

具有自适应校正功能的红外成像系统设计

王华伟^{1,2}, 曹剑中¹, 马彩文¹, 张 辉¹, 武登山¹

(1. 中国科学院西安光学精密机械研究所, 陕西 西安 710119;

2. 中国科学院大学, 北京 100049)

摘 要: 针对红外焦平面阵列(IRFPA)响应随温度及时间漂移的特点, 及红外成像系统兼备测量和监视的要求, 设计了一种能够对环境自适应的长波非制冷红外成像系统。系统采用 FPGA 单处理器架构, 实现系统控制和图像处理等功能, 简化了系统架构, 降低了功耗。采用 ADN8830 进行控温, 使探测器工作在最佳工作温度点, 保证了探测器的成像性能。提出了基于黑体快门的非均匀性校正技术, 实现了红外图像的实时校正, 并有效补偿了外部环境的影响。视频输出采用模拟和数字双输出方式, 模拟视频输出为图像增强后输出, 便于人眼观察, 数字输出为 12 bit 量化原始输出, 可用于测量, 系统可同时满足监视和测量的要求。试验结果表明, 系统具有成像质量良好、环境适应性强、功耗低等特点。

关键词: 自适应; 非均匀性; IRFPA; FPGA; 快门

中图分类号: TN216 **文献标志码:** A **文章编号:** 1007-2276(2014)01-0061-06

Design of infrared imaging system with adaptive correction function

Wang Huawei^{1,2}, Cao Jianzhong¹, Ma Caiwen¹, Zhang Hui¹, Wu Dengshan¹

(1. Xi'an Institute of Optics and Precision Mechanics of CAS, Xi'an 710119, China

2. University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China)

Abstract: In view of the fact that the response of IRFPA will drift with time and temperature and the IR imaging system will be used to measure and watch, an long-wave infrared uncooled imaging system which has adaptive correction function was designed. The system is based on FPGA, in which FPGA performs system control and image processing. Architecture of the system is simple and with less power dissipation. In order to improve the performance of the detector, a temperature control circuit based on ADN8830 was introduced, which could set temperature of the detector to a fixed point. In order to correct non-uniform responses of the detector's individual elements, an adaptive non-uniformity correction algorithm was proposed based on shutter, which could compensate the response drift according to temperature and time. The system had both analog and digital video output, in which analog video could be used to watch, while digital video with 12 bit precision could be used to measure. The results show that the imaging system has the advantages of good image quality, good environmental adaptability and low power consumption.

Key words: adaptive; non-uniformity; IRFPA; FPGA; shutter

收稿日期: 2013-05-21; 修订日期: 2013-06-24

基金项目: 国家 863 计划(2008AA09A403)

作者简介: 王华伟(1982-), 男, 助理研究员, 博士生, 主要从事光学成像与测量技术方面的研究。Email: whw@opt.ac.cn

导师简介: 马彩文(1965-), 男, 研究员, 博士生导师, 主要从事光电测控技术方面的研究。Email: cwma@opt.ac.cn

0 引言

随着红外焦平面技术的发展, 红外成像技术在国民经济建设和国防中的应用越来越广泛, 尤其是非制冷红外成像技术因其成本低、体积小、使用方便等优点得到了广泛应用。国外非制冷红外成像设备的应用已经很广泛, 但我国在非制冷红外热像仪的研制方面起步较晚, 目前只有几家大公司和少数科研机构从事这方面的研究。文中根据实际需求, 研制出了具有自适应非均匀性校正功能的长波非制冷红外成像系统, 并通过试验进行了性能验证。

1 设计难点

长波非制冷红外成像系统主要由光学系统、电子学系统和结构系统组成, 文中主要介绍电子学系统的设计, 其设计难点主要有两个方面:

(1) 非均匀性校正设计。由于制造工艺、器件工作状态、外界输入及光学系统等的影响, 造成红外图像的非均匀性, 表现在图像上为图像的固定空间噪声、串扰等, 严重影响图像的质量, 因此必须进行校正^[1-2]。系统要求非均匀性校正效果良好且自适应复杂环境的变化, 因此设计一种满足系统要求并易于实现的非均匀性校正方法是该系统设计的一个难点。

(2) 红外探测器模块设计。红外探测器模块包括红外探测器、偏置电路和温控电路。红外探测器偏置电源种类多、噪声性能要求高, 偏置电源的质量对图像的质量有很大的影响, 是系统设计的一个难点和重点。另外, 为了在复杂的工作环境下提高探测器的工作性能, 提高图像质量和测量的精度, 需要设计一个高精度的温度控制系统将探测器阵列所有像元温度控制在一个相同的恒定温度下^[3-4]。

2 系统设计

如图 1 所示, 基于 FPGA 的长波非制冷红外成像系统主要由光学镜头、红外探测器模块、FPGA、存储器、快门组件和图像编码器组成。

红外探测器模块主要是将光信号转换为电信号并输出, 主要包含红外探测器、偏置电路、温控电路等。

FPGA 为系统控制与图像处理单元。系统采用单 FPGA 作为处理器, 一方面用于控制, 如提供红外

探测器工作时序控制、存储器数据读取控制、电机控制等; 另一方面用于图像处理, 如非均匀性校正参数计算、非均匀性校正、图像放大、图像对比度增强等处理。单处理器架构有效降低了系统功耗并减小了电路板面积。

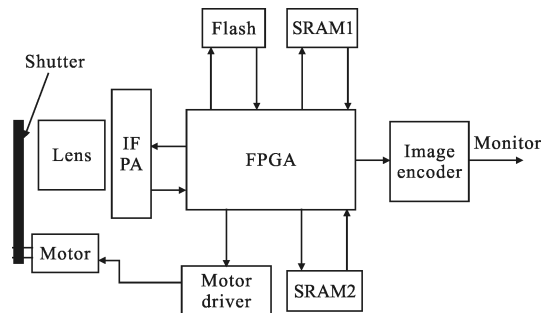


图 1 系统组成

Fig.1 Block diagram of the system

存储器包括非易失性存储器 flash 和易失性存储器 SRAM, 存储器主要用于非均匀性校正。flash 用于存储一些固定的参数, SRAM 用于数据的暂存。

快门组件包括机械快门、电机和电机驱动器。快门组件主要用于非均匀性校正参数的计算。

图像编码主要是将处理后的图像数据输出, 系统设计时采用数字信号和模拟信号双输出的模式, 兼备测量和监视的功能。

文中重点对红外探测器模块、非均匀性校正模块和图像编码模块的设计进行详细介绍。

3 红外探测器模块设计

3.1 红外探测器介绍

红外探测器选用 ULIS 公司的非制冷长波红外探测器 UL03191, 分辨率为 384×288 , 像元尺寸为 $25 \times 25 \mu\text{m}$, NETD $< 100 \text{ mK}^{[5]}$ 。UL03191 为 CMOS 红外探测器, 内部集成了 12 bit 分辨率的 A/D, 可以有效降低功耗和减小电路板尺寸。

3.2 偏置电路设计

UL03191 工作时需要偏置电压较多, 除供电电源 VDDA (+5 V) 和 VDDL (+3.3 V) 外, 还需要 VBUS (+2.8 V)、GSK (+2.12 V)、VR+ (+4.2 V)、VR- (+1.0 V) 和 VMC (+2.6 V) 五路固定偏置电压和 GFID (0.65~5 V)、VSK (2.5~5.5 V) 两路可调电压^[5], 偏置电压对精度和噪声要求较高。系统设计时采用了灵活的电

源设计方案,对于供电电源+5 V和+3.3 V,电流较大,分别采用低噪声LDO LT1962-5 V和LT1962-3.3V实现,其10 Hz~100 kHz的RMS噪声仅为20 μ V,可以满足要求。对于其余偏置电源,采用高精度D/A+低噪声运放的形式实现,通过灵活配置D/A的寄存器实现输出电压的改变。D/A选用了ADI公司的八路输出高精度D/A-AD5648,AD5648分辨率为14 bit,设计时采用+5 V的参考基准,电压分辨率为0.3 mV,可以满足系统要求。为了减小D/A输出电流对输出电压误差的影响,在D/A输出端增加运放来提高电源品质。运放选用ADI公司的高精度低噪声运放AD8606,其噪声小于8 nVHz^{-1/2}。

3.3 温控电路设计

UL03191如果要工作在最佳性能,探测器阵列像元温度必须稳定在30 \pm 0.01 $^{\circ}$ C且保持一致。该探测器内部集成了一个有两个电气管脚的热电制冷器(TEC)和一个温度传感器,通过温度传感器输出Vtemp读出探测器的温度,经过处理后产生控制TEC的电流,该电流使TEC制冷或制热来精确控制红外探测阵列的温度。目前对于TEC控制有很多方法,其中最简单有效的方法就是通过TEC控制芯片来实现。系统设计选用了ADI公司的ADN8830 TEC控制芯片^[6],使用时外接功率MOSFET来提供大电流并需要根据负载调节PID补偿网络的器件参数。

4 非均匀性校正算法与实现

非均匀校正是红外成像系统必不可少的一项技术,目前采用的校正方法主要有两种:基于参考源的校正技术和基于场景的校正技术^[7-8]。基于参考源的校正技术采用参考源作为基准进行校正,比较典型的是两点校正法,因其算法简单、硬件容易实现而得到广泛应用,但缺点是校正参数会随时间及温度漂移,需要周期性的进行定标且需要参考源。基于场景的校正方法因不需要参考源而成为近些年来研究的热点,但其算法复杂,难以在硬件上实现,目前还处于研究阶段。

该系统设计了一种基于快门的自适应两点校正法,克服了传统两点校正法需要定期进行校正的缺点,另外快门放置于镜头前面,在校正探测器的非均匀性的同时也校正了包含光学系统在内的系统的非均匀性。

4.1 基于快门的自适应两点校正法原理

传统的两点校正法是设备使用前让成像设备分别采集高温和低温下的黑体图像,根据两幅图像求出校正参数(增益和偏置),然后利用增益和偏置这两个参数对探测器输出的图像进行非均匀性校正,但随着时间和环境温度的变化,校正参数会发生偏移,图像的均匀性会下降进而影响到图像的质量,需要重新校正。两点校正法的具体原理可参见参考文献[1-2]。

基于快门的自适应两点校正法在传统两点校正法基础上进行了改进,在成像设备内置一幅参考图像,工作时定时开关快门遮挡视场,获取一幅能实时反映当前工作状态的快门图像,利用参考图像和快门图像根据公式(1)和(2)计算新的校正参数,根据公式(3)对探测器输出的图像进行非均匀性校正。

$$G_{ij}(t) = \frac{V_H - V_S(t)}{x_{ij}(\phi_H) - x_{ij}(\phi_S)} \quad (1)$$

$$O_{ij}(t) = \frac{V_H x_{ij}(\phi_S) - V_S x_{ij}(\phi_H)}{x_{ij}(\phi_S) - x_{ij}(\phi_H)} \quad (2)$$

$$y_{ij}(t+n) = G_{ij}(t)x_{ij}(t+n) + O_{ij}(t) \quad (3)$$

式中: $V_S(t)$ 为探测器对快门在 t 时刻的所有探测元的响应平均值(t 时刻快门处于关闭状态); $x_{ij}(\phi_S)$ 是探测元(i, j)在 t 时刻对快门的响应值; $G_{ij}(t)$ 为 t 时刻计算出的校正增益参数; $O_{ij}(t)$ 为 t 时刻计算出的校正偏移参数; $x_{ij}(t+n)$ 为 $t+n$ 时刻探测元(i, j)的原始响应值; $y_{ij}(t+n)$ 为 $t+n$ 时刻探测元(i, j)的非均匀性校正后的输出。

由于校正参数是定时更新的,而参数更新时采用的一幅基准图像反映了探测器工作点和环境的变化,实验结果表明,该方法对由于时间、温度等造成的参数漂移有很好的改进效果。

4.2 基于快门的自适应两点校正法实现

基于快门的自适应两点校正法是采用一幅预先采集的基准图像和实时采集的基准图像计算校正参数,因此系统设计时需要成像系统自带一个参考源。系统设计在光学镜头前设置一个机械快门,如图2所示。快门的形状及大小要与镜头相匹配,快门关闭时应完全遮挡视场,快门打开时应对视场无遮挡。由于要求快门起到模拟均匀黑体的作用,所以要求表面平整、没有镜面反射,加工完成后表面进行喷沙和黑色氧化处理。

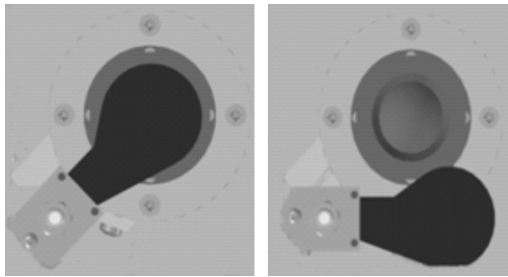


图 2 快门示意图

Fig.2 Mechanical shutter

系统设计完成后需要在实验室环境下以面源黑体为参考源,分别采集一幅低温黑体图像和高温黑体图像,利用两点法计算出校正参数后将校正参数和高温黑体图像写入 flash 中,然后系统即可工作。

如图 3 所示,系统上电后先进行初始化,包括 FPGA 程序加载、红外探测器参数初始化、视频编码器参数初始化等工作,然后 FPGA 从 flash 中读取数据并写入 SRAM 中,其中将增益参数和高温黑体图

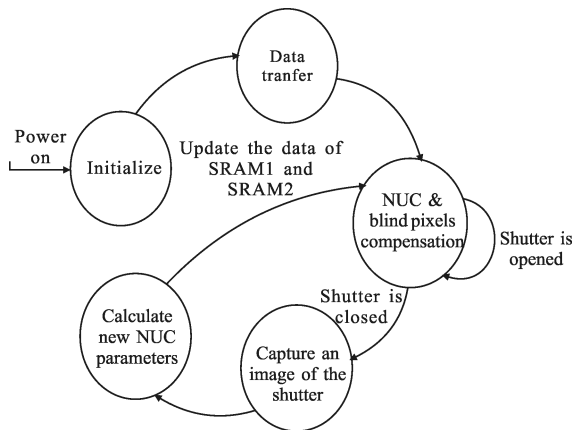


图 3 非均匀性校正实现流程图

Fig.3 Flow chart of the adaptive two-point NUC

像写入 SRAM1,将偏置参数写入 SRAM2 中。数据转移完成后,FPGA 接收红外探测器输出的图像并利用 SRAM1 中的增益参数和 SRAM2 中的偏置参数进行非均匀性校正及盲元补偿(补偿算法不在文中介绍),然后进行视频编码输出。在工作过程中如果需要进行校正参数的更新,FPGA 控制电机转动带动快门闭合,采集一幅快门图像存入 SRAM2 中,然后利用公式 (1) 和 (2) 计算新的校正参数并存入 SRAM1 和 SRAM2 相应位置,计算完成后打开快门,FPGA 利用更新的校正参数对图像进行非均匀性校

正,一次参数更新过程可在 1 s 内完成,基本不影响系统工作。参数更新的时刻可以通过串口指令人工注入,也可以定时或根据内部环境温度的变化自动进行校正参数更新,以适应环境的变化。

5 自适应对比度增强视频输出设计

由于系统要求兼备监视和测量的功能,对于测量功能,需要保证数据的原始性,系统设计为经过非均匀性校正和盲元补偿后经 Cameralink 接口输出,输出位数为 12 bit,Cameralink 接口芯片选用 NS 生产的 DS90CR285。

监视功能要求利于人眼观看,而红外图像具有对比度弱的缺点,不利于人眼观看,且探测器输出的 12 bit 的图像也无法直接在监视器上显示,需映射为 8 bit 后显示,基于这样原因,系统采用了自适应图像对比度增强算法,算法流程如图 4 所示,图中 $A_v(N-1)$ 表示第 $N-1$ 幅图像的灰度平均值, $y_{ij}(N)$ 表示第 N 幅图像坐标为 (i,j) 的点经过非均匀性校正后的灰度值, $z_{ij}(N)$ 表示第 N 幅图像坐标为 (i,j) 的点经过对比度增强后的灰度值,也即要输出的灰度值。

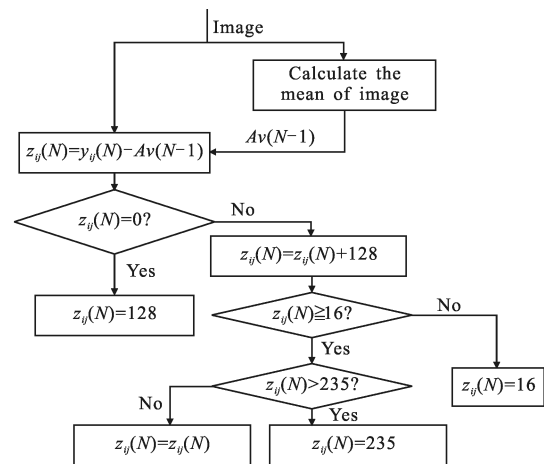


图 4 自适应对比度增强算法流程

Fig.4 Flow chart of adaptive image enhancement

FPGA 内部设计一个灰度统计器,对每幅图像 $(N-1)$ 的平均灰度进行统计,然后下一幅图像 (N) 以该灰度平均值 $(A_v(N-1))$ 为参考,如果等于平均值,输出中间值 128,否则输出 $128+(y_{ij}(N)-A_v(N-1))$ 。模拟视频编码的亮度信号范围一般为 16~235,因此对增强后的图像数据进行边界判断,如果小于 16 则等于

16, 如果大于 235 则等于 235。进行对比度增强后的图像数据经视频编码器编码后输出。

6 试验结果及分析

系统设计完成后,通过试验对设计进行了验证,试验主要包括非均匀性测试、实物成像试验和高温适应性试验。

首先是对非均匀性校正的效果进行测试,测试时红外成像系统分别对 40℃和 80℃的黑体成像,采集图像后计算非均匀性,非均匀性均小于 0.5%,而校正前的原始图像非均匀性大于 12%,表明非均匀性得到了校正。

然后进行了对手的成像试验,以观察实际成像效果和非均匀性校正效果,如图 5 所示。图 5(a)为红外探测器输出的原始图像,图像非均匀性非常严重,已经看不出图像的内容,图(b)为非均匀性校正后输出的数字图像,图像均匀性良好,手的轮廓也很清晰。图 6 为对比度增强后的图像,手的轮廓更加清晰,可以满足人眼观察要求。

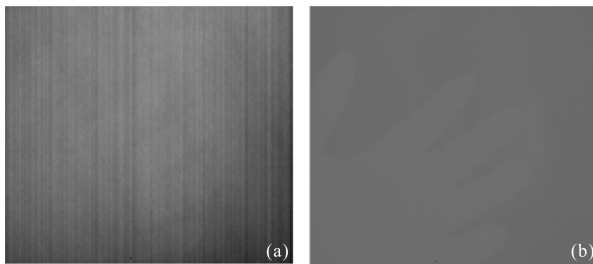


图 5 原始图像和非均匀性校正后图像

Fig.5 Original image and corrected image



图 6 对比度增强图像

Fig.6 Contrast enhancement image

为了验证文中提出的基于快门的自适应两点校正法对环境变化的适应性,通过高温试验进行了验

证。试验时将红外成像系统放在环境试验箱内,并将系统的工作模式设置为人工校正模式(即操作人员通过指令控制快门运动进行校正参数更新)。试验时发现常温下图像均匀性良好,但试验箱温度变化时,图像的均匀性不断恶化,质量下降,如图 7(a)所示为试验箱温度 40℃时的图片。人工启动快门模式后,即控制快门定时关闭进行非均匀性校正,图像均匀性良好,如图 7(b)所示。试验结果表明,基于快门的自适应两点校正法能够补偿由于环境温度变化引起的非均匀性校正参数漂移,校正效果较经典的两点校正法有非常明显的提高。

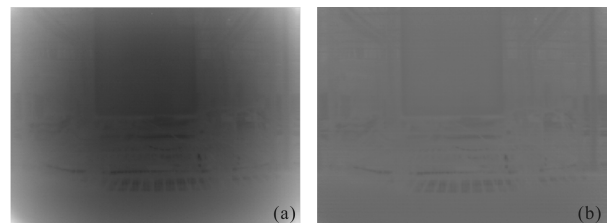


图 7 高温下经典两点法校正图像和自适应两点法校正图像

Fig.7 Corrected image by classic two-point and by the proposed methodology

7 结束语

文中采用单 FPGA 处理器架构设计了一套非制冷长波红外成像系统,非均匀性校正技术是红外成像设备的核心技术,成像系统采用了基于快门的自适应两点非均匀性校正方法,试验结果表明该方法校正效果较传统的两点法有较大的改善。系统输出兼备监视和测量的功能,使用的对比度增强算法易于硬件实现,效果可以满足要求。

参考文献:

- [1] Li Xu, Yang Hu. Application of nonuniformity correction algorithm for IRFPAS based on two points [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2008, 37(S2): 608-610. (in Chinese)
李旭, 杨虎. 基于两点的红外图像非均匀性校正算法应用 [J]. 红外与激光工程, 2008, 37(S2): 608-610.
- [2] Liu Huitong, Yi Xinjian. Two-point nonuniformity correction for IRFPA and its physical motivation [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2004, 33(1): 76-78. (in Chinese)
刘会通, 易新健. 红外焦平面阵列非均匀性的两点校正及依据 [J]. 红外与激光工程, 2004, 33(1): 76-78.

- [3] Zheng Xing, Jiang Yadong, Luo Fengwu. Design of temperature control circuit for UFPA based on ADN8830[J]. *Modern Electronics Technique*, 2009, 24: 154–156. (in Chinese)
郑兴, 蒋亚东, 罗风武. 基于 ADN8830 的非制冷红外焦平面温度控制电路设计[J]. 现代电子技术, 2009, 24: 154–156.
- [4] Zhu Hongbin, Li Wei, Liu Ziji. A design of high precision temperature controlling system for uncooled infrared focal plane[J]. *Infrared Technology*, 2009, 31(3): 144–147. (in Chinese)
祝红彬, 李伟, 刘子骥. 一种高精度非制冷红外焦平面温度控制系统的设计[J]. 红外技术, 2009, 31(3): 144–147.
- [5] ULIS Inc. UL03191 384×288 LWIR uncooled microbolometer datasheet [EB/OL]. <http://www.ulis-ir.com>. 2008.
- [6] Zhang Pei, Zhu Hongbin, Lv Jian. Design of the low noise uncooled infrared focal plane array driver circuit[J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2010, 39(5): 806–810. (in Chinese)
张沛, 祝红彬, 吕坚, 等. 低噪声非制冷红外焦平面阵列驱动电路的设计[J]. 红外与激光工程, 2010, 39(5): 806–810.
- [7] Wang Tingting, Yu Junsheng. Non-uniformity correction for infrared focal plane array with image based on neural network algorithm[C]//SPIE, 2010, 7658: 76584I.
- [8] He Ming, Wang Yadi. Non-uniformity correction algorithm based on midway histogram equalization in single infrared image [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2012, 41(9): 608–610. (in Chinese)
贺明, 王亚弟. 中值直方图均衡的单帧红外图像非均匀性校正算法[J]. 红外与激光工程, 2012, 41(9): 608–610.