

文章编号: 0258-7025(2009)02-0307-05

基于现场可编程门阵列的高性能红外热成像系统

罗凤武 王利颖 涂霞 陈厚来

(电子科技大学电子薄膜与集成器件国家重点实验室, 四川 成都 610054)

摘要 探讨了红外成像系统实时信号处理算法、硬件结构等关键技术。提出了一种新的自适应两点非均匀性校正(ATPC)算法,该算法以快门为目标场景来实时更新校正参数,能有效克服红外焦平面阵列(IRFPA)响应随时间漂移导致的两点非均匀性校正算法失效问题。采用查找表结构来实现平台直方图均衡(PE)算法,并对 PE 算法进行了优化,降低了运算量和存储空间需求。硬件系统采用两片同步动态随机存储器(SDRAM)的乒乓缓存结构,在单片现场可编程门阵列(FPGA)上实现了 IRFPA 的 ATPC 和 PE 算法的并行操作。实验结果表明,对 320×240 的 IRFPA,在 50 MHz 系统时钟下,帧频为 60 Hz 时系统工作良好,处理后的红外图像质量有了明显改善,系统结构简单便于小型化,能够满足实时动态检测及追踪需求。

关键词 成像系统; 红外成像系统; 自适应两点非均匀性校正; 平台直方图均衡算法; 现场可编程门阵列

中图分类号 TN215 文献标识码 A doi: 10.3788/CJL20093602.0307

A Real-Time Processing System Based on Field Programmable Gate Array for Infrared Image

Luo Fengwu Wang Liying Tu Xia Chen Houlai

(Key Laboratory of Electronic Film and Integrated Device, University of Electronic Science and Technology of China, Chengdu, Sichuan 610054, China)

Abstract Key technologies such as real-time signal processing algorithms and hardware structure intended for driving a 320×240 infrared focal plane arrays (IRFPA) are presented here. Owing to the response of the IRFPA is instable with time, an adaptive two point correction (ATPC) algorithm was introduced in which the coefficients were updated according to a shutter image as the target. In addition, the real-time processing for plateau equalization (PE) is difficult although the infrared image can be enhanced effectively. In this article, PE algorithm was optimized and simplified by a loop-up table in which the size was limited by the maximum and minimum values in the frame. Therefore, the calculating numbers and requirement of memory were reduced greatly. A real-time infrared system structure based on field programmable gate array (FPGA) was introduced, in which two synchronous random access memories (SDRAM) were used as frame buffer. In this article, the structure of the system and the software realization of the ATPC and PE were described in details. Meanwhile, the infrared images before and after the process of ATPC method were shown here as well as images with different Plateau values. These results suggested that, for a 320×240 IRFPA, the system works well in the 60 Hz frame rate and 50 MHz system clock. Furthermore, the infrared images were improved significantly and the requirement for real signal processing was achieved consequently.

Key words imaging systems; infrared imaging systems; adaptive two point correction; plateau equalization; field programmable gate array

1 引言

由于材料和工艺水平的限制,红外焦平面阵列(IRFPA)普遍存在严重的非均匀性^[1,2],同时,红外图像具有动态范围窄、目标对比度差^[3~7]等特点,因

此非均匀性校正和图像增强是红外实时图像处理系统中的关键技术。目前国内外 IRFPA 的非均匀性校正方法可以分为基于标定的校正算法和基于场景的校正算法。前者如两点非均匀性校正算法

收稿日期: 2008-08-18; 收到修改稿日期: 2008-10-20

基金项目: 国家自然科学基金创新群体基金(60721001)资助课题。

作者简介: 罗凤武(1978—),女,硕士,讲师,主要从事光电传感器信号检测和应用等方面的研究。

E-mail: luofengwu@126.com

(ATPC),该类算法具有精度高、实时性好等优点,但其校正性能受限于 IRFPA 工作的稳定性;后者如 Scribner 等^[8]提出的神经网络自适应非均匀性校正算法(NN-NUC),该类算法利用序列图像来估计 IRFPA 的校正系数或者直接估计校正结果,具有自适应校正能力,校正性能不受 IRFPA 响应随时间变化的影响。在图像增强算法中,针对红外图像的“高背景低反差”特点,平台直方图均衡(PE)算法能有效抑制背景噪声,提高目标对比度^[4]。但是,无论 NN-NUC 非均匀性校正算法还是 PE 图像增强算法,它们都有一个共同点:需要大量的运算及存储资源,不易实时实现。

传统的实时红外处理系统多采用 DSP+FPGA 硬件结构,用现场可编程门阵列(FPGA)实现两点非均匀性校正算法,用数字信号处理(DSP)实现图像增强算法^[9],分工明确,但存在硬件结构及软件交互机制复杂、资源利用率低等缺点。随着 FPGA 运算能力的不断增强,在单片 FPGA 上实现所有的红外图像处理功能的单芯片系统(SOC)已成为可能。基于单片 FPGA 的红外图像处理 SOC 除具有体积小、成本低、稳定性好等优点外,还具有易于向专用红外处理大规模集成芯片(ASIC)移植的巨大优势。

本文引入神经网络自适应思想对两点校正算法的校正参数进行修正,同时对 PE 算法进行了优化,并采用并行流水线处理方式,在单片 FPGA 上实现了自适应两点非均匀性校正和平台直方图图像增强的实时处理。

2 红外成像实时处理系统结构及并行工作机制

红外图像实时处理系统的结构框图如图 1 所示,从焦平面出来的模拟信号经模数转换后进入 FPGA,在 FPGA 内部完成非均匀性校正、平台直方

图均衡增强等处理,然后转换成模拟视频信号或送数字 LCD 显示屏直接显示。本系统采用了大容量外部同步动态随机存储器(SDRAM)作为缓存,主要是基于以下考虑:首先,非均匀校正 ATPC 算法的实现需要存储连续多帧图像数据以实时修正校正参数;其次,平台直方图均衡算法需要根据一帧图像来完成灰度统计及映射处理。而对于一幅 320×240 的红外图像,当采样精度为 14 bit 时,其数据量高达 1075200 bit,相对含有大容量 RAM 块的高端 FPGA,高密度低成本的外部 SDRAM 无疑是更好的选择,虽然后者需要精心设计 SDRAM 控制器。系统采用两片 SDRAM 进行乒乓操作,其工作原理如图 2 所示。第一帧图像经非均匀性校正后送入 SDRAM1 缓存,SDRAM2 空闲,接着第二帧图像完成非均匀性校正送入 SDRAM2 缓存,同时系统从 SDRAM1 中读取第一帧图像数据以实现平台直方图均衡的灰度映射,后续各帧图像的处理依此类推,这样,两块 SDRAM 的读写交叉操作可以使前一帧图像的增强处理与后一帧图像的非均匀性校正缓存同步进行。这种乒乓结构的并行操作机制降低了 SDRAM 控制器的开发难度,并在保证系统运行速度的同时降低了时钟频率,增强了系统的稳定性。对于 320×240 的 IRFPA,系统主时钟频率为 50 MHz,帧频可达 60 Hz,能够满足实时动态检测及追踪的要求。

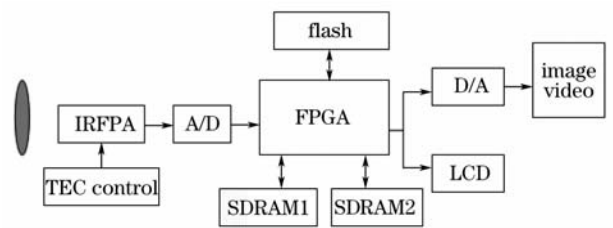


图 1 红外成像实时处理系统结构框图
Fig. 1 Block diagram of the system

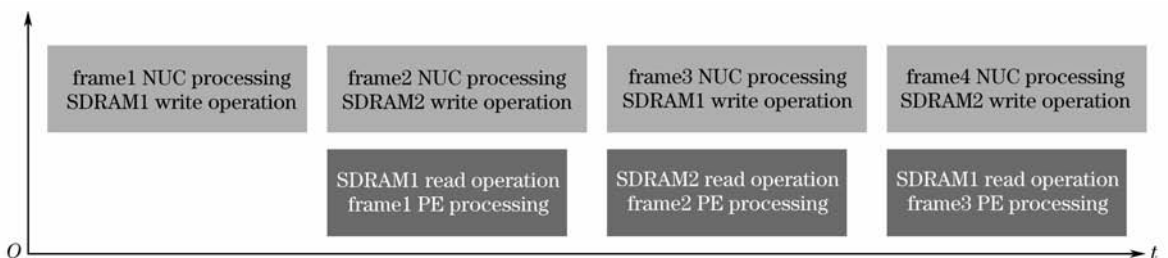


图 2 SDRAM 乒乓结构示意图
Fig. 2 Ping-pang structure of SDRAM

3 自适应两点非均匀性校正方法

两点非均匀性校正算法的响应模型为^[10]

$$y_{ij} = a_{ij}x_{ij}[\varphi_{ij}(t)] + b_{ij}. \quad (1)$$

从(1)式可以看出,两点法假设探测器的响应模型是线性的,并且探测器的响应特性不随时间漂移。两点法采用辐射均匀的参考辐射源为探测目标源,通过测量探测器在不同辐射下的两帧输出即可计算出用于非均匀性校正的校正系数。

两点法校正精度高、实时性好,但其校正性能受限于红外焦平面阵列工作的稳定性,需要周期性地利用参考源进行定标。NN-NUC 算法假设 x 是存在非均匀性噪声的图像,经过 NUC 校正单元处理后输出为 y ,对于像元 (i,j) 两者的关系为

$$y_{ij}^n = a_{ij}^n x_{ij}^n + b_{ij}^n, \quad (2)$$

式中 n 表示第 n 帧图像, a_{ij}^n 和 b_{ij}^n 分别为像元 (i,j) 的增益和偏移校正系数。像元 (i,j) 期望的校正输出 f_{ij}^n 采用像元 (i,j) 其 4 邻域 y^n 的空间均值

$$f_{ij}^n = (y_{i-1,j}^n + y_{i+1,j}^n + y_{i,j-1}^n + y_{i,j+1}^n)/4, \quad (3)$$

定义误差函数为

$$e_{ij}^n = (y_{ij}^n - f_{ij}^n)^2 = (a_{ij}^n x_{ij}^n + b_{ij}^n - f_{ij}^n)^2, \quad (4)$$

则利用最陡下降法对 a_{ij}^n 和 b_{ij}^n 进行更新,得到 a_{ij}^{n+1} 和 b_{ij}^{n+1} ,其中迭代步长为 u

$$\begin{aligned} a_{ij}^{n+1} &= a_{ij}^n - ue_a = a_{ij}^n - 2ux(y - f), \\ b_{ij}^{n+1} &= b_{ij}^n - ue_b = b_{ij}^n - 2u(y - f). \end{aligned} \quad (5)$$

系统以两点非均匀性校正为基础,将原始的两点校正系数存储在 FLASH 存储器中,当发现图像质量下降时利用按键启动校正系数的更新操作,以原始两点校正系数 a_{ij}^n 和 b_{ij}^n 为(5)式的初始值,用 IRFPA 前的快门作为参考目标按(3)式计算像元的 4 邻域均值,迭代步长 u 的设置要从更新速度和精度两方面考虑,本系统 u 采用固定值 0.00001,按(5)式对两点校正系数进行更新,直到获得满意图像质量结束更新操作,最后将更新后的校正系数回写到 FLASH。将这种非均匀性校正算法称为自适应两点非均匀性校正算法。

IRFPA 总是存一定数量的无效像元^[2],IRFPA 无效像元会对非均匀性校正参数修正造成严重干扰。这种干扰首先影响无效像元四周的像素,进而逐渐扩散到整个红外图像。除此之外,无效像元的存在大大增加了后续图像增强算法的计算量,甚至可能导致图像增强算法的完全失效。所以在对图像进行非均匀性校正之前,必须对 IRFPA 中的无效

像元进行合理补偿或替换处理。本系统实现时用 FLASH 存储器记录无效像元的位置,在 FPGA 中用移位寄存器巧妙地实现了无效像元的替代,其值为同一帧图像中的同行的前一个数据和同列的前一个数据的算术平均,消除了无效像元对非均匀性校正及图像增强算法的干扰。

4 PE 算法的实时实现

PE 是对传统的直方图均衡增强算法的一种修正,它首先通过选择一个合适的平台阈值 P ,对已知直方图进行如下修正:若某灰度级的直方图大于平台阈值 P ,将其直方图值置为 P ;如果其直方图值小于平台阈值 T ,则保持不变^[4]。即

$$p(a_k) = \begin{cases} n_k/n, & n_k < P \text{ 时} \\ P/n, & n_k > P \text{ 时} \end{cases} \quad (6)$$

因此 PE 的本质就是适度限制背景和噪声灰度的增强,为目标细节的提升留出灰度空间,该算法的效果和平台值 P 的选取直接相关。

传统直方图均衡和平台直方图均衡算法都具有计算量和存储量大的缺点,不利于实时图象处理应用。本文充分利用 FPGA 内部的 RAM 资源,建立原始直方图信息表和直方图映射表,处理时首先根据 SDRAM 中的图像数据实时更新信息表和映射表,然后利用图像的原始灰度级为地址索引查找映射表得到转换后的显示数据,平台直方图的硬件框图见图 3。此外,系统虽采用了 14 位的模数转换器(ADC),但实际的图像数据不可能占满 0~16385 的每一级,故本系统在对图像进行非均匀性校正的同时,用寄存器 N_{\max} 和 N_{\min} 实时统计一帧图像灰度级的最大值和最小值,然后在 PE 阶段利用最大值和最小值来限制信息表和映射表的大小,大大缩减了 PE 的运算量和存储量。PE 具体实现步骤如下:

1) 计算原始直方图。遍历一帧图像数据统计各个灰度级的像素数,存于数组 $C[i]$, $C[i]$ 为灰度级为 i 的像素个数,其中 i 的范围为 $[N_{\min}, N_{\max}]$ 。

2) 选取平台值。虽然有一些根据红外图像自适应地选取平台值的算法报道,但这些算法都过于复杂不具实时性^[4],所以系统采用设置按键输入平台值的方式来增强系统的灵活性。

3) 根据选择的平台值 P 将 $C[i]$ 钳位到 $[0, P]$,即若 $C[i] > P$,则取 $C[i] = P$ 。

4) 计算钳位后的直方图累积概率分布, $S[N_{\min}] =$

$C[N_{min}]$, $S[i]=S[i-1]+C[i]$ ($i=N_{min}, N_{max}$), $SP=S[N_{max}]$, 归一化 $S[i]=S[i]/SP$ 即为直方图的累计概率分布。

5)计算直方图映射表 $G[i]$, $G[i]=int(255S[i]+0.5)$, $S[i]$ 中 i 的范围为 $[N_{min}, N_{max}]$ 连续, $G[i]$ 中

i 范围为 $[0, 255]$, 这样就将原始 14 bit 灰度级映射到范围为 $[0, 255]$ 的新灰度级。

6)查表进行灰度映射, 原始图像数据为 y_{ij} , 映射后图像数据为 $G[y_{ij}]$ 。

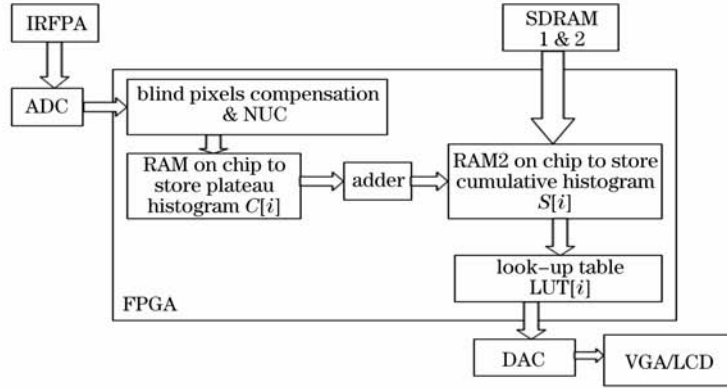


图 3 平台直方图的 FPGA 硬件结构图

Fig. 3 PE hardware structure diagram on FPGA

5 实验结果及分析

针对 Sofradir 公司的 320×240 的非制冷红外焦平面, 当帧频为 60 Hz, 系统时钟为 50 MHz 时系统工作稳定, 对快速运动的目标, 图像无拖尾抖动现象。非均匀性校正效果如图 4 所示, 通过比较图 4(b)和图 4(c)可以看出 ATPC 算法能获得更好的图像效果。对 ATPC, 由于快门在整个 IRFPA 上的输入没

有明显的边缘区域, 不存在边缘问题引起的校正系数的错误更新问题^[11]; 同时参数的更新以当前的两点系数为初始值, 迭代运算量较 NN-NUC 大幅度降低; IRFPA 响应随时间的漂移是缓慢的, 并非每次开机都需要更新, 当发现图像质量下降时, 花几十秒甚至几分钟时间更新两点校正参数来克服 IRFPA 响应特性的时间漂移影响是值得的, 故 ATPC 算法



图 4 非均匀性校正算法效果比较。(a) 原始图像; (b) 两点校正; (c) 自适应两点(ATPC)校正

Fig. 4 Comparison diagrams between two different un-uniform correction algorithms. (a) original image; (b) two point corrected image; (c) adaptive two point corrected image

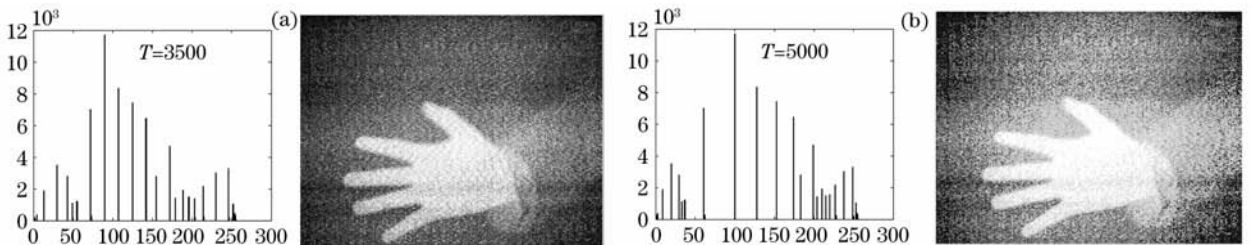


图 5 平台直方图效果比较

Fig. 5 Comparison diagrams of PE with different P value

具有较好的实用价值。平台值的选取是平台直方图均衡算法的关键,如图 5 所示。显然,图 5(a)的视觉效果要明显优于图 5(b),另外二者的直方图也可以看出前者灰度分布较为均匀,而对于后者,背景相对于目标占有了更多的灰度级,因此在系统中把平台值设置为操作参数是较好的选择。

参 考 文 献

- 1 M. Schulz, L. Caldwell. Non-uniformity correction and correctability of infrared plane arrays[J]. *Infrared Physics & Technology*, 1995, **36**: 763~777
- 2 Liu Zhicai, Li Guangzhi. A review on image process technique of thermal imager[J]. *Infrared Technology*, 2000, **2**(6): 27~32
刘志才,李广志. 红外热像仪图像处理综述[J]. *红外技术*, 2000, **2**(6): 27~32
- 3 J. A. Stark. Adaptive image contrast enhancement using generalizations of histogram equalization [J]. *IEEE Trans. Image Process*, 2000, **9**(5): 889~896
- 4 E. Vickers. Plateau equalization algorithm for real-time display of high-quality infrared imagery[J]. *Opt. Eng.*, 1996, **35**(7): 1921~1926
- 5 Bai Junqi, Chen Qian. Algorithm for infrared image noise filtering based on anisotropic diffusion[J]. *Acta Optica Sinica*, 2008, **28**(5): 866~869
- 白俊奇,陈 钱. 基于各向异性扩散的红外图像噪声滤波算法[J]. *光学学报*, 2008, **28**(5): 866~869
- 6 Guan Zhiqiang, Chen Qian, Qian Weixian *et al.*. An adaptive background adjusting algorithm for dim target detection[J]. *Acta Optica Sinica*, 2007, **27**(12): 2163~2168
- 管志强,陈 钱,钱惟贤 等. 一种背景自适应调整的弱点目标探测器[J]. *光学学报*, 2007, **27**(12): 2163~2168
- 7 Qin Hanlin, Zhou Huixin, Liu Shangqian. Nonuniformity-correction algorithm for infrared focal plane arrays based on wavelet transform[J]. *Acta Optica Sinica*, 2007, **27**(9): 1617~1620
- 秦翰林,周慧鑫,刘上乾. 小波变换的红外焦平面阵列非均匀性校正算法[J]. *光学学报*, 2007, **27**(9): 1617~1620
- 8 D. A. Scribner, K. A. Sarkady, M. R. Krueer *et al.*. Adaptive retina-like preprocessing for image detector arrays[C]. *IEEE Neural Networks*, 1993. 1955~1960
- 9 Gu Dongsheng, Yang Nansheng, Pi Defu *et al.*. A DSP+FPGA based real-time histogram equalization system of infrared image [C]. *SPIE*, 2001, **4602**: 277~786
- 10 L. P. David, L. D. Eustace. Linear theory of non-uniformity correction in infrared staring sensors[J]. *Opt. Eng.*, 1993, **32**(8): 1854~1859
- 11 Zhang Tianxu, Shi Yan. Eliminating “ghosting” artifact and target fade-out in adaptive non-uniformity correction for IRFPA [J]. *J. Infrared Millim Waves*, 2005, **24**(5): 335~340
- 张天序,石 岩. 红外焦平面阵列非均匀性自适应校正算法中目标退化与伪像的消除方法[J]. *红外与毫米波学报*, 2005, **24**(5): 335~340