

单台相机机载 InSAR 基线动态测量方法研究

吴一戎 李广云* 王保丰* 黄桂平* 王卫延 彭海良 范生宏* 洪隆昌

(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 100080)

(解放军信息工程大学测绘学院 郑州 450052)

摘要: 该文提出一种对机载干涉合成孔径雷达(InSAR)基线的动态测量方法。通过在机载 InSAR 天线上布设一定数量的控制点,采用单台内方位元素精确标定的数码相机对天线进行实时监测。基于实时控制点图像所建立的共线方程和后方交会算法,解算出相机测量坐标系与控制点辅助坐标系之间的转换参数。将转换参数代入待测点坐标方程后,计算得到天线中心在测量坐标系下的实时三维坐标。在实验室进行的静态和动态模拟实验取得较好结果,验证了该文提出的 InSAR 基线动态测量方案的可行性。

关键词: 机载 InSAR 基线, 动态测量, 计算机视觉测量, 后方交会

中图分类号: TN958 文献标识码: A 文章编号: 1009-5896(2005)06-0999-03

The Dynamic Measurement Scheme Based on Single Camera for the Airborne InSAR Baseline

Wu Yi-rong Li Guang-yun* Wang Bao-feng* Huang Gui-ping* Wang Wei-yan Peng Hai-liang

Fan Sheng-hong* Hong Long-chang

(The Institute of Electronics, Chinese Academy of Sciences,

National Microwave Imaging Technology Key Laboratory, Beijing 100080, China)

* (Topography College, University of PLA Information Engineering, Zhengzhou, 450052, China)

Abstract The dynamic measurement scheme based on single camera for the airborne InSAR baseline is described in this paper. In the above measurement scheme, the calibrated camera is mainly responsible for taking pictures on the pre-designed legends on the antennas of the InSAR system at a reasonable frequency. The 3D coordinates of the antenna phase centers are calculated by the collinear equations and backward intersection algorithm. The scheme is verified feasible by the static and dynamic tests.

Key words Airborne InSAR baseline, Dynamic measurement scheme, Computer aided vision measurement, Backward intersection

1 引言

从干涉式合成孔径雷达获取的目标数据中可以提取目标的高程信息^[1-5]。采用 InSAR 技术获取的目标高程精度依赖于飞行高度、测量斜距、基线长度、基线指向以及干涉相位等多个导出参数的测量精度。为了提高 InSAR 获取目标高程的精度,需要提高各个导出参数的测量精度。本文开展机载 InSAR 基线动态精密测量方法研究,是为了在机载干涉合成孔径雷达空中作业时,实时精确地确定干涉天线之间基线的长度和指向。图 1 是干涉天线位置和干涉基线的示意图。

本文旨在研究 InSAR 基线动态精密测量的方法以及在遥感飞机上实现长干涉基线精密测量的方案和装置的可行

性。一般地,要求的基线长度范围为 3~6m 或更长;测量速率为 10~20Hz,长度测量的相对误差和指向测量误差要小于 $(1 \sim 2) \times 10^{-4}$ 。

原理上,进行空间位置的动态测量,可以采用全站仪,也可以采用激光跟踪测距仪。但是目前具有自动跟踪能力的

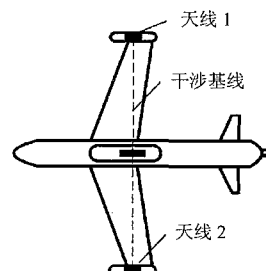


图 1 机载 InSAR 干涉基线示意

全站仪采样速度慢,而激光跟踪仪的体积大、成本高,都不适于解决机载长基线干涉 SAR 的基线测量问题。单台相机计算机视觉测量是通过单台相机瞬间得到的图像实现对动态目标的实时量测,它测量的速度快、精度高,设备简单。我们提出利用计算机视觉测量技术来解决机载 InSAR 基线的动态测量问题。

2 测量原理

摄影测量的基本原理是根据物方点的同名像点列出共线方程,进行求解而得到点的三维坐标;采用单台相机获取 InSAR 天线中心点三维坐标需借助辅助标志点系,并要利用到空间后方交会原理。假设在 InSAR 的飞行作业中天线结构本身可以被视作刚体,这样,可以在天线结构上布设 M 个精确标定的辅助标志点系 ($M \geq 3$)。记所有标志点在辅助测量坐标系内的三维坐标为 (X'_i, Y'_i, Z'_i) , 天线中心的三维坐标为 (X'_a, Y'_a, Z'_a) ; 记所有标志点在像平面坐标系中的平面坐标为 (u_i, v_i) , 如图 2 所示。在 InSAR 飞行作业中,随着机翼不规则运动,天线中心及辅助测量坐标系相对于相机测量坐标系 (X, Y, Z) , 会发生坐标平移 (X_s, Y_s, Z_s) 和旋转 (ϕ, ω, κ) 。单台相机测量时,通过对单张照片中天线上 M 个标志点与其相应的实时像点之间的数学关系,可以建立 $2M$ 个空间后方交会共线方程^[6,7]:

$$\left. \begin{aligned} (u_i - u_0)(1 + k_1 r_i^2) &= -f_u \frac{a_1(X'_i - X_s) + b_1(Y'_i - Y_s) + c_1(Z'_i - Z_s)}{a_3(X'_i - X_s) + b_3(Y'_i - Y_s) + c_3(Z'_i - Z_s)} \\ (v_i - v_0)(1 + k_1 r_i^2) &= -f_v \frac{a_2(X'_i - X_s) + b_2(Y'_i - Y_s) + c_2(Z'_i - Z_s)}{a_3(X'_i - X_s) + b_3(Y'_i - Y_s) + c_3(Z'_i - Z_s)} \end{aligned} \right\} \quad (1)$$

$$i = 1, 2, \dots, M$$

式中 a_i, b_i, c_i ($i = 1, 2, 3$) 为坐标旋转矩阵元素,由 ϕ, ω, κ 确定;
 u_0, v_0, f_u, f_v 和 k_1 为相机内方位元素精确标定的参数;
 $r_i = \sqrt{(u_i - u_0)^2 + (v_i - v_0)^2}$ 为控制像点至像平面中心的距离。
对式(1)求解,得到辅助测量坐标系与测量坐标系之间的6个实时转换参数 X_s, Y_s, Z_s 和 ϕ, ω, κ 。根据这些参数,可以确定天线中心在测量坐标系中的实时三维坐标:

$$\begin{bmatrix} X'_a \\ Y'_a \\ Z'_a \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} a_1 & b_1 & c_1 \\ a_2 & b_2 & c_2 \\ a_3 & b_3 & c_3 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} X'_a - X_s \\ Y'_a - Y_s \\ Z'_a - Z_s \end{bmatrix} \quad (2)$$

3 方案可行性实验

为验证单台相机计算机视觉 InSAR 基线测量方案的可行性,采用 Nikon D2H 专业型数码相机进行实验室模拟实验。实验前,对相机进行了内方位元素标定^[7,8],标定参数由表 1 给出。实验中使用的焦距和光圈与标定时相同。

选择移动控制架作为测试对象,在移动控制架的一个近似的平面内,布设 7 个标志点,点位如图 3 所示。全部标志

表 1 D2H 内方位元素标定参数

u_0 (像素)	v_0 (像素)	k_1	f_u (像素)	f_v (像素)
1220.85	815.68	1.2×10^{-8}	3044.024	3044.49

点的三维坐标由经纬仪测量系统精确测定,点位精度优于 0.05mm ^[9,10]。其中 4 号标志点被视作待测的天线中心,其余 6 个标志点作为辅助控制点。为保持高度稳定的拍摄,实验中将相机固定在悬挂重锤的脚架上,并采用无线遥控快门拍摄。当移动控制架在实验室移动时, Nikon D2H 相机以 8 帧/秒的速度对其进行连续拍摄。按照式(1)和式(2),对于每一幅照片图像,通过控制点共线方程组,可以求得测量坐标系与辅助测量坐标系间的转换参数(即摄站的外部参数),并依此计算出 4 号点(天线中心)在测量坐标系中的三维坐标。由于相机是固定不动的,所以一系列 4 号点在测量坐标系下的三维坐标反映了天线中心随时间的变化。图 4 给出实验中在 5 个不同位置计算得到的姿态变化和位置移动示意图。

从实验结果看到,利用单台相机计算机视觉测量技术实现对机载 InSAR 基线的动态监测,在测量速度上是可以保证的。

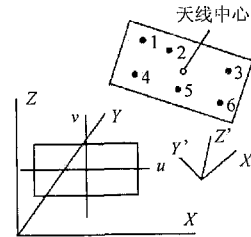


图 2 动态测量坐标系变换

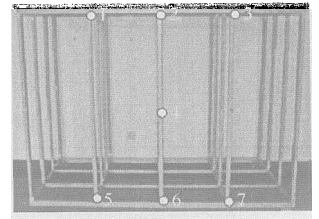
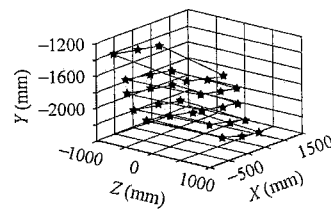
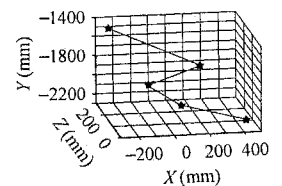


图 3 控制架上点位分布



(a) 模拟天线面姿态变化



(b) 模拟天线中心位置变化

图 4 姿态变化示意

4 精度评估实验

在对 InSAR 干涉基线测量方法进行定性实验的基础上,利用现有测量和实验设备,分别进行了静态和动态的测量精度评定实验。实验中用一个 $1000\text{mm} \times 600\text{mm}$ 的平板作为 InSAR 的模拟天线,模拟天线竖直地安装在高精度双频激光干涉测长系统的小车上。在模拟天线板上布设了 9 个回光反射标志点,并采用经纬仪测量系统对各标志点中心进行精确标定,精度为 $\pm 0.05\text{mm}$;如图 5 所示。测试相机 Nikon D2H 被固定在高稳定性三角架上,相机与模拟天线板的中心同高;三角架距双频激光干涉测长系统导轨约 3—4m;使用无线遥控快门连续拍摄。

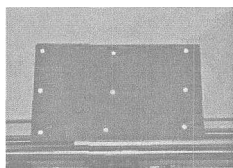


图5 在导轨上的模拟天线

4.1 静态测量精度实验

首先, 在模拟天线处于静止状态时进行单台相机计算机视觉测量精度实验。对模拟天线连续拍摄得到 9 幅照片。对 9 幅照片使用相同的内方位标定参数, 计算出同一标志点的三维坐标, 由表 2 给出。

对表 2 的测量数据分析表明, 在上述的实验环境下, X , Y , Z 3 个方向测量的均方根误差分量分别为: 0.096mm、0.030mm 和 0.037mm, 总测量均方根误差为 0.11mm。静态实验结果说明, 利用单台 Nikon D2H 数码相机对静止目标进行计算机视觉测量可以达到 0.1mm 的测量精度。

表 2 静态测量结果 单位: mm

序号	X	Y	Z
1	1207.33	1137.192	-499.79
2	1207.45	1137.17	-499.83
3	1207.45	1137.17	-499.83
4	1207.20	1137.23	-99.75
5	1207.17	1137.21	-499.75
6	1207.16	1137.17	-499.76
7	1207.26	1137.19	-499.80
8	1207.31	1137.18	-499.82
9	1207.28	1137.26	-499.72

4.2 动态测量精度实验

在计算机控制下安装在小车上的模拟天线以 50mm/s 速度沿导轨作直线运动, 同时 Nikon D2H 相机以 8 帧/秒的速度对目标连续拍摄获得多幅照片。为便于进行计算机图像处理, 相机选择弱曝光模式, 快门速度设定为 1/160s; 测试中锁定光圈和焦距。在不同运动方向和拍摄方式下进行了 3 次实验, 其中第 1、2 次实验中小车分别从左至右和从右至左运动, 相机采用横拍方式; 第 3 次实验中小车从左至右运动相机采用竖拍方式拍摄测量。

对每次实验获得的多幅照片利用专业视觉测量软件 PhotoModeler 进行图像处理, 并计算出各相片对应的相机中心点坐标。处理中假设模拟天线位置固定, 天线与相机之间的相对运动表现为相机中心沿着相反方向运动。而模拟天线及小车是在高精度双频激光干涉测长系统轨道上匀速运动, 轨道的直线度误差小于 $\pm 0.15\text{mm}$, 因此从多幅照片拟合出的相机中心轨迹应该是等同于小车轨迹的直线。于是, 可以利用相机测量的相机中心轨迹的直线度来评估动态测量误差。

第 1 次实验拍摄 56 幅照片, 经计算, 拟合的相机中心轨迹的直线度误差为 0.37mm, 起点至终点的测量距离与双

频激光干涉测长系统的测量误差为 0.41mm; 第 2 次实验拍摄 57 幅照片, 拟合的相机中心轨迹的直线度误差为 0.32mm, 起、终点间距离的测量误差为 0.01mm; 第 3 次实验拍摄 44 幅照片, 拟合的相机中心轨迹的直线度误差为 0.39mm, 起、终点间距离的测量误差为 0.10mm。

在双频激光干涉测长系统导轨上进行的单台相机计算机视觉测量精度评估实验表明, 无论是静态测量或动态测量, 测量精度优于 0.5mm, 相对测长精度和指向精度都优于 2×10^{-4} 。

5 结束语

本文提出利用单台相机计算机视觉测量方法实现机载 InSAR 基线动态监测的方法, 进行了原理性分析和实验研究。从原理性实验结果看到, 提出的单台相机计算机视觉测量方法是正确的。考虑到这种测量方案具有较好的测量精度和速率, 并且系统的集成度高, 我们认为, 将单台相机计算机视觉测量方案应用在机载干涉 SAR 基线的动态监测中是可行的。

参考文献

- [1] Graham L C. Synthetic interferometric radar for topographic mapping. *Proc. IEEE*, 1974, 62(6): 763 - 768.
- [2] Peng Hailiang, Shao Yi-ming, Song Fu-ming, Wu Yi-rong, Wang Lei, Li Lan. DEM generation using L-band airborne SAR data, IGARSS 2000, Honolulu Hawaii, USA, 2000: 764 - 766.
- [3] 王磊, 彭海良. 重复飞行机载干涉 SAR 的实验研究. *电子与信息学报*, 2002, 24(12): 1939 - 1946.
- [4] Wang Yan-ping, Peng Hai-liang. Locating calibrators in airborne InSAR calibration. IGARSS 2003, Toulouse, France. 2003: 4515 - 4517.
- [5] 彭海良, 王彦平. 机载合成孔径雷达干涉灵敏度分析. *高技术通讯*, 2004, 14(1): 17 - 20.
- [6] 冯文颢. 近景摄影测量的基本技术提要. *测绘科学*, 2000, 25(4): 26 - 30.
- [7] 王保丰. 计算机视觉工业测量系统的建立与标定. [硕士学位论文], 郑州: 解放军信息工程大学, 2004.
- [8] 李德仁, 王新华. CCD 阵列相机的几何标定. *武汉测绘科技大学学报*, 1997, 22(4): 308 - 313.
- [9] 李广云, 倪涵, 徐忠阳. 工业测量系统. 北京: 解放军出版社, 1994: 89 - 151.
- [10] 黄桂平. 多台电子经纬仪/全站仪构成混合测量系统的研究与开发. [硕士学位论文], 郑州: 解放军信息工程大学, 1999.

吴一戎: 男, 1963 年生, 研究员, 主要研究方向为微波遥感、合成孔径雷达系统设计和信号处理。

李广云: 男, 1965 年生, 教授, 主要研究方向为精密工程测量、工业测量与计算机视觉测量。