

低功耗非制冷红外图像处理专用 SoC 芯片

郭广浩^{1,2}, 吴南健^{1,2*}, 刘力源^{1,2}

(1. 中国科学院半导体研究所 超晶格实验室, 北京 100083;

2. 中国科学院大学 材料科学与光电技术学院, 北京 100049)

摘要: 非制冷红外成像技术具有非常广泛的应用前景。但是, 目前非制冷红外成像芯片存在非均匀校正、图像细节增强和条纹噪声等亟待解决的问题。论文提出并设计一种面向非制冷红外成像的图像处理专用 SoC 芯片, 芯片集成了一个 CPU、两个 DSP 处理器和一个红外图像处理专用加速器, 单芯片可实现非制冷低功耗红外图像的非均匀校正、图像滤波、直方图均衡、数字图像细节增强、条纹消除和目标检测跟踪等实时图像处理。同时, 研究开发了面向芯片应用的非制冷低功耗红外图像处理算法。采用 65-nm CMOS 工艺实现了非制冷红外图像专用处理 SoC 芯片, 实现了基于非制冷红外成像芯片和图像处理 SoC 芯片的小型低功耗非制冷红外成像系统。测试结果表明成像系统可以实现清晰的非制冷红外成像、目标检测及目标跟踪等功能, 系统功耗小于 2 W, 体积相比传统的系统减小了 50%, 满足对体积、功耗、性能要求比较高的系统的应用需求, 具有较高的工程应用价值和前景。

关键词: 红外图像处理; SoC 芯片; 非制冷红外探测系统; 低功耗

中图分类号: TN492、TN47、TP391.4

文献标识码: A

Low power application specific SoC chip for uncooled infrared image processing

GUO Guang-Hao^{1,2}, WU Nan-Jian^{1,2*}, LIU Li-Yuan^{1,2}

(1. State Key Laboratory for Superlattices and Microstructures, Institute of Semiconductors, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100083, China;

2. College of Materials Sciences and Opto-Electronic Technology, University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China)

Abstract: Uncooled infrared imaging technology has a very broad application prospect. However, there are some urgent problems to be solved, such as non-uniformity correction, image detail enhancement and stripe noise. This paper proposes and designs a special SoC chip for image processing for uncooled infrared imaging. The chip integrates a CPU, two DSP processors and a special accelerator for infrared image processing. A single chip can realize real-time image processing such as non-uniformity correction, image filtering, histogram equalization, digital image detail enhancement, stripe elimination and target detection and tracking. At the same time, research and development of uncooled low-power infrared image processing algorithms for chip applications. The 65-nm CMOS process is used to realize the special processing SoC chip for uncooled infrared images, and a small and low-power uncooled infrared imaging system based on the uncooled infrared imaging chip and the image processing SoC chip is realized. The test results show that the imaging system can realize functions such as clear uncooled infrared imaging, target detection and target tracking. The power consumption of the system is less than 2 W, and the volume is reduced by 50% compared with the traditional system. It meets the application requirements of systems with high requirements for volume, power consumption and performance, and has high engineering application value and prospect.

Key words: infrared image processing, SoC chip, uncooled infrared detection system, low-power

收稿日期: 2022-04-09, 修回日期: 2022-06-06

Received date: 2022-04-09, revised date: 2022-06-06

基金项目: 国家重点研发计划(2019YFB2204303); 国家自然科学基金(U20A20205)

Foundation items: National Key R&D Program of China (2019YFB2204303), National Natural Science Foundation of China (U20A20205)

作者简介 (Biography): 郭广浩 (1986—), 男, 河南漯河人, 博士研究生, 主要从事红外微系统, 智能视觉 SoC 芯片研究. E-mail: guo Guang-hao17@semi.ac.cn

* 通讯作者 (Corresponding author): Email: nanjian@red.semi.ac.cn

引言

非制冷探测技术具有体积小、功耗和成本低等特点,得到了极大的推广^[1-4],特别是车载、监控和个人视觉系统(如狩猎、户外运动、电玩)等电子装备,以及对于像手持设备,无人机等需要电池或燃料供电的系统来说,小型化低功耗更是亟需解决的问题。

非制冷红外成像器件的晶圆级封装及低成本封装工程化应用^[5-7]为红外探测系统向着小型化、低功耗、低成本的发展提供了技术基础,但目前红外图像处理大多是基于FPGA或DSP等通用处理器件,限制了红外图像处理系统的小型化和低功耗。例如中国科学院大学魏新宇等人^[8]研制的一种基于FPGA加上位计算机进行图像处理的非制冷型长波红外成像系统;长春理工大学的田永等人^[9]研制了基于FPGA芯片图像处理的非制冷型红外成像系统;光电系统信息控制技术国家级重点实验室的徐世伟等人^[10]实现了基于FPGA加双DSP的红外图像处理系统;北京工业大学的胡国琦等人^[11]研制了基于C6657-DSP的非制冷型长波红外成像系统。以上非制冷红外成像系统均面临红外图像处理系统体积大、功耗高,开发难度大,周期长等缺点,且无法实时处理大图幅、高帧率的红外图像数据。

科研人员已经关注到使用FPGA或DSP等通用器件给系统所带来的问题,并开展了相关图像处理芯片的研究,例如汪健等人^[12]设计的红外探测器集成图像信号处理ASIC芯片;陶俊伟等人^[13]提出的红外图像处理ASIC芯片RS001等,但缺乏灵活性和通用性。另外,科研人员开展了红外图像处理SoC芯片的相关研究,例如华中科技大学的梁巢兵等人^[14]研究的基于32位RISC CPU核和Wishbone片上总线架构的红外图像处理SoC芯片,但该芯片主要面向于中低层图像处理,且通用处理能力不强。

本文提出并设计一种面向非制冷红外成像的图像处理专用SoC芯片,芯片包括一个CPU、两个DSP处理器和一个红外图像处理专用加速器,单芯片可实现非制冷低功耗红外图像的非均匀校正、图像滤波、直方图均衡、数字图像增强、条纹消除和目标检测跟踪等实时图像处理功能;设计面向SoC芯片应用的红外图像处理算法。采用65-nm CMOS工艺研制了非制冷红外图像专用处理SoC芯片,实现了小型化和低功耗的非制冷红外成像系统,系统可以实现清晰的非制冷红外成像、目标检测及目标跟

踪等功能。

1 非制冷红外图像处理 SoC 芯片设计

1.1 SoC 芯片架构

图1是非制冷红外图像处理SoC芯片的系统架构,它包括一个CPU、两个DSP处理器、图像处理加速器、片上SRAM及各种通用接口,各个功能模块通过总线结构相互连接。CPU作为主控设备,完成芯片的工作控制,图像处理加速器完成图像校正和增强处理,DSP0和DSP1进行高层级的图像处理,其它处理模块作为辅助运算系统,完成运算处理。

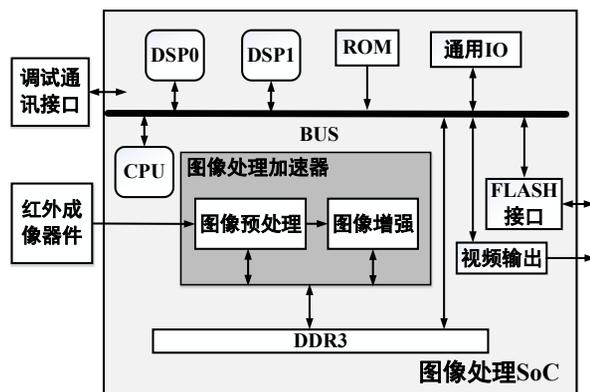


图1 图像处理SoC芯片系统架构

Fig. 1 Architecture of infrared image processing SOC chip system

图像加速器主要包括图像预处理和图像增强两个模块。主要完成非均匀校正、条纹消除、图像细节增强、图像滤波四大功能。芯片含PAL、Camera-link 视频接口、32bit@1600M数据率DDR接口和各种通用数据通信接口。

1.2 图像处理加速器设计

红外图像实时处理的数据量大,以1 024×768规模的红外焦平面阵列为例,如果每个像元信号精度是12 bit,图像60帧/秒,则传输的数据量高达67.5 MB/s,对图像处理SoC芯片的运算能力提出了很高的要求。红外图像处理加速器通过硬件并行处理的方式提高处理速度,主要包括如下图像预处理和图像增强两个模块,辅助DSP实现各种不同的图像处理算法,包括对图像进行预处理、图像增强、温度探测、图像识别、目标跟踪测量等等。

1.2.1 图像预处理模块

图2给出了图像预处理模块的内部结构,包括两个图像校正模块、两个滤波模块、数据控制器和存储器,图像预处理模块主要完成非均匀校正

(NUC)中的定标校正、基于场景的校正和图像滤波等实时性较强且运算较简单的图像处理任务,支持16bit像素数据精度,像素处理运算采用流水线方式进行。运算过程中DSP和CPU配合图像预处理模块进行处理,并进行流程控制和数据软处理。DDR存储器为运算提供校正和滤波系数并存储图像数据。

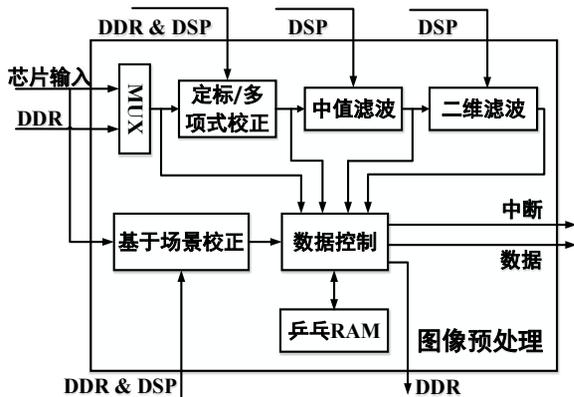


图2 图像预处理模块结构图

Fig. 2 Structure of image preprocessing module

红外成像系统产生非均匀性噪声是其主要缺陷,其性能受阵列中成像器件单元的空间非均匀性的影响很大,这种非均匀性使获取的图像畸变,模糊不清,无法成像。非均匀校正算法的任务就是补偿空间非均匀性、更新补偿算法来解决成像器件响应的时变。

红外图像的非均匀校正通常采用基于定标的非均匀校正^[15-16]和基于场景的非均匀校正^[17]。定标校正中的二点校正是利用焦平面各阵列元在温度不同的两个均匀辐射的黑体(高温TH和低温TL)下的响应输出计算出增益校正系数 G_{ij} 和偏置校正系数 O_{ij} ,从而实现非均匀性校正两点校正硬件实现简单,但成像过程中由于成像器件响应的非线性误差较大。一般在工程应用中采用最小二乘法进行曲线拟合,可得出多项式的系数^[18]。该方法误差小,比较适合软硬件实现。本研究使用基于二点校正法和多项式拟合的三阶多项式进行软硬件设计。

基于场景的非均匀校正技术是利用每帧图像中的场景信息来进行校正的,无需大量的辅助器件(如黑体光学设备等),可以实时产生和更新校正系数,能够解决非均匀性的时间漂移问题,与定标校正形成了很好的互补。基于场景的非均匀校正方法主要包括神经网络法^[19-22]、恒定统计法^[23-24]、时域

高通滤波法^[25]、代数法^[26]、小波分析^[27]和卡尔曼滤波^[28]等。本文主要对神经网络法、恒定统计法及高通滤波法进行了设计实现,非均匀校正硬件实现的算法流程如图3所示,算法由盲元检测和补偿,两点/多项式校正,恒定统计、基于神经网络的非均匀校正,时域高通滤波等组成。

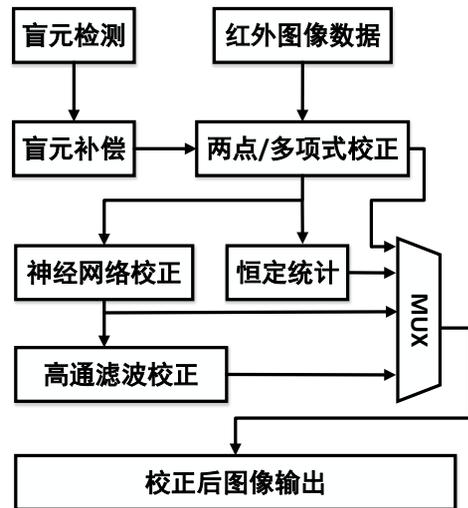


图3 非均匀校正算法流程图

Fig. 3 Flow chart of nonuniformity correction algorithm

算法步骤如下:

①盲元检测,通过预置校正系数进行盲元检测和像素修正。根据前面获取的盲元位置信息,对输入原始图像进行盲元补偿,得到经过第一次盲元补偿的图像 $\hat{x}_{i,j}(n)$,并采用该盲元补偿后的图像计算期望值,期望值的计算公式由下式(1)给出:

$$f_{ij}(n) = [\hat{x}_{i-1,j}(n) + \hat{x}_{i,j-1}(n) + \hat{x}_{i,j+1}(n) + \hat{x}_{i+1,j}(n)]. \quad (1)$$

②采用定标校正法获得红外成像系统工作温度区间内的校正系数,即采用两点或多项式校正系数作为神经网络法非均匀校正的系数更新迭代初始值,其好处是可以加快收敛速度,对校正温度区间内的输入图像使用如下式(2)两点校正公式:

$$X_{i,j}(n) = G_{ij}^s(n)x_{i,j}(n) + O_{ij}^s(n), \quad (2)$$

式(2)中, $X_{i,j}(n)$ 为校正后输出的图像, $G_{ij}^s(n)$ 和 $O_{ij}^s(n)$ 分别表示在 $[T_{s-1}, T_s]$ 温度区间内的增益校正系数和偏置校正系数,同时支持三阶多项式校正,使用如下式(3)三阶多项式公式:

$$Y_{ij} = A_{ij}x_{ij}^3 + B_{ij}x_{ij}^2 + C_{ij}x_{ij} + D_{ij}, \quad (3)$$

式(3)中,A,B,C,D分别为采用最小二乘法进行曲线拟合的多项式系数。

③神经网络系数更新,采用最陡下降法如

下式:

$$\begin{aligned} G_{i,j}^s(n+1) &= G_{i,j}^s(n) - 2\mu X_{i,j}(n)[Y_{i,j}(n) - \\ f_{i,j}(n)]; O_{i,j}^s(n+1) &= O_{i,j}^s(n) - 2\mu[Y_{i,j}(n) - f_{i,j}(n)], \end{aligned} \quad (4)$$

式(4)中: μ 的值根据下式(5)计算所得, $\mu_{i,j}(n)$ 为第n帧(i,j)位置对应的迭代步长; μ_0 为迭代步长的最大值; $\sigma_{i,j}^2(n)$ 为第n帧(i,j)位置3×3邻域内的方差; λ 为方差影响系数,盲元所在位置的系数不进行更新。

$$\mu_{i,j}(n) = \mu_0 / (1 + \lambda \sigma_{i,j}^2(n)) \quad (5)$$

④计算低通滤波器输出,计算公式为:

$$f_{i,j}^L(n) = \frac{1}{m} X_{i,j}(n) + (1 - \frac{1}{m}) X_{i,j}(n-1). \quad (6)$$

⑤执行时域高通非均匀校正,校正公式为:

$$Y_{i,j}(n) = X_{i,j}(n) - f_{i,j}^L(n) - O_{i,j}(n) \quad (7)$$

将时域高通校正后的图像作为最终的输出图像。

1.2.2 图像增强处理模块

图像增强模块主要负责对预处理后的图像进行数字细节增强,主要功能包括滤波模块(低通滤波、均值滤波、高斯滤波、双边滤波等)、非线性变换、图像分层、线性变换及存储,其内部结构如图4所示。图像增强模块完成的以下主要功能:

- 滤波模块,滤波模块主要包括低通滤波、均值滤波、高斯滤波、双边滤波等功能,滤波器最大支持9×9掩模,掩模可配。

- 图像分层,最大设定5层分层,可根据均值方差进行数据分层。

- 非线性变换,支持傅里叶变换、指数变换、对数变换、三角函数变换等。

- 线性变换及求和,采用可配置方式对分层数据进行数值求和、数据格式化。

由于红外传感器本身的特性,红外图像相比可见光成像在信噪比、对比度和成像细节上均较差,不经处理的红外图像很难被识别,提高目标图像与背景之间的对比度是改善红外成像系统的有效手段。特别是在城市安防、无人机搜救等领域对于图像的显示效果要求较高,因此需要对图像进行增强显示。为了提高红外成像系统的成像质量,必须在图像的预处理阶段对噪声进行滤除,同时对图像中的目标特性加以增强,目前的红外图像增强的算法有很多种,大多都是基于空间域和频率变换域的,提取空间域和频率变换域所需的主要算子进行硬件实现,可以扩展SoC芯片图像增强算法的能力。

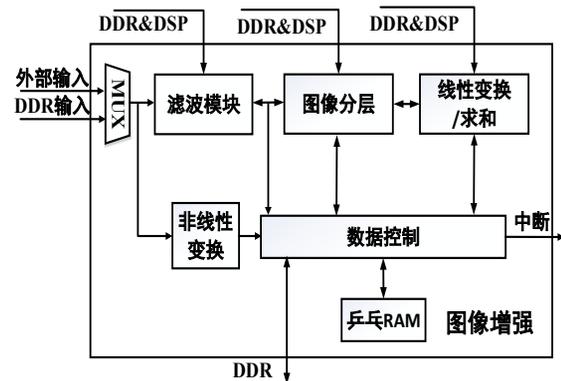


图4 图像增强模块结构图

Fig. 4 Structure of image enhancement module

目前该款芯片支持DDE、直方图均衡、双边边缘滤波、Retinex算法、线性反锐化掩膜增强及变换域图像增强等算法,各个图像增强算法的具体实现流程这里不再赘述。

2 软硬件协同设计及验证

芯片功能设计的正确与否需要软硬件协同设计和仿真进行验证,本文选取条纹消除、基于场景的校正、图像增强等三个算法进行介绍。通过主观和量化的客观指标进行评价,主管评价主要是基于人眼的视觉效果,这里不再赘述。目前有很多种量化的客观评价标准用于红外图像非均匀校正和图像增强的评估,但是还没有一个统一的评价标准,我们选取应用广泛的峰值信噪比(PSNR)^[29]、均方根误差(RMSE)和粗糙度(ρ)^[30]对条纹消除和基于场景的校正进行量化评估,选取信息熵(IE)^[31]、平均梯度(AVG)^[32]和峰值信噪比(PSNR)对图像增强进行量化评估。下述所有算法均已完成硬件设计实现,并可由软件根据实际需要动态配置进行算法选择。

2.1 条纹消除算法验证

红外图像非均匀性中有一类跟焦平面结构相关的条纹非均匀性噪声,简称条纹噪声。条纹噪声是焦平面阵列成像过程中,由于传感器的响应不均匀造成的原始数据在一定方向上出现的灰度值连续偏高或偏低的现象,其非均匀性同样存在时间漂移特性。本文主要针对直方图统计方法^[33]做了局部优化的区域均值的行偏置校正、傅里叶变换滤波法^[34]中的频域二维中值滤波、LMS(Least Mean Square)的自适应滤波^[35]进行仿真验证,条纹消除三种算法的仿真验证效果图如图5所示,我们在行偏

置校正法中用行均值代替行直方图统计,提高了运算速度和准确度。

图5中可以看出三种算法均能有效的进行条纹噪声消除,且边缘细节保留较好。区域均值的行偏置校正算法硬件开销小,处理速度快,但由于需要根据场景微调窗口尺寸,在场景适应性方面稍差;频域二维中值滤波算法硬件开销大、处理速度稍慢,但对不同场景下的参数不敏感,场景适应性好;基于LMS的自适应滤波算法硬件开销最大,由于需要反馈环进行参数调整,处理速度较慢,但场景适应性最好。芯片支持这三种校正算法,可根据应用场景进行切换。

量化评估指标如下表1,其中PSNR指标越大表示处理效果越好, RMSE和 ρ 指标越小表示处理效果越好。

通过对表1列出的量化指标对比,发现频域二维中值滤波算法处理后的图像峰值信噪比最大,均方根误差和粗糙度最小,说明算法的效果最好。经过三种条纹消除算法校正后的图像在粗糙度上都比原图小,说明处理后的效果比原图好。

2.2 基于场景的校正算法验证

针对基于场景校正算法中的神经网络算法、高通滤波算法和恒定统计平均算法进行仿真验证,三

表1 图5中各条纹消除算法量化评估指标对比

Table 1 Comparison of quantitative evaluation indicators for each fringe elimination algorithm in Figure 5

评价指标	原始图像	区域均值的行偏置	频域二维中值滤波	LMS的自适应滤波
峰值信噪比(PSNR)	--	19.8514	28.2901	25.2866
均方根误差(RMSE)	0	25.9399	9.8183	13.8743
粗糙度(ρ)	0.1129	0.0816	0.0812	0.101

种算法的仿真验证效果图如图6所示。

图6中可以看出三种算法均能有效的进行红外图像校正,物体轮廓能够清晰显现。基于神经网络算法硬件开销最大,处理速度较慢,但成像效果最好,且对探测器参数的线性 and 稳定性要求不高。高通滤波算法硬件开销较大,处理速度稍慢,会滤除直流信号和大部分低频信号,比较适合移动场景;恒定统计平均算法硬件开销小,处理速度快,但图像的边缘处理效果较差;

量化评估指标如下表2,其中PSNR指标越大表示处理效果越好, RMSE和 ρ 指标越小表示处理效果越好。

通过对表2列出的量化指标对比,发现神经网络法处理后的图像峰值信噪比最大,均方根误差

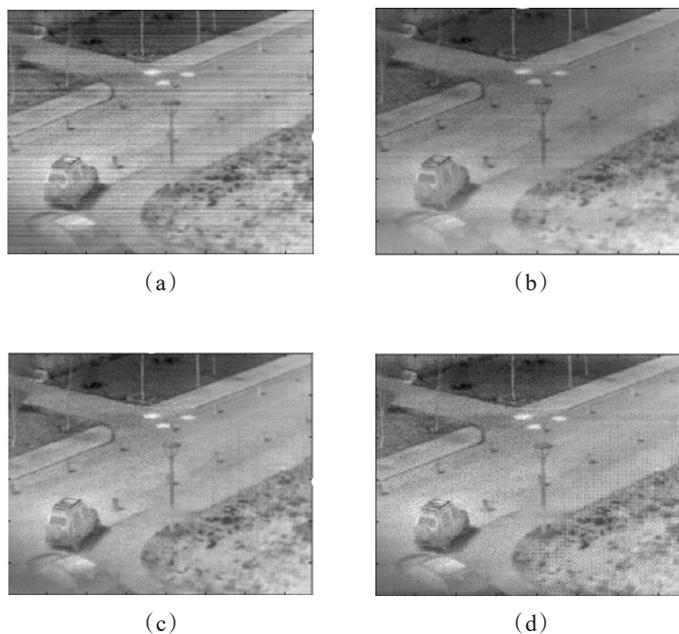


图5 条纹消除仿真验证效果图, (a)含有条纹噪声原图, (b)区域均值的行偏置校正仿真验证效果图, (c)频域二维中值滤波仿真验证效果图, (d) LMS的自适应滤波仿真验证效果图

Fig. 5 Verification of stripe elimination, (a) original image with stripe noise, (b) verification of line offset correction of regional mean, (c) verification of frequency domain 2D median filtering, (d) verification of adaptive filtering of LMS

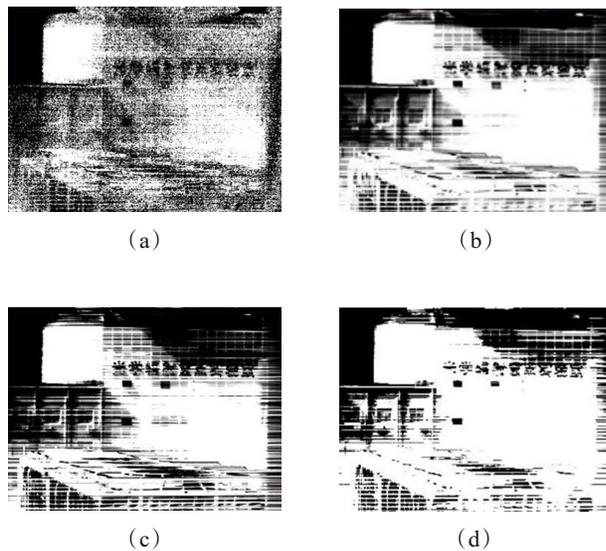


图6 基于场景的非均匀校正仿真验证效果图, (a)校正前原图, (b)神经网络法仿真验证效果图, (c)高通滤波校正仿真验证效果图, (d)恒定统计平均法校正仿真验证效果图,
Fig.6 Verification of scene-based nonuniformity correction , (a) original diagram before correction, (b) verification of neural network method, (c) verification of high pass filter correction, (d) Verification of constant statistical average correction

表2 图6中各基于场景校正算法量化评估指标对比
Table 2 Comparison of quantitative evaluation indicators for each scene based correction algorithms in Figure 6

评价指标	原始图像	神经网络法	高通滤波法	恒定统计平均
峰值信噪比(PSNR)	--	10.1109	10.0785	8.8498
均方根误差(RMSE)	0	79.6153	79.9128	92.0554
粗糙度(ρ)	0.5049	0.1853	0.3672	0.2242

和粗糙度最小,说明该算法的效果最好。同时经过

三种场景校正后的图像在粗糙度上都比原图小,说明处理后的效果均比原图好。

2.3 图像增强算法验证

为了提高红外成像系统的成像质量,必须在图像的预处理阶段对噪声进行滤除,同时对图像中的目标特性加以增强,目前的红外图像增强的算法有很多种,大多都是基于空间域和频率变换域的,本文主要针对基于空间分层细节增强的Retinex算法、全局直方图均衡和变换域增强-对数变换算法等三种算法进行软硬件仿真验证,三种算法仿真验证效果图如图7所示。

图7中可以看出三种算法均能对原图进行相关图像增强,但效果有所差异。Retinex算法较为复杂,硬件开销大,处理速度较慢,但对不同场景适应性强;全局直方图均衡化算法硬件开销较小,处理速度较快,但增加图像全局对比度和亮度的同时也会增加背景噪声的对比度;变换域增强算法硬件开销小,处理速度快,可以利用变换函数的特有性质进行图像灰度值的调节,能够较好的增强图像的暗部细节。

量化评估指标如下表3,IE、AVG、PSNR这三项指标均是越大表示处理效果越好。

通过对表3列出的量化指标对比,发现全局直方图均衡处理后的图像信息熵和平均梯度最大,说明图像细节信息更丰富,清晰度更高。但峰值信噪比最低,说明全局直方图均衡化算法在提高有效信号功率的同时也提高了噪声功率。经过三种图像增强算法处理后的图像在信息熵和平均梯度上都比原图大,说明处理后的效果比原图好。

3 芯片实现与系统验证

采用65-nm CMOS工艺实现了非制冷红外成像

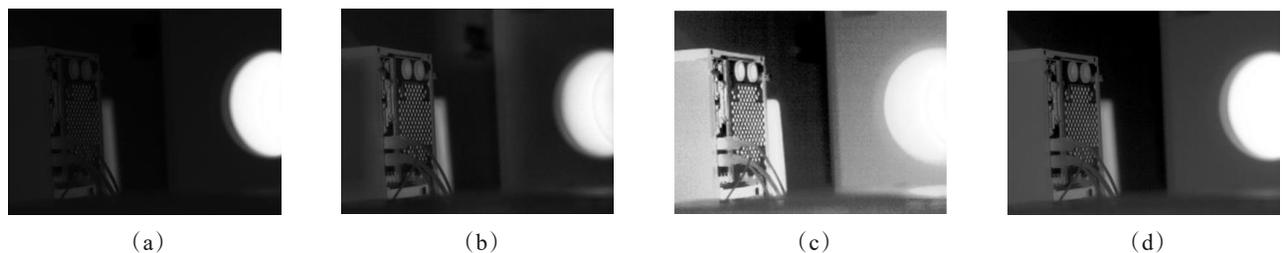


图7 图像增强仿真验证效果图, (a)原图, (b)Retinex算法仿真验证效果图, (c)全局直方图均衡仿真验证效果图, (d)变换域增强-对数变换仿真验证效果图

Fig.7 Verification of image enhancement, (a) original diagram, (b)verification of Retinex algorithm, (c)verification of global histogram equalization, (d)verification of transform domain enhancement -logarithmic transform

表3 图7中各图像增强算法量化评估指标对比

Table 3 Comparison of quantitative evaluation indicators for Image enhancement algorithm in Figure 7

评价指标		原始图像	Retinex算法	全局直方图均衡	变换域增强-对数变换
信息熵(IE)	5.201 4	6.285 9	7.821 7	7.821 7	6.384 1
平均梯度(AVG)	3.235 7	4.516 4	6.521 4	6.521 4	4.431 2
峰值信噪比(PSNR)	--	21.765 4	7.477 4	7.477 4	16.754 6

的图像处理专用SoC芯片,图8为SoC芯片的版图设计版图和芯片裸片照片。芯片尺寸6 mm×6 mm,功耗1.2 W,表4给出了图像处理专用SoC芯片的关键技术指标。

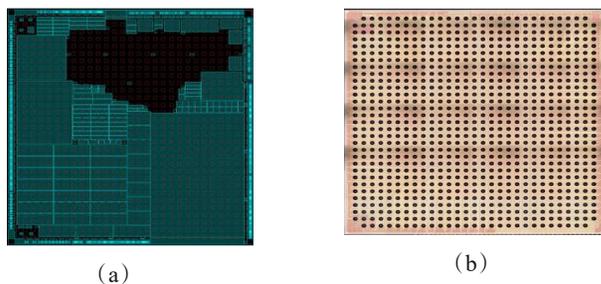


图8 红外图像处理SoC芯片,(a) SoC芯片版图,(b)SoC裸片
Fig.8 Infrared image processing SoC chip, (a)SoC chip layout,(b)SoC die

将海康微影公司晶圆级封装的非制冷红外成像器件与图像处理专用SoC芯片进行了系统集成,实现了小型化和低功耗的非制冷红外成像系统。图9为1280x1024非制冷红外成像器件及1024x768非制冷红外成像器件的照片,主要指标见表5。

非制冷红外成像系统相比传统红外探测系统尺寸可减小50%以上,功耗可以控制在2 W左右,

表4 红外图像处理SoC芯片设计指标

Table 4 Design index of infrared image processing SOC chip

标类型	设计值
芯片物理参数	尺寸6 mm×6 mm;小于1.2 W;设计工艺65 nm。
处理器参数	2核DSP,400 MHz, DSP核单周期完成64次16 bit MAC;单核CPU,200 MHz片上存储1.5 MB。
功能	图像处理加速器参数
工作频率	非均匀校正、图像滤波、条纹消除、图像增强。 250 MHz。
通用接口	接口参数 2个SPI;2个UART;32个GPIO;1个I2C;2个CAN 总线接口。
Ethernet接口	支持百兆和千兆网口。
图像输出接口	Cameralink :1个,60 fps,1 280×1 024,LVDS输出;PAL:1个,标准输出。
DDR	DDR3,工作频率400 MHz,32位,支持1 GB DDR容量。
AD接口	8通道,16 bit,支持并行及LVDS格式。

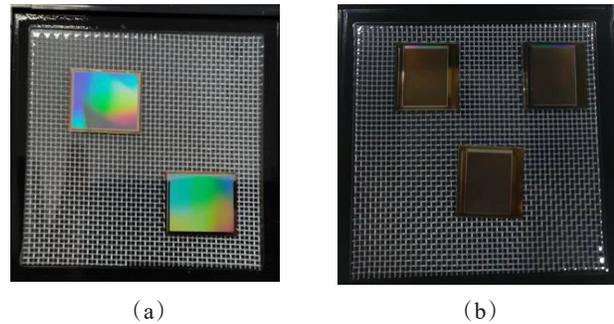


图9 非制冷红外成像器件 (a)1 280×1 024非制冷红外成像器件,(b)1 024×768非制冷红外成像器件

Fig.9 Infrared imaging device (a) 1 280×1 024 uncooled infrared imaging device, (b) 1 024×768 uncooled infrared imaging device

远小于通用器件实现的红外探测系统动辄十几瓦的功耗。图10给出了本论文的小型化低功耗红外探测微系统机芯、原理样机及成像效果图。

红外探测微系统可实现非均匀校正、温度检测、图像增强、目标检测和目标跟踪等功能。图11为1280x1024成像微系统原理样机非均匀校正测试效果。图11(a)为成像器件未做非均匀校正的输出图像,基本无人像轮廓;图11(b)经过成像器件的非均匀校正后可以看出人像轮廓;图11(c)经过SoC芯

表5 非制冷红外成像器件指标规格

Table 5 Specifications of uncooled infrared imaging device

指标类型	具体指标
成像器件探测波段	7~14 μm
成像器件分辨率	1 280×1 024
成像器件像元尺寸	12 μm
成像帧率	30 fps
图像输出格式	LVDS格式输出
NETD	NETD<40 mK(@F/1.0, 25 Hz 300 K)
成像器件尺寸	20.9 mm×19.9 mm×1.3 mm
封装重量	<2 g
典型功耗	<450 mW @25 Hz, 300 K
工作温度	-40°C~+85°C
封装形式	WLCSP晶圆级封装

片进行非均匀校正后可以看出清晰的人像。图12显示为1280×1024成像微系统原理样机目标检测及目标跟踪效果图。使用高温烙铁作为目标源,目标

源移动时,图中十字星能够实时对其跟踪移动,初步验证了算法的有效性。

4 结论

本文设计了一款低功耗非制冷红外图像处理SoC芯片。芯片实现和系统验证结果表明,该SoC芯片既能够完成红外图像的非均匀校正、图像增强、条纹消除和目标检测跟踪的加速处理,芯片功耗小于1.2 W,面积为6mm x 6mm。红外图像处理SoC芯片与非制冷红外成像器件集成研制了低功耗非制冷红外成像系统,系统功耗小于2 W,体积相比传统的系统减小了50%,满足对体积、功耗、性能要求比较高的系统的应用需求。

Reference

- [1] YU Li-Jing, TANG Li-Bin, YANG Wen-Yun, *et al.* Research progress of uncooled infrared detectors [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2021, **50**(1): 71-85.(余黎静,唐利斌,杨文运,等.非制冷红外探测器研究进展.红外与

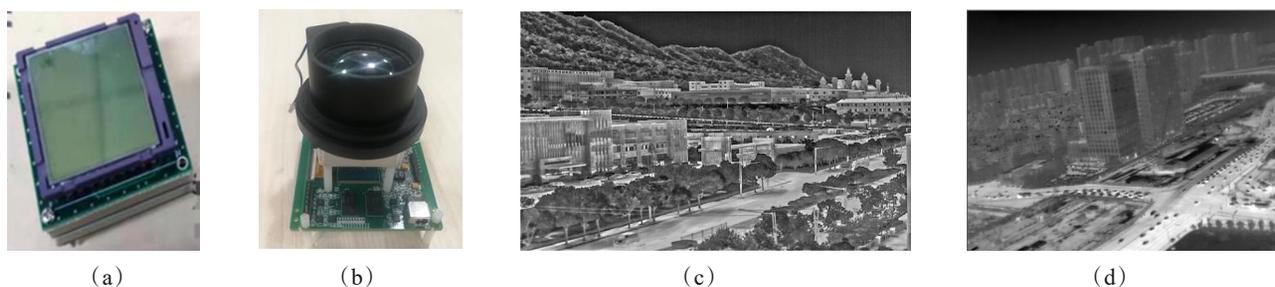


图10 小型化低功耗红外探测微系统机芯、原理样机及成像。(a)1 024×768成像机芯,(b)1 280×1 024红外探测系统原理样机,(c)1 024×768成像图,(d)1 280×1 024成像图

Fig. 10 Miniaturized low power infrared detection microsystem movement, principle prototype and imaging, (a) 1 024×768 imaging movement, (b) 1 280×1 024 infrared detection system principle prototype, (c) imaging of 1 024×768, (d) imaging of 1 280×1 024

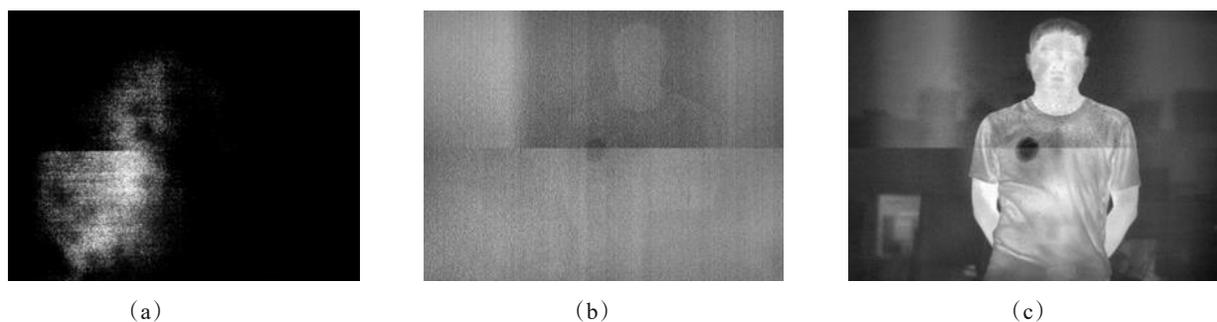


图11 1 280×1 024成像微系统原理样机非均匀校正测试效果,(a)读出电路无NUC、SoC芯片无NUC,(b)读出电路片内NUC、SoC芯片无NUC,(c)读出电路片内NUC+SoC芯片NUC

Fig. 11 Nonuniformity correction test effect of 1 280×1 024 imaging microsystem principle prototype, (a) no NUC in readout circuit, no NUC in SoC chip, (b) NUC in readout circuit chip, no NUC in SoC chip, (c) NUC in readout circuit chip + NUC in SoC chip



图 12 1 280×1 024 成像微系统原理样机目标检测及目标跟踪效果图

Fig. 12 Diagram of target detection and target tracking of 1 280×1 024 imaging microsystem principle prototype

- 激光工程)), 2021, **50**(1): 71-85.
- [2] Lei S Y. Uncooled infrared focal plane array imaging in China[C]. Proc of SPIE, 2015, **9451**: 945119.1-945119.8
- [3] Balcerak R S. Uncooled infrared sensors: rapid growth and future perspective[C]. Proc of SPIE, 2000, **4028**: 36-39.
- [4] LI Jing, SONG Guang, DONG Shan, *et al.* Research Progress and Trend of Uncooled Infrared Focal Plane Detectors [J]. *Infrared*, 2020, **41**(10): 1-14+24. (李静, 宋广, 董珊, 等. 非制冷红外焦平面探测器研究进展与趋势. *红外*), 2020, **41**(10): 1-14+24.
- [5] Becker S, Imperinetti P, Yon J J, *et al.* Latest Pixel Size Reduction of Uncooled IRFPA at CEA, LETI[C]. Proc of SPIE, 2012, **8541**: 85410C.
- [6] Alicandro C J, Demarco R W. 1024 × 768 XGA Uncooled Camera Core Achieves New Levels of Performance in a Small Package[C]. Proc of SPIE, 2011, **8012**: 80121H.
- [7] FENG Tao, JIN Wei-Qi, SI Jun-Jie. Uncooled infrared focal plane detector and its technology development trends [J]. *Infrared Technology*, 2015, **37**(3): 177-184. (冯涛, 金伟其, 司俊杰. 非制冷红外焦平面探测器及其技术发展动态. *红外技术*) 2015, **37**(3): 177-184.
- [8] WEI Xin-Yu. The Driver and Information Acquisition and Processing Technology of Uncooled Long Wave Infrared Detector [D]. University of Chinese Academy of Sciences (Shanghai Institute of Technical Physics, Chinese Academy of Sciences), 2018. (魏新宇. 非制冷长波红外探测器驱动及信息获取与处理技术. 中国科学院大学, 中国科学院上海技术物理研究所) 2018.
- [9] TIAN Yong. Design of infrared imaging system based on uncooled detector [D]. Changchun University of Science and Technology, 2021. (田永. 基于非制冷型探测器的红外成像系统设计). 长春理工大学, 2021.
- [10] XU Shi-Wei, LIU Yan-Yan, WEI Dong, *et al.* Infrared Image Processing System and Display Technology Based on FPGA+Two DSPs [J]. *Electro-Optic Technology Application*, 2009, **24**(5), 57-61. (徐世伟, 刘严严, 魏东, 等. 基于FPGA+双DSP实现的红外图像处理系统与图像显示. *光电技术应用*) 2009, **24**(5), 57-61.
- [11] Hu Guo-Qi. The Hardware Design of Uncooled LWIR Imaging and Processing System Based on C6657 DSP [D]. Beijing University of Technology, 2015. (胡国琦. 基于C6657 DSP的非制冷长波红外成像及处理系统硬件设计. 北京工业大学) 2015.
- [12] WANG Jian, ZHANG Lei, ZENG Xin, *et al.* Design of Integrated Image Signal Processing Chip for Infrared Detector [J]. *Infrared Technology*, 2021, **43**(11): 1044-1048. (汪健, 张磊, 曾鑫, 等. 红外探测器集成图像信号处理芯片设计. *红外技术*) 2021, **43**(11): 1044-1048.
- [13] TAO Jun-Wei, WANG Hong-Chen, DONG Shan, *et al.* Application Analysis of Wafer-Level Packaged and large Format Uncooled Infrared Detector [J]. *Infrared*, 2020, **41**(1): 15-20. (陶俊伟, 王宏臣, 董珊, 等. 晶圆级封装非制冷大面阵红外探测器应用分析. *红外*) 2020, **41**(1): 15-20.
- [14] LIANG Chao-Bing. Research on SoC implementation of low level processing for object detection in infrared imaging guidance [D]. Huazhong University of Science & Technology, 2015. (梁巢兵. 红外成像制导目标检测低层处理的SoC实现技术研究. 华中科技大学) 2015.
- [15] QU Hui-Ming, CHEN Qian. Surrounding temperature compensation for infrared focal plane arrays non-uniformity correction [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2011, **40**(12): 2328-2332. (屈惠明, 陈钱. 环境温度补偿的红外焦平面阵列非均匀性校正. *红外与激光工程*) 2011, **40**(12): 2328-2332.
- [16] YIN Shi-Min, XIANG Li-Bin, ZHOU Jin-Song, *et al.* Research on Nonuniformity Correction of IRFPA Based on Radiation Source Scaling [J]. *Acta Photonica Sinica*, 2008, **37**(5): 992-995. (殷世民, 相里斌, 周锦松, 等. 辐射源定标红外焦平面阵列非均匀性校正算法研究. *光子学报*) 2008, **37**(5): 992-995.
- [17] Lü You, HE Xin, Wei Zhong-Hui. Research on Non-uniformity Correction Algorithms for IRFPA [J]. *Computer Technology And Development*, 2015, **25**(2): 7-11. (吕游, 何昕, 魏仲慧. 红外焦平面阵列非均匀性校正算法研究. *计算机技术与发展*) 2015, **25**(2): 7-11.
- [18] LI Yan-Xu, SUN De-Xin, LIU Yin-Nian. Polynomial Fitting Based on Nonuniformity Correction of Infrared Focal Plane Arrays [J]. *Laser & Infrared*, 2005, **35**(2): 40-43. (李言旭, 孙德新, 刘银年. 基于多项式拟合的红外焦平面非均匀性校正. *激光与红外*) 2005, **35**(2): 40-43.
- [19] Scribner D A, Sarkady K A, Krueer M R, *et al.* Adaptive nonuniformity correction for IR focal-plane arrays using neural networks [J]. *Proceedings of SPIE - The International Society for Optical Engineering*, 1991, **1541**: 100-109.
- [20] ZHANG Fei-Fei, WANG Wen-Long, MA Guo-Rui, *et al.* Neural Network Nonuniformity Correction Algorithm for Infrared Focal Plane Array Based on Non-local Means Filter [J]. *Infrared Technology*, 2015, **37**(4): 265-271. (张菲菲, 王文龙, 马国锐, 等. 基于非局部均值滤波与

- 神经网络的红外焦平面阵列非均匀性校正算法. *红外技术* 2015, **37**(4):265-271.
- [21] ZHAO Chun-Hui, LIU Zhen-Long. Improved infrared image neural network non-uniformity correction algorithm [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2013., **42**(4):1079-1083. (赵春晖,刘振龙.改进的红外图像神经网络非均匀性校正算法. *红外与激光工程*) 2013, **42**(4):1079-1083.
- [22] NIE Rui-Jie, LI Li-Juan, WANG Chao-Lin. Improved Adaptive IR Image Non-uniformity Correction Algorithm Based on Neural Network [J]. *Infrared*, 2015, **36**(9):10-14. (聂瑞杰,李丽娟,王朝林.基于神经网络的改进型红外图像自适应非均匀校正算法. *红外*) 2015, **36**(9):10-14.
- [23] Harris J G, Chiang Y M. Nonuniformity correction of infrared image sequences using the constant-statistics constraint [J]. *IEEE Trans. Image Processing* 1999, **8**(8):1148-1151
- [24] Hayat M M, Torres S N, Armstrong E E, et al. Statistical algorithm for nonuniformity correction in focal-plane arrays [J]. *Appl. Opt.* 1999, **38**(8):772-780
- [25] Scribner D A, Sarkady K A, Caulfield J T, et al. Nonuniformity correction for staring IR focal plane arrays using scene-based techniques [C]. *Infrared Detectors and Focal Plane Arrays SPIE*, 1990, **1308**:224-233
- [26] Ratliff B M, Hayat M M, Tyo J S. Generalized algebraic scene based nonuniformity correction algorithm [J]. *J. Opt. Soc. Am. A*, 2005, **22**(2):239-249
- [27] QIN Han-Lin, ZHOU Hui-Xin, LIU Shang-Qian. Non-uniformity 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. *光学学报*) 2007, **27**(9):1617-1620.
- [28] Pezoa J E, Hayat M M. Multimodel Kalman filtering for adaptive nonuniformity correction in infrared sensors [J]. *J. Opt. Soc. Am. A*, 2006, **23**(6):1282-1291
- [29] Gonzalez R. C., Woods R. E., and Eddins S. L. [2009]. *Digital Image Processing Using MATLAB*, ed. 2nd, Publishing Gatesmark, Knoxville, TN.
- [30] Majeed M. Hayat, Sergio N. Torres, Ernest Armstrong et al. Statistical algorithm for nonuniformity correction in focal-plane arrays [J]. *APPLIED OPTICS*, 1999, **38**(8):772-780
- [31] YU Tian-He. Research on Enhancement Technique of Infrared Image for Human Visual System [D]. Harbin Institute of Technology, 2009. (于天河.针对人眼视觉特性的红外图像增强技术研究.哈尔滨工业大学) 2009
- [32] SHI Gong-Peng. Research on Infrared Image Enhancement Algorithms [D]. Xidian University, 2019. (史公鹏.红外图像增强算法研究.西安电子科技大学) 2019.
- [33] Berthold K.P.Horn, Robert J.Woodham. Destriping Landsat MSS images by histogram modification [J]. *Computer Graphics and Image Processing*, 1979, **10**(1):69-83
- [34] CHANG Wei-Wei. Research on strip noise elimination method of hyperspectral image [D]. Northwestern Polytechnical University, 2007. (常威威.高光谱图像条带噪声消除方法研究.西北工业大学) 2007.
- [35] WANG Qing-Xiang. Strip Non-uniformity Correction in Infrared Focal Plane Array [D]. Huazhong University of Science & Technology, 2016 (王祥庆.红外图像条纹非均匀性校正算法研究.华中科技大学) 2016.