

文章编号 1004-924X(2020)06-1236-09

航空遥感相机 Ronchi 光栅自准直 检焦模型分析与验证

刘学吉^{1*}, 丁亚林¹, 李 锋², 陈志超¹, 远国勤¹, 刘志明¹

(1. 中国科学院 长春光学精密机械与物理研究所
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. 空军装备部驻长春地区军事代表室, 吉林 长春 130033)

摘要:为解决航空遥感相机检焦系统故障分析、元器件选型及提高检焦精度的问题,本文深入研究了基于 Ronchi 光栅的光电自准直检焦法。首先,归纳总结了国内外航空相机常用的几种检焦方法,对比了每种检焦方法的优缺点。接着,重点介绍了基于 Ronchi 光栅的光电自准直检焦系统的构成和工作原理,建立了数学模型,模拟了检焦系统在不同像面位置处的输出波形。然后,为衡量离焦程度,提出了离焦评价因子的概念,接着分析了光学系统的衍射效应和像差大小、Ronchi 光栅的周期选择及检焦光源的能量分布这三种因素对检焦精度的影响,给出了 Ronchi 光栅周期的选择方法。最后,通过实验的方法对本文的仿真结果加以验证。实验结果表明:合焦波形的峰峰值占比 0.82,对应 0.05 mm 步长下的平均检焦分辨力约为 10%。

关键词:航空相机;检焦;自准直;Ronchi 光栅

中图分类号:TH74;V241.01;V248.1 **文献标识码:**A **doi:**10.3788/OPE.20202806.1236

Theoretical analysis and verification of Ronchi grating auto-collimated focusing for aerial remote camera

LIU Xue-ji^{1*}, DING Ya-lin¹, LI Feng², CHEN Zhi-chao¹, YUAN Guo-qin¹, LIU Zhi-ming¹

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

2. *Military Representative Office Stationed in Changchun by Air Force Equipment Department, Changchun 130033, China)*

**Corresponding author, E-mail: lxj3115@163.com*

Abstract: To address issues such as auto-focusing system fault analysis and component selection, and to improve the focusing accuracy of aerial remote cameras, this article offered insights into the auto-collimated focusing technology based on the Ronchi grating. First, in this paper, several common focusing methods of both domestic and foreign aerial cameras were summarized and compared. Then, the composition and operating principle of optoelectronic auto-collimated focusing systems based on the

收稿日期:2019-12-31;修订日期:2020-02-26.

基金项目:国家自然科学基金面上项目(No. 61675202)

Ronchi grating were introduced, the mathematical model was established, and the simulation curves of the focusing waveform with different imaging positions were presented. To measure the focal distances, the concept of the defocusing evaluation factor was proposed. Next, the three factors that affect the focusing accuracy of the diffraction effect and the aberration of the optical system, the period selection of the Ronchi grating, and the energy distribution of the light source were analyzed. The influence of the Ronchi grating period selection method was then presented. Finally, the experimental results verify the validity of the simulation results and show that the peak-to-peak ratio of the focusing waveform is 0.82, corresponding to an average focusing detection resolution of 10% at 0.05 mm.

Key words: aerial camera; focusing; auto-collimating; Ronchi grating

1 引言

航空遥感相机是将地物反射的太阳辐射光谱信息通过光学系统汇聚到成像器件上形成遥感图像的光电探测系统。航空相机在工作过程中会受到自然环境(如大气、温度、地形)和载机飞行姿态的影响,造成成像探测器的光敏面位置偏离理想像平面,这个偏移量被称为离焦量,当离焦量大于半焦深时相机就无法获取清晰的图像^[1]。因此,在航空成像领域如何精确地测量并补偿离焦量是重点研究方向。针对航空相机检焦方法的选择问题,国内外学者做了大量的研究工作,主要可概括为三类:程序控制法、图像处理法和光学测量法。

程序控制法是通过传感器实时采集外界环境参数信息,经过机上处理程序运算后和实验室标定数据进行比对,从而得到像面离焦量^[2],由于导致航空相机离焦的因素众多,无法精确标定并建立可靠的数学模型,因此这种方法的补偿精度有限。

图像处理法是根据图像中高频成分的锐利程度来评价像质的好坏,在不加入额外的光学元件的基础上,从航空图像中获取图像功率谱^[3]和调焦评价算子^[4-5],从而得到离焦信息,针对传统图像处理法需要对同一景物多次成像的不足,文章^[6]对空间滤波测速原理及 Visibility 与离焦量的关系进行了研究,提出一种适用于航空遥感相机的自动图像检焦方法,上述方法均需要图像中包含高对比度的成像景物信息。

光学测量法通常依据光学自准直原理,采用特定的光学元件(如五棱镜^[7]、靶标板^[8]、Ronchi

光栅^[9-10]等)通过探测器接收图像或者能量调制信号,再通过图像处理或信号处理的方法获得离焦量,这种方法的缺点是需要光学系统的成像光路中加入额外的检焦光学元件,优点是精度和可靠性高,故至今仍被应用在多种型号的航空相机上,如美国的 KS-112A 和 KS-146 相机等^[11];近年来,一种利用迈克逊干涉仪进行离焦检测的激光干涉光学测量法被应用在了航空遥感相机领域,使焦面测量精度可以达到 0.2 nm^[12],与传统光学自准直原理检焦法相比,激光干涉法的测量精度和灵敏度更高,但其测量装置复杂且抗干扰能力较差。

综上,基于 Ronchi 光栅的光电自准直检焦法(以下简称自准直检焦法)不论在测量装置的复杂程度,还是在工作精度和可靠性等方面都具有很强的工程应用价值,根据现阶段可以检索到的国内外航空相机 Ronchi 光栅自准直检焦法文献资料^[9-11]的调研情况,该方法的测量机理尚未明确,缺乏可评价检焦精度并适合工程应用的理论分析模型。本文深入研究了 Ronchi 光栅自准直检焦法的测量理论,建立了适合工程实践的可模拟检焦过程的数学模型,并进行了实验验证,该模型对于检焦故障分析、检焦测量装置的选型以及提高检焦精度具有重要意义。

2 基于 Ronchi 光栅的光电自准直检焦法的工作原理及理论建模

2.1 自准直检焦法的工作原理

光学自准直的概念是由 J. W. FOREST^[13]提出,最早应用于美国 KA-112A 航空相机上。其工作原理如图 1 所示,基于 Ronchi 光栅

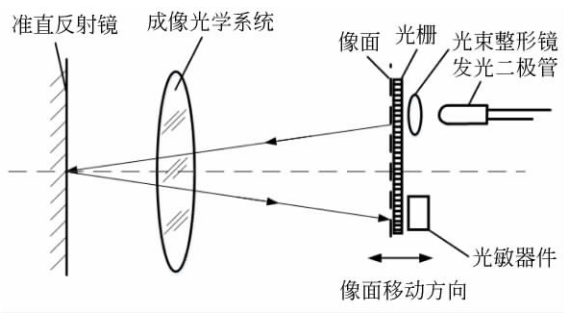


图 1 基于 Ronchi 光栅的光电自准直检焦法原理图
Fig. 1 Auto-collimated focusing system based on Ronchi grating

的光电自准直检焦系统由光源(通常为发光二极管)、Ronchi 光栅、准直反射镜、光电接收器件和相应的控制驱动部件等组成,检焦系统工作时,位于光学系统物镜前方的准直反射镜成垂直于光轴工况,由发光二极管照亮光栅,发出的光栅像经过光学系统透射后被准直反射镜反射,再次经过光学系统汇聚后依次被光栅和光电接收器件接收,为了检测合焦或离焦,准直反射镜在垂直光轴位置附近小幅摆动,使光栅像沿着垂直于光栅刻划方向水平扫描,这样光电接收器件可获得一个光调制信号,通过感测调制信号的峰谷值大小可得到焦面位置。

2.2 自准直检焦法的理论建模

Ronchi 光栅是指透射式黑白等栅距线性光栅,若透光缝宽度为 a ,遮光栅线宽度为 b ,则光栅周期 $T = a + b$,其空间函数表达式可以看作是

一个大小为 1 的矩形函数^[14]:

$$y(x) = \begin{cases} 1, & \text{在透光区,即 } kT - \frac{a}{2} \leq x \leq kT + \frac{a}{2}, \\ 0, & \text{在非透光区} \end{cases} \quad (1)$$

式中 k 为整数。

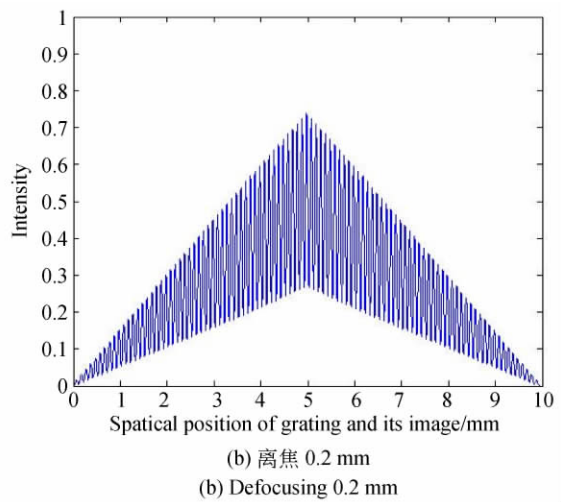
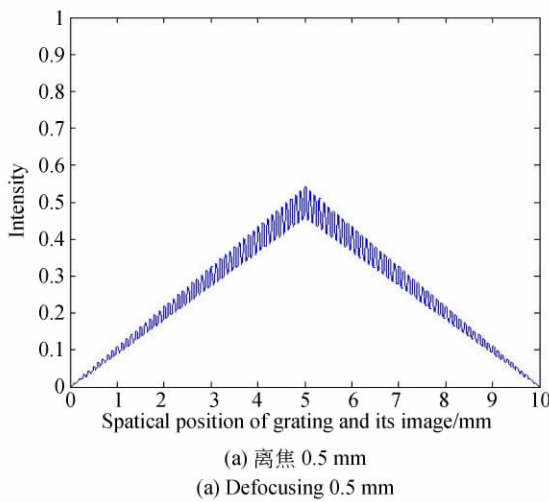
根据光学自准直原理,在理想成像的情况下,在物方光栅的共轭位置处得到的光栅像应该与物方光栅大小相似,准直反射镜的小幅摆动使光栅像在像方光栅表面沿着垂直于光栅刻划方向水平扫描,因此检焦时调制信号的理论模型 $F(x)$ 就是光栅空间函数与自身的卷积,即:

$$F(x) = y(x) * y(x). \quad (2)$$

一般地,光学系统离焦后的弥散斑大小常用离焦距离 l 、光学系统焦距 f 和口径 D 的线性函数描述,即 $d_{\text{defocus}} = l/F$, F 是系统的 F 数,且 $F = f/D$ ^[15]。其中 d_{defocus} 表示光学系统离焦后的弥散斑大小。

应用上述离焦模型仿真分析检焦过程,选取透光缝宽度 a 和遮光缝宽度 b 均为 0.1 mm,即光栅周期 $T = 0.2$ mm,设光电接收器件的光敏面大小为 $\Phi 10$ mm(除特别指出外,本文均选取上述条件),假设光源均匀照明,图 2 给出了在离焦量分别选取为 0.5 mm, 0.2 mm, 0.05 mm 及合焦时的检焦输出波形的仿真曲线。

由图 2 可知,随着离焦距离的增加,检焦输出波形的峰峰值占比逐渐变小,因此通过测量不同离焦距离时检焦波形曲线峰峰值占比,选取占比最大处的像面位置,即为理想焦平面位置。



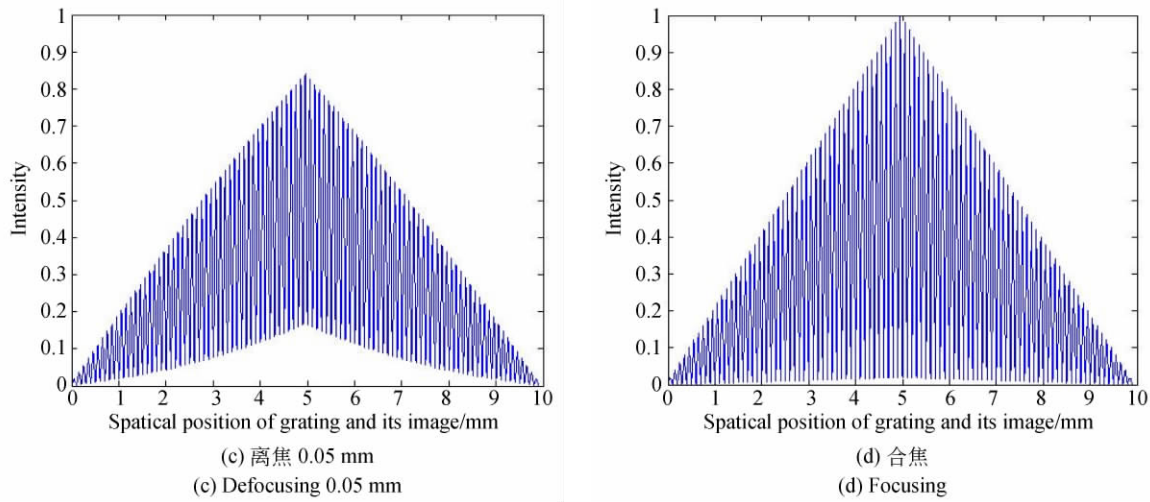


图 2 基于 Ronchi 光栅的光电自准直检焦法的检焦波形仿真曲线

Fig. 2 Simulation curve of auto-collimated focusing waveform based on Ronchi grating

2.3 自准直检焦法的检焦精度评价

实际光学系统的探测器在离开高斯像面一定距离时也可以清晰成像,这个距离被称为光学系统的半焦深^[16],其大小为 $2\lambda F^2$,所以光电自准直检焦法的检焦精度应优于光学系统的半焦深。定义离焦评价因子为检焦输出信号波形对合焦信号波形归一化后的峰峰值占比,离焦评价因子的大小可体现检焦系统的灵敏度及像面的离焦程度,离焦评价因子的变化量可体现检焦系统的分辨力,表 1 列出了理想情况下不同离焦量对应的离焦评价因子。

表 1 理想情况下自准直检焦波形的离焦评价因子

Tab. 1 Evaluation factors of auto-collimated focusing waveform under ideal conditions

离焦量/mm	离焦评价因子
0	1
0.025	0.700 6
0.05	0.668 3
0.2	0.469 6
0.5	0.082 8

3 基于 Ronchi 光栅的光电自准直检焦系统的工作精度分析

前文已经对理想情况下 Ronchi 光栅光电自准直检焦精度进行了分析,但在工程应用中,航空相机的工作环境复杂,影响检焦精度的因素众多,下

文从衍射和像差、Ronchi 光栅的周期及检焦光源的能量等三个方面对检焦精度的影响进行分析。

3.1 非理想光学系统的检焦精度分析

由于衍射效应的存在,理想光学系统的成像分辨力受制于艾里斑的半径,其大小为 $1.22\lambda F$,其中 λ 是光学系统的工作波长^[17]。若光电自准直检焦系统采用轴上点采样,则在考虑光学系统像差对光电自准直检焦精度的影响时,只需考虑球差和色差,即可直接考虑色球差对弥散斑的贡献,若光学系统的色球差为 $\delta L'_{FC} = \delta L'_F - \delta L'_C$,则由色球差引起的弥散斑大小 $d_{\text{blur}} = \delta L'_{FC} / F$ 。

假设一台可见光航空相机(中心波长 $0.6 \mu\text{m}$, $F=6$),其艾里斑半径大小为 0.004 mm ,其光学系统的色球差大小为 0.1 mm ,则由色球差引起的弥散斑直径 0.017 mm ,仿真计算考虑了衍射效应和色球差影响后的离焦评价因子,将结果和理想情况下的离焦评价因子对比展示在表 2 中。

表 2 理想情况与考虑像差时的离焦评价因子

Tab. 2 Evaluation factors with ideal case or aberration considered

离焦量/mm	理想离焦评价因子	有像差时的离焦评价因子
0	1	0.665 5
0.025	0.700 6	0.633 0
0.05	0.668 3	0.605 6
0.2	0.469 6	0.385 1
0.5	0.082 8	0.032 9

从表 2 中数据可见,由于光学系统中像差的存在,导致合焦信号的峰峰值占比下降,即离焦评价因子达不到理想值 1;同时,像差还导致检焦的灵敏度下降。因此,光学系统的像差越大,其检焦灵敏度越差,检焦精度越低。

3.2 光栅周期的选择对检焦精度的影响

Ronchi 光栅是光电自准直检焦法的重要元

件,本节探讨如何选取合适的光栅周期实现高精度检焦。在考虑光学系统衍射效应的影响下,选取透光缝宽度 a 和遮光缝宽度 b 分别为 0.05 mm, 0.1 mm 和 0.15 mm, 即光栅周期分别为 0.1 mm, 0.2 mm 和 0.3 mm 时仿真计算相应的离焦评价因子,如表 3 所示。

表 3 不同光栅周期时的离焦评价因子

Tab. 3 Evaluation factors with different period gratings

半栅周 期/mm	离焦量/mm						
	0.025	0.05	0.1	0.15	0.2	...	0.55
0.1	0	0	—	—	—	...	—
0.2	0.633 0	0.605 6	0.537 3	0.468 0	0.385 1	...	0
0.3	0.811 5	0.796 1	0.766 6	0.706 1	0.645 9	...	0

从表格 3 的结果可以看出,在离焦量相同的情况下,光栅周期越小,离焦评价因子下降越快,即检焦灵敏度越高;但过小的光栅周期会使得离焦量的测量范围变窄。因此,选取合理的光栅周期的准则是:既要保证较大的离焦量测量范围又要兼具较高的检焦灵敏度。

选择合理的光栅周期需要满足以下两个条件:(1)有效检焦范围内像面弥散斑的变化量小于 Ronchi 光栅透光缝的线宽度;(2)相邻两个采样位置处的离焦评价因子变化率至少大于 5%。假设一台航空相机(F#6)的调焦量是 ± 0.3 mm,则最大离焦量 0.3 mm 时的弥散斑半径为 0.05 mm,根据约束条件 1 得 $a/2 > 0.05$,即光栅透光缝线宽至少取 0.1 mm;根据表格 3 的分析结果,光缝宽度 0.1 时以半焦深为采样间隔的离焦评价因子大于 5%,故选择 Ronchi 光栅的周期 $T=a+b=0.2$ mm。

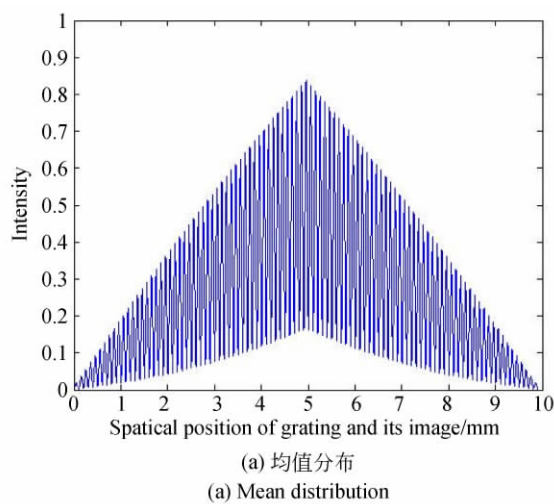
3.3 检焦光源能量分布对检焦精度的影响分析

检焦光源是光电自准直检焦装置中的重要器件,下面分三种情况对光源的能量分布进行讨论并研究对检焦精度的影响,分别为均匀分布、高斯分布和随机分布。

均匀分布是指光源的能量分布处处一致,是一种理想的情况;高斯分布是光源能量分布最常

见的形式,选用曲线拟合方差为 2;随机分布是指在均值附近分布着占总能量 20% 范围内的随机噪声,图 3 是这三种不同光源能量分布下的检焦波形图,表 4 是各个分布下对应不同离焦量时的离焦评价因子。

从表 4 中的结果可以看出,光源的随机分布与均匀分布的检焦评价因子之间差异微小,在千分之二以内;光源的高斯分布下的检焦精度要高出随机分布和均匀分布 2% 左右;检焦的有效量程不会随着光源能量的分布形式而改变。



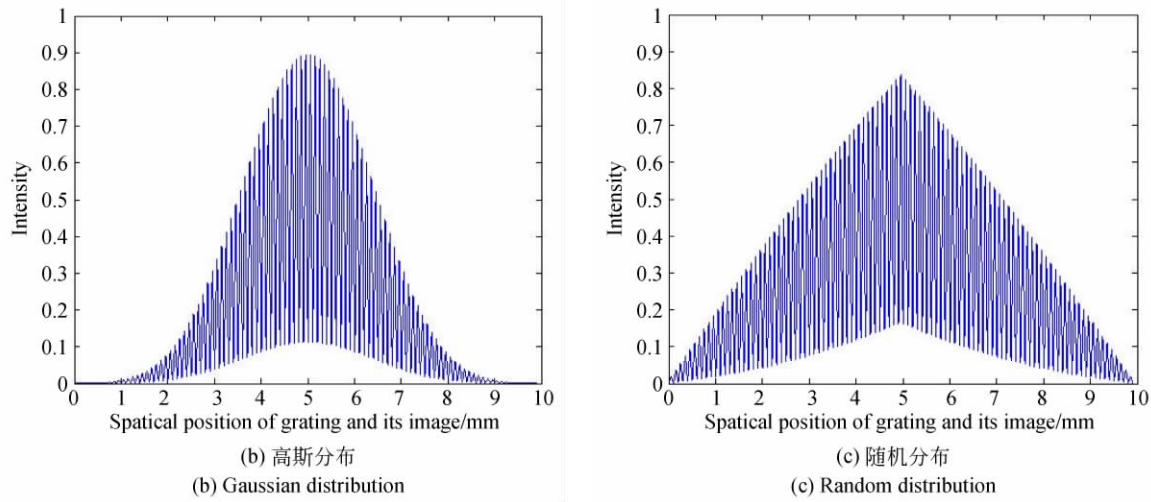


图 3 光源不同能量分布形式下的检焦波形仿真曲线

Fig. 3 Simulation curve with different energy distribution of light source

表 4 光源不同能量分布形式下的离焦评价因子

Tab. 4 Evaluation factors with different energy distribution of light source

能量分布	离焦量/mm						
	0.025	0.05	0.1	0.15	0.2	...	0.55
均值分布	0.633 0	0.605 6	0.537 3	0.468 3	0.385 1	...	0
高斯分布	0.732 4	0.674 8	0.573 7	0.480 3	0.389 6	...	0
随机分布	0.640 8	0.604 1	0.535 6	0.468 5	0.391 3	...	0

4 实验结果

实验采用的航空相机 F#6,选择基于 Ronchi 光栅的光电自准直检焦法,检焦光源采用工作波长 650 nm 的发光二极管,接收探测器选择光电电池,面阵大小为 $\Phi 15$ mm,Ronchi 光栅的周期为 $T=0.2$ mm,即透光缝宽度 a 和遮光缝宽度 b 均为 0.1 mm。在实验室进行自动检焦实验,通过编码器采集图像传感器的位置信息,选取离焦量为 0.5 mm,0.2 mm,0.05 mm 及合焦情况下光电电池的输出电压信号波形如图 4 所示,实验测得的离焦评价因子与理论仿真的对比结果见表 5。

从实验结果来看,检焦波形的形状与检焦光源能量在高斯分布下的仿真曲线一致,表明实验采用的发光二极管的能量分布属于高斯型。实验的结果表明:离焦评价因子的理论仿真和实验结果高度吻合,表明本文建模准确,提出的精度评价方法切实可行;合焦波形的峰峰值占比 0.82,对

应 0.05 mm 步长下的平均检焦分辨力约为 10%。实验结果还表明,受制于检焦系统光电器件的噪声等因素,实际检焦时,离焦评价因子的最小值恒大于 0。

表 5 离焦评价因子的仿真与实验对比结果

Tab. 5 Evaluation factors results of simulation and experiment

离焦量/mm	离焦评价因子的仿真结果	离焦评价因子的实验结果
0	0.782 0	0.824 5
0.025	0.732 4	0.770 1
0.05	0.674 8	0.718 6
0.1	0.573 7	0.622 8
0.15	0.480 3	0.524 9
0.2	0.389 6	0.419 8
0.55	0	0.150 3

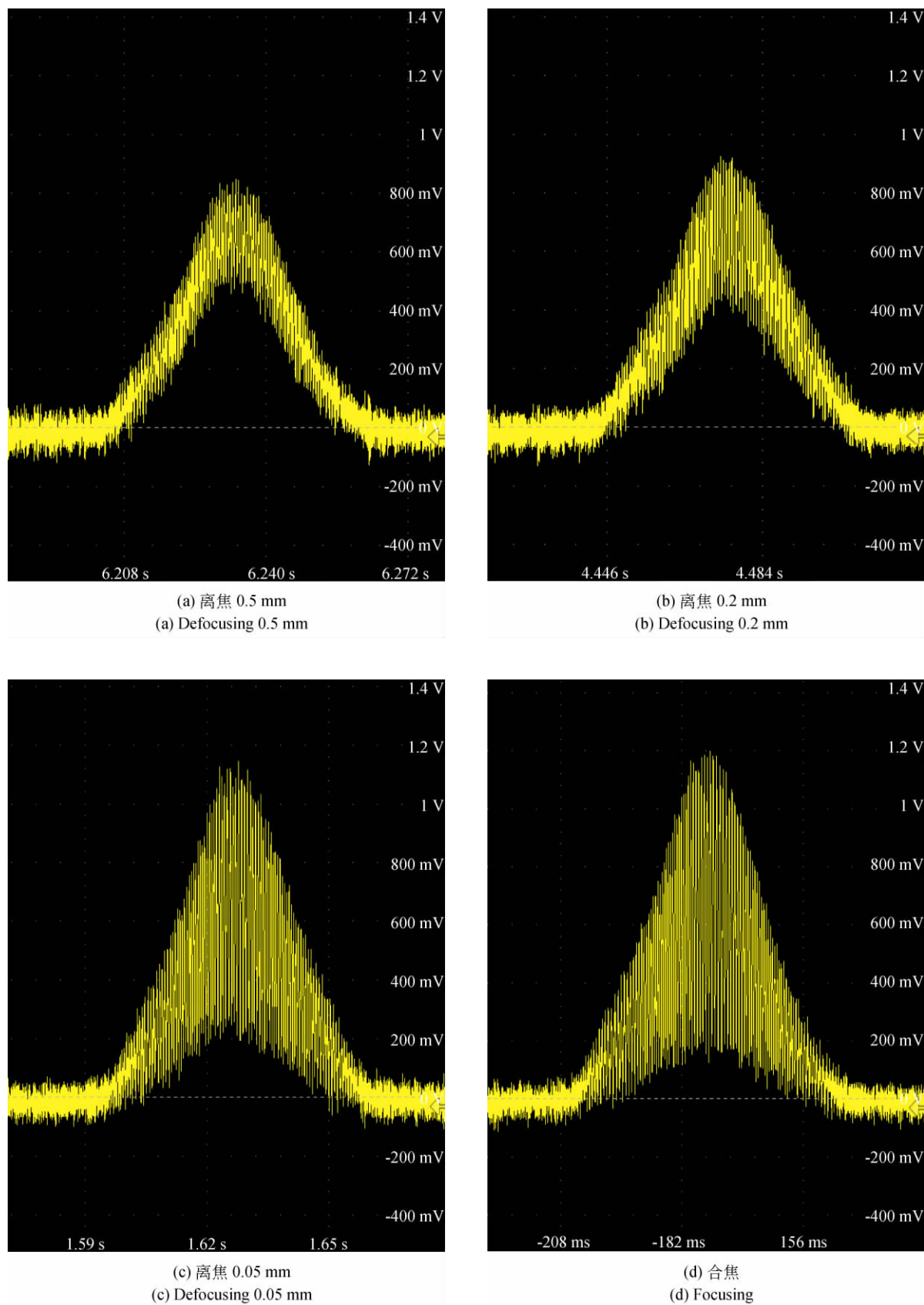


图 4 实验采集到的基于 Ronchi 光栅的光电自准直检焦波形

Fig. 4 Experimental curve of auto-collimated focusing waveform based on Ronchi grating

5 结 论

本文归纳总结了现阶段国内外航空相机主要的检焦方法,重点介绍了基于 Ronchi 光栅的光电自准直光学检焦系统的结构和工作原理,建立了

数学模型,提出了评价检焦精度的方法,分析了光学系统的衍射效应和像差大小、Ronchi 光栅的周期选择及检焦光源的能量分布等因素对检焦精度的影响。实验结果表明:合焦波形的峰峰值占比 0.82,对应 0.05 mm 步长下的平均检焦分辨率约为 10%。

参考文献:

- [1] 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-broom hyperspectral camera[J]. *Opt. Precision Eng.*, 2019, 27(2): 450-457. (in Chinese)
- [2] 许兆林,赵育良,张国栋. 新型航空相机自动调焦系统的设计[J]. 电光与控制, 2011, 18(4): 77-80.
XU ZH L, ZHAO Y LI, ZHANG G D. Design of an auto focusing system for a new type of aerial camera[J]. *Electronics Optics & Control*, 2011, 18(4): 77-80. (in Chinese)
- [3] 王昊. 航空可见光变焦镜头自动调焦系统研究[D]. 长春:中国科学院研究生院, 2015.
WANG H. *The Research of Visible Aviation Zoom Auto Focus System*[D]. Changchun: Graduate University of the Chinese Academy of Sciences, 2015. (in Chinese)
- [4] 杨权,刘晶红,马晓飞. 基于图像处理的机载光电平台自动调焦方法[J]. 液晶与显示, 2011, 26(5): 677-682.
YANG Q, LIU J H, MA X F. Auto-focusing method based on image processing for airborne electro-optical imaging platform [J]. *Chinese Journal of Liquid Crystals and Displays*, 2011, 26(5): 677-682. (in Chinese)
- [5] 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, 2016.
MENG F H. *Study on the Application of Autofocus Technique Based on Image Processing Technology in Aerial Camera* [D]. Changchun: Graduate University of the Chinese Academy of Sciences, 2016. (in Chinese)
- [6] 郑丽娜,李延伟,远国勤,等. Visibility 的航空遥感相机自动焦面检测方法[J]. 红外与激光工程, 2019, 48(4): 236-241.
ZHENG L N, LI Y W, YUAN G Q, *et al.*. Automatic focus plane detection of aerial remote camera based on Visibility[J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2019, 48(4): 236-241. (in Chinese)
- [7] 曹智睿,董吉洪. 航天 CCD 相机焦面位置地面标定方法研究[J]. 应用光学, 2014, 35(5): 830-834.
CAO ZH R, DONG J H. Terrestrial calibration method of focal plane position of space CCD camera[J]. *Journal of Applied Optics*, 2014, 35(5): 830-834. (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[2019-12-20]. <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 [2019-12-20]. <http://kns.cnki.net/kcms/detail/31.1690.TN.20190709.0837.044.html>. (in Chinese)
- [9] 王德江,李文明,许永森,等. TDI-CCD 全景航空相机快速自动检调焦方法[J]. 光电子·激光, 2012, 23(8): 1452-1457.
WANG D J, LI W M, XU Y S, *et al.*. A fast auto-focusing technique for the TDI-CCD panoramic aerial camera[J]. *Journal of Optoelectronics · Laser*, 2012, 23(8): 1452-1457. (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, 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 Academy of Sciences, 2016. (in Chinese)
- [11] 朱鹤,梁伟,高晓东. 航空相机光电自准直检调焦系统[J]. 光电工程, 2011, 38(3): 35-39.
ZHU H, LIANG W, GAO X D. Autofocusing system with opto-electronic auto-collimation meth-

- od for aerial camera[J]. *Opto-Electronic Engineering*, 2011, 38(3): 35-39. (in Chinese)
- [12] WANG S J, ZHAO Y, LI S. Research of aerial camera focal plane micro-displacement measurement system based on Michelson interferometer[J]. *International Symposium on Advanced Optical Manufacturing & Testing Technologies International Society for Optics and Photonics*, 2014, 9282: B-1-7.
- [13] FORREST J W, STRAAT H W, DAKIN R K. Autocollimating spectrometer[J]. *Journal of the Optical Society of America*, 1955, 46: 143-144.
- [14] 陈升, 李常伟, 张思炯. 基于 Ronchi 光栅 Talbot 效应的相位恢复[J]. *光学学报*, 2018, 38(4): 46-53.
CHEN SH, LI CH W, ZHANG S J. Phase retrieval based on Talbot effect of Ronchi grating[J]. *Acta Optica Sinica*, 2018, 38(4): 46-53. (in Chinese)
- [15] 贾海威. 离焦模糊图像的点扩散函数估计及超分辨率重建技术研究[D]. 重庆: 重庆大学, 2018.
JIA H W. *Research on Point Spread Function Estimation and Super-Resolution Reconstruction of Defocused Image*[D]. Chongqing: Chongqing University, 2018. (in Chinese)
- [16] 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)
- [17] 郁道银, 谈恒英. 工程光学[M]. 北京: 机械工业出版社, 2016.
YU D Y, TAN H Y. *Engineering Optics* [M]. Beijing: China Machine Press, 2016. (in Chinese)

作者简介:



刘学吉(1989—),男,吉林公主岭人,硕士,研究实习员,2012年于长春理工大学获得学士学位,2015年于国防科技大学获得硕士学位,主要从事航空光学成像仿真及光学系统设计等方面的研究。E-mail: lxj3115@163.com

通讯作者:



丁亚林(1964—),男,吉林长春人,研究员,博士生导师,1987年于吉林工业大学获得学士学位,1994年于东北大学获得硕士学位,主要从事航空遥感仪器光机结构总体技术及载机动态条件下稳定成像技术等方面的研究。E-mail: dingyl1964@sohu.com