第31卷，第1期
2011年1月

光谱学与光谱分析
Spectroscopy and Spectral Analysis

Vol. 31, No. 1, pp267-271
January, 2011

红外探测器成像实验研究

王德江[1,2]，张　涛[1]

1. 中国科学院长春光学精密机械与物理研究所，吉林 长春　130033
2. 中国科学院研究生院，北京　100049

摘　要　红外探测器广泛应用于多光谱成像系统中，文章提出并建立了一种红外线阵时间延迟积分探测器的成像实验系统，阐述了成像系统的工作原理，对影响成像质量的两个主要因素电子稳像与自动对焦进行了深入分析。利用高精度直流测速机确定了转台转速与探测器的行转移频率，采用卡尔曼滤波算法滤除了测速机带来的噪声，提高了速度匹配精度。在分析比较红外相机四种检焦方法的基础上采用视频信号幅度法进行检调焦。在国家光学机械产品质量监督检验测试中心实地搭建了成像实验系统，并分别对5.3，6.4和9.2 mm宽度靶标成像。实验结果表明，采集到的原始靶标纹理清晰，照相分辨率达到了每毫米11.3对线，达到了实验预期目的。

关键词　红外探测器；红外光谱；聚焦；成像实验

中图分类号：TH744.1　　**文献标识码**：A　　**DOI**：10.3964/j.issn.1000-0593(2011)01-0267-05

引　言

红外探测器与可见光探测器、紫外光探测器等组成的多光谱遥感设备能够获得目标在不同光谱内的反射、吸收信息，采用多光谱数据融合方法，有效提高了资源勘探、林业监测等科研任务的技术水平[1-3]，因此红外探测器在远距离遥感成像设备中得到了广泛的应用。

探测器是多光谱遥感设备中的核心器件[4-6]，近年来我国红外探测器的设计、生产水平得到了飞速发展[7]。为了获取红外探测器在实际遥感成像设备中的工作参数，进而改进遥感类探测器的设计方案、生产工艺，定制了一款线阵红外时间延迟积分(time delay integration，TDI)探测器，并搭建了相应的成像实验验证系统。

为了达到实验预期目的，排除其他因素导致图像分辨率下降[8]，首先提出了一种基于卡尔曼算法的滤波方法，精确建立了TDI探测器行转移频率与景物运动之间的关系，然后采用自适应检调焦方法完成了焦面的标定，最终在国家光学机械产品质量监督检验测试中心实地搭建了试验平台，并成功获取了一系列的靶标图像数据。

1　实验系统组成

成像系统主要包含五个子系统：光学系统，结构支撑与固定，探测器和探测器电子线路，图像采集部分，图像处理部分。其中光学系统焦距为50 mm，相对孔径1/2，光谱响应范围3～5 μm；结构支撑与固定系统负责红外镜头、探测器、电子线路板的固定等，其中红外镜头焦距可调；探测器和探测器电子线路驱动探测器按照一定的时序工作，其中探测器行转移频率软件可调，但最大不超过100 kHz，探测器曝光时间可调；图像采集系统将探测器输出的模拟信号离散化，然后输出到工控机上用以后续的图像判读、分析；图像处理系统对采集到的红外图像数据进行后处理。

试验测试系统主要包含四部分：辐射源，靶，准直仪，扫描器。辐射源提供了红外成像系统所探测到的辐射通量，相对于背景温度，辐射源的温度可调，但试验中最大可调温差为100 K；靶的功能是相对已知背景，为测试提供一个辐射特性和几何形状都已知的目标，试验中选用四条型靶；准直仪用光学方法将目标置于无穷远处，本次实验选用的准直仪焦距为6 000 mm。扫描器模拟相机成像过程，由高精度转台完成。

测试原理框图如图1所示。辐射源、标准红外靶标与准直仪结合在一起，将已知尺寸和亮度的标准靶标投射到红外

收稿日期：2010-08-28，**修订日期**：2010-11-29

基金项目：国家(863计划)项目(2006AA06A208)资助

作者简介：王德江，1981年生，中国科学院长春光学精密机械与物理研究所博士研究生　　e-mail：wangdj04@live.cn

© 1994-2012 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved.　http://www.cnki.net

成像系统。光学镜头、红外探测器等固定在精密转台上，成像中探测器接收到由靶标确定的等间隔疏密辐射通量，探测器将此辐射通量转换为电压，图像采集系统将此电压转换为相应的二进制数据，图像处理系统对采集到的二进制数据进行存储、非均匀性校正等。

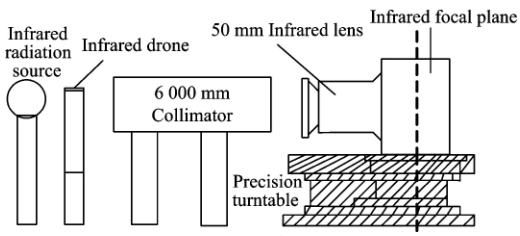

Fig. 1 Block diagram of experimental system

设准直仪的焦距为 f_1，红外鉴别率靶亮条纹或暗条纹宽度为 w，红外镜头焦距为 f_2，则靶标宽度对应到红外探测器上的条纹宽度 R 为

$$R = w\frac{f_2}{f_1} \tag{1}$$

如该靶标经判读是可鉴别的，则相机的分辨率 N 为

$$N = \frac{1}{2R} \tag{2}$$

2 电子稳像分析

TDI 探测器是由多行平行排列的线阵探测器构成的，TDI 探测器工作时，要求各行探测器都对同一景物成像一次[9-11]。图 2 是由四行探测器构成的 TDI 探测器的工作过程，各行探测器间距为 b。

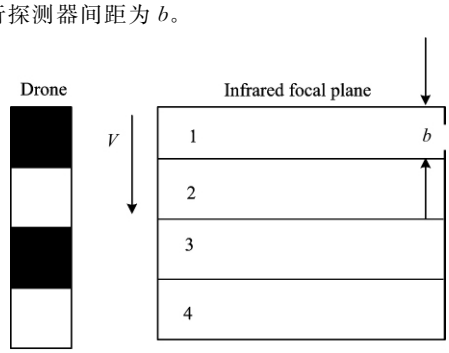

Fig. 2 Typical TDI operation

设 TDI 探测器以速度 v 运动，第一行探测器在 t_1 时刻对目标成像，t_2 时刻第二行探测器对目标成像，t_3 时刻第三行探测器对目标成像，t_4 时刻第四行探测器对目标成像，四行探测器的成像结果相加(积分)得到 TDI 探测器的最后输出。因此 TDI 探测器有更高的灵敏度和更低的噪声。

为保证 TDI 各行探测器准确重复对目标成像，须满足下式

$$v(t_2 - t_1) = v(t_3 - t_2) = v(t_4 - t_3) = b \tag{3}$$

式中 $t_n - t_{n-1}(n=1,2,3,4)$表示移动一个 b 的时间。一般称之为行转移时间，其倒数称之为行转移频率。

实际成像过程中，转台转速与 TDI 探测器行转移频率的失配导致照相分辨率降低[12-14]。利用与精密转台同轴的测速机建立起转台转速与红外探测器行转移频率之间的固定关系。但测速机输出包含随机噪声，导致景物在像面上移动的速度与探测器行转移频率不匹配，降低了成像分辨率。因此需要选择一种合适的去噪方法对测速机输出进行滤波，然后由滤波后的信号解算出 TDI 探测器行转移频率。

卡尔曼滤波是对随机信号的最优线性滤波，以均方估计误差最小为原则。假设待估计的测速机输出信号数学模型为由白噪声序列$\{w(k)\}$驱动的一阶自回归模型。模型结构为

$$\hat{x}(k) = a(k)\hat{x}(k-1) + K(k)y(k-1) \tag{4}$$

在 k 时刻滤波的均方根误差为

$$P(k) = E[x(k) - \hat{x}(k)]^2 \tag{5}$$

分别令 $a(k)$和 $K(k)$的偏导数为零，推得最小均方误差准则下的卡尔曼滤波方程为

$$\hat{x}(k) = a(k)\hat{x}(k-1) + K(k)[y(k) - a\hat{x}(k-1)] \tag{6}$$

测量方程为

$$y(k) = cx(k) + v(k) \tag{7}$$

其中 $\hat{x}(k)$ 为测速机输出的最优估计值，$v(k)$ 为测速机输出测量噪声，其方差为 σ_v^2，测量系数 c 是由测量系统和测量方法所确定的时不变常数。$y(k)$ 为测速机的采样输出数据序列，并含有输出噪声 $v(k)$。$K(k)$ 为滤波增益序列

$$K(k) = \frac{a^2P(k-1) + \sigma_w^2}{\sigma_v^2 + \sigma_w^2 + a^2P(k-1)} \tag{8}$$

测速机输出采样频率为 400 kHz，利用数字信号处理器完成如上所述的卡尔曼滤波，并将结果变换后更新数字信号处理器事件管理器中的周期寄存器，最终由脉宽调制端口输出行转移频率到探测器外输入行同步端口。

3 检调焦分析

高性能遥感成像设备对成像系统的聚焦性要求很高[15-18]，表 1 给出了通用的四种红外相机检焦测试技术。

Table 1 Means of focusing

检焦测试技术	典型靶
视觉方法	星型板、楔形板、线性扫描目标
模拟视频信号幅度	狭缝、高空间频率条靶、点源
MTF 最大化	狭缝、刀口
边缘监测算法	具有清晰细节的复杂目标

视觉方法需要大量有经验的图像判读人员反复对采集到的图像进行分析，工作量较大，且容易出现人为的干扰，当前试验条件下缺乏大量的有经验图像判读人员，不易采用该方法。

相对于可见光探测器，由于工艺的限制，红外探测器的噪声相对较大，从自主研发的角度考虑，本次实验红外探测器为定制的器件，器件技术水平有待于提高，边缘监测法亦不适宜。

与传统的传递函数聚焦法不同，调制传递函数(modulation transfer function，MTF)最大化方法对于提高检焦精度

© 1994-2012 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

具有非常重要的作用。根据 MTF 定义，应是输出对比度和输入对比度的比值。由于平均强度不变，所以等价于输出调制度和输入调制度的比值。则对于余弦输入信号，考虑理想采样的情况，即连续采样，假设像素的大小 P，由于受到孔径效应影响，经过探测器后，输出的信号强度的对比度会降低。新的调制度可通过调制度在整个单元像素上的平均得出。假设像素的中心落于余弦函数的顶峰，调制度变为

$$A_2 = \frac{1}{p}\int_{-p/2}^{p/2} A_1 \cos 2\pi f_{in} x \, \mathrm{d}x = A_1 \frac{\sin \pi f_{in} p}{\pi f_{in} p} \tag{9}$$

传递函数为

$$MTF(f_{in}) = \mathrm{sinc}(p f_{in}) \tag{10}$$

MTF 使用的前提条件是系统要满足空间不变性，即当目标移动时，其输出应该只改变位置而不改变其函数形式。以图 3 为例，平滑的余弦曲线表示输入信号，平直分段线为抽样后的得到的结果。可以看出原调制度 $A_1 \cos 2\pi f_{in} x$ 的顶端不一定会处于像素的中心，当对图像进行采样时，图像相对于探测器的位置会影响输出的调制度 A_2。所以 MTF 一直应用于评价连续系统。

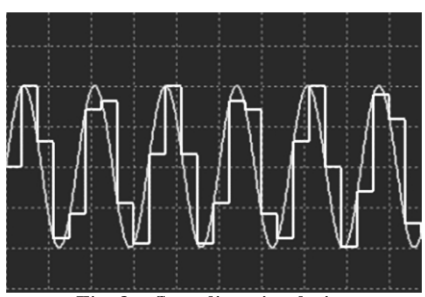

Fig. 3　Sampling simulation

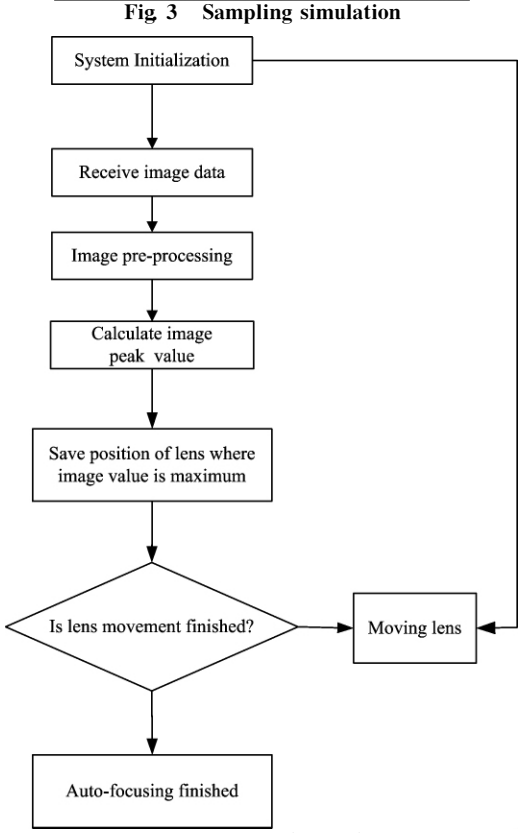

Fig. 4　Flowchart of auto-focusing

模拟视频信号幅度法只需要给定一个目标，通过判断采集图像的峰值即可得知相机是否聚焦，该方法简单易行，比较适合计算机自动控制实现。采用方法 2 检焦流程如图 4 所示。

4　实验测试与结果

试验中黑体前的靶标可以根据计算机的指令自动更换，黑体温度与环境温度温差最大为 100K，试验中设定的温差为 40 K（这主要考虑到探测器灵敏度不高这一因素），由于是对红外目标成像，6 000 mm 准直仪采用折反式光学系统，探测器使用液氮制冷，每次试验前均对探测器制冷 30 min 后进行。所有的试验装置都通过气浮平台与地面隔离。

按照前述检焦方法，标定好相机焦面；然后开始实验。选择 3 个尺寸的标准的四条型靶。靶标亮暗条纹宽度与折算到相机像面宽度如表 2 所示；利用 PhotoShop 对采集到的原始靶标放大 16 倍(未采用任何插值算法)，所得图像如图 5—图 7 所示。

Table 2　Results of experimentation

	靶标宽度 /mm	折合到像面宽度/μm	折合像面宽度占探测器像元百分比/%
靶标 1	5.3	44.16	96
靶标 2	6.4	53.33	116
靶标 3	9.2	76.67	167

Fig. 5　Obtained image from drone one

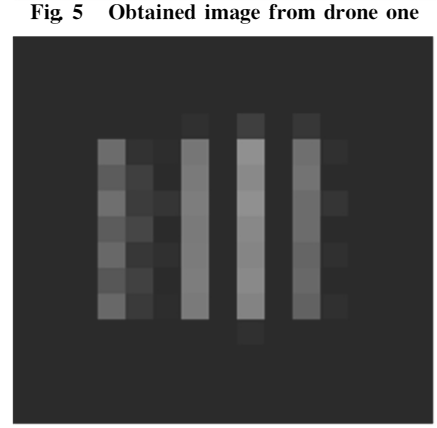

Fig. 6　Obtained image from drone two

© 1994-2012 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved.　http://www.cnki.net

由于靶标1宽度与探测器像元尺寸非常接近，因此所得图像的明暗边缘分明，靶标3折合到像面宽度与探测器尺寸之比为167%，因此图7明暗条纹边缘没有图5清晰。

对于实际的成像系统，静态照相分辨率如能达到1/2P（P为像元尺寸）已经非常困难，从图5可以得知，本次实验完全达到了1/2P照相分辨率的指标，即照相分辨率每毫米高于11.3对线。

Fig. 7 Obtained image from drone three

5 结 论

本次实验涉及到的环节众多，从最初的方案确定、探测器定制，到最终获取靶标图像，前后跨越时间较长，实验过程中对红外相机的光、机、电总体设计、调试获得了一定的经验。其中提出了一种红外TDI探测器成像实验系统，阐述了该系统的实验原理、实验方法，然后深入讨论了成像实验过程中影响分辨率的两个主要问题，即检焦、电子稳像，最后在国家光学机械产品质量监督检验测试中心实地搭建了该测试系统，分别对三种靶标5.3，6.4和9.2 mm成像，所得图片清晰。

References

[1] Zarco-Tejada P J, Berni J A J, Suarez L, et al. Remote Sensing of Environment, 2009, 113(6): 1262.

[2] Tominaga Shoji, Tanaka Norihiro. Journal of Electronic Imaging, 2008, 17(4): 043022.

[3] Olivier Romain, Thomas Ea, Patrick Garda. Optical Engineering, 2007, 26(11): 103202.

[4] Robert Rehm, Martin Walther, Hohannes Schmitz, et al. Infrared Physics & Technology, 2009, 52(6): 344.

[5] Rossi A, Diani M, Corsini G. Electronics Letters, 2010, 46(5): 348.

[6] Neubrech F, Pucci A, Cornelius T W. Physical Review Letters, 2008, 101(15): 157403.

[7] WEI Wei, HUANG Shang-lian, CHEN Wei-min, et al(韦 玮，黄尚廉，陈伟民，等). Spectroscopy and Spectral Analysis(光谱学与光谱分析), 2010, 30(3): 848.

[8] Smith Steven L. Optical Engineering, 1999, 35(5): 821.

[9] LIU Yan-yan, ZHANG Xin, XU Zheng-ping, et al(刘妍妍，张 新，徐正平，等). Optics and Precision Engineering(光学精密工程), 2009, 17(10): 2620.

[10] CAO Qi, WANG De-jiang, ZHANG Qi, et al(曹 琦，王德江，张 齐，等). Optics and Precision Engineering(光学精密工程), 2010, 18(3): 741.

[11] HU Jun, WANG Dong(胡 君，王 栋). Optics and Precision Engineering(光学精密工程), 2009, 17(8): 1810.

[12] Irie K, McKinnon A E, Unsworth K, et al. IEEE Transactions on Circuits and Systems for Video Technology, 2008, 18(2): 280.

[13] Chen L, Zhang X, Lin J, et al. Optics & Laser Technology, 2009, 41(11): 574.

[14] Amer Aishy, Dubois Eric. IEEE Transactions on Circuits and Systems for Video Technology, 2005, 15(1): 113.

[15] Langehanenberg P, Kemper B, Dirksen D, et al. Applied Optics, 2008, 47(19): D176.

[16] Khmaladze Alexander, Kim Myun, Lo Chun-Min. Optics Express, 2008, 16(15): 10900.

[17] Paturzo M, Memmolo P, Miccio L, et al. Optics Letters, 2008, 33(22): 2629.

[18] Maslov Konstantin, Zhang Hao F, Hu Song, et al. Optics Letters, 2008, 33(9): 929.

© 1994-2012 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

Study on Photographing Experiment of Infrared Detector

WANG De-jiang[1,2], ZHANG Tao[1]
1. Changchun Institute of Optics, Fine Mechanics and Physics, Chinese Academy of Sciences, Changchun 130033, China
2. Graduate University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China

Abstract Infrared detectors are widely used in multi spectral remote sensing systems, and in order to verify photographing principles of infrared time delay integration (TDI) detector, and make preparations for future research, a verification system for infrared TDI camera is proposed in the present paper. Experimental methods are explained thoroughly and two major factors which affect image quality are analyzed. First, the causes of image motion and their effects on the quality of image are studied, and a novel architecture using high precision DC-speed machine is presented, then the relationship between velocity of precision turntable and detectors line transfer frequency is determined by Kalman algorithm. Second, four focusing means are analyzed and compared, and video signal amplitude method is selected according to practical application. Finally, a genuine demo system is established in national supervision and test center for optics mechanics quality. 5.3, 6.4 and 9.2 mm drones are chosen for testing. Experimental results indicate that the obtained drone is vivid, and camera's resolution achieves 11.3 lines per mm, which satisfies preliminary aims.

Keywords Infrared detector; Infrared spectral; Auto-focusing; Imaging experiment

(Received Aug. 8, 2010; accepted Nov. 29, 2010)

© 1994-2012 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net