

doi: 10. 3788/gzxb20134204. 0475

# 基于变积分时间的红外焦平面非均匀性校正 算法研究

陈世伟, 杨小冈, 张胜修, 王一

(第二炮兵工程大学 303 教研室, 西安 710025)

**摘 要:** 针对两点温度定标算法在应用过程中暴露的问题, 提出了基于变积分时间的红外焦平面非均匀性校正算法. 该算法先对图像进行非线性压缩, 转换为线性图像, 再利用红外焦平面阵列探测元的响应特性与积分时间之间的关系, 采用改变积分时间的方法拟合红外焦平面探测器的平均响应特性曲线, 进行两点校正, 然后对结果进行取指数操作, 即得到原图非均匀校正后的图像. 分别利用两点温度定标法和变积分法对航拍红外图像进行校正效果验证, 同时进行了不同校正算法的非均匀性适应性评价实验. 实验结果表明新算法计算量小, 校正准确度高, 反应速度快, 并在一定程度上解决了大动态范围内响应非线性对校正性能的影响, 具有很好的工程应用价值.

**关键词:** 变积分时间; 非均匀校正; 非线性模型; 红外焦平面阵列

中图分类号: TN215

文献标识码: A

文章编号: 1004-4213(2013)04-0475-5

## Research on Nonuniformity Correction Algorithm of IRFPA Based on Adjusting Integral Time

CHEN Shi-wei, YANG Xiao-gang, ZHANG Sheng-xiu, WANG Yi

(303 Section, The Second Artillery Engineering University, Xi'an 710025, China)

**Abstract:** According to the problems of two temperature points correction algorithm in application, a nonuniformity correction algorithm with based on adjusting integral time is presented. In this algorithm, the nonlinear image data is translated into the linearized one firstly, then by using the relationship of IRFPA between response characteristic and integral time, the response curve of IRFPA is fitted by adjusting the integral time. And two point calibration correction is used. Finally the exponent of the corrected linearized image data is calculated and the uniformity image of the original one is achieved. The effect of correction aerial infrared image is verified by two temperature points correction algorithm and adjusting the integral time method, and this assessment method for the adaptability of nonuniformity is used in different nonuniformity correction methods. Experimental results indicate that the new algorithm has better engineering practice significance because of its characteristics of small calculating amount and fast speed, and high precision. The algorithm of the nonlinear response model of IRFPA reduces the influence of the detector nonlinear response to the nonuniformity correction performance in large dynamic range in some degree.

**Key words:** Adjusting integral time; Nonuniformity correction; Nonlinear model; Infrared Focal Plane Arrays(IRFPA)

基金项目: 国家自然科学基金(No. 61203189)资助

第一作者: 陈世伟(1979-), 男, 讲师, 博士研究生, 主要研究方向为精确制导及图象处理技术. Email: cshw3876@tom.com

导师: 张胜修(1965-), 男, 教授, 博导, 主要研究方向为航天器制导、控制与测试技术. Email: zshx@tom.com

收稿日期: 2012-10-09; 录用日期: 2013-01-04

## 0 引言

由凝视型红外焦平面阵列 (Infrared Focal Plane Array, IRFPA) 构成的成像系统不需要传统的光机扫描, 具有体积小、灵敏度高、性能稳定等优点, 是目前发展的主要方向. 但由于材料和工艺方面的原因, IRFPA 器件各探测单元对同一辐射源很难达到响应一致, 也就是响应度的非均匀性问题, 影响了 IRFPA 成像系统的效果. 因此必须对 IRFPA 器件的非均匀性进行校正.

红外图像非均匀校正算法很多, 主要分为两大类: 基于定标<sup>[1]</sup>和基于场景<sup>[2]</sup>的校正方法. 定标法要求在特定温度下通过黑体产生的均匀辐射对 IRFPA 定标, 定标法包括一点法、两点法及扩展的两点法等. 目前, 国内外的大量研究工作集中于基于场景的非均匀性校正算法, 如时域高通滤波 (Temporal High Pass Filtering Correction, THPFC) 算法、人工神经网络 (Artificial Neural Network, ANN) 算法、卡尔曼滤波 (Kalman Filtering, KF) 算法及恒定统计平均 (Constant Statistics, CS) 校正算法等<sup>[3-4]</sup>. 基于场景的校正方法虽然可自动适应背景变换, 也无需定标, 但是通常使用图像序列并且依赖于运动, 且都是面对某种特定的条件, 而在对当前图像进行校正时需要用到先前图像的统计信息, 计算量大, 容易产生“鬼影”. 因此, 在实际中应用较多的还是定标法, 其中以两点温度定标算法在工程应用中最为常见. 但该算法在实际使用过程中也曝露出不少问题, 如需要标准黑体, 需要设定环境温度, 步骤繁琐, 条件苛刻, 很难实现快速简洁标定. 另外, 响应特性的非线性在大动态范围下对于两点温度定标算法的校正效果影响也很大.

本文提出了一种基于变积分时间的红外图像非均匀性快速校正算法. 该算法不仅克服了定标法对环境要求高、标定时间长的固有缺点, 而且还解决了响应非线性的影响. 实验结果表明这种新算法实现了简洁快速标定, 并在一定程度上解决了响应非线性影响标定效果的问题, 很适合在武器装备上应用.

## 1 两点温度定标算法

两点温度校正法是最早开展研究、最为成熟的算法之一. 应用两点温度法校正有两个前提条件, 第一, 探测器的响应在所关注的温度范围内是线性变化的<sup>[3]</sup>; 第二, 探测器的响应具有时间的稳定性, 并且其受随机噪音的影响较小, 则非均匀性引入固定模式的乘性和加性噪音. 在此条件下, 探测元在黑体

产生的均匀辐射背景下的响应表示为

$$V_{ij}(\phi) = A_{ij}X_{ij}(\phi) + B_{ij} \quad (1)$$

式中  $X_{ij}(\phi)$  为实际接收的辐射量,  $A_{ij}$  为乘性噪音,  $B_{ij}$  为加性噪音.

对于每一探测元, 乘性和加性噪音的值是固定且不随时间变化. 由于探测器各阵列单元响应的不一致, 导致在同一辐射通量下各响应存在差异, 需加以校正, 即

$$\bar{V}_{ij}(\phi) = G_{ij}V_{ij}(\phi) + B_{ij} \quad (2)$$

式中,  $G_{ij}$  为校正增益,  $B_{ij}$  为校正偏移量,  $\bar{V}_{ij}(\phi)$  为校正后输出.

定标过程中, 首先要选取高低温 2 个温度点  $T_H$  和  $T_L$ , 得到 2 个辐照度  $\phi_H$  和  $\phi_L$ . 取平均后有

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

$$\bar{V}(\phi_L) = \sum V_{ij}(\phi_L) / N \quad (4)$$

分别代入式(2)中得到各探测元的增益校正系数和偏置校正系数为

$$G_{ij} = \frac{\bar{V}(\phi_L) - \bar{V}(\phi_H)}{V_{ij}(\phi_L) - V_{ij}(\phi_H)} \quad (5)$$

$$B_{ij} = \frac{V_{ij}(\phi_L)\bar{V}(\phi_H) - V_{ij}(\phi_H)\bar{V}(\phi_L)}{V_{ij}(\phi_L) - V_{ij}(\phi_H)} \quad (6)$$

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两个响应图像, 并以此为基础根据上面的公式计算出校正系数. 两点温度定标算法在实现过程中需要有标准黑体, 对环境要求苛刻, 定标过程较为繁琐.

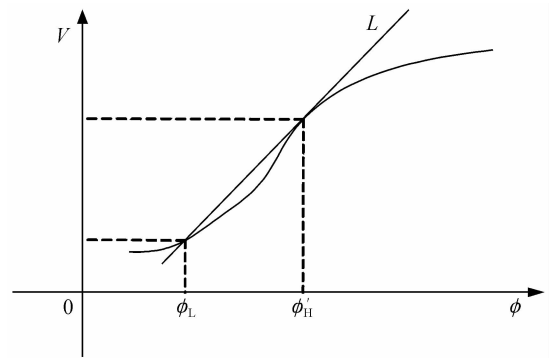


图1 两点定标法误差示意图

Fig. 1 Two calibration method error schematic diagram

该算法是基于探测单元在工作范围内响应呈线性的假设, 实际上探测单元的响应为非线性. 如图1所示, 假设定标点一为  $\phi_L$ , 如果将定标点二选择为  $\phi_H$ , 那么采用这种算法所假定的响应曲线为直线  $L$ , 显然在  $\phi_L$  和  $\phi_H$  之间以及其附近的部分与真实的响应曲线非常接近, 校正准确度高, 但是在其余的部分, 假定的响应直线  $L$  与真实的响应曲线相差较远, 校正准确度显著下降. 在探测器的响应动态范围

很大的工程应用中,显然此时如果仍然采用线性模型,则非线性将会对非均匀性校正引入较大的误差,降低非均匀性校正的性能.另外,两点温度定标算法在实现过程中需要有标准黑体,对环境要求苛刻,定标过程较为繁琐漫长,很难实现红外探测器的快速、简洁标定.

## 2 基于变积分时间的非均匀性校正算法

### 2.1 基于变积分时间的两点法

文献[6]指出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.

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.因此,在系统的动态范围内,可以采用最小二乘法拟合焦平面阵列各探测元的平均响应特性,然后采用两点法得到各探测元的增益校正系数和偏置校正系数.

设焦平面阵列探测器正常工作时具有  $N$  个积分时间,其集合为  $T=[t_1, t_2, \dots, t_n]$ ,对同一均匀入射辐射在各积分时间下采集到各像元的平均响应数据集为  $X=[x_1, x_2, \dots, x_n]$ .基于变积分时间的非均匀校正算法如下:

1)采用最小二乘法拟合焦平面阵列各探测元的平均响应特性,根据探测器的响应模型,所采用的拟合模型为

$$X(n)=kT(n)+b \quad (7)$$

式中,  $k$  和  $b$  为拟合系数,通过解方程组求得

$$k=\frac{N(\sum X(n)T(n))-\sum X(n)\sum T(n)}{N(\sum T(n)^2)-(\sum T(n))^2} \quad (8)$$

$$b=\frac{(\sum T(n)^2)(\sum X(n))-(\sum T(n))(\sum T(n)X(n))}{N(\sum T(n)^2)-(\sum T(n))^2} \quad (9)$$

2)选取高低两个积分时间得到焦平面阵列各探测元在高积分时间的响应数据  $V_{ij}(T_H)$  和在低积分时间的响应数据  $V_{ij}(T_L)$ ,这两个积分区间上探测器的响应平均值可通过式(7)得到,这样套用式(5)和式(6)可到各探测元的增益校正系数和偏置校正系数.

基于变积分时间的两点法的优点是不再需要标准黑体,只要不打开镜头盖或者用铝板遮挡镜头就可以进行标定,为探测器在使用前进行快速标定提供了保障.但是从算法本身看,仍是以假设红外探测元的响应为线性响应为前提条件的,因此依然存在前面所述的模型误差.

### 2.2 非线性模型

文献[7]给出了根据长期工程实践经验得出的 IRFPA 探测元非线性响应曲线可近似表示为

$$V=A/(1+\exp(B\phi+C))+D \quad (10)$$

式中,  $\phi$  为某探测元入射的红外辐射通量;  $V$  是某探测元的响应输出值;  $A, B, C, D$  分别是此探测元响应曲线的参量.

对式(8)两边取对数后,其变为

$$\ln\left(\frac{A}{V-D}-1\right)=B\phi+C \quad (11)$$

令  $S=\ln\left(\frac{A}{V-D}-1\right)$ ,则  $S$  与输入  $\phi$  之间为线性关系,这就满足上述的基于变积分时间的两点法线性假定的条件,从而可以采用其进行校正处理.

2.3 基于变积分时间的非均匀性校正过程

校正过程如下:

1)首先盖上红外焦平面的镜头盖,或将镜头对准均匀铝板;

2)按照设定的积分时间序列,依次拍摄,存储各次的图像数据;

3)根据式(8)和(9)求出拟合系数;

4)在有效积分时间范围内设定两个积分时间  $T_1, T_2(T_1>T_2)$ ,通过式(7)得到探测器的响应平均值;

5)按照两个设定的积分时间,依次拍摄,存储各次的图像数据,得到各探测元的响应值;

6)对每个探测单元的响应值取对数  $S=\ln\left(\frac{A}{V-D}-1\right)$ ,以进行非线性压缩,转化为线性化的图像  $S$ ;

7)根据式(5)、(6),计算每一个探测元的响应增益和偏移量,分别存储在查找表 LUT 内,以供校正时取用;

8)根据查找表 LUT 内的增益和偏移量系数,按照式(7)对线性化图像  $S$  进行校正,得到校正后线性化图像  $S'$ ;

9)最后对校正处理后的线性化图像  $S'$  进行取指数操作  $V'=\frac{A}{e^{S'}+1}+D$ ,即得到原图非均匀校正后的图像  $V'$ .

由以上校正过程描述可以看出,新算法简单易行,能够实现在探测器使用前进行快速定标.另外,新算法中采用非线性模型和指数运算,将非线性转化为线性问题,并没有过多地增加在线计算量,却达到了降低非线性响应的影响,从而提高了非均匀性校正的准确度.

### 3 实验结果及其分析

#### 3.1 实验结果的评价指标

本文中在均匀辐射下,焦平面阵列像元视频输出值的均方根偏差与视频输出平均值的百分比值NU,作为非均匀度的评价指标<sup>[8]</sup>.

$$NU = \frac{1}{V_{\text{oavg}}} \sqrt{\frac{1}{M \times N - (d+h)} \sum_{i=1}^M \sum_{j=1}^N (V_{ij} - V_{\text{oavg}})^2} \quad (12)$$

$$V_{\text{oavg}} = \frac{1}{M \times N - (d+h)} \sum_{i=1}^M \sum_{j=1}^N V_{ij} \quad (13)$$

式中, $V_{ij}$ 为焦平面上第*i*行第*j*列所对应像元的视频输出信号; $V_{\text{oavg}}$ 为焦平面上所有有效像元的视频信号平均值(在计算视频信号的和以及非均匀性时,均不包括无效像元的信号值);*M*和*N*分别为焦平面阵列的行数和列数;*d*为焦平面阵列中的死像元数;*h*为焦平面阵列中的过热像元数<sup>[6]</sup>.其中死像元

定义为响应率小于平均响应率1/10的像元,过热像元定义为噪音电压大于焦平面平均噪音电压10倍的像元.

#### 3.2 实验结果与分析

本文选用法国 SOFRADIR 公司的生产的  $320 \times 240$  中波制冷型凝视焦平面探测器,其有效积分时间为  $0.3 \sim 53 \mu\text{s}$ . 盖上镜头盖后在积分时间为  $1 \sim 50 \mu\text{s}$  区间内以  $5 \mu\text{s}$  为间隔采集 20 帧图像,按照本文算法流程和变积分时间两点校正算法分别对 1 000 帧航拍图像进行校正实验. 图 2 为第 10 帧航拍图像的校正实验结果. 图 2(a)为校正前原始图像,图 2(b)两点温度定标法校正后的图像,按照本文算法校正后图像如图(c)所示. 实验结果表明两种算法都可以有效改善图像的非均匀性,但本文算法不需要标准黑体,可以快速对 IRFPA 器件的非均

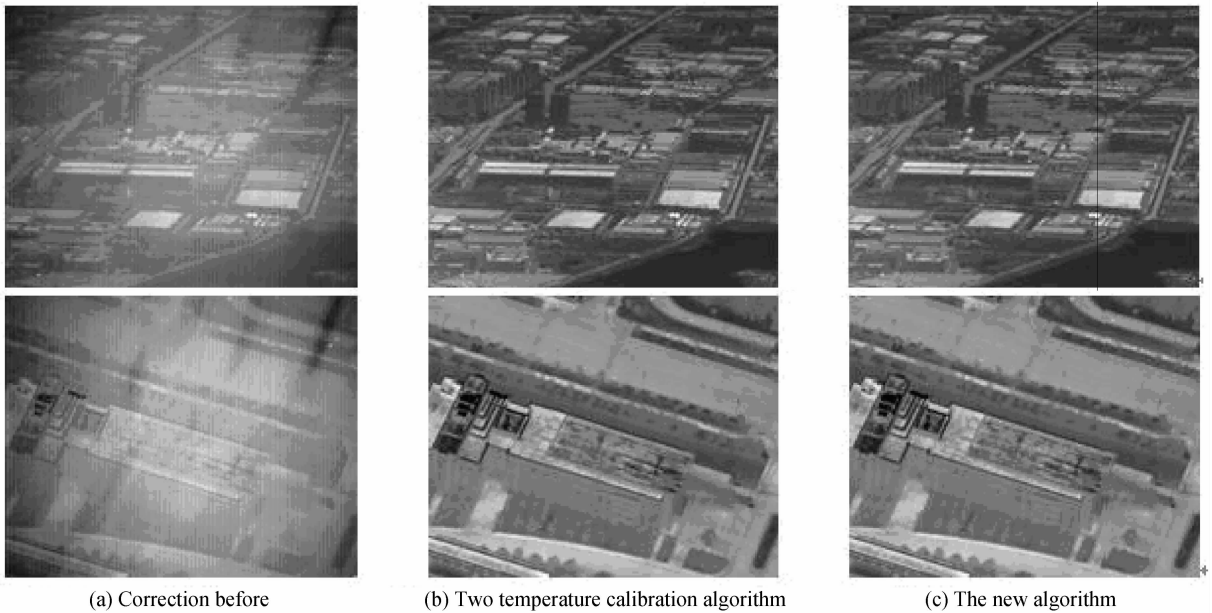


图 2 不同算法校正前后图像

Fig. 2 Different before and after correction algorithm of the image

表 1 校正算法的适应性实验结果比较

Table 1 Correction algorithm is the adaptability of the experimental results

	Correction before	Two temperature calibration algorithm	The new algorithm
1	9.095	0.496 5	0.436 9
2	9.105	0.495 5	0.493 5
3	8.953	0.577 5	0.501 3
4	9.086	0.606 5	0.502 2
5	10.005	0.625 3	0.557 8
6	9.195	0.653 6	0.598 6
7	9.085	0.789 6	0.561 2
8	9.195	0.768 9	0.553 1
9	8.995	0.965 3	0.542 8
10	8.905	1.186 7	0.576 9

匀性进行校正. 为了验证本文算法适应 IRFPA 非线性响应特性的能力,将 1 000 帧航拍图像按顺序分成 10 组,以模拟较大的动态范围,分别计算每一组图像应用不同算法后校正前后的平均非均匀度,实验结果如表 1 所示. 与原图像的非均匀度相比,经过两点温度定标法和本文算法校正后,图像的非均匀度都降低了一个数量级,校正效果都很好. 但在大动态范围内,两点温度定标法会因探测器响应的非线性,出现误差漂移现象,校正后图像非均匀度逐渐增大,而本文算法的校正能力相对稳定.

### 4 结论

本文针对两点温度定标算法在实际应用过程中

存在的对环境要求苛刻,难以实现快速校正,以及存在非线性误差等问题,提出了基于变积分时间的红外图像非均匀性快速校正算法.本文阐述了该算法的理论基础,并通过实验给出了该算法的校正效果图及对比数据.与两点温度定标算法相比,本文算法在一定程度上减小了由于响应非线性引起的校正误差,并且省去了两点温度定标线性校正算法在实际使用时苛刻的环境条件和繁琐的校正过程,更能满足武器装备对快速反应能力的要求,提高了校正准确度,获得了满意的实际应用效果.

#### 参考文献

- [1] FENG Lin, LIU Shang, ZHAO Kai-sheng, *et al.* Method of nonuniformity correction for IRFA with nonlinear response [J]. *Journal of Infrared and Millimeter Waves*, 2006, **25**(3): 221-224.  
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[J].*红外与毫米波学报*, 2006, **25**(3): 221-224.
- [2] LI Qing, LIU Shang-qian, LAI Rui, *et al.* A scene-based nonuniformity correction algorithm of IRFPA [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.
- [3] ZHANG Xiao-jun, ZHAO Yi-gong. Combined algorithm for nonuniformity correction of infrared focal plane arrays [J]. *Infrared Technology*, 2003, **25**(6): 34-38.  
张小军,赵亦工.红外焦平面非均匀校正的综合处理算法[J].*红外技术*, 2003, **25**(6): 34-38.
- [4] 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): 68-72.  
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): 68-72.
- [5] MOONEY JM, SHEPHERD F D, EWING W S. Responsively non-uniformity limited performance of infrared staring cameras [J]. *Optical Engineering*, 1989, **28**(11): 1151-1161.
- [6] LENG Han-bing, TANG Xin-yi, PENG Ding-xiang. Research on nonuniformity correction of IRFPA based on integral time adjusts [J]. *Journal of Infrared and Millimeter Waves*, 2007, **26**(4): 246-250.  
冷寒冰,汤心溢,彭鼎祥.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[J].*红外与毫米波学报*, 2007, **26**(4): 246-250.
- [7] 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的测定[J].*光电子·激光*, 2003, **14**(5): 489-492.
- [8] TORRES S, VERA E, REEVES R, *et al.* Adaptive scene-based non-uniformity correction method for infrared-focal plane arrays [C]. *SPIE*, 2003, **5076**: 130-139.
- [9] WANG Ying-rui. Influence of non-uniformity of IRFPA responsibility on system sensitivity [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2006, **35**(3): 258-261.  
王英瑞.红外探测器响应非均匀性对系统灵敏度的影响[J].*红外与激光工程*, 2006, **35**(3): 258-261.
- [10] REN Huan-huan, RUAN Ping, HE Jian-wei, *et al.* Study of the radiation calibration of TDI-CCD spatial stereo camera [J]. *Acta Optica Sinica*, 2010, **30**(12): 3476-3481.  
任焕焕,阮萍,何建伟,等.TDI-CCD空间立体相机辐射定标研究[J].*光学学报*, 2010, **30**(12): 3476-3481.