

## 基于衬底温度的红外焦平面联合非均匀性校正

唐艳秋<sup>1,2</sup>, 孙强<sup>1</sup>, 赵建<sup>1</sup>, 姚凯男<sup>1,2</sup>

- (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. 中国科学院大学, 北京 100049)

**摘要:** 分别分析了红外焦平面阵列(IRFPA)基于定标的非均匀性校正法(NUC)和基于场景的 NUC 算法各自的优势和问题, 在此基础上提出了联合非均匀性校正方法。根据上电时刻焦平面衬底的温度值, 从 FLASH 中提取事先存储的对应温度区间的增益和偏置校正参数, 初步消除探测器的非均匀性。通过分析初步校正后图像残余非均匀性噪声的特性, 提出了用具有保边缘特性的 P-M 滤波取代传统神经网络算法中的四邻域均值滤波来获得期望图像, 从而减小了图像边缘误差。实验结果表明, 该算法收敛速度快, 校正精度高, 有效避免了因红外焦平面响应特性漂移而引起的图像降质。

**关键词:** IRFPA; 联合非均匀性校正; 衬底温度; 神经网络算法; P-M 模型算法

**中图分类号:** TN219   **文献标志码:** A   **DOI:** 10.3788/IRLA201645.0304002

## Combined nonuniformity correction algorithm of infrared focal plane arrays based on substrate temperature

Tang Yanqiu<sup>1,2</sup>, Sun Qiang<sup>1</sup>, Zhao Jian<sup>1</sup>, Yao Kainan<sup>1,2</sup>

- (1. Changchun Institute of Optics, Fine Mechanics and Physics, Chinese Academy of Sciences, Changchun 130033, China;
2. University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China)

**Abstract:** The advantages and disadvantages in nonuniformity correction (NUC) algorithms based on calibration and scene of infrared focal plane arrays(IRFPA) were analysed separately. The combined NUC algorithm was presented. The thermal imaging system extracted the gain and offset factor from the FLASH which stored beforehand according to the substrate temperature of the IRFPA at the moment of power on. These factor was adopted to remove the nonuniformity of the detector simply. Based on the analysis of the characteristic of residual noise after initial correction, the P-M filter was used to replace the linear spatial average filter in the Neural Network nonuniformity correction algorithm (NN-NUC), which could preserve the image edge. Experimental results show that the proposed algorithm can accelerate the rate of convergence, reduces the correction error largely, and avoids the image degradation caused by the response drift of IRFPA.

**Key words:** IRFPA; combined nonuniformity correction; substrate temperature; neural network algorithm; P&M model algorithm

收稿日期: 2015-07-05; 修订日期: 2015-08-03

基金项目: 吉林省重点科技攻关项目(20140204030GX); 长春市科技局重大科技攻关计划(14KG011)

作者简介: 唐艳秋(1986-), 女, 博士生, 主要从事红外成像方面的研究。Email: woshitangyanqiu1@126.com

导师简介: 孙强(1971-), 男, 研究员, 博士生导师, 从事现代红外光学仪器方面的研究。Email: sunq@ciomp.an.cn

## 0 引言

近年来,红外热成像技术广泛地应用于国防、医学以及森林防火等领域。然而由于制造工艺等方面因素,导致红外焦平面(IRFPA)存在严重的非均匀性问题,严重影响了图像质量,因此需要对红外图像进行非均匀性校正(NUC)<sup>[1]</sup>。

目前常见的非均匀性校正方法主要分为两大类:一类是基于定标的校正方法(BBNUC),典型的有一点校正法、两点校正法以及多点校正法等<sup>[2]</sup>;另一类是基于场景的校正算法(SBNUC),主要有恒定统计法、时域高通滤波法以及神经网络算法等<sup>[3-4]</sup>。基于定标的校正方法具有较好的校正效果,算法简单,易于硬件实现,但随着时间和环境因素的变化,FPA的响应率会发生漂移,使得当前校正参数不再适用,因此需要周期性的停机重新标定,从而影响系统的正常工作;而基于场景的校正方法通过对场景信息进行估计,提取校正参数,可以克服探测器因时间和环境因素带来的响应特性变化,具有自适应性和智能性,不过这类算法通常比较复杂,收敛速度较慢,而且还存在较强的鬼影现象和图像退化问题。

文中提出了一种基于衬底温度的非均匀性联合校正算法,该算法综合了BBNUC算法和SBNUC算法的优势,取长补短,有效地克服了各自的缺点<sup>[5-6]</sup>。该算法充分利用了BBNUC算法校正精度高,速度快等优点,根据探测器上电时刻的衬底温度,从系统FLASH中选取一组预先存储的参数作为初始参数,然后再采用SBNUC算法对参数进行实时更新,从而消除响应率漂移造成的参数误差,进一步提高了校正精度,增强了算法的环境试验性。

## 1 联合非均匀性校正算法

### 1.1 基于衬底温度的校正方法

基于定标的校正算法由于时间和环境温度的变化,探测器的响应率会发生漂移,导致原有的校正参数失效。根据参考文献[7],探测器的响应率可表示为:

$$\mathcal{R}_v = V_b \frac{RR_L \alpha}{(R+R_L)^2} \frac{1}{g} \frac{1}{1+\beta \frac{R-R_L}{R+R_L}} \quad (1)$$

式中: $V_b$ 为偏置电压; $R_L$ 为负载电阻; $R$ 为微测辐射热计的电阻; $g$ 为微测辐射热计的热导; $\alpha$ 、 $\beta$ 分别为电阻

温度系数和热电参数。各参数之间的关系可通过探测器偏置电路的等效电路图来说明,如图1所示。

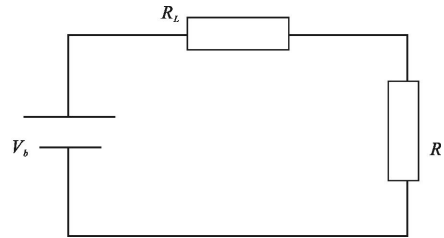


图1 探测器偏置电路等效电路图

Fig.1 Equivalent circuit of the detector

对于特定的探测器, $R_L$ 、 $V_b$ 、 $g$ 等均为定值,而 $R$ 、 $\alpha$ 、 $\beta$ 则与探测器的温度有关,因此探测器温度发生变化,必然会引起响应率的变化。若能准确获得探测器的温度,则能有效地解决BBNUC算法参数漂移的问题,从而获得更好的校正效果。

目前的探测器为了获得较好的热隔离效果,将探测器热敏元置于真空管壳内,难于获取热敏元的温度,因此必须另辟蹊径。根据热平衡原理,探测器热敏元的热传递主要有热敏元和衬底之间的热传导和热辐射、偏置电压产生的焦耳热、热敏元接收到红外辐射以及热敏元自身的辐射散热<sup>[7]</sup>,用公式表示为:

$$C \frac{dT}{dt} = IV + Q - g(T - T_s) \quad (2)$$

$$V = V_b \frac{R}{R + R_L}$$

$$I = \frac{V_b}{R + R_L}$$

式中: $C$ 为热敏元的比热容; $Q$ 为热敏元吸收的净辐射功率; $T$ 和 $T_s$ 分别为热敏元和衬底的温度。对公式(2)进行积分,得到:

$$T = T_s + \frac{IV + Q}{g} (1 - e^{-\frac{t}{C/g}}) \quad (3)$$

由公式(3)可得,当 $t=0$ 时, $T=T_s$ ,因此在刚上电时刻,通过读取衬底温度即可近似得到热敏元的当前温度,根据该温度从FLASH中提取预先存储的对应的增益和偏置校正系数,对图像进行预处理。

### 1.2 神经网络校正算法

由参考文献[8]可知,在未经校正的红外图像中,非均匀性噪声主要为低频成分,经过两点定标和盲元补偿后,残余噪声在低频部分有较大降低,而由增益引起的高频噪声则有较大增加,这与神经网络

算法(NN-NUC)的非均匀性噪声主要为白噪声或者高频噪声的前提条件相吻合,因此,将基于衬底温度的校正法和神经网络算法相结合,能够获得更快的收敛速度和更高的校正精度。

一般用线性模型来描述红外焦平面的响应,如下式所示:

$$y_{ij}(n)=a_{ij}(n)*x_{ij}(n)+b_{ij}(n) \quad (4)$$

式中: $y_{ij}(n)$ 表示包含非均匀性的原始图像; $a_{ij}(n)$ 和 $b_{ij}(n)$ 分别代表第 $n$ 帧图像 $(i,j)$ 像元的增益和偏置系数; $x_{ij}(n)$ 为真实的图像。为了方便对非均匀性进行校正,将上式变换为:

$$x_{ij}'(n)=g_{ij}(n)*y_{ij}(n)+o_{ij}(n) \quad (5)$$

式中: $g_{ij}(n)$ 和 $o_{ij}(n)$ 分别为 $(i,j)$ 点的增益和偏置校正系数; $x_{ij}'(n)$ 为对真实图像的估计值。

D.A.Scribner 等人提出的 NN-NUC 算法模拟人眼视网膜中低层处理机制,利用某像元的四邻域均值作为该像元的理想输出,并将该值反馈到校正系数调整环节,对增益和偏置校正系数进行实时更新,从而对图像进行实时非均匀性校正。具体过程如下。

像元 $(i,j)$ 的期望值输出为:

$$f_{ij}(n)=\frac{1}{4}(x'_{i,j-1}(n)+x'_{i,j+1}(n)+x'_{i-1,j}(n)+x'_{i+1,j}(n)) \quad (6)$$

定义误差函数 $e_{ij}$ ,用以表征校正后图像与真实图像的偏差:

$$e_{ij}(n)=x_{ij}'(n)-f_{ij}(n)=(g_{ij}(n)*y_{ij}(n)+o_{ij}(n))-f_{ij}(n) \quad (7)$$

采用最陡下降法得到增益和偏置校正系数的迭代公式:

$$\begin{aligned} g_{ij}(n+1) &= g_{ij}(n) - 2\mu * y_{ij}(n) * e_{ij}(n) \\ o_{ij}(n+1) &= o_{ij}(n) - 2\mu * e_{ij}(n) \end{aligned} \quad (8)$$

式中: $\mu$ 值代表迭代步长,决定了算法的收敛速度和稳定性,步长太小,导致算法收敛速度太慢,迭代步长过大,则算法稳定性变差,可能出现异常图像,因此合理选择 $\mu$ 值是该算法的难点。

传统的 NN-NUC 算法采用四邻域均值作为某像素点的期望值,在图像平坦区域,由于图像是缓慢变化的,因此这种估计是合理的,但若是在图像灰度变化较大的地方,例如图像边缘区域,由于四邻域均值算法具有各向同性扩散的特性,对图像边缘不具有保护作用,因此在平滑图像的同时模糊了图像边缘,随着迭代次数的增加,图像边缘细节信息逐渐消失。为了在去除非均匀性的同时保留图像的边缘细

节信息,文中采用 Perona 和 Malik 提出的各向异性扩散模型(P-M 模型)<sup>[9]</sup>。该模型为基于图像梯度(灰度差)特征的偏微分方程,引入了扩散系数,在图像灰度变化急剧(图像边缘)的地方低速扩散,在灰度变化平缓区域加速扩散。

经过 P-M 滤波后的图像用公式表示为:

$$x_{ij}''(n)=x_{ij}'(n)+\lambda(C_U*\nabla_U x_{ij}'(n)+C_D*\nabla_D x_{ij}'(n)+C_L*\nabla_L x_{ij}'(n)+C_R*\nabla_R x_{ij}'(n)) \quad (9)$$

式中: $x_{ij}'(n)$ 为经过 $n$ 次迭代后的 $(i,j)$ 点的像素灰度值; $\lambda$ 为确保图像稳定而引入的参数值, $0 \leq \lambda \leq 1/4$ ;  $U$ 、 $D$ 、 $L$ 和 $R$ 分别代表 UP、DOWN、LEFT 和 RIGHT 四个方向,各方向的梯度值分别为:

$$\begin{aligned} \nabla_U x_{ij}'(n) &= x'_{i,j-1}(n) - x_{ij}'(n) \\ \nabla_D x_{ij}'(n) &= x'_{i,j+1}(n) - x_{ij}'(n) \\ \nabla_L x_{ij}'(n) &= x'_{i-1,j}(n) - x_{ij}'(n) \\ \nabla_R x_{ij}'(n) &= x'_{i+1,j}(n) - x_{ij}'(n) \end{aligned} \quad (10)$$

扩散系数 $C$ 为图像的梯度函数,它是一个梯度的单调递减函数。对于一副图像,在边缘处,梯度通常较大, $C$ 值较小,扩散程度变小;在平坦区域,梯度较小,则 $C$ 值较大,扩散程度较大,这样就可以有选择地对图像进行平滑,达到去除非均匀性的同时保留图像边缘细节信息。

通过以上对扩散系数 $C$ 的分析,文中采用改进型的 P-M 扩散方程:

$$\begin{cases} C_{ij}(n) = \frac{1}{1 + \frac{(\nabla x_{ij}'(n))^2}{K^2}}, & |\nabla x_{ij}'(n)| < T_{\text{阈}} \\ C_{ij}(n) = 0, & |\nabla x_{ij}'(n)| > T_{\text{阈}} \end{cases} \quad (11)$$

式中: $K$ 为预先设定的常数; $T_{\text{阈}}$ 为设定的梯度阈值,当梯度大于 $T_{\text{阈}}$ 时,把扩散系数强制性置为零,可以在图像边缘细节处完全停止扩散,从而避免图像边缘模糊现象。 $T_{\text{阈}}$ 值的选取至关重要,为了对图像非均匀性进行较好的平滑作用,文中选择焦平面输出像元的均方误差在作为梯度阈值,如下式:

$$\begin{aligned} T_{\text{阈}} &= \sqrt{\frac{1}{M*N} \sum_{i=1}^M \sum_{j=1}^N [x_{ij}'(0) - E(x_{ij}'(0))]^2} \\ E(x_{ij}'(0)) &= \frac{1}{M*N} \sum_{i=1}^M \sum_{j=1}^N x_{ij}'(0) \end{aligned} \quad (12)$$

式中: $x_{ij}'(0)$ 为初始经过两点校正后的图像; $E(x_{ij}'(0))$ 为该图像的平均灰度值。经过 P-M 滤波后的像素输出值 $x_{ij}''(n)$ 取代四邻域均值均值作为图像的期望

值,有效避免了图像边缘模糊现象,获得了较好的图像效果。

## 2 实验结果与分析

文中采用自行研制的红外热像仪进行实验,该热像仪采用法国 ULIS 公司生产的红外焦平面芯片 UL02 15 2,分辨率为 160×120,帧频为 20 帧。在热像仪前期研制过程中,将热像仪用一均匀洁净的镜头盖遮住后放入高低温试验箱中,设定好高低温试验箱温度,将热像仪放置一段时间使其与周围环境达到热平衡,此时衬底温度近似等于设定温度。当热像仪上电后,立即通过采集卡连续采集 10 帧图像,求均值后作为该温度下的标准图像。高低温箱温度变化范围为 [-20℃, 50℃],每次温度间隔为 10℃。利用获取的图像运用多点校正法计算各个温度区间的增益和偏置校正参数,表 1 列出了像素点(80,60)和(50,50)在不同的温度区间下的增益和偏置校正参数。将上述计算得到的参数固化到 FLASH 芯片中。热像仪正常工作时,通过在上电时刻读取的衬底温度值,从 FLASH 芯片中读取对应的校正参数序列,暂存于 FPGA 片上 RAM 中。将该参数序列作为初始参数,获得预处理后的图像,计算该图像与期望图像的误差函数,运用最陡下降法求得增益和偏置校正参数的迭代公式,对这两个参数进行实时更新,从而对图像非均匀性进行实时校正。

表 1 像素点在不同温度区间下的增益和偏置校正参数

Tab.1 Gain and offset correction parameters in different temperature range

Temperature/℃	Pixel coordinates	
	Gain and offset correction parameters of pixel(80,60)	Gain and offset correction parameters of pixel(50,50)
[-20,-10]	1.017 6, -38.643 2	1.022 1, 42.633 3
[-10,0]	1.018 4, -47.775 5	1.024 8, 56.548 1
[0,10]	1.021 6, -68.852 9	1.047 5, -125.500 1
[10,20]	1.016 3, -21.557 8	1.023 8, 84.384 2
[20,30]	1.018 4, -43.614 4	1.021 8, 105.579 0
[30,40]	1.020 3, -65.444 2	1.023 2, 88.621 6
[40,50]	1.022 3, -77.321 8	1.031 0, 76.322 1

为了验证算法的有效性,现选取两段有代表性的红外视频图像来具体说明,分别为静止的室内图像和动态的室外图像,如图 2、3 所示。

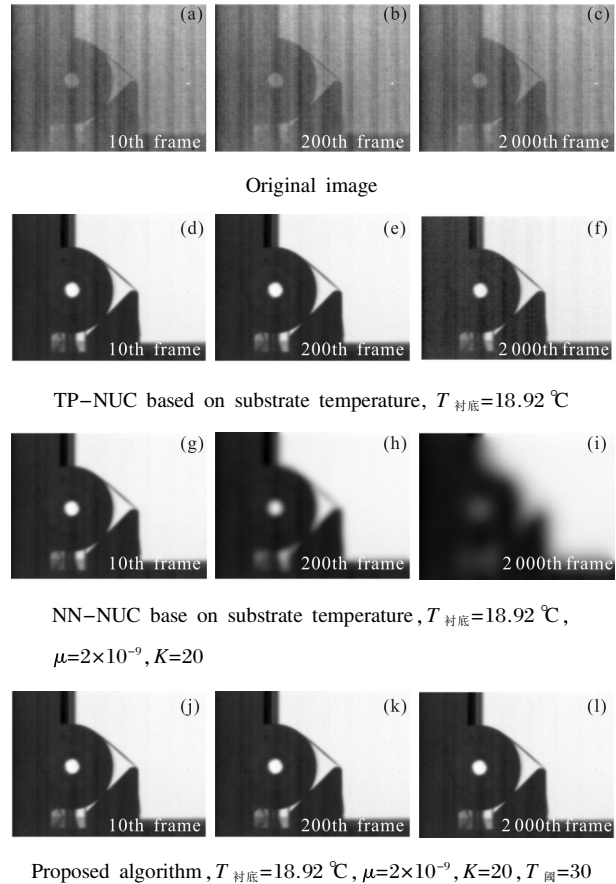


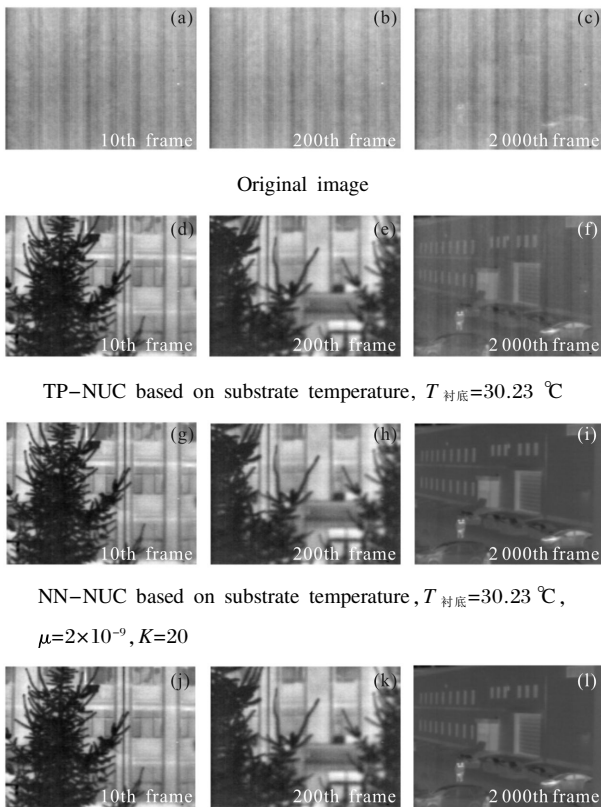
图 2 室内图像不同算法校正后图像

Fig.2 Indoor images after different corrected algorithms

在室温(18.92℃)下,对图像进行连续采集,其中背景为均匀面阵黑体,温度设定为 20℃,取 2 000 帧图像进行非均匀性校正,取第 10、200、2 000 帧图像,校正前后图像如图 2 所示,其中,第一组图像为未经过处理的原始图像,可以清楚地看到原始图像存在非常明显的固定图形噪声,均匀性很差,图像对比度很低,严重影响图像的质量和视觉效果,因此实际使用时必须对非均匀性进行校正。第二组图像为基于衬底温度的两点非均匀性校正(TP-NUC),根据上电时刻的衬底温度,选择对应温度区间的校正参数对图像进行校正,由图 2(d)~(f)可知,短时间内,TP-NUC 法能有效去除图像非均匀性,然而随着时间增长,探测器响应特性发生变化,图像产生条纹噪声。第三组图像首先根据衬底温度,对图像进行初步校正,再采用神经网络算法自适应更新增益和偏置校

正系数后的输出图像,其中迭代步长  $\mu$  设为  $2 \times 10^{-9}$ , 阈值  $K$  设为 20,由图 2(g)~(i)可以看出图像具有较高的校正精度,然而存在边缘模糊的现象。为了解决传统神经网络算法中图像边缘模糊的问题,文中采用保边缘的 P-M 滤波取代四邻域均值滤波,来获得像素点的期望值,梯度阈值  $T_{\text{阈}}$  由公式(12)计算取整得到,如图 2(l),经过 2 000 次迭代后,图像边缘仍然非常锐利清晰,成像效果良好。

图 3 为室外红外图像,由于自然环境中目标与背景的温差较小,因此受探测器非均匀性的影响很大,原始图像的细节信息几乎无法辨别,如图 3(a)~(c)所示。经过两点校正后,图像细节清晰可见,视觉效果良好,然而随着时间增长,图像质量逐渐下降,如图 3(d)~(f)。NN-NUC 算法和文中算法对动态场景均能实时校正图像的非均匀性,成像质量良好。因此 NN-NUC 算法适用于动态场景中,而文中算法不仅适用于动态场景,在静止场景中同样拥有良好的效果,适用范围更广。



Proposed algorithm,  $T_{\text{衬底}}=30.23\text{ }^{\circ}\text{C}$ ,  $\mu=2 \times 10^{-9}$ ,  $K=20$ ,  $T_{\text{阈}}=5$

图 3 室外图像不同算法校正后图像

Fig.3 Outdoor images after different corrected algorithm

为了进一步验证算法校正非均匀性的能力和收

敛速度,文中采用了响应不均匀性对校正后的图像进行评价:

$$U_R = \frac{1}{E(x_{ij}'(0))} * \sqrt{\frac{1}{M*N} \sum_{i=1}^M \sum_{j=1}^N [x_{ij}'(0) - E(x_{ij}'(0))]^2} * 100\%$$

$$E(x_{ij}'(0)) = \frac{1}{M*N} \sum_{i=1}^M \sum_{j=1}^N x_{ij}'(0) \quad (13)$$

式中:  $E(x_{ij}'(n))$  为该图像的平均灰度值;  $M$ 、 $N$  分别表示图像的行、列值。

在室温下 ( $18.79\text{ }^{\circ}\text{C}$ ), 对均匀场景进行拍摄, 取 2 000 帧图像进行处理, 处理前后的响应非均匀性如图 4 所示。在热像仪上电后, 读取衬底温度传感器的值, 计算得到当前衬底温度为  $19.11\text{ }^{\circ}\text{C}$ , 因此取温度区间  $[10\text{ }^{\circ}\text{C}, 20\text{ }^{\circ}\text{C}]$  对应的增益和偏置校正参数对图像进行非均匀性校正, 校正结果如图 4(a) 所示, 由图中可以看出, 图像非均匀性得到很好地校正, 响应非均匀性值仅为 0.046% 左右, 然而相邻帧之间波动仍然较为明显; 图 4(b) 为采用文中的联合校正算法进行处理后的图像, 其中  $U_R$  值快速下降至 0.034% 后大致保持稳定, 因此可以得出结论, 文中采用的算法能够快速、精确地校正图像非均匀性, 同时具有较好的稳定性。

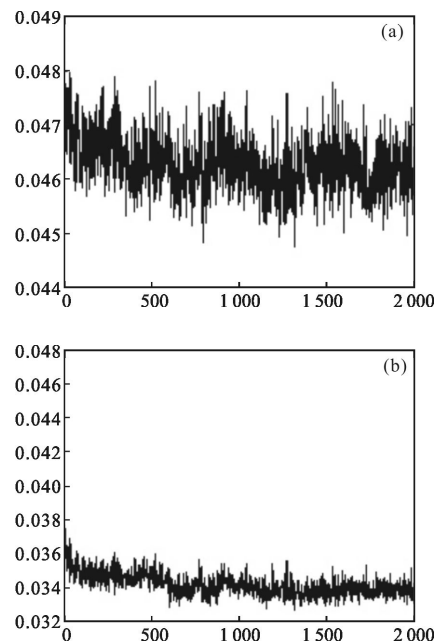


图 4 图像的像元不均匀性

Fig.4 Pixel nonuniformity of images

### 3 结论

在神经网络算法中, 增益和偏置校正参数的初

始值决定了该算法的收敛时间和校正精度。根据上电时刻的衬底温度从 FLASH 中提取对应温度区间的参数,作为 NN-NUC 算法的初始值,可以极大的缩短算法的收敛时间,并且有效地提高了校正精度。传统的 NN-NUC 算法采用四邻域均值作为某像素点的期望值,不具有边缘保留的功能,随着算法迭代次数的增加,图像边缘细节信息逐渐消失。文中采用带阈值的基于图像梯度特征的偏微分方程,在平坦区域加速平滑,有效去除图像非均匀性;在边缘细节区域停止扩散,很好地保留了图像边缘细节信息。通过实验结果可以看出,文中算法结合了基于定标的校正法和基于场景的校正法的优点,具有结构简单,收敛速度快,校正精度高等优点,增强了算法的环境适应性。实验结果验证了该算法的有效性。

#### 参考文献:

- [1] Scribner D A, Kruer M R, Cridley J C, et al. Physical limitation to nonuniformity correction in IR focal plane arrays[C]//SPIE, 1987, 865: 185-202.
- [2] Wang Yueming, Chen Jianxin, Liu Yinnian, et al. Study on two-point multi-section IRFPA nonuniformity correction algorithm[J]. *J Infrared Millin Waves*, 2003, 22(6): 415-418. (in Chinese)  
王跃明, 陈建新, 刘银年, 等. 红外焦平面器件二点多段非均匀性校正算法研究[J]. 红外与毫米波学报, 2003, 22(6): 415-418.
- [3] Lou Bo, Zhang Feng, Song Liqun, et al. Improved neural network nonuniformity correction technique for IRFPA [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2008, 37(2): 300-303. (in Chinese)  
楼波, 张锋, 宋利权, 等. 改进的神经网络非均匀性校正方法[J]. 红外与激光工程, 2008, 37(2): 300-303.
- [4] Li Qing, Liu Shangqian, Wang Bingjian, et al. New nonuniformity correction algorithm for IRFPA based on neural network [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2007, 36(3): 342-344. (in Chinese)  
李庆, 刘上乾, 王炳健, 等. 基于神经网络的 IRFPA 非均匀性校正新算法[J]. 红外与激光工程, 2007, 36(3): 342-344.
- [5] 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. (in Chinese)  
屈惠明, 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.
- [6] Shi Changcheng, Zhang Tianxu, Liu Huina, et al. Combinational algorithm for nonuniformity correction of infrared focal plane array[J]. *J Infrared Millin Waves*, 2010, 29(1): 23-26. (in Chinese)  
施长城, 张天序, 刘慧娜, 等. 一种红外焦平面非均匀性组合校正算法[J]. 红外与毫米波学报, 2010, 29(1): 23-26.
- [7] Yang Li, Yang Zhen. The Principle and Technology of Infrared Thermal Imaging Temperature Measurement [M]. Beijing: Science Press, 2012: 68-71. (in Chinese)  
杨立, 杨桢. 红外热成像测温原理与技术 [M]. 北京: 科学出版社, 2012: 68-71.
- [8] Zhang Tianxu, Shi Yan, Cao Zhiguo. Study on the property of spatial frequency of nonuniformity noise in IRFPA and the mprovement of spatial adaptive nonuniformity correction technique [J]. *J Infrared Millin Waves*, 2005, 24(4): 255-260. (in Chinese)  
张天序, 石岩, 曹治国. 红外焦平面非均匀性噪声的空间频率特性及空间自适应非均匀性校正方法改进 [J]. 红外与毫米波学报, 2005, 24(4): 255-260.
- [9] Perona P, Malik J. Scale-space and edge detection using anisotropic diffusion [J]. *IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine*, 1990, 12(7): 629-639.