

红外焦平面条带状非均匀性校正硬件实现方法

张磊,王岳环,宋琼

(华中科技大学 自动化学院,湖北 武汉 430074)

摘要: 红外焦平面阵列条带状非均匀性严重影响了其成像质量,大大限制了它的应用。实现了一种基于 FPGA 的红外焦平面阵列条带状非均匀性实时校正系统,该系统以中值红外均衡算法为核心,针对算法以及 FPGA 的特性进行了优化,单帧内可进行条带状非均匀性的校正,硬件仿真结果表明:处理效果显著。系统处理速度快、资源占用量小,可以作为一个独立模块嵌入到红外焦平面成像与处理系统中,实现条带状非均匀性的实时校正,有很高的实用性与可扩展性。

关键词: 实时非均匀性校正; 红外焦平面阵列; 条带状非均匀性; FPGA

中图分类号: TN215 **文献标志码:** A **文章编号:** 1007-2276(2015)10-2886-05

Hardware implementation of stripe non-uniformity correction method for infrared focal plane arrays

Zhang Lei, Wang Yuehuan, Song Qiong

(School of Automation, Huazhong University of Science and Technology, Wuhan 430074, China)

Abstract: The stripe non-uniformity of infrared focal plane array strongly impact the image quality, thus the application of infrared focal plane array is strongly restricted. A real-time FPGA-based system for correcting the stripe non-uniformity was proposed. The system was based on Midway Infrared Equalization method and it could execute the correction in a single frame. Simulation results have demonstrated its efficiency and effectiveness in correcting the stripe non-uniformity. System architecture was optimized for the algorithm so that the system had relatively low FPGA resources consumption and high speed. The system can be embedded into the infrared focal plane array imaging and processing system as an independent module to realize a real-time stripe non-uniformity correction. Due to the previous features, the system has great functionality and extensibility and has a broad prospect in practical application.

Key words: real-time non-uniformity correction; infrared focal plane array; stripe non-uniformity; FPGA

收稿日期:2015-02-09; 修订日期:2015-03-15

作者简介:张磊(1989-),男,硕士生,主要从事红外图像处理及嵌入式系统方面的研究工作。Email:lzhang89@163.com

导师简介:王岳环(1972-),男,教授,博士生导师,博士,主要从事实时自动目标识别方法与系统、计算机视觉、图像分析、智能视频监控、嵌入式图像处理系统方面的研究工作。Email:yuehwang@hust.edu.cn

0 引言

现今使用的红外成像系统多是基于红外焦平面阵列器件,但由于制造工艺水平与材料的问题,红外焦平面阵列器件存在信噪比低的问题,这一方面是由于探测单元响应不一致所引起的固定图案噪声,另一方面是由于读出电路的非均匀性与偏置电压噪声所引起的条带状非均匀性^[1],这种非均匀性严重影响了红外图像的质量,限制了红外焦平面阵列器件的应用。条带状非均匀性既有结构性,又有随机性,传统的非均匀性校正方法中,定标类方式只适用于参数时域固定的情况,而基于场景的方法一般需要对时域上连续的若干帧进行运算,其收敛速度较慢,无法适应参数时域上的变化。因此需要研究专门针对条带状随机噪声的算法。

直方图匹配法^[4]将未校正的数据与参考数据进行直方图匹配,以得到校正后的图像。直方图匹配法简单、快速,但是直方图匹配法的性能非常依赖参考数据的质量,并且对于复杂的场景,由于待校正数据与参考数据直方图分布差异可能较大导致效果不好。矩匹配法^[5-6]假设这种列向非均匀性体现在偏置与增益的不同上,列与列之间依然呈线性关系,因此通过调整待校正数据的均值与方差使其与参考数据一致,来消除非均匀性。矩匹配方法强行将所有列的均值调整到同样大小,对于均匀的场景,这样做是合适的,但是对于大多数场景,场景分布并不均匀,这种调整使图像发生畸变,产生带状效应。频域滤波法^[7-8]假设条带状非均匀性有一定周期性,产生的噪声集中分布在频域上的特定范围中,因而先将图像变换到频域中,选择适当的滤波器进行滤波后再变换回空域中,但这样会影响同频带的有用信号,造成图像模糊,同时频域滤波法难以去除低频噪声。近年来广泛使用的总变分方法^[9]经过人为精细调整的模型对条带状非均匀性的校正有很好的效果,但对参数敏感,同时还需要迭代运算,难以硬件实现。中值红外均衡(MIRE)方法对条带状噪声校正效果明显优于直方图匹配和局匹配方法,与经过精细参数调整的总变分方法接近,且不需要迭代计算,但目前采用DSP实现该算法仍需占用大量计算和存储资源,不利于红外焦平面成像条带状噪声的实时校正。

文中根据FPGA的特点对MIRE算法进行了计算结构优化,并最终利用FPGA实现了MIRE算法,能实时校正条带状非均匀性,处理效果显著、速度快、资源占用量小,处理效果与软件实现相当。

1 中值红外均衡算法

非均匀性校正本质上是对探测器的参数进行校正,而这些参数通过探测器输出的数据间接得到反映,如果对每个探测器输出的数据进行统计,就可以得到对其参数的一个估计,而直方图即是一种直观的统计途径。有鉴于此,MIRE将对参数的校正转变为对列直方图的校正,其处理流程为^[2]:

- (1) 对每一列图像 C_j 计算其直方图 I_j 。
- (2) 计算每一列图像的累计直方图 H_j 。
- (3) 计算每一列图像累计直方图的逆直方图 H_j^{-1} 。
- (4) 计算其中值累计直方图的逆直方图 $\tilde{H}_j^{-1} =$

$$\sum_{k \in [-N, N]} \Gamma_{\sigma}(k) H_{j+k}^{-1}, \text{ 其中 } \Gamma_{\sigma}(k) = \frac{1}{\sum \psi_{\sigma}(k)} \psi_{\sigma}(k), \psi_{\sigma}(k) = \frac{1}{\sigma \sqrt{2\pi}} e^{-\frac{k^2}{2\sigma^2}}.$$

- (5) 将每一列的列直方图规范到该列的中值直方图, $\tilde{X}_{i,j} = \tilde{H}_j^{-1}(H_j(X_{i,j}))$ 。

由前述可知每一列探测器的参数是相同的,同时认为对一幅不太小的图像,其每一列所包含的数据足够形成一个可以代表其探测器统计特性的直方图。由于图像在空域上的变化比较缓慢,可以认为理想无条带状非均匀性图像的相邻列的差异在统计意义上是十分小的,即它们的直方图应是一致的。因此如果对每一列统计一个直方图并将相邻列进行直方图中值均衡可以有效地消除条带状非均匀性。中值红外均衡方法只使用相邻有限列的信息实现校正,因此不会将所有图像列的均值变成同一个数值,从而克服了由此引起的带状效应。

2 MIRE 算法的 FPGA 实现

原算法流程中五个步骤相互之间必须要完全完成上一步的所有计算才可以进行下一步计算,无法形成一条连贯的流水线,不利于FPGA的实现,并且需要相当大的存储空间以缓存中间结果。如何通过适当的手段对算法进行变换,使算法呈现出流水线的特性并

减少存储空间的使用是设计时最大的难题。

针对上述问题, 首先对算法的处理流程进行变更, 将原来步骤中的第(4)、(5)步变为:

(4) 将每一列的直方图分别规范化到相邻列的直方图 $\tilde{X}_{i,j}(k) = H_{j+k}^{-1}(H_j(X_{i,j}))$ 。

(5) 将所有规范化后的值加权平均得到最终的结果 $\tilde{X}_{i,j} = \sum_{k \in [-N, N]} \tilde{X}_{i,j}(k)$ 。

这样最后两个步骤可以形成一条完整的流水线, 大大简化了系统的结构, 同时节省了存储中值直方图所需要的存储空间。

在计算累计直方图的逆直方图时, 将直方图中每一个非零元素对应的灰度值及累计直方图上对应的高度值称为标记值, 将灰度值写入标记值对应地址并填充空白地址区域, 从而建立累计直方图的逆直方图。这样不用计算全部的累计直方图也可进行逆直方图的计算, 从而使第(2)、(3)步可以同时进行。

根据算法以图像列为单位运算的特点, 文中实现的结构以一行图像为单位, 按照前述步骤分为直方图统计、累计直方图处理与逆直方图计算以及规范化像素值计算三级, 在列的尺度上实现流水处理。即在一行图像的传输周期中, 流水线上的各级模块分别完成一行图像数据的处理并将处理得到的中间结果使用片内 DPRAM 进行缓存, 同时将上一个列周期中运算得到的中间结果输出给下一级模块进行处理。整个系统结构如图 1 所示。

系统分为图像缓存模块、参数计算模块、非均匀性校正模块与数据输出模块。图像缓存模块对输入数据进行解析, 缓存输入图像, 在非均匀性校正模块的

控制下输出缓存图像并同时图像列进行二次缓存以供计算规范化图像列使用。参数计算模块通过计算图像列均值按最小二乘法二次拟合的均方误差来估计计算中值累计直方图时的加权参数, 并且可以根据外部的输入指令手动设置参数, 使参数的调整更加方便。数据输出模块根据不同的协议格式将图像数据组帧后按一定时序输出以满足不同种类的输出接口。

非均匀性校正模块是整个系统的主体, 该模块实现 MIRE 算法对图像进行条带状非均匀性校正。它包含并行控制模块、输入控制与数据分发模块、直方图统计模块、累计直方图处理模块、标记值转发模块、索引值转发模块、逆直方图处理模块与规范化模块。输入控制与数据分发模块向图像缓存模块发出读请求并将输入图像与二次缓存图像列分别送给直方图统计模块与累计直方图处理模块; 直方图统计模块完成对图像列像素灰度值的直方图统计, 其内部例化了大小为存储一行图像直方图所需空间的两倍的存储区域, 采用乒乓方式进行操作, 在一行图像的处理周期内将该列计算得到的结果存储在 A 区域, 同时将存储在 B 区域内已计算好的前一列的直方图数据传递给累计直方图处理模块; 累计直方图处理模块完成累计直方图的计算, 将标记值下传并同时同时累计直方图进行存储以提供计算规范化像素的索引值 $H_j(I_{i,j})$; 标记值转发模块向逆直方图处理模块转发计算逆直方图时的标记值, 由于逆直方图计算速度不均匀且所需时间为两个图像列周期, 跟不上累计直方图处理模块的数据处理速度, 因此需要两个 FIFO 缓存标记值, 将每一列的标记值轮流存入这两个 FIFO, 然后两个 FIFO 分别将标记值传递

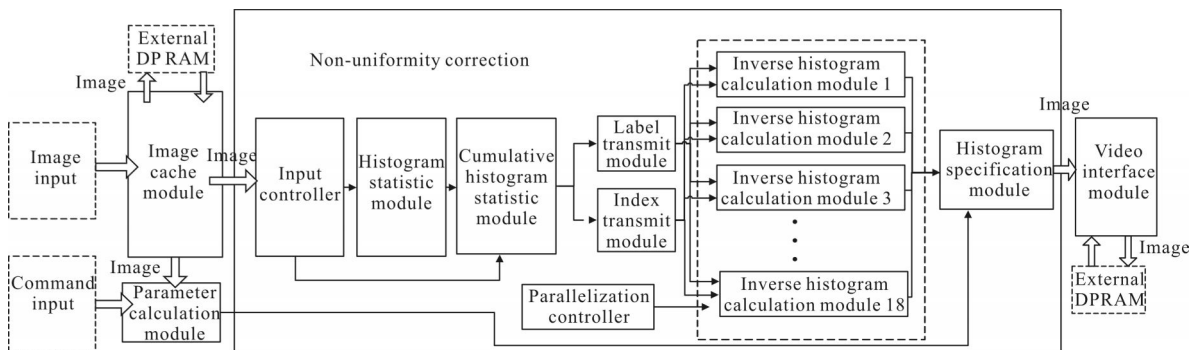


图 1 红外图像条带状非均匀性校正系统结构框图

Fig.1 Architecture of the IRFPA stripe non-uniformity system

给奇数与偶数编号的逆直方图计算模块进行处理;索引值转发模块向逆直方图处理模块转发该列的像素在累计直方图中相应的索引值;逆直方图处理模块完成逆直方图的计算更新并根据索引值输出 $\tilde{I}_{i,j}(k)$;并行控制模块给逆直方图处理模块提供更新逆直方图信息的使能信号;规范化模块根据逆直方图处理模块输出的 $\tilde{I}_{i,j}(k)$ 进行加权,完成对图像的直方图规范化处理。

3 实验结果

该系统在 Altera 公司的 EP4CE75 器件上实现,图像输入大小为 640×480,灰度级为 8。对真实的带有条带噪声的红外图像进行列条纹非均匀性校正,其结果如图 2 所示。图 2(a)为原始带有条带噪声的图像;(b)为 MIRE 软件计算输出结果;(c)为该系系统硬件仿真的输出结果($N=7, \sigma=5.6$)。

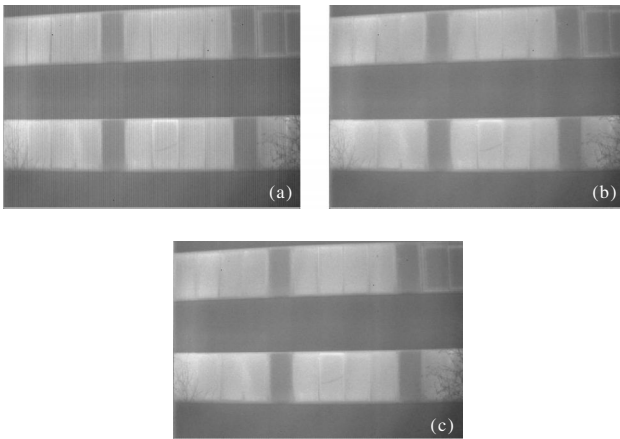


图 2 该系统对红外焦平面图像校正效果
Fig.2 Effect of proposed algorithms for IRFPA

在缺乏黑体辐射源或无法得到均匀辐射的情况下,通常使用图像的粗糙度系数 $\rho(f)^{[10]}$ 来验证非均匀性校正算法的校正效果,其计算公式如下:

$$\rho(f) = \frac{\|h_1 * f\|_1 + \|h_2 * f\|_1}{\|f\|_1}$$

式中: f 为红外图像; $h_1=[1, -1]$ 为水平模板; $h_2=h_1^T$ 为垂直模板;* 为离散卷积; $\|\cdot\|_1$ 为 L_1 范数。

如表 1 所示,文中算法硬件输出的结果与软件输出结果几乎完全一致,粗糙度相对原图降低了 50%,很好地校正了条带状非均匀性。此外,为了更加客观地评价该算法,笔者采用均方根误差(RMSE)^[3] 作为评判标准,它的值越小,则代表被评价的图像与

表 1 校正方法粗糙度比较表

Tab.1 Correction performance comparison using roughness

	Roughness $\rho(f)$
Image with stripe non-uniformity	0.079 28
Result of MIRE method	0.039 56
Result of proposed system	0.039 62

原图像的相似度就越高,其计算公式如下:

$$RMSE(Im_1, Im_2) = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^{row} \sum_{j=1}^{col} (Im_1(i,j) - Im_2(i,j))^2}{row \times col}}$$

式中: Im_1 为不含噪声的原始红外图像; Im_2 为处理后的图像; row 与 col 为图像的行与列的大小。首先在一幅没有受任何非均匀性污染的图像 Im_{og} (图 3(a))上叠加条带状非均匀性得到含有条带状非均匀性的图像 Im_n (图 3(b)),使之与真实红外图像(图 2(a))中含有的条带状非均匀性在视觉效果上相符。然后用该系统进行处理,得到校正后的图像 Im_{dn} ,并将 $RMSE(Im_{og}, Im_n)$ 与 $RMSE(Im_{og}, Im_{dn})$ 进行比较,结果如表 2 所示。图 3(c)为 CWFT 输出结果;图 3(d)为 MIRE 软件计算输出结果;图 3(e)为该系系统硬件仿真的输出结果($N=7, \sigma=3$)。

经过硬件处理后,图像的 RMSE 由 19.923 4 降到 1.893 4,与软件处理得到的结果 1.860 1 接近。

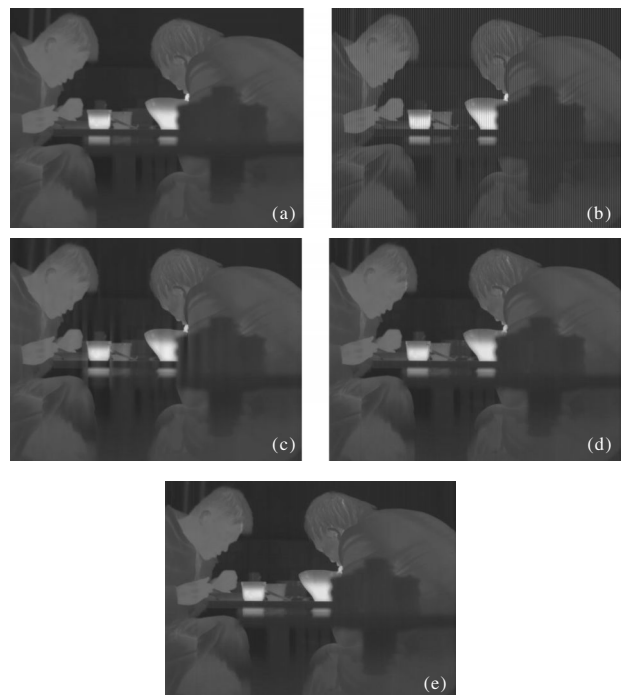


图 3 该系统对人工加噪的红外图像校正效果

Fig.3 Effect of proposed algorithms for image with simulated noise

表 2 校正方法 RMSE 比较表

Tab.2 Correction performance comparison using RMSE

	RMSE
Image with stripe non-uniformity	19.923 4
Result of CWFT method	2.424 4
Result of MIRE method	1.860 1
Result of proposed system	1.893 4

该系统的工作频率可以达到 139 MHz，主时钟为 120 MHz，文中硬件实现与软件处理时间对比如表 3 所示。

表 3 硬件实现与软件处理时间对比表

Tab.3 Speed in software versus hardware

	Altera EP4CE75F2917 System freq: 120 MHz	Visual C++ 2010 OS: Windows 7 64 bit CPU; Core i7-4700MQ 2.40 GHz(use one thread only)
Resolution	640×480	640×480
Speed	2.65 ms	4 743 ms

可以看到硬件实现相比软件实现速度上提升明显。FPGA 的资源使用情况如表 4 所示。

表 4 FPGA 资源使用情况表(仅计入 MIRE 处理模块的资源消耗)

Tab.4 FPGA resources utilization (MIRE processing module only)

	Resources utilization
Logic elements	2938(4%)
Total combinational functions	2740(4%)
Dedicated logic registers	1631(2%)
Total memory bits	111104(4%)
DSP 9×9	18(5%)

由上表可以看出:MIRE 处理模块资源占用量非常少, 可以作为一个子模块与其他算法处理模块集成到一个 FPGA 中, 增大了模块的实用性。

4 结 论

文中提出了一种基于场景的红外焦平面阵列非均匀性校正系统的 FPGA 实现, 该 FPGA 实现以经过计算结构优化的 MIRE 算法为核心, 处理效果显著且处理速度快、资源占用量小。作为一个独立模块

可嵌入到红外焦平面成像与处理系统中, 实现条带状非均匀性噪声的实时校正。

参考文献:

- [1] Hou Ting, Gu Guohua, Chen Qian. Strip noise suppression algorithm of infrared focal plane imaging frame by frame based on FPGA [J]. *Optics & Optoelectronic Technology*, 2012, 10(6): 77-81. (in Chinese)
侯婷, 顾国华, 陈钱. 基于 FPGA 的红外焦平面成像条纹噪声逐帧抑制算法的研究 [J]. 光学与光电技术, 2012, 10(6): 77-81.
- [2] Tendero Y, Gilles J, Landeau S, et al. Efficient single image non-uniformity correction algorithm [C]// SPIE Defense, Security, and Sensing. International Society for Optics and Photonics, 2010, 7834: 78340E-78340E-12.
- [3] Tendero Y, Gilles J. ADMIRE: a locally adaptive single-image, non-uniformity correction and denoising algorithm: application to uncooled IR camera [C]//SPIE Defense, Security, and Sensing. International Society for Optics and Photonics, 2012, 8353: 83531O-83531O-16.
- [4] Kautsky J, Nichols N K, Jupp D L B. Smoothed histogram modification for image processing [J]. *Computer Vision, Graphics, and Image Processing*, 1984, 26(3): 271-291.
- [5] Gong Z, Leng H, Cao J, et al. A new destriping method combining moment matching and interpolation in infrared images [C]//Information Science and Technology (ICIST), 2014 4th IEEE International Conference on IEEE, 2014: 410-413.
- [6] Gadallah F L, Csillag F, Smith E J M. Destriping multisensor imagery with moment matching [J]. *International Journal of Remote Sensing*, 2000, 21(12): 2505-2511.
- [7] Simpson J J, Gobat J I, Frouin R. Improved destriping of GOES images using finite impulse response filters [J]. *Remote Sensing of Environment*, 1995, 52(1): 15-35.
- [8] Mřnch B, Trtik P, Marone F, et al. Stripe and ring artifact removal with combined wavelet-Fourier filtering [J]. *Optics Express*, 2009, 17(10): 8567-8591.
- [9] Bouali M, Ignatov A. Estimation of detector biases in MODIS thermal emissive bands [J]. *Geoscience and Remote Sensing, IEEE Transactions on*, 2013, 51(7): 4339-4348.
- [10] Zhao J, Gao X, Chen Y, et al. Fast iterative adaptive nonuniformity correction with gradient minimization for infrared focal plane arrays [J]. *Infrared Physics & Technology*, 2014, 65: 87-93.