

文章编号: 1672-8785(2018)07-0008-06

基于全变分模型的红外焦平面 非均匀性校正及其 FPGA 实现

姚锦华 郑东志 姜江辉 刘 婧

(浙江大立科技股份有限公司, 浙江 杭州 310053)

摘 要: 基于辐射源的定标校正法在工程应用中易受到特殊应用场合以及仪器工作状态偏移等因素影响, 输出图像质量欠佳。针对此问题, 基于现场可编程门阵列(Field Programmable Gate Array, FPGA)硬件平台实现了全变分模型场景实时校正算法, 阐述了模型的应用原理及抑制图像鬼影、退化问题的相关措施。在制冷型长波红外探测器上完成了功能调试及性能测试。实验结果表明, 该算法能在 20 帧图像内完成校正收敛, 达到良好的成像校正效果。

关键词: 非均匀性校正; 全变分模型; 图像鬼影; FPGA

中图分类号: TN219 **文献标志码:** A **DOI:** 10.3969/j.issn.1672-8785.2018.07.002

Nonuniformity Calibration of Infrared Focal Plane Based on Total Variational Model and Its FPGA Implementation

YAO Jin-hua, ZHENG Dong-zhi, JIANG Jiang-hui, LIU Jing

(Zhejiang Dali Technology CO. LTD, Hangzhou 311100, China)

Abstract: The reference-based Non-Uniformity Correction (NUC) is susceptible to the special application situation and the working condition drift of the instrument. This may result in the output images with poor quality. To solve this problem, a scene-based NUC algorithm for the total variation model is realized on the Field Programmable Gate Array (FPGA) platform. The application principle of the model and some measures for suppressing image ghosts and degradation are presented. Function debugging and performance testing are completed in some cooled LWIR detectors. The experimental results show that this algorithm can accomplish correction convergence in 20 frames and satisfactory imaging quality is achieved.

Key words: correction of non-uniformity; total variation model; ghost artifact; FPGA

0 引言

红外焦平面阵列(Infrared Focal Plane Ar-

rays, IRFPAs)能够感知并获取场景红外波段的有效信息, 被广泛应用于安防监控、消防救援、军事探测等相关领域。随着焦平面阵列规

收稿日期: 2018-04-03

基金项目: 国家重大科学仪器设备开发专项(2013YQ470767)

作者简介: 姚锦华(1991-), 男, 浙江杭州人, 硕士生, 主要从事红外图像处理研究。

E-mail: yaojinhua@dali-tech.com

模的日益扩大, 阵列固定模式噪声(Fixed Pattern Noise, FPN)特别是非均匀性条纹噪声已成为限制其成像性能的主要来源之一。如何有效地去除非均匀性, 从而提升红外焦平面阵列的成像品质是红外成像领域一个重要研究方向。

目前非均匀性校正算法有两大类, 即基于辐射源的定标校正和基于场景的实时校正^[1]。在通常的工程应用中, 红外焦平面阵列多采用基于辐射源的定标校正, 将由定标得到的增益系数 G 和偏置系数 O 矩阵表预存至内存中; 当仪器开机使用时再从内存中调用系数表以完成校正工作。然而此类方法在实际应用中存在一些弊端。其一, 焦平面阵列的非均匀性会随着时间的推移而产生性能漂移, 预存的两个系数表对焦平面的校正效果逐渐变差, 需要重新返厂做定标校正; 其二, 探测器实际使用中需要通过挡片遮挡视场进行单点校正, 更新偏置系数 O 表, 在目标跟踪应用中, 此遮挡视场过程容易导致目标丢失; 其三, 探测器存在“温飘”现象, 即随着工作时间的累积, 功耗性电子器件发热导致仪器的整体温度上升, 成像质量变差。基于场景的非均匀性校正具有实时性优势, 仅依赖于图像序列信息就能通过校正算法实时更新校正系数表, 从而能够有效避免上述问题。

当前基于场景的校正算法主要有时域高通滤波法、恒定统计法、卡尔曼滤波法和全变分迭代法。如要选取一种算法用于硬件实现, 则以上各算法均存在劣势^[2]: 时域高通滤波法要求场景做随机运动, 使用场合要求比较苛刻; 恒定统计法的收敛速度较慢, 且建立在统计假设的前提下, 与实际情况存在一定差异; 卡尔曼滤波法涉及到矩阵乘法和求逆计算, 算法运算量较大。因此, 本文选取基于全变分迭代模型的场景校正算法, 其主要特征有: 逐帧迭代, 无特定场景要求; 运行效率高, 仅需 20~50 帧即能完成收敛; 算法运算量适中, 易于在 FPGA 平台上实现, 具有良好的工程开发性。

本文首先阐述了非均匀性校正方案的总体

思路, 再介绍了全变分迭代模型在红外焦平面阵列非均匀性校正工作中的应用原理, 然后针对场景校正中较易出现的鬼影及图像退化现象, 提出了控制校正系数的更新以及迭代步长的方法, 接着分析了基于 FPGA 平台的校正模型实现原理, 最后展示并分析了已完成的工程样机的非均匀性校正成像效果。

1 非均匀性校正总体方案

本文所采用的非均匀性校正总体方案将两种校正算法相结合, 共同作用以完成仪器的成像校正工作。首先, 应用基于辐射源的定标校正初步完成探测器的校正工作, 消除绝大部分的固定图像噪声。基于辐射源的定标校正主要用于消除由增益和偏置系数的固定分量带来的非均匀性^[3], 校正方程为

$$Y_{i,j}(n) = A_{i,j} * X_{i,j}(n) + B_{i,j} \quad (1)$$

式中, $A_{i,j}$ 为像素 (i, j) 的增益系数, $B_{i,j}$ 为像素 (i, j) 的偏置系数, $X_{i,j}(n)$ 为焦平面阵列所成的原始图像, $Y_{i,j}(n)$ 为经过非均匀性校正后的图像。

完成上述校正步骤后, 红外焦平面的输出图像质量良好。一般来说, 将其非均匀性国标参数控制在 1% 以内, 就达到了绝大多数任务的应用要求。而仪器持续工作过程中会引入由外界以及自身状态变化所带来的非均匀性(例如“温飘”现象), 此时, 再利用基于全变分迭代校正模型对其进行二次非均匀性校正, 便能保持图像的优良均匀性, 有利于持续工作中的场景观察以及目标探测等视觉任务。

2 全变分模型在非均匀性校正工作中的应用

在图像去噪领域, 全变分(Total Variation, TV)迭代模型不但能有效抑制图像的噪声, 而且能较好地保留图像纹理和边缘细节, 因此受到广泛的关注, 是研究的热点。

2.1 模型原理及计算公式

TV 迭代模型^[4]在有界变差函数空间内利用全变分对图像进行建模, 其数学表达式为

$$TV(X(n)) = \|X(n)\|_{TV} = \sum_{i,j} |\nabla X(n)|_{i,j} \quad (2)$$

式中, $X(n)$ 为待校正图像序列, ∇ 表示求取梯度计算。

显然, 含噪声图像的全变分要大于无噪声图像, 因此 TV 迭代模型的核心是在图像序列中通过偏微分计算使得图像梯度最小化, 通过迭代更新图像校正所需的增益系数 G 和偏置系数 O 。其数学表达式为

$$\min TV(X(n)) \text{ s.t. } X = G * Y + O \quad (3)$$

式中, Y 与式(1)相同, 表示经基于辐射源定标校正后的图像, X 表示经全变分迭代模型校正后的图像。图像梯度可用一阶差分代替, 其中, 对于奇数帧图像采用式(4)计算, 对偶数帧图像用式(5)计算。

$$|\nabla X|_{i,j} = \sqrt{(X_{i,j} - X_{i-1,j})^2 + (X_{i,j} - X_{i,j-1})^2} \quad (4)$$

$$|\nabla X|_{i,j} = \sqrt{(X_{i,j} - X_{i+1,j})^2 + (X_{i,j} - X_{i,j+1})^2} \quad (5)$$

最终的迭代方程为

$$G_{i,j}^{N+1} = G_{i,j}^N - \lambda \frac{1}{|\nabla X|_{i,j}} [X_{i,j} - T_{i,j}] \quad (6)$$

$$O_{i,j}^{N+1} = O_{i,j}^N - \lambda \frac{1}{|\nabla X|_{i,j}} [X_{i,j} - T_{i,j}] \quad (7)$$

当图像为奇数帧时, $T_{i,j} = \frac{1}{3} (X_{i,j} + X_{i-1,j} + X_{i,j-1})$; 当图像为偶数帧时, $T_{i,j} = \frac{1}{3} (X_{i,j} + X_{i+1,j} + X_{i,j+1})$ 。

最后, 将最新迭代得到的增益系数 G 和偏置系数 O 代入校正式(8)中, 得到最终的校正图像:

$$X_{i,j}(n) = G_{i,j}(n) \times Y_{i,j}(n) + O_{i,j}(n) \quad (8)$$

2.2 抑制鬼影及图像退化的方法

基于场景的实时校正算法需要采取适当的方法处理鬼影及图像退化问题^[5]。Narendra 等人曾原则性地提出一种克服“鬼影”的简单方法^[6], 即在景物不变时停止校正系数的更新。本校正方案在迭代优化之前, 需对图像序列进行运动检测。若判断当前帧为运动状态, 则进

行相应的迭代优化计算并更新校正系数, 反之则不更新迭代, 继承上一帧的优化校正系数。

帧间运动检测以相邻两帧之间差值的绝对平均值 Mean 与均方差 Delta 作为判断依据^[7]。只有判定两者同时超过设定阈值, 才认为场景运动, 即进行迭代优化更新操作。其中阈值的设取根据实际应用场景进行相应的适应性调整。

另一方面, 场景的鬼影产生与图像退化也与迭代更新步长相关, 如何让迭代步长保持在合理的区间范围内也是亟待优化的问题。具体地, 图像鬼影一般发生在图像多帧静止后突然移动的时刻, 此时由于迭代率不足而使得之前的图像残像与当前场景相重叠。与之对应的, 图像退化则往往发生在图像由缓慢运动到静止的过程中, 此时由于图像迭代速率过快而使得图像过于平滑, 从而导致退化。

为了解决以上两种状态变化带来的图像问题, 校正方案设置了两个基本准则。其一是记录当前的连续静止帧数, 若其超过设定阈值, 则可认为此时场景处于静止状态, 将迭代步长重置为初始步长, 以防场景突然运动时由于更新不及时所导致的鬼影现象; 其二是记录当前的连续运动帧数, 若其超过设定阈值, 则可认为此时校正系数更新已基本达到收敛状态, 故降低其迭代步长, 以防系数更新过快导致图像退化。

上述抑制鬼影及图像退化的技术方案较简便, 易于在硬件端实现, 且能保证红外焦平面工作输出图像的质量, 因此具有良好的工程化应用前景。其缺点在于, 几个阈值参数的设置需要根据实际应用场景加以调整, 不具备自适应调整的功能。

2.3 基于 FPGA 平台实现全变分校正模型

采用的长波制冷型红外焦平面阵列的分辨率为 320×256 , 噪声等效温差 (Noise Equivalent Temperature Difference, NETD) 指标小于 40 mK。由于 FPGA 能够并行处理, 运算速度快, 适合做运算量大的数据处理, 且本文的算法主要用于实时红外图像处理, 因此本设计中选用

FPAG 进行算法硬件实现。设计中选用的 FPAG 为 Xilinx 公司生产的 Spartan6 XC6SLX150 FPGA, 该器件内部有 147443 个逻辑单元、4824 KB 的存储单元和 180 个 DSP 模块。FPGA 内部主要实现红外图像采样、基于定标的非均匀性校正、运动检测、TV 迭代模型控制系数计算及 TV 校正, 硬件实现总体结构如图 1 所示。其中, FLASH 用于存储基于定标方式的校正系数, DDR3 SDRAM 用于缓存 TV 校正运算过程中的图像数据, 包括用于运动检测的红外图像数据、TV 校正系数及 TV 校正后的图像数据等。

FPGA 采集焦平面阵列输出的 14 位原始成像数据, 接着读取存储的定标校正系数, 完成非均匀性的初步校正; 然后实时对每帧图像进行运动检测判断, 若符合第 2.2 小节中所讨论的设置条件, 则进行 TV 校正系数计算并更新; 最后将迭代校正系数作用于图像序列上以完成最终的图像输出。

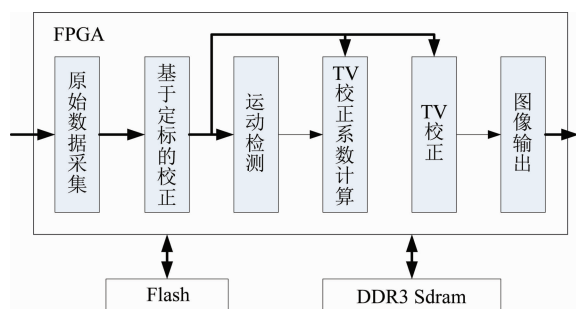


图 1 硬件实现总体结构图

3 实验结果与分析

为了客观评价经过全变分模型校正后的输出图像的非均匀性改善情况, 采用一种无参考图像的非均匀性客观评价粗糙度指数因子 ρ , 此评价因子主要衡量图像的高通内容信息。 ρ 越小, 图像质量就越好, 非均匀性校正效果就越好^[8]。

对于任意图像 f , ρ 定义为

$$\rho(f) = \frac{\|h_1 \otimes f\|_1 + \|h_2 \otimes f\|_1}{\|f\|_1} \quad (9)$$

式中, $h_1(i, j) = \delta_{i-1, j} - \delta_{i, j}$ 且 $h_2(i, j) = \delta_{i, j-1} -$

$\delta_{i, j}$ 。 $\delta_{i, j}$ 是克罗内克符号, $\|f\|_1$ 是 f 的 l_1 范数。

光电转塔等监视观测设备常配备有红外探测器, 该系统需要长时间不间断工作以满足观测要求。随着工作时间的累积, 整机系统产生热量, 由于系统相对密闭, 包括红外探测器在内的系统整体温度逐渐上升, 红外探测器的性能发生漂移, 导致成像质量逐渐下降。在此类应用场景下, 基于场景的实时校正算法能较好地改善图像质量下降的问题。本文将长波制冷型红外焦平面阵列应用于观测型系统中, 在一定温升范围内只使用基于辐射源的校正算法既能完成图像校正工作, 超过一定温升阈值后即启动基于场景的校正算法, 以保证长时间工作状态下红外焦平面输出图像质量的稳定。

通过实时采集记录器件基于场景校正过程中的图像输出。因为器件在连续运动 20 帧内能完成校正收敛, 所以取校正过程中第 1、10、15 及 20 帧为图像评价对象。下面分别分析室外场景以及靶标测试场景两组连续视频图像的校正效果。

图 2 展示了室外建筑场景校正过程的实时输出图像序列。由简单观察可见, 第 20 帧图像的背景噪声水平要优于第 1 帧图像。使用粗糙度指数因子对图 2 中 4 幅序列图像进行客观评价计算, 其数值曲线如图 3 所示。器件输出图像的非均匀性随着帧数的累积而逐渐减小, 成像质量得到有效提升。由上述主客观双重评价, 经过 20 帧的校正收敛之后, 算法能有效地消除图像中绝大部分非均匀性噪声, 提高了图像视觉效果以及客观评价指标。

图 4 展示了运动靶标测试场景校正过程的实时输出图像序列, 其中, 目标为 0.6 K 正温差靶标。通过 20 帧的图像收敛, 图像的非均匀性明显有效地被消除。使用粗糙度指数因子对图 4 中 4 幅序列图像进行客观评价计算, 其数值曲线如图 5 所示。器件输出图像的非均匀性随着帧数的累积而逐渐减小, 成像质量得到有效提升。而非均匀性的消除较大地改善了成像质量, 第 20 帧图像中四杆靶标的清晰度明

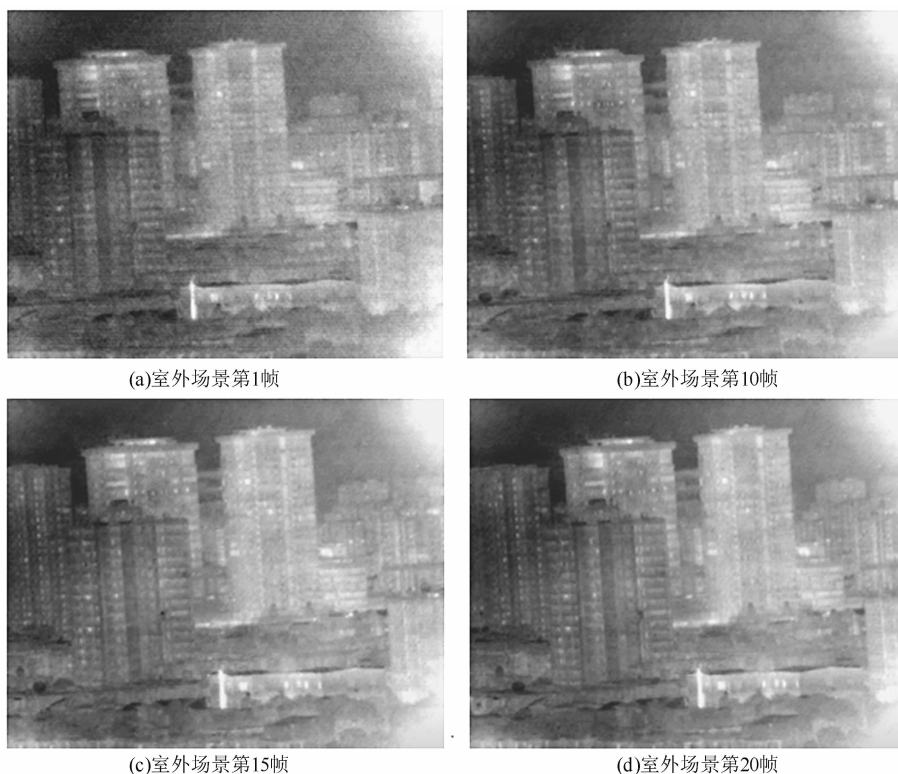


图 2 室外建筑场景校正图像序列

显优于第 1 帧图像,即器件的最小可分辨温差 (Minimum Resolvable Temperature Difference, MRTD) 指标得到了有效提升。器件成像性能的优化有利于后端应用。

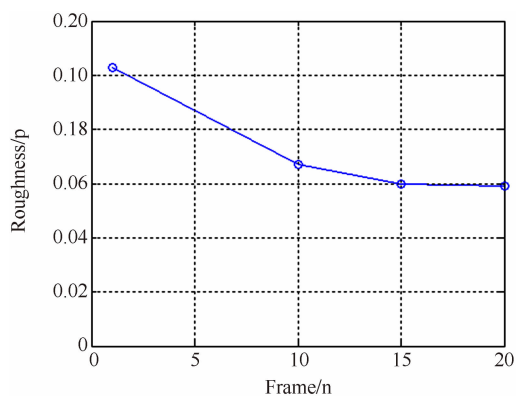


图 3 室外建筑场景序列粗糙度指标

结合以上两组器件实际输出场景校正成像序列分析,无论从主观观测效果还是从客观评价指标来说,基于 FPGA 实现的全变分校正模型对于实际场景的应用都能够满足红外图像的非均匀性校正需求,且能在短短 20 帧图像序列时间内完成校正收敛,输出的红外图像数据

具有较好的成像质量,对于实时校正任务具有很好的工程应用效果及价值。

4 结束语

基于全变分校正模型,结合鬼影及图像退化抑制方法,完成了 FPGA 平台的实时图像处理系统的设计,并对实时场景进行了功能验证,利用粗糙度指数因子客观地评价了算法校正效果。算法的复杂度较低,能在 20 帧图像内完成校正收敛,具有极佳的工程应用价值。

参考文献

- [1] Narendra P M, Foss N A. Shutterless Fixed Pattern Noise Correction for Infrared Imaging Arrays [C]. SPIE, 1981, 282: 44-51.
- [2] 栗宇路,苏俊波,刘传明,等. 基于场景的国产红外探测器非均匀性校正方法 [J]. 红外技术, 2014, 36(08): 624-627.
- [3] Milton A F, Barone F R, Kruer M R. Influence of Non-uniformity on Infrared Focal Plane Array Performance [J]. Optical Engineering, 1985, 24: 855-862.

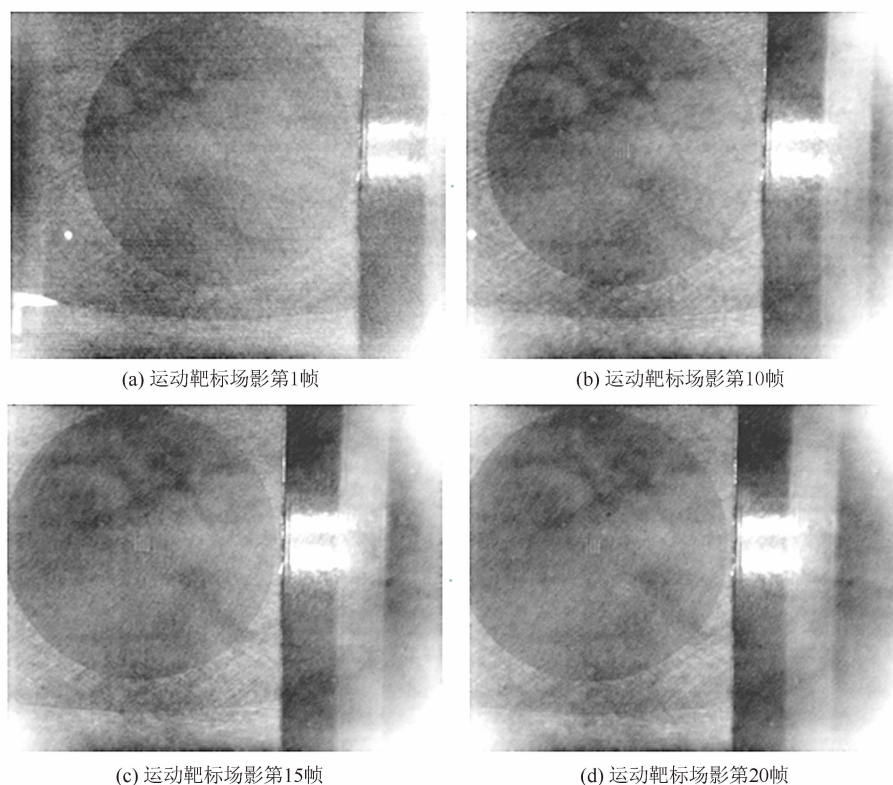


图 4 运动靶标场景校正图像序列

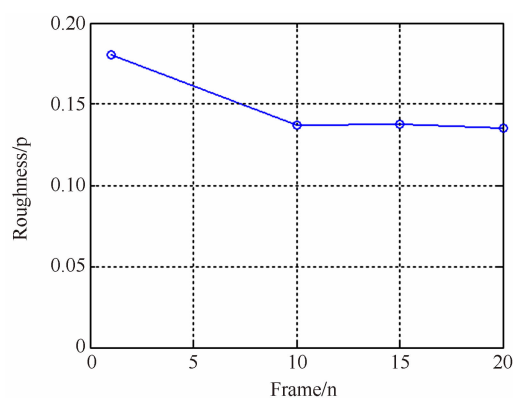


图 5 运动靶标场景序列粗糙度指标

[4] Esteban V, Pablo M, Sergio T. Total Variation

Approach for Adaptive Non-uniformity Correction in Focal-plane Arrays [J]. *Acta Optica Sinica*, 2014, **34** (3): 38–44.

[5] 刘会通, 马红伟. 自适应非均匀性校正中“鬼影”问题的分析 [J]. *红外技术*, 2003(05): 30–32.

[6] Narendra P M, Foss N A. Shutterless Fixed Pattern Noise Correction for Infrared Imaging Arrays [C]. SPIE, 1981, 282: 44–51.

[7] 桑红石, 袁雅婧, 张天序. 基于运动指导的红外焦平面非均匀性校正方法 [J]. *中国图象图形学报*, 2011, **16**(09): 1577–1582.

[8] 赵巨峰. 基于多波段光学成像及链路优化的微弱目标探测技术研究 [D]. 杭州: 浙江大学, 2013.