

〈系统与设计〉

红外焦平面阵列探测器数据采集系统的校准验证方法

余永涛¹, 陈勇国¹, 邹黎明², 王小强¹, 罗宏伟¹

(1. 工业和信息化部电子第五研究所, 广东 广州 510610;

2. 浙江大立科技股份有限公司, 浙江 杭州 310053)

摘要: 数据采集系统的校准验证是准确测试评价红外焦平面阵列探测器性能指标的技术基础。在分析红外焦平面阵列探测器数据采集系统工作原理特点的基础上, 提出了利用通用设备和红外焦平面阵列探测器测试系统对数据采集系统进行校准验证的方法。实际测试结果表明该方法有效可行, 实现了数据采集系统的采集误差限、线性度、系统噪声、采集速率等关键指标的校准验证。

关键词: 红外探测器; 焦平面阵列; 数据采集系统; 校准验证

中图分类号: TN216

文献标识码: A

文章编号: 1001-8891(2018)10-0961-05

Calibration Techniques for Data Acquisition Systems of IRFPA Detectors

YU Yongtao¹, CHEN Yongguo¹, ZOU Liming², WANG Xiaoqiang¹, LUO Hongwei¹

(1. The Fifth Electronics Research Institute of Ministry of Industry and Information Technology, Guangzhou 510610, China;

2. Zhejiang Dali Technology Co. Ltd., Hangzhou 310053, China)

Abstract: Calibration of data acquisition systems is important for testing infrared focal plane array(IRFPA) detectors. Based on the analyses of the working principle and characteristics, a calibration method for data acquisition systems is presented using general devices and testing systems of IRFPAs. The practical testing results indicate the effectiveness of the method, which could calibrate the key performance metrics of data acquisition systems, including acquisition error bounds, acquisition linearity, background noise, and acquisition frequency.

Key words: infrared detector, focal plane array, data acquisition system, calibration

0 引言

红外焦平面阵列(infrared focal plane array, IRFPA)探测器是红外成像系统的核心器件, 是探测、识别、处理和分析红外目标信息的关键, 在军民领域都具有广泛的应用^[1]。对于红外焦平面阵列探测器性能参数测试, 数据采集系统是采集、处理红外探测器输出信号的关键仪器。数据采集系统的采集误差限、背景噪声、采集速率等指标对于红外焦平面阵列探测器性能参数测试结果的准确性具有重要的影响, 是性能参数测试误差的重要来源^[2]。

红外焦平面阵列探测器参数测试系统专业复杂, 目前国内相关研制、生产、检测等单位的测试系统一

般是通过国外专业厂商定制开发或自行研制。对于其中的数据采集系统, 由于需要与被测红外探测器同步的帧、行、像元等触发信号, 常规的校准验证方法难以进行, 多是由国外厂商定期进行校准验证或只进行功能检查及部分参数指标的测试。另外, 国内相关单位研制了专用的红外探测器模拟器, 可以模拟数据采集系统所需的同步信号和数据信号, 实现数据采集系统的定量校准。由于不同单位的数据采集系统具体功能、性能指标要求不同, 传输接口通用性不足, 同时焦平面阵列向大规格、高速、数字化方向发展, 如已研发出 2048×1536 以及 200M 超大规模的非制冷红外焦平面阵列探测器^[3-8]。这些对红外焦平面阵列探测器数据采集系统校准验证的方法提出了挑战。

收稿日期: 2017-12-03; 修订日期: 2018-04-01.

作者简介: 余永涛(1987-), 男, 河南宝丰人, 博士, 主要从事光电器件质量检测与可靠性技术研究。E-mail: yuyt2010@163.com。

在分析红外焦平面阵列探测器数据采集系统工作原理特点的基础上,研究利用通用设备和红外焦平面阵列探测器测试系统对数据采集系统性能指标进行校准验证,并对方法进行实际测试应用,实现了采集误差限、线性度、系统噪声等指标的校准验证。

1 红外焦平面阵列探测器数据采集系统工作原理特点

红外焦平面阵列探测器参数测试原理如图1所示,黑体辐射源经过光学系统对被测IRFPA探测器提供黑体辐射激励;同时测试系统的控制模块对器件提供工作偏压、时序驱动及温度控制等,器件输出模拟电压信号到数据采集系统;数据采集系统在接收到控制模块的同步触发信号后,对被测器件输入的电信号进行放大、采集、处理和存储,并将数据传输到计算机;计算机对测试数据进行统计计算,得到各种性能参数数据。

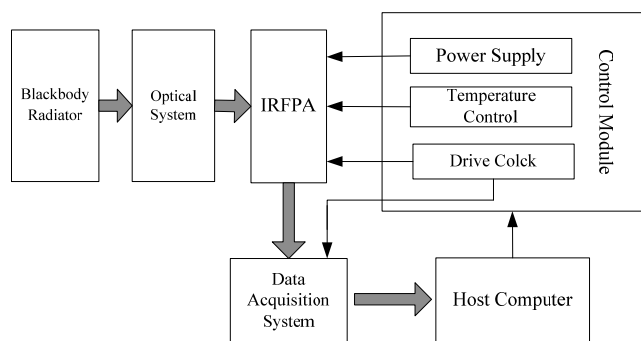


图1 红外焦平面阵列探测器参数测试原理框图

Fig.1 Block diagram of IRFPA detector testing

在红外焦平面器件参数测试时,控制模块为被测器件提供时钟和积分信号,同时为数据采集系统提供采样所需的帧、行以及像元同步采样时钟信号。在驱动时钟信号作用下,红外焦平面阵列探测器主要有两种输出方式:①单通道串行输出,像元电压信号从一个共同通道输出,适用于帧频较低及阵列规模较小的器件。②多通道并行输出,像元电压信号分别从两个以上通道并行输出,适用于帧频较高或规模较大的器件^[8]。与红外焦平面阵列探测器输出相匹配,数据采集系统的每个通道在帧、行同步触发后,每接收到一个像元同步触发信号就采集一个数据。数据采集系统所需的同步时钟触发信号是常规校准验证方法难以适用的关键。因此,可以利用测试系统自身控制模块提供所需的帧、行、像元同步触发信号,同时利用符合技术要求的通用高精度直流电源模拟IRFPA输出的电压信号,并作为标准信号对数据采集系统进行校

准验证。

2 红外焦平面阵列探测器数据采集系统校准验证方法

基于通用数据采集系统校准规范中参数定义和相关性能参数校准方法流程研究^[9-11],利用红外焦平面阵列探测器参数测试系统自身控制驱动模块提供所需的帧、行、像元同步触发信号,对数据采集系统的关键指标的校准方法进行研究。

2.1 采集电压范围、误差限和线性度

采集电压范围是指数据采集系统采集的电压信号上下限范围(E_L, E_H)。采集误差限是测量结果偏离真值(约定真值)的程度。采集线性度是测量一组线性电压信号时,测量数据与拟合直线间的偏离程度。

用计量合格的标准源(直流电源)在数据采集系统输入通道电压范围内输入固定直流电压值,由小到大改变电压值,从而确定数据采集系统的采集电压上下限范围。对于采集误差限、线性度的测试,校准验证方法如下:

1) 校准点的确定

如图2所示,在采集范围(E_L, E_H)内按式(1)~(3)确定11个校准点:

$$E_1 = E_L + (E_H - E_L) \times 1.25\% \quad (1)$$

$$E_i = E_L + (E_H - E_L)(i-1) \times 10\% \quad (i=2,3,\dots,10) \quad (2)$$

$$E_{11} = E_L + (E_H - E_L) \times 98.75\% \quad (3)$$

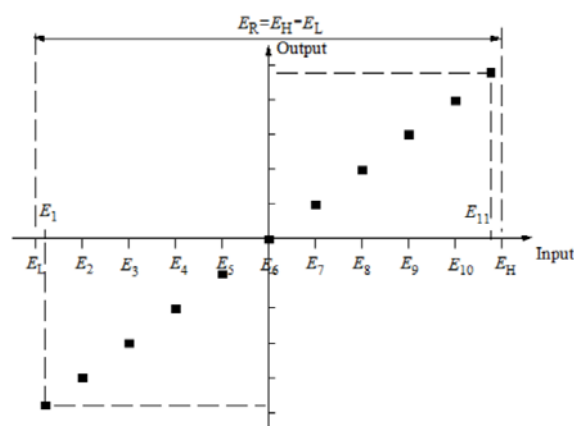


图2 数据采集系统输入输出示意图

Fig.2 Schematic diagram of input-output characteristics of data acquisition system

2) 数据采集

按校准点要求分别把标准源电压信号分别设为不同的值,在不同的设定电压 E_i 下,数据采集系统分别采集 n 个(≥ 100)数据 $x_{ij}(i=1,2,\dots,11;j=1,2,\dots,n)$ 。

3) 采集误差限

按照式(4)~(6)计算不同校准点的采集误差限 A_i , 以 11 个校准点中的最大值作为数据采集系统误差限的实测值:

$$\bar{x}_i = \frac{1}{n} \sum_{j=1}^n x_{ij} \quad (i=1,2,\cdots,11; j=1,2,\cdots,n) \quad (4)$$

$$\sigma_i = \sqrt{\frac{1}{n-1} \sum_{j=1}^n (x_{ij} - \bar{x}_i)^2} \quad (5)$$

$$A_i = \pm \frac{|\bar{x}_i - E_i| + 2\sigma_i}{E_H - E_L} \quad (6)$$

4) 采集线性度

在计算得到不同校准点 n 个采集数据平均值后, 按照式(7)~(11)采用最小二乘法拟合确定数据采集系统的采集线性度 L :

$$\bar{x} = \frac{\sum_{i=1}^{11} \bar{x}_i}{11}, \bar{E} = \frac{\sum_{i=1}^{11} E_i}{11} \quad (7)$$

$$k = \frac{\sum_{i=1}^{11} (\bar{x}_i - \bar{x})(\bar{E}_i - \bar{E})}{\sum_{i=1}^{11} (\bar{E}_i - \bar{E})^2} \quad (8)$$

$$b = \bar{x} - k\bar{E} \quad (9)$$

$$\Delta \bar{x}_i = \bar{x}_i - (kE_i + b) \quad (10)$$

$$L = \frac{\max(|\Delta \bar{x}_i|)}{E_H - E_L} \quad (i=1, 2, \cdots, 10) \quad (11)$$

式中: $\Delta \bar{x}_i$ 为第 i 个电压 E_i 下测量 n 次的平均值与最小二乘法拟合直线回归值的误差。

2.2 采集系统噪声

采集系统噪声会对红外探测器的性能测试产生重要影响, 其定义及测量较为复杂^[4-5]。采集系统噪声一般是指在无外部输入信号条件下, 采集系统自身输出电压信号的随机涨落, 一般用均方根表示。

对于数据采集系统噪声的测量, 在采集通道输入端开路或 $50\ \Omega$ 短路负载条件下, 采集 N (≥ 100) 个数据 X_i ($i=1,2,\cdots,N$), 按式(12)~(13)计算采集系统的噪声 RMS:

$$\bar{X}_i = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N X_i \quad (i=1,2,\cdots,N) \quad (12)$$

$$\text{RMS} = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^N (\bar{X}_i - X_i)^2}{N-1}} \quad (13)$$

2.3 采集速率

数据采集系统采集通道在单位时间内采集的可读有效数据个数称为采集速率, 或采集频率。数据采集系统单通道最高采集速率需要满足被测红外探测器工作帧频和分辨率的要求:

$$f_{\text{clk}} \geq M \times N \times f_{\text{frame}} / P \quad (14)$$

式中: M 、 N 为红外焦平面器件的像元阵列规模, 决定了器件的分辨率; f_{frame} 为器件的工作帧频; P 为采集通道数。

对于采集速率的测试, 采用红外焦平面测试系统的时钟控制模块为数据采集系统提供帧、行同步触发信号, 采用高精度直流电压信号作为数据采集系统的模拟信号输入, 并把输出电压设为采集范围内的固定值; 根据采集系统的标称采集速率, 设置控制模块输出的像元同步触发信号频率, 采用高速示波器对信号频率进行校准验证; 逐步提高信号频率, 重复以上步骤, 直到采集数据异常, 从而确定数据采集系统的最高采集速率。

3 方法应用验证

根据红外焦平面阵列探测器测试系统的情况, 分别选取国外进口测试平台和自研测试平台对红外焦平面阵列探测器数据采集系统的关键指标进行测试验证。

基于 FPA 770 外焦平面阵列探测器参数测试平台, 对美国公司的 PI 3105 型专用数据采集系统进行测试验证^[12]。采用高精度直流电源模块作为数据采集系统的模拟输入信号源, 并利用计量合格 Keithley 2000 高精度多用表对输入电压信号进行验证, 保证输入电压信号的精确度, 在 10 V 量程内的误差小于 $50\ \mu\text{V}$, 满足校准验证要求。

在采集线性度测量中, 采用最小二乘法对数据采集系统的输入输出数据进行拟合, 如图 3 所示。测试平均值与最小二乘法拟合直线回归值之间的最大误差出现在 E_4 校准点, $\Delta \bar{x}_4$ 为 -0.0055 , 进而计算得到线性度为 0.14%。

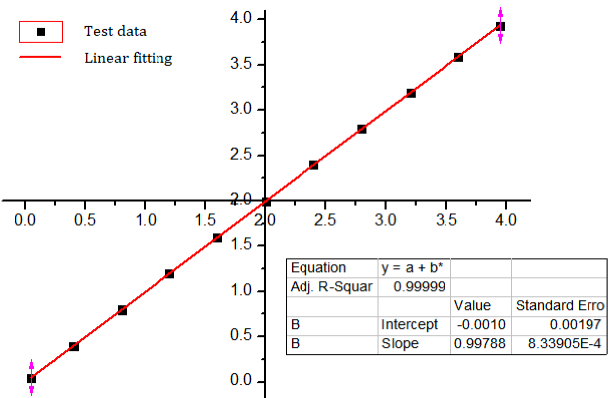


图3 数据采集系统采集线性度拟合

Fig.3 Linear fitting for acquisition linearity of data acquisition system

在最高采集速率测量中，分别针对采集系统的 8 个通道，利用 300 MHz 带宽的示波器 Agilent DSO5034A 对像元同步触发信号频率进行验证，如图 4 所示，采集速率达到 11 MHz 时，数据采集系统仍可正常工作，继续提高采集速率后，采集数据异常。所有测试结果汇总如表 1 所示，达到厂商标称指标。

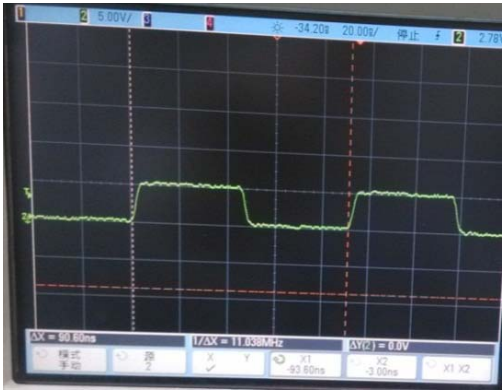


图 4 数据采集系统同步采集触发信号

Fig.4 Synchronal sampling signals of data acquisition system

表 1 PI 3105 采集系统关键指标校准验证结果

Table 1 Calibration results for PI 3105 IRFPA detector data acquisition system

| Number | Calibration parameter | Calibration result | Target aim |
|--------|--------------------------|--------------------|------------|
| 1 | Voltage range | 0~4.0012 V | 0~4 V |
| 2 | Acquisition error bounds | ±0.382% | ≤±1.0% |
| 3 | Linearity degree | 0.138% | - |
| 4 | RMS noise | 130 μV (50 Ω) | ≤150 μV |
| 5 | RMS noise | 140 μV (Open) | ≤150 μV |
| 6 | Sampling rate | 11 MHz | ≥10 MHz |

另外，基于 VO_x 红外焦平面测试平台对自研系统进行了测试验证，结果如表 2 所示，达到要求指标。

表 2 数据采集系统关键指标校准验证结果

Table 2 Calibration results for VO_x IRFPA detector data acquisition system

| Number | Calibration parameter | Calibration result | Target aim |
|--------|--------------------------|--------------------|------------|
| 1 | Voltage range | 0~5.0009 V | 0~5 V |
| 2 | Acquisition error bounds | ±0.213% | ≤±1.0% |
| 3 | Linearity degree | 0.102% | - |
| 4 | RMS noise | 0.16 mV (50 Ω) | ≤0.2 mV |
| 5 | RMS noise | 0.17 mV (Open) | ≤0.2 mV |
| 6 | Sampling rate | 6 MHz | ≥5 MHz |

根据数据采集系统的测试结果，自研系统的部分性能指标达到甚至优于进口系统的指标。由于采集速率很高，为了提高测试结果的稳定性，可以适当增大数据采集数量。在系统噪声测试时，50 Ω 短路负载条件的噪声相对较小。

4 结论

本工作研究提出了利用通用设备（高精度直流电源、多用表、高速示波器等）和红外焦平面阵列探测器测试系统对数据采集系统的关键性能指标进行校准验证的方法。实际测试结果表明该方法有效可行，校准验证了采集误差限、线性度、系统噪声、采集速率等关键指标，可以为红外焦平面阵列探测器数据采集系统的校准验证提供规范有效的指导，为红外焦平面阵列探测器性能参数的准确测试和评价奠定基础。

参考文献：

[1] 冯涛, 金伟其, 司俊杰. 非制冷红外焦平面探测器及其技术发展动态[J]. 红外技术, 2015, 37(3): 177-184.

FENG Tao, JIN Weiqi, SI Junjie. Uncooled infrared FPA—a review and forecast[J]. *Infrared Technology*, 2015, 37(3): 177-184.

[2] 王江辉. 红外焦平面阵列测试数据采集与评价技术研究[D]. 西安: 西安电子科技大学, 2011.

WANG Jianghui. Study of test data acquisition and evaluation in infrared focal plane array[D]. Xi'an: Xidian University, 2011.

[3] 王恒飞, 应承平, 刘红元, 等. 红外焦平面阵列数据采集系统校准方法[J]. 光子学报, 2014, 43(s1): 191-195.

WANG Hengfei, YING Chengping, LIU Hongyuan, et al. Calibration technique of data acquisition systems for infrared focal plane arrays[J]. *Acta Photonica Sinica*, 2014, 43(s1): 191-195.

[4] 李锋, 董峰, 冯旗. 320×256 中波红外焦平面器件低噪声采集系统设计[J]. 红外技术, 2017, 39(8): 704-709.

LI Feng, DONG Feng, FENG Qi. Acquisition system with low noise based on 320×256 medium wavelength infrared FPA[J]. *Infrared Technology*, 2017, 39(8): 704-709.

[5] 邢彦敏, 吕坚, 周云, 等. 基于 LabVIEW 的非制冷红外焦平面阵列采集系统的设计[J]. 红外技术, 2010, 32(9): 541-545.

XING Yanmin, LV Jian, ZHOU Yun, et al. A design of acquisition system of UFPA based on the LabVIEW[J]. *Infrared Technology*, 2010, 32(9): 541-545.

[6] 刘子骥. 非制冷红外焦平面阵列探测器测试及验证成像技术研究[D]. 成都: 电子科技大学, 2012.

LIU Ziji. Study on Uncooled Infrared Focal Plane Detector Testing and Imaging Technology[D]. Chengdu: University of electronic science and

technology of China, 2012

- [7] 马学智. 红外焦平面器件性能检测与特征分析研究[D]. 西安: 西安电子科技大学, 2013.
- MA Xuezhi. IRFPA performance detection and characteristic analysis[D]. Xi'an: Xidian University, 2013.
- [8] 王忆锋, 黄江平. 红外焦平面探测器阵列规格的发展[J]. 红外, 2013, **34**(9): 1-8.
- WANG Yifeng, HUANG Jiangping. Development of infrared focal plane array detector in format[J]. *Infrared*, 2013, **34**(9): 1-8.
- [9] 梁志国, 周艳丽. 数据采集系统校准规范 JJF 1048-95[S]. 北京: 中国航空工业总公司第三〇四研究所, 1995.
- LIANG Zhiguo, ZHOU Yanli. Calibration specification of data acquisition system JJF1048-95[S]. Beijing: The 304 Institute of Aviation

Industry Corporation of China, 1995.

- [10] 梁志国, 李少壮, 李滨. 数据采集系统直流增益和线性度的精确评价[J]. 计测技术, 1999, **19**(5): 17-21.
- LIANG Zhiguo, LI Shaozhuang, LI Bin. Precise evaluation of DC gain and linearity of data acquisition system[J]. *Metrology & Measurement Technology*, 1999, **19**(5): 17-21.
- [11] 张宇, 常艳. 数据采集系统校准研究[J]. 电子测量技术, 2012, **35**(8): 98-102.
- ZHANG Yu, CHANG Yan. Research of data acquisition system calibrating[J]. *Electronic Measurement Technology*, 2012, **35**(8): 98-102.
- [12] HGH. PI-3105 *Multi-Channel Data Acquisition System for Image Sensor Testing Product Description*[M]. France: HGH, 2004.

(上接第 951 页)

- [31] 蒋淑芳, 郭兴旺, 沈京玲, 等. 固体火箭发动机绝热层脱站的红外热波无损检测[J]. 激光与红外, 2005, **35**(8): 584-586.
- JIANG Shufang, GUO Xingwang, SHEN Jingling. Infrared thermal wave NDT on the disbonds of the heat insulated layer in solid propellant rocket motors[J]. *Laser & Infrared*, 2005, **35**(8): 584-586.
- [32] 杨正伟, 张伟, 武翠琴, 等. 导弹发动机壳体粘接质量红外热波检测[J]. 仪器仪表学报, 2010, **31**(12): 2781-2787.
- YANG Zhengwei, ZHANG Wei, WU Cuiqin. Infrared thermography applied to evaluate adhesive equality of missile motor shell[J]. *Chinese Journal of Scientific Instrument*, 2010, **31**(12): 2781-2787.
- [33] 李艳红. 特种涂层涂覆质量的红外热波无损检测技术研究[D]. 北京: 北京理工大学, 2009.
- LI Yanhong. Infrared thermal wave nondestructive testing technology for coating quality of special coatings[D]. Beijing: Beijing Institute of Technology, 2009.
- [34] 陶胜杰, 杨正伟, 张伟, 等. 基于热图序列时间特征的涂层厚度测量研究[J]. 仪器仪表学报, 2014, **35**(8): 1810-1816.

TAO Shengjie, YANG Zhengwei, ZHANG Wei. Research on measurement of coating thickness based on thermal image time characteristic[J]. *Chinese Journal of Scientific Instrument*, 2014, **35**(8): 1810-1816.

- [35] HAN X Y, Favro L D, Thomas R L. Quantitative defect depth measurements for NDE of Composites[A]. Proceedings of the American Society for composites, 1988: 1077-1081.
- [36] Maldague X. Introduction to NDT by active infrared thermography[J]. *Materials Evaluation*, 2002, **60**(9): 1063-1073.
- [37] Carlomagno G M, Meola C. Comparison between thermographic techniques for frecoes NDT[J]. *NDT & E International*, 2002, **35**(8): 559-565.
- [38] 罗英, 张德银, 彭卫东等. 民航飞机主动热波成像检测技术应用进展[J]. 激光与红外, 2011, **41**(7): 718-723.
- LUO Ying, ZHANG Deyin, PENG Weidong. Development of active infrared thermography and its application in civil aviation aircraft testing[J]. *Laser & Infrared*, 2011, **41**(7): 718-723.