

DOI:10.13203/j.whugis.20141013



文章编号:1671-8860(2017)02-0157-06

利用三维重建模型的机载 InSAR 区域网平差方法

陈乾福^{1,2} 黄国满² 杨书成² 花奋奋² 卢丽君²

1 国家测绘地理信息局卫星测绘应用中心,北京,100830

2 中国测绘科学研究院,北京,100830

摘要:在机载合成孔径雷达干涉测量(synthetic aperture radar interferometry, InSAR)中,为了获取高精度的数字高程模型(digital elevation model, DEM),研究了机载 InSAR 视向量正交分解法及三维重建数学模型,分析了中国的机载 CASMSAR(synthetic aperture radar system of Chinese Academy of Surveying and Mapping)干涉系统误差来源及观测参数,建立了机载 InSAR 区域网平差模型。利用国产机载 CASMSAR 系统获取的 X 波段干涉数据进行试验,利用高精度的控制点数据进行平差解算,结果表明本文方法能够消除干涉模型间平面和高程差异,DEM 成果满足 1:1 万山地测图精度要求,验证了该模型的正确性和有效性。

关键词:机载 InSAR;干涉参数定标;三维重建模型;视向量正交分解;敏感度方程;区域网平差

中图分类号:P237; P225 **文献标志码:**A

机载双天线合成孔径雷达干涉测量(synthetic aperture radar interferometry, InSAR)系统具有机动灵活、按需成像的特点,在地形测图中被广泛应用^[1,2]。在利用 InSAR 提取数字高程模型(digital elevation model, DEM)时,干涉系统参数误差通过相高转换、地理编码同时影响平面和高程,误差最终传递到 DEM 上。这些误差主要包括天线位置、速度矢量、基线矢量、斜距(绝对时间延迟)、干涉相位和多普勒频率等。

为了提高 DEM 精度,需利用地面控制点(ground control point, GCP)对这些参数进行平差改正。国内外学者提出了多种干涉参数改正方法,多采用平面电磁波模型,在研究过程中更偏重于理论研究,与实际应用情况有较大差距^[3-5]。对多个单模型影像独立进行平差解算时,由于模型求解精度的不同,使得重叠区域内的点在平面和高程上差异较大;此外,单个模型的平差解算需要一定数量的控制点,在进行大面积测图应用时,不得不面临获取大量控制点的问题^[6-9]。本文提出了机载 InSAR 区域网平差处理方法,该方法能减少控制点需求量、消除模型间平面和高程差异^[9-12],并获取高精度的 DEM 数据。

中国的机载 CASMSAR(synthetic aperture

radar system of Chinese Academy of Surveying and Mapping)系统,基线物理长度约 2.2 m,在数据获取时间间隔较小的情况下,视为刚性基线,基线物理长度改正量应相同,本文在 InSAR 区域网平差模型参数设置中,各模型基线长度参量取统一值。由于飞行姿态不一致、雷达产生的随机误差不完全相同,不同的单元模型对应的其它系统参数不同且相互独立。根据敏感度方程^[9],利用连接点和少量控制点进行 InSAR 区域网平差处理,求得稳定可靠的干涉系统参数和连接点坐标,实现机载 SAR 数据高精度测图。

1 InSAR 三维重建模型与区域网平差解算

1.1 地形三维重建模型

利用 InSAR 进行地形测绘时,通过距离方程、多普勒方程和干涉相位方程描述 InSAR 基本测量值与地面目标位置之间的关系,获取地面目标点的三维坐标,称为地形三维重建^[5]。表示为:

$$\begin{cases} r_{A_1} = |A_1 - P| \\ f_{\text{dop}} = \frac{2v \cdot (A_1 - P)}{\lambda \cdot r_{A_1}} \\ \varphi = \phi + 2k\pi = \frac{2\pi Q(r_{A_1} - r_{A_2})}{\lambda} \end{cases} \quad (1)$$

收稿日期:2015-12-14

项目资助:测绘地理信息公益性行业科研专项经费(201512022);国家高技术研究发展计划(863 计划)(2011AA120402);国家基础测绘科技计划(2016KJ0204)。

第一作者:陈乾福,硕士,助理工程师,主要从事合成孔径雷达干涉测量研究。chenqianfu-114@163.com

$$\frac{\partial \mathbf{F}_{G(1,j)}}{\partial b_l} = \begin{bmatrix} \frac{\partial \mathbf{F}_{xG(1,j)}}{\partial b_l} \\ \frac{\partial \mathbf{F}_{yG(1,j)}}{\partial b_l} \\ \frac{\partial \mathbf{F}_{zG(1,j)}}{\partial b_l} \end{bmatrix}; \mathbf{B} = \begin{bmatrix} \mathbf{B}_{G(1,j)} & 0 & 0 & 0 & \dots \\ 0 & \mathbf{B}_{G(1,j+1)} & 0 & 0 & \dots \\ \mathbf{B}_{Tie(1,k)} & 0 & 0 & 0 & \dots \\ 0 & \mathbf{B}_{Tie(1,k+1)} & 0 & 0 & \dots \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \dots \\ 0 & 0 & \mathbf{B}_{Tie(2,k)} & 0 & \dots \\ \mathbf{B}_{G(2,j)} & 0 & 0 & 0 & \dots \\ 0 & 0 & 0 & \mathbf{B}_{Tie(2,k+1)} & \dots \\ 0 & \mathbf{B}_{G(1,j+1)} & 0 & 0 & \dots \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \ddots \end{bmatrix}; \begin{cases} \mathbf{B}_{G(i,j)} = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} \\ \mathbf{B}_{Tie(i,k)} = \begin{bmatrix} -1 & 0 & 0 \\ 0 & -1 & 0 \\ 0 & 0 & -1 \end{bmatrix} \end{cases}$$

$$\mathbf{L} = [l_{x,G(i,j)} \quad l_{y,G(i,j)} \quad l_{z,G(i,j)} \quad \dots \quad l_{x,Tie(i,k)} \quad l_{y,Tie(i,k)} \quad l_{z,Tie(i,k)} \quad \dots]^T;$$

$$\Delta \mathbf{x}_1 = [\Delta b_l \quad \Delta b_{a,1} \quad \Delta r_{0,1} \quad \Delta \varphi_1 \quad \Delta \mathbf{F}_{dop,1} \quad \Delta b_{a,2} \quad \Delta r_{0,2} \quad \Delta \varphi_2 \quad \Delta \mathbf{F}_{dop,2} \quad \dots]^T;$$

$$\Delta \mathbf{x}_2 = [\Delta P_{x,k} \quad \Delta P_{y,k} \quad \Delta P_{z,k} \quad \Delta P_{x,k+1} \quad \Delta P_{y,k+1} \quad \Delta P_{z,k+1} \quad \dots]^T.$$

本文的区域网平差采用迭代计算、逐渐趋近方法^[14],根据最小二乘原理进行区域网平差计算。

2 实验与分析

选取四川省北部若尔盖地区机载 InSAR 数据,进行区域网平差试验。该区地处青藏高原东部边缘地带,高度 2 900~4 200 m,高差 1 000 m 以上,属于山地地形。飞机飞行方向为由东向西、由西向东两个方向,按照飞行方向、航带号对干涉数据进行编号,试验使用 6 个航带号,分别为 DX_65、DX_66、DX_67、XD_65、XD_66、XD_67,每个航带内选取 3 个单元模型,编号为 50、51 和 52,总计 18 对干涉数据,覆盖面积近 90 km²,如图 1 所示。

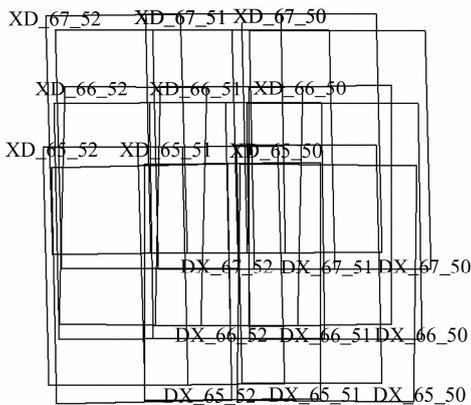


图 1 机载 InSAR 区域网平差影像范围

Fig. 1 Image Region of Airborne InSAR Block Adjustment

试验区范围内控制点数量为 7 个,检查点数量为 19 个。本文对比单模型平差方法和 InSAR

区域网平差方法,从以下三个方面进行评价。

2.1 平差模型精度分析

利用 InSAR 区域网平差模型改正的干涉系统参数,通过三维重建模型解算控制点的地理坐标,并和控制点已知地理坐标进行比较,统计其中误差,作为评价区域网平差模型是否有效的标准。

试验中,InSAR 区域网平差模型使用了 7 个控制点,两种方法所用控制点残差对比结果(为表述简便,均取绝对值参与统计)见表 1。

表 1 区域网平差模型和单模型平差所用控制点残差统计

Tab. 1 Statistic of Error Using GCPs by This Paper and Single Model

控制点残差	统计项	本文区域网平差	单模型平差
X 方向/m	最大残差	1.63	4.21
	最小残差	0.373	0.65
	中误差	0.97	2.04
Y 方向/m	最大残差	1.33	3.89
	最小残差	0.07	0.54
	中误差	0.74	1.78
Z 方向/m	最大残差	2.91	4.62
	最小残差	0.29	0.68
	中误差	1.54	2.93

(1) 采用单模型平差解算,每个单模型至少需要 3 个控制点,18 个模型则至少需要 54 个控制点,实际使用了 67 个控制点,而 InSAR 区域网平差模型使用了 7 个控制点,有效减少了控制点需求,降低了外业测量成本。

(2) 表 1 中,本文 InSAR 区域网平差模型解算后,控制点 X 方向的中误差为 0.97 m,Y 方向的中误差为 0.74 m,Z 方向的中误差为 1.54 m,单模型平差解算后,控制点 X、Y 和 Z 三个方向上的残差或中误差较本文区域网平差模型中控制点

的残差或中误差明显增大,说明在稀少控制条件下,InSAR 区域网平差模型具有明显的优势。区域网平差处理增强了各模型间重叠区域控制点的约束关系,降低了系统噪声和敏感度矩阵病态性的影响,其模型稳健性更强。单模型平差处理无法有效避免这些问题,得到的结果可信度较低。

2.2 干涉系统参数分析

稳定的基线长度、精确的基线倾角、准确的干涉相位、多普勒中心频率和绝对时间延迟等参数是获取高精度 DEM 的关键因素,分析干涉系统参数的变化规律有利于 InSAR 区域网平差模型的改进。InSAR 区域网平差方法得到的干涉系

统参数处理结果见表 2,以其中 2 个航带(由东向西方向的 DX_66 和 DX_67)的 6 个单元模型为例,分析两种方法得到的干涉系统参数。

(1) 机载 CASMSAR 系统,基线物理长度约 2.2 m,在时间间隔较小的情况下,视为刚性基线,其基线物理长度改正量应相同。InSAR 区域网平差方法得到的基线长度参量为 2.192 1 m,而利用单模型平差方法得到的基线长度最大为 2.224 0 m,最小为 2.155 6 m,互差达到 0.068 4 m,与实际测量值比较,本文的区域网平差方法得到的基线长度值接近实测值,更符合物理情况,如表 2 所示。

表 2 两种方法得到的干涉系统参数对比

Tab. 2 Interferometric Calibration Parameters Comparison by This Paper and Single Model

航带号	统计项	干涉对编号						实际测量值
		50		51		52		
		区域网平差	单模型平差	区域网平差	单模型平差	区域网平差	单模型平差	
DX_66	基线长度/m	2.192 1	2.171 9	2.192 1	2.173 6	2.192 1	2.155 6	2.189 5
	基线倾角/(°)	0.342 5	0.748 8	0.481 7	0.811 6	0.540 2	1.251 3	-
	初始斜距改正数/m	1.268 7	0.685 3	-0.172 7	0.470 0	-0.371 9	0.603 6	-
	相位改正数/rad	-6.465 4	-11.545 7	5.714 9	1.250 5	-0.941 3	-10.033 0	-
	多普勒改正数/Hz	-0.644 9	-1.174 5	-0.857 6	-0.601 2	-1.278 5	-1.111 5	-
DX_67	基线长度/m	2.192 1	2.159 9	2.192 1	2.224 0	2.192 1	2.195 5	2.189 5
	基线倾角/(°)	0.519 2	1.208 9	0.488 6	-0.103 9	0.560 7	0.489 0	-
	初始斜距改正数/m	1.067 7	0.977 7	0.368 4	0.933 6	0.693 8	0.923 2	-
	相位改正数/rad	-1.633 9	-9.920 2	-1.445 4	6.410 6	4.619 8	5.491 6	-
	多普勒改正数/Hz	-0.062 8	-0.337 7	-0.623 3	-0.415 7	-0.678 6	-0.420 0	-

(2)单模型平差求解的干涉系统参数,受系统噪声、敏感度矩阵病态性以及控制点精度的影响,其结果只适用于控制点周边区域,无法满足整个测绘带的要求,会导致重叠区域平面和高程信息不一致,引起更大的测量误差。

2.3 DEM 精度分析

利用区域范围内 19 个检查点,分别统计本文方法和单模型方法获取的 DEM 高程误差,统计结果如表 3 所示,本文方法计算得到的 DEM 成果如图 2 所示。

从表 3 可以发现:① 本文方法获取的 DEM 检查点高程中误差为 1.33m,而单模型方法得到的中误差为 3.02 m,试验结果表明本文方法能够有效减少模型间的高程差异,改善 DEM 精度;② 在InSAR 区域网平差模型参数设置中,对基线长度参量取统一值符合理论和实际情况;③ 由检查点精度可知,满足山地地区 1:1 万 DEM 定位精度要求。

表 3 DEM 检查点高程误差统计

Tab. 3 Statistics of Error Using Inspect Points

统计项	区域网平差方法/m	单模型平差/m
最大误差	2.31	4.54
最小误差	0.50	0.59
中误差	1.33	3.02

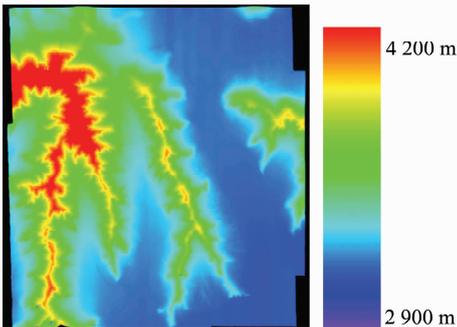


图 2 本文方法得到的 DEM 成果

Fig. 2 DEM in Geographic Coordinate System by This Paper

3 结 语

本文提出了一种利用三维重建模型进行视向量正交分解,随后建立机载 InSAR 区域网平差模型,对干涉系统参数进行模型优化。以四川地区机载 X 波段干涉数据进行试验,结果表明本文提

出的机载 InSAR 区域网平差方法是有效的,获取的 DEM 数据满足国家 1 : 1 万地形图测图精度要求。在后续的平差试验中,需要更大范围的数据验证本文提出方法的有效性和实用性。此外,在平差模型的构建中,没有考虑控制点本身的精度,需要剔除误差较大的控制点,进一步提高干涉 DEM 的精度。

参 考 文 献

- [1] Huang Guoman, Zhang Jixian, Zhao Zheng. Research on Airborne SAR Interferometry Mapping System [J]. *Acta Geodaetica et Cartographica Sinica*, 2008, 37(3):277-279(黄国满,张继贤,赵争.机载干涉 SAR 测绘制图应用系统研究[J].测绘学报,2008,37(3):277-279)
- [2] Liu Guoxiang, Ding Xiaoli, Li Zhilin, et al. Experimental Investigation on DEM Generation Through InSAR[J]. *Acta Geodaetica et Cartographica Sinica*, 2001,30(4):336-342(刘国祥,丁晓利,李志林,等.使用 InSAR 建立 DEM 的试验研究[J].测绘学报,2001,30(4):336-342)
- [3] Mallorqui J J, Bara M, Broquetas A. Calibration Requirements for Airborne SAR Interferometry [C]. SPIE on SAR Image Analysis, Modeling, and Techniques III, Barcelona, Spain, 2000
- [4] Dall J. Calibration of Airborne Signal-pass Interferometry Data[C]. Proceedings of 2002 EUSAR, Cologne, Germany, 2002
- [5] Wang Yanping. Studies on Calibration Model and Algorithm for Airborne Interferometric SAR[D]. Beijing: Institute of Electronics, Chinese Academy of Sciences, 2004(王彦平.机载干涉 SAR 定标模型与算法研究[D].北京:中国科学院电子学研究所,2004)
- [6] Ma Jing, You Hongjian, Hu Donghui. A New Method of Block Adjustment of Airborne SAR Image with Few GCPs[J]. *Geomatics and Information Science of Wuhan University*, 2012, 37(4):410-414(马婧,尤红建,胡东辉.机载干涉雷达数据联合定位及拼接技术研究[J].武汉大学学报·信息科学版,2012,37(4):410-414)
- [7] Yun Ye, Zeng Qiming, Jiao Jian, et al. Calibration of Airborne Interferometric SAR Data Based on Reference DEM[J]. *Acta Geodaetica et Cartographica Sinica*, 2014,43(1):74-82(云烨,曾琪明,焦健,等.基于参考 DEM 的机载 InSAR 定标方法[J].测绘学报,2014,43(1):74-82)
- [8] Chen Gang, Tang Xiaotao, Qian Fangming. A Three-dimensional Baseline Calibration Method of Spaceborne InSAR [J]. *Geomatics and Information Science of Wuhan University*, 2014, 39(1):37-41(陈刚,汤晓涛,钱方明.星载 InSAR 立体基线定标方法[J].武汉大学学报·信息科学版,2014,39(1):37-41)
- [9] Wang Mengmeng, Huang Guoman, Hua Fenfen, et al. Joint Calibration Method of Airborne Dual-antenna Interferometric SAR [J]. *Acta Geodaetica et Cartographica Sinica*, 2014,43(12):1 259-1 265(王萌萌,黄国满,花奋奋,等.机载双天线 InSAR 联合定标算法[J].测绘学报,2014,43(12):1 259-1 265)
- [10] Huang Guoman, Yang Shucheng, Wang Ningna, et al. Block Combined Geocoding of Airborne InSAR with Sparse GCPs [J]. *Acta Geodaetica et Cartographica Sinica*, 2013,42(3):397-403(黄国满,杨书成,王宁娜,等.稀少控制下机载 InSAR 区域网联合地理编码方法[J].测绘学报,2013,42(3):397-403)
- [11] Huang Guoman, Yue Xijuan, Zhao Zheng, et al. Block Adjustment with Airborne SAR Images Based on Polynomial Ortho-rectification [J]. *Geomatics and Information Science of Wuhan University*, 2008, 33(6):569-572(黄国满,岳昔娟,赵争,等.基于多项式正射纠正模型的机载 SAR 影像区域网平差[J].武汉大学学报·信息科学版,2008,33(6):569-572)
- [12] Yue Xijuan, Han Chunming, Dou Changyong, et al. Mathematical Model of Airborne InSAR Block Adjustment [J]. *Geomatics and Information Science of Wuhan University*, 2015, 40(1):59-63(岳昔娟,韩春明,窦长勇,等.机载 InSAR 区域网平差数学模型研究[J].武汉大学学报·信息科学版,2015,40(1):59-63)
- [13] Madsen S N, Skou N, Woelders K, et al. EMISAR Single Pass Topographic SAR Interferometer Modes [C]. Proceedings of 1996 IGARSS, Lincoln, USA, 1996
- [14] Error Theory and Foundation of Surveying Adjustment[M]. Wuhan: Wuhan University Press, 2003(误差理论与测量平差基础[M].武汉:武汉大学出版社,2003)

A Method for Block Adjustment with Airborne InSAR by Aid of Three Dimensional Reconstruction Model

CHEN Qianfu^{1,2} HUANG Guoman² YANG Shucheng² HUA Fenfen² LU Lijun²

¹ Satellite Surveying and Mapping Application Center, NASG, Beijing 100830, China

² Chinese Academy of Surveying and Mapping, Beijing 100830, China

Abstract: In order to improve the accuracy of DEM (digital elevation model) acquired by airborne InSAR (synthetic aperture radar interferometry), we researched the orthogonal decomposition of visual vector model and three dimensional reconstruction model for airborne InSAR. Error sources and adjustment parameters of domestic airborne InSAR system of CASMSAR (synthetic aperture radar system of Chinese Academy of Surveying and Mapping) were analyzed. A block adjustment method was proposed for airborne InSAR which could be used to derive DEM. An Experiment was carried out with X-band interferometric data acquired by CASMSAR. And we used ground control points to correct this error model. The results show that the proposed algorithm could be used to eliminate the differences in plane and height among multi-strip in the overlapping area. Finally, the results met the requirements of topographic mapping at a scale of 1 : 10 000, and proved the correctness and effectiveness of the new algorithm with CASMSAR data.

Key words: airborne InSAR; interferometric parameters calibration; 3D reconstruction model; orthogonal decomposition of visual vector model; sensitivity equation; block adjustment

First author: CHEN Qianfu, master, specializes in synthetic aperture radar interferometry. E-mail: chenqianfu-114@163.com

Foundation support: The Mapping Geographic Information Public Service Industry Research Projects Funded Projects, No. 201512022; the National High-tech Research and Development Program of China (863 Program), No. 2011AA120402; the National Basic Surveying and Mapping Scientific Program of National Administration of Surveying, Mapping and Geoinformation, No. 2016KJ0204.