

## 边缘视场检焦在航空遥感器中的应用

张继超

- (1. 中国科学院航空光学成像与测量重点实验室, 吉林 长春 130033;
2. 中国科学院长春光学精密机械与物理研究所, 吉林 长春 130033)

**摘要:** 针对大面阵航空遥感器检焦存在的问题, 提出了一种通过边缘视场检焦确定中心视场焦面位置的方法。通过倾斜安装与精密装调相结合的方法来提高检焦精度, 检焦系统的倾斜安装能够解决边缘视场视场角对检焦的影响, 利用显微镜装调、照相装调和电控校准来实现检焦像面的粗、精和精细标定, 解决边缘视场与中心视场像面存在差异的问题。检焦系统的伺服控制采用粗精结合、遍历搜索的方法搜索出焦面的最佳位置, 搜索最短步长为 0.01 mm。经分析计算, 检焦重复精度为 0.03 mm, 在焦深范围内, 满足使用要求。经试验验证和试飞验证, 证明该自动检焦方法检出的焦面准确, 得到的照片效果良好, 该方法切实可行。

**关键词:** 边缘视场检焦; 倾斜安装; 精密装调; 粗精结合

**中图分类号:** TH745; V248.1 **文献标志码:** A **文章编号:** 1007-2276(2013)04-1038-06

## Application of auto-focusing with margin field for airborne remote sensor

Zhang Jichao

- (1. Key Laboratory of Airborne Optical Imaging and Measurement, Chinese Academy of Science, Changchun 130033, China;
2. Changchun Institute of Optics, Fine Mechanics and Physics, Chinese Academy of Science, Changchun 130033, China)

**Abstract:** To solve the problem of auto-focusing in large array airborne remote sensor, a method to search position of focal plane in center field through auto-focusing in margin field was presented. Combination of oblique assembling and fine setting were taken to improve precision of auto-focusing, which could settle the influence of field angle in margin field. Microscope adjustment, photographic adjustment and electric adjustment were used to realize coarse calibration, accurate calibration and fine calibration of focal plane position and the problem of difference between focal plane position in center and in margin field was resolved. In servocontrol of the auto-focusing system, coarse-to-fine and ergodic hunting method were taken to find the optimum position of focal plane. Minimum step length was 0.01mm, and repeatability precision was 0.03mm, which was within focal depth and met the requirement. After experiment and flight test, focal plane that was detected by this method was accurate and the photographs were in high quality.

**Key words:** focusing in margin field; oblique assembling; fine setting; coarse to fine

收稿日期: 2012-09-05; 修订日期: 2012-10-09

基金项目: 国家 863 计划(2006AA06A208); 中国科学院知识创新领域前沿项目(070Y32R070)

作者简介: 张继超(1981-), 男, 助理研究员, 硕士, 主要从事航空遥感器结构设计方面的研究。Email: [zhangjichao@sohu.com](mailto:zhangjichao@sohu.com)

## 0 引言

长焦距大面阵航空遥感器焦平面尺寸较大,一般都采用平面式焦平面,在保证焦平面中心视场清晰的前提下,应尽可能的校正边缘视场与中心视场一致<sup>[1-3]</sup>。但即使再优秀的光学系统,边缘视场由于像差的存在,与中心视场还是存在一定的差异,像面不完全共面。航空遥感器要得到清晰的像,需将成像介质置于遥感器光学系统的焦深范围内。遥感器在工作平台上工作时,由于环境的变化,像面在漂移,这就需要设计相应的检焦系统,对像面位置进行实时检测。遥感器中心视场为成像最清晰的位置,所以检焦系统需检测出焦面的中心位置。

目前,检焦的方法有几种<sup>[4-6]</sup>。其一是在遥感器上安装传感器,测出遥感器所处的环境温度和压力,与实验室的基准环境温度和压力进行比较,根据差值,通过程序控制,实现检焦。其优点是检焦时间短,工作效率高,缺点是传感器根据安装位置的不同,不能够真实的反映遥感器的真正工况,对检焦结果影响较大。其二是利用光路自准直的方法检焦,根据物像共轭原理,通过光敏元件接收返回信号的大小特征来检焦。其优点是将环境温度压力变化引起的光学元件变形、光学元件折射率的变化以及周围空气折射率的变化综合包含在内<sup>[7-9]</sup>,检焦结果真实可靠。根据该遥感器前端设计有扫描反射镜的特点,系统采用第二种检焦方法。

文中针对特定的光学系统,提出了一种通过边缘视场检焦确定中心视场焦面位置的方法。利用倾斜安装与精密装调相结合的方法来提高边缘视场检焦的精度,通过显微镜装调、照相装调和电控校准来实现检焦像面的粗、精和精细标定。试验验证该方法检焦精度高,便于控制,切实可行。

## 1 检焦目的及原理

### 1.1 焦平面简介

焦平面是遥感器的重要组成部分,遥感器的很多工作都是围绕保证焦平面精度而展开的。文中所介绍的遥感器成像介质为面阵 CCD,采用光栅自准直的方法来检焦。相机的光学系统由自准直反射镜、镜头、探测器和检焦组成,光学系统示意图

如图 1 所示。

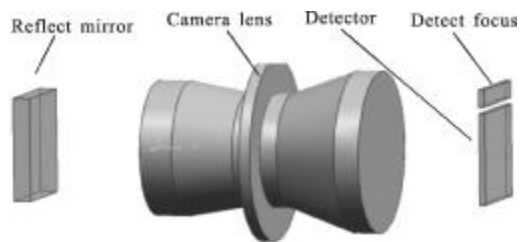


图 1 光学系统图

Fig.1 Optical system sketch

探测器尺寸为  $80\text{ mm}\times 80\text{ mm}$ , 遥感器的像面为圆形,为了节省空间,像面的大小按照探测器的外接圆来设计,尺寸为  $\varphi 120\text{ mm}$ 。像面示意图如图 2 所示。

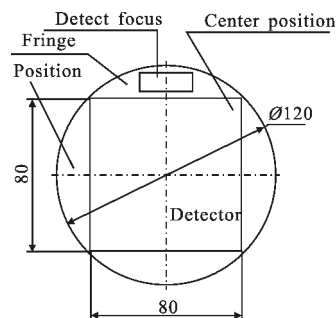


图 2 像面示意图

Fig.2 Image plane sketch

探测器占据了像面的大部分视场,在有限的像面尺寸内,为充分的利用空间,将检焦设计在像面的边缘,采用边缘视场检焦。光学系统的设计有像差以及视场角的存在,给边缘视场检焦带来一定的问题和困难。像差导致像面不是精确的平面,而是一个非球面,边缘视场与中心视场存在微小的差异;视场角的存在使检焦光源垂直像面发出的光无法经过光学系统进行自准。

### 1.2 检焦的目的

光学系统离焦严重降低光学系统的传递函数,影响遥感器的成像质量。该系统的 MTF(调制传递函数)曲线如图 3 所示,离焦曲线如图 4 所示。

从图 3 可以看出,该系统的传递函数在截止频率  $56\text{ lp/mm}$  时为 0.4,在长焦光学系统中为优质光学系统。从图 4 可以看出,当光学系统离焦  $0.1\text{ mm}$  时,传递函数下降至 0.3,说明离焦对光学系统的影响很大,需要检焦。

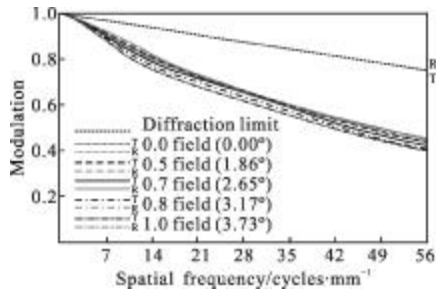


图 3 光学系统 MTF 曲线

Fig.3 Curve of optical MTF

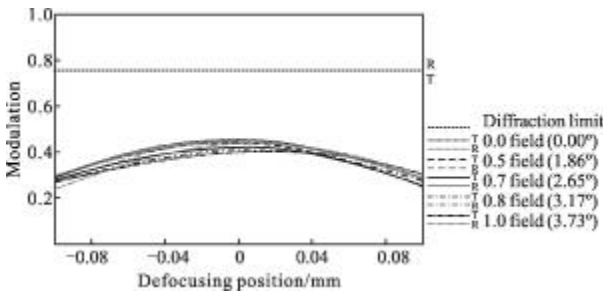


图 4 光学系统 MTF 离焦曲线

Fig.4 Departure focus curve of optical MTF

### 1.3 检焦原理

遥感器在扫描工作状态下,其光学系统前端设计有扫描反射镜,依据这个特点,遥感器采用自准直方式检焦。在焦平面处放置光栅,利用光源将光栅照亮,光栅经光学系统到达自准直反射镜返回,再经光学系统回到像面,使光栅在焦面附近成像。物像共面,说明焦面准确。物像不共面,需调焦。原理图如图 5 所示。

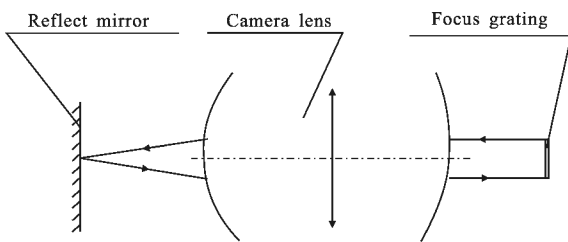


图 5 自准直检焦原理图

Fig.5 Principle of auto collimation

检焦时,自准直反射镜在垂直光轴位置附近小幅摆动,这样光栅的像就可以在光栅物上进行水平扫描,从而在光电探测器上产生一个光调制信号,调制信号在最大的时候为焦面位置。通过调制信号的大小来判断离焦情况,从而控制调焦。

## 2 边缘视场检焦安装与焦面标定

### 2.1 边缘视场检焦安装

由于视场角的存在,边缘视场的检焦光源垂直像面发出的光无法到达自准直反射镜,故需将检焦系统与像面倾斜一个角度安装。检焦安装示意图如图 6 所示。

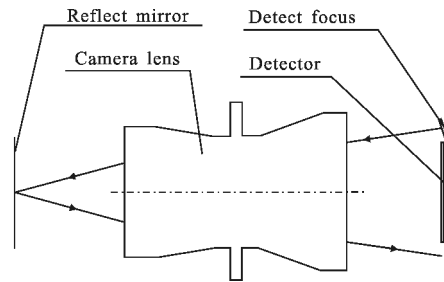


图 6 检焦安装示意图

Fig.6 Installattion sketch

调整遥感器的俯仰和方位轴系角度,使光栅通过光学系统、经自准直反射镜返回的光栅影像与光栅刻线平行,并摆动自准直反射镜使光栅的影像在光栅上切割。

### 2.2 检焦焦面的标定

检焦焦面的标定采用机械修磨和电子学调整相结合、粗精分步调整的方法。利用显微镜标定检焦所在的边缘视场的像面位置,确定边缘视场焦面位置;结合遥感器成像像面中心位置精确修正检焦焦面,使检焦焦面与遥感器中心视场像面重合;结合电子学控制精细修正检焦焦面,使检焦检到的焦面为中心视场精确像面。

#### 2.2.1 显微镜标定边缘视场像面

将调焦机构置于调焦零位,利用显微镜确定遥感器边缘视场像面位置。调整显微镜,标定检焦光栅位置与边缘视场像面位置,计算像面与检焦光栅位置的差值为 0.236 mm,检焦位置高于像面 0.236 mm,修整调整环节,使遥感器边缘视场像面与光栅平面重合。显微镜标定检焦像面示意图如图 7 所示。

由于光学系统像差的存在,边缘视场的像面与中心视场的像面存在差异,以及检焦倾斜安装引进的误差,导致检焦结果与中心视场的焦平面存在差异。

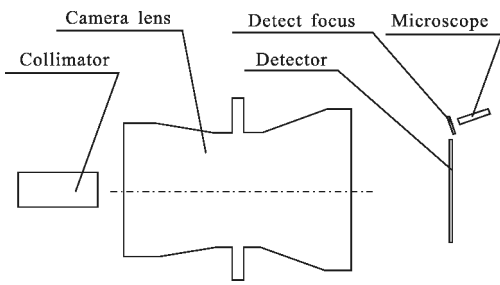


图 7 显微镜标定检焦像面示意图

Fig.7 Sketch of calibration focused plane by microscope

### 2.2.2 标定检焦像面与中心视场像面重合

将传感器对目标发生器成像，目标发生器调整成无穷远目标。调整成像介质的位置，找到成像介质中心视场成像的最佳位置，记录电位计的电压值为 7.506 V。利用标定后的检焦系统进行自动检焦，将检焦得到的调焦电位计值为 7.533 V，与像面电位计值差值为 27 mV，根据传动机构与电位计电压值的对应关系，计算出修正量为 0.058 mm，进行修正。

由于系统误差、测量误差和加工误差的存在，修整后的结果与实际焦面存在微小的差异。

### 2.2.3 电子学精确标定检焦像面

为了提高检焦的精度，将上述的修整结果进行电子学校正。再次自动检焦，检焦得出的调焦电位计值为 7.524 V，与像面位置的电位计值 7.506 V 进行比较，通过修改程序将差异进行修正，每次检焦后将检焦结果加入修正值。

通过上述 3 个步骤的修正，检焦结果能够真实的反映像面的位置。综合考虑电控误差和传动误差，以及机械加工和装调误差，检焦精度能达到 0.03 mm。

## 3 检焦伺服控制

由于检焦的倾斜安装，自准直反射镜在以竖直面为中心摆动时，光栅的像无法切割到接收端的光栅刻线，需对自准直反射镜的摆动位置进行标定。手动控制自准直反射镜，在切割光栅±10 mm 范围内，标定两侧极限位置的电位计值，作为自准直反射镜摆动的起始和结束位置。为了节省检焦时间，标定反射镜在±5°小范围内摆动。

合焦时，光栅像和光栅物共面，通过光栅的光能量多，光电器件接收的光能量最大，输出信号最强；离焦时，光栅像和光栅物不共面，通过光栅的光能量

少，光电器件接收的能量小，输出的信号弱。通过对调制信号的处理，最终确定焦面准确位置。自动检焦工作原理如图 8 所示。

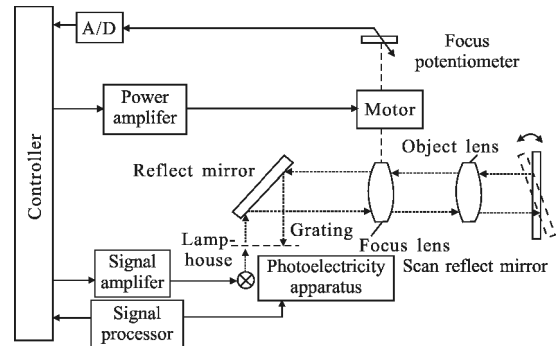


图 8 自动检调焦原理框图

Fig.8 Functional block diagram of autofocus control

检焦系统采用粗细结合、遍历搜索的方法搜索最佳焦面位置。首先通过粗检焦，在全检焦行程范围内快速搜索，找到焦面的大致位置；然后减小搜索步长，通过细检焦获得准确的最佳焦面位置。检焦电位计的电压范围为 15 V，取中间位置 7.5 V 为零位，作为检焦的起始点，在零位两侧进行检焦。7.5 V 对应的检焦步进电机的码值为 625，通过步进电机的码值控制检焦每步的位移量。

检焦搜索过程的波形如图 9 所示。图中左侧 11 个信号对应全检焦行程范围 10 个等分位置的粗检焦结果，由于检焦位置间隔较大，光敏元件的输出信号幅值变化较明显，通过对各位置光敏元件输出信号峰值的比较，判断出实际焦面的大致位置，检焦结果的电位计码值、电压值和调焦位置如表 1 所示；精检焦分两段进行，先对粗检焦获得的 3 个连续最大值位置区间以 0.06 mm 步长进行搜索，获得更准确的焦面位置，再以 0.01 mm 步长在更接近焦面位置的范围内确定最佳焦面位置，精检焦和精细检焦结果如表 2 和表 3 所示。

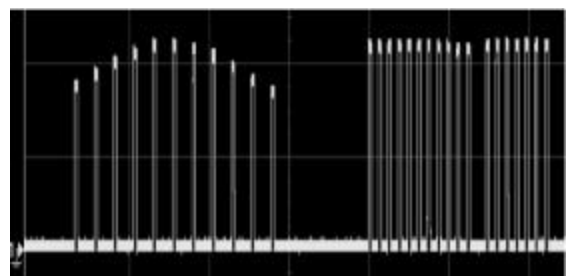


图 9 检焦搜索过程中光电池信号波形

Fig.9 Wave of photocell signal in autofocus process

表 1 检焦电位计码值、电压值和调焦位置

Tab.1 Code of potentiometer, voltage and position

Code	Voltage	Position
5C1	7.003	-1.0
5D5	7.109	-0.8
5E9	7.202	-0.6
5FD	7.303	-0.4
611	7.401	-0.2
625	7.504	0
639	7.604	0.2
64D	7.708	0.4
661	7.807	0.6
675	7.806	0.8
689	8.001	1.0

表 2 检焦电位计码值、电压值和调焦位置

Tab.2 Code of potentiometer, voltage and position

Code	Voltage	Position
606	7.350	-0.30
60C	7.382	-0.24
613	7.412	-0.18
619	7.443	-0.12
61F	7.471	-0.06
625	7.502	0
62B	7.530	0.06
631	7.562	0.12
637	7.591	0.18
63D	7.622	0.24
643	7.651	0.30

表 3 检焦电位计码值、电压值和调焦位置

Tab.3 Code of potentiometer, voltage and position

Code	Voltage	Position
622	7.485	-0.03
623	7.490	-0.02
624	7.494	-0.01
625	7.499	0
626	7.505	0.01
627	7.509	0.02
628	7.514	0.03

通过上述三步检焦，得出焦面的精确位置在电压值为 7.449 V 位置。

### 4 检焦准确性验证

遥感器在实际的使用过程中，环境是复杂变化的，故需要试验验证。将遥感器置于温度高度试验箱内，温度高度试验箱可以模拟飞机内温度和压力的变化，为遥感器提供不同的环境条件。在温度高度试验箱上开有窗口，遥感器可以对目标发生器成像。验证原理示意图如图 10 所示。

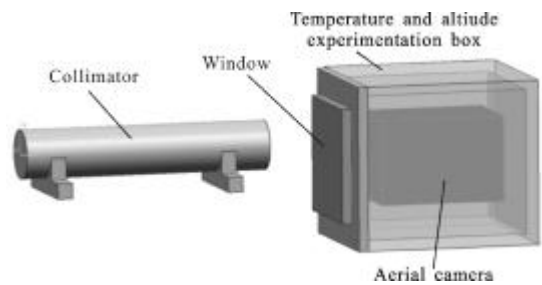


图 10 检焦验证原理示意图

Fig.10 Sketch of focused principle

将温度高度试验箱调节到温度 -15 °C、压力 600 KPa，保温两小时，模拟 4 000 m 高空环境，进行自动检焦，检焦 10 次，每次记录电位计值，检焦结果列于表 4 中。

表 4 检焦结果

Tab.4 Results of focus examine

Time	1	2	3	4	5
Voltage	7.672	7.677	7.673	7.678	7.678
Time	6	7	8	9	10
Voltage	7.677	7.678	7.679	7.676	7.677

对表中数据进行分析<sup>[9-11]</sup>：

$$\bar{x} = 7.673$$

$$\sigma = \sqrt{\frac{1}{n-1} \sum_{i=1}^n v_i^2} = 0.0043$$

$$x = \bar{x} \pm 3\sigma = 7.673 \pm 0.013$$

分析结果表明，表中数据不含有坏值，说明检焦结果的重复性好。检焦精度为 ±0.013 mm，即 0.026 mm，满足使用要求。

改变试验箱的温度和压力，遥感器在不同条件下进行自动检焦，并根据检焦结果对目标发生器成

像,得到传感器的分辨率为 44 lp/mm,与实验室成像分辨率 45 lp/mm 对比,图像分辨率几乎相同。结果表明,检焦结果正确。

传感器在实际飞行过程中对地成像的图像如图 11 所示。飞行器的飞行高度为 4 000 m,飞行速度为 700 km/h,成像比例尺为 1:10 000。图 11(a)为利用本方法检焦,合焦时航拍图片,图 11(b)为不进行检焦,离焦时航拍图片。可以看出,图片质量有明显差异,说明了检焦的必要性。

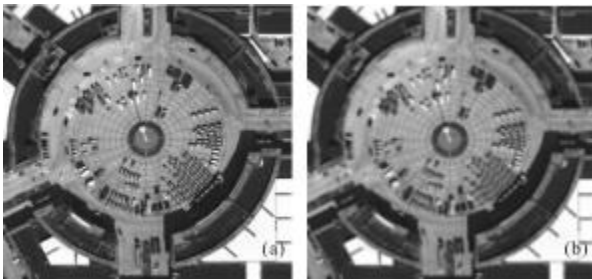


图 11 航拍图片

Fig.11 Navigate picture

## 5 结论

不同的传感器根据各自的特点,可采用不同的检焦方法,同一台传感器也有多种检焦方法可选择。本文所介绍的传感器焦平面尺寸有限,中心视场被传感器全部占用,检焦系统充分利用光学系统的边缘视场,采用光栅自准值的方法检焦。文中阐述了光栅自准确直检焦的原理,详细论述了边缘视场检焦装调方法与试验验证,通过成像图片的对比分析,说明了检焦的必要性。结果表明:此种方法检焦精度高,通过试验验证,该方法切实可行。

### 参考文献:

- [1] Zhang Shuqing, Ding Yalin. Image motion compensation method of a step-frame LOROP camera [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2008, 37(3): 501-504. (in Chinese)  
张树青,丁亚林.斜视步进画幅遥感相机像移补偿方法研究[J].*红外与激光工程*, 2008, 37(3): 501-504.
- [2] Wan Zhi, Ren Jianwen. Analysis of signal-to-noise ratio for remote sensing TDI CCD camera based on radiative transfer model [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2008, 37(3): 497-500. (in Chinese)  
万志,任建伟.基于辐射传输模型的TDI CCD 遥感相机信噪比分析[J].*红外与激光工程*, 2008, 37(3): 497-500.
- [3] Lu Jianfeng. Design of real-time processing system for IR image tracking based on digital signal processor [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2008, 37: 622-625. (in Chinese)  
鲁剑锋.基于 DSP 的实时红外图像处理系统的设计[J].*红外与激光工程*, 2008, 37: 622-625.
- [4] Ding Zhenyong Ye Lu. Detection method of parallelism of optic axes between laser and visible optical systems [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2008, 37(5): 890-893. (in Chinese)  
丁振勇,叶露.激光与可见光系统光轴平行性检测 [J].*红外与激光工程*, 2008, 37(5):890-893.
- [5] Wang Dejiang. Effects of gyro de-noising algorithm on aerial camera motion compensation system [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2010, 39(5): 968-978. (in Chinese)  
王德江.陀螺去噪算法对航空相机像移补偿系统的影响 [J].*红外与激光工程*, 2010, 39(5): 968-978.
- [6] Zhang Dexin. Design of super-wide-angle aerial reconnaissance CCD camera [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2010, 39(6): 1060-1065. (in Chinese)  
张德新.宽角航空侦察 CCD 相机设计 [J].*红外与激光工程*, 2010, 39(6): 1060-1065.
- [7] Wang Junshan. Characteristic analysis and correction technique about the image rotation of aerial camera [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2008, 37(3): 493-496. (in Chinese)  
王俊善.航空相机的像面旋转特性分析及其补偿方法[J].*红外与激光工程*, 2008, 37(3): 493-496.
- [8] Geng Wenbao. Characteristic analysis for image rotation of aerial camera [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2008, 37(6): 1053-1057. (in Chinese)  
耿文豹.航空相机的像面旋转特性分析[J].*红外与激光工程*, 2008, 37(6): 1053-1057.
- [9] Zheng Fei. Analysis of image rotation for sweeping aerial camera with CCD area array [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2009, 38(5): 897-900. (in Chinese)  
郑飞.摆扫式面阵 CCD 航空相机的像旋转分析[J].*红外与激光工程*, 2009, 38(5): 897-900.