

文章编号: 1007-4619(2007)04-0563-05

一种高精度的干涉雷达复数影像配准方法

张登荣, 俞 乐

(浙江大学 地球科学系空间信息技术研究所, 浙江 杭州 310027)

摘 要: 在总结现有算法的基础上, 提出了基于相干系数、Harris 特征点、小波金字塔及 TN 三角微分纠正技术的单视复数雷达图像的配准流程。通过 ERS1/2 的实验表明, 提高了配准的精度和效率, 特别是保证了在没有精确轨道甚至没有轨道参数的情况下也能获得很高的配准精度, 计算正确的干涉相位图。在重采样过程中采用的三角联网策略, 进一步使匹配点的局部拟合误差得到有效控制, 得到配准精度更高的复图像对。在 CPU 3.06GHz 计算机上, 43 s 内完成 5000 像素 \times 1000 像素的主辅图像的配准, 平均相干系数为 0.719855。

关键词: InSAR 配准; 小波金字塔

中图分类号: TN957.52 **文献标识码:** A

A High-Precision Co-registration Method for InSAR Image Processing

ZHANG Deng-rong, YU Le

(Institute of Spatial Information Technologies, Zhejiang University, Zhejiang Hangzhou 310027, China)

Abstract: This paper mainly discusses the high-precision co-registration methods for interferometric synthetic aperture radar (InSAR) complex image. After several registration methods are reviewed and compared, a new method of the co-registration for two single looking complex (SLC) SAR images, the master image and the slave image, based on coherence coefficient, Harris feature points, wavelet pyramid and Triangular Network (TN) based differential rectification was proposed. The experiment with space borne InSAR (ERS1/2) showed the method accomplished co-registration in about 43 seconds with a coherence 0.719855. It proves that the accuracy of this method can satisfy the requirement of Interferometry.

Key words: InSAR, registration, wavelet pyramid

1 引 言

随着空间科学技术的发展, 合成孔径雷达干涉测量技术得到了发展和应用。目前干涉雷达测量的主要应用模式是重轨道干涉成像模式, 干涉像对之间的高精度配准是实现干涉测量的先决条件。高精度的干涉雷达复数影像配准技术是提高和改善干涉雷达测量精度的关键技术途径。

由于干涉雷达影像是未采取任何辐射分辨率改

善措施的最原始的影像信号, 同时 SAR 影像存在斑点噪声的影响, 其配准的难度比光学影像之间的配准要大, 尤其是在复数数据情形, 精度、可靠性和运算效率等方面难以取舍和平衡。研究表明, 配准精度达到 1/10 像素才对干涉条纹图的质量没有明显影响。这个要求人工操作是很难达到的, 必须采用计算机自动配准技术。

Li^[1] 等人将区域边界和其他强边缘作为特征, 用链码相关和形状相似性规则来匹配闭区域, 而对开区域则检测角点, 并进行匹配。对匹配得到的控

收稿日期: 2006-09-01; 修订日期: 2006-10-30

基金项目: 国家高技术研究发展计划(863计划)项目(编号: 2003AA135118)和中国地调局项目。

作者简介: 张登荣(1966—), 男, 浙江大学副教授。2004年毕业于浙江大学地球科学系, 获遥感地质学博士学位。主要从事为遥感数字图像处理, 空间信息格网等方面的研究。已发表专著 1 部, 论文 30 余篇。E-mail: rsgis@zju.edu.cn

制点对进一步进行一致性检查,消除错误匹配。这一方法被应用于不同传感器图像的配准,如 Landsat TM、SPOT和 Seasat SAR Gelautz^[2]等将真实的 SAR 影像和由已知 DEM生成的模拟 SAR影像的配准来达到 SAR影像和地形图的自动配准,其配准精度可达到 1.0—1.5 像素。Wu^[3]提出一种基于小波变换的多尺度配准方法得到两幅图像之间的平移和旋转参数,并已首次将算法在数字信号处理器上实现。但此法不包括图像比例变换,此方法仅对同类传感器遥感图像有效。Walf^[4]利用高斯拉普拉斯算子自动确定半不变量地面控制点,并通过点距离数组匹配技术和统计分析进行同名点的寻找。国内学者也已经提出了多种 SAR图像配准技术。李智^[5]等提出了基于轮廓相似性测度的图像配准方法,它适用于轮廓特征丰富的图像的配准。郭海涛^[6]等提出了一种将遗传算法(Genetic Algorithm,简称 GA)用于图像配准的算法。廖明生^[7,8]等提出的结合最小二乘匹配的多级匹配方法能较好的解决效率、精度和可靠性问题等等。所有这些方法的提出,都极大地丰富了当前 InSAR配准的技术并促进了 InSAR应用的发展。

本文采用多级匹配的框架,结合在光学遥感影像匹配中的经验,将 Harris特征点提取、小波金字塔、交互匹配以及三角微分纠正等技术引入这一框架,实现了干涉雷达影像对的快速、高精度自动配准,在保证准确性和可靠性的前提下,提高了运算效率。特别是保证了在没有精确轨道甚至没有轨道参数的情况下也能获得很高的配准精度,计算正确的干涉相位图。

2 高精度干涉雷达复数影像配准流程

本文采用以相干系数作为配准精度评价标准,从粗到细进行影像匹配的流程(图 1)。基本思想是采用多种配准方法的有机组合,尽量避免复杂的复数运算,在保证准确性和可靠性的前提下,提高运算效率。基本流程包括以下几个主要步骤:(1)粗配准;(2)像元级配准;(3)亚像元级配准;(4)待配准影像纠正。这是一个自动/半自动(未知轨道参数的情况下)的综合处理流程。实验结果表明该匹配处理流程具有较高的可靠性、正确性和运算效率。

2.1 干涉雷达影像对的粗配准

干涉雷达测量中复图像的粗配准通常是基于卫

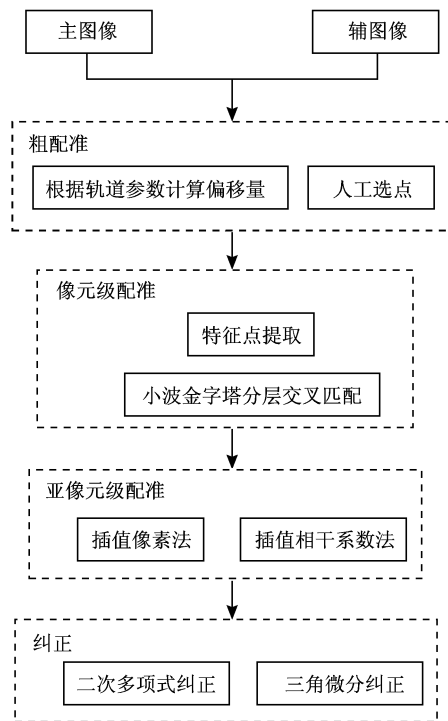


图 1 干涉雷达复图像配准流程图

Fig 1 The work flow chart of InSAR images co-registration

星轨道参数的方法,这种方法的优点是能自动完成偏移量的估算,但匹配精度较低(10—20个像素),在轨道参数无法获得的情况下更是无法使用。本文引入控制点的方法实现干涉雷达复图像对的粗配准,能在未知轨道参数的情况下接近较高的配准精度(接近 1 个像素)。基于人工选控制点的辅图像初始偏移量计算方法,不需要知道干涉复数图像对轨道信息,而是直接通过人工选取控制点的方式,从干涉雷达影像对中选取至少 2—3 对控制点,利用控制点通过两点或三点仿射变换,可以计算辅图像相对主图像的初始偏移及旋转量。控制点对选取越多,分布越均匀,粗配准精度越高。这种方式的缺点是需要人工参与,配准精度对所选择的控制点有很强的依赖性。在实际应用中,根据数据情况可以选择这两种方式之一使用。基于卫星轨道参数的方法只能计算两图像的平移偏差,而控制点的方法计算两图像的平移偏差的同时计算了两图像之间的旋转偏差,这将有助于削弱由于两图像基线相交而产生的去相关影响。

2.2 干涉雷达影像对像元级配准

干涉雷达测量中复图像的像元级配准通常采用的是基于窗口的自动配准技术,利用主图像和辅图

像在空间域或频率域进行配准。在主图像上选取匹配窗, 辅图像上选取搜索窗, 在搜索窗内按行列以不同的整像元偏移量计算匹配窗与对应窗的匹配质量评价指标, 由此得到的配准精度大约为一个像元。当前, 最常用的配准相似性的评价参数是, ①相干系数法, ②最大谱估计法, ③平均波动函数法等, 但都存在运算量大的缺点, 本次研究采用相干系数的快速估计法^[9]来评价配准精度, 并将 Harris 算子用于特征提取和小波金字塔搜索策略来实现像元级的配准。由于斑点噪声的影响, 不宜通过影像滤波或增强等预处理手段来改善匹配结果, 这里采用小波金字塔策略, 可以克服单点匹配所引起的问题, 改善抗噪能力, 提高可靠性。具体流程如图 2 所示。

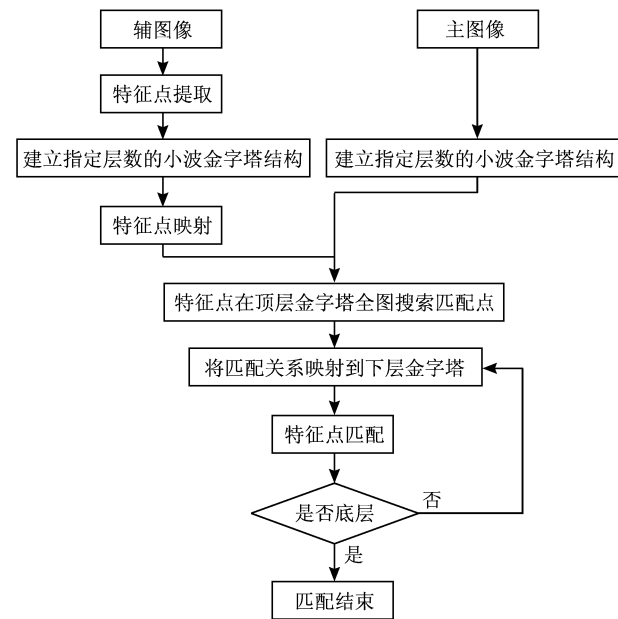


图 2 像元级配准流程图

Fig 2 Workflow chart of pixel level image co-registration

2.2.1 基于 Harris 算子的自适应特征点提取算法

众多的研究表明, 事先提取出稳定、分布均匀的特征点有助于获得高精度的控制点数据, 提高图像配准的精度。本文提出了一种基于 Harris 算子^[10]的遥感影像自适应特征提取的方法, 能有效地提取出 SAR 等遥感图像中的地貌特征点。Harris 算子中只用到灰度的一阶差分及滤波, 计算简单。同时, 由于 Harris 算子特征点的检测不需设置阈值, 因此还可以满足自动化的要求。实验表明, 在纹理信息丰富的区域(山区), Harris 算子可以从卫星遥感图像上提取出大量有用的特征点, 而在纹理信息少的区域(平原), 提取的特征点则较少, 特征点的分布具有很好的合理性。特别地, 即使图像发生一定的旋

转、有一定的灰度的差异或噪音影响, 所提取的特征点也具有一定的稳定性, 而且不涉及阈值。

由于 Harris 算子需要对整块影像进行差分和滤波处理, 所以对于大图像, 程序运行时会有很大的计算量。为了提高计算速度, 首先对影像进行分块, 然后逐块计算每个像元点的 Harris 值并排序, 取 Harris 值最大的一定数量的点作为特征点, 这样做进一步保证了特征点分布的均匀性^[11]。特征点提取结果如图 3 所示。绿色“+”表示被提取出的特征点。

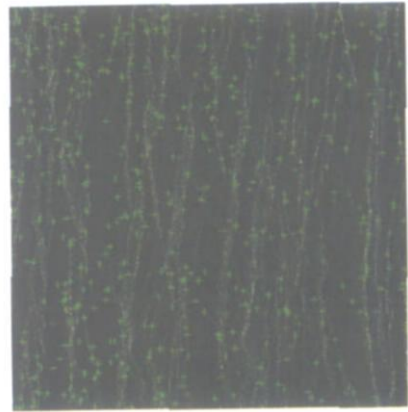


图 3 特征点提取结果

Fig 3 Feature points extracted from SLIC image

2.2.2 金字塔数据结构图像生成算法

金字塔生成算法主要有以下三种: Gaussian 金字塔、Face 影像金字塔和小波金字塔等。其中基于小波变换的金字塔影像编码方法, 因其提供的分辨率可分级性、保真度可分级性(从有损到无损的渐进传输)、较强的抗误码性能、低内存空间占用和编解码快速等引人瞩目的特性而成为目前主要的图像金字塔方法。通过实验还发现, 小波金字塔在匹配成功率和视觉效果上都是这三者中最优秀的。

2.2.3 特征点引导的金字塔交叉匹配算法

在影像匹配时, 利用影像金字塔结构设计了影像逐层搜索机制, 采用了逐步求精的匹配策略, 从而大大提高了匹配速度。算法中首先将前面提取的特征点进行金字塔坐标映射, 在金字塔影像匹配时从顶层开始, 逐级向下, 同层间匹配时, 采用了交叉相关算法, 进一步保证了匹配精度。

交叉相关算法的基本思想是: 先以辅图像上的特征点作为待匹配点, 在搜索范围内找到主图像上相关度最大的点作为有效匹配点。然后将主图像上的这个有效匹配点作为待匹配点, 以同样方法与搜索范围内的辅图像上的点进行匹配。若这两次匹配

的结果一致,所得的点即为同名点。

为保证控制点的准确,有必要进行剔除粗差。将匹配生成的足够多的控制点对建立多项式关系,给定拟合偏差限差(例如 1 个像素),剔除拟合偏差超限的控制点对。

2.3 亚像元级配准技术

理论和实际的经验都证明,当干涉雷达影像对的配准精度优于 0.1 像元时才满足干涉雷达测量的精度要求。针对这一要求,人们开展了大量研究工作,设计开发了很多种亚像元级的配准方法。目前主要方法有两类,一类基于原始图像过采样数据进一步寻找更加精确的配准位置,称之为像元过采样匹配法;另一类算法基于控制点周围若干像元的相关系数插值求取最大相关系数,以之确定更加精确的配准位置,称之为相干系数插值法。前者有精度上的优势,后者有速度上的优势。

2.3.1 像元过采样匹配法

像元过采样匹配法获得亚像元配准精度的具体步骤如下^[12]:

步骤 1:对已获得的每一个控制点采用双线性插值等方法对相应主图像、辅图像块作过采样处理。插值的间隔决定过采样程度(例如 0.01 个像元)。

步骤 2:进行最大相干估算。与像元级的配准相似,采用基于窗口的搜索方法,寻找可靠的相对偏移量估算值。与像元级配准不同的是,在这一步中要选择相对较小的窗口,但窗口的数目增多,以便进行相应的数据拟合。由于窗口大小变小,为了防止出现最大相干偏差,还需要适当的增大搜索窗的大小多次计算,如果相对偏移量保持稳定,表明这个估算值可靠,否则开始新一轮搜索。

步骤 3:选取最大相关系数的匹配位置即该控制点亚像元配准位置。

2.3.2 相干系数插值法

插值相关系数法^[13]并不是对像素本身进行过采样,而是对周围像素的相干系数值进行高精度的插值来获得亚像元级配准精度。在控制点处插值相干系数的具体计算公式为:

$$\zeta(x, y) = \sum_{i=p}^{p+2} \sum_{j=q}^{q+2} \left[\prod_{\substack{k=i \\ k \neq i}}^{p+2} \frac{x - x_k}{x_i - x_k} \right] \left[\prod_{\substack{l=j \\ l \neq j}}^{q+2} \frac{y - y_l}{y_j - y_l} \right] \zeta_{ij} \quad (1)$$

式中, ζ_{ij} 为相干系数值, $\zeta(x, y)$ 为插值后的相关系数值。以一定的像元的间距(例如 0.01 像素)插值相干系数,其中最大相干系数对应的位置就是更精确的配准位置,得到配准精度达到亚像元级的控制点。

2.4 待配准影像的纠正技术

在确定影像之间的控制点后,就可以进行辅图像相对于主图像的纠正,即建立匹配模型,并利用该模型计算出影像重叠范围内每一个像素的匹配偏移量,从而获得主图像中每一像元在辅图像中所对应的同名像点,据以对辅图像像元值重采样。在山区以及山区和平原交界处,由地面起伏导致的变形在整个影像上的分布是不规则的,采用利用多项式对影像整体纠正往往达不到要求。本文采用三角网微分变换模型,实现坐标转换定位,利用匹配获得的控制点对将影像分割成一个个的三角形,针对每一个三角形区域建立畸变模型仿射变换,然后进行影像纠正。整个过程不仅计算简单还保证了公共边上影像的连续性,最后用最近邻点、双线性插值和三次褶积等数据采样方法实现对辅图像像元值重采样。

3 配准试验

按照本文的配准流程,采用 1996 年 1 月欧空局 ERS1/2 获取的覆盖中国某地区的干涉雷达复影像对进行配准处理实验。图像基本数据见表 1。

实验采用粗配准→像元级配准→亚像元级配准→待配准影像纠正这一四级配准流程进行。首先可利用精确轨道参数计算,得到主辅图像的初始偏移估计量,或者在未知精确轨道参数的前提下,通过人工的方法,选取了 3 对控制点首先对像对进行了粗配准。然后从主图像获取满足一定特征、分布的特征点,采用金字塔自动匹配策略,从辅图像中搜索匹配点,通过拟合误差检查删除误匹配点后,获得了正确的配准控制点数据。然后利用三角网微分变换模型对辅图像进行重采样,获得满足干涉测量需要的

表 1 实验数据

Table 1 Basic information of tested data

数据类型	波长 / m	成像时间	图像大小	方位向分辨率 / m	距离向分辨率 / m	匹配范围
ERS1 (master)	5.66	1996-01-20	26564×4900	3.984	7.904	5000×1000
ERS2 (slave)	5.66	1996-01-21	26560×4900	3.984	7.904	5000×1000

干涉雷达像对。在 CPU 3.06GHz 内存 1G 环境下,采用基于轨道参数计算、特征点提取、小波金字塔分层相干匹配、插值相关系数、三角微分纠正这一流程的时间为 43 s;未知轨道参数时的配准流程:人工选点(事先选好点导入)、特征点提取、小波金字塔分层相干匹配、插值相关系数、三角微分纠正的时间为 42 s。这一流程得到的平均相干系数为 0.719855。与 DORIS 软件提供的像元级配准功能相比,本流程提供的是特征级的配准,因此在运行时间上有所提高。在同样的硬件条件下用同样的数据用 DORIS 进行配准(轨道计算,粗配准,精配准,多项式纠正)共需 97 s,平均相干系数为 0.667388。从生成干涉图的结果来看,采用本方案获得的干涉雷达像对计算的干涉图亮度分布极值大,显示了较高的配准精度。

4 结 论

该方案的优点是可以利用数字摄影测量领域处理光学影像的较成熟的理论和方法,结合干涉雷达数据处理的特点,将有关算法有机组合起来,重点解决精度和可靠性问题,并大大提高了匹配的计算效率,使数据处理能力能够达到大规模应用干涉雷达技术的要求。该方案存在以下特色:(1)由于可以采用人工选点的方式执行粗配准,在未知复图像对轨道参数的情况下,根据图像幅度信息也能得到粗略的偏移量,且精度明显高于基于轨道参数的结果;其最明显的缺点是,需要人工参与。但通过基于相关系数的匹配搜索能大大降低手动寻找同名点的难度;(2)基于 TIN 的微分纠正与采用二次多项式为几何变换模型的相对纠正方法相比较,一方面,这种方法是将影像分为三角形的小块来进行局部纠正,适用于因地形起伏较大而导致影像变形严重情况下的相对纠正;另一方面,每对三角形之间的变换是简单的仿射变换,大大地减少了单个模型数据处理的计算量。

参 考 文 献 (References)

- [1] Li H, Sanjit K. A Contour-based Approach to Multi-sensor Image Registration [J]. IEEE Transaction on Image Processing, 1995, 4(3): 320—335.
- [2] Gelauz M, Mitteregger E, Leberl F. Automated Acquisition of Ground Control Using SAR Layover and Shadows [A]. IEEE Proceedings of IGARSS 94 [C], Pasadena, 1994.
- [3] Wu H, Kim Y. Fast Wavelet Based Multiresolution Image Registration on a Multiprocessing Digital Signal Processor [J]. International Journal of Imaging System and Technology, 1998, 9(1): 29—37.
- [4] Walli K C. Automated Multisensor Image Registration [A]. IEEE Proceedings of the 32nd Applied Imagery Pattern Recognition Workshop [C], Washington, 2003.
- [5] Li Z, Zhang Y S. A Contour based Method of Image Registration [J]. Journal of Institute of Command and Technology, 1998, 9(3): 101—106. [李智,张雅声.基于轮廓特征的图像配准研究[J].装备指挥技术学院学报,1998,9(3):101—106.]
- [6] Guo H T, Liu Z, Zhang B M. Research on Fast Image Matching Based on Genetic Algorithms [J]. Journal of Institute of Surveying and Mapping, 2001, 18(Supplement): 20—22. [郭海涛,刘智,张保明.基于遗传算法的快速影像匹配技术的研究[J].测绘学院学报,2001,18(增刊):20—22.]
- [7] Liao M, Frederiksen P, Dall J et al. Precision Rectification of Airborne SAR Image [A]. IEEE Proceedings of IGARSS 97 [C], Singapore, 1997.
- [8] Liao M S, Zhang L, Zhang Z X et al. Automatic Registration for Repeat Track Interferometric Data Processing [A]. International Archives of Photogrammetry and Remote Sensing [C], XXX III Part B1, Amsterdam, 2000.
- [9] Guarnieri A M, Prati C. SAR Interferometry: A “Quick and Dirty” Coherence Estimator for Data Browsing [J]. IEEE Transaction on Geoscience and Remote Sensing, 1997, 35(3): 660—669.
- [10] Harris C G, Stephens M J. A Combined Corner and Edge Detector [A]. Proceedings Fourth Alvey Vision Conference Manchester [C], 1988.
- [11] Zhang D R, Liu F B, Yu L, et al. An Auto-adapted Features Extraction Method Based on Harris Operator [J]. Remote Sensing for Land and Resources, 2006, (2): 35—38. [张登荣,刘辅兵,俞乐等.基于 Harris 算子的遥感影像自适应特征提取方法[J].国土资源遥感,2006,(2):35—38.]
- [12] Wang C, Zhang H, Liu Z. Spaceborne Synthetic Aperture Radar Interferometry [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.]
- [13] Wang L C, Wang Y N, Mao J X. Registration of InSAR Image Based on Integrating Correlation Registration and Maximum 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干涉雷达复图像配准方法[J].测绘学报,2003,32(4):320—324.]