

# 基于加权引导滤波与时域高通滤波的非均匀性校正算法

钱润达<sup>1</sup>, 赵 东<sup>1</sup>, 周慧鑫<sup>1</sup>, 于君娜<sup>2</sup>, 王士成<sup>2</sup>, 荣生辉<sup>1</sup>

(1. 西安电子科技大学 物理与光电工程学院, 陕西 西安 710071;

2. 中国电子科技集团公司第五十四研究所, 河北 石家庄 050081)

**摘 要:** 为解决基于传统时域高通滤波红外图像非均匀性校正算法存在“鬼影”现象以及固定图案噪声去除不彻底的问题, 提出了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。首先, 利用加权引导滤波准确分离红外图像中的空域高频成分; 然后, 计算红外图像中像素点灰度值变化幅度; 最后, 在进行时域高通滤波时对红外图像中的运动区域和静止区域使用不同时间常数进行校正。采用两组真实红外图像序列进行实验, 并与经典的双边滤波时域高通、均值滤波时域高通非均匀性校正算法进行比较。实验结果表明: 文中所提算法在主观视觉和客观评价指标方面优于其他两种算法, 有效降低了红外图像的非均匀性, 不会产生“鬼影”, 取得了较好的非均匀性校正效果。

**关键词:** 红外焦平面阵列; 非均匀性校正; 加权引导滤波; 运动判断; 时域高通滤波

**中图分类号:** TN219 **文献标识码:** A **DOI:** 10.3788/IRLA201847.1204001

## Non-uniformity correction algorithm based on weighted guided filter and temporal high-pass filter

Qian Runda<sup>1</sup>, Zhao Dong<sup>1</sup>, Zhou Huixin<sup>1</sup>, Yu Junna<sup>2</sup>, Wang Shicheng<sup>2</sup>, Rong Shenghui<sup>1</sup>

(1. School of Physics and Optoelectronic Engineering, Xidian University, Xi'an 710071, China;

2. The 54th Research Institute of China Electronics Technology Group Corporation, Shijiazhuang 050081, China)

**Abstract:** The drawbacks of traditional temporal high pass filter were "ghost artifacts" and fixed pattern noise can't be removed completely. A non-uniformity correction algorithm that combines weighted guided filter and improved temporal high pass filter was proposed. Firstly, weighted guided filter was used to separate spatial high frequent components from infrared images accurately. Then, the change amplitude of every pixel value was calculated. Finally, different time constants were applied to motion regions and static regions to conduct non-uniformity correction. Two real infrared sequences were adopted in experiments, and space low-pass and temporal high-pass (SLTH) as well as bilateral filter based temporal high-pass filter(BFTH) were used to compare with the proposed algorithm. The experimental results show that the proposed algorithm is superior to the other two algorithms in subjective visual effect and

收稿日期: 2018-07-05; 修订日期: 2018-08-15

基金项目: 国家自然科学基金(61401343, 61675160); 国家高技术研究发展计划(2014AA8098089C);

中国科学院光谱成像技术重点实验室开放基金(LSIT201503); 高等学校学科创新引智计划(B17035)

作者简介: 钱润达(1992-), 男, 硕士生, 主要从事红外图像处理方面的研究。Email: qianrunda@163.com

导师简介: 周慧鑫(1975-), 男, 教授, 博士生导师, 主要从事光电成像及图像处理、目标检测跟踪及制导、光电对抗、高光谱异常检测等方面的研究。Email: hxzhou@xidian.edu.cn

objective evaluation index. The proposed algorithm can reduce non-uniformity without causing "ghost artifacts" and achieves a better effect of non-uniformity correction.

**Key words:** infrared focal plane array; non-uniformity correction; weighted guided filter; motion judgement; temporal-high pass filter

## 0 引言

红外焦平面阵列 (Infrared Focal Plane Arrays, IRFPAs) 由于制造工艺和外部因素影响存在响应非均匀性问题, 即其所构成的成像系统即使在相同辐射输入的条件下, 探测单元的输出也不一致, 最终在输出图像上呈现出固定图案噪声, 从而严重地影响了成像质量和图像信噪比<sup>[1-2]</sup>。目前对于非均匀性校正主要分为两类: 一类是基于参考辐射源的定标算法, 如两点校正法和多点校正法; 另一类是基于场景的校正算法, 如时域高通滤波法<sup>[3]</sup>、神经网络法<sup>[4]</sup>、恒定统计法<sup>[5]</sup>和卡尔曼滤波法<sup>[6]</sup>。后者是利用对场景信息的估计来实现非均匀性校正, 不需要暂停成像系统的工作来重复定标, 因此是目前的研究热点。

2010 年, 钱惟贤等提出的基于均值滤波的空域低通时域高通非均匀性校正算法 (以下简称 SLTH 算法)<sup>[7]</sup>通过空域滤波先分离出原始图像的空域高频成分, 再对空域高频成分使用时域高通滤波得到固定图案噪声, 最后从原始图像中减去固定图案噪声实现非均匀性校正。该算法使用均值滤波, 对图像空域高频成分分离得不够准确, 因此在运动区域会产生“鬼影”现象。左超等在此基础上提出了基于双边滤波的空域低通时域高通非均匀性校正算法<sup>[8]</sup> (以下简称 BFTH 算法) 通过使用双边滤波来获取图像空域高频成分, 减少了“鬼影”现象。但是由于双边滤波的效果有限, 得到的高频成分中仅含有部分的固定图案噪声, 导致最后的校正结果中会包含没有被分离出的固定图案噪声。

针对上述问题, 文中提出了一种基于加权引导滤波和改进时域高通滤波的非均匀性校正算法。利用加权引导滤波处理原始红外图像得到空域高频成分, 再通过运动判断得到图像运动区域和静止区域。对不同区域使用不同时间常数的改进时域高通滤波进行处理, 从而得到含有极少量边缘信息的固定图

案噪声。实验结果表明, 该算法在降低红外图像非均匀性和抑制“鬼影”两方面取得了较好的效果。

## 1 相关算法分析

### 1.1 时域高通滤波

时域高通滤波 (Temporal High Pass Filtering, THPF) 是一种典型的基于场景的非均匀性校正算法, 通过设置不同时间常数得到不同的截止频率, 过滤掉低于该频率的固定图案噪声, 从而实现非均匀性校正。其迭代公式如公式(1)和公式(2)所示:

$$y(n) = x(n) - f(n) \quad (1)$$

$$f(n) = \frac{1}{M} x(n) + \left(1 - \frac{1}{M}\right) f(n-1) \quad (2)$$

式中:  $x(n)$  为带有非均匀性的原始图像;  $y(n)$  为经过校正后的结果;  $M$  为时间常数;  $f(n)$  为第  $n$  次迭代得到的固定图案噪声。

时域高通滤波主要缺点为: 一方面会将静止的场景滤除; 另一方面会使得运动的部分产生“鬼影”。“鬼影”产生的原因是整幅图像都参与到了迭代运算中, 其中包含了大量无关的场景信息, 导致校正参数出现错误。由于大量不相关的场景参与运算是产生“鬼影”现象的根本原因, 因此一种改进的思路是先将场景信息分离出来, 利用图像的高频成分进行迭代运算以有效地抑制“鬼影”。

### 1.2 加权引导滤波

图像可看作是一个无法写出解析式的二维函数, 引导滤波 (Guided Filter)<sup>[9-11]</sup>模型认为图像中的任意一个像素点都与其周围近邻的像素点存在线性关系, 可通过周围像素点来线性表示。最后将所有线性函数在该点的值求平均作为滤波结果。引导滤波假设引导图像和滤波输出图像之间是一个局部线性关系, 假设  $q$  是引导图像  $I$  在像元  $K$  处窗口大小为  $w_k$  的一个线性变换。

$$q_i = a_k I_i + b_k, \forall i \in w_k \quad (3)$$

式中:  $(a_k, b_k)$  为在  $w_k$  内的线性系数, 所用窗口半径为  $r$ 。由该式可以看出,  $\nabla q = a \nabla l$ , 当  $l$  有梯度时  $q$  也有梯度, 所以引导滤波模型具有边缘保持特性。

为了求得线性系数, 使得输出  $q$  和输入图像  $p$  之间差值最小, 利用最小二乘法可以得到:

$$E(a_k, b_k) = \sum_{i \in w_k} ((a_k l_i + b_k - p_i)^2 + \varepsilon a_k^2) \quad (4)$$

式中:  $\varepsilon$  是为了防止  $a_k$  过大而设置的正则化参数。通过线性回归可以得到:

$$a_k = \frac{\frac{1}{|w|} \sum_{i \in w_k} l_i p_i - \bar{u}_k \bar{p}_k}{\sigma_k^2 + \varepsilon} \quad (5)$$

式中:  $\bar{u}_k$  和  $\sigma_k^2$  分别为  $l$  在窗口  $w_k$  内的均值和方差;

$|w|$  为窗口  $w_k$  中的像素总数;  $\bar{p} = \frac{1}{|w|} \sum_{i \in w_k} p_i$  是  $p$  在  $w_k$  内的均值。

$$b_k = \bar{p}_k - a_k \bar{u}_k \quad (6)$$

将该线性模型用于整个图像的所有局部窗口, 可得到引导滤波的输出为:

$$q_i = \frac{1}{|w|} \sum_{k: i \in w_k} (a_k l_i + b_k) = \bar{a}_i l_i + \bar{b}_i \quad (7)$$

式中:  $\bar{a}_i = \frac{1}{|w|} \sum_{k: i \in w_k} a_k$ ,  $\bar{b}_i = \frac{1}{|w|} \sum_{k: i \in w_k} b_k$ 。

在边缘区域,  $a_k$  的值接近于 1,  $b_k$  的值接近于 0, 滤波器输出结果近似于原引导图像。在平坦区域,  $a_k$  的值接近于 0,  $b_k$  的值几乎等于  $p_k$  的均值, 此时引导滤波相当于一个均值滤波器。

引导滤波算法对所有像素点均采用相同的  $\varepsilon$  值, 在图像边缘会造成一定程度的模糊效应, Li Zhengguo 等提出了引入权重  $T$  并通过计算局部窗口内的方差来自适应地调整  $\varepsilon$  的值的加权引导滤波<sup>[12]</sup>。

则公式(4)可以改写为:

$$E(a_k, b_k) = \sum_{i \in w_k} \left( (a_k l_i + b_k - p_i)^2 + \frac{\varepsilon}{T(i)} a_k^2 \right) \quad (8)$$

$$T(i') = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N \frac{\sigma^2(i') + \alpha}{\sigma^2(i) + \alpha} \quad (9)$$

式中:  $N$  为图像像素总数;  $\sigma^2(i')$  为以目标像素为中心的窗口的方差;  $\sigma^2(i)$  为遍历整幅图像的所有像素的方差;  $\alpha$  为一固定参数, 用于调节权重的大小并防止出现  $T(i')$  为 0 从而使得误差  $E$  为无穷大的情况。

## 2 文中算法

### 2.1 基于 Sobel 算子的加权引导滤波

由于计算每个像素点一定大小窗口内的方差非常耗费时间, 造成算法实时性很差。因此文中采用 Sobel 算子来计算每个像素点的梯度, 并求出每个像素点的权重值  $T(i')$ , 最终通过  $\frac{\varepsilon}{T(i')}$  自适应地对不同区域选用不同的平滑倍数。Sobel 算子由水平模板  $P_x$  和垂直模板  $P_y$  组成。

$$P_x = \begin{bmatrix} -1 & -2 & -1 \\ 0 & 0 & 0 \\ 1 & 2 & 1 \end{bmatrix} \quad (10)$$

$$P_y = \begin{bmatrix} -1 & 0 & 1 \\ -2 & 0 & 2 \\ -1 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (11)$$

将输入图像与 Sobel 算子卷积, 则公式(9)改写为:

$$T(i') = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N \frac{\text{Sobel}^2(i') + \alpha}{\text{Sobel}^2(i) + \alpha} \quad (12)$$

式中:  $\text{Sobel}(i')$  为图像上的第  $i'$  个像素点用 Sobel 算子求出的梯度;  $\text{Sobel}(i)$  为遍历整幅图像的所有像素的梯度。

Sobel 算子在边缘处具有较大的幅值, 所以  $T(i')$  在边缘处总大于 1, 使得  $\varepsilon$  具有更小的数值, 即在边缘处平滑程度较小, 从而在去噪的同时更好地保留边缘信息。

### 2.2 运动区域检测

传统的时域高通滤波对整幅图像使用相同的时间常数, 对于运动区域, 如果时间常数过大, 则会导致“鬼影”的产生。对于静止区域, 如果时间常数过小, 则会导致固定图案噪声去除得不彻底。针对此问题, 文中提出一种改进的时域高通滤波, 首先判断出图像的运动区域, 然后对运动区域使用较小的时间常数, 对静止区域使用较大的时间常数。具体的判断方法为: 首先计算当前帧(第  $n$  帧)高频成分和上一帧(第  $n-1$  帧)高频成分的差值图像。

$$x_n^d = x_n^H - x_{n-1}^H \quad (13)$$

式中:  $x_n^H$  为当前帧的高频成分;  $x_{n-1}^H$  为上一帧的高频成分;  $x_n^d$  为当前帧与上一帧的差值图像。

然后将差值图像中的每一个像素点的灰度值除

以上一帧高频成分相对应的像素点的灰度值:

$$q_n(i, j) = \frac{x_n^d(i, j)}{x_{n-1}^H(i, j)} \quad (14)$$

式中:  $q_n(i, j)$  为当前帧第  $i$  行第  $j$  列的像素点的比值。

再将得到的比值和事前设置好的阈值相比较, 如果比值大于阈值, 说明该像素点变化充分, 属于运动区域。如果比值小于阈值, 说明该像素点可以认为是没有发生变化, 属于静止区域。对于运动区域, 使用较小的时间常数来避免出现“鬼影”。对于静止区域, 使用较大的时间常数来加快去除固定图案噪声的过程。公式(12)改写为:

$$f_n(i, j) = \begin{cases} \frac{1}{M_{\min}} x^H(i, j) + \left(1 - \frac{1}{M_{\min}}\right) f_{n-1}(i, j), & (q_n(i, j) > Th) \\ \frac{1}{M_{\max}} x^H(i, j) + \left(1 - \frac{1}{M_{\max}}\right) f_{n-1}(i, j), & (q_n(i, j) < Th) \end{cases} \quad (15)$$

式中:  $M_{\min}$  为较大的时间常数;  $M_{\max}$  为较小的时间常数;  $f_n(i, j)$  为第  $n$  次迭代得到的固定图案噪声;  $Th$  为事先设置好的阈值, 事先设置好的阈值的大小主要根据图像中目标的运动速度, 目标的运动速度越快, 阈值就越大, 目标运动速度越慢, 阈值就越小, 合适的阈值可以准确地区分原始图像中的运动区域和静止区域。

文中算法的流程如图 1 所示, 具体步骤如下。

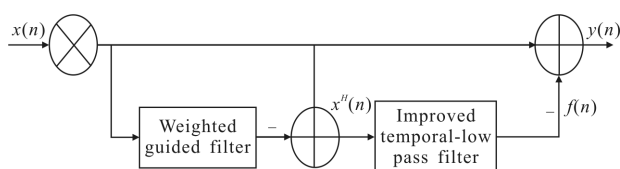


图 1 文中算法流程图

Fig.1 Flow chart of the proposed algorithm

Step 1: 对原始图像使用基于 Sobel 算子的加权引导滤波得到图像的低频成分  $x^L$ ;

Step 2: 将原始图像减去第一步中得到的低频成分  $x^L$  得到原始图像的高频成分  $x^H$ , 其中包含了非均匀性和少量的边界信息, 则:

$$x^H(n) = x(n) - x^L(n) \quad (16)$$

Step 3: 用公式(13)、(14)得到每个像素点的比值;

Step 4: 将比值与事先设置好的阈值相比较, 确定每个像素点的时间常数;

Step 5: 用公式(15)进行时域高通滤波, 得到第  $n$  次迭代后的固定图案噪声  $f(n)$ ;

Step 6: 用公式(1)从原始图像中减去固定图案噪声, 完成非均匀性校正。

### 3 实验结果与分析

选取两组真实红外图像序列进行实验。第一组红外图像序列大小为  $256 \text{ pixel} \times 256 \text{ pixel}$ , 图像序列总帧数为 700 帧, 帧频为 25 帧/s, 图像中手臂做上下运动。第二组红外图像序列大小为  $256 \text{ pixel} \times 256 \text{ pixel}$ , 图像序列总帧数为 700 帧, 帧频为 25 帧/s, 图像中人体从左至右, 再从右至左往复运动。

引导滤波的窗口大小  $r=2$ , 正则化参数  $\varepsilon=0.1$ 。加权引导滤波参数  $\alpha$  设置为 0.065,  $M_{\max}$  的值设置为 5,  $M_{\min}$  的值设置为 2, 阈值  $Th$  设置为 0.1。

图 2 为第一组图像序列第 700 帧的校正结果, 从图 2(a)可以看出, 原图呈现明显的条带状非均匀性。如图 2(b)所示, 经 SLTH 算法校正后在手的位置出现了明显的“鬼影”现象。如图 2(c)所示, 经 BFTH 算法校正后虽然没有出现“鬼影”, 但是手的左侧仍能看到清晰的条带状非均匀性。如图 2(d)所示, 经文中所提算法校正后, 不但没有产生“鬼影”并且很好地降低了图像的非均匀性, 提升了图像的质量。

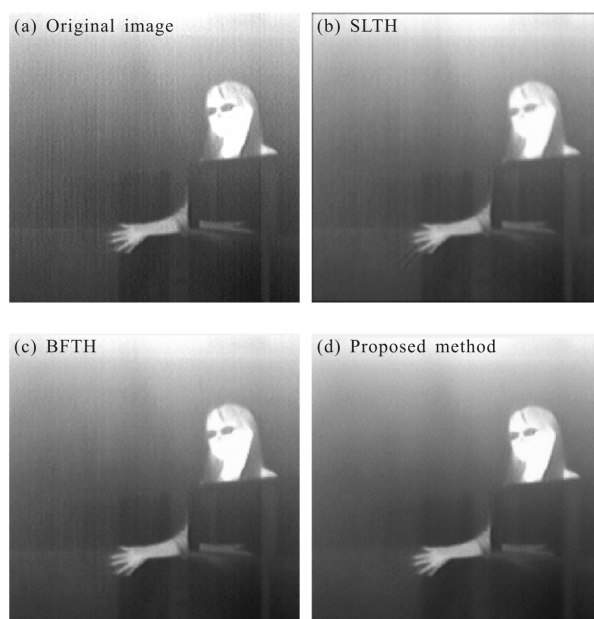


图 2 第一组序列非均匀性校正结果

Fig.2 Nonuniformity correction results of the first sequence

用第一组图像序列第 700 帧的校正结果减去原始图像序列第 700 帧得到差值图像, 图 3 所示为三种不同算法获得的差值图像。图 3(a)为 SLTH 算法得到的差值图像, 该差值图像整体灰度值偏低, 效果不理想。图 3(b)为 BFTH 算法得到的差值图像, 该差值图像所含固定图案噪声较少, 校正结果较差。图 3(c)为文中提出算法得到的差值图像, 该差值图像中包含了大部分固定图案噪声, 能够更有效地降低图像的非均匀性。

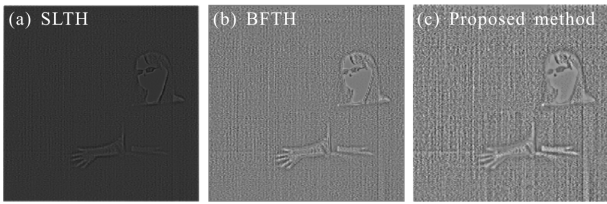


图 3 第一组序列差值图像

Fig.3 Difference images of the first sequence

图 4 为第二组图像序列第 700 帧的校正结果, 从图 4(b)~(c)可以看出, SLTH 和 BFTH 算法处理后的结果依旧包含竖直的带状非均匀性。而文中算法处理的结果只包含目标和场景, 非常好地实现了非均匀性校正。可见文中提出的算法对不同的场景具有较好的适应性。

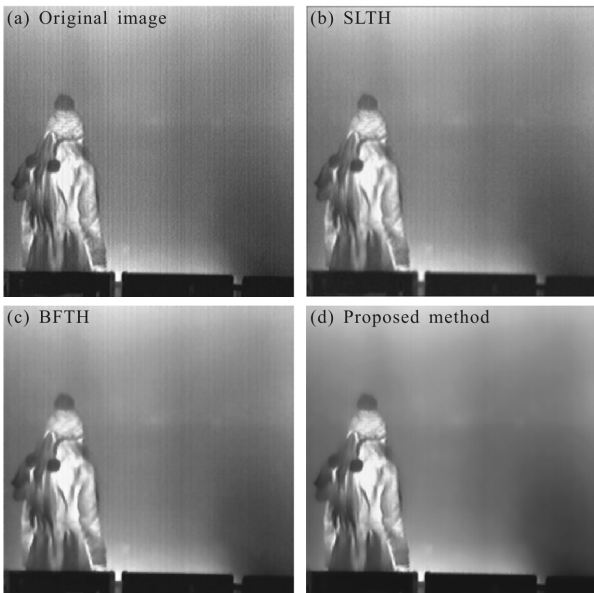


图 4 第二组序列非均匀性校正结果

Fig.4 Nonuniformity correction results of the second sequence

为进一步定量分析算法非均匀性校正的性能, 文中采用粗糙度(Roughness)指标来定量地评价三种

算法的校正效果。粗糙度定义为:

$$\rho = \frac{\|h_1 * x\|_1 + \|h_2 * x\|_1}{\|x\|_1} \quad (17)$$

式中:  $x$  为输入图像;  $h_1$  和  $h_2$  分别为水平模板和垂直模板,  $h_1 = [1, -1]$ ,  $h_2 = [1, -1]^T$ ; “\*” 表示卷积操作;  $\| \cdot \|_1$  表示  $L_1$  范数。

对两组红外图像序列进行实验, 并分别绘制校正结果粗糙度曲线图, 实验结果如图 5~6 所示。由图 5 可以看出, 三条粗糙度曲线都有相似的波动, 这是因为它们对应的三种算法都是采用空域低通时域高通的框架。第一组序列的场景是人不发生全身运动, 而只有手上下摆动, 所以粗糙度曲线比较平稳, 起伏不大。文中提出算法获得的粗糙度曲线在 0.045 附近波动, BFTH 算法获得的粗糙度曲线在 0.05 附近波动, SLTH 算法获得的粗糙度曲线在 0.055 附近波动, 文中算法的粗糙度曲线位置最低, 说明了文中算法的良好性能。

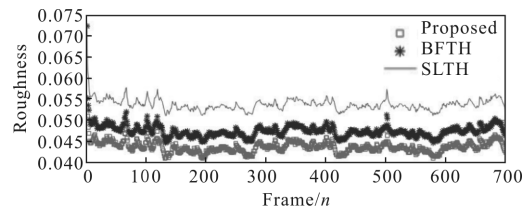


图 5 第一组序列校正结果粗糙度曲线

Fig.5 Roughness curves of the first sequence correction results

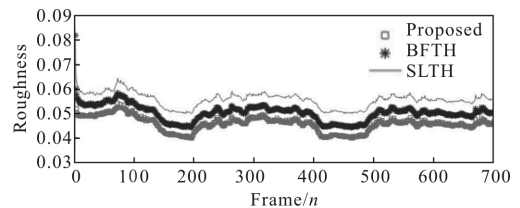


图 6 第二组序列校正结果粗糙度曲线

Fig.6 Roughness curves of the second sequence correction results

由图 6 可以看出, 三条粗糙度曲线波动幅度比较大, 有明显的上升和下降区间。这是因为第二组图像序列中人从第 90 帧时由静止开始向右运动, 三种算法的粗糙度明显降低。从第 200~390 帧人保持静止不动, 粗糙度有所上升。从第 390~490 帧人从右向左运动, 因为有充分的运动所以粗糙度又有所下降。从第 490~700 帧人保持静止不动, 粗糙度有所上升。可以看出, 文中所提算法在每一帧都具有最低的粗糙度, 这是因为加权引导滤波能够准确分离出图像

的空域高频成分,并且可以对图像运动区域和静止区域自适应地使用不同的时间常数,从而在保留边缘的同时去除固定图案噪声。文中提出算法获得的粗糙度曲线在 0.045 附近波动,BFTH 算法获得的粗糙度曲线在 0.05 附近波动,SLTH 算法获得的粗糙度曲线在 0.06 附近波动,文中提出算法相对 BFTH 算法将粗糙度降低 10%,相对于 SLTH 算法那将粗糙度降低 25%,可见文中提出算法具有较好效果。

## 4 结 论

文中在已有的两种空域低通时域高通非均匀性校正算法的基础上,提出了一种改进算法,该算法先采用基于 Sobel 算子的加权引导滤波分离出原图像的空域高频成分,再通过对运动区域和静止区域使用不同时间常数的改进时域高通滤波。实验结果表明,文中算法在降低图像非均匀性的同时更好地保留了图像的边缘信息,并且不会产生“鬼影”。文中算法由于使用了加权引导滤波并判断运动区域,因此具有较高的运算复杂度。相对于单独使用加权引导滤波和单独使用时域高通滤波,文中所提算法要更加耗费时间,所以下一步工作的重点是优化算法的步骤以加快运行速度,使得文中提出的算法更容易在硬件上实现。

## 参考文献:

- [1] Scribner D A, Caulfield J T. Adaptive nonuniformity correction for IR focal-plane arrays using neural networks [C]//Proceedings of SPIE the International Society for Optical Engineering, 1991, 1541: 100-109.
- [2] Lou B, Zhang F, Song L Q, et al. Improved neural network nonuniformity correction technique for IRFPA [J]. Infrared and Laser Engineering, 2008, 37(2): 300-303. (in Chinese)
- [3] Scribner D A, Caulfield J T. Nonuniformity correction for staring IR focal plane arrays using scene-based techniques [C]//Proceedings of SPIE the International Society for Optical Engineering, 1990, 12: 21730.
- [4] Rong S H, Zhou H X, Qin H L, et al. Guided filter and adaptive learning rate based non-uniformity correction algorithm for infrared focal plane array [J]. Infrared Physics & Technology, 2016, 76: 691-697.
- [5] Ji Eryou, Gu Guohua, Chen Qian, et al. Dual channel constant statistic NUC algorithm of separate band [J]. Laser & Infrared, 2011, 41(4): 474-478. (in Chinese)
- [6] Sobarzo S K, Torres S N. Real-time Kalman filtering for nonuniformity correction on infrared image sequences: performance and analysis [J]. Lecture Notes in Computer Science, 2010, 3773: 752-761.
- [7] Qian W X, Chen Q, Gu G H. Space low-pass and temporal high-pass nonuniformity correction algorithm [J]. Optical Review, 2010, 17(1): 24-29.
- [8] Zuo C, Chen Q, Gu G, et al. New temporal high-pass filter nonuniformity correction based on bilateral filter [J]. Optical Review, 2012, 18(2): 197-202.
- [9] He Kaiming, Sun Jian, Tang Xiaoou. Guided image filtering [J]. IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence, 2013, 35(6): 1397-1409.
- [10] Zhao Fan, Zhao Jian, Zhao Wenda, et al. Guide filter-based gradient vector flow module for infrared image segmentation [J]. Applied Optics, 2015, 54(33): 9809-9817.
- [11] He K, Sun J, Tang X. Guided image filtering [C]//Computer Vision -ECCV 2010, 2010: 1397-1409.
- [12] Li Z, Zheng J, Zhu Z, et al. Weighted guided image filtering [J]. IEEE Transactions on Image Processing, 2015, 24(1): 120-129.