

引用格式:田立坤,汪江华,李平祥.基于软核的高分辨率红外图像处理系统设计与实现[J].电光与控制,2019,26(12):91-95. TIAN L K, WANG J H, LI P X. Design and implementation of high-resolution infrared image processing system based on soft core[J]. Electronics Optics & Control, 2019, 26(12):91-95.

基于软核的高分辨率红外图像处理系统设计与实现

田立坤, 汪江华, 李平祥

(中国航空工业集团公司洛阳电光设备研究所,河南 洛阳 471000)

摘要: 高分辨率是红外成像技术的发展方向。为了实现高分辨率红外成像系统实时处理,提出一种基于 SOPC 技术的解决方案。以软核 CPU Micro Blaze 为核心构建软硬协同处理架构,完成非均匀校正、图像降噪、直方图均衡等图像处理,解决大数据量图像高速处理问题,满足实时性要求。相比于传统 FPGA + DSP 的硬件架构,该方案易于实现低功耗和小型化,且可靠性高、通用性强。设计的高分辨率红外图像处理系统具有清晰度高、对比度高、图像细节清晰等优点。

关键词: Micro Blaze; 高分辨率; 软核; 红外图像处理系统

中图分类号: TP319 **文献标志码:** A **doi:**10.3969/j.issn.1671-637X.2019.12.019

Design and Implementation of High-Resolution Infrared Image Processing System Based on Soft Core

TIAN Li-kun, WANG Jiang-hua, LI Ping-xiang

(Luoyang Institute of Electro-Optical Equipment, AVIC, Luoyang 471000, China)

Abstract: High-resolution is the trend of infrared imaging technology. In order to implement high-resolution infrared imaging in real-time, a technical scheme based on SOPC technology is proposed. Hardware and software co-design architecture is constructed with the core of CPU Micro Blaze to complete such image processing procedures as non-uniformity correction, image denoising, and histogram equalization enhancement, so as to solve the problem of high-speed processing of large-data images and meet the real-time requirement. Compared with traditional hardware architecture of FPGA + DSP, this technical scheme has lower power consumption and is miniaturized with high reliability and high generality. The designed high-resolution infrared image processing system has the advantages of high definition, high contrast and clear image details.

Key words: Micro Blaze; high resolution; soft core; infrared image processing system

0 引言

高分辨率红外成像技术近几年来有着突飞猛进的发展,是未来的发展方向。高分辨率与图像清晰度息息相关,是反映图像质量好坏的重要标准之一。1280 × 1024 红外焦平面阵列规模红外系统既满足对大视场和高空间分辨率日益增长的应用要求,同时也适应了主流显示技术的兼容性需要。FPGA 的可编程片上系统(SOPC)因具有体积小、灵活性强以及稳定性高等特点,在实时红外图像采集与处理系统中得到广泛应用。不同于专用集成电路(ASIC),SOPC 主要通过 IP 核复用来实现系统功能,对于特定的应用通过标准片上总线扩展

功能单元灵活构建相应的系统架构,缩短设计周期的同时提高系统的稳定性和可靠性^[1]。

本文研究了基于软核 Micro Blaze 处理器的高分辨率(1280 × 1024)红外焦平面实时图像处理系统,提出以软核 CPU Micro Blaze 为核心构建软硬协同处理架构,实现灵活高效的图像采集与处理系统。此外,对系统中图像处理算法非均匀校正、图像降噪、直方图均衡算法的原理和实现方法进行了阐述。

1 Micro Blaze 处理器

Micro Blaze 软核处理器采用 RISC 架构及哈佛结构的 32 位指令和数据总线,带有 32 个通用寄存器、2 个特殊寄存器、1 个 ALU 单元、1 个移位单元和两级中断响应单元,具有 3/5 级流水线和桶形移位器,内存管理/内存保护单元、浮点单元、高速缓存等模块。支持 CoreConnect 片上总线的标准外设集合,具有兼容性和

收稿日期:2018-11-08

修回日期:2019-04-23

作者简介:田立坤(1988—),男,河北邢台人,硕士,工程师,研究方向为红外成像技术。

重复利用性,且可根据性能需求和逻辑区域成本任意裁减,极大地扩展了应用范围,其最精简的核只需要将近 400 个 Slice^[2]。图 1 为 Micro Blaze 内部结构图。

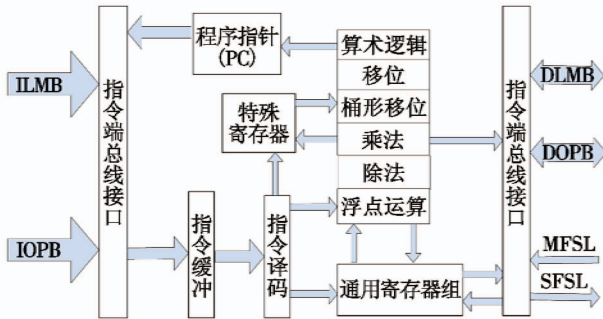


图 1 Micro Blaze 内部结构图
Fig.1 Structure of Micro Blaze

2 系统架构设计

高分辨率红外图像处理系统通过接收上位机 RS422 通讯指令完成积分时间调整、探测器配置、非均匀校正、图像降噪、直方图统计及灰度映射等图像处理,最终以符合 VASA 标准的 60 Hz DVI 视频格式输出。数字硬件电路主要由 FPGA、同步 SRAM, DDR3, FLASH 以及外围电路组成。高分辨率实时红外图像处理系统指标如表 1 所示。

表 1 高分辨率红外系统指标

Table 1 High-resolution infrared system index

指标类型	技术指标	指标类型	技术指标
像元数	1280 × 1024	制冷方式	斯特林制冷机
像素大小/μm	15 × 15	制冷时间	8min@23℃
响应波段/μm	3.6~4.9	重量/kg	0.8
平均 NETD/K	≤22 × 10 ⁻³	工作温度/℃	-40 ~ +70
冷屏 F 数	4		

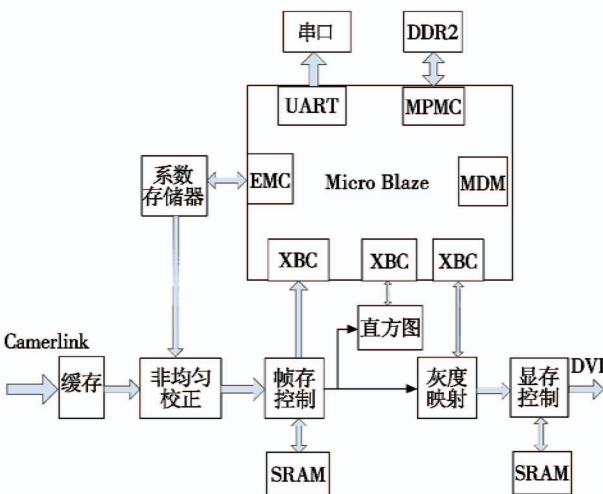


图 2 视频流处理示意图

Fig.2 Video stream processing
高分辨率红外图像处理系统所处理图像数据量

大,要求处理实时性较高,图像处理不及时会出现时序难以控制、视频混乱等问题。为了实现图像高速实时处理且使红外探测器数据和 DVI 输出时序匹配,采用两个同步 SRAM 做显存,以乒乓操作的处理方法对数据流进行流水线式处理,实现 60 Hz 帧频 1280 × 1024 高分辨率视频显示。图 2 为系统中红外视频流处理示意图。

红外系统接收主时钟为 80 MHz Camerlink 红外探测器的图像视频,通过缓存完成跨时钟域处理。Micro Blaze 通过控制帧存 SRAM 来读取探测器数据完成系数计算,所计算的非均匀校正系统经 EMC (External Memory Controller) 控制系数数据存储存储在系数存储器中。非均匀校正模块不断读取系数存储器的系数数据完成红外图像非均匀校正。图像数据经帧存缓存后分别进入直方图模块和灰度映射模块,在直方图模块中完成直方图统计后, Micro Blaze 通过 XBC (xps_bram_if_cntlr) 获取直方图统计数据并完成灰度映射计算,最终通过显存控制单元以标准 DVI 视频格式输出。

在 SOPC 内部集成了基于 Micro Blaze 软核处理器的片上系统,其内部集成了 MPMC (Multi-Port Memory Controller) IP 核用于控制程序存储器 DDR2; XPS_MCH_EMC (XPS Multi-Channel External Memory Controller) 用于控制系数存储器的读写操作; XPS-BRAM Controller 用于读取帧存数据; Micro Blaze 的调试接口用 Xilinx Microprocessor Debug Module (MDM) IP 核; UART IP 核用于与上位机通信。

3 图像处理模块设计与实现

高分辨率红外图像处理系统获取的探测器原始图像经缓存单元格式转换后,在软硬协同平台下进行图像处理。本文主要针对非均匀校正、图像降噪、直方图均衡图像处理算法进行研究与设计。

3.1 非均匀校正

探测器的非均匀性是指由于制造工艺、生产材料等相关技术水平的限制,红外焦平面中的每个探测器单元响应不一致,即探测器单元对相同输入的辐射值有不同的响应值。非均匀性使得红外图像带有固定噪声,严重影响红外探测与显示的效果。常见的两点校正方法以探测器响应电压与目标温度之间是线性关系为假设^[3]。

采用高温 T_1 、低温 T_2 的两个黑体进行定标,使得探测器的探测元对于高温 T_1 、低温 T_2 分别做出响应 $V_{m,n}(T_1)$ 、 $V_{m,n}(T_2)$, 并且求出探测器响应的平均值

$$V(T_1) = \sum_{m=1, n=1}^{m=M, n=N} V_{m,n}(T_1) \quad (1)$$

$$V(T_2) = \sum_{m=1, n=1}^{m=M, n=N} V_{m,n}(T_2) \quad (2)$$

定时,高温黑体响应值点和低温黑体响应值点确定的直线为校正后曲线,并且通过线性变换得到,即

$$Y_{m,n} = G_{m,n}(V_{m,n}) + Q_{m,n} \quad (3)$$

将探测器原响应值变换成校正后响应值,式中: $G_{m,n}$ 为校正增益因子; $Q_{m,n}$ 为校正偏置因子。对于不同的探测元, $G_{m,n}$ 与 $Q_{m,n}$ 有所不同。

红外图像的非线性校正采用高、低温黑体的两点校正,并通过常温黑体进行偏移量的再次修正。Micro Blaze 通过读出帧存 SRAM 图像数据分别获取高温 T_1 、低温 T_2 探测器探测元响应信息,计算完校正增益因子和校正偏置因子后存储在 Flash 存储器中。非均匀校正模块获取经缓存处理后的探测器图像数据的同时读取 Flash 存储的校正系数即校正增益因子和校正偏置因子,完成非均匀校正功能。图 3 为红外图像校正流程图。

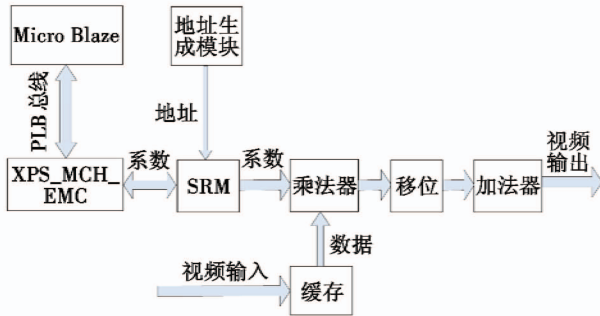


图 3 红外图像校正流程图

Fig. 3 Flow chart of infrared image correction

在 FPGA 中实现非均匀校正模块,数据位宽为 14 bit,图像像素为 1280×1024 ,主时钟频率为 80 MHz。

3.2 图像降噪

中值滤波是一种非线性的图像平滑方法,能够很好地滤除脉冲噪声,对椒盐噪声和坏元填充具有明显效果。中值滤波基本原理:采用一个含有奇数个点的滑动窗口,用窗口区域内的中值来替代窗口像素点的灰度值^[4]。 f_i 为图像的信息点时,如果仍用中值来代替该点,不但无法消除噪声,反而会带来误差。为了增强图像细节与边缘信息,在此基础上增加引导滤波模块。引导滤波是一种具有边缘保持作用的图像滤波方法,是在局部线性模型的基础上推导得出的,在计算滤波图像的同时考虑了输入图像和引导图像的信息^[5]。具体描述为:在局部区域 w_k 内第 i 个像素的滤波器输出 q_i 与其对应的引导图像 I_i 呈线性关系,可以表示为

$$q_i = a_k I_i + b_k \quad \forall i \in w_k \quad (4)$$

式中: w_k 是以第 k 个像素为中心的窗口区域; a_k 和 b_k 为线性模型的系数。通过计算输出 q_i 和输入 p_i 的最

小平方差函数 E 来获取线性系数 a_k 和 b_k ,即

$$E(a_k, b_k) = \sum_{i \in w_k} [(a_k I_i + b_k - p_i)^2 + \varepsilon a_k^2] \quad (5)$$

式中, ε 是设定的正则化参数。利用线性回归模型解得系数 a_k 和 b_k ,分别表示为

$$a_k = \frac{\frac{1}{|w|} \sum_{i \in w_k} I_i p_i - \mu_k \bar{p}_k}{\delta_k^2 + \varepsilon} \quad (6)$$

$$b_k = \bar{p}_k - a_k \mu_k \quad (7)$$

式中: μ_k 是引导图像 I 在窗口 w_k 中的平均值; δ_k^2 是引导图像 I 在窗口 w_k 中的方差; $|w|$ 是窗口 w_k 中像素的数量; \bar{p}_k 是待滤波图像 p 在窗口 w_k 中的均值。由于同一像素在不同的窗口中计算得到的值不同,所以使用所有可能值的均值作为最终的输出。当把引导滤波用作边缘保持滤波器时,原始输入图像作为引导图像,即 $I=p$,则

$$a_k = \frac{\delta_k^2}{\delta_k^2 + \varepsilon} \quad (8)$$

$$b_k = (1 - a_k) \mu_k \quad (9)$$

对于图像平缓区域,即 $\delta_k^2 \ll \varepsilon$,此时 $a_k \approx 0, b_k \approx \mu_k$,引导滤波等效为均值滤波,主要起着平滑的作用。对于图像中边缘信息的区域,即 $\delta_k^2 \gg \varepsilon$,此时 $a_k \approx 1, b_k \approx 0$,滤波图像接近于引导图像,引导滤波主要起到了保持边缘的作用^[6-7]。

本系统以 3×3 方形窗口为滤波模板,沿图像数据的行方向逐像素滑动。 3×3 窗口模板由 3 组寄存器和 2 个 FIFO 组成,FIFO 的深度为 1920,宽度为 24 bit。 ε 取值为 40,图 4 为对输入的待校正图像进行引导滤波处理的流程图。

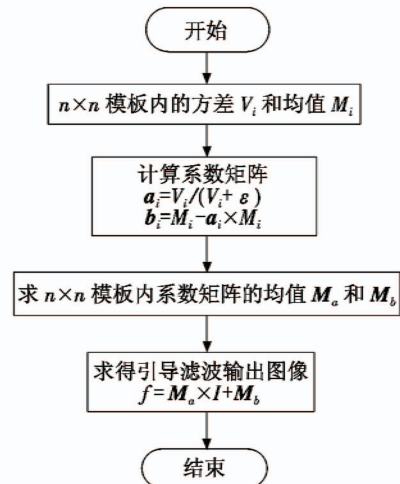


图 4 引导滤波流程图

Fig. 4 Flow chart of guided filter

图像降噪总体设计主要包括 5 部分,即计数模块、模板生成模块、中值滤波模块、引导滤波模块以及控制

与延时模块。图5为图像降噪硬件结构图。

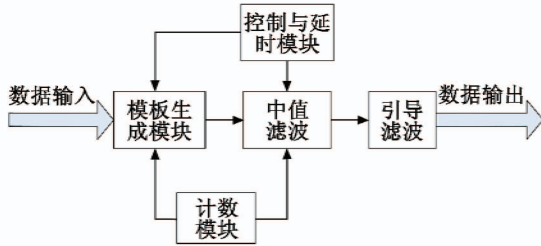


图5 图像降噪硬件结构图

Fig.5 Structure of image denoising hardware

通过中值滤波可以完成红外探测器输出图像数据的坏元自动填充,通过引导滤波增强边缘信息使得图像显示效果更清晰。在FPGA中实现图像降噪模块。

3.3 直方图均衡

在红外成像技术领域,为了能够从红外图像中正确地识别出目标,通常会采用图像增强算法来提高红外图像场景中目标与背景的温差。直方图均衡是一种通过直方图分布信息进行灰度调整以达到图像增强效果的方法。本文所实现的直方图算法是把一幅已知灰度概率分布的图像,经过点变换使原始图像变成具有均匀概率分布的图像,从而使得信息熵最大。

直方图均衡后使所有灰度层上的像素分布概率密度为1。设原像素的灰度值为 $r(0 \leq r \leq 1)$,概率密度为 $p_r(r)$,经过变换后的像素灰度为 s ,概率密度为 $p_s(s)$,变换函数为 $T(r)$,则有

$$s = T(r) \quad 0 \leq r \leq 1 \quad (10)$$

$$p_s(s) ds = p_r(r) dr \quad (11)$$

同时必须满足:1) $T(r)$ 是单值单调递增函数,这样就确保了灰度的单值映射和灰度不会出现反转(即原图中小灰度像素经过变换后大于原图中大灰度像素的变换值);2) $0 \leq T(r) \leq 1$,这样就确保了经过变换不会缩小原图像的灰度动态范围^[8]。

首先通过选择一个合适的平台阈值 T ,对统计直方图进行如下修正:如果某灰度级的直方图值大于平台阈值 T ,将其直方图值置为 T ;如果其直方图值小于平台阈值 T ,则保持不变,即 $s = T(r), 0 \leq r \leq 1$,阈值 T 需在试验过程中根据图像显示效果确定,本文中 T 取值100。

直方图均衡算法是将每个输入的灰度映射成另外的灰度值,而映射后的图像灰度为均衡化的分布。通过单口SPRAM和双口DPRAM来实现直方图均衡功能模块,其中单口SPRAM主要完成直方图统计功能,CPU会实时获取统计结果。双口DPRAM实现直方图均衡模块与CPU交互。图6为直方图均衡流程图。

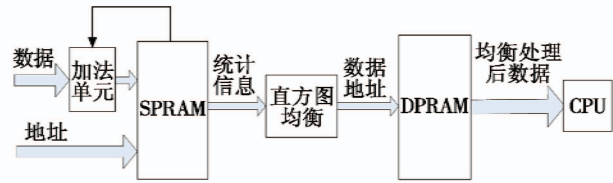


图6 直方图均衡流程图

Fig.6 Flow chart of histogram equalization

红外图像数据作为地址信号在SPRAM中通过两倍时钟进行灰度统计,统计的信息进行直方图均衡处理后存入DPRAM中供CPU读取。在FPGA中实现直方图均衡模块。

4 系统效果

在美国Xilinx公司FPGA芯片XC5VSX95T-1FF11361平台中完成基于软核Micro Blaze软硬协同架构设计,并实现非均匀校正、图像降噪、直方图均衡等图像处理,完成高分辨率红外图像处理系统原理样机的研制。经测试,相比于传统FPGA+DSP的硬件架构实时性提高33%,探测器制冷到温后正常工作状态红外图像处理系统功耗为45W,功耗降低18%。利用该系统对轻雾(能见度0.3~1km)天气下的室外3km处景物成像,成像效果如图7所示。



图7 系统成像效果图

Fig.7 System imaging effects

从图7中可以看出,该中波红外图像处理系统在雾天成像清晰,图像对比度好,能呈现很多图像细节,如建筑物、树木、汽车轮胎等。

5 结束语

在系统设计过程中,通过建立软核Micro Blaze的SOPC架构,灵活、高效地完成了图像数据的采集与处理,利用FPGA芯片平台和MPMC等IP核完成非均匀校正、图像降噪以及直方图均衡等图像处理,显著提高了图像显示质量和图像对比度。本文设计充分发挥FPGA流水线处理和并行计算的优势,提高了预处理速度,同时该系统具有体积小、灵活性强以及稳定性高等特点,已应用到具体的项目中。

参考文献

- [1] 田耘,徐文波. Xilinx FPGA 开发实用教程[M]. 北京:清华大学出版社,2008.
- [2] Xilinx, Inc. MicroBlaze processor reference guide [R/OL]. <https://www.docin.com/p-606872945.html>.
- [3] 夏玫,顾国华,陈钱,等. IRFPA 两点校正的定标温度选择方法研究及实现[J]. 红外技术,2011, 33(3):151-154,178.
- [4] KALAVATHY S, SURESH R M. A switching weighted adaptive median filter for impulse noise removal[J]. International Journal of Computer Applications, 2011, 28(9):8-13.
- [5] 刘杰,张建勋,代煜. 基于多引导滤波的图像增强算法[J]. 物理学报,2018, 67(23):238701-1-238701-10.
- [6] 葛朋,杨波,毛文彪,等. 基于引导滤波的高动态红外图像增强处理算法[J]. 红外技术,2017, 39(12):1092-1097.
- [7] 刘毓博. 机载大视场高分辨率热红外成像系统研究[D]. 上海:中国科学院大学(中国科学院上海技术物理研究所),2017.
- [8] 张云峰. 基于场景复杂度计算的红外图像平台直方图均衡[J]. 液晶与显示,2016, 31(7):695-702.

(上接第 90 页)

除异常值并利用时间记忆的参考度进行加权融合的估计算法。此算法通过剔除异常值保证融合值更加精确,又利用历史数据蕴含的信息对融合值进行修正,通过时间和空间的融合,使数据融合值更加准确、可靠、稳定。

参考文献

- [1] KIM D, M'CLOSKEY R T. Spectral analysis of vibratory gyro noise [J]. IEEE Sensors Journal, 2013, 13(11):4361-4374.
- [2] 李士心,王晓亮,翁海娜,等. 基于灰色模型和 RBF 神经网络的 MEMS 陀螺温度补偿[J]. 中国惯性技术学报,2010, 18(6):742-746.
- [3] BAYARD D S, PLOEN S R. High accuracy inertial sensors from inexpensive components:US6882964[P]. 2005-04-19.
- [4] 李伟,何鹏举,高社生. 多传感器加权信息融合算法研究[J]. 西北工业大学学报,2010, 28(5):674-678.
- [5] 金建华,阙沛文. 多传感器测量数据的切尾加权融合算法[J]. 仪器仪表学报,2002, 23(3):303-304.
- [6] 张华强,赵剡,陈雨. 基于支持度的 MEMS 陀螺信息融合方法[J]. 宇航计测技术,2012, 32(2):18-21.