

引用格式:BAI Le, LAI Xue-feng, HAN Wei-qiang, *et al.* An Infrared Image Nonuniformity Correction Method Adapted to Adjustment of Integration Time[J]. *Acta Photonica Sinica*, 2020, 49(1):0110002.

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):0110002.

适应积分时间调整的红外图像非均匀性校正方法

白乐^{1,2}, 赖雪峰¹, 韩维强¹, 王昊光³, 周金梅¹, 廖胜¹, 赵汝进¹

(1 中国科学院光电技术研究所, 成都 610209)

(2 中国科学院大学, 北京 100049)

(3 中国科学院微小卫星创新研究院, 上海 201203)

摘 要:针对应用常规红外图像非均匀性校正方法在变积分时间时,图像灰度值会发生改变的现象,提出了一种适应积分时间调整的红外图像非均匀性校正方法.该方法将不同积分时间、不同温度的黑体定标数据和对应的理论红外辐射量整合为一个整体数据库,借助神经网络损失函数和误差反向传递机制,对模型中的校正系数进行学习.训练得到的校正网络能在红外相机积分时间实时调整过程中,保证图像均匀地稳定输出,对后端红外图像处理有着重要意义,并验证训练该网络不需要大量定标数据.而针对红外探测器响应漂移的现象,则提出了在线修正校正系数的方法以有效应对.

关键词:红外图像;非均匀性校正;神经网络;积分时间调整;红外辐射量;定标

中图分类号:TN219

文献标识码:A

doi:10.3788/gzxb20204901.0110002

Infrared Image Nonuniformity Correction Method Adapted to Adjustment of Integration Time

BAI Le^{1,2}, LAI Xue-feng¹, HAN Wei-qiang¹, WANG Hao-guang³, ZHOU Jin-mei¹,
LIAO Sheng¹, ZHAO Ru-jin¹

(1 *Institute of Optics and Electronics, Chinese Academy of Sciences, Chengdu 610209, China*)

(2 *University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China*)

(3 *Innovation Academy for Microsatellites of CAS, Shanghai 201203, China*)

Abstract: For the application of conventional infrared image non-uniformity correction method, when the integration time is adjusted, the image gray level may change accordingly, an infrared image nonuniformity correction method adapted to adjustment of integration time was proposed. In this method, the black-body calibration images with different integration time and temperature, and the corresponding theoretical infrared radiation were integrated into a whole database, with the loss function of neural network and error reverse transfer mechanism, the correction coefficients in the model were learned during the training. The trained network correct non-uniformity can ensure the stable output of images during the real-time adjustment of infrared camera integration time, it is significant for post infrared image processing. And it is proved that the training of this network does not need enormous calibration datum. In order to deal with the problem of infrared detector response drift, an online learning correction coefficient method is proposed.

基金项目:国家自然科学基金(No.61501429)

第一作者:白乐(1993—),男,硕士研究生,研究方向为红外图像处理. Email: 511690069@qq.com

导 师:韩维强(1977—),男,副研究员,硕士,研究方向为光学工程系统总体技术,光电探测器、光电信号提取与处理. Email: 80324071@qq.com

通讯作者:赖雪峰(1979—),男,副研究员,博士,研究方向为红外系统光电混合信号处理. Email: laixuefeng@ioe.ac.cn

收稿日期:2019-08-20;录用日期:2019-10-08

<http://www.photon.ac.cn>

Key words: Infrared image; Non-uniformity correction; Neural network; Adjustment of integration time; Infrared radiation; Calibration

OCIS Codes: 100.2550; 110.3038; 010.5630

0 引言

由于红外焦平面阵列(Infrared Focal Plane Array, IRFPA)自身材料及工艺的原因,各探测元的响应率会不一致,还有光学系统表现出来的渐晕现象,都会使红外图像产生非均匀性.它们在红外图像上通常表现为条形或块状的纹理,也被称为固定图案噪声(Fixed Pattern Noise, FPN),这些固定图案噪声严重影响红外图像质量.因此,红外图像非均匀性校正成为该领域研究的热点之一,国内外学者在这方面也取得了很多卓有成效的进展^[1-3].

自适应积分时间功能,能扩展红外系统对目标温度的适用范围,使目标区域始终工作在最佳响应区间,以获取更好的图像质量.但积分时间的改变会给图像带来非均匀性,且常规的非均匀性校正方法其输出灰度值耦合了辐射量与积分时间,当积分时间改变时,图像灰度值会跟着发生变化.文献[4]提出根据场景信息自适应调整积分时间挡位的校正方法,在预设积分时间挡位能有效抑制固有低频噪声,但需要存储不同挡位的背景噪声图像;文献[5]提出基于辐射标定的积分时间实时调整方法,通过选取最优积分时间避免跟踪丢失,但是没有利用不同积分时间、不同温度定标数据之间的相关性;文献[6,7]是基于黑体定标和积分时间的校正方法,融合温度与积分时间信息,得出适应整个积分时间段的校正系数,但是随着积分时间的调整,图像灰度值会发生变化;文献[8]提出了一种在辐射通量和积分时间两个维度上都进行多点校正的自适应积分时间的校正方法,但需要存储多点校正参数.这些方法均是在灰度域而不是能量域的变积分时间校正算法,因此积分时间调整时输出灰度值会发生变化.

基于此,本文提出一种在红外辐射能量域利用神经网络对红外图像非均匀性进行校正的方法.不同于基于场景的神经网络校正方法^[9,10],本文方法基于定标数据,输出图像是红外辐射量图像,克服了红外图像在积分时间动态调整过程中的非均匀性以及图像灰度值变化的问题.并且此方法只需要四组校正系数矩阵,所需存储量和运算量小,也不需要大量定标数据,这些特性均有利于工程应用.此外,为了克服红外探测器长时间工作或者环境变化而导致探测器响应漂移的现象,还提出对校正系数进行在线修正的方法,以减小探测器响应漂移带来的影响.

1 校正模型推导与研究方法

1.1 校正模型的推导

红外图像的灰度值与像元接收的辐照功率相关,像元辐照功率根据黑体辐射出射度计算,并与黑体发射率、焦距、口径、透过率等因素相关,其表达式为

$$P = \frac{\tau e M A_d}{4F^2} \quad (1)$$

式中, P 为像元辐照功率,单位为W; τ 为系统透过率; e 为目标辐射发射率; F 为光学系统焦距与入射光瞳直径比值; A_d 为像元面积大小,单位为 cm^2 ; M 为目标辐射出射度,单位为 W/cm^2 ,由普朗克黑体辐射公式^[11]在相机工作波段积分得到.

根据像元响应输出模型和响应电压与灰度值的AD转换关系^[12],并加入对光学系统渐晕现象的修正项^[13,14],可以得出目标辐射出射度 M 与积分时间 t 和像元灰度值 X 的关系式为

$$M = \frac{(X - V - v_1 - v_2) \cdot 4F^2}{(kG_1 G_2 \tau e A_d \cos^4(\omega) / C_{\text{int}}) t} - \frac{I_d \cdot 4F^2}{k \tau e A_d} \quad (2)$$

式中, G_1 为像元的综合增益; G_2 为量化增益; k 为响应系数,由像元的有效量子效率和光敏元面积决定; I_d 为暗电流; C_{int} 为像元积分电容; V 为和电路形式有关的电压输出补充项; v_1 为像元输出噪声; v_2 为量化噪声; ω 为像元对应的光学系统离轴角.

令 $A = \frac{C_{\text{int}} \cdot 4F^2}{kG_1 G_2 \tau e A_d \cos^4(\omega)}$, $B = -\frac{(V + v_1 + v_2) \cdot 4F^2}{kG_1 G_2 \tau e A_d \cos^4(\omega) / C_{\text{int}}}$, $C = -\frac{I_d \cdot 4F^2}{k \tau e A_d}$, 对工作在线性区的探测器

和已知光学系统,可以把 A 、 B 、 C 中的参数视为像元相关的常量系数.而设定的积分时间与探测器实际积分时间存在一定误差,为此增加一个积分时间的修正项,推导得出对红外图像在能量域的校正模型为

$$Y = A * \frac{X}{T+D} + B * \frac{1}{T+D} + C \quad (3)$$

式中, Y 是对目标辐射出射度矩阵 M 的回归值, A 、 B 、 C 为校正系数矩阵, D 为积分时间修正项,“ $*$ ”为哈达马积(Hadamard Product),定义为两个矩阵中元素对应一一相乘.以黑体灰度图像 X 和积分时间矩阵 T 作为训练时的输入值,以理论计算的黑体辐射出射度矩阵 M 为期望值,通过神经网络训练使模型的输出值 Y 回归到目标辐射出射度.校正神经网络只对校正系数进行回归,而不需要对式(2)中的各项物理参数进行精确求解.

1.2 神经网络的设计与搭建

1.2.1 网络结构设计

首先建立用于回归的前向神经网络,结构如图1,网络结构中的输入层为黑体图像 X 及对应积分时间 T ,回归层为校正模型(3),输出层为神经网络校正后的输出,损失函数为校正后的输出与期望值的均方误差和.



图1 网络结构示意图

Fig.1 Network structure diagram

根据校正模型式(3),本文方法所用网络的基本单元结构如图2.

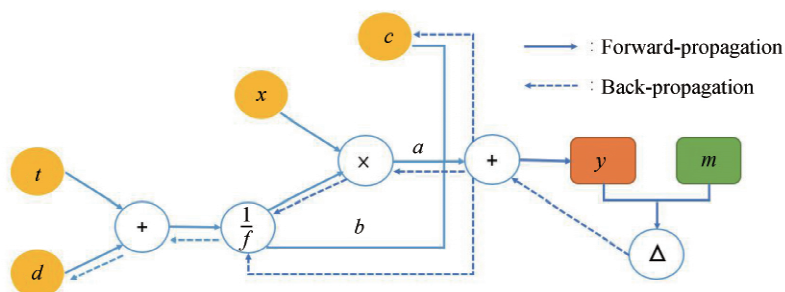


图2 网络基本单元

Fig.2 Basic network unit

图2中 x 、 t 、 m 分别为单个像元的灰度值、积分时间以及辐射量期望值, a 、 b 、 c 、 d 为单个像元的各校正系数, y 为单个像元校正后的辐射量输出值.输入先经实线箭头所指方向正向传递后输出 y ,网络再将输出值 y 与期望值 m 的均方误差求和,并按照虚线所指方向反向传递,对校正系数进行逐级修正.网络经过多次迭代,最后训练出符合要求的校正系数.

1.2.2 网络损失函数和梯度反向传递

为了衡量校正模型输出值的准确性,需要构建损失函数进行评估,而校正系数的修正量需要通过梯度反向传递原理计算.因此,先根据前馈神经网络得出的输出矩阵 Y 以及定标辐射量矩阵 M ,建立均方误差和的损失函数 L_{oss} ^[15] 及误差反向传递函数 $d_{L,y}$

$$\begin{cases} L_{oss} = \frac{\sum_{i=1}^H \sum_{j=1}^W (Y_{i,j} - M_{i,j})^2}{2H \cdot W} \\ d_{L,y_{i,j}} = (Y_{i,j} - M_{i,j})/n \end{cases} \quad (4)$$

式中, i 、 j 为像元坐标, H 、 W 为红外焦平面行列数, n 为定标数据点总数, $Y_{i,j}$ 为校正像元输出值, $M_{i,j}$ 为辐射期望值.再分别对校正模型式(3)中的校正系数 A 、 B 、 C 以及 D 求导,并与误差值 $d_{L,y_{i,j}}$ 相乘,得到校正系数的修正量,计算表达式为

$$\begin{cases} d_{LdA_{i,j}} = \frac{X_{i,j}}{T_{i,j} + D} * d_{LdY_{i,j}} \\ d_{LdB_{i,j}} = \frac{1}{T_{i,j} + D} * d_{LdY_{i,j}} \\ d_{LdC_{i,j}} = d_{LdY_{i,j}} \\ d_{LdD_{i,j}} = \frac{-A_{i,j}X_{i,j} - B_{i,j}}{(T_{i,j} + D_{i,j})^2} * d_{LdY_{i,j}} \end{cases} \quad (5)$$

得到校正系数的修正量后,乘以学习率 α ,如式(6)将他们与待修正系数叠加,即可得到修正后的校正系数,通过不断地迭代训练来优化校正系数 A 、 B 、 C 和 D 。

$$\begin{cases} A_{i,j} = A_{i,j} + \alpha \cdot d_{LdA_{i,j}} \\ B_{i,j} = B_{i,j} + \alpha \cdot d_{LdB_{i,j}} \\ C_{i,j} = C_{i,j} + \alpha \cdot d_{LdC_{i,j}} \\ D_{i,j} = D_{i,j} + \alpha \cdot d_{LdD_{i,j}} \end{cases} \quad (6)$$

1.2.3 数据库的搭建

首先将采集到的不同温度点不同积分时间下的多帧黑体辐射图像进行盲元替换和平均去噪预处理.然后将归一化后的 X 与 T 组成 $\text{Height} \times \text{Width} \times 2 \times \text{num}$ 的四维张量作为数据库的输入 I_{input} ,将计算出的每个工作点对应黑体辐射出射度 M 组成的 $\text{Height} \times \text{Width} \times 1 \times \text{num}$ 四维张量作为数据库的期望值 O_{output} ,可表示为

$$\begin{cases} I_{\text{input}}(\text{height}, \text{width}, 2, \text{num}) = \left[\frac{X_{i,j,k}}{X_{\text{max}}}; \frac{T_{i,j,k}}{T_{\text{max}}} \right] \\ O_{\text{output}}(\text{height}, \text{width}, 1, \text{num}) = [M_{i,j,k}] \end{cases} \quad (7)$$

式中, X_{max} 与 T_{max} 分别为图像最大灰度值和相机最大积分时间, i, j 为像元坐标, k 为定标序号.值得注意的是,如果直接将原始灰度值及积分时间输入网络训练,会出现梯度消失的现象,训练结果难以收敛.因此需要对灰度图 X 与积分时间 T 进行归一化。

本文实验的数据库总共由 88 个定标点构成,图 3 分别为 88 个定标点归一化灰度级与辐射量随积分时间的分布情况。

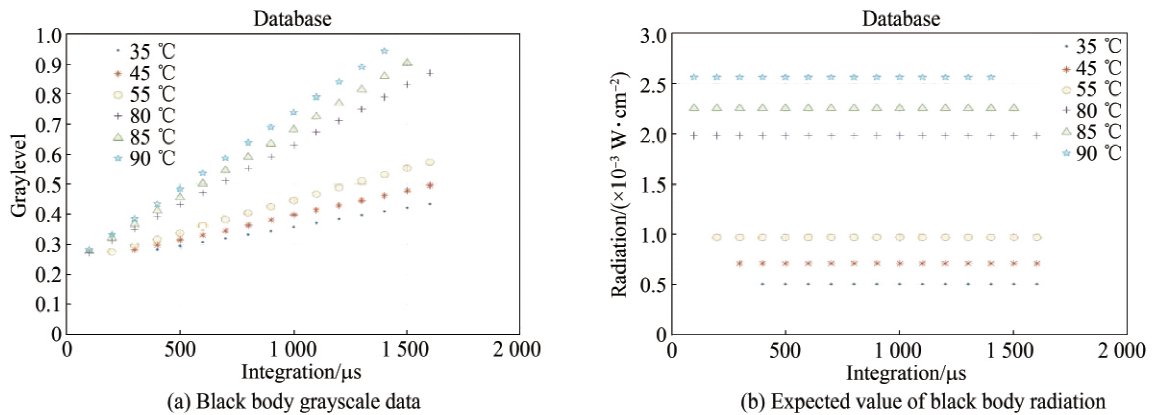


图 3 数据库示意
Fig.3 Database diagram

1.3 校正系数的在线修正

由于红外器件长时间工作和环境温度变化,会导致探测器响应出现漂移.本文在传统神经网络非均匀性校正思想的基础上,在工作任务前将镜头切换遮光盖或均匀天空背景,以前一帧输出的全图均值作为期望值 T_{arget} ,而不是以真实目标场景作为输入,避免了鬼影现象的出现,全图辐射量均值计算表达式为

$$T_{\text{arget}}(i, j) = \frac{1}{H \cdot W} \sum_{i=1}^H \sum_{j=1}^W Y(i, j) \quad (8)$$

从原理上,可以对模型(3)中的所有校正系数进行在线修正.但由于校正系数修正时,输入的数据相比于定标数据在灰度和积分时间跨度更为单一,每次迭代只是输入了单一积分时间和单一温度的图像,因而如果用该方法对校正模型中的系数 A 、 B 和 D 进行修正,难以得到准确的修正量.因此,本方法只针对偏置校正系数 C 进行在线修正,利用梯度反向传递机制,通过式(4)计算反向传递误差值 $d_{L,dY_{i,j}}$,再通过式(9)对偏置校正系数 C 进行修正:

$$\begin{cases} d_{Y_{i,j},dC_{i,j}} = d_{L,dY_{i,j}} \\ C_{i,j} = C_{i,j} + \alpha \cdot d_{Y_{i,j},dC_{i,j}} \end{cases} \quad (9)$$

这样不断迭代输入均匀温度的序列图,即可得到修正后的校正系数 C .

2 实验结果与分析

2.1 实验配置与评价指标

实验中使用 320×256 的中波制冷型红外相机,视场大小为 $5^\circ \times 4^\circ$,焦距为 $110 \mu\text{m}$,口径为 55 mm ,像元尺寸为 $30 \mu\text{m}$,工作波段在 $3.7 \sim 4.8 \mu\text{m}$,黑体为 $100 \text{ mm} \times 100 \text{ mm}$ 的面源黑体,发射率为 0.99 ± 0.01 ($1 \sim 14 \mu\text{m}$),温度稳定性为 $\pm 0.0005 \text{ }^\circ\text{C}$.实验中将 14 位红外原始数据和处理后的图像数据按固定比例拉伸至 8 位进行显示.

对图像非均匀性校正效果通过校正后图像的非均匀度大小进行评价.目前通用的计算图像非均匀度 (Non-uniformity, NU) 的表达式为^[16]

$$\text{NU} = \frac{1}{\bar{X}_{i_0, j_0}} \sqrt{\frac{1}{H \cdot W - (d+h)} \sum_{i=1}^H \sum_{j=1}^W (Y_{i,j} - \bar{X}_{i,j})^2} \quad (10)$$

式中, d, h 分别为死像元和过热像元的个数; $Y_{i,j}$ 为焦平面阵列第 i 行 j 列像元经校正后的输出值; \bar{X} 是除去死像元和过热像元后的输出响应均值矩阵.

2.2 神经网络训练过程

首先生成定标数据库,搭建网络结构,再将数据库载入网络中开始训练,设置学习率 α 为 0.01,经过数百次的迭代,损失函数开始收敛,当损失函数值趋于稳定后即可停止训练,训练过程如图 4,经过 554 次迭代,损失函数值为 1.5498×10^{-6} .

这样,便训练出了具有适应积分时间动态调整的红外图像非均匀性校正网络,再将训练好的网络参数部署到基于 VS 的红外图像采集平台中,即可对实景图像校正效果进行试验.

2.3 实验结果对比与分析

因为本文方法是基于定标数据,所以选择基于黑体定标的校正方法与本文方法进行对比.

2.3.1 非均匀性校正效果

图 5 为原始定标数据、基于黑体温度两点定标、积分时间两点定标与本文方法校正后的非均匀度 NU.由图 5 可知,原始黑体定标图的非均匀度随着积分时间的增加而增加,原始定标图像 NU 均值 2.36%.基于黑体温度定标方法,采集 $800 \mu\text{s}$ 积分时间下, $45 \text{ }^\circ\text{C}$ 以及 $80 \text{ }^\circ\text{C}$ 的黑体图像进行定标,仅对 $800 \mu\text{s}$ 及其邻近积分时间下的黑体红外图像非均匀性校正效果良好,而对其它积分时间效果变差,NU 均值约为 0.091%;而基于积分时间定标方法,是对 $55 \text{ }^\circ\text{C}$ 下的 $600 \mu\text{s}$ 以及 $1200 \mu\text{s}$ 积分时间采集的黑体红外图像进行定标,该方法对 $55 \text{ }^\circ\text{C}$ 下的黑体图像非均匀性校正良好,而对其它温度效果变差,NU 均值约为 0.104%;经本文方法校正后,在 $100 \sim 1600 \mu\text{s}$ 整个积分时间段内的校正效果都较为平稳,校正后的 NU 均值约为 0.042%,相较于前两种方法下降了超过 50%.

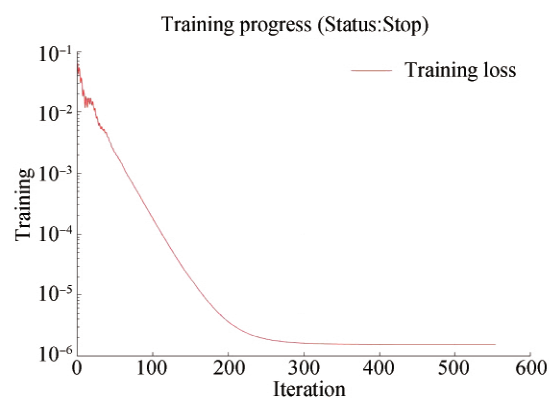


图 4 损失函数值
Fig.4 Loss function value

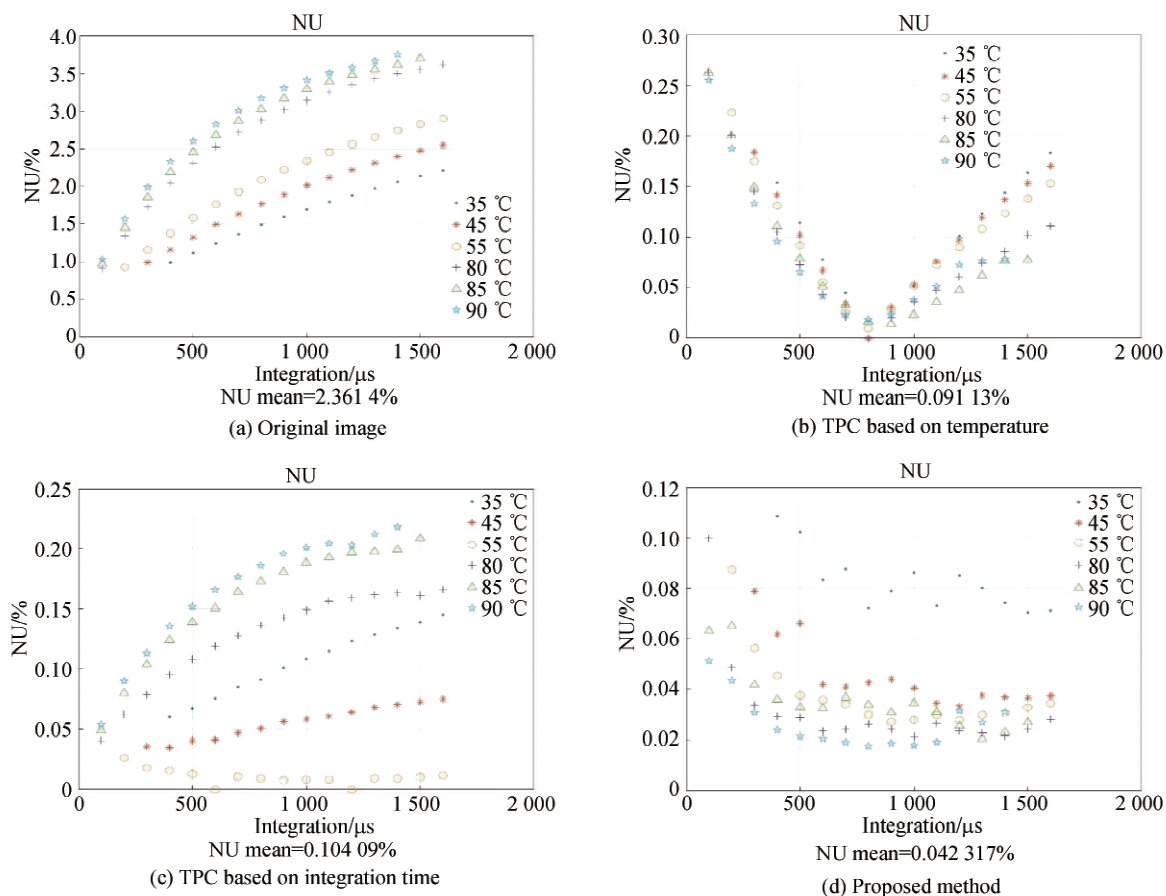


图5 定标数据校正前以及经不同方法校正后的非均匀度

Fig.5 Non-uniformity of calibration data before correction and after correction by different methods

再将效果较好的基于黑体温度两点定标法与本文方法进行实景图对比,经本文方法校正后,如图6所示的场景1中建筑、树木的轮廓比常规方法更为清晰,灰度层次更为丰富.图7所示场景2图像,是对天空图像的局部放大,仔细观察可以发现,两点法校正后天空背景仍存在残留条纹噪声,而经本文方法校正后条纹噪声更小.

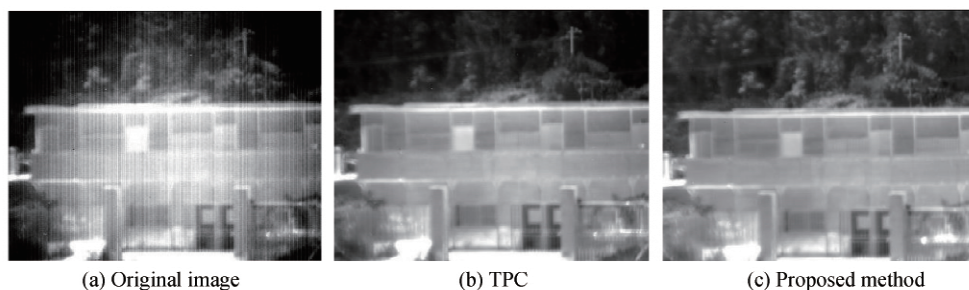


图6 场景1图像

Fig.6 Sample images for outdoor scene 1

2.3.2 变积分时间校正效果

实验先分别将相机积分时间设置为 $800\ \mu\text{s}$ 、 $900\ \mu\text{s}$ 和 $1\ 000\ \mu\text{s}$ 对实景图采集并用常规黑体温度两点定标法进行非均匀性校正,效果如图8.

经过两点定标法校正后,输出图像的平均灰度值分别为 5 010、5 265、5 429.可知,随着积分时间增加,两点法校正后的图像灰度值也在增加,均值相对变化量为 5.1%和 8.4%,对应到显示域时图像发生明显亮度变化.

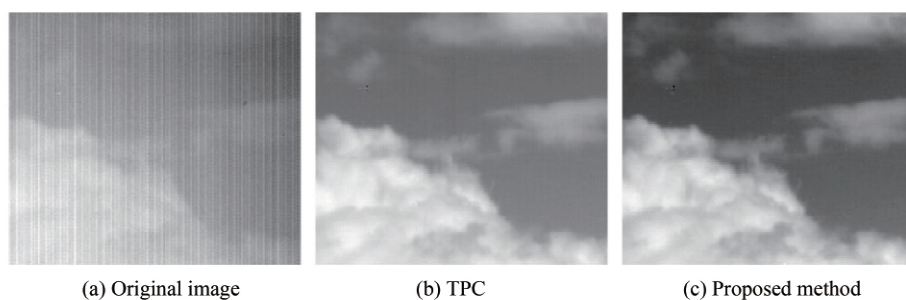


图7 场景2图像

Fig.7 Sample images for outdoor scene 2

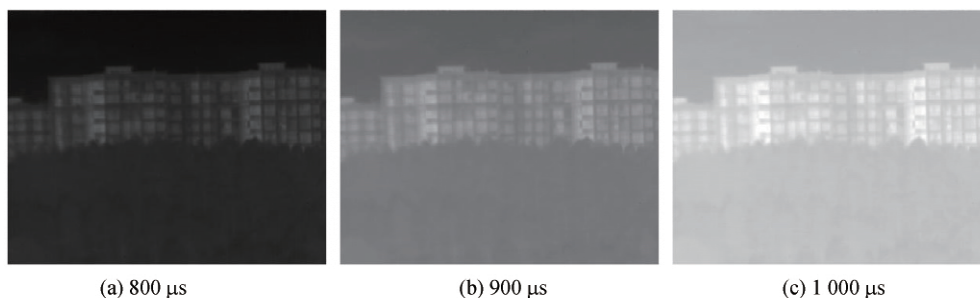


图8 不同积分时间下经两点法校正后的输出图像

Fig.8 Output images corrected by TPC with different integration time

使用本文方法在积分时间分别为 $800 \mu\text{s}$ 、 $900 \mu\text{s}$ 和 $1000 \mu\text{s}$ 时,对同一场景校正后输出的能量均值分别为 $3.666 \times 10^{-4} \text{ W/cm}^2$ 、 $3.676 \times 10^{-4} \text{ W/cm}^2$ 和 $3.680 \times 10^{-4} \text{ W/cm}^2$,均值相对变化量为 0.27% 和 0.38% ,较前面方法低一个数量级,对应到显示域时图像显示稳定,如图9所示.这是因为本文方法校正后输出图像的灰度值主要和目标辐射量相关,只要目标辐射量保持稳定,当积分时间改变时,图像灰度就能够保持稳定.

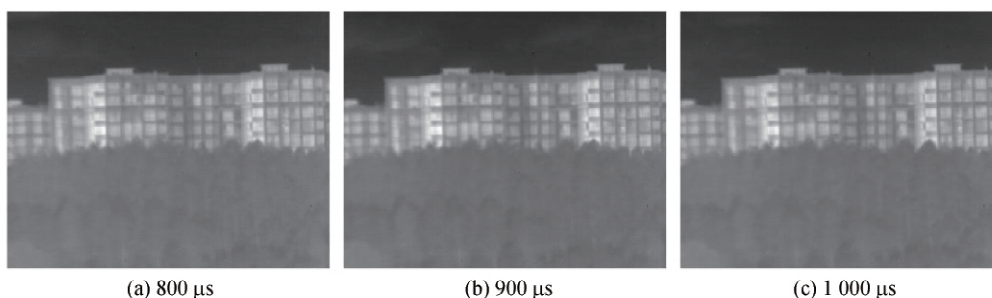


图9 不同积分时间下经本文方法校正后的输出图像

Fig.9 Output images corrected by proposed method with different integration time

2.3.3 减少定标数据点的影响

由于大量的定标会增加该方法应用的工作量,因此尝试减少定标数据点对网络进行训练,选取定标点的原则是使温度和积分时间的跨度尽量大.实验分别采用4、6以及8个定标点对网络进行训练,再用训练好的网络对所有定标点黑体图像进行校正,校正后的平均非均匀度 NU 如表1.

表1 不同定标点训练网络对所有定标点校正后的 NU 均值

Table 1 The mean of NU corrected by different calibration points training networks

	4 calibration points	6 calibration points	8 calibration points	88 calibration points
NU/%	0.047	0.046	0.043	0.042

实验结果表明,选取较少定标点训练出来的网络仍然能够接近整体定标点训练的效果,总体校正效果和选取的定标点误差有一定的关联.实验发现,环境温度的扰动对接近常温的低温定标点数据精度的影响会更大一些,如图5(d)所示, 35°C 黑体红外图像校正效果相比其它温度更差.因此,合理的选择定标点可以在保

证校正效果的前提下,降低定标工作量,有利于工程应用.

2.3.4 校正系数在线修正效果

最后,对于校正系数修正功能的验证,先使红外相机连续工作 2 h,探测元响应出现漂移,此时采集的图像经本文方法校正后的输出质量变差,图 10(a)中图像两边和底部偏亮,并带有一定条纹噪声和噪点.然后镜头切换温度均匀的遮光盖,开启对校正系数在线修正功能,经过大约 20 s 后,停止修正并打开遮光盖,采集的图像如图 10(b),对比修正前的图像中固有条纹噪声和噪点,修正后整体表现更加均匀.相机盖上遮光盖进行修正前非均匀度为 0.66%,进行修正后非均匀度为 0.08%,非均匀度下降了 87.9%.实验表明,在红外相机响应出现漂移时,本方法能够对其进行有效地修正.但需要注意的是,通常相机响应的漂移量很小,因此对偏置校正系数进行修正时,需要将其学习率适当降低,否则会出现校正系数不收敛的现象,反而破坏了校正系数.

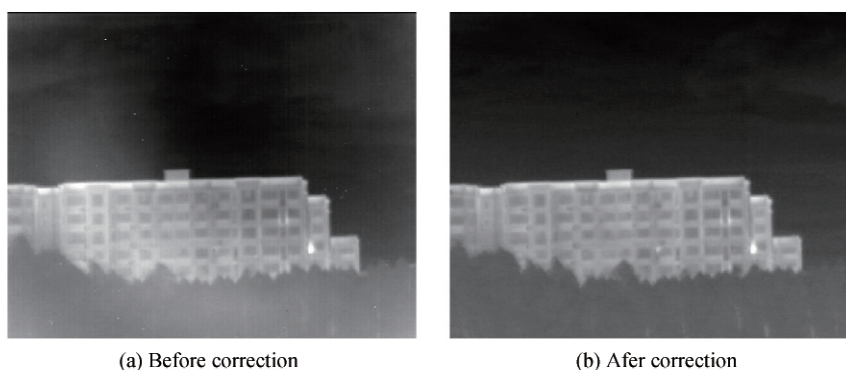


图 10 校正系数修正前后的图像

Fig.10 Image before and after correction coefficient modified

3 结论

本文提出了基于黑体定标数据,在红外辐射能量域利用神经网络对红外图像非均匀性进行校正的方法.该方法在定标时采集不同温度、不同积分时间的黑体图像,结合积分时间信息作为训练校正网络的输入,再对应的黑体辐射量作为网络输出的期望值,利用损失函数和误差反向传递机制训练校正神经网络.该方法结合自适应积分时间调节功能,能使红外探测器工作在最佳响应区间,拓展目标温度动态范围,同时输出的图像灰度值更为稳定,有利于红外系统后端的进一步处理.此外,针对红外探测器响应漂移的现象,在本文校正模型的基础上提出了一种对偏置校正系数在线修正的方法.在相机开始工作任务前,镜头切换遮光盖或均匀天空背景,对校正系数进行修正,经实验验证,该方法能够克服因红外相机长时间工作而产生的探测器响应漂移现象.

参考文献

- [1] HARRIS J G, CHIANG Y M. Nonuniformity correction using the constant-statistics constraint; analog and digital implementations[C]. SPIE, 1997, **3061**: 895-905.
- [2] CHANG Song-tao, LI Zhou. Single-reference-based solution for two-point nonuniformity correction of infrared focal plane array[J]. *Infrared Physics & Technology*, 2019, **101**: 96-104.
- [3] LIU Ya-mei. High-precision combined nonuniformity correction method based on local constant statistics[J]. *Acta Photonica Sinica*, 2019, **48**(6): 0604002.
刘亚梅. 基于局部恒定统计的高精度联合非均匀性校正方法[J]. *光子学报*, 2019, **48**(6): 0604002.
- [4] LI Jing, ZHU Bin, GUO Li-xin, et al. A method of non-uniformity correction based on adaptively adjusting integration time[J]. *Acta Photonica Sinica*, 2013, **42**(4): 486-490.
李晶,朱斌,郭立新,等. 一种积分时间自适应调整的非均匀性校正算法[J]. *光子学报*, 2013, **42**(4): 486-490.
- [5] LI Man-liang, WU Qin-zhang, XIA Mo, et al. Integral time real-time adjust method based on radiation calibration[J]. *Journal of Infrared Millimeter Wave*, 2014, **33**(3): 297-302.
李满良,吴钦章,夏默,等. 基于辐射标定的积分时间实时调整方法[J]. *红外与毫米波学报*, 2014, **33**(3): 297-302.
- [6] YU Yi, CHANG Song-tao, WANG Min, et al. Fast non-uniformity correction for high dynamic infrared radiometric system[J]. *Optics and Precision Engineering*, 2015, **23**(7): 1932-1938.
余毅,常松陶,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.

- [7] CHEN Nan, ZHANG Ji-qing, ZHONG Sheng-you, *et al.* Nonuniformity correction for variable-integration-time infrared camera[J]. *IEEE Photonics Journal*, 2018, **10**(6):1-11.
- [8] CUI Kun, CHEN Fan-sheng, SU Xiao-feng, *et al.* Adaptive non-uniformity correction method for IRFPA with integration time changing[J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2017, **46**(11): 77-83.
崔坤,陈凡胜,苏晓峰,等. 自适应积分时间改变的红外焦平面非均匀校正方法[J]. *红外与激光工程*, 2017, **46**(11):77-83.
- [9] SCRIBNER D A, SARKADY K A, KRUER M R, *et al.* Adaptive nonuniformity correction for IR focal plane arrays using neural networks[C]. SPIE, 1991, **1541**: 100-109.
- [10] ZHOU Yong-kang, ZHU You-pan, ZHAO De-li, *et al.* A review of scene-based nonuniformity correction algorithms for infrared focal plane arrays[J]. *Infrared Technology*, 2018, **40**(10): 952-960.
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.
- [11] ZHOU Shi-chun. Introduction to advanced infrared optoelectronic engineering[M]. 1st ed. Beijing: Science Press. 2018: 8-28.
周世椿. 高级红外光电工程导论[M]. 1版. 北京: 科学出版社, 2018: 8-28.
- [12] WEN Yong, LIU Si-chao, JIN You-shan, *et al.* Investigation on the nonlinearity of CTIA readout circuit[J]. *Laser & Infrared*, 2009, **39**(9): 978-981.
文勇,刘思超,金友山,等. CTIA型读出电路非线性的研究[J]. *激光与红外*, 2009, **39**(9):978-981.
- [13] LENG Han-bing, TANG Xin-yi, PENG Ding-xiang. Research on nonuniformity correction of IRFPA based on integral time adjust[J]. *Journal of Infrared Millimeter Wave*, 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.
- [14] CAO Y P, TISSE C L. Single-image-based solution for optics temperature-dependent nonuniformity correction in an uncooled longwave infrared camera[J]. *Optics Letters*, 2014, **39**(3): 646-648.
- [15] TORRES S N, HAYAT M M. Kalman filtering for adaptive nonuniformity correction in infrared focal-plane arrays[J]. *Journal of the Optical Society of America A Optics Image Science & Vision*, 2003, **20**(3): 470-480.
- [16] Shanghai Institute of Technical Physics, Chinese Academy of Sciences. GB/T 17444-1998 The technical norms measurement and test of characteristic parameters of infrared focal plane arrays[S]. Beijing: China Zhijian Publishing House, 1998.
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]. 北京: 中国标准社, 1998.