

文章编号: 1672-8785(2023)07-0015-06

红外焦平面图像实时处理的 FPGA 实现

厉天扬 陈兴杰

(上海工程技术大学城市轨道交通学院, 上海 201620)

摘 要: 为了消除非制冷红外焦平面阵列上红外成像结果的非均匀性与成像过程中产生的盲元, 提高了图像的对比度以及红外图像的实时处理能力。搭建了基于武汉高德红外公司生产的 120×90 红外焦平面探测器的电子学实验平台。利用现场可编程门阵列(Field-Programmable Gate Array, FPGA)的并行处理和流水化处理的能力, 在 FPGA 上实现了非均匀性校正中的两点校正、基于中值滤波的盲元补偿、直方图均衡化以及伪彩色变换。实验结果表明, 在 200 MHz 的输入时钟条件下, 这种红外图像实时处理模块处理一帧图像耗时 $60.4 \mu\text{s}$, 实时性强。该研究对于非制冷红外焦平面阵列应用优化具有一定的实际意义。

关键词: 现场可编程门阵列; 非制冷红外焦平面; 红外图像处理

中图分类号: TN219 **文献标志码:** A **DOI:** 10.3969/j.issn.1672-8785.2023.07.003

FPGA Implementation of Real-Time Processing of Infrared Focal Plane Images

LI Tian-yang, CHEN Xing-jie

(School of Urban Railway Transportation, Shanghai University of Engineering Science, Shanghai 201620, China)

Abstract: In order to eliminate the non-uniformity of infrared images on uncooled infrared focal plane array and the blind elements generated in the imaging process, the image contrast and the real-time processing ability of infrared images are improved. In this paper, an electronic experimental platform based on the 120×90 infrared focal plane detector produced by Wuhan Guide Infrared company is built. Using the parallel processing and pipeline operation capabilities of field-programmable gate array (FPGA), two-point correction in non-uniformity correction, blind element compensation based on median filter, histogram equalization and false color transformation are realized on FPGA. The experimental results show that under the condition of 200 MHz input clock, this infrared image real-time processing module takes $60.4 \mu\text{s}$ to process a frame of image, and has strong real-time performance. The research has practical significance for the application optimization of uncooled infrared focal plane arrays.

Key words: field-programmable gate array; uncooled infrared focal plane; infrared image processing

收稿日期: 2023-04-07

作者简介: 厉天扬(1997-), 男, 浙江金华人, 硕士研究生, 主要研究方向为数字电路设计。

E-mail: 791071565@qq.com

0 引言

非制冷型红外焦平面阵列提升了红外探测器的灵敏度以及红外图像的空间分辨率^[1],并减小了系统的体积、重量和功耗。但红外图像的对比度和信噪比通常较低^[2],而红外焦平面非均匀性的影响又很大,会导致图像变得模糊且难以提取出目标图像的特征。所以必须消除成像结果的非均匀性。

原始红外图像还会有盲元的存在。盲元是指探测器焦平面上无法通过消除图像的非均匀性实现图像坏点修复的像素点,因此需要采用合适的滤波器对图像上的噪声以及坏点进行修复。盲元的数量和分布受红外焦平面探测器的制约,已经严重影响到红外图像的成像效果。因此,需要对红外焦平面阵列的原始图像进行盲元补偿^[3],以减少盲元的数量和分布。此外,为了增强红外对比度并使图像的微小细节被人眼发现,在提高图像质量的同时还需要对红外图像进行增强处理^[4-5]。

针对以上问题,本文基于武汉高德红外公司生产的 120×90 非制冷红外焦平面探测器,利用 FPGA 的并行处理及流水线技术^[6],在 XC7K325TFFG-900 型 FPGA 上实现了红外焦平面图像处理算法,保证了图像的实时处理。

1 红外图像实时处理算法架构

红外图像实时处理算法的硬件架构设计

(见图 1)主要包含 5 个部分:非均匀性校正模块、盲元补偿模块、直方图均衡模块、伽马变换模块以及伪彩色变换模块。从图 1 中可以看出,像元数据流的流向是从非均匀性校正模块到盲元补偿模块。在直方图均衡过程中,将一帧图像缓存于外部存储器。等到直方图统计完成并生成查找表后,将缓存在外部存储器中的图像读出,然后对其进行伽马变换以及伪彩色变换处理,最终得到经 FPGA 实时处理后的红外图像。

2 红外图像实时处理算法的 FPGA 实现

2.1 非均匀性校正中两点校正的 FPGA 实现

非均匀性校正系数计算在 FPGA 上实现起来比较复杂。因此,本文选择在上位机中计算非均匀性校正系数,然后将其下发到片上存储器中。所以可将非均匀性校正中的两点校正算法简化为一次函数表达式:

$$P_o(i,j) = k_{ij}P_i(i,j) + b_{ij} \quad (1)$$

式中, k_{ij} 为非均匀性校正的增益系数; $P_i(i,j)$ 为校正前的结果; $P_o(i,j)$ 为校正后的结果; b_{ij} 为非均匀性校正的失调系数。

非均匀性校正中两点校正的 FPGA 实现如图 2 所示。上位机将计算好的非均匀性校正系数结果通过以太网下发到随机访问存储器(Random Access Memory, RAM)中。像元先缓存在先进先出(First In, First Out, FIFO)存储

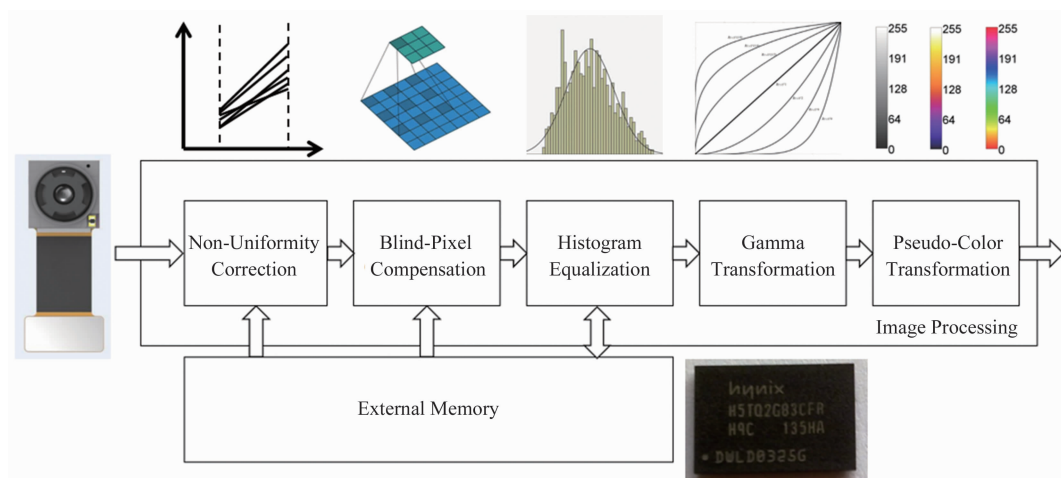


图 1 红外图像实时处理算法的硬件架构设计

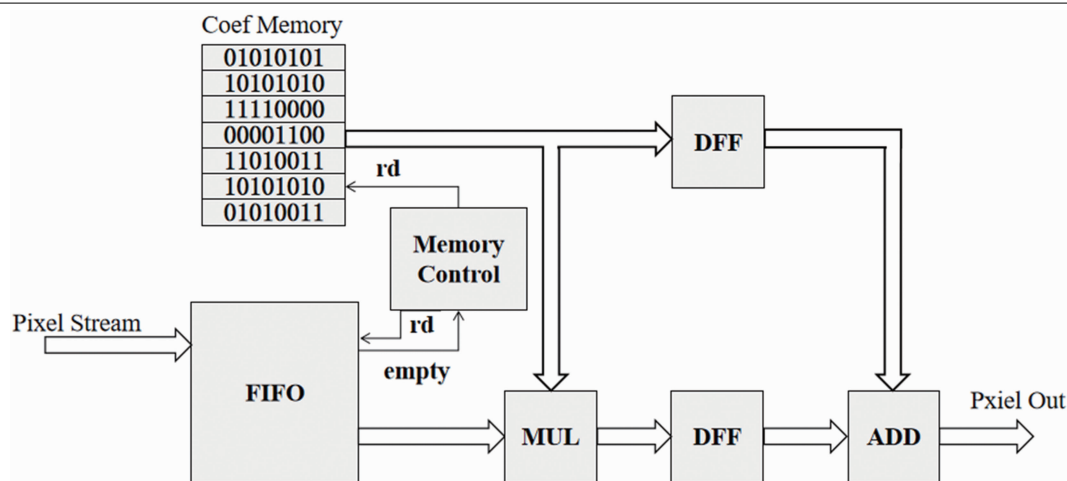


图 2 非均匀性校正中两点校正的 FPGA 实现

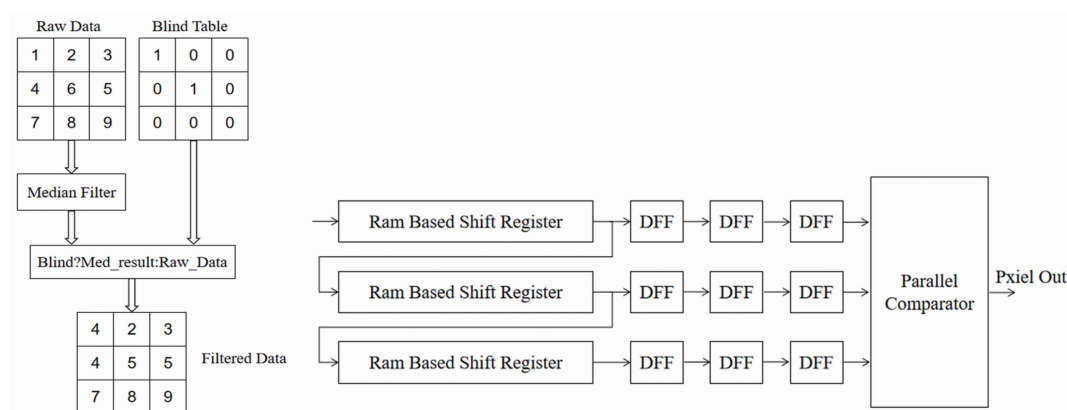


图 3 盲元补偿模块的 FPGA 实现

器中。每当 FIFO 存储器非空时, 读取未校正的像元与存放在 RAM 中的系数。像元先乘以非均匀性校正的增益校正系数, 延迟 1 个时钟周期后再加上非均匀性校正的偏移校正系数, 接着用于存储系数的 RAM 地址以 1 为单位自增。当地址到达最后一个像素后, 地址清零。

在非均匀性校正模块中, 像素的运算采用流水线处理^[7], 从输入到输出一共花费了 3 个时钟周期。在这部分设计中, 定义像素的位宽为 16 bit, 非均匀性校正的乘法系数为 9 bit, 非均匀性校正的加法系数为 6 bit。因此将系数存储器的比特宽度定义为 15 bit。

2.2 盲元补偿的 FPGA 实现

图 3 为盲元补偿模块的原理图。盲元补偿的卷积核大小为 3×3 。基于此卷积核进行中值滤波, 将其结果与盲元表对照, 从而判断 3×3 卷积核中央的像元是否为盲元。如果是盲

元, 就用中值滤波的结果进行替换, 否则使用原本的像素值。由于盲元补偿是对多行像元进行对照, 因此需要在 FPGA 上实现三行像元的缓存。图 3 右半部分表示 3×3 卷积核的实现。用于生成卷积核的移位寄存器基于 RAM 实现。由于 FPGA 中的寄存器资源有限, 且直接使用可配置逻辑单元 (Configurable Logic Block, CLB) 内部的寄存器会导致布局布线资源紧张, 进一步造成时序不收敛等问题, 因此有必要选用基于 RAM 的移位寄存器。

2.3 直方图均衡化的 FPGA 实现

直方图均衡化的 FPGA 实现如图 4 所示。首先统计一帧图像的灰度直方图^[8], 得到当前帧图像的灰度值统计结果后, 通过遍历操作读出直方图每个地址的数据。将这些数据累加的结果通过除法器依次除以一帧图像的像元数量 (即 10800), 再通过乘法器依次将除法结果乘

以 255 (可等效为左移 8 位)。将处理之后的结果按照地址顺序累加的方式存入查找表。直方图均衡化涉及到缓存一帧图像的操作。由于 FPGA 内部的存储资源紧张^[9], 需要将图像缓存至 FPGA 外部的存储资源。当像元查找表构建完成后, FPGA 负责将存储在 DDR3 内部的图像读出, 并根据查找表寻找到正确的像元。

本系统采用双端口 RAM (Dual-Ported RAM, DPRAM) 作为直方图统计值的存储器。这样就方便调整 FPGA 时序。每帧红外图像的像素个数为 120×90 。假设一幅图像所有像素值的大小相等, 那么 DPRAM 单个地址的深度应当不小于一帧图像像素点的个数, 因此定义 DPRAM 的尺寸为 10800×16 bit。由于灰度值的范围为 $0 \sim 65535$, 所以输入的地址位宽度为 8 bit。输入的写入地址端口用于统计灰度数据, 而写入的数据分为两种情况: 第一种是在写入邻接像素数据不相等的情况下, 写入的数据会使当前的统计结果加 1; 第二种是在写入邻接像素数据相等的情况下, 写入的数据会等待相邻像素统计结束, 然后在写入使能有效的条件下, 使当前的地址统计数据加 1。一帧图像统计未完成的情况下, 写入地址为灰度值, 读出地址为写入地址经过一个延迟触发器后的

数据, 用于将 RAM 内存存储的统计数据读出。一帧图像统计处理完成时, RAM 的读出地址改变, 通过输入连续累加的数据对当前的统计结果进行索引, 输入数据流的控制通过多路选择器实现。每次直方图统计信息完成时, 都会遍历一次 RAM, 读出每个地址对应的结果。

2.4 伽马变换模块与改进后的伪彩色变换模块的 FPGA 实现

由于本系统中伽马变换的输入范围只有整数 $0 \sim 65535$, 因此可选用查找表的方式实现伽马变换^[10]。将预先计算好的伽马变换系数存入只读存储器 (Read-Only Memory, ROM), 并将像元作为输入地址, 便可得到伽马校正之后的结果。

伪彩色变换主要分为空间域映射和频域映射两种方式。频域算法涉及到傅里叶变换, 为 FPGA 的实现增加了复杂度, 也增加了资源的消耗。因此, 本设计选择了空间域伪彩色变换算法。基于人眼视觉特征, 本文提出一种新的伪彩色变换映射函数。

基于空间域映射的伪彩色变换算法的 FPGA 实现如图 5 所示。灰度值经过三色映射函数运算后, 得到了相应的像素值。然后将三个像素值并行组合, 便可得到伪彩色变换之后的

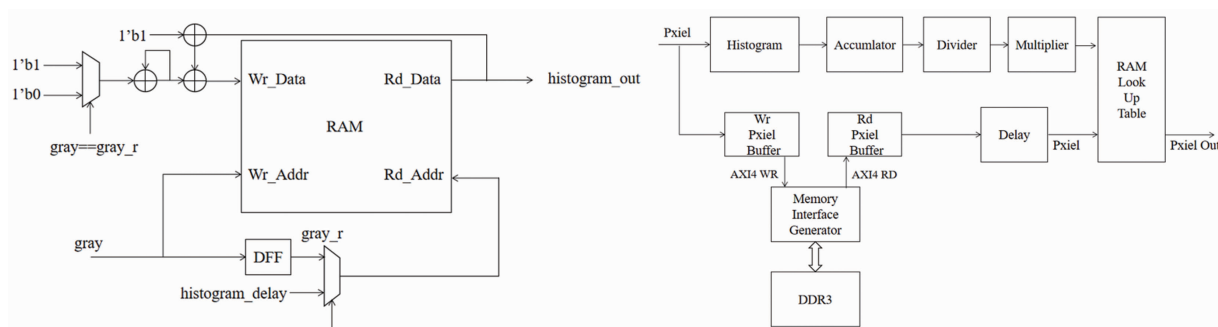


图 4 直方图均衡化的 FPGA 实现

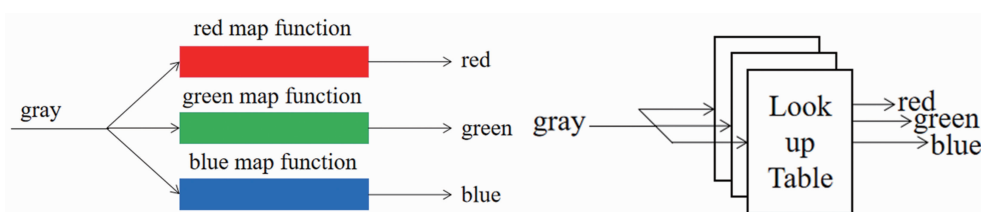


图 5 改进后的伪彩色变换算法的 FPGA 实现

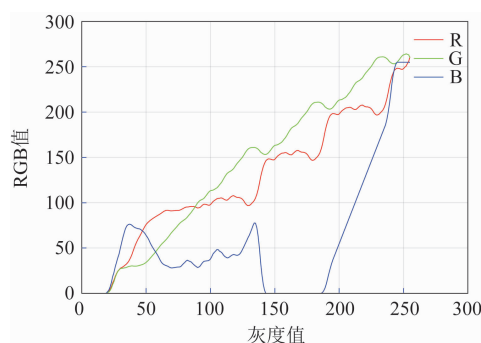


图 6 改进的伪彩色变换函数与灰度值的映射关系图像。由于本设计中的伪彩色变换函数是非线性函数, 因此选用三个查找表来拟合伪彩色变换曲线。图 6 所示为改进的伪彩色变换函数与灰度值的映射关系。

3 实验结果

本文选用武汉高德红外公司生产的 120×90 焦平面探测器, 并根据该探测器设计了此次实验的电子学平台。图 7(a)所示为该系统的实验平台。FPGA 通过以太网与上位机以及探测器板卡通信。上位机负责接收 FPGA 实时处理完成的图像, 并显示成像结果。图 7(b)所示为红外探测器板卡。本文基于该探测器设计了外围控制电路和以太网电路。

将设计完成的图像实时处理模块在 Vivado Simulator 环境下进行仿真(见图 8), 计算红外图像处理算法的消耗时间。从图 8 中可以看出, 在外部仿真时钟为 200 MHz 的条件下, 第一个像素输入与第一个像素输出的时间间隔为 $60.4 \mu\text{s}$ 。通过该时间间隔可以得知处理一帧图像所消耗的时间。

本文采集了红外探测器板卡生成的同一幅图像经过 FPGA 每个图像处理模块后的处理结果(见图 9), 然后将其存储在上位机中并进行对照。从图 9 中可以看出, 非均匀性校正和盲元补偿去除了原始红外图像中死像元的影响, 同时消除了图像的非均匀性。通过图像增强模块后, 图像的细节与对比度有所增强。经过伪彩色变换模块后, 图像的明暗代表了物体的温度。可以看出, 人脸的温度明显高于周围的温度, 因此人脸上的像素亮度高, 而周围的像素亮度低, 证明改进的伪彩色变换算法能够正确反映出物体表面温度的变化。

4 结束语

本文在 FPGA 上实现了红外图像实时处理模块, 有效减小了图像的非均匀性, 剔除了图像的坏点。同时增强了图像的对比度与细节,

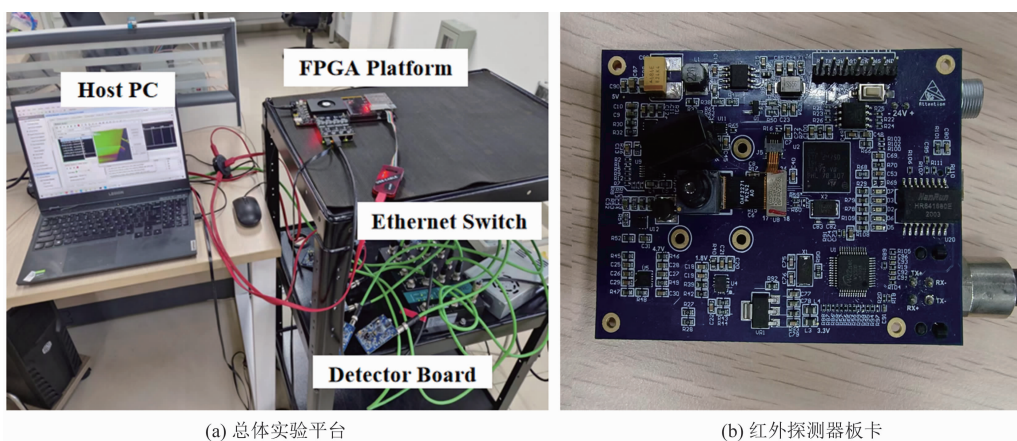


图 7 电子学平台

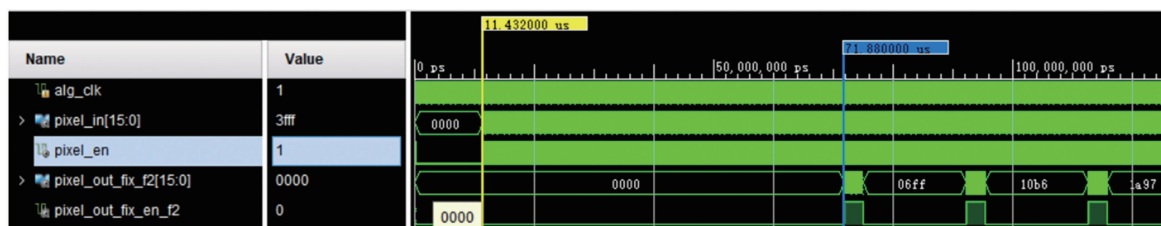


图 8 图像处理模块仿真图

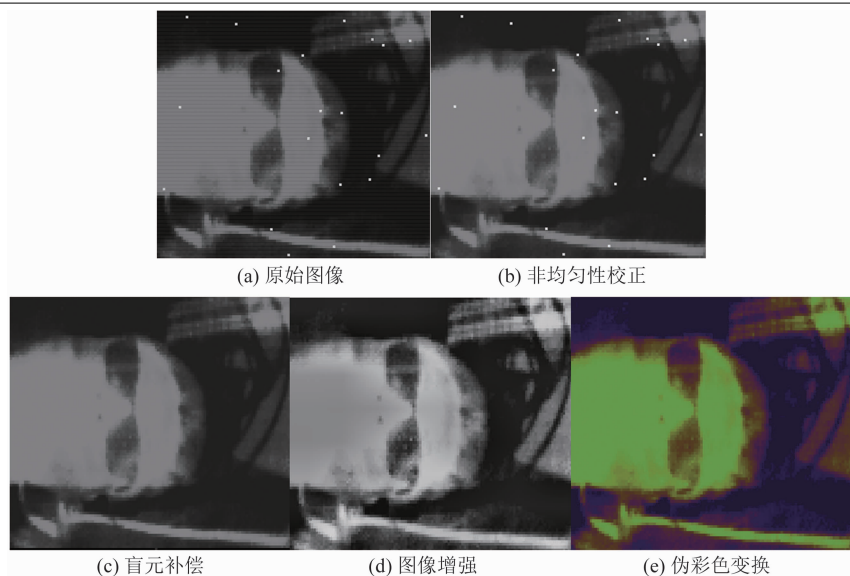


图 9 红外图像处理实验结果

实现了红外图像的实时处理,并在此基础上搭建了采用 120×90 非制冷型红外焦平面探测器的电子学实验平台。选用了非均匀性校正中的两点校正算法、基于中值滤波的盲元补偿算法、基于直方图均衡化的图像增强算法以及改进后的伪彩色变换处理算法,消除了红外图像的非均匀性以及红外图像中存在的盲元,增强了图像的对比度,并实现了温度与色彩的转换。虽然该模块实现了红外图像的实时处理,但是其中基于定标的两点校正算法的非均匀度随着时间产生漂移^[11],非均匀性校正系数需要随时间变化。因此需要实现非均匀性校正系数的自适应变换。后续将针对该问题开展非均匀性校正系数实时标定的算法研究与实现,从而对该系统进行进一步的方案优化和性能提升。

参考文献

- [1] 邓荣春,卢杰,徐立中,等.微测辐射热计型非制冷红外焦平面探测器技术新进展[J].*光电子*, 2021, **11**(4): 158-167.
- [2] 何锁纯,周阳,党雪晨,等.红外图像细节增强算法及 FPGA 实现方法研究[J].*宇航计测技术*, 2022, **42**(6): 66-69.
- [3] 郭广浩,吴南健,刘力源.低功耗非制冷红外图像处理专用 SoC 芯片[J].*红外与毫米波学报*, 2023, **42**(1): 122-131.
- [4] Wang B, Zou Y, Zhang L, et al. Multimodal Super-Resolution Reconstruction of Infrared and Visible Images via Deep Learning [J]. *Optics and Lasers in Engineering*, 2022, **156**: 107078.
- [5] 刘喆,马建伟,刘刚.基于融合的非红外图像增强方法[J].*电光与控制*, 2013, **20**(2): 23-27.
- [6] Vijay V, Rao V R S, Chaitanya K, et al. High-Performance IIR Filter Implementation Using FPGA [C]. Jamshedpur: 4th International Conference on Recent Trends in Computer Science and Technology (ICRTCST), 2022.
- [7] 程旺,吕群波,赵娜.基于 FPGA 的科学级 CMOS 图像传感器非均匀性校正[J].*半导体光电*, 2016, **37**(6): 873-875.
- [8] 李晓冰.基于 FCM 聚类的测量图像自适应平台直方图均衡算法[J].*兵工自动化*, 2012, **31**(2): 43-46.
- [9] Veeravalli B, Fong X Y. An FPGA-Based Co-Processor for Spiking Neural Networks with On-Chip STDP-Based Learning [C]. Austin: 2022 IEEE International Symposium on Circuits and Systems (ISCAS), 2022.
- [10] 彭国福,林正浩.图像处理中 Gamma 校正的研究和实现[J].*电子工程师*, 2006, **32**(2): 30-32.
- [11] 王成龙,王春阳,谷健,等.一种基于定标的非均匀性校正改进算法[J].*中国光学*, 2022, **15**(3): 498-507.