

文章编号:1002-2082(2017)02-0304-05

# 一种基于恒定统计的红外图像非均匀性校正算法

孟思岐,任侃,路东明,顾国华,陈钱

(南京理工大学 电子工程与光电技术学院, 江苏南京 210094)

**摘要:**对红外焦平面阵列成像系统而言,基于场景的非均匀校正技术是处理固定图案噪声的关键技术。现有的非均匀校正算法主要被收敛速度和鬼像问题所限制。提出一种新的基于恒定统计算法的自适应场景非均匀校正技术。利用红外图像序列的时域统计信息结合提出的 $\alpha$ 修正均值滤波来估计探测器的参数,通过减少样本的渐进方差估计,完成成像系统的非均匀性校正。通过模拟和真实的非均匀性图像对算法的性能进行评价。实验结果表明,在继承恒定统计算法快速收敛的同时,图像峰值信噪比较恒定校正法及常系数 $\alpha$ 校正算法分别有44.5%和32.9%的提升,图像鬼像问题有明显改善。

**关键词:**红外焦平面阵列;非均匀性校正;恒定统计;修正均值滤波

中图分类号:TN216

文献标志码:A

doi:10.5768/JAO201738.0206002

## A non-uniformity correction algorithm of infrared image sequences based on constant-statistics

Meng Siqi, Ren Kan, Lu Dongming, Gu Guohua, Chen Qian

(School of Electronic and Optical Engineering, Nanjing University of Science and Technology, Nanjing 210094, China)

**Abstract:** For infrared focal-plane array imaging system, scene-based non-uniformity correction is key technique to deal with fixed pattern noise. Existing algorithms are mainly restricted by convergence speed and ghosting artifacts. In this paper, a novel adaptive scene-based non-uniformity correction technique is presented, which is based on constant-statistics method (CS). Utilizing temporal statistics of infrared image sequences, the proposed method applies an alpha-trimmed mean filter to estimate detector parameters and minimize sample asymptotic variance estimate. Performance of proposed technique is evaluated by simulation and real non-uniformity image. Experimental results show the proposed method inherits characteristics of fast convergence of CS method and increases peak signal to noise ratio by 44.5% and 32.9% respectively, and image ghost problem is improved obviously.

**Key words:** focal-plane array; non-uniformity correction; constant-statistics; alpha-trimmed mean filter

收稿日期:2016-10-17; 修回日期:2016-11-17

基金项目:江苏省自然科学基金(BK20130769)

作者简介:孟思岐(1991—),男,江苏徐州人,硕士研究生,主要从事图像处理与模式识别方面的研究工作。

E-mail:836251591@qq.com

通信作者:任侃(1983—),男,江苏南京人,研究生导师,主要从事图像视频处理与人机交互界面设计的研究工作。

E-mail:k.ren@njust.edu.cn

## 引言

由于红外焦平面阵列具有高分辨率、高帧频以及良好的探测能力,故而迅速成为红外成像技术的主流设备。然而,由于制造工艺的限制,使得探测器阵列的各个单元响应度不一致,导致叠加在图像上的固定图案噪声,严重影响了红外焦平面阵列的成像质量,降低了空间分辨率、探测范围、温度分辨率以及辐射测量的性能。所有这些问题限制了成像系统的最终显示效果,因此有必要进行非均匀校正。

目前应用于红外焦平面阵列非均匀性校正的算法分为两类<sup>[1]</sup>:1)基于定标的非均匀性校正技术;2)基于场景的非均匀性校正技术。第一类基于定标的方法原理简单,易于硬件化且能够获得高的校正准确率。但是这种方法需要实际的校准源作为参考,且受限于一段时间后参数的漂移问题。第二类基于场景的校正方法利用场景信息,避免了定标的方法的缺点<sup>[2]</sup>,是现在主要的研究方向。目前已出现多种基于场景的红外图像非均匀校正算法,例如高通滤波、神经网络、恒定统计等。对于运动场景,各算法都能在一定程度上校正非均匀性,但都存在“鬼像”问题<sup>[3]</sup>。

基于场景的方法中,Scribner<sup>[4]</sup>等人相继提出了基于场景的时域高通滤波算法和基于人的视觉神经机制的神经网络非均匀校正算法。时域高通滤波算法计算简单、易于实现,但是缺乏增益系数的校正同时会带来鬼像现象。国内学者钱等人<sup>[5]</sup>提出了消除鬼像的方法,该方法基于时域高通滤波通过统计图像中的高频部分,计算校正系数。左等人<sup>[6]</sup>结合双边滤波来划分输入帧,获取固定图案噪声更准确的估计,相比线性滤波,它能够同时校正增益和偏置系数,但仍然存在鬼像问题。Harris等人<sup>[7]</sup>提出了恒定统计校正算法,该方法假设每个探测器的辐射输入是均匀的,且通过一个变化的阈值来消除鬼像。Sergio N. Torres<sup>[8]</sup>将卡尔曼滤波应用在非均匀校正上,然而该方法要求场景遵循高斯分布。

文章中提出一个新的自适应场景非均匀校正方法。该方法基于恒定统计算法,对每个像素的统计特性和鬼像产生的原因进行分析,其基本的分布不满足恒定统计的假设<sup>[9]</sup>,如对称性。因为高斯分布不能描述每个像素数据的统计特性,我们使用混合分布模型观察对鬼像产生的影响。然

后利用红外图像序列的时域统计结合提出的 $\alpha$ 修正的均值滤波来估计探测器的参数,不使用传统的中值滤波。算法选择 $\alpha$ 均值估计来尽量减少样本的渐进方差估计。此外, $\alpha$ 修正的均值滤波可以检测非对称点和修改异常值。通过对模拟的非均匀性和实际图像的实验和理论分析,结果表明,文中算法能够显著提高非均匀性校正效果,有效地减少了鬼像现象。

## 1 非均匀校正算法原理

### 1.1 传统的恒定统计算法原理

通过线性观察模型<sup>[10]</sup>,对每个探测器用增益和偏置来描述一个自变量到一个因变量的转换。对于给定的 $n(n=1,2,3,\dots)$ ,第 $(i,j)$ 焦平面探测元所接收到的辐射度为 $x_{i,j}(n)$ ,其输出 $y_{i,j}(n)$ 表示如下:

$$y_{i,j}(n) = g_{i,j}(n)x_{i,j}(n) + o_{i,j}(n) \quad (1)$$

式中 $g_{i,j}(n)$ 和 $o_{i,j}(n)$ 分别是 $n$ 时刻第 $(i,j)$ 焦平面探测元的增益和偏置。假设每个像素的时间平均和标准差是恒定的,恒定统计算法产生一个零均值,单位平均偏差信号如下:

$$\begin{cases} g=s \\ o=m \end{cases} \quad (2)$$

(1)式可表示为

$$x_{i,j} = \frac{y_{i,j} - m_{i,j}}{s_{i,j}} \quad (3)$$

每个像素的平均值和平均偏差,可以通过以下递归公式来计算:

$$\begin{cases} \hat{m}_{i,j}(n) = (1-\lambda)\hat{m}_{i,j}(n-1) + \lambda y_{i,j} \\ \hat{s}_{i,j}(n) = (1-\lambda)\hat{s}_{i,j}(n) + \lambda |y_{i,j} - \hat{m}_{i,j}(n)| \end{cases} \quad (4)$$

在原始恒定统计校正算法中,指数 $\lambda=1/n$ ,并且用一个固定 $\lambda$ 值来更好地估计增益和偏置的突变。

恒定统计算法的主要缺点是对图像校正后的鬼像问题。其根本原因是不同像素间的分布差异。如图1显示的是某像素在1 000帧间的一个典型分布情况。一个像素分布通常是非对称的,且分布几乎很少严格遵循高斯分布。如果场景静止一段时间,且如图1当像素大小靠近255,恒定统计算法对参数的估计会严重偏离正常值,导致鬼像产生。静止像素偏离越多,产生鬼像现象越严重。

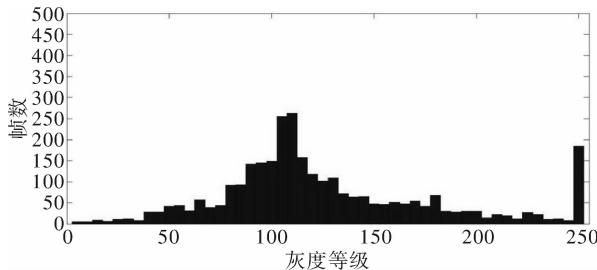


图 1 1000 帧单个像素直方图

Fig. 1 Histogram map of a single pixel over 1000 frames

## 1.2 文中算法

$L$  帧的观察数据长度是  $\{y_{i,j}(n), y_{i,j}(n-1), \dots, y_{i,j}(n-L+1)\}^{[11]}$ , 该序列的统计量是  $\{y_{i,j}^{(1)}(n), y_{i,j}^{(2)}(n), \dots, y_{i,j}^{(L)}(n)\}$ 。每个像素的平均值和平均偏差由  $\alpha$  修正的均值滤波给出如下:

$$\begin{cases} \hat{m}_{i,j}(n) = \frac{1}{L-2[\alpha L]} \sum_{l=[\alpha L]+1}^{L-[\alpha L]} y_{i,j}^{(l)}(n) \\ \hat{s}_{i,j}(n) = \frac{1}{L-2[\alpha L]} \sum_{l=[\alpha L]+1}^{L-[\alpha L]} (y_{i,j}^{(l)}(n) - \hat{m}_{i,j}(n)) \end{cases} \quad (5)$$

式中  $[\cdot]$  表示取较大的整数, 且  $0 \leq \alpha \leq 0.5$ 。对于滤波而言,  $\alpha$  是决定性因素。当  $\alpha$  接近于 0 时, 滤波表现如正常的恒定统计非均匀算法; 当  $\alpha$  接近于 0.5, 表现如一个时域中值滤波。

为了选择最优的  $\alpha$ , 我们采用最小化渐进方差估计的方法来选择  $\alpha_{opt}$ ,

$$\alpha_{opt} = \operatorname{argmin} V(\alpha) \quad (6)$$

式中渐进方差  $V(\alpha)$  可由下式计算得:

$$V_{i,j}(n, \alpha) = \frac{1}{(1-2\alpha)^2} \left\{ \frac{1}{n} \sum_{l=[\alpha L]+1}^{L-[\alpha L]} (y_{i,j}^{(l)}(n) - m_{i,j}(n, \alpha))^2 + \alpha (y_{i,j}^{[\alpha L]+1}(n) - m_{i,j}(n, \alpha))^2 + \alpha (y_{i,j}^{L-[\alpha L]}(n) - m_{i,j}(n, \alpha))^2 \right\} \quad (7)$$

为了最小化样本渐进方差估计  $V_{i,j}(n, \alpha)$ , 自适应  $\alpha$  修正均值滤波通过一个递归程序来选择最优的  $\alpha_{opt}(n)$ 。对于每一帧, 通过  $\alpha_{opt}(n-1) - \frac{1}{L}$ ,  $\alpha_{opt}(n-1)$ ,  $\alpha_{opt}(n-1) + \frac{1}{L}$  来更新  $\alpha$ , 如下所示:

$$\alpha_{opt}(n) = \left\{ \operatorname{argmin} V(n, \alpha) \mid \alpha = \alpha_{opt}(n-1) - \frac{1}{L}, \alpha_{opt}(n-1), \alpha_{opt}(n-1) + \frac{1}{L} \right\} \quad (8)$$

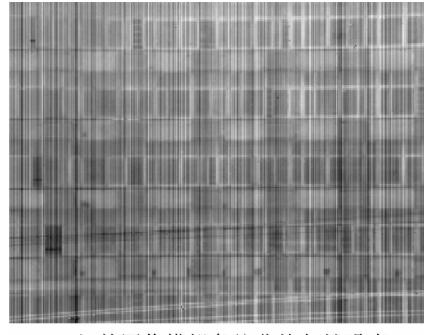
$n$  时刻  $\alpha_{opt}$  由 3 个值  $\alpha_{opt}(n-1) - \frac{1}{L}$ ,  $\alpha_{opt}(n-1)$ ,  $\alpha_{opt}(n-1) + \frac{1}{L}$  计算得到, 从而达到最小化渐进

方差估计  $V_{i,j}(n, \alpha)$  的目的。

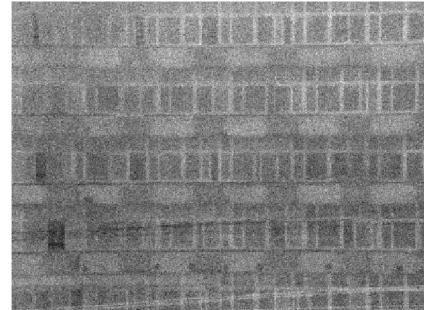
## 2 算法评价

### 2.1 模拟红外图像序列分析

通过模拟红外图像序列的固定图案噪声, 对文中算法进行效果分析。对 2 000 帧均匀红外图像序列叠加非均匀性噪声, 使用一个固定均值, 方差为 0.05 的高斯分布来合成增益, 使用一个均值为 0, 方差为 15 高斯分布来合成偏置进而模拟非均匀性噪声。图 2 显示的是两种模拟的非均匀性噪声: 一个是条纹非均匀性噪声, 另一个是高斯分布的非均匀性噪声。



(a) 红外图像模拟条纹非均匀性噪声



(b) 红外图像模拟高斯分布的非均匀性噪声

图 2 均匀图像模拟不同的非均匀性噪声

Fig. 2 Clean image corrupted with different simulated non-uniformity

为了评价文中算法的性能, 我们使用均方根误差 (root-mean-square error, RMSE) 定量地评价真实红外图像和校正后的图像的执行效果。RMSE 的定义如下:

$$\text{RMSE} = \frac{1}{MN} \left[ \sum_{i=1}^N \sum_{j=1}^M (I_{i,j} - \hat{I}_{i,j})^2 \right]^{\frac{1}{2}} \quad (9)$$

式中:  $I_{i,j}$  是真实红外图像的像素值,  $\hat{I}_{i,j}$  为经过非均匀校正后的图像像素值;  $M, N$  分别表示图像水平和垂直方向的像素数量。RMSE 是原图像和校正后图像的一个总体评价指标。获得的峰值信噪比定义如下:

$$PSNR = 20 \lg \left( \frac{2^b - 1}{RMSE} \right) \quad (10)$$

式中  $b$  代表每个像素的比特数,这里为 14。模拟的非均匀性红外图像序列的峰值信噪比为 30 dB。PSNR 的值越大,表示效果越好。

实验包含 3 种非均匀校正算法:传统的恒定统计算法,文中提出的算法设置  $\alpha$  为常数为 0.2,以及文中提出的自适应  $\alpha$  算法。恒定统计算法的窗口参数为  $\lambda = 0.01 (L \approx 100)$ 。3 种算法峰值信噪比(PSNR)演化过程如图 3 所示。

表 1 3 种校正方法的峰值信噪比

Table 1 Peak signal to noise ratio of correction algorithms

方法	信噪比						
	50	100	200	400	600	800	1 000
恒定统计	42.315 3	62.840 7	66.617 4	69.737 3	65.960 6	69.901 5	53.645 3
常系数 $\alpha$	51.182 3	55.451 6	79.261 1	87.471 3	72.036 1	63.825 9	59.556 7
自适应 $\alpha$	53.973 7	64.647 0	94.203 6	121.626	87.307 1	89.113 3	111.938

根据(9)式和(10)式,针对非均匀红外图像序列,对 3 种方法下相同帧号的峰值信噪比值结果如表 1 所示。

从表中数据结合上图曲线可以直观地看到,文中算法较其他校正方法有更快的收敛速度和更高的峰值信噪比。在大多数情况下,文中算法峰值信噪比高于其他传统的算法。使用自适应  $\alpha$  系数的方法明显好于常系数  $\alpha$  法和传统的恒定统计方法。图 4 为校正方法对模拟红外图像的处理效果,能够看到经过文中算法对输入数据的修正,能够得到一个理想的非均匀校正结果。

为了将文中算法和传统算法作对比,图 4 为基于场景算法的模拟非均匀性校正结果图。图 4(a)为均匀的图像,图 4(b)~(d)是模拟非均匀性图像经过 3 种不同算法校正的结果。从图中可以看到,经过传统方法校正后的图像仍然有很多鬼像,常系数  $\alpha$  方法获得了一个较好的结果,而文中提出的自适应系数  $\alpha$  获得了最好的效果且几乎没有鬼像存在。

## 2.2 真实红外图像序列分析

传统的恒定统计非均匀校正方法和文中提出的改进算法应用在真实红外图像序列上。红外图像数据采用  $320 \times 256$  HgCdTe 焦平面阵列得到,

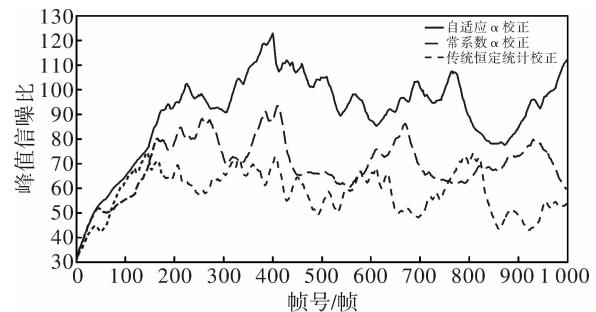


图 3 1 000 帧间 3 种非均匀校正方法的 PSNR

Fig. 3 PSNR of three non-uniformity correction algorithms over 1 000 frames

波长范围  $3 \mu\text{m} \sim 5 \mu\text{m}$ ,帧频 25 F/S。传统恒定统计算法使用窗口参数  $\lambda = 0.008 (L = 125)$ 。可通过查看视频序列,可视化地评价校正效果以及验证是否有鬼像存在,图 5 分别为原始图像,传统恒定统计算法校正后图像,文中提出的常系数  $\alpha$  算法校正后图像和提出的自适应  $\alpha$  算法校正后图像。

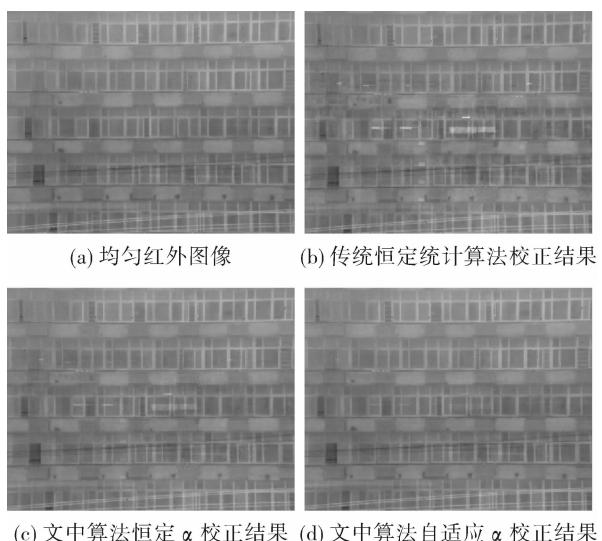


图 4 基于场景算法的模拟非均匀性校正结果

Fig. 4 Result of simulated non-uniformity correction with three SBNUC algorithms

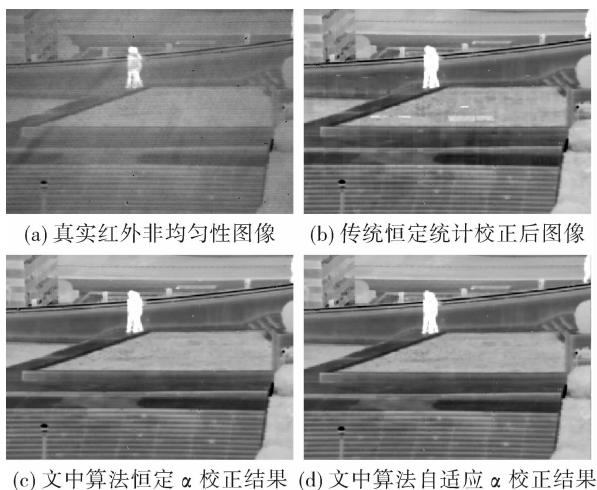


图 5 3 种基于场景校正方法对真实非均匀性校正结果

Fig. 5 Results of true nonuniformity correction with three SBNUC algorithms

由上图对真实红外图像序列校正效果可以看到,自适应  $\alpha$  校正算法能够较好补偿固定图案噪声,整个视频序列效果较好。而且从图像中也可以看到使用文中自适应  $\alpha$  校正算法,对去除鬼像问题有较好的处理效果。

### 3 结论

本篇文章提出一种对非均匀性校正方法的改进措施。文中算法利用红外图像序列时域统计的信息,利用自适应  $\alpha$  修正均值滤波代替传统的中值滤波,来估计探测器的参数。相比其他非均匀校正技术,文中算法继承了恒定统计算法快速收敛的特性,而且具有更强的鲁棒性,几乎没有鬼像。模拟的和真实的红外图像实验显示,文中算法能够有效地补偿非均匀性和减少鬼像问题。

### 参考文献:

- [1] Ren Jianle, Chen Qian, Gu Guohua, et al. Stripe nonuniformity correction for infrared-focal plane arrays[J]. Journal of Applied Optics, 2013, 42(8): 1987-1990.
- 任建乐,陈钱,顾国华,等.红外焦平面阵列条纹非均匀性校正方法[J].应用光学,2013,42(8),1987-1990.
- [2] Li Qing, Liu Shangqian, Lai Rui, et al. A scene-based nonuniformity correction algorithm of IRFPA [J]. Acta Photonica Sinica, 2006, 35(5):720-723.
- 李庆,刘上乾,赖睿,等.一种基于场景的红外焦平面阵列非均匀校正算法[J].光子学报,2006,35(5):720-723.
- [3] Ren Tingting, Zhang Zhijie. A scene-based non-uniformity correction algorithm for infrared image[J]. Optics & Optoelectronic Technology, 2014, 12(2): 136-138.
- 任婷婷,张智杰.一种基于场景的红外图像非均匀性校正算法[J].光学与光电技术,2014,12(2):136-138.
- [4] Scribner D, Sarkady K, Krueger M, et al. Adaptive nonuniformity correction for IR focal plane arrays using neural networks [J]. SPIE, 1991, 1541: 100-109.
- [5] Qian W, Chen Q, Gu G. Space low-pass and temporal high-pass nonuniformity correction algorithm [J]. Optical Review, 2010, 17(1): 24-29.
- [6] Zuo C, Chen Q, Gu G, et al. New temporal high-pass filter nonuniformity correction based on bilateral filter [J]. Optical Review, 2011, 18(2): 197-202.
- [7] Harris J G, Chiang Y M. Nonuniformity correction using constant statistics constraint: analog and digital implementations [J]. SPIE, 1997, 3061: 895-905.
- [8] Torres S N, Hayat M M. Kalman filtering for adaptive nonuniformity correction in infrared focal-plane arrays [J]. JOSA A, 2003, 20(3): 470-480.
- [9] Ren Tingting, Zhang Zhijie. A scene-based non-uniformity correction algorithm for infrared image[J]. Optics & Optoelectronic Technology, 2014, 12(2): 136-138.
- 任婷婷,张智杰.一种基于场景的红外图像非均匀性校正算法[J].光学与光电技术,2014,12(2):136-138.
- [10] Yang Zhengxing, Tan Xinquan, Shang Xiaodong. Study on scene-based non-uniformity correction in infrared image[J]. Optoelectronic Technology, 2003, 23(2):135-138.
- 杨正兴,谈新权,尚小冬.基于场景的红外图像非均匀校正方法综述[J].光电子技术. 2003, 23(2):135-138.
- [11] Oten R, Figueiredo de R J P. Adaptive alpha-trimmed mean filters based on asymptotic variance minimization[J]. IEEE, 1999, 3: 45-48.