

文章编号: 1672-8785(2023)09-0008-08

基于 FPGA 的红外图像非均匀性校正系统设计

郑洪波 邱晓庆 张浩平 黄茂潼

(中国科学院上海技术物理研究所, 上海 200083)

摘 要: 红外成像技术在众多领域得到广泛应用, 但设计和制造工艺存在的非均匀性现象严重降低了红外图像的成像质量。针对这一问题, 设计了一种基于现场可编程门阵列 (Field-Programmable Gate Array, FPGA) 的红外图像校正系统。该系统采用两点校正法对某国产短波探测器的像元增益和偏置进行更新, 然后利用 3σ 算法实现盲元点的检测并利用邻域替代的思想进行盲元校正, 通过将盲元点周围的有效像元值按比例替代盲元像元来降低运算复杂度。在基于 XC5VLX110T 型 FPGA 的硬件系统上进行实验。结果表明, 所设计的红外图像校正系统改善了图像的非均匀性, 提高了成像质量且成像速度快。此外, 丰富的余量资源使得系统具有较好的扩展性。该系统在红外图像处理方面具有一定的应用价值。

关键词: 非均匀性校正; 盲元检测与校正; 红外图像; 现场可编程门阵列

中图分类号: TN215 **文献标志码:** A **DOI:** 10.3969/j.issn.1672-8785.2023.09.002

Design of FPGA-Based Non-Uniformity Correction System for Infrared Images

ZHENG Hong-bo, QIU Xiao-qing, ZHANG Hao-ping, HUANG Mao-tong

(Shanghai Institute of Technical Physics, Chinese Academy of Sciences, Shanghai 200083, China)

Abstract: Infrared imaging technology is widely used in many fields, but the non-uniformity of the design and manufacturing process seriously reduces the imaging quality of infrared images. To solve this problem, an infrared image correction system based on FPGA is designed. The system uses a two-point correction algorithm to update the pixel gain and bias of a domestic short-wave detector, then uses the 3σ algorithm to detect blind pixels and uses the idea of domain substitution to correct the blind pixels. The blind pixels are replaced by the values of valid pixels around the blind pixels in proportion to reduce the operational complexity. Experiments are carried out on the hardware system based on XC5VLX110T FPGA. The results show that the designed infrared image correction system can improve the image non-uniformity, the image quality and the imaging speed. In addition, the abundant spare resources make the system have better expansibility. This system has certain application value in infrared image processing.

收稿日期: 2023-04-16

作者简介: 郑洪波(1984-), 男, 山东泰安人, 高级工程师, 主要从事航天卫星遥感信号处理方面的研究。

E-mail: zhbsniper916@126.com

Key words: non-uniformity correction; detection and correction of blind pixel; infrared image; field-programmable gate array

0 引言

红外线是一种不可见光。只要物体的温度高于绝对零度就会对外产生红外线,即红外辐射。红外焦平面阵列能够探测到物体的红外辐射,从而生成红外图像。与可见光成像相比,红外成像具有不可替代的优势(不受昼夜时间限制,能够反映目标的温度分布特征),因此在军事、航天和民用领域获得了广泛的应用^[1-2]。

红外焦平面阵列作为红外成像系统的核心器件,在成像时存在非均匀性问题。当接收相同的红外辐射时,像元响应的灰度值并不相同,导致生成的红外图像上出现条形或块状的纹理。此外,探测器本身还具有过亮或过暗的盲元点。这些原因使得红外图像的目标模糊、细节不清晰,严重降低了成像的质量^[3]。

以上问题是目标成像时背景的干扰、光学系统中镜头的精度偏差、探测器生产过程所用的材料及工艺步骤、信号读取处理电路^[4]等多种因素共同作用的结果。红外成像系统的非均匀性无法完全消除,需要通过对图像进行非均匀性校正来提高成像质量。

校正方法可分为基于参考红外信息源的定标类校正算法和基于场景的校正算法两种。其中,基于参考红外信息源的定标类校正算法(如单点法、多点法等)需要借助均匀辐射的黑体,通过采集不同温度下的图像,拟合出每一个成像单元的响应曲线参数。这类方法的优势是计算量小、校正效果明显,缺点是探测器的温漂和时漂需要周期性定标以免出现新的非均匀噪声。实际工程应用较多的是两点校正法。

基于场景的校正算法(如高通滤波校正算法和基于神经网络的校正算法等)根据图像本身的数据特征来进行校正。这类算法不需要黑体提供均匀场景,但通常时间和空间复杂度较

高且计算量大,不适用于对功耗和体积具有严格要求的系统^[5-6]。

本文根据某国产探测器的特点,采用定标的方法实现了一种基于 FPGA 的红外图像非均匀性校正系统。

1 非均匀性校正算法原理

1.1 两点校正法

一般认为红外探测器的像元响应特性为线性关系,且具有时间稳定性^[7],则红外图像响应域的红外辐射响应关系为

$$X_{ij}(\varphi) = M_{ij}\varphi + N_{ij} \quad (1)$$

式中, φ 为像元接收的辐射通量, M_{ij} 为像元 (i, j) 对应的增益, N_{ij} 为像元 (i, j) 对应的偏移。

理论上每个像元点应该具有相同的响应关系,响应曲线是重合的。但实际应用中,在相同辐射容量下,每个探测器像元的响应 $X_{ij}(\varphi)$ 并不相同。图 1 所示为三个像元点的响应曲线。可以看出,相同的辐射通量生成不同的灰度值,故需要通过校正来调整像元响应的增益和偏移,使每个像元点的响应一致。

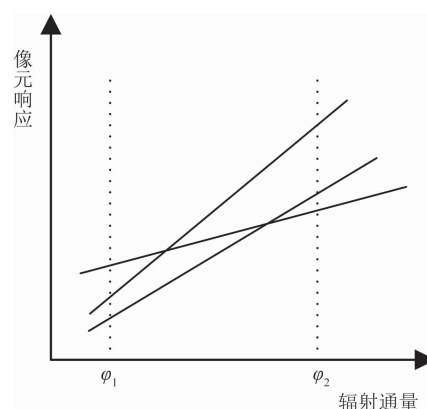


图 1 像元灰度值与辐射通量的对应关系

两点校正法模型如下:

$$Y_{ij}(\varphi) = k_{ij}X_{ij}(\varphi) + b_{ij} \quad (2)$$

式中, $Y_{ij}(\varphi)$ 为探测器校正后的灰度输出值, k_{ij} 为校正增益, b_{ij} 为校正偏移。

利用黑体提供均匀辐射,在高温 T_H 和低温 T_L 下分别选取多帧图像,测得探测器像元的所有平均响应:

$$\begin{cases} Y_H = k_{ij} X_H + b_{ij} \\ Y_L = k_{ij} X_L + b_{ij} \end{cases} \quad (3)$$

根据式(3)可以计算出增益和偏移:

$$\begin{cases} k_{ij} = \frac{Y_L - Y_H}{X_L - X_H} \\ b_{ij} = \frac{Y_H X_L - Y_L X_H}{X_L - X_H} \end{cases} \quad (4)$$

1.2 盲元检测与剔除

通过以上校正方法可以抑制图像中大部分的非均匀性噪声,但图像中还存在一些分布孤立的盲元点。它们是成像时出现的过亮或过暗的像素点,分别称为过热盲元和死盲元。据相关研究发现,均匀分布的红外图像像元的灰度值是近似正态分布的^[8]。根据统计学中常用的异常值检测方法,本文采用 3σ 算法对盲元进行检测,将实际响应值在平均响应值 $\pm 3\sigma$ 之外的像元判定为盲元点。

将某个像素点判定为盲元后,采用邻域替代的思想来替换盲元点的像素值。根据盲元点可能出现的位置,将像素点划分为图 2、图 3 和图 4 所示的三个集合 Q_1 、 Q_2 和 Q_3 。集合 Q_1 和 Q_2 的盲元点分别有 3 个和 5 个邻域像元点。如果每个像元点所占比例相同,FPGA 就要进行除 3 和除 5 操作,在 FPGA 中实现时耗费资源较多。本文采用的盲元校正方法根据邻域与盲元点的距离,对邻域内不同像元点的比例进行调整,使软件实现时仅通过移位操作就可以进行盲元点灰度值的计算。图 2 为一幅红外图像的示意图。图像左上角像素点位置为坐标 $(0,0)$;沿箭头方向, i 和 j 的值逐渐增大。下面介绍根据盲元点所处的不同位置对盲元点处的灰度值进行计算的三种方法。

在第一种情况下,盲元点位于图像的四个顶点位置上(见图 2),相应像素点集合为 $Q_1 = \{p_{0,0}, p_{0,511}, p_{511,0}, p_{511,511}\}$,则盲元点对应的像素点的灰度值计算方法如下:

$$\begin{cases} p_{0,0} = \frac{1}{4}p_{1,0} + \frac{1}{4}p_{0,1} + \frac{1}{2}p_{1,1} \\ p_{0,511} = \frac{1}{4}p_{0,510} + \frac{1}{4}p_{1,511} + \frac{1}{2}p_{1,510} \\ p_{511,0} = \frac{1}{4}p_{510,0} + \frac{1}{4}p_{511,1} + \frac{1}{2}p_{510,1} \\ p_{511,511} = \frac{1}{4}p_{511,510} + \frac{1}{4}p_{510,511} + \frac{1}{2}p_{510,510} \end{cases} \quad (5)$$

当盲元点位于图像边缘的行或列上,但不位于四个顶点上时(见图 3),相应像素点集合为 $Q_2 = \{p_{i,0}, p_{i,511}, p_{0,j}, p_{511,j}, 0 < i, j < 511\}$,则该盲元点对应的像素点的灰度值计算方法如式(6)所示。

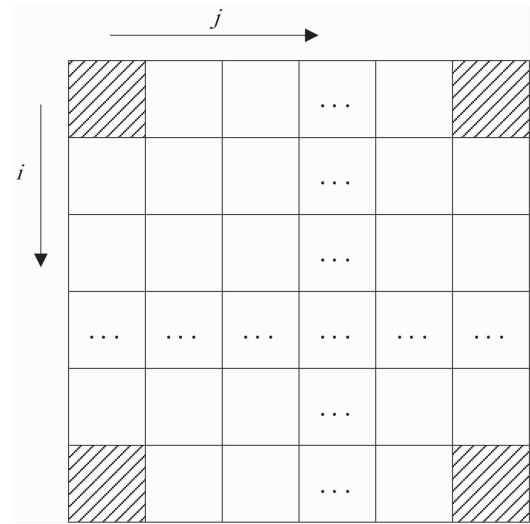


图 2 盲元点位于顶点上

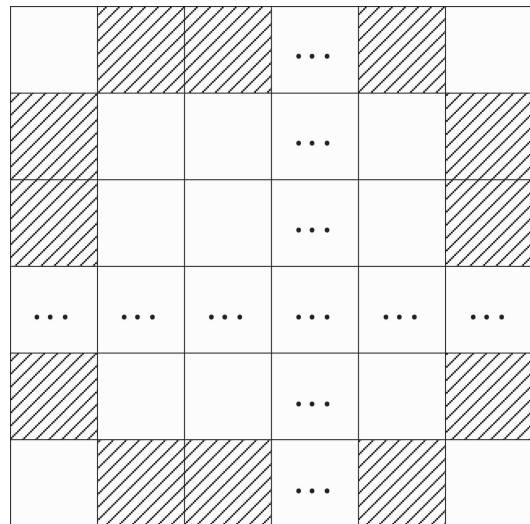


图 3 盲元点位于边缘像素点上

$$\begin{cases} p_{i,0} = \frac{1}{4}(p_{i+1,0} + p_{i-1,0} + p_{i,1}) + \frac{1}{8}(p_{i-1,1} + p_{i+1,1}) \\ p_{i,511} = \frac{1}{4}(p_{i+1,511} + p_{i-1,511} + p_{i,510}) + \frac{1}{8}(p_{i-1,510} + p_{i+1,510}) \\ p_{0,j} = \frac{1}{4}(p_{0,j-1} + p_{0,j+1} + p_{1,j}) + \frac{1}{8}(p_{1,j-1} + p_{1,j+1}) \\ p_{511,j} = \frac{1}{4}(p_{511,j-1} + p_{511,j+1} + p_{510,j}) + \frac{1}{8}(p_{510,j-1} + p_{510,j+1}) \end{cases} \quad (6)$$

如果盲元点不位于图像边缘的行或者列上, 而位于图 4 所示的阴影区域内, 相应像素点集合 $Q_3 = \{p_{i,j}, 0 < i, j < 511\}$, 则该盲元点对应的像素点的灰度值为相邻八个像素点灰度值的均值:

$$p_{i,j} = \frac{1}{8}(p_{i-1,j} + p_{i+1,j} + p_{i,j-1} + p_{i,j+1} + p_{i-1,j-1} + p_{i+1,j+1} + p_{i+1,j-1} + p_{i-1,j+1}) \quad (7)$$

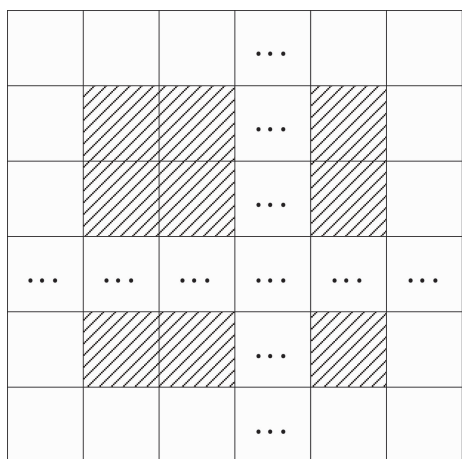


图 4 盲元点位于图像内部

2 红外图像校正系统

整个图像校正系统包括数据采集和数据处理两大步骤。如图 5 所示, 通过光学镜头将目标的红外辐射聚集到红外探测器模块上; 红外探测器将接收到的红外辐射信号转换为电信号, FPGA 控制 A/D 模块将电信号转换为数字信号, 然后依次对红外数字图像进行非均匀性校正; 对校正后过亮或者过暗的盲元进行识别, 然后对其进行校正并将处理完的红外数字图像进行显示。

2.1 硬件系统设计

图 6 和图 7 分别为校正系统与外部器件交

互的框图和硬件系统的实物图。

红外图像校正系统采用 Xilinx 公司生产的 XC5VLX110T 型 FPGA 来完成对红外探测器输出图像数据的处理、对外围芯片的控制与通信以及接收上位机发送的指令参数并将校正完成的图像发送给上位机。

系统中采用国产短波红外探测器, 其成像大小为 512×512 , 每个像元点占用 16bit 的存储空间。采用 N25Q256MB 型 FLASH 存储图像的校正参数; 采用 M25P128 型 FLASH 存储软件代码, 每次系统上电程序从该 FLASH 启动。采用 CY7C1071DV33 型 SRAM 存储器读入 FLASH 中的参数, 保证成像系统工作时对校正参数高速读取的需要。采用 DAC8412 型 D/A 转换器提供偏置电压, 避免探测器像元的灰度值过高, 并利用四路 B9243 型 A/D 转换器采集探测器的像素灰度值。采用 UART 串口协议接收上位机指令和注入参数; 采用 LVDS 协议将处理完成的图像数据输出给上位机。

A/D 转换器采集每个像元的灰度值并输出 14bit 的灰度值数据, 每一个像元点对应的校正系数有 32bit。其中, b31~b29 为盲元标志, 1 代表目前像素点是盲元; b28~b16 为该像素点的校正增益 k 值; b15~b0 为该像素点的校正偏置 b 值。针对本探测器输出的图像大小, 图像的校正参数需要占用 1048576 字节的存储空间。

2.2 软件系统设计

图 8 为软件各个模块和接口的关系图。图像校正系统与上位机之间实现双向异步串行通

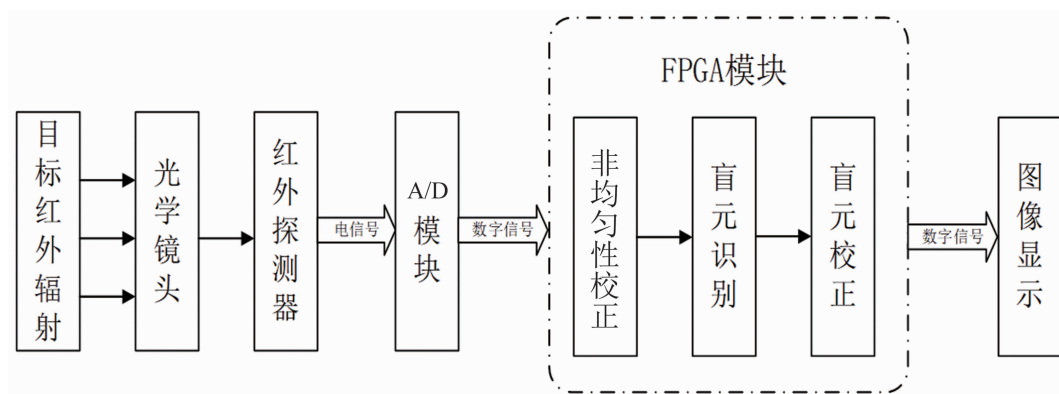


图 5 系统信号框图

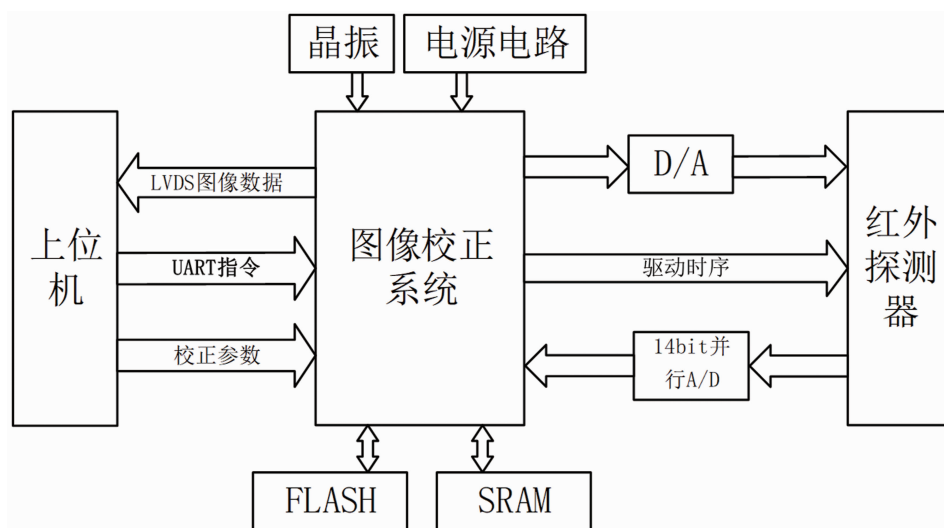


图 6 系统外部框图

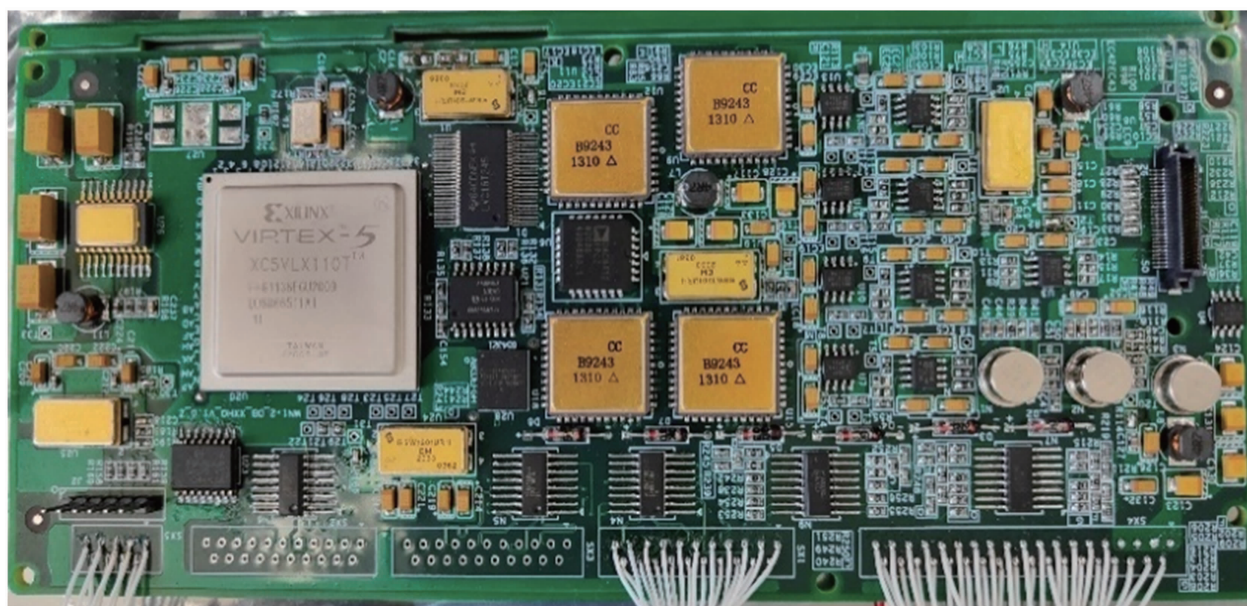


图 7 硬件系统实物图

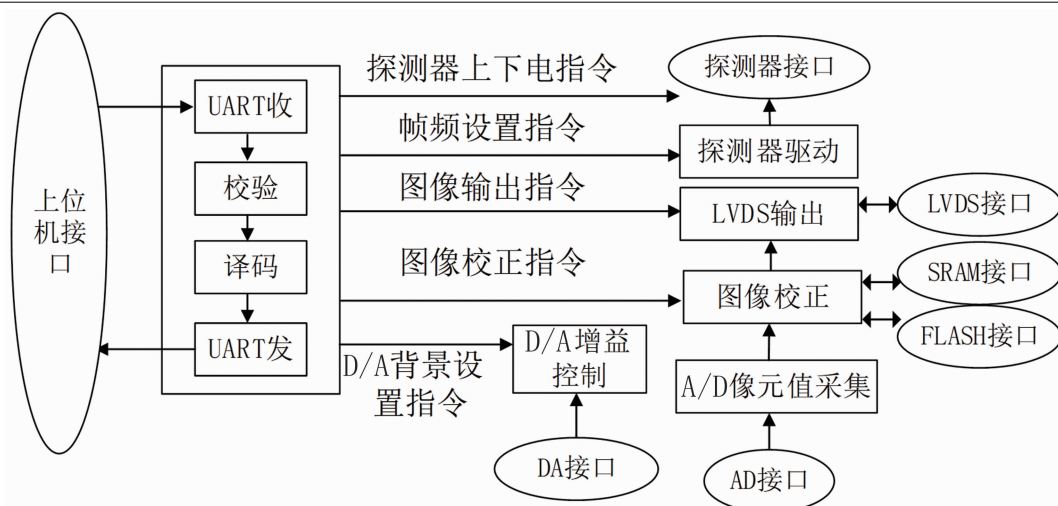


图 8 模块功能与接口的关系图

信。在接收到上位机的 UART 指令后, 首先由指令处理模块控制进行指令的接收校验和解析, 形成指令接收是否成功的状态并将其返回。UART 通信的波特率采用 1Mbps, 字节的校验方式采用奇校验。

探测器上下电控制指令通过探测器接口控制探测器电源上下电, 另外还根据触发信号输出探测器控制时序; 帧频设置指令可以根据帧频产生固定频率的内部触发信号, 从而触发探测器按照固定频率采集图像; D/A 背景设置指令通过图像背景控制模块控制 2 路 D/A 转换器输出相应电压值, 实现对图像像元整体灰度值大小的控制, 从而提高成像的动态范围; A/D 数据采集模块通过对 4 片 A/D 芯片的控制, 实现 4 路像素同时采集, 将采集到的像素值按行进行从左到右排列后, 输出串行的像素流到后续非均匀性校正模块进行非均匀性校正以及盲元的检测与识别。

图像校正指令控制图像校正功能的开关, FPGA 上电后会控制 FLASH 驱动程序从对应接口读取 FLASH 中的校正参数, 并通过 SRAM 接口将数据写入 SRAM。在探测器出图过程中, 校正模块将校正参数与像素流对齐, 进行非均匀性校正计算。计算完毕后存储三行像素, 即可在同一时刻得到某像素值的周围像素值, 再对其进行盲元校正操作。最后, 在 LVDS 输出模块将一帧图像数据添加帧头、帧

尾、帧校验和等信息。为了尽可能地消除误码, 将一帧图像拆成以 1024 个字节为单位进行传输, 添加包头、包计数、主导头、包尾、包校验和等信息, 通过 LVDS 将其传输到地面解析后进行显示。

3 实验结果与分析

红外图像校正效果的评价方法可分为主观法和客观法两种。其中, 主观法通过人眼进行观察, 适用于目标明显变化的场景。图 9(a)为校正前的可视化图, 图 9(b)为校正后的可视化图。可以看出, 校正前图像总体上明亮区域差别较大, 而且图像上明显有过热盲元的分布; 而校正后的图像像素灰度值基本相等, 几乎不存在过热盲元和死盲元。

客观法一般采用指标计算的方式进行评价。比如非均匀性 NU 就是红外探测器输出响应的均方根误差与所有像元响应平均值的比值, 即

$$NU = \frac{1}{p} \sqrt{\frac{1}{MN} \sum_{i=1}^M \sum_{j=1}^N (p_{i,j} - \bar{p})^2} \quad (8)$$

式中, $p_{i,j}$ 为对应坐标像元点的灰度值, $\bar{p}$ 为所有像元灰度值的均值, M 和 N 分别为图像的长度和宽度。

由于计算 NU 时引入了额外的计算量, 本实验直接将校正前后的图像每一列像素灰度值之和进行对比。图 10(a)所示为校正前的每一

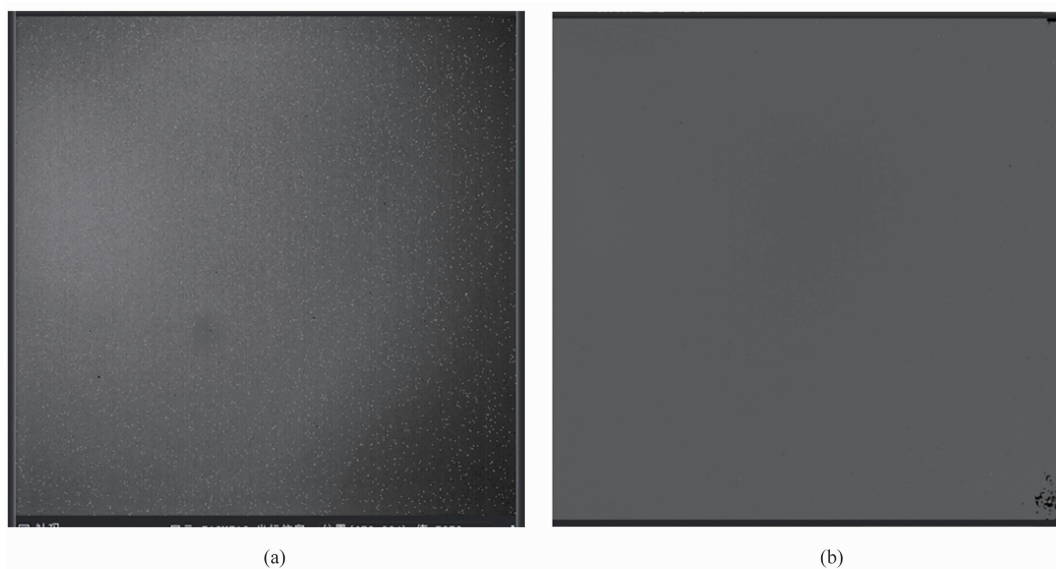


图 9 (a)校正前的可视化图；(b)校正后的可视化图

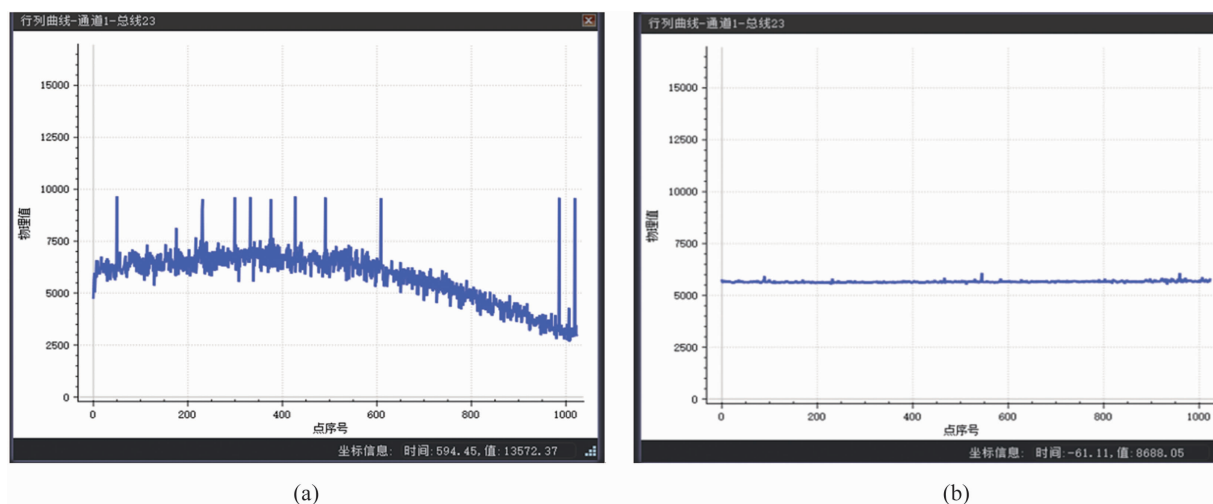


图 10 (a)校正前的 AD 码值；(b)校正后的 AD 码值

列像素的灰度值，图 10(b)所示为校正后的每一列像素的灰度值。对比后发现，校正前每一列灰度值之和差别较大。从数据的分布特征来看，灰度值之和的方差较大且其中某些列对应的数据过高或过低。结果表明，图像整体上均匀性较差，过高或过低数值对应的列存在热盲元和死盲元。校正后图像每一列对应的灰度值之和近似于一条直线，数据值的方差接近于 0，且高低异常值不明显，说明图像所有像元的灰度值几乎相同，红外图像的非均匀现象得到了明显改善。

资源使用率是 FPGA 系统设计的重要特征

之一。表 1 列出了本文系统的资源占用情况。其中，寄存器和查找表主要用于实现校正过程所需的组合逻辑和时序逻辑，I/O 引脚用于连接外部存储芯片和接口设备，RAM/FIFO 资源用于各模块之间通信数据的缓存。资源余量充足，为系统的进一步扩展提供了可能。

表 1 FPGA 资源使用统计

资源类型	已用	可用	使用率
寄存器	8379	69120	12%
查找表	11505	69120	16%
RAM/FIFO	89	148	60%
I/O 管脚	158	640	24%

4 结束语

本文实现了一种基于FPGA的红外图像非均匀性校正系统,解决了红外探测器成像后存在的非均匀性问题。采用定标法去除某国产探测器采集的红外图像中的大部分非均匀性噪声;利用 3σ 算法对孤立的盲元点进行检测并采用邻域替代的方法进行替换。将校正前后的图像对比后可以看出,本文系统获得了较好的校正效果,验证了设计的有效性。目前,该系统已经在产品中得到了实际应用,为后续红外图像的获取和分析奠定了基础。接下来可进一步对校正后的图像进行研究和分析(如图像中的目标检测与识别等)。

参考文献

- [1] Wu Z, Fuller N, Theriault D, et al. A thermal infrared video benchmark for visual analysis [C]. Washington: 2014 IEEE Conference on Computer Vision and Pattern Recognition Workshops, 2014.
- [2] 范晋祥, 杨建宇. 红外成像探测技术发展趋势分析 [J]. 红外与激光工程, 2012, **41**(12): 3145-3153.
- [3] 刘海峥, 史泽林, 冯斌. 微偏振片阵列红外成像非均匀性产生机理及其校正 [J]. 光学精密工程, 2018, **26**(2): 480-491.
- [4] Li Z, Shen T, Lou S. Scene-based nonuniformity correction based on bilateral filter with reduced ghosting [J]. *Infrared Physics & Technology*, 2016, **77**(1): 360-365.
- [5] 周永康, 朱尤攀, 赵德利, 等. 基于场景的红外焦平面非均匀校正算法综述 [J]. 红外技术, 2018, **40**(10): 952-960.
- [6] 张宝辉, 姚立斌, 张巍伟, 等. 红外图像校正与增强技术研究现状 [J]. 红外技术, 2017, **39**(6): 481-488.
- [7] Perry D L, Dereniak E L. Linear theory of non-uniformity correction in infrared staring sensors [J]. *Optical Engineering*, 1993, **32**(8): 1854-1859.
- [8] 董祥美, 陈家璧, 梁忠诚, 等. 波导多层光存储读出光学系统的实验研究 [J]. 仪器仪表学报, 2005, **26**(S1): 119-120.
- [9] Liu R, Wang D, Ping J, et al. Gradient sky scene based nonuniformity correction and local weighted filter based denoising [J]. *Optik*, 2018, **174**(12): 748-756.