

红外低温相机视轴引出方法

邢 辉 焦文春 王 昀

(北京空间机电研究所, 北京 100190)

摘要 测量红外低温相机的系统调制传递函数(MTF)需要借助于低温平行光管。由于红外低温相机探测器在常温下无法正常工作,并且红外低温相机、低温平行光管离轴抛物镜以及模拟靶标三者是空间分离的,因此实验前需要将相机的视轴引出到平行光管的视轴方向,同时将模拟靶标调整到平行光管焦面位置且靶标中心处于平行光管的中心视场。借助于干涉仪,利用经纬仪分别将相机视轴和平行光管视轴引出到外基准立方镜 a 和 b,通过两立方镜坐标系的方向余弦矩阵关系,将红外低温相机的视轴引出到低温平行光管的视轴方向。对视轴引出精度进行了分析,给出了实验采集的图像。实验结果表明,系统 MTF 满足要求,同时表明红外低温相机视轴引出方法合理可行。

关键词 测量;红外低温相机;视轴引出;外基准立方镜;经纬仪

中图分类号 V447⁺.1 **文献标识码** A **doi**: 10.3788/AOS201333.0112008

Method to Elicit the Boresight of Infrared Cryogenic Camera

Xing Hui Jiao Wenchun Wang Yun

(Beijing Institute of Space Mechanics and Electricity, Beijing 100190, China)

Abstract A cryogenic collimator is needed to test the modulation transfer function (MTF) of the infrared cryogenic camera. The detector of the infrared low temperature camera cannot work normally at room temperature, besides the camera, the off-axis parabolic mirror and the simulated target are spatially separated. So it is necessary to adjust the boresight direction of the camera with the collimator, meanwhile the simulated target must be set on the focal plane and at the $0'$ field of the collimator. By using the interferometer, the boresight of the camera and the collimator can be individually elicited to external reference cubes a and b. Based on the direction cosine matrix of the two cubes' coordination system, the boresight of the camera can be elicited to the direction of the boresight of the collimator. The accuracy of this method is analyzed, and the image of the experiment is also shown. The experimental result shows that the MTF of the camera meets the demand, and it also indicates that the method is reasonable and feasible.

Key words measurement; infrared cryogenic camera; elicitation of the boresight; external reference cube; theodolite

OCIS codes 120.4630; 120.4820; 110.2970; 110.4100

1 引 言

红外低温相机镜头通常在常温下进行系统装调和测试,镜头调制传递函数(MTF)、焦距和视场均满足要求后再安装红外探测器。红外低温相机整机 MTF 测试则需提供超高真空、低温辐射环境,即在低温真空实验罐内模拟深空/地球临边背景下完成^[1]。

对红外低温相机进行系统 MTF 测试需要借助于低温平行光管来完成,将模拟靶标置于平行光管焦

平面处,使模拟靶标和背景的辐射经低温平行光管准直后进入红外低温相机,通过设置合适的黑体工作温度,来模拟中长波谱段和长波谱段实际接收的目标和背景的辐射能量。红外低温相机探测器及其结构都需要工作在 60 K 温度下,微杜瓦封装结构的信号引线形式不再适用,探测器采用了气密无杜瓦封装结构,必须在真空环境下才能对其制冷,因此不能在实验室环境下用制冷机对探测器焦面直接制冷,从而不能在常温下直接通过观测探测器采集到的图像将红

收稿日期: 2012-07-11; 收到修改稿日期: 2012-09-22

作者简介: 邢 辉(1979—),男,硕士,工程师,主要从事光学装调与测试等方面的研究。E-mail: xinghui322@126.com

外低温相机视轴调整到平行光管视轴方向。

低温平行光管有效视场角较小($8'$),并且平行光管离轴抛物镜和相机均无调整机构,实验一旦进行就无法对离轴抛物镜以及相机单独进行调整,只能对靶标进行一定范围的调整。为了保证系统MTF测试时使用的是平行光管的中心视场,必须将相机的视轴调整至与平行光管视轴一致,以确保实验数据的可靠性。

2 测量原理

用经纬仪将红外低温相机视轴引出到一外基准立方镜,将低温平行光管视轴引出到另一外基准立方镜。建立两个外基准立方镜的 3×3 矩阵,通过测量两个外基准立方镜的关系将红外低温相机视轴引出到平行光管视轴方向。

2.1 经纬仪对瞄数据的转换

由于在测量过程中,经纬仪之间进行了多次对瞄,因此在测量前需先确定一个基准经纬仪,其他所有经纬仪均直接或间接与基准经纬仪对瞄,利用对瞄数据将其他经纬仪的读数转换为基准经纬仪的读数,便于后期数据处理。经纬仪的竖直角读数都是绝对值,不需要对竖直方向的对瞄数据进行处理^[2,3]。如图1所示,假设M为基准经纬仪,N为另外一台经纬仪,两经纬仪对瞄时经纬仪M的水平读数为 H_{12} ,经纬仪N的水平读数为 H_{21} ,空间某方向P需用经纬仪N进行自准直,然后再转换到基准经纬仪中。P方向在经纬仪N中的水平读数为 H_{2P} ,那么P方向在经纬仪M中对应的水平读数 H_{1P} 为

$$H_{1P} = H_{2P} + H_{12} - H_{21} \pm 180^\circ. \quad (1)$$

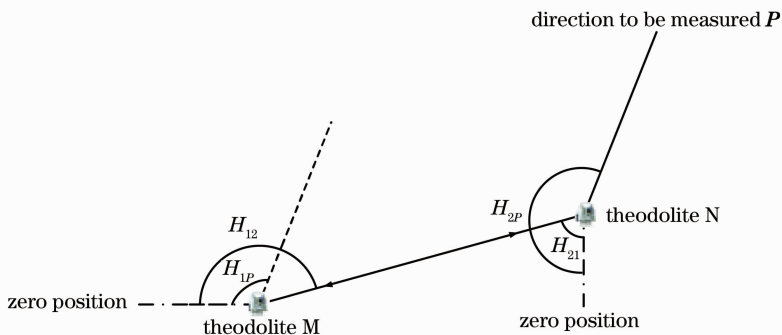


图1 经纬仪对瞄数据转换

Fig. 1 Conversion of mutual collimation data

2.2 建立经纬仪测量坐标系

以经纬仪的 $(0^\circ, 90^\circ)$, $(270^\circ, 90^\circ)$ 方向分别为Y轴正方向和Z轴正方向建立右手正交坐标系,称为测量坐标系^[3,4],记为 Σ_0 。坐标系的X轴正方向为垂直向上,此时Y轴正方向为经纬仪的零位。假设经纬仪自准直空间某方向P对应的水平角和竖直角读数分别为H和V,如图2所示,P点的空间向量分量在测量坐标系 Σ_0 中表示为

$$\begin{cases} x = \cos V \\ y = \sin V \cos H \\ z = -\sin V \sin H \end{cases} \quad (2)$$

2.3 视轴与立方镜坐标系的关系

为了确定相机或平行光管的视轴方向,需要将其过渡到一外基准立方镜。如图3所示,如果要测量视轴与立方镜的关系,需用三台经纬仪。定义经纬仪1为基准经纬仪,经纬仪1和2分别自准直立方镜的两镜面法线,经纬仪3自准直相机视轴方向,然后再通过经纬仪1、3及经纬仪2、3之间的对瞄,

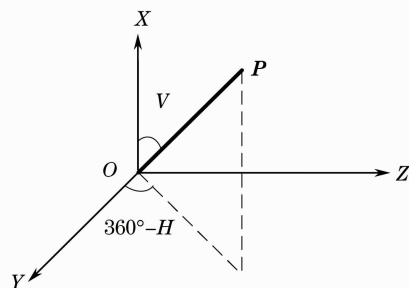


图2 建立测量坐标系 Σ_0

Fig. 2 Establishing the measuring coordinate system Σ_0

来确定经纬仪2、3相对于经纬仪1的角度转换关系。

经纬仪1、2自准直立方镜的读数分别为 $(0^\circ, V_1)$ 、 (H_2, V_2) ,经纬仪3自准直相机视轴的读数为 (H_3, V_3) 。由于经纬仪1、3及经纬仪2、3分别进行了一次对瞄,利用(1)式将经纬仪2、3的读数转换到基准经纬仪1中的读数,假设为 (H'_2, V'_2) 、 (H'_3, V'_3) 。以基准经纬仪1的 $(0^\circ, 90^\circ)$, $(270^\circ, 90^\circ)$ 方向分别为Y

轴正方向和 Z 轴正方向建立右手正交测量坐标系 Σ_0 。由(2) 式求得立方镜两个镜面法线的方向矢量在 Σ_0 下的单位矢量, 分别定义为立方镜坐标系 Σ_1 的 y 轴正方向和 z 轴正方向, 用 y 和 z 表示, 则立方镜坐标系 Σ_1 的 x 轴正方向可根据右手法则叉乘求得。立方镜坐标系 Σ_1 三个坐标轴的方向矢量在测量坐标系 Σ_0 下分别表示为

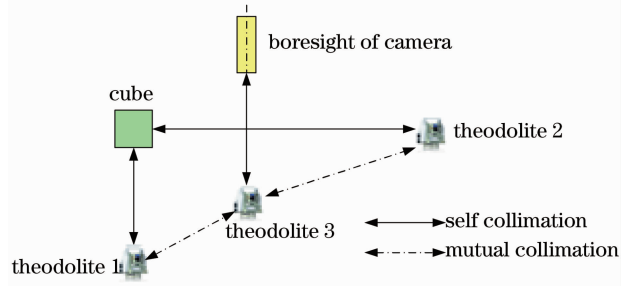


图 3 相机视轴引出

Fig. 3 Elicitation of the camera boresight

$$\begin{cases} \mathbf{x} = (\sin V_1 \sin V'_2 \sin H'_2, & -\cos V_1 \sin V'_2 \cos H'_2, & \cos V'_2 \sin V_1 - \cos V_1 \sin V'_2 \cos H'_2) \\ \mathbf{y} = (\cos V'_2, & \sin V'_2 \cos H'_2, & -\sin V'_2 \sin H'_2) \\ \mathbf{z} = (\cos V_1, & \sin V_1, & 0) \end{cases} \quad (3)$$

同样根据(2)式求得相机视轴在测量坐标系 Σ_0 下方向矢量的单位矢量 \mathbf{s}_1 为

$$\mathbf{s}_1 = (\cos V'_3, \sin V'_3 \cos H'_3, -\sin V'_3 \sin H'_3). \quad (4)$$

由于立方镜坐标系 Σ_1 的三个坐标轴和视轴单位矢量 \mathbf{s}_1 都是在测量坐标系 Σ_0 下求得的, 因此 \mathbf{s}_1 分别与 Σ_1 的三个坐标轴点乘既可求得相机视轴在立方镜坐标系下的方向矢量, 用 \mathbf{s}_2 表示:

$$\mathbf{s}_2 = (\mathbf{s}_1 \cdot \mathbf{x}, \mathbf{s}_1 \cdot \mathbf{y}, \mathbf{s}_1 \cdot \mathbf{z}). \quad (5)$$

将 \mathbf{s}_2 归一化, 得到相机视轴在立方镜坐标系 Σ_1 下的单位矢量 \mathbf{s} :

$$\mathbf{s} = (x_1, y_1, z_1), \quad (6)$$

式中 $x_1^2 + y_1^2 + z_1^2 = 1$ 。可以求得平行光管视轴在平行光管外基准立方镜坐标系 Σ_2 下的单位矢量 \mathbf{s}' :

$$\mathbf{s}' = (x_2, y_2, z_2). \quad (7)$$

通过(1)~(7)式分别将红外低温相机视轴和低温平行光管视轴引出到各自的外基准立方镜, 若将相机视轴和低温平行光管视轴调至一致, 则两立方镜坐标系之间的夹角余弦必须满足矩阵

$$\mathbf{M} = \mathbf{s}^T \cdot \mathbf{s}' = \begin{bmatrix} x_1 x_2 & x_1 y_2 & x_1 z_2 \\ y_1 x_2 & y_1 y_2 & y_1 z_2 \\ z_1 x_2 & z_1 y_2 & z_1 z_2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} m_{11} & m_{12} & m_{13} \\ m_{21} & m_{22} & m_{23} \\ m_{31} & m_{32} & m_{33} \end{bmatrix}. \quad (8)$$

2.4 坐标系变换

如果要测量立方镜 1、2 之间的夹角矩阵, 那么需用四台经纬仪分别自准直每个立方镜相互垂直的两个镜面, 如图 4 所示。经纬仪 1 为基准经纬仪, 经纬仪 1、2 分别自准直立方镜 1 的两镜面, 经纬仪 3、4 自准直立方镜 2 的两镜面, 再通过经纬仪 1、3、1、4、2、3 和 2、4 之间的对瞄, 来确定经纬仪 2、3 和 4 相对于基准经纬仪 1 的角度转换关系。

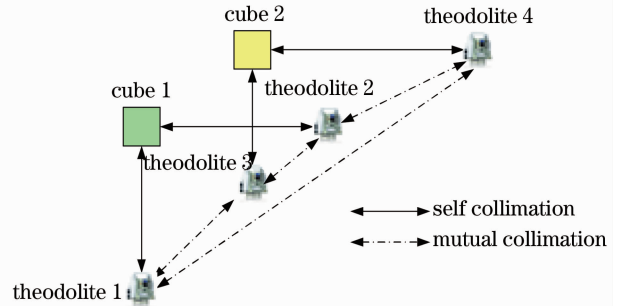


图 4 两个立方镜关系的测量

Fig. 4 Measuring the relationship between the two cubes

经纬仪 1、2、3 和 4 自准直立方镜的读数分别为 $(0^\circ, v_1)$ 、 (h_2, v_2) 、 (h_3, v_3) 和 (h_4, v_4) , 将经纬仪 2、3 和 4 的读数转化到基准经纬仪 1 下, 分别为 (h'_2, v'_2) 、 (h'_3, v'_3) 和 (h'_4, v'_4) 。根据(3) 式求得立方镜 1 坐标系 Σ_1 的三个坐标轴及立方镜 2 坐标系 Σ_2 的三个坐标轴在基准经纬仪下的单位矢量:

$$\begin{cases} \mathbf{X}_1 = (\sin v_1 h \sin v'_2 \sin h'_2, & -\cos v_1 \sin v'_2 \cos h'_2, & \cos v'_2 \sin v_1 - \cos v_1 \sin v'_2 \cos h'_2) \\ \mathbf{Y}_1 = (\cos v'_2, & \sin v'_2 \cos h'_2, & -\sin v'_2 \sin h'_2) \\ \mathbf{Z}_1 = (\cos v_1, & \sin v_1, & 0) \end{cases} \quad (9)$$

$$\begin{cases} \mathbf{X}_2 = (\sin v'_4 \sin h'_4 \sin v'_3 \cos h'_3 - \sin v'_4 \cos h'_4 \sin v'_3 \sin h'_3, & \cos v'_4 \sin v'_3 \sin h'_3 - \sin v'_4 \sin h'_4 \cos v'_3, \\ & \cos v'_4 \sin v'_3 \cos h'_3 - \cos v'_3 \sin v'_4 \cos h'_4) \\ \mathbf{Y}_2 = (\cos v'_4, & \sin v'_4 \cos h'_4, & -\sin v'_4 \sin h'_4) \\ \mathbf{Z}_2 = (\cos v'_3, & \sin v'_3 \cos h'_3, & -\sin v'_3 \sin h'_3) \end{cases} \quad (10)$$

由(9)式和(10)式求得两坐标系 Σ_1 和 Σ_2 坐标轴夹角余弦的 3×3 矩阵^[5~14]

$$\mathbf{N} = \begin{bmatrix} \mathbf{X}_1 \cdot \mathbf{X}_2 & \mathbf{X}_1 \cdot \mathbf{Y}_2 & \mathbf{X}_1 \cdot \mathbf{Z}_2 \\ \mathbf{Y}_1 \cdot \mathbf{X}_2 & \mathbf{Y}_1 \cdot \mathbf{Y}_2 & \mathbf{Y}_1 \cdot \mathbf{Z}_2 \\ \mathbf{Z}_1 \cdot \mathbf{X}_2 & \mathbf{Z}_1 \cdot \mathbf{Y}_2 & \mathbf{Z}_1 \cdot \mathbf{Z}_2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} n_{11} & n_{12} & n_{13} \\ n_{21} & n_{22} & n_{23} \\ n_{31} & n_{32} & n_{33} \end{bmatrix} \quad (11)$$

确定了两个外基准立方镜的夹角余弦矩阵 \mathbf{N} ,

调整相机和平行光管离轴抛物镜,直至矩阵 \mathbf{N} 与矩阵 \mathbf{M} 一致,从而将红外低温相机视轴通过外基准立方镜引出到平行光管视轴方向。

3 视轴引出方法

图 5 为红外低温相机在真空罐内进行 MTF 测试的示意图,低温红外相机、低温平行光管离轴抛物镜及模拟靶标是空间分离的。

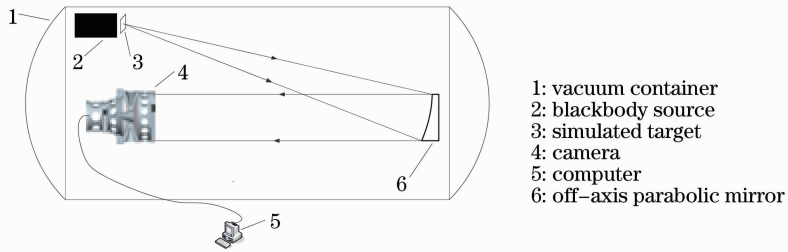


图 5 红外低温相机 MTF 测试

Fig. 5 MTF test of the infrared cryogenic camera

3.1 红外低温相机视轴引出

红外低温相机光学系统采用全反射式结构形式,在常温下对红外低温相机镜头进行光学装调与测试,用干涉仪测试各个视场的像质,满足要求后确定相机镜头的中心视场,并定义为红外低温相机的视轴方

向。保持相机镜头和干涉仪的位置不动,如图 6 所示,将探测器安装到主体结构上,用经纬仪 A 自准直干涉仪出射平行光的方向,经纬仪 B、C 自准直安装在相机上的外基准立方镜 a。根据(6)式建立相机视轴方向的反方向与外基准立方镜 a 的关系。

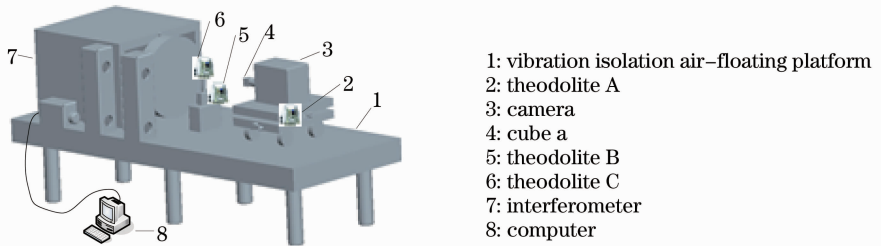


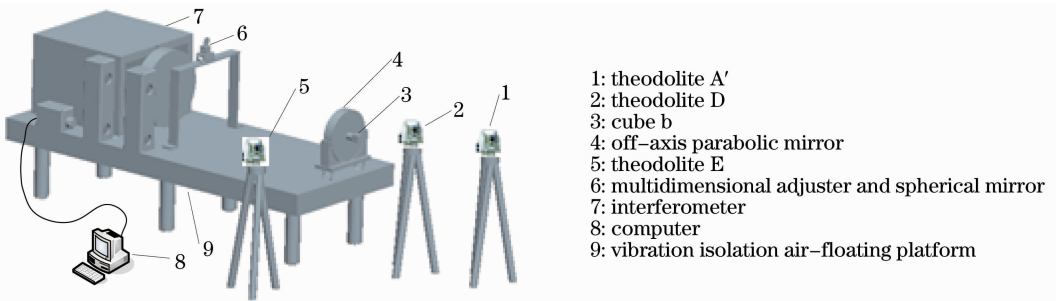
图 6 红外低温相机视轴引出

Fig. 6 Boresight elicitation of the infrared cryogenic camera

3.2 低温平行光管视轴引出

实验用的低温平行光管只有一个离轴抛物镜,其视轴引出是在 32 inch (1 inch=25.4 mm) Zygo 干涉仪上进行的,如图 7 所示。将离轴抛物镜放置到隔振气浮平台上,干涉仪出射平行光,经离轴抛物镜后成像在平行光管焦面处。利用自准直原理,在

平行光管焦面附近放置一标准球面镜,使光线原路返回。干涉仪测量系统像质,调整离轴抛物镜俯仰和倾斜,并相应调整球面反射镜的俯仰和倾斜,直至系统波像差的均方根(RMS)最小。此时干涉仪出射平行光的方向与平行光管像质最好的视场方向一致,定义为平行光管的视轴方向。



1: theodolite A'
2: theodolite D
3: cube b
4: off-axis parabolic mirror
5: theodolite E
6: multidimensional adjuster and spherical mirror
7: interferometer
8: computer
9: vibration isolation air-floating platform

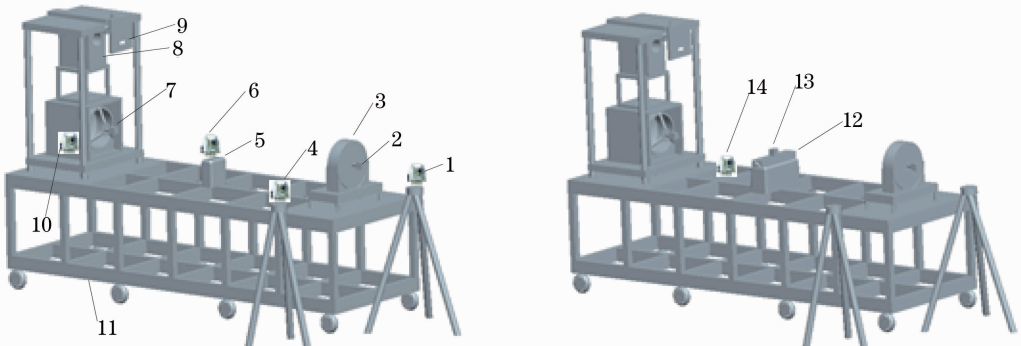
图 7 低温平行光管视轴引出

Fig. 7 Boresight elicitation of the cryogenic collimator

用经纬仪 A' 自准直干涉仪出射平行光的方向，即平行光管视轴方向的反方向，经纬仪 D、E 自准直安装在离轴抛物镜背后的外基准立方镜 b，根据 (7) 式得到平行光管视轴方向的反方向与外基准立方镜 b 的关系。同时由 (8) 式得到两立方镜坐标系的夹角余弦矩阵。

3.3 红外低温相机视轴引出到平行光管视轴

如图 8 所示，黑体光源辐射到位于平行光管中心视场的靶标孔上，经平行光管后出射平行光，平行光沿红外低温相机视轴方向进入相机，成像在相机探测器上。



1: theodolite D'; 2: cube b; 3: off-axis parabolic mirror; 4: theodolite E'; 5: lifting platform; 6: theodolite C'; 7: cube a; 8: blackbody source; 9: multidimensional adjuster and simulated target; 10: theodolite B'; 11: test station; 12: one dimensional guide; 13: pentagonal prism; 14: theodolite F

图 8 系统调整

Fig. 8 System adjustment

3.3.1 两个立方镜的调整

将平行光管离轴抛物镜安装到测试台上，用经纬仪 B' 和 C' 自准直外基准立方镜 a，经纬仪 D' 和 E' 自准直外基准立方镜 b，由 (11) 式可以确定两个立方镜的夹角余弦矩阵。分别调整相机和离轴抛物镜的俯仰和旋转，直至矩阵 N 与矩阵 M 一致。

3.3.2 模拟靶标位置的确定

红外低温相机视轴反方向的单位矢量在立方镜 a 中满足 (6) 式，此方向恰好是平行光管的视轴方向，根据 (2) 式可以求得其在经纬仪 C' 中的空间角 $(h_{C'}, v_{C'})$ ，用经纬仪 C' 自准直无穷远处的靶标，调整多维调节机构上下和水平位移，使靶标与经纬仪十字丝中心重合，且在经纬仪 C' 中的读数为 $(h_{C'}, v_{C'})$ 。

完成平行光管离轴抛物镜焦面上下和左右位置

调整后，采用五棱镜法标定平行光管焦面的前后位置。将五棱镜放置到一维导轨上，调整五棱镜和经纬仪 F，直至用经纬仪观测到靶标经离轴抛物镜、五棱镜和经纬仪后所成的像。旋转一维导轨旋钮使五棱镜沿水平方向且垂直于视轴方向移动，此时会看到靶标左右晃动，调整多维调节机构使靶标沿着视轴方向移动，直至调整一维导轨时，在经纬仪中观测不出模拟靶标的晃动，此时模拟靶标已经位于平行光管焦面位置。

利用外基准立方镜 a 和 b，通过调整，将红外低温相机的视轴方向引出到低温平行光管的视轴方向；调整模拟靶标到平行光管的焦面位置，使靶标中心位于平行光管的中心视场。由于在调整和测量过程中多次使用经纬仪进行测量，会引入一定的测量误差，所以应给出视轴引出精度分析。

4 视轴引出精度

视轴的引出精度主要取决于经纬仪的自准直测量误差、经纬仪的对瞄测量误差和经纬仪对无穷远目标的自准直测量误差。在平行光管标定、红外低温相机视轴引出以及相机视轴引出到平行光管视轴的过程中,用经纬仪进行了多次自准直、多次对瞄以及两次对无穷远目标的自准直,通过对测量误差与视轴引出精度的分析,给出视轴引出精度(各误差量均为 RMS 值)。

4.1 误差源

测量中采用 Leica 经纬仪 T5100A,根据其使用说明书,轴系精度可达 $0.5''$,但考虑到人眼的判读误差,实际测量中经纬仪的自准直误差的精度 δ_1 约为 $2''$ 。

一般来说,对瞄测量误差为自准直测量误差的两倍,即经纬仪的对瞄测量误差 δ_2 约为 $4''$ 。

自准直无穷远目标和自准直情况类似,不同的是光线只在目标和经纬仪之间传输一次,没有进行角度的放大,但受测量条件的限制,目标本身成像的清晰度比自准直像低,因此对无穷远目标的自准直测量误差 δ_3 通常会比 δ_1 略大,在此计 $\delta_3 = 5''$ 。

4.2 误差的合成

对平行光管进行视轴引出时,包含两次对立方镜的自准直、两次对瞄和一次无穷远目标的自准直,因此低温平行光管的视轴测量误差为

$$\delta_A = \sqrt{2\delta_1^2 + 2\delta_2^2 + \delta_3^2} = 8.1'' \quad (12)$$

相机视轴引出时,也包含两次对立方镜的自准直、两次对瞄和一次无穷远目标的自准直,因此红外低温相机视轴测量误差为

$$\delta_B = \sqrt{2\delta_1^2 + 2\delta_2^2 + \delta_3^2} = 8.1'' \quad (13)$$

在将相机视轴引出到平行光管视轴时,包含四次对外基准立方镜的自准直、四次对瞄和一次无穷远目标的自准直,因此相机视轴与平行光管视轴调整测量误差为

$$\delta_C = \sqrt{4\delta_1^2 + 4\delta_2^2 + \delta_3^2} = 10.2'' \quad (14)$$

由(12)~(14)式可知,将相机视轴引出到平行光管视轴的测量误差最大不超过 $\pm 27''$,即相机视轴引出到平行光管视轴的精度优于 $27''$ 。由于平行光管的视场角为 $8'$,相机的视场角为 $2^\circ \times 2^\circ$,上述调整可以确保后续实验中找到模拟靶标在红外低温相机探测器上所成的像。

红外低温相机及测试系统均安装在机械机构支架上,在真空低温环境下结构会有变形,从而会导致

相机和平行光管视轴有所偏离。由于机械机构受环境影响变形情况比较复杂,在此不作深入分析。

5 实验结果

图 9 为实验采集到的位于红外低温相机中心视场附近模拟靶标的图像,圆孔靶标、矩形靶标和奈奎斯特频率靶标均清晰可见。系统 MTF 为 0.18 (17 lp/mm),满足指标要求。由于靶标刻线倾斜,造成奈奎斯特频率靶标倾斜,像元错位,可以通过在靶标调整机构上加上旋转功能予以校正。

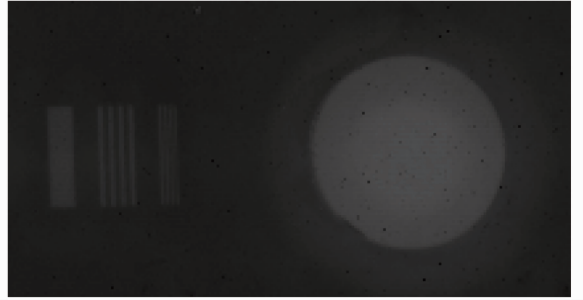


图 9 实验采集的模拟靶标图像

Fig. 9 Image of the simulated target obtained in the experiment

6 结 论

借助于干涉仪,利用经纬仪将低温平行光管视轴和红外低温相机视轴分别引出到外基准立方镜,通过两个外基准立方镜将相机视轴引出到平行光管视轴方向,解决了红外低温相机因常温下探测器不能正常工作而无法直接根据图像进行视轴调整的问题,红外低温相机视轴引出精度优于 $27''$ 。后续实验证明,红外低温相机视轴引出方案合理可行,满足实验要求。

参 考 文 献

- 1 Shen Mangzuo, Ma Wenli, Liao Sheng *et al.*. Development of a cryogenic optical system[J]. *Acta Optica Sinica*, 2001, **21**(2): 202~205
沈忙作, 马文礼, 廖 胜 等. 低温光学系统的研制[J]. *光学学报*, 2001, **21**(2): 202~205
- 2 Yang Zaihua, Sun Gang, Liu Jianxin. Measurement of orientation of optic axis of space camera with theodolite[J]. *Spacecraft Environment Engineering*, 2010, **27**(1): 92~94
杨再华, 孙 刚, 刘建新. 采用经纬仪测量航天相机视轴的方法分析[J]. *航天器环境工程*, 2010, **27**(1): 92~94
- 3 Shen Zhaoxin, Chen Xiaohui. A technology to get coordinate-system of cube-prism in electron-theodolite surveying system[J]. *J. Astronautic Metrology and Measurement*, 2006, **26**(4): 73~75
沈兆欣, 陈晓辉. 电子经纬仪测量系统中立方镜坐标系建立技术探讨[J]. *宇航计测技术*, 2006, **26**(4): 73~75

- 4 John Troll, Patrick Thompson, David Humm. Boresight and gimbal axis alignment for the CRISM instrument [C]. *SPIE*, 2005, **5877**: 58770A
- 5 Young-Jin Lee, Alper Yilmaz. Boresight calibration of the aerial multi-head camera system[C]. *SPIE*, 2011, **8059**: 805908
- 6 Andrzej W. Domanski, Daniel Budaszewski, Pawel Poziemski *et al.*. Method of optical axis determination in crystals by use of light depolarization measurements [C]. *SPIE*, 2007, **6616**: 66161V
- 7 Liu Yong, Chen Xiaohui, Yin Qing *et al.*. Applications of three-dimension coordinate transform in space device' s geometry measurement [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2008, **37**(s): 147~150
刘 勇, 陈晓辉, 殷 晴 等. 三维坐标变换在航天器机械测试中的应用[J]. *红外与激光工程*, 2008, **37**(s): 147~150
- 8 Wu Guodong, Song Dan. Calibration of mapping camera and cubic prism coordinate system [J]. *Optics and Precision Engineering*, 2007, **15**(11): 1727~1730
吴国栋, 宋 丹. 测绘相机坐标系与立方棱镜转换矩阵的标定[J]. *光学精密工程*, 2007, **15**(11): 1727~1730
- 9 Yang Zhen, Li Guangyun, Huang Guiping *et al.*. Research on attitude measurement method of cubic prism based on auto-collimation[J]. *J. Astronautic Metrology and Measurement*, 2010, **30**(2): 14~29
杨 振, 李广云, 黄桂平等. 基于自准直的立方棱镜姿态测量方法研究[J]. *宇航计测技术*, 2010, **30**(2): 14~29
- 10 Gai Pengfei. Autocollimation method of theodolite or total station [J]. *J. Geomatics Science and Technology*, 2010, **27**(3): 196~199
盖鹏飞. 经纬仪/全站仪自准直方法[J]. *测绘科学技术学报*, 2010, **27**(3): 196~199
- 11 Liu Manlin, Hao Bin, Xiong Rensheng *et al.*. Visible light measurement television system design and sight line axial precision analysis [J]. *Electro-Optic Technology Application*, 2008, **23**(6): 49~59
刘满林, 郝 斌, 熊仁生 等. 可见光测量电视系统设计及视轴精度分析[J]. *光电技术应用*, 2008, **23**(6): 49~59
- 12 Zhang Man, Li Tao, Liu Jianxin. A new approach for precision measurements for a satellite under different pressure conditions [J]. *Spacecraft Environment Engineering*, 2006, **23**(3): 165~174
张 满, 李 涛, 刘建新. 某卫星不同受力环境下精度测试方法的新思路[J]. *航天器环境工程*, 2006, **23**(3): 165~174
- 13 Chen Jihua, Huang Jianbo, Mu Aiguo *et al.*. A novel method of auto-collimation by theodolite [J]. *J. Zhengzhou Institute of Surveying and Mapping*, 2006, **23**(5): 338~344
陈继华, 黄剑波, 牟爱国 等. 一种新的经纬仪自准直方法[J]. *测绘科学技术学报*, 2006, **23**(5): 338~344
- 14 Niu Lin, Chen Jianping, Tian Yi. The optimal choice of common points in three dimensional coordinate transformation [J]. *Beijing Surveying and Mapping*, 2007, (4): 9~11
牛 琳, 陈建平, 田 疑. 三维坐标转化的公共点选择方法[J]. *北京测绘*, 2007, (4): 9~11

栏目编辑：何卓铭