文章编号:1001-5078(2017)09-1132-05 ·红外技术及应用·

无TEC制冷电路下的红外成像温度补偿方法

徐梦龙[1,2],王玮冰[1,3],李 佳[1,3]
(1. 中国科学院微电子研究所,北京 100029; 2. 中国科学院物联网研究发展中心,江苏 无锡 214000;
3. 昆山光微电子有限公司,江苏 苏州 215300)

摘 要:在红外成像系统中去除制冷电路来降低功耗和体积的方法已成为红外热成像仪的配置主流,但在无制冷电路的情况下,红外成像效果会受到环境温度以及自身发热的影响。本文设计了一种温度补偿的校正方法,采用了先标定后补偿的处理方案,在基于FPGA结合温度传感器以及FLASH存储芯片的硬件平台上,实现了对红外探测器输出图像在无TEC制冷电路情况下的温度补偿校正。实验结果表明该设计方案有效地抑制了在无制冷电路情况下红外探测器所处环境温度的起伏对红外输出成像效果所造成的干扰。

关键词:红外成像;无TEC;温度补偿校正;FPGA
中图分类号:TN216 **文献标识码**:A **DOI**:10.3969/j.issn.1001-5078.2017.09.014

Infrared imaging temperature compensation method without TEC refrigeration circuit

XU Meng-long[1,2], WANG Wei-bing[1,3], LI-Jia[1,3]
(1. Institute of Microelectronics of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100029, China;
2. Chinese Academy of Sciences Internet of Things Development Center, Wuxi 214000, China;
3. Kun-Shan Guang Wei Co. LTD., Suzhou 215300, China)

Abstract: The method of removing the cooling circuit to reduce the power consumption and the volume in the infrared imaging system has become the mainstream of the configuration of the infrared thermal imager, but in the case of no refrigeration circuit, the infrared imaging effect will be affected by the ambient temperature and self-heating. A correction method of temperature compensation is designed. The method adopts the processing scheme of first calibration and then compensation. Based on the hardware platform, the output image of infrared detector is realized without TEC cooling circuit under the temperature compensation correction. The experimental results show that the proposed method can effectively suppress the interference of infrared temperature fluctuation on infrared imaging effect without the cooling circuit.

Key words: infrared imaging; TEC circuit; temperature compensation; FPGA

1 引 言

红外成像技术作为一种重要的信息探测手段,有着其他波段探测技术无法替代的优势。红外成像的应用使得人眼的观察范围从可见光谱扩展到了红外光谱。红外的这一特性使得红外成像技术在军事和民用领域都有着重要的应用

基金项目:国家863计划(No. 2015AA042605);国家自然科学基金面上项目(No. 61370044);中科院-北大率先合作团队资助经费(No. 201510280052)资助。
作者简介:徐梦龙(1991-),男,硕士研究生,研究方向为MEMS红外热成像技术。E-mail:943354833@qq.com
收稿日期:2017-02-03;**修订日期**:2017-03-17

意义。但不同于其他类型的探测器,由于红外探测器对热源异常的敏感。所以探测器电路系统工作时自身不可避免的发热以及使用环境温度的变化会引起探测器响应的起伏,这一现象会造成红外探测器的成像质量的下降。针对这一问题,传统的热成像红外探测器引入了用于衬底温度控制的热电制冷器[1](Thermo-Electric Cooler, TEC)来吸收探测器表面的热量,使探测器表面温度保持在一个相对稳定的范围内。但引入热电制冷器后会提高整机的功耗,同时增加整机的体积,这与当前低功耗,小型便捷的军用、民用市场趋势潮流不符。

本文采用了温度补偿方法中常用的软件补偿方法,通过对红外探测器温度补偿原理的介绍以及对温度补偿方法的分析,提出了在无热电制冷器(无TEC)情况下对红外探测器输出进行实时温度补偿校正的解决方案。设计方案基于FPGA和FLASH结合的硬件平台,并结合温度传感器完成了先标定后补偿的校正方法,实现了在红外成像系统工作过程中,当探测器表面温度起伏较大时,仍然能够输出清晰稳定的红外图像。

2 温度补偿原理

在无制冷电路的情况下,红外探测器的表面温度会随着整机电路温度的变化而改变,而探测器表面温度的变化会引起探测器的响应输出,该现象会使得红外成像质量下降[2]。若能够得到红外探测器的响应与探测器表面温度的函数关系,则可尝试在设计中构建一个减法补偿模型以削弱该现象造成的红外成像质量下降。补偿方法具体如下:

将探测器输出响应与探测器表面温度的关系函数设为$f(T)$,其中,T为探测器表面温度。若选取25 ℃作为基准,可构建补偿函数$g(T)$:

$$g(T) = f(25) - f(T) \tag{1}$$

在红外探测器成像系统工作时,实时的将补偿函数所对应的补偿值与探测器的输出相叠加,理论上即可抵消红外成像系统工作时环境温度变化对红外成像质量的影响。分析可知$f(T)$的构建与补偿过程的实现是设计中的关键点。其中红外探测器响应与探测器表面温度的函数关系$f(T)$可以通过数值拟合的方法来近似得到。

2.1 探测器响应与探测器表面温度函数关系拟合过程

在数值分析中常用的曲线拟合方法主要有:在使偏差绝对值之和最小条件下得到满足要求的近似函数曲线的方法、使偏差绝对值中最大的值最小的条件下得到满足要求的近似函数曲线方法以及使偏差平方和最小条件下得到近似曲线的方法。本方案在保证拟合精度的前提下为了最大的降低拟合运算量,采用了最小二乘法[3]作为拟合方式,即以二项式方程为拟合曲线方程。

其中函数关系的拟合所用数据通过在不同的环境温度下,测量探测器的响应输出值来得到,拟合所用数据记为$P(T_i, Y_i)$,其中$i = 1, 2, \cdots, m$。T为探测器表面温度,Y为探测器响应输出。根据最小二乘法拟合方法设探测器的响应值Y与探测器表面温度的函数关系即拟合曲线为:

$$Y = a_0 + a_1 T + a_2 T^2 \tag{2}$$

则设计中采集的各数据点P到这条曲线的距离之和,即偏差平方和如下:

$$R^2 \equiv \sum_{i=1}^{3} [Y_i - (a_0 + a_1 T_i + a_2 T_i^2)]^2 \tag{3}$$

其中,R为常数,根据最小二乘法原理,计算出当R^2最小时a_0、a_1、a_2的值,即得到了近似的拟合曲线。为了求得符合条件的a值,对等式右边求a_i偏导数,便可得到一个多项等式组,对其做进一步化简,以矩阵的形式可以表示为:

$$\begin{bmatrix} 3 & \sum_{i=1}^{3} T_i & \sum_{i=1}^{3} T_i^2 \\ \sum_{i=1}^{3} T_i & \sum_{i=1}^{3} T_i^2 & \sum_{i=1}^{3} T_i^3 \\ \sum_{i=1}^{3} T_i^2 & \sum_{i=1}^{3} T_i^3 & \sum_{i=1}^{3} T_i^4 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} a_0 \\ a_1 \\ a_2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \sum_{i=1}^{3} y_i \\ \sum_{i=1}^{3} y_i T_i \\ \sum_{i=1}^{3} y_i T_i^2 \end{bmatrix} \tag{4}$$

分析可知上式为范德蒙得矩阵[4],做进一步化简后可得到式(5):

$$\begin{bmatrix} 1 & T_1 & T_1^2 \\ 1 & T_2 & T_2^2 \\ 1 & T_3 & T_3^2 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} a_0 \\ a_1 \\ a_2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} y_1 \\ y_2 \\ y_3 \end{bmatrix} \tag{5}$$

式(5)可表示为$T \times A = Y$的形式,其中T为温度矩阵,A为所求系数矩阵,Y为探测器响应值矩阵,通过矩阵运算求得系数矩阵A为:

$$A = (T' \times T)^{-1} \times T' \times Y \tag{6}$$

由上述系数矩阵 A 便得到探测器响应与探测器表面温度函数关系 $f(T)$ 。

2.2 无 TEC 温度补偿过程

在知道探测器响应与探测器表面温度的函数关系 $f(T)$ 后便可得出相应的补偿函数 $g(T)$ 。

以 T_0 为基准温度(T_0 通常为 25 ℃),则在探测器表面温度为 T 时温度补偿函数为 $g(T)$:

$$g(T) = f(T_0) - f(T) \tag{7}$$

将拟合函数代入式(7)可得:

$$g(T) = (a_0 + a_1 T_0 + a_2 T^2) - (a_0 + a_1 T + a_2 T^2) \tag{8}$$

进一步化简得到:

$$g(T) = a_1(T_0 - T) + a_2(T_0 - T)(T_0 + T) \tag{9}$$

基于以上化简结果,在硬件上可采用加法器和乘法器来实现补偿值的计算,设计中探测器表面温度值可通过使用高精度贴片式温度传感器得到。实时补偿校正原理图如图 1 所示, a_1 和 a_2 分别为上述补偿函数系数, T_0 为基准温度、T 为探测器表面实时温度,DATA_IN 为探测器实时响应输出,通过将 DATA_IN 与探测器温度补偿值 $g(T)$ 相加得到 DATA_OUT,DATA_OUT 即为探测器输出经过温度补偿后的值,整个计算过程在高速 FPGA 中实现。

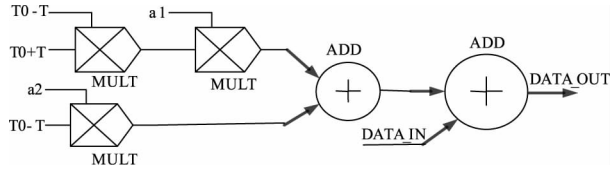


图 1 算法原理框图

Fig. 1 Algorithm schematic

3 FPGA 实现温度补偿校正

3.1 标定过程

由上述分析可知,整个无 TEC 温度补偿系统可分为补偿函数的标定和算法的实现[5]两部分,标定过程如图 2 所示。红外探测器接受红外辐射并实时地将红外辐射转化为模拟电平输出,输出电平通过 AD 转换输出到 FPGA 主控芯片,同时 FPGA 通过控制 ADS1112 芯片来读取红外探测器表面实时温度并传输给 FPGA,FPGA 通过 UART 接口将温度值与该温度下红外探测器响应值发送至 PC 端。PC 端可使用 MATLAB 工具计算式(6)中各个像元所对应的补偿系数值,并生成温度补偿系数表,烧写到 FLASH 存储芯片中供后续的补偿运算调用。

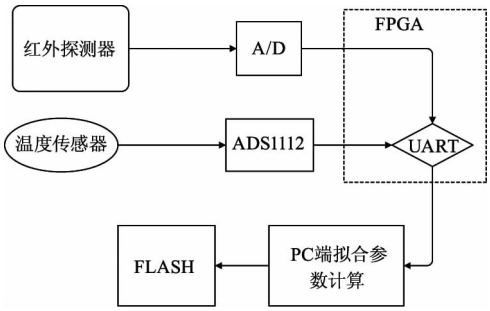


图 2 标定原理框图

Fig. 2 Block diagram ofcalibration

3.2 校正补偿实现

整机系统由红外焦平面阵列、FPGA 模块、温度传感器以及 ADC 模块及相应外围数据接口构成。为了能在满足数据处理需求的同时降低整机的成本,设计方案选用了 XILINX 公司所生产的中端 Spartan 6 系列型号为 xc6slx45 的 FPGA,其内部包含有 3424 个 CLB,116 kB 片上静态 Block SRAM 存储,58 个 18×18 位宽的硬件乘法器和累加器,集成了 SDRAM 控制所需的 PLL,支持 Mega Wizard IP 编程输入,满足了时序产生和 SDRAM 的控制需要。为了满足实时图像数据的处理存储芯片选用型号 MT47H128M16 容量为 1GB 的 DDR2 SDRAM,通过 FPGA 内部集成的 SDRAM 控制 IP 对其进行读写控制,同时使用了一片型号为 M25p128 128 Mbit 的片外 FLASH 存储器,其中 42 Mbit 存储空间供 FPGA 代码文件烧写,96 Mbit 用来存储温度补偿系数和其他校正信息,使用前先将校正系数表通过 PC 端控制烧写到 Flash 内部。

为了准确地将补偿数据与相对应的红外探测器以及温度传感器的输出值做实时的运算,先将校正信息从 FLASH 中读出,存入缓存区 FIFO 当中,在系统的控制下一一对应的与红外探测器以及温度传感器的输出数据作运算[6],系统框图如图 3 所示。

由于 IRFPA 的数据输出速率是按 10 MHz 的时钟输出的,为了提高数据处理速度,方案中采用了在处理高速数据中广泛应用的低频域数据在高频域数据处理的方法[7]:首先将红外探测器的模拟输出经 A/D 转换后的数据存入 FPGA 片内 RAM 当中,然后在 50 MHz 的时钟下对 RAM 中的数据进行运算。同时为了解决在数据处理过程中不同模块间数据传输引起的速度匹配问题,设计中划分了不同的 RAM

区间对数据采用了乒乓操作和流水线处理。通过调用XILINX公司所开发的一系列控制算法IP以及FPGA内部所包含的乘法器以及加法器,对数据逐点进行补偿校正运算[8],最终实现整个焦平面所有像元的温度补偿。

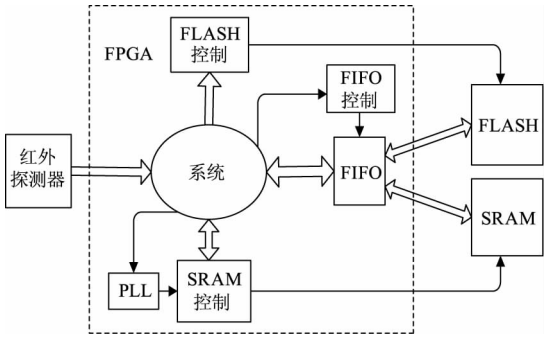


图3 补偿模块框图

Fig. 3 Block diagram of correction module

3.3 补偿时序

红外探测器的驱动时序由MC、INT、RESET三个信号构成,信号均由FPGA产生。其中MC为红外探测器工作的主时钟,对于不同的阵列规模的探测器MC不同,320×240为10 MHz。RESET作为红外探测器的复位信号,在探测器输出一整帧的数据后将行列选通信号复位在焦平面第一行第一个像素。INT为积分时间控制信号,在每一行像素INT之前通过读FLASH将该行所对应的补偿参数读出并写入缓冲FIFO当中,在每行像素积分完成后,探测器的模拟信号在时钟信号的控制下进入进行AD转换,在每一行AD数据转换完成后,在下一个INT到来之前完成对每一行转换后的数据的补偿校正运算[9],实现了数据的实时补偿处理。并通过在SRAM控制IP下将校正完的数据存入片外SRAM,以便做后续的图像处理。数据读取时序和补偿运算时序如图4所示。

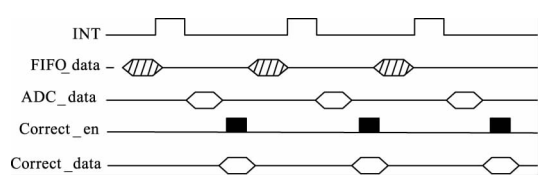


图4 补偿过程时序图

Fig. 4 Timing diagram of data read and correction process

4 补偿结果分析

在恒温挡片的遮挡下,将红外探测器模拟输出经AD转换后的数据通过串口通信协议实时的传输给PC端。为了分析温度补偿前后的数据的差异,任意选取探测器阵列中不同位置的5个点,分别在开启温度补偿系统的条件下以及关闭温度常常系统的条件下,分别采集在探测器阵列温度不断升高时各个点的响应值,并对5个点的响应平均值整理如表1和图5所示。

表1 补偿前后红外探测器响应值

Tab. 1 Response value before and after correction

探测器温度/℃	18	21	24	27	30	33	36
补偿关闭/V	2.22	2.25	2.32	2.42	2.56	2.64	2.86
补偿开启/V	2.23	2.24	2.27	2.32	2.30	2.34	2.36

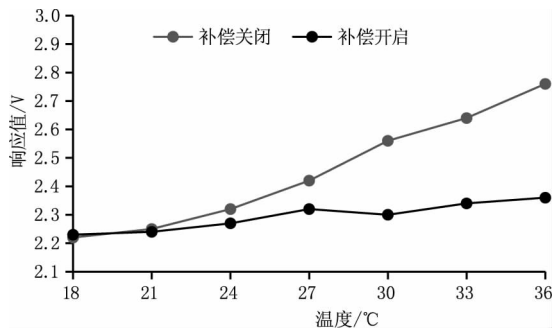


图5 补偿前后响应对比

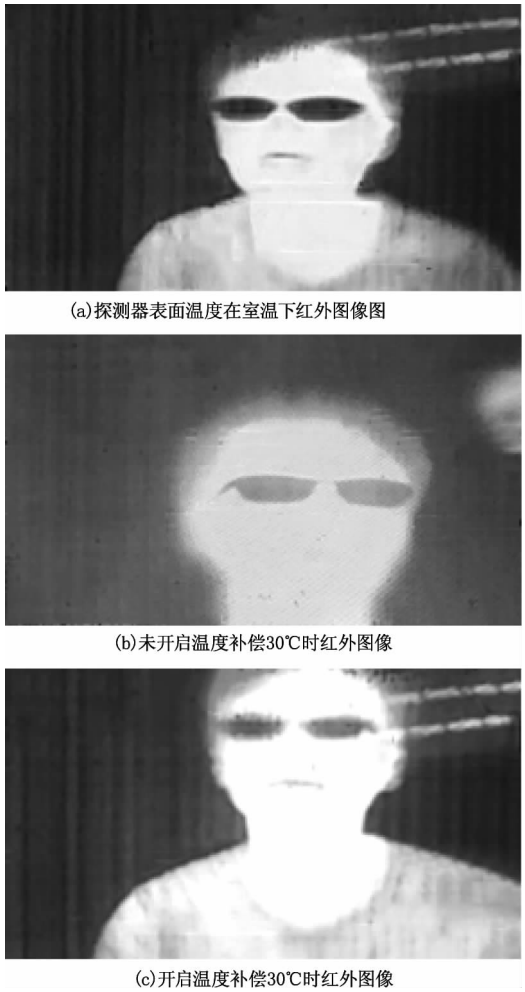
Fig. 5 TheResponse before and after correction

从图5实验数据中可以看出,在无TEC制冷电路的情况下,温度补偿系统开启前随着探测器温度的升高探测器输出平均电压也在不断增大,红外探测器表面温度在18 ℃到36 ℃之间变化时,输出平均电压值大约有0.5 V的起伏,这一现象将会严重的影响到红外成像质量。在开启补偿系统后,对比未开启的情况,由数据以及图标中可以看出探测器输出平均电压受温度的影响得到了明显的抑制,环境温度从18 ℃升高到36 ℃过程中探测器输出电压平均值增长幅度大约只有0.1 V。

红外成像进行温度补偿前后的输出图像效果如图6所示,图6(a)为成像系统整机刚开机时成像效果,可以看出由于系统刚开始工作,整机温度为室温状态,显示图像较为清晰。

图6(b)为在未开启温度补偿模块的情况下,随着成像系统硬件的发热,当探测器表面工作温度升高到30 ℃时成像效果,可以看出红外图像因探测器表面温度的升高而变得模糊不清,图像整体亮度提高,人物与背景区分度变小。图6(c)为开启温度补偿模块情况下,随着成像系统硬件的发热,当探测器表面工作温度升高到30 ℃时成像效果,可以看出显

示画面亮度虽略有所提高,但图像依然较为清晰,同图 6(b)相比较补偿前后对比明显。综上分析可以得出温度补偿模块有效地降低了系统硬件发热对成像质量造成的影响。



(a)探测器表面温度在室温下红外图像图

(b)未开启温度补偿30℃时红外图像

(c)开启温度补偿30℃时红外图像

图 6 红外成像温度补偿前后对比

Fig. 6 The original image and before and after correction

5 结 论

通过上述的分析,本设计方案以基于 FPGA 结合温度传感器以及 FLASH 存储芯片的硬件平台,实现了在无 TEC 制冷电路的情况对红外输出图像的实时温度补偿。对比补偿前后的探测器响应数据以及显示效果,实验结果显示温度补偿作用明显。温度补偿模块的引入显著降低了探测器表面温度起伏对红外成像质量的影响,同时设计中提出了可行的硬件实现方法。设计方案为红外图像在制无制冷电路情况下的补偿校正技术提供了一种新的解决方法。

参考文献:

[1] Jiang L, Liu H, Chi J, et al. Design, fabrication and testing of 17um pitch 640 ×480 uncooled infrared focal plane array detector[C]. International Society for Optics and Photonics, 2015: 96740W-96740W – 6.

[2] ZHANG siqi. Design of real-time imaging software for the IRFPA[J]. Laser & Infrared, 2011, 41(6): 653 – 656. (in Chinese)
张思奇. 红外焦平面阵列实时成像软件设计[J]. 激光与红外, 2011, 41(6): 653 – 656.

[3] TIAN Long, LIU Zongtian. Least squares segmented straight line fitting [J]. Computer Science, 2012, 39(B06): 482 – 484. (in Chinese)
田垅, 刘宗田. 最小二乘法分段直线拟合[J]. 计算机科学, 2012, 39(B06): 482 – 484.

[4] ZHAO Ruizhen, WANG Ruoqian, ZHANG Fengzheng. Research on blocked ordered matte montmartrematrix as compressed sensing measurement matrix[J]. Journal of Electronics & Information Technology, 2015, 37(6): 1317 – 1322. (in Chinese)
赵瑞珍, 王若乾, 张凤珍, 等. 分块的有序范德蒙矩阵作为压缩感知测量矩阵的研究[J]. 电子与信息学报, 2015, 37(6): 1317 – 1322.

[5] LUO Yixue, TANG Xinyi, WANG Yu, et al. Infrared imaging nonuniformitycorrection technique based on reference radiation source calibration [J]. Infrared technology, 2014, 36(4): 281 – 285. (in Chinese)
罗易雪, 汤心溢, 王宇, 等. 基于参考辐射源标定的红外成像非均匀校正技术[J]. 红外技术, 2014, 36(4): 281 – 285.

[6] WU Heran, ZHANG Ning, ZHOU Yun. Realization of non-refrigeration IRFPA real-time two-point correction based on FPGA and FLASH[J]. Infrared technology, 2011, 33(4): 202 – 205. (in Chinese)
吴和然, 张宁, 周云, 等. 基于 FPGA & FLASH 实现非制冷 IRFPA 实时两点校正的研究[J]. 红外技术, 2011, 33(4): 202 – 205.

[7] JIA Liang, WANG Zhenzheng, MA Xing. Design of FPGA high-speed data acquisition and storage system based on [J]. Computer Measurement and Control, 2015, 23(11): 3839 – 3841. (in Chinese)
贾亮, 王真真, 马兴, 等. 基于 FPGA 高速数据采集与存储系统的设计[J]. 计算机测量与控制, 2015, 23(11): 3839 – 3841.

[8] Xie D, Song Y, Song Y, et al. Design of a micro uncooled infrared imaging system based on VOx IRFPA[C]. International Society for Optics and Photonics, 2016: 1002516 – 1002516 – 8.

[9] Yang Y, Shu B, Zhang C, et al. Application research in nouniformity correction algorithm of IRFPA for infrared measuring system[C]. International Society for Optics and Photonics, 2015: 950624 – 950624 – 11.