

文章编号 2097-1842(2024)06-1359-09

红外辐射测量系统的快速宽动态 非均匀性校正算法

李 周¹, 张尧禹^{1*}, 周 慧², 孔祥龙³, 赵新宇¹, 李祥琛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. 中国人民解放军 92941 部队, 辽宁 葫芦岛 125000;

3. 中国卫星海上测控部, 江苏 江阴 214431)

摘要: 本文针对红外辐射测量系统需要积分时间连续变化的需求, 提出一种快速宽动态的非均匀性校正算法。该算法考虑了积分时间效应和光学系统杂散辐射的影响, 并利用 25 mm 口径的制冷型中波红外辐射特性测量系统进行试验验证。将本文所提算法与经典算法进行对比, 结果表明, 校正效率较传统非均匀性校正算法提高了 3.4 倍。本文还利用剩余残差评价原始图像以及两种算法的图像校正效果, 利用多个积分时间(0.6 ms, 3 ms 和 3.5 ms)模拟连续变化的积分。结果显示本文算法在各个积分时间下剩余残差均表现稳定且校正图像都具有良好的校正效果。

关键词: 红外成像; 焦平面阵列; 辐射定标; 辐射测量

中图分类号: TN222

文献标志码: A

doi: 10.37188/CO.2023-0076

CSTR: 32171.14.CO.2023-0076

Rapid wide dynamic non-uniformity correction algorithm for infrared radiation measurement system

LI Zhou¹, ZHANG Yao-yu^{1*}, ZHOU Hui², KONG Xiang-long³, ZHAO Xin-yu¹, LI Xiang-chen¹

(1. Changchun Institute of Optics, Fine Mechanics and Physics, Chinese Academy of Sciences,
Changchun 130033, China;

2. Unit 44, No.92941 Troops of PLA, Huludao 125000, China;

3. Technology Department, Satellite Maritime Measurement and Control Department of China,
Jiangyin 214431, China)

* Corresponding author, E-mail: 13604336836yaoyu@sina.com

Abstract: In this paper, a rapid and wide dynamic non-uniformity correction algorithm is proposed for the requirement of continuous change of integration time in infrared radiation measurement system. The algorithm considers the impact of integration time effect and stray radiation of the optical system. The experimental verification was conducted by employing cooled mid-wave infrared radiation characteristic measurement system with a 25 mm aperture. The correction efficiency of the classical algorithm and the proposed algorithm are compared. The results indicate that the proposed algorithm is 3.4 times more efficient than the traditional

收稿日期: 2023-05-04; 修订日期: 2023-05-26

基金项目: 国家自然科学基金(No. 62105330)

Supported by National Natural Science Foundation of China (No. 62105330)

non-uniformity correction algorithm. On the above basis, we evaluate the effect of the two algorithms on the image correction using residual non-uniformity. Multiple integration times (0.6 ms, 3 ms and 3.5 ms) are used to simulate the continuous change of integration. The results indicate that the residual non-uniformity of the proposed algorithm is consistent and the image has been effectively corrected.

Key words: infrared imaging; focal plane array; radiation calibration; radiation measurement

1 引言

图像的非均匀性是红外焦平面阵列(IRFPA)的重要特征之一。红外图像的非均匀性包括红外焦平面的非均匀性和光电系统的非均匀性。红外焦平面非均匀性主要受材料和工艺水平的限制,而光电系统非均匀性主要受内、外杂散光的影响。结果导致相同的亮度输入造成实际输出的数字响应并不相同,严重影响图像质量和系统的跟踪识别性能^[1]。在过去的几十年中,学者们提出了大量的非均匀性校正算法(NUC),比如:基于定标的非均匀性校正算法(BBNUC)和基于场景的非均匀性校正算法(CBNUC)。目前,工程中主要还是以基于定标的非均匀性算法为主,该类算法具有算法简单,计算量小,适合于硬件实现等优点^[2]。考虑积分时间的非均匀性算法的研究在国内外已经开展很多年,天津津航技术物理研究所霍晓江等通过分析基于黑体定标方法和基于积分时间定标方法的优缺点,提出一种实用化的基于积分时间定标校正的方法^[3]。上海技术物理研究所冷寒冰等对基于积分时间调整的校正算法展开研究,提出了一种新的自适应非均匀校正算法^[4]。第二炮兵工程大学陈世伟等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^[5-8]。

目前普遍认为非均匀性校正系数需适应积分时间的变化,却没有明确给出校正参数与积分时间的关系,实际上现在适应积分时间的非均匀性校正,通常在系统所用的积分时间内做积分时间的拟合函数,不适用于在跟踪过程中积分时间连续可调的系统,因此不适用于红外测量系统^[6]。因此,本文基于定标非均匀性算法,由光学系统的杂散辐射推导得到含有积分时间非均匀性校正系数,提出一种针对红外辐射特性测量系统的快速宽动态非均匀性校正算法。该算法本身考虑杂散

辐射的积分时间效应,实时性好,且适用宽动态范围红外辐射测量系统,能满足靶场红外光电测量系统的连续变化积分时间的非均匀性校正需要^[7-8]。

2 考虑积分时间的快速非均匀性校正算法

红外焦平面在其线性区域一般认为是线性响应模型,即系统的输出信号与系统的输入信号满足线性关系,其数学表达为^[9-10]:

$$N_{ij}(T_{bb}) = R_{ij}L(T_{bb}) + D_{ij} \quad (1)$$

其中, $N_{ij}(T_{bb})$ 为系统采用的焦平面探测器在 (i, j) 像素位置的输出信息,如电压或者数字灰度, R_{ij} 为红外测量系统的响应率, D_{ij} 为系统的响应偏置。 $L(T_{bb})$ 为系统在黑体温度 T_{bb} 时的辐射亮度,其数值可以通过普朗克定律计算得到。

由于线性模型在不同积分时间的响应不同,假设在不同时间 t_1, t_2, t_3, t_4 时,交于 y 轴的 D_1, D_2, D_3, D_4 , 其与 y 轴的交点代表采集的自身噪声灰度。不同的积分时间有不同响应率 R_1, R_2, R_3, R_4 , 不同积分时间下的系统定标结果如图 1 所示。

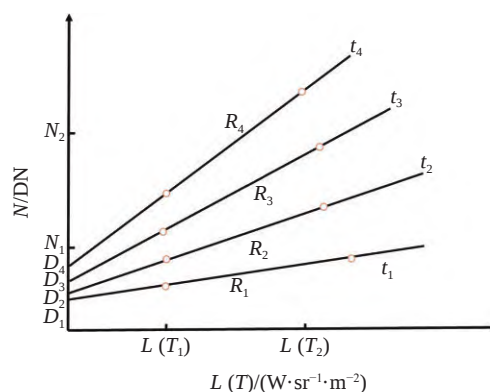


图 1 制冷型红外测量焦平面像素响应模型

Fig. 1 Response model for a cooled infrared pixel

红外焦平面的每个像素均受乘性噪声和加性噪声影响。为了更直观地表述其影响,引入两个

噪声扰动量 Δr_{ij} 和 Δd_{ij} , 则系统响应率和响应偏置可以表述为:

$$\begin{cases} R_{ij} = \bar{R} + \Delta r_{ij} \\ D_{ij} = \bar{D} + \Delta d_{ij} \end{cases}, \quad (2)$$

其中, $\bar{R}$ 和 $\bar{D}$ 分别为焦平面阵列整个靶面的响应率和响应偏置, Δr_{ij} 和 Δd_{ij} 分别代表响应率的扰动量和偏置的扰动量, 这样系统的响应系数都可以分成不变量和扰动量两部分。系统非均匀性校正就是实现扰动量的校正, 可以表达为:

$$\begin{cases} \overline{N(T_1)} = k_{ij}N_{ij}(T_1) + b_{ij} \\ \overline{N(T_2)} = k_{ij}N_{ij}(T_2) + b_{ij} \end{cases}, \quad (3)$$

其中, $\overline{N(T)} = \bar{R}L(T) + \bar{D}$, T 代表温度 T_1 和 T_2 , 根据式(3)可得:

$$\begin{cases} k_{ij} = \frac{\bar{R}}{R_{ij}} \\ b_{ij} = \overline{N(T_2)} - k_{ij}N_{ij}(T_2) \end{cases}, \quad (4)$$

其中, k_{ij} 和 b_{ij} 分别为系统红外焦平面阵列的每个像元的乘性校正系数和加性校正系数。

可以利用校正残差来定量评估校正效果。假设在温度为 T 时, 获取一幅黑体图像 $N_{ij}(T)$, 经过非均匀性校正, 其结果可以表达为:

$$\begin{aligned} N_{ij}^c(T) &= k_{ij}(N_{ij}(T) - N_{ij}(T_2)) + \overline{N(T_2)} = \\ &= \overline{GL(T)} + \bar{D} = \overline{N(T)}. \end{aligned} \quad (5)$$

由公式(5)可以看出, 经过非均匀性校正后, 其结果为该温度 T 下焦平面的灰度平均值, 即校正的剩余残差为零, 说明系统各个像素的非均匀性得到完全校正^[11-12]。

对于红外辐射测量系统, 除了需对系统进行高精度的辐射定标之外, 还要确保采集图像既不能信噪比过低也不能出现灰度饱和。考虑到静态测量需要调节衰减片, 动态测量需要调节积分时间, 故建立考虑积分时间的定标模型。红外辐射测量系统的能量传输与转换包括被测目标的红外辐射, 系统的外部杂散辐射, 系统机械、镜片的杂散辐射, 探测器的放大器噪声和探测器暗电流噪声, 最终得到系统的数字灰度, 如式(6)所示^[13-19]。

$$D_{ij}(T, t) = t \cdot d_{\text{stray}, ij} + t \cdot d_{m, ij} + d_{in, ij}, \quad (6)$$

其中, $d_{\text{stray}, ij}$ 为系统机械与镜片杂散辐射引起的

噪声, 单位为DN, $d_{m, ij}$ 为探测器的放大器的噪声, $d_{in, ij}$ 为探测器的暗电流噪声。对系统响应率进行归一化处理, 归一化的响应率 $R_{n, ij}$ 可以表示为:

$$R_{n, ij} = \frac{R_{ij}}{t}, \quad (7)$$

其中 t 为相机的积分时间。随积分时间变化的辐射定标模型可以表示为:

$$\begin{aligned} N_{ij}(T, t) &= tR_{n, ij}L(T) + t \cdot d_{m, ij} + \\ &+ t \cdot d_{\text{stray}, ij} + d_{in, ij}. \end{aligned} \quad (8)$$

对含有积分时间项的辐射项进行合并, 有:

$$N_{ij}(T, t) = t \cdot R_{n, ij}L(T) + t \cdot d_{t, ij} + d_{in, ij}, \quad (9)$$

其中, $d_{t, ij} = d_{m, ij} + d_{\text{stray}, ij}$ 为积分时间相关的杂散辐射项。

随积分时间变化的辐射定标模型对红外辐射测量系统具有重要意义。在系统的曝光范围内, 可以根据被测目标的状态连续调节积分时间, 以保证测量数据有效。

但积分时间变化会导致图像像质退化, 给目标提取与跟踪带来困扰。为解决红外辐射测量系统由于积分时间连续变化导致的红外图像质量下降问题, 本文提出一种适用于红外辐射测量系统的积分连续可调的快速宽动态非均匀性校正算法。

基于随积分时间变化的辐射定标模型, 可求得系统的定标参数:

$$\begin{bmatrix} N_{ij}(T_1, t_1) \\ N_{ij}(T_2, t_2) \\ \vdots \\ N_{ij}(T_m, t_n) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} t_1 L(T_1) & t_1 & 1 \\ t_2 L(T_2) & t_2 & 1 \\ \vdots & \vdots & \vdots \\ t_n L(T_n) & 1 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} R_{n, ij} \\ d_{t, ij} \\ d_{in, ij} \end{bmatrix}, \quad (10)$$

其中, m 表示采集温度点个数, n 为采集积分时间的数量。

$$\begin{bmatrix} R_{n, ij} \\ d_{t, ij} \\ d_{in, ij} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} t_1 L(T_1) & t_1 & 1 \\ t_2 L(T_2) & t_2 & 1 \\ \vdots & \vdots & \vdots \\ t_n L(T_m) & 1 & 1 \end{bmatrix}^{-1} \begin{bmatrix} N_{ij}(T_1, t_1) \\ N_{ij}(T_2, t_2) \\ \vdots \\ N_{ij}(T_m, t_n) \end{bmatrix}. \quad (11)$$

此时, 辐射定标模型含有3个定标参数, 利用两点校正系数对任意积分时间的图像 $N_{ij}(T, t)$ 进行

校正, 校正后的图像 $N_{ij}^c(T, t)$ 可以描述为:

$$\begin{aligned} N_{ij}^c(T, t) &= k_{ij}(T, t_1)(N_{ij}(T, t) - N_{ij}(T_2, t_1)) + \overline{N}(T_2, t_1) \\ &= t\overline{R}_n L(T) + (t - t_1) \frac{\overline{R}_n}{R_{n,ij}} d_{t,ij} + t_1 \overline{d}_t + \overline{d}_{in} \end{aligned} \quad (12)$$

校正之后的剩余残差 $n_{ij}(T, t)$ 为:

$$\begin{aligned} n_{ij}(T, t) &= N_{ij}^c(T, t) - \overline{N}(T, t) \\ &= (t - t_1) \left(\frac{\overline{R}_n}{R_{n,ij}} d_{t,ij} - \overline{d}_t \right) \end{aligned} \quad (13)$$

经校正后, 仅当 $t = t_1$ 时, 残差不为零。也就是说, 两点校正算法不适用于连续变化的积分时间的辐射定标模型。

3 快速宽动态非均匀性校正算法

前述随时间变化的辐射定标模型包括一个乘性因子和两个加性因子, 利用噪声项表示为:

$$\begin{cases} R_{n,ij} = \overline{R}_n + \Delta R_{n,ij} \\ d_{t,ij} = \overline{d}_t + \Delta d_{t,ij} \\ d_{in,ij} = \overline{d}_{in} + \Delta d_{in,ij} \end{cases}, \quad (14)$$

其中, $\Delta R_{n,ij}$, $\Delta d_{t,ij}$ 和 $\Delta d_{in,ij}$ 为各个参数引入的噪声项, 定义 3 个校正参数分别为 α_{ij} , β_{ij} 和 γ_{ij} 。

$$\begin{cases} \alpha_{ij} = \frac{\overline{R}_n}{R_{n,ij}} \\ \beta_{ij} = \frac{\overline{d}_t}{d_{t,ij}} \\ \gamma_{ij} = \overline{d}_{in} - d_{in,ij} \end{cases} \quad (15)$$

利用上述参数对任意积分时间的任意温度的图像进行校正:

$$\begin{aligned} N_{ij}^c(T, t) &= \alpha_{ij}(t \cdot R_{n,ij} L(T)) + \beta_{ij} t \cdot d_{t,ij} + d_{in,ij} + \gamma_{ij} = \\ &= t\overline{R}_n L(T) + \overline{d}_t + \overline{d}_{in} \end{aligned} \quad (16)$$

4 实验部分

为验证本文提出的非均匀性校正算法的有效性, 采用一个制冷型的中波红外系统进行实验验证。辐射定标源采用以色列 CI 公司的 $100 \text{ mm} \times 100 \text{ mm}$ 的黑体, 均匀度为 $\pm 0.005^\circ\text{C}$, 有效发射率为 0.97 以上。系统的参数如表 1 所示,

表 1 系统的基本参数

Tab. 1 Basic parameters of the proposed infrared system

Parameter	Value
Response band/ μm	3.7~4.8
Pixel numbers	320×256
Pixel size/ μm	30
NETD/mK	15
Number resolution (bit)	14
Cooled temperature/K	77
Focal length/mm	50
F/#	2

4.1 辐射定标与成像试验

采集定标数据进行定标试验验证。试验在一个温控箱中进行, 场景如图 2 所示。

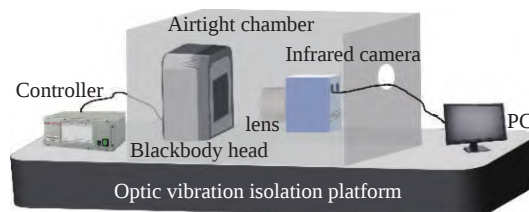


图 2 系统装置示意图

Fig. 2 Schematic diagram of experimental setup

定标与非均匀性验证步骤如下:

(1) 保持温控环境温度, 设置黑体温度为 20°C , 待黑体稳定和红外系统初始化结束后, 采集 0.6 ms, 2.5 ms, 3 ms, 3.5 ms, 4 ms, 5 ms 图像。

(2) 采集结束, 黑体升温至 25°C , 继续采集图像, 重复步骤(1), 直到黑体温度达到 70°C 。

(3) 为比较非均匀性校正效果, 将定标黑体放置在成像距离处, 在 $30^\circ\text{C} \sim 60^\circ\text{C}$, 采集 3 ms, 3.1 ms, 3.2 ms, 3.4 ms, 3.5 ms 图像, 用于模拟连续变化的积分时间。试验场景如图 3 所示。

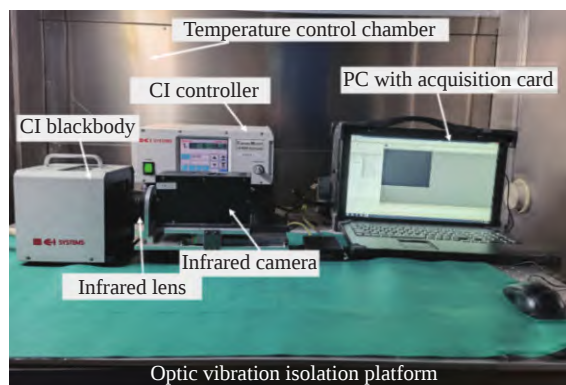


图 3 试验场景图

Fig. 3 Experiment scenario

4.2 定标数据分析

首先, 通过随积分时间变化的辐射定标模型验证系统输出灰度与积分时间和输入辐射亮度的线性度。拟合各个积分时间下, 各个温度辐射亮度与系统输出的关系, 如图 4(彩图见期刊电子版)所示。积分时间分别为 0.6 ms, 2.5 ms, 3 ms, 3.5 ms, 4 ms, 5 ms, 黑体温度从 20 °C 到 70 °C 变化, 温度间隔为 5 °C。由图 4 可知, 系统在各个积分时间下均展现出良好的线性特性, 若不考虑随机误差, 在线性范围内, 系统在各个温度下的辐射亮度与系统输出灰度间均具有良好的线性度。

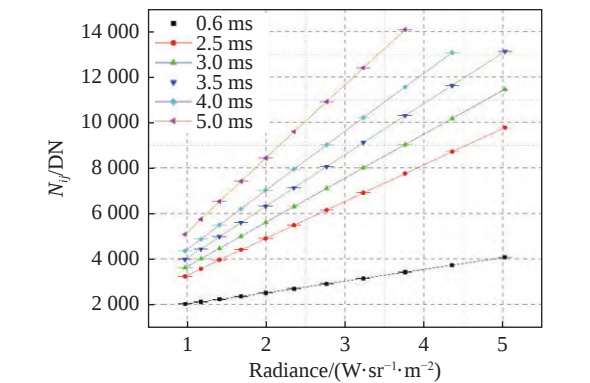


图 4 在不同积分时间下, 辐射亮度与系统灰度的关系
Fig. 4 The relationship between radiation brightness and system grayscale at different integration times

与此同时, 选择不同黑体温度, 验证积分时间与系统输出的关系, 最终的拟合结果如图 5(彩图见期刊电子版)所示。结果显示, 随积分时间的变化, 系统也表现出良好的线性度。

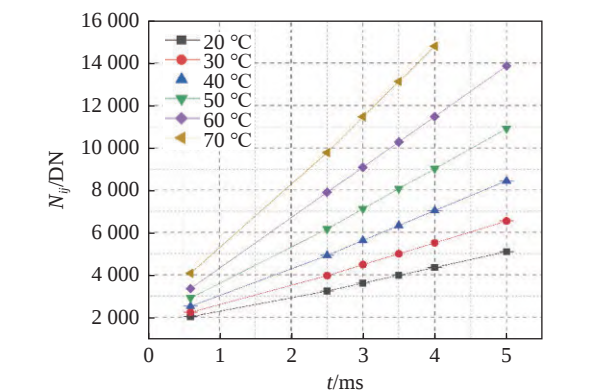


图 5 在不同黑体温度下积分时间与系统灰度的关系
Fig. 5 The relationship between integration time and system grayscale at different blackbody temperatures

在不考虑随机误差的情况下, 通过制冷型中波红外系统证实了随积分时间变化的辐射定标模型。接下来, 需要获取系统的定标参数, 包括

系统响应系数和偏置系数。其定标系数如表 2 所示。

表 2 辐射定标参数的平均值
Tab. 2 Average value of radiometric calibration parameters

Parameters	Value
$\overline{R_n}$	573
$\overline{d_t}$	192
$\overline{d_m}$	1 251

为了更直观地显示系统定标参数的分布, 图 6(彩图见期刊电子版)给出了定标参数的三维分布。

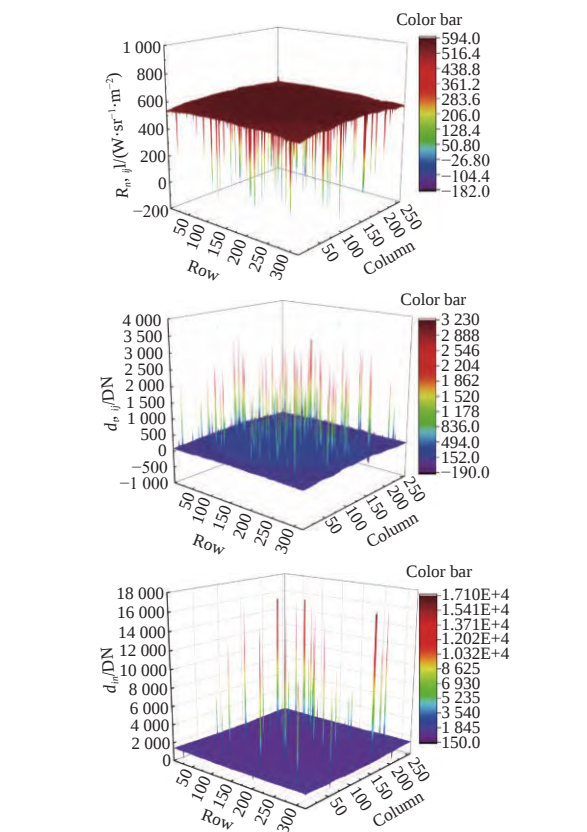


图 6 定标参数的三维分布
Fig. 6 Three-dimensional distribution of calibration parameters

在非均匀性校正之前, 需要进行坏点查找与补偿。坏点是指某一温度范围内, 像元响应出现异常的现象, 但一般温度范围较窄, 不满足宽动态温度范围, 通过随积分时间变化的辐射定标参数, 增加动态范围, 实现对坏点的补偿。通过定标参数, 对坏元进行筛选补偿, 补偿前后的效果如图 7(彩图见期刊电子版)所示。

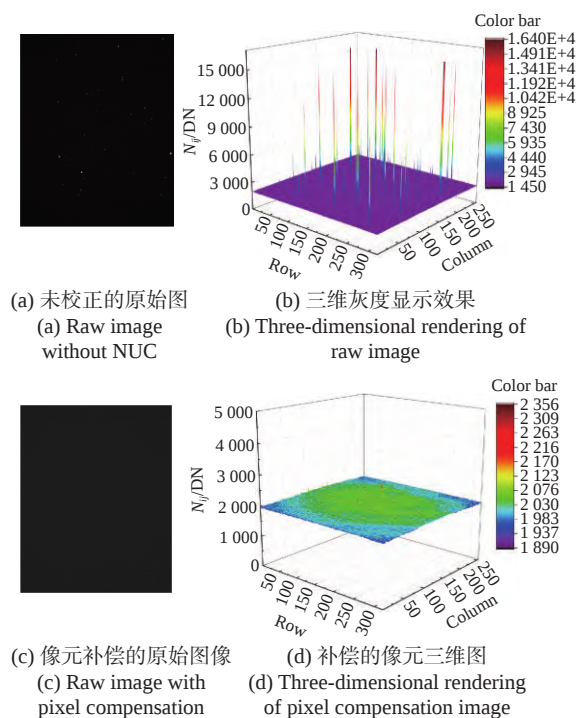


图 7 坏元补偿效果

Fig. 7 Schematic diagram of bad pixels compensation effect

4.3 快速宽动态范围的非均匀性校正算法

快速宽动态范围的非均匀校正算法的优势是速度快,传统的 NUC 耗时的主要原因是黑体加热和稳定时间较长,与其相比,快速宽动态范围的非均匀性校正算法的图像采集时间可以忽略。一般情况下,在短积分时间使用高温点,而长积分时间使用低温点,以防止温度过高导致系统饱和。例如,对于本系统,采用非均匀性校正时,在积分时间为 0.6 ms 时黑体辐射温度为 60 °C 和 70 °C,在积分时间为 5 ms 时黑体辐射温度为 20 °C 和 30 °C。通过逐点升温的方式统计了所有积分时间下传统 NUC 算法及本文提出的 NUC 算法所需的时间,如图 8 所示。

根据以上统计数据,传统的 NUC 算法的积分时间接近 80 min,而本文 NUC 算法只需要积分 25 min。与传统的 CBNUC 算法相比,该算法的校正效率提高了 3.4 倍。结果表明本文算法更适合用于连续调整积分时间的外场红外辐射测量积分系统。

接下来,为了验证所提出的 NUC 算法对制冷红外辐射测量系统成像质量的改善效果,并验证其对所有积分时间的有效性。本文采用残余非均匀性(RNU)作为评价标准进行定量评价。RNU

定义为^[16,20-21]:

$$RNU = \frac{1}{N} \sqrt{\frac{1}{m \times n} \sum_{i=1}^m \sum_{j=1}^n (N_{ij} - \bar{N})^2} \times 100. \quad (17)$$

RNU 用于衡量无噪声的参考图像与其噪声和非均匀性校正图像之间的总体差异。用以评估所提算法是否受限于积分时间的变化。以 0.6 ms 图像为例,原始被校正图像的平均 RNU 为 6.45%,根据 0.6 ms 得到的校正系数,利用传统 CBNUC 算法计算得到平均 RNU 为 0.38%,而利用本文提 NUC 算法得到的校正系数计算被校正图像的平均 RNU 为 0.21%。校正效果如图 9 所示。可见,传统的 CBNUC 算法和本文提出的 NUC 算法都有较好的效果。对于 3 ms 和 3.5 ms 的红外图像,利用本文提出的 NUC 算法校正后的图像仍具有较好的质量。然而,传统的 CBNUC 算法对积分时间敏感,采用 0.6 ms 得到的 NUC 系数被应用到其他积分时间 (3 ms、3.1 ms 和 3.5 ms) 时,并没有取得良好的校正效果。

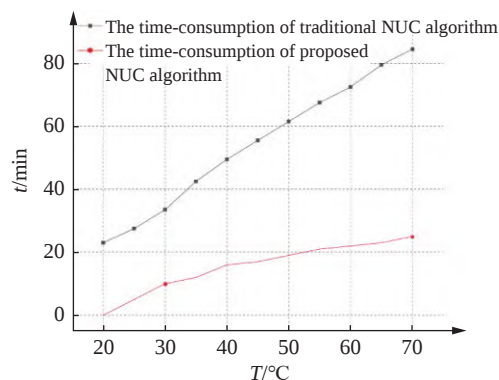


图 8 快速宽动态非均匀性算法的效率分析

Fig. 8 Efficiency analysis of rapid wide dynamic non-uniformity algorithm

为进一步验证本文提出的 NUC 算法不受积分时间的限制,对不同积分时间 (3 ms、3.1 ms、3.5 ms) 的原始图像分别采用传统 CBNUC 系数 (在积分时间为 0.6 ms 时获取) 和本文提出的 NUC 算法进行处理。用 3 个积分时间模拟连续积分时间变化,如图 10~图 11 所示。可见,传统 NUC 算法对积分时间敏感,而本文提出的 NUC 算法由于应用到不同积分次数的图像,及积分时间的引入故增加了算法的动态范围。与传统的非均匀性校正算法相比,该算法可以在较宽的温度范围内应用。遗憾的是,所提算法仅适用于制冷型红外测量系统,且为线性动态范围。

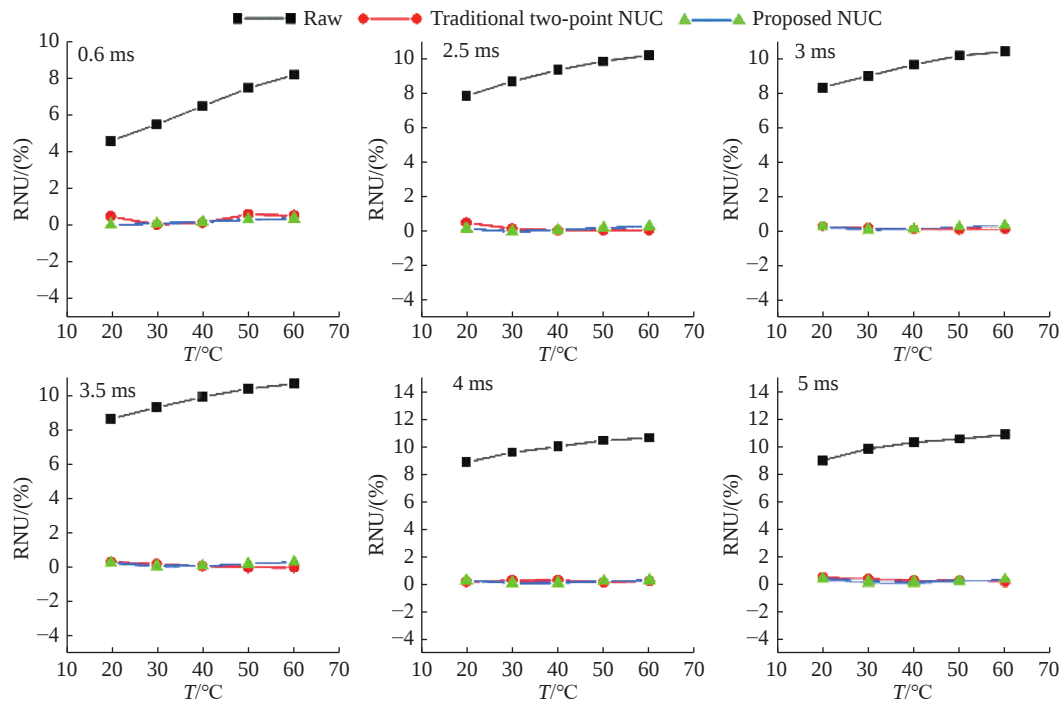


图9 原始图像、传统 NUC 以及本文所提算法不同积分时间的校正残差对比

Fig. 9 Comparison of corrected residuals of the original image, conventional NUC, and the algorithms mentioned in this paper at different integration times

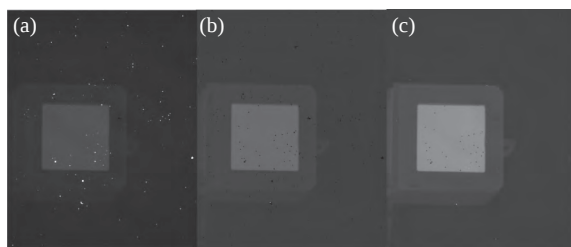
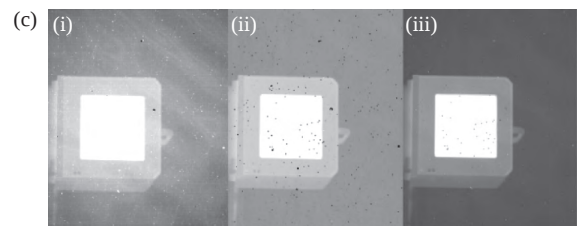
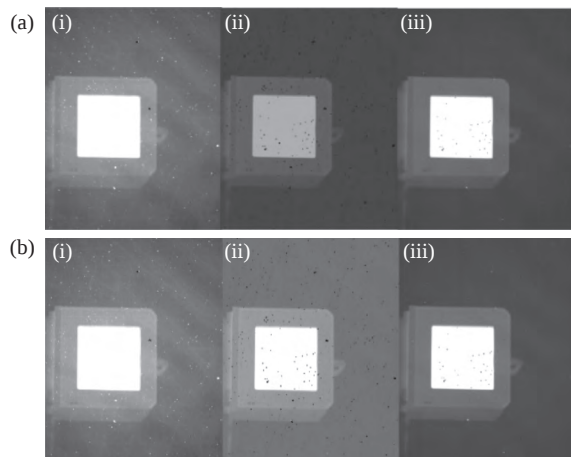


图10 在相同积分时间(0.6 ms)的不同算法的校正效果对比。(a)原始图像;(b)传统 NUC 算法结果;(c)本文所提 NUC 算法结果

Fig. 10 Comparison of correction effects by different algorithms with the same integration time (0.6 ms). (a) Raw image; (b) the traditional NUC algorithm results; (c) the proposed NUC algorithm results

图11 不同积分时间下不同算法的校正效果比较。(a) $t=3$ ms; (b) $t=3.1$ ms; (c) $t=3.5$ ms。(i)原始图像;(ii)传统 NUC 算法结果;(iii)本文所提 NUC 算法结果Fig. 11 Comparison of calibration effects by different algorithms with different integration times. (a) $t=3$ ms; (b) $t=3.1$ ms; (c) $t=3.5$ ms. (i) Raw image; (ii) traditional NUC algorithm results; (iii) the proposed NUC algorithm results

5 结 论

本文针对红外测量系统的外场需要连续变化积分时间的需求,提出一种快速宽动态 NUC 算法,并将提出的算法与传统的 CBNUC 算法进行比较。结果显示本文算法校正效率高,且可适用于不同的积分时间,对线性区的温度不敏感。对于辐亮度变化较大的目标,其可以通过改变积分时间来实时获取目标的辐亮度变化。利用 320×256 像素中波制冷型红外成像系统获取的真实红外图像对所提算法的鲁棒性和准确性进行相关测试,结果验证了理论的正确性。

参考文献:

- [1] OCHS M, SCHULZ A, BAUER H J. High dynamic range infrared thermography by pixelwise radiometric self calibration[J]. *Infrared Physics & Technology*, 2010, 53(2): 112-119.
- [2] JI J K, YOON J R, CHO K. Nonuniformity correction scheme for an infrared camera including the background effect due to camera temperature variation[J]. *Optical Engineering*, 2000, 39(4): 936-940.
- [3] 霍晓江, 郭肇敏, 张志恒, 等. 基于积分时间的 IRFPA 非均匀性校正方法研究[J]. *红外与激光工程*, 2008, 37(S2): 604-607.
- HUO X J, GUO ZH M, ZHANG ZH H, *et al.*. Research on nonuniformity correction of IRFPA based on integration time[J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2008, 37(S2): 604-607. (in Chinese)
- [4] 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.
- LENG H B, TANG X Y, PENG D X. Research on nonuniformity correction of IRFPA based on integral time adjust[J]. *Journal of Infrared and Millimeter Waves*, 2007, 26(4): 246-250. (in Chinese)
- [5] 陈世伟, 杨小冈, 张胜修, 等. 基于变积分时间的红外焦平面非均匀性校正算法研究[J]. *光子学报*, 2013, 42(4): 475-479.
- CHEN SH W, YANG X G, ZHANG SH X, *et al.*. Research on nonuniformity correction algorithm of IRFPA based on adjusting integral time[J]. *Acta Photonica Sinica*, 2013, 42(4): 475-479. (in Chinese)
- [6] HUO L J, ZHOU D B, WANG D J, *et al.*. Staircase-scene-based nonuniformity correction in aerial point target detection systems[J]. *Applied Optics*, 2016, 55(25): 7149-7156.
- [7] ZUO CH, CHEN Q, GU G H, *et al.*. New temporal high-pass filter nonuniformity correction based on bilateral filter[J]. *Optical Review*, 2011, 18(2): 197-202.
- [8] 李周, 乔彦峰, 常松涛, 等. 宽动态范围红外辐射测量系统快速定标算法[J]. *红外与激光工程*, 2017, 46(6): 0617003.
- LI ZH, QIAO Y F, CHANG S T, *et al.*. High-speed calibration algorithm for wide dynamic range infrared radiometric system[J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2017, 46(6): 0617003. (in Chinese)
- [9] MOONEY J M, SHEPPARD F D, EWING W S, *et al.*. Responsivity nonuniformity limited performance of infrared staring cameras[J]. *Optical Engineering*, 1989, 28(11): 281151.
- [10] 李周. 地基靶场红外辐射特性测量系统宽动态辐射测量研究[D]. 长春: 中国科学院大学(中国科学院长春光学精密机械与物理研究所), 2018.
- LI ZH. Research on ground-based infrared characteristics measurement systems in wide dynamic range radiometry[D]. Changchun: University of Chinese Academy of Sciences (Changchun Institute of Optics, Fine Mechanics and Physics, Chinese Academy of Sciences), 2018. (in Chinese)
- [11] JIN Y, JIANG J, ZHANG G J. Three-step nonuniformity correction for a highly dynamic intensified charge-coupled device star sensor[J]. *Optics Communications*, 2012, 285(7): 1753-1758.
- [12] 李周, 李铭扬, 余毅, 等. 基于二次修正提高宽动态红外辐射测量精度[J]. *红外与激光工程*, 2020, 49(10): 20200142.
- LI ZH, LI M Y, YU Y, *et al.*. Improvement of wide dynamic infrared radiation measurement accuracy based on dual correction[J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2020, 49(10): 20200142. (in Chinese)
- [13] CHANG S T, ZHANG Y Y, SUN ZH Y, *et al.*. Method to remove the effect of ambient temperature on radiometric calibration[J]. *Applied Optics*, 2014, 53(27): 6274-6279.
- [14] MONTANARO M, LUNSFORD A, TESFAYE Z, *et al.*. Radiometric calibration methodology of the Landsat 8 thermal infrared sensor[J]. *Remote Sensing*, 2014, 6(9): 8803-8821.
- [15] SUN ZH Y, CHANG S T, ZHU W. Radiometric calibration method for large aperture infrared system with broad dynamic range[J]. *Applied Optics*, 2015, 54(15): 4659-4666.
- [16] CAO Y P, TISSE C L. Single-image-based solution for optics temperature-dependent nonuniformity correction in an uncooled long-wave infrared camera[J]. *Optics Letters*, 2014, 39(3): 646-648.
- [17] ZHOU D B, WANG D J, HUO L J, *et al.*. Scene-based nonuniformity correction for airborne point target detection systems[J]. *Optics Express*, 2017, 25(13): 14210-14226.
- [18] NUGENT P W, SHAW J A, PUST N J. Radiometric calibration of infrared imagers using an internal shutter as an equivalent external blackbody[J]. *Optical Engineering*, 2014, 53(12): 123106.

- [19] WOLF A, REDLICH R, FIGUEROA M, *et al.*. On-line nonuniformity and temperature compensation of uncooled IRFPAs using embedded digital hardware[J]. *Proceedings of SPIE*, 2013, 8868: 88680H.
- [20] TORRES S N, PEZOA J E, HAYAT M M. Scene-based nonuniformity correction for focal plane arrays by the method of the inverse covariance form[J]. *Applied Optics*, 2003, 42(29): 5872-5881.
- [21] KIM S. Two-point correction and minimum filter-based nonuniformity correction for scan-based aerial infrared cameras[J]. *Optical Engineering*, 2012, 51(10): 106401.

作者简介:



李 周(1989—), 男, 山东临沂人, 博士, 2018年于中国科学院大学获得博士学位, 主要从事红外辐射定标, 红外辐射特性测量等方面的工作。



张尧禹(1973—), 辽宁黑山人, 工学博士、研究员、博士生导师, 2003年于中国科学院长春光学精密机械与物理研究所获得机械制造及其自动化专业博士学位, 主要研究方向为: 靶场跟踪、靶场测量、光电瞄准、单兵系统等。
E-mail: 13604336836yaoyu@sina.com