

文章编号: 1001-1595(2010)02-0175-05

一种基于卫星编队 InSAR 的基线检测方法

郑 浩, 汤晓涛, 陈 刚, 刘志铭

西安测绘研究所, 陕西 西安 710054

InSAR Baseline Detection Based on Satellites Formation

ZHENG Hao, TANG Xiaotao, CHEN Gang, LIU Zhiming

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

Abstract: For InSAR data processing, baselines are vitally parameters and play important role for acquisition height of ground point. In the InSAR system based on formation-flying satellites, baselines changes continuously due to continuous movement of each satellite. So a credible and accurate method is needed. Baseline detection is one of important ways to get high-precision baseline. As a consequence, there are few experiences to use for reference in this work. This paper focuses on study the baseline detection in the formation-flying satellites, which test baseline parameters of InSAR formed by hi-dynamic and distributed satellites using the hi-precision ground area data. Based on analysis, an improved model of baseline detection based on baseline linear fitting is presented. The tests of the method have been done using with the ERS real data. The result shows the method make great improvement and can be implemented in practice.

Key words: InSAR; baseline; formation-flying satellites; baseline estimation; baseline detection; precision analysis

摘 要: 研究的是基于卫星编队 InSAR 的基线检测技术, 利用高精度的地面实验场数据, 对高动态、分布式卫星条件下合成孔径雷达系统的 InSAR 基线参数进行检测。通过分析, 提出一种改进的基于基线线性拟合的基线检测方法, 并采用 ERS 真实数据进行基线检测实验, 通过比较检查点高程和进行精度分析表明, 采用该基线检测方法基线精度有很大提高, 具有很高的实际应用价值。

关键词: 干涉合成孔径雷达; 基线; 卫星编队; 基线估计; 基线检测; 精度分析

中图分类号: P231

文献标识码: A

基金项目: 国家 863 计划(2003AA716062)

干涉合成孔径雷达(interferometric synthetic aperture radar, InSAR)技术是在合成孔径雷达(synthetic aperture radar, SAR)技术基础上发展并逐渐成熟起来的一种新的主动微波成像技术。目前, 获取 InSAR 数据的方式有三种: 重复轨道、单平台双天线、卫星编队飞行。重复轨道数据获取方式是通过卫星重复过境时对同一目标观测时轨道的差异形成有效的基线, 特点是卫星和有效载荷的设计相对简单、基线靠事后反演获得, 但干涉效率低、去相关效应严重。目前公开的 InSAR 理论研究的数据多来源于这一技术途径, 技术难度小, 但难以实现业务化运行。单平台双天线数据获取方式是在一部雷达上安装两个天线(双通道雷达), 用两个天线各自接收的回波做干涉数据源。其特点是影像相关性好, 获取效率高、处理相对简单, 是数据获取的最佳方式。缺点是基线较短、技术难度大。目前只有美国在航天飞机上实现了单平台双天线 InSAR 系统, 要在卫星上实现, 对平台和载荷

都提出很大挑战。卫星编队飞行是通过卫星组网的方式满足 InSAR 数据获取的条件获取 InSAR 数据。其特点是有效基线长, 数据精度高。缺点是需要较为复杂的卫星编队飞行控制技术、星间同步技术以及基线测量技术等。近年来, 基于卫星编队的 InSAR 技术受到许多国家的重视, 已经成为一种发展趋势。目前欧洲、日本和美国都对这一领域开展了相应的研究工作, 典型的系统是 CNES 的 Cartwheel 计划^[1-2]、美国的 TechSat 21^[3-4] 计划以及德国的 Tandem-X^[5-6] 任务等。

在卫星编队的 InSAR 系统中, 由于参与编队的各卫星相对位置不断变化, 故其基线也在不断变化, 目前, 通常采用星间基线测量和地面基线估计两种方法进行基线测量。不管采用哪种方法, 都不可避免地存在测量误差。在 InSAR 数据处理过程中, 基线参数起着至关重要的作用, 是影响干涉处理结果的重要因素^[7-8]。它决定了有效干涉影像对的选取, 对数据处理中的平地效应等有

很大影响,其精度决定了 InSAR 数据处理的最终成果精度。所以,没有高精度的基线参数就没有高精度的 DEM。而基线检测是获取高精度基线参数的重要手段之一。基线检测是通过地面控制点来获取 InSAR 系统的基线长度、基线夹角、雷达侧视角、平台高度等信息,消除系统误差,对获取的基线长度、基线夹角等参数进行精化。所以基线检测需要解决卫星编队组网运控、星间基线测量、地面检测模型可靠性、检测结果精度分析等关键技术。目前有多种可以用作基线检测的方法^[9-12],本文对基于基线线性拟合的方法进行较为深入的分析,证明该方法是一种稳定可靠的基线检测方法。

1 基于基线线性拟合的基线检测法及其改进

如图 1 显示, M 和 S 为两部雷达天线相位中心位置; B 为基线长度; α 是基线倾角; θ 为地面点 P_i 的雷达侧视角; H 为雷达高度; h_i 为地面点 P_i 的高程; R_e 是当地椭球半径; R_{si} 和 R_{mi} 为两部雷达天线相位中心到地面点 P_i 的斜距。

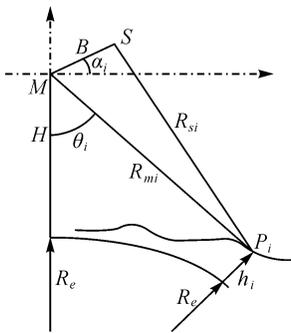


图 1 基于基线线性拟合的基线检测方法原理

Fig. 1 InSAR baseline detection based on linear fitting theory

设起算点的绝对相位为 ϕ_0

$$\phi_0 = \phi_0 + 2n_0\pi \quad (1)$$

设 P_i 点的绝对相位 ϕ_i 为

$$\phi_i = \phi_i + 2n_i\pi \quad (2)$$

ϕ_i 为 P_i 点的相位主值, P_i 点的绝对相位 ϕ_i 可以表示为

$$\phi_i = \Delta\phi_i + \phi_0 \quad (3)$$

上面的三个式中, 相位主值分别为 ϕ_0 和 ϕ_i , 相应的模糊度为 n_0 和 n_i , 则对于 P_0 和地面点 P_i 之间的相对相位差 $\Delta\phi_i$ 有

$$\Delta\phi_i = \phi_i - \phi_0 = 2(n_i - n_0)\pi + \phi_i - \phi_0 \quad (4)$$

式中, 虽然 n_0 和 n_i 为未知数, 但它们的差 $(n_i -$

$n_0)$ 却可以通过量测 P_0 和 P_i 点之间条纹数获得。因此, 地面点 P_0 和 P_i 之间的相对相位差 $\Delta\phi_i$ 可以被惟一地确定。

目标点 P_i 点的绝对相位差可表示为

$$\phi_i = \frac{2\pi}{\lambda}(R_{si} - R_{mi}) \quad (5)$$

即

$$\Delta\phi_i + \phi_0 = \frac{2\pi}{\lambda}(R_{si} - R_{mi}) \quad (6)$$

在 $\triangle MSP_i$ 中, 利用余弦定理, 可表示为

$$R_{si}^2 = R_{mi}^2 + B^2 - 2R_{mi}B \cos \left[\alpha + \left(\frac{\pi}{2} - \theta \right) \right] \quad (7)$$

$$R_{si}^2 = R_{mi}^2 + B_x^2 + B_y^2 - 2R_{mi}B(\sin \theta \cos \alpha - \cos \theta \sin \alpha) \quad (8)$$

由于 B_x 、 B_y 、 R_{mi_x} 、 R_{mi_y} 分别是 B 和 R_{mi} 的 x 、 y 方向的分量。

$$R_{mi_x} = R_{mi} \sin \theta \quad (9)$$

$$R_{mi_y} = -R_{mi} \cos \theta \quad (10)$$

$$B_x = B \cos \alpha \quad (11)$$

$$B_y = B \sin \alpha \quad (12)$$

所以

$$R_{si}^2 = R_{mi}^2 + B^2 - 2(R_{mi_x}B_x + R_{mi_y}B_y) \quad (13)$$

由余弦定理可得

$$\cos \theta = \frac{R_{mi}^2 + (H + R_e)^2 - h_i^2}{2R_{mi}(R_e + H)} \quad (14)$$

当至少已知四个同一距离向地面控制点的 ϕ 、 R_{mi} 和 h_i 时, 利用上面的公式可解算出未知参数 B_x 、 B_y 、 H 和 ϕ_0 。但通常很难找到同一距离向的多个控制点。

由于参数 B_x 、 B_y 、 H 和 ϕ_0 在整景影像中通常并非常数, 但它们的变化率很小且成线性。

$$B_x(t) = B_{x_0} + B_{x_1}t \quad (15)$$

$$B_y(t) = B_{y_0} + B_{y_1}t \quad (16)$$

$$H(t) = H_0 + H_1t \quad (17)$$

式中, $B_x(t)$ 、 $B_y(t)$ 、 $H(t)$ 为变化函数, B_{x_0} 、 B_{y_0} 为起算点 B 的 x 、 y 方向的分量, H_0 为起算点轨道高度, t 为方位向坐标。

将以上式(6)、(13)~(17)进行整理, 可得

$$f(B_{x_0}, B_{y_0}, B_{x_1}, B_{y_1}, H_0, H_1, \phi_0) = \Delta\phi_i + \phi_0 - \frac{2\pi}{\lambda} \left[-R_{mi} + \sqrt{R_{mi}^2 + B_x^2 + B_y^2 - 2R_{mi}B_x \sin \theta + 2R_{mi}B_y \cos \theta} \right] \quad (18)$$

由式(18), 当至少已知整景影像中的 7 个地面控制点的 $\Delta\phi$ 、 ϕ_0 、 Q 、 λ 、 R_{mi} 、 h_i 、 R_e 和 t , 便可求

得 B_0 、 B_{y_0} 、 B_{x_1} 、 B_{y_1} 、 H_0 、 H_1 、 ϕ_0 (相当于 n^0) 等 7 个未知数。在整景影像中找到多个地面控制点则相对容易。

以上方法需要用到公式

$$R_{mi} = D_{s_0} + X_s j \quad (19)$$

其中, D_{s_0} 为雷达近距边; X_s 为距离向分辨率; j 为距离向坐标。

在基于基线线性拟合的基线检测法中是将雷达近距边当作真值来计算的, 没有考虑到雷达近距边本身可能存在误差。雷达近距边的误差主要来自两个方面: 一个是微波在穿过电离层的过程中, 由于电离层的影响, 微波传播路线会发生偏移, 不再是直线传播, 导致传播路程增大。而且电离层本身是不稳定的, 电离层密度在不断发生变化, 因此电离层导致的微波传播误差是很难修正的。第二个原因是计时的误差。卫星上的计时设备在记录微波发射时间和返回时间的过程中存在误差。由于以上两个原因, 根据国内外已有的资料^[12]可以估计在斜距分辨率为 10 m 的情况下雷达近距边的误差大约在 3 m。

下面分析 3 m 的雷达近距边误差能带来多大的基线测量误差。雷达近距边对高程测量精度的影响为^[12]

$$k_{D_s} = \frac{\partial B}{\partial R_{D_s}} = \frac{B \cos \theta}{R(\sin \theta + \cos \theta \tan \alpha) \tan(\theta - \alpha)} \quad (20)$$

式中, k_{D_s} 为雷达近距边对高程测量精度的影响数值; α 是基线倾角; θ 为雷达侧视角; R 为雷达天线相位中心到地面点的斜距。

由中误差传播定律有

$$m_B = k_{D_s} m_{D_s} \quad (21)$$

取参数: 雷达中心视角 $\theta = 39^\circ$, 基线倾角 $\beta = 29^\circ$, 基线长度 $B = 1030$ m, $D_{s_0} = 652703$ m, 斜距 $R = 653703$ m, 斜距误差 $m_{R_{mi}} = m_{D_s} = \pm 3$ m, 可得, 基线长度误差 $m_B = \pm 0.002$ m。这么大的基线长度误差会带来 0.8 m 的测高误差。

2 ERS 数据验证与结论

2.1 实验数据

本文实验数据采用 ERS-1/2 卫星数据, 虽然该数据是重复轨道数据, 不是卫星编队 InSAR 数据, 但是该数据的基线参数等数据特点与编队情况类似, 可以利用该数据对基线检测模型进行原理验证。

在主影像上选择了能够明显识别的道路交叉点、水渠拐点等 18 个点, 并量测其距离向和方位向坐标。在 1:5 万的地形图上找到这些点的具体位置, 并量测这些点的高程坐标。

2.2 计算基线参数和检查点高程

1. 基线初值和计算的基线参数比较(表 1)

表 1 基线初值和计算的基线参数比较

Tab. 1 Comparison of baseline initial value and calculating value

参数	基线初值	计算的基线结果	数值差
基线 X 方向分量/m	333.487 11	333.472 10	0.015 01
基线 X 方向分量变化率/(m/s)	- 0.019 63	- 0.011 30	- 0.008 33
基线 Y 方向分量/m	- 89.235 843	- 89.220 800	- 0.015 04
基线 Y 方向分量变化率/(m/s)	- 0.005 303	- 0.005 600	0.000 297
轨道高度/m	789 344. 81	789 345. 31	- 0. 5
轨道高度变化率/(m/s)	0.005 69	0.905 70	- 0.900 01
基准点绝对相位差/rad	- 47 461. 300 0	- 47 461. 450 0	0.15
雷达近距边/m	850 802. 81	850 801. 31	1. 5
基线长度/m	345. 219 76	345. 220 00	- 0.000 24
基线倾角/(°)	- 14. 980 5	- 14. 978 7	- 0.001 8

2. 利用计算的结果计算检查点高程(表 2)

表 2 ERS 实验检查点高程结果比较

Tab. 2 ERS experiment check point height comparison

点号	量取的检查点高程	利用初值计算的结果		利用计算基线参数计算的结果	
		计算检查点高程	高程差	计算检查点高程	高程差
1	1 332	5404. 704	- 4 064. 70	1 307. 823	32. 176 7
2	1 395	4311. 515	- 2 948. 51	1 305. 688	57. 311 9
3	1 538	3796. 500	- 2 445. 50	1 380. 974	- 29. 973 5
4	1 487	8292. 026	- 6 831. 03	1 463. 598	- 2. 598 3

续表 2

/ m

点号	量取的检查点高程	利用初值计算的结果		利用计算基线参数计算的结果	
		计算检查点高程	高程差	计算检查点高程	高程差
5	1 544	5087.263	- 3 748.26	1 320.012	18.987 8
6	1 558	4743.999	- 3 406.00	1 314.146	23.853 8
7	1 446	5672.769	- 4 327.77	1 333.159	11.840 7
8	1 560	5167.429	- 3 844.43	1 309.339	13.660 7
9	1 347	2874.647	- 1 527.65	1 519.796	- 172.796 4

2.3 测高精度分析

2.3.1 理论分析

各误差引起的地面点的高程中误差分量可以表示为^[12]

$$m'_{\phi} = \pm \frac{\lambda R (\sin \theta + \cos \theta \tan \alpha)}{2\pi B \cos(\theta - \beta)} m_{\phi} \quad (22)$$

$$m'_{B} = \pm \frac{R (\sin \theta + \cos \theta \tan \alpha) \tan(\theta - \beta)}{B} m_B \quad (23)$$

$$m'_{\beta} = \pm R (\sin \theta + \cos \theta \tan \alpha) m_{\alpha} \quad (24)$$

$$m'_{R} = \pm \cos \theta m_R \quad (25)$$

$$m'_{H} = \pm m_H \quad (26)$$

其中, α 为地面点沿 X 方向的坡度值。

地面点总的高程中误差为

$$m_h = \pm \sqrt{m'^2_{\phi} + m'^2_{B} + m'^2_{\beta} + m'^2_{R} + m'^2_{H}} \quad (27)$$

取本次实验的参数: 卫星轨道高度 $H = 789\,344.81$ m, 雷达中心视角 $\theta = 22^\circ$, 波长 $\lambda = 0.056\,666$ m, 基线倾角 $\beta = -14.980^\circ$, 基线长度 $B = 345.220$ m。

本实验的误差有四类误差组成: 斜距测量误差、控制点误差、相位误差和轨道高度误差。

1. 斜距测量误差

依据第 1 节的分析, 取斜距测量中误差为 ± 3 m。

2. 轨道高度误差

根据使用数据的实际情况, ERS1/2 影像提供的轨道数据的精度范围是 1~ 4 m, 因此, 按照其范围取轨道高度测量中误差为 ± 3 m。

3. 控制点误差

(1) 地图高程误差

按照有关规范的规定, 丘陵地的高程中误差不得大于 4.5 m。

(2) 像点量测误差引起的高程误差

由于地图上判点误差和影像上选点误差的影响造成像点坐标误差在 1 个像素左右, 而影像的地距分辨率大约为 20 m, 所以影像像点坐标量测

误差会造成平面位置大约 20 m 的误差。根据有关规范对丘陵地的规定, 地势起伏较缓, 图幅内大部分坡度在 $2^\circ \sim 6^\circ$, 取坡度范围为 $\pm 6^\circ$ 。所以, 因平面位置误差造成的高度误差是 0.6~ 2.1 m。1: 50 000 地图的等高距是 10 m, 取三分之一等高距的误差即为 3 m。综合以上因素, 取控制点高程中误差为 ± 10 m。

4. 相位误差

国外星载 InSAR 数据处理相位误差的统计结果表明: 其相位中误差通常不会超过 30° , 相当于 0.52 rad, 所以, 给基准控制点绝对相位差加入 0.6 rad 的中误差。

由于以上误差参与计算会造成基线长度和基线倾角误差, 所以需要对其误差进行分配。依据实验情况取各参数的测量误差为: $m_{\phi} = \pm 0.6$ rad, $m_B = \pm 0.1$ m, $m_{\alpha} = \pm 8''$, $m_R = \pm 3$ m, $m_h = \pm 10$ m, $m_H = \pm 3$ m。

得到高程精度理论分析情况如图 2 所示。

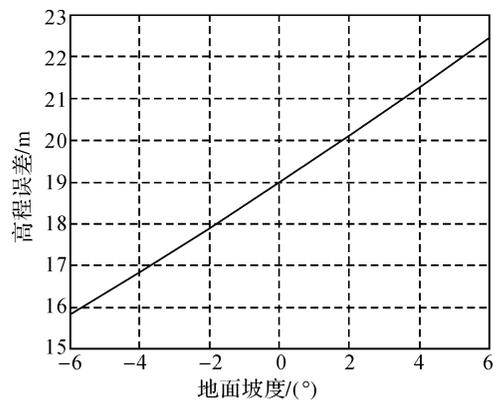


图 2 高程精度理论分析

Fig. 2 Height theoretic precision analysis

2.3.2 实验结果

从表 2 可以看出, 第 9 个检查点的计算高程与其他点的结果相比相差太大, 将其作为粗差去除, 分析其与 8 个控制点的精度如图 3。

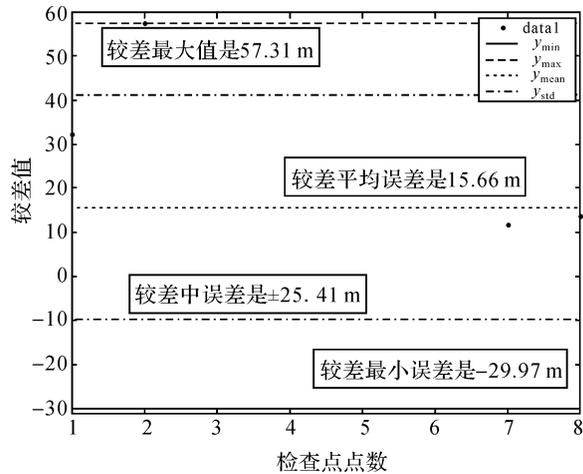


图 3 ERS 检查点高程较差统计

Fig. 3 ERS check point height statistical discrepancy

2.3.3 实验结果与理论分析结果比较

从以上的比较可以看出,实验获取数据的精度与理论分析的误差基本一致。受数据源的影响,本次实验的检查点数目过少,检查点数据增加,结果会更理想。由此可以得出结论:采用该基线检测模型计算的基线参数结果是可靠的,相比于初值计算的检查点高程精度有很大提高。

3 结束语

InSAR 技术是目前 DEM 生产最具潜力的技术手段之一,基于卫星编队的 InSAR 技术已经成为一种发展趋势,作为保证 InSAR 系统生成 DEM 精度重要手段之一的基线检测已成为研究热点。本文对 InSAR 基线检测作了一些工作,通过实验证明该方法可以提高基线精度,消除基线测量的系统误差,是一种稳定可靠的基线检测方法,具有很高的实用价值。但是,该方法需要高精度的地面控制点,控制点的精度、分布、数量等对基线检测精度都有影响,如何获取一定数量的高精度的地面控制点是基线检测面临的一个难题,所以,今后还应在如何获取高精度的地面控制点和提高基线检测的可靠性方面做进一步的工作。

参考文献:

[1] CURLANDER J C, MCDONOUGH R N. Synthetic Aperture Radar: Systems and Signal Processing [M]. Beijing: Publishing House of Electronics Industry, 2006. (CURLANDER J C, MCDONOUGH R N. 合成孔径雷达:系统与信号处理 [M]. 韩传钊,译.北京:电子工业出版社,2006.)

[2] RODRIGUEZ E, MARTIN J M. Theory and Design of In-

terferometric Synthetic Aperture Radars [J]. IEE Proceedings F, 1992, 139(2): 147-159.

- [3] MASSONNET D. Capabilities and Limitations of the Interferometric Cartwheel [J]. IEEE Trans Geosci Remote Sensing, 2001, 39(3): 506-520.
- [4] MITTERMAYER J, KRIEGER G, WENDLER M, et al. Preliminary Interferometric Performance Estimation for the Interferometric Cartwheel in Combination with ENVISAT ASAR [C] // Proceedings of CEOS Working Group on Calibration and Validation SAR Workshop. Tokyo: [s. n.], 2001: 2-5.
- [5] MOREIRA A, KRIEGER G, HAJNSEK I, et al. TanDEM-X: a TerraSAR-X Add on Satellite for Single-pass SAR Interferometry [EB/OL]. [2008-08-11]. <http://www.dlr.de/hr/Portaldata/32/Resources/dokumente/tedmx/TanDEM-X-IGARSS-2004.pdf>.
- [6] ImStrat Corporation. TanDEM-X- Radar Interferometry with Unprecedented Accuracy in Close Formation Flight with TerraSAR-X Satellites [EB/OL]. [2008-08-11]. <http://www.imstrat.on.ca/page46.htm>.
- [7] RODRIGUEZ E, MARTIN J M. Theory and Design of Interferometric Synthetic Aperture Radars [J]. IEE Proceedings F, 1992, 139(2): 147-159.
- [8] 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.)
- [9] SMALL D, WERNER C, NUESCH D. Baseline Modelling for ERS-1 SAR Interferometry [C] // Proceedings of IGARSS'93. Tokyo: [s. n.], 1993: 1204-1206.
- [10] SHI Shiping. DEM Generation Using ERS-1/2 Interferometric SAR Data [J]. Acta Geodaetica et Cartographica Sinica, 2000, 29(4): 317-323. (史世平.使用 ERS-1/2 干涉测量 SAR 数据生成 DEM [J].测绘学报, 2000, 29(4): 317-323.)
- [11] ZHANG Xiaoling, WANG Jianguo, HUANG Shunji. Research of Estimations of Terrain Height and Baseline for interferometric SAR [J]. Signal Processing, 1999, 15(4): 316-320. (张晓玲,王建国,黄顺吉.干涉 SAR 成像中地形高度估计及基线估计方法的研究 [J].信号处理, 1999, 15(4): 316-320.)
- [12] KIMURA H, TODO M. Baseline Estimation Using Ground Points for Interferometric SAR [C] // Proceedings of IGARSS'97. 1997: 442-444.

(责任编辑:雷秀丽)

收稿日期: 2008-09-22

修回日期: 2009-11-23

第一作者简介: 郑浩(1977—),男,助理研究员,主要从事 InSAR 数据处理方面的研究。

First author: ZHENG hao (1977—), male, associate researcher, majors in InSAR processing.

E-mail: zh9622@sohu.com