

星载 InSAR 立体基线定标方法

陈刚^{1,2,3} 汤晓涛^{2,3} 钱方明^{2,3}

1 信息工程大学地理空间信息学院,河南 郑州,450052

2 地理信息工程国家重点实验室,陕西 西安,710054

3 西安测绘研究所,陕西 西安,710054

摘要:在专用的星载 InSAR 系统中,基线矢量精度是影响地面高程精度的主要因素之一,对其进行定标能有效提高目定标位的精度。目前,基线定标方法多采用简化的二维平面模型,该模型忽略了顺轨基线分量,导致其定标精度不高。针对此模型存在的不足,提出了一种符合星载 InSAR 工作特点的立体基线模型,通过建立局部移动坐标系,简化定标参数,优化处理过程。仿真数据处理结果表明,该方法能完成高精度 InSAR 基线矢量定标,可为星载 InSAR 系统定标提供支撑。

关键词:干涉合成孔径雷达;基线估计;基线定标

中图法分类号:P228.41

文献标志码:A

对于星载 InSAR 而言,基线矢量是影响高程精度的主要因素之一。如在轨道高度为 500 km,基线长度为 1 000 m,倾角为 48° ,雷达视角为 30° 条件下,当基线长度和倾角误差分别为 5 cm 和 $6''$ 时,会带来 1.8 m 和 13 m 的高程误差。因此,进行基线定标是数据处理的重要环节之一,已成为 InSAR 研究的热点^[1-10]。

从已有研究结果看,要想进行高精度的基线定标,必须利用地面控制信息^[1],包括地面控制点和 DEM 数据。Small^[2]以影像中心切平面为参考平面建立了 TCN 坐标系,给出了五种基线定标模型和相应的结果,利用定标后的基线计算地面高程,高程均方差最高可达 8.2 m。Kimura^[3]对同一地区的三幅 SAR 影像进行了干涉处理,形成两两相干的三条基线,利用基线之间的三角形关系和地面控制点高程来定标基线参数和平台高度;定标后,干涉相位均方差由 $2\ 136.0^\circ$ 提高到 19.1° 。Knedlik^[4]以建立的 TCN 坐标系为依据构建基线模型,通过海平面数据的参考高度(潮汐模型),利用扩展的卡尔曼滤波算法对 SRTM 基线进行了定标;利用定标后的基线计算 DEM 数据,20 s 时间内,高程偏差优于 0.2 m。类似的研究还包括 Zink^[5]、Guarnieri^[6]、Guarnieri^[7] 等。刘国祥^[8]建立了基于 TCN 坐标系的星载 InSAR 基

线定标模型,利用模拟数据进行定标实验,分析了基线长度、地面控制点个数与覆盖范围、控制点精度等因素对基线定标精度的影响。类似的研究还包括陈刚^[1]、李品^[9]、郑浩^[10] 等。

尽管已经开展了大量的研究工作,但是现有的基线定标模型存在以下问题:①采用二维平面简化模型,只考虑了对切轨(across-track)、下轨(down-track)基线分量的定标,没有考虑顺轨(along-track)基线分量的定标,并且假设 InSAR 成像面过地心,而实际中这一条件很难成立。②模型假设控制点在 TCN 坐标系的 CN 平面内,实际上,在多普勒频率和速度有误差的情况下,控制点不总是在该平面内。对于星载重复轨道 InSAR 而言,顺轨基线较短,能够采用该模型,但由于假设不成立,会导致定标精度下降;对于编队 InSAR 系统而言,顺轨基线较长^[11],无法再采用该模型。而在专用的 InSAR 系统如 TanDEM-X 中,基线测量精度要求到 mm 级^[11],定标精度应该高于这个量级才能检校误差。定标模型如果不准确,无法达到高精度检校的目的。本文给出了 InSAR 严格定位模型,在此基础上通过建立局部移动坐标系,构建了局部坐标系下的立体基线定位模型,给出了基线定标方法。仿真数据处理验证了立体基线定标模型的正确性。

收稿日期:2013-08-21

项目来源:国家自然科学基金资助项目(41371439)。

第一作者:陈刚,副研究员。现主要从事分布式 SAR、InSAR 数据处理和干涉定标的研究。E-mail: splitter@sina.com

1 InSAR 严格定位模型

星载 InSAR 严格定位模型可以用以下三个方程描述:

$$(X_1 - X_t)^2 + (Y_1 - Y_t)^2 + (Z_1 - Z_t)^2 = R_1^2 \quad (1)$$

$$(X_2 - X_t)^2 + (Y_2 - Y_t)^2 + (Z_2 - Z_t)^2 = R_2^2 = \left(R_1 + \frac{\lambda\phi_i}{2\rho\pi}\right)^2 \quad (2)$$

$$(X_t - X_1) \cdot V_{X_1} + (Y_t - Y_1) \cdot V_{Y_1} + (Z_t - Z_1) \cdot V_{Z_1} = -(\lambda R_1 f_{d_1})/2 \quad (3)$$

式中, (X_1, Y_1, Z_1) 、 (X_2, Y_2, Z_2) 是成像时刻主/辅雷达天线相位中心坐标; (X_t, Y_t, Z_t) 是地面点坐标; $(V_{X_1}, V_{Y_1}, V_{Z_1})$ 是主雷达的速度; R_1 、 R_2 是主/辅雷达到地面点的距离; λ 是雷达波长; ϕ_i 是地面点的绝对干涉相位; f_{d_1} 是主雷达多普勒中心频率; ρ 为收发模式, $\rho=1$ 表示一发双收模式, $\rho=2$ 表示自发自收模式。

方程(1)表示以主雷达为中心的一个球面, 方程(2)表示以辅雷达为中心的一个球面, 方程(3)表示以主雷达速度为中心的一个锥面, 三个曲面相交有两个交点, 其中一个为有效解, 如图 1 所示。

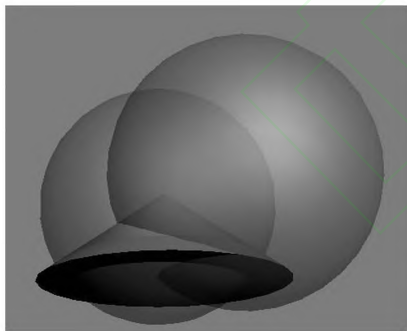


图 1 InSAR 定位模型示意图

Fig. 1 Sketch Map of InSAR Position Model

2 InSAR 立体基线定标模型

2.1 局部移动坐标系的建立

InSAR 基线定标是定位的逆过程, 即利用地面控制点反算主辅雷达坐标。从方程(1)~(3)可以看出, 如果利用地面控制点直接定标左右雷达天线坐标的位置, 方程中的 6 个参数都可变, 不存在一个定量, 无法求解出真值。从实际应用角度考虑, 只需知道主雷达位置、辅雷达相对于主雷达的偏移即可, 不需要同时确定主辅雷达天线的绝

对位置。为此, 需建立局部坐标系, 将求解参数变换到局部坐标系下。

局部坐标系定义为: 对每一方位向, 设主雷达在地心坐标系的位置为 $\vec{S} = (X_1, Y_1, Z_1)^T$, 速度为 $\vec{V} = (V_{X_1}, V_{Y_1}, V_{Z_1})^T$ 。定义 Y' 轴为 $\vec{V}/|\vec{V}|$, X' 轴为 $\vec{V} \times \vec{S}/|\vec{V} \times \vec{S}|$, Z' 轴为 $X' \times Y'$, 如图 2 所示。

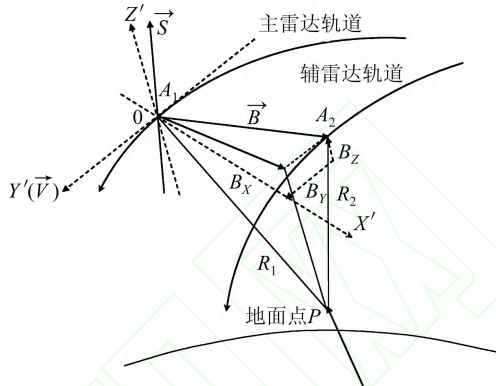


图 2 InSAR 基线矢量示意图

Fig. 2 Sketch Map of InSAR Baseline Vector

重新定义 Z' 轴的原因是因为星载 InSAR 一般采用椭圆轨道, \vec{V} 与 \vec{S} 一般不垂直, 无法直接构建三轴坐标系。

2.2 基线分量初值的获取

InSAR 基线矢量 \vec{B} 的定义为: 对同一目标进行观测时, 主辅雷达天线相位中心的连线可表示为 $\vec{B} = (X_2 - X_1, Y_2 - Y_1, Z_2 - Z_1)^T$ 。进行影像配准时, 确定了辅影像相对于主影像方位向的偏移关系, 一般可用 N 阶多项式描述:

$$\text{Azi}_{\text{Off}} = \sum_{i=0}^N \sum_{j=0}^i a_{i,j} x^{i-j} y^j \quad (4)$$

其中, y 、 x 分别是主影像的方位向和距离向坐标; a_i 是多项式系数; N 是多项式阶数。对于主影像上的每一点, 根据式(4)可计算辅影像对应方位向的偏移量。根据方位向坐标和雷达天线相位中心空间位置的对应关系, 可以求得主、辅雷达的空间位置, 进而求得基线矢量。

沿方位向建立完局部坐标系后, 基线矢量 \vec{B} 在局部坐标系下的三轴分量表示为:

$$(B_x, B_y, B_z)^T = (\vec{B} \cdot X', \vec{B} \cdot Y', \vec{B} \cdot Z')^T \quad (5)$$

从式(4)可以看出, 即使在同一方位向, 每一点对应的基线矢量也存在微小差别。从 InSAR 定位原理来说, 这种微小差别对目定标位精度的影响可以忽略不计, 因此对每一方位向可用统一的基线分量来描述。

2.3 局部移动坐标系下 InSAR 定标方程

在局部坐标系下, InSAR 定位模型如图 3 所示, 可用以下公式表示:

$$R_2^2 = R_1^2 + B^2 - 2R_1B\cos\beta = \left(R_1 + \frac{\lambda\phi_i}{2\rho\pi}\right)^2 \quad (6)$$

$$\cos\beta = \frac{\vec{S} \cdot \vec{P}}{|\vec{S}| |\vec{P}|} = \frac{B_X X_d + B_Y Y_d + B_Z Z_d}{R_1 B} \quad (7)$$

从图 3 可以看出,如果顺轨基线 $B_Y=0$,且多普勒中心频率为 0 时(此时 $Y_d=0$),此时的三维立体基线模型简化为经典的二维平面模型,也即二维平面模型是三维立体模型的特例。因此,直接使用二维平面模型来进行基线定标,其精度难以满足要求。

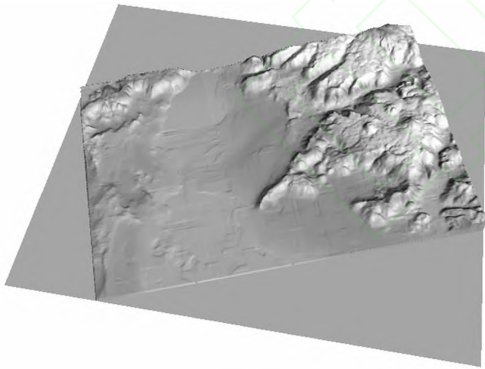
连立式(6)、式(7)可得:

$$R_1^2 + B_X^2 + B_Y^2 + B_Z^2 - 2(B_X X_d + B_Y Y_d + B_Z Z_d) - \left(R_1 + \frac{\lambda\phi_i}{2\rho\pi}\right)^2 = 0 \quad (8)$$

由于星载 InSAR 飞行姿态平稳,基线三个方向的分量变化可由多项式模拟,一般采用一阶,即 $B_X = B_{X_0} + B_{X_1} t$, $B_Y = B_{Y_0} + B_{Y_1} t$, $B_Z = B_{Z_0} + B_{Z_1} t$ 。现未知数有 B_{X_0} 、 B_{Y_0} 、 B_{Z_0} 、 B_{X_1} 、 B_{Y_1} 、 B_{Z_1} ,一个控制点只能列一个方程,场景中有 6 个控制点就可以解答参数,当控制点多于 6 个时,采用最小二乘方法求解。

3 实验与分析

考虑到目前我国尚无 InSAR 卫星,德国的



(a) 仿真所用的DEM数据

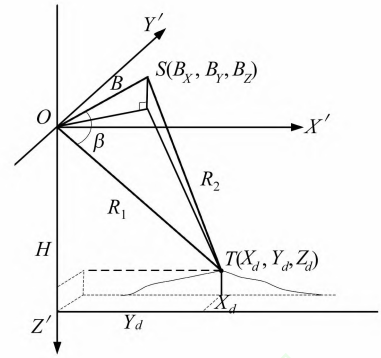
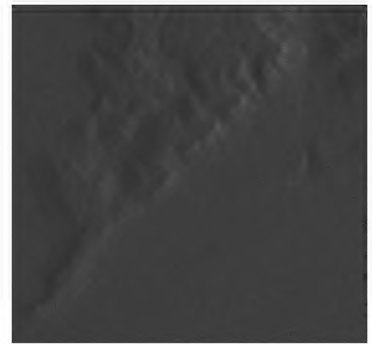


图 3 局部坐标系示意图

Fig. 3 Sketch Map of Local Coordinate System

TanDEM-X 系统数据又不公开发布,为了验证算法的正确性,本文利用国防科技大学信号级 InSAR 仿真数据进行定标实验。仿真系统对场景进行电磁建模,得到雷达回波数据。笔者利用回波数据进行 SAR 成像、InSAR 干涉处理和坐标量测三个步骤后,得到控制点数据,然后利用控制点数据进行基线定标实验。

相关的仿真参数如下: X 波段、轨道高度为 515 km,波束下视角为 34° ,基线长度约 580 m,采用自发自收工作模式,数据采样间隔为 $2.2 \text{ m} \times 1 \text{ m}$ (方位向 \times 距离向)。仿真所用的 DEM 数据和仿真后的强度影像如图 4(a)、4(b)所示。



(b) 仿真后的强度图像

图 4 仿真结果示意图

Fig. 4 Simulation Result

3.1 基线拟合误差分析

该项实验主要是分析拟合精度是否满足要求,为此,对基线三轴进行一次项拟合,拟合后逐点与拟合前的基线分量进行比较,统计中误差,结果如表 1 所示。可以看出,在星载情况下,基线三轴采用一次项拟合可满足精度要求,拟合误差在 10^{-5} m ,可以忽略不计。

3.2 控制点与检查点情况

仿真数据共提供了 40 个控制点,将其中的

表 1 基线拟合结果

Tab. 1 Baseline Fitting Results

分项	数值	拟合中误差/m
B_{X_0}/m	318.619 800 93	0.000 010 650
$B_{X_1}/(\text{m} \cdot \text{s}^{-1})$	0.267 071 30	
B_{Y_0}/m	-305.651 528 81	0.000 008 703
$B_{Y_1}/(\text{m} \cdot \text{s}^{-1})$	0.427 109 96	
B_{Z_0}/m	-378.505 590 77	0.000 017 279
$B_{Z_1}/(\text{m} \cdot \text{s}^{-1})$	-0.033 047 16	

20 个作为控制点,20 个作为检查点。控制点与检

查点的分布情况如图5所示。

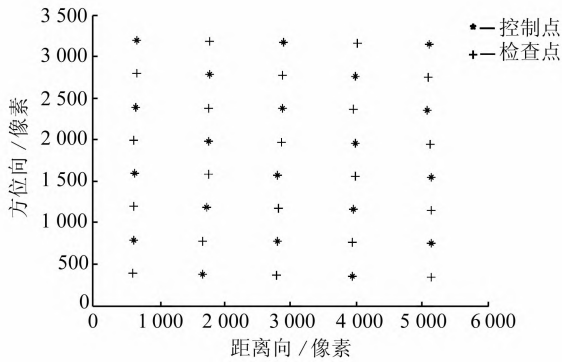


图5 控制点与检查点分布示意图

Fig. 5 Distribution of Control Points and Check Points

3.3 实验结果比较

由于仿真参数无误差,为了与实际情况接近,给控制点坐标(三轴)注入 0.1 m 的随机误差,干涉相位注入 40° 随机误差,并且给基线三轴初值增加了 3 cm 的常数项误差和 0.001 m/s 的一次项误差。利用原始基线计算地面点坐标,部分结果如表 2 所示。

经过统计,控制点在原始基线情况下计算出的理论坐标与实际坐标的中误差分别为 $m_x = \pm 40.98$ m, $m_y = \pm 29.60$ m, $m_z = \pm 31.96$ m。经过定标后,基线三轴分量的一次项表达式和中误差统计结果如表 3 所示。

表 2 原始基线计算地面点控制点坐标比较

Tab. 2 Coordinate Comparison Between GCP and Computation by Initial Baseline

序号	控制点			定位结果		
	X/m	Y/m	Z/m	X/m	Y/m	Z/m
1	999 463.64	-4 305 737.22	4 584 608.91	999 421.77	-4 305 766.93	4 584 640.90
2	997 661.33	-4 305 992.50	4 584 898.97	997 620.31	-4 306 022.94	4 584 930.54
3	995 840.37	-4 306 167.13	4 585 103.27	995 798.76	-4 306 197.18	4 585 135.36
4	994 011.50	-4 306 307.51	4 585 271.15	993 969.99	-4 306 337.81	4 585 302.54
5	992 189.91	-4 306 479.41	4 585 472.54	992 148.32	-4 306 509.6	4 585 504.49
6	999 455.85	-4 306 372.77	4 583 997.30	999 413.47	-4 306 402.42	4 584 029.78

表 3 检测前后基线分量对比及误差统计

Tab. 3 Comparison of Baseline Initial Values, Calibration Values and Statistic Baseline Errors

参数	原始基线	基线真值	定标后基线	中误差/m
B_{X_0}/m	318.589 800 93	318.619 800 93	318.626 262 17	$m_{B_X} = \pm 0.023 53$
$B_{X_1}/(m \cdot s^{-1})$	0.266 071 30	0.267 071 30	0.268 081 62	
B_{Y_0}/m	-305.681 528 81	-305.651 528 81	-305.340 944 39	$m_{B_Y} = \pm 0.213 5$
$B_{Y_1}/(m \cdot s^{-1})$	0.426 109 96	0.427 109 96	0.534 680 37	
B_{Z_0}/m	-378.535 590 77	-378.505 590 77	-378.495 376 17	$m_{B_Z} = \pm 0.022 2$
$B_{Z_1}/(m \cdot s^{-1})$	-0.034 047 16	-0.033 047 16	-0.030 406 64	

从表 3 可以看出,定标后,基线分量的一次项表达式与基线真值非常接近。中误差统计结果表明, B_X 、 B_Z 的精度较高,能够达到 cm 量级,而 B_Y 的精度较差,在 dm 量级。这是因为顺轨基线 B_Y 的精度对目定标位精度的影响很小^[12],因此利用控制点反求该基线分量时,无法精确求取。如何提高沿顺轨基线定标的精度是下一步需要研究的工作。

分别利用定标前/后的基线计算控制点和检查点的坐标,并与实际坐标进行比较,结果如表 4 所示。从表 4 可以看出,定标后,控制点与检查点的精度有了大幅度提高,证明了本文方法的有效性。

表 4 定标前后地面点坐标中误差/m

Tab. 4 Coordinate RMS Comparison Between Initial Baseline and Calibration Baseline/m

	X 坐标中误差		Y 坐标中误差		Z 坐标中误差	
	定标前	定标后	定标前	定标后	定标前	定标后
控制点	40.98	0.38	29.60	0.32	31.96	0.72
检查点	40.02	0.59	28.56	0.54	31.15	0.80

4 结 语

本文提出了一种符合星载 InSAR 工作特点、基于地面控制点的立体基线定标方法,克服了以往采用二维简化基线定标模型导致定标精度不高,无法适用于编队 InSAR 的缺点。仿真数据处理结果表明,利用定标后的基线计算地面目标点的位置精度可以达到 m 级,基线长度定标的精度可达到 cm 级,证明了该方法能够有效完成基线矢量的高精度定标,可为星载 InSAR 基线定标提供支撑。

参 考 文 献

- [1] Chen Gang, Tang Xiaotao. Analysis on Baseline Estimation Algorithm of Spaceborne InSAR[J]. *Geomatics Science and Engineering*, 2008, 28(2): 46-48 (陈刚, 汤晓涛. 星载 InSAR 基线估计算法分析

- [J]. 测绘科学与工程, 2008, 28(2): 46-48)
- [2] Small D. Baseline Modelling for ERS-1 SAR Interferometry[C]. IEEE IGARSS'93, Toyko, 1993
- [3] Kimura H. A Method to Estimate Baseline and Platform Altitude for SAR Interferometry[C]. International Geoscience and Remote Sensing Symposium, Firenze, 1995
- [4] Knedlik S, Loffeld O. Baseline Estimation and Prediction Referring to the SRTM [C]. IEEE 2002 IGRASS, Toronto, Canada, 2002
- [5] Zink M, Geudtner D. Interferometric Calibration of the X-SAR System on the Shuttle Radar Topography Mission [C]. IEEE 1999 IGRASS, Hamburg, Germany, 1999
- [6] Costantini M, Minati F. SAR Interferometric Baseline Calibration Without Need of Phase Unwrapping [C]. IEEE IGARSS'04, Anchorage, 2004
- [7] Guarnieri M A, Biancardi P. Accurate and Robust Baseline Estimation[EB/OL]. http://earth.esa.int/pub/ESA_DOC/fringe1999/Papers/montigua.pdf, 1999
- [8] Liu Guoxiang. Monitoring of Ground Deformations with Radar Interferometry[M]. Beijing: Surveying and Mapping Publications, 2006: 68-88(刘国祥. 利用雷达干涉测量技术监测区域地表形变[M]. 北京: 测绘出版社, 2006: 68-88)
- [9] Li Pin. Researching of Calibration Method About InSAR System[D]. Hefei: University of Science and Technology of China, 2008(李品. InSAR 系统的定标方法研究[D]. 合肥: 中国科学技术大学, 2008)
- [10] Zheng Hao, Tang Xiaotao, Chen Gang, et al. InSAR Baseline Detection Based on Satellites Formation [J]. *Acta Geodaetica Cartographica Sinica*, 2010, 39(2): 175-179(郑浩, 汤晓涛, 陈刚, 等. 一种基于卫星编队的 InSAR 基线检测算法[J]. 测绘学报, 2010, 39(2): 175-179)
- [11] Weber M, Herrmann J. TerraSAR-X and TanDEM-X: Global Mapping in 3D Using Radar[EB/OL]. <http://isprs.2007ist.itu.edu.tr/22.pdf>, 2007
- [12] Lou Liangsheng, Tang Xiaotao, Huang Qilai. Influence of Azimuth Baseline on Formation-Flying Satellites Based InSAR[J]. *Geomatics and Information Science of Wuhan University*, 2007, 32(1): 59-61(楼良盛, 汤晓涛, 黄启来. 基于卫星编队 InSAR 方位向基线影响分析[J]. 武汉大学学报·信息科学版, 2007, 32(1): 59-61)

A Three-Dimensional Baseline Calibration Method of Spaceborne InSAR

CHEN Gang^{1,2,3} TANG Xiaotao^{2,3} QIAN Fangming^{2,3}

1 Institute of Geospatial Information, Information Engineering University, Zhengzhou 450052, China

2 State Key Laboratory of Geo-information Engineering, Xi'an 710054, China

3 Xi'an Research Institute of Surveying and Mapping, Xi'an 710054, China

Abstract: Accuracy of baseline vector is one of important factors that affect the accuracy of height in spaceborne InSAR. By calibrating the baseline vector can effectively improve target's position accuracy, now most baseline calibration methods adopt two-dimensional model. This model ignores along-track baseline, which decrease calibration accuracy. According to working theory of spaceborne InSAR, this paper presents a three-dimensional baseline model. By constructing the local moving coordinate system, the proposed method simplifies parameters and optimizes process in calibration. Results show that the proposed method has practical value and can be used in the calibration of high accuracy baseline vector.

Key words: InSAR; baseline estimation; baseline calibration

First author: CHEN Gang, associate researcher, specializes in distribution InSAR, data processing, InSAR interferometric calibration. E-mail: splitter@sina.com

Foundation support: The National Natural Science Foundation of China, No. 41371439.