

一种基于特征点权重的机载 InSAR 系统区域网干涉参数定标方法

韩松涛^{①②} 向茂生^①

^①(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)

^②(中国科学院研究生院 北京 100039)

摘要: 干涉参数外定标可以获取干涉相位偏置,并对干涉系统基线参数进行修正,提高干涉系统 3 维定位的精度。该文提出了一种新的区域网干涉参数定标算法,该方法采用特征点提取、最优相关匹配技术实现对交互连接的数据块同名点提取;利用加权联合定标技术实现少量控制点条件下干涉数据的参数定标,并对定标结果进行了理论分析。通过对具有不同地貌特征的实测机载数据的处理,验证了处理算法的有效性。

关键词: 干涉合成孔径雷达; 干涉参数定标; 特征点提取; 同名点; 加权联合定标

中图分类号: TN959.73

文献标识码: A

文章编号: 1009-5896(2010)05-1244-04

DOI: 10.3724/SP.J.1146.2009.00640

A Bundle Adjustment Calibration Method for Airborne InSAR System Based on Weighting of Feature Points

Han Song-tao^{①②} Xiang Mao-sheng^①

^①(The National Key Laboratory of Microwave Imaging Technology, Institute of Electronics, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100190, China)

^②(Graduate University of the Chinese Academy of Sciences, Beijing 100039, China)

Abstract: Interferometric parameters calibration of InSAR system can acquire both interferometric phase bias and accurate baseline parameters. Then planimetric and vertical accuracies can be improved much. An approach of interferometric calibration over very large areas is presented in this paper. It acquired corresponding points using feature points extraction and optimal matching, then weighted bundle adjustment is induced to realize calibration of each sub-data simultaneously. The calibration parameters are analyzed. Results using airborne data show robust of the algorithm with respect to different terrain type.

Key words: InSAR; Interferometric calibration; Feature points extraction; Corresponding points; Weighted bundle adjustment calibration

1 引言

干涉合成孔径雷达(Interferometric Synthetic Aperture Radar, InSAR)广泛应用于地形测绘、地表形变监测等军事、民用领域。干涉参数误差是影响系统高程测量精度的因素之一,干涉定标实现干涉相位偏置的获取以及对基线测量误差进行修正,从而提高干涉系统高程测绘的精度^[1,2]。干涉定标相关研究多集中在方法论述、定标点布放规则、病态矩阵求逆问题以及多源数据生成大区域 DEM 等^[3-6]。

在机载 InSAR 系统实用化测图处理中,复杂多样的地形地貌增加了野外布放定标点的难度;同时干涉数据处理多采用条带内重叠分块处理方式^[7],实

现全部数据块的定标点布放大大增加了作业工作量。本文提出一种在具备少量定标点的情况下实现大区域干涉数据参数定标的方法。该方法基于特征点提取、最优匹配技术实现同名点提取,利用同名点实现控制点高程信息传递;同时在干涉参数联合定标处理中引入加权处理,实现控制点的权重分配。通过对定标点稀疏分布在测绘带两端的条带数据处理,验证了定标算法的有效性,对定标结果的理论分析证明了应用本文算法获取定标参数的正确性。

2 同名点提取方法

算法利用同名点实现控制点高程信息在不同数据块间的传递,因此同名点选取的精度会直接影响算法的性能。算法采用特征点提取与最优相关匹配技术来实现高精度的同名点提取。

2.1 特征点提取

特征点提取广泛应用于图像配准领域,常采用的特征点提取算子有: Moravec 算子, Forstner 算

2009-04-30 收到, 2009-09-17 改回

国家 863 计划项目(2007AA120302)和国家 973 计划项目(2009CB724003)资助课题

通信作者: 韩松涛 justdoit_doing@126.com

子, Harris 算子, SUSAN 算子等。其中 Harris 算子实现简单且稳定性高, 应用广泛^[8,9], Harris 算子利用与自相关函数相联系的矩阵 \mathbf{M} , 其计算公式为

$$\mathbf{M} = \begin{bmatrix} f_x^2 & f_x f_y \\ f_y f_x & f_y^2 \end{bmatrix} \quad (1)$$

其中 f_x , f_y 分别表示灰度图像 f 在水平方向和垂直方向的一阶导数。

兴趣值 $I = \det(\mathbf{M}) - k(\text{tr}(\mathbf{M}))^2$, 其中 \det 为矩阵行列式, tr 为矩阵的迹, k 为常数。所要提取的特征点就是局部范围内极大兴趣值所对应的点。

2.2 最优相关匹配

最优相关匹配利用两幅图像精确配准时相关系数最大的性质, 以特征点为中心选择窗口 N , 在需要寻找同名点的数据块中通过移动窗口计算相关系数, 相关系数最大位置即对应同名点的位置。

2.3 同名点选取

提取同名点的最终目的是用于实现干涉参数联合定标, 因此需要剔除相关性较低的同名点, 同时根据文献[4]中的定标点布放规则, 对同名点进行择优保留。

3 加权联合定标算法

根据 InSAR 测高原理^[10]:

$$h = H - r \cos \theta$$

$$= H - r \cos \left(\alpha + \arcsin \left(\frac{B^2 - \Delta r^2 - 2r\Delta r}{2Br} \right) \right) \quad (2)$$

$$\phi = \frac{2\pi}{\lambda} \Delta r \quad (3)$$

其中 h 为目标高度, H 为载机高度, r 为目标与主天线距离, θ 为雷达下视角, α 为基线倾角, B 为基线长度, Δr 为目标与主从天线距离差, λ 为波长, ϕ 为干涉相位, 干涉模式为标准模式。

利用高程误差与基线长、基线倾角、干涉相位偏差的关系构建敏感度矩阵 \mathbf{F} :

$$\mathbf{F} = \begin{bmatrix} \left. \frac{\partial \mathbf{H}}{\partial \phi} \right|_1 & \left. \frac{\partial \mathbf{H}}{\partial \alpha} \right|_1 & \left. \frac{\partial \mathbf{H}}{\partial B} \right|_1 \\ \vdots & \vdots & \vdots \\ \left. \frac{\partial \mathbf{H}}{\partial \phi} \right|_N & \left. \frac{\partial \mathbf{H}}{\partial \alpha} \right|_N & \left. \frac{\partial \mathbf{H}}{\partial B} \right|_N \end{bmatrix} \quad (4)$$

其中 \mathbf{H} 为 $N \times 1$ 维高程向量, 干涉参数修正量为

$$\Delta \mathbf{X} = \mathbf{F}^+ \Delta \mathbf{H} \quad (5)$$

其中 $\Delta \mathbf{H}$ 为 $N \times 1$ 维高程误差向量, \mathbf{F}^+ 表示敏感度矩阵 \mathbf{F} 的广义逆矩阵, $\Delta \mathbf{X} = [\Delta \phi, \Delta \alpha, \Delta B]^T$ 为干涉参数修正量。定标算法利用地面控制点高程信息获取高程误差向量 $\Delta \mathbf{H}$, 利用系统参数构建敏感度矩

阵 \mathbf{F} , 之后利用式(5)得到干涉参数误差, 实现对干涉参数(绝对相位、基线倾角、基线长度)的修正。

加权联合定标首先将全部数据块分为两类: I 类数据既包含定标点又包含同名点; II 类数据只包含同名点, 算法整体分为同名点信息初始值获取和干涉参数联合定标两部分。

由式(5)基本原理, 应用高程误差结合敏感度矩阵实现干涉参数修正量的获取, 当控制点本身存在误差 $\Delta \mathbf{H}_{\text{error}}$ 时, 此时式(5)转化为

$$\Delta \mathbf{X}' = \mathbf{F}^+ (\Delta \mathbf{H} + \Delta \mathbf{H}_{\text{error}}) = \Delta \mathbf{X} + \Delta \mathbf{X}_{\text{error}} \quad (6)$$

$\Delta \mathbf{X}_{\text{error}}$ 为干涉参数修正量误差, 可见控制点自身误差会引起干涉参数定标误差, 以此干涉定标结果获取的目标高程信息为

$$\mathbf{H} = G(\phi, \alpha, B \dots) = G(\mathbf{X} + \Delta \mathbf{X} + \Delta \mathbf{X}_{\text{error}}) \quad (7)$$

\mathbf{H} 为获取的目标高程向量, \mathbf{X} 表示干涉参数向量, G 为由于干涉参数获取高程的非线性函数。可见控制点的高程误差会最终引起高程反演误差。因此需要对具有不同高程精度的控制点(包括定标点以及同名点)赋予不同的权重。

(1)利用已有的定标点进行干涉定标, 获取本数据块内的同名点高程, 利用已获取的同名点作为控制点进行参数定标依次获取全部同名点高程, 同时记录由最初定标点到获取同名点高程所经过的传递次数 L , 按式(8)获取同名点高度的初始值。

$$H = \sum_{i=1}^M \left(\frac{1}{L_i} / \sum_{j=1}^M \frac{1}{L_j} \right) H_i \quad (8)$$

其中 M 表示该同名点所位于的数据块个数, H_i , L_i 分别为各数据块内的同名点信息以及传递次数。经过传递的次数越多, 误差积累越显著, 因此对此类同名点赋予较低的权重值, 反之则赋予较高的权重值。

(2)利用定标点与同名点共同作为控制点进行参数定标, 并按式(8)更新同名点高程, 循环直至定标点偏差以及同名点间差异满足设定阈值。外场实测的定标点由差分 GPS 获取, 可忽略此类控制点的高程误差; 而同名点受相关系数、信噪比等因素影响会存在干涉相位误差, 利用定标点获取的同名点高程不可避免存在误差, 同时利用存在偏差的同名点高程作为控制点会进一步引起误差传递。为降低同名点多次传递引起的误差影响, 在联合定标处理中引入加权因子, 修正式(5)为

$$\Delta \mathbf{X} = \mathbf{F}^+ \mathbf{W} \Delta \mathbf{H} \quad (9)$$

\mathbf{W} 为高程误差权重向量。

$$W_i = \frac{\min\{L_1, L_2, \dots, L_P\}}{L_i} \quad (10)$$

其中 P 表示该数据块内的全部同名点个数, L_i 意义上, 对外场定标点其 $L_i = 1$, \min 表示取极小值, 利用该式设置权重一方面降低了经过高传递次数的控制点权重, 另一方面保留了高可信度控制点的高程误差, 不至于降低迭代算法的收敛速度。

4 实验结果与分析

实验应用中国科学院电子学研究所研制的机载双天线 InSAR 系统获取的数据, 测绘带宽 5 km, 长约 100 km, 飞行方向自西向东, 飞行时间 11 min, 测绘带内地形丰富, 西部为平地区, 东部为山体区。在数据处理过程中整个条带共分 30 小块, 块间重合度约 1/3。

4.1 实验结果

利用本文算法进行同名点提取, 并进行质量检查以及分布筛选, 主要是剔除低相关区如居民区强目标散射点以及分布过于密集的同名点, 提取结果将用于后续定标处理。图 1 以相邻的两个数据块为例, 给出部分区域同名点提取结果, 其中水平方向表示方位向, 垂直方向为距离向。

条带内共有 20 个定标点, 集中分布在西部第 7 小块(4 个), 东部的第 19 小块(8 个), 20 小块(3 个), 以及 16, 17, 18, 24, 25 小块各 1 个。

如果应用普通的定标算法, 一方面多数不存在定标点的数据块无法实现干涉参数定标; 另一方面含有较少定标点的数据块定标结果会有较大偏差。

利用本文算法对实验区数据进行加权联合定标处理, 并利用定标点及检验点对联合定标结果进行误差统计, 统计点包括定标处理用到的 20 个定标点以及分布在整个条带的 53 个检验点。图 2(a)为本文算法条带内高程误差统计图, 其中方位向坐标表示像素点沿方位向的空间位置, 其中“*”号为定标点, “○”号为检验点, 统计信息显示高程均方误差约 3.00 m, 表明本文算法可以在少量定标点情况下实现 InSAR 系统高精度测图。

图 2(b)是未引入加权的联合定标处理结果, 高程均方误差约 3.11 m, 低于本文算法精度。本实验数据块分布在同一条带内, 同名点高程的传递或由两侧定标点传递而来(如第 10 小块), 或由一侧定标点传递而来(如第 30 小块), 同一数据块内的同名点权值较接近, 加权联合定标处理高程精度提高 3.54%。

4.2 结果分析

图 3 与图 4 分别显示了整个条带 30 个数据块加权联合定标后的基线长度误差以及平均偏航角。

在整个测绘带飞行时间内, 干涉基线相对变化最大约 2 mm, 结合系统参数基线相对变化量会引起 9 m 左右的高程误差, 若整个条带应用同一基线参数将会引起较大的定位误差, 这也验证了国际上通用的将测绘带划分若干重叠小块单独进行干涉处理的合理性。

基线变化与偏航角存在相关性, 这是由于系统采用稳定平台的基线安装模式且存在 1.14 m 的顺轨基线, 偏航角变化引起有效交轨基线的变化。理论分析验证了加权联合定标结果的合理性。

5 结论

InSAR 技术是实现大区域地形测绘的重要技术, 本文给出的基于特征点权重的加权联合参数定标方法可以在具备少量定标点情况下实现干涉参数定标, 同时理论分析验证了定标结果的合理性, 处理算法为实用化机载系统应用于国家西部测图工程打下坚实基础。

同名点提取以及有效性判别是实现联合定标的关键, 后续工作还需要考虑更复杂数据源的同名点提取方法, 如多条带交叉飞行等; 另外联合定标可以实现少量定标点情况下的干涉参数获取, 但仍然需要对定标点进行合理设置, 如对长测绘带在两端设置定标点优于在一端集中布放。

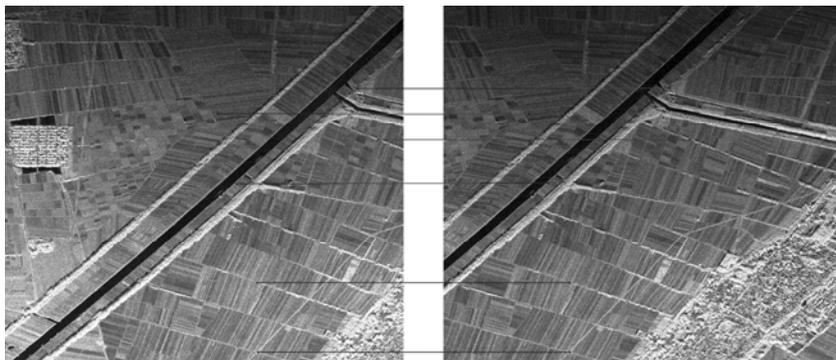


图 1 同名点提取结果

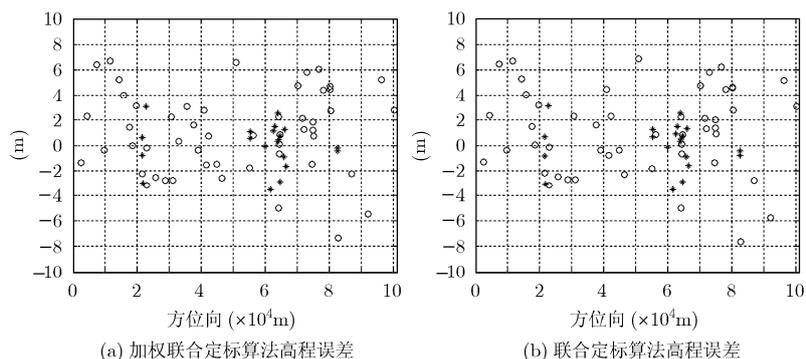


图2 高程误差统计图

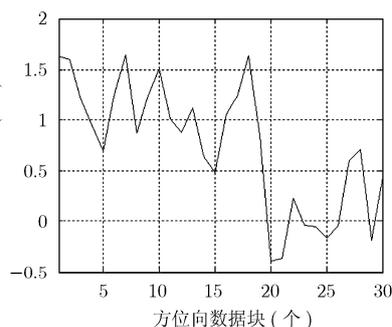


图3 条带内基线误差统计图

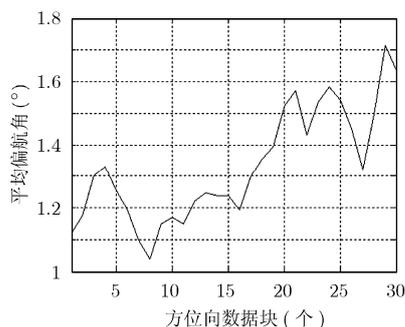


图4 条带内飞行姿态偏航角统计图

参考文献

- [1] Ferretti A, Monti-Guarnieri A, and Prati C, *et al.* InSAR Principles: Guidelines for SAR Interferometry Processing and Interpretation [M]. The Netherlands, ESA Publications, 2007: A17-A23.
- [2] Crosetto M. Calibration and validation of SAR interferometry for DEM generation [J]. *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*, 2002, 57(3): 213-227.
- [3] Mallorqui J J, Rosado I, and Bara M. Interferometric calibration for DEM enhancing and system characterization in single pass SAR interferometry [C]. IEEE International Geoscience and Remote Sensing Symposium, Sydney, Australia, 2001, 1: 404-406.
- [4] Wang Yan-ping and Peng Hai-liang. Locating calibrators in airborne InSAR calibration [C]. IEEE International Geoscience and Remote Sensing Symposium, Beijing, China, 2003, 7: 4515-4517.
- [5] 李品. InSAR 系统的定标方法研究[D]. [博士论文], 中国科学技术大学, 2008.
- [6] Li Pin. Research on methods of calibration in InSAR system [D]. [Ph.D.dissertation], University of Science and Technology of China, 2008.
- [7] Mora O, Perez F, and Pala V *et al.* Development of a multiple adjustment processor for generation of DEMs over large areas using SAR data [C]. IEEE International Geoscience and Remote Sensing Symposium, Beijing, China, 2003, 4: 2326-2328.
- [8] Madsen S N, Zebker H, and Martin J. Topographic mapping using radar interferometry: processing techniques [J]. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 1993, 31(1): 246-256.
- [9] 张春美, 龚志辉, 黄艳. 几种特征点提取算法的性能评估及改进[J]. 测绘科学技术学报, 2008, 25(3): 231-234.
- [10] Zhang Chun-mei, Gong Zhi-hui, and Huang Yan. Performance evaluation and improvement of several feature point detectors [J]. *Journal of Geomatics Science and Technology*, 2008, 25(3): 231-234.
- [11] 张春森. 基于点特征匹配的SUSAN, Harris算子比较[J]. 西安科技大学学报, 2007, 27(4): 608-611.
- [12] Zhang Chun-sen. Compare SUSAN and Harris corner detector based on point feature matching [J]. *Journal of Xi'an University of Science and Technology*, 2007, 27(4): 608-611.
- [13] Richards M A. A beginner's guide to interferometric SAR concepts and signal processing [J]. *IEEE Aerospace and Electronic Systems Magazine*, 2007, 22(9): 5-29.

韩松涛: 男, 1982年生, 博士生, 研究方向为干涉合成孔径雷达数据处理技术。

向茂生: 男, 1964年生, 研究员, 研究方向为干涉合成孔径雷达系统技术。