

文章编号: 1001-1595(2011)05-0616-07

基于区域网平差的 InSAR 基线估计方法

靳国旺^{1,2}, 吴一戎¹, 向茂生¹, 徐青², 秦志远²

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. 信息工程大学测绘学院, 河南郑州 450052

Baseline Estimation Algorithm of InSAR with Block Adjustment

JIN Guowang^{1,2}, WU Yirong¹, XIANG Maosheng¹, XU Qing², QIN Zhiyuan²

1. National Key Laboratory of Science and Technology on Microwave Imaging, Institute of Electronics, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100190, China; 2. Institute of Surveying and Mapping, Information Engineering University, Zhengzhou 450052, China

Abstract: A new baseline estimation algorithm with block adjustment considering phase offset for multiple InSAR data that cover large areas is proposed to reduce the number of needed ground control points and the difference between heights derived from different data. The experiments of baseline estimation with block adjustment are done with multiple pairs of InSAR data obtained by an airborne InSAR system researched by Institute of Electronics, Chinese Academy of Sciences. It uses less ground control points. The difference between heights in overlap areas is reduced, which validates the proposed baseline estimation algorithm.

Key words: interferometric synthetic aperture radar (InSAR); baseline estimation; block adjustment; tie point; ground control point

摘要: 为有效减少大面积、多套干涉数据基线估计所需的地面控制点数量、降低接边处反演高程的差异, 提出考虑干涉相位偏置的 InSAR 区域网平差基线估计方法。采用中国科学院电子学研究所机载 InSAR 系统获取的多套干涉数据进行了区域网平差基线估计试验, 利用少量地面控制点完成了各套干涉数据的基线估计, 减小接边处反演高程的差异, 验证该基线估计方法的有效性。

关键词: 合成孔径雷达干涉测量 (InSAR); 基线估计; 区域网平差; 连接点; 地面控制点

中图分类号: P237 文献标识码: A

基金项目: 国家自然科学基金 (40771142; 40871213; 41071296); 国家 863 计划 (2007AA120302); 中国博士后科学基金 (200801111); 国家西部 1:50000 地形图空白区测图工程

1 引言

合成孔径雷达干涉测量^[1-3] (interferometric synthetic aperture radar, InSAR) 技术在地形测绘^[2-3]、地表形变监测^[4]、冰川运动研究^[5-6] 等方面都表现出快速、高精度、全天时、全天候、大区域等突出优势^[2-3], 已经成为目前发展迅速、极具潜力的对地观测及测绘新技术之一。

利用 InSAR 技术快速获取高精度数字高程模型 (digital elevation model, DEM) 是目前 InSAR 应用研究的一个主要方面。在 InSAR 处理中, 基线估计或干涉参数定标是关键步骤之一, 其精度直接影响最后获取高程的精度。

在干涉参数定标方面, 文献[7]建立了考虑多路径效应等参数的定标模型, 文献[8-9]介绍了基于敏感度方程的干涉定标方法, 文献[10]针对 SRTM 设计了利用点目标及分布式目标进行幅

射定标和相位定标的方案, 文献[11]介绍了 GeoSAR P 波段的干涉定标情况, 文献[12]基于敏感度矩阵的条件数研究了机载 InSAR 定标模型和定标器布放问题, 文献[13]介绍了一种 InSAR 地理编码和镶嵌系统, 文献[14]等介绍了大区域 SAR 数据生成 DEM 的平差方处理方法。

为了提高基线估计的精度和可靠性, 作者对机载双天线 InSAR 系统的基线参数估计方法进行了研究, 并提出了一种新的干涉参数定标模型^[15]。为了利用少量地面控制点完成大面积、多套 InSAR 数据的基线估计, 在文献[15-16]的基础上, 设计了考虑干涉相位偏置的区域网平差基线估计方法。

在进行大面积、多套 InSAR 数据的基线估计时, 如果不考虑各干涉数据之间的连接条件而采用各像对单独基线估计方法, 将存在以下问题:

① 对于每对干涉数据, 都需要足够数量、分布合

理的地面控制点来完成基线估计, 在整个大区域内完成所有干涉像对的干涉处理和数字高程模型及正射影像的获取工作就需要获取大量、分布合理的地面控制点, 需要消耗大量的人力和财力;

② 由于基线估计误差的存在, 在各套干涉数据接边处反演的高程值之间将存在较大差异, 不同干涉数据获取的 DEM 及正射影像之间将存在较大的相对误差。综上所述, 采用各套数据单独基线估计方法, 难以以经济、高效的方式完成大面积地形测绘工作。

在光学图像的摄影测量和 SAR 立体图像的摄影测量中, 经常采用区域网平差思想由少量地面控制点加密出测图用的大量控制点。为了促进 InSAR 技术在大面积地形测绘中的实用化, 笔者引入区域网平差思想, 提出一种考虑干涉相位偏置的区域网平差 InSAR 基线估计方法。

2 基于区域网平差的基线估计原理

令 R 表示主天线相位中心到相应地面点的斜距, ΔR 表示 InSAR 成像时两天线相位中心到同一地面点的斜距差, B 表示两天线相位中心之间的基线长度, α 表示基线与水平方向的夹角, H 为天线相位中心的高程, h 为地面点的高程。则由 InSAR 的基本原理^[3]可得到如下关系式

$$h = H - R \cos \theta = H - R \cos \left(90^\circ + \alpha - \arccos \left(-\frac{\Delta R}{B} + \frac{B}{2R} - \frac{\Delta R^2}{2RB} \right) \right) \quad (1)$$

式中, $\theta = \arccos \frac{H-h}{R}$ 。

对于重复轨道 InSAR 系统而言, $\Delta R = \frac{\phi_0 + \Delta\phi}{4\pi} \lambda$; 对于机载双天线 InSAR 系统而言, $\Delta R = \frac{\phi_0 + \Delta\phi}{2\pi} \lambda$ 式中, ϕ_0 表示干涉相位偏置; $\Delta\phi$ 表示解缠干涉相位; λ 表示雷达波波长。考虑到本文采用机载双天线 InSAR 数据进行试验, 如下公式推导均是针对双天线 InSAR 系统进行的。

对式(1)进行变换, 可得

$$F = B \sin(\theta - \alpha) + \Delta R - \frac{B^2}{2R} + \frac{\Delta R^2}{2R} = 0 \quad (2)$$

式(2)可简记为

$$F(B, \alpha, \phi_0, h) = 0 \quad (3)$$

当考虑误差因素影响时, 可将式(3)对基线长

度、基线水平角和干涉相位偏置三个参数及高程值 h 线性化后得到误差方程

$$v = F(B, \alpha, \phi_0, h) = b_0 \Delta B + b_1 \Delta \alpha + b_2 \Delta \phi_0 + b_3 \Delta h - l \quad (4)$$

其系数分别为

$$\begin{cases} b_0 = \frac{\partial F}{\partial B} = \sin \left[\arccos \frac{H-h}{R} - \alpha \right] - \frac{B}{R} \\ b_1 = \frac{\partial F}{\partial \alpha} = -B \cos \left[\arccos \frac{H-h}{R} - \alpha \right] \\ b_2 = \frac{\partial F}{\partial \phi_0} = \frac{\lambda}{2\pi} + \frac{\Delta R}{R} \frac{\lambda}{2\pi} \\ b_3 = \frac{\partial F}{\partial h} = \frac{1}{\sqrt{R^2 - (H-h)^2}} \\ B \cos \left[\arccos \frac{H-h}{R} - \alpha \right] \end{cases}$$

常数项为

$$l = -F_0(B, \alpha, \phi_0, h) = -B_0 \sin \left[\arccos \frac{H-h}{R} - \alpha_0 \right] - \Delta R + \frac{B_0^2}{2R} - \frac{\Delta R^2}{2R}$$

式(4)写成矩阵形式为

$$V = [A \ B] \begin{bmatrix} \Delta_1 \\ \Delta_2 \end{bmatrix} - L \quad (5)$$

式中, $V = [v]$; $A = [b_0 \ b_1 \ b_2]$; $B = [b_3]$; $\Delta_1 = [\Delta B \ \Delta \alpha \ \Delta \phi_0]^T$; $\Delta_2 = [\Delta h]$; $L = [l]$ 。

为了简要说明考虑干涉相位偏置的区域网平差基线估计思想, 假定采用的数据是具有一定影像重叠的两个干涉像对, 所采用的控制点为平面高程控制点, 需要解算的是两个干涉像对的基线长度、基线水平角和干涉相位偏置。如图 1 所示, 若采用区域网平差基线估计方法, 则在这两个像对中, 控制点、连接点都可根根据式(4)列出相应的误差方程式。

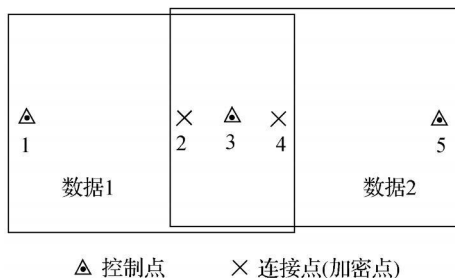


图 1 区域网平差基线估计所需控制点

Fig. 1 Needed GCPs for baseline estimation with block adjustment

以图 1 中的控制点 1 为例, 所列出的误差方程形式为

$$v_{GCP1} = F(B_1, \alpha_1, \phi_{10}, h_{GCP1}) \quad (6)$$

而对于图 1 中的连接点 2, 由不同像对反演的高程值应相等, 因此在平差中考虑了不同数据接边处高程相等的条件, 此时连接点 2 在不同干涉像对中所列出的误差方程分别为

$$v_{1TP2} = F(B_1, \alpha_1, \phi_{10}, h_{TP2}) \quad (7)$$

$$v_{2TP2} = F(B_2, \alpha_2, \phi_{20}, h_{TP2}) \quad (8)$$

依此类推, 对于所有的控制点和连接点, 都可列出相应的误差方程式。之后给定未知数的初值, 根据误差方程组成法方程式进行各未知数改正量的答解。再根据解算出的未知数改正量对初值进行修正, 并对上述计算过程进行迭代, 直至满足给定的收敛条件。最后可得到各像对的基线估计和干涉相位偏置解算结果及所有连接点处的高程值加密结果。

此时, 需要解算的参数共计 $2 \times 3 = 6$ 个, 重叠范围内的 1 个控制点可列 $1 \times 2 = 2$ 个误差方程式, 其余 2 个控制点各列 1 个误差方程式, 2 个连接点可列 4 个误差方程式并同时引入 2 个未知数, 所以此时刚好能列 $2 + 2 + 4 = 8$ 个误差方程式来解算 $6 + 2 = 8$ 个未知数。因而, 在整个影像覆盖范围内利用 3 个分布合理的地面控制点可以进行有效的基线估计。并且当干涉像对数量增多时, 利用 3 个地面控制点仍然可以进行有效的基线估计。

假定需要进行基线估计的干涉像对数为 100, 且各数据间仅存在两度重叠, 控制点均不位于影像重叠范围内, 则需要解算的参数数量为 $n \times 3 = 100 \times 3 = 300$, 由控制点可列出的误差方程式数量为 $3 \times 1 = 3$, 由连接点列出的误差方程式数量为 $m \times 2 = 2m$, 由连接点引入的高程未知数数量为 m , 此时利用 3 个地面控制点和 297 个连接点就可以完成 100 个干涉像对的基线估计和干涉相位偏置解算, 有效减少了所需的地面控制点数量。

但是如果采用各像对单独基线估计方法, 如图 2 所示, 对于两套干涉数据, 则要求每套数据中都至少布设分布合理的 3 个地面控制点来进行基线估计和干涉相位偏置解算。假定影像重叠区域内存在 1 个地面控制点, 则总共需要至少 5 个地面控制点。干涉像对数越大, 所需的地面控制点数量就越大。当干涉像对数为 100 时, 假定各影

像重叠范围内均存在且只存在 1 个地面控制点, 则至少需要 $n \times 3 - (n - 1) \times 2 + (n - 1) = 201$ 个地面控制点。

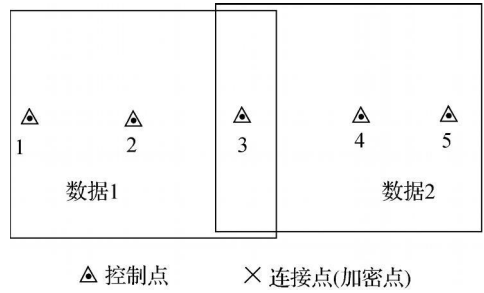


图 2 单独基线估计所需地面控制点

Fig. 2 Needed GCPs for baseline estimation with each data

综上所述, 采用区域网平差基线估计方法可以有效减少所需的地面控制点数量。

对于区域网平差基线估计和控制点加密, 可采取两种解算方案。

2.1 方案 A——整体解法

对于每一个像点(分别对应于控制点和连接点)可以根据式(5)列出一组误差方程式, 误差方程式中含有两类未知数 Δ 和 Δ_c 。其中, Δ 对应于所有干涉像对的基线参数和干涉相位偏置参数(每个像对有 3 个参数), Δ_c 对应于所有连接点的高程值。

相应的法方程式为

$$\begin{bmatrix} A^T A & A^T B \\ B^T A & B^T B \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \Delta \\ \Delta_c \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} A^T L \\ B^T L \end{bmatrix} \quad (9)$$

对于大区域而言, 当涉及的干涉像对数和连接点数很多时, 误差方程式的总数十分可观。在解算过程中可先消去一类未知数而只求另一类未知数。考虑到一般选取的连接点数较多, 其未知数 Δ_c 的个数远大于干涉参数 Δ 的个数, 因此消去 Δ_c 以后, 可得 Δ 的解为

$$\Delta = [A^T A - A^T B(B^T B)^{-1} B^T A]^{-1} \cdot [A^T L - A^T B(B^T B)^{-1} B^T L] \quad (10)$$

Δ_c 的解为

$$\Delta_c = [A^T B]^{-1} [A^T L - A^T A \Delta] \quad (11)$$

2.2 方案 B——两类未知数交替趋近法

首先把连接点处的高程近似值作为已知值, 求出每个干涉像对的基线参数和干涉相位偏置, 再利用这些参数的新值计算各连接点的高程值, 如此反复趋近, 直至各干涉像对中各参数改正值和连接点的高程改正值均小于某个限差时, 迭代

结束。

3 试 验

为了验证本文所提出的考虑干涉相位偏置参数的区域网平差 InSAR 基线估计方法的正确性和有效性, 采用中国科学院电子学研究所机载 InSAR 系统获取的多套干涉数据进行基线估计试验。在试验区内, 包含了平地 and 山区等典型的地形要素。试验所采用的 InSAR 系统的部分相关参数如表 1 所示。

表 1 InSAR 系统参数
Tab. 1 Parameters of InSAR

参数类型	参数值
波长/m	0.031 2
波段	X
方位向分辨率/m	1.1
距离向分辨率/m	1.25
绝对航高/m	6 190.0
多普勒中心频率/Hz	0
极化方式	HH

图 3~ 图 6 分别为试验区的 4 套 InSAR 数据强度图。其中, 图 3 和图 4 为航线 0001 中相邻两块数据的控制点分布情况; 图 5 和图 6 为航线 1001 中相邻两块数据的控制点分布情况。表 2 为根据 SAR 强度影像中的明显特征点利用差分 GPS 到实地测量的高程值。



图 3 0001_04 控制点分布

Fig. 3 GCPs' distribution of data 0001_04



图 4 0001_03 控制点分布

Fig. 4 GCPs' distribution of data 0001_03

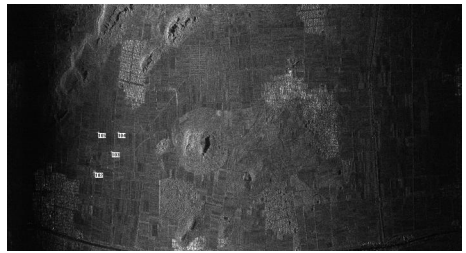


图 5 1001_04 控制点分布

Fig. 5 GCPs' distribution of data 1001_04



图 6 1001_03 控制点分布

Fig. 6 GCPs' distribution of data 1001_03

表 2 高程控制点

Tab. 2 Height control points

数据块编号	高程点编号	高程值/m
0001_04	95	61.810
	96	62.734
	97	61.969
	98	64.577
	99	64.033
0001_03	105	57.607
	44	54.516
	45	54.028
	59	52.599
	60	55.188
1001_04	61	52.854
	65	52.299
	68	54.005
	75	53.249
	103	56.297
1001_03	104	55.088
	105	57.607
	102	58.227
1001_03	91	51.902
	68	54.005

图 7~ 图 10 为各套干涉数据中选取的连接点分布情况。表 3 为采用各套数据单独基线估计方法对干涉相位偏置、基线长度和基线水平角进行估计的结果; 表 4 为采用区域网平差基线估计方法对相应各参数进行估计的结果。



图 7 0001_04 连接点分布

Fig. 7 Tie points' distribution of data 0001_04



图 8 0001_03 连接点分布

Fig. 8 Tie points' distribution of data 0001_03



图 9 1001_04 连接点分布

Fig. 9 Tie points' distribution of data 1001_04



图 10 1001_03 连接点分布

Fig. 10 Tie points' distribution of data 1001_03

从试验结果可以看出: 对于干涉数据 1001_03, 由于覆盖范围内只有两个地面控制点, 当采用各像对单独基线估计方法时, 由于控制点数量不足, 难以进行精确有效地基线估计和干涉相位偏置参数解算; 而采用区域网平差基线估计方法, 则可根据与其他数据区域的连接点条件, 进行精确有效的基线估计和干涉相位偏置参数解算, 进而有效地进行高程信息反演, 这已经充分验证了区域网平差基线估计方法的优势。

表 3 各像对单独基线估计和相位偏置解算结果

Tab. 3 Estimated parameters with each data

数据	基线长度 /m	基线角 /rad	相位偏置 /rad	垂直基线 /m
0001_04	0.576 1	0.309 3	53.141 7	0.512 0
0001_03	0.536 8	0.477 1	14.115 1	0.511 5
1001_04	0.609 9	0.214 1	78.667 9	0.513 0
1001_03	—	—	—	—

注: “—”表示无法完成

表 4 区域网平差基线估计结果

Tab. 4 Estimated parameters with block adjustment

数据	基线长度 /m	基线角 /rad	相位偏置 /rad	垂直基线 /m
0001_04	0.565 4	0.344 7	48.550 6	0.511 4
0001_03	0.545 7	0.435 5	18.958 9	0.512 6
1001_04	0.583 4	0.282 8	68.977 4	0.511 3
1001_03	0.562 8	0.344 2	54.575 2	0.508 9

表 5 是采用不同基线估计方法获取的基线参数反演的高程值与实测的控制点高程值的差异情况。从表 5 中可以看出, 两种基线估计方法均能高精度地进行高程信息反演, 但对于各干涉像对单独基线估计方法要求每套干涉数据中均存在足量分布合理的控制点。

表 5 高程差异情况

Tab. 5 Difference of heights

数据块 编号	控制点名	反演高程值与实测高程值之差/m	
		单独基线 估计	区域网平差 基线估计
0001_04	95	-2.913	-1.596
	96	0.896	2.212
	97	4.592	5.902
	98	-1.680	-0.388
	99	-0.015	0.646
	105	0.240	-3.687
0001_03	44	-1.600	0.322
	45	-3.555	-3.294
	59	5.741	4.034
	60	-4.087	-5.812
	61	-2.719	-0.432
	65	13.508	17.741
	68	-1.101	3.124
	75	-4.630	3.078
1001_04	103	1.881	3.937
	104	-0.724	1.859
	105	-2.550	-1.943
1001_03	102	2.077	2.414
	91	—	-0.967
	68	—	4.823

注: “—”表示无法计算

为了进一步说明两种基线估计方法的差异, 表 6 分别列出了采用为单独基线估计和区域网平差基线估计后的基线参数反演的连接点处高程值的差异情况。

表 6 采用不同基线估计方法反演的连接点处高程差异

Tab. 6 Height difference on tie points with different baseline estimation methods

连接点名	不同像对连接点处反演高程之差		m
	不同像对连接点处反演高程之差		
	单独基线估计	区域网平差基线估计	
14	13.654	3.641	
15	26.009	14.786	
23	9.403	1.128	
24	13.198	4.368	
25	8.164	-0.799	
33	-7.284	-5.682	
34	-2.494	-2.410	
35	-3.108	3.121	
36	-5.849	-9.904	
37	5.279	3.626	
38	12.311	-10.100	
标准偏差	10.190	7.167	
平均值	6.298	0.161	

考虑到对于数据 1001_03, 由于控制点数量不足, 采用单独基线估计方法无法进行基线估计, 表 6 中仅统计了数据 1001_04 与数据 0001_03、0001_04 之间连接点处的高差情况。图 11 和图 12 分别表示单独基线估计和区域网平差基线估计后上述连接点处高差分布情况。从表 6 和图 11、图 12 可以看出, 采用区域网平差基线估计方法, 反演的连接点处高程之差的均值接近于 0。这说明该方法可以有效降低不同数据接边处反演高程的差异。但从得到的标准偏差情况来看, 采用区域网平差基线估计方法, 虽然可以在一定程度上降低不同数据反演高程之差的标准偏差, 但其标准偏差仍较大, 这说明得到的高差分布比较离散。分析其原因, 主要是所采用的干涉数据在不同数据接边处信噪比较低(通过图 4~ 图 6 所示的强度图像也能反映这一点, 图像两侧色调较暗), 干涉相位中噪声影响较大。在后续研究中, 将进一步考虑连接点选取对基线估计性能的影响, 特别是要避免选取低相干性的点作为控制点和连接点, 并且要注意尽量使所选取的连接点分布均匀。

为了说明区域网平差方法对非接边区域的影响, 表 7 给出了采用不同方法进行基线参数估计后反演高程值与实测控制点高程值的差异情况。

从表 7 中可以看出, 两种基线估计方法均能高精度地进行高程信息反演。但对于单独基线估计方法要求每套干涉数据中均存在足量分布合理的控制点, 对于区域网平差基线估计方法, 由于考虑了各套数据之间的误差配赋问题, 个别控制点上反演的高程误差略微增大。

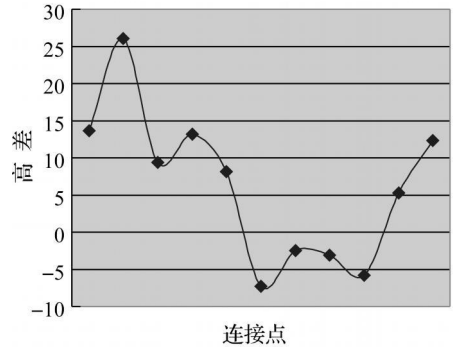


图 11 单独基线估计后连接点处的高差分布

Fig. 11 Distribution of heights' difference on tie points with estimated parameters by single data

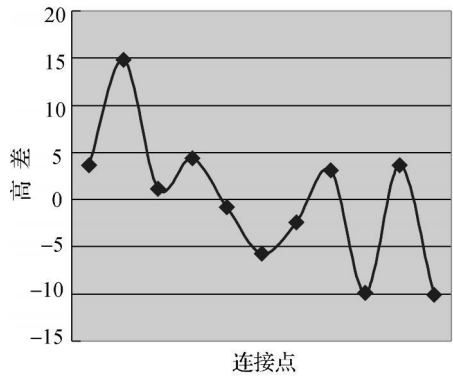


图 12 区域网平差基线估计后连接点处的高差分布

Fig. 12 Distribution of heights' difference on tie points with estimated parameters by joint adjustment

表 7 不同方法的反演高程与实测高程之差

Tab. 7 Difference between derived heights and measured heights with different methods

数据块编号	控制点名	反演高程值与实测高程值之差		m
		反演高程值与实测高程值之差		
		单独定标	区域网平差定标	
0001_04	95	-2.913	-1.596	
	96	0.896	2.212	
	97	4.592	5.902	
	98	-1.680	-0.388	
	99	-0.015	0.646	
	105	0.240	-3.687	

续表 7

m

数据块 编号	控制点名	反演高程值与实测 高程值之差/m	
		单独定标	区域网平差 定标
0001_03	44	- 1.600	0.322
	45	- 3.555	- 3.294
	59	5.741	4.034
	60	- 4.087	- 5.812
	61	- 2.719	- 0.432
	65	13.508	17.741
	68	- 1.101	3.124
	75	- 4.630	3.078
1001_04	103	1.881	3.937
	104	- 0.724	1.859
	105	- 2.550	- 1.943
	102	2.077	2.414
1001_03	91	—	- 0.967
	68	—	4.823

注：“—”表示无法计算。

4 总 结

基线估计在 InSAR 系统的实用化测绘应用中具有重要意义。基线估计误差将降低反演高程的精度。为了有效地将 InSAR 系统用于大面积地形测绘中,本文借鉴光学摄影测量中已成熟运用的区域网平差思想,提出并设计了考虑干涉相位偏置参数解算的 InSAR 区域网平差基线估计方案,以有效减少对地面控制点数量的需求,并降低不同数据接边处反演高程的差异。

采用中国科学院电子学研究所机载 InSAR 系统获取的多套干涉数据进行了区域网平差基线估计试验,在少量地面控制的条件下,充分利用重叠区域的连接点条件,对各干涉像对进行了区域网平差基线估计,取得了满意的基线估计结果,明显减小了接边处反演高程的差异,验证了本文所提基线估计方案的正确性和有效性。

本文仅考虑了利用高程控制点和连接点进行区域网平差基线参数估计和干涉相位偏置参数解算。为了进一步提高干涉基线估计的可靠性和精度,在后续研究中,还需考虑将不同类型的控制点(包括平面控制点、高程控制点和平面高程控制点)及连接点引入平差方案并优化平差解算过程。

参考文献:

[1] GRAHAM L C. Synthetic Interferometer Radar for Topographic Mapping[J]. Proceedings of the IEEE, 1974, 62

(6): 763-768.

- [2] WANG Chao, ZHANG Hong, LIU Zhi. 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.)
- [3] JIN Guowang. Research on Key Processing Techniques for Accurate DEM Deriving from InSAR [D]. Zhengzhou: Information Engineering University, 2007. (靳国旺. InSAR获取高精度 DEM 关键处理技术研究[D]. 郑州: 信息工程大学, 2007.)
- [4] KOHLHASE A O, FEIGL K L, MASSONNET D. Applying Differential InSAR to Orbital Dynamics: A New Approach for Estimating ERS Trajectories[J]. Journal of Geodesy, 2003, 77: 493-502.
- [5] ZHOU Chunxia, E Dongchen, LIAO Mingsheng. Feasibility of InSAR Application to Antarctic Mapping[J]. Geomatics and Information Science of Wuhan University, 2004, 29(7): 619-623. (周春霞, 鄂栋臣, 廖明生. InSAR 用于南极测图的可行性研究[J]. 武汉大学学报: 信息科学版, 2004, 29(7): 619-623.)
- [6] JOUGHIN I R, WINEBRENNER D P, FAHNESTOCK M A. Observation of Ice sheet Motion in Greenland Using Satellite Radar Interferometry[J]. Geophysical Research Letters, 1995, 22(5): 571-574.
- [7] DALL J, GRINDER-PEDERSEN J, MADSEN S N. Calibration of a High Resolution Airborne 3D SAR[C] // Proceedings of 1997 IEEE International Geoscience and Remote Sensing: 2. Singapore: IEEE, 1997: 1018-1021.
- [8] MALLORQUI J J, BARA M, BROQUETAS A. Calibration Requirements for Airborne SAR Interferometry[C] // Proceedings of SPIE: 4173. Barcelona: SPIE, 2000: 267-278.
- [9] MALLORQUI J J, BARA M, BROQUETAS A. Sensitivity Equations and Calibration Requirements on Airborne Interferometry[C] // Proceedings of IEEE 2000 International Geoscience and Remote Sensing Symposium: 6. Honolulu: IEEE, 2000: 2739-2741.
- [10] SARABANDI K, BROWN C G, PIERCE L, et al. Calibration of the Shuttle Radar Topography Mission Using Point and Distributed Targets[C] // Proceedings of IEEE 2000 International Geoscience and Remote Sensing Symposium: 6. Honolulu: IEEE, 2000: 2718-2720.
- [11] CHAPIN E, HENSLEY S, MICHEL T R. Calibration of an Across Track Interferometric P-band SAR[C] // Proceedings of IEEE 2001 International Geoscience and Remote Sensing Symposium: 1. Sydney: IEEE, 2001: 502-504.
- [12] WANG Yanping, PENG Hailiang, YUN Risheng. Locating Calibrators in Airborne InSAR Calibration[J]. Journal of Electronics & Information Technology, 2004, 26(1): 89-94. (王彦平, 彭海良, 云日升. 机载干涉合成孔径雷达定

(下转第 627 页)

参考文献:

- [1] ZHU Changqing, FU Haojun, YANG Chengsong, et al. Watermarking Algorithm for Digital Grid Map Based on Integer Wavelet Transformation [J]. Geomatics and Information Science of Wuhan University, 2009, 34(5): 619-621. (朱长青, 符浩军, 杨成松, 等. 基于整数小波变换的栅格数字地图数字水印算法[J]. 武汉大学学报: 信息科学版, 2009, 34(5): 619-621.)
- [2] YANG Chengsong, ZHU Changqing, TAO Daxin. A Blind Watermarking Algorithm for Vector Geo-spatial Data Based on Coordinate Mapping [J]. Journal of Image and Graphics, 2010, 15(4): 684-688. (杨成松, 朱长青, 陶大欣. 基于坐标映射的矢量地理数据全盲水印算法[J]. 中国图象图形学报, 2010, 15(4): 684-688.)
- [3] WANG Zhiwei, ZHU Changqing, YIN Shuowen, et al. An Adaptive Watermarking Algorithm for DEM Based on DFT [J]. Journal of Image and Graphics, 2010, 15(5): 796-801. (王志伟, 朱长青, 殷硕文, 等. 一种基于 DFT 的 DEM 自适应数字水印算法[J]. 中国图象图形学报, 2010, 15(5): 796-801.)
- [4] MIN Lianquan. A Robust Digital Watermarking in Cartographic Data in Vector Format [J]. Acta Geodaetica et Cartographica Sinica. 2008, 37(2): 262-267. (闵连权. 一种鲁棒的矢量地图数据的数字水印[J]. 测绘学报, 2008, 37(2): 262-267.)
- [5] BARNIM, BARTOLINI F, CAPPELLINI V, et al. Near-lossless Digital Watermarking for Copyright Protection of Remote Sensing Images[C] // Proceedings of IEEE International Geoscience and Remote Sensing Symposium, IGARSS' 02. Toronto: IEEE, 2002: 1447-1449.
- [6] ZIEGELER H, TAMHANKAR H, FOWLER J, et al. Wavelet-based Watermarking of Remotely Sensed Imagery Tailored to Classification Performance[C] // Proceedings of IEEE Workshop on Advances in Techniques for Analysis of Remotely Sensed Data. Washington D C: Goddard Space Flight Center, 2003.
- [7] WANG Xiangyang, YANG Hongying, WU Jun. Content-based Adaptive Discrete Cosine Transform Domain Watermarking Algorithm for Remote Sensing Image [J]. Acta Geodaetica et Cartographica Sinica, 2005, 4(4): 324-330. (王向阳, 杨红颖, 邬俊. 基于内容的离散余弦变换域自适应遥感图像数字水印算法[J]. 测绘学报, 2005, 4(4): 324-330.)
- [8] KBAIER I, BELHADJ Z. A Novel Content Preserving Watermarking Scheme for Multispectral Images[J]. Information and Communication Technologies, 2006, 16(2): 243-247.
- [9] GENG Xun, GONG Zhihui, ZHANG Chunmei. A Watermarking Algorithm for Remote Sensing Image Based on HVS and Integer Wavelet Transform [J]. Bulletin of Surveying and Mapping, 2007(8): 20-22. (耿迅, 龚志辉, 张春美. 基于 HVS 和整数小波变换的遥感图像水印算法[J]. 测绘通报, 2007(8): 20-22.)

(责任编辑:雷秀丽)

收稿日期: 2010-09-03

修回日期: 2010-12-08

第一作者简介: 任娜(1981—), 女, 博士生, 主要从事数据安全研究。

First author: REN Na (1981—), female, PhD candidate, major in data security.

通讯作者: 朱长青

Corresponding author: ZHU Changqing

E-mail: zcq88@263.net

(上接第 622 页)

标中的定标器布放[J], 电子与信息学报, 2004, 26(1): 89-94.)

- [13] ROTH A, KNOPFLE W, RABUS B, et al. GeMoS: A System for the Geocoding and Mosaicking of Interferometric Digital Elevation Models[C] // Proceedings of IEEE 1999 International Geoscience and Remote Sensing Symposium: 2. Hamburg: IEEE, 1999: 1124-1127.

- [14] MORA O, PEREZ F, PALA V, et al. Development of a Multiple Adjustment Processor for Generation of DEMs Over Large Areas Using SAR Data [C] // 2003 IEEE International Geoscience and Remote Sensing Symposium: 4. Toulouse: IEEE, 2003: 2326-2328.

- [15] JIN Guowang, ZHANG Wei, XIANG Maosheng, et al. A New Calibration Algorithm of Interferometric Parameters for Dual-antenna Airborne InSAR[J]. Acta Geodaetica et Cartographica Sinica, 2010, 39(1): 76-81. (靳国旺, 张薇, 向茂生, 等. 一种机载双天线 InSAR 干涉参数定标

新方法[J]. 测绘学报, 2010, 39(1): 76-81.)

- [16] JIN Guowang, XU Qing, ZHU Caiying, et al. Initial Baseline Estimation of InSAR Based on the Phases of Flat Earth[J]. Journal of Zhengzhou Institute of Surveying and Mapping, 2006, 23(4): 278-283. (靳国旺, 徐青, 朱彩英, 等. 利用平地干涉相位进行 InSAR 初始基线估计[J]. 测绘科学技术学报, 2006, 23(4): 278-283.)

(责任编辑:丛树平)

收稿日期: 2010-09-19

修回日期: 2011-02-22

第一作者简介: 靳国旺(1977—), 男, 博士, 副教授, 研究方向为摄影测量与遥感、合成孔径雷达干涉测量技术。

First author: JIN Guowang(1977—), male, PhD, associate professor, majors in photogrammetry and remote sensing, InSAR techniques.

E-mail: jgw77@sohu.com