

一种基于定标的非均匀性校正改进算法

王成龙^{1,2}, 王春阳^{1,3*}, 谷 健⁴, 赵新宇²

- (1. 长春理工大学, 吉林 长春 130022;
2. 中国科学院长春光学精密机械与物理研究所, 吉林 长春 130033;
3. 西安工业大学, 西北兵器工业研究院, 陕西 西安 710072;
4. 中国人民解放军 63768 部队, 陕西 西安 713800)

摘要: 红外辐射测量系统的成像性能以及测量精度受到焦平面阵列非均匀性的严重影响, 原始红外图像的非均匀性需通过后期图像处理算法进行校正。为进一步提高制冷型红外探测器的非均匀性校正(NUC)效果, 本文提出了一种基于定标的非均匀性改进算法。该算法以单点定标和两点定标非均匀性校正方法为基础, 既保留两点定标非均匀性校正方法增益校正系数的一致性优势, 又结合了单点定标偏置校正系数的稳定性, 使得改进算法具有更好的校正效果。为了验证该改进算法的校正效果, 本文以 640 pixel×512 pixel 大小的制冷型中波红外探测器为研究对象, 采用入瞳直径为 25 mm 的红外成像系统对提出的算法进行实验验证。实验结果表明: 在 1 ms 积分时间下, 单点定标方法、两点定标方法及改进算法校正后的图像非均匀性分别为 1.7833%、0.2190% 和 0.1481%; 2 ms 积分时间下的非均匀性分别为 1.8257%、2.2474% 和 1.6546%。改进算法整体上进一步降低了图像的非均匀性, 校正效果更好、精度更高。

关键词: 红外焦平面阵列; 红外探测器; 单点定标; 两点定标; 非均匀性校正

中图分类号: TN215 文献标志码: A doi: 10.37188/CO.2021-0231

An improved non-uniformity correction algorithm based on calibration

WANG Cheng-long^{1,2}, WANG Chun-yang^{1,3*}, GU Jian⁴, Zhao Xin-yu²

- (1. Changchun University of Science and Technology, Changchun 130022, China;
2. Changchun Institute of Optics, Fine Mechanics and Physics, Chinese Academy of Sciences, Changchun 130033, China;
3. Northwest Institutes of Advanced Technology, Xi'an Technological University, Xi'an 710072, China;
4. 63768 Unit of PLA, Xi'an 713800, China)

* Corresponding author, E-mail: chunyang.wang@136.com

Abstract: The imaging performance and measurement accuracy of infrared radiation measurement systems are seriously affected by the non-uniformity of the focal plane array. Therefore, the non-uniformity of the raw infrared image needs to be corrected by the image processing algorithm. In order to further improve the Non-Uniformity Correction (NUC) effect of cooled infrared detectors, an improved non-uniformity algorithm based on calibration is proposed in this paper. The algorithm is based on the single-point calibration and the

收稿日期: 2021-12-27; 修订日期: 2022-01-13

基金项目: 国防基础科研计划资助项目(No. JCKY-2016411C006)

Supported by National Defense Basic Scientific Research program of China (No. JCKY-2016411C006)

two-point calibration NUC methods, which not only retains the consistency advantage of the two-point calibration NUC method in gain correction coefficient, but also combines the stability of the single-point calibration in the offset correction coefficient. The improved algorithm has a better correction effect. In order to verify the correction effect of the improved algorithm, a cooled medium wave infrared detector with a size of 640 pixel $\times$ 512 pixel is taken as the research object, and an infrared imaging system with a pupil diameter of 25 mm is used to verify the performance of the proposed algorithm. The experimental results show that under the 1ms integral time, the single-point calibration method, the two-point calibration method and the improved algorithm correct the image's non-uniformity to 1.783 3%, 0.219 0% and 0.148 1%, respectively. And under the 2 ms integral time, they correct the image's non-uniformity to 1.825 7%, 2.247 4% and 1.654 6%, respectively. The improved algorithm further reduces the image's non-uniformity more effectively, so its correction effect is better and the accuracy is higher.

Key words: infrared focal plane array; infrared detector; single-point calibration; two-point calibration; non-uniformity correction

1 引言

焦平面阵列(Focal Plane Array, FPA)探测器,尤其是红外焦平面阵列(Infrared Focal Plane Array, IRFPA)探测器是红外成像系统的关键组件,广泛应用于军用和民用领域。FPA 的性能受固定模式噪声(Fix-Pattern Noise, FPN)的影响,导致其红外成像质量以及辐射测量精度严重降低^[1]。FPN 又称 FPA 的不均匀性,用于描述外界均匀辐射输入时,各单元之间响应输出的不一致性。受限于现有制造工艺缺陷,FPA 中每个独立的探测器元件间不可避免地存在不均匀性,导致相邻元件间具有不同的响应特性^[2]。非均匀性校正(NUC)是提高红外图像质量的重要技术,也是红外辐射测量系统计量和校准必不可少的环节^[3]。

红外成像系统的非均匀性主要来源于两个方面:(1)最主要的影响因素是 IRFPA 自身的非均匀性。受限于制造工艺,各像元光谱响应率、有效感应面积和半导体掺杂浓度等均存在差异,导致 FPA 器件具有固有的噪声^[4]。(2)其次是光学系统引起的非均匀性。包括镜头的加工和装调误差导致的成像非均匀性;渐晕效应产生的非均匀性;冷反射以及沿光路放置的透镜和机械组件的自发辐射导致的空间非均匀性等等^[5-6]。后者对环境温度的变化比较敏感,需要定期进行 NUC^[7]。

NUC 图像处理技术一般包括 3 个关键步

骤^[8]:(1)建模:首先建立非均匀性模型。(2)参数估计:根据非均匀性模型,估计校正参数。(3)输出校正:根据校正参数对输出信号进行校正。

FPA 非均匀性问题与探测器制造工艺、材料、电子学架构、光学系统架构等均相关,因此想要从硬件方面着手解决非均匀性问题十分困难。而使用图像处理算法进行 NUC,能够快速有效地达到想要的效果,而且消耗的成本也比较低,实际应用意义很大。传统的 NUC 技术主要分为两类,即基于定标的非均匀性校正(CBNUC)算法和基于场景的非均匀性校正(SBNUC)算法^[8-9]。定标法是一种将黑体辐射源作为参考源进行预先标定的 NUC 算法。由于其计算复杂度低,容易在硬件系统中实现,所以在工程系统中使用最多。但是这种方法校正过的非均匀性会随着时间产生漂移,导致校正参数精度下降,需要定期更新校正参数^[9]。与基于定标的 NUC 方法相比,基于场景的校正算法省略了参考辐射源,简化了系统处理流程,而且可以有效解决校正参数的漂移问题,提高了系统稳定性。但是此类方法计算量大、校正精度低且易出现“鬼影”,对红外系统的辐射测量精度影响很大^[10]。

对于高性能的红外探测成像系统,其采用的制冷型探测器在某一温度范围下的输出响应是线性的,适合采用基于定标的 NUC 方法,其中最常见的是单点定标校正和两点定标校正法^[11-12]。本文在这两种方法基础之上,提出了一种基于定标的 NUC 改进算法。

2 辐射定标模型及单点、两点定标 NUC 原理

2.1 红外系统的辐射定标

单点定标与两点定标 NUC 方法都是线性校正算法,假设探测器的响应输出与入射的红外辐射量呈线性关系。为了建立红外成像系统输入辐射量与输出灰度值之间的关系,红外系统在工作前需要进行辐射定标。由于近距离扩展源定标方法能够减少大气衰减以及大气程辐射对定标结果的影响^[13],广泛被应用于红外系统的定标工作,其原理如图 1 所示。

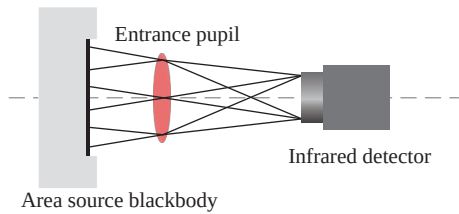


图 1 面源黑体近距离辐射定标的能量传输

Fig. 1 Energy transfer of near-range radiometric calibration of the area source blackbody

在红外探测器的线性响应范围内,当前积分时间下黑体辐射亮度与系统输出灰度值的关系为^[14]:

$$G_{i,j}(T) = R_{i,j} \cdot L(T) + I_{i,j}^{\text{out}} + I_{i,j}^{\text{in}}, \quad (1)$$

式中: $G_{i,j}(T)$ 是焦平面阵列中 (i,j) 处像元输出的灰度值, $R_{i,j}$ 是每个像元对辐射亮度的响应率, T 是面源黑体的温度, $L(T)$ 是黑体的辐射亮度, $I_{i,j}^{\text{out}}$ 是红外系统杂散辐射等引起的灰度输出, $I_{i,j}^{\text{in}}$ 是探测器暗电流等自身因素导致的灰度输出。

2.2 单点定标 NUC 原理

单点校正法是最早的 NUC 算法。在温度为 T_0 的定标点, 求出单点校正的偏置系数 $B_{i,j}(T_0)$:

$$\begin{cases} \overline{G_{i,j}(T_0)} = \frac{\sum_{i=1}^M \sum_{j=1}^N G_{i,j}(T_0)}{M \times N} \\ B_{i,j}(T_0) = \overline{G_{i,j}(T_0)} - G_{i,j}(T_0) \end{cases}, \quad (2)$$

其中 $M \times N$ 为红外焦平面阵列像元总数, $G_{i,j}(T_0)$ 是面源黑体温度为 T_0 时每个像元的响应灰度值, $\overline{G_{i,j}(T_0)}$ 为所有像元在 T_0 温度下响应灰度的平均值。

由此得到单点校正表达式:

$$G_{i,j}^c(T) = G_{i,j}(T) + B_{i,j}(T_0). \quad (3)$$

由公式 (3) 可知, 单点定标 NUC 方法将红外系统的非均匀性简化成固定的加性背景噪声, 通常只对图像的偏置不均匀进行校正。

2.3 两点定标 NUC 原理

目前大部分红外系统工程应用的均为基于两点定标的 NUC 方法。其原理如图 2 所示, 其中, a, b, c 为校正前各像元的响应, 经过两点定标 NUC, 统一校正为 a', b', c' 。

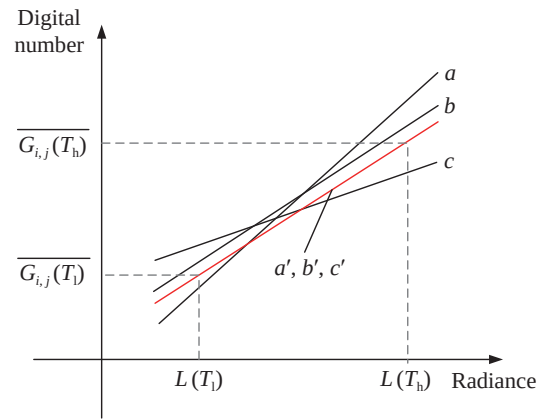


图 2 两点定标非均匀性校正原理

Fig. 2 Principle of two-point calibration NUC

在某一积分时间下, 黑体温度分别设置为低温 T_1 和高温 T_h , 根据定标公式 (1) 得到:

$$\begin{cases} G_{i,j}(T_1) = R_{i,j} \cdot L(T_1) + I_{i,j}^{\text{out}} + I_{i,j}^{\text{in}} \\ G_{i,j}(T_h) = R_{i,j} \cdot L(T_h) + I_{i,j}^{\text{out}} + I_{i,j}^{\text{in}} \end{cases}, \quad (4)$$

两点定标点图像的像元响应平均灰度值由公式 (5) 给出:

$$\begin{cases} \overline{G_{i,j}(T_1)} = \frac{\sum_{i=1}^M \sum_{j=1}^N G_{i,j}(T_1)}{M \times N} \\ \overline{G_{i,j}(T_h)} = \frac{\sum_{i=1}^M \sum_{j=1}^N G_{i,j}(T_h)}{M \times N} \end{cases}. \quad (5)$$

设校正后的增益系数为 $K_{i,j}$, 偏置系数为 $B_{i,j}$, 根据两点定标原理, 得到:

$$\begin{cases} \overline{G_{i,j}(T_1)} = K_{i,j} \cdot G_{i,j}(T_1) + B_{i,j} \\ \overline{G_{i,j}(T_h)} = K_{i,j} \cdot G_{i,j}(T_h) + B_{i,j} \end{cases}. \quad (6)$$

由公式 (6) 可以推导出增益系数 $K_{i,j}$ 和偏置系

数 $B_{i,j}$ 的表达式:

$$\begin{cases} K_{i,j} = \frac{\overline{G_{i,j}(T_h)} - \overline{G_{i,j}(T_l)}}{\overline{G_{i,j}(T_h)} - \overline{G_{i,j}(T_l)}} \\ B_{i,j} = \frac{\overline{G_{i,j}(T_l)} \cdot \overline{G_{i,j}(T_h)} - \overline{G_{i,j}(T_h)} \cdot \overline{G_{i,j}(T_l)}}{\overline{G_{i,j}(T_h)} - \overline{G_{i,j}(T_l)}} \end{cases} \quad (7)$$

根据公式(7)得到的校正系数对同一积分时间下温度为 T 的输出图像进行校正,得到:

$$G_{i,j}^c(T) = K_{i,j} \cdot G_{i,j}(T) + B_{i,j} = \bar{R} \cdot L(T) + \bar{I}^{\text{out}} + \bar{I}^{\text{in}} \quad (8)$$

其中, $\bar{R}$ 是探测器所有像元在相应温度下的平均辐射亮度响应率, $\bar{I}^{\text{out}}$ 是系统杂散辐射等外部因素引入的平均灰度值, $\bar{I}^{\text{in}}$ 是探测器自身因素产生的平均灰度值。

基于两点定标校正算法的原理,如果探测器响应为线性并且没有漂移,任意一点的响应都可

以通过该方法校正得到探测器像元在 $L(T)$ 处的响应均值,则剩余非均匀性 ΔNU 为:

$$\Delta NU = G_{i,j}^c(T) - \overline{G_{i,j}(T)} = 0 \quad (9)$$

即该方法对线性响应的 IRFPA 的校正没有剩余非均匀性。这是基于两点定标的校正方法的物理依据^[15]。

2.4 传统三点定标 NUC 原理

对于线性度不好的焦平面探测器采用多点定标校正算法^[16]。以三点校正算法为例,分别取黑体的3个不同定标温度点,得到输出灰度:

$$\begin{cases} G_{i,j}(T_l) = R_{i,j} \cdot L(T_l) + I_{i,j}^{\text{out}} + I_{i,j}^{\text{in}} \\ G_{i,j}(T_m) = R_{i,j} \cdot L(T_m) + I_{i,j}^{\text{out}} + I_{i,j}^{\text{in}} \\ G_{i,j}(T_h) = R_{i,j} \cdot L(T_h) + I_{i,j}^{\text{out}} + I_{i,j}^{\text{in}} \end{cases} \quad (10)$$

进行两次两点定标校正后,取校正系数的平均值:

$$\begin{cases} K_{i,j} = \frac{\left[\frac{\overline{G_{i,j}(T_h)} - \overline{G_{i,j}(T_m)}}{\overline{G_{i,j}(T_h)} - \overline{G_{i,j}(T_m)}} + \frac{\overline{G_{i,j}(T_m)} - \overline{G_{i,j}(T_l)}}{\overline{G_{i,j}(T_m)} - \overline{G_{i,j}(T_l)}} \right]}{2} \\ B_{i,j} = \frac{\left[\frac{\overline{G_{i,j}(T_m)} \cdot \overline{G_{i,j}(T_h)} - \overline{G_{i,j}(T_h)} \cdot \overline{G_{i,j}(T_m)}}{\overline{G_{i,j}(T_h)} - \overline{G_{i,j}(T_m)}} + \frac{\overline{G_{i,j}(T_l)} \cdot \overline{G_{i,j}(T_m)} - \overline{G_{i,j}(T_m)} \cdot \overline{G_{i,j}(T_l)}}{\overline{G_{i,j}(T_m)} - \overline{G_{i,j}(T_l)}} \right]}{2} \end{cases} \quad (11)$$

可以看出,随着定标点的增加,算法也越来越繁琐,因此在探测器线性度较强的情况下,一般不采取多点定标非均匀性校正。

图3给出探测器在30℃~80℃黑体温度范围内1ms积分时间的定标拟合曲线,本实验中用到的探测器在此温度范围内线性度较强,故不必采用算法复杂的三点或多点定标方法校正。

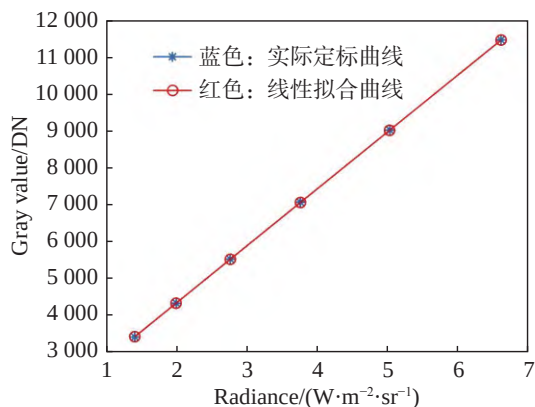


图3 探测器定标拟合曲线

Fig. 3 The calibration fitting curve of the detector

3 NUC 改进算法及非均匀性计算

3.1 基于定标的 NUC 改进算法

在上一节中,介绍了基于定标的 NUC 方法。以此为基础进行改进,保留两点定标 NUC 方法中得到的校正增益系数 $K_{i,j}$,再通过采集第3个温度点 $T_m(T_l < T_m < T_h)$ 的输出图像确定校正偏置系数 $B'_{i,j}$ 。因此,改进算法既保留了两点定标非均匀性校正方法在增益校正系数的一致性优势,又具有单点定标偏置校正系数的稳定性。

得到最终的校正结果为:

$$\begin{cases} K_{i,j} = \frac{\overline{G_{i,j}(T_h)} - \overline{G_{i,j}(T_l)}}{\overline{G_{i,j}(T_h)} - \overline{G_{i,j}(T_l)}} \\ B'_{i,j} = \overline{G_{i,j}(T_m)} - K_{i,j} \cdot \overline{G_{i,j}(T_m)} \end{cases} \quad (12)$$

其中, $G_{i,j}(T_m)$ 是面源黑体温度为 T_m 时每个像元的响应灰度值, $\overline{G_{i,j}(T_m)}$ 表示所有像元在 T_m 温度下响

应灰度的平均值。

3.2 本文方法中非均匀性的计算

如图 4 所示,对于红外成像探测系统,原始图像的非均匀性一般表现为在相同的辐射输入情况下,像元响应不一致,导致场景成像均匀性较差,会出现条纹,影响成像质量。

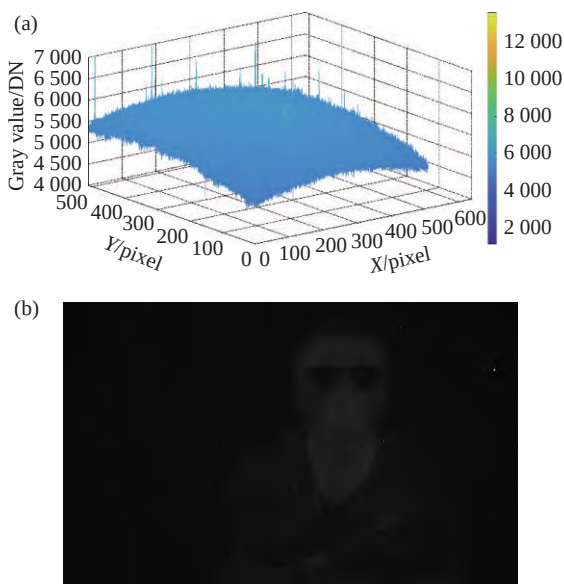


图 4 (a)均匀辐射输入时,探测器的原始输出信号;(b)存在条纹的未校正的场景成像图

Fig. 4 (a) The raw output signal of the detector at uniform radiation input; (b) an uncorrected scene image with stripes

对于均匀背景图像,红外焦平面阵列的非均匀性和 NUC 结果,通常通过定量计算图像中固定模式噪声来评估。一般用 NU 来表示非均匀性大小, NU 值越小说明图像非均匀性越低,算法的校正效果越好。 NU 定义如下^[17-18]:

$$\left\{ \begin{aligned} NU &= \frac{1}{\bar{G}} \cdot \sqrt{\frac{1}{M \times N - d} \cdot \sum_{i=1}^M \sum_{j=1}^N (G_{i,j} - \bar{G})^2} \times 100\% \\ \bar{G} &= \frac{1}{M \times N - d} \cdot \sum_{i=1}^M \sum_{j=1}^N G_{i,j} \end{aligned} \right. \quad (13)$$

其中, $\bar{G}$ 是所有像元响应灰度的平均值, $G_{i,j}$ 是阵列中 (i,j) 处像元的响应灰度, d 是损坏的像元的数量, $M \times N$ 是焦平面阵列中的像元总数。

公式(11)计算得到探测器的总体响应的非均匀性,用来表征非均匀性校正方法的整体性能; $NU_{i,j}$ 代表每个像元响应的非均匀性情况,计算方

式如下:

$$NU_{i,j} = \frac{G_{i,j} - \bar{G}}{\bar{G}} \times 100\% \quad (14)$$

4 非均匀性校正实验

4.1 实验图像采集

针对本文提出的改进 NUC 算法,搭建了入瞳直径为 25 mm,焦距为 50 mm 的中波红外成像系统进行实验验证。实验使用的是 FLIR 制冷型中波红外相机和 CI 公司的 SR-800 型高精度面源黑体。两者的具体参数在表 1 和表 2 列出。

表 1 制冷型红外相机参数

Tab. 1 Parameters of cooled infrared camera

Parameters	Requirement
Materials	HgCdTe
Spectral range	3.7 μm ~4.8 μm
Aperture	f/2
Pixel size	15 μm ×15 μm
Pixel depth	14
Resolution	640(H)×512(V)
Operating temperature	-40 $^{\circ}\text{C}$ ~+60 $^{\circ}\text{C}$

表 2 面源黑体参数

Tab. 2 Parameters of area source blackbody

Parameters	Requirement
Blackbody emitter size	100 mm×100 mm
Temp. range	0 $^{\circ}\text{C}$ ~125 $^{\circ}\text{C}$
Set point resolution	0.001 $^{\circ}\text{C}$
Emissivity	0.98±0.02
Operating temp. head	-20 $^{\circ}\text{C}$ ~70 $^{\circ}\text{C}$
Operating temp. controller	0 $^{\circ}\text{C}$ ~50 $^{\circ}\text{C}$

采集原始图像过程,如图 5 所示,将黑体放在红外系统前面,覆盖系统入瞳,关闭红外相机自动增益和偏置调节,在 2 个积分时间下,将黑体温度从 30 $^{\circ}\text{C}$ 升至 80 $^{\circ}\text{C}$,每隔 10 $^{\circ}\text{C}$ 采集一幅定标图像。

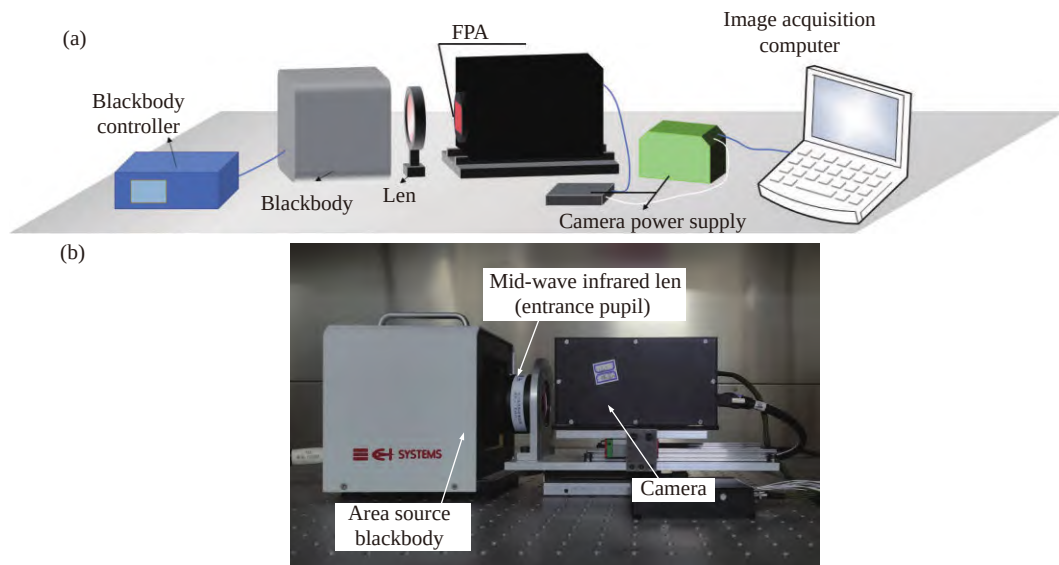


图5 (a)图像采集系统示意图;(b) 图像采集装置图

Fig. 5 (a) Schematic diagram of image acquisition system; (b) image acquisition device

4.2 NUC 结果

选取 40°C 下的原始图像采用单点定标 NUC 方法进行校正; 选取定标中的 30°C 和 80°C 两幅原始图像采用两点定标方法计算 NUC 校正系数; 选取定标中的 30°C 和 80°C 两幅原始图像采用本文提出的改进算法来计算增益校正系数, 再选取 40°C 下的原始图像计算偏置校正系数。中间温度点的选取尽量接近实验时的环境温度, 以获得更好的 NUC 效果。其余温度点的原始图像用来验证几种方法的 NUC 效果。

对于探测器上的坏像素(10 个左右), 计算

了坏点补偿前后(以 1 ms 积分时间下各温度点为例)的平均灰度值误差为 0.27% 左右, 其对非均匀性校正的影响可以忽略, 因此在本实验后续的校正中, 为了简化算法, 未进行探测器坏点补偿。

表 3 中分别给出了两个积分时间、不同温度下原始图像、单点定标 NUC、两点定标 NUC 以及改进算法校正后图像的非均匀性(不考虑校正选取的 30°C 、 40°C 、 80°C 定标点图像, 这 3 个定标点图像计算的 $NU=0$)。校正前, 在两个积分时间下图像的平均非均匀性分别为 3.9374% 、 3.9565% , 单点定标 NUC 校正的平均非均匀性分别为 1.7833% 、 1.8257% ; 两点定

表 3 NUC 实验结果

Tab. 3 Results of NUC experiment

Integral time/ms	Blackbody temperature/ $^{\circ}\text{C}$	Non-uniformity/%			
		Uncorrected	Single-point NUC	Two-point NUC	Improved NUC
1	50	3.8453	1.0403	0.2437	0.1451
	60	3.9253	1.8394	0.2427	0.1695
	70	4.0417	2.4703	0.1704	0.1297
	Average	3.9374	1.7833	0.2190	0.1481
2	50	3.8274	1.0697	1.7184	0.9707
	60	3.9642	1.8963	2.3016	1.7212
	70	4.0780	2.5112	2.7223	2.2718
	Average	3.9565	1.8257	2.2474	1.6546

标 NUC 校正的平均非均匀性分别为 0.2190%、2.2474%，改进算法校正后的平均非均匀性分别为 0.1481%、1.6546%。从以上数据可以看出，积分时间为 2 ms 时，两点定标和改进算法 NU 值变化较大，这是因为随着积分时间的增加，80 °C 原始图像的输出灰度值趋于饱和，偏离了探测器的线性响应范围，因此对 NUC 的校正效果有所影响。但是即便如此，改进算法的非均匀性校正效果仍要好于单点定标和两点定标法，这是因为其保留了两点定标方法增益校正系数的一致性优势，又结合了单点定标偏置校正系数的稳定性，在校正条件变化时，也有较强的适应性。

图 6 给出各方法的非均匀性数值曲线。从曲线趋势可以看出，基于定标的 NUC 改进算法整体非均匀性更小，校正效果更加理想。根据公式(12)可以计算每个像元的非均匀性，图 7 给出了积分时间为 2 ms，黑体温度为 60 °C 时，原始图像以及 3 种方法校正后所有像元的非均匀性曲线，可见相比前两种 NUC 方法，改进算

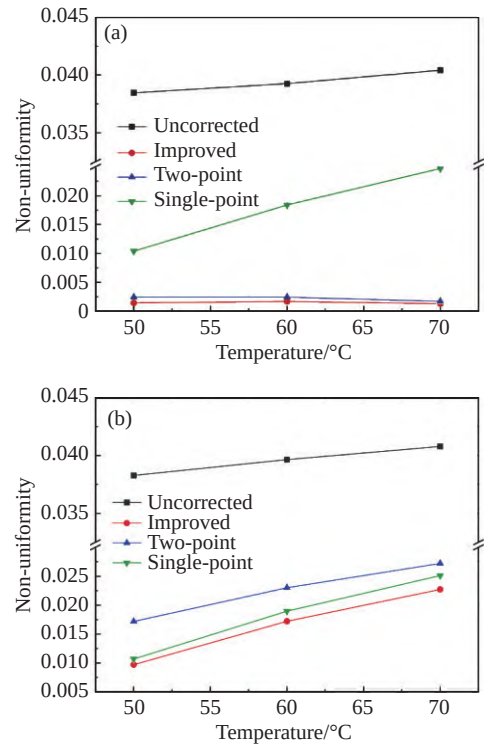


图 6 积分时间为(a)1 ms 和(b)2 ms 的非均匀性校正结果
Fig. 6 Results of NUC for different integral times. (a) 1ms; (b) 2 ms

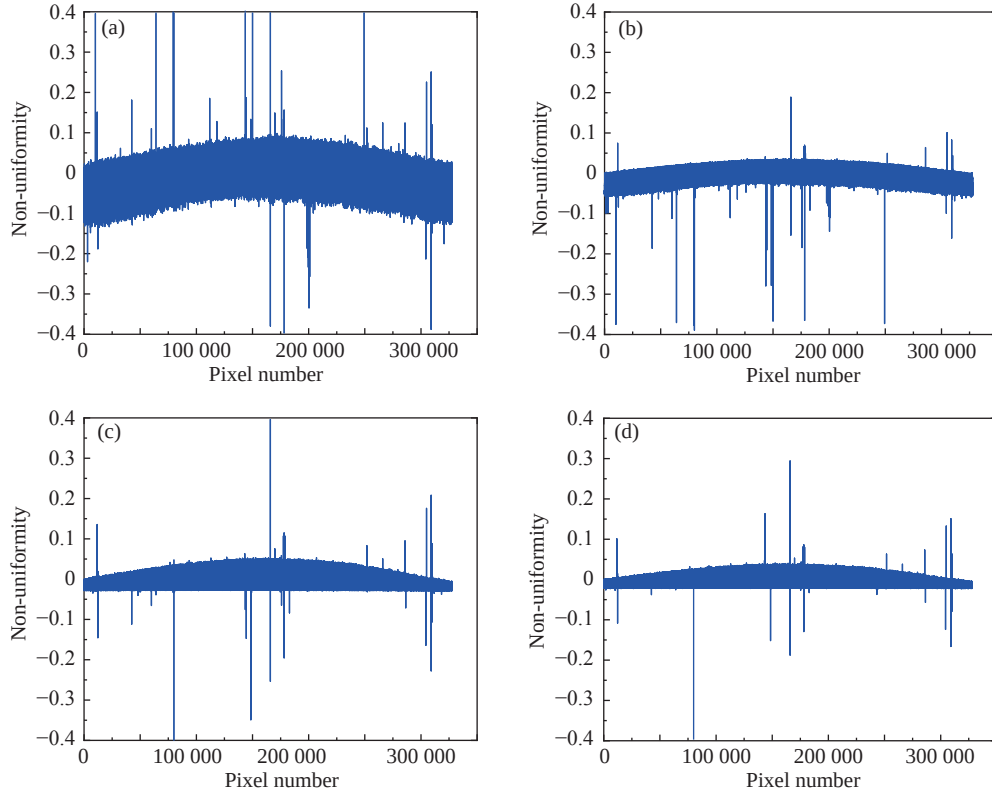


图 7 (a)未校正像元的非均匀性; (b)单点定标 NUC 像元的非均匀性; (c)两点定标 NUC 像元的非均匀性; (d)改进的 NUC 像元的非均匀性

Fig. 7 (a) NU of uncorrected pixels; (b) NU of pixels with single-point calibration NUC; (c) NU of pixels with two-point calibration NUC; (d) NU of pixels with improved NUC

法进一步降低了焦平面阵列中像元的非均匀性, 并且曲线中尖峰变少变小, 数值波动相对更小, 说明改进算法 NUC 精度更高, 适应性更强,

稳定性更好。

图 8 是系统在不同积分时间下获取的场景原始图像及通过改进方法校正后的图像。可



图 8 NUC 改进算法校正前后的场景成像图

Fig. 8 Scene images before and after being corrected by improved NUC algorithm

以看出原始图像存在严重的非均匀现象(条纹), 通过 NUC 改进算法校正后, 条纹被消除, 非均匀性明显降低, 大大提高了成像质量。图 9 给出了改进算法校正前后焦平面阵列信号输出图, 经过校正后, 焦平面的灰度分布图中尖峰减少, 趋于平面, 像元响应灰度值更加均匀, 进一步说明了改进方法对探测器非均匀性校正的有效性。

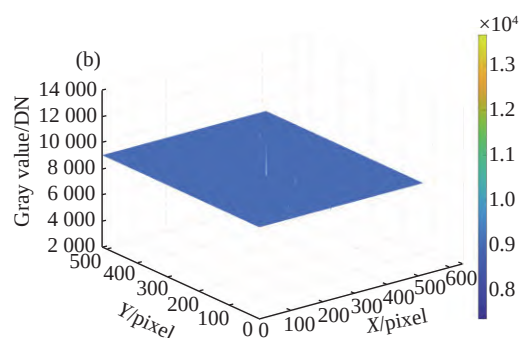
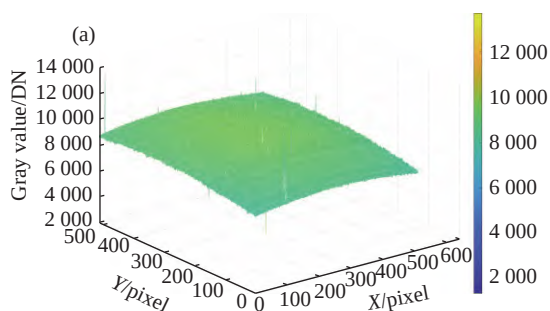


图 9 (a)焦平面阵列的原始输出信号;(b)NUC 改进算法校正后焦平面阵列的输出信号

Fig. 9 (a) Raw output signal of FPA; (b) output signal of FPA after the correction by improved NUC algorithm

5 结 论

本文首先介绍了红外系统的辐射定标模

型、单点定标以及两点定标 NUC 方法的原理。然后,基于定标的 NUC 方法,提出了一种改进算法。结合两点定标 NUC 及单点定标 NUC 的优势,利用 3 幅定标图像来计算校正系数。利用具有制冷型探测器的红外相机进行 NUC 实验。通过实验进行对比分析,两个积分时间下,改进算法校正后 FPA 的平均非均匀性比单点及两点定标 NUC 方法的效果都要好,相比两点定标 NUC 方法,平均非均匀性分别降低

了 32.37%、26.38% 左右,精度更高,而且更加稳定。最后对原始场景图像进行了校正,证明了改进方法的有效性。值得一提的是,改进算法并没有增加计算的复杂程度,但是校正效果有很大提高,具有更强的适应性。但是实际上探测器响应曲线并不是完全线性的,而是随环境温度的改变而实时变化,故本文提出的方法依然有其局限性,即存在校正偏差,接下来需要进行更加完善的算法研究以及实验论证。

参考文献:

- [1] A. F. Milton, F. R. Barone, M. R. Kruer. Influence of nonuniformity on infrared focal plane array performance[J]. *Optical Engineering*, 1985, 24(5): 855-862.
- [2] M. Schulz, L. Caldwell. Nonuniformity correction and correctability of infrared focal plane arrays[J]. *Infrared Physics & Technology*, 1994, 36: 763-777.
- [3] CAO Y P, Christel-L T. Shutterless solution for simultaneous focal plane array temperature estimation and nonuniformity correction in uncooled long-wave infrared camera[J]. *Applied Optics*, 2013, 52(25): 6266-6271.
- [4] Clay S, Doug M, Ron D. Analysis and implications of resistive emitter array non-uniformity correction (NUC) between sensors with different spectral bands[C]. *Technologies for Synthetic Environments: Hardware-in-the-Loop Testing III*, SPIE (3368), 1998.138-156.
- [5] Joe LV, Greg F, Kevin S, et al. LWIR NUC Using an Uncooled Microbolometer Camera[C]. *Technologies for Synthetic Environments: Hardware-in-the-Loop Testing XV* SPIE(7663), 2010.766306.
- [6] CAO Y P, Christel-L T. Solid-state temperature-dependent NUC (Non-Uniformity Correction) in uncooled LWIR (Long-Wave Infra-Red) Imaging System[C]. *Infrared Technology and Applications XXXIX*, SPIE (8704), 2013.87042W.
- [7] SHENG Y C, DUN X, QIU S, et al.. On-orbit non-uniformity correction method for infrared remote sensing systems using controllable internal calibration sources[J]. *J. Infrared Millim. Waves*, 2021, 40(5): 655-663.
- [8] 张明杰, 李岩, 马文坡, 等. 盛一成, 顿雄, 裘溯, 等. 基于可控内定标源的星上红外遥感相机非均匀性校正方法[J]. *红外技术*, 2021, 43(4): 324-333.
ZHANG M J, LI Y, MA W P, LIU Z Y. Non-uniformity Correction for Large Format Array Infrared Detectors Based on Regional Correction[J]. *Infrared Technology*, 2021, 43(4): 324-333. (in Chinese)
- [9] 赵振男, 宋鸿飞, 任宏凯. 一种改进的基于场景的非均匀性校正方法[J]. *长春理工大学学报(自然科学版)*, 2020, 43(2): 53-57.
ZHAO ZH N, SONG H F, REN H K. An Improved Scene-based Non-uniformity Correction Method[J]. *Journal of Changchun University of Science and Technology(Natural Science Edition)*, 2020, 43(2): 53-57. (in Chinese)
- [10] LIU CH W, SUI X B. Improved calibration-based non-uniformity correction method for uncooled infrared camera[C]. *Infrared Sensors, Devices, and Applications VII*, SPIE(10404), 2017.104040X.
- [11] 余毅, 常松涛, 王旻, 等. 宽动态范围红外测量系统的快速非均匀性校正[J]. *光学精密工程*, 2015, 23(7): 1932-1938.
YU Y, CHANG S T, WANG M, et al.. Fast non-uniformity correction for high dynamic infrared radiometric system[J]. *Optics and Precision Engineering*, 2015, 23(7): 1932-1938. (in Chinese)
- [12] 关同辉, 张同贺. 一种新型实时两点非均匀性校正方法[J]. *航空兵器*, 2021, 28(4): 112-117.
Gun T H, Zhang T H. A New Real-time two-Point Nonuniformity Correction method[J]. *AERO WEAPONRY*, 2021, 28(4): 112-117. (in Chinese)
- [13] 王跃明, 陈建新, 刘银年, 等. 红外焦平面器件二点多段非均匀性校正算法研究[J]. *红外与毫米波学报*, 2003, 22(6): 415-418.
WANG Y M CHEN J X, LIU Y N, et al.. Study on two-point multi-section IRFPA non-uniformity correction algorithm[J]. *Infrared Millim. Waves*, 2003, 22(6): 415-418. (in Chinese)

- [14] 孙志远, 常松涛, 朱玮. 大口径、宽动态范围红外测量系统辐射定标方法[J]. 光学学报, 2014, 53(27): 6274-6279.
SUN Z Y, CHANG S T, ZHU W. Radiation calibration method for infrared system with large aperture and broad dynamic range[J]. *Acta Optica Sinica*, 2014, 53(27): 6274-6279. (in Chinese)
- [15] CHANG S T, ZHANG Y Y, SUN Z Y, *et al.*. Method to remove the effect of ambient temperature on radiometric calibration[J]. *Applied optics*, 2014, 53(27): 6274-6279.
- [16] 黄宇, 张宝辉, 吴杰, 等. 自适应多点定标非均匀性校正算法[J]. 红外技术, 2020, 42(7): 637-643.
HUANG Y, ZHANG B H, WU J, *et al.*. Adaptive Multipoint Calibration Non-uniformity Correction Algorithm[J]. *Infrared Technology*, 2020, 42(7): 637-643. (in Chinese)
- [17] 刘会通, 易新建. 红外焦平面阵列非均匀性的两点校正及依据[J]. 红外与激光工程, 2004, 33(1): 76-78.
LIU H T, YI X J. Two-point nonuniformity correction for IRFPA and its physical motivation[J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2004, 33(1): 76-78. (in Chinese)
- [18] 中国科学院上海技术物理研究所, GB/T 17444-1998 红外焦平面阵列特性参数测试技术规范[S], 中国质检出版社, 北京, 1988.
Shanghai Institute of Technical Physics of Chinese Academy of Sciences, GB/T 17444-1998 The technical norms of measurement and test of characteristic parameters of infrared focal plane arrays [S], China Zhijian Publishing House, Beijing, 1988. (in Chinese)

作者简介:



王成龙(1981—),男,辽宁沈阳人,硕士,副研究员,2005年于中国科技大学获得学士学位,现为中国科学院长春光学精密机械与物理研究所副研究员,主要从事靶场光学测量方面的研究。E-mail: 13944934139@139.com



王春阳(1964—),女,吉林长春人,工学博士,教授,博士生导师,副院长。现任中国自动化学会高级会员,吉林省自动化学会理事,中国光学学会会员,第三届中国机械工业教育协会自动化学科教学委员会委员,长春博士联合会第三届理事,教育部高等学校电子信息类专业教学指导委员会协作委员。主要研究方向为复杂运动系统高精稳定控制、光电精密检测与信息处理技术等。E-mail: chunyang.wang@136.com



谷健(1989—),男,山西朔州人,2010年于哈尔滨工业大学获工学硕士学位,工程师,现就任中国人民解放军63768部队,主要研究方向光学设计及激光制导技术,大型望远镜技术总体等。E-mail: gujianhgd@163.com