

SOPC 技术在实时红外图像处理中的应用 *

赵耀宏^{1,2}, 向 伟¹, 罗海波¹, 史泽林¹

(1.中国科学院 沈阳自动化研究所, 辽宁 沈阳 110016; 2.中国科学院 研究生院, 北京 100049)

摘要:可编程片上系统(SOPC)是 Altera 公司提出的一种灵活、高效的片上系统解决方案,为构建实时、小型化的红外图像处理器提供了有效的解决途径。介绍了一种基于 SOPC 技术的红外图像处理器,可对数字红外图像进行实时处理和显示驱动。处理器主要包括非均匀校正模块、实时图像增强模块和显示驱动模块。处理功能主要由一片 Altera 公司的 SOPC 芯片 EPXA4 完成。实验结果表明,采用 SOPC 技术构建的红外图像处理器集成度高、功耗低、可靠性强、实时性好。

关键词: SOPC; 红外成像; 非均匀校正; 图像增强

中图分类号: TP391 **文献标识码:** A **文章编号:** 1007-2276(2005)06-0747-05

Application of SOPC technology in real-time infrared image processing*

ZHAO Yao-hong^{1,2}, XIANG Wei¹, LUO Hai-bo¹, SHI Ze-lin¹

(1.Shenyang Institute of Automation, Chinese Academy of Sciences, Shenyang 110016, China; 2. Graduate University of the Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China)

Abstract: SOPC is a flexible and efficient SOC design methodology which is developed by Altera Corporation. Small efficient infrared image processor can be developed with the technology advantage of SOPC. In the paper, an infrared image processor based on SOPC technology is discussed, which has real-time infrared image processing and display driving function. The processor mainly encompasses a nonuniformity correction module, a real-time image enhancement module and a display driver. A single SOPC chip EPXA4 of Altera Corporation implements the main function of the processor. Experimental results show that the infrared image processor based on SOPC has high real-time performance, small bulk and low power dissipation.

Key words: SOPC; Infrared imaging; Nonuniformity correction; Image enhancement

0 引言

外热成像在军事和民用等领域的应用越来越广泛。红外热成像系统一般由红外焦平面阵列、红外图像处理器和显示器件组成。由于红外焦平面阵列的固有非均

随着非制冷红外焦平面阵列技术的日益成熟,红

收稿日期:2005-04-05; 修订日期:2005-07-10

* 基金项目:中国科学院科技创新基金资助项目(F030405)

作者简介:赵耀宏(1979-),男,山西朔州人,硕士生,主要从事图像处理方面的研究。

匀性等因素,获取到的红外图像普遍存在空间不均匀和噪声,且图像动态范围大、对比度低。研制高效、实时、小型化红外图像处理器是当前热门研究课题^[1]。目前的红外图像处理器大多基于 DSP^[2,3] 或 DSP+FPGA^[4,5] 技术。基于这两种技术,系统在设计过程中缺乏软、硬件协同设计能力和完整、严格的验证手段,开发周期长;此外系统的集成度较差,体积相对较大。

SOPC 技术将 EDA、嵌入式系统、DSP、FPGA 等融为一体,已经成为当前集成电路设计的趋势。本文介绍的基于 SOPC 技术的红外图像处理器,主要采用一块 Altera 公司的 SOPC 芯片 EPXA4,实现了红外图像的非均匀校正、实时图像增强和显示。与传统红外图像处理器相比,具有体积小、功耗低,实时性好,可靠性强等特点。

1 SOPC 芯片 EPXA4

Altera 公司的 Excalibur 系列芯片提供了完整的软硬件 SOPC 解决方案,是理想的 SOPC 设计平台,因此在红外图像处理器设计中,选用 Excalibur 系列 SOPC 芯片 EPXA4。

EPXA4(图 1)内部由 Stripe line 和 FPGA 两部分组成。Stripe line 是嵌入 FPGA 的硬核,包含 ARM 922T 微处理器、ARM 外围设备(中断控制器、计时器、UART、SDRAM 接口控制器、FLASH 接口控制器)、两个 AHB 总线桥端口、128 kB SRAM 和 64 kB 双端口 SRAM。FPGA 中有 16640 个 LE (Logic Element)、26 kB 的 RAM 位和四个锁相环(PLL)。

SOPC 要求设计工具具备软、硬件协同设计和完整、严格的协同验证能力。Altera 公司的设计软件 Quartus II 4.0 及其 SOPC builder 设计组件,集软件开发、IP 内核集成、设计输入、建模仿真、调试综合于一体,为基于 SOPC 的设计提供了一个强大的平台。其中,SOPC builder 是一个自动化的系统开发工具,适合于搭建基于总线的系统。使用 SOPC builder 设计工具,可以定义从硬件到软件的完整系统。设计者所要做的就是选择设计模块(库模块和自定义模块),SOPC builder 为每个模块生成可综合的代码,生成总线,配置寄存器,并生成仿真模型。

JTAG	PLL	UART	External memory interface	Trace module	SRAM
	Timer				
	Watchdog timer		Interrupt controller	ARM922T	DPRAM
FPGA					

图 1 EPXA4 芯片资源

Fig.1 Excalibur device resource

2 基于 SOPC 技术的红外图像处理

红外图像处理器是红外成像系统中的重要组成部分。一个典型的红外图像处理器应包括非均匀校正模块、实时图像增强和显示驱动模块。

文中红外图像处理器结构如图 2 所示,非制冷焦平面获取到的红外图像经过 A/D,送到图像处理器中,经过处理器处理和 D/A 后,输出标准 EIA 制式的模拟视频。红外图像处理的各个功能模块全部由 EPXA4 芯片完成。EPXA4 芯片内的大规模 FPGA、内嵌 ARM 处理器和内嵌 SRAM/ DPRAM 等丰富资源,极大地方便了这些处理模块的构建。

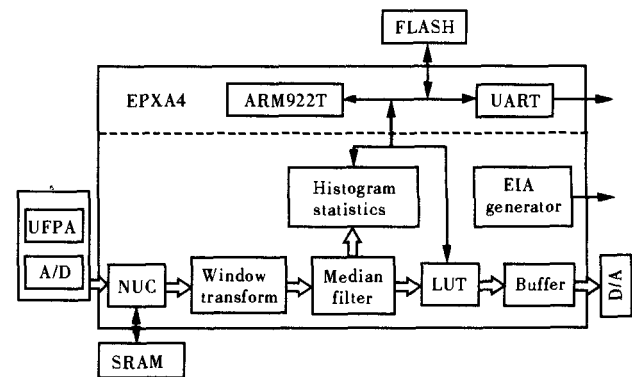


图 2 红外图像处理器结构

Fig.2 Infrared imaging processing system architecture

在 EPXA4 芯片内,主要实现了红外图像的非均匀校正、图像窗口变换、实时中值滤波、直方图处理和显示驱动模块。各个处理模块主要由 EPXA4 内部 FPGA 完成,并构成流水线处理方式,因此处理器具有很强的实时性。

EPXA4 芯片外挂一块 FLASH 和一块 SRAM。其中 FLASH 用于存储软件程序、FPGA 配置信息和图像非均匀校正时用到的校正系数。处理器上电工作时,SRAM 暂存非均匀校正系数,解决了直接从

FLASH中读取校正系数速度较慢的问题。

本红外图像处理器的主要工作流程如下:处理器上电后,ARM处理器将校正系数从FLASH中拷贝到SRAM中,非均匀校正模块对原始图像进行非均匀校正,校正后的图像经过窗口变换、中值滤波和直方图处理后,通过D/A转化为标准EIA制式的模拟视频。此外,处理器通过UART与PC机进行通讯,通过PC机上的操控软件,可完成图像采集、直方图变换算法选择、手动增益控制等高级功能。

2.1 非均匀校正

红外焦平面探测器单元响应的差异使红外图像产生空间不均匀性,要想得到高质量的红外图像,必须进行非均匀校正,因此非均匀校正技术便成为最为关键的红外图像处理技术。目前,红外图像的非均匀校正方法很多^[6],其中两点校正是应用最广的工程化方法,也是本系统中采用的校正方法。

设 $f(x,y)$ 为原始图像, $g(x,y)$ 为校正后的图像, a_{xy} 、 b_{xy} 为校正系数,两点校正法可表示为公式(1)所示的图像点处理。

$$g(x,y) = a_{xy}f(x,y) + b_{xy} \quad (1)$$

本处理器中,将校正系数 a_{xy} 、 b_{xy} 存在片外FLASH中。系统上电后,ARM处理器将校正系数拷贝到SRAM。FPGA中的非均匀校正模块(如图2所示)从SRAM中读取增益 a_{xy} 和偏移量 b_{xy} ,对每一像素进行公式(1)所示的变换,从而完成非均匀校正。由于校正模块全部由FPGA完成,所以具有很强的实时性。

目前,非均匀校正的系数一般是一次标定后存入热像仪,以后热像仪工作时就使用这些数据进行非均匀校正。随着系统工作环境温度的变化,这些校正系数可能不再适用。为了使本系统能够独立更新校正系数,系统中设计实现了一个图像采集模块,该模块可采样一场原始图像(即焦平面的原始响应),并通过UART将图像传给PC机。当需要更新非均匀校正系数时,通过PC机中的操控软件,对高温和低温的均匀辐射黑体分别采样,根据采样到的图像,重新计算校正系数,将新系数烧写到FLASH中,便完成了非均匀系数的更新。此外,采集到的原始图像可用于算法验证和图像分析。

2.2 窗口变换

红外信号的动态范围较大,本红外图像处理器采用的A/D为14 bit,图像显示D/A为8 bit。为了将14 bit有效数据映射为8 bit的电视视频数据,且使图像保持良好的对比度,处理器在FPGA中实现了一个窗口变换模块,原理如图3所示。该模块根据上一场图像的统计特性,对当前场图像进行窗口变换,其原理如下。

设 f 为输入图像的灰度, g 为输出图像的灰度, W_L 为窗底, W_H 为窗顶, $W_w = W_H - W_L$ 为窗宽, $K = \frac{W_L + W_H}{2}$ 为窗中心,窗口变换如公式(2)所示。经过

$$g(x,y) = \begin{cases} 0 & f(x,y) < W_L \\ 255 \frac{f(x,y) - K}{W_w} + 128 & W_L \leq f(x,y) \leq W_H \\ 255 & W_H < f(x,y) \end{cases} \quad (2)$$

窗口变换,14 bit原始图像被映射到0~255灰度量级上,如图3所示。

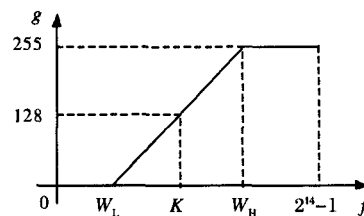


图3 窗口变换原理

Fig.3 Block diagram of window transform

在红外图像处理器中,根据实验情况,设窗宽 $W_w = 1024$ 。窗中心 K 在场消隐期中更新为上一场图像的均值,即:

$$K = \frac{1}{320 \times 240} \sum_{x=1}^{320} \sum_{y=1}^{240} f(x,y) \quad (3)$$

当新一场开始后,对图像进行公式(2)所示的窗口变换,并统计当前场图像的均值,为下一场更新窗中心 K 做准备。通过更新 K ,显示窗口中心自适应地滑动到上一场图像的均值上,变换后的图像信息丰富、对比度良好。

2.3 帧内中值滤波

通常,非制冷焦平面存在一些坏点,这使得获取

的红外图像上会出现亮点或暗点,而且在获取的过程中,不可避免地加入了各种噪声(如颗粒噪声);另外,两点校正后的剩余非均匀性也使红外图像有线状条纹。系统将上述各种情况都视为噪声。考虑到中值滤波作为一种非线性滤波器,能较好地保护图像的边缘信息,且对颗粒和线状条纹有较好的滤除作用,因此系统中采用帧内中值滤波器来滤除上述噪声。

设 $median$ 为取中值函数, S 为滤波窗口, 则中值滤波可表示为:

$$g(x,y)=median\{f(s,t)\} \quad (s,t) \in S \quad (4)$$

系统在 FPGA 中实现了一个实时 3×3 中值滤波器, 滤波器由窗口形成电路和奇偶排序网络^[7]组成, 如图 4 所示。滤波窗口形成电路, 例化(Instantiate)了两个 Altera 库中的 IP 模块 LPM_FIFO 作为行缓冲, 实时数字图像经过两个行缓冲后, 在寄存器 D 中形成了 3×3 的滤波窗口 S 。奇偶排序网络实现 $median$ 函数功能, 对滤波窗口 S 内的像素排序, 并实时输出中值。整个滤波器只引入了三行像素的延迟, 完全满足图像实时显示的要求, 实验表明, 中值滤波有效地滤除了上述各种噪声。

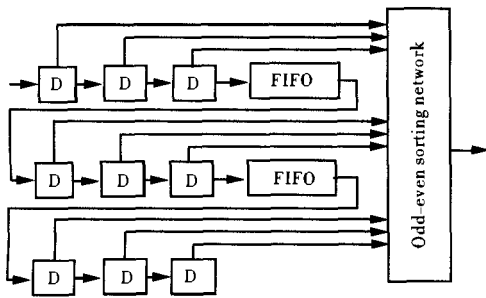


图 4 中值滤波原理框图
Fig.4 Block diagram of median filter

2.4 直方图处理

与可见光图像不同, 红外图像层次单一、对比度低, 直方图分布过于集中。直方图处理是改善红外图像显示的基本方法。典型算法有直方图均衡(HE)、直方图投影(HP)、平台直方图均衡(PE)等^[8]。

EPXA4 Stripe 中两块内嵌 DPRAM 为直方图变换提供了丰富的存储器资源。系统中将两块 DPRAM 分别配置成 32 位和 8 位宽度, 分别用于存储直方图

统计信息和查找表 LUT, 如图 5 所示。系统在场正程中由直方图统计模块完成图像的直方图统计, 将统计结果存入 DPRAMA 中, 场逆程触发 ARM 处理器进入快速中断模式, 读取 DPRAMA 中的统计数据, 根据具体的算法(HE、HP 或 PE)计算灰度变换, 将结果存入查找表 LUT(DPRAMB)中。下一场数据有效时, 对图像数据做“查表”操作, 便完成直方图变换。

系统中通过 PC 机中的操控软件来选择具体的直方图算法(HE、HP 或 PE)以及设定 PE 的平台上限值。

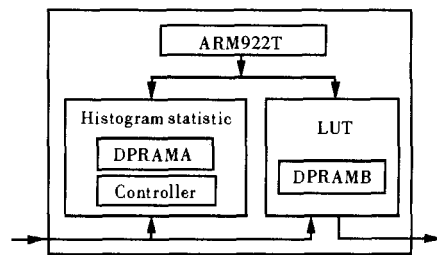


图 5 直方图处理原理框图
Fig.5 Block diagram of histogram processing

2.5 视频生成

红外图像处理器的最终处理结果要在模拟黑白监视器上显示出来, 这就需把处理结束后的数字图像转化为标准模拟视频。红外成像系统中红外焦平面的输出是帧频 60 Hz 的图像数据, 考虑到 EIA 制式的场频为 60 Hz, 因此系统输出采用 EIA 制式。

系统在 FPGA 中, 由 EIA Generator 模块生成一路 EIA 制式的全电视信号。同时在 EPXA4 内的 FPGA 中例化了 Altera 库中提供的 IP 模块 LPM_RAM_DP, 结合两个读写控制电路, 构成可容 30 行数字图像的环形缓冲器 Buffer, 如图 2 所示。处理后的图像在前端时序的控制下存入环形缓存, 同时在 EIA 模块的控制下读出环形缓冲器中的图像到 D/A, 生成模拟视频。

3 实验结果

本红外图像处理器中, 非制冷红外焦平面采用法国 ULIS 公司生产的 320×240 芯片, 该芯片像素时钟为 5 MHz, 帧频 60 Hz。系统开发工具采用 Quartus 4.0+SOPC Builder, ARM 处理器的软件开发工具采用 ARM ADS 1.2。系统中 FPGA 仿真和软硬件协同验

证工具为 Modelsim 5.7 C。硬件部分全部采用 VHDL 语言作为设计输入。

与其他实时红外图像处理器相比,采用 SOPC 技术,单个芯片便可完成所有的处理算法,电路少,功能多。同时系统在设计过程中,具有软硬件协同设计和验证的能力,大大缩短了开发时间。

4 结束语

采用 SOPC 技术构建的实时红外图像处理器整机具有以下技术特点:

(1) 高实时性 红外图像处理器的各个功能模块主要由 EPXA4 中的 FPGA 实现,同时各个模块间构成流水线处理结构,因此整个系统有很强的实时性。

(2) 小型化 红外图像处理器主要由一块 SOPC 芯片 EPXA4、简单的片外存储器件和 D/A 构成,设计器件全部采用贴片封装,因此处理器的体积小。

(3) 低功耗 系统中 SRAM、FLASH 等器件全部在 3.3 V 电压下工作,EPXA4 内核电压为 1.8 V,整个系统功耗很低。

参考文献:

- [1] LIU Zhi-cai, LI Zhi-guang. A review on image processing technique of thermal imager[J]. Infrared Technology (刘志才,李志广. 红外热像仪图像处理技术综述. 红外技术), 2000, 22(6): 27-32.
- [2] XING Su-xia, CHANG Ben-kang, QIAN Yun-sheng, et al. Study on infrared image processing circuit based on high speed DSP[J]. Infrared and Laser Engineering(邢素霞,常本康,钱芸生,等. 基于高速 DSP 的红外图像处理电路研究. 红外与激光工程), 2004, 33(3): 292-295.
- [3] LI Hong-min, YANG Jia-de. Design of real-time IR image signal processing system based on DSP and USB [J]. Semiconductor Optoelectronics(李宏民,杨家德. 基于 DSP 和 USB 的实时红外图像处理系统. 半导体光电), 2003, 24(1): 61-62.
- [4] MAO Yu-xing, HU Xu. The design of real-time processing system of infrared image[J]. Infrared Technology(毛玉星,胡旭. 红外图像实处理系统设计. 红外技术), 2003, 25(5): 50-53.
- [5] ZHAO Guang-zhou, ZHANG Tian-xu, WANG Xin-sai, et al. Modularized real-time image processing system based on DSP and FPGA[J]. Huazhong University of Science and Technology(Nature Science Edition)(赵广州,张天序,王新赛,等. 基于 DSP 和 FPGA 的模块化实时图像处理系统设计. 华中科技大学学报(自然科学版)), 2004, 32(10): 4-6.
- [6] CHEN Rui, TAN Xin-quan. Study on non-uniformity correction of infrared image[J]. Infrared Technology(陈锐,谈新权. 红外图像非均匀校正方法综述. 红外技术), 2002, 24(1): 1-3.
- [7] CHEN He-xin. Nonlinear Filter & Digital Image Processing[M]. Beijing: National Defense Industry Press(陈贺新. 非线性滤波器与数字图像处理. 北京:国防工业出版社), 1997. 240-242.
- [8] Vicker V E. Plateau equalization algorithm for real time display of high-quality infrared imagery[J]. Opt Eng, 1996, 35 (7): 1921-1826.

《宇航计测技术》征订启事

《宇航计测技术》是国家科委批准的计量测试专业性技术刊物,国内外公开发行人。本刊以“报道计量与测试的科研成果与技术进展,传递计量信息,促进学术交流,推广科研成果,为国防现代化建设服务”为办刊宗旨,面对广大科研机构、大专院校和厂矿企业从事计量与测试的技术人员,报道的主要内容包括计量标准研制、自动测试设备的研制;计量校准技术研究、自动测试技术研究和武器计量保障的研究以及计量综合管理、计量测试技术发展综述和计量与测试研究成果的推广与应用。《宇航计测技术》被列为中国科技核心期刊、首批中文核心期刊、计量核心期刊、国家统计局用刊,同时也被中国科学文献计量评价中心作为“中国科学引文数据库来源期刊”。本刊为《中国学术期刊(光盘版)》与“中国期刊网”的全文收录用刊,是“中国学术期刊评价数据库来源期刊”,并被多种文献数据库收录。《宇航计测技术》逢双月出版,大 16 开本,每册定价 7 元,全年 42 元,国内外公开发行人,国内统一刊号为 CN 11-2052/V,国际标准刊号为 ISSN 1000-7202。全国各地邮局均可订阅,邮发代号 18-123,也可直接向编辑部订阅,通信地址:北京市 142 信箱 408 分箱(100039)《宇航计测技术》编辑部。电话:68386651;传真:68386651。E-mail: kyb@casic203.com;银行汇款户名:中国航天科工集团第二研究院二〇三所;开户银行:北京市工商银行永定路分理处;帐号:0200004909003901904。欢迎订阅。