

改进的探测器 S 形曲线的非均匀校正算法研究

赵 岩, 张 焱, 沈振康

(国防科学技术大学电子科学与工程学院, 湖南 长沙 410073)

摘 要:在大动态范围内,基于光子效应的 IRFPA 探测器单元的响应输出与入射辐照度之间为非线性关系。由理论分析各测量结果可知,探测器的响应曲线服从 S 形非线性分布。然而经典 S 形曲线校正算法计算量大,而且参数随时间漂移,工作一段时间后需重新定标,这样必然影响热像仪的连续工作,并且增大了硬件实现的难度。针对这两个问题提出了改进的 S 形曲线校正算法。该算法结合两点校正算法,减少了计算量,并利用最小均方法(LMS)对 S 形曲线的定标参数进行补偿,解决了探测器需要重新定标的问题,实现了基于 LMS 的 S 形两点定标校正算法。并通过实验,表明提出的改进算法计算量小,校正精度较高,而且解决了经典 S 形曲线校正算法需多次定标的问题,具有较好的工程实践意义。

关键词:非均匀校正;两点定标线性校正法;最小均方法;S 形曲线

中图分类号:TP391;TN215

文献标识码:A

Improved Detector Nonuniformity Correction Based on S-curve Model

ZHAO Yan, ZHANG Yan, SHEN Zhen-kang

(School of Electronic Science and Engineering, National University of Defense Technology, Changsha 410073, China)

Abstract: The relation between response output and radiate input of the detectors of the IRFPA is nonlinearity in big dynamical range. Due to the result of the experiment, we knew that the response curve of the detector obeys S-curve model. However, the traditional S-curve model correction needs great deal of calculate. And the parameters drift as time goes by. The parameters need to be compensated which may affect the continuous working of the infrared detectors and at the same time makes the system complex. New method combined with two-point NUC correction, which reduced calculate a lot. Based on least mean square (LMS) algorithm, the parameters of the S-curve model is compensated to solve the problem of the traditional method in this paper. And the new improved algorithm is realized. Its efficiency and superiority are clarified by experiment. The algorithm has better engineering practice significance.

Key words: nonuniformity correction; two-point linear correction; LMS; S-curve model

1 引 言

红外焦平面阵列构成的成像系统在军事、医疗、安全等方面得到了日益广泛的应用,但是由于制造工艺的限制,使得红外探测器阵列的各个单元响应度不一致,产生了叠加在图像上的固定图案噪声(FPN),严重影响了成像质量,因此必须进行非均匀性校正^[1]。根据理论分析各测量统计结果可知,探测器的响应曲线服从 S 形非线性分布,即每条响应

曲线都包含了缓慢上升、线性增长和趋于饱和的三个变化过程,只是对于不同的探测单元,其 S 曲线的具体位置和形状不尽相同而已。经典的基于 S 形曲线的校正算法对于每个像元都需要解四元

基金项目:武器装备预研基金(No. 9140A01030406KG01)项目资助。

作者简介:赵 岩(1983-),女,硕士研究生。E-mail: zhaoyan0829@sina.com

收稿日期:2007-09-18

非线性方程组,计算量大,计算需时较长,难以实时实现。针对这个问题提出了改进的基于 S 形曲线的非均匀校正算法,不仅解决了经典算法中计算量大的问题,而且对 S 形曲线的定标参数进行补偿,解决了探测器需要重新定标的问题,实现了基于 LMS 的 S 形两点定标校正算法^[2]。

2 改进的 S 形曲线非均匀校正算法描述

2.1 S 形曲线校正方法的原理描述

根据长期工程实践经验,可知探测元响应曲线可近似表示为^[3]:

$$v = \frac{A}{1 + \exp(B\phi + C)} + D \quad (1)$$

其中, ϕ 为某探测元入射的红外辐射通量; v 是某探测元的响应输出值; A, B, C, D 分别是此探测元响应曲线的参数。

非线性拟合校正算法的原理,是在忠实于光敏元响应非线性的前提下,利用特殊点(如曲线的极值点、拐点和焦平面经常处于的工作环境温度点等)对各个光敏元的响应进行定标,然后根据曲线特征找到一个校正函数,对各个光敏元的响应输出进行校正,使得所有光敏元的响应曲线重合于一条期望曲线(一般利用各定标点的响应输出均值确定这条期望曲线),从而消除响应非线性的不均匀性,完成焦平面的非均匀校正。如图 1 所示,取 4 个定标点 $\phi_1, \phi_2, \phi_3, \phi_4$, 分别测得在 4 个定标点输出图像中对应于黑体的像素的灰度值 P_1, P_2, P_3 和 P_4 。利用多帧平均的方法计算出各个定标点的灰度均值 $\bar{P}_1, \bar{P}_2, \bar{P}_3$ 和 $\bar{P}_4$ 作为期望输出,即有:

$$\bar{P}_i = \frac{1}{F} \sum_{f=1}^F P_i \quad (2)$$

其中, F 是采样帧数。

把 ϕ_i, P_i 和 $\bar{P}_i (i=1, 2, 3, 4)$ 代入拟定的数学模型的方程中,得到 4 个方程组,解方程组可以得到对应于该光敏元的响应曲线的参数 $\tilde{a}(i, j), \tilde{b}(i, j), \tilde{c}(i, j)$ 和 $\tilde{d}(i, j)$ 的值和期望曲线的参数 $a(i, j), b(i, j), c(i, j)$ 和 $d(i, j)$ 。与两点温度定标法相似,我们可以找到某种映射关系,使得 $\tilde{a}(i, j), \tilde{b}(i, j), \tilde{c}(i, j)$ 和 $\tilde{d}(i, j)$ 经过运算分别映射到 $a(i, j), b(i, j), c(i, j)$ 和 $d(i, j)$, 即把所有光敏元的响应曲线拉到期望曲线的位置上,使它们都重合于标准的期望输出曲线。

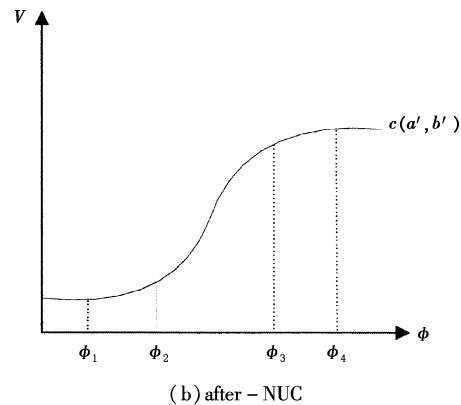
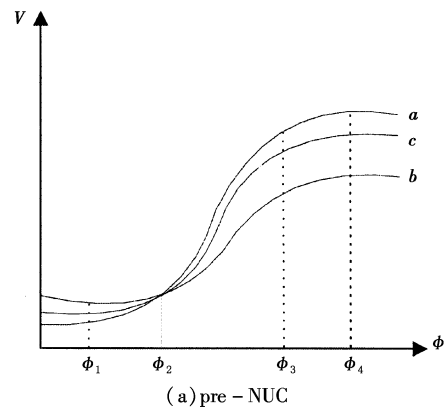


图 1 S 形曲线校正算法示意图

Fig. 1 schematic of S - curve NUC

经典的 S 形曲线校正算法需要对每一个像元求解一个四元的非线性方程组,计算量很大,求解过程对硬件的要求较高,并且很难实现实时校正。这就直接限制了基于 S 形曲线的非均匀校正算法在实际中的应用。

2.2 S 形曲线的两点校正算法描述

由式(1)可得^[4]:

$$\frac{A}{v - D} - 1 = \exp(B\phi + C) \quad (3)$$

对式(3)两边取对数:

$$\ln\left(\frac{A}{v - D} - 1\right) = B\phi + C \quad (4)$$

$$\text{令: } V = \ln\left(\frac{A}{v - D} - 1\right) \quad (5)$$

$$\text{得: } V = B\phi + C \quad (6)$$

由此我们可以看出,如果我们对探测元响应近似满足 S 形曲线的热像仪的输出图像进行如式(5)的处理,得到的处理后的图像与焦平面的入射辐射通量呈线性关系。所以,可以使用两点定标线性校正算法校正经过式(5)处理后的图像。这里,我们假设用两点定标线性校正算法校正后的图像为 V' 。如图 2(a) 中所示曲线 a, b 是不同探测元的响应的 S

形曲线,因为曲线 a, b 的参数不同,使原图像变得不均匀,我们的目的是把曲线 a, b 经过变换拉到目标曲线 s 上,使不均匀的图像变得均匀,对 v 进行如式(5)的处理,可以得到如图2(b)所示的直线 A, B ,还有由目标曲线 s 得到的目标直线 S ,通过两点定标线性校正算法,将直线 A, B 拉到直线 S 上,如图2(c)所示。最后,通过对 V' 进行式(5)的反变换的处理,得到(d)中的 v' 。

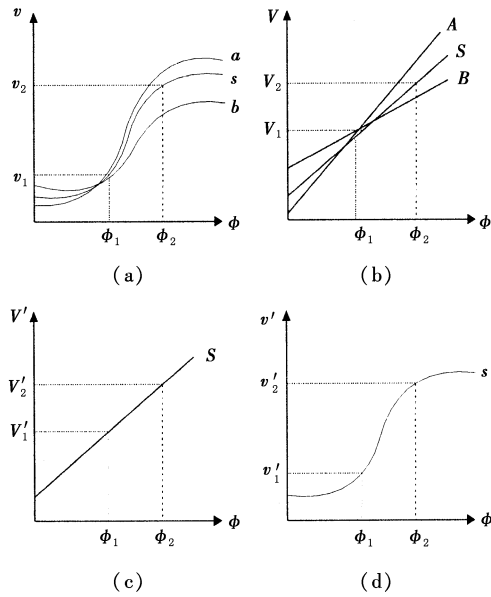


图2 S形曲线的两点校正算法示意图

Fig.2 schematic of S-curve two point NUC

算法框图如图3所示。

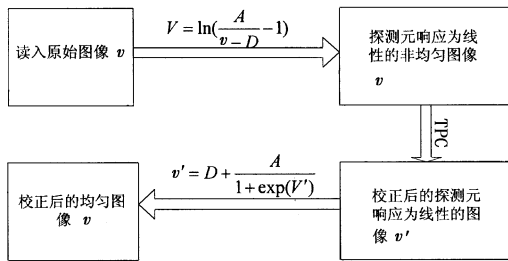


图3 S形曲线的两点校正算法框图

Fig.3 procedure for the S-curve two point NUC

S形曲线的两点校正方法较两点定标线性校正算法更忠实于光敏元的真实特性,因而能达到更高的校正精度。这种方法增大了其适用的动态范围,因而有更大的发展潜力。

2.3 基于LMS的S形曲线校正算法描述

虽然S形曲线的两点校正方法相比较两点定标线性校正算法在一定程度上增大了动态范围,但是在实际应用中,还需要在一段时间之后重新“定标”。这必然会影响热像仪的连续工作,并且增大

了硬件实现的难度。为了解决这一问题,在上述算法中引入LMS^[5]算法,以便对工作一段时间后的 G_{ij}, O_{ij} 进行补偿。

将LMS算法用于上述基于S形曲线的两点校正算法,得到系数 G_{ij} 和 O_{ij} 的迭代公式:

$$G_{ij}(n+1) = G_{ij}(n) + 2 \cdot \mu \cdot V_{ij}(n) \cdot (d_{ij}(n) - V'_{ij}(n)) \quad (7)$$

$$O_{ij}(n+1) = O_{ij}(n) + 2 \cdot \mu \cdot (d_{ij}(n) - V'_{ij}(n)) \quad (8)$$

其中,

$$V'_{ij}(n) = G_{ij}(n) \cdot V_{ij}(n) + O_{ij}(n) \quad (9)$$

$d_{ij}(n)$ 是在 n 时刻,探测元 (i, j) 的理想输出。通常情况下,我们可以用其实际校正输出 V'_{ij} 的四邻域均值来估计,即:

$$d_{ij}(n) = \frac{(V'_{i,j+1} + V'_{i,j-1} + V'_{i-1,j} + V'_{i+1,j})}{4} \quad (10)$$

步长 μ 可经过多次实验,通过实验结果选择最优值。步长选择过小,收敛速度过慢,可能导致在实验的连续帧数范围内算法未达到收敛;过大的步长则导致算法不收敛,图像非均匀性恶化。

改进的算法中的初值 $G_{ij}(1)$ 和 $O_{ij}(1)$ 是通过前面的算法已经得到的。这就大大减少了迭代次数,加快了算法的收敛速度。

3 实验结果及其分析

3.1 实验结果的评价指标

本文中在以均匀辐射下,焦平面阵列像元视频输出值的均方根偏差与视频输出平均值的百分比值NU,作为非均匀度的评价指标^[6]。

$$NU = \frac{1}{V_{\text{oavg}}} \sqrt{\frac{1}{M \times N - (d+h)} \sum_{i=1}^M \sum_{j=1}^N (V_{ij} - V_{\text{oavg}})^2} \quad (11)$$

式中:

$$V_{\text{oavg}} = \frac{1}{M \times N - (d+h)} \sum_{i=1}^M \sum_{j=1}^N V_{ij}$$

其中, V_{ij} 为焦平面上第 i 行第 j 列所对应像元的视频输出信号; V_{oavg} 为焦平面上所有有效像元的视频信号平均值(在计算视频信号的和以及非均匀性时,均不包括无效像元的信号值); M 和 N 分别为焦平面阵列的行数和列数; d 为焦平面阵列中的死像元数; h 为焦平面阵列中的过热像元数^[7]。其中死像元定义为响应率小于平均响应率 $1/10$ 的像元,过热像元定义为噪声电压大于焦平面平均噪声电压 10 倍的像元。同时本文中给出校正前后黑体图像的三

维网格图,可以更加直观地看出校正前后非均匀度的变化。

3.2 实验结果

算法中使用的黑体图如图 4(a)所示。图 4(b)是利用两点定标线性校正算法校正后的图像。与原图像的非均匀度相比,经过两点定标线性校正算法校正后,图像的非均匀度降低了一个数量级,校正效果较好。图 4(c)是经过 S 形曲线的两点校正法校正后的图像。与经过两点定标线性校正算法校正后图像的非均匀度相比,此时图像的非均匀度也有所改善。图 4(d)是经过基于 LMS 的 S 形曲线两点校正法对图 4(a)的黑体图校正后图像。与两点定标线性校正算法和 S 形曲线的两点校正法相比,这种校正方法明显改善了校正的非均匀度。图 5 中(a),(b),(c),(d)四幅图分别为对应于图 4 中四幅图的三维网格图。图中的 x 轴和 y 轴分别对应的图像的行和列, z 轴对应的图像的灰度值信息。从三维网格图上我们也可以看出此时图像的灰度值变得很平缓,图像中最大的灰度值为 143,最小的灰度值为 140,最大与最小的像素值只差 3 个灰度级。

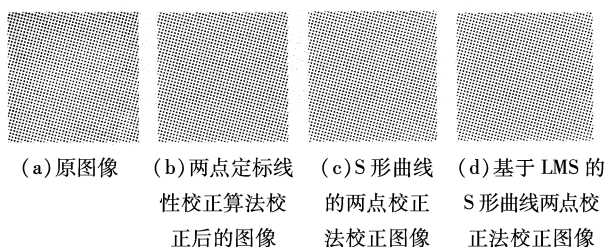


图 4 原图像及经过不同算法校正后的图像

Fig. 4 result of simulated image

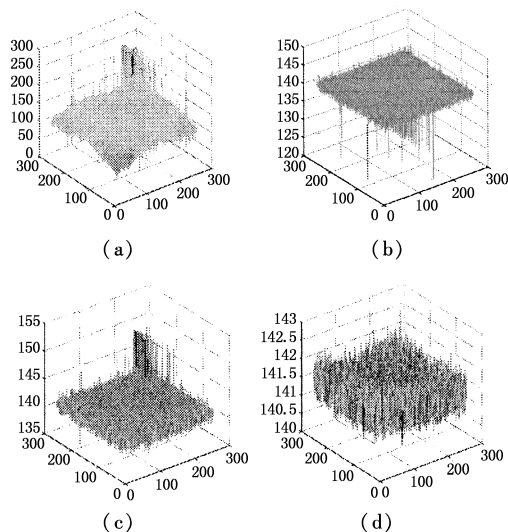


图 5 与图 4 中(a),(b),(c),(d)对应的三维网格图

Fig. 5 three-dimensional gridding chart corresponding with Fig. 4

上述三种校正算法实验校正效果比较如表 1 所示。

表 1 三种校正算法实验效果比较

Tab. 1 comparison of the three algorithm

实验算法名称	校正前的非均匀度	校正后的非均匀度
两点定标线性校正算法/%	9.098	0.49691
S 形曲线的两点校正算法/%	9.098	0.49132
基于 LMS 的 S 形曲线 两点校正算法/%	9.098	0.23017

4 结束语

本文针对 S 形曲线校正算法存在的计算量大,难以实现实时校正,以及在校正过程中参数会出现漂移等问题提出了改进的 S 形曲线的定标校正算法。本文阐述了算法的理论基础,并通过实验给出了改进的算法的校正效果图及对比数据。与两点定标校正算法相比,此算法在一定程度上减小了由于响应非线性引起的两点定标线性校正算法的校正误差,并且省去了两点定标线性校正算法的实时使用时的多次定标过程,更加能满足硬件实现的需要,提高了校正精度,获得了满意的校正效果。

参考文献:

- [1] Li-quan Dong, Wei-qi Jin, Jing Sui. Summarize on the scene-based Nonuniformity correction algorithms for IRFPA[C]//Proceedings of the SPIE,2005,5881:1-10.
- [2] 代少升. 红外焦平面阵列实时非均匀校正研究[D]. 重庆:重庆大学,2004,4.
- [3] 胡贵红,陈钱,沈晓燕. 红外焦平面探测器响应非线性的测定[J]. 光电子·激光,2003,14(5):489-492.
- [4] Huixin Zhou, Shangqian Liu, Rui Lai, et al. Solution for the nonuniformity correction of infrared focal plane arrays[J]. Applied Optics,2005,44:2928-2932.
- [5] 何志彪,易新建,黄光. 基于自适应滤波的焦平面非均匀校正法的研究[J]. 红外与毫米波学报,2000,19(3):194-196.
- [6] Sergio N Torres, Esteban M Vera, Rodrigo A Reeves, et al. Adaptive scene-based non-uniformity correction method for infrared-focal plane arrays[C]//Proceedings of the SPIE,2003,5076:130-139.
- [7] 王英瑞. 红外探测器响应非均匀性对系统灵敏度的影响[J]. 红外与激光工程,2006,35(3):258-261.