

# 红外焦平面阵列非均匀性校正的精度分析\*

周金梅 邢廷文 林妩媚

(中国科学院光电技术研究所微细加工光学技术国家重点实验室, 成都 610209)

**摘要** 介绍了红外图像非均匀性校正的基本方法,并用基于黑体多点线性校正算法对  $128 \times 128$  的红外焦平面阵列进行了图像校正,获得了较好的结果. 多点线性校正的精度与定标点的选择和其数量有关,所以在得到探测器响应曲线的基础上,对这两个因素的选择进行了分析,并用实际的校正结果对这两个因素对校正精度的影响进行了讨论. 结果表明,与理论分析符合的很好.

**关键词** 红外焦平面阵列;非均匀性;校正;响应曲线;辐射通量

**中图分类号** TN215 **文献标识码** A

## 0 引言

由于受材料和工艺水平等原因,红外焦平面阵列(Infrared Focal Plane Array, IRFPA)器件各探测单元响应特性之间普遍存在着非均匀性,导致红外图像的非均匀性,严重影响了红外传感器的成像质量,因而工程中使用的 IRFPA 器件都要采用相应的非均匀性校正技术<sup>[1,2]</sup>. 非均匀性校正的方法很多,主要有一点校正法<sup>[1]</sup>、两点校正法<sup>[1,3~5]</sup>、多点校正法<sup>[1,4]</sup>、恒定统计平均法<sup>[3]</sup>、时域高通滤波法<sup>[3,6]</sup>、神经网络法<sup>[3,6]</sup>和自适应校正法<sup>[5,7]</sup>等. 但应用较多的是两点线性校正和多点线性校正法. 两点线性校正从非均匀性产生的机理出发进行校正,算法简单,运算速度快,便于用硬件实现. 但缺点是对参数变化敏感,当非线性严重时精度很差,因此适合于非线性不严重的焦平面探测器或小动态范围成像系统. 多点校正算法能很好地适应 IRFPA 器件探测单元响应曲线的非线性和大动态范围的特性,具有极高的校正精度,是工程中应用较多的算法<sup>[4]</sup>. 但是 IRFPA 器件的响应曲线会随时间推移和工作环境的变化而发生漂移,这会导致定标算法的精度显著下降. 所以为提高非均匀性校正精度,在每次使用前必须重新标定校正系数.

多点线性校正的精度与定标点的选取及定标点的数量有关,这是由于探测器探测元的非线性所致. 本文在计算得到探测器响应曲线的基础上,对响应曲线进行分析,确定了影响多点线性校正的这两个因素. 并对实验数据进行基于黑体的多点线性非均匀性校正,得到了较好的结果.

## 1 两点线性校正算法

多点线性校正是要校正的范围分为多个区

间,每个均区间采用两点线性校正进行非均匀性校正,所以其校正算法类似于两点线性校正. 假设探测元  $ij$  在均匀辐射背景条件下的输出为

$$x_{ij}(\phi) = \mu_{ij}\phi + \nu_{ij}$$

式中  $\phi$  为辐射通量,  $\mu_{ij}$  和  $\nu_{ij}$  分别为增益和偏移量. 对于每一个阵列元,  $\mu_{ij}$  和  $\nu_{ij}$  的值都是固定的,并且不随时间变化.

两点校正的校正方程为

$$y_{ij} = G_{ij}x_{ij}(\phi) + Q_{ij} \quad (1)$$

式中  $G_{ij}$  和  $Q_{ij}$  分别为增益校正因子和偏移量校正因子,  $x_{ij}$  为校正前的输出,  $y_{ij}$  为校正后的输出.

将所有列阵元在温度为  $T_1$  和  $T_2$  (定标点)的黑体辐射下的响应分别规划为  $V_1$  和  $V_2$ . 即

$$V_1 = G_{ij}x_{ij}(\phi_1) + Q_{ij}, V_2 = G_{ij}x_{ij}(\phi_2) + Q_{ij} \quad (2)$$

式中  $\phi_1$ 、 $\phi_2$  分别为黑体温度为  $T_1$ 、 $T_2$  时的辐射通量,  $V_1$  和  $V_2$  一般分别取所有列阵元在  $T_1$  和  $T_2$  的黑体辐射下的平均响应,即

$$V_1 = \frac{\sum_{i=1}^M \sum_{j=1}^N x_{ij}(\phi_1)}{MN}, V_2 = \frac{\sum_{i=1}^M \sum_{j=1}^N x_{ij}(\phi_2)}{MN} \quad (3)$$

这样可以计算出  $G_{ij}$  和  $Q_{ij}$

$$G_{ij} = \frac{V_2 - V_1}{x_{ij}(\phi_2) - x_{ij}(\phi_1)}, Q_{ij} = V_1 - G_{ij}x_{ij}(\phi_1) \quad (4)$$

这样两点校正后探测器的输出为

$$y_{ij}(\phi) = G_{ij}[x_{ij}(\phi) - x_{ij}(\phi_1)] + V_1 \quad (5)$$

从式(4)可以看出,当探测器的某个像素点对两个定标温度的响应相等时,不能用式(5)进行校正计算,这时可以采用坏点的处理方法,令其输出等于相邻点校正后的输出.

## 2 实验结果分析

### 2.1 探测器响应曲线

用黑体对  $128 \times 128$  长波红外焦平面阵列探测器进行非均匀性校正. 黑体温度范围设置为  $20^\circ\text{C} \sim 55^\circ\text{C}$ , 每隔  $5^\circ\text{C}$  采集一次数据. 探测器原始的最大

\* 中科院光电技术研究所所长基金资助(CK0318)项目  
Tel: 028-85100941-226 Email: zhoujm@ioe.ac.cn  
收稿日期: 2004-09-16

非均匀性在 7.1%左右。

从式(1)中可以看出,两点线性校正算法是在假设探测元的响应为线性的前提下计算的.一般来说探测元的响应中段具有较好的线性度,而两端则较差.正是这种非线性的存在制约了两点线性校正的精度.

从理论上说,选取定标点越多,校正偏差越小,但是定标点越多,所需的存储区就越大,数字处理电路也就越复杂,并影响计算速度,难以对探测器进行实时校正.所以在实际应用中应根据需要选择恰当定标点数量,以便于硬件实现和实时校正.

由于黑体温度  $T$  已知,可以计算得到辐射通量  $\phi$ ,进一步得到该探测器的响应曲线.参考该曲线的形状可以得到多点线性校正定标点的选取以及定标点数量选取的信息.假设黑体辐射系数为 1,每个探测元接收的黑体辐射通量  $\phi$  可以表示为

$$\phi = kS \int_{\lambda_1}^{\lambda_2} M(\lambda) Q(\lambda) d\lambda \frac{D_1^2}{D^2} \tag{6}$$

式中

$$k = \tau_2 \sin^2 \theta, \tan \theta = \frac{D}{2f}$$

$D$  为平行光管的孔径,  $f$  为有效焦距

$$M(\lambda) = \frac{C_1}{\lambda^5} \cdot \frac{1}{e^{\frac{C_2}{\lambda T}} - 1}$$

$$(C_1 = 3.7415 \times 10^8, C_2 = 14387.9)$$

$D_1$  为探测器前所用光学系统的孔径.由于计算的是探测器各探测元的辐射通量,所以黑体辐射面积由探测元的面积决定,即  $S$  应满足

$$\frac{S}{f^2} = \frac{S_{\text{探测元}}}{f_{\text{定标系统}}^2} \tag{7}$$

得到的探测器第  $10 \times 10$  探测元的响应曲线如图 1,图 2 为该响应曲线对应的斜率分布.该探测器所有探测元斜率分布如表 1(坏点除外).由表 1

中可以看出,黑体温度为  $20^\circ\text{C} \sim 55^\circ\text{C}$  时,探测器的响应基本呈线性分布,响应曲线的斜率变化不大,均值在 0.75 左右.由于响应曲线的线性度用多点线性非均匀性校正算法对以上数据进行分析.探测器典型的原始图像如图 3(a).图 3(b)为两点线性校正算法校正后的典型图像,图 3(c)为三点线性校正算法校正后的典型图像,图 3(d)为五点线性校正算法校正后的典型图像.为便于分辨,图像均进行了不同程度的灰度拉伸.由图 3 可以看出,经非均匀性校正后图像的非均匀性得到很大的改善,其结果如表 2.

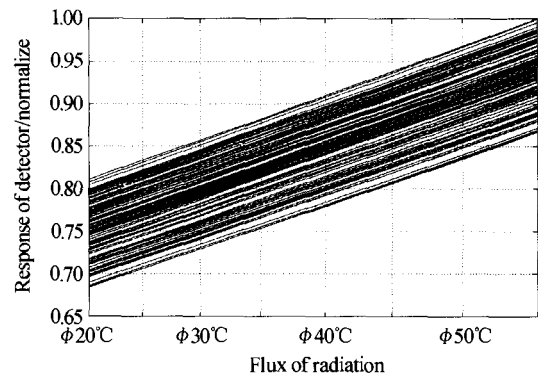


图 1 红外探测器响应曲线  
Fig. 1 Response curve of IR detector

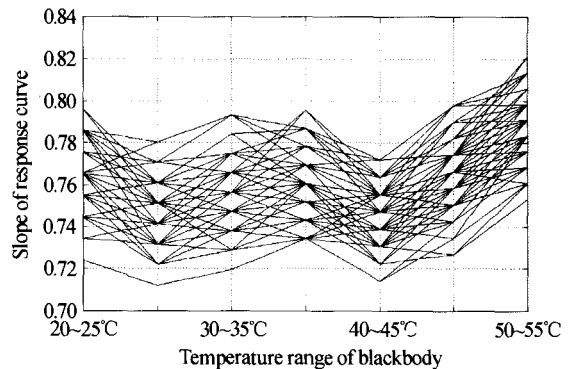


图 2 探测器响应曲线斜率分布  
Fig. 2 Slope of detector response curve

表 1 探测器响应曲线斜率分布表(归一化)

温度段	20~25°C	25~30°C	30~35°C	35~40°C	40~45°C	45~50°C	50~55°C
分布范围	0.62~0.89	0.59~0.86	0.60~0.89	0.58~0.87	0.58~0.86	0.55~0.87	0.53~1.00
平均值	0.77	0.75	0.75	0.75	0.74	0.74	0.74
均方根偏差	0.07	0.06	0.06	0.07	0.07	0.07	0.07

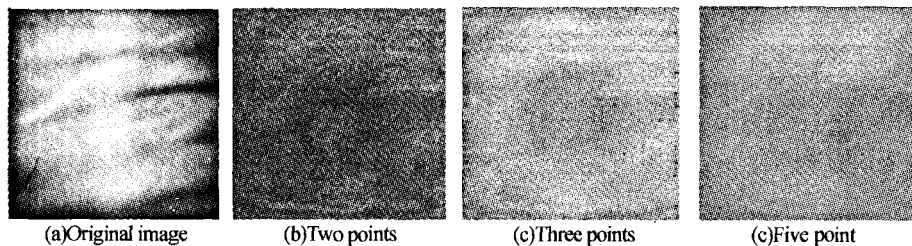


图 3 探测器原始图像以及不同定标点校正结果  
Fig. 3 Original image and corrected images with different number of temperature points

表 2 多点线性非均匀性校正结果

Nuc	30℃	40℃	50℃
原始	6.8‰	6.5‰	6.3‰
五点校正	0.4‰	0.4‰	0.5‰
三点校正	1.5‰	0.6‰	1.2‰
两点校正	2.6‰	2.9‰	2.8‰

## 2.2 定标点数量对校正结果的影响

从表 2 中的数据可以看出,对于校正后的非均匀性,五点校正优于三点校正,三点校正优于两点校正,这与理论分析相符合. 对于 20℃~55℃ 黑体温度范围,五点线性校正后的最大非均匀性在 0.5‰ 左右,三点线性校正后的最大非均匀性在 1.5‰ 左右,两点线性校正后的最大非均匀性在 2.9‰ 左右,其非均匀性均比校正前下降了一个数量级以上,图像的均匀性得到很大的改善.

但是如果需要校正的温度范围很宽,或者探测器响应的线性度较差,两点校正算法很难获得高的非均匀性校正精度,这时需要根据实际情况选择定标点.

## 2.3 定标点不同对校正结果的影响

为了比较定标点选取不同对非均匀性校正精度的影响,选取不同定标点的组合对 35℃ 的探测器原始图像数据进行两点校正(其中定标点 1 温度低于 35℃,定标点 2 温度高于 35℃),校正结果如表 3. 从表中数据可以看出,随着定标点 2 温度向被校正温度靠近,非均匀性呈明显的下降趋势. 虽然非均匀性也随定标点 1 有相同的趋势,但是却存在明显的波动. 当其温度为 20℃,比 25℃ 能获得更好的校正结果. 当然,非均匀性两点线性校正算法是否普遍存在这种规律,还要通过大量的实验验证.

表 3 两点线性非均匀性校正结果

Nuc	定标点 1			
	20℃	25℃	30℃	
定标点 2	40℃	1.1‰	1.2‰	0.8‰
	45℃	2.3‰	2.9‰	1.9‰
	50℃	3.3‰	4.4‰	2.8‰
	55℃	4.6‰	5.8‰	3.9‰

## 2.4 非均匀性校正结果

图 4 为非均匀性校正前后人手指的图像,从图

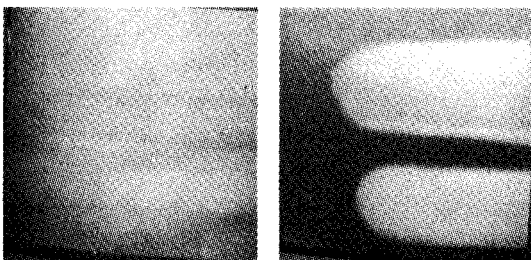


图 4 非均匀性校正前后的图像

Fig. 4 Uncorrected and corrected image

中可以看出校正后探测器图像得到很大程度的改善.

## 3 结论

多点线性校正的结果与定标点的选取、定标点的数量密切相关. 从理论上说,定标点的数量越多,校正结果越好,但定标点数量的增加,会给探测器的实时校正带来困难. 为了恰当选择定标点及其数量,对实验所用探测器的响应曲线进行了计算、分析,认为两点校正即可得到较好的结果. 实验结果表明,定标点越多,校正后的均匀性越好,对于 20℃~55℃ 黑体温度范围,探测器原始的最大非均匀性在 7.1‰ 左右. 五点线性校正后的最大非均匀性在 0.5‰ 左右,三点线性校正后的最大非均匀性在 1.5‰ 左右,两点线性校正后的最大非均匀性在 2.9‰ 左右,与理论分析相符. 用不同定标点组合对 35℃ 原始图像的校正分析的结果表明,在高温段,非均匀性随定标点温度向被校正图像温度靠近而降低,但是在低温段却存在一定的波动,而且两点线性校正方法是否存在这种普遍规律,还需要进一步的实验.

## 参考文献

- 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  
Yin S M, Liu S Q. *Acta Photonica Sinica*, 2002, **31**(6): 715~718
- 拜丽萍, 殷世民, 刘上乾. 一种新的基于场景的红外焦平面阵列非均匀性校正算法. 光子学报, 2004, **33**(1): 109~112  
Bai L P, Yin S M, Liu S Q. *Acta Photonica Sinica*, 2004, **33**(1): 109~112
- 陈锐, 谈新权. 红外图像非均匀性校正方法综述. 红外技术, 2002, **24**(1): 1~3  
Chen R, Tan X Q. *Infrared Technology*, 2002, **24**(1): 1~3
- 孔令彬, 易新建, 王典洪, 等. 利用 FPGA 实现红外焦平面阵列实时非均匀性校正. 光电工程, 2002, **29**(6): 39~42  
Kong L B, Yi X J, Wang D H, et al. *Opto-electronic Eng*, 2002, **29**(6): 39~42
- 姜光, 刘上乾. 一种新的红外焦平面器件非均匀性自适应校正算法. 光电工程, 2001, **28**(5): 40~42  
Jiang G, Liu S Q. *Opto-electronic Eng*, 2001, **28**(5): 40~42
- 胡晓梅. 红外焦平面探测器的非均匀性与校准方法研究. 红外与激光工程, 1999, **28**(3): 9~12  
Hu X M. *Infrared & Laser Eng*, 1999, **28**(3): 9~12
- 付小宁, 殷世民, 刘上乾. 基于系统非线性的红外焦平面非均匀性校正. 光子学报, 2002, **31**(10): 1277~1280  
Fu X N, Yin S M, Liu S Q. *Acta Photonica Sinica*, 2002, **31**(10): 1277~1280

## Precision Analysis of Nonuniformity Correction of IRFPA

Zhou Jinmei, Xing Tingwen, Lin Wumei

*State Key Laboratory of Optical Technologies for Microfabrication, Institute of Optics and Electronics,  
Chinese Academy of Sciences, Chengdu 610209*

Received date: 2004-09-16

**Abstract** Some general methods for nonuniformity correction of infrared focal plane array (IRFPA) were discussed in the article. Multi-point linear algorithm (MPLA) based on black body was used to correct some images of IRFPA with size of  $128 \times 128$  and the results were rather good. Method for the selection and determining of the number of the used points were analyzed with knowledge of the response curves of the detector because the performance of MPLA was related to these two factors. And the influence of them was also researched practically, which showed the perfect reconciliation with former analysis.

**Keywords** IRFPA; Nonuniformity; Correction; Response curve; Flux of radiation

**Zhou Jinmei** was born in 1977. She studied in North-eastern University at Shenyang from 1996 to 2003 and was awarded a B. S. degree in applied physics and a M. S. degree in condensed physics. Now she works in Institute of Optics and Electronics, Chinese Academy of Sciences and her main interests are infrared measurement & infrared system calibration.

