

基于三次样条插值的 IRFPA 非均匀性校正算法*

李恩科, 刘上乾, 王炳健, 殷世民

(西安电子科技大学 技术物理学院, 西安 710071)

摘 要: 针对红外成像制导跟踪系统工程应用的实际要求, 对红外焦平面阵列工作在大动态范围条件下的非均匀性校正算法进行了深入研究, 依据函数插值原理, 导出了三次样条插值非均匀性校正算法. 用模拟的非均匀性图像和实际的红外图像对算法进行了校验. 结果表明该算法具有动态范围大、校正准确度高的优点, 可对红外焦平面阵列实现非均匀性和非线性双重校正效果.

关键词: 红外焦平面阵列; 非均匀性校正; 三次样条插值

中图分类号: TN215

文献标识码: A

文章编号: 1004-4213(2009)11-3016-5

0 引言

红外焦平面阵列(Infrared Focal Plane Array, 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具有结构简单、工作稳定可靠、灵敏度高、噪音等效温差(NETD)小等优点. 由于受材料和工艺水平所限等原因, 器件各探测单元响应的非均匀性较大, 它导致红外成像系统的温度分辨率、灵敏度等性能显著下降, 以至使其难以满足红外成像系统的实际使用要求, 因而在工程使用中焦平面器件都要采用相应的非均匀性校正技术^[1-2].

IRFPA 非均匀性校正算法主要有基于场景^[3-4]和基于辐射源定标^[5]两类算法. 基于场景的 IRFPA 非均匀性校正算法如神经网络法、高通滤波法以及 Kalman 滤波法等. 该类算法通过采集到的序列图像计算校正参量, 但是由于算法复杂、计算速度慢等原因在工程上一直未能得到有效的应用. 基于辐射源定标的算法, 需要通过辐射源提供均匀辐射, 然后根据采集到的均匀辐射图像, 计算校正参量. 该类算法计算量小, 便于工程实现. 目前在工程应用中, 主要采用基于辐射源定标的两点校正算法. 但是两点校正算法仅适用于各探测器单元响应特性为线性的场合, 而且 IRFPA 动态范围小, 导致了在应用中, 需要中断红外系统的工作, 重新计算校正参量. 因此, 两点校正算法难以适应成像制导跟踪系统大动态范围的需要, 为了扩展 IRFPA 非均匀性校正的动态范围, 本文对辐射源定标红外焦平面阵列非均匀性校正算法进行了深入研究, 揭示了其内在的数学规律, 提出了一种适用于大动态范围场合的基于三次样条插值的 IRFPA 非均匀性校正算法, 并利

用红外图像进行了仿真实验, 结果表明本文提出的 IRFPA 非均匀性校正算法具有较高的校正准确度和大的动态范围, 能有效对 IRFPA 响应特性大动态范围和非线性实现双重校正, 满足红外成像制导跟踪系统的要求.

1 IRFPA 非均匀性校正模型分析

如果 IRFPA 各探测单元的响应特性在感兴趣的温度范围内为线性的^[6]、在时间上是稳定的, 并且假定 $1/f$ 噪音的影响较小, 则 IRFPA 非均匀性主要表现为乘性和加性噪音. 此时, 可用线性模型来描述 IRFPA 器件探测单元的响应特性

$$S_{ij}(\varphi) = K_{ij}\varphi + Q_{ij}, \begin{matrix} i=1\sim M \\ j=1\sim N \end{matrix} \quad (1)$$

式中 $S_{i,j}(\varphi)$ 为第 (i, j) 个探测单元的响应输出, 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 器件的非均匀性是由于各探测单元参量 K_{ij} 、 Q_{ij} 不同所致, 如图 1(a). 但是, 线性模型的缺点是动态范围小, 而且只有场景的温度离定标点较近时, 校正效果理想, 而当场景的温度远离定标点时, 非均匀性校正误差大, 导致了在实际应用中, 要中断成像系统的工作, 不断地对 IRFPA 重新定标, 这大大限制了红外成像系统的应用. 实际上, IRFPA 各探测单元的响应特性都表现为不同程度的非线性, 它类似于 S 形状^[7], 可以用函数

$S(\varphi) = a/[1 + \exp(b - c\varphi)] + d$ 表示, 式中 φ 为目标辐照度, S 为探测单元的响应输出值, a 、 b 、 c 和 d 为每个探测单元的响应参量. 正是由于各个探测单元的响应参量的不一致, 才体现出了红外焦平面阵列响应的非均匀性, 如图 1(b). 图 1 中曲线 1, 2, 3 分别为 IRFPA 的三个不同探测单元的响应特性曲线. 为了扩展非均匀性校正的动态范围, 克服两点定

* 国家自然科学基金(60377034) 资助

Tel: 029-88202573

Email: ekli@xidian.edu.cn

收稿日期: 2008-04-10

修回日期: 2008-09-23

标法的不足,本文的非均匀性校正算法采用的探测器响应模型为非线性模型,即 S 曲线模型。

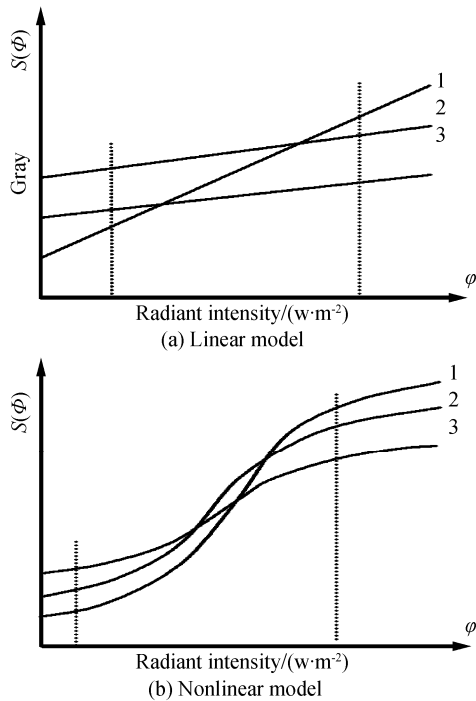


图 1 IRFPA 特性响应曲线的非均匀性
Fig. 1 The nonuniformity of IRFPA response curve

2 基于三次样条插值的 IRFPA 非均匀性校正算法

2.1 算法原理

IRFPA 辐射源定标是红外成像系统根据 IRFPA 器件响应的动态范围,利用黑体在 $K \geq 2$ 个不同温度下的均匀辐射作为系统输入,系统采集并存储各不同温度下的输出,据此计算 IRFPA 的校正参量。

设 IRFPA 为 M 行 N 列的阵列,红外成像系统在 K 个均匀辐照度 $\varphi_k (k=1, 2, \dots, K)$ 下的输出分别为 $S_{ij}(\varphi_k)_{j=1,2,\dots,M}^{i=1,2,\dots,N}$, 对其求平均得

$$\bar{S}_k = \frac{1}{MN} \sum_{i=1}^M \sum_{j=1}^N S_{ij}(\varphi_k), k=1 \sim K \quad (2)$$

如图 2, IRFPA 非均匀性校正就是对各探测单元的响应特性曲线做归一化,使各探测单元的响应特性曲线趋于同一条曲线。图 2 中实线为 IRFPA 中第 (i, j) 个探测器单元的响应特性曲线,虚线为 IRFPA 中所有探测器单元的平均响应特性曲线,将 IRFPA 所有探测器单元的平均响应特性曲线作为归一化曲线即可校正 IRFPA 探测器的非均匀性,即将 $S_{ij}(\varphi_k)$ 映射为 $\bar{S}_k, k=1, 2, \dots, K$, 亦即要寻找在任意辐照度 φ 下,第 (i, j) 个探测单元的输出值 $S_{ij}(\varphi)$ 与其校正值 $S'_{ij}(\varphi)$ 之间的函数映射关系 f

$$S'_{ij}(\varphi) = f[S_{ij}(\varphi)] \quad (3)$$

满足

$$\bar{S}_k = f(S_{ij}(\varphi_k)), k=1, 2, \dots, K \quad (4)$$

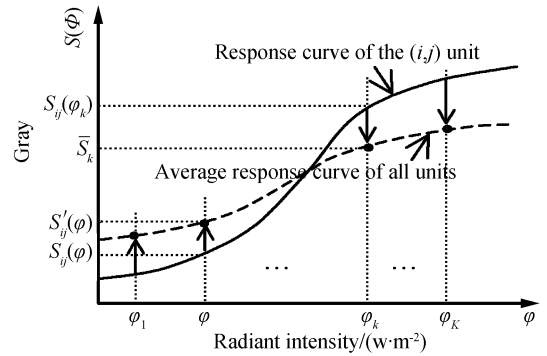


图 2 IRFPA 非均匀性校正原理
Fig. 2 Nonuniformity correction principle for IRFPA

求解满足式(3)与式(4)的函数映射关系 f 属于数值分析中函数的插值或拟合问题。由于某些插值算法的 Runge 现象^[8], 为保证 IRFPA 非均匀性校正的准确度和工程应用, 必须选择那些计算量不太大且绝对收敛的插值方法。

2.2 三次样条插值校正算法

三次样条插值具有收敛性、稳定性、光滑性好的特点,在实际中得到了广泛的应用。本算法采用三次样条插值函数逼近 IRFPA 的响应曲线,提出了一种基于三次样条插值的非均匀性校正算法。

给定区间 $[a, b]$ 的一个分划 $\Delta: a = x_0 < x_1 < \dots < x_{n-1} < x_n = b$, 关于节点分划 Δ 的三次样条函数 $s_3(x)$ 定义为:

1) $s_3(x)$ 在每个子区间 $[x_k, x_{k+1}] (k=0, 1, \dots, n-1)$ 上是不超过三次的代数多项式;

2) $s_3(x) \in C^2[a, b]$. 设函数 $f(x)$ 在分划节点上的函数值为 $f_k = f(x_k) (k=0, 1, \dots, n)$, 如果三次样条函数 $s_3(x)$ 还满足条件;

3) $s_3(x_k) = f_k, k=0, 1, \dots, n$, 则 $s_3(x)$ 就称为关于分划 Δ 的三次插值样条函数, 记为 $s_3(f; x)$ 。

根据三次样条插值算法原理^[8], 采用 K 个定标点, 可构造如下的 IRFPA 非均匀性校正算法

$$S'_{ij}(\varphi) = \bar{S}_k(1-t) + \bar{S}_{k+1}t - \frac{h_k^2}{6}t(1-t) \times [(2-t)m_k + (1+t)m_{k+1}] \quad (5)$$

式中

$$t = [S_{ij}(\varphi) - S_{ij}(\varphi_k)] / h_k \quad (i=1 \sim M)$$

$$h_k = S_{ij}(\varphi_{k+1}) - S_{ij}(\varphi_k) \quad (j=1 \sim N)$$

$$S_{ij}(\varphi) \in [S_{ij}(\varphi_k), S_{ij}(\varphi_{k+1})] \quad (k=1 \sim K-1) \quad (6)$$

$$\begin{bmatrix} 2 & \lambda_0 & & & & \\ \mu_1 & 2 & \lambda_1 & & & \\ & \ddots & \ddots & \ddots & & \\ & & \mu_{K-1} & 2 & \lambda_{K-1} & \\ & & & \mu_K & 2 & \end{bmatrix} \begin{bmatrix} m_0 \\ m_1 \\ \vdots \\ m_{K-1} \\ m_K \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} d_0 \\ d_1 \\ \vdots \\ d_{K-1} \\ d_K \end{bmatrix} \quad (7)$$

$$\begin{aligned} \mu_k &= h_{k-1} / (h_{k-1} + h_k) \\ \lambda_k &= 1 - \mu_k \\ d_k &= \frac{6}{h_{k-1} + h_k} \left(\frac{\bar{S}_{k+1} - \bar{S}_k}{h_k} - \frac{\bar{S}_k - \bar{S}_{k-1}}{h_{k-1}} \right) \\ k &= 1, 2, \dots, K-1; \\ \lambda_0 &= \mu_K = 1, d_0 = d_K = 0 \end{aligned} \quad (8)$$

式中 $\{m_k, k=0, 1, \dots, K\}$ 可事先用追赶法快速求解并存储以备实时或事后校正时使用。

在求得校正系数之后,三次样条插值校正算法对每一点的校正为一个三次代数多项式,对三次代数多项式有 $y = a_3 x^3 + a_2 x^2 + a_1 x + a_0 = [(a_3 x + a_2) x + a_1] x + a_0$,其在线计算量仅三次乘法和三次加法,该算法计算量较小,能有效适应 IRFPA 响应特性的大动态范围和非线性要求,具有较高的校正准确度。

根据插值原理^[9],当采用的定标点越多时,得到的 IRFPA 的响应曲线越接近实际情况,IRFPA 的工作越稳定,校正误差越小.但定标点越多,计算量也越大,而且在实际系统中所需要的存储量也越多.因此,在实际应用中,要综合考虑上述因素,折衷确定定标点数.在忠实于各探测单元响应为非线

性的条件下,利用各探测单元在整个工作范围内的特殊点,如 S 曲线的起点、拐点和终点等,对各个探测单元的响应进行标定,然后根据各个标定点确定相应像元的响应曲线,根据标定点的平均值确定标准校正曲线.本文算法采用 3 个定标点,即 $K=3$.

3 仿真结果

由于实际工作中 IRFPA 响应特性表现出如图 1(b)的非线性,利用 IRFPA 非均匀性校正 S 曲线模型 $S(\varphi) = a / [1 + \exp(b - c\varphi)] + d$ 来模拟 IRFPA 各探测单元的响应特性,根据实际的红外图像进行仿真实验,结果如图 3.其中图 3(a)为原红外图像,图 3(b)为根据 S 曲线模型获得的非均匀性红外图像,其非均匀性为 11.7%;图 3(c)为对(b)图进行两点插值校正结果,其非均匀性为 7.6%;图 3(d)为对(b)图进行三点三次样条插值校正结果,其非均匀性为 1.5%.可以看出,本算法非均匀性校正后,图像的非均匀性大大减小.另外,在视觉效果上,本文算法的校正结果优于两点校正算法的校正结果。

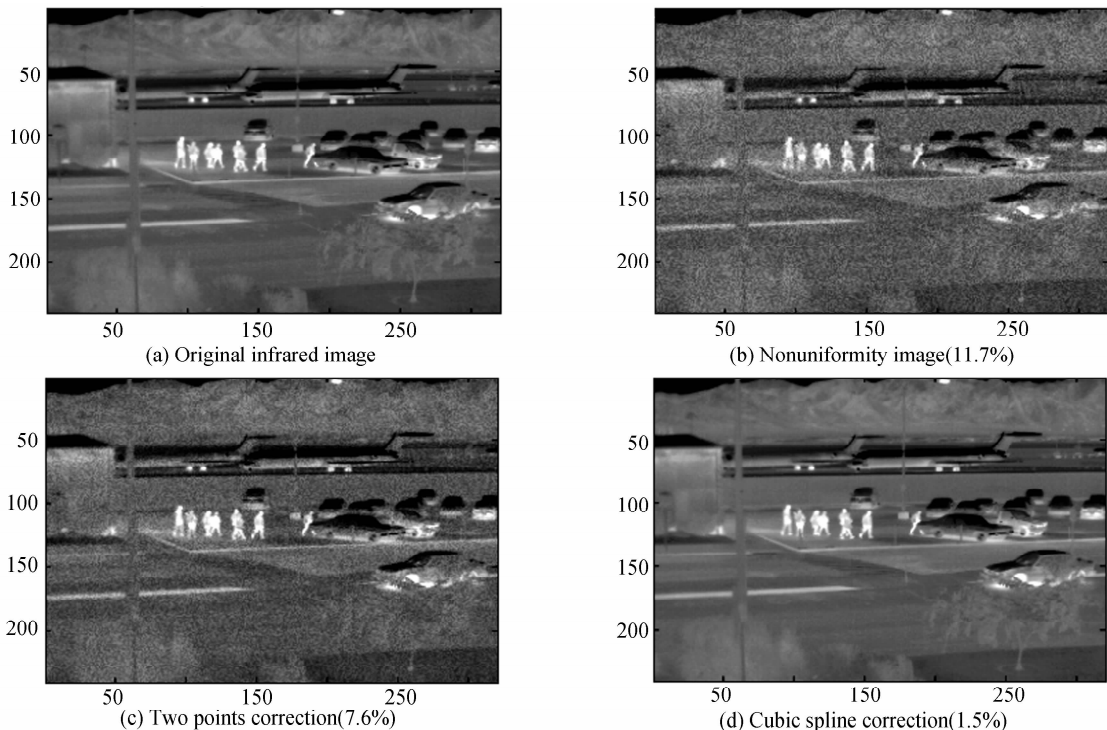


图 3 IRFPA 非均匀性校正仿真实验结果

Fig. 3 Simulation results of nonuniformity correction

与其它辐射源定标类非均匀性校正算法^[5,7,10-11]相比,本文算法的校正结果优于多点校正法(折线近似法)、曲线-直线法、三点 B 样条法,与非线性校正法、三点二次多项式拟合法校正结果接近。

图 4 为采用本算法对一 128×128 成像系统采集到的图像进行非均匀性校正的结果,其中(a)为原始图像,(b)为校正后的图像,可以看出,校正后的图像中的非均匀性明显减小,非均匀校正效果显著。

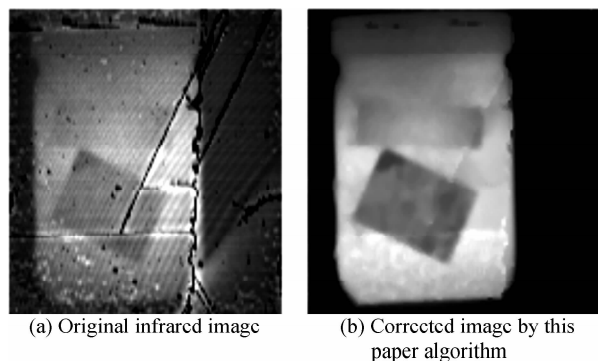


图4 实际红外图像的校正结果

Fig. 4 Nonuniformity correction result of infrared image

4 结论

本文在分析基于辐射源定标算法的基础上,指出了两点校正算法存在动态范围小的不足,并提出了一种大动态范围的、可实时实现的 IRFPA 非均匀性校正算法——基于三次样条插值的非均匀性校正算法,并将本文算法分别对模拟的非均匀图像和实际的红外图像进行非均匀性校正,仿真结果表明本文算法校正准确度高,可有效地满足成像制导跟踪系统的要求,能有效满足 IRFPA 响应特性的大动态范围和非线性要求,可对红外焦平面阵列实现非均匀性和非线性双重校正效果。

参考文献

- [1] GROSS W, HIERL T, SCHULZ M. Correctability and long-term stability of infrared focal plane arrays[J]. *Opt Eng*, 1999, **38**(5):862-865.
- [2] XUE Li-jun, LI Zi-tian, LI Chang-le, *et al.* Study on the Hyper-Spectral CCD imager nonuniformity correction algorithm[J]. *Acta Photonica Sinica*, 2006, **35**(5):693-696.
薛利军,李自田,李长乐,等. 光谱成像仪 CCD 焦平面组件非均匀性校正技术研究[J]. *光子学报*, 2006, **35**(5):693-696.
- [3] SCRIBNER D A, SARKADY K A, KRUEER M R, *et al.* Adaptive nonuniformity correction for IR focal plane arrays using neural networks[C]. *SPIE*, 1991, **1541**:100-109.
- [4] LI Qing, LIU Shang-qian, LAI Ru, *et al.* A Scene-based nonuniformity correction algorithm of IRFP [J]. *Acta Photonica Sinica*, 2006, **35**(5):720-723.
李庆,刘上乾,赖睿,等. 一种基于场景的红外焦平面阵列非均匀性校正算法[J]. *光子学报*, 2006, **35**(5):720-723.
- [5] YIN Shi-min, XIANG Li-bing, ZHOU Jin-song, *et al.* Research on nonuniformity correction of IRFPA based on radiation source scaling[J]. *Acta Photonica Sinica*, 2008, **37**(5):992-995.
殷世民,相里斌,周锦松,等. 辐射源定标红外焦平面阵列非均匀性校正算法研究[J]. *光子学报*, 2008, **37**(5):992-995.
- [6] PERRY D L, DERENIAK E L. Linear theory of nonuniformity correction in infrared staring sensors[J]. *Opt Eng*, 1993, **32**(8):1854-1859.
- [7] DAI Shao-sheng. New method of IRFPA nonuniformity correction with nonlinear response[J]. *Acta Photonica Sinica*, 2008, **35**(4):121-125.
代少升. 红外焦平面阵列非均匀性非线性校正新方法[J]. *光电工程*, 2008, **35**(4):121-125.
- [8] CHENG Zheng-xing, LI Shui-gen. Digital approximation and ordinary differential equation numerical solution[M]. Xi'an: Xi'an Jiaotong University Press, 2000:19-25, 67-123.
程正兴,李水根. 数值逼近与常微分方程数值解[M]. 西安:西安交通大学出版社, 2000:19-25, 67-123.
- [9] LI Qing-yang, WANG Neng-chao, YI Da-yi. Numerical analysis [M]. Wuhan: Huazhong University of Science and Technology Press, 1986:19-105.
李庆扬,王能超,易大义. 数值分析[M]. 武汉:华中理工大学出版社, 1986:19-105.
- [10] LI Yan-xu, SUN De-xin, LIU Yin-nian. Polynomial fitting based on nonuniformity correction of infrared focal plane arrays[J]. *Laser & Infrared*, 2005, **35**(02):104-107.
李言旭,孙德新,刘银年. 基于多项式拟合的红外焦平面非均匀性校正[J]. *激光与红外*, 2005, **35**(02):104-107.
- [11] LI Bu-chan, XIAO Jun. Study of calibration-based nonuniformity correction algorithms for IRFPA [J]. *Infrared*, 2008, **29**(6):5-8.
李步蟾,肖峻. 基于定标的红外焦平面非均匀性校正算法研究[J]. *红外*, 2008, **29**(6):5-8.

Nonuniformity Correction Algorithms of IRFPA Based on Cubic Spline Function

LI En-ke, LIU Shang-qian, Wang Bing-jian, YIN Shi-min

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

Abstract: The nonuniformity correction algorithm of IRFPA under the broad dynamic range is studied for the engineering applications of infrared imaging guidance and track systems. The nonuniformity correction algorithm based on cubic spline function interpolation is derived based on the function interpolation principle. This algorithm is validated by a simulated nonuniform image and a real infrared image captured by 128×128 infrared imaging system. Experiments' results show that this algorithm has the advantages such as broad dynamic range and high correction precision, which realizes double correction to nonuniformity and nonlinearity of IRFPA.

Key words: IRFPA; Nonuniformity correction; Cubic spline function interpolation



LI En-ke was born in 1960. Now he is a Ph. D. degree candidate at Xidian University, and his research interests focus on infrared imaging system, infrared image processing and optoelectronic countermeasures etc.