

文章编号: 1672-8785(2015)09-0010-05

基于神经网络的改进型红外图像 自适应非均匀校正算法

聂瑞杰 李丽娟 王朝林

(中国空空导弹研究院, 河南 洛阳 471009)

摘 要: 针对传统的基于神经网络的自适应非均匀性校正 (Neural-Network-based Non-Uniformity Correction, NN-NUC) 算法在实际应用中存在校正能力有限和容易产生鬼影的问题, 深入分析了 NN-NUC 算法中的鬼影产生过程, 并给出了抑制鬼影的一般性方法; 然后结合实际红外成像系统的特点, 提出了一种改进型 NN-NUC 算法。仿真实验结果表明, 该算法可以最大限度地抑制场景鬼影的产生, 并可有效减小系统输出图像的非均匀性噪声。此外, 本文算法计算量小, 且易于用硬件实现, 因此具有很好的工程应用价值。

关键词: 自适应非均匀性校正; 红外图像; 神经网络; 鬼影

中图分类号: TN215; TN911.73 **文献标志码:** A **DOI:** 10.3969/j.issn.1672-8785.2015.09.003

Improved Adaptive IR Image Non-uniformity Correction Algorithm Based on Neural Network

NIE Rui-jie, LI Li-juan, WANG Chao-lin

(China Airborne Missile Academy, Luoyang 471009, China)

Abstract: In practical applications, the traditional adaptive nonuniformity correction algorithm based on Neural Network (NN-NUC) has a limited correction capability and is easy to generate ghosting artifacts. To solve this problem, the ghosting artifact generating process in the NN-NUC algorithm is analyzed in detail and the common methods for removing ghosting artifacts are given. Then, by incorporating the characteristics of actual infrared imagers, an improved NN-NUC algorithm is proposed. The simulation experimental results show that the proposed method can suppress the generation of ghosting artifacts in a scene extremely and can reduce the nonuniformity noise of the image effectively. Moreover, the proposed algorithm has a small calculation amount and is easy to be implemented by hardware. So it is of good value to practical applications.

Key words: adaptive nonuniformity correction algorithm; IR image; neural network; ghosting artifact

收稿日期: 2015-08-23

基金项目: 总装探索项目 (7131466); 科技创新基金项目 (CJK1416)

作者简介: 聂瑞杰 (1986-), 男, 河南三门峡人, 博士, 工程师, 主要从事红外探测成像技术以及信号与信息处理等方面的研究。E-mail: nrj19862008@126.com

0 引言

红外图像的非均匀性噪声及其校正方法是人们在各类红外成像应用中非常关注的一个问题。为了解决这个问题, 研究人员提出了各种各样的非均匀性校正算法。这些算法在总体上可以分为两大类: 一类是基于定标的非均匀性校正 (Calibration-Based Non-Uniformity Correction, CB-NUC) 算法^[1,2]; 另一类是基于场景的非均匀性校正 (Scene-Based Non-Uniformity Correction, SB-NUC) 算法^[3-7]。后者可以根据场景实时更新校正系数, 因此无需添加黑体和光学设备等复杂笨重的装置, 而且还能解决非均匀性噪声随时间和工作环境变化而发生漂移的问题, 由此受到了人们的极大关注。典型的 SB-NUC 算法包括 NN-NUC 算法、基于时域高通滤波的非均匀性校正算法以及基于卡尔曼滤波的非均匀性校正算法等。其中, NN-NUC 算法能够同时对偏移系数、增益系数甚至是更高阶的非均匀性参数进行自适应校正, 且运算量不大, 因此在自适应非均匀性校正应用中具有优势。然而传统的 NN-NUC 算法在提高收敛速度和抑制场景鬼影之间存在矛盾, 而且还受适用范围的限制。

为了解决以上问题, 研究人员提出了各种各样的解决方法。在提高收敛速度和抑制场景鬼影方面, 他们主要采用可对边缘点进行准确估计的滤波方法来估计期望值^[9-13], 并抑制边缘区域中校正系数的更新速度^[14,15]; 另外, 他们还采用了基于运动指导的红外焦平面非均匀性校正方法^[16]。然而这些算法存在计算量较大、不易于用硬件实时实现以及适用范围有限等问题, 所以仍需作进一步改进。本文在深入分析 NN-NUC 算法的处理手段和鬼影产生过程的基础上, 结合实际应用的需求, 提出了一种基于神经网络的改进型非均匀性校正算法, 并取得了很好的试验效果。

1 理论分析

1.1 NN-NUC 算法的实现流程

在通常情况下, 红外成像系统的非均匀性校正都采用一个线性模型:

$$y_{i,j}^n = G_{i,j}^n x_{i,j}^n + O_{i,j}^n \quad (1)$$

式中, $x_{i,j}^n$ 为第 n 帧的第 i 行、第 j 列的输出; $G_{i,j}^n$ 为第 n 帧的增益校正系数; $O_{i,j}^n$ 为第 n 帧的偏移量校正系数; $y_{i,j}^n$ 为校正后第 n 帧的像素输出。

传统的 NN-NUC 算法的实现流程如下: 第一步, 利用式 (1) 对输入图像进行校正; 第二步, 计算四邻域均值, 并将其作为期望值:

$$f_{i,j}^n = (y_{i-1,j}^n + y_{i+1,j}^n + y_{i,j-1}^n + y_{i,j+1}^n) / 4 \quad (2)$$

第三步, 以均方误差最小准则为判据, 利用式 (3) 计算误差函数:

$$E_{i,j}^n = (y_{i,j}^n - f_{i,j}^n)^2 \quad (3)$$

第四步, 采用最陡下降法对参数进行迭代更新, 然后将此系数用于下一帧图像的非均匀性校正:

$$G_{i,j}^{n+1} = G_{i,j}^n - 2\mu x_{i,j}^n (y_{i,j}^n - f_{i,j}^n) \quad (4)$$

$$O_{i,j}^{n+1} = O_{i,j}^n - 2\mu (y_{i,j}^n - f_{i,j}^n) \quad (5)$$

传统的 NN-NUC 算法最早是由 Scribner D A 等人提出的。该算法基于一个假设, 即图像中的非均匀性噪声主要是高频空域噪声或白噪声。然而在实际应用中, 非均匀性噪声并非总能满足这样的假设条件。在图 1(a) 所示的红外图像中, 非均匀性噪声包括密集的椒盐类脉冲噪声。图 1(b) 为通过用四邻域均值求期望值来进行自适应非均匀性校正所获得的图像。可以看出, 校

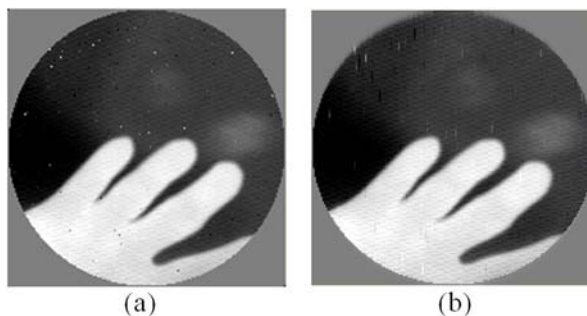


图 1 采用传统的 NN-NUC 算法进行校正前后的图像对比情况

正效果很不理想,因此需要对基于期望值的计算方法进行改进,比如采用中值滤波或裁剪均值滤波等方法来求期望值。

1.2 NN-NUC 算法中的鬼影产生过程

NN-NUC 算法中,鬼影的产生过程实际上是非正常 NN-NUC 算法的执行过程(见图 2)。

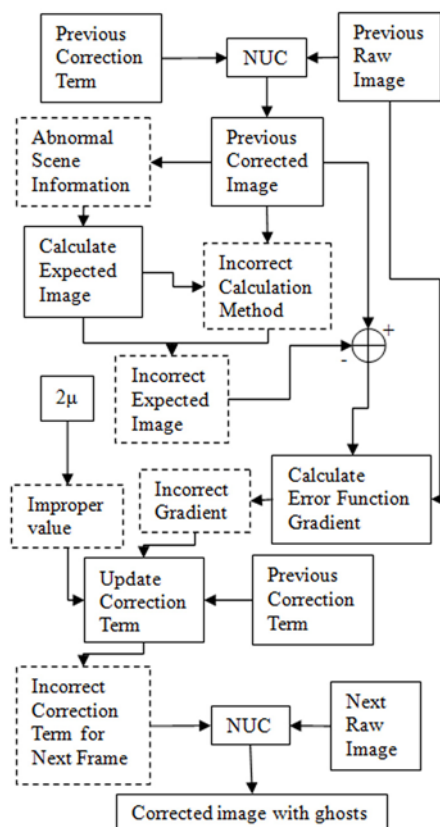


图 2 NN-NUC 算法中的鬼影产生过程

图 2 中,虚线框所表示的环节是 NN-NUC 算法执行流程中可能会出现的异常节点。将这些节点按照执行的先后顺序分层排序:第一层为异常的场景信息和错误的期望图像计算方法,其本质为图像场景信息与期望图像计算方法的不匹配;第二层为错误的期望值;第三层为错误的误差函数梯度和不合适的迭代步长,也可统称为误差函数梯度和迭代步长不匹配;第四层为错误的校正系数。这四层节点中的任一层出现错误都会导致其后面层级的节点出现错误,并使最终的输出图像中产生鬼影。而将任一层的错误剔除后,都能够避免将该层及其前面层级的错误传递到下一层,并能阻止这些错误被

传递到最终的输出图像中而产生鬼影。

1.3 NN-NUC 算法中的鬼影抑制方法

由前面的分析可知,要想抑制 NN-NUC 算法中的鬼影产生,可以采用以下两种方法:一种是对每一层节点进行修正,以保证每一个层级均不会出现异常节点;另一种是将所有异常节点层级的最后一层的错误剔除。

上文所提到的目前研究较多的基于保边缘滤波、边缘检测以及自适应调整迭代步长的 NN-NUC 算法都是属于第一种方法^[9-13]。而根据第一种方法的设计思想,我们还可以选择灰度变化起伏小、空间频率低的场景来作非均匀性校正,这样也能够抑制鬼影的产生,但是却会限制自适应非均匀性校正算法的适用环境,因此不能将该方法作为优先选用的方法。

对于第二种方法,目前用得较多的是基于主动运动控制以及运动指导的 NN-NUC 算法。为了更好地说明这一点,图 3 列出了基于用四邻域均值求期望值的某一场景图像的期望图像和误差图像。

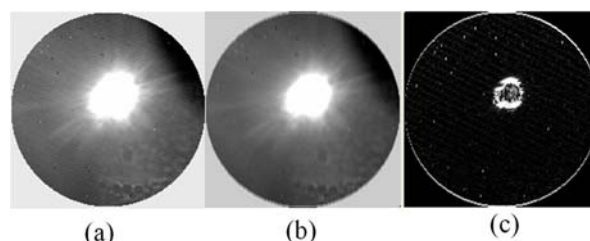


图 3 真实场景的原始图像、期望图像和误差图像

在用四邻域均值求期望值时,期望图像中的目标发生了退化;反映到误差图像中,即为误差图像中包含了部分目标的信息,这显然是不正确的。随着误差的后向传递和前向反馈,最终图像中会出现鬼影。因此,必须将期望图像中不正确的期望值剔除掉,即将误差图像中的目标信息剔除掉。而通过让成像系统相对于场景进行运动,或者采用基于运动指导的校正系数更新方法,能够利用场景目标和非均匀性噪声在时域上的空间位置变化差异将两者分离开来,进而剔除掉误差图像中的错误信息,从而抑制鬼影的产生。

此外, 根据第二种鬼影抑制方法的设计思想, 也可以通过剔除第四层节点中的错误来抑制鬼影。对于鬼影, 可以认为是在一次校正中, 由于校正系数的调整量过大, 校正后的图像灰度值出现了较大的起伏。因此, 通过给校正系数的调整量设定阈值, 可以剔除错误的校正系数。该阈值的大小可根据对鬼影的灰度值起伏要求来加以设定。

1.4 改进的非均匀性校正算法

根据前面的分析, 结合实际系统的特点及其对非均匀性校正算法运算量不能过大的要求, 我们在传统 NN-NUC 算法的基础上, 提出了一种改进算法:

(1) 采用十字五点中值滤波方法来求期望值, 以便更好地对图像中的椒盐类脉冲空域噪声进行校正, 即将传统 NN-NUC 算法流程中第二步的期望值计算公式改为式 (6):

$$f_{i,j}^n = \text{median}\{y_{i-1,j}^n, y_{i+1,j}^n, y_{i,j}^n, y_{i,j-1}^n, y_{i,j+1}^n\} \quad (6)$$

(2) 主动控制成像系统与场景的相对运动, 并在传统 NN-NUC 算法流程中的第四步中给校正系数的单次调整量设定阈值, 以抑制鬼影。其中, 增益系数的单次调整量 $\Delta G_{i,j}$ 和偏移系数的单次调整量 $\Delta O_{i,j}$ 分别为

$$\Delta G_{i,j} = 2\mu x_{i,j}^n (y_{i,j}^n - f_{i,j}^n) \quad (7)$$

$$\Delta O_{i,j} = 2\mu (y_{i,j}^n - f_{i,j}^n) \quad (8)$$

2 仿真结果与分析

采用凝视型制冷中波红外焦平面成像系统所采集的图像对本文算法进行了性能仿真和验证。图 4 和图 5 所示分别为该算法的鬼影抑制效果和校正效果。

如图 4 所示, 所有图像中都带有接近饱和的高亮度目标。其中, 图 4(a) 未采用任何鬼影抑制方法, 所以其校正结果存在严重的鬼影。图 4(b) 仅采用了给校正系数的单次调整量设定阈值的方法来抑制鬼影, 其中增益系数单次调整量的

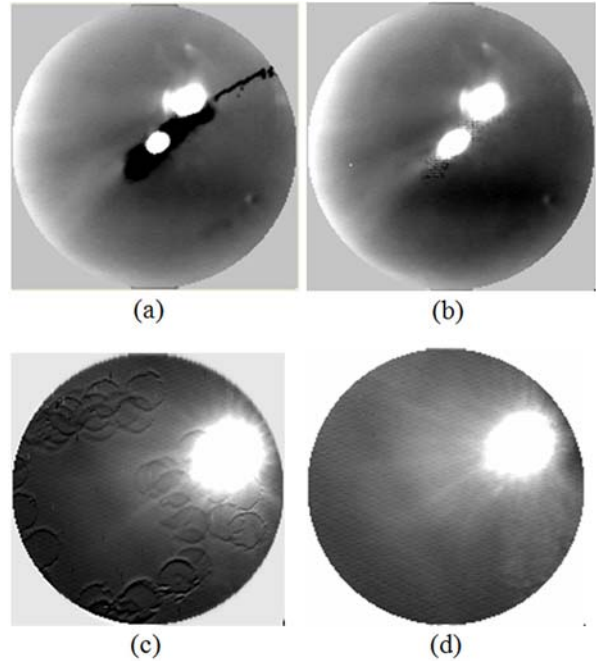


图 4 本文算法的鬼影抑制效果

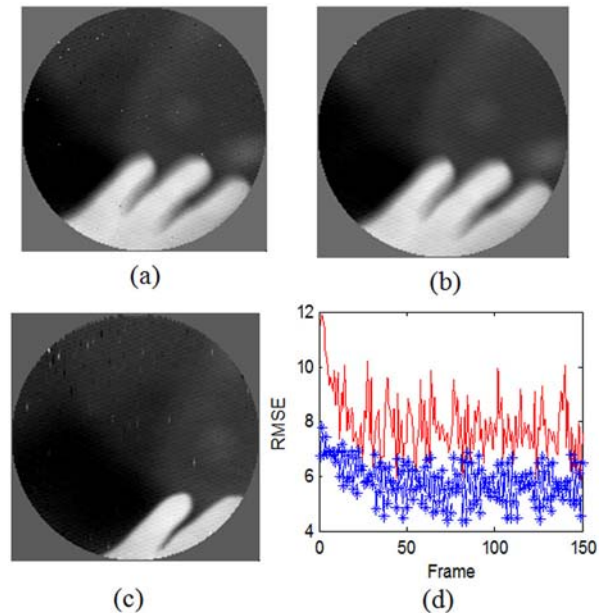


图 5 真实场景图像的非均匀性校正结果

阈值为 $100/D$ (D 为图像的饱和灰度值), 偏移系数单次调整量的阈值为 8。图像中的目标时而静止, 时而运动, 因此该方法有效抑制了鬼影的出现。然而由于目标运动不够充分, 图像中仍有残留的鬼影。图 4(c) 和图 4(d) 都采用了主动控制成像系统和场景做主动运动的方法来抑制鬼影。然而图 4(c) 未给校正系数的单次调整量设定阈值, 因而在目标的运动轨迹上留下了大量

鬼影；图 4(d) 则完整地采用了前面所介绍的鬼影抑制方法。从图 4 中可以看出，本文方法最大程度地抑制了鬼影的产生。

图 5 所示为基于本文算法的真实场景图像的非均匀性校正结果，其中采用均方根误差作为评价标准。均方根误差的定义为

$$RMSE = \sqrt{\frac{1}{MN} \sum_{i=1}^M \sum_{j=1}^N (y_{i,j} - f_{i,j})^2} \quad (9)$$

式中， M 和 N 分别为图像的行数和列数，对于经过内切圆处理的图像，以内切圆内的实际像素数为准进行计算； $y_{i,j}$ 为校正后的图像像素值； $f_{i,j}$ 为期望图像的像素值。

图 5(a) 为校正前的第 57 帧图像，图 5(b) 为经本文算法校正后的第 57 帧图像，而图 5(c) 所示为基于传统 NN-NUC 算法的第 94 帧图像的校正效果。直接用人眼对其进行主观评价，能够发现本文算法的校正效果大大优于传统算法的校正效果，而图 5(d) 中采用均方根误差作为评价标准的客观评价结果也有力地证明了这一点，而且本文算法的收敛速度也有了很大提高。

3 结束语

在基于神经网络的自适应非均匀性校正算法中，不可能有一种完美的期望值计算方法能够既保证有效地抑制非均匀性，又保证不在误差函数中引入场景目标信息。而在通常情况下，人们会更加优先考虑对非均匀性进行抑制，因此误差图像中会不可避免地出现场景目标信息。若不将其剔除，它们就会随误差的后向传递而通过前馈路径反映在最终的输出图像上，导致目标退化和场景鬼影的产生。

本文算法采用中值滤波方法计算期望图像，有效抑制了系统输出图像中存在的密集椒盐类脉冲空域噪声；然后在深入分析 NN-NUC 算法中的鬼影产生过程的基础上，结合实际系统的特点，选用主动运动控制和给校正系数单次调整量设定阈值的方法，最大程度地移除了校正后输出图像中的鬼影。本文算法中用以抑制鬼影的一般性方法，也适用于其他所有基于 NN-NUC 算法的应用，并能够在为实际系统选择最佳鬼影抑制方法方面提供理论依据。

参考文献

- [1] 白俊奇, 陈钱, 钱惟贤, 等. 基于环境温度的红外焦平面阵列非均匀性校正 [J]. *红外与毫米波学报*, 2010, **29**(1): 50–52.
- [2] 毛小群, 石俊生, 何文学. 基于定标法的红外图像非均匀校正 [J]. *云南师范大学学报*, 2009, **29**(4): 57–61.
- [3] Scribner D A, Kruer M R, Gridley J C, et al. Physical Limitation to Nonuniformity Correction in IR Focal Plane Arrays [C]. *SPIE*, 1987, **865**: 185–202.
- [4] Scribner D A, Sarkady K A, Kruer M R, et al. Adaptive Non-uniformity Correction for IR Focal Plane Arrays Using Neural Networks [C]. *SPIE*, 1991, **1541**: 100–109.
- [5] Scribner D A, Sakady K A, Caulfield J T, et al. Non-uniformity Correction for Staring IR Focal Plane Arrays Using Scene-based Techniques [C]. *SPIE*, 1990, **1308**: 224–233.
- [6] 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.
- [7] 张天序, 施长城, 李洁君, 等. 红外焦平面阵列非均匀性自适应非均匀校正算法研究进展 [J]. *红外与毫米波学报*, 2007, **26**(6): 409–413.
- [8] 张天序, 石岩, 曹治国. 红外焦平面非均匀性噪声的空间频率特性及空间自适应非均匀性校正方法改进 [J]. *红外与毫米波学报*, 2005, **24**(4): 255–260.
- [9] 张天序, 袁雅婧, 桑红石, 等. 基于 PDE 去鬼影的自适应非均匀校正算法研究 [J]. *红外与毫米波学报*, 2012, **31**(2): 177–182.
- [10] 杨硕, 赵保军, 毛二可, 等. 基于 PM 扩散的红外焦平面阵列神经网络非均匀校正算法 [J]. *电子与信息学报*, 2013, **35**(11): 2744–2750.
- [11] 刘秀, 刘咏, 金伟其, 等. 基于边缘检测的神经网络非均匀校正及硬件实现 [J]. *光电工程*, 2014, **41**(2): 63–68.
- [12] 张红辉, 罗海波, 余新荣, 等. 改进的神经网络红外图像非均匀校正方法 [J]. *红外技术*, 2013, **35**(4): 232–237.
- [13] Alessandro Rossi, Marco Diani, Giovanni Corsini. Bilateral Filter-based Adaptive Nonuniformity Correction for Infrared Focal Plane Array Systems [J]. *Optical Engineering*, 2010, **49**(5): 057003.
- [14] 施长城, 张天序, 刘慧娜, 等. 一种红外焦平面非均匀性组合校正算法 [J]. *红外与毫米波学报*, 2010, **29**(1): 23–26.
- [15] 曹治国, 魏络刚, 张天序. 基于神经网络法的焦平面器件非均匀校正技术研究 [J]. *红外与激光工程*, 2000, **29**(1): 65–68.
- [16] 桑红石, 袁雅婧, 张天序. 基于运动制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**(9): 1577–1582.