

文章编号 1004-924X(2020)06-1226-10

航空低温温度对自准直检焦系统的影响

刘伟毅*, 徐钰蕾, 石磊, 姚园

(中国科学院 长春光学精密机械与物理研究所 航空成像与测量重点实验室, 吉林 长春 130033)

摘要: 为了研究航空低温温度对自准直检焦系统的影响, 从而指导实际检焦系统的设计及修正, 本文根据自准直检焦及几何光学原理, 分析了单点成像、条纹成像及有无像散条件下, 成像位置、成像宽度与接收的光强度差之间的相互关系, 并给出了相关理论公式。结合实际的相机工况, 对光学系统进行了相应的仿真, 仿真结果显示, 仿真双波峰电压值为 1.4 V 和 0.47 V, 与实际的检焦双波峰电压值 1.38 V 和 0.56 V 基本一致。根据结果进行了温控和柔性支撑, 从而使检焦正常, 提高了自准直检焦系统的温度适应性。本研究对系统的温度适应性具有指导作用。

关键词: 航空相机; 自准直检焦; 低温环境; 单点成像; 条纹成像

中图分类号: V243.5 **文献标识码:** A **doi:** 10.3788/OPE.20202806.1226

Influence of aviation low temperature on auto-collimating focusing system

LIU Wei-yi*, XU Yu-lei, SHI Lei, YAO Yuan

(Key Laboratory of Airborne Optical Imaging and Measurement Changchun Institute of Optics, Fine Mechanics and Physics, Chinese Academy of Sciences, Changchun 130033, China)

* Corresponding author, E-mail: 2219101@163.com

Abstract: To analyze the influence of aeronautical low temperature on the self-collimation focus detection system, and enables the design and correction of the actual focus detection system, the relationship among various factors under different imaging conditions was investigated. Based on the principle of autocollimation focus detection and geometry, comparison of single-point and fringe imaging, imaging position and width according to different received light intensities, and presence and absence of astigmatic conditions were analyzed. Thus, a related analysis formula was deduced. Combined with the actual camera working conditions, the corresponding simulation of the optical system was performed, and the simulation results (simulated bimodal voltage values of 1.4 V and 0.47 V) were in accordance with the actual test data (peak-to-focus double-peak voltage values of 1.38 V and 0.56 V). The actual modification measures are carried out to improve the temperature adaptability of the self-collimation detection system. The temperature adaptability analysis is in accordance with the actual demand and has a guiding function for the temperature adaptability of the system.

收稿日期: 2019-12-02; 修订日期: 2019-12-20.

基金项目: 国家重点研发计划资助项目 (No. 2017YFC0822403); 国家自然科学基金青年基金资助项目 (No. 51705496)

Key words: aerial camera; auto-collimating focusing; low temperature; single point imaging; fringe imaging

1 引言

随着技术的发展,航空遥感器分辨率越来越高,焦距越来越长^[1-4]。受温度、大气压力、成像距离变化等因素的影响,航空相机的像方焦距也会随之发生变化,需要进行自动检调焦技术^[5-13]。在众多自动检调焦技术中^[14-21],自准直检焦技术是一种典型的检焦方式,通常应用在长焦距、大体积及大口径的航空遥感器上^[22-23]。在自准直检焦过程中,航空环境温度起着重要的影响作用。如果温度因素没有处理好,会导致检焦的失败。某一长焦距可见光航空相机的多次试验表明:相机通过自准直检焦在常温状态下可以获得清晰的图像,而在模拟航空环境的低温状态下则成像模糊,其原因就是自动检焦的失败。自检焦时获取的检焦电压数据显示,在低温状态时,检焦电压数值并没有出现理想的单波峰,而是出现了两个波峰,从而无法确定正确的焦面位置。通过手动调焦至两个波峰对应的检焦位置时,发现这两个位置也不是正确的焦面位置。造成这种现象的可能性有很多,如光伏电池、检焦光源、编码器等电子器件类的故障,摆扫系统、调焦系统、轴承组件等运动部件类的故障,调焦程序 bug 等软件类的故障等。然而,实际排查却发现相机并没有以上的任何故障,所以确定外环境温度的变化是导致本现象发生的原因。

为了解决环境温度导致的自动检焦失败问题,本文从自准直检焦原理及相机自身的实际工况入手,针对外温度环境对检焦系统的影响进行了详细的分析及理论仿真,提出了相应的解决措施,对后期类似的检焦系统的温度适应性设计具有重要的指导意义。

2 自准直检焦原理

自准直检焦过程如图 1 所示。检焦光源 C

发出光,通过物方条纹遮拦 a,形成明暗条纹,再经过光学系统 H,变为平行光。平行光线通过检焦反射镜 M 返回,再次经过光学系统 H,成像于像方条纹遮拦 b 处,通过像方条纹遮拦 b,照射在光伏电池 E 上。条纹板 D 上的物方条纹遮拦 a 和像方条纹遮拦 b,其形状、大小、位置及规格一致,条纹方向一致。

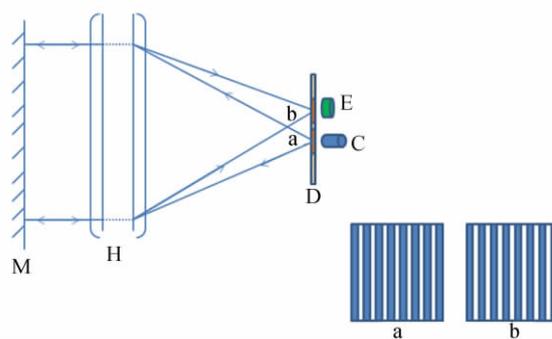


图 1 检焦过程示意图

Fig. 1 Schematic diagram of focusing process

在检焦过程中,条纹板 D 处于不同的光轴位置,通过摆扫镜的摆动,使条纹遮拦 b 对所成的像在垂直于光轴的面上有沿垂直于条纹方向的相对移动。若条纹板 D 处于焦点的位置,那么具有明暗条纹状的物方会在条纹遮拦 b 处形成清晰的明暗条纹的像。条纹遮拦 b 的相对移动,可以完全通过或遮挡光线到光伏电池 E 上。此情况下,光伏电池 E 所接收到的光强类似于图 2(a)所示,光伏电池 E 将光强度信号转化为电压信号,并记录最大的电压差值。若条纹板 D 不处于焦点的位置,那么具有明暗条纹状的物方在条纹遮拦 b 处将形成模糊的像,平行光不能汇聚成一点,而是产生光斑。这样,条纹遮拦 b 的相对移动并不能完全遮挡光线到光伏电池 E 上。此情况下,光伏电池 E 所接收到的光强如图 2(b)所示,同样地,光伏电池记录最大的电压差值。当光伏电池 E 记录的电压差最大时,平行光汇聚成一点,即条纹板所在位置为无穷远平行光的焦点位置。

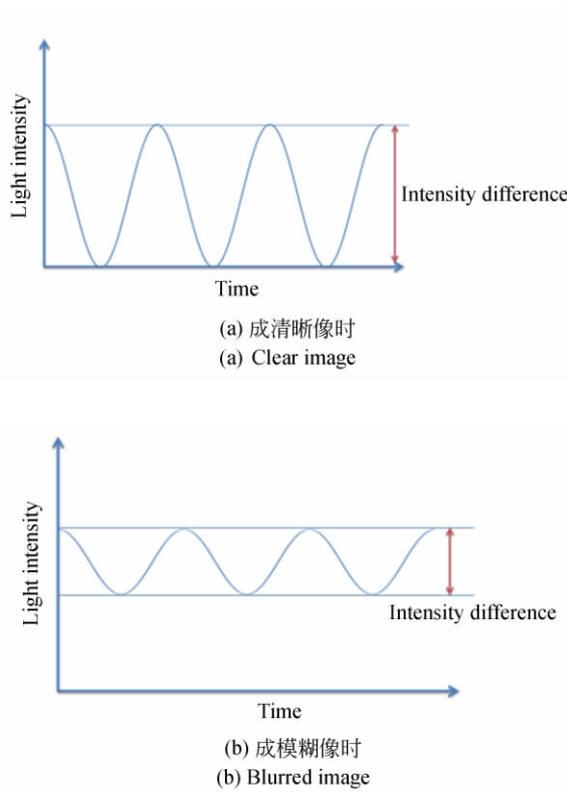


图 2 光伏电池接收的光强度变化

Fig. 2 Changes in light intensity received by photovoltaic cells

2 相机自准直检焦现象

2.1 相机介绍

相机焦距为 1 800 mm, 尺寸为 1 260 mm × 550 mm × 620 mm, 像元尺寸为 9 μm × 9 μm, 光学系统为卡塞格林系统, 调焦采用自准直检焦方式。由接口及外形形状的要求, 该相机并未采用前端大反射镜进行自检焦及摆扫成像, 而是在机身内部设置一固定的自准直反射镜, 如图 3 所示。

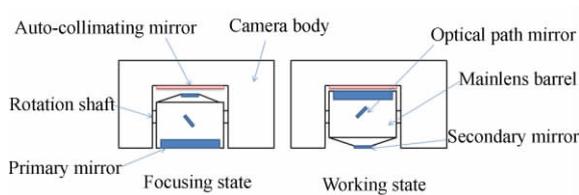


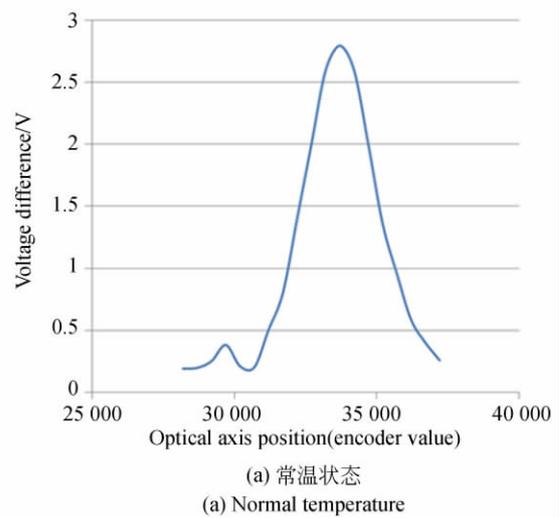
图 3 相机自检焦及工作状态

Fig. 3 Schematic diagram of camera in self-focus and working state

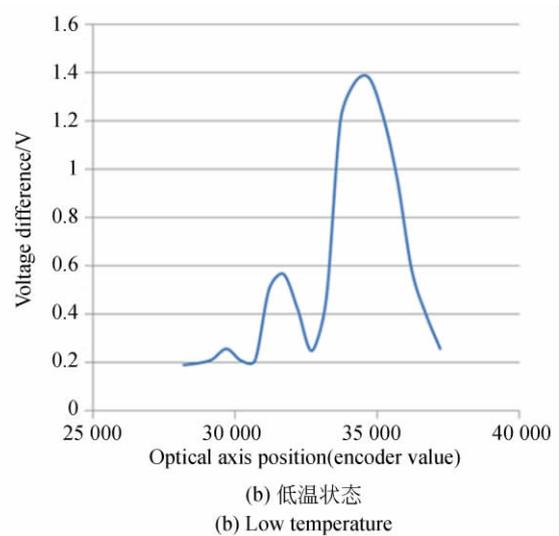
自准直反射镜安置在相机机身的内部, 相机自检焦时, 通过主镜筒的旋转, 使主镜筒开口对准固定的反射镜, 主镜筒小幅往复摆动配合检焦。相机工作时, 主镜筒旋转 180°, 使其开口朝向地面, 对地面进行成像。这样相机在对地成像时, 自准直反射镜并未参与其中。

2.2 低温环境自准直检焦情况介绍

自准直检焦试验数据表明, 在低温条件下, 自准直检焦会出现双峰现象, 两个峰值大小接近。图 4(a) 和图 4(b) 分别为常温状态和低温状态时



(a) 常温状态
(a) Normal temperature



(b) 低温状态
(b) Low temperature

图 4 试验中自检焦时光电池接收的电压差

Fig. 4 Voltage difference received by photoelectric cell during experiment

的光伏电池接收的在光轴方向不同位置的电压差。可以看出,在低温状态时,电压差出现了双峰,实际测试中对应的双峰位置均不是相机的焦距位置。

3 单点成像与光伏电压差关系分析

要解释检焦双峰现象,首先要研究在条纹遮拦不断的相对移动的条件下,系统成像与光伏电压差的关系。单点成像是最简单的一种情况。条纹遮拦在相对移动时,光伏电池接收到与条纹方向垂直方向的光强,因此条纹遮拦在对成像图样进行检测时存在方向性,即只有条纹宽度范围内的光强影响检测结果,这将一直应用在后期的分析中。

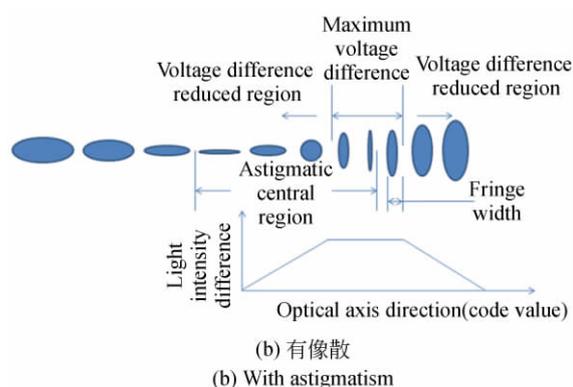
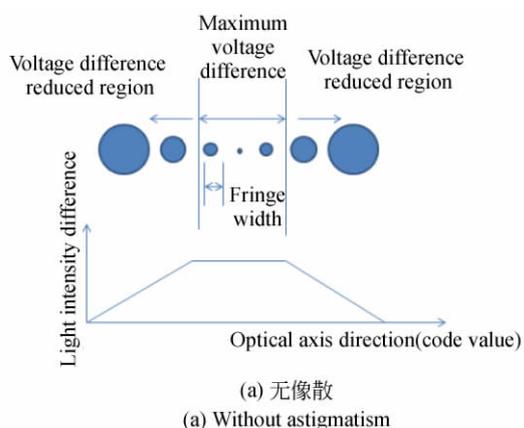


图5 单点成像与系统光伏电压差关系

Fig. 5 Relationship between single point imaging and light intensity difference

4 条纹物方成像与光伏电压差关系分析

当物方为条纹的时候,可以认为条纹由条纹区域中无数的单点组成,那么所成的像也是由无数的单点成像叠加而成。图6为在无像散和有像散时,单个条纹在不同成像位置所成的条纹像。根据单物点像不同的成像图形,其条纹像的高低、宽窄及光强分布均不相同。

以条纹竖直方向为例,图5(a)和图5(b)分别为没有像散和有像散时单点成像及所对应的光伏电压差。图5(a)中,中间的圆斑及圆点分别表示光轴方向不同位置上单点的成像,当成像位置位于焦点时,平行光线汇聚为一点,远离焦点位置时,汇聚为一圆光斑。横轴方向上当单条纹宽度大于成像宽度(圆斑直径)时,光伏电压差最大(如图示中间部分)。当单条纹宽度小于成像宽度时,光伏电压差会相应地减小(图示两边)。图5(b)中,系统存在一定的像散,中间的系列形状为光轴方向不同位置上单点的成像,此时像散中心区域与电压差最大区域不是同一区域。在横轴方向上当单条纹宽度大于成像宽度时,光伏电压差最大;当单条纹宽度小于成像宽度时,光伏电压差会相应地减小。

以条纹为竖直方向为例,当单物点成像为图6(a)的Ⅲ图案和图6(b)的Ⅴ图案时,此时所检测的光伏电压差最大。图案的两侧小范围内,由于成像条纹逐渐变宽,有一部分光能量将会被条纹遮拦挡住,所以其检测的光伏电压差也随之逐渐缩小,这将形成一个以该图案处为峰值的电压差曲线。

当单物点成像为其他图案时,此时条纹所成的像要比物方条纹宽度宽,条纹像宽度与条纹遮拦宽度的关系会对应不同的光强差。

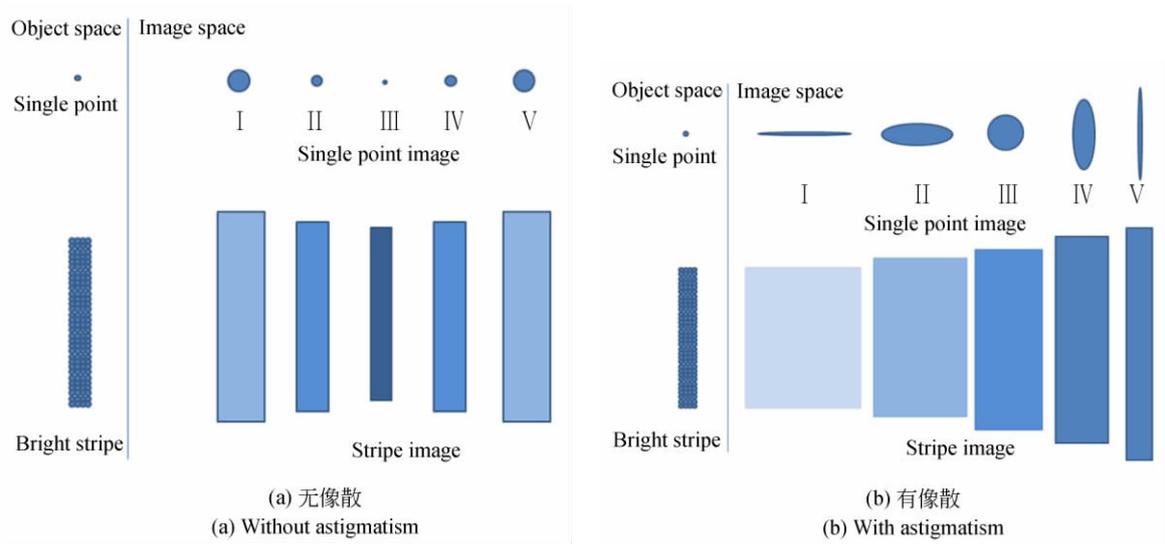


图 6 物方单物点及条纹所成的像

Fig. 6 Images of single point and bright stripe

5 单点成像宽度、条纹遮拦宽度与光强差关系分析

5.1 若单点成像宽度等于条纹遮拦宽度

条纹竖直方向可认为是无限、对称的,因此在分析时只考虑水平方向。假定线段 AB 为物方条纹一段水平的线段,线段长为 L ,线段 AB 上每个点所成的像的宽度均为 L 。如图 7 所示,设 Π 为线段 AB 所成的像,则其总长为 $2L$ 。

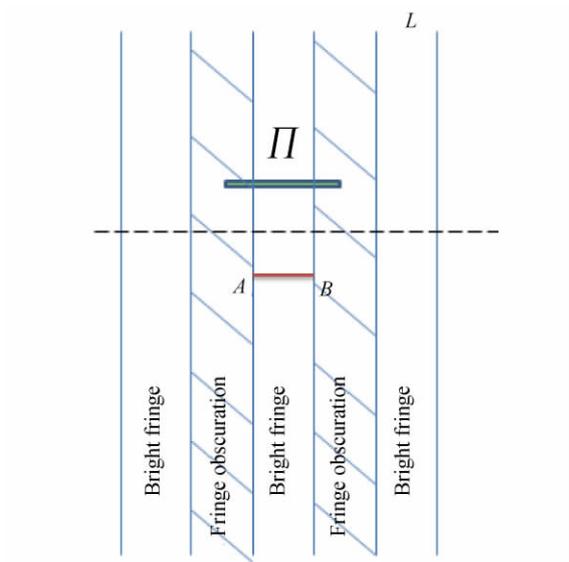


图 7 条纹竖直方向成像分析示意图

Fig. 7 Schematic of imaging analysis in fringe vertical direction

定义单点成像每个位置的光强度为 $N(x)$, $x \in [0, L]$ 。则 A 点对应的通光处的光强度为:

$$\int_{\frac{L}{2}}^L N(x) dx, x \in [0, L]. \quad (1)$$

线段 AB 上任意一点 y 对应的通光处的光强度为:

$$\Phi_1(y) = \begin{cases} \int_{\frac{L}{2}-y}^L N(x) dx, y \in [0, \frac{L}{2}] \\ \int_0^{\frac{3L}{2}-y} N(x) dx, y \in [\frac{L}{2}, L] \end{cases} \quad (2)$$

单点 y 对应的条纹遮拦处的光强度为:

$$\Phi_2(y) = \begin{cases} \int_0^{\frac{L}{2}-y} N(x) dx, y \in [0, \frac{L}{2}] \\ \int_{\frac{3L}{2}-y}^L N(x) dx, y \in [\frac{L}{2}, L] \end{cases} \quad (3)$$

线段 AB 对应的通光处的光强度为:

$$\Psi_1(y) = \int_0^L \Phi_1(y) dy, y \in [0, L]. \quad (4)$$

线段 AB 对应的遮拦条纹处的光强度为:

$$\Psi_2(y) = \int_0^L \Phi_2(y) dy, y \in [0, L]. \quad (5)$$

系统检测到的光强差为:

$$\Delta = \Psi_1(y) - \Psi_2(y), y \in [0, L]. \quad (6)$$

为了更好地理解及方便计算,假定单点的像正好是一水平线段(图 6(b)中的 I 图案)且线段上的光强度处处相等($N(x)$ 为定值)。则如图 8 所示,线段 AB 为物方条纹一段水平的线段,左侧边缘 A 点所形成的像为直线 a ,右侧边缘 B 点所成的像为直线 b ,则 A 点和 B 点之间的成像点

所成的像都在直线 a 和直线 b 的区域内,且相互叠加。为了便于计算及图示,将 B 点成的像(直线 b)下移一段距离,则 A, B 点之间的所有点所成的像都可以认为在平行四边形 M 之中。用平行四边形在条纹遮拦及通光处的面积来表示成像分布的光强度。由图 8 可以计算,在通光处区域中,平行四边形的面积为 $0.75S$ (S 为平行四边形总面积);在条纹遮拦处,平行四边形的面积为 $0.25S$ 。即若一个亮条纹所成的像的能量为 E ,则成像区域中通光处所占的能量为 $0.75E$,条纹遮拦处的能量为 $0.25E$,它们之间的能量差为 $0.5E$ 。

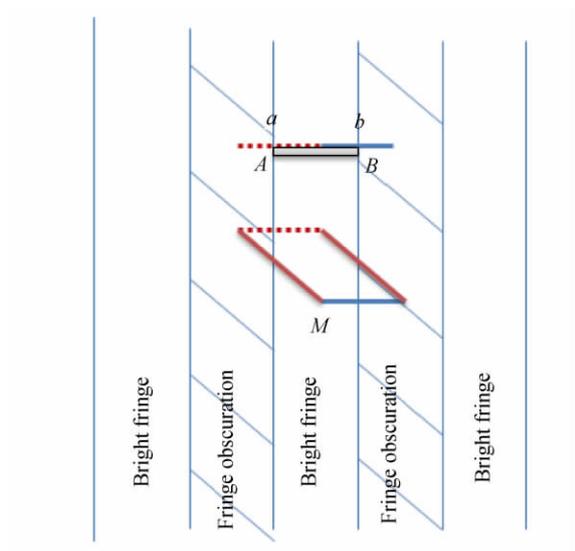


图 8 光强度分布示意图

Fig. 8 Schematic diagram of light intensity distribution

5.2 若单点成像宽度等于 2 倍条纹遮拦宽度

同样按照上述方法计算平行四边形面积,在通光处和条纹遮拦处的面积各为 $0.5S$,所以它们之间的能量差为 0。

5.3 若单点成像宽度等于 3 倍条纹遮拦宽度

平行四边形在亮条纹区域的面积为 $\frac{5}{12}S$,在暗区域的面积为 $\frac{7}{12}S$ 。它们之间的能量差为 $E/6$ 。

综上,若成像条纹线长为条纹遮拦宽的偶数倍(0 倍除外),则没有能量差,若为奇数倍,则存在能量差。分别计算各个条纹宽度倍数条件下的光强度差,采用拟合曲线的方式,可以得到单条纹宽倍

数与光强能量差的关系。图 9(a)展示了无像散时,单点成像宽度倍数、接收的光强度差及对应的光轴方向位置关系。当光强差最大时,正好对应成像中心点位置。对比实际测试的图 4(a)中,在编码器数值位置约 34 000 处出现了最高峰,对应最大电压 2.8 V;在编码器数值位置约 29 500 处,出现了一个小峰,该小峰位置恰好处于 3 倍条纹宽度处,理论电压值为 0.47 V,与实际测试的 0.48 V 吻合。图 9(b)展示了有像散时三者的关系。当光强差最大时,所对应的成像位置并不是像散中心,而是成像图案最细的位置。

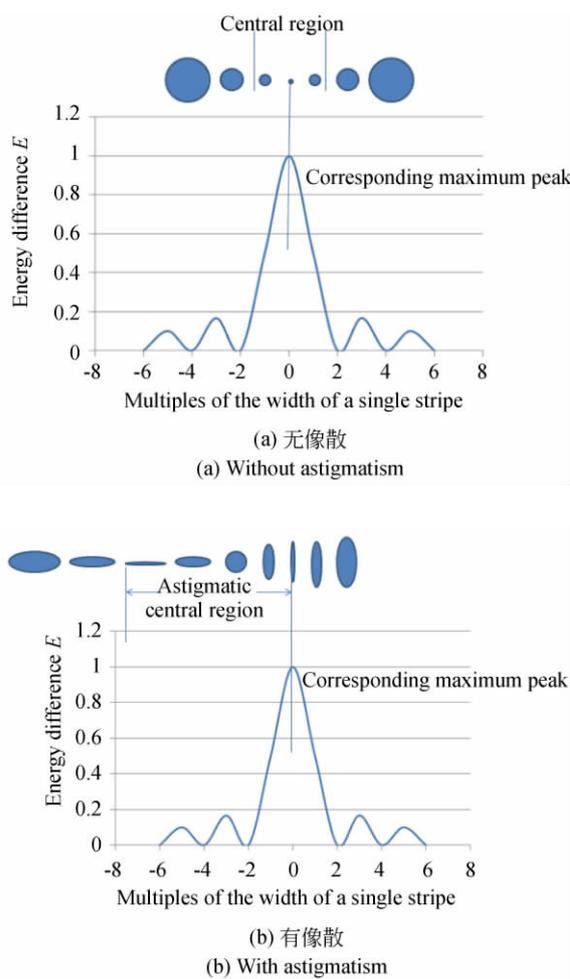


图 9 成像位置、成像宽度与光强度差的关系

Fig. 9 Relationship between imaging position, width of image, and light intensity difference

无像散时,由于圆斑的能量在水平方向并不是均匀的,而是中间能量高、两边低,用圆斑直径来表示横向能量属于一种近似。

6 相机低温工况自检焦现象分析

从图 9(b)可以看出,当存在像散时,在不同的条纹倍数中存在不同的峰值。针对相机实际的检焦双峰现象,若考虑 3 倍条纹宽和 0 倍条纹宽的两个峰值,它们存在明显的区别,其大小比例与试验数据不符。考虑 3 倍条纹宽与 5 倍条纹宽的两个峰值,它们之间刚好是两个峰值,且峰值的大小比例关系符合试验数据,但是其绝对值不符,最高峰值仅为 $0.167E$ 。所以,纯像散不会产生试验中的双峰现象。

在实际成像中,除了像散,还存在其他因素的影响,使得所成的竖线条像带有一定的宽度。如本相机中,受到外界航空低温环境的影响后,自准直反射镜的支撑组件受冷收缩,对自准直反射镜产生了一定的挤压。有限元分析表明,这种挤压使得自准直反射镜由平面变为马鞍形状面,曲率由 0 变为 10^{-6} mm。将该变化带入光学系统,由点列图分析得出在光轴方向焦点及周边单点成像图样如图 10 所示。物方单点在系统焦距附近处成的像最窄处已不再是竖线,而是带有一定的宽度,宽度值约为 0.1 mm,而系统采用的条纹遮拦的宽度也是 0.1 mm,即单点成像宽度等于条纹遮拦宽度。因此,中间的最强光强差对应于图 9(b)中的 1 倍条纹宽度,即光强差为 $0.5E$,而两侧的单点成像宽度逐渐增加。检焦时对应的光强度差分析结果如图 11 所示,此时系统不再有 0 倍条纹宽度,而直接从 1 倍条纹宽度开始。将分析结果与图 4 中的试验检焦电压差数据进行比较,

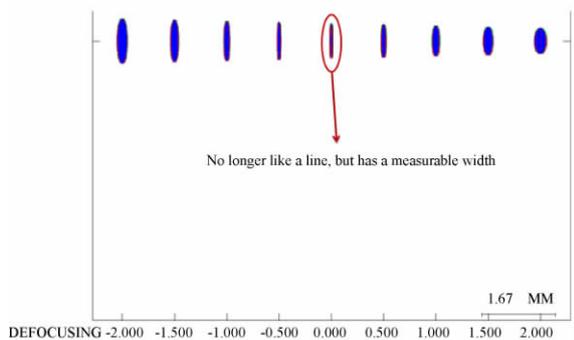


图 10 受环境影响的系统点列图分析

Fig. 10 Spot diagram analysis under environmental influences

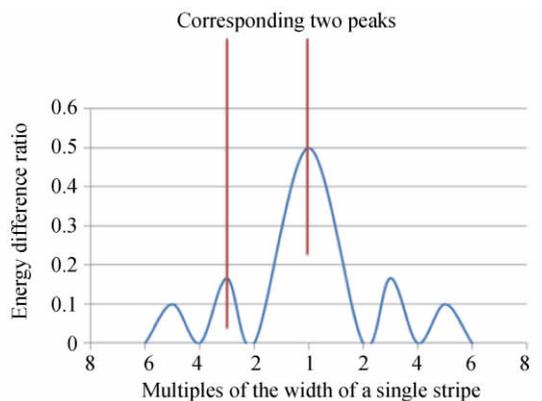


图 11 受环境影响的自检焦光强度差分析

Fig. 11 Analysis of light intensity difference under environmental influences

检焦电压差值双峰分别是正常检焦电压差的 0.5 倍和 0.167 倍。试验数据中正常检焦电压值为 2.8 V, 双峰的检焦电压差值分别为 1.38 V 和 0.56 V(对应 0.49 倍和 0.2 倍)。考虑到实际存在的误差和噪声影响,认为该试验结果与分析结果基本相符。

综上所述,相机自检焦失败的原因是由于环境影响大反射镜产生了曲率变形,产生的像斑宽度又刚好与条纹遮拦宽度基本一致。因此引发了自准直检焦时,同时具有 1 倍条纹能量差和 3 倍条纹能量差的现象,即双峰现象。

针对此问题,这里对相机做了相应的修正措施:对自准直反射镜进行了温控措施及柔性支撑设计,减小因环境影响而产生的变形。修正后再

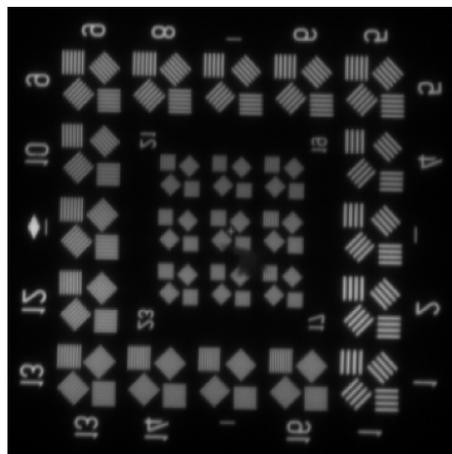


图 12 低温条件下自检焦后的成像图片

Fig. 12 Image captured by camera after self-checking focal at low temperature

次实施低温条件下自准直检焦时,检焦正常,获得了较为清晰的图片,如图12所示。

7 结 论

本文在工程应用基础上,根据光的粒子特性,结合几何光学、微积分及自准直检焦原理,对成像

宽度、条纹遮拦宽度与光强差关系进行了理论分析,并结合实际工况对系统的自检焦双峰现象进行了模拟。仿真结果表明,双波峰电压值为1.4 V和0.47 V,与实际的测试数据(检焦双波峰电压值1.38 V和0.56 V)相符,最终成像效果良好,验证了自检焦的准确性。本文对自准直检焦系统在外环境影响下的检焦效果分析具有指导意义。

参考文献:

- [1] 李海星, 惠守文, 丁亚林. 国外航空光学测绘装备发展及关键技术[J]. 电子测量与仪器学报, 2014, 28(5): 469-477.
LI H X, HUI SH W, DING Y L. Development and key techniques of optical mapping equipment in foreign airborne[J]. *Journal of Electronic Measurement and Instrumentation*, 2014, 28(5): 469-477. (in Chinese)
- [2] 李永昆, 林招荣, 张绪国. 国外远距斜视航空相机发展概况[J]. 航天返回与遥感, 2017, 38(6): 11-18.
LI Y K, LIN ZH R, ZHANG X G. Development survey of foreign aerial cameras for distant oblique reconnaissance[J]. *Spacecraft Recovery & Remote Sensing*, 2017, 38(6): 11-18. (in Chinese)
- [3] 赵建川, 张润琦, 王杰, 等. 航空相机成像技术研究[J/OL]. 红外技术: 1-14.
ZHAO J CH, ZHANG R J, WANG J, SHAO Y, SHEN Y, LIU C M. Research on aerial camera imaging technology[J/OL]. *Infrared Technology*: 1-14. [2019-11-22]. <http://kns.cnki.net/kcms/detail/53.1053.TN.20181220.1049.002.html>. (in Chinese)
- [4] 廖劲峰. 一种机载长焦距可见光系统的无热化设计[D]. 北京: 中国科学院大学, 2019.
LIAO J F. *Athermalization Design of an Airborne Telephoto Visible System* [D]. Beijing: University of Chinese Academy of Sciences, 2019. (in Chinese)
- [5] 牛海军. 长焦距相机调焦关键技术研究[D]. 北京: 中国科学院大学, 2016.
NIU H J. *Study on Key Techniques of Autofocusing for Long-Focus Camera* [D]. Beijing: University of Chinese Academy of Sciences, 2016. (in Chinese)
- [6] SONG J H, HWANG S U, PARK I Y, et al.. Automatic focusing system for optical tweezers [C]. *Proc SPIE 6048, Optomechatronic Actuators and Manipulation*, 2005, 6048: 60480B.
- [7] 黄厚田, 王德江, 沈宏海, 等. 航空成像系统检调焦技术分析与展望[J]. 中国光学, 2014, 7(4): 542-551.
HUANG H T, WANG D J, SHEN H H, et al.. Analysis and prospect of auto-focusing technique for the aerial camera[J]. *Chinese Optics*, 2014, 7(4): 542-551. (in Chinese)
- [8] 李启辉, 丁亚林, 修吉宏, 等. 一种基于图像处理的自准直检焦方法[J/OL]. 激光与光电子学进展: 1-12 [2019-11-22]. <http://kns.cnki.net/kcms/detail/31.1690.TN.20190709.0837.044.html>.
LI Q H, DING Y L, XIU J H, et al.. A self-collimation focusing method based on image processing [J/OL]. *Laser & Optoelectronics Progress*: 1-12 [2019-11-22]. <http://kns.cnki.net/kcms/detail/31.1690.TN.20190709.0837.044.html>. (in Chinese)
- [9] 殷延鹤. 光电经纬仪快速被动调焦技术研究[D]. 北京: 中国科学院大学, 2018.
YIN Y H. *Fast Passive Auto-Focus for Opto-Electrical Theodolites* [D]. Beijing: University of Chinese Academy of Sciences, 2018. (in Chinese)
- [10] 陈志超. 基于R-C系统的长焦距航空相机实时相位检焦技术研究[D]. 长春: 中国科学院研究生院(长春光学精密机械与物理研究所), 2016.
CHEN ZH CH. *Research on Real-Time Phase Detection Auto Focus Technique of Long Focus Airborne Camera Based on R-C Optical System* [D]. Changchun: Graduate University of the Chinese A-

- cademy of Sciences (Changchun Institute of Optics, Fine Mechanics and Physics, Chinese Academy of Sciences), 2016. (in Chinese)
- [11] 孟繁浩. 基于图像处理的自动检焦技术在航空相机中的应用研究[D]. 长春: 中国科学院研究生院(长春光学精密机械与物理研究所), 2016.
MENG F H. *Study on the Application of Auto-focus Technique Based on Imageprocessing Technology in Aerial Camera*[D]. Changchun: Graduate University of the Chinese Academy of Sciences (Changchun Institute of Optics, Fine Mechanics and Physics, Chinese Academy of Sciences), 2016. (in Chinese)
- [12] 王晓茜. 航天遥感 CCD 相机检焦控制系统设计[J]. 现代经济信息, 2015(23): 349.
WANG X X. Design of focal control system for space remote sensing CCD camera[J]. *Modern economic information*, 2015(23): 349. (in Chinese)
- [13] 陈昌龙, 邸成良, 唐小萍, 等. 基于线阵 CCD 的高速光刻检焦技术[J]. 红外与激光工程, 2015, 44(8): 2389-2394.
CHEN CH L, DI CH L, TANG X P, *et al.*. High-speed focusing technique for lithography based on line scan CCD[J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2015, 44(8): 2389-2394. (in Chinese)
- [14] 程鹏辉, 吴萌源. 空间相机调焦平台的动力学特性研究[J]. 光学精密工程, 2019, 27(3): 602-609.
CHENG P H, WU M Y. Research on dynamic characteristics of space camera focusing platform[J]. *Opt. Precision Eng.*, 2019, 27(3): 602-609. (in Chinese)
- [15] 魏桂华, 肖亮, 郑志忠. 推扫式高光谱相机自动调焦[J]. 光学精密工程, 2019, 27(2): 450-457.
WEI G H, XIAO L, ZHENG ZH ZH. Auto-focusing method of push-boom hyperspectral camera[J]. *Opt. Precision Eng.*, 2019, 27(2): 450-457. (in Chinese)
- [16] 孔林, 杨林. 空间相机温度-离焦特性分析与试验[J]. 光学精密工程, 2017, 25(7): 1825-1831.
KONG L, YANG L. Study and test of thermal-defocusing property in space camera[J]. *Opt. Precision Eng.*, 2017, 25(7): 1825-1831. (in Chinese)
- [17] 张学敏, 宋兴, 侯晓华, 等. 可调焦离轴三反光学系统的装调[J]. 光学精密工程, 2017, 25(6): 1458-1463.
ZHANG X M, SONG X, HOU X H, *et al.*. Alignment of focus-adjustable off-axis reflective optical system[J]. *Opt. Precision Eng.*, 2017, 25(6): 1458-1463. (in Chinese)
- [18] 姜紫庆, 贾建军. 空间相机透镜调焦机构的设计与测试[J]. 光学精密工程, 2018, 26(12): 2956-2962.
JIANG Z Q, JIA J J. Development of focusing mechanism for space camera[J]. *Opt. Precision Eng.*, 2018, 26(12): 2956-2962. (in Chinese)
- [19] 吕世良, 刘金国, 王晓茜. 对地观测高分辨率 TDICCD 相机调焦控制系统设计[J]. 中国光学, 2015, 8(6): 1013-1019.
LÜ SH L, LIU J G, WANG X X. Design of refocusing system for a high resolution TDICCD earth observation camera[J]. *Chinese Optics*, 2015, 8(6): 1013-1019. (in Chinese)
- [20] 刘磊, 马军, 郑玉权. 空间微重力下离轴三反相机离焦范围[J]. 中国光学, 2014, 7(2): 320-325.
LIU L, MA J, ZHENG Y Q. Defocus range of off-axis three-mirror anastigmat (TMA) camera under space microgravity [J]. *Chinese Optics*, 2014, 7(2): 320-325. (in Chinese)
- [21] 刘炳强, 张帆, 李景林, 等. 空间相机调焦机构运动同步性误差分析[J]. 中国光学, 2013, 6(6): 946-951.
LIU B Q, ZHANG F, LI J L, *et al.*. Analysis of synchronous motion error for focusing mechanism of space camera[J]. *Chinese Optics*, 2013, 6(6): 946-951. (in Chinese)
- [22] 许兆林, 赵育良, 张玉叶. 基于光学自准直的航空相机自动调焦系统[J]. 光学仪器, 2011, 33(2): 52-56.
XU ZH L, ZHAO Y L, ZHANG Y Y. Autofocusing system based on optical autocollimating for aerial camera[J]. *Optical Instruments*, 2011, 33(2): 52-56. (in Chinese)
- [23] 史磊, 金光, 田海英, 等. 航空相机的自准直自动

检焦方法研究[J]. 光学精密工程, 2008, 16(12): 2460-2464.
SHI L, JIN G, TIAN H Y, *et al.*. Autofocusing

method with automatic calibration for aerial camera [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2008, 16(12): 2460-2464. (in Chinese)

作者简介:



刘伟毅(1983—),男,山东莱州人,博士,副研究员,硕士生导师,2012年于中国科学院长春光学精密机械与物理研究所获得博士学位,主要从事热设计及热光学分析方面的研究。E-mail: 2219101@163.com



徐钰蕾(1984—),女,吉林省吉林市人,博士,副研究员,2007年于中国科学技术大学获得学士学位,2012年于中国科学技术大学获得博士学位,主要从事航空光电载荷的光机结构设计及其仿真分析研究。E-mail: yuleixu@ciomp.ac.cn