

基于 SOPC 的红外图像自适应非均匀性校正设计

王明昌¹, 樊养余¹, 陈宝国², 雷伟³, 周波³

(1. 西北工业大学 电子信息学院, 陕西 西安 710072; 2. 中国空空导弹研究院, 河南 洛阳 471009;
3. 华中科技大学 电子信息与通信学院, 湖北 武汉 430074)

摘要: 场景非均匀校正和基于本底信息无快门校正等红外图像自适应非均匀性无快门校正算法不需要中断探测过程, 克服了定标类校正算法需要周期性定标的不足, 目前日趋受到重视。相对于场景无快门校正算法, 基于本底信息的自适应无快门校正算法具有复杂度低、易于实现的特点, 正逐步从理论研究走向具体工程应用, 通过硬件系统实现该校正算法具有重要的应用价值。根据自适应无快门校正算法理论特点, 采用基于 FPGA 构建 SOPC 系统的方法进行了硬件实现, 主要由校正参数计算、本底采集、校正模型等模块组成。校正参数计算部分根据自适应拉格朗日插值计算和更新校正参数, 本底采集模块用于采集均匀本底信息, 为图像校正提供一系列本底信息, 校正模块完成红外图像的实时非均匀性校正。实验结果表明: 实现的非均匀性无快门校正系统具有占用硬件资源少、延迟短和图像效果好的优点, 能够广泛应用在红外成像系统中, 具有较强的研究价值和现实意义。

关键词: 红外成像; 非均匀性校正; 无快门算法; SOPC

中图分类号: TN215 **文献标志码:** A **DOI:** 10.3788/IRLA201746.0628001

Realization of adaptive non-uniformity correction of infrared image based on SOPC

Wang Mingchang¹, Fan Yangyu¹, Chen Baoguo², Lei Wei³, Zhou Bo³

(1. School of Electronics and Information, Northwestern Polytechnical University, Xi'an 710072, China;

2. China Airborne Missile Academy, Luoyang 471009, China;

3. School of Electronic Information and Communications, Huazhong University of Science and Technology, Wuhan 430074, China)

Abstract: The non-uniformity correction algorithm of infrared image using Lagrange interpolation algorithm to calculate the offset coefficient was proposed in this paper. It overcame the shortcoming of periodic calibration for the calibration algorithm and it was less complex than other algorithms based on the scene. According to the characteristics of large amount calculation, the method of constructing SOPC system based on FPGA was used to realize the algorithm, including parameter calculation, background acquisition and calibration model. Parameters were calculated and updated according to a certain strategy. Background information module was used for collecting the information of the uniform background. Correction module was used to complete the real-time non-uniformity correction. The experimental results show that this system has the advantages of less resources, shorter delay and better imaging effect.

Key words: infrared imaging; NUC; non-shutter algorithm; SOPC

收稿日期: 2016-10-13; 修订日期: 2016-11-20

基金项目: 中央高校基本科研业务费专项基金(2016YXMS299)

作者简介: 王明昌(1977-), 男, 高级工程师, 硕士, 主要从事红外成像技术方面的研究。Email: zhoubo@hust.edu.cn

0 引言

由于红外热成像系统可以在白天、黑夜和恶劣的条件下进行探测,具有受环境影响小、作用距离远、全天候工作的优势,这使其在军事和特定民用领域得到了广泛的应用,目前,随着隐身技术的发展,导弹和各类作战飞机平台的雷达反射截面积呈现减小的趋势,利用无线电手段探测目标变得越来越困难和低效,而这种目标高速运动时与空气产生的摩擦和发动机的尾焰均会产生强烈的红外辐射,十分有利于红外探测,红外探测在现代战争和未来战争中都具有重要作用。随着军民融合的进程,红外技术在民用上也取得了高速的发展,可用于火灾预警、地球遥感等,具有广阔的应用前景。

受制造工艺和材料的限制,红外焦平面阵列普遍具有非均匀性,大大降低了成像质量,必须进行非均匀性校正^[1]。目前,应用最普遍的方法是采用两点校正对探测器输出的红外图像进行非均匀性校正。为了保持校正效果,该方法需要快门周期地定标来更新校正参数,而这会暂时中断探测过程,具有很大的局限性。针对此问题,最近研究人员提出了一些基于场景的无快门校正算法^[1-2],该类算法不需要快门定标,能得到连续的图像数据、保证了系统持续工作,减轻了系统重量和体积,但算法相对复杂,难以硬件实现。近几年来,基于本底信息的自适应无快门非均匀校正技术^[3-5],特别是通过实时采集探测器温度进行本底拉格朗日插值的算法日益得到重视。这种无快门校正方法相对于场景非均匀校正具有算法简单、易于实现等特点,正逐步由理论研究走向实际应用。文中的目的即是在红外图像实时处理系统上完成该算法的硬件实现。

红外图像无快门非均匀性校正是红外图像实时处理的重要组成部分,目前,红外图像实时处理系统主要有三种处理器方案^[6-7],一种是单数字信号处理器(Digital Signal Processing, DSP)处理器方案^[8],一种是可编程逻辑器件+DSP 组合方案^[9-10],一种是片上可编程系统(System-on-a-Programmable-Chip, SOPC)方案^[11-12]。由于目前市场上红外探测器接口时序并未形成统一标准,单 DSP 架构因为不能很方便提供各种接口时序而不能很好地适应不同红外探测器,不便于移植。可编程逻辑器件+DSP 组合方案是

当前红外图像处理的主流。该方案用 CPLD 提供各种接口时序,完成原始图像的采集,考虑到开发难度,用 DSP 完成红外图像处理算法。然而随着高帧率、高分辨率探测器的出现,红外成像系统对处理速度的要求越来越高,这种方案逐渐难以满足要求。SOPC 方案通过像素级并行流水处理,具有更高的数据吞吐率,并且可自定义软核实现系统控制,灵活方便,逐渐取代可编程逻辑器件+DSP 组合方案。文中采用 SOPC 方案实现了文中所述的红外图像自适应非均匀性校正算法。

1 自适应无快门非均匀性校正原理

红外探测器的非均匀性^[13]是指在均匀辐射背景下,红外探测器各探测单元的输出不一致,即红外探测器各探测单元响应率随空间变化。两点校正^[14]基于探测单元具有时间稳定性的假设,校正参数固定,受探测单元响应率随探测器温度、偏置电压、时间变化而发生漂移的影响,从而不能一直保持好的校正效果。文中实现的无快门非均匀性校正算法通过引入探测器温度信息和预选采集的均匀本底数据,并通过分段拉格朗日插值实现自动更新校正参数,从而达到了无需快门定标、自动更新校正参数,持续保持校正效果。该算法的具体思路和步骤如下:

(1) 在探测器工作温度范围内采集 n 幅均匀本底 $f(t_i)(i=1, 2, \dots, n)$,同时记录探测器温度 t_1, t_2, \dots, t_n ,采用单点校正方法计算对应的偏移本底 $o_{ij}(t_i)(i=1, 2, \dots, n)$ 。

(2) 把 $(t_1, o_{ij}(t_1)), (t_2, o_{ij}(t_2)), \dots, (t_n, o_{ij}(t_n))$ 看作是一系列离散的样本点,采用拉格朗日插值法来计算偏移校正系数,插值公式为^[15]:

$$\hat{o}_{ij}(t) = k_1(t) \times o_{ij}(t_1) + k_2(t) \times o_{ij}(t_2) + k_3(t) \times o_{ij}(t_3) + \dots \quad (1)$$

其中

$$k_n(t) = \frac{(t-t_1) \cdots (t-t_{n-1})(t-t_{n+1}) \cdots}{(t_n-t_1) \cdots (t_n-t_{n-1})(t_n-t_{n+1}) \cdots} = \prod_{\substack{m=1 \\ m \neq n}}^n \frac{t-t_m}{t_n-t_m} \quad n=1, 2, 3, \dots \quad (2)$$

校正公式为^[16]:

$$y_{(i,j)} = x_{(i,j)} + \hat{O}_{(i,j)} \quad (3)$$

实际应用中,用来插值的本底数目和温度点越多,则插值函数的次数就越高,计算量越大,但并不是插值的次数越高,精度就越高。因此,为了简化算法同时保证需要的插值精度,该算法使用了分段低

次插值方法,即插值时,并不使用所有的温度点,而是只选取与当前探测器温度相近的 N 个温度点进行插值计算。 N 的选取要根据采集均匀本底时的温度间隔和探测器本身的特性而定,实验结果表明:当采集本底的温度间隔是 $5\sim 10\text{ }^{\circ}\text{C}$ 时,一般令 $N=4$,就可以满足实验所需的插值精度。

2 自适应无快门非均匀性系统设计与实现

SOPC 系统是利用可编程逻辑技术在单芯片上实现整个系统的主要逻辑功能,具有设计方式灵活,软硬件在系统可编程、易于剪裁、扩展升级的特点。SOPC 系统通常由硬件逻辑模块和嵌入式软核组成,各部分通过片内总线联系。该系统在 FPGA 片内系统设计中采用 Avalon-MM 总线^[7]作为系统总线,与定制的 NIOS II 软核和逻辑模块一起构成这个 SOPC 系统的核心部分。为了节省系统资源,系统中各模块通过 DMA(Direct Memory Access)进行数据传输。DMA 是一种不经过 CPU 而直接从内存存取数据的数据交换模式。在该模式下,CPU 只须向 DMA 控制器下达指令,让其处理数据的传送。待数据传送完毕再把信息反馈给 CPU,这样就很大程度上减轻了 CPU 资源占有率,可以大大节省系统资源。

系统首先通过本底采集模块在探测器工作温度范围内每隔一段温度采集一幅均匀本底,通过 DMA2 传输到 SDRAM 中,并固化到 FLASH 中,防止掉电丢失,完成前期准备工作。红外图像无快门非均匀性校正时,选取当前探测器温度附近的 4 幅均匀本底计算均匀偏移本底,保存于 SDRAM 中,并据此插值计算出校正参数,然后通过 DMA1 将校正参数传输到校正模型逻辑模块,由校正模型逻辑模块完成红外图像无快门非均匀性校正工作。红外图像无快门非均匀性校正算法的系统框图如图 1 所示。

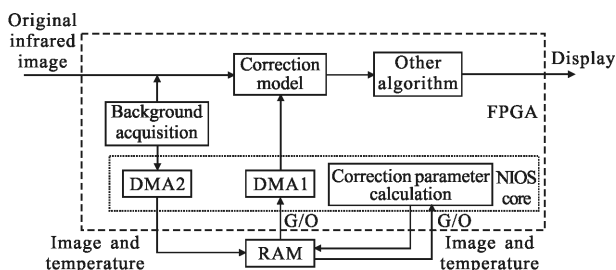


图 1 红外图像无快门非均匀性校正算法的系统框图

Fig.1 System block diagram of the infrared image non-shutter non-uniformity correction algorithm

该算法的实现主要由三部分组成:校正参数的计算、本底采集模块、校正模型模块。由无快门校正算法分析可知校正参数的计算较为复杂,且需要存储较多的数据表,利用 FPGA 逻辑实现困难,在 NIOS II 中可以充分利用处理器强大的计算能力和高级语言的灵活性,实现比较容易,故在 NIOS II 来实现。本底采集模块和校正模型模块通过编写逻辑模块完成。

2.1 校正参数计算

由无快门非均匀性校正理论可知校正增益设为恒定值 1,只自动更新校正偏置 O 。系统初始化完成后,通过 PIO 口获得当前探测器温度,从 FLASH 中选取探测器当前温度附近的 4 幅均匀本底,采用单点法求得均匀偏移本底并保存于 SDRAM 中,根据 4 幅均匀本底对应的探测器温度采用拉格朗日插值法计算出校正系数,再由校正系数和对应的均匀偏移本底计算出校正偏置,并更新保存 SDRAM 中的校正表,如此循环,达到自适应更新校正参数的目的。校正偏置 O 的计算流程如图 2 所示。

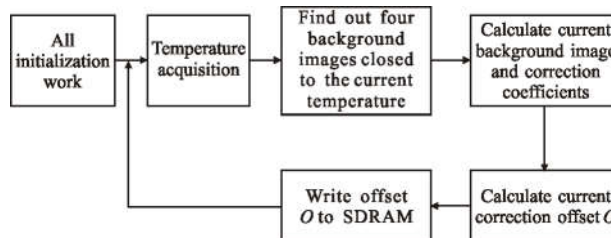


图 2 无快门校正参数计算流程图

Fig.2 Calculation of non-shutter calibration parameters

2.2 本底采集

本底采集是将采集的原始图像数据传输到 SDRAM 的过程,通过在 NIOS II 中调用自定义本底采集函数来实现,本底采集逻辑模块为其提供支持,由于传输的数据量比较大,选择 DMA 作为原始数据从本底采集逻辑模块到 SDRAM 的传输通路。本底采集工作流程图如图 3 所示。

采集一帧原始图像时多少行中断一次是一个需要权衡的问题,行数过大,本底采集逻辑模块用于数据缓冲的异步 FIFO 的容量需求将很大,不利于节约 FPGA 资源,行数过少,中断过于频繁。在综合考虑下,该系统每 4 行中断一次,本底采集逻辑模块异步 FIFO 的容量 $16\text{ bit}\times 2\text{ }048\text{ word}$ 足以满足要求

($384 \times 4 < 2048$), 中断计数 72 次后, 表明一帧数据采集完毕($72 \times 4 = 288$)。

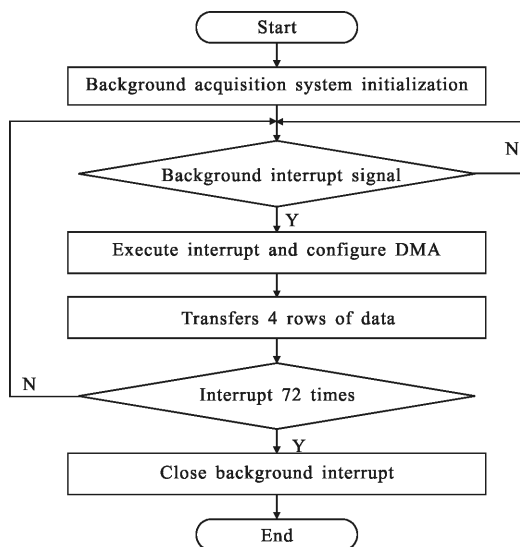


图 3 本底采集工作流程图

Fig.3 Flow ohart of background image collection work

本底采集子系统初始化主要完成本底采集逻辑模块的复位,注册本底中断函数,本底采集中断 PIO 口边沿寄存器清零,开启本底中断使能,以等待中断的到来。本底中断函数中主要完成本底 DMA 寄存器的配置,配置完成后,DMA 将按配置自动传输数据。数据传输涉及到不同时钟域中传输数据,采用异步 fifo 缓冲,保证数据传输正常。

2.3 校正模型实现

校正模型模块用于根据 NIOS II 程序算出的校正参数 G/O 对红外图像进行校正,整个校正模型模块由三个部分组成,分别是异步 fifo、waitsignal 子模块、correction 子模块,校正参数通过 DMA 从 SDRAM 中传输到逻辑后,经过 FIFO 缓冲,与原始图像数据一同输入到 correction 子模块,完成红外图像校正,其实现框图如图 4 所示。

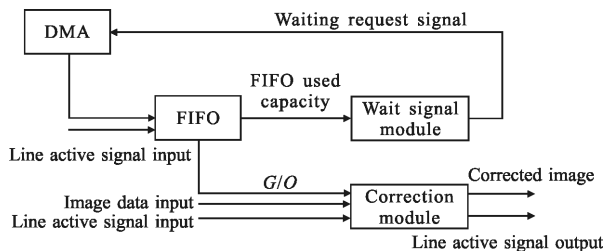


图 4 校正模型模块框图

Fig.4 Block diagram of calibration model

系统采用 DMA 来传输校正参数不仅大大提高了传输速度,而且减轻了 NIOS II 软核的数据处理压力。通过异步 fifo 来缓冲异步时钟域间校正参数的传输,fifo 中数据以 32 bit 为字存储,低 16 bit 为校正的增益系数 G ,高 16 bit 为校正的偏移系数 O 。行有效信号作为 fifo 的读使能信号,数据时钟作为 fifo 的读时钟,waitsignal 子模块为 DMA 传输等待信号产生模块,用于判断 fifo 的空/满状态,并产生等待请求信号反馈给 DMA,从而控制 fifo 的读写。correction 子模块对齐校正参数和图像输入数据,并通过流水运算实现红外图像非均匀性校正。

通过以上设计,利用 DMA 从 SDRAM 中不断读取校正参数,通过 FIFO 缓冲以匹配图像数据后,在校正子模块中完成图像校正。

3 实验结果与分析

为了验证实现的正确性,首先通过 SignalTap II 软件进行校正模型输入波形分析(图像分辨率为 384×288),如图 5 所示。整体模块将校正参数代入输入校正模型来计算最终的输出校正数据。在实际红外成像系统正参数中,增益 G 为一个接近 1 的浮点型小数。在实现过程中将小数部分放入 16 bit 增益系数中的低 12 bit,整数部分放入高 4 bit,从而在计算过程中将浮点运算转为整数运算,节省运算资源。在此次仿真中取增益系数 G 为 1,也就是对应校正参数中的后 4 位,为 1000h(16 进制)。对同一列中偏置系数 O 依次设为 0、1、2、3.....287,对应 16 进制校正参数的高 4 位,分别是 0001,0002,...。然后通过 SignalTap II 捕获校正模型模块输入输出。

图 5 中校正参数、校正模型输入和校正模型输出中的第一个圆圈部分表示第一组校正数据、第二个圆圈部分表示第二组校正数据,以此类推。由于增益系数被设为 1,所以校正模型模块输出实际上是校正模型模块输入与偏置系数 O 相加后延时输出。由校正参数的第一个圆圈内的数据可知,校正参数中的偏置系数为 0,输出数据与输入数据相同,为 4566;校正参数的第二个圆圈内偏置系数为 1,故输出数据 4573 为输入数据 4572 和偏置系数的相加。以此类推,可说明校正模型模块输入输出结果与预期完全一致,从而保证整个校正模块实现的正确性。

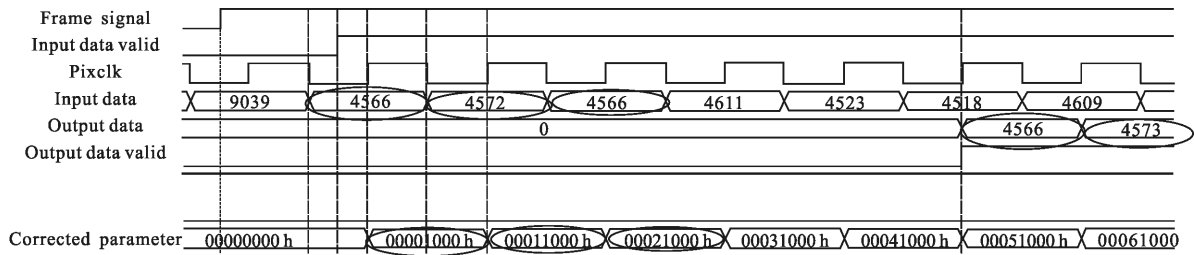


图 5 校正模型模块输入输出波形图

Fig.5 Input and output data waveform of calibration model

在实际红外成像系统实现中采用 PICO384P 红外探测器,在 Cyclone V 5CEBA4U15C7^[18] 中利用 Altera 公司的 Quartus II 13.1 开发工具完成了红外图像无快门非均匀性校正, FPGA 系统资源占用率如表 1 所示,其中括号内表示为系统总资源。从表 1 可知:本底采集和校正模型总资源消耗在 6%左右,为进一步实现其他红外图像算法留有足够资源。

表 1 算法实现 FPGA 资源消耗

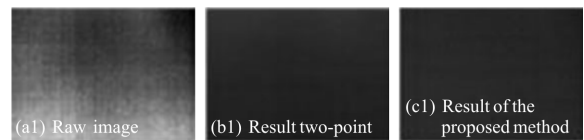
Tab.1 FPGA resource consumption

Resource	Background acquisition	Correction model	Total consumption
Logic unit	184(18 480)	109(18 480)	1.6%
Register	239(10 177)	174(10 177)	4.1%
Block memory	131072 (3 153 920)	65 536 (3 153 920)	6.2%
DSP block	0(66)	4(66)	6%

为了说明该系统针对各种场景均具有良好的校正效果,选取几个代表性的真实场景将该系统效果与经典两点校正系统对比,如下两点校正效果为用均匀挡板定标后短时间内两点系统校正效果,此时两点校正系统受探测器温度漂移影响较小,校正效果较佳,如图 6 所示。

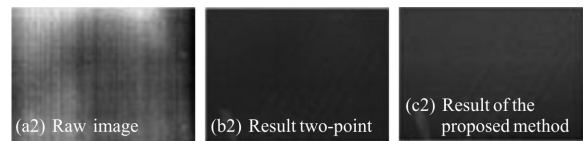
从图 6 可以看出,该系统在多种类型场景下均有较好的非均匀性校正效果,第 2 组图中的天花顶板图案细节基本可以看清,第 3 组图中远处强目标背景下细节基本可以看清。和基于快门定标的经典两点校正效果对比,本无快门非均匀性校正效果与经典两点校正系统定标校正后短时效果基本相当。这是因为该系统的自适应校正基于实时采集探测器的实时温度,然后选取该温度附近的均匀本底进行精确拉格朗日插值获得,从而能够保证校正参数

的精准性,达到较好的校正效果。与此同时,本无快门非均匀性校正无需快门定标,可满足连续探测系统要求,体积更小,重量更轻。



(a) 均匀图像

(a) Uniform image



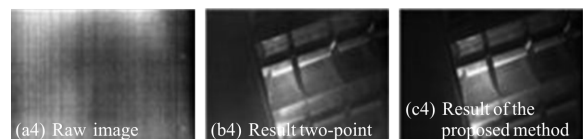
(b) 近景

(b) Close-range image



(c) 细节丰富的远景

(c) Far-range image with rich detail



(d) 含有强目标的近景

(d) Close-range image with strong detail

图 6 不同场景下该系统与两点校正系统效果对比

Fig.6 Comparison between the proposed method and the two point correction method under different scenarios

4 结论

文中完成了基于 SOPC 的红外图像无快门非均匀性校正算法实现。针对红外图像无快门非均匀性

校正算法特点,采用逻辑模块实现数据量大的校正模型,采用 NIOS II 软核实现复杂校正参数更新和系统控制,充分利用了 FPGA 逻辑模块并行处理和 NIOSII 软核擅长高层算法和控制的各优自势,简化了复杂算法的硬件实现,完成了图像的实时校正。对比本文无快门非均匀性校正与两点校正的非均匀性校正效果,结果显示:该系统实现的无快门非均匀性校正效果接近两点瞬时最佳校正效果。采用文中设计的自适应无快门校正系统无需快门定标,校正效果良好,可以满足军民诸多领域需要实时无间断红外探测的应用需求,文中兼具算法理论和工程实现,对后续相关研究及实现具有一定的借鉴意义。

参考文献:

- [1] Chen Qian. The status and development trend of infrared image processing technology [J]. *Infrared Technology*, 2013, 35(6): 311-318. (in Chinese)
陈钱. 红外图像处理技术现状及发展趋势 [J]. 红外技术, 2013, 35(6): 311-318.
- [2] Zuo C, Chen Q, Gu G, et al. Scene-based nonuniformity correction algorithm based on interframe registration [J]. *JOSA A*, 2011, 28(6):1164-1176
- [3] Cairnduff B. Correction of non-uniformity of response in sensor arrays. United Kingdom, 0724795. 0[P]. 2007-12-21.
- [4] Jiang Zhengzhong. The method for obtaining image correction coefficient: China CN201110062438.9 [P]. 2011-09-07. (in Chinese)
姜正中. 图像校正系数的获取方法: 中国, 201110062438.9 [P]. 2011-09-07.
- [5] Huang Li, Sun Xiaomin. Non shutter non uniformity correction method of uncooled thermal imager based on template method: China CN201210232737.7 [P]. 2012-11-07. (in Chinese)
黄立, 孙小敏. 基于模板法的非制冷热像仪无快门非均匀性校正方法: 中国, 201210232737.7 [P]. 2012-11-07.
- [6] Gao Meiguo, Liu Guoman, Tian Liyu. The Structure and System of High Speed Digital Signal Processor[M]. Beijing: Tsinghua University Press, 2004. Chinese)
高梅国, 刘国满, 田黎育. 高速数字信号处理器结构与系统[M]. 北京: 清华大学出版社, 2004.
- [7] Tu Zhiqiang. An adaptive double plateaus histogram equalization algorithm for infrared image enhancement and its realization on FPGA[D]. Wuhan: Huazhong University of Science and Technology, 2012. (in Chinese)
涂志强. 一种自适应双平台直方图红外图像增强算法及其 FPGA 实现[D]. 武汉: 华中科技大学, 2012.
- [8] Zhang Xiaofei. Study on nonuniformity correction technology of IRFPA based on DSP [D]. Chungqing: Chongqing University, 2002. (in Chinese)
张晓飞. 基于 DSP 的红外焦平面阵列非均匀性校正技术研究[D]. 重庆: 重庆大学, 2002.
- [9] Ding R, Shi C C, He Peikun. The Realization of two-point non-uniformity correction of infrared image based on FPGA+DSP[J]. *Optical Technique*, 2006, 32(S1): 121-123.
- [10] Liu D M, Zhang T, Yin C L, et al. An embedded infrared image enhancement system based on DSP and FPGA [J]. *Advanced Materials Research*, 2012, 505: 263-266.
- [11] Zhou J Y, Yin Y M, Tang Z L, et al. Nonuniformity correction of infrared images based on FPGA [J]. *Semiconductor Optoelectronics*, 2007, 28(2): 273-272.
- [12] Yang H, Gao K, Ni Guoqiang, et al. Combined real-time non-uniformity correction of IRFPA based on FPGA [J]. *Laser & Infrared*, 2007, 37(S1): 1027-1030.
- [13] Zhao Yan. Research on nonuniformity correction of infrared focal plane array [D]. Changsha: National University of Defense Technology, 2007. (in Chinese)
赵岩. 红外焦平面阵列非均匀校正算法研究[D]. 长沙: 国防科学技术大学, 2007.
- [14] Li Danhong. A study of the nonuniformity correction for infrared focal plane arrays [D]. Xi'an: Xidian University, 2011. (in Chinese)
李丹红. 红外焦平面阵列非均匀性校正算法研究 [D]. 西安: 西安电子科技大学, 2011.
- [15] Sauer T. Numerical Analysis[M]. New York: Pearson, 2012.
- [16] Li Jianhua. The research and simulation on nonuniformity correction algorithm of infrared focal plane array[D]. Harbin: Harbin Institute of Technology, 2008. (in Chinese)
李建华. 红外焦平面阵列非均匀性校正算法研究与仿真 [D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2008.
- [17] Yang Xin, Xu Weijun, Chen Xianyong, et al. Overview of the latest interface standard of Avalon bus [J]. *China Integrated Circuit*, 2007, 11(102): 24-29. (in Chinese)
杨鑫, 徐伟俊, 陈先勇, 等. Avalon 总线最新接口标准综述 [J]. 中国集成电路, 2007, 11(102): 24-29.
- [18] Altera Corporation. Cyclone V Device Handbook[Z]. 2015.