

doi:10.3788/gzxb20144301.0110003

基于非局部均值滤波与时域高通滤波的 非均匀性校正算法

张爽,周慧鑫,牛肖雪,秦翰林,钱琨

(西安电子科技大学 技术物理学院,西安 710071)

摘 要:时域高通滤波非均匀性校正是一种典型的基于场景的红外焦平面阵列非均匀性校正算法,但其易产生“鬼影”现象,影响校正效果.本文在时域高通滤波校正算法的原理基础上,分析了其校正过程中“鬼影”现象产生的原因,即由于全部图像信息的叠加而导致静止场景被滤除且运动场景会在当前位置留下反转的图像,从而形成“鬼影”.引入非局部均值滤波方法,提出了一种去“鬼影”的非局部均值滤波-时域高通滤波非均匀性校正方法.该方法首先采用非局部均值滤波将图像信息分离成高低频两部分(其中高频成分含有大部分噪音及非均匀性),并使用高频成分进行时域高通滤波算法中低通输出的递归运算,使得低通滤波后的图像含有较少的场景信息,从而可使校正输出图像含有较少的“鬼影”现象.采用两组真实红外序列图像进行验证,结果表明该算法不仅能获得较好的非均匀性校正效果,而且能较好地抑制时域高通滤波算法中的“鬼影”现象.

关键词:红外焦平面阵列;非均匀性校正;时域高通滤波;非局部均值滤波;鬼影

中图分类号:TN219

文献标识码:A

文章编号:1004-4213(2014)01-0110003-4

Temporal High-pass Filter Nonuniformity Correction Algorithm Based on Non-local Means Filter for Infrared Focal Plane Array

ZHANG Shuang, ZHOU Hui-xin, NIU Xiao-xue, QIN Han-lin, QIAN Kun

(Institute of Technology Physics, Xidian University, Xi'an 710071, China)

Abstract: The nonuniformity correction algorithm with the temporal high-pass filter for infrared focal plane array is a typical scene-based nonuniformity correction technique, but it has the ghosting artifacts problem. Based on the basic principle of temporal high-pass filter algorithm, the superposition of the whole image information will result in the elimination of stationary scene and the stay of a reversed image which can be referred to as the ghosting artifacts on the current position of the moving scene. A new scene-based nonuniformity correction technique based on the non-local means filter was proposed to eliminate the ghosting artifacts in the temporal high-pass filter algorithm. In this algorithm, the original input image was separated into two parts, which were the high spatial-frequency part and the low spatial-frequency part. And then the output of the low-pass filter was estimated recursively only by using the high spatial-frequency part of the image which contains most of the noise and nonuniformity. The performance of this presented algorithm was tested with two infrared image sequences, and the experimental results show that the algorithm can significantly reduce the ghosting artifacts in THF and achieve a better nonuniformity correction effect.

Key words: Infrared focal plane array; Nonuniformity correction; High-pass filter; Non-local means; Ghosting artifacts

OCIS Codes: 100.2550; 110.3080

基金项目:国家自然科学基金(No. 61107007)、航空基金(Nos. 20100181006, 20120181005)、陕西省自然科学基金基础研究计划(No. 2011JQ8012)和中央高校基本科研业务费专项资金(Nos. K5051205008, K5051305004)资助

第一作者:张爽(1988-),女,硕士研究生,主要研究方向为红外成像及图像处理. Email:15029249005@163.com

导师:周慧鑫(1975-),男,教授,博士,主要研究方向为红外成像及图像处理、红外对抗等. Email:hxzhou@mail.xidian.edu.cn

收稿日期:2013-06-26; **录用日期:**2013-08-28

<http://www.photon.ac.cn>

0 引言

红外焦平面阵列 (Infrared Focal Plane Arrays, IRFPA) 具有信噪比高、灵敏度高及结构简单紧凑等优点, 广泛应用于军事、工业、农业等多个领域. 然而由于制造工艺等方面的限制, 在相同辐照条件下, IRFPA 各探测单元响应度不完全相同, 这种响应的不一致性被称作成像非均匀性, 在图像上表现为固定图案噪音. 非均匀性严重影响了红外系统的成像质量, 导致红外成像系统的温度分辨率等性能显著下降, 因而在工程应用中必须对 IRFPA 进行非均匀性校正^[1].

目前, IRFPA 非均匀性校正算法主要分为两类. 一类是基于参考源的校正算法, 典型的有两点校正和多点校正技术^[2-3]; 另一类是基于场景的校正算法, 主要有时域高通滤波算法、恒定统计算法与神经网络算法等. 基于参考源的方法可获得较好的非均匀性校正效果, 但需要周期性地停机重新定标来修正参量漂移的影响, 从而影响系统的正常工作. 而在基于场景的校正方法中, 其计算校正参量的数据不是依赖参考源, 而是部分或全部来源于对场景的估计, 因此对校正参量漂移具有较强的自适应性^[4-6]. 但是, 此类算法大多需要场景与成像系统之间存在相对运动, 因此容易引起“鬼影”现象, 影响校正效果^[7-8].

时域高通滤波算法是一种典型的基于场景的非均匀性校正算法, 易于并行实时实现, 但校正结果中存在明显“鬼影”现象^[9]. 本文针对这一现象, 提出了将非局部均值滤波与时域高通滤波结合的新校正算法, 该算法在获得较好的非均匀性校正效果的同时又可较好地抑制“鬼影”现象.

1 时域高通滤波算法分析

1.1 时域高通滤波算法

IRFPA 探测单元的响应特性随时间变化很缓慢, 所以非均匀性在短时间内可以认为是不变的, 即属于低频成分; 而场景中相对运动较快的目标则属于高频成分. 基于此机理, 时域高通滤波 (Temporal High Pass Filtering, THPF) 非均匀性校正 (Non Uniformity Correction, NUC) 算法通过滤除场景中大部分低频成分, 从而实现非均匀性校正. 整个校正过程可以看成是一个时域上的高通滤波, 即

$$y(n) = x(n) - f(n) \quad (1)$$

$$f(n) = \frac{1}{M}x(n) + (1 - \frac{1}{M})f(n-1) \quad (2)$$

式中, M 为根据截止频率而预先设定的时间常量, $x(n)$ 为第 n 帧的输入, $f(n)$ 为第 n 帧的低通输出, $y(n)$ 为校正后输出.

1.2 “鬼影”分析

THPF 算法易于并行实时实现, 但其不足之处在于要求场景与成像系统之间存在相对运动, 且场景中

过亮或过暗的区域对校正参量影响较大^[10]. 如果场景长时间处于静止状态, 则会被认为是 FPN, 从而被滤除. 而静止的场景开始运动, 就会在校正后图像的原位置留下一个反转的图像, 从而形成“鬼影”. 另外, 由于算法中的低通滤波图像是通过递归方式求得, 因此如果某些场景的亮度较高, 即使其停留时间很短也会对校正参量产生很大的影响, 从而引起“鬼影”.

在 THPF-NUC 过程中, 通常使用整幅图像来进行校正参量估计, 然而图像中的大量场景信息, 尤其是过亮或过暗的区域, 容易影响其它部分的估计参量. 例如, 当一个高亮度目标进入场景后, 目标区域的校正系数会明显增大; 而当目标离开后, 使得该位置上的估计参量与实际值之间会有较大偏差, 从而引起“鬼影”. 由此可知, 在 THPF-NUC 过程中, 大量不相关场景的存在是产生“鬼影”的最主要原因.

对该算法的一种改进方法是先将低频场景信息从原图中滤除, 再利用其高频成分来估计非均匀性参量. 这样可降低非随机运动和过亮或过暗区域对非均匀性参量的不利影响, 从而在一定程度上抑制“鬼影”现象. 由此, 这种改进最重要的是选择一种合适的预处理方法来预先较好地分离图像的高频成分和低频成分.

Qian 提出的 NUC 算法^[11] 首先采用均值滤波来分离图像, 其中低频成分包含大部分场景信息, 高频成分则包含大部分噪音, 然后再利用高频成分进行校正参量估计. 该算法中的难点在于确定滤波阈值, 且校正后的图像仍易存在类似光晕的“鬼影”. 针对这个问题, Zuo 提出了基于双边滤波的 NUC 算法 (BFTH)^[12]. 其主要思想是用双边滤波分离图像, 并将其高频成分用于参量估计. 该方法能够在降低非均匀性的同时保留背景并减少“鬼影”, 然而 BFTH 校正后图像在边缘部分仍然存在“鬼影”现象, 而且目标区域亮度变低. 分析双边滤波分离出的高频成分, 可以看出其除了噪音和非均匀性之外, 仍有较多的边界信息, 这是导致图像边缘部分“鬼影”现象产生的一个主要原因^[13].

2 基于非局部均值滤波的时域高通滤波算法

为了在前期图像信息分离时尽可能地分离边界, 本文引入非局部均值 (Non Local Mean, NLM) 滤波来进行滤波分离处理, 而后再结合时域高通滤波来实现非均匀性校正.

2.1 非局部均值滤波

NLM 是 Buades 等在 2005 年提出的一种滤波方法^[14]. 其基本思想是: 考虑图像的自相似性, 当前像素的预测值可由图像中所有与它结构相似的像素加权平均得到.

给定一幅定义在有限区域 $I \in N^2$ 的离散含噪图像 $z = \{z(i) | i \in I\}$, 对于某个像素点 i , NLM 算法是利

用图像中所有像素的加权平均来得到该点的估计值 $NL(z)(i)$.

$$NL(z)(i) = \sum_{j \in I} \omega(i, j) z(j) \quad (3)$$

式中, $\omega(i, j)$ 是根据像素 i 和像素 j 之间的相似性所得的权值, 满足条件: $0 \leq \omega(i, j) \leq 1$ 且 $\sum_j \omega(i, j) = 1$.

式(3)中

$$\omega(i, j) = \frac{1}{Z(i)} \exp \left(- \frac{\|z(N_i) - z(N_j)\|_{2,a}^2}{h^2} \right) \quad (4)$$

$$Z(i) = \sum_j \exp \left(- \frac{\|z(N_i) - z(N_j)\|_{2,a}^2}{h^2} \right) \quad (5)$$

式中, h 为滤波参量, $z(N_i)$ 表示以像素 i 为中心的像素邻域, $\|z(N_i) - z(N_j)\|_{2,a}^2$ 表示以像素 i 和像素 j 为中心的邻域之间的高斯加权欧氏距离.

在进行 NLM 滤波时, 如果选取整幅图像进行加权平均, 则会导致运算量过大. 而另一方面, 相似像素区域大多位于以当前像素点为中心的窗口附近. 因此实际运算时, 一般选取图像中的部分区域来进行像素值估计. 在本文实验中, 选取以当前像素点为中心的 11×11 像素的区域作为搜索窗口, 5×5 像素的区域作为相似性窗口.

2.2 基于非局部均值滤波的时域高通滤波非均匀性校正

为了解决 BFTH 算法中边缘存在“鬼影”的问题, 本文采用上述 NLM 滤波对图像进行预处理, 并采用滤波后的高频成分进行 NUC 参量估计. 算法具体过程为:

1) 对输入的第 n 帧图像 $x(n)$ 进行 NLM 滤波, 得到图像的低频成分 $x^{NLm}(n)$;

2) 再将图像 $x(n)$ 与 $x^{NLm}(n)$ 相减, 得到图像 $x(n)$

的高频成分 $x^{NLm-H}(n)$, 其包含了原图中大部分噪音、非均匀性以及少量边界;

$$x^{NLm-H}(n) = x(n) - x^{NLm}(n) \quad (6)$$

3) 将 $x^{NLm-H}(n)$ 作为时域高通滤波校正中低通滤波器的输入, 即得到低通滤波结果 $f(n)$ 为

$$f(n) = \frac{1}{M} x^{NLm-H}(n) + (1 - \frac{1}{M}) f(n-1) \quad (7)$$

式中 M 为根据截止频率而预先设定的时间常量;

4) 最后将输入图像 $x(n)$ 与低通滤波结果 $f(n)$ 相减, 即可得到 $x(n)$ 的校正图像输出 $y(n)$.

$$y(n) = x(n) - f(n) \quad (8)$$

3 仿真结果及分析

实验中采用的两组红外图像序列分别是由一台非制冷 256×256 IRFPA 相机以 25 帧/秒的帧频拍摄的 400 帧图像组成. 实验时, 只截取了图像中部非均匀性较大的 180×200 像素区域进行计算. 其中第一组是对场景成像, 而第二组是对均匀背景成像.

对第一组序列中的第 100 帧图像分别采用双边滤波和 NLM 滤波进行滤波处理, 以比较两者的滤波差异. 实验中, 双边滤波中设置滤波窗口大小为 9×9 像素, 空间邻近函数参量 σ_s 为 2, 灰度相似度函数参量 σ_g 为 30; NLM 滤波中设置平滑参量 h 为 6.5, 搜索窗口为 11×11 像素, 相似性窗口为 5×5 像素. 两种算法的滤波分离结果分别如图 1. 由图 1 可以看出, 双边滤波后的高频成分中仍旧包含大量边界信息, 且目标区域亮度较高; 而 NLM 滤波后高频成分中只含有极少边界, 且亮度相对均匀.

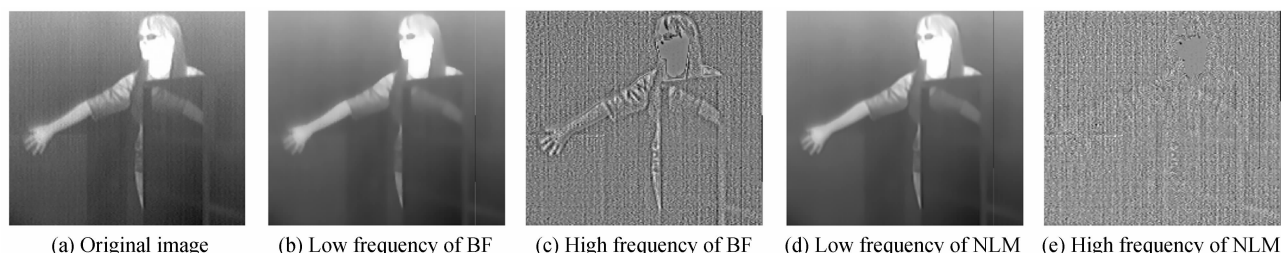


图 1 图像滤波结果比较

Fig. 1 Image filtering results

分别采用 THPF、BFTH 和 NLMTH 对第一组红外图像序列进行非均匀性校正比较实验. 实验中高通滤波的时间常量 M 设为 6, 双边滤波和 NLM 滤波的参量设置同上. 其中对第 125 帧图像的校正结果如图 2.

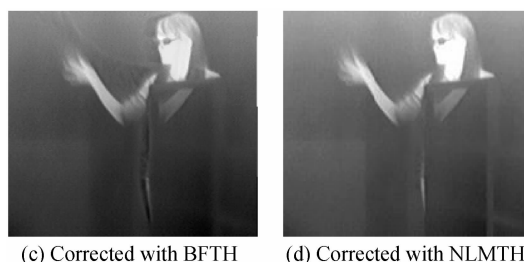
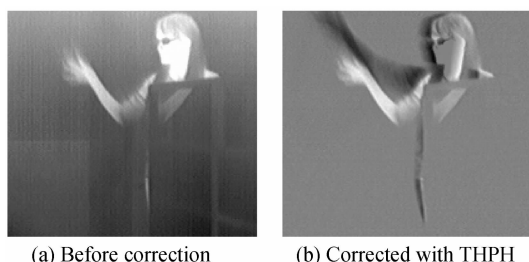


图 2 不同算法的校正结果

Fig. 2 NUC results of different algorithms

由图 2 可以看出, THPF 校正后的图像中存在严重的“鬼影”现象, 且其它静止背景都被滤除. BFTH 校正后的图像保留了大部分背景, 但仍有较明显的“鬼

影”现象存在,并且运动场景的亮度相对被降低了,本文所提出的 NLMTH 校正后的图像中“鬼影”现象很弱,且目标亮度减弱也不明显,表明本文所提出算法相比获得了较好的非均匀性校正效果。

为了进一步定量分析校正结果,采用 IRFPA 的非均匀性指标^[15]来定量比较校正效果.非均匀性指标定义为

$$U_R = \frac{1}{\bar{V}} \sqrt{\frac{1}{M \times N} \sum_{i=1}^M \sum_{j=1}^N [V(i, j) - \bar{V}]^2} \quad (9)$$

式中

$$\bar{V} = \frac{1}{M \times N} \sum_{i=1}^M \sum_{j=1}^N V(i, j) \quad (10)$$

$V(i, j)$ 为 IRFPA 第 i 行,第 j 列像元的响应值, \bar{V} 为 IRFPA 上所有探测器单元的平均响应值, M 和 N 分别为 IRFPA 中探测单元的总行数和总列数。

该实验使用第二组对均匀背景的成像图像序列,分别采用 BFTH 和 NLMTH 算法对其进行校正.表 1 给出了两种算法校正前后的非均匀性对比.由表 1 可知,相对于 BFTH,本文提出的 NLMTH 算法校正后的图像非均匀性指标明显更低,从而进一步验证了该算法能获得更好的校正效果。

表 1 图像非均匀性对比

Table 1 Comparison of image nonuniformity

| | Original image | BFTH algorithm | NLMTH algorithm |
|--------------|----------------|----------------|-----------------|
| $U_R / (\%)$ | 6.88 | 5.12 | 4.22 |

4 结论

本文给出了时域高通滤波非均匀性校正过程中“鬼影”产生的主要原因.其改进的方法可采用只含噪声和非均匀性的高频成分代替原图像来进行校正参量估计.由此,本文提出了采用 NLM 滤波先对图像预处理,利用所得到的图像高频成分用来对 NUC 参量进行估计,以最终实现 IRFPA 成像非均匀性校正.实验结果表明该算法在有效降低非均匀性的同时,较大程度上抑制了原算法中的“鬼影”现象。

非局部均值滤波可将图像的高低频成分进行有效地分离,但是其算法复杂度相对较高.实际应用时,可采用多 DSP 和 FPGA 并行实现,这也是下一步需要进行的研究工作。

参考文献

[1] SCRIBNER D A, SARKAY K A, KRUEER M R, *et al.* Adaptive nonuniformity correction for IR focal plane arrays using neural networks[C]. SPIE, 1991, **1541**: 100-109.

[2] ZUO Chao, CHEN Qian, GU Guo-hua. Nonuniformity correction based on unified photoresponse characteristics of infrared focal plane arrays[J]. *Acta Photonica Sinica*, 2011, **40**(6): 926-932.

左超,陈钱,顾国华.基于焦平面归一化响应特性的红外非均匀性校正[J].光子学报,2011,**40**(6):926-932.

[3] LI En-ke, LIU Shang-qian, QANG Bing-jian, *et al.* Nonuniformity correction algorithms of IRFPA based on cubic spline function[J]. *Acta Photonica Sinica*, 2009, **38**(11):3016-3020.

李恩科,刘上乾,王炳健,等.基于三次样条插值的 IRFPA 非均匀性校正算法[J].光子学报,2009,**38**(11):3016-3020.

[4] HARDIE R C, HAYAT M M, ARMSTRONG E, *et al.* Scene-based non-uniformity correction with video sequences and registration[J]. *Applied Optics*, 2000, **39**(8): 1241-1250.

[5] ZHOU Hui-xin, LIU Shang-qian, LAI Rui, *et al.* Solution for nonuniformity correction of infrared focal plane arrays [J]. *Applied Optics* 2005, **44**(15): 2928-2932.

[6] WANG Xian-ya, CHEN Qian, GU Guo-hua, *et al.* A nonuniformity correction technique of IRFPA based on BP neural network[J]. *Acta Photonica Sinica*, 2009, **38**(6): 1504-1506.

王娴雅,陈钱,顾国华,等.基于 BP 神经网络的红外焦平面非均匀性校正技术[J].光子学报,2009,**38**(6):1504-1506.

[7] ZHANG Hao, LIU Zheng-guo, HU Xiao-mei, *et al.* Nonuniformity correction based on active movement-control of scene[J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2011, **40**(3): 397-401.

张昊,刘振国,胡晓梅,等.场景主动运动控制的非均匀性校正方法[J].红外与激光工程,2011,**40**(3):397-401.

[8] ZHANG Tian-xu, YUAN Ya-jing, SANG Hong-shi, *et al.* PDE based deghosting algorithm for correction of nonuniformity in infrared plane array[J]. *Journal of Infrared and Millimeter Waves*, 2012, **31**(2):177-182.

张天序,袁静雅,桑红石,等.基于 PDE 去鬼影的自适应非均匀性校正算法研究[J].红外与毫米波,2012,**31**(2):177-182.

[9] LEI Xiao-jie, GU Guo-hua, SUI Xiu-bao, *et al.* Improved temporal high-pass filter nonuniformity correction based on bilateral filter[J]. *Laser & Infrared*, 2012, **42**(7): 831-836.

雷晓杰,顾国华,隋修宝,等.红外双边滤波时域高通非均匀性校正[J].激光与红外,2012,**42**(7):831-836.

[10] SCRIBNER D A, SARKAY K A, CAULFIELD J T, *et al.* Nonuniformity correction for staring IR focal plane arrays using scene-based techniques[C]. SPIE, 1990, **1308**: 224-233.

[11] QIAN Wei-xian, CHEN Qian, GU Guo-hua. Space low-pass and temporal high-pass nonuniformity correction algorithm [J]. *Optical Review*, 2010, **17**(1): 24-29.

[12] ZUO Chao, CHEN Qian, GU Guo-hua, *et al.* New temporal high-pass filter nonuniformity correction based on bilateral filter[J]. *Optical Review*, 2011, **18**(2): 197-202.

[13] ZHANG Feng, LIU Shang-qian, WANG Da-bao. A new correction method of IRFPA nonuniformity based on stationary wavelet transform[J]. *Acta Photonica Sinica*, 2009, **38**(8): 2135-2138.

张峰,刘上乾,汪大宝.一种新的基于平稳小波变换的红外焦平面非均匀性校正技术[J].光子学报,2009,**38**(8):2135-2138.

[14] BUADES A, COLL B, MOREL J M. A review of image denoising algorithms, with a new one [J]. *Multiscale Modeling & Simulation*, 2005, **4**(2): 490-530.

[15] Shanghai Institute of Technical Physics of Chinese Academy of Sciences. GB/T 17444-1998 The technical norms of measurement and test of characteristic parameters of infrared focal plane arrays [S]. Beijing: China Zhijian Publishing House, 1998.

中国科学院上海技术物理研究所. GB/T 17444-1998 红外焦平面阵列特性参量测试技术规范[S].北京:中国标准社,1988.