

综述与评价

基于标定的 IRFPA 非均匀性校正方法综述

蔡 盛^{1,2}, 柏旭光^{1,2}, 乔彦峰¹

(1.中国科学院长春光学精密机械与物理研究所, 吉林 长春 130033; 2.中国科学院研究生院, 北京 100039)

摘要: 红外焦平面阵列 (IRFPA) 是红外系统的关键部件, 其非均匀性是制约红外系统成像质量的限制性因素。对基于标定的 IRFPA 非均匀性校正算法进行了原理探讨, 阐述了两点校正法、基于埃尔米特插值算法、基于多项式拟合以及最佳平方逼近等几种目前正在研究的标定类非均匀性校正技术。

关键词: 红外焦平面阵列; 非均匀性校正; 两点校正法; 埃尔米特插值; 多项式拟合; 最佳平方逼近

中图分类号: TN216 **文献标识码:** A **文章编号:** 1001-8891(2007)10-04-0589

Summarize on the Nonuniformity Correction Algorithms for IRFPA Based on Calibration

CAI Sheng^{1,2}, BAI Xu-guang^{1,2}, QIAO Yanfeng¹

(1.Changchun Institute of Optics, Fine Mechanics and Physics, the Chinese Academy of Science, Changchun Jilin 130033, China; 2.Graduate School of the Chinese Academy of Sciences, Beijing 100039, China)

Abstract: The Infrared Focal Plane Array (IRFPA) is a key part of modern infrared system, and its nonuniformity has limited the quality of infrared imaging system. The approach of nonuniformity correction algorithms based on calibration was discussed. As the under research in this area, two-point temperature correction, hermite interpolation, polynomial fitting and least square approximation were presented in detail.

Key words: infrared focal plane arrays ;nonuniformity correction ;two-point temperature correction ;hermite interpolation ; polynomial fitting ; least square approximation

引言

红外焦平面阵列 (IRFPA) 是一种兼具辐射敏感和信号处理功能的新一代红外探测器, 是现代红外成像系统的关键器件。由于受材料和制造工艺等原因限制, 各个探测元的响应率不一致, 导致红外焦平面阵列普遍存在着非均匀性。

国内外对红外焦平面阵列的非均匀性校正算法主要有: 基于标定的校正算法和基于场景的校正算法。由于 IRFPA 的非均匀性随时间和环境改变会发生缓慢变化, 基于标定的校正算法的误差会随之增大; 基于场景的非均匀性校正算法能够随着 IRFPA 非均匀性的变化自适应地对图像进行校正^[1]。标定类非均匀性校正方法是红外辐射测量中的一项关键技术, 直接影响红外辐射测量的精度。

1 IRFPA 非均匀性产生的原因

IRFPA 非均匀性产生的原因十分复杂。目前对非均匀性的来源已比较清楚, 但对其数学描述都局限于经验公式, 还没有建立完整的数学模型和计算理论。IRFPA 非均匀性产生的原因大致有^[2]: 1) 红外探测器自身的非均匀性。这类原因与制造探测器的材料质量和工艺过程有直接的关系。如沟道掺杂浓度和表面态密度和栅氧化物厚度、光敏元面积、光谱响应的差异以及偏置电压的不同等。IRFPA 一旦制造完成, 这些非均匀性将固定存在, 而且很难避免。2) 探测器与读出电路的耦合非均匀性。这类因素主要是由探测器件的电荷转移效率以及探测器自身与 CCD 读出电路的耦合相关的紧密程度的不同造成的。3) 器件工作状态引入的非线性。如焦平面器件所处的工作温度、入射的目标和背景红外辐射强度的变化范围, 红外探测器单元和 CCD 器件的驱动信号等。4) 红外光学系统的影响。如红外光学系统镜头的加工精度、探测元相对光轴的偏离角度等因素。

收稿日期: 2007-07-10

作者简介: 蔡盛 (1983—), 男, 湖北武穴人, 博士研究生, 研究方向为红外辐射测量技术。

2 标定类非均匀性校正方法

根据 IRFPA 工作时场景的变化范围, 选定 P 个入射辐射度 $\Phi_1, \Phi_2, \dots, \Phi_p$ 作为校正定标点, 得到 IRFPA 中所有 $N \times M$ 个探测元的输出 $V_{nm}(\Phi_p), p = 1, 2, \dots, P$. IRFPA 标定类非均匀性校正算法就是找到在任意辐射度 Φ 下, 第 (n, m) 个探测元的输出值 $V_{nm}(\Phi)$ 与其校正值 $V_{nm}(\Phi)$ 之间的函数映射关系 $V_{nm}(\Phi) = f(V_{nm}(\Phi))$, 使得 $V_{nm}(\Phi)$ 尽可能保持一致. 构造离散点 $V_{nm}(\Phi_p)$ 、任意点 $V_{nm}(\Phi)$ 及其校正值 $V_{nm}(\Phi)$ 之间关系可以通过不同的数值方法, 根据对探测器响应模型的不同假设, 可以分为基于探测器线性响应模型和基于探测器非线性响应模型两类.

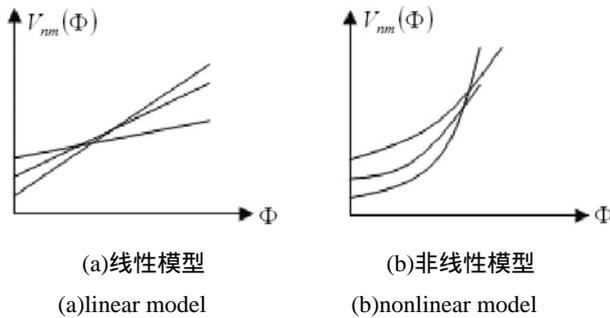


图1 非均匀性模型 Fig.1 Model of IRFPA response curve

2.1 基于探测器线性响应模型

1) 两点校正法

假设探测元响应是线性的, 则其响应可以表示为:

$$V_{nm}(\Phi) = \mu_{nm}\Phi + v_{nm} \quad (1)$$

式中: μ_{nm} 和 v_{nm} 是坐标为 (n, m) 阵列元的增益和偏移量, 对于每一个阵列元, μ_{nm} 和 v_{nm} 的值都是固定的, 并且不随时间变化. 因此采用两点法即可实现 IRFPA 的非均匀性校正, 即:

$$V_{nm}(\Phi) = G_{nm}V_{nm}(\Phi) + O_{nm} \quad (2)$$

式中: G_{nm} 和 O_{nm} 分别为两点校正法的校正增益和校正偏移量.

两点法校正将所有探测元在高温 T_H 和低温 T_L 下的响应分别归一化为 V_H 和 V_L :

$$V_H = G_{nm} V_{nm}(\Phi_H) + O_{nm} \quad (3)$$

$$V_L = G_{nm} V_{nm}(\Phi_L) + O_{nm} \quad (4)$$

校正增益和校正偏移量即可通过下式计算出来:

$$G_{nm} = \frac{V_H - V_L}{V_{nm}(\Phi_H) - V_{nm}(\Phi_L)} \quad (5)$$

$$O_{nm} = \frac{V_L V_{nm}(\Phi_H) - V_H V_{nm}(\Phi_L)}{V_{nm}(\Phi_H) - V_{nm}(\Phi_L)} \quad (6)$$

将各探测元的校正增益 G_{nm} 和校正偏移量 O_{nm} 预先存储起来, 在探测过程中以此对探测器的响应值按

式(2)不断进行校正.

2) 分段线性插值算法

两点校正法基于探测器响应的线性模型, 具有算法简单、计算量小的特点, 但是由于线性模型与实际系统还是有较大差别, 存在动态范围小的缺点, 本着多点逼近的思想, 有人提出了分段线性插值算法. 在系统的动态范围内, 按照辐射通量等级把定标数据分成 L 个区间, 在每个区间内按照两点校正法进行校正. 根据两点校正法的公式可以求出每个区间的校正系数. 这样对于任意辐射通量, 探测元的响应可以这样校正^[3]:

首先判断属于定标点构成的区间中的哪一个; 在区间内按照两点校正法进行非均匀性校正.

在实际应用中, 分段数的选取以及定标点位置的确定却没有可靠的依据, 这一问题成为制约该算法进一步应用的技术瓶颈.

2.2 基于探测器非线性响应模型

2.2.1 基于插值的非均匀性校正算法

两点校正法、多点校正法、分段线性插值法都属于基于拉格朗日 (lagrange) 插值算法, 这类算法是目前实用的用于实时非均匀性校正的. 我们这里讨论基于埃尔米特 (Hermite) 插值的非均匀性校正算法^[4]. 假设 P 个插值节点满足 $\Phi_1 < \Phi_2 < \dots < \Phi_p$, 分段插值函数 $H_h(\Phi)$ 在相邻两个节点构成的小区间 $[\Phi_j, \Phi_{j+1}]$ 上满足插值条件:

$$H(\Phi_j) = V_j, H(\Phi_{j+1}) = V_{j+1}, H'(\Phi_j) = w_j, H'(\Phi_{j+1}) = w_{j+1}$$

$$\text{式中: } v_j = \sum_{n=1}^N \sum_{m=1}^M V_{nm}(\Phi_j) \quad (7)$$

$$w_j = (V_{j+\delta} - V_{j-\delta})/2\delta \quad (\delta \text{ 越小, 精度越高}) \quad (8)$$

与 lagrange 插值相比, 在定标时, 需要在附近的临近区间内再定标, 算出其导数分布并存储的一个预处理过程. 当 $\Phi \in [\Phi_j, \Phi_{j+1}]$ 时, 根据 Hermite 插值原理有:

$$H_h(x) = \sum_{j=1}^P [V_j \alpha_j(\Phi) + w_j \beta_j(\Phi)] \quad (9)$$

式中: $\alpha_j(\Phi), \beta_j(\Phi)$ 为 Hermite 插值基函数.

这里采用分段插值函数与分段线性插值的思想是一致的, 分段优化处理有利于确定导数值, 也可以有效地使曲线走向更有效的逼近原始曲线.

2.2.2 基于多项式拟合非均匀性校正算法

IRFPA 系统可以看作一个因果性的非线性物理系统, 可用 Volterra 泛函级数描述为一个序列卷积之和. 对于输入辐射度 $\Phi(t)$ 的响应可以表示为^[5]:

$$V(t) = a_0 \int_{-\infty}^{+\infty} a_1(\tau) \Phi(t-\tau) d\tau + \dots + \int_{-\infty}^{+\infty} \dots + \int a_1(\tau_1, \tau_2, \dots, \tau_k) \prod_{i=1}^k \Phi(t-\tau_i) d\tau_i \quad (10)$$

对该系统，设单位辐照度为 $\mu(t)$ ，传递函数为 F ，则有：

$$y[\mu(t)] - a_0 = F[\mu(t)] = \sum_{k=1}^{\infty} a_k \quad (11)$$

$$y[\Phi \cdot \mu(t)] - a_0 = F[\Phi \cdot \mu(t)] = \sum_{k=1}^{\infty} a_k \Phi^k \quad (12)$$

该公式的物理意义是探测元对于输入辐射度 Φ 的响应可以用 Φ 的无穷次多项式来表示。忽略很小的高阶项，保留前 $K+1$ 项，有：

$$y(\Phi) = \sum_{k=0}^K a_k \Phi^k \quad (13)$$

即探测元对于辐射度 Φ 的响应，可以用 Φ 的 K 次多项式来近似。IRFPA 任一探测元的响应公式为：

$$y_{nm}(x) = \sum_{k=0}^K a_k(n, m) x^k \quad (14)$$

把整个 IRFPA 对于同一输入辐射度 Φ 的平均响应作为校正期望值：

$$V'(\Phi) = \frac{1}{N \times M} \sum_{i=1}^N \sum_{j=1}^M \sum_{k=0}^K a_k(n, m) \Phi^k \quad (15)$$

这样对于 P 组定标数据有两种处理途径：

- 1) 根据定标数据拟合出单个探测元的响应公式，由(14)、(1)计算
 - 2) 先根据(15)式计算出标定点的校正期望值，再由(14)式直接拟合得到校正后的探测元响应曲线。
- 比较两种处理途径后者的运算量小、速度快，易于硬件实现。

2.2.3 基于最佳平方逼近的非均匀性校正算法

该算法的基本思想^[6]与基于多项式拟合算法一致，通过最小二乘拟合得到 IRFPA 的探测元响应曲线 f_{nm} 和平均响应曲线 \bar{f} ，由于实际响应曲线呈抛物线型，同时考虑到需要方便求反函数， f_{nm} 及 \bar{f} 可以表示为：

$$f_{nm}(\Phi) = \sum_{k=0}^2 a_{nmk} \Phi^k \quad (16)$$

$$\bar{f}(\Phi) = \sum_{k=0}^2 C_k \Phi^k \quad (17)$$

由响应曲线 \bar{f} 的单调递增性，可知在整个定义域内其一阶导数为正，在 $\Phi \in [\Phi_{\min}, \Phi_{\max}]$ 内 $f_{nm}(\Phi)$ 的反函数为：

$$f_{nm}^{-1}(V_{nm}) = \frac{-a_{nm1} + \sqrt{a_{nm1}^2 - 4 \times a_{nm2} \times (a_{nm0} - V_{nm})}}{2a_{nm2}} \quad (18)$$

校正公式为：

$$V'_{nm} = \bar{f}[f_{nm}^{-1}(V_{nm})] = \frac{c_2}{a_{nm2}} * V_{nm} + \frac{a_{nm1}^2 c_2 - 2a_{nm2} a_{nm0} c_2 - a_{nm2} a_{nm1} c_1 + 2a_{nm2}^2 c_0}{2a_{nm2}^2} + \frac{(a_{nm2} c_1 - a_{nm1} c_2) * \sqrt{a_{nm1}^2 - 4a_{nm2}(a_{nm0} - V_{nm})}}{2a_{nm2}^2} \quad (19)$$

从上式可以看出，由于探测元响应函数具有非线性特征，因此在整个工作范围内要达到理想校正，其相应的校正公式也是非线性的，而在上式中由于存在除法和开方运算，不利于算法的硬件实现，非均匀性校正变换后的输出最好能用输入的多项式表示，即：

$$V'_{nm} = \sum_{k=0}^T b_k V_{nm}^k \quad (20)$$

对于式(19)按照最佳平方逼近准则，选择一个属于式(20)类型的来近似。

2.3 各种算法部分属性的比较

如表 1 所示，各种算法都有各自的优缺点，同时各种算法的运算量以及硬件实现的方便性也是考虑的因素，在选择非均匀性校正算法时需综合考虑。

表 1 各算法部分属性的比较

Table 1 Comparisons of some algorithms

	是否线性校正	校正精度	需存储的参数个数
两点校正法	线性	一阶	2
分段线性(两段)	线性	一阶	5
多项式拟合	非线性	可选	3(二阶校正)
Hermite 插值	非线性	三阶	4
最佳平方逼近	非线性	可选	3(二阶校正)

3 结束语

红外焦平面阵列是红外成像系统的关键部件，但是红外焦平面阵列的非均匀性直接影响系统的成像质量，非均匀性校正问题是目前限制红外焦平面阵列应用的关键因素，因此解决非均匀性校正问题迫在眉睫。尽管世界范围内 IRFPA 非均匀性校正技术的研究工作、技术途径多种多样，但对于红外辐射测量系统来说，怎样提高标定类非均匀性校正算法的精度和处理速度是目前研究的重点，另外需要解决的是由于响应漂移引起的重复定标问题，研究具有自适应性的标定类非均匀性校正算法是其发展方向。

参考文献：

- [1] CHEN Rui, TAN XIN-quan. Study on nonuniformity correction of infrared images[J]. *Infrared Technology*, 2002, **24**(1): 1 ~ 3.
陈锐, 谈新权. 红外图像非均匀性校正方法综述[J]. 红外技术, 2002, **24**(1): 1 ~ 3.
- [2] HU Gui-hong, CHEN Qian, SHEN Xiao-yan. Research on the nonlinearity of Infrared Focal Plane Arrays[J]. *Journal of Optoelectronics. Laser*, 2003, **14**(5): 489 ~ 492.
胡贵红, 陈钱, 沈晓燕. 红外焦平面探测器响应非线性性的测定[J]. 光电子·激光, 2003, **14**(5): 489 ~ 492
- [3] HOU He-kun, ZHANG Xin. Recent development of infrared focal plane arrays nonuniformity correction[J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2004, **33**(1): 79 ~ 82.
侯和坤, 张新. 红外焦平面阵列非均匀性校正技术的最新进展[J]. 红外与激光工程, 2004, **33**(1): 79 ~ 82.
- [4] LIU Zi-ji, JIANG Ya-dong, WU Zhi-ming etl. A New Algorithm For Real-time Nonuniformity Correction of Uncooled IRFPA[J]. *Infrared Technology*, 2006, **28**(8): 485 ~ 488.
刘子骥, 蒋亚东, 吴志明, 等. IRFPA的一种新的非均匀性校正算法[J]. 红外技术, 2006, **28**(8): 485 ~ 488.
- [5] 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**(2): 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**(2): 104 ~ 107
- [6] SHI Yan, ZHANG Tian-xu, LI Hui etl. New Approach to nonuniformity Correction of IRFPA with Nonlinear Response[J]*Journal of Infrared Millim.Waves*, 2004, **23**(4): 251 ~ 256
石岩, 张天序, 李辉, 等. 一种考虑红外焦平面非线性响应得非均匀性校正方法[J]. 红外与毫米波学报, 2004, **23**(4): 251 ~ 256