

DOI: 10.13382/j.jemi.B2104916

红外焦平面阵列非均匀性校正性能的联合评价*

闫勇刚¹ 王耿¹ 彭志勇² 张登攀¹ 魏绍亮¹ 李晨博³(1. 河南理工大学机械与动力工程学院 焦作 454003; 2. 天津津航技术物理研究所 天津 300300;
3. 北京机电工程研究所 北京 100074)

摘要:凝视红外焦平面阵列(IRFPA)的非均匀性已成为制约红外光学系统成像质量的关键因素。针对自适应类非均匀性校正性能评价问题,提出一种非均匀性校正性能联合测试方法;结合3种典型海上场景,探讨自适应类算法校正性能效果评价;构建校正性能联合测试系统,在海面场景、海天场景和天空场景的输入条件下算法收敛时间分别为16、18和15 s,小于传统自适应算法的20 s;在海面场景输入下,算法校正精度为0.28%,低于其他自适应算法的0.6%,有效温度范围为19~31℃;在天空场景输入下,算法校正后NETD为87 mK。实验结果表明,相较于传统的单一自适应校正算法,所提出的联合处理方法能够在保证NETD的情况下,有效提高IRFPA非均匀性校正性能;也反映了IRFPA非均匀性校正算法能够改善红外光学成像系统质量。

关键词:非均匀性校正;性能评价;红外焦平面阵列;海上场景;红外光学系统

中图分类号: TN216 **文献标识码:** A **国家标准学科分类代码:** 510.4050

Joint assessment of non-uniformity correction performance of infrared focal plane array

Yan Yonggang¹ Wang Geng¹ Peng Zhiyong² Zhang Dengpan¹ Wei Shaoliang¹ Li Chenbo³(1. School of Mechanical and Power Engineering, Henan Polytechnic University, Jiaozuo 454003, China;
2. Tianjin Jinhang Technical Physics Institute, Tianjin 300300, China; 3. Beijing Electro-Mechanical
Engineering Institute, Beijing 100074, China)

Abstract: Infrared focal plane array (IRFPA) non-uniformity correction (NUC) problem of staring infrared imaging system is the key issue that affects the imaging quality. To assess NUC performance based on self-adaption scenes, a joint test method was developed successfully, and was analyzed using three typical scenes as a test scenario. A joint test system was built further. The convergence time was respectively 16, 18 and 15 s at the frame frequency of 50 Hz; the correction accuracy was 0.28%, respectively lower than 20 s and 0.6% by the traditional algorithm, and the effective temperature was in the range of 19℃ and 31℃ with the input of sea scene; the corrected noise-equivalent temperature difference (NETD) was 87 mK. The experimental results show that the proposed joint test method, compared with the traditional self-adaption correction algorithm, can evaluate the NUC performance of IRFPA availablely, and the NUC algorithm of IRFPA can improve the imaging quality of infrared imaging system.

Keywords: non-uniformity correction; performance test; infrared focal plane array; sea scene; infrared imaging system

0 引言

凝视红外焦平面阵列(infrared focal plane array, IRFPA)是现代红外成像系统中的核心部件。与扫描型

成像系统相比,IRFPA成像系统具有响应频带宽、速度快、结构紧凑等优点,因此,IRFPA成像系统在军事、航空航天、环境等领域应用日趋广泛^[1-2]。由于受材料和工艺固有水平限制等原因,红外焦平面阵列各探测单元响应特性之间存在着各类响应不一致的差别(所谓非均匀

收稿日期: 2021-11-17 Received Date: 2021-11-17

* 基金项目:国家自然科学基金(51775174)、河南省科技攻关项目(212102210323,202102210082)、河南理工大学博士基金(B2017-32)项目资助

性)和盲元(无响应和过响应)^[3-5],严重影响红外成像系统成像质量,因而工程中使用的 IRFPA 器件都要采用与系统应用需求相一致的非均匀性校正和盲元修整技术,这是极富挑战性的工作。

目前,常用非均匀性校正技术按照获得校正系数的方法不同主要分为基于参考辐射源的非均匀性校正和基于场景的非均匀性校正两类。前者能很好地适应 IRFPA 器件探测单元响应曲线的非线性和大动态范围的特性^[6-8],具有很高的校正精度,是工程中应用较多的算法。但是 IRFPA 器件的响应曲线会随时间推移和工作环境的变化而发生漂移,导致定标算法的精度显著下降。为提高非均匀性校正精度,在使用前必须重新标定校正系数。而标定系数需要的设备要求较高,操作繁琐,耗时量大,在战地条件下,很难及时有效的进行标定工作。后者也称为自适应校正法^[9-11],不需要参考辐射源,根据场景信息自适应地更新校正参数。基于场景的校正算法不但省略了参考辐射源,使系统得到简化,提高了系统的稳定性,而且可以有效地消除参数特性漂移的影响。

自适应校正法不需停止探测系统的正常工作,使用具有运动图像变化的序列信息,以在每一探测单元上产生场景温度变化。根据这些温度变化依次提供统计参考点,并计算出探测器单元响应的校正参数,从而达到非均匀校正的目的。在自适应非均匀性校正算法^[12-14]研究方面,时域高通滤波、恒定统计和神经网络等算法是目前自适应校正算法中实用价值较好的方法。时域高通滤波算法是最早研究的算法,计算量小,只需要较少的内存就可以实时实现非均匀校正,但该算法收敛速度和稳定性差,只能保留场景中的运动变化信息且易产生“鬼影”,对于静止场景也会视为固定图形偏置噪声予以滤除。针对此问题,2018年钱润达等^[15]提出一种加权引导滤波和改进时域高通滤波相结合的非均匀性校正算法。恒定统计法要求统计帧内所有像元接受的人射辐射能量均值和方差相等,若满足此条件,可有效校正固定图像噪声;若不满足此条件,也易产生“鬼影”。针对此问题,Weixian 等^[16]研究了一种基于高频恒定统计算法的自适应场景非均匀校正算法;算法校正效果好,计算量小,但仍存在“鬼影”。近年来,神经网络算法在红外焦平面阵列非均匀性校正中应用越来越多,它要求场景运动变化是遍历的,且对低频的空间固定偏置噪声抑制能力较差。针对此问题,程起森等^[17]提出了一种基于非线性模型的 BP 神经网络非均匀性校正算法;李谦等^[18]通过对神经网络输入层的预处理和增加神经网络的层数,有效提高了图像质量。神经网络算法具有比具有统计模型的方法更好的鲁棒性和适用性。虽然,红外焦平面阵列光学非均匀性校正算法理论和仿真研究较多,且取得良好的效果,但是在非均匀性校正时仅使用某种自适应方法,未有效使用多

种校正方法的各自优势,且针对自适应校正方法的成果量化、场景适应性及其性能测试研究较少。

理想情况下,校正参数应按照调整策略与序列景象和环境温度变化进行实时调整。然而,基于场景的非均匀性校正算法在实际应用中往往存在以下问题:1)对于空域和时域的处理方法,要求场景充分运动(达到信息域的遍历性要求),否则易出现目标退化和伪像;2)时域处理方法方面存在算法收敛速度优化问题;3)对于响应元入射场景均值一致的假设,要在长时间的统计之后,才能得到满足;4)空域处理方法对低频噪声的处理效果不佳。由于上述自适应非均匀性校正方法,依赖于场景运动且对场景分布存在一定的要求,因此,自适应校正方法依然存在场景适应性问题,特别是海上特殊场景下 IRFPA 的非均匀性校正性能需要进一步探索和测试。

结合海上工作条件下的场景统计学特征,采取自适应类校正方法的联合处理,构建自适应类非均匀校正系统,减少对场景信息域的要求程度,并开展自适应方法的非均匀校正以及性能测试和评价。

1 自适应类非均匀校正联合处理

联合测试方法原理为,首先通过全局统计的方法对探测器的固定图形偏置噪声进行校正;之后对校正后的图像采用归一化神经网络算法,进行高频增益噪声的校正,对于目标场景的静止部分利用条件更新系数的方法进行处理,以减小目标伪像和退化的影响,算法原理图如图 1 所示。

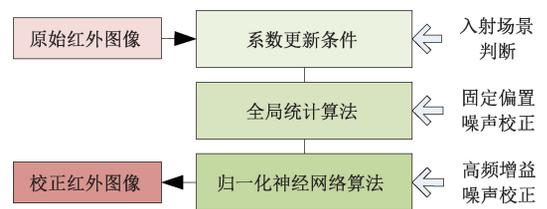


图 1 联合测试方法

Fig. 1 Joint test methodology

红外焦平面探测器非均匀性成像过程可表示为:

$$y'_{i,j}(n) = g_{i,j}(n)x_{i,j}(n) + o_{i,j}(n) \quad (1)$$

式中: $g_{i,j}(n)$ 和 $o_{i,j}(n)$ 分别是第 n 时刻第 (i, j) 焦平面探测元的增益和偏置; $x_{i,j}(n)$ 是第 (i, j) 焦平面探测元接收的辐射通量; $y'_{i,j}(n)$ 是探测器响应的输出信号。

依据恒定统计法假设,有:

$$o = m \quad (2)$$

$$g = \sigma_y \quad (3)$$

式中: m 和 σ_y 分别表示输出信号的均值和均方差。

式(1)可表示为:

$$x_{i,j} = \frac{y'_{i,j} - m_{i,j}}{\sigma_{i,j}} \quad (4)$$

其中,每个像素的均值和均方差可以通过如下递归公式计算得到:

$$\begin{cases} \hat{m}_{i,j}(n) = (1 - \lambda)\hat{m}_{i,j}(n - 1) + \lambda y'_{i,j} \\ \hat{\sigma}_{i,j}(n) = (1 - \lambda)\hat{\sigma}_{i,j}(n - 1) + \lambda |y'_{i,j} - \hat{m}_{i,j}(n)| \end{cases} \quad (5)$$

式中:系数 λ 为 $1/n$,也可设定为其他固定值。

利用上述全局统计法校正红外焦平面阵列非均匀性中的固定图形偏置噪声。然后,对校正后的图像采用归一化神经网络算法,校正高频增益噪声。

对已校正后图像的灰度值进行归一化处理,使其成为 1 附近的数值,同时结合 BP 校正算法,有:

$$y''_{i,j}(n) = \frac{y'_{i,j}(n)}{\bar{y}'} \quad (6)$$

$$y_{i,j}(n) = G_{i,j}(n)y''_{i,j}(n) + O_{i,j}(n) \quad (7)$$

式中: $y_{i,j}(n)$ 是探测器输出信号; $G_{i,j}(n)$ 和 $O_{i,j}(n)$ 分别是第 n 时刻增益和偏置校正系数。

图像中处于 (i, j) 位置的像素的期望值 $f_{i,j}$ 采用 4 个最近邻域的平均值计算,因此,误差函数定义为:

$$e_{i,j}(n) = (y_{i,j}(n) - f_{i,j}(n))^2 \quad (8)$$

采用最陡下降法计算得到下一时刻待校正图像的增益校正系数的更新公式为:

$$G_{i,j}(n + 1) = G_{i,j}(n) - 2\alpha y'_{i,j}(n)(y_{i,j}(n) - f_{i,j}(n)) \quad (9)$$

式中: α 为迭代步长。

把计算得到的高频增益和偏置系数代入线性校正公式,就可以实现红外焦平面阵列的非均匀性校正。

2 测试输入场景的选择

自然界场景的多样性、复杂性和不确定性决定了自适应校正算法不可能对所有的场景均可以达到理想的校正效果。在实际应用中,根据设备运行的具体应用场合来选择确定场景条件和校正方法。本文根据在典型海天条件下的特定场景,对该条件下的典型场景的统计特性进行测试,以考察自适应类算法在该场景条件下的适应性。

一般地,海上场景分成 3 种类型:海面场景,海天场景,天空场景,如图 2 所示,其中海面场景为只有单纯海面背景;海天场景同时存在海面和天空场景,即场景中包含海天;天空场景为深空背景。

分别在转台直线运动和二维曲线运动两种运动模式下,采用长波红外探测器 ($7.9 \sim 9.2 \mu\text{m}$, $320 \times 256 \text{ pixels}$) 实地采集海上场景红外图像序列 1 000 帧,在图像区域

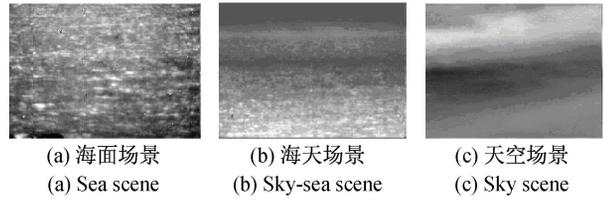


图 2 海上场景图像

Fig. 2 Scenes on the sea

内,随机选择 9 块考察测试区域 ($9 \times 9 \text{ pixels}$),并计算各自图像数据的均值和方差,以考察场景均值和标准差的一致程度。图 3 为 3 种场景下的统计结果。

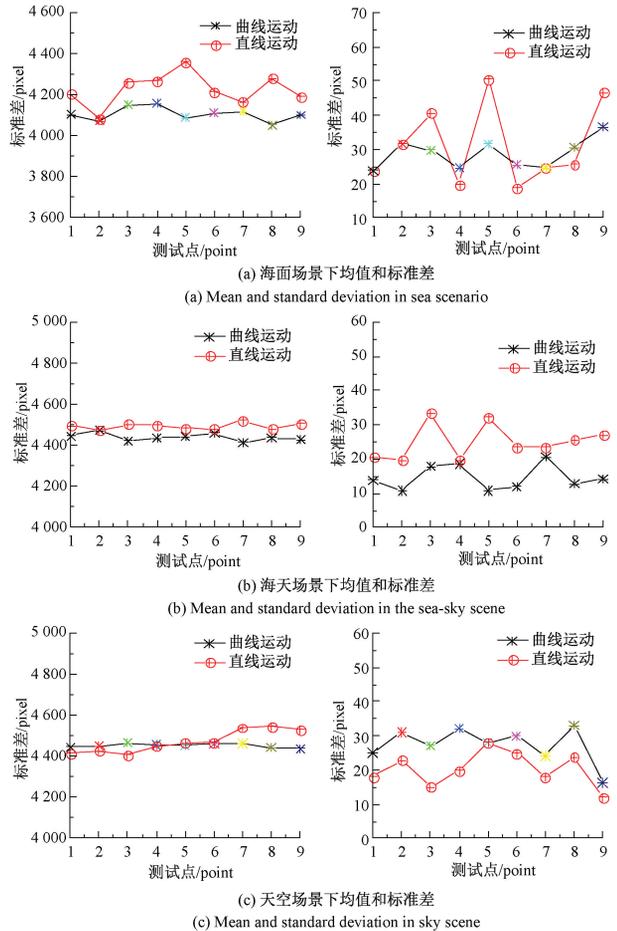


图 3 测试点均值和标准差分布图

Fig. 3 Mean and standard deviation

从图 3 中可以看到,曲线运动所获得图像统计一致性较好,天空场景和海面场景比海天场景的统计一致性较好。根据全局统计法中要求在校正帧段中所有像元的响应均值和方差,应该是一致的。而海上的这 3 种场景的红外图像对比度较低,区域分布面积较大,通过以上的统计运算,在一定量的统计帧内其均值和方差分布较为均匀,比较符合自适应类算法对场景的要求。因此,在测

试过程中入射辐射输入环节采取这3种场景。另外,由于场景运动对算法有影响,还需要考虑运动模式。在测试过程中应针对入射场景类型和入射场景的运动模式进行测试,主要包括海面场景、天空场景、海天场景的直线和曲线运动模式。

3 海上场景下的非均匀性校正性能测试和分析

本文中,通过系数收敛时间、校正精度、适用温度范围、校正后 NETD 等参数,对自适应类方法的校正性能评价。测试设备布局如图4所示。红外成像器校正测试平台包括3个测试位,其中测试位1为场景输入测试,即在此测试位完成全局统计法中校正系数的采集;测试位2为均匀辐射输入,在此测试位获取均匀背景图像作为测试用的基准图像;测试位3为目标背景图像输入,其中背景黑体提供目标图像,目标靶轮提供背景图像。

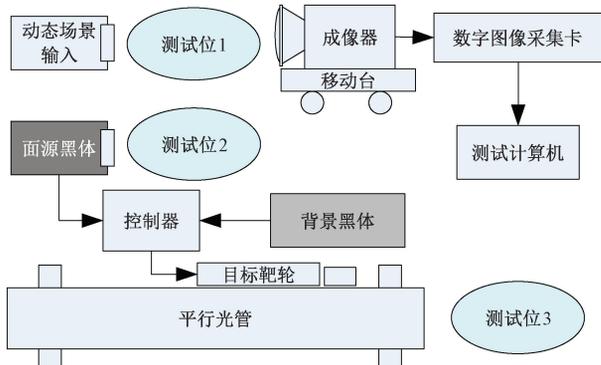


图4 测试设备布局图
Fig. 4 Experimental layout

3.1 校正算法系数收敛时间测试

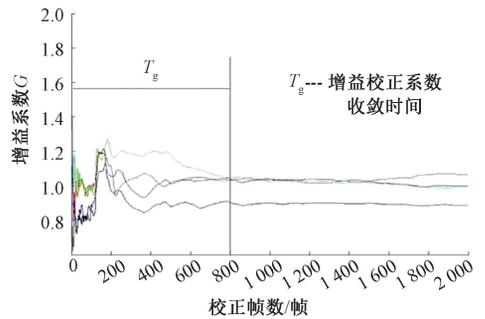
对于自适应类校正方法来说,探测器的校正系数是在系统工作后获得的,因此,在系统正常成像之前需要一段时间求取校正系数。算法获得该校正系数的速度为算法校正速度,即校正系数在多少帧内完成收敛。在测试过程中,应充分考虑到场景分布对收敛速度的影响。测试中,通过测试计算机实时读取每帧测试点的校正系数,当其稳定后,计算帧数。以联合校正方法为例,系数收敛时间如图5所示。

系数收敛时间可表示为:

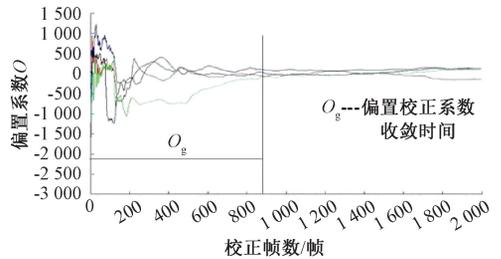
$$T = \text{Max}(T_g, O_g) / F \quad (10)$$

式中: F 为成像器的帧频。

此项测试在测试位1完成,主要是通过输入动态场景对算法的校正速度进行测试,测试过程中测试输入源选择实际海上场景,或是通过场景模拟器产生动态场景,算法在运行过程中,实时地将测试点的校正系数传递到



(a) 增益校正系数收敛时间
(a) Convergence time of gain correction coefficient



(b) 偏置校正系数收敛时间
(b) Convergence time of offset correction coefficient

图5 校正算法系数收敛时间测试

Fig. 5 Coefficient convergence time using correction algorithm

测试计算机中,测试计算机对算法的收敛速度进行计算。在实际测试过程中,应充分考虑到不同的场景条件对算法收敛速度的影响,应对海面场景,海天场景和天空场景分别进行测试。

通过对联合校正算法的测试,在海面场景、海天场景和天空场景的输入场景条件下算法的收敛时间分别为(帧频为50 Hz):16、18和15 s,图像帧数分别为800、900和750帧;而传统自适应校正一般约为1000帧。从结果中可以看到,通过联合校正方法,校正算法系数收敛时间缩短了1/5~1/4,提高了测试效率。

3.2 算法校正精度

依据国标《红外焦平面阵列特性参数测试技术规范》^[19],IRFPA的非均匀性 U_R 为焦平面阵列中各有效像元响应率 $R(i, j)$ 均方根偏差与平均响应率 \bar{R} 的百分率,可表示为:

$$U_R = \frac{1}{\bar{R}} \sqrt{\frac{1}{MN - (d + h)} \sum_{i=1}^M \sum_{j=1}^N [R(i, j) - \bar{R}]^2} \cdot 100\% \quad (11)$$

式中: M 和 N 分别为焦平面像元的行数 and 列数; d 和 h 分别为死像元数和过热像元数; $R(i, j)$ 为像元响应率。

校正精度测试主要在测试位1和测试位2完成。首先,在测试位1运行自适应校正算法,待校正系数收敛以后,在不断电条件下,将成像器置于测试位2,此时面源黑体温度应设定环境温度,并保证探测器的入射辐射

位均匀的。此时计算成像器输出图像的 U_R 值即为校正精度, U_R 值越高, 校正精度越低。

在测试过程中, 应充分考虑到不同的入射场景条件对校正精度的影响左右。入射场景应包括 3 种测试场景外, 还应包括在场景不同的运动模式下对校正精度的影响, 具体包括场景直线运动、曲线运动和静止。图 6 为测试流程示意图。

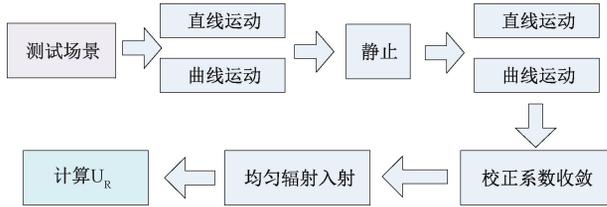


图 6 校正精度测试流程

Fig. 6 Test flow chart of correction accuracy

测试中, 静止入射是为了测试算法对于运动不充分场景的适应能力, 即是否会因为运动不充分的原因出现伪像和目标退化。而均匀辐射入射主要是测量在均匀入射条件下的算法校正精度。图 7 为联合校正算法的实时校正图像和均匀辐射入射图像。

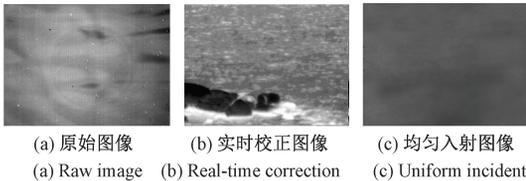


图 7 校正精度测试图像

Fig. 7 Test images of correction accuracy

测试条件为: 海面场景入射, 曲线运动, 静止 2~3 s; 曲线运动, 校正系数 800 帧收敛, 环境温度 25°C。利用式 (11) 可测得 $U_R = 0.28\%$ 。测试过程中, 静止恢复运动后未发现伪像。采用基于高通滤波的自适应校正算法测得 U_R 一般在 0.6%~1%。因此, 可以看到采用联合性能校正算法, IRFPA 的非均匀性能也得到了有效提高。

3.3 适用温度范围

实际工作中, 对于环境温度变化较大的场合, 有可能导致校正精度的降低, 甚至失效, 因此, 应对自适应类校正算法的适用温度范围做出测试。

测试流程同算法校正精度。在均匀辐射入射校正精度环节, 通过调整面源黑体温度模拟不同的环境温度入射, 并计算各个温度点成像器输出图像的 U_R 值, U_R 值在要求精度内的温度范围即为适用温度范围。

图 8 为对联合校正算法测试结果。

测试条件为: 海面场景入射, 曲线运动, 静止 2~3 s; 曲线运动, 校正系数 800 帧收敛, 环境温度 25°C; 校正精

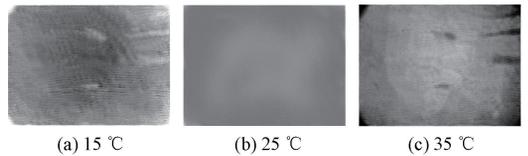


图 8 适用温度范围测试图像

Fig. 8 Testing images of suitable temperature range

度要求为 0.4%。此时, 有效温度范围为 [19, 31] °C。

3.4 校正后 NETD

自适应类校正算法通常含有图像滤波、图像模糊等改变图像空域分布的操作, 造成图像细节质量下降, 这样会影响到成像系统温度分辨率, 因此有必要对完成校正的成像器的 NETD 值进行测试。

测试流程基本与算法校正精度流程相同, 仅将均匀辐射入射替换成四杆靶目标入射即可。红外成像器 NETD 测试在测试位 1 和测试位 3 完成, 在测试位 1 完成校正系数的获取, 在测试位 3 完成 NETD 测试。

由背景图像得出背景图像均值 V_B 和背景图像噪声均值 \bar{V}_N , 由四杆靶图像得出目标均值 V_G , 由式 (12) 可计算得出此时的 NETD 值。

$$NETD = \frac{T - T_0}{(V_G - V_B) / \bar{V}_N} \quad (12)$$

红外焦平面阵列非均匀性联合校正方法的测试图像及测试结果如图 9 所示。

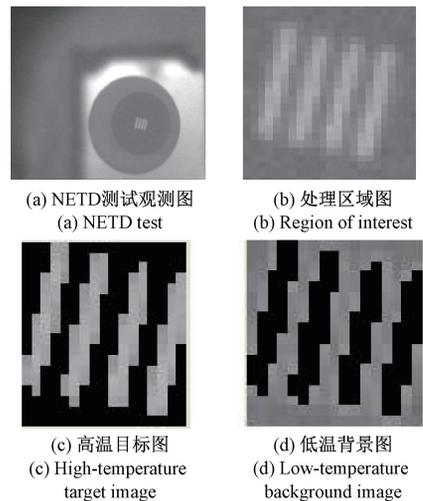


图 9 NETD 测试结果

Fig. 9 NETD test result

测试条件为: 天空场景入射, 曲线运动, 静止 2~3 s; 曲线运动, 校正系数 800 帧收敛, 环境温度 25°C, 背景黑体温度位 27°C, 即四杆靶目标于背景温差位 2 K。测试获得的 NETD 值为 87 mK (多段两点法对应值为 50 mK)。

由于 NETD 与探测器和成像镜头相关,两种校正方法下,结果基本一致。

4 结 论

本文分析了基于场景的不同自适应类非均匀性校正方法的优缺点,针对场景适应性问题提出一种基于自适应算法的 IRFPA 的非均匀性校正性能联合测试方法和原理。结合海上典型场景,从测试场景选择、测试项目确定和测试方法设计进行了初步分析;构建了一种非均匀性校正性能联合校正测试系统,对实际算法测试给出了测试结果。结果表明,本文所提联合测试方法不仅能够有效提升红外成像系统全寿命周期定期维护和标定的需求,而且有效提升面向海上多类别场景红外成像适应能力。本文的研究成果将对在其他场景条件下的 IRFPA 非均匀性校正性能提供有益的借鉴;当然,自适应算法优劣的衡量标准在不同应用场合下会存在着异同,在更广泛的场景入射条件下的测试方法和测试项的选择仍为后继工作的重点。

参考文献

- [1] 卢晨, 凌兴宏. 基于强度-梯度映射与多方向中值滤波的红外弱小目标检测算法[J]. 电子测量与仪器学报, 2020, 34(12): 151-158.
LU CH, LING X H. Infrared dim small target detection algorithm based on intensity gradient mapping and multi-direction median filter [J]. Journal of Electronic Measurement and Instrumentation, 2020, 34(12): 151-158.
- [2] 李意, 雷志勇, 李青松. 红外探测技术的应用与发展[J]. 国外电子测量技术, 2018, 37(2): 80-83.
LI Y, LEI ZH Y, LI Q S. Application and development of the infrared detection technology [J]. Foreign Electronic Measurement Technology, 2018, 37(2): 80-83.
- [3] 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.
YU H T, MA J P, FAN Y, et al. Theory of nonuniformity related to spectrum response in IR imaging system [J]. Infrared & Laser Engineering, 2019, 48(2): 75-81.
- [4] 闫钧华, 倪越, 姜宇, 等. 复杂场景机械交错拼接遥感相机在轨相对定标[J]. 仪器仪表学报, 2021, 42(5): 131-139.
YAN J H, NI Y, JIANG Y, et al. On-orbit relative calibration of mechanical interlaced stitching cameras in complex scenes [J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2021, 42(5): 131-139.
- [5] 修吉宏, 李军, 黄浦, 等. 彩色宽幅面阵航空相机的非均匀性校正方法[J]. 电子测量与仪器学报, 2014, 28(10): 1053-1061.
XIU J H, LI J, HUANG P, et al. Non-uniformity correction method for bayer array color wide format aerial camera [J]. Journal of Electronic Measurement and Instrumentation, 2014, 28(10): 1053-1061.
- [6] 白俊奇, 陈钱, 钱惟贤, 等. 基于环境温度的红外焦平面阵列非均匀性校正[J]. 红外与毫米波学报, 2010, 29(1): 49-52.
BAI J Q, CHEN Q, QIAN W X, et al. Non-uniformity correction for infrared focal plane arrays based on environmental temperature [J]. Journal Infrared and Millimeter Waves, 2010, 29(1): 49-52.
- [7] LI Z, SHEN T, LOU S. Scene-based nonuniformity correction based on bilateral filter with reduced ghosting [J]. Infrared Physics & Technology, 2016, 77: 360-365.
- [8] GUTSCHWAGER B, HOLLANDT J. Nonuniformity correction of imaging systems with a spatially nonhomogeneous radiation source [J]. Applied Optics, 2015, 54(36): 10599-10605.
- [9] HARDIE R C, BAXLEY F, BRYNS B, et al. Scene-based nonuniformity correction with reduced ghosting using a gated LMS algorithm [J]. Optics Express, 2009, 17: 14918-14933.
- [10] ZUO C, CHEN Q, GU G. Scene-based nonuniformity correction method using multiscale constant statistics [J]. Optical Engineering, 2011, 50: 087006.
- [11] 郑娜, 穆平安. 基于改进双边滤波的非均匀光照图像校正算法[J]. 电子测量技术, 2019, 42(17): 157-161.
ZHENG N, MU P AN. Illumination uneven image correction algorithm based on improved bilateral filtering [J]. Electronic Measurement Technology, 2019, 42(17): 157-161.
- [12] 张天序, 施长城, 李洁珺, 等. 红外焦平面阵列非均匀性自适应校正算法研究进展[J]. 红外与毫米波学报, 2007(6): 409-413.
ZHANG T X, SHI CH CH, LI J J, et al. Overview of research on the adaptive algorithms for non-uniformity correction of infrared focal plane array [J]. Journal Infrared and Millimeter Waves, 2007(6): 409-413.
- [13] 周永康, 朱允攀, 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.
ZHOU Y K, ZHU Y P, ZHAO D L, et al. A review of scene-based nonuniformity correction algorithms for infrared focal plane arrays [J]. Infrared Technology, 2018, 40(10): 952-960.

- [14] CHANG Y, YAN L, LIU L, et al. Infrared aerothermal nonuniform correction via deep multiscale residual network [J]. IEEE Geoscience and Remote Sensing Letters, 2019, 16(7): 1120-1124.
- [15] 钱润达, 赵东, 周慧鑫, 等. 基于加权引导滤波与时域高通滤波的非均匀性校正算法[J]. 红外与激光工程, 2018, 47(12): 147-152.
- QIAN R D, ZHAO D, ZHOU H X, et al. Non-uniformity correction algorithm based on weighted guided filter and temporal high-pass filter[J]. Infrared & Laser Engineering, 2018, 47(12): 147-152.
- [16] WEIXIAN Q, QIAN C, GUOHUA G. The high-frequency constant-statistics constraint nonuniformity correction algorithm[J]. Journal of Infrared, Millimeter, and Terahertz Waves, 2011, 32(6): 778-792.
- [17] 程起森, 张元涛, 孙德新. 基于非线性模型的神经网络非均匀性校正方法[J]. 红外技术, 2018, 40(9): 868-874.
- CHENG Q S, ZHANG Y T, SUN D X. An improved neural network non-uniformity correction algorithm based on non-linear model [J]. Infrared Technology, 2018, 40(9): 868-874.
- [18] 李谦, 杨波, 粟宇路, 等. 基于神经网络的红外焦平面光学非均匀性校正改进算法[J]. 红外技术, 2019, 41(3): 251-255.
- LI Q, YANG B, LI Y L, et al. An improved algorithm for IRFPA optical nonuniformity correction based on neural networks [J]. Infrared Technology, 2019, 41(3): 251-255.

- [19] 红外焦平面阵列特性参数测试技术规范: GB/T 17444-1998[S].
- Technical norms for measurement and test of characteristic parameters of infrared focal plane arrays: GB/T 17444-1998[S].

作者简介



闫勇刚 (通信作者), 2002 年和 2006 年于河南理工大学分别获得学士学位和硕士学位, 2015 年于天津大学获得博士学位, 现为河南理工大学副教授, 主要研究方向为光学精密测量、视觉感知等方面的教学和研究工作。

E-mail: tjzyan@tju.edu.cn

Yan Yonggang (Corresponding author) received his B. Sc. degree and M. Sc. degree from Henan Polytechnic University in 2002 and in 2006, and Ph. D. degree from Tianjin University in 2015, respectively. Now he is an assistant professor in Henan Polytechnic University. His main research interests include optics measurement and vision sensing and measurement.



王耿, 2008 年于河南理工大学获得学士学位, 2013 年于中国科学院大学获得博士学位, 现为河南理工大学副教授, 主要研究方向为传感与精密测量系统。

E-mail: wanggeng@hpu.edu.cn

Wang Geng received his B. Sc. degree from Henan Polytechnic University in 2008 and Ph. D. degree from University of Chinese Academy of Sciences in 2013, respectively. Now he is an associate professor in Henan Polytechnic University. His main research interests include sensing and precision measurement system.