

文章编号:1001-9014(2004)01-0033-05

一种新的红外焦平面器件非均匀性自适应校正算法

殷世民¹, 洪新华², 刘上乾¹, 付小宁¹

(1. 西安电子科技大学技术物理学院, 陕西 西安 710071;
2. 中国科学院西安光学精密机械研究所, 陕西 西安 710068)

摘要:提出了一种新的红外焦平面器件非均匀性自适应多点校正算法,该算法利用自适应滤波技术获取探测器在某一定标辐照度下稳定工作时的权值,并利用该权值去除探测器实时输出图像的温度漂移,最后对去除温度漂移的图像进行三次样条插值多点校正,具有校正精度高、动态范围大和易于工程实时实现等优点。

关键词:红外焦平面;自适应;温度漂移;三次样条插值;多点校正

中图分类号:TN215 **文献标识码:**A

NEW ALGORITHM OF ADAPTIVE NONUNIFORMITY CORRECTION FOR IRFPA

YIN Shi-Min¹, HONG Xin-Hua², LIU Shang-Qian¹, FU Xiao-Ning¹

(1. School of Technical Physics, Xidian University, Xi'an 710071, China;
2. Xi'an Institute of Optics & Precision Mechanics, The Academy of Sciences of China, Xi'an 710068, China)

Abstract: A new adaptive multi-point nonuniformity correction algorithm for IRFPA was presented. The algorithm acquires the weights of detector working under a demarcated radiation by using adaptive filtering. The temperature floating of nonuniform IR images was removed by making use of the acquired weights. In the end, the multi-point nonuniformity correction based on three order spline interpolation to the removed temperature floating IR images is made. The algorithm is with high correction precision, broad dynamic range and easy to realize in engineering.

Key words: IRFPA; adaptive; temperature floating; three order spline interpolation; multi-point correction

引言

红外焦平面阵列(IRFPA)器件是当今技术性能最先进的红外探测器,用它构成的红外成像系统较传统的光机扫描红外成像系统有结构简单、工作稳定可靠、灵敏度高、噪声等效温差(NETD)性能好等优点,是当今国内外重点发展的新一代红外探测器。由于受材料和工艺水平等所限器件各探测单元响应的非均匀性较大,并且各探测单元响应特性曲线随着工作温度的变化都有不同程度的直流漂移,导致红外成像系统的温度分辨率性能显著下降,以至使其难以满足红外成像系统实际使用的要求,因而在工程使用中IRFPA器件几乎毫无例外地都要采用相应的非均匀性校正技术^[1]。

基于场景的IRFPA非均匀性校正如神经网络

法^[2]等虽然具有不用现场定标并能对探测器的温度漂移进行自适应校正的好处,但其收敛时间比较长且校正精度不高,目前尚不能应用于工程中。自适应克服红外焦平面阵列器件的温度漂移以对其非均匀性进行高精度校正一直是IRFPA非均匀性校正领域的研究重点和难点。为此本文将基于现场定标和基于场景的IRFPA非均匀性校正算法结合起来,提出了一种新的能自适应克服IRFPA探测单元响应特性的温度漂移并对其非均匀性进行高精度校正的算法,它具有收敛速度快、动态范围大和在线计算量相对较小等优点。

1 IRFPA的非均匀性及响应特性的温度漂移

1.1 IRFPA的非均匀性

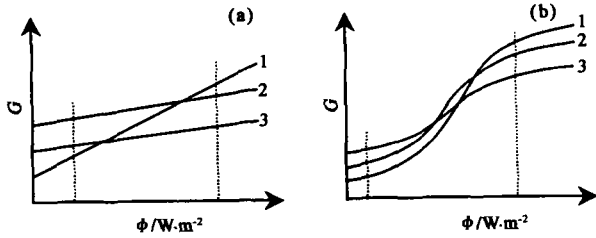


图1 IRFPA 器件特性响应曲线的非均匀性 (a) 线性模型 (b) 非线性模型
Fig. 1 The nonuniformity of IRFPA response curve (a) linear model (b) nonlinear model

假设红外探测器的响应特性是线性^[3]的, 则 IRFPA 中第 (i, j) 个探测单元的输出为

$$S_{ij}(\varphi) = K_{ij}\varphi + Q_{ij} \quad (1)$$

式(1)中 φ 为投射到第 (i, j) 探测单元上的辐照度, K_{ij} 为探测单元响应特性的增益系数或特性曲线的斜率, Q_{ij} 为暗电流形成的偏移量或特性曲线的截距. 可见, IRFPA 器件的非均匀性实属各探测单元参数 K_{ij} 、 Q_{ij} 不同所致, 如图 1(a) 所示. IRFPA 各探测器的响应特性都是非线性的, 它类似于“S”形状(如图 1(b) 所示). 图 1 中曲线 1, 2, 3 分别为 IRFPA 的 3 个不同探测单元的特性响应曲线, Φ 表示辐射强度, G 表示灰度.

1.2 IRFPA 响应特性的温度漂移

根据实际使用中对 IRFPA 器件各探测单元响应特性曲线的标定, IRFPA 各探测单元响应特性曲线的温度漂移主要是由响应特性曲线的增益 K_{ij} 和截距 Q_{ij} 随温度的变化而变化所致(如图 2 所示). 图中曲线 1 为 IRFPA 某一探测单元在温度为 T 时的特性响应曲线, 曲线 2 为该探测单元在温度为 $T + \Delta T$ 时的特性响应曲线, Φ 为辐射强度, G 为灰度. 在实际的 IRFPA 非均匀性校正过程中, 如果开始测量标定的是曲线 1, 但在器件的工作过程中, 随着温度的变化其特性漂移为曲线 2, 即曲线 2 变成了 IRFPA 当前工作时的响应特性曲线, 这时若仍用曲线 1 对 IRFPA 的非均匀性进行校正, 则必然会产生较大

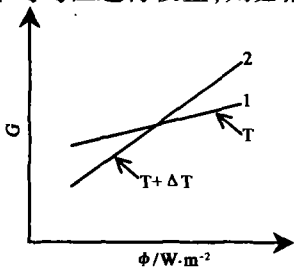


图2 IRFPA 响应特性温度漂移
Fig. 2 Temperature floating of IRFPA

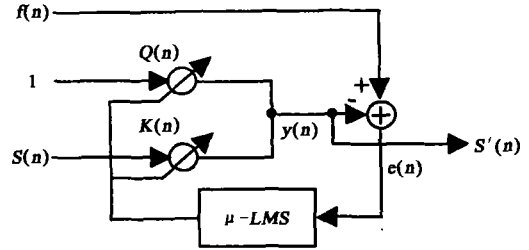


图3 神经网络校正原理
Fig. 3 The neural networks correction

的校正误差. 本文的设计思想是首先将当前温度漂移的特性响应曲线 2 自适应校正到定标时的特性响应曲线 1, 然后再利用定标的特性响应曲线 1 对 IRFPA 的非均匀性进行多点校正^[4].

2 神经网络 IRFPA 非均匀性校正

基于场景的神经网络法^[2] IRFPA 非均匀性校正如图 3 所示. 假设 S 是存在非均匀性失真的图像, S' 是经过校正后得到的图像, 其关系为:

$$S'_{ij} = K_{ij}S_{ij}(\varphi) + Q_{ij} \quad (2)$$

这里 $S_{ij}(\varphi)$ 是焦平面阵列中等 (i, j) 探测器单元未校正的输出信号, K_{ij} 和 Q_{ij} 是相应的增益和偏置校正系数. 则自适应校正的过程就是不断依据实际影像调整 K_{ij} 和 Q_{ij} , 使校正效果达到最佳.

令权矢量为

$$W(n) = (K(n), Q(n))^T \quad (3)$$

期望输出:

$$f_{i,j} = (S_{i,j+1} + S_{i-1,j} + S_{i,j-1} + S_{i+1,j})/4 \quad (4)$$

记

$$X(n) = (S(n), 1)^T \quad (5)$$

则自适应校正过程为:

$$y(n) = W^T(n)X(n), \quad (6)$$

$$e(n) = f(n) - y(n), \quad (7)$$

$$W(n+1) = W(n) + 2\mu e(n)X(n). \quad (8)$$

式中 μ 为步长, n 为帧数.

神经网络方法在理论上完全不需要对红外焦平面阵列进行预先定标, 校正系数可以通过学习连续更新, 对探测器参数的线性和稳定性要求不高. 但计算量很大, 速度很慢, 且校正精度不高, 达不到实际应用的要求. 图 4 是利用可见光像机拍摄的图像对 IRFPA 非均匀性进行神经网络法校正的效果图, 图 4(a) 为原始图像, 图 4(b) 为没有温漂的探测器输出的非均匀图像, 图 4(c) 为利用神经网络法对图 4(b) 非均匀性进行校正的结果.

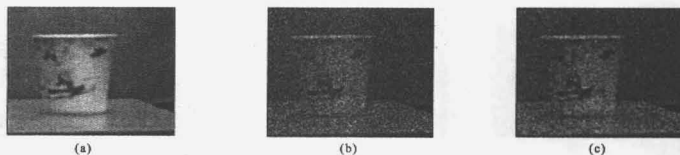


图4 IRFPA 非均匀性神经网络校正结果
Fig.4 The nonuniformity correction result of neural networks

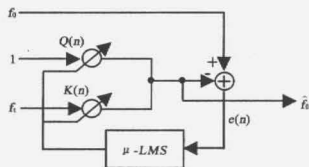


图5 自适应去温漂原理
Fig.5 Adaptive removing temperature floating

3 IRFPA 非均匀性自适应多点校正算法

3.1 算法原理

假如 f_0 为事先标定的均匀参考辐射源辐照度 $\varphi = \varphi_0$ 时 IRFPA 器件输出的非均匀性图像, 则有

$$f_0(i, j) = K_0(i, j)\phi_0(i, j) + Q_0(i, j). \quad (9)$$

其中 $K_0(i, j)$ 和 $Q_0(i, j)$ 分别为焦平面阵列中第 (i, j) 探测器单元响应特性的增益和截距. 随着器件工作温度的变化其特性响应曲线的增益和截距都将发生变化, 假如当前时刻的增益和截距系数变为 $K_i(i, j)$ 和 $Q_i(i, j)$, 此时对同一均匀参考辐射源 $\phi = \phi_0$ 探测器输出的非均匀图像将变为^[5]

$$f_i(i, j) = K_i(i, j)\phi_0(i, j) + Q_i(i, j). \quad (10)$$

于是可采用如图 5 所示的自适应算法对权值进行训练:

$$\begin{aligned} e(n) &= f_0 - [K(n)f_i + Q(n)] \\ &= [K_0(i, j) - K(n)K_i(i, j)]\phi_0(i, j) + Q_0(i, j) \\ &\quad - K(n)Q_i(i, j) - Q(n), \end{aligned} \quad (11)$$

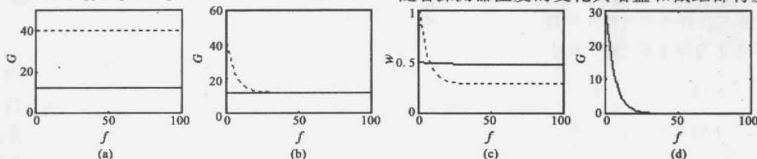


图6 某一探测器单元的温漂自适应校正
Fig.6 Adaptive removing temperature floating for a detector unit

$$K(n+1) = K(n) + 2\mu e(n)f_i, \quad (12)$$

$$Q(n+1) = Q(n) + 2\mu e(n). \quad (13)$$

当算法收敛后 $e(n)$ 取最小值时可得最优权值:

$$K(n) = \frac{K_0(i, j)}{K_i(i, j)}, \quad (14)$$

$$Q(n) = Q_0(i, j) - \frac{K_0(i, j)}{K_i(i, j)}Q_i(i, j). \quad (15)$$

获得器件稳定工作后的最优权值 $K(i, j)$ 和 $Q(i, j)$ 后, 对当前 IRFPA 输出的任一帧实时图像 $f(i, j)$ 即可按式(16)进行去除温度漂移的校正:

$$\hat{f}(i, j) = K(i, j)f(i, j) + Q(i, j) \quad (16)$$

对去除温度漂移之后的非均匀图像 \hat{f} 即可采用如下 IRFPA 非均匀性多点校正算法^[4]对其非均匀性进行高精度校正. 图 6 为响应特性 $S_y(\varphi) = K_y\varphi + Q_y$ 的某一探测器单元的温漂自适应校正效果图, f 为帧数, G 为灰度, w 为权重. 图 6(a) 中实线为该探测器单元在 $\varphi_0 = 1.0, K_y = 10.0, Q_y = 2.0$ 温漂前特性响应曲线, 虚线为该探测器单元在 $\varphi_0 = 1.0, K_y = 20.0, Q_y = 20.0$ 温漂后特性响应曲线. 图 6(b) 为特性响应曲线的收敛情况, 图 6(c) 为权值收敛情况, 图 6(d) 为误差曲线.

在实际校正工作中按如下方法可简单有效地达到去除探测器温度漂移的过程: 在红外像机正常工作后, 将像机镜头用手或镜头盖堵上, 采集此时探测器的输出图像作为定标图像 f_0 . 当工作一段时间后随着探测器温度的变化其增益和截距都将发生漂



图7 IRFPA 非均匀性自适应多点校正结果

Fig.7 Multi-point adaptive nonuniformity correction for IRFPA

移,此时再将像机镜头用手或镜头盖堵上,采集此时一定帧数的探测器输出图像,根据上述自适应去漂移算法获得调整权值 $K(n)$ 和 $Q(n)$,然后根据式(16)获得去除温漂的实时非均匀图像 \hat{f} ,之后即可利用定标图像 f_0 对非均匀图像 \hat{f} 进行校正。

3.2 三次样条插值非均匀性多点校正

(1) 多点校正算法原理

根据 IRFPA 器件工作时场景的变化范围,选下 M 个辐照度 $\varphi_1, \varphi_2, \dots, \varphi_M$ 作为校正定标点,分别对 IRFPA 器件中所有 N 个探测单元的输出 $S_j(\varphi_i)$, $i = 1, 2, \dots, M$ 求平均,得

$$\bar{S}_i = \frac{1}{N} \sum_{j=1}^N S_j(\varphi_i) / N, \quad i = 1, 2, \dots, M \quad (17)$$

IRFPA 器件非均匀性的多点校正算法思想^[4]就是要找到在任意辐照度 φ 下,第 j 个探测单元的输出值 $S_j(\varphi)$ 与其校正值 $S'_j(\varphi)$ 之间的函数映射关系:

$S'_j(\varphi) = f(S_j(\varphi))$, 满足

$$\bar{S}_i = f(S_j(\varphi_i)), \quad i = 1, 2, \dots, M \quad (18)$$

显然可以利用多项式插值的方法来求得该函数映射关系,但是我们所做的仿真实验表明有些高次插值多项式(如 Lagrange 插值多项式等)不具有绝对收敛性,即其不总是随着插值节点的增多逼近精度增高,且其计算量相对较大,不利于工程实时实现。鉴于此,本文采用了函数的三次样条插值算法来求解上述函数映射关系式(18),它具有绝对收敛性和在线计算量小的特点。

(2) 三次样条插值非均匀性多点校正算法

根据三次样条插值算法原理可构造如下的 IRFPA 器件非均匀性多点校正算法:

$$S'_j(\varphi) = \bar{S}_i(1-t) + \bar{S}_{i+1}t - \frac{h_i^2}{6}t(1-t)[(2-t)m_i + (1+t)m_{i+1}], \quad (19)$$

其中

$$t = (S_j(\varphi) - S_j(\varphi_i)) / h_i,$$

$$h_i = S_j(\varphi_{i+1}) - S_j(\varphi_i), \quad i = 1, 2, \dots, M, \quad j = 1, 2, \dots,$$

$$NS_j(\varphi) \in [S_j(\varphi_i), S_j(\varphi_{i+1})].$$

而 m_0, m_1, \dots, m_{M+1} 满足如下的三对角线方程组:

$$\begin{pmatrix} 2 & \lambda_0 & & & & & \\ \mu_1 & 2 & \lambda_1 & & & & \\ & \ddots & \ddots & \ddots & & & \\ & & \mu_M & 2 & \lambda_M & & \\ & & & \mu_{M+1} & 2 & & \end{pmatrix} \begin{pmatrix} m_0 \\ m_1 \\ \vdots \\ m_M \\ m_{M+1} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} d_0 \\ d_1 \\ \vdots \\ d_M \\ d_{M+1} \end{pmatrix}$$

其中

$$\begin{cases} \mu_i = h_{i-1} / (h_{i-1} + h_i) \\ \lambda_i = 1 - \mu_i \\ d_i = \frac{6}{h_{i-1} + h_i} \left(\frac{\bar{S}_{i+1} - \bar{S}_i}{h_i} - \frac{\bar{S}_i - \bar{S}_{i-1}}{h_{i-1}} \right) \\ i = 1, 2, \dots, M; \\ \lambda_0 = \mu_{M+1} = 1, d_0 = d_{M+1} = 0 \end{cases}$$

对于上述的 $|m_i, i = 0, 1, \dots, M+1|$ 可事先用追赶法快速求解,存储以备实时校正时使用。

4 算法仿真

仍利用图4(a)图像根据本文算法进行 IRFPA 非均匀性校正计算机仿真,结果如图7所示。图7(a)为探测器输出的有温漂的非均匀图像,图7(b)为对图7(a)的非均匀进行校正的结果。图7(c)为图7(a)去除温漂后的非均匀图像,图7(d)为对图7(c)的非均匀进行校正的结果。从仿真结果可以看出,由于温漂的影响,没有去除温漂的校正图像图7(b)有些模糊且变暗,而去除温漂后的校正图像图7(d)则比较清晰,和原图像图4(a)基本一致。

5 结论

根据仿真结果,对于本文算法可得如下结论:

(1) 能自适应地去除 IRFPA 探测单元响应特性的温度漂移,较基于神经网络等的自适应校正算法相比具有在线计算量相对较小、易于工程实时实现等优点;(2) 能显著地降低 IRFPA 器件的非均匀性,具有校正精度高和适应大动态范围器件的特点,并能有

效地克服 IRFPA 探测单元响应特性的非线性对校正精度的影响.

REFERENCES

- [1] Gross W, Hierl T, Schulz M. Correctability and long-term stability of infrared focal plane arrays[J]. *Optical Engineering*, 1999, **38**(5): 862—865
- [2] Scribner D A, Sarkady K A, Krueer M R, et al. Adaptive nonuniformity correction for IR focal plane arrays using neural networks[J]. *Proc. SPIE*, 1991, **1541**: 100—109
- [3] Perry D L, Dereniak E L. Linear theory of nonuniformity correction in infrared staring sensors[J]. *Optical Engineering*, 1993, **32**(8): 1854—1859
- [4] YIN Shi-Min, LIU Shang-Qian. The multi-point nonuniformity correction algorithm for IRFPA on low order interpolation[J]. *Acta Photonica Sinica* 2002, **31**(6): 715—718(殷世民,刘上乾. 基于低次插值的红外焦平面器件非均匀性多点校正算法. *光子学报*), 2002, **31**(6): 715—718
- [5] Schulz M, Caldwell L. Nonuniformity correction and correctability of infrared plane arrays[J]. *Proc. SPIE*, 1995, **2470**: 200—209