

# 多本底采样自适应非均匀校正算法

段程鹏 刘 伟 陈耀弘 谢庆胜 易 波 周祚峰

中国科学院西安光学精密机械研究所, 陕西 西安 710119

**摘要** 对于红外输出图像的非均匀性,通常可采用两点校正法和神经网络法进行改善。但两点校正法不能有效地克服环境温度漂移的影响;神经网络法收敛缓慢,使静止图像逐渐融入背景,导致运动目标出现伪像。提出一种多本底采样自适应非均匀校正算法,在不同的环境温度点采集多组高低温本底,根据最小二乘法拟合计算得到非均匀校正系数和环境温度的关系,根据环境温度的改变自适应完成非均匀校正。测试结果表明,该方法简单可行,能够较好地克服环境温度漂移的影响。

**关键词** 光计算;非均匀校正;神经网络法;多本底采样;最小二乘法

**中图分类号** TN215 **文献标识码** A

**doi:** 10.3788/AOS201636.1020001

## Multiple Background Sampling Adaptive Non-Uniform Correction Algorithm

Duan Chengpeng Liu Wei Chen Yaohong Xie Qingsheng Yi Bo Zhou Zuofeng

*Xi'an Institute of Optics and Fine Mechanics, Chinese Academy of Sciences, Xi'an, Shaanxi 710119, China*

**Abstract** To improve the non-uniformity of infrared output images, the two-point correction and neural network algorithms are commonly used. However, the two-point correction algorithm cannot overcome the influence of environmental temperature drift effectively. Due to the slow convergence speed of the neural network algorithm, the still images using the neural network algorithm gradually integrate to the background, and the moving target appears an artifact. So a multiple background sampling adaptive non-uniform correction algorithm is proposed, and multiple groups of high- and low-temperature backgrounds are collected at different temperature points. The relationship between the achieved non-uniform correction coefficient and the environmental temperature is fitted by means of the least square method, and the adaptive non-uniform correction is implemented based the change of the environmental temperature. Test results show that this method is simple and feasible, and it can effectively overcome the influence of environmental temperature drift.

**Key words** optics in computing; non-uniform correction; neural network algorithm; multiple-background sampling; least square method

**OCIS codes** 200.4740; 140.3070; 100.2000; 100.2550; 040.1240

## 1 引 言

红外焦平面阵列由于受到环境温度漂移等因素的影响,输出图像会出现严重的非均匀现象。为了改善红外输出图像的非均匀性,基于定标的两点校正法和基于场景的神经网络法被广泛使用。两点定标法随着环境温度的漂移,校正后残差逐渐增大,图像质量也逐渐下降;神经网络法能够克服环境温度漂移的影响,但校正后输出图像对比度不高,图像边缘模糊且有重影,工程实现难度大<sup>[1-3]</sup>。

针对现有非均匀校正算法的不足,本文提出一种多本底采样自适应非均匀校正算法,针对不同的环境温度采集得到不同的高低温本底,计算得到不同环境温度对应的非均匀校正系数,根据最小二乘法得到校正系数和环境温度的拟合曲线,并将拟合系数进行存储,根据温度传感器实时测得的环境温度,调用不同的拟合系数,完成非均匀校正。测试结果表明,多本底采样自适应非均匀校正算法能够克服环境温度漂移的影响,

**收稿日期:** 2016-02-22; **收到修改稿日期:** 2016-05-23

**基金项目:** 国家自然科学基金(61201376)

**作者简介:** 段程鹏(1987—),男,硕士,主要从事红外探测器方面的工作。E-mail: duanchengpeng@opt.ac.cn

易于工程实现,具有理想的校正效果。

## 2 传统非均匀校正算法

### 2.1 两点校正法

假定红外焦平面阵列各像元的响应特性在所测温度范围内为线性的,采用两点校正法能够消除像元输出图像的乘性和加性噪声。两点校正法计算公式可表示为

$$Y_{ij} = a_{ij} X_{ij}(\Phi) + b_{ij}, \quad (1)$$

式中  $X_{ij}(\Phi)$  为探测器输出原始图像的灰度值,  $\Phi$  表示焦平面阵列所接收的辐通量,  $Y_{ij}$  为校正后输出图像的灰度值,  $a_{ij}$  和  $b_{ij}$  分别为校正增益系数和偏移系数,  $i$  和  $j$  分别表示焦平面阵列的行号和列号。在一定环境温度条件下,分别对高低温黑体进行采样,得到探测器所有像元响应灰度的平均值分别为  $Y_H$  和  $Y_L$ 。假定  $\bar{X}_{ij}(\Phi_H)$  和  $\bar{X}_{ij}(\Phi_L)$  分别对应高低温条件下  $S$  帧图像各个像元响应灰度的平均值,能够求得各响应像元的校正系数为

$$\begin{cases} a_{ij} = \frac{Y_H - Y_L}{\bar{X}_{ij}(\Phi_H) - \bar{X}_{ij}(\Phi_L)} \\ b_{ij} = Y_H - a_{ij} \bar{X}_{ij}(\Phi_H) \end{cases} \quad (2)$$

在环境温度不变的条件,根据(2)式能够得到较好的非均匀校正效果,但随着环境温度的漂移,探测器输出图像发生漂移,此时利用(2)式不能得到理想的校正后输出图像。

### 2.2 神经网络法

神经网络算法通常包括输入层、非均匀性校正(NUC)层、输出层和隐含层。利用最陡下降法能够对校正增益和偏移系数进行反馈修正,自适应完成非均匀校正<sup>[4-5]</sup>。神经网络算法流程框图如图1所示。图1中  $X_n$  和  $Y_n$  分别表示探测器输出的原始图像和校正后图像,NUC层根据当前的校正增益和偏移系数,对当前层输入图像进行非均匀校正,其具体表达式为

$$Y_n(i, j) = G_n(i, j) X_n(i, j) + O_n(i, j), \quad (3)$$

式中  $G_n(i, j)$  和  $O_n(i, j)$  分别为当前帧所对应的校正增益和偏移系数,  $n$  为焦平面阵列的像元数。

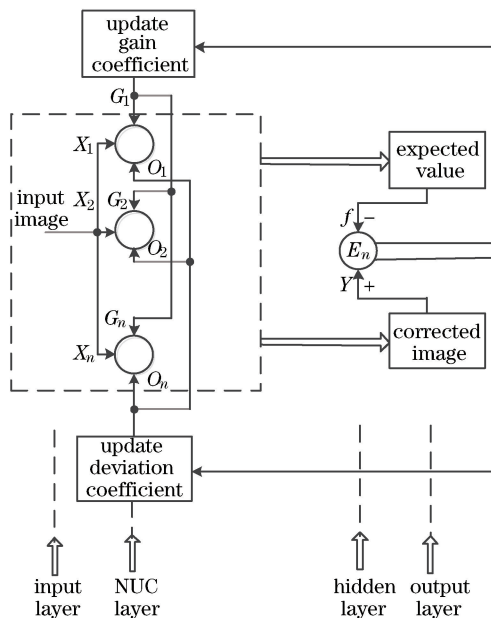


图1 神经网络算法流程框图

Fig. 1 Flow chart of neural network algorithm

隐含层通常取待测像素点的四邻域灰度平均值作为该像素点的期望输出值,对输入图像进行线性平滑,其对应的具体表达式为

$$f_n(i, j) = \frac{1}{4}[X_n(i-1, j) + X_n(i+1, j) + X_n(i, j-1) + X_n(i, j+1)], \quad (4)$$

式中  $f_n(i, j)$  为待测像素点的期望输出值。

假定当前帧期望输出值与实际输出值之差为误差信号  $E_n(i, j)$ , 则  $E_n(i, j)$  可表示为

$$E_n(i, j) = [Y_n(i, j) - f_n(i, j)]^2. \quad (5)$$

利用最陡下降法, 将  $E_n(i, j)$  分别对  $G_n(i, j)$  和  $O_n(i, j)$  求导, 可得

$$\begin{cases} \frac{\partial E_n(i, j)}{\partial G_n(i, j)} = 2X_n(i, j)[Y_n(i, j) - f_n(i, j)] \\ \frac{\partial E_n(i, j)}{\partial O_n(i, j)} = 2[Y_n(i, j) - f_n(i, j)] \end{cases}. \quad (6)$$

选取一定的校正系数初始值和迭代步长, 根据设定的阈值对(6)式进行反复迭代运算, 直至收敛。

实际测试结果表明, 神经网络迭代算法能够克服环境温度漂移的影响。但由于需经过较长时间才能收敛, 待测像素点的期望输出值会逐渐趋近其邻域点的灰度值, 使静止图像逐渐融入背景, 图像模糊, 运动图像出现拖影等问题。

### 3 多本底采样自适应非均匀校正法

针对两点校正法不能有效克服环境温度漂移影响, 神经网络法算法复杂, 不利于工程实现等缺点, 提出一种多本底采样自适应非均匀校正算法, 针对不同的环境温度采集得到不同的高低本底, 计算得到不同环境温度对应的非均匀校正系数, 根据最小二乘法得到校正系数和环境温度的拟合曲线, 利用温度传感器实时采集的环境温度值, 自适应调取相应的拟合系数, 完成非均匀校正<sup>[6-8]</sup>。

在室温 25 °C 条件下, 随着时间的推移, 探测器针对不同温度目标的灰度值输出响应曲线如图 2 所示。在不同的环境温度条件下, 不同温度目标的灰度值输出响应曲线如图 3 所示。

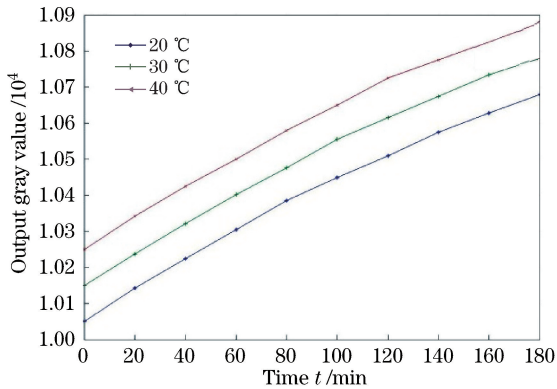


图 2 相同环境温度下探测器的输出

Fig. 2 Output gray values of detector at same environmental temperature

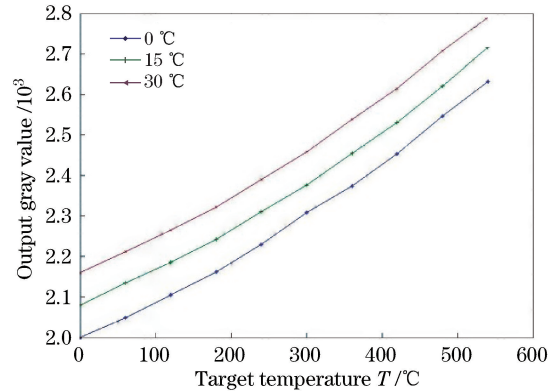


图 3 不同环境温度下探测器的输出

Fig. 3 Output gray values of detector at different environmental temperatures

根据图 2 和图 3 可知, 当环境温度发生漂移时, 采用原有的校正系数不能得到很好的校正后输出图像, 故需要根据环境温度的变化自适应地更新校正系数。

选取 6 个不同的温度点  $T_1, T_2, T_3, T_4, T_5, T_6$  作为环境温度变化的温度区间, 在每个温度点分别对高低温黑体进行采样, 可得到 6 组不同的高低本底  $[Y_{H1}, Y_{L1}], [Y_{H2}, Y_{L2}], [Y_{H3}, Y_{L3}], [Y_{H4}, Y_{L4}], [Y_{H5}, Y_{L5}], [Y_{H6}, Y_{L6}]$ , 根据(2)式分别计算校正系数, 得到 6 组不同的校正系数为  $[G_1(i, j), O_1(i, j)], [G_2(i, j), O_2(i, j)], [G_3(i, j), O_3(i, j)], [G_4(i, j), O_4(i, j)], [G_5(i, j), O_5(i, j)], [G_6(i, j), O_6(i, j)]$ 。

为了方便应用, 按照最小二乘法拟合公式可得非均匀校正增益和偏移系数的计算表达式为

$$\begin{cases} G = A_G \cdot T^3 + B_G \cdot T^2 + C_G \cdot T + D_G \\ O = A_O \cdot T^3 + B_O \cdot T^2 + C_O \cdot T + D_O \end{cases}, \quad (7)$$

式中  $A_G, B_G, C_G, D_G$  为校正增益拟合系数,  $A_O, B_O, C_O, D_O$  为校正偏移拟合系数。(7)式为三阶拟合, 最终将拟合系数进行存储。

经过理论分析及实验验证可知, 采用 3 阶最小二乘拟合可得到较好的非均匀校正效果。在不同的环境温度条件下, 按照(7)式进行计算, 得到此时对应的非均匀校正系数, 进而完成自适应非均匀校正。多本底采样自适应非均匀校正算法流程图如图 4 所示。

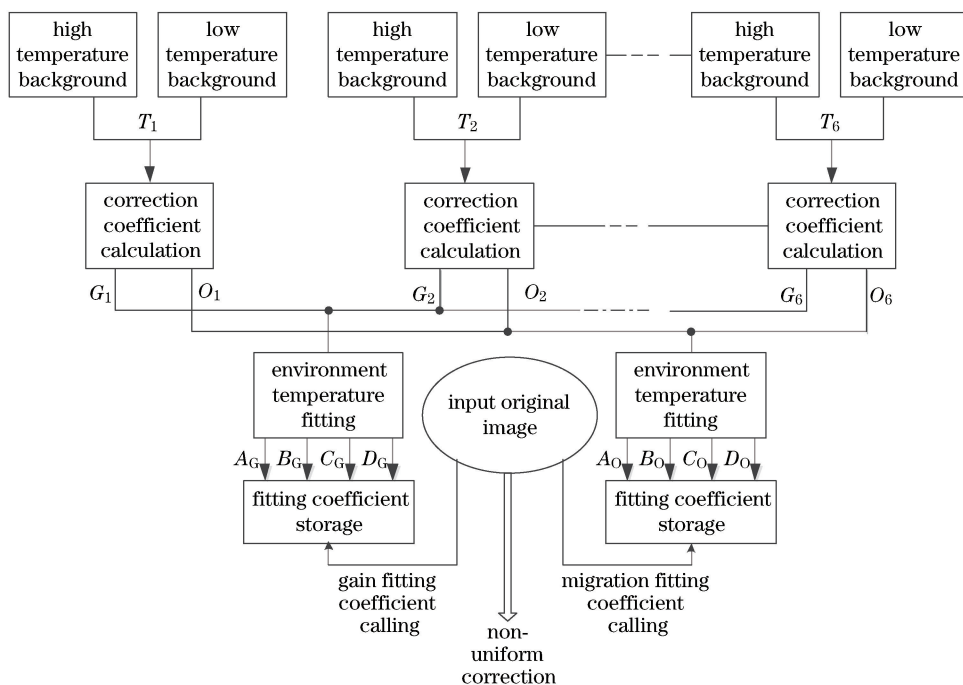


图 4 多本底采样自适应非均匀校正算法流程图

Fig. 4 Flow chart of multiple background sampling adaptive non-uniform correction algorithm

### 4 算法实现及结果分析

根据所提出的多本底采样自适应非均匀校正算法, 在  $-10, 0, 10, 20, 30, 40$  °C 共 6 个不同的环境温度点分别对高低温黑体进行采样, 得到 6 组不同的高低温本底, 根据高低温本底计算得到 6 组不同的非均匀校正系数, 第一组校正增益系数和偏移系数二维(2D)条形图分别如图 5 和图 6 所示。

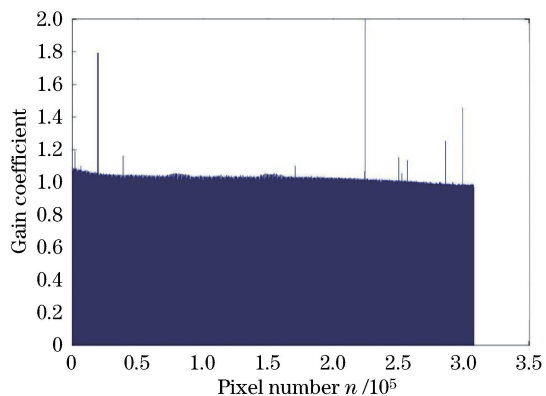


图 5 校正增益系数二维条形图

Fig. 5 2D grayscale of correction gain coefficient

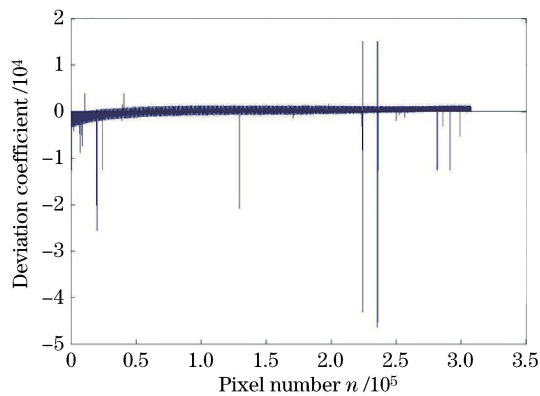


图 6 校正偏移系数二维条形图

Fig. 6 2D grayscale of correction deviation coefficient

由图 5 可知,校正增益系数分布在 1 附近。由图 6 可知,校正偏移系数分布范围较宽,具有较大的偏差,为了得到更高的校正精度,通常需要采集多组高低温本底。

为了对多本底采样自适应非均匀校正的效果进行验证,选取不同的环境温度点,对探测器输出的原始图像分别进行采集,将原始图像分别采用两点校正法、神经网络法和多本底采样自适应校正法三种方法进行非均匀校正,将得到的校正后图像及校正前图像分别导入 Matlab 工具软件,可得到不同环境温度条件下校正前及校正后的输出图像。

在 22 °C 环境温度条件下,得到的校正前及校正后图像如图 7 所示。在 28 °C 环境温度条件下,得到的校正前及校正后的图像如图 8 所示。

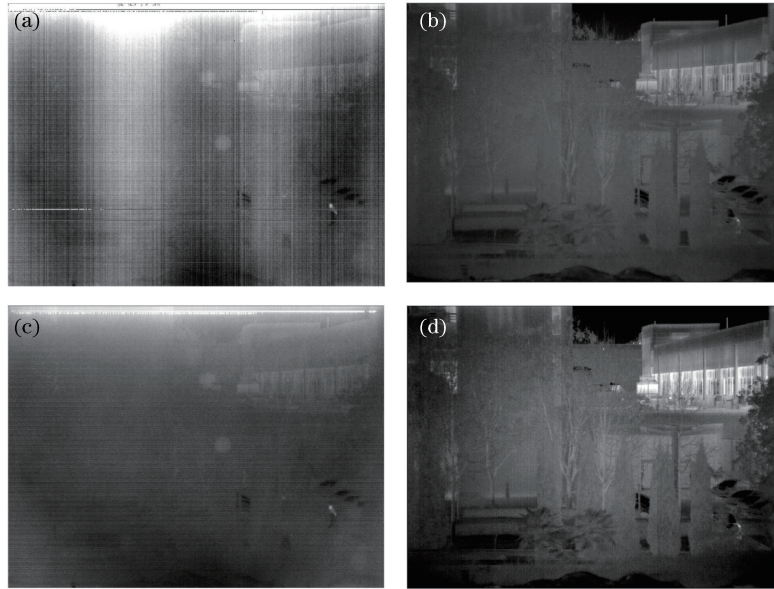


图 7 22 °C 环境温度条件下校正前及不同方法校正后图像。(a)校正前图像;(b)两点校正法校正后图像;  
(c)神经网络法校正后图像;(d)多本底校正法校正后图像

Fig. 7 Non-corrected image and corrected images using different correction algorithms at environmental temperature of 22 °C.  
(a) Non-corrected image; (b) corrected image using two point correction algorithm; (c) corrected image using neural network algorithm; (d) corrected image using multiple background correction algorithm

结合图 7 和图 8 可以看出:1)两点校正法不能得到理想的校正后输出图像,这是因为随着环境温度的漂移,校正后残差逐渐增大;2)神经网络法能够克服环境温度漂移影响,但收敛速度较慢,校正后输出图像出现模糊重影现象;3)多本底采样自适应校正法能够根据环境温度变化自适应更新校正系数,得到理想的校正后输出图像。

采用峰值信噪比  $R_{PSN}$  对输出图像质量进行评价,其表达式为

$$\begin{cases} R_{PSN} = 20 \cdot \lg\left(\frac{2^b}{x_{RMS}}\right) \\ x_{RMS} = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{k=1}^n (Y_k - X_k)^2} \end{cases}, \quad (8)$$

式中  $x_{RMS}$  为输出图像均方根误差, $b$  为输出图像灰度有效位数, $k$  为焦平面阵列像元的序号, $X_k$  为校正前图像灰度值, $Y_k$  为校正后图像灰度值。不同环境温度下不同方法的峰值信噪比  $R_{PSN}$  对比如表 1 所示。

由表 1 可知:随着环境温度的漂移,两点校正法输出图像非均匀性变差,峰值信噪比逐渐下降;随着环境温度的漂移,神经网络法输出图像的峰值信噪比数值需经过较长时间才能趋于稳定,收敛速度较慢;多本底采样自适应校正法输出图像峰值信噪比没有明显的变化,这是由于该方法能够根据环境温度变化自适应更新校正系数。

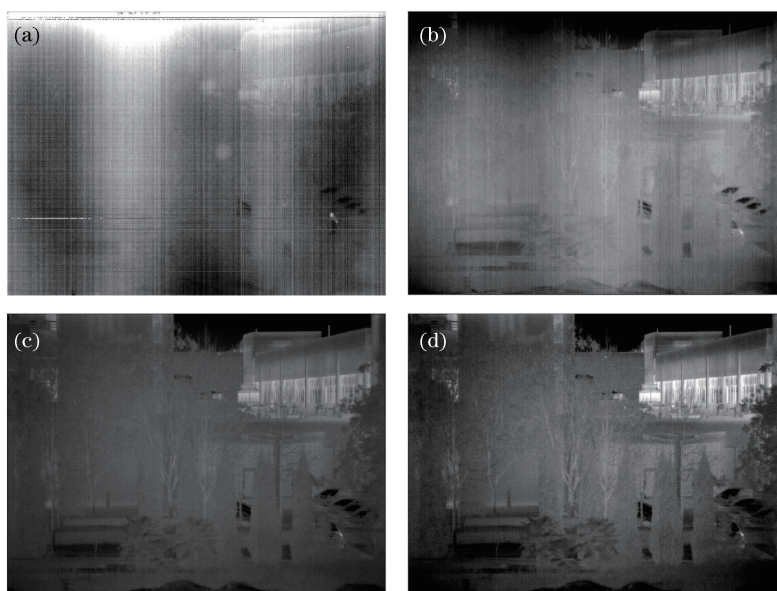


图 8 28 °C 环境温度条件下校正前及不同方法校正后图像。(a)校正前图像;(b)两点校正法校正后图像;  
(c)神经网络法校正后图像;(d)多本底校正法校正后图像

Fig. 8 Non-corrected image and corrected images using different correction algorithms at environmental temperature of 28 °C .

(a) Non-corrected image; (b) corrected image using two point correction algorithm; (c) corrected image using neural network algorithm; (d) corrected image using multiple background correction algorithm

表 1 不同环境温度下不同方法峰值信噪比  $R_{\text{PSN}}$  对比

Table 1 Comparison of peak signal-to-noise ratio under different algorithms at different environment temperatures

Environmental temperature /°C	$R_{\text{PSN}}$			
	Non-corrected image	Two point correction algorithm	Neural network algorithm	Multiple background correction algorithm
3	6.8569	7.3845	7.3236	7.4587
5	6.8156	7.3638	7.3327	7.4469
8	6.7748	7.3476	7.3409	7.4488
11	6.7632	7.3234	7.3512	7.4516
14	6.7386	7.3105	7.3608	7.4495
17	6.7242	7.2986	7.3713	7.4502
20	6.7167	7.2814	7.3805	7.4497
23	6.6915	7.2631	7.3806	7.4508

## 5 结 论

针对红外输出图像的非均匀性,研究了目前常用的非均匀校正算法——两点校正法和神经网络法,对两种算法的不足进行了深入分析。在理论分析及仿真实验基础上,提出了多本底采样自适应非均匀校正算法。测试结果表明该自适应算法能够克服环境温度漂移的影响,得到理想的校正后输出图像,且算法简单可行,易于工程化实现。

## 参 考 文 献

- 1 Wu Zepeng, Jia Hongguang, Xuan Ming, *et al.* Nonuniformity correction algorithm for infrared focal plane arrays based on extended total variation[J]. *Acta Optica Sinica*, 2014, 34(3): 0304001.  
吴泽鹏, 贾宏光, 宣明, 等. 基于扩展全变分的红外焦平面阵列非均匀性校正方法[J]. *光学学报*, 2014, 34(3): 0304001.
- 2 Chen Baoguo, Zhang Xuefeng, Niu Yingyu. Improved nonuniformity correction algorithm based on neural network[J].

- Infrared and Laser Engineering, 2013, 42(3): 574-578.
- 陈宝国, 张学峰, 牛英宇. 改进的基于神经网络的非均匀性校正算法[J]. 红外与激光工程, 2013, 42(3): 574-578.
- 3 Liu Yongjin, Zhang Guohua, Zhao Yigong. Non-uniformity correction algorithm of using mixed Kalman filter[J]. Journal of Xidian University, 2012, 39(6): 195-200.
- 刘永进, 张国华, 赵亦工. 混合卡尔曼滤波的非均匀校正算法[J]. 西安电子科技大学学报, 2012, 39(6): 195-200.
- 4 Chen Shiwei, Yang Xiaogang, Zhang Shengxiu, *et al.* Research on non-uniformity correction algorithm of IRFPA based on adjusting integral time[J]. Acta Photonica Sinica, 2013, 42(4): 475-479.
- 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.
- 5 Leng Hanbing, Xie Qingsheng, Liu Wei, *et al.* Adaptive nonuniformity correction for IRFPA based on Bayesian estimation[J]. Acta Optica Sinica, 2014, 34(9): 0910001.
- 冷寒冰, 谢庆胜, 刘 伟, 等. 基于贝叶斯估计的 IRFPA 自适应非均匀性校正[J]. 光学学报, 2014, 34(9): 0910001.
- 6 Qu Huiming, Chen Qian. Surrounding temperature compensation for infrared focal plane arrays non-uniformity correction [J]. Infrared and Laser Engineering, 2011, 40(12): 2328-2332.
- 屈慧明, 陈 钱. 环境温度补偿的红外焦平面阵列非均匀性校正[J]. 红外与激光工程, 2011, 40(12): 2328-2332.
- 7 Lai Rui, Yang Yintang, Wang Bingjian, *et al.* S-curve model-based adaptive algorithm for non-uniformity correction in infrared focal plane arrays[J]. Acta Optica Sinica, 2009, 29(4): 927-931.
- 赖 瑞, 杨银堂, 王炳健, 等. 一种基于 S 曲线模型的红外焦平面阵列非均匀性自适应校正算法[J]. 光学学报, 2009, 29(4): 927-931.
- 8 Yildirim O O, Akin T. A dynamic resistance non-uniformity compensation circuit for uncooled microbolometer detector arrays[C]. SPIE, 2006, 6206: 62061T.