

InSAR 复数影像配准方法探讨

焦明连, 蒋廷臣

(淮海工学院 空间信息科学系, 江苏 连云港 222001)

摘要: 复数影像配准是卫星合成孔径雷达干涉数据处理中的重要步骤之一, 本文对目前影像配准最常用的方法进行了研究分析, 提出了基于幅度影像的配准方案, 并证明该方案配准精度高, 适应能力强, 运算效率高。

关键词: 干涉合成孔径雷达; SAR 影像; 配准

中图分类号: TP75 文献标识码: B 文章编号: 1672-5867(2008)06-0021-03

Discussion on Registration Procedure for InSAR Complex Image

JIAO Ming-lian, JIANG Ting-chen

(Department of Space Information Science, Huaihai Institute of Technology, Lianyungang 222001, China)

Abstract The co-registration of complex images is one of the vital procedures in data reduction of satellite synthetic aperture radar interferometry. The method of co-registration of complex images is described in this paper. The co-registration plan based on amplitude image is expounded. Results of experiment show that this plan achieves high accuracy with more effective operation and good adaptive capacity.

Key words synthetic aperture radar interferometry; SAR images; co-registration

0 引言

应用 InSAR 影像提取地面高程信息和形变信息, 目前还没有形成完全成熟的技术体系, 仍有许多问题有待解决。例如, 重复轨道干涉模式下复数影像的高精度配准、地形变化剧烈或有植被覆盖区域的去相关引起的相位噪声、复杂地形条件下的相位解缠、轨道参数的精确校准和地形快速纠正等问题。其中复数影像的高精度自动配准是干涉处理的首要步骤, 也是影响干涉相位图质量以及最终成果精度的关键因素。为此, 国内外有关学者提出许多影像配准方法, 如相干系数法、最大干涉频谱法、相位差影像平均波动函数法、最小二乘法和动态规划法等, 不断出现的各种配准方法使得配准的精度越来越高, 但其中始终存在一个问题, 就是某一种方法仅对几组或几种图像可以取得很好的效果, 却并不适应其他类型的图像, 我们希望找到一个自动化程度高、适应能力强的高精度影像配准方法。本文利用数字摄影测量领域中处理光学影像的较成熟的理论和方法, 结合 InSAR 数据处理的特点, 将有关影像配准方法有机组合起来, 不仅较好地解决了精度和可靠性问题, 并大大提高了配准效率, 使

数据处理能力能够达到大规模应用 InSAR 技术的要求。

1 影像配准方法分析

1.1 影像配准方法

目前影像配准最常用的方法有相干系数法、最大干涉频谱法和相位差影像平均波动函数法, 目的都是在于准确可靠地寻找控制点, 它们的实施策略和实现步骤基本相同, 只是计算的匹配指标、计算方法和选取配准点的标准不同, 下面进行简要说明。

1) 相干系数法

它是相干系数作配准指标, 在参考影像上以待匹配点为中心取一定大小的窗口, 对应在输入影像的一定搜索范围内, 逐行逐点移动, 并计算窗口内的相干系数, 相干系数最大处即为最佳匹配点。

2) 最大干涉频谱法

它是频谱值作配准指标, 将两匹配窗口影像进行干涉处理得到干涉条纹图像, 再对干涉条纹图像进行 2 维离散傅立叶变换得到 2 维谱, 2 维谱复绝对值 (复数值的模) 中的最大值为配准指标值 (频谱值), 最后选取搜索窗口中最大频谱值点作为配准点。

收稿日期: 2007-12-28

基金项目: 江苏省测绘科研项目 (JSCHKY200708) 资助

作者简介: 焦明连 (1963-), 男, 河南商丘人, 副教授, 学士, 1985 年毕业于焦作矿业学院工程测量专业, 主要从事空间信息和测绘教育研究工作。

3) 相位差影像平均波动函数法

它是以前相位差图像的平均波动函数值 f 作为配准指标, 通过估计干涉条纹图质量来判断匹配的质量。首先计算两匹配窗口对应像素的相位差 $p(i, j)$, 再按式 (1) 计算窗口的相位差平均波动函数值 f , 以 f 作为窗口中心点的配准指标值。最后选取搜索窗口中具最小波动函数值的点作为配准点。

$$f = \sum_i \sum_j |p(i+1, j) - p(i, j)| + |p(i, j+1) - p(i, j)| / 2 \quad (1)$$

1.2 影像配准方法分析

以上 3 种影像配准方法有它们各自的特点, 但也存在一些问题。

1) 在一定搜索范围内, 需要逐点移动窗口并计算配准指标, 重复运算工作量大, 严重影响计算效率。

2) 以整像素间隔为移动距离, 然后对定位结果进行多项式拟合求出最佳点。这种数据处理方法要达到子像素级别的精度较为困难, 在信噪比较高时, 理论精度可达 0.15~0.2 像素, 信噪比较低时, 并不能保证精度的明显提高, 拟和出来的极值位置甚至还可能落在所取窗口之外。

3) 这些配准方法均为单点匹配法, 即以待匹配点为中心取一个窗口, 根据某种配准指标, 在另一影像上搜寻最佳的匹配窗口, 确定同名点位置, 其结果的正确与否与周围点并无关系。但是, 由于某些噪声或随机干扰, 可能会在搜索范围内出现多个极值点, 而且其中的最大(小)值也可能与同名点不相对应, 不能保证匹配结果的整体一致性和可靠性。因此, 这种孤立的、不考虑与周围同名点相互关联的单点影像匹配结果之间可能会出现矛盾。

因此, 要将 InSAR 技术推向实用化, 解决影像自动配准, 并保证其可靠性、精度和运算效率是有待解决的关键问题。

2 基于幅度影像的配准方案

该方案的基本思想是充分利用复数影像中幅度分量所包含的信息, 将多种匹配方法有机组合起来, 在保证准确性和可靠性的前提下, 尽量避免复杂的运算。实施方案如下:

2.1 特征点提取

特征是某个或某些像元相对于其邻域表现出来的一种结构性质, 它一般能够较好地保持平移、旋转不变性。因此, 采用特征匹配可以得到较高的可靠性。点特征是基本特征, 但其适用的范围却最广, 而且其计算与描述都很简单, 因此文中选择特征点作为配准点。提取特征点需要用到所谓的兴趣算子, Forstner 算子的精度与速度比较适中, 所以选用该算子提取特征点。

2.2 初级匹配

以特征点为中心取一矩形窗口, 通常称之为目标窗口, 根据先验知识的预测, 在从影像中取一较大的矩形窗口(该窗口应包含主影像特征点的同名点), 通常称为搜

索窗口, 将搜索窗口中每一个与目标窗口等大的子窗口的灰度矩阵与目标窗口的灰度矩阵进行比较, 其中相关系数最大, 即最相似的子窗口中心即为该特征点的同名点。相关系数按式 (2) 计算。

$$\max \rho(\Delta x, \Delta y) = \frac{\sigma_{\text{影像}^2}}{\sqrt{\sigma_{\text{影像}^1} \sigma_{\text{影像}^2}}} \quad (2)$$

式中: $\sigma_{\text{影像}^2}$ 为协方差; $\sigma_{\text{影像}^1}$, $\sigma_{\text{影像}^2}$ 为方差; $1 \geq \rho \geq -1$ 。

应该注意的是, 初级匹配也是单点匹配, 而且在搜索区域内可能出现多峰值, 即参考影像上一个点, 可能对应输入影像上多个待选同名点。因此该匹配结果仅作为下一级匹配的初始值。

2.3 松弛法整体影像匹配

初始匹配仅依靠匹配窗口内的有限信息, 并未考虑某个匹配结果与其相邻的匹配结果之间相容与否, 采用松弛算法作整体匹配, 可以提高匹配的可靠性, 是解决整体最优的方法之一。

影像松弛匹配是定义两幅影像之间相应的点对, 即输入影像上的某像素 j 对应于参考影像上同名像素 i 。从模式识别的观点来看, 设有一目标集合 $O = \{O_1, O_2, \dots, O_n\}$ 与类别集合 $C = \{C_1, C_2, \dots, C_m\}$ 。其中, 参考影像上的像素 i 对应目标 O_i , 输入影像上对应的像素 j 为类别 C_j , 而影像匹配就是要解决 $O_i \in C_j$ 是否成立的问题。为了提高可靠性, 我们还必须考虑结果的全局一致性, 即分类结果是否相互协调一致。根据概率松弛算法, 必须引入 $O_i \in C_j$ 与 $O_h \in C_k$ 的相容系数 $C(i, j, h, k)$ 。

在局部的匹配算法中是以灰度分布的相似性作为匹配的测度, 因此可以定义相关系数 ρ_j 为 $O_i \in C_j$ 的概率 P_j 的测度。根据跨接法 (bridge mode method) 影像匹配原理, 参考影像中区间 ih 和输入影像中对应区间 jk 的相关系数 $\rho(ih, jk)$ 可以定义为上述相容系数 $C(i, j, h, k)$ 的测度。若 $O_i \in C_j$, $O_h \in C_k$ 则相容系数 $C(i, j, h, k)$ 对应于 $(O_i \in C_j \text{ and } O_h \in C_k)$, 即:

$$C(i, j, h, k) \propto \overline{\rho(ih, jk)} \quad (3)$$

在确定了它们的 P_j 和 $C(i, j, h, k)$ 后, 就可根据式 (4) 进行松弛叠代运算, 即:

$$\left. \begin{aligned} Q(i, j) &= \sum_{h=1}^{n(H)} \left(\sum_{k=1}^{m(k)} C(i, j, h, k) \cdot P(i, j) \right) \\ p^{(r)}(i, j) &= p^{(r-1)}(i, j) \cdot (1 + B \cdot Q(i, j)) \\ p^{(r)}(i, j) &= p^{(r)}(i, j) / \left(\sum_{j=0}^m p^{(r)}(i, j) \right) \end{aligned} \right\} \quad (4)$$

式中 $n(H)$ 为相邻匹配点的个数, $m(k)$ 和 $m(j)$ 为匹配候选点的个数, 最后, 如果 $p^{(r)} > T$, 该点停止叠代, 并确定其可靠的点对; B 是一个常数, 由经验确定; T 为事先给出的阈值。此外, 影像的金字塔数据结构用于整个匹配过程, 以进一步提高数据处理的速度和配准的可靠性。

2.4 单点最小二乘匹配

最小二乘匹配的出发点是应用“灰度差的平方和最小”的匹配测度。由于该方法充分利用了影像窗口内的信息进行平差计算, 使影像匹配可以达到 1/10 甚至 1/100 像素的高精度。为此, 最小二乘影像匹配被称为“高精度

影像匹配”,具体算法见文献[3],因此应用该方法可以确保匹配结果的精度达到 0.1 个像素以上。最小二乘法影像匹配需要注意的是收敛性问题。在匹配的迭代计算中,其收敛的速度主要取决于初值的准确性。初值越准确,收敛就越快。那些经过多次迭代不收敛的点将被剔除,不参与后面的纠正以保证结果的可靠性。

2.5 配准影像的相对纠正

两幅影像之间的相对纠正实际上是一个影像坐标变换和影像灰度重采样的过程。由于在上述自动配准中能够获得较密集的配准点对,也可以采用局部影像纠正的方法,即首先利用 Delaunay 三角网生成算法自动构成不规则三角网(TIN);然后对每个三角形利用仿射变换公式计算出变换参数。这种方法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成三角形的小块来进行局部的纠正,适用于因地形起伏较大而导致影像变形严重情形下的相对纠正;另一方面,每对三角形之间的坐标变换是简单的仿射变换,大大减少了数据处理的计算量。

3 分析与结论

针对高精度影像配准存在着缺乏一个高度自动化和强适应性的算法问题,文中将几种高精度的匹配方法有机集成,实现了一种新的影像配准方案。

1) 从匹配方案来看,匹配算法和相干性测度的计算都是基于幅度分量进行。这样,大大减少了需处理的数据量,实数运算也显然比复数运算的计算量小得多。因为, SAR 数据动态范围大,单通道的原始影像一般每个像素以浮点型 4 个字节(幅度影像)或 8 个字节(复数影像)记录。实际上在处理复数 SAR 影像时,为显示方便或检测信号,通常都会生成幅度影像或功率影像,即幅度的平方,不会另外增加太多的计算量。

2) 由于仅利用幅度分量进行匹配,噪声的干扰会比

较突出。多级匹配方法的组合,可以保证精度和可靠性。基于 ρ 的粗匹配能消除影像灰度间的线性畸变,适用于普遍存在灰度线形畸变的不同相影像之间的匹配;基于跨接法整体匹配的松弛算法充分考虑到整体匹配的一致性,从而也保证了匹配结果的可靠性,使得该级匹配结果满足最小二乘匹配对初始值的要求;最后使用单点最小二乘匹配来进一步提高匹配精度。

3) 最小二乘匹配本质上是灰度相似性导引的最速下降算法,少量的迭代次数就可达到所需精度,避免了传统方法逐点搜索、重复计算的缺点。实验结果^[7]表明,匹配精度完全能够满足 NSAR 数据处理的要求。

参考文献:

- [1] 张祖勋,张剑清. 数字摄影测量学[M]. 武汉: 武汉测绘科技大学出版社, 1996
- [2] 胡志贵. CyberLand 先进独特的遥感影像配准与融合系统[J]. 中国图形图像学报(应用版), 2001, (7): 27-30
- [3] 方勇,常本义. 基于多源遥感数据融合的 SAR 影像地图制作的研究[J]. 测绘学院学报, 2000 20(1): 8-12
- [4] 邢帅,谭兵,李建胜,等. 基于小面元的多源遥感影像高精度配准方法[J]. 测绘学院学报, 2003 20(2): 8-12
- [5] 陈鹰,于晶涛. InSAR 复数影像配准方法研究[J]. 计算机工程与应用, 2005, (8): 13-15
- [6] 罗小军,刘国祥,黄丁发,等. 几种卫星合成孔径雷达影像配准算法的比较研究[J]. 测绘科学, 2006, 31(1): 19-21
- [7] 林卉,赵长胜,肖剑平. 一种高精度遥感影像配准融合方法[J]. 江南大学学报(自然科学版), 2005, 4(4): 371-374
- [8] 廖明生,林琿. 雷达干涉测量原理与信号处理基础[M]. 北京: 测绘出版社, 2003

[责任编辑:王丽欣]

(上接第 20 页)

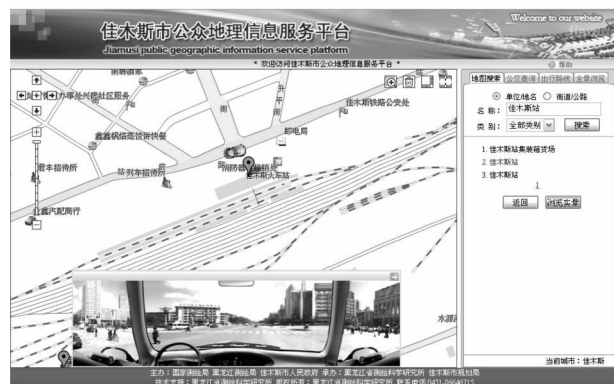


图 3 佳木斯市公众地理信息服务平台——地图搜索栏目
Fig 3 Jiamusi public geographic information service platform — Map search

参考文献:

- [1] 陈述彭,鲁学军,周成虎. 地理信息系统导论[M]. 北京: 科学出版社, 2001
- [2] 严蔚敏,吴伟民. 数据结构[M]. 北京: 清华大学出版社, 1996
- [3] [美]Cay S Horstmann, Cay Corneli 著. 朱志,王怀,赵伟等译. Java 2 核心技术卷② 高级特性[M]. 北京: 机械工业出版社, 1999
- [4] 李德仁,邵振峰. 2008 年 4 月影像城市·武汉——网络电子地图的一场革命[J/OL]. 2008
- [5] 李德仁. 论可量测实景影像的概念与应用——从 4D 产品到 5D 产品[J]. 测绘科学, 2007, 32(3): 5-7
- [6] 李德仁,郭晟,胡庆武等. GIS 新引擎——“真图”数据解决方案[J]. 地理信息世界, 2008, 31(4): 5-10

[责任编辑:姚艳霞]