

文章编号:1672-6952(2020)04-0130-05

投稿网址: <http://journal.lnpu.edu.cn>

一种基于定标变积分时间的均匀校正算法

李 周, 余 毅, 何锋赞, 蔡立华

(中国科学院长春光学精密机械与物理研究所 天基动态快速光学成像技术重点实验室, 吉林 长春 130033)

摘 要: 在靶场光学测量领域,地基红外辐射特性测量系统不仅承担对目标辐射特性测量工作,而且还要实现目标跟踪成像和实况记录。然而,现有红外焦平面在制造工艺上的缺陷,以及红外辐射测量系统的光学系统自身热辐射的不均匀性,致使图像存在严重的非均匀性。基于传统的非均匀性校正方法在红外辐射特性测量系统应用的局限性,提出一种基于定标变积分时间的均匀校正算法。为证实校正效果,基于600 mm的中波红外辐射测量系统进行验证。实验结果表明,2.5 ms和3.0 ms下的原始图像非均匀度从3.69%降低至0.22%,证实所提算法具有良好的校正效果,有工程应用意义。

关键词: 红外成像; 非均匀性校正; 宽动态范围; 辐射特性测量

中图分类号: TN216

文献标志码: A

doi:10.3969/j.issn.1672-6952.2020.04.018

A Variable Integration Time Non-Uniformity Correction Algorithm Based on Calibration

Li Zhou, Yu Yi, He Fengyun, Cai Lihua

(Changchun Institute of Optics, Fine Mechanics and Physics, Chinese Academy of Sciences, Key Laboratory of Space-Based Dynamic & Rapid Optical Imaging Technology, Chinese Academy of Sciences, Changchun Jilin 130033, China)

Abstract: A ground-based infrared radiation characteristic measurement system not only undertakes the measurement of radiation characteristic, but also realizes the imaging in outfield. However, as for the manufacturing defects of the infrared focal the existing plane and the thermal radiation of system, it leads to the phenomenon of non-uniformity. Considering that the limitations of traditional non-uniformity correction algorithms, a variable integration time non-uniformity correction algorithm based on calibration was proposed in this paper. To confirm the effect of the proposed algorithm, the verification experiment based on 600 mm aperture mid-infrared radiation measurement system. The experimental results show that the original image non-uniformity under 2.5 ms and 3.0 ms is reduced from 3.69% to 0.22%. It is confirmed that the proposed algorithm has good correction effect and has engineering application significance.

Keywords: Infrared imaging; Non-uniformity correction; Wide dynamic range; Radiation characteristic measurement

高性能的红外成像系统被广泛地应用于军事领域,因其具有强抗干扰性、强识别能力、被动探测隐蔽性等特点,在军事领域具有广阔的发展前景。对红外成像系统来说,红外焦平面阵列(IRFPA)是成像系统最为核心的元件,直接影响整个成像系统的性能,如作用距离、目标发现概率与成像像质^[1]。

红外焦平面阵列受制于其技术水平和制造工艺,伴随着掺杂粒子的浓度不均匀,其原始输出图像存在严重的非均匀性。红外非均匀性导致图像

的对比度下降,目标与噪声难以区分。红外焦平面阵列其多元成像的特点不可避免地带来非均匀性的问题。为解决红外焦平面成像系统的非均匀性,W.S.Ewing最早提出单点校正算法,该算法可以将阵列对某一特定辐射偏置进行校正,得到偏置的一致响应^[2]。在单点校正的基础上,后续发展出两点校正,主要改善单点校正不能同时校正增益和偏置的影响。针对探测器响应的非线性问题,A.F.Milton提出多点校正算法^[3]。基于定标的非均匀性

收稿日期:2020-04-26 修回日期:2020-06-12

基金项目:国家自然科学基金项目(51675506)。

作者简介:李周(1989-),男,博士,助理研究员,从事红外辐射特性测量方面研究;E-mail: lizhou@ciomp.ac.cn。

校正(NUC)相对简单,精度高,工程应用广泛。但是,校正系数需要进行周期性的更新,增加设备的复杂度^[4]。

为避免定标非校正算法的参数更新问题,学者们提出基于场景的非均匀性校正算法^[5]。该方法主要利用探测元对辐射量响应的线性模型,首先假定入射到各阵列元的辐射通量均值和方差相同,然后对场景内红外图像进行空间信息的统计,通过统计量连续地对增益系数和偏移量进行校正。但基于场景的非均匀性校正算法大多需要多次迭代,计算量大,不利于实时性操作^[6-7]。

充分考虑基于定标非均匀性校正实时性差,以及基于场景的非均匀性校正计算繁琐的特点,提出一种实时的非均匀性校正算法。该算法有效地考虑系统积分时间变化。首先介绍了基于定标的非均匀性校正原理,然后基于600 mm口径的中波红外系统对校正效果进行验证。场景校正效果如图1所示。

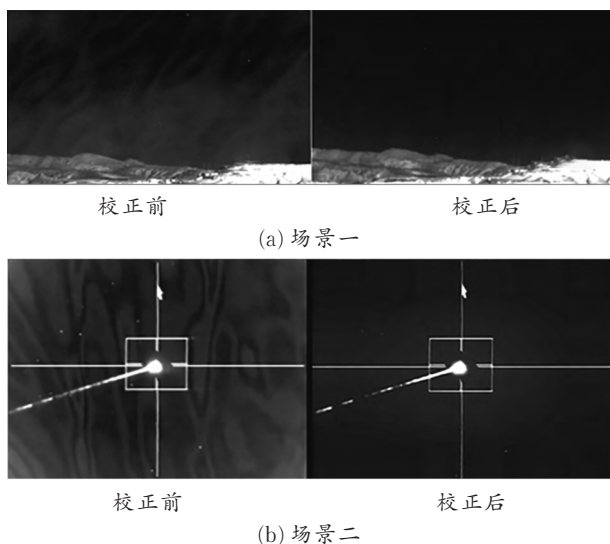


图1 场景校正效果

1 红外辐射定标基本原理

对高性能的红外光电系统来说,其探测器一般选用制冷型红外焦平面阵列,制冷型红外系统对入射的辐射通量具有良好的线性响应度。扩展源辐射定标原理如图2所示。

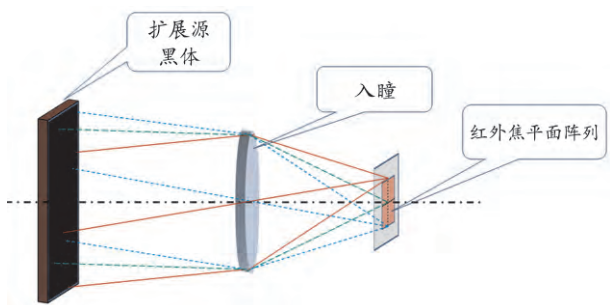


图2 扩展源辐射定标原理

当积分时间设定后,黑体辐射亮度与输出灰度之间的关系称为定标模型或定标方程,系统输出灰度值可由定标方程表示为:

$$G_{i,j} = R_{i,j}L(T_{bb}) + B_{i,j} \quad (1)$$

式中, $G_{i,j}$ 为像元 (i,j) 的输出灰度值; $R_{i,j}$ 为像元 (i,j) 对单位红外辐射亮度的响应率, $(\text{m}^2 \cdot \text{sr})/\text{W}$; $L(T_{bb})$ 为定标辐射源的辐射亮度, $\text{W}/(\text{m}^2 \cdot \text{sr})$; $B_{i,j}$ 为红外系统和探测器电路等引起的偏置^[8-9]。

对于高精度的红外辐射特性测量系统,在探测器响应线性范围内,探测器像元的输出灰度值为积分时间的线性函数。所以,定标公式中的偏置项 $B_{i,j}$ 也应该是积分时间 t 的线性函数。

$$B_{i,j} = tB_{\text{out},i,j} + B_{\text{in},i,j} \quad (2)$$

式中, $tB_{\text{out},i,j}$ 为系统杂散辐射等因素引起的偏置; $B_{\text{in},i,j}$ 为暗电流等探测器自身因素引起的系统输出。

为实现宽动态范围辐射亮度测量,靶场红外辐射特性测量系统通常预设多个积分时间档位。考虑红外探测器的积分时间,定标方程可改写为:

$$G_{i,j} = tR'_{i,j}L(T_{bb}) + tB_{\text{out},i,j} + B_{\text{in},i,j} \quad (3)$$

式中, t 为积分时间, μs 。此时, $R'_{i,j}$ 为单位积分时间所对应的辐射亮度响应率。

2 基于定标的非均匀性校正算法

2.1 基于黑体的两点校正的基本原理

黑体定标法是定标校正法的一种,是指对给定积分时间下不同黑体定标源图像进行采集,将一个或多个图像用于非均匀性校正,在进行非均匀性校正时要求对采集的几十帧(通常为20帧)图像进行均匀化处理,来降低由时间引起的随机噪声。

设积分时间为 t_0 ,黑体温度范围为低温 T_l 至高温 T_h 。根据定标公式可得:

$$\begin{cases} G_{i,j}(T_l) = t_0 R_{i,j}L(T_l) + t_0 B_{\text{out},i,j} + B_{\text{in},i,j} \\ G_{i,j}(T_h) = t_0 R_{i,j}L(T_h) + t_0 B_{\text{out},i,j} + B_{\text{in},i,j} \end{cases} \quad (4)$$

假设红外探测器像元数为 $M \times N$,那么温度 T 的黑体定标图像平均灰度值为 $\overline{G(T)} = \frac{1}{M \times N} \sum_{i=1}^M \sum_{j=1}^N G_{i,j}(T)$,黑体非均匀性校正方法的基本原理为利用 a 、 b 和 c 表示进行非均匀性校正时三个探测元的响应曲线,进行两点校正后得到的结果为 a' 、 b' 和 c' ,三者曲线重合,即三个探测元的响应被校正均匀,获得了相同的响应^[10-11]。两点校正基本原理如图3所示。得到校正系数分别为:

$$\begin{cases} k'_{i,j} = \frac{\overline{G(T_h)} - \overline{G(T_l)}}{G_{i,j}(T_h) - G_{i,j}(T_l)} \\ b'_{i,j} = \overline{G(T_h)} - k'_{i,j}G_{i,j}(T_h) \end{cases} \quad (5)$$

式中, T_h 为辐射标定源采用的高点温度, $^{\circ}\text{C}$; T_l 为辐射标定源采用的低点温度, $^{\circ}\text{C}$; $k_{i,j}^{t_0}$ 为在 t_0 时间的非均匀性校正增益; $b_{i,j}^{t_0}$ 为在 t_0 时间的非均匀性校正偏置。

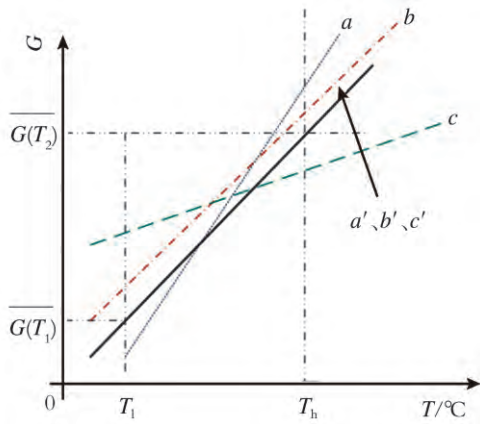


图 3 两点校正基本原理

非均匀度是非均匀性校正结果的一个评鉴标准^[12]。现阶段对红外热成像系统的非均匀度的定义业内还没有一个统一的标准。传统意义上,普遍采用 GB/T 17444—1988《关于红外焦平面阵列特性参数测试技术规范》,其中对红外图像的非均匀度 (Non-Uniformity, NU) 做如下定义^[13]:

$$\left\{ \begin{array}{l} \text{NU} = \frac{1}{G(T_0)} \cdot \\ \sqrt{\frac{1}{M \times N - d} \sum_{i=1}^M \sum_{j=1}^N [G_{i,j}(T_0) - \overline{G(T_0)}]^2} \times 100\% \\ \overline{G(T_0)} = \frac{1}{M \times N - d} \sum_{i=1}^M \sum_{j=1}^N G_{i,j}(T_0) \end{array} \right. \quad (6)$$

式中, $\overline{G(T_0)}$ 为红外图像在 T_0 温度的整个焦平面阵列的平均灰度值; d 为焦平面阵列的坏元数目。

2.2 基于定标变积分时间的非均匀校正算法

非均匀性校正目的就是使红外焦平面探测器阵列所有像元的辐射响应率一致。而红外成像系统为了保证测量的有效性,常常预设多档积分时间,因此常常针对每档积分时间进行逐一非均匀性校正。为保证校正系数的有效性,需要选择多个温度的辐射源,来提高定标非均匀性校正的实效性。

假设在积分时间 t 下,其校正前定标方程可以表示为^[14-16]:

$$G_{i,j} = tR_{i,j}L(T) + tB_{\text{out},i,j} + B_{\text{in},i,j} \quad (7)$$

假设在积分时间 t 下的非均匀性校正系数为 $k_{i,j}^{t'}$ 和 $b_{i,j}^{t'}$,则校正后的像元灰度 $G_{i,j}^{t'}$ 可以表示为:

$$G_{i,j}^{t'} = k_{i,j}^{t'} G_{i,j} + b_{i,j}^{t'} \quad (8)$$

其校正的后的结果应该满足:

$$G_{i,j}^{t'} = \overline{G} \quad (9)$$

式中, $\overline{G} = t\overline{R}L(T) + t\overline{B}_{\text{out}} + \overline{B}_{\text{in}}$,由此得到:

$$\left\{ \begin{array}{l} k_{i,j}^{t'} = \frac{k_{i,j}^{t_h} + k_{i,j}^{t_l}}{2} \\ b_{i,j}^{t'} = \frac{t - t_l}{t_h - t_l} b_{i,j}^{t_h} + \frac{t_h - t}{t_h - t_l} b_{i,j}^{t_l} \end{array} \right. \quad (10)$$

式中, t_h 和 t_l 分别为非均匀性校正所采用的长积分时间和短积分时间, ms; $b_{i,j}^{t_h}$ 和 $b_{i,j}^{t_l}$ 分别为在长积分时间和短积分时间的非均匀性校正系数。

首先,黑体定标法采集三幅包括两个温度点和两个积分时间的数字图像,以便获取在线性区间内的全部非均匀性校正系数,降低对定标源的要求,进而降低系统外场非均匀性校正的设备需求。其次,避免了在所有积分时间下进行逐一非均匀性校正,系统所需的非均匀性校正时间大幅缩短。

3 实验部分

为了检验本文的非均匀性校正方法,对某靶场红外成像及辐射特性测量系统进行非均匀性校正实验。定标实验装置如图 4 所示。



图 4 定标实验装置

该系统口径 600 mm, 焦距 1 200 mm。红外探测器为凝视型焦平面阵列,其工作波段为中波红外 3.7~4.8 μm , 探测器像元数量为 640 $\times$ 512, 像元大小为 15 $\mu\text{m} \times 15 \mu\text{m}$, 相机的光圈数为 2, 动态范围为 14 位。高精度面元黑体, 黑体的温度范围为 5~150 $^{\circ}\text{C}$, 直接覆盖红外成像系统进行非均匀性校正。

首先对考虑积分时间的辐射定标模型进行验证,该模型是本文非均匀性校正方法的基础,设计的定标实验过程为 2.5、3.0 ms 和 3.5 ms 积分时间下将黑体温度从 20 $^{\circ}\text{C}$ 以 10 $^{\circ}\text{C}$ 为间隔上升到 100 $^{\circ}\text{C}$ 进行红外成像系统的辐射定标。定标结果如图 5 所示。从图 5 可以看出,该红外成像系统具有很好的线性响应特性。

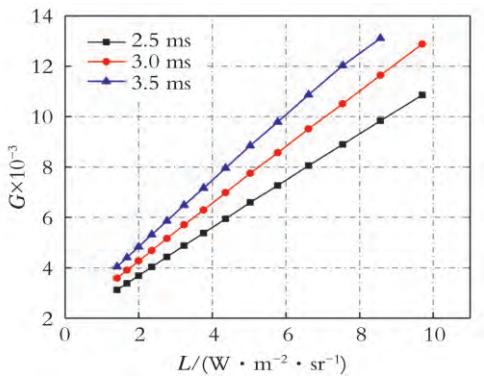


图5 系统输出灰度与辐射亮度关系

采用基于黑体定标法和本文提出方法分别对红外成像系统的非均匀性校正,选取两个积分时间档位为 2.5 ms 和 3.0 ms,用于校正的辐射源温度为 50 ℃和 70 ℃,得到本文算法进行非均匀性校正系数和 3.0 ms 计算下的基于黑体的非均匀性校正系数,分别对 2.5 ms 和 3.0 ms 的图像进行校正。计算在两个积分时间下的非均匀度。结果显示本文方法平均非均匀度为 0.22%,且其校正效果受场景温度和积分时间变化的影响并不严重,不同方法非均匀性校正结果如表 1 所示。

表 1 不同方法非均匀性校正结果

t/ms	$T/^\circ\text{C}$	原始图像的非均匀度 /%	基于黑体定标法校正后 的图像非均匀度/%	本文方法的非均匀度 /%
2.5	30	3.22	0.99	0.28
	50	3.42	0	0.21
	70	3.58	0	0.25
	90	3.76	0.68	0.16
	110	3.99	0.60	0.18
3.0	30	3.42	0.18	0.24
	50	3.71	0	0.26
	70	3.80	0	0.22
	90	3.95	0.18	0.24
	110	4.14	0.19	0.21
均值		3.69	0.28	0.22

注:0表示该场景温度或者该积分时间正是校正时选择的温度或者积分时间,校正后的非均匀性NU值理论上为0。

4 结 论

提出的新型非均匀性校正方法是一种基于定标的方法,比基于场景的非均匀性校正方法的校正精度和定量精度高,适用于高精度的辐射特性测量系统和其他一些定量、准定量的红外成像系统。该方法是黑体定标法和积分时间法的结合。相比于

黑体定标法,可以方便地实现多个积分时间下的非均匀性校正,大大缩短非均匀性校正所需时间,提高设备外场试验的适应性和系统的实时性。相比于积分时间法,所提方法克服了场景温度变化对校正效果的影响,即可以应用于宽动态范围红外成像系统的非均匀性校正,具有更好的实用性。

参 考 文 献

[1] Schulz M, Caldwell L. Nonuniformity correction and correct ability of infrared focal plane arrays[J]. Infrared Physics & Technology, 1995, 36(4): 763-777.

[2] 周慧鑫,李庆,刘上乾,等. 红外焦平面阵列非均匀性及校正分析[J]. 激光与红外, 2003, 33(6): 446-448.

[3] 刘志才,李志广. 红外热像仪图像处理技术综述[J]. 红外技术, 2000, 22(6): 27-32.

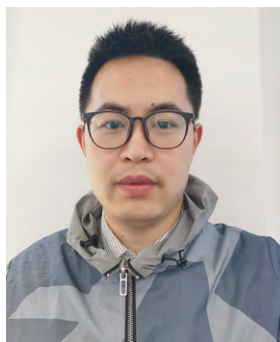
[4] Ratliff B M, Hayat M M, Hardie R C. An algebraic algorithm for nonuniformity correction in focal-plane arrays[J]. A Optics Image Science and Vision, 2002, 19(9): 1737-1747.

[5] Hua W, Zhao J, Cui G, et al. Stripe nonuniformity correction for infrared imaging system based on single image optimization [J]. Infrared Physics & Technology, 2018, 91: 250-262.

[6] Chang S T, Li Z. Single-reference-based solution for two-point nonuniformity correction of infrared focal plane arrays[J]. Infrared Physics & Technology, 2019, 101: 96-104.

- [7] 尹佳琪,王世勇,张瑞,等. 近红外偏振探测器的定标及非均匀性校正[J]. 红外与毫米波学报,2020,39(2):235-241.
- [8] 白乐,赖雪峰,韩维强,等. 适应积分时间调整的红外图像非均匀性校正方法[J]. 光子学报,2020,49(1):175-183.
- [9] 颜刘挺. 红外图像非均匀性校正技术研究[D]. 武汉:华中科技大学,2019.
- [10] 夏侯耀涛,王万平,黄涛. 基于FPGA的CMOS图像实时非均匀性校正方法[J]. 电子设计工程,2019,27(1):184-188.
- [11] 于海涛,马金鹏,范芸,等. 红外成像系统响应光谱非均匀性的理论分析[J]. 红外与激光工程,2019,48(2):75-81.
- [11] 周永康,朱尤攀,赵德利,等. 基于场景的红外焦平面非均匀校正算法综述[J]. 红外技术,2018,40(10):952-960.
- [13] 钟莺. 红外焦平面阵列非均匀性校正算法研究[D]. 南京:南京理工大学,2016.
- [14] 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):158-166.
- [15] 孙志远,常松涛,朱玮,等. 应用内外定标修正实现红外测量系统辐射定标[J]. 光学精密工程,2015,23(2):356-362.
- [16] 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.

(编辑 陈 雷)



李周,男,1989年10月生,山东人,博士,助理研究员。2009—2013年,在辽宁石油化工大学学习,获得学士学位;2013—2018年在中国科学院大学学习(硕博连读),2018年获得光学工程博士学位。从事红外辐射特性测量方面研究工作,近几年发表SCI/EI收录论文7篇。先后承担“多波段大口径出口光电系统”、“舰载大口径光电系统”、“车载多波段红外辐射特性测量系统”等项目的红外辐射特性测量分系统的负责人。积极开展红外辐射特性以及红外多光谱测量与红外偏振测量的技术研究,着力发展军事靶场的光电测试水平,为红外隐身测试与导弹防御提供数据支撑。