

文章编号:1001-1595(2008)01-0064-06

中图分类号:TP79

文献标识码:A

一种改进的星载干涉 SAR 复图像最大频谱配准算法

赵志伟^{1,2}, 杨汝良¹, 祁海明^{1,2}

1. 中国科学院 电子学研究所,北京 100080; 2. 中国科学院 研究生院,北京 100039

An Improved Maximum Spectrum Peak Co-registration Algorithm for Space-borne InSAR Complex Data

ZHAO Zhi-wei^{1,2}, YANG Ru-liang¹, QI Hai-ming^{1,2}

1. Institute of Electronics, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100080, China; 2. Graduate School, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100039, China

Abstract: The Maximum Spectrum Peak Algorithm (MSPA) is commonly used in Space-borne SAR complex data co-registration. But the algorithm has large computation load and can be interfered with the noise. An improved co-registration algorithm based on the original MSPA for space-borne SAR complex data is proposed in the paper. It has less computation load and higher accuracy. Chirp-z transform is used to substitute the zero-padded Fast Fourier Transform (FFT) to get a higher accuracy of spectrum peak as well as to control the computation load on a reasonable level. A relative threshold is chosen to judge whether the current estimation of shift between the control points is reliable. Based on the judgment, the control points in different area can choose suitable window length for sub-image cutting adaptively, so that the computation load can be allotted reasonably. The improved algorithm is validated with two pairs of complex images, from ASAR and ERS-1/2 respectively. The experiments results show that the new algorithm has better reliability and lower computation load than the conventional MSPA.

Key words: synthetic aperture radar; interferometry; co-registration; maximum spectrum peak algorithm; chirp-z transform

摘要: 最大频谱法常用于星载干涉 SAR 复图像配准,但该方法计算量较大且易受噪声影响。本文提出一种改进的最大频谱配准算法。该方法利用 chirp-z 变换替换补零 FFT 变换,以相对较少的运算量达到较高的频谱峰值计算精度;通过设定合理的判决门限,判定控制点偏移量估计结果的可靠性,以便对位于不同区域的控制点自适应选取子图像截取窗口的长度,达到控制运算量的目的。利用该算法分别对来自 ASAR 和 ERS-1/2 的两对复图像进行验证,实验结果表明该算法可以有效实现配准,且比同条件下利用常规最大频谱算法得到的结果更加可靠。

关键词: 合成孔径雷达;干涉;配准;最大频谱法;chirp-z 变换

1 引言

随着多颗具有合成孔径雷达(SAR)的卫星发射成功,星载 SAR 干涉测量成为当前研究的热点^[1,2]。复图像配准是 SAR 干涉处理中的关键步骤,其目的是使两复图像中同一位置上的像素对应地面的同一回波点,配准的精度直接影响干涉图的质量^[3]。星载 SAR 复图像的精确配准通常通过估计一定数量的控制点(或“联系点”^[4])的偏移量来拟合全图各个像素的偏移量,再利用插

值重采样得到新的辅图像。控制点偏移量的计算精确度将直接决定配准质量^[3,4]。

目前的星载 SAR 复图像配准算法按照原理可以分为三类^[6,9]:一类是按照传统的图像配准思路,利用各种统计相关函数或图像几何特征实现配准,典型方法是复相关函数法,这类方法的缺点是在图像相干性较差时会出现较大偏差;第二类是根据配准过程中干涉相位所表现出来的特性实现配准,典型方法是最大频谱法,这类方法受相干性影响小、结果精确,缺点是计算量较大;还有一类是在

收稿日期:2007-03-02;修回日期:2007-04-19

作者简介:赵志伟(1979-),男,辽宁锦州人,博士生,研究方向为星载合成孔径雷达信号处理与系统仿真。

E-mail:waly_zzw@hotmail.com

原始数据成像过程中通过补偿直接得到配准的图像,该方法不适用于复图像的配准。

最大频谱配准算法最早是 Gabriel 等人对 SIR-B 的星载复图像进行干涉实验时提出来的^[8]。该方法适用于轨道平行性较差的条件下所获得的复图像的配准。尽管计算量很大,但限于目前的轨道控制技术,该配准方法对重复轨道的星载 SAR 干涉处理还是具有实际意义的。D. Small 等人利用该方法实现了 ERS-1 复图像的配准^[10]。

本文提出一种改进的最大频谱配准法,该方法利用 chirp-z 变换替换时域补零的快速傅里叶变换(FFT 变换),以较低的运算量获得比直接 FFT 变换更准确的最大频谱值;通过自定义的门限,判决估计结果的可靠性;根据判决结果调整各控制点所需要的子图像截取窗口的长度,合理分配运算量。通过真实数据实验,证明利用本算法得到的结果可靠性优于原始最大频谱法,且计算量得到有效控制。

2 最大频谱配准法

最大频谱法的思路是:定义复数干涉图频谱的最大模值与其他频率成分的模值之和的比值,即相对最大频谱为配准过程所使用的评价函数,当干涉条纹最清晰时,该相对频谱取得最大值^[6]。具体可以按照如下方法进行:

在主图像(master)中取一待匹配点,在其周围以较大的窗口(搜索窗口, $M \times M$)截取子图像,记做 S_1 ;在辅图像(slave)中同一位置取对应点,在其周围取较小的窗口(匹配窗口, $N \times N$)截取子图像,记做 S_2 ,其中 $M > 2 \times N$,以保证计算的准确性。将 S_2 在 S_1 内按 2 维方向逐点滑动,并且每

滑动一次,计算一次该位置的干涉图频谱,即

$$F = FFT2(S_1' \cdot S_2^*) \quad (1)$$

其中 S_1' 表示 S_1 中与 S_2 同等大小的子图像,取该频谱的最大模值作为该位置的质量测度

$$I(i, j) = \max\{|F|\} \quad (2)$$

大窗口内所有位置上干涉图频谱的最大模值形成一个信噪比矩阵

$$SNR(i, j) = \frac{I(i, j)}{\sum_{m \neq i} \sum_{n \neq j} I(m, n)} \quad (3)$$

该矩阵的最大值对应着最佳的配准结果

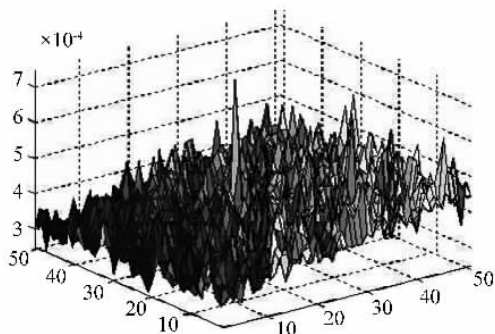
$$(i', j') = \max_{(i, j)} \{SNR\} \quad (4)$$

在最大频谱法中,子图像截取窗口的长度(以下简称“窗口长度”或“窗长”)和 FFT 的长度直接决定计算量;频谱峰值的计算精确度影响配准结果的可靠性。

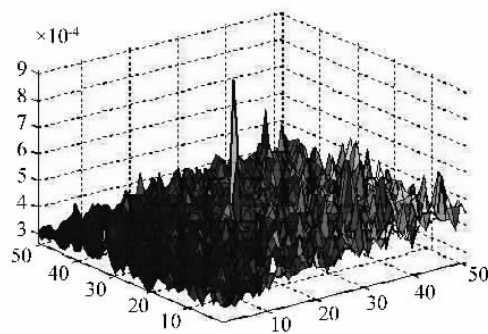
3 改进的最大频谱配准算法

3.1 利用 chirp-z 变换替换 FFT 变换

最大频谱配准法是利用滑动窗口得到频谱峰值矩阵,在窗口滑动时,每个位置上都需要做 2 维 FFT 计算。为了降低估计方差,可利用时域补零的方法增加 FFT 长度,得到具有较高频率分辨率的频谱值,从而提高计算精度^[11]。对于一些数据条件不好的图像,利用最大频谱法估计控制点偏移量时,增加 FFT 长度可以得到更准确的频谱峰值位置。图 1 为对同一个控制点,利用不同长度的 FFT 变换实现最大频谱法所得到的信噪比矩阵曲面。可见与图 1(a)相比,图 1(b)中的峰值更大且相对高度突出,不容易受噪声影响,说明补零 FFT 有利于得到准确的最大频谱值。



(a) FFT 长度为 64×64



(b) FFT 长度为 256×256

图 1 不同频谱分辨率下得到的信噪比矩阵曲面

Fig. 1 SNR matrix surface for different spectrum resolution

在雷达信号处理领域, chirp-z 变换经常被用作替代 FFT 变换对信号进行窄带高分辨率分析^[11]。在最大频谱法中, 利用 chirp-z 变换对频谱主瓣区域进行高分辨率的计算, 可以较低运算量达到与补零 FFT 相同的计算精度。

chirp-z 变换是一种比离散傅里叶变换更灵活的信号频谱计算方法, 它以较高的频率分辨率计算有效频段的频谱, 从而提高频谱计算的效率。它的基本原理是^[13]

假设 $x(n), 0 \leq n \leq N-1$, 它的 z 变换为

$$X(z_k) = \sum_{n=0}^{N-1} x(n) z_k^{-n} = \sum_{n=0}^{N-1} x(n) A^{-n} W^{nk} \quad (5)$$

$k = 0, 1, \dots, M-1$

其中, M 为 chirp-z 变换的输出点数, A 和 W 可以进一步表示为

$$A = A_0 e^{j\theta_0}, \quad W = W_0 e^{j\varphi_0} \quad (6)$$

式中, A_0 为起始取样点的半径长度, 通常 $A_0 \leq 1$; θ_0 为起始取样点 z_0 的相角; φ_0 为两相邻点之间的等分角; W_0 为螺旋线的伸展率, $W_0 < 1$ 则线外伸, $W_0 > 1$ 则线内缩(反时针), $W_0 = 1$ 则表示半径为 A_0 的一段圆弧。当 $A_0 = 1$ 时, chirp-z 变换就成为离散傅里叶变换(DFT)。

chirp-z 变换的主要特点是: 任意设置 z_k 点的角间隔 φ_0 可以得到任意的频率分辨率; 选定任意的 θ_0 和 φ_0 , 就可从任意频率开始对输入数据进行窄带高分辨率的分析。在 1 维 chirp-z 变换的基础上扩展实现 2 维 chirp-z 变换。 N 点 1 维

chirp-z 变换的计算量为

$$Count_{\text{chirp-z}} = \frac{3}{2} L \log_2 L + 5M + L + N \quad (7)$$

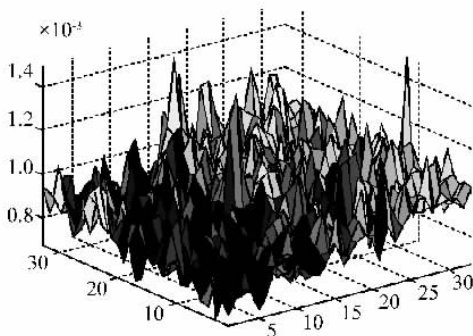
其中, M 为输入点数, N 为输出点数, $L \geq M + N - 1$, 且 $L = 2^m$ (m 为正整数)。达到同样的频率分辨率, chirp-z 变换的计算量小于 FFT 变换, 且分辨率越高差距越明显^[12]。 N 点 FFT 变换的计算量为

$$Count_{\text{FFT}} = \frac{N}{2} \log_2 N \quad (8)$$

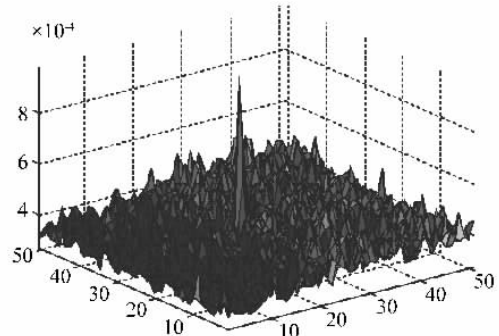
现举例说明利用 chirp-z 变换替换补零 FFT 的实现方法: 先在主、辅图像中选取控制点, 设主图像中的窗口 S_1 为 33×33 , 辅图像中的窗口 S_2 为 16×16 。 S_2 在 S_1 中滑动, 在第一个位置, 窗口内的复图像共轭相乘, 获得 16×16 大小的干涉图, 对其进行 2 维 FFT, 可以得到 16×16 的 2 维频谱, 找到频谱峰值的位置; 再利用 chirp-z 变换对主瓣区域进行 8 倍细化, 其结果与对该干涉图补零进行 128×128 点的 2 维 FFT 相同。利用式(7)和式(8)不难得出, chirp-z 变换比补零 FFT 节省近一半的计算量, 且所需存储空间更少。在循环计算时这种优势更加明显。

3.2 设定判决门限自适应改变窗长

适当地增加窗长可降低噪声对频谱计算精度的影响^[14]。图 2 为同一控制点在不同窗长下得到的信噪比矩阵曲面(FFT 长度同为 64×64), 通过对比可以看出增加窗长后, 噪声被有效遏制, 峰值明显。



(a) 搜索窗长为 65×65 , 匹配窗长为 33×33



(b) 搜索窗长为 101×101 , 匹配窗长为 51×51

图 2 不同窗长时得到的信噪比矩阵曲面

Fig. 2 SNR matrix surface for different window length

在同一景图像内, 并非所有区域都需要同样的窗长进行估计: 在图像相干性好、噪声低的区域, 较小的窗长就能得到正确的结果。位置相邻的子图像具有相近的地貌特征和数据特性, 如果

使用某个窗口长度可以正确地估计当前点的偏移量, 说明其周围的点也可以使用相同的甚至更小的窗长进行估算, 这样就能够节省运算量; 反之, 如果不能正确地估计出当前点的偏移量, 则适当

地扩大窗长重新计算,达到提高结果准确性的目的。一个待计算的控制点可以根据其周围最邻近的若干个控制点的估计情况选择窗长。这就实现了在场景范围内自适应改变窗长的目的。为了合理判断控制点估计结果的可靠性,引入一个检测门限来判断信噪比矩阵峰值的相对高度是否明显,即

$$Th = \alpha \cdot \max \{ SNR \} \quad (9)$$

其中, α 为自定义的门限比例因子。根据这个门限,若 $(m, n) = \max(SNR(i, j))$, 设定判别依据为

$$\left. \begin{aligned} &\text{如果 } \max_{i \neq m, j \neq n} (SNR(i, j)) < Th, \text{ 则结果可靠} \\ &\text{如果 } \max_{i \neq m, j \neq n} (SNR(i, j)) \geq Th, \text{ 则结果不可靠} \end{aligned} \right\} \quad (10)$$

利用偏移量已知的一对复图像可以检测不同的比例因子对漏检概率和虚检概率的影响,如表 1 所示(限于篇幅,只给出典型值反映结果的变化趋势)。由表 1 可知,随着门限增高,虚检率增加,漏检率降低。实际工程中,需要根据系统对虚检和漏检概率的要求,合理地选择一个比例因子。利用门限判决,一方面可以提高控制点结果的可靠性,另一方面为“自适应选择窗长”提供依据。

表 1 不同门限比例因子对检测结果的影响

Tab. 1 Effect on detection results for different threshold values

实验点数	比例因子 α	虚检率/(%)	漏检率/(%)
4 400	0.95	3.01	4.66
	0.90	1.38	10.87
	0.85	0.38	19.34
	0.80	0.12	32.44

3.3 改进的最大频谱算法流程

在具体实现过程中,为了方便计算窗长,先定义如下规则:

在输出结果中,增加控制点“属性”标记,若某一控制点判决结果为“可靠”,标记其属性为“好点”,并将其使用的窗长按窗长缩小比例因子(记作“ γ ”)缩小并存入缓存;反之标记为“差点”,并将其使用的窗长按窗长扩大比例因子(记作“ β ”)扩大并存入缓存。

这样,改进的最大频谱配准算法可以按照以下流程进行:

1. 初始化基本参数。设定若干个均匀分布的控制点;在缓存区设定初始窗长,作为第一个控制点使用的窗长。设定比例因子 α, β, γ , 其中 $\alpha < 1, \beta > 1, \gamma \leq 1$ 。

2. 根据缓存区中存储的相邻点使用的窗长,计算当前控制点所需要的窗长(第一个控制点除外)。

3. 在控制点周围截取子块图像,按照 3.1 节的方法计算信噪比矩阵。

4. 求出信噪比矩阵的峰值,利用 α 计算门限值并判决结果,根据判决结果标记控制点属性,更新缓存区中与其对应的窗长。对于“好点”直接进入步骤 5,对于“差点”,若只在该点计算过一次,则按照扩大后的窗长重复步骤 3,否则直接进入步骤 5。这是为避免在图像条件较差的区域出现多次循环计算仍无法得到可靠结果的情况。

5. 当前点的计算结束,输出该点的属性及偏移量。

6. 将 2~5 的步骤循环计算,直至所有控制点计算结束。

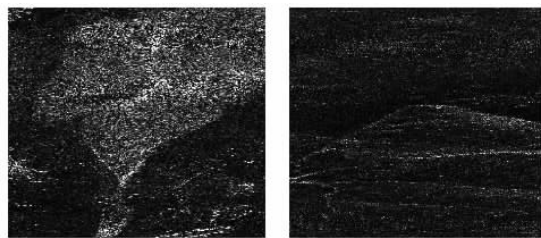
4 数据实验

本文选取两对不同特性的星载 SAR 复图像验证改进算法。这两对数据的共同特点是相干性较低,但形成原因不同。两对复图像的基本参数如表 2 所示。其中 ASAR 图像为欧空局提供的干涉演示图像,获取时间间隔较长,时间去相干严重;ERS-1/2 图像为利用 R-D 算法对原始数据成像后得到的复图像(成像过程中未进行任何校正),受成像处理器影响,图像噪声较大。图 3 分别为两对数据的主图像幅度图(辅图像与主图像幅度图相似,不再列出),图 4 为所选取的控制点在各自图像中的位置分布。实验过程中 α, β, γ 的取值分别为 0.9, 1.3 和 0.8。

表 2 实验用星载 SAR 干涉复图像参数

Tab. 2 Parameters of the InSAR complex data used in the experiments

图像名称	获取时间	基线长度 /m	距离向点数	方位向点数
ASAR 复图像	2003-09-21/ 2004-02-08	130	1 024	200
ERS-1/2 复图像	1996-02-05/ 1996-02-06	190	1 024	1 024



(a) ASAR 主图像幅度图 (距离向 5 视)
(b) ERS-1/2 主图像幅度图 (单视)

图 3 实验所用数据的主图像幅度图

Fig. 3 Intensity images of the master data used in the experiments

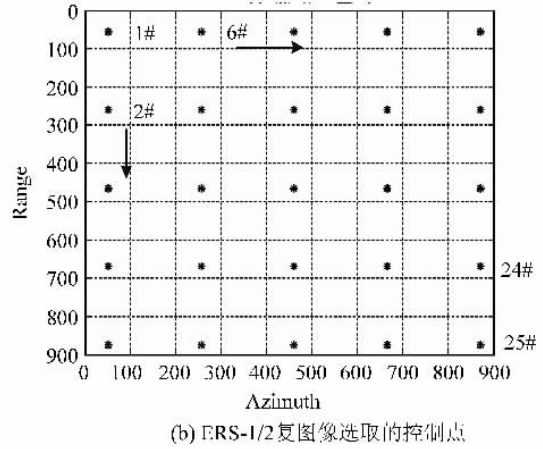
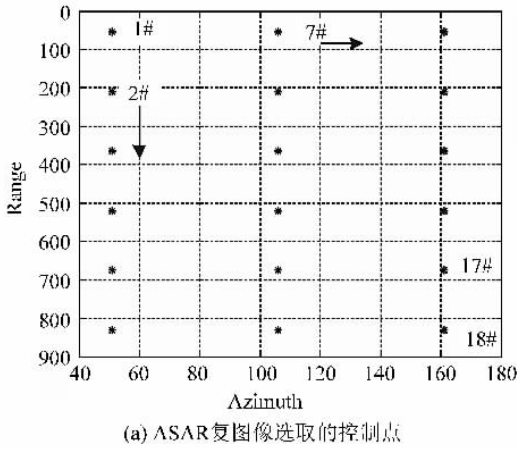


图4 控制点在图像中的位置分布示意图

Fig. 4 Distribution of the control points in the images

作为对比,实验中还利用常规的最大频谱法(即窗长固定,FFT计算时不进行“补零”操作,以

下简称“原算法”)对每对复图像的控制点进行了偏移量估计。实验结果如图5和表3所示。

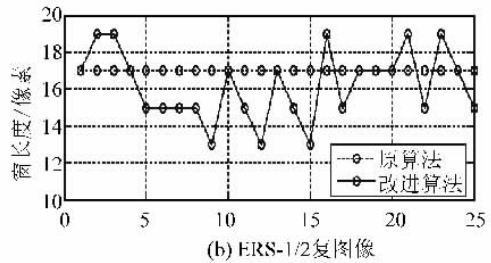
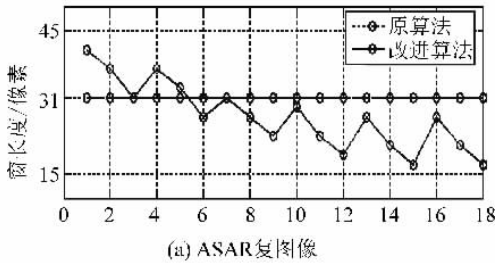


图5 各控制点使用的窗长变化

Fig. 5 Window length used by each control point

表3 改进算法与原算法得到的结果可靠性对比

Tab. 3 Comparison of results obtained with the improved algorithm and the original algorithm

数据名称	总控制点数	算法	“好点”数量	“差点”数量
ASAR 复图像	18	改进算法	17	1
		原算法	13	5
ERS-1/2 复图像	25	改进算法	23	2
		原算法	19	6

由图5可见,利用本文提出的改进算法进行估计时,各点所需窗长会自适应改变,可以有效地调整搜索范围,提高运算效率,这在控制点分布密集的时候(ASAR图像)效果尤为明显。同时,利用chirp-z变换替换补零FFT变换在提高频谱计算效率的同时保证计算精度,在一定程度上保证窗长能够合理变化。由表3可知,对于两对复图像,改进算法最终得到“好点”的数量多于原算法,说明改进算法能够提供更多可用于拟合的控制点,有利于整幅图像配准的快速准确实现。

针对ERS-1/2复图像,利用改进算法所得结果,选取点7#,9#,12#,14#,17#,19#,进行多项式拟合、插值^[9],得到精配准的辅图像后进行复共轭相乘、去平地效应和均值滤波去噪,其结果如图6所示。图6(a)为干涉条纹图,图6(b)为精配准后相干系数分布图。该图像的相干性较差主要源于图像噪声较大。可见对于低相干图像,该算法依然有效。

5 结论

复图像配准是星载SAR干涉处理的关键步骤。常用的最大互相关系数法会受到时间去相干等因素的影响,常规的最大频谱法则计算量较大且易受到噪声的影响。本文提出一种改进的最大频谱配准法,它也是基于图像的配准方法,不受低相干性的影响。利用chirp-z变换在提高频谱峰值的计算精度的同时控制运算量的增加;根据估计结果的可靠性自适应改变不同控制点

偏移量估计所需要的窗长也能有效节省运算量。通过两对不同的复图像实验表明该算法具有较好的适用性,比原算法具有更高的运算效率和可

靠性。

致谢:作者感谢欧洲空间局 ESA/ERSIN 数据中心提供的星载 SAR 干涉图像和原始数据。

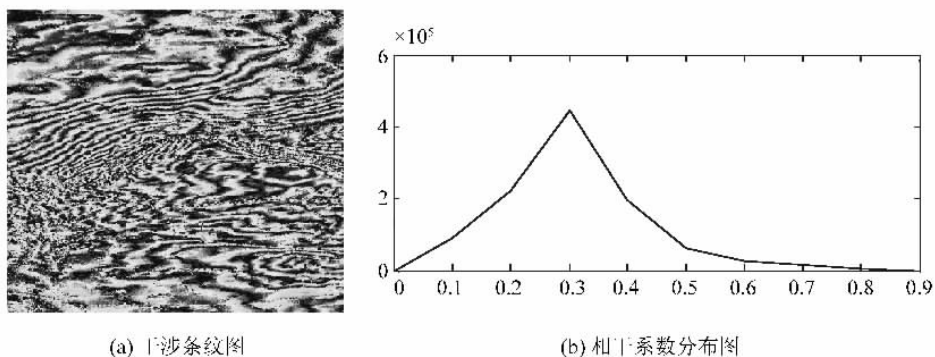


图6 ERS-1/2的复图像精配准后的干涉结果

Fig.6 The interferometric results of ERS-1/2 data after accuracy coregistration

参考文献:

- [1] WANG Chao, ZHANG Hong, LIU Zhi. Space-borne Synthetic Aperture Radar Interferometric Measurement [M]. Beijing: Science Press, 2002. (王超,张红,刘智.星载合成孔径雷达干涉测量[M].北京:科学出版社,2002.)
- [2] BAMLER R, HARTL P. Synthetic Aperture Radar Interferometry[J]. Inverse Problems, 1998, 14(4): 1-54.
- [3] WANG Lu-cai, WANG Yao-nan, MAO Jian-xu. 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.)
- [4] LIU Guo-xiang, DING Xiao-li, LI Zhi-lin, 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.)
- [5] ZENG Qi-ming, XIE Xue-tong. A FFT-based Complex Correlation Function Method Applied to Interferometric Complex Image Coregistration[J]. Acta Geodaetica et Cartographica Sinica, 2004, 33(2): 127-131. (曾琪明,解学通.基于谱运算的复相关函数法在干涉复图像配准中的应用[J].测绘学报, 2004, 33(2): 127-131.)
- [6] TAO Kun. Data Processing and Simulation of Interferometric Synthetic Aperture Radar[D]. Beijing: Institute of Electronics of Chinese Academy of Sciences, 2003. (陶鸱.干涉合成孔径雷达数据处理及仿真研究[D].北京:中国科学院电子学研究所, 2003年.)
- [7] LIU Q, VESECKY J F. New Approaches in Interferometric SAR Data Processing [J]. IEEE Trans Geosci Remote Sensing, 1992, 30(3): 560-567.
- [8] GABRIEL A K, GOLDSTEIN R M. Crossed Orbit Interferometry: Theory and Experimental Results from SIR-B[J]. Int J Remote Sensing, 1988, 9(5): 857-872.
- [9] SCHEIBER R, MOREIRA A. Coregistration of Interferometric SAR Images Using Spectral Diversity[J]. IEEE Trans Geosci Remote Sensing, 2000, 38(5): 2 179-2 191.
- [10] SMALL D, WERNER C L, NUESCH D R. Registration of ERS-1 SLC Products for SAR Interferometry [A]. Proc of Fourth GEOSAR Workshop [C]. Loipersdorf: [s. n.], 1993. 63-66.
- [11] ZHU Dai-yin, ZHU Zhao-da, XIE Qiu-cheng. A Topography Adaptive Interferogram Filter Based on Local Frequency Estimation[J]. Acta Electronica Sinica, 2002, 30(12): 1 853-1 856. (朱岱寅,朱兆达,谢求成.一种基于局部频率估计的地形自适应干涉图滤波器[J].电子学报, 2002, 30(12): 1 853-1 856.)
- [12] WANG Yi-ding, TU Guo-fang. High Precision Range Imaging of Pulse Stepped Frequency Radar Based on Target's Feature[J]. Journal of the Graduate School of Chinese Academy of Sciences, 2005, 22(1): 46-50. (王一丁,涂国防.基于目标宽度特征的脉间跳频雷达距离精确成像[J].中国科学院研究生院学报, 2005, 22(1): 46-50.)
- [13] CHENG Pei-qing. Digital Signal Processing [M]. Beijing: Tsinghua University Press, 1995. (程佩青.数字信号处理教程[M].北京:清华大学出版社, 1995.)
- [14] BAMLER R. Interferometric Stereo Radargrammetry: Absolute Height Determination from ERS-ENVISAT Interferograms [A]. Proc IGARSS00 [C]. Honolulu: [s. n.], 2000. 742-745.

(责任编辑:丛树平)