

可见探测器微缝拼接几何特性研究

龚学艺¹ 陈凡胜¹ 苏晓峰¹ 黄思婕¹ 刘 强²

(¹ 中国科学院上海技术物理研究所红外探测与成像技术实验室, 上海 200083)
(² 中国科学院上海技术物理研究所红外成像材料与器件重点实验室, 上海 200083)

摘要 探测器拼接几何参数获取是验证以及评价拼接成功的关键因素之一,但几何参数获取技术的系统性方法一直没有形成。对于探测器微缝拼接过程中的两个探测器之间的旋转,与狭缝垂直方向的平移,狭缝宽度等重要几何量,基于成像的测试方法可以给出非常准确的结果。另外,利用影像测量仪可以对探测器拼接狭缝的平均宽度进行实际测量,两者结果类似。证明基于成像的测试方法能够一次性完成多种几何特征量的测试,并且能够保证较高精度,这正好满足航天应用快捷、高精度的需要,可以为探测器微缝拼接提供强有力的技术支持。

关键词 探测器; 探测器拼接; 几何特征; 狭缝; 旋转; 航天应用

中图分类号 O436 文献标识码 A doi: 10.3788/CJL201441.s114002

Study on the Geometric Characteristics of Micro-Seam Stitching Detectors

Gong Xueyi¹ Chen Fansheng¹ Su Xiaofeng¹ Huang Sijie¹ Liu Qiang²

¹Key Laboratory of Infrared System Detection and Imaging Technology, Shanghai Institute of Technical Physics, Chinese Academy of Sciences, Shanghai 200083, China
²Key Laboratories of Infrared Imaging Materials and Detectors, Shanghai Institute of Technical Physics, Chinese Academy of Sciences, Shanghai 200083, China

Abstract The geometric parameters acquisition of splice detector is the most important thing to validate and evaluate the success of splice, but there is no systematic approach to solve it. For the rotation between the two detectors, the translation of the vertical slit, the slit width and other geometric parameters, the method based on imaging can give very accurate results. On the other hand, the smart-scope can give us the actual mean width of detector splicing, and the results are similar to the above. It proves that the method based on imaging can complete various geometric parameters tests with a very high precision. It just meets the needs of easy and high precision of the aerospace application, and it can provide powerful technical support for the detector slit splicing.

Key words detectors; detector assembly; geometric characteristics; slit; rotation; aerospace applications

OCIS codes 140.2010, 140.3300

1 引 言

在航天遥感载荷设计领域,对于遥感仪器的时间和空间分辨率这两个指标的要求越来越高,因此航天用探测器面阵规模需求不断的提高,但这与目前探测器的发展水平相互制约。可以通过其他的辅

助方法来扩展探测器面阵规模,比如将较小的探测器进行拼接,等效为一块大面阵探测器,最终实现与大规模探测器类似的成像效果。目前可以选择的探测器拼接方法多种多样,但就成像的效果而言可以分为两大类:1)无缝探测器拼接;2)微缝探测器

收稿日期: 2013-10-23; 收到修改稿日期: 2013-11-12

基金项目: 中国科学院红外成像材料与器件重点实验室开放基金

作者简介: 龚学艺(1987—),男,博士研究生,主要从事航天信息获取以及遥感仪器的定量化应用等方面的研究。

E-mail: xygong@mail.ustc.edu.cn

导师简介: 陈凡胜(1978—),男,博士,副研究员,主要从事空间小型监视相机、高空间分辨率遥感相机和空间点目标探测等方面的研究。E-mail: cfs@mail.sitp.ac.cn

拼接^[1]。无缝拼接较为成熟,主要应用于拼接面阵数量较多的情况。微缝拼接在探测器面阵规模较大,所需拼接的探测器平面数较少时应用较为广泛^[2]。以实现地球圆盘覆盖为例,在保证星下 50 m 的空间分辨率要求时,需要保证探测器面阵规模达到 25.6 k×25.6 k 以上。目前中国科学院上海技术物理研究所已经实现单片大规模可见探测器的研制,这为满足需求的大规模面阵探测器的实现提供了强有力支持,在这种情况下微缝拼接便称为必然选择。在实际的项目应用过程中,微缝拼接完成后需要重点关注拼接后不同探测器之间的几何特性。主要包括不同探测器间的拼接缝宽,相对旋转角度以及竖直水平方向的平移。本文将从三个方面对探测器几何特性研究方法进行说明,分别是基于成像的测试原理说明,实际的成像测试结果及利用 CNC500 的测试对比,最后对整个测试方法进行总结,证明基于成像的探测器拼接几何特性研究方法满足航天应用需求。

2 原理说明

在航天应用领域为了实现高时间高空间分辨率的对地成像,需要尽可能提高探测器的等效像元规模。而在目前探测器工艺水平前提下,拼接成了必然选择,图 1 为一种基于探测器管脚 L 型分布技术的探测器拼接示意图。该方法主要用于探测器规模本身较大条件下的小数量探测器扩展。

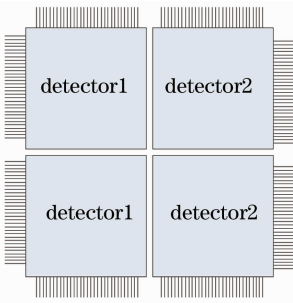


图 1 L 型探测器拼接示意图

Fig. 1 Schematic diagram of the L detector assembly

在探测器拼接过程中由于某些偶然和必然的因素会导致拼接效果不理想,这些因素导致的宏观影响主要体现在以下几个方面:1) 竖直和水平方向的平移,如图 2 所示;2) 以一块探测器为基准,另一块探测器相对于它的旋转角度,如图 3 所示;3) 由于单块探测器本身的像素规模较大,多通道并行读出是其必然选择,通道间存在一定数量的固定宽度的无效成像区域,这些区域不参与成像,可以等效认为是

探测器拼接间的狭缝,如图 4 所示;4) 探测器边缘存在的成像盲区,在探测器的制作工艺中,为了保证设计像元的完好性,边缘留出空白区(一般为非直线的不规则区)可以为像元本身提供很好的保护作用,如图 4 所示。

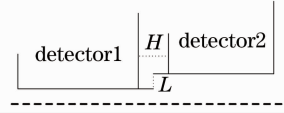


图 2 探测器间的水平和竖直平移

Fig. 2 Horizontal and vertical translate on between the detectors

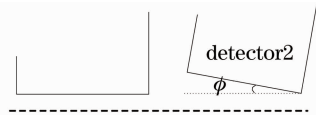


图 3 探测器间的旋转

Fig. 3 Rotation between between the detectors

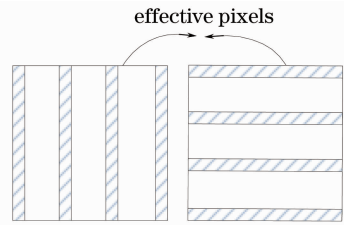


图 4 探测器边缘和通道间的无效像元区域

Fig. 4 Invalid pixel area of the detectors' edge and the inter channel

上述四类因素共同影响拼接完成后的等效探测器成像效果,需要分别对这四类拼接误差进行研究测试,以获取其具体参数。从而完成最终的图像校正过程。

为了准确地分析测试上述四个位置偏移量的具体数值,可以采用基于成像的间接式测试方法。该方法的主要原理为:假定一条既定的直线 L 可以在探测器焦平面上正确成像,成像需满足以下条件:1) 直线跨越两块探测器焦平面,即直线有部分实像落入拼接狭缝内;2) 直线经过光学系统所成的实像与探测器中轴缝(水平或者垂直方向)成某一确定的夹角 θ 。由于与中轴缝成某一确定的夹角这一条件在实际操作中几乎不可实现,可以利用多条直线 $\{L_1, L_2, \dots, L_n\}$ 相邻两条之间成夹角为 $\{\Delta\theta_1, \Delta\theta_2, \dots, \Delta\theta_{n-1}\}$ 。

经过合适的光学系统后在探测器焦平面上成像,利用物像相似的原理可知,在像平面上会得到相对应的 n 条直线 $\{L'_1, L'_2, \dots, L'_n\}$,它们之间的夹角仍然为 $\{\Delta\theta_1, \Delta\theta_2, \dots, \Delta\theta_{n-1}\}$,利用夹角不变形原理可以构建拼接几何量同夹角之间的关系式。下面以

两条直线为例对上述过程做出简单说明。如图 5 所示,两条直线 L_1 和 L_2 在焦平面上成像,由于狭缝不连续效应,在焦平面上成像为四条相对应的直线 $\{L'_1, L'_2, L'_3, L'_4\}$,这四条直线中 L'_1, L'_2 为直线 L_1 所对应的像, L'_3, L'_4 为直线 L_2 所对应的像,这四条像平面直线与探测器边缘的交点分别为 $P_1(x_1, y_1), P_2(x_2, y_2), P_3(x_3, y_3), P_4(x_4, y_4)$, 由于上述平移、旋转、无效像元等因素的存在,导致上述四点的图像位置与像面位置存在较大差异,具体来说两者夹角与相对应的四个交点之间存在如下关系式:

$$\tan \Delta\theta_1 = \tan |\theta_1 - \theta_2| = \frac{|\tan \theta_1 - \tan \theta_2|}{1 + \tan \theta_1 \tan \theta_2} = \frac{|x_1(h_1 - h_2) + (h_1 + \Delta h)L \tan \varphi|}{x_1(x_1 + L \tan \varphi) + (h_1 + \Delta h)(h_2 + \Delta h)}, \quad (1)$$

式中 x_1 为需要求解的狭缝宽度值(对应与 P_1 点位置处), h_1 为直线 L_1 在狭缝两端出现的竖直坐标变化值, h_2 为直线 L_1 在狭缝两端出现的竖直坐标变化值, Δh 为竖直方向的探测器拼接偏移, L 为两条线段在狭缝左侧竖直方向上坐标值的差, $\tan \varphi$ 为探测器拼接旋转角度的正切值, $\tan \Delta\theta$ 为两条直线夹角的正切值。

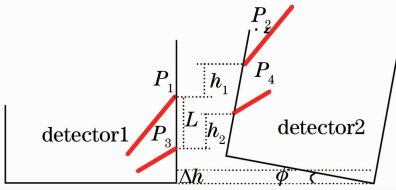


图 5 直线在狭缝处的成像

Fig. 5 Imaging line on the slit

3 可实现方法论述

在原理说明中,已经提供了一种计算某一特定像素点位置处的狭缝宽度值方法,但是该方法存在以下几点不足,导致其不适合实际应用^[3]。1) 计算量较大,利用相关的数学软件解(1)式,效率较低,需要花费较大的资源和较长的时间;2) 一次性可求得的几何误差量较少,不满足初始目标;3) 目标单一,可利用的实际样本数较少,增大了计算误差。为了解决上述问题,提出了相对应的解决方案,主要依托于探测器拼接的平移以及无效像元等因素不影响直线在狭缝两端的斜率变化,如图 6 所示在拼接狭缝的两端,像平面的直线发生断裂,焦平面 1 和 2 上同一直线的像异化为两条,分别为 L_1 和 L_2 ,两者之间存在一个旋转角 φ 。旋转角度 φ 与探测器拼接所产生的水平和竖直方向的平移与无效像元等因素均没

有关系,只与探测器间的旋转相关。因此可以认为直线在断裂处的异化所产生的倾斜角变化直接便是探测器拼接过程中的旋转量。为了使测试结果尽可能准确,实验中成像目标为 3 条成一定夹角的直线,利用这三条直线分别计算出其所对应的 3 个不同的旋转角度值(样本量尽量取大,得到更标准的旋转角度值),利用这三个角度值,对其进行加权求平均可以得到更为准确的结果。

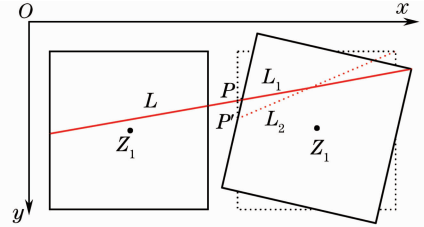


图 6 探测器拼接狭缝两端直线的旋转

Fig. 6 Rotation of the lines between on the two sides of the slit

在 Matlab 坐标系中,图像所有部分关于 x 轴对称,图 6 右侧所示的探测器示意图,在旋转的前后有着如下所述的异同点,旋转前的点 P 和旋转后的点 P' 分别到旋转前后的正方形探测器中心点的距离相等,假设距离都为 r ,则 $P(x, y), P'(x', y')$,原始正方形中心点坐标为 $Z_2(a, b)$,如果只是绕中心点旋转,中心点坐标保持不变。但是如果有平移,中心点坐标将会发生变化,假定正方形向 y 轴负方向平移 h 个单位, x 轴正方向移动了 m 个单位。则导致中心点 $Z_2(a, b)$ 变为 $Z'_2(a, b-h)$, $P'(x', y')$ 的坐标具体表示为

$$\begin{cases} x' = a + r \cos \theta \\ y' = b + r \sin \theta \end{cases} \quad (2)$$

假设探测器绕中心旋转的角度如上图所示 φ ,此时的旋转方向在正常坐标系的环境中来看的话是顺时针旋转(将上图的图形关于 x 轴做一次镜像,便可以得到最终的标准坐标系中的图像),于是 $P(x, y)$ 的坐标表达式可以化为

$$\begin{cases} x = (a + m) + r \cos(\theta - \varphi) \\ y = (b - h) + r \sin(\theta - \varphi) \end{cases}, \quad (3)$$

将(2)式代入(3)式,对其中的三角量做相应的变换可以求得

$$\begin{cases} r \sin(\theta - \varphi) = r \sin \theta \cos \varphi - r \cos \theta \sin \varphi = \\ (y' - b) \cos \varphi - (x' - a) \sin \varphi, \\ r \cos(\theta - \varphi) = r \cos \theta \cos \varphi + r \sin \theta \sin \varphi = \\ (x' - a) \cos \varphi + (y' - b) \sin \varphi \end{cases}, \quad (4)$$

于是可以得到旋转平移后的 $P'(x', y')$ 点坐标值为

$$\begin{cases} x = (a + m) + (x' - a) \cos \varphi + (y' - b) \sin \varphi \\ y = (b - h) + (y' - b) \cos \varphi - (x' - a) \sin \varphi \end{cases} \quad (5)$$

式中的相关参数物理含义如下： a 为旋转平移前探测器的中心点横坐标， b 为旋转平移前的探测器中心点纵坐标， h 代表探测器往 y 轴负方向平移的单位数， x 为旋转平移前 P 点的横坐标值， y 为旋转平移前 P 点的纵坐标值。 φ 为探测器逆时针旋转的角度，若为顺时针则为 $-\varphi$ 。

基于探测器拼接过程中的旋转和平移规律，可以较为方便地给出此时的探测器狭缝测试原理，具体过程如下。

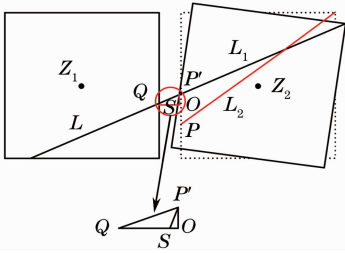


图 7 几何量测试方法

Fig. 7 Geometry test method

在探测器顺时针旋转的过程中(Matlab 坐标系中,此时狭缝右侧直线的斜率比之相对应的左侧直线斜率大),如图 7 所示,缝宽 $\vec{QS} = \vec{QO} - \vec{SO}$,假定 $Q(x_0, y_0)$, 则

$$\begin{aligned} \vec{QO} &= (y - y_0) \cot(\arctan k_1), \\ \vec{SO} &= (y - y_0) \tan \varphi, \end{aligned} \quad (6)$$

于是可以得到

$$\vec{QS} = \vec{QO} - \vec{SO} = (x - x_0) - (y - y_0) \tan \varphi. \quad (7)$$

同一条直线在探测器焦平面上出现两个不同的成像结果,两个像之间存在夹角 θ , θ 只来源于拼接时探测器焦平面的旋转,为了更准确地得到旋转角度值,可以采用物方平面多条直线成像的方法,最后对不同的 θ 值取平均,可得到加权平均后的旋转角度为

$$\varphi = \frac{\theta_1 + \theta_2 + \dots + \theta_n}{N}. \quad (8)$$

如上述方法可以首先得到拼接量中的旋转角度,然后,依据探测器的旋转角度来计算最终的各参数值,在直线断开处的两端狭缝宽度存在如图 8 所示关系。

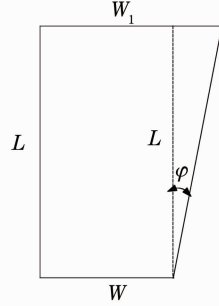


图 8 断开处的狭缝宽度关系

Fig. 8 Relationship between the slit widths

图 8 为两组直线对所分别对应的狭缝宽度关系图, W 为探测器上所成直线纵坐标较小处的狭缝宽度值, W_1 为探测器上所成直线纵坐标较大处所对应的狭缝宽度值。两者存在如下关系:

$$W_1 = W + L \tan \varphi, \quad (9)$$

依据(6)式和(8)式所得的分析结果,选取成像目标中的任意两条直线可以列出如下所示的三元一次方程组:

$$\begin{cases} W = (x - x_0) - (y - y_0) \tan \varphi \\ W_1 = (x_2 - x_1) - (y_2 - y_1) \tan \varphi, \\ W_1 = W + L \tan \varphi \end{cases} \quad (10)$$

式中相关的参数含义与(7)式中相同,对于 W_1, x_1, x_2, y_1, y_2 则为同样含义下的另外一条直线在探测器拼接狭缝处的边缘交点。由于在图像中只能得到异化后的成像结果,所得图像中的点 $P'(x', y')$, $P'_1(x'_1, y'_1)$ 分别对应于探测器几何位置中的点 $P(x, y), P_1(x_1, y_1)$, 对于点 $P(x, y), P_1(x_1, y_1)$ 可以得到其所对应的实际坐标位置,但是(10)式中计算所用到的应该是探测器的具体几何位置坐标值,通过(5)式则可以实现探测器具体几何坐标数值和异化后图像坐标之间的对应,将(5)式代入(10)式有

$$\begin{cases} W = \{[(a + m) + (x' - a) \cos \varphi + (y' - b) \sin \varphi] - x_0\} - \\ \quad \{[(b - h) + (y' - b) \cos \varphi - (x' - a) \sin \varphi] - y_0\} \tan \varphi \\ W_1 = \{[(a + m) + (x'_2 - a) \cos \varphi + (y'_2 - b) \sin \varphi] - x_1\} - \\ \quad \{[(b - h) + (y'_2 - b) \cos \varphi - (x'_2 - a) \sin \varphi] - y_1\} \tan \varphi \\ W_1 = W + L \tan \varphi \end{cases} \quad (11)$$

式中相关量均为已知量,具体定义已经在上文中有着详细的说明。利用上述方法可以很方便的完成探测器拼接相关几何量的测试。

4 实测及验证

依据第二部分所述的基于成像的间接式测试方法,可以利用基于已拼接完毕的 $2.5\text{ k} \times 2.5\text{ k} \times 4$ 可见探测器(图 9)成像系统对某一预先设定的目标进行成像,这一预先设定的固定目标依据上文所述选用若干条成已知夹角的直线,实验中为了计算方便,选用 3 条成已知夹角的直线,如图 10 所示。

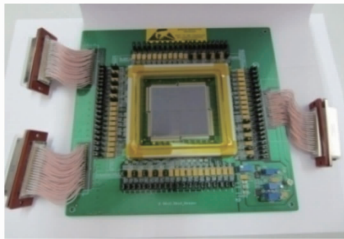


图 9 待分析探测器图
Fig.9 Detector to analysis

图 10 中共有三条相交的直线作为目标,从上至下分别为 L_1, L_2, L_3 三者之间的夹角从上至下至整

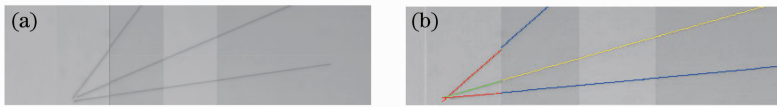


图 11 (a) 直线成像的部分区域图; (b) 拟合直线图
Fig.11 (a) Part of straight lines image; (b) graph of the linear fitting

图 11 给出了部分区域的成像结果,由于探测器的多通道读出,图中还未进行通道以及探测器间的非均匀性校正。另外受到系统 MTF 的影响,图中直线上的每一点均不是单像素点,考虑垂直方向时,在同一列 K 中的 n 个像素点 $P_i(X_k, Y_i) (i=1, 2, 3, \dots, n)$ 在直线成像范围内的每一点所在的列方向上均需要求出直线上的点所处的中心位置,采取高

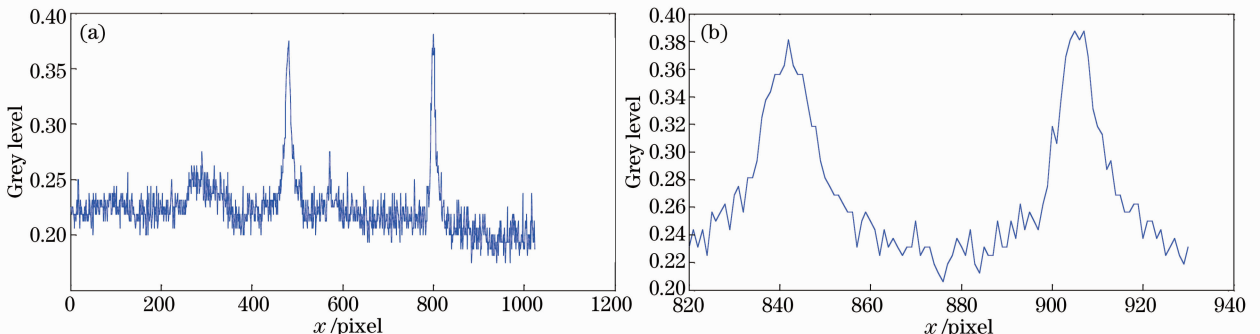


图 12 (a) 单列像素灰度值纵坐标分布图; (b) 局部放大图

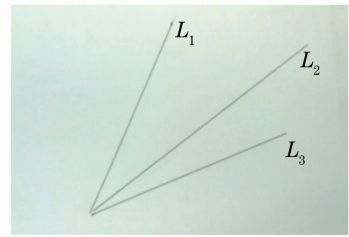


图 10 待成像的目标图像
Fig.10 Target to be imaged

斯加权求和^[5]的方式求得最终的加权点所在的位置,列方向上的像素灰度值纵坐标图像服从高斯分布,图 12 所示为某一列上的像素值纵坐标的整体以及局部放大图。
为了求得图 12 中所示的列方向的若干个目标点的准确坐标值,首先需要确定图 11 中所示的某一个点的峰值大概位置,在该位置两侧合理地选择某

Fig.12 (a) Distribution of the pixel gray value and the points longitudinal coordinate; (b) partial view of the two points

些像素点,这便是上文所述的 $P_i(X_k, Y_i) (i = 1, 2, 3, \dots, n)$ 的由来。在峰值点位置的初步确定阶段需要对已知的列灰度值曲线进行滤波操作^[6-7], 滤除不相关的伪峰值点, 然后对处理过后的列灰度值曲线进行找极点操作便可以得到所需要的峰值点初步位置。初步位置确定后, 分别取该位置的前后等量的 50~100 个点作为精确位置确定中的加权序列, 具体的加权计算方法为

$$\begin{cases} Y_i = (\sum_{j=-l}^m H_{i,j} Y_{i,j}) / (\sum_{j=-l}^m Y_{i,j}) \\ X_i = X_i \end{cases}, \quad (12)$$

$$\begin{cases} a = (\sum_{i=1}^n y_i - b \sum_{i=1}^n x_i) / n \\ b = (\sum_{i=1}^n x_i \sum_{i=1}^n y_i - n \sum_{i=1}^n x_i y_i) / (\sum_{i=1}^n x_i)^2 - n \sum_{i=1}^n x_i^2 \\ Y = a + bX \end{cases} \quad (13)$$

利用最小二乘法对图 11 中的六条直线进行拟合, 可以分别计算出每一条直线所对应的表达式, 从而得到最终的狭缝断裂处的纵坐标值, 具体情况如图 11(b) 所示。

得到拟合直线的具体代数表达式, 表达式的自变量为横坐标数值, 变量则为纵坐标数值^[10]。在第二部分的可实现分析方法说明中可知, 需要关注的是狭缝两侧的断裂边沿处的点, 这些点的横坐标为 2560 pixel 和 2561 pixel, 每一个横坐标均对应 3 条直线的边缘点, 总共 6 个。在计算的过程中可以选择任意两条直线所对应的 4 个点列。实验中选择上述两条直线在探测器拼接边缘所对应的 4 个点, 分别对应与上文中的 $P(x, y), P_1(x_1, y_1), P'(x', y'), P'_1(x'_1, y'_1)$, 将所得的点坐标代入(11)式便可以得到此时的固定纵坐标对应情况下的狭缝宽度, 狭缝垂直方向的平移量以及旋转角度值, 所得的计

算结果为
 式中 X_i 代表所选择第 i 列像元中心点所对应的横坐标值, Y_i 代表所选择第 i 列像元中心点所对应的纵坐标值。同样的方法可以确定像平面的整个直线域上的每一个点的具体位置, 由于成像误差, 算法误差等诸多原因, 这些点列并不是理想的在一条直线上, 而是位于直线的两侧, 此时需要使用一定的数学方法来拟合出直线所在的标准位置, 直线拟合考虑使用最小二乘法进行^[8], 以获取最小的拟合误差。最小二乘法的拟合的原理如下^[9]:

算结果为

$$\begin{aligned} W &= 14.324, \quad W_1 = 15.48, \\ h &= 4.8389, \quad \varphi = 0.15^\circ. \end{aligned} \quad (14)$$

上述结果中宽度和平移量的单位均为像素宽度值, 所分析的探测器其像素宽度为 $8.75 \mu\text{m}$, 则此时所对应的缝宽和平移量为 $W = 14.324 \times 8.75 = 125.335 \mu\text{m}$, $W_1 = 15.48 \times 8.75 = 135.45 \mu\text{m}$, $h = 4.8389 \times 8.75 = 42.34 \mu\text{m}$ 。其中 W 对应纵坐标为 1920 pixel 时的缝宽, W_1 对应纵坐标为 1479 pixel 时的缝宽。

为了验证所提出方法的正确性采用 SMARTSCOPE CNC500 影像测量仪对 $2.5 \text{ k} \times 2.5 \text{ k} \times 4$ 可见探测器进行测试, 该测量仪的分辨率可以达到 $0.5 \mu\text{m}$, 满足测试验证的需求, 具体的测试过程及测试结果如图 13 所示。

CNC500 影像测量仪采用的是多次取点边缘拟

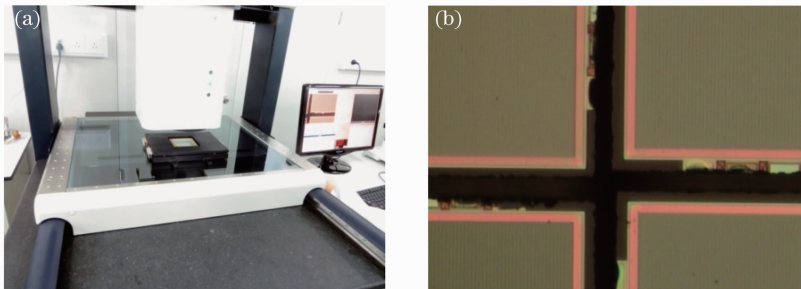


图 13 (a) 影像测量仪测试狭缝宽度; (b) 拼接狭缝处放大图

Fig. 13 (a) Use smart-scope CNC500 to measure the slit width; (b) splicing slit enlargement

合的方法来测量狭缝之间的宽度,该方法是一个多次平均的过程,只能给出平均缝宽值,不能给出倾斜角度、平移量等其他参数,影像测量仪所测的如图 13(b)中上,下,左,右缝宽平均值分别为 141.7,

157.7,146.7,145.9 μm 。

利用上述方法及 CNC500 影像测量仪所得的结果如表 1 所示。

表 1 基于成像所得的参数测量结果

Table 1 Results of parameter measurement based on imaging

Position (ordinate values)	1	1280	1479	1920	2560
Spacing	19.3484	15.9334	15.48	14.324	12.65
Rotational angle			0.15°		
Vertical shift amount			4.8389		
Note	Units are pixel size ($\times 8.75 \mu\text{m}$)				
CNC500 test results	141.7 μm				

5 结 论

大规模的可见及红外面阵是航天遥感领域对地高空间,高时间分辨率的必然选择,在目前半导体工艺水平的情况下,拼接便成为一种必然手段。在探测器的拼接过程中,对其拼接几何特征有着非常严格的要求。拼接非平面度、狭缝宽度、角度旋转都对光电系统的成像效果有极大的影响,因此必须保证在探测器的拼接过程中拼接几何特征满足设计指标。如何确定探测器拼接的几何特征参数便成为必须解决的关键问题。目前存在一些设备如影像测量仪等可以实现部分特征参数的测量,但是无法一次性地得到整个参数序列,无法满足整体功能的需求。基于成像的测试方法便是为了解决这一问题。对成一定夹角的直线成像,分析其在断裂处的坐标变化可以得到准确的旋转、平移、狭缝宽度等几何特征量,由于旋转角度的存在,不同纵坐标处所对应的狭缝宽度是不一致的,狭缝宽度与纵坐标之间存在线性关系,单块探测器单列像素数为 2560,于是在 1280 pixel 处便为该方向狭缝的平均宽度值。成像实验所研究的对象的影像测量仪所对应的上狭缝。此时分析计算的结果为 139.42 μm ,与 CNC500 的测量结果 141.7 μm 非常接近,误差仅为 1.6%,远远小于一个像元宽度。CNC500 的测试结果与实验结果吻合,很好地证明了本方法的科学性。基于成像的探测器微缝拼接几何参数研究方法能够很好地解决微缝拼接中的几何参数获取问题。

参 考 文 献

1 Yong Chaoliang, Lin Jianchun, Zhao Ming, *et al.*. Mosaic of spatial large scale CMOS focal plane array[J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2012, 41(10): 2562-2565.
 雍朝良,林剑春,赵明,等.空间大规模 CMOS 面阵焦平面拼接技术[J]. *红外与激光工程*, 2012, 41(10): 2562-2565.

2 Xu Na, Chen Lin, Hu Xiuqing, *et al.*. Nonlinearity of FY-2D infrared detector in thermal window channels and correction method[J]. *J Infrared and Millimeter Waves*, 2013, 32(4): 337-343.
 徐娜,陈林,胡秀清,等. FY-2D 红外探测器窗口通道非线性特性及其定标订正方案[J]. *红外与毫米波学报*, 2013, 32(4): 338-342.
 3 Wang Shitao, Zhang Wei, Jin Lihua, *et al.*. Point target detection based on temporal-spatial over-sampling system[J]. *J Infrared and Millimeter Waves*, 2013, 32(1): 68-72.
 王世涛,张伟,金丽花,等.基于时-空过采样系统的点目标检测性能分析[J]. *红外与毫米波学报*, 2013, 32(1): 68-72.
 4 N X Vinh, J Epps, J Bailey. Information theoretic measures for clusterings comparison: variants, properties, normalization and correction for chance[J]. *J Mach Learn Res*, 2010, 11: 2837-2854.
 5 Wang Haiyong, Fei Zhenghong, Wang Xinlong. Precise simulation of star spots and centroid calculation based on Gaussian distribution[J]. *Optics and Precision Engineering*, 2009, 17(7): 1673-1677.
 王海涌,费峥红,王新龙.基于高斯分布的星像点精确模拟及质心计算[J]. *光学精密工程*, 2009, 17(7): 1673-1677.
 6 Jia Xuezhong, Wang Dong, Zhang Lei, *et al.*. Optimizing design and precision experiment of focusing mechanism in lightweight space camera[J]. *Optics and Precision Engineering*, 2011, 19(8): 1824-1831.
 贾学志,王栋,张雷,等.轻型空间相机调焦机构的优化设计与精度试验[J]. *光学精密工程*, 2011, 19(8): 1824-1831.
 7 Zheng Yuquan, Wang Hui, Wang Yifan. Selection and design of optical systems for spaceborne hyperspectral imagers[J]. *Optics and Precision Engineering*, 2009, 17(11): 2629-2637.
 郑玉权,王慧,王一凡.星载高光谱成像仪光学系统的选择与设计[J]. *光学精密工程*, 2009, 17(11): 2629-2637.
 8 Tang Qijing, Tian Xingbin, Geng Mingchao, *et al.*. Global calibration method for CCD based visual inspective system[J]. *Optics and Precision Engineering*, 2011, 19(8): 1903-1910.
 唐启敬,田行斌,耿明超,等. CCD 视觉检测系统的整体标定[J]. *光学精密工程*, 2011, 19(8): 1903-1910.
 9 Shi Guang, Zhang Fumin, Qu Xinghua. Economical type large-scale laser automatic coordinate measuring system[J]. *Optics and Precision Engineering*, 2013, 21(8): 1957-1965.
 时光,张福民,曲兴华.经济型大尺寸激光自动坐标测量系统[J]. *光学精密工程*, 2013, 21(8): 1957-1965.
 10 Ren Jianwei, Zhang Yanqi, Ye Zhao, *et al.*. Establishment and application of CCD radiation response function matrix[J]. *Optics and Precision Engineering*, 2012, 22(5): 957-962.
 任建伟,张艳琪,叶钊,等. CCD 辐射响应函数矩阵的建立与应用[J]. *光学精密工程*, 2012, 22(5): 957-962.

栏目编辑:何卓铭