

文章编号:1001-9014(2007)04-0246-05

## 基于积分时间调整的红外焦平面阵列 非均匀校正算法研究

冷寒冰, 汤心溢, 彭鼎祥

(中国科学院上海技术物理研究所, 上海 200083)

**摘要:**利用实测的响应数据分析了红外焦平面阵列探测元的响应特性与入射辐射、积分时间的关系,指出了实际工程中常用的两点黑体辐射定标校正算法的本质在于利用高低温时不同的响应数据计算增益系数与偏置系数.与此相类似,通过调整积分时间也能得到不同的响应数据.因此对基于积分时间调整的校正算法展开研究,分别提出一点与两点定标校正算法,并将一点定标与小波多分辨率分解相结合,提出了一种新的自适应非均匀校正算法,实验结果证明了该方法在实际成像系统中的有效性.

**关键词:**积分时间;多分辨率分解;非均匀校正

**中图分类号:**TN215 **文献标识码:**A

## RESEARCH ON NONUNIFORMITY CORRECTION OF IRFPA BASED ON INTEGRAL TIME ADJUST

LENG Han-Bing, TANG Xin-Yi, PENG Ding-Xiang

(Shanghai Institute of Technical Physics, Chinese Academy of Sciences, Shanghai 200083, China)

**Abstract:** The relationship of IRFPA between response characteristic and incidence radiation, integral time was analyzed by using the practical response data. The essence of two point blackbody radiometric calibration non-uniformity correction algorithm was proposed by using different response data of high and low temperature to calculate gain coefficient and bias coefficient. Resembling to this, different response data could also be gathered by adjusting integral time. Therefore, non-uniformity correction (NUC) algorithm based on integral time regulation was studied, one and two point calibration correction algorithm was first proposed, then combined with multi-resolution wavelet decomposition, a new adaptive NUC algorithm was presented. Experiments show that the proposed scheme achieves good performance when applied in real imaging system.

**Key words:** integral time; multi-resolution wavelet decomposition; NUC

### 引言

红外焦平面阵列(IRFPA)器件由于各探测元响应的不一致,会导致图像中非均匀性噪声的存在,降低系统的成像质量.非均匀校正技术是解决这一问题,提高系统温度分辨率的重要措施.目前国内外的非均匀校正算法主要有基于黑体辐射定标的校正方法<sup>[1]</sup>和基于场景的校正方法<sup>[2,3]</sup>.但在实际工程中使用的往往多为定标校正算法,尤其是黑体定标两点校正算法,应用得更广泛.

基于黑体辐射定标的校正方法用标准黑体的 2

个或多个不同温度下的均匀热辐射对每个探测单元响应进行定标.然后计算出各像元的增益系数和偏置系数,在成像过程中利用这 2 个系数对各探测元的响应值不断进行校正.由此可见,黑体辐射定标校正方法的实现离不开可变温度的黑体辐射源,并且定标过程也较为繁琐.

本文利用 IRFPA 的实测定标响应数据,分析了像元响应率与入射辐射、积分时间的关系,并指出定标校正的本质是利用不同辐射能量下阵列的不同响应值来计算校正系数.考虑到同样入射辐射能量下,改变焦平面的积分时间也可以得到不同的响应值,

收稿日期:2006-09-25,修回日期:2007-01-10

基金项目:国家自然科学基金(10477019)资助项目

作者简介:冷寒冰(1978-),男,江苏常州人,博士生,主要研究方向为红外焦平面阵列测试与成像信号处理.

Received date: 2006-09-25, revised date: 2007-01-10

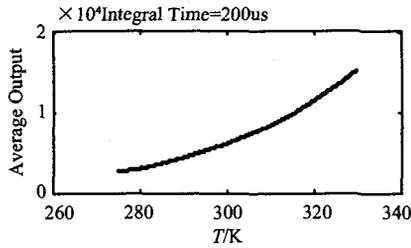


图1 各像元平均输出与入射辐射的关系  
Fig. 1 Average output vs input radiation

因此提出了基于积分时间调整的非均匀校正算法. 通过研究,对调整积分时间实现一点校正(OPC)与两点校正(TPC)的定标校正算法提出了具体实现步骤,并将积分时间一点校正与小波的多分辨率分解相结合,对自适应校正算法作了初步探讨.

## 1 红外焦平面阵列的响应特性与工作参数的关系

Mooney 首先推导了 IRFPA 探测器的理想响应模型[4]

$$N_i(T) = G_i \cdot \Phi \cdot B_i, \quad (1)$$

式中,  $\Phi$  为绝对温度  $T$  的黑体辐射到 IRFPA 各探测元的平均光通量,而  $B_i$  和  $G_i$  分别为探测元  $i$  的偏置系数和增益系数,此即为探测元的线性响应模型. 实际的探测元响应模型是非线性的,文献[5]给出了 IRFPA 探测元非线性响应量的计算.

为考查实际工作中探测元的响应和入射辐射,积分时间等工作参数的关系,本文利用国外某  $256 \times 256$  的碲镉汞(HgCdTe)阵列,自行研制了图像采集系统,并得到系列定标数据.

### 1.1 探测元响应与入射辐射的关系

为考察响应率与入射辐射的关系,固定积分时间( $200\mu\text{s}$ )和室内环境温度( $290\text{K}$ ),仅改变入射黑体辐射,考察其与各像元平均输出值的关系. 黑体辐射温度变化范围为  $275\text{K} \sim 330\text{K}$ ,间隔为  $5\text{K}$ .

图1中横坐标为黑体温度,纵坐标为 IRFPA 各探测元平均输出灰度值,光滑的曲线描述了各探测元平均响应与入射黑体辐射的关系:随着入射黑体辐射温度的升高,IRFPA 各探测元的平均输出值逐渐升高.

### 1.2 探测元响应与积分时间的关系

为考察响应率与积分时间的关系,固定黑体入射辐射( $290\text{K}$ )和室内环境温度( $290\text{K}$ ),仅改变积分时间,使其范围为  $60\mu\text{s} \sim 360\mu\text{s}$ ,间隔为  $10\mu\text{s}$ .

图2中横坐标为积分时间,纵坐标为 IRFPA 各

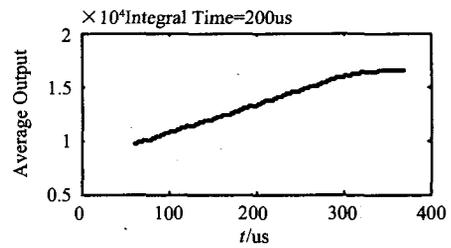


图2 各像元平均输出与积分时间的关系  
Fig. 2 Average output vs integral time

探测元输出平均灰度值,图中的光滑曲线描述了平均灰度值与积分时间的关系. 焦平面正常工作时存在一个合适的积分时间区域,在该区域中,随着积分时间的增加各探测元平均输出的响应值也逐渐增加. 等各探测元均进入饱和状态时,平均输出的响应值保持不变.

## 2 黑体辐射定标两点校正算法的本质

由各像元平均输出与入射辐射的关系图可知,改变入射辐射就可以得到各像元不同的响应值. 传统的黑体辐射定标校正算法正是基于此原理才得以实现的.

黑体定标过程中,首先要选取高低温2个温度点  $T_1$  和  $T_2$ ,得到2个辐照度  $\phi_1$  和  $\phi_2$ ,取平均后有

$$\bar{V}(\phi_1) = \sum V_{ij}(\phi_1)/N, \quad (2)$$

$$\bar{V}(\phi_2) = \sum V_{ij}(\phi_2)/N, \quad (3)$$

分别代入  $V_{ij}(\phi) = G_{ij} \times V_{ij}(\phi) B_{ij}$  中得到增益校正系数和偏置校正系数:

$$G_{ij} = [\bar{V}(\phi_2) - \bar{V}(\phi_1)] / [V_{ij}(\phi_2) - V_{ij}(\phi_1)], \quad (4)$$

$$B_{ij} = [V_{ij}(\phi_2)\bar{V}(\phi_1) - V_{ij}(\phi_1)\bar{V}(\phi_2)] / [V_{ij}(\phi_2) - V_{ij}(\phi_1)]. \quad (5)$$

由此可见,该校正算法的本质是利用高温和低温黑体得到焦平面阵列各像元不同的2个响应图像,并以此为基础根据上面的公式计算出校正系数. 在实现过程中需要有高低温定标物体才能够实现,其定标过程较为繁琐.

## 3 基于积分时间调整的非均匀性校正算法

由各像元平均输出与积分时间的关系图可知,当焦平面阵列的积分时间发生改变后,同样可以得到各像元不同的响应值. 因此理论上,以这些响应值为基础,同样可以计算出非均匀校正所需要的各像元的增益校正系数和偏置校正系数. 下文分别对基于积分时间调整的定标(一点、两点)校正算法和自

适应校正算法展开研究。

### 3.1 基于积分时间调整的一点定标校正算法

设焦平面正常工作时有  $T$  个积分时间,其集合为  $T = [t_1, t_2, \dots, t_T]$ ,在各积分时间下采集到的各像元响应数据集为  $X = [X_i(t_1), X_i(t_2), \dots, X_i(t_T)]$ ,  $i$  为第  $i$  个像元 ( $i = 1, 2, \dots, N$ )。基于积分时间调整的一点校正算法过程如下:

1. 对每个积分时间下的响应值求各探测元的偏置分量

$$\bar{X}_i(t_n) = \sum_{i=1}^N X_i(t_n) / N, \quad n = 1, 2, \dots, T \quad (6)$$

$$B_i(t_n) = X_i(t_n) - \bar{X}_i(t_n) \quad n = 1, 2, \dots, T \quad (7)$$

2. 对各积分时间下计算出的偏置分量求其均值

$$\bar{B}_i = \sum_{n=1}^T B_i(t_n) \quad (8)$$

式(2)中所求得的  $\bar{B}_i$  即为各探测元的偏置校正系数。由计算过程可知,该积分时间调整定标方法的实质是每个积分时间下一点定标后求均值以确定各探测元最终的偏置校正系数。该方法无需标准黑体,实际工作中只需将焦平面的镜头盖盖上即可实施,过程极为简单方便。

### 3.2 基于积分时间调整的两点定标校正算法

设焦平面阵列探测器正常工作时有  $N$  个积分时间,其集合为  $T = [t_1, t_2, \dots, t_N]$ ,在各积分时间下采集到的各像元响应数据集为  $X = [X_1(i), X_2(i), \dots, X_N(i)]$ ,  $i$  为第  $i$  个像元。基于积分时间调整的两点定标非均匀校正算法有以下几个步骤:

1. 采用最小二乘法拟合焦平面阵列各探测元的响应特性,根据探测器的响应模型,所采用的拟合模型如下式所示

$$X(i) = K(i) \cdot T(i) + B(i) \quad (9)$$

其中,  $K(i)$  和  $B(i)$  为拟合系数,通过解方程组求得:

$$K(i) = \frac{N(\sum T(i)X(i)) - (\sum T(i))(\sum X(i))}{\Delta} \quad (10)$$

$$B(i) = \frac{(\sum T(i)^2)(\sum X(i)) - (\sum T(i))(\sum T(i)X(i))}{\Delta} \quad (11)$$

$$\Delta = N(\sum T(i)^2) - (\sum T(i))^2 \quad (12)$$

2. 分别计算各个像元拟合后的方差  $\sigma(i)$

$$\sigma(i) = \left( \sum_{n=1}^N X_n(i) - K(i) \cdot t_n - B(i) \right)^{1/2} \quad (13)$$

3. 设立阈值,确定合适的方差判据。若  $\sigma(i) > \epsilon$ ,则判定该像元为盲元,并修正该点对应的  $K(i)$  和

$B(i)$ ;

4. 执行非均匀校正算法,输出校正后的图像。

### 3.3 一点校正与小波多分辨率分解相结合的自适应校正算法

基于积分时间调整的一点校正算法只是对焦平面阵列各探测元的偏置分量做了校正。下文通过分析由增益非均匀性单独引起的空间噪声,提出用小波多分辨率分解消除增益非均匀性的自适应校正算法。

#### 3.3.1 增益非均匀性引起的空间噪声分析

焦平面的简化模型可表示为:  $Y_{ij} = G_{ij}\Phi_{ij} + B_{ij}$ ; 仿照文献[6]中的分析方法,对同一均匀入射辐射,调整积分时间得到高积分时间响应数据  $Y_{ij}^H$  和低积分时间响应数据  $Y_{ij}^L$ ,则有

$$\begin{aligned} Y_{ij}^H &= G_{ij}\Phi_{ij}^H + B_{ij} \\ Y_{ij}^L &= G_{ij}\Phi_{ij}^L + B_{ij} \end{aligned} \quad (14)$$

其中  $\Phi_{ij}^H$  和  $\Phi_{ij}^L$  分别为高积分时间和低积分时间时的均匀入射光通量。对于定标数据,其期望的校正输出一般用其空间均值。则有如下方程

$$Y_{ij}^H - \bar{Y}_{ij}^H = (G_{ij} - \bar{G}_{ij})\Phi_{ij}^H + (B_{ij} - \bar{B}_{ij}) \quad (15)$$

$$Y_{ij}^L - \bar{Y}_{ij}^L = (G_{ij} - \bar{G}_{ij})\Phi_{ij}^L + (B_{ij} - \bar{B}_{ij}) \quad (16)$$

因而在输入光通量变化为  $\Phi_{ij}^H - \Phi_{ij}^L$  时,由探测元增益非均匀性所导致的空间噪声为

$$(Y_{ij}^H - \bar{Y}_{ij}^H) - (Y_{ij}^L - \bar{Y}_{ij}^L) = (G_{ij} - \bar{G}_{ij})(\Phi_{ij}^H - \Phi_{ij}^L) \quad (17)$$

上面等式中的左边可以通过计算得到。右边  $\Phi_{ij}^H - \Phi_{ij}^L$  为一定值,因而下式

$$G_{ij} - \bar{G}_{ij} = [(Y_{ij}^H - \bar{Y}_{ij}^H) - (Y_{ij}^L - \bar{Y}_{ij}^L)] / (\Phi_{ij}^H - \Phi_{ij}^L) \quad (18)$$

可完全反映增益非均匀性引起的空间噪声的分布。

保持入射辐射不变,对某  $200 \times 200$  大小的碲镉汞(HgCdTe)阵列在积分时间为  $200\mu\text{s}$  和  $260\mu\text{s}$  时采集定标数据,采样精度为 14 位。根据上式计算由增益非均匀性所导致的空间噪声,噪声分布如图 3 所示。对该噪声图像进行二维小波分解,得到 4 个子带的小波系数图像,如图 4 所示。图 4 中左上角子带为噪声的低频成分,其余 3 个子带为噪声的高频成分。

根据二维小波分解后各子带的系数可计算出由非均匀性所导致的空间噪声中,高频成分的能量占总噪声能量的比例为 28.4%,由此可见,由增益非均匀性引起的空间噪声既有高频成分,也有低频成分,并且低频成分占主导地位。要降低由增益引起的非均匀性,必须要尽可能消除该空间噪声中的高频与低频成分。

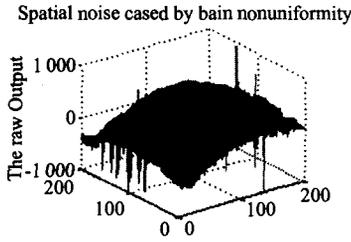


图3 由增益非均匀性所导致的空间噪声  
Fig.3 Spatial noise caused by gain nonuniformity

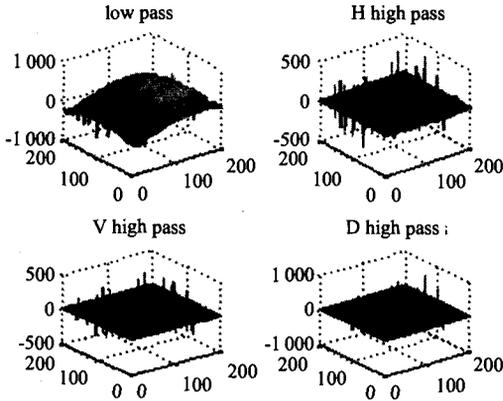


图4 二维小波分解后各子带的系数  
Fig.4 Spatial noise after wavelet decomposition

3.3.2 与小波多分辨率分解相结合的自适应校正算法

S. Mallat 在 1988 年首先提出了多分辨率分析的思想,从空间的概念上形象地说明了小波的多分辨率特性,并将之前的所有正交小波基的构造法统一起来,给出了正交小波的构造方法以及正交小波变换的快速算法,即 Mallat 算法。

由数值方法给出的  $f(x)$ , 其离散正交小波分解通过 Mallat 算法表述最终有如下分解:

$$f(x) = A_{J_2}f(x) + \sum_{j=J_1+1}^{J_2} D_j f(x) \quad (19)$$

式(19)中,  $A_j f$  称作  $f$  在  $2^j$  分辨率下的连续逼近,  $D_j f$  为  $f$  在  $2^j$  分辨率下的连续细节. 为形象表示该分解过程, 设  $L$  和  $H$  分别为低通滤波器和高通滤波器, Mallat 算法的分解过程可由滤波过程来描述, 如图 5 所示。

由图 5 可以看出, 多分辨率分解只是对低频部分进行进一步分解, 而高频部分则予以保留不变. 结合对增益非均匀性引起的空间噪声分析可知, 采用多分辨率分解后, 由增益非均匀性引起的空间噪声将分布在低频分量 and 各高频分量中。

利用 sym2 小波对图 3 中由增益非均匀性所导

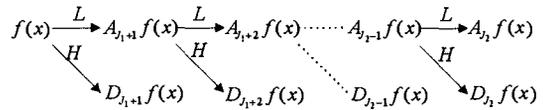


图 5 尺度空间分解过程示意图  
Fig.5 Schematic diagram of scale decomposition

表 1 由增益非均匀性所引起空间噪声经多分辨率分解后的结果

Table 1 Spatial noise caused by gain nonuniformity after scale decomposition

分解层数	低频噪声在总噪声中的比例
1	74.04%
2	65.11%
3	56.98%
4	51.17%
5	46.77%
6	38.48%
7	25.27%

致的空间噪声进行 7 层多分辨率分解. 其噪声中的低频成分占总噪声能量的百分比如表 1 所列。

由表 1 可见, 随着分解层数的增加, 低频分量中由增益非均匀性引起的空间噪声将越来越小. 因此在分解到一定层次后, 由低频分量重构图像, 即相当于对原始图像进行了增益校正处理. 若以第 7 层分解后的低频分量重构图像, 则重构的图像与原图像相比, 由增益非均匀性引起的空间噪声降低了 74.73%。

据此, 本文提出基于积分时间调整和小波多分辨率分解相结合的自适应非均匀校正算法 (OPC + WAC: Wavelet Adaptive Correction), 其完整过程如下:

1. 调整焦平面的积分时间并计算各像元的偏置校正系数;
2. 完成对各像元偏置的校正, 得到一点校正后的图像;
3. 选择合适的层数 (通常为 2 ~ 6), 对经过偏置校正的图像进行多分辨率分解;
4. 对高频子带系数进行中值滤波, 平滑其中的噪声成分;
5. 以低频子带和滤波后的高频子带重构图像, 完成对增益引起的空间噪声的校正。

4 实验结果分析

本文中使用的碲镉汞 (HgCdTe) 探测器阵列, 其有效积分时间为  $70\mu s \sim 300\mu s$ . 图 6 (a) 为 HgCdTe 阵列在积分时间为  $200\mu s$  时的原始图像. 盖上镜头盖后在积分时间为  $200\mu s \sim 290\mu s$  区间内以  $10\mu s$  为

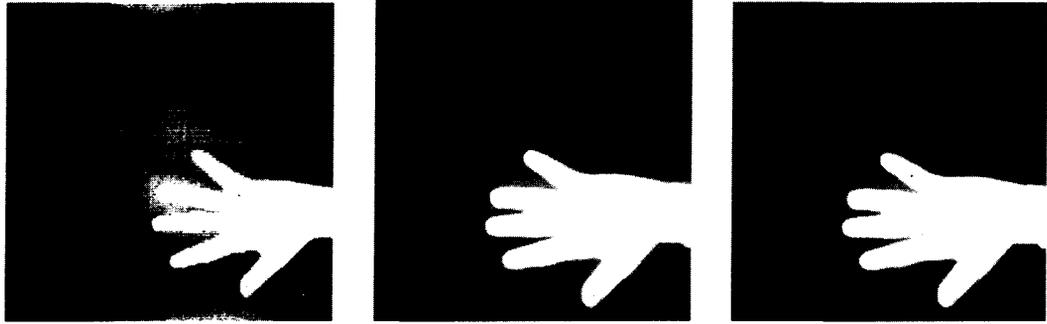


图6 试验结果对比图 (a)原始图像 (b)积分时间两点校正结果 (c)一点校正 + 小波自适应校正结果  
Fig.6 Experiment result contrast (a) original image (b)TPC result (c)OPC + WAC result

表2 各算法校正后的非均匀性

Table 2 Nonuniformity after NUC algorithms

原始图像	积分时间 OPC	积分时间 TPC	黑体辐射 TPC	积分时间 OPC + WAC
5.6%	0.9%	0.32%	0.31%	0.19%

间隔采集 10 帧图像,按照本文算法流程分别进行积分时间一点与两点校正,以及一点校正与小波变换相结合的自适应校正.各算法校正后的非均匀性如表 2 所列.

由实验数据可知,与未校正的图像相比,积分时间 OPC 算法能将图像的非均匀性降低约 6 倍,而积分时间 TPC 与黑体辐射 TPC 算法有着几乎相同的校正效果,能将图像的非均匀性降低约 18 倍.积分时间 OPC 和小波分解相结合的自适应校正算法能取得更低的非均匀性和更好的校正效果,由于该算法在小波重构过程中对高频子带系数进行了平滑处理,因此图像中的目标会丢失部分细节成分.通过实验对比发现,丢失的这部分细节成分对目标的识别影响并不大,因此综合而言该方法仍具有其先进性和实用性.

## 5 结语

本文以 HgCdTe 焦平面阵列为例,分析了 IRFPA 的响应与积分时间的关系,提出以 IRFPA 不同积分时间下的响应数据来估计各探测元的偏置与增益,据此提出基于积分时间定标的一点与两点校正算法,同时分析了由增益非均匀性所引起的空间噪声的特性,在一点校正的基础上提出利用小波多分辨率分解实现对各探测元增益的自适应校正的方

法.实验结果表明基于积分时间调整的两点定标校正算法和一点校正与小波分解自适应算法能够有效地降低焦平面阵列图像的非均匀性.前者已经被应用在实时的红外图像处理项目中,而后的实时应用仍有待进一步研究.

## REFERENCES

- [1] FENG Lin, LIU Shuang, ZHAO Kai-Sheng, *et al.* Method of nonuniformity correction for IRFPA with nonlinear response[J]. *J. Infrared Millim. Waves* (冯林,刘爽,赵凯生,等.考虑红外焦平面器件非线性响应的一种非均匀性校正方法.红外与毫米波学报), 2006, 25(3):221—224.
- [2] WANG Bing-Jian, LIU Shang-Qian, LAI Rui, *et al.* Adaptive non-uniformity correction algorithm for IRFPA based on neural network [J]. *J. Infrared Millim. Waves* (王炳健,刘上乾,赖瑞,等.基于神经网络的红外焦平面非均匀性自适应校正算法.红外与毫米波学报), 2006, 25(6):405—407.
- [3] Scribner D A, Sarkay K A, Caldfield J T. Nonuniformity Correction for staring focal plane arrays using scene-based techniques [J]. *SPIE*, 1990, 1308:224—233.
- [4] Mooney J M, Shepherd F D, Ewing W S. Responsivity non-uniformity limited performance of infrared staring cameras [J]. *Optical Engineering*, 1989, 28(11):1151—1161.
- [5] LIU Hui-Tong, WANG Qi, ZHENG Zhi-Wei. Analysis and calculation of the nonlinear response in infrared focal plane arrays [J]. *J. Infrared Millim. Waves* (刘会通,王骐,郑志伟.红外焦平面阵列非线性响应的分析和计算.红外与毫米波学报), 2001, 20(4):253—258.
- [6] ZHANG Tian-Xu, SHI Yan, CAO Zhi-Guo, *et al.* Study on the property of spatial frequency of non-uniformity noise in IRFPA and the improvement of spatial adaptive nonuniformity correction technique [J]. *J. Infrared Millim. Waves* (张天序,石岩,曹治国,等.红外焦平面非均匀性噪声的空间频率特性及空间自适应非均匀性校正方法改进.红外与毫米波学报), 2005, 24(4):255—260.