

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

石晓进^{①②} 张云华^①

^①(中国科学院空间科学与应用研究中心 北京 100190)

^②(中国科学院研究生院 北京 100049)

摘要: 相对于单轨双天线 InSAR 系统, 重复轨道 InSAR 系统由于轨道不能完全平行, 导致 InSAR 图像对间存在夹角, 使其配准更为困难。该文针对非平行重复轨道的 InSAR 问题, 提出了一种结合 Fourier-Mellin 变换和相干系数法的 InSAR 图像配准算法, 对存在夹角的 SAR 复图像对进行精确配准。该方法用于粗配准时, 通过引入非线性图像幅度变换预处理, 克服了 Fourier-Mellin 变换无法直接处理 SAR 图像对幅度分布动态范围大且不均匀的问题, 而用于精配准时, 通过引入相干系数法, 精确估计了复图像对之间存在的微小角度。以 SIR-C/X 重复轨道的 X 波段 SAR 数据为例, 详细比较了传统相干系数配准算法和该文算法在配准精度和计算时间上的差异, 从而验证了算法的有效性。

关键词: 干涉合成孔径雷达; 重复轨道; 图像配准; Fourier-Mellin 变换; 相干系数法

中图分类号: TN959.74

文献标识码: A

文章编号: 1009-5896(2009)04-0803-05

A New Image Registration Method for Repeat-Pass InSAR Based on Fourier-Mellin Transformation and Correlation-Coefficient Algorithm

Shi Xiao-jin^{①②} Zhang Yun-hua^①

^①(Center for Space Science and Applied Research, CAS, Beijing 100190, China)

^②(Graduate University of the Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China)

Abstract: Compared with one pass InSAR system with two antennae, the registration of image pair of repeat-pass InSAR system is much more difficult due to parallel tracks are usually not guaranteed. In this paper, a new image co-registration algorithm for repeat-pass InSAR, which combines the Fourier-Mellin transform and correlation-coefficient algorithm, is proposed to perform accurate co-registration for complex image pair having rotation angle due to unparallel tracks. When the method is used as coarse co-registration step, a nonlinear amplitude transformation is introduced as pre-processing to overcome the failure of Fourier-Mellin transformation method in case of image pair with large dynamic amplitude range and non-uniform amplitude distribution, and when used as fine co-registration step, correlation-coefficient algorithm is incorporated to accurately estimate the small rotation angle between image pair. SIR-C/X X-band experimental data are used to test the proposed algorithm through comparing with traditional correlation-coefficient algorithm in both accuracy and run time. The experimental results prove the effectiveness of the proposed algorithm.

Key words: Interferometric Synthetic Aperture Radar (InSAR), Repeat-pass; Image co-registration; Fourier-Mellin transform; Correlation-coefficient algorithm

1 引言

InSAR(Interferometric Synthetic Aperture Radar)是一种通过处理两幅相干的 SAR 复数图像来获取三维地形的技术。InSAR 处理中两大关键步骤是图像配准和相位解缠。图像配准是对两幅存在缩放、平移、旋转关系的图像进行变换, 使之共有特征能够对应起来的过程。相对于普通光学照片, SAR 图像, 特别是星载 SAR 图像中存在很强的噪声, 这使得 InSAR 图像配准工作更为困难。高精度的图像配准是保

证获得高相干性, 从而保证三维地形高程测量精度的前提, 通常 InSAR 图像配准必须达到亚像素级精度^[1,2]。

前人已经提出多种 InSAR 图像配准方法, 例如 Andrew 等通过计算两幅图像干涉相位的频谱, 并寻找频谱中能量最大的地方来确定图像之间的偏移量的最大频谱法^[2]; Lu 等通过计算图像之间的相干系数及其最大值来计算图像间的位移量的相干系数法^[3], Scheiber 等提出了无需任何插值和交叉相关运算的利用频谱密度中相位信息进行配准的方法^[4]; 刘宝泉等提出一种基于 B-样条曲线拟合和匹配的 InSAR 复图像对的自动配准算法^[5]。但是上述方法主要针对图像对之

间只存在两个方向的位移偏移的情况,并不完全适用于重复轨道 InSAR 的图像配准,因为对于重复轨道 InSAR 来说,轨道不可能完全平行,这就导致图像对之间存在一个明显的角度偏移量,所以需要有一个新的算法来对图像间的夹角进行估计。师瑞荣等在对机载重复轨道干涉 SAR 的试验数据处理中,提出将图像分块分别配准并通过坐标变换方法来获得重复轨道的夹角,从而明显改善图像配准效果^[6]。

1994年,Chen等人提出了一种基于 Fourier-Mellin 变换的图像配准方法^[7,8]。假设两幅图像之间存在缩放、平移、旋转关系,该方法通过计算两幅图像频域互功率谱的逆傅里叶变换所对应的峰值来确定其平移关系,通过在图像频域引入对数-极(Log-Polar)变换来计算图像之间的旋转角和缩放因子,从而实现两幅图像的配准。该方法具有较强的鲁棒性和更小的计算量。

2002年,Abdelfattah等人将 Fourier-Mellin 变换应用于 ERS 重复轨道卫星在 Orgeval, Mastang 等地区的 InSAR 图像数据的配准处理中^[9,10]。文献[10]中的结果表明,通过 Fourier-Mellin 变换方法,可以得到 InSAR 图像对间精度为 1° 的夹角,并且相对于相干系数法,该方法可进一步提高图像对间的相干性。但文献[10]方法不适用于夹角度远小于 1° 时的情况。本文针对文献[10]存在的问题,提出了基于 Fourier-Mellin 变换,结合非线性图像幅度变换和相干系数法的图像配准新方法。文中对 Fourier-Mellin 变换与相干系数法的计算量进行了比较,同时详细分析了 Fourier-Mellin 变换相对于相干系数法在粗配准和精配准中的特点,并以美国航天飞机 SIR-C/X-SAR X 波段重复轨道 Enta 火山附近成像数据为例^[11],说明本文算法在 InSAR 图像像素级(粗配准)和亚像素级(精配准)配准方面均可取得良好效果。

2 基于 Fourier-Mellin 变换的图像配准

2.1 Fourier 位移变换理论

设 $f_1(x, y)$, $f_2(x, y)$ 分别为两幅图像,并且存在 (x_0, y_0) 的位移。

$$f_2(x, y) = f_1(x - x_0, y - y_0) \quad (1)$$

设 $f_1(x, y)$, $f_2(x, y)$ 的 Fourier 变换为 $F_1(u, v)$, $F_2(u, v)$, 则

$$F_2(u, v) = F_1(u, v)e^{-j(ux_0 + vy_0)} \quad (2)$$

$f_1(x, y)$ 和 $f_2(x, y)$ 的互功率谱为

$$\frac{F_1(u, v)F_2^*(u, v)}{|F_1(u, v)F_2^*(u, v)|} = \phi_1(u, v) - \phi_2(u, v) = e^{j(\phi_1(u, v) - \phi_2(u, v))} \quad (3)$$

其中 $F_1(u, v) = |F_1(u, v)|e^{j\phi_1(u, v)}$, $F_2(u, v) = |F_2(u, v)|e^{j\phi_2(u, v)}$ 。

F_2^* 表示 F_2 的复共轭,对式(3)进行逆傅里叶变换,其在图像域 (x_0, y_0) 处将会出现一个脉冲函数,脉冲所在位置即为两图像间的偏移量 (x_0, y_0) 。该方法的物理意义在于,通过两幅图像互功率谱的逆傅里叶变换,得到互相关函数,再由相关峰的位置即可确定图像间的偏移量。

2.2 Fourier-Mellin 变换^[7-10]

设两幅图像 $s(x, y)$ 和 $r(x, y)$, $s(x, y)$ 是 $r(x, y)$ 经过平移 (x_0, y_0) 、旋转 α 角和一致尺度缩放(即在 x 和 y 方向的缩放因子都为 σ)后的图像,则

$$s(x, y) = r[(\sigma(x \cos \alpha + y \sin \alpha) - x_0, \sigma(-x \sin \alpha + y \cos \alpha) - y_0)] \quad (4)$$

对 $s(x, y)$ 和 $r(x, y)$ 进行 Fourier 变换得到 $S(u, v)$ 和 $R(u, v)$, 且

$$|S(u, v)| = \sigma^{-2} |R[\sigma^{-1}(u \cos \alpha + v \sin \alpha), \sigma^{-1}(-u \sin \alpha + v \cos \alpha)]| \quad (5)$$

其中 $|\cdot|$ 表示频谱的模,即幅度值。从式(5)可以看出,频谱的幅度只与旋转角度 α 和缩放因子 σ 有关,而与平移量 (x_0, y_0) 无关。所以旋转角度 α 和缩放因子 σ 可以和平移量 (x_0, y_0) 分开计算,可先在图像频域计算旋转角 α 和缩放因子 σ 。

将图像的幅度谱 $|S(u, v)|$ 和 $|R(u, v)|$ 变换到极坐标系 $\rho - \theta$ 下,得到 $|S_p(\theta, \rho)|$ 和 $|r_p(\theta, \rho)|$, 令

$$r_{p1}(\theta, \log \rho) = r_p(\theta, \rho), \quad s_{p1}(\theta, \log \rho) = s_p(\theta, \rho), \\ u = \rho \cos \theta, \quad v = \rho \sin \theta \quad (6)$$

由式(5)可得

$$s_{p1}(\theta, \log \rho) = r_{p1}(\theta - \alpha, \log \rho - \log \sigma) \quad (7)$$

取 $\lambda = \log \rho$, $\kappa = \log \sigma$

$$s_{p1}(\theta, \lambda) = r_{p1}(\theta - \alpha, \lambda - \kappa) \quad (8)$$

可见,式(8)与式(1)具有相同的形式,所以在图像频域的对数-极坐标系下使用 Fourier 位移变换理论即可求出图像之间的旋转角和缩放因子。

求得旋转角度 α 和缩放因子 σ 后,对图像 $s(x, y)$ 按反方向旋转角度 α 并按 $1/\sigma$ 进行缩放,得到图像 $s_1(x, y)$ 。由于此时 $s_1(x, y)$ 与 $r(x, y)$ 之间只有平移变换,所以再应用 Fourier 位移变换即可求出两图像之间的平移量 (x_0, y_0) 。

3 基于 Fourier-Mellin 变换的 InSAR 图像像素级粗配准

由于星载 InSAR 成像面积较大,主辅图像之间可能有几十甚至上百个像素点的偏差,所以必须对图像对先进行粗配准,使图像的匹配精度达到 1 个像素。通常用相干系数法或最大频谱法等传统配准方法可直接处理原始 SAR 图像复数数据,但这些方法不能估计图像对之间的夹角,而且星载 SAR 图像数据通常幅度分布极不均匀,无法直接用 Fourier-Mellin 变换来处理,所以首先要对图像进行幅度变换。

3.1 非线性幅度变换

由于通常 SAR 图像存在幅度分布动态范围大且分布不均匀的特点,所以需要非线性幅度变换将低幅度范围的图像值进行扩展,将高幅度范围的图像值进行压缩。事实上通常采用以 10 为底的对数 dB 值来表示 SAR 图像幅度的方法。

本文采用较为复杂的非线性幅度变换以期达到更好的效果^[12]。

设 $f(x, y)$ 是一幅图像, 则对数变换可以表示为

$$g(x, y) = a + \frac{\lg[f(x, y) + b]}{\lg c} \quad (9)$$

其中 a, b, c 是参数, 来调节曲线的位置和形状。

以 SIR-C/X (轨道高度为 213325m) 的 Enta 火山附近 X 波段 SAR 成像数据为例, 其中 $b=1000, a=0, c=10$ 。图1是原始 InSAR 图像和经过对数幅度变换后的图像, 可见变换后的图像幅度分布更加均匀。

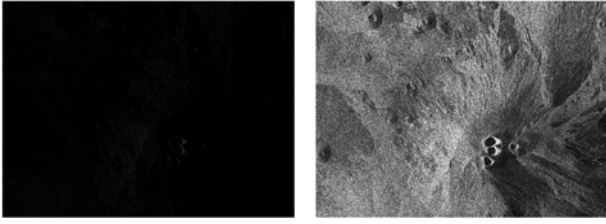


图1 原始InSAR图像和经过幅度变换后的图像

3.2 应用 Fourier-Mellin 变换计算 InSAR 图像对之间的夹角和平移量

对于 SAR 图像配准来说, 影响精度的主要因素是图像间的夹角和平移量, 由于雷达的波束宽度一般不会由于轨道等原因发生变化, 故所得图像的缩放因子 σ 通常都非常接近 1, 并且对于尺度不很大的图像, 其影响可以忽略。若令 $\sigma = 1$ 则式(5)变换到极坐标系下, 可得

$$s_p(\theta, \rho) = r_p(\theta - \alpha, \rho) \quad (10)$$

α 为图像对之间的夹角。

所以若不考虑缩放因子 σ , 可在图像频域极坐标系下使用 Fourier-Mellin 变换求得图像间夹角, 然后根据夹角对图像进行反变换后再求平移量。

由于实际图像通常覆盖区域较大, 图像对内各部分偏移量可能不完全相同, 所以不能对经过幅度变换的图像直接进行 Fourier-Mellin 变换, 需要先将图像分块, 然后再对各图像块进行配准。由于图像间噪声的影响以及对计算量的考虑, 对图像的分块不宜太小。经实验, 按 500×500 对图像进行分块配准比较合适。所以从图像中截取一块 500×500 的区域来使用 Fourier-Mellin 变换进行配准, 如图2所示。配准结果如表1所示, 根据 Fourier-Mellin 变换方法, 可得两幅图像之间的夹角为 2° , 平移量为 2 个像素, 通过粗配准可以使图像间相干系数由 0.2362 提高到 0.4555。该算法程序使用 Matlab 编写, 运行在 CPU 主频为 3.4GHz, 内存 1GB 的计算机上。

由于传统方法需要按不同的偏移量进行多次插值计算, 从而找到合适的偏移量, 而 Fourier-Mellin 变换方法只需要进行傅里叶变换和直角坐标到极坐标的一次插值变换, 所以计算量大大降低。表2列出了使用相干系数法和 Fourier-Mellin

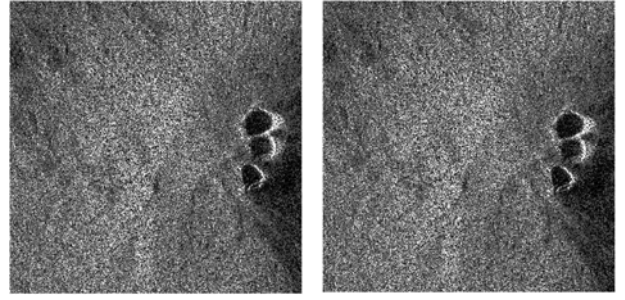


图2 经过幅度量化准备进行粗配准的图像对

表1 使用 Fourier-Mellin 变换进行粗配准的结果

图像对间夹角	2°
图像对间平移量	2
使用 Fourier-Mellin 变换进行粗配准前的相干系数	0.2362
使用 Fourier-Mellin 变换进行粗配准后的相干系数	0.4555

表2 不同算法配准前后的相干系数和计算时间

	配准后相干系数	计算时间
相干系数法	0.2431	22s
Fourier-Mellin 变换法	0.4555	8s

变换法在图像粗配准前后的相干系数和计算时间。可见 Fourier-Mellin 变换方法的计算时间仅是相干系数法的 $1/3$, 而且对比使用不同方法进行粗配准前后的相干系数, 可以发现, 使用相干系数法进行粗配准, 图像间相干系数仅从 0.2362 提高到 0.2431, 而使用 Fourier-Mellin 变换方法, 图像间相干系数可从 0.2362 提高到 0.4555。这说明在粗配准阶段, 相干系数法不能有效提高图像对的相干性, 而 Fourier-Mellin 变换方法却可显著提高图像间的匹配精度。Fourier-Mellin 变换方法在理论上没有两幅图像间最大夹角的限制, 而且对于重复轨道 InSAR 系统, 由于主辅图像之间相干性的要求, 两幅图像之间的夹角不能太大, 通常都在几度之内, Fourier-Mellin 变换方法在该范围能很好完成配准工作。

4 基于 Fourier-Mellin 变换的 InSAR 图像亚像素级精配准

星载 InSAR 复数图像对通常必须达到亚像素级的配准精度。传统的精配准方法是对图像对进行 8-10 倍插值, 然后使用相关系数法或最大频谱法进行配准, 但这种方法的缺点是不能估计出待精配准图像对间的微小夹角^[2]。Fourier-Mellin 变换可以计算图像之间的夹角, 但是由于 InSAR 图像中噪声的影响, 无法使用该方法计算插值后的图像对之间的夹角。本文提出将相干系数法和 Fourier-Mellin 变换方法结合起来的图像配准方法, 实现对存在小夹角的 InSAR 图像对的精配准。

相干系数法是处理含有较大噪声图像配准问题的一种有效方法。传统相干系数的定义如式(11)所示。通常认为相干系数越大,两幅图像的匹配程度也就越高。但是在使用传统相干系数法对InSAR图像进行配准的过程中,出现了偏移量计算错误,匹配精度不高等问题。所以本文使用改进的相干系数法^[13],采用新的相干系数定义和移除多普勒中心频率的方法来解决上述问题。限于篇幅,该方法的具体内容可详见文献[13]。

$$\bar{\gamma} = \frac{\left| \sum_{m=1}^M \sum_{n=1}^N u_1(m,n)u_2^*(m,n) \right|}{\sqrt{\sum_{m=1}^M \sum_{n=1}^N |u_1(m,n)|^2 \sum_{m=1}^M \sum_{n=1}^N |u_2(m,n)|^2}} \quad (11)$$

对于待精配准的,插值后的InSAR图像对,由于噪声的影响,直接使用Fourier-Mellin变换方法无法得到正确的夹角和位移量。所以新的配准方法先在图像域上移除了多普勒中心频率,然后在Fourier-Mellin变换处理步骤中引入了相干系数法,不再使用Fourier位移变换理论来计算 α 角,而在极坐标系下的图像频域幅度谱中使用相干系数法,让辅图像在主图像中不断滑动并按新的相干系数公式计算相干系数,相干系数最大处的位置就对应着夹角 α 。在求得 α 角后对插值后的图像进行反变换,然后按改进的相干系数法计算出图像对间的平移量就完成了InSAR图像的精配准。

仍以SIR-C/X-SAR X波段Enta火山成像数据为例,取3块连续的、特征明显的并且经过粗配准的区域,按上述方法进行精配准,可以计算出图像对之间存在 $0.0095^\circ - 0.013^\circ$ 的微小夹角,如表3所示。表4列出了使用改进的相干系数法在该区域计算出的平移量。根据表4和图3可得到计算夹角 α 的公式。

$$\frac{a}{a+b} = \frac{c}{d} \Rightarrow a = \frac{cb}{d-c} \quad \text{且} \quad \alpha = \tan^{-1}\left(\frac{c}{a}\right) \quad (12)$$

由式(12)可计算出图像对之间存在 $0.0095^\circ - 0.0127^\circ$ 的夹角,这与表3的结果相吻合,证明新的配准方法确实可以精确估计图像对间小于 0.1° 的微小偏角。本文使用传统相干系数法和改进的相干系数法,按10倍插值和 100×100 窗口对

表3 在精配准步骤计算的夹角和平移量

区域	夹角	平移量(像素) (距离向,方位向)
区域1(1-500,1-500)	0.013°	(0.2,0.1)
区域2(500-1000,500-1000)	0.011°	(0.2,0.2)
区域3(1000-1500, 1000-1500)	0.0095°	(0.1,0.1)

表4 使用相干系数法计算的在各区域距离向平移量

区域	距离向平移量(像素)
区域1(1-500,1-500)	0.3
区域2(500-1000,500-1000)	0.4与0.5之间
区域3(1000-1500, 1000-1500)	0.5

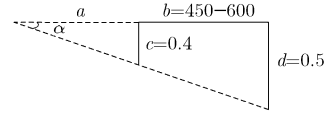


图3 根据表4计算夹角 α 的示意图

Enta火山数据进行精配准,并与新的配准方法相比较。表5是使用3种方法分别对区域1进行精配准的结果。由表5可以看出,使用新的配准方法精配准后,图像对间的相干系数为0.5592,在3种方法中配准效果最佳。但是在精配准中,新的配准方法使图像间相干系数相比于粗配准提高了0.1391,而改进的相干系数法则使相干系数相比于粗配准提高了0.2974。这说明相对于新的配准方法,相干系数法在精配准中对图像间相干系数提高较大,这与粗配准过程的结果正好相反。但这并不说明在精配准过程中,相干系数法的配准效果更好,因为从最终3种方法的配准结果来看,新的配准方法的效果明显优于其他两种方法。这种结果只是说明对于偏移不是很大的图像对,相干系数法主要是在精配准过程体现其对图像相干性的提升,而Fourier-Mellin变换方法则是在粗配准和精配准过程中都相对均匀地提高了图像间相干性。图4是应用本文方法对Enta火山地区复数图像对配准前后的干涉相位图的比较,从中看出配准后的干涉相位图的清晰度明显增强。图5给出了本文配准算法的详细流程图。

5 结束语

本文提出了一种将Fourier-Mellin变换与相干系数法相结合的InSAR图像配准方法。该方法分为粗配准和精配准两步。在粗配准过程中,先对InSAR图像进行对数幅度变换,然后使用Fourier-Mellin变换进行图像配准。而在精配准过程中,先对图像进行插值,然后基于Fourier-Mellin变换,以相干系数为判断依据,计算图像对间微小的夹角和平移量。通

表5 使用不同算法对区域1进行精配准前后的相干系数

	精配准前相 干系数	精配准后相 干系数
传统相干系数法	0.2427	0.5233
改进的相干系数法 ^[13]	0.2427	0.5401
新的配准方法	0.4201	0.5592
新的配准方法	0.4201	0.5592

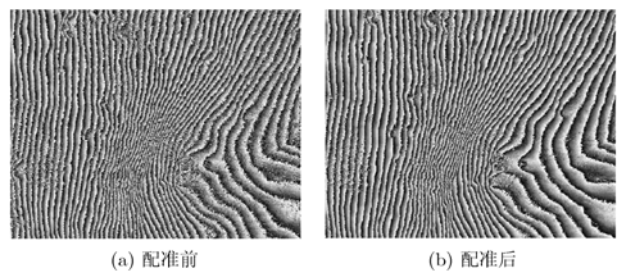


图4 配准前后的Enta火山区域图像对干涉相位图

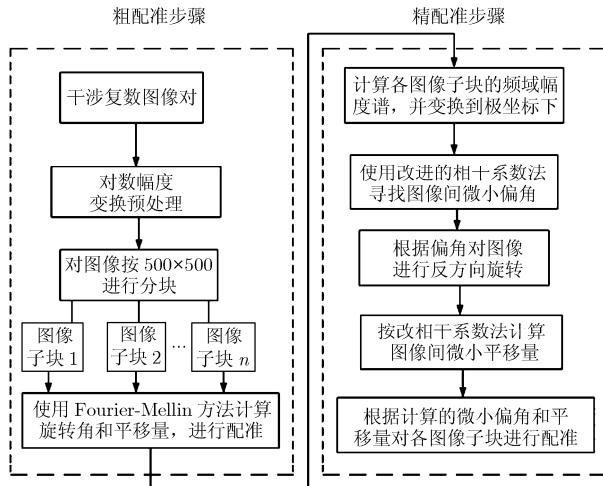


图5 结合Fourier-Mellin变换和相干系数法的InSAR复数图像配准算法流程图

通过对SIR-C/X Enta火山的X波段SAR成像数据的配准试验, 结果表明: 在像素级粗配准过程中, 相干系数法对图像对间的相干系数提高幅度较小, 而Fourier-Mellin变换方法对图像对间相干系数提高幅度较大; 在以粗配准结果为基础的亚像素级精配准中, 相干系数法对图像对间相干系数的提高幅度较大, 而Fourier-Mellin变换结合相干系数法的方法对相干系数的提高幅度虽然相对较小, 但是其获得的相干系数仍然要高于前者。实验结果还表明本文的图像配准方法相对于传统的相干系数法, 除了能够提高图像的配准精度外, 在粗配准中还可显著提高计算速度。

参考文献

- [1] Rosen P, Hensley S, Joughin I R, Li F K, Madsen S, Rodriguez E, and Goldstein R M. Synthetic aperture radar interferometry[J]. *Proc. IEEE*, 2000, 88(3): 333-382.
- [2] Gabriel A K and Goldstein R M. Crossed orbit interferometry: Theory and experimental results from SIR-B[J]. *Int. J. Remote Sensing*, 1988, 9(5): 857-872.
- [3] Lu Lijun, Liao Mingsheng, and Wang Teng. Registration of INSAR complex images based on integrating correlation-registration and least square-registration[J]. *Proc. SPIE*, 2005, 6043: 604330P_1-604330P_6.
- [4] Scheiber R and Moreira A. Coregistration of interferometric SAR images using spectral diversity[J]. *IEEE Trans. on Geoscience and Remote Sensing*, 2000, 38(5): 2179-2191.
- [5] 刘宝泉, 冯大政, 武楠, 李军侠. 基于曲线拟合的干涉合成孔径雷达(InSAR)复图像自动配准算法. *电子与信息学报*, 2007, 29(7): 1666-1669.
Liu Bao-quan, Feng Da-zheng, Wu Nan, and Li Jun-xia. An image automatic registration algorithm for InSAR complex images based on curve fitting[J]. *Journal of Electronics & Information Technology*, 2007, 29(7): 1666-1669.
- [6] 师瑞荣, 荆麟角, 宋福明等. 机载 SAR 重复轨道干涉成像试验结果. *电子与信息学报*, 2003, 23(11): 1515-1524.
Shi Rui-rong, Jing Lin-jiao, and Song Fu-ming, et al. Repeat-pass interferometry with airborne synthetic aperture radar[J]. *Journal of Electronics & Information Technology*, 2003, 23(11): 1515-1524.
- [7] Reddy B S and Chatterji B N. An FFT-based technique for translation, rotation, and scale-invariant image registration [J]. *IEEE Trans. on Image Processing*, 1996, 5(8): 1266-1271.
- [8] Chen Qin-Sheng, Defrise M, and Deconinck F. Symmetric phase-only matched filtering of Fourier-Mellin transforms for image registration and recognition[J]. *IEEE Trans. on Pattern Analysis and Machine Intelligence*, 1994, 16(12): 1156-1168.
- [9] Abdelfattah R, Nicolas J M, and Tupin F. Interferometric SAR image coregistration based on the Fourier-Mellin invariant descriptor[C]. *IEEE Geoscience and Remote Sensing Symposium*, Toronto, Jun.24-28 2002, Vol.3: 1334-1336.
- [10] Abdelfattah R and Nicolas J M. InSAR image co-registration using Fourier-Mellin transform[J]. *International Journal of Remote Sensing*, 2005, 26(13): 2865-2876.
- [11] Stanford University. Radar Remote Sensing: Fundamentals and Geophysical Application of Imaging Radar Systems. <http://www.stanford.edu/class/ee355/software.htm>
- [12] 王晓军, 孙洪, 黄培荣, 管鲍. 基于直方图形态的 SAR 图像灰度变换性能评估. *系统工程与电子技术*, 2004, 26(10): 1332-1335.
Wang Xiao-jun, Sun Hong, Huang Pei-rong, and Guan Bao. Evaluation for the gray-scale transformation of SAR images by the shape of histogram[J]. *Systems Engineering and Electronics*, 2004, 26(10): 1332-1335.
- [13] Shi Xiaojin and Zhang Yunhua. InSAR image registration using modified correlation coefficient algorithm[C]. *International Symposium on Antennas, Propagation and EM Theory*, ISAPE2006, Guilin, Oct.27-30, 2006: 533-536.

石晓进: 男, 1980年生, 博士生, 研究方向为干涉SAR信号处理、成像雷达仿真模型研究。

张云华: 男, 1967年生, 研究员, 博士生导师, 研究方向为微波遥感理论与技术、电磁场数值计算。