

基于非线性模型的卡尔曼滤波非均匀性校正算法

周慧鑫 魏亚姣 秦翰林 王炳健

(西安电子科技大学 技术物理学院, 陕西 西安 710071)

摘要 针对红外焦平面阵列探测单元响应的非线性对非均匀性校正的影响, 利用探测器响应的非线性模型, 对卡尔曼滤波非均匀性校正算法进行扩展和改进, 以有效地克服响应非线性对校正精度的影响。该算法先对图像进行非线性压缩, 转换为线性图像, 再利用线性模型下的卡尔曼滤波算法实施非均匀校正, 然后对其进行取指数操作, 即得到原图非均匀校正后的图像。实验结果表明, 该算法不仅继承了原算法利用场景信息来最优地更新校正参数的估计, 解决了探测器偏置和增益漂移对校正影响, 而且还在一定程度上解决了响应非线性对校正性能的影响, 从而获得了较好的非均匀性校正效果。

关键词 红外成像系统; 非均匀性校正; 非线性模型; 卡尔曼滤波; 红外焦平面阵列

中图分类号 TN21 **文献标识码** A **doi**: 10.3788/AOS20082902.0378

Kalman-Filtering Nonuniformity Correction Algorithm Based on Nonlinear Model

Zhou Huixin Wei Yajiao Qin Hanlin Wang Bingjian

(School of Technical Physics, Xidian University, Xi'an, Shaanxi 710071, China)

Abstract For resolving the influence that the nonlinear response of detectors imposed on the nonuniformity correction (NUC) for infrared focal plane arrays, a new improved Kalman-filtering nonuniformity correction algorithm with a nonlinear model is presented. In this algorithm, the nonlinear image data is translated into linearized one firstly, then the Kalman-filter NUC algorithm with a linear model is utilized to correct nonuniformity of the linearized image. Finally the exponents of the corrected linearized image data is calculated, and the uniformity image of the original one is achieved. Experimental results indicate that the presented algorithm not only inherits the advantage of the original algorithm, which resolves the problem of detector offset and gain drift with time by updating NUC parameters with information of the current scene, but also reduces the influence of the detector nonlinear response to the NUC performance in some degree, and acquires good NUC effect.

Key words infrared imaging systems; nonuniformity correction(NUC); nonlinear model; Kalman filter; infrared focal-plane arrays

1 引 言

红外焦平面阵列(IRFPA)器件各探测单元响应特性之间普遍存在着非均匀性,在图像上表现为固定图案噪声。它导致 IRFPA 成像系统的成像质量和空间分辨率等性能显著下降,因此实用中的 IRFPA 器件几乎都采用相应的非均匀性校正(NUC)技术^[1,2]。

近二十多年,NUC 技术得到很大的发展,大致可以分成两大类,一类是基于参考辐射源的校正算法,如两点或多点校正技术^[1,2],它们需要已知的参考辐射校正源,而且在实际系统中,为了降低探测器响应特性漂移对校正效果的影响,需要对系统进行周期性地重复定标,这就相应地增加了系统的复杂性,并影响了系统的正常工作,降低了系统的可靠性

收稿日期: 2008-02-27; 收到修改稿日期: 2008-09-04

基金项目: 教育部科学技术研究重点项目(108114)资助课题。

作者简介: 周慧鑫(1975—),男,副教授,博士,主要从事红外成像及图像处理、红外对抗等方面的研究。

E-mail: hxzhou@mail.xidian.edu.cn

和响应速度。另一类是基于场景的校正算法,是利用不同的现代信号理论建立的一类算法,如常数统计算法^[3]、时间高通滤波器技术^[4]、神经网络算法^[5,6]、维纳滤波^[7]、小波变换^[8]、卡尔曼滤波算法^[9]等。基于场景的 NUC 算法利用场景中信息来获得校正参数的,因而可以在不同程度上消除参数特性漂移对 NUC 性能的影响,这也是目前校正算法发展的趋势^[10]。

除了参数特性漂移对 NUC 影响之外,响应特性的非线性在大动态范围下对 NUC 的影响也是 IRFPA 非均匀性校正中需要解决的一个重要问题。本文提出了利用探测器响应的非线性模型对基于卡尔曼滤波 NUC 算法进行扩展和改进,它不仅继承了原算法降低探测器响应参数随时间漂移对校正的影响,而且还解决了响应非线性的影响。实验结果表明这种改进新算法在一定程度上解决了探测器偏置和增益随时间漂移以及响应非线性影响 NUC 性能的问题,获得了较好的非均匀性校正效果,扩展了器件响应的动态范围。

2 卡尔曼滤波非均匀性校正算法

先简要阐述涉及基于卡尔曼滤波的 IRFPA 非均匀性校正算法。该算法由 S. N. Torres 提出^[9]。算法用两个状态变量来表示 IRFPA 中每个探测单元的增益和偏置,将 n 帧图像作为一个帧块,假定探测器响应的增益和偏置在同一帧块内是不变的,而在帧块间存在缓慢的随机变化,所以用 Gauss-Markov 模型来描述状态变量,得出测量方程和状态方程,从而推导出状态变量(增益和偏置)的递推估计方程,最终利用增益和偏置的估计值以实现非均匀性校正。

2.1 测量方程

假定 IRFPA 工作在线性响应范围内,则其探测单元响应的测量方程为

$$\mathbf{S}_k = \mathbf{C}_k \mathbf{X}_k + \mathbf{V}_k \quad (1)$$

其中 k 是表示帧块矢量时间, \mathbf{S}_k 、 \mathbf{V}_k 和 \mathbf{C}_k 分别是该时间内的测量向量、读出噪声矢量(即附加的电路噪声)和测量矩阵。测量方程的矩阵形式为

$$\begin{bmatrix} s(1) \\ \vdots \\ s(l_k) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \varphi(1) & 1 \\ \vdots & \vdots \\ \varphi(l_k) & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x_k^1 \\ x_k^2 \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} v(1) \\ \vdots \\ v(l_k) \end{bmatrix}, \quad (2)$$

式中 x_k^1 和 x_k^2 分别是第 k 帧块时间内探测单元的增益和偏置; l_k 是第 k 帧块帧数。 $\varphi(n)$ 是探测器在该帧块内的第 n 个观察在积分期间内所接收到的辐射。 $v(n)$ 是第 n 个观察的读出噪声。为了简化,假

定:(1) 噪声 $v(n)$ 与辐射 $\varphi(n)$ 是相互独立的;(2) $\varphi(n)$ 是在 $[\varphi_k^{\min}, \varphi_k^{\max}]$ 范围内均匀分布的一个随机变量,该范围包含了使探测器响应达到饱和之前的所有可能的辐射量级,而且对 IRFPA 中所有探测器来说是相同的。读出噪声 v_k 的协方差可以表示为

$$E(v_k v_l^T) = \begin{cases} \Gamma_k & k = l \\ 0 & \text{other} \end{cases}, \quad \Gamma_k = \mathbf{D} \sigma_{v_k}^2. \quad (3)$$

其中矩阵 \mathbf{D} 是一个 $l_k \times l_k$ 的单位矩阵, $\sigma_{v_k}^2$ 是整个观察矢量的加性电子噪声的方差。

2.2 状态方程

根据算法假定,可采用 Gauss-Markov 过程来建立状态变量的模型,其状态方程为

$$\mathbf{X}_k = \mathbf{A}_k \mathbf{X}_{k-1} + \mathbf{H}_k \mathbf{W}_{k-1} \quad (4)$$

式中 \mathbf{A}_k 为第 k 矢量时间上的状态转移矩阵, \mathbf{H}_k 为该时间的系统伴随矩阵。(4)式矩阵形式为

$$\begin{bmatrix} x_k^1 \\ x_k^2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} a_k & 0 \\ 0 & b_k \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x_{k-1}^1 \\ x_{k-1}^2 \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} w_{k-1}^1 \\ w_{k-1}^2 \end{bmatrix}, \quad (5)$$

式中 x_k^1 、 x_k^2 和 x_{k-1}^1 、 x_{k-1}^2 分别是第 k 和第 $k-1$ 矢量时间内探测单元响应的增益和偏置; w_{k-1}^1 和 w_{k-1}^2 分别为第 $k-1$ 矢量时间内增益和偏置的激励噪声;参数 a_k 和 b_k 分别表征增益和偏置的漂移,它们分别是由第 k 状态与 $k-1$ 状态下增益和偏置之间的漂移程度所决定的。假定激励噪声 \mathbf{W}_k 的随机过程是互不相关的,则其协方差表示为

$$E[\mathbf{W}_k \mathbf{W}_l^T] = \begin{cases} \xi_k & k = l \\ 0 & \text{other} \end{cases}, \quad \xi_k = \begin{bmatrix} \sigma_{w_k^1}^2 & 0 \\ 0 & \sigma_{w_k^2}^2 \end{bmatrix}, \quad (6)$$

式中 $\sigma_{w_k^1}^2$ 、 $\sigma_{w_k^2}^2$ 分别是增益和偏置激励噪声的方差。

2.3 算法实现

在实际的应用中,增益和偏置在时间上的随机漂移不会改变非均匀性的统计特性。假定系统初始状态 X_0 为随机变量,其与激励噪声和读出噪声都不相关。设 X_0 具有已知的均值 $\bar{X}_0 = E[X_0]$ 和协方差矩阵 $P_0 = \text{var}(X_0) = E[(X_0 - \bar{X}_0)(X_0 - \bar{X}_0)^T]$ 。算法设状态值 X_1 的初始预测值 \hat{X}_1^- 为

$$\hat{X}_1^- = \Phi_0 \bar{X}_0, \quad (7)$$

如此就获得了卡尔曼滤波所要求的初始条件。设 k 矢量时间内观测矩阵的均值为 \bar{C}_k 。当 $k \geq 1$ 时,基于测量值 S_1, S_2, \dots, S_k 的状态估值 \hat{X}_k 可通过下列方程的递归运算获得

$$\hat{X}_k^- = A_{k-1} \hat{X}_{k-1} + H_{k-1} \bar{W}_{k-1}, \quad k = 1, 2, \dots \quad (8)$$

$$P_k^- = A_{k-1} P_{k-1} A_{k-1}^T + H_{k-1} \xi_{k-1} H_{k-1}^T, \quad (9)$$

$$K_k = P_k^- \bar{C}_k^T (\bar{C}_k P_k^- \bar{C}_k^T + \Gamma_k)^{-1}, \quad (10)$$

$$\hat{X}_k = \hat{X}_k^- + K_k (S_k - \bar{C}_k \hat{X}_k^-), \quad (11)$$

$$P_k = (I - K_k \bar{C}_k) P_k^-. \quad (12)$$

利用这个模型, IRFPA 中的每个探测单元的增益和偏置可利用一个卡尔曼滤波器来优化递归地估计出来。当一个新的帧块到来时, 滤波器利用当前场景的信息更新探测单元增益和偏置的旧估计, 以此消除增益和偏置漂移对非均匀性校正的影响。一旦探测器的增益和偏置被估计出来后, 即可按下式实现非均匀性校正。

$$S'_{i,j} = (S_{i,j} - O_{i,j}) / G_{i,j}, \quad (13)$$

式中 $S'_{i,j}$ 和 $S_{i,j}$ 分别是校正前后探测单元响应, G_{ij} 和 O_{ij} 分别为所得的增益和偏置估计值。

3 非线性响应模型

在上述算法的推导中, 红外探测器的响应特性假定是线性的, 但实际上探测器的响应特性是非线性的。在探测器的响应动态范围很大的工程应用中, 显然此时如果仍然采用线性模型, 则非线性将会对非均匀性校正引入较大的误差, 降低非均匀性校正的性能。

根据文献[11]以及在实际工作中对 IRFPA 特性响应曲线的标定, IRFPA 特性响应曲线可用一个非线性模型来描述。对于输入为 x 而响应为 Y 的某

一探测单元响应特性可表示为

$$Y = \frac{A}{1 + e^{B-Cx}}, \quad (14)$$

式中 A 表征探测器响应的动态范围, C 表征响应特性曲线的斜率, 而响应特性曲线的截距为 $A/(1 + e^B)$, 即用 B 来表征响应特性曲线的截距。

4 基于非线性模型的改进新算法

为了降低非线性对非均匀性校正的影响, 提出利用非线性模型对上述卡尔曼滤波校正算法进行改进和扩展, 得到一种新的非均匀性校正算法, 以适应大动态范围的应用。

对(14)式两边取对数后, 其变为如下形式:

$$\ln(A/Y - 1) = B - Cx, \quad (15)$$

令 $S = \ln(A/Y - 1)$, 则 S 与输入 x 间为线性关系, 这就满足上述的卡尔曼滤波 NUC 算法线性假定的条件, 从而可以采用其进行校正处理。扩展新算法原理框图如图 1 所示, 其实现的步骤如下:

1) 首先输入原非均匀图像, 对每个探测单元的响应 Y 取对数 $S = \ln(A/Y - 1)$, 以进行非线性压缩, 转化为线性化的图像 S ;

2) 然后对线性化图像 S 实施上述的卡尔曼滤波非均匀校正处理, 得校正后线性化图像 S' ;

3) 最后对校正处理后的线性化图像 S' 进行取指数操作 $Y' = A/(e^{S'} + 1)$, 即得到原图非均匀校正后的图像 Y' 。

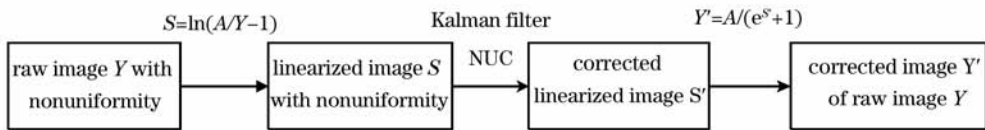


图 1 基于非线性模型的改进新算法

Fig. 1 Procedure of the presented improved algorithm based on the nonlinear model

由以上算法描述可看出, 改进扩展的新算法中采用非线性模型和指数运算, 巧妙地将非线性转化为线性问题, 并没有过多地增加在线计算量, 却达到了降低非线性响应对 NUC 影响的目的, 从而提高了非均匀性校正的精度, 较原算法进一步扩大了有效动态范围。

5 实验及分析

利用 $320 \text{ pixel} \times 240 \text{ pixel}$ 的非制冷 IRFPA 成像图像序列进行实验来验证所提出新算法的校正性能。该图像序列由 1000 帧图像组成, 以一个装有开水的瓶子在视场中进出、移动来模拟大动态视场, 视

场温度范围 $10 \sim 95 \text{ }^\circ\text{C}$ 。采用 IRFPA 非均匀性值 U_R 来衡量算法性能:

$$U_R = \frac{1}{\bar{V}_s} \sqrt{\frac{1}{MN} \sum_{i=1}^M \sum_{j=1}^N [V_s(i,j) - \bar{V}_s]^2}, \quad (16)$$

$$\bar{V}_s = \frac{1}{MN} \sum_{i=1}^M \sum_{j=1}^N V_s(i,j),$$

式中 $V_s(i,j)$ 为第 (i,j) 个探测单元的响应值, \bar{V}_s 为 IRFPA 中所有探测器的平均响应值, M, N 分别为 IRFPA 中探测单元的总行数和总列数。

实验中 A 取非均匀图像像素灰度最大值, 卡尔曼滤波器算法中设置帧块长度为 50, 增益和偏置的

漂移为 $a_k = b_k = 0.9$ 。图 2 给出了一组校正比较结果。图 2(a) 为取自该图像序列中的一幅原始帧图, 瓶子的热图被非均匀性引起的固定图案噪声严重湮没, 瓶盖和瓶身连接的提手环几乎不能分辨, 其非均匀性达 26.12%。图 2(b) 给出了图 2(a) 在 $k=5$ 的情况下原卡尔曼滤波算法校正后的帧图, 非均匀性降至 2.022%。图 2(c) 给出了 $k=5$ 的情况下本文算法对图 2(a) 的非均匀性校正图, 非均匀性降至 1.196%。实验结果表明, 两种算法在 $k=5$ 时由 250 个连续帧就可以得到较好的 NUC 效果, 固定图

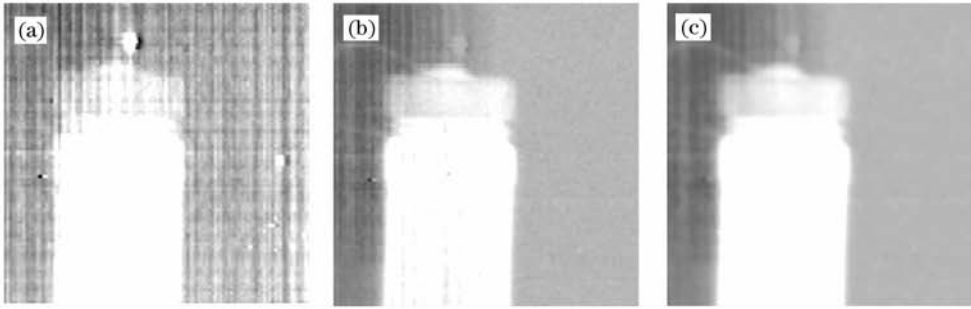


图 2 实验结果。(a)校正前图;(b)原卡尔曼滤波算法校正后图;(c)新扩展算法校正后图

Fig. 2 Experimental results. (a) Raw image before NUC; (b) The NUC image by the original Kalman filtering to 2(a); (c) The image corrected by the presented algorithm to 2(a)

6 结 论

提出了利用探测器响应的非线性模型对卡尔曼滤波非均匀性校正算法进行扩展和改进, 利用对数函数将非线性转化为线性问题。它不仅继承了卡尔曼滤波非均匀性校正算法的优点, 利用场景帧块中的信息在一定程度上解决了探测器偏置和增益随时间漂移的问题; 而且能一定程度上抑制响应非线性对 NUC 的影响, 从而获得了较好的非均匀性校正效果。改进新算法对 IRFPA 器件的非均匀性, 无论是线性还是非线性的, 都有良好的校正效果, 可适用的有效动态范围更大, 因而在工程上具有一定的应用价值。

参 考 文 献

- 1 A. F. Milton, F. R. Barone, M. R. Kruer. Influence of nonuniformity on infrared focal plan array performance [J]. *SPIE Opt. Eng.*, 1985, **24**(5): 855~862
- 2 D. L. Perry, E. L. Dereniak. Linear theory of nonuniformity correction in infrared staring sensors [J]. *SPIE Opt. Eng.*, 1993, **32**: 1854~1859
- 3 J. G. Harris, Y. M. Chiang. Nonuniformity correction of infrared image sequences using the constant-statistics constrain [J]. *IEEE Transactions on Image Processing*, 1999, **8**: 1148~1151
- 4 D. A. Scribner, K. A. Sarkay, J. T. Caulfield *et al.*. Nonuniformity Correction for Staring Focal Plane Arrays Using Scene-Base Technology [C]. *SPIE*, 1990, **1308**: 224~233

案噪声都得到了较好的去除, 瓶子热图变得清晰, 瓶盖和瓶身连接的提手环都显现出来了。由实验结果还可以清楚地得出, 在同样的条件下, 本文所提出的算法获得了相对更好的 NUC 效果。这是因为它不仅继承了卡尔曼滤波非均匀性校正算法利用场景帧块中的信息来最优地更新增益和偏置参数的估计, 在一定程度上解决了探测器偏置和增益随时间漂移对校正影响, 而且还在一定程度上解决了响应非线性影响非均匀性校正性能的问题, 从而获得了更好的非均匀性校正效果, 可适用的有效动态范围更大。

- 5 D. A. Scribner, K. A. Sarkay, M. R. Kruer *et al.*. Adaptive Nonuniformity Correction for IR Focal Plane Arrays Using Neural Networks [C]. *SPIE*, 1991, **1541**: 100~109
- 6 Wang Bingjian, Liu Shangqian, Lai Rui *et al.*. Adaptive nonuniformity correction algorithm for IRFPA based on neural network [J]. *J. Infrared Millim. Waves*, 2006, **25**(6): 405~407
王炳健, 刘上乾, 赖睿等. 基于神经网络的红外焦平面非均匀性自适应校正算法[J]. *红外与毫米波学报*, 2006, **25**(6): 405~407
- 7 Li Qing, Liu Shangqian, Wang Bingjian *et al.*. Wiener based nonuniformity correction algorithm for IRFPA [J]. *Acta Photonica Sinica*, 2006, **35**(12): 1908~1911
李庆, 刘上乾, 王炳健等. 基于维纳滤波的红外焦平面阵列非均匀性校正算法[J]. *光子学报*, 2006, **35**(12): 1908~1911
- 8 Qin Hanlin, Zhou Huixin, Liu Shangqian. Nonuniformity correction algorithm for infrared focal plane arrays based on wavelet transform [J]. *Acta Optica Sinica*, 2007, **27**(9): 1617~1620
秦翰林, 周慧鑫, 刘上乾. 小波变换的红外焦平面阵列非均匀性校正算法[J]. *光学学报*, 2007, **27**(9): 1617~1620
- 9 S. N. Torres, M. M. Hayat. Kalman filtering for adaptive nonuniformity correction in infrared focal plane arrays [J]. *J. Opt. Soc. Am. A*, 2003, **20**: 470~480
- 10 Zhang Tianxu, Shi Changcheng, Li Jiejun *et al.*. Overview of research on the adaptive algorithms for nonuniformity corrections of infrared focal plane array [J]. *J. Infrared Millim. Waves*, 2007, **26**(6): 409~413
张天序, 施长城, 李洁珺等. 红外焦平面阵列非均匀性自适应校正算法研究进展 [J]. *红外与毫米波学报*, 2007, **26**(6): 409~413
- 11 Huixin Zhou, Shangqian Liu, Rui Lai *et al.*. Solution for nonuniformity correction of infrared focal plane arrays [J]. *Appl. Opt.*, 2005, **44**(15): 2928~2932