

文章编号 1004-924X(2008)01-0128-06

基于红外焦平面阵列读出结构的非均匀校正算法

刘永进,朱红,赵亦工

(西安电子科技大学 电子工程学院,陕西 西安 710071)

摘要:提出了一种基于红外焦平面阵列读出结构的非均匀校正算法,它将校正过程分成两步。首先利用恒定统计方法滤除由通道放大器引起的固定图案噪声,然后采用改进的神经网络方法,进一步校正由探测器响应产生的非均匀性。实验结果表明:该算法在第20帧时就能够收敛到一个较好的水平,此刻校正图像的平均绝对误差(MAE)和峰值信噪比(PSNR)值分别为2.9和39.2。由于本算法是递推进行的,并且具有收敛速度快、计算复杂度低等优点,因此易于工程实现。

关键词:红外焦平面阵列;非均匀校正;固定图案噪声;恒定统计;神经网络

中图分类号:TN215 **文献标识码:**A

Nonuniformity correction algorithm based on infrared focal plane array readout architecture

LIU Yong-jin, ZHU Hong, ZHAO Yi-gong

(School of Electronic Engineering, Xidian University, Xi'an 710071, China)

Abstract: A nonuniformity correction algorithm based on infrared focal plane array readout architecture is proposed to correct the aggregate nonuniformity by two separate steps. Firstly, the nonuniformity from the readout amplifiers is corrected using the constant statistics method. Then, the noise resulted from the detectors is decreased with the improved neural network method. The experimental results indicate that the proposed algorithm can converge to a good correction level at the frame 20, while the Mean Absolute Error(MAE) and Peak Signal-to-Noise Ratio(PSNR) of the corrected image are 2.9 and 39.2, respectively. The algorithm is recursive with the advantages of high convergent speed and low computational complexity, so it is easy to be implemented in projects.

Key words: infrared focal plane array; nonuniformity correction; fixed-pattern noise; constant statistics; neural network

1 引言

红外焦平面阵列(Infrared Focal Plane Ar-

ray, IRFPA)探测器^[1-2]现已广泛应用于国防、民用等各个领域。但固定图案噪声(Fixed-Pattern Noise, FPN)的存在却严重影响了红外系统的成像质量,它主要是由于焦平面阵列上各探测单元

收稿日期:2007-08-01;修订日期:2007-08-29.

基金项目:国家自然科学基金资助项目(No. 60572151)

对于同一辐照的响应度不完全相同所致。另外,图像数据读出电路中各通道之间的差异致使这种非均匀性更加明显。因此,如何有效地去除固定图案噪声实现非均匀校正(Nonuniformity Correction, NUC)是提高红外焦平面阵列成像质量的关键。

到目前为止,国内外已经提出了许多关于红外焦平面阵列非均匀校正的算法,但主要可以分为两大类。一类是基于标定的方法(如两点校正法^[3]),这类方法具有较高的校正精度,但在标定过程中需要成像系统暂停工作,因此其使用范围受到一定的限制。另一类是基于场景的方法(如神经网络法^[4]、统计法^[5]、代数法^[6]、卡尔曼滤波法^[7]、高阶统计量法^[8]等),它直接利用每帧图像的场景信息进行非均匀校正,克服了第一类方法的缺陷,因此是目前研究的焦点。

本文提出了一种基于红外焦平面阵列读出结构的非均匀校正算法,它首先对 IRFPA 进行探测器级和通道级建模,然后利用改进的神经网络(Neural Network, NN)方法和恒定统计(Constant Statistics, CS)方法^[5]分别对两个模型进行处理,从而很好地校正了由这两个方面引入的固定图案噪声。

2 算法模型

2.1 探测器模型

对于一个大小为 $M \times N$ 的红外焦平面阵列,其上各探测器的输出响应一般互不相同,但都可以近似利用线性模型来描述:

$$y_k(i, j) = a_k(i, j)x_k(i, j) + b_k(i, j), \quad (1)$$

其中, $x_k(i, j)$ 表示第 k 帧时坐标为 (i, j) 的探测器所接收到的真实红外辐照, $a_k(i, j)$ 和 $b_k(i, j)$ 分别为此时该探测器的乘性噪声参数和加性噪声参数。

2.2 通道模型

红外焦平面阵列上各传感器单元在完成光电转换后,需要读出电路对所收集的电荷进行转移、放大、量化等处理操作。为了实现高速数据采集,通常读出电路都是由多个通道构成,并且每个通道都可以独立完成数据处理任务。但各通道之间也存在着响应的不一致性,特别是放大电路,每个通道的增益和偏置都不尽相同,因此加重了图像

的固定图案噪声。

法国 ULIS 公司的 320×240 多晶硅非制冷焦平面探测器的读出电路是将图像上的几列像素值用一个通道读出,而具体通道数则根据实际型号略有不同。为不失算法的一般性,本文假设焦平面上每列探测器都分别对应一个通道,这样,第 j 个通道的响应就可以表示为:

$$z_k(\cdot, j) = g(j)y_k(\cdot, j) + o(j), \quad (2)$$

式中, $z_k(\cdot, j)$ 表示第 k 帧第 j 列的观测值, $g(j)$ 和 $o(j)$ 分别为通道 j 的增益参数和偏置参数。而对于某些实际情况,通道的偏置非均匀性往往是最主要的,因此可假定所有通道的增益参数都相等且为 1。这样,式(2)可以简化为:

$$z_k(\cdot, j) = y_k(\cdot, j) + o(j). \quad (3)$$

3 算法描述

3.1 通道级非均匀校正

根据第一部分所建立的数学模型的特点,本算法将先完成通道级非均匀校正,即利用恒定统计假设并结合通道信息,消除由读出电路引起的固定图案噪声。为此,将式(1)代入式(3)得:

$$z_k(i, j) = a_k(i, j)x_k(i, j) + b_k(i, j) + o(j), \quad (4)$$

对式(4)两边同时在一个通道范围内取均值,且假设 a 与 x 互不相关,则

$$E[z_k(j)] = E[a_k(j)]E[x_k(j)] + E[b_k(j)] + o(j). \quad (5)$$

由于焦平面上每一列都有足够多的探测器单元,并且其加性固定图案噪声是随机的,因此可以假定它们在列空间上满足均匀分布,且均值为零,即 $E[b_k(j)] = 0$ 。另外,每个传感器单元在不同空间和时间所接收的辐照度也是随机的,由恒定统计假设可得 $E[x_k(j)] = 0$ 。这样,式(5)就可以简化为:

$$E[z_k(j)] = o(j). \quad (6)$$

因此,只要求出 $E[z_k(j)]$ 就可以利用式(3)实现通道级非均匀校正。一般来说,可按如下方式对 $E[z_k(j)]$ 进行估计:

$$E[z_k(j)] = \frac{1}{M} \sum_{i=1}^M z_k(i, j). \quad (7)$$

为使估计更加精确,还引入了同列不同帧的像素值,并以迭代形式进行计算:

$$E[z_k(j)] = \frac{1}{Mk} \sum_{i=1}^M z_k(i,j) + \frac{k-1}{k} E[z_{k-1}(j)]. \quad (8)$$

3.2 探测器级非均匀校正

本算法第二个阶段的非均匀校正,是在通道级校正的基础上利用改进的神经网络方法(传统的神经网络方法参见文献[4])进一步实现探测器级的非均匀校正。

现将式(1)改写为:

$$x_k(i,j) = G_k(i,j)y_k(i,j) + O_k(i,j), \quad (9)$$

其中,增益校正系数 $G_k(i,j) = \frac{1}{a_k(i,j)}$,偏置校正

$$\text{系数 } O_k(i,j) = -\frac{b_k(i,j)}{a_k(i,j)}.$$

这样,可以认为式(9)是一个最简单的神经网络系统,是由一个带有连接权 $G_k(i,j)$ 和偏置 $O_k(i,j)$ 的神经元构成,且探测器的输出响应 $y_k(i,j)$ 为其输入,校正结果 $\hat{x}_k(i,j)$ 为其输出,即:

$$\hat{x}_k(i,j) = \hat{G}_k(i,j)y_k(i,j) + \hat{O}_k(i,j), \quad (10)$$

式中,参数 $\hat{G}_k(i,j)$ 和 $\hat{O}_k(i,j)$ 要进行逐帧迭代更新以最小化某个误差函数,从而使校正结果 $\hat{x}_k(i,j)$ 无限趋近于真实值 $x_k(i,j)$ 。为此,构造误差函数如下:

$$J_k(i,j) = [\hat{G}_k(i,j)y_k(i,j) + \hat{O}_k(i,j) - f_k(i,j)]^2, \quad (11)$$

其中, $f_k(i,j)$ 是真实场景的估计值。由于固定图案噪声是空间随机的,因此可以假定任一像素点的真实值可由其校正结果的四邻域平均来估计,即:

$$f_k(i,j) = \frac{\hat{x}_k(i,j+1) + \hat{x}_k(i,j-1) + \hat{x}_k(i-1,j) + \hat{x}_k(i+1,j)}{4}. \quad (12)$$

对式(11)利用最速下降算法,可得到 $\hat{G}_{k+1}(i,j)$ 和 $\hat{O}_{k+1}(i,j)$ 的递推表达式:

$$\hat{G}_{k+1}(i,j) = \hat{G}_k(i,j) - 2\alpha_k y_k(i,j) [\hat{x}_k(i,j) - f_k(i,j)], \quad (13)$$

$$\hat{O}_{k+1}(i,j) = \hat{O}_k(i,j) - 2\beta_k [\hat{x}_k(i,j) - f_k(i,j)], \quad (14)$$

其中, α_k 和 β_k 分别为两式的步长因子。该算法与传统神经网络算法的不同点就在于这里的步长因子能够自适应调节,从而使增益校正系数和偏置校正系数的更新值在式(15)意义下总为最优:

$$E_{k+1} = \|\hat{x}_{k+1} - f_{k+1}\|_2^2 = \sum_{i=1}^M \sum_{j=1}^N [\hat{x}_{k+1}(i,j) - f_{k+1}(i,j)]^2, \quad (15)$$

将式(15)对 α_k 和 β_k 分别进行求导,并令求导结果为零,则可得到最优步长因子:

$$\tilde{\alpha}_k = \arg \min_{\alpha_k} E_{k+1} = \frac{S_{k+1}(1)S_{k+1}(4) - S_{k+1}(2)S_{k+1}(5)}{2[S_{k+1}^2(4) - S_{k+1}(2)S_{k+1}(3)]}, \quad (16)$$

$$\tilde{\beta}_k = \arg \min_{\beta_k} E_{k+1} = \frac{S_{k+1}(4)S_{k+1}(5) - S_{k+1}(1)S_{k+1}(3)}{2[S_{k+1}^2(4) - S_{k+1}(2)S_{k+1}(3)]}, \quad (17)$$

其中

$$S_{k+1}(1) = \sum_{i=1}^M \sum_{j=1}^N [B_{k+1}(i,j) - \bar{B}_{k+1}(i,j)] [C_{k+1}(i,j) - \bar{C}_{k+1}(i,j)], \quad (18)$$

$$S_{k+1}(2) = \sum_{i=1}^M \sum_{j=1}^N [C_{k+1}(i,j) - \bar{C}_{k+1}(i,j)]^2, \quad (19)$$

$$S_{k+1}(3) = \sum_{i=1}^M \sum_{j=1}^N [A_{k+1}(i,j) - \bar{A}_{k+1}(i,j)]^2, \quad (20)$$

$$S_{k+1}(4) = \sum_{i=1}^M \sum_{j=1}^N [A_{k+1}(i,j) - \bar{A}_{k+1}(i,j)] [C_{k+1}(i,j) - \bar{C}_{k+1}(i,j)], \quad (21)$$

$$S_{k+1}(5) = \sum_{i=1}^M \sum_{j=1}^N [A_{k+1}(i,j) - \bar{A}_{k+1}(i,j)] [B_{k+1}(i,j) - \bar{B}_{k+1}(i,j)], \quad (22)$$

$$A_{k+1}(i,j) = y_k(i,j)y_{k+1}(i,j) [\hat{x}_k(i,j) - f_k(i,j)], \quad (23)$$

$$B_{k+1}(i,j) = \hat{G}_k(i,j)y_{k+1}(i,j) + \hat{O}_k(i,j), \quad (24)$$

$$C_{k+1}(i,j) = \hat{x}_k(i,j) - f_k(i,j), \quad (25)$$

$$\bar{A}_{k+1}(i,j) = [A_{k+1}(i,j-1) + A_{k+1}(i,j+1) + A_{k+1}(i-1,j) + A_{k+1}(i+1,j)]/4. \quad (26)$$

此外, $\bar{B}_{k+1}(i,j)$ 和 $\bar{C}_{k+1}(i,j)$ 与 $\bar{A}_{k+1}(i,j)$ 的形式相同。

通过上述的逐帧迭代更新,对于每一幅图像都可以利用式(13)、(14)得到最优的参数估计,进而再利用式(10)获得最终的校正结果。

4 算法仿真与结果分析

4.1 仿真红外图像的非均匀校正

本部分采用 255 帧、256 级灰度、大小为 250×160 的已校正红外图像序列(图 1(a)和 1(f)分别为该序列第 2 帧和第 255 帧),通过对其加上已知的固定图案噪声来检验算法的有效性。为方便

起见,可假设该仿真图像的读出电路只有两个通道,且它们的偏置灰度值分别为 10 和 50,而探测器级乘性噪声和加性噪声都满足高斯分布,其具

体均值 (Mean) 和标准差 (Standard Deviation, SD) 如表 1 所示。图 1(b) 和 1(g) 分别为图 1(a) 和图 1(f) 被上述噪声污染后的结果。

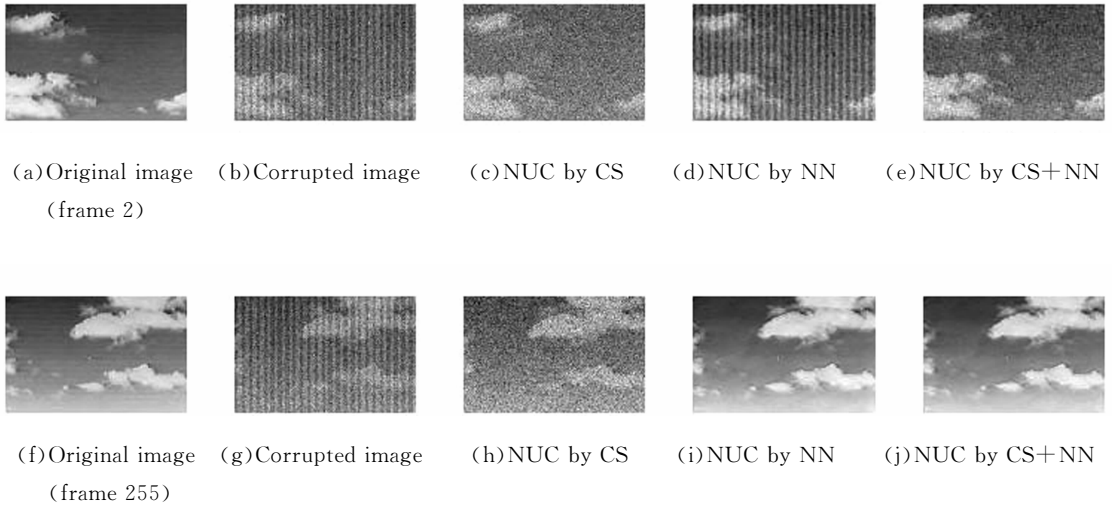
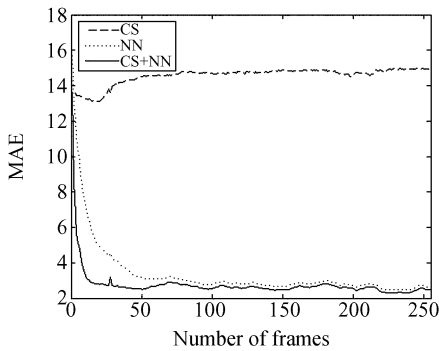
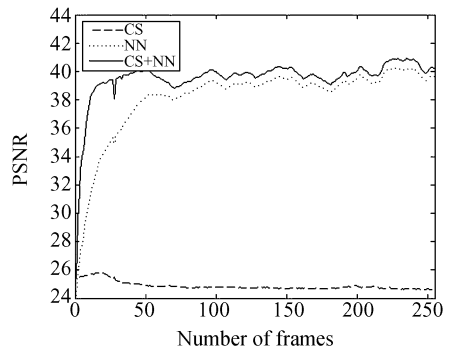


图 1 三种算法对于仿真红外图像的校正能力

Fig. 1 Correction effect for simulated infrared images by three kinds of algorithm



(a) 用 MAE 进行评价
(a) Evaluated by MAE



(b) 用 PSNR 进行评估
(b) Evaluated by PSNR

图 2 算法性能与帧数之间的关系

Fig. 2 Relationship between the performance of algorithm and the number of frames

这里,我们分别采用恒定统计算法(CS)、改进的神经网络算法(NN)和本文提出的综合算法(CS+NN)对仿真图像序列进行非均匀校正,图 1 显示了第 2 帧和第 255 帧图像的实际校正效果。可以看出:(1)CS 算法对通道级 FPN 有很好的抑制作用,而对探测器级 FPN 无能为力;(2)NN 算法在开始时校正效果不是很理想,而本文提出的

CS+NN 算法从一开始就有较好的校正效果;(3)随着迭代帧数的增加,CS+NN 算法和 NN 算法都几乎能够滤除所有的 FPN,并且其校正结果也非常相似。

另外,还可以利用平均绝对误差 (Mean Absolute Error, MAE) 和峰值信噪比 (Peak Signal-to-Noise Ratio, PSNR) 作为算法性能的评价指

标。如图 2 给出了三种算法的性能与帧数之间的关系,由图可见:CS+NN 算法在 20 帧时就已经收敛到一个很好的校正水平(其中 $MAE=2.9$, $PSNR=39.2$),显然比 NN 算法具有更快的收敛速度(虽然 100 帧以后它们的收敛值很接近);而 CS 算法的校正能力与帧数没有太大关系,因此结合前面的讨论可以认为 CS 算法在 CS+NN 算法中能够起到预处理的作用,这也是 CS+NN 算法优于 NN 算法的主要原因。

表 1 通道和探测器的噪声参数

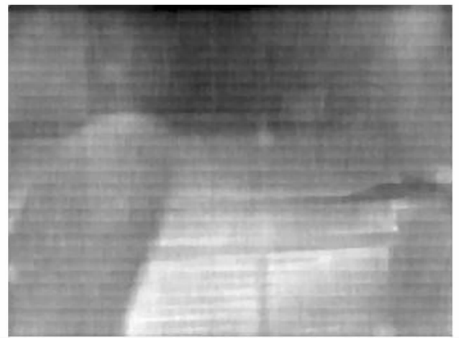
Tab. 1 Noise parameters of channels and detectors

	Gain		Offset	
	Mean	SD	Mean	SD
Channel 1	1		10	
Channel 2	1		50	
Detectors	1	0.1	0	20

4.2 真实红外图像的非均匀校正

本部分使用的红外图像序列是利用法国 ULIS 公司的 320×240 、工作在 $8 \sim 14 \mu\text{m}$ 范围的 IRFPA 采集的,共 400 frames,采样速率为 30 frame/s,14 bit 量化(最大灰度值为 16 383)。

图 3(a)为第 310 帧真实红外图像,可以看出其上有很严重的固定图案噪声,经过三种算法校正后的结果分别为图 3(b)、3(c)和 3(d)。由图可见:(1)CS 算法虽然能够很好地去除条纹噪声,但其总体校正效果仍不理想;(2)NN 算法具有很好的校正效果,但是图 3(c)右上部分偏黑,“鬼影”(Ghosting Artifact)^[9]稍重;(3)CS+NN 算法能够有效地抑制“鬼影”,但由于有些列不完全满足



(b)用 CS 算法校正的图像

(b) Corrected by CS



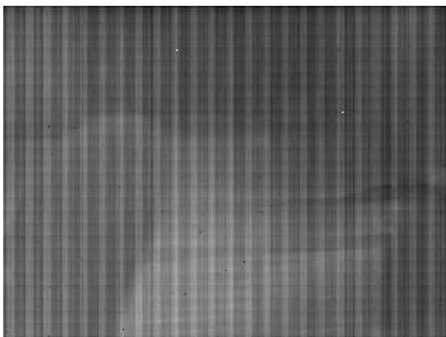
(c)用 NN 算法校正的图像

(c) Corrected by NN



(d)用 CS+NN 算法校正的图像

(d) Corrected by CS+NN



(a)未校正图像

(a) Uncorrected image

图 3 三种算法对于真实图像的校正效果

Fig. 3 Correction effect for real infrared images by three kinds of algorithm

恒定统计假设,因此图 3(d)又引入了一些条纹噪声,但总的来说与 NN 算法的校正水平相当,这与在 4.1 节所得出的结论相一致。

5 结 论

本文提出了一种基于红外焦平面阵列读出结构的非均匀校正算法,它可以根据固定图案噪声的产生机理利用CS算法和NN算法分别实现通

道级和探测器级非均匀校正。实验结果表明,该方法对于固定图案噪声和“鬼影”都有很好的抑制作用,并且只需要20帧就能够收敛,具有比NN算法更快的收敛速度(虽然100帧以后两者的校正水平相当),这主要是因为CS算法能够起到预处理的功效。

参考文献:

- [1] 许中胜. 红外探测系统参数关系及实际应用[J]. 光学精密工程, 1999, 7(4): 81-85.
XU ZH SH. Infrared detection system parameter relation formula and practical application [J]. *Opt. Precision Eng.*, 1999, 7(4): 81-85. (in Chinese)
- [2] 崔敦杰. 关于红外探测器与红外焦平面阵列探测器性能参数描述方法的商榷[J]. 光学精密工程, 2003, 11(3): 265-269.
CUI D J. How to define noise and associated performance parameters for infrared detector and infrared focal plane array detectors [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2003, 11(3): 265-269. (in Chinese)
- [3] 代少升, 袁祥辉. 红外图像非均匀性实时校正的新技术[J]. 光学精密工程, 2004, 12(2): 201-204.
DAI SH SH, YUAN X H. Real-time correction of infrared image nonuniformity [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2004, 12(2): 201-204. (in Chinese)
- [4] SCRIBNER D A, SARKAY K A, KRUEER M K, *et al.*. Adaptive nonuniformity correction for IR focal plane arrays using neural networks [J]. *SPIE*, 1991, 1541: 100-109.
- [5] HARRIS J G, CHIANG Y M. Nonuniformity correction of infrared image sequences using the constant-statistics constraint [J]. *IEEE Trans. Image Processing*, 1999, 8(8): 1148-1151.
- [6] RATLIFF B M, HAYAT M M, TYO J S. Generalized algebraic scene-based nonuniformity correction algorithm [J]. *J. Opt. Soc. Am. A.*, 2005, 22(2): 239-249.
- [7] PEZOA J E, HAYAT M M. Multimodel Kalman filtering for adaptive nonuniformity correction in infrared sensors [J]. *J. Opt. Soc. Am. A.*, 2006, 23(6): 1282-1291.
- [8] 徐田华, 赵继政, 赵亦工. 基于高阶统计量的红外焦平面非均匀校正算法[J]. 西安电子科技大学学报, 2006, 33(2): 227-230.
XU T H, ZHAO J ZH, ZHAO Y G. High-order-statistics based nonuniformity correction for infrared focal plane arrays [J]. *Journal of Xidian University*, 2006, 33(2): 227-230. (in Chinese)
- [9] HARRIS J G, CHIANG Y M. Minimizing the "ghosting" artifact in scene-based nonuniformity correction [J]. *SPIE*, 1998, 3377: 106-113.

作者简介:刘永进(1983—),男,安徽金寨人,博士研究生,主要从事图像与信号处理方面的研究。E-mail: lyj830924@sohu.com

赵亦工(1960—),男,陕西西安人,教授,博士生导师,主要从事光电成像探测、识别与跟踪,雷达信号处理及雷达成像方面的研究。E-mail: ygzhao@xidian.edu.cn