0}^M |u_1(n, m)|^4 \sum_{n=0}^N \sum_{m=0}^M |u_2(n, m)|^4}} \quad (9)$$

其中  $M$  和  $N$  分别为方位向和距离向的窗口长度。

尽管在多视视数  $L$  一定的情况下， $\sigma_\phi$  随  $\gamma$  的增大而减少，但仅仅根据单个点相关系数大并不能判定此点的干涉相位噪声小。因此，在实际利用相干

系数图对候选同名点剔除时，不仅仅需要考虑同名点处的相干系数，还需要考虑其邻域的相干系数。

由 InSAR 高程反演的几何关系可以得到高程精度  $\sigma h$  与干涉相位精度  $\sigma_\phi$  的关系为

$$\sigma h = \frac{\lambda r \sin \theta}{4m_f \pi B \cos(\theta - \alpha)} \sigma_\phi \quad (10)$$

其中  $\lambda$  为波长， $r$  为目标点到天线的斜距， $B, \alpha$  分别为基线长度和基线倾角，当雷达工作在标准模式时  $m_f = 0.5$ ，乒乓模式时  $m_f = 1$ 。因此在高程精度  $\sigma h$  已知时，可以联合式(7)和式(10)来确定单点的相关系数门限  $\gamma_{th}$ 。

另外，在干涉测图中，一般要求相干系数图的均值大于 0.90<sup>[12]</sup>。因此，在判断同名点周围邻域相干性时，取其邻域相干系数均值

$$E[\gamma] \geq 0.95 \quad (11)$$

#### 4 同名点提取算法

近年来，利用具有不变性的检测子和描述子匹配特征点的方法成为同名点自动提取的研究热点。该类方法首先利用如 SIFT, SURF(Speeded Up Robust Features)等检测子提取图像中稳定的特征(如点、线、面)；然后根据特征点的邻域采用描述子形成特征向量；最后按照相似性度量准则建立同名点匹配对。以检测子 SIFT 为例，本节首先简单地描述检测子 SIFT 算法的具体过程，然后结合前面两节内容给出完整的同名点提取算法。

#### 4.1 SIFT 算法

SIFT 算法大致可以分为 4 步: 尺度空间极值点检测、特征点定位、特征点主方向确定和特征向量生成。

(1) 尺度空间极值点检测 提取尺度不变的特征点, 其主要思想是提取的特征点出现在任何一个尺度上。这样不论图像的尺度如何变化, 总能够提取出这种特征点。高斯卷积核是实现尺度变换的唯一变换核, 并且是唯一的线性核。所以一幅 2 维图像  $I(x, y, \sigma)$  的尺度空间定义为

$$L(x, y, \sigma) = G(x, y, \sigma) * I(x, y, \sigma) \quad (12)$$

其中  $G(x, y, \sigma)$  是标准差为  $\sigma$  的尺度可变高斯函数。

为了有效地在尺度空间检测到稳定的关键点, 一般采用高斯差分尺度空间(DOG scale-space), 其由不同尺度的高斯差分核与图像卷积生成。

$$\begin{aligned} D(x, y, \sigma) &= (G(x, y, k\sigma) - G(x, y, \sigma)) * I(x, y) \\ &= L(x, y, k\sigma) - L(x, y, \sigma) \end{aligned} \quad (13)$$

(2) 特征点定位 通过拟和 3 维二次函数以精确确定关键点的位置和尺度(达到亚像素精度), 同时去除低对比度的关键点和不稳定的边缘响应点(因为 DOG 算子会产生较强的边缘响应), 以增强匹配稳定性、提高抗噪声能力。

(3) 特征点主方向确定 通过求解每个极值点的梯度来为极值点赋予方向, 其梯度幅值和方向为  $m(x, y) =$

$$\sqrt{(L(x+1, y) - L(x-1, y))^2 + (L(x, y+1) - L(x, y-1))^2} \quad (14)$$

$$\theta(x, y) = \tan^{-1} \left[ \frac{L(x, y+1) - L(x, y-1)}{L(x+1, y) - L(x-1, y)} \right] \quad (15)$$

(4) 特征向量生成 通过对关键点周围图像区域分块, 计算块内梯度方向直方图, 生成一个 128 维的描述子向量, 并对其进行规范化。

#### 4.2 算法流程

本文基于成像信息和相干信息提出了一种新的同名点提取方法, 其主要过程可以分为 5 部分: 仿射变换、利用 SIFT 检测特征、特征匹配、相干性剔除和坐标逆映射。其详细流程为:

(1) 基于成像时理想运动补偿的航向角及斜视角等信息, 确定两幅图像 I, II 之间的旋转角, 然后对图像 II 进行旋转变换得到图像 III。

(2) 根据图像 I 和图像 III 重叠区域的雷达平台高度、最近斜距、采样间隔等成像信息, 建立两幅图像之间对应的斜距关系, 然后对图像 III 进行重采样, 使之重采样到图像 I 的斜距坐标系下。

(3) 利用 SIFT 算法分别检测两幅图像的多尺度

特征, 并分别建立其描述子向量。

(4) 利用欧几里得(Euclid)距离对特征点进行度量, 采用 Best-Bin-First(BBF)<sup>[13]</sup>算法, 按照比值法<sup>[5]</sup>准则进行快速的双向匹配, 建立初始匹配对集合。

(a) 比值法是指如果特征点与其最近邻和次近邻的距离之比小于指定阈值, 则判定该特征点和其最近邻为匹配点。

(b) 双向匹配是指待匹配图像中的 A 点对应的匹配点是参考图像中的 B 点, 同时与 B 点对应的匹配点是 A 点, 这样才认为 A 和 B 是一对匹配点。

(5) 利用随机抽样一致(RANdom SAmples Consensus, RANSAC)<sup>[14]</sup>算法来消除错误的匹配点对, 得到正确的匹配点对。

(6) 正确匹配点对的相干系数  $\gamma$  及其邻域内的相干系数  $E[\gamma]$  是否满足条件:  $\gamma \geq \gamma_{th}$  和  $E[\gamma] \geq 0.95$ , 若满足条件, 则判定该匹配点对为同名点。

(7) 将得到的同名点坐标根据步骤(1)和步骤(2)两步的几何关系进行逆映射, 最终获得同名点在原始图像上的坐标。

## 5 实际数据处理

为验证本文方法的有效性, 采用中国科学院电子学研究所机载双天线 InSAR 于 2011 年 7 月在四川某地获取的干涉数据进行实验。首先是验证利用本文方法能够对重叠区域较小的同航向相邻航带进行同名点提取, 接着验证利用上述方法提出的同名点能够满足高精度的测图中对干涉 SAR 数据进行干涉定标及图像拼接的要求, 以验证上述方法的实用性和有效性。

### 5.1 同名点的提取

同航向相邻航带的两影像尺寸分别为  $8000 \times 13120$  和  $8500 \times 13120$ , 航向重叠大小为 2100 和 1316, 分别占整个航带宽度的 16% 和 10%。两图像的成像参数分别如下(航带 I 和航带 II): 航向角为  $90.64^\circ$  和  $90.88^\circ$ , 斜视角为  $2.44^\circ$  和  $2.45^\circ$ , 飞行相对高度为 5659.74 m 和 5660.91 m, 距离向采样间隔都为 0.4997 m, 最近斜距距离都为 6481.26 m。

两图像的严重几何畸变差异, 使得传统的光学影像特征匹配提取同名点的方法失效。根据上述成像参数, 对图像 II 进行仿射变换, 然后利用特征匹配的方法提取同名点, 再经过利用相干系数图进行筛选得到的同名点如图 3(a) 所示; 最后对提取出的同名点进行逆映射得到在原始图像上的坐标如图 3(b) 所示。由此可以得到, 本文提出的算法能够对几何畸变严重不一致的两图像提取同名点。

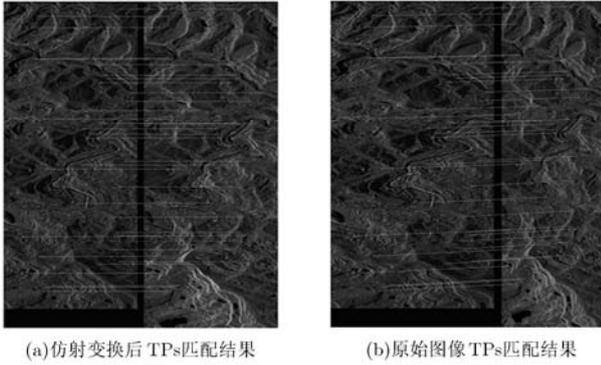


图3 TPs 提取结果

### 5.2 干涉定标和图像拼接

机载 InSAR 系统在大区域地形测绘时通常采取分若干条带获取数据，每条带又分若干场景进行处理的方式来作业。要获得一定比例尺的正射影像图或 DEM 图时，需要不同条带及不同场景之间的图像进行拼接。但由于在作业过程中难以实地布放足量且分布合理的 GCPs，现有的定标方法都必须利用相邻影像之间的 TPs 并联合少量的 GCPs，对测绘区域内所有场景进行整体标定。因此为减少图像拼接时的条带数目，严重几何畸变的相邻条带之间的同名点提取尤为重要。

本小节以一幅高精度的实际制图为例来验证上述方法提取得到的同名点的有效性。所选数据的斜

距 SAR 图像如图 4 所示，共包含 3 个条带，为简化处理在成像时每个航带不再分多景成像。其基本参数为：载频 9.6 GHz，信号带宽 250 MHz，采样频率 300 MHz，脉冲重复频率 3300 Hz，平台速度 120 m/s，基线长度 2.3 m，基线倾角 0°，中心斜视角 45°。图 4 中共布放由 15 个已知 3 维位置的角反射器，在联合定标中用作 GCP 点；各相邻两场景利用上述方法分别获得了 120 对和 110 对同名点。在此利用加权最优化 3 维联合定标法<sup>[2]</sup>对各个场景进行联合定标，经过地理编码和图像拼接，最终所得的正射幅度图如图 5 和正射 DEM 如图 6 所示。这里需要说明的是，图 6 中颜色由黑到白，表示高度由低到高。

另外在本文方法提出前，由于无法直接提取同名点，以及人工提取同名点也较困难，一般是通过在 3 幅斜距图像之间额外增加两个条带，使得条带间重叠区域增大，能够利用特征匹配方法提取同名点。按照干涉制图流程，最终得到的正射 DEM 如图 7 所示，其满足高精度的测图要求，在此认为其反映地形的真实高程。

通过对图 6 和图 7 所示的 DEM 进行统计分析，可以得到 DEM 差值(图 6 的 DEM 高度减去图 7 的 DEM 高度)的均值为 0.5118，方差为 2.8066，其精度满足高精度的测图要求。同时，该方法与一般的提取同名点方法相比，只是增加了仿射变换过程以

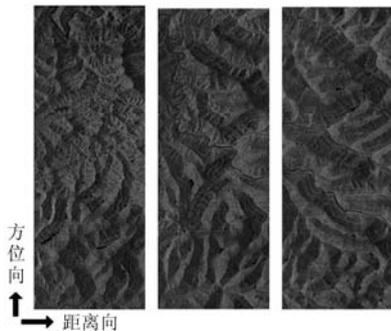


图4 斜距域 SAR 图像

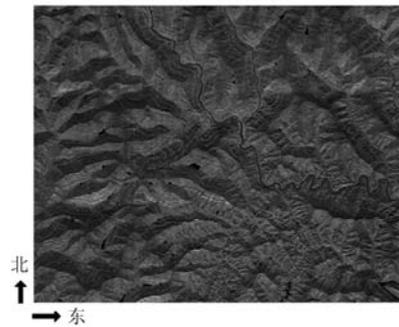


图5 正射 SAR 图像

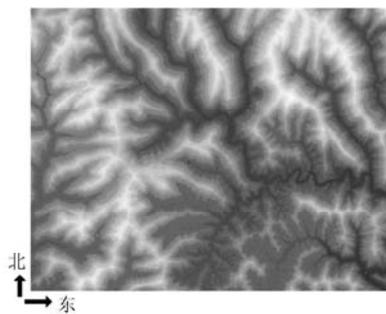


图6 3条带拼接后的 DEM

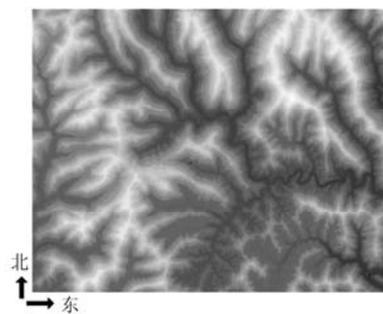


图7 5条带拼接后的 DEM

及读取同名点的相干系数进行筛选的过程,其运算量的增加可以忽略不计。

## 6 结论

本文提出了一种根据 SAR 图像成像信息和相干信息的同名点提取方法。该方法在光学影像特征匹配方法的基础上,首先根据 SAR 图像的成像信息对图像进行仿射变换,最后以相干系数图为导向对利用特征匹配方法得到的同名点进行筛选。通过对实际数据的处理,验证了本文方法在重叠区域较小(<15%),几何畸变严重不一致的两幅图像上能够提取同名点。同时利用上述方法提取的同名点进行干涉定标和图像拼接,不仅高程精度能够达到高精度的测图要求,而且能够使原来的 5 个条带数据拼接减少为现在的 3 个条带,大大减少了干涉测图的作业量和作业成本。

## 参考文献

- [1] Rosen P A, Hensley S, Joughin I R, *et al.* Synthetic aperture radar interferometry[J]. *Proceedings of the IEEE*, 2000, 88(3): 333-382.
  - [2] 马婧, 尤红建, 胡东辉. 机载干涉雷达数据联合定位及拼接技术研究[J]. 武汉大学学报(信息科学版), 2012, 37(4): 410-414. Ma Jing, You Hong-jian, and Hu Dong-hui. Research on union localization and mosaic technology of InSAR data[J]. *Geomatics and Information Science of Wuhan University*, 2012, 37(4): 410-414.
  - [3] 毛永飞, 向茂生. 基于加权最优化模型的机载 InSAR 联合定标算法[J]. 电子与信息学报, 2011, 33(12): 2819-2824. Mao Yong-fei and Xiang Mao-sheng. Joint calibration of airborne interferometric SAR data using weighted optimization method[J]. *Journal of Electronics & Information Technology*, 2011, 33(12): 2819-2824.
  - [4] 胡继伟, 洪峻, 明峰, 等. 一种适用于大区域稀疏控制点下的机载 InSAR 定标方法[J]. 电子与信息学报, 2011, 33(8): 1792-1797. Hu Ji-wei, Hong Jun, Ming Feng, *et al.* A calibration method for airborne InSAR applied to large areas with sparse GCPs [J]. *Journal of Electronics & Information Technology*, 2011, 33(8): 1792-1797.
  - [5] Lowe D G. Distinctive image features from scale-invariant keypoints[J]. *International Journal of Computer Vision*, 2004, 60(2): 91-110.
  - [6] Bay H, Ess A, Tuytelaars T, *et al.* Speeded-up robust features (SURF)[J]. *Computer Vision and Image Understanding*, 2008, 110(3): 346-359.
  - [7] 王山虎, 尤红建, 付琨. 基于大尺度双边 SIFT 的 SAR 图像同名点自动提取方法[J]. 电子与信息学报, 2012, 34(2): 287-293. Wang Shan-hu, You Hong-jian, and Fu Kun. An automatic method for finding matches in SAR images based on coarser scale bilateral filtering SIFT[J]. *Journal of Electronics & Information Technology*, 2012, 34(2): 287-293.
  - [8] 姜丽敏, 陈曙暄, 向茂生. 面向 InSAR 稀疏控制点测图的同名点提取方法[J]. 电子与信息学报, 2011, 33(12): 2837-2845. Jiang Li-min, Chen Shu-xuan, and Xiang Mao-sheng. A method of homologue points extraction for InSAR mapping with sparse control points[J]. *Journal of Electronics & Information Technology*, 2011, 33(12): 2837-2845.
  - [9] Just D and Bamler R. Phase statistics of interferogram with applications to synthetic aperture radar[J]. *Applied Optics*, 1994, 33(20): 4361-4368.
  - [10] Rodriguez E and Martin J M. Theory and design of synthetic aperture radar[J]. *IEE Proceedings F Radar and Signal Processing*, 1992, 139(2): 147-159.
  - [11] Guarnieri A M and Prati C. SAR interferometry: a "quick and dirty" coherence estimator for data browsing[J]. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 1997, 35(3): 660-669.
  - [12] 向茂生, 梁兴东, 王宇, 等. 机载 InSAR 系统测制 3D 产品技术规范[R]. 中国科学院电子学研究所, 2011. Xiang Mao-sheng, Liang Xing-dong, Wang Yu, *et al.* Technical rules for producing 3D digital products based on airborne InSAR[R]. Institute of Electronics, Chinese Academy of Sciences, 2011.
  - [13] Beis J and Lowe D G. Shape indexing using approximate nearest-neighbor search in high dimensional spaces[C]. Conference on Computer Vision and Pattern Recognition, Puerto Rico, 1997: 1000-1006.
  - [14] Fischler M and Bolles R C. Random sample consensus: a paradigm for model fitting with applications to image analysis and automated cartography[J]. *Communications of the ACM*, 1981, 24(6): 381-395.
- 李银伟: 男, 1985年生, 博士生, 研究方向为SAR成像、机载双天线InSAR及重轨InSAR信号处理。
- 向茂生: 男, 1964年生, 研究员, 博士生导师, 长期从事干涉合成孔径雷达技术及方法的研究工作。
- 韦立登: 男, 1973年生, 副研究员, 硕士生导师, 研究方向为干涉合成孔径雷达数据处理技术。