

文章编号:1002-2082(2010)06-0974-06

星载 InSAR 基线矢量方位动态测量方法研究

邓立新¹, 范清春², 杨建坤¹, 谭吉春¹

(1. 国防科学技术大学 理学院, 湖南 长沙 410073;

2. 北京控制工程研究所, 北京 100190)

摘要: 星载 InSAR 干涉基线矢量方位角的测量精度对整个系统的测绘精度有着十分重要的影响。针对星载 InSAR 测量系统对其干涉基线矢量方位角的测量要求, 给出了一种基于图像处理的 CCD 摄像测量方法。利用 CCD 摄像测量法对主副天线在平面内的相对位移进行了精确测量。分析了系统的理论误差, 构建了完整的实验系统, 并对光学靶标的固定步长位移进行验证性实验测量, 实验结果与理论分析值具有较好的一致性, 测量系统的测量精度优于 1σ , 证明了该测量方法具有很好的可行性。

关键词: 测量相机; 光学合作靶标; 干涉基线矢量; 靶标质心坐标

中图分类号: TB852.1

文献标志码: A

Azimuth angle measurement of space-borne InSAR interferometric baseline vector

DENG Li-xin¹, FAN Qing-chun², YANG Jian-kun¹, TAN Ji-chun¹

(1. Science College, National University of Defense Technology, Changsha 410073, China;

2. Beijing Institute of Control Engineering, Beijing 100190, China)

Abstract: The accuracy of space-borne InSAR interferometric baseline vector azimuth angle measurement is very important for improving system mapping accuracy. To meet the measurement accuracy requirement of a space-borne InSAR interferometric baseline vector azimuth angle, an optical metrology camera based on image processing is presented, an integrity experiment system is constructed, and the system measurement accuracy is analyzed theoretically. An experiment for optical target assembly with fixed displacement is used to validate the theoretical analysis of the system. The experiment result agrees with the result in theory, the system with arc-seconds accuracy is realized. It proved this approach is feasible for the space-borne InSAR interferometric baseline vector azimuth angle measurement.

Key words: metrology camera; optical target assembly; interferometric baseline vector; target centroid coordinates

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], 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^[2]。其中, 干涉基线是指内舱和外舱雷达天线相位中心之间的虚拟连线^[3-4]。

在航天飞行器的在轨飞行过程中, 飞行器相对于地面系统保持了一个相当稳定的姿态, 但由于振动(受飞行器内部系统影响)和热变形, 伸展臂的指

收稿日期: 2010-03-02; 修回日期: 2010-05-19

基金项目: 国家自然科学基金(60673147); 博士后科学基金(200904501445)

作者简介: 邓立新(1973-), 男, 湖南宁乡人, 博士, 主要从事光纤传感和航天测量研究。E-mail: d_lx@163.com

向方位和长度将会发生变化。这将影响到干涉高程测量精度。为此,需要通过基线测量系统获得伸展臂指向方位和长度的低频变化,并在后续的地面处理中加以补偿。

在对干涉基线的测量过程中,可将测量分为两部分进行,即干涉基线的长度测量和干涉基线的矢量方位测量。一般情况下,为了保证测量精度,将干涉基线的长度测量和干涉基线的矢量方位测量分开进行。对于干涉基线长度测量,可根据需要选择合适的激光测距仪进行改装而成^[6],因所用的方法具有通用性,本文不对干涉基线的长度测量进行分析,主要对干涉基线的方位测量进行方法研究。

对小角度进行精确测量的方法有很多,如莫尔条纹方法、位置敏感器(PSD)方法以及CCD摄像测量方法等。但根据InSAR干涉基线测量的任务背景,认为CCD摄像测量方法比较符合测量任务的要求。其主要原因是因为在轨飞行过程中,副天线在侧向(垂直于干涉基线方向)运动的范围过大。如果采用位置敏感器的测量方法,则对位置敏感器的探测范围要求过大,如副天线 $50\text{ cm} \times 50\text{ cm}$ 的侧向运动范围对应位置敏感器的探测范围要求为 $100\text{ cm} \times 100\text{ cm}$,而一般PSD的探测面积仅为 $2\text{ cm} \times 2\text{ cm}$,所以用这种方法无论在成本上和技术方法上都是难于实现的。而运用莫尔条纹技术的小角度测量方法也同样会受到探测范围的局限。

选用CCD摄像测量系统,则可很好地解决这个问题^[6],因为CCD摄像测量系统是通过成像方法和图像处理方法来对副天线的运动进行测量,只要副天线的侧向运动范围没有超出CCD摄像测量系统的中心视场,测量便不会受到影响。在测量距离为 29 m 的情况下,对应的视场角要求为 3° 左右,一般的测量相机均能满足测量要求。

1 CCD摄像测量法

基线的矢量方位主要和基线两端在平面内的相对运动有关^[7],基线矢量方位角的计算一般通过对主、副天线在平面内的相对位移的精确测量,然后再通过三角关系转换求得。CCD摄像测量法主要是对主、副天线在平面内的相对位移进行精确测量。在测量过程中,CCD摄像机一般安装在卫星的本体上,与主天线形成刚性固联,其相对位置可通过固定的坐标转换关系式求得。CCD摄像系统主要针对副天线的相对运动进行测量,而由于副天线本身并不具有光学可测量性,一般通过在副天线上

加装光学合作靶标的方法来完成光学标识^[8],光学合作靶标选取具有合适波长、半谱宽度和亮度的发光二极管^[9],如图1所示。

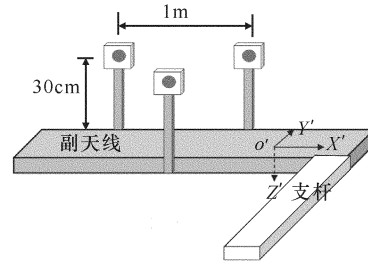


图1 光学合作目标阵列

Fig. 1 Layout of optical target assembly

1.1 CCD成像与测量原理

CCD摄像测量系统的成像光路示意图,如图2所示。

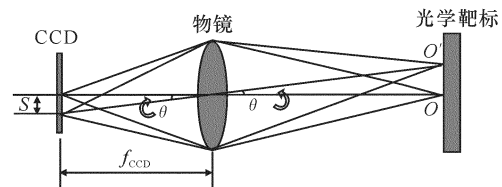


图2 CCD摄像测量系统成像光路示意图

Fig. 2 Schematic diagram of CCD camera imaging

从图中可以看出,CCD摄像测量系统中存在如下关系式

$$\tan\theta = S/f_{\text{CCD}} \quad (1)$$

式中: f_{CCD} 为CCD摄像测量系统的焦距。

从(1)式中可以发现,CCD摄像测量系统的分辨率主要与焦距 f_{CCD} 和感光像元的尺寸有关。设单个像元的尺寸为 S ,则摄像测量系统的角分辨率为

$$\theta \approx \tan\theta = S/f_{\text{CCD}} \quad (2)$$

从上式可以看出,在光学成像系统的焦距 f_{CCD} 一定的情况下,感光像元尺寸越小,摄像机分辨率就越高。

1.2 影响测角精度的几个因素

1.2.1 图像目标的亚像元定位误差

像点提取普遍采用亚像元技术以提高精度。在实际CCD探测面上,像点不是集中于一个像元,而是采用离焦手段,使像点成为一个分布在几个像元上的模糊斑点,然后通过亚像元定位技术计算得到像点的位置坐标,如图3所示。

以普遍采用的质心法为例,像点位置 (x_o, y_o) 的计算公式为

$$x_o = \frac{\sum \sum x' I(x', y')}{\sum \sum I(x', y')}$$

$$y_0 = \frac{\sum \sum y' I'(x', y')}{\sum \sum I'(x', y')} \quad (3)$$

式中: (x', y') 为光学目标在 CCD 上所成像元的位置; $I'(x', y')$ 为该像元的信号强度。

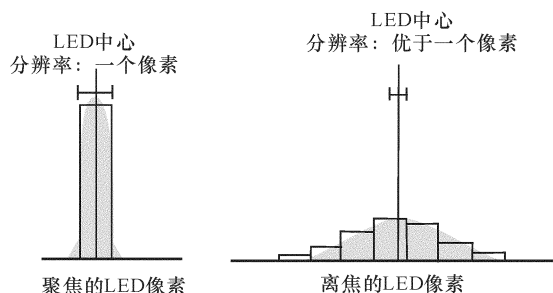


图3 亚像元内插质心提取示意图

Fig. 3 Sketch map of calculate method of sub-pixel centroid

上述亚像元内插质心法计算得到的光斑能量中心并非实际的质心,产生相应的误差。误差源包括像点大小、像元数量、像点坐标在像元的位置等系统性因素。

对图像中目标进行高精度定位是提高光测系统测量精度的最重要环节之一。例如,当算法的精度为 0.1 个像素,则相当于测量系统的硬件分辨率提高了 10 倍。通过计算分析,我们得出在理想情况下灰度质心法的精度可以达到 (0.2~0.5) 个像素,亚像素步长相关法的精度为 (0.02~0.1) 个像素,相关函数拟合极值法的精度为 (0.01~0.1) 个像素。选择不同的质心算法,可以得到不同的测量精度,但是其运算速度也不尽相同。因此选择何种算法,要根据实际情况而定。

1.2.2 摄像系统参数及热影响

成像系统的焦距变化对测量精度的影响很大,当测量系统在太空环境下工作时,因为太阳光辐射而引起温度变化范围大,所以尤其要考虑这一点。这也是影响系统测量精度的主要因素之一。

光学测量系统的成像示意图如图 4 所示。根据小孔成像模型的成像公式,像点的位置与光学成像系统的焦距存在如下的关系式

$$S' = f \times \tan \theta \quad (4)$$

当 f 变化为 $f + \Delta f$ 时,像点相应的位置变化为 $\Delta S' = \Delta f \times \tan \theta$ (5)

根据光学测量系统的测角关系式

$$\theta = \arctan\left(\frac{1}{f_{\text{CCD}}} \times S'\right) \quad (6)$$

S' 变化为 $S' + \Delta S'$ 对光学测量系统的测角精度将引入的测角误差为

$$\Delta \theta = \arctan\left(\frac{1}{f_{\text{CCD}}} \times \Delta S'\right) \quad (7)$$

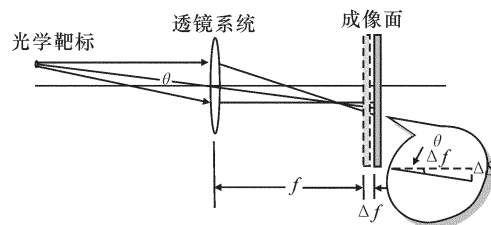


图4 焦距变化对像点定位精度的影响

Fig. 4 Influence of focus length variety on image point positioning precision

在设计过程中,光学成像系统需包含过无热化设计、远心光路设计以及温度控制系统设计等几个方面。经过这些措施后摄像系统受热引起的焦距变化 Δf 一般在 $10 \mu\text{m}$ 左右,在较小的视场角,引入的角度定位误差较小。

1.2.3 CCD 摄像系统的标定误差

因为光学成像系统像差、色差以及前述的像点定位误差的存在,CCD 摄像系统的标定误差也是系统误差的主要来源之一。

实验中采用如下的标定方法:以精度较高的平面网格板作为标定的基准,用摄像机拍摄网格图像,实际拍摄时对摄像机光轴不要求与网格板严格垂直。根据网格图像进行三步法的标定求解^[10]。

在严格的实验条件下,摄像系统的标定精度可优于 $1 \mu\text{m}$,对应为 0.1 个像素。

2 实验及实验结果分析

以 29 m 长基线矢量方位为测量对象进行实验研究,CCD 摄像测量系统的焦距 $f_{\text{CCD}} = 105 \text{ mm}$,CCD 像元的大小为 $13 \mu\text{m}$ 。实验系统的工作流程如图 5 所示。

2.1 图像处理软件

我们所编写的图像处理软件是 CCD 摄像系统进行干涉基线矢量方位测量的系统操作软件,主要包括了系统对靶标图像的自动(手动)采集、靶标像点的亚像元定位算法以及基线矢量方位的转换算法。系统的主界面如图 6 所示,在该界面上可以选择图像采集的方式以及测量系统的其他相关功能。从主界面进入系统的基线矢量方位测量界面,如图 7 所示,在该界面上首先根据 CCD 摄像系统的实际

参数进行参数选择,然后即可进行基线矢量的方位测量与显示。

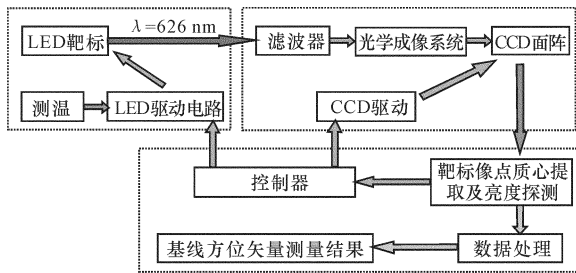


图5 CCD摄像测量系统工作流程图

Fig. 5 Operation flow chart of CCD camera system



图6 主界面

Fig. 6 Interface of main program



图7 基线矢量方位测量界面

Fig. 7 Interface of baseline vector azimuth angle measurement

2.2 干涉基线矢量方位测量

测量固定移动步长下的光学靶标,对上一节分析的CCD摄像测量系统的精度进行验证性实验测量。

InSAR 测量系统干涉基线的长度一般较长,由于实验场地的限制,在本文中我们仅对长度为29 m的干涉基线的矢量方位变化进行测量。

实验条件如下:所采用的CCD摄像测量相机为 ANDOR Classic PCI CCD 相机,这是一款科学型的低速扫描相机,焦距 $f_{\text{CCD}}=105$ mm,像素大小为 $13 \mu\text{m}$,图象大小为 512×512 ,相机到光学靶标的距离为 29 m。光学靶标的移动通过精密的机床来控制,最小刻度为 0.005 mm,光学靶标沿水平方

向(x 轴)进行移动,移动的步长为 0.5 mm。

2.2.1 光学靶标移动步长对应像点坐标变化的理论值计算

根据图2所示CCD摄像测量系统成像模型,光学靶标移动 $dx=0.5$ mm 对应像点在CCD成像面上的移动距离 ds 应满足如下关系式

$$\frac{ds}{f_{\text{CCD}}} = \frac{dx}{l} \quad (8)$$

式中: l 为光学靶标到测量相机的距离。

将已知参数代入(8)式,可得

$$ds = (1.81 \times 10^{-6}) \text{ m} \quad (9)$$

转换为以像素点表示的坐标系,有

$$ds = 0.139257 \text{ (像素)} \quad (10)$$

2.2.2 光学靶标移动对应像点坐标变化的测量

在前述实验条件下对光学靶标的移动进行实验测量,选取处于视场中心的光学靶标为测量对象,以光学靶标未移动时所采集的第一幅图象记录的光学靶标位置作为初始状态。在实验程中,光学靶标从左向右平行移动,步长 $ds=0.5$ mm,一共测量20组数据。数据记录如表1所示。

此外,为了便于对系统进行下一步的精度分析,将(8)式~(10)式所推导的光学靶标像点坐标变化对应的理论值也列于表1。

表1 光学靶标移动步长 $dx=0.5$ mm 时对应像点的坐标值(像素值)

Table 1 Coordinates (pixels) of imaging point with optical target moving step $dx=0.5$ mm

图像序列	X轴测量值	X轴理论值	Y轴测量值	Y轴理论值
1	236.688	236.688	205.2	205.2
2	236.827	236.827	205.195	205.2
3	236.95	236.966	205.196	205.2
4	237.077	237.105	205.203	205.2
5	237.201	237.245	205.2	205.2
6	237.32	237.384	205.183	205.2
7	237.55	237.523	205.227	205.2
8	237.692	237.662	205.204	205.2
9	237.798	237.802	205.227	205.2
10	237.963	237.941	205.207	205.2
11	238.067	238.080	205.239	205.2
12	238.217	238.219	205.226	205.2
13	238.333	238.359	205.246	205.2
14	238.567	238.498	205.224	205.2
15	238.696	238.637	205.254	205.2
16	238.805	238.776	205.225	205.2
17	238.95	238.916	205.241	205.2
18	239.066	239.055	205.245	205.2
19	239.193	239.194	205.25	205.2
20	239.331	239.333	205.255	205.2

测量结果如图8所示。

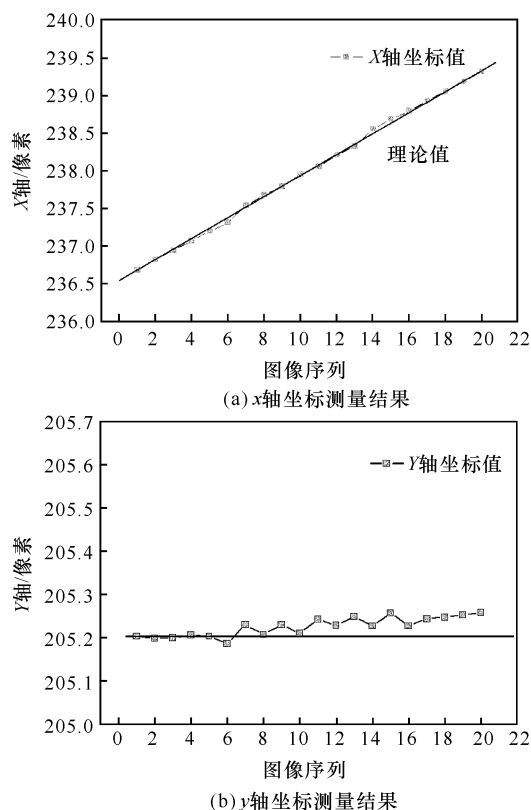


图8 光学靶标像点坐标变化的测量结果图
Fig. 8 Measurement result of optical target imaging point coordinates

2.2.3 测量系统精度计算

由表1所测量的结果,可分别求得测量系统在成像面对光学靶标坐标位置测量的标准误差

$$\sigma_x = 0.032\ 66(\text{像素}), \sigma_y = 0.032\ 05(\text{像素})$$

根据光学系统成像原理进行关系转换,可求得测量系统对光学靶标所指示的干涉基线矢量方位测量的标准误差为

$$\sigma'_x = 0.834'', \sigma'_y = 0.817''$$

在对系统的精度进行分析的过程中发现,系统在 y 轴方向的测量精度要高于 x 轴方向的测量精度,这是因为操作中是对光学靶标的水平移动进行测量,光学靶标在垂直方向(y 轴)是处于静止的,没有额外的误差引入量,而光学靶标在沿水平方向(x 轴)移动时,在移动过程中会引入相应的读数误差,这也就是造成系统在 y 轴方向的测量精度要稍高于 x 轴方向的测量精度的主要原因。

3 结束语

在基于图像处理的 CCD 摄像测量方法中,受

影响的条件较多,主要分为硬件和软件两方面。其中硬件条件主要包括成像系统的焦距、成像面元的大小等,软件条件主要包括系统所采用的亚像素定位算法、成像系统的标定方法等方面。本文中对星载 InSAR 测量系统对其干涉基线矢量方位角的测量要求,给出了一种基于图象处理的 CCD 摄像测量方法,分析了系统的理论误差,构建了完整的实验系统,并对光学靶标的不同位移量进行验证性实验,实验系统测量精度优于 1σ ,结果与理论分析值具有较好的一致性,表明了该实验方法具有很好的可行性。

参考文献:

- [1] GRAHAM L C. Synthetic interferometric radar for topographic mapping[J]. Proc. IEEE, 1974,62(6): 763-768.
- [2] 吴一戎,李广云,王宝丰,等.单台相机机载InSAR基线动态测量方法研究[J].电子与信息学报,2005,27(6):999-1001.
- [3] WU Yi-rong, LI Guang-yun, WANG Bao-feng, et al. The dynamic measurement scheme based on single camera for the airborne InSAR baseline[J]. Journal of Electronics & Information Technology, 2005, 27(6):999-1001. (in Chinese with an English abstract)
- [4] DUREN R, WONG E, BRECKENRIDGE B, et al. Salomon metrology attitude and orbit determination for spaceborne interferometric synthetic aperture radar[J]. SPIE Int. Soc. Opt. Eng., 1998, 3365: 51-60.
- [5] FRANCESCHETTI G, IODICE A, MADDALUNO S, et al. Effect of antenna mast motion on X-SAR/SRTM performance[J]. IEEE Trans Geosci Remote Sens, 2000, 38: 2361-2372.
- [6] DUREN R, TUBBS F. A modified commercial surveying instrument for use as a spaceborne rangefinder[J]. Proceedings of the IEEE, Aerospace Conference, 2000(3): 18-25.
- [7] DUREN R, LIEBE C. The SRTM sub-arcsecond metrology camera[J]. Proceedings of the IEEE, Aerospace Conference, 2001(3): 36-45.
- [8] GEUDTNER D, ZINK M, GIERULL C, et al. Interferometric alignment of the X-SAR antenna system on the space shuttle radar topography mission [J]. IEEE Trans Geosci Remote Sens, 2002, 40: 995-1006.

-
- [8] SLATER J A, GARVEY G, JOHNSTON C, et al. The SRTM data'finishing'process and products[J]. Photogramm Eng. Remote Sens, 2006,72:237-247.
- [9] WONG EDWARD, BRECKENRIDGE WILLIAM, BOUSSALIS DHEMETRIOS, et al. Post-flight attitude reconstruction for the shuttle radar topography mission Conference[C]. Quebec :AAS/AIAA-01-314,2001:1-24.
- [10] 于起峰, 陆宏伟, 刘肖琳. 基于图像的精密测量与运动测量[M]. 北京:科学出版社, 2002.
- YU Qi-feng, LU Hong-wei, LIU Xiao-lin. The precision measurement and movement measurement based on image[M]. Beijing: Science Press,2002. (in Chinese)