

## 双边滤波直方图均衡的非均匀性校正算法

贺明<sup>1,2,3</sup>, 王亚弟<sup>1</sup>, 贺菁<sup>2</sup>, 陈向军<sup>3</sup>, 路建方<sup>2,3</sup>, 寇广<sup>1</sup>, 沈鹏<sup>4</sup>

- (1. 中国人民解放军信息工程大学, 河南 郑州 450002;  
2. 防空兵学院 红外与成像制导技术实验室, 河南 郑州 450002;  
3. 上海蓝剑科技发展有限公司, 上海 201821; 4. 南昌陆军学院, 江西 南昌 330000)

**摘要:** 针对传统的红外焦平面自适应校正算法存在的目标退化和收敛时间较长等问题, 提出了一种融合双边滤波机制的直方图均衡红外焦平面非均匀性自适应校正方法。研究了红外焦平面响应特性, 建立红外焦平面阵列响应的统计模型, 根据模型首先计算单个像元的时域统计直方图, 接着融合双边滤波机制求取邻域像元时域直方图的均值, 最后利用该均值直方图均衡完成非均匀性校正。实际应用证明, 该算法具有校正精度高、收敛速度快、抑止目标退化能力强的优点。

**关键词:** 直方图均衡; 双边滤波; 红外焦平面; 自适应非均匀校正

**中图分类号:** TN219 **文献标志码:** A **文章编号:** 1007-2276(2013)10-2620-05

## Non-uniformity correction algorithm based on bilateral filter histogram equalization

He Ming<sup>1,2,3</sup>, Wang Yadi<sup>1</sup>, He Jing<sup>2</sup>, Chen Xiangjun<sup>3</sup>, Lu Jianfang<sup>2,3</sup>, Kou Guang<sup>1</sup>, Shen Peng<sup>4</sup>

- (1. The PLA Information Engineering University of the PLA, Zhengzhou 450002, China;  
2. Lab for Infrared and Imaging Navigation Technologies, Air Defense Forces Academy, Zhengzhou 450052, China;  
3. Shanghai Science and Technology Development Cp, Lt, Shanghai 201821, China;  
4. Nanchang Military Academy, Nanchang 330000, China)

**Abstract:** The traditional infrared focal plane adaptive correction algorithm has target degradation problem and its convergence time is too long. Aiming at this problem, infrared focal plane adaptive non-uniformity correction algorithm based on bilateral filter histogram equalization was proposed. By analyzing infrared focal plane response characteristics, a statistical model of the infrared focal plane array response was created. According to the model, a single pixel time-domain statistical histogram was calculated firstly, then bilateral filter was fused to get the mean of the neighborhood histogram, and non-uniformity correction was completed using the mean histogram equalization. According to the practical application, this algorithm has the advantage of the strong ability to eliminate the image degradation, fast convergence speed and high precision.

**Key words:** histogram equalization; bilateral filter; infrared focal plane arrays; adaptive non-uniformity correction

收稿日期: 2013-02-07; 修订日期: 2013-03-10

基金项目: “十二五”国家科技支撑计划课题(2011BAD21B03)

作者简介: 贺明(1981-), 男, 博士生, 主要研究方向是红外成像与识别系统方面的研究。Email: ming8797@gmail.com

导师简介: 王亚弟(1965-), 男, 教授, 博士生导师, 博士, 主要从事红外成像和人工智能方面的研究。Email: yadiwi@vip.371.net

## 0 引言

针对红外焦平面阵列存在的非均匀性,已有文献中提出的校正方法,主要分为两大类。一类是基于定标法<sup>[1]</sup>,这类方法具有较高的校正准确度,但需要黑体源,增加了系统的体积和成本,并且在标定过程中还需要中断系统成像,制约了该类算法的使用范围。另一类是基于场景的方法<sup>[1-3]</sup>,不需要参考源的情况下能够随着焦平面非均匀性的变化自适应地对图像进行校正。但在这类方法中绝大部分都需要估计图像的真实值,典型的如:Scribner 等提出了基于神经网络的非均匀校正算法,该算法将噪声图像的四邻域平均作为真实图像的估计值,并且用于训练神经网络,但前提是固定图案噪声能够被四邻域平均所消减,否则迭代将会发散;Hardie 等提出了基于运动补偿时域平均(MCTA)的校正算法,该算法利用运动补偿平均后的图像来估计真实场景,但此时必须保证同一场景点要有充分多的探测单元在不同时间观察过,否则校正效果也会不理想。

文中提出的一种双边滤波直方图均衡红外焦平面自适应校正算法,突破传统自适应校正算法研究思路,引入中值直方图均衡思想,对焦平面像素邻域进行时域直方图中值均衡,从而校正了由于焦平面非均匀性引起邻域像素灰度差异,达到了消除焦平面非均匀性目的。另外为了避免由于图像静止及边缘像素引起的目标边缘退化和伪像,在直方图均衡中加入双边滤波机制,保护了目标细节,抑制了目标边缘的退化和伪像。实验表明,该算法能有效地抑止目标退化,具有实时性强、计算复杂度低易于实现等优点。

## 1 双边滤波直方图均衡非均匀性校正算法

### 1.1 红外焦平面阵列响应的统计模型

通常采用线性模型来表示红外焦平面的响应方程<sup>[4]</sup>,具体表达式为:

$$y = A_{ij}x + B_{ij} + v \quad (1)$$

式中: $A_{ij}$ 为第 $(i, j)$ 焦平面像素的增益值; $B_{ij}$ 为第 $(i, j)$ 焦平面像素的偏置值; $x$ 为输入辐射量; $y$ 为输出灰度值; $v$ 为高斯白噪声。假设输入辐射量是随机变量,在焦平面工作的一定时间内,焦平面中每个像素接收外界辐射能的概率相等。工程实践中,由于很难

做到焦平面中每个像素都和场景保持运动状态,因此只能假设局部像素(通常为 $3 \times 3$ 区间)辐射量相等,定义其输入辐射量密度函数是 $f(x)$ ,忽略高斯白噪声,通过公式(1)可以推导出焦平面像素输出灰度值的概率密度函数表达式为:

$$\rho_j(y) \approx A_{ij}f(x) \quad (2)$$

式中: $\rho_j(y)$ 为焦平面像素输出灰度值的密度函数。从公式(2)可以看出,只要把像素输出灰度的密度函数转化成相同的密度函数,那么就实现了非均匀校正。

### 1.2 红外焦平面阵列的时域直方图

焦平面每个像素的输出灰度密度函数可以用像素输出灰度随时间变化的直方图来表示。把红外焦平面中第 $(i, j)$ 像素的时域直方图定义为一定周期内输出灰度值在灰度动态范围内出现的频数。表达式为:

$$H = h_{ij}(y|t) \quad (3)$$

式中: $t$ 为观察周期; $h_{ij}$ 表示在 $t$ 周期内灰度 $y$ 出现的频数。如果 $t$ 足够长,则它与 $\rho_j(y)$ 存在如下关系:

$$\lim_{t \rightarrow \infty} \frac{h_{ij}(y|t)}{\int h_{ij}(y|t) dy} = \rho_j(y) \quad (4)$$

因此该直方图可以准确地反映焦平面中像素输出灰度密度函数 $\rho_j(y)$ 。

### 1.3 基于中值时域直方图均衡的非均匀校正

通常红外图像像素单元间灰度是连续的,那么从根据大数定律,如果样本足够大,相邻像素间成像差别很小,这意味着两相邻像素在时间域直方图可以认为是相等的。根据这个推理,把单个探测单元的响应密度函数规定化到邻域焦平面像素响应密度函数的中间值,从而实现非均匀校正。

定义:中值灰度密度函数 $\rho_m(y)$ 为焦平面中邻域像素灰度密度函数的平均值,则:

$$\rho_m(y) = \frac{1}{8} \sum_{i=1}^2 \sum_{j=1}^2 \rho_{ij}(y) \quad (5)$$

设定探测元的输出构成的中值直方图记为 $h(y)$ :

$$h(y) = \sum_{i=1}^2 \sum_{j=1}^2 h_{ij}(y) \quad (6)$$

可以证明:

$$\lim_{t \rightarrow \infty} \frac{h(y)}{\int h(y) dy} = \rho(y) \quad (7)$$

因此中值响应密度函数对应于所有焦平面像素响应值形成的直方图 $h(y)$ 。将中值化直方图作为每

个像元 $(i, j)$ 新的直方图,均衡即完成非均匀校正。

以上讨论焦平面像素模型及其统计特性时,没有考虑非均匀性漂移的影响。事实上,由于红外焦平面阵列的非均匀性会随时间变化而发生漂移,从而导致成像质量下降。特别是不带 TEC 的非制冷探测器,根据实验,ULSI 公司 UL03362 焦平面稳定工作时间需要 1 h,而 FLIR 公司的 tau320 机芯稳定工作时间为 1.5 h。因此,焦平面非均匀性的温度漂移随时间变化比较平缓。

为了避免非均匀性温漂对算法的影响,对焦平面像素输出灰度的直方图统计时间进行评估,把统计时间控制在不存在温漂的时间段内。但是又不能太短,必须保证局部像素辐射量相同。通过大量实验,对于上述焦平面取每段时间为 256 帧图像可以有效克服温漂影响。

#### 1.4 基于双边滤波机制消除目标边缘的退化和伪像

利用上述算法在红外焦平面成像机芯中实验,笔者发现当场景静止,图像边缘有退化问题。分析原因是由于直方图均衡算法只是简单的平均邻域内所有焦平面像素的直方图,没有考虑图像边缘灰度突变的影响。

在实际场景图像中,灰度差较小的同一灰度区域,直接利用邻域平均所有焦平面像素直方图可以很好逼近探测元输入辐射直方图,但是对于灰度差较大的图像边缘,由于含有图像边缘信息,直接平均所有焦平面像素直方图会导致逼近焦平面像素输入辐射直方图误差较大。这种情况如果出现在场景运动中,图像边缘的位置不断变化,独立的逼近误差不会对直方图统计带来影响,但当场景静止时,误差会不断累积,最终影响直方图的统计精度。

基于直方图与双边滤波<sup>[5]</sup>融合机制来消除目标边缘退化和伪像:

$$h(y) = \sum_{i=1}^2 \sum_{j=1}^2 \frac{h_{ij}(y)w_s(i, j)w_r(i, j)}{w_s(i, j)w_r(i, j)} \quad (8)$$

$$w_s(i, j) = e^{-\frac{|i-k|^2 + |j-l|^2}{2\sigma_s^2}} \quad (9)$$

$$w_r(i, j) = e^{-\frac{|g(i, j) - g(k, l)|^2}{2\sigma_r^2}} \quad (10)$$

式中: $g(i, j)$ 为第 $(i, j)$ 焦平面像素的灰度值; $g(k, l)$ 为中心点为 $(k, l)$ 探测元的灰度值; $y$ 为直方图灰度值; $h(y)$ 为直方图; $h_{ij}(y)$ 为第 $(i, j)$ 个邻域焦平面像素

直方图。 $s$ 为中心点为 $(k, l)$ 的九邻域空间。 $w_r(i, j)$ 为灰度相似度因子,随着灰度差的增大而减小。 $w_s(i, j)$ 为空间邻近度因子,随着与中心点之间欧几里德距离的增加而减小。在图像平缓的区域,邻域内灰度相差不大,双边滤波转化为高斯低通滤波器;在灰度突变的区域,滤波器利用边缘像元附近灰度值相近像元直方图平均替代原值。因此,双边滤波器既平滑了直方图,又保持了图像边缘点的中值直方图。如图 1 所示,证明双边滤波机制可以很好的消除图像静止或边缘引起的图像退化和伪像。图 1(a)为原图,图 1(b)为处理后图像。

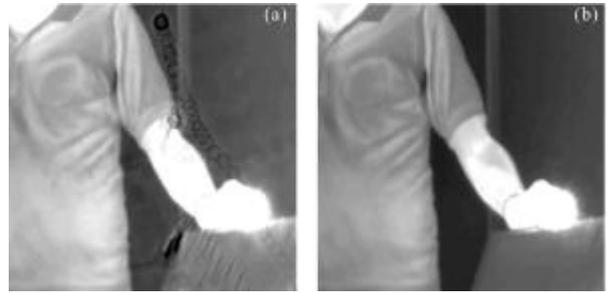


图 1 目标边缘退化和伪像消除效果

Fig.1 Edge degradation and ghosting artifacts removal

## 2 校正效果评价与实验

### 2.1 非均匀性校正效果评价方法

为了评价文中校正算法的校正效果,采用红外焦平面非均匀性国标定义指标<sup>[5-6]</sup>:

$$U = \frac{1}{\bar{Y}(\varphi)} \sqrt{\frac{1}{pm} \sum_{i=1}^p \sum_{j=1}^m (Y_{ij}(\varphi) - \bar{Y}(\varphi))^2} \quad (11)$$

式中: $\bar{Y}(\varphi)$ 为焦平面中所有像素的平均响应值; $Y_{ij}(\varphi)$ 为第 $(i, j)$ 像素的响应值; $p$ 和 $m$ 分别表示图像水平和垂直方向上的像素数。

### 2.2 实验结果与分析

为验证文中校正算法的性能,在自主研发的非制冷红外焦平面成像仪(探测器多晶硅,镜头孔径 75 mm/f1.0,焦平面像素数 384×288,像元尺寸 25 μm,工作波段 8~14 μm,成像帧频为 50 帧/s)中采用文中算法试验。实验环境为北方春季夜晚(晴,温度 21℃,相对湿度 36%,微风小于 3 级),目标场景是天空冷背景下的飞机亮目标以及云层。

图 2 为五种不同校正算法的比较,由于成像仪与飞机目标随动,飞机目标表现静止于图像中间位

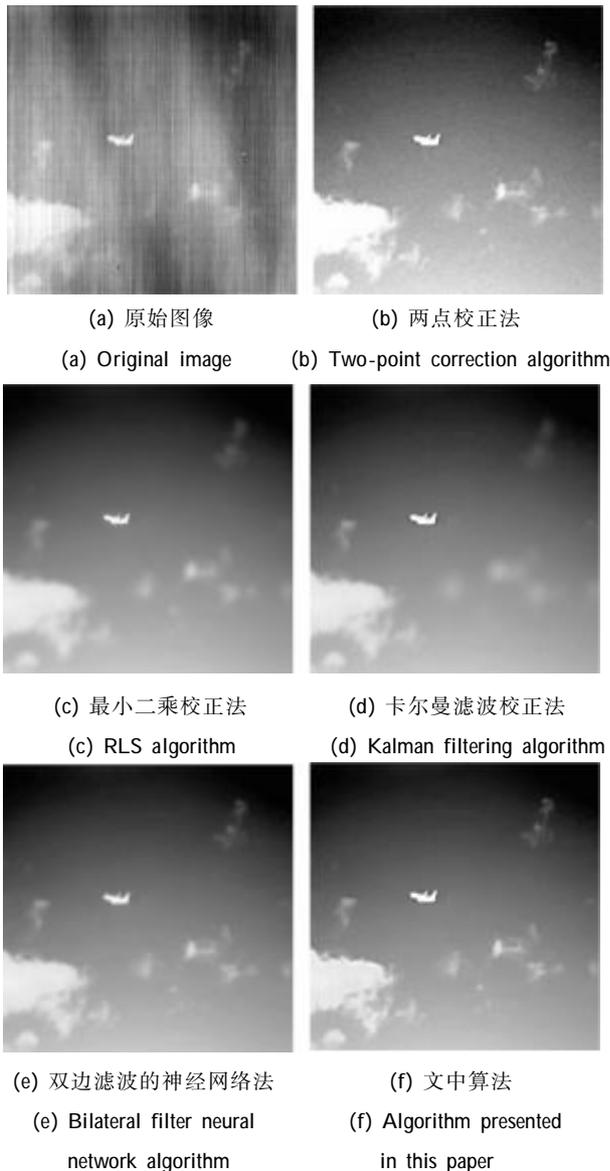


图 2 不同算法校正比较图

Fig.2 Comparison of different correction algorithms

置,自适应校正算法在 8 s 左右全部收敛,因此选取了该序列图中第 9 s 中的图像,代数校正和神经网络算法在该图像都表现出了图像退化现象。图 2(a)为原始图像;图 2(b)为现场两点校正后的图像。此方法校正效果较好,但由于有限字长效应,图像中有校正残余,呈现一定的颗粒状固定噪声。图 2(c)为最小二乘算法<sup>[6]</sup>的校正结果,由于弱目标的估计误差,云层有退化现象。图 2(d)为卡尔曼滤波<sup>[7]</sup>校正结果,收敛速度稍慢,飞机目标较清晰,但是图像中的云层退化严重。图 2(e)为基于双边滤波的神经网络算法<sup>[8-9]</sup>校正结果。由于加入了双边滤波机制,图像边缘受到了保护,但由于神经网络的计算精度,导致图像整体有

一定程度退化。图 2(f)为文中校正算法的处理结果,算法利用直方图均衡对单个像元与邻域像素灰度偏差进行精确修正,不存在运算和估计精度问题,结合双边滤波机制对目标边缘进行了有效保护,得到校正后图像目标细节突出,性噪比高。

通过对表 1 分析比较发现,两点校正计算简单,可以得到较好校正效果,但算法需要定标的黑体源,操作不便。最小二乘法校正算法和卡尔曼滤波校正算法,由于对真实场景计算估算精度较高,强目标退化得到很好抑制,弱目标退化较明显,计算复杂,不易硬件实现。双边滤波的神经网络法计算量较小,收敛速度快,但图像整体都存在轻微退化现象。文中算法能有效抑制各种目标退化,同时可以相对提高校正精度,控制剩余非均匀性,另外在算法收敛时间方面(如图 3 所示)优于另外 3 种方法。

表 1 5 种算法综合性能比较

Tab.1 Performance comparion of five algorithms

	U	Degradation	Pixels compensation	Time to arrive convergence/s
Two-point correction algorithm	5.12%	No degradation	Manual	0
RLS algorithm	9.74%	Degradation	Auto	7.2
Kalman filtering algorithm	7.98%	Degradation	Auto	11.13
Bilateral filter neural network algorithm	7.42%	Little degradation	Auto	7.96
Algorithm presented in this paper	4.67%	No degradation	Automatically	2.34

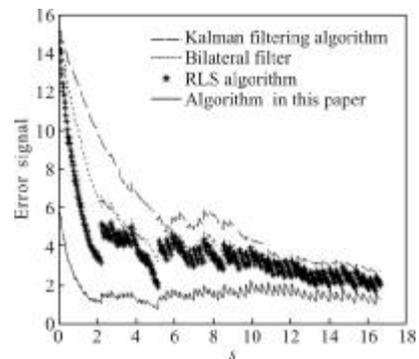


图 3 不同算法收敛效果对比

Fig.3 Convergence comparion of four adaptive algorithms

### 3 结 论

文中从红外焦平面响应的线性模型出发,通过分析焦平面局部辐射量在时间上的分布函数,推导了一种新的红外焦平面的非均匀性校正方法,提出输出灰度直方图均衡结合双边滤波的自适应非均匀校正算法。通过真实的红外图像数据实验测试,采用非均匀性国标评价校正后的效果,证明了算法的有效性。采用焦平面输出灰度直方图是算法的特点,加入双边滤波机制是算法的突破点,通过这种机制使算法对场景没有特别要求,易于工程应用。

#### 参考文献:

- [1] Seribner D A, Sakady K A. Nonuniformity correction for stating IR focal plane arrays using scene-based techniques [C]//Infrared Detectors and Focal Plane Arrays SPIE, 1990, 1308: 224-233.
- [2] Scribner D A. Adaptive retina-like preprocessing for imaging detector arrays[C]//IEEE, 1993: 1955-1960.
- [3] Liu Yongjin, Zhu Hong, Zhao Yigong. Nonuniformity correction algorithm of infrared focal plane arrays based on particle filters [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2008, 37(6): 945-950. (in Chinese)  
刘永进, 朱红, 赵亦工. 基于粒子滤波的红外焦平面阵列非均匀校正算法[J]. *红外与激光工程*, 2008, 37(6): 945-950.
- [4] Delon J. Midway image equalization [J]. *Journal of Mathematical Imaging and Vision*, 2004, 21(2): 119-134.
- [5] Li Qing, Liu Shangqian, Wang Binjian, et al. New nonuniformity correction algorithm for IRFPA based on neural network [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2007, 36(3): 342-344. (in Chinese)  
李庆, 刘上乾, 王炳健, 等. 基于神经网络的 IRFPA 非均匀性校正新算法[J]. *红外与激光工程*, 2007, 36(3): 342-344.
- [6] Niu Zhaodong, Wang Weihua, Jiang Weidong, et al. Scene-based statistical algorithms for nonuniformity correction of infrared images [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2005, 34(3): 261-265. (in Chinese)  
牛照东, 王卫华, 姜卫东, 等. 场景统计类红外图像非均匀性校正算法研究 [J]. *红外与激光工程*, 2005, 34(3): 261-265.
- [7] Zhang Junju, Chang Benkang, Qian Yunsheng, et al. Uncooled infrared imaging system based on FPGA [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2008, 37(4): 579-581. (in Chinese)  
张俊举, 常本康, 钱芸生, 等. 基于 FPGA 的非制冷红外热成像系统研究 [J]. *红外与激光工程*, 2008, 37 (4): 579-581.
- [8] Niu Zhaodong, Wang Weihua, Jiang Weidong. Scene-based statistical algorithms for nonuniformity correction of infrared images [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2005, 34(3): 261-265. (in Chinese)  
牛照东, 王卫华, 姜卫东, 等. 场景统计类红外图像非均匀性校正算法研究[J]. *红外与激光工程*, 2005, 34(3): 261-265.
- [9] Hou Hekun, Zhang Xin. Recent development of infrared focal plane arrays nonuniformity corection [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2004, 26(3): 5-10. (in Chinese)  
侯和坤, 张新. 红外焦平面阵列非均匀性校正技术的最新进展[J]. *红外与激光工程*, 2004, 26(3): 5-10.