

红外双边滤波时域高通非均匀性校正

雷晓杰, 顾国华, 隋修宝, 左 超

(南京理工大学光电工程国防重点学科实验室, 江苏 南京 210094)

摘 要: 红外焦平面阵列的非均匀性噪声是制约红外成像质量的主要因素。本文在研究了传统的时域高通滤波法及其两种改进算法的基础上, 提出了一种改进的基于双边滤波的非均匀性自适应校正算法, 在这种方法中引入了一个由双边滤波系数矩阵推得的二次校正矩阵, 该矩阵能够判别原始图像与双边滤波所得图像的差图像中场景的边缘部分, 并进行自适应的抑制, 使校正参数的计算更加准确。实验部分通过对加模拟噪声图像序列和实际非均匀性图像的校正证明本文的改进算法比其他两种改进算法有更好的校正效果。

关键词: 红外焦平面阵列; 非均匀性校正; 基于场景; 双边滤波器; 二次校正矩阵

中图分类号: TP391.4 **文献标识码:** A **DOI:** 10.3969/j.issn.1001-5078.2012.07.024

Improved temporal high-pass filter nonuniformity correction based on bilateral filter

LEI Xiao-Jie, GU Guo-hua, SUI Xiu-bao, ZUO Chao

(National Defense Key Laboratory of Optoelectronic Engineering, NUST, Nanjing 210094, China)

Abstract: The nonuniformity noise in the infrared focal plane is a major factor which limits the quality of infrared image. By analyzing the traditional high pass filtering algorithm and two of its improved correction methods, a new improved adaptive correction method based on bilateral filter is presented. A second correction matrix which is derived from the bilateral filter coefficient matrix is introduced. This matrix can distinguish edges of the scene from the difference image of the original image and bilateral filtering image, and inhibit them adaptively to make the correction parameters more accurate. In experimental part, the new algorithm is compared with the other two improved algorithms by correcting the same video sequence added with simulated noise and the same images with real uniformity to prove that it can achieve a better effect of correction.

Key words: infrared focal panel array; non-uniformity correction; scene-based; bilateral filter; second correction matrix

1 引 言

红外焦平面阵列探测器(IRFPA)已成为红外成像技术的主要器件,但其存在严重的非均匀性,在红外图像中表现为固定图案噪声^[1](FPN),严重制约着IRFPA的应用,所以必须进行非均匀性校正(NUC)。校正方法主要包括两类:一类是定标法,典型代表是两点温度定标算法,定标法最大的缺点是系统需要重复标定^[1-2];另一类是场景法,依据实际场景的信息实现非均匀性校正,可以实现自适应校正,成为NUC技术发展的主要方向^[3-12]。

近些年来,基于场景的非均匀校正技术层出不穷,总的来说,这些算法都是通过两大类途径实现的,一类是基于统计的^[3-6],比较有代表性的技术有时域高通滤波法^[1,3]、统计恒定法^[4-5]、神经网络法^[6-7]等。另一类是基于配准的^[8-10],比较有代表

基金项目:江苏省自然科学基金(No. BK2011698);教育部博士点新教师基金(No. 20113219120017);江苏省普通高校研究生科研创新计划项目(No. CXZZ11_0237)资助。

作者简介:雷晓杰(1988-),男,硕士研究生,主要从事红外图像非均匀性校正算法的研究工作。E-mail:leixj025@163.com

收稿日期:2011-11-14; **修订日期:**2011-12-14

性的技术有全景图积累法^[8]、帧间配准法^[9]、代数校正法^[10]等。在统计类的基于场景校正算法中,时域高通滤波法由于其相对较小的计算量和存储量而被广泛使用与研究。然而,它很难兼顾算法的收敛速度与稳定性,如果过分追求高收敛速度,那么就容易产生“鬼影效应”。针对时域高通滤波算法中的鬼影问题,许多学者对其做了广泛的研究:文献[11]在时域高通滤波法(THPF-NUC)的基础上提出空域低通时域高通法(SLPF-NUC)^[11]。文献[12]在文献[11]的基础上提出基于双边滤波的时域高通滤波法(BFTH-NUC)^[12],双边滤波器^[13](Bilateral filter)能够较好地保存图像的边缘,有效地减少鬼影的出现并进一步提高了收敛速度。然而,文献[11]采用的空域均值滤波器并不能很好的保护图像场景中的边缘成分,而双边滤波器尽管能在一定程度上保护场景的边缘,但实验表明,其滤波的残差图像中仍然具有一些不可忽略场景边缘信息,仍然不可避免的会导致校正参数的错误更新,影响算法最终的校正精度。故本文提出一种改进的双边滤波的时域高通非均匀性校正算法。

2 时域高通滤波法及其改进算法

2.1 时域高通滤波非均匀性校正算法

时域高通滤波法是一个时间域的统计滤波器,其基本思想是假设非均匀性处在背景杂波之中,且在图像中随着时间变化相对比较缓慢,而人眼感兴趣的目标信号相对于背景杂波在像平面上运动比较快,所以可以通过时域低通滤波的方法将含噪图像在时域上分解成目标信号(高频分量)和背景杂波(低频分量)两部分。将原始信号与低通滤波器的结果取差即可得到高频分量,即目标信号,从而构成一个高通滤波器,其具体公式表述如下^[12]:

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

其中:

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

式中, $x(n)$ 表示非均匀性校正之前原始图像的第 n 帧输入信号; $y(n)$ 表示高通滤波器第 n 帧的输出信号,即经过校正后第 n 帧的输出图像; $f(n)$ 为低通滤波器第 n 帧的输出信号,即第 n 帧校正参数; M 为滤波器的时间常数。

虽然大多数情况下,时域高通滤波法是一种简单而有效的非均匀性校正方法,但它有两个缺点:依赖于场景运动,并且对极端场景敏感。从式(1)、式(2)可知,滤波器直接作用于原始输入图像,这就要

求场景要有充分的运动,如果热像仪相对场景没有足够的随机运动,或在图像中有过强的场景,经过时域高通滤波处理后会致静止的图像退化。当场景由慢运动目标快速移开后,会在其原来位置上留下严重的“鬼影”,影响非均匀性校正质量。

2.2 空域低通时域高通非均匀性校正算法

由于影响THPF算法收敛速度与其鬼影问题的根本原因在于大量无关的场景信息被参与非均匀性校正参数的计算过程中,所以只要尽可能将更多的场景信息,特别是强物体从原始图像中排除,再将剩下的部分参与非均匀性校正参数的计算过程,这样就可以尽可能减小非随机运动与场景中强物体对校正过程的影响,有效减少鬼影效应。根据这个思想,SLPF-NUC预先采用空域滤波器将输入的图像信号进行分离。由于在空间上,场景中目标信号具有连续相关性,表现为空域低频性,而非均匀性是由各探测器阵列元独立产生,各阵列元对应的输出的非均匀性差异较大,表现为空域高频性,所以应用空域滤波器将原始信号分离成高频(HSF)和低频(LSF)两个部分,只利用高频部分参与非均匀性的校正。该算法中采用了空域线性均值滤波器,场景中的边缘信号同时被平均,所以可以引入一个阈值 T_h ,当 x_{ij}^{HSF} 大于阈值时,可认为它是场景的边缘,置零,不参与非均匀性的校正。因此,空域低通时域高通非均匀性校正算法可将式(2)中的 $x(n)$ 替换为 $x^{\text{HSF}}(n)$, $x^{\text{HSF}}(n)$ 表示空域高通滤波器第 n 帧的输出图像,代表了原始信号中高频部分。

SLPF-NUC跟THPF-NUC相比,它只利用原始图像中的空域高频部分用于非均匀性校正,减少了场景中目标信号在校正参数 $f(n)$ 中的积累,因此也减小“鬼影”的出现。

2.3 双边滤波时域高通非均匀性校正算法

SLPF-NUC算法虽然有效降低了THPF-NUC中的鬼影现象,但是这个算法也有它的不足之处:如不易找到合适的阈值去分离边缘与场景信息;空域滤波器选用线性滤波器,场景中边缘信号在空域上也表现为高频,如此空域高通滤波器的输出信号 $x^{\text{HSF}}(n)$ 中含有大量的边缘信号,并将影响校正参数,从而导致校正后的图像在边缘部分出现“鬼影”轮廓;此外通过阈值将高频中大于阈值的部分置零,不参与校正,如果图像中某些部分的HSF连续多帧都大于阈值,那么对应位置的非均匀性就长时间得不到校正从而重新显现。为了克服上述缺点,左提出了双边滤波时域高通法^[11]。

双边滤波器与均值滤波器最大的区别是,它是一种非线性滤波。双边滤波器考虑到了像素的强度(灰度值)变化,以保护图像中的边缘区域,它的合理性在于,两个像素的相关性不仅考虑他们空间位置的临近性,也要考虑他们的灰度值的相似性。给定一个输入图像,其对应双边滤波输出图像表述如下:

$$I^{BF}(x,y) = \frac{\sum_{(i,j) \in S_{x,y}} w(i,j)I(i,j)}{\sum_{(i,j) \in S_{x,y}} w(i,j)} \quad (3)$$

$$w(i,j) = w_s(i,j) \cdot w_r(i,j) \quad (4)$$

其中, $I(i,j)$ 为原始输入图像信号; $I^{BF}(x,y)$ 为双边滤波器的输出图像信号; $w(i,j)$ 为总模板; $w_s(i,j)$ 是空间模板; $w_r(i,j)$ 是亮度模板,空间和亮度模板具体表述如下:

$$w_d(i,j) = \exp\left\{-\frac{d_s^2\{(i,j),(x,y)\}}{2\sigma_d^2}\right\} = \exp\left\{-\frac{(i-x)^2 + (j-y)^2}{2\sigma_d^2}\right\} \quad (5)$$

$$w_r(i,j) = \exp\left\{-\frac{d_r^2\{(i,j),(x,y)\}}{2\sigma_r^2}\right\} = \exp\left\{-\frac{(i-x)^2 + (j-y)^2}{2\sigma_r^2}\right\} \quad (6)$$

式中, $d_s\{(i,j),(x,y)\}$ 和 $d_r\{(i,j),(x,y)\}$ 分别为图像两个像素点间的欧式距离与灰度差; σ_d 和 σ_r 是高斯卷积核的标准差,分别控制空间和灰度域的权值自由度,决定了双边滤波器的性能。

双边滤波时域高通非均匀性校正算法可将式(2)中的 $x(n)$ 替换为 $x^{BFr}(n)$, $x^{BFr}(n)$ 为原始图像与双边滤波器输出图像的残差图像。由于双边滤波器的边缘保护特性,BFTH算法进一步降低了THPF-NUC算法中的鬼影,且校正精度进一步得到提高。

3 改进型双边滤波时域高通非均匀性校正算法 (IBFTH-NUC)

3.1 滤波器滤波效果分析

双边滤波器尽管能在一定程度上保护场景的边缘,但其滤波的残差图像 $x^{BFr}(n)$ 中仍然具有一些不可忽略场景边缘信息,这些边缘信息参与到非均匀性校正的更新中,必然会导致校正参数的错误更新,影响算法最终的校正精度,下面以一个实例来说明这个现象。图1(a)是一幅含有非均匀性噪声的图像,场景中包含了天地交接与一些建筑物,非均匀性在图像上主要表现为横竖交错的竖纹。图1(b)与图1(d)是将图1(a)进行均值滤波与双边滤波后的

结果。图1(c)与图1(e)分别为均值滤波与双边滤波结果的残差图像。由图中可以看出,均值滤波器的滤波结果中,除了包含大部分非均匀性噪声外,还残余有大量的场景信息,特别是场景中的边缘信息。相比之下,双边滤波残差图像中,场景的边缘信息已经减少了许多,特别是右侧的房屋对比更为明显,然而,其中仍然包含大量的场景信息。这个例子说明,双边滤波器并不能很好的保护场景中的边缘。所以,必须辅助额外的措施将这些场景信号进一步排除。



(a) 原始带非均匀性的红外图像



(b) 均值滤波器输出图像 (D=9, Th=0.09)



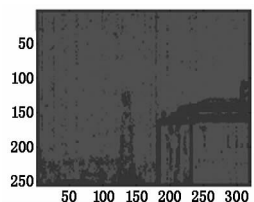
(c) 均值滤波残差图像



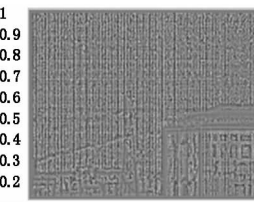
(d) 双边滤波器输出图像 (D=9, sigma_s=3, sigma_r=0.14)



(e) 双边滤波器残差图像



(f) 二次校正矩阵的 imagesc 图像



(g) 对双边滤波残差图像二次校正后所得图像(alpha=5)

图1 滤波器分离效果图

3.2 IBFTH-NUC

本文算法的改进之处在于,双边滤波器残差图像中仍然有场景的边缘信息,由此可以对残差图像再次进行处理,使残差图像中场景边缘信息减少部分,校正参数的计算更加准确。如果要抑制场景中强边缘,可以分成两步来进行:首先要在双边滤波器

的输出图像中定位强边缘信息。根据双边滤波器权重矩阵 $w(i, j)$ 可以从场景中区分出边缘部分^[14], 场景中的边缘信息主要由亮度范围矩阵 $w_r(i, j)$ 反应, 所以先把空间距离矩阵 $w_d(i, j)$ 归一化, 后与亮度范围矩阵 $w_r(i, j)$ 相乘所得矩阵的和 $w_m(x, y)$ 的大小可以反应出像素点 (x, y) 是否处在场景边缘。矩阵 w_m 称为判定矩阵, 其均值记作 $\overline{w_m}$, 公式如下:

$$w_m(x, y) = \frac{\sum_{(i, j) \in S_{x, y}} w(i, j)}{\sum_{(i, j) \in S_{x, y}} w_d(i, j)}$$

$$= \frac{\sum_{(i, j) \in S_{x, y}} w_d(i, j)}{\sum_{(i, j) \in S_{x, y}} w_d(i, j)} w_r(i, j) \quad (7)$$

$$\overline{w_m} = \frac{\sum_{(x, y) \in S_{m, n}} w_m(x, y)}{M \times N} \quad (8)$$

式中, $M \times N$ 为图像总的像素个数。当 $w_m(x, y) \geq \overline{w_m}$ 时, 认为像素点不在场景的边缘处; 当 $w_m(x, y) < \overline{w_m}$ 时, 认为像素点处在场景的边缘。

定位到场景中的边缘后, 下一步就要对已经找到边缘信息予以抑制。低通滤波器的系数 $\frac{1}{M}$ 在残差图像场景中每个像素点的值应该根据该像素是否处在边缘而适应性的变化。若该像素在边缘, 则 $\frac{1}{M}$ 应变小, 使得该点对校正参数的计算贡献减少。按照这个思路, 本文引入二次校正矩阵 $w_l(n)$, 并将二次校正矩阵与低通滤波器的系数 $\frac{1}{M}$ 相乘, 即将低通滤波器的系数 $\frac{1}{M}$ 更改为 $\frac{1}{M} w_l(n)$, 这样就使本身固定的时域高通滤波器的时间常数随着场景信息自适应地进行改变。二次校正矩阵 $w_l(n)$ 一个是与图像矩阵大小相同的矩阵, 表述为:

$$w_l(x, y) = \begin{cases} \overline{w_m}/\alpha & w_m(x, y) < \overline{w_m} \\ 1 & w_m(x, y) \geq \overline{w_m} \end{cases} \quad (9)$$

其中, α 是抑制因子, 取值越大对残差图像中边缘信息抑制作用越强, 根据要处理场景的复杂程度选择合适的抑制因子, 既能有效抑制对残差图像中边缘信息, 又能保证收敛速度。当 $w_m(x, y) \geq \overline{w_m}$ 时, 认为像素点不在场景的边缘处, 应正常加入校正参数的计算, 故将二次校正值 $w_l(x, y)$ 赋值为 1; 当 $w_m(x, y) < \overline{w_m}$ 时, 认为像素点处在场景的边缘, 此时若将零赋给 $w_l(x, y)$, 即该像素点不参加校正参数的计算, 赋零虽然能较强的抑制场景边缘计入校正参数, 但会带来像 SLTH-NUC 一样的问题, 即场景的非均匀性参数可能长时间得不到更新, 降低了收敛速

度, 影响非均匀性校正的效果, 因此在此种情况下可以将 $\overline{w_m}/\alpha$ 赋值给 $w_l(x, y)$, 这样既能抑制边缘计入校正参数, 又能保证收敛速度, 对场景中边缘的抑制也能动态的调整: 若 $\overline{w_m}$ 的值较小, 说明对应像素点处在较明显的边缘处, 而 $w_l(x, y) = \overline{w_m}/\alpha$, 所以 $w_l(x, y)$ 同时也变小, 对边缘的抑制效果相应也增强。

实际的抑制效果可以从图 1 观察到。图 1(f) 为计算得到的二次校正矩阵, 对双边滤波残差图像进行二次校正, 即图 1(e) 图像与图 1(f) 中二次校正矩阵参数相乘, 得到图 1(g) 图像。可以明显地看到无论是两侧的房屋, 还是中间的高塔, 边缘部分均得到有效抑制, 从而减少场景中的细节部分计入校正参数, 使校正参数计算更准确。

综上, 改进型双边滤波时域高通非均匀性校正算法表述如下:

$$y(n) = x(n) - f(n) \quad (10)$$

其中:

$$f(n) = w_l(n) \frac{1}{M} x^{\text{BFr}}(n) + \left[1 - w_l(n) \frac{1}{M} \right] f(n - 1) \quad (11)$$

$$x^{\text{BFr}}(n) = x(n) - x^{\text{BF}}(n) \quad (12)$$

式中, $x^{\text{BF}}(n)$ 为双边滤波器第 n 帧输出图像; $x^{\text{BFr}}(n)$ 为原始图像与双边滤波器输出图像的残差图像; $w_l(n)$ 为第 n 帧图像的二次校正矩阵。IBFTH-NUC 既改进了 SLTH-NUC 线性滤波器对场景边缘信息的平滑而带来的“鬼影”问题, 又在 BFTH-NUC 的基础上进一步对双边滤波器输出图像进行判断, 区分出图像场景边缘信息, 并产生相应的二次校正矩阵对残差图像中的边缘予以有效地抑制, 使校正参数的计算更加接近真实的非均匀性。

4 实验结果及分析

为了检验本文提出算法的实际效果, 本节我们详细比较如下三种算法: 空域低通时域高通算法、双边滤波时域高通法和改进型双边滤波时域高通法。

本文采用均方根误差 (RMSE) 来评估图像校正质量, 它的值越小, 被评价图像与原图像的相似度就越高, 图像校正质量也就越高, 具体公式如下:

$$\text{RMSE} = \sqrt{\frac{1}{M \times N} \sum_{i, j} (I_{ij} - \hat{I}_{ij})^2} \quad (13)$$

其中, I_{ij} 代表原始图像像素点 (i, j) 的灰度值; \hat{I}_{ij} 代表校正后图像像素点 (i, j) 的灰度值; M 和 N 分标代表图像的行数和列数。

用连续的 500 帧图像序列来测试各算法的校正效果, 对连续的图像序列加上均匀分布的随机噪声,

各算法校正效果如图 2 所示。

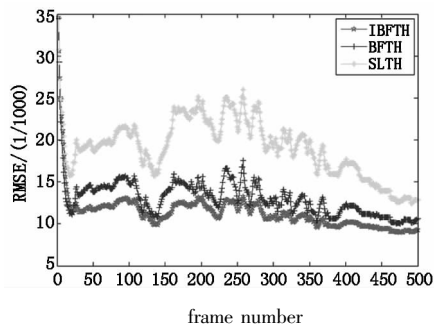


图 2 三种校正算法的 RMSE 曲线

图 2 中三条曲线分别对应上文中提到的三种校正算法: SLTH-NUC ($M = 5, T_h = 0.09$), BFTH-NUC ($M = 5, D = 9, \sigma_s = 3, \sigma_r = 0.14$), IBFTH-NUC ($\alpha = 5, M = 5, D = 9, \sigma_s = 3, \sigma_r = 0.14$)。图 2 中曲线的每个大尖峰表示此时目标发生突变运动,导致均方根误差变大。在第 30 帧到第 100 帧,三条曲线相对较平缓且几乎平行,但是 SLTH, BFTH 和 IBFTH 的 RMSE 曲线值分别在 20, 14 和 12 上下小范围波动。在第 160 帧到第 380 帧,SLTH 的 RMSE 曲线值最大,波动最厉害;BFTH 的 RMSE 曲线值比 SLTH 的要小,波动也比较厉害,特别是在 250 帧附近;而 IBFTH 的 RMSE 曲线值比其他两条曲线都要小,并且波动也是最小的,尤其在其他两条曲线的峰值部分对应的数帧图像处,即校正效果最差,易出“鬼影”的地方,IBFTH 的 RMSE 的峰值明显变小,使得整条曲线能够趋于平稳且曲线的值最小。

取图像序列中第 235 帧图像具体分析,通过校正后图像与原始干净图像的差值图像,可以清楚地看出各算法的不足和优势,差值图像中场景信息越少则图像校正质量越高。三种校正算法效果对比如图 3 所示。

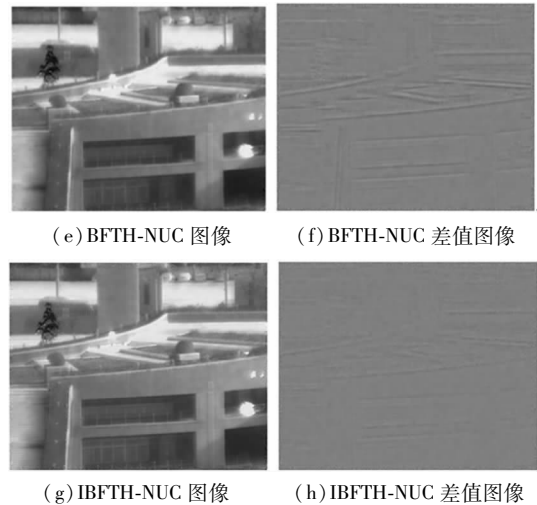
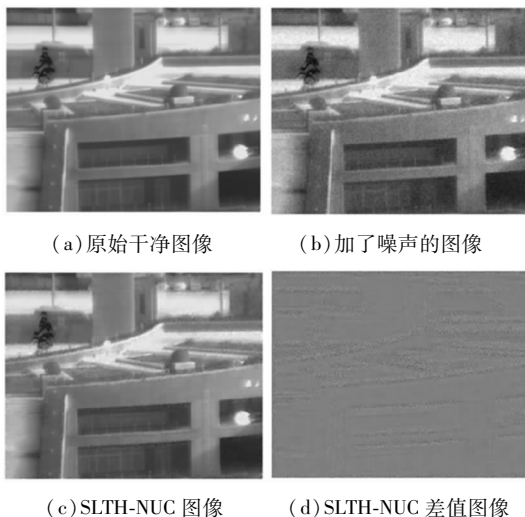


图 3 第 235 帧图像处理结果对比

从图 3 可以看出图 3(d) SLTH-NUC 差值图像场景边缘部分有未被较掉的噪声,这也验证了本文之前的分析,连续几帧图像高频部分的绝对值都大于阈值,校正参数得不到更新,致使原图像对应部分的噪声得不到有效校正;图 3(f) BFTH-NUC 差值图像中虽然边缘部分的噪声得到校正,但是仍有较多的场景边缘信息;图 3(h) IBFTH-NUC 差值图像不仅噪声得到有效去除,而且场景边缘在三幅差值图像中最少。

采用 HgCdTe 中波 ($3.7 \sim 4.8 \mu\text{m}$), 320×256 的红外焦平面热像仪对本文算法的实际效果进行验证,图 4 给出了经过 100 帧后,三种算法的校正结果。从图 4 中可以看出 SLTH-NUC 的校正图像图 4(b)中还残留有较多的非均匀性,BFTH-NUC 的校正结果图 4(c)要优于 SLTH-NUC 的校正结果,但是仍然存在部分残余非均匀性,从而影响图像的正常观测,而本文算法的校正结果图 4(d)中,非均匀性已经难以察觉。由此可以看出,本文算法的校正效果要明显优于其他两种算法。

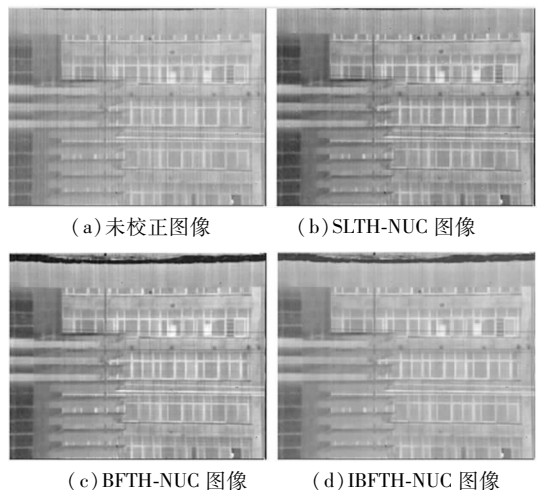


图 4 真实非均匀性图像处理结果

5 结 论

本文提出了一种改进的基于双边滤波的时域高通非均匀性校正算法。通过利用双边滤波器的系数矩阵 w 得到二次校正矩阵 w_i , 使得低通滤波器的系数能够根据双边滤波残差图像的场景边缘复杂程度动态调整, 对双边滤波残差图像的场景边缘能够有效地予以抑制, 使校正参数的计算更准确, 从而减少校正图像中鬼影的出现, 尤其是当场景由慢运动目标快速移开后, 对鬼影的抑制效果更明显。非均匀性校正的仿真实验结果与真实非均匀性的校正结果都表明, 本文提出的算法校正效果要优于其他两种时域高通滤波法的改进算法, 是一种简单有效的基于场景非均匀性校正算法。

参考文献:

- [1] D A Scribner, K A Sarkady, J T Caulfield, et al. Nonuniformity correction for staring IR focal plane arrays using scene-based techniques[C]. *Infrared Detectors and Focal Plane Arrays*, SPIE, 1990, 1308(1): 224 - 233.
- [2] Lü Lei, Zhang Xuefeng. Real-time infrared image nonuniformity correction base on FPGA[J]. *Laser & Infrared*, 2011, 41(6): 641 - 643. (in Chinese)
吕雷, 张学峰. 基于 FPGA 的红外图像实时非均匀性校正[J]. *激光与红外*, 2011, 41(6): 641 - 643.
- [3] D A Scribner, K Asarkady, M R Kruer, et al. Adaptive retina-like preprocessing for imaging detector arrays[C]. *Proc. IEEE*, 1993: 1955 - 1960.
- [4] J Harris, Y Chiang. Non-uniformity correction of infrared image sequences using the constant-statistics constraint [J]. *IEEE Transactions on Image Processing*, 1999, 8(8): 1148 - 1151.
- [5] C Zuo, Q Chen, G H Gu, et al. Scene-based nonuniformity correction method using multiscale constant statistics[J]. *Opt Eng*, 2011, 50(8): 0870061 - 08700611.
- [6] D A scribner, K A sarkady, M R Kruer, et al. Adaptive nonuniformity correction for IR focal-plane arrays using neural networks [C]. *Infrared Sensors: Detectors, Electronics, and Signal Processing*, SPIE, 1991, 1541(1): 100 - 109.
- [7] Zheng Dezhong, Sun Tao. Improved algorithm of neural network using in non-uniformity correction[J]. *Laser & Infrared*, 2010, 40(10): 1111 - 1115. (in Chinese)
郑德忠, 孙涛. 应用于非均匀性校正的改进的神经网络算法[J]. *激光与红外*, 2010, 40(10): 1111 - 1115.
- [8] R C Hardie, M M Hayat, E E Armstrong, et al. Scene based non-uniformity correction using video sequences and registration[J]. *Appl. Opt.*, 2000, 39: 1241 - 1250.
- [9] C Zuo, Q Chen, G Gu, et al. Scene-based nonuniformity correction algorithm based on interframe registration[J]. *J. Opt. Soc. Am. A*, 2011, 9(28): 1164 - 1176.
- [10] B M Ratliff, M M Hayat, R C Hardie. An algebraic algorithm for nonuniformity correction in focal-plane arrays [J]. *J. Opt. Soc. Am. A*, 2002, 19: 1737 - 1747.
- [11] W Qian, Q Chen, G Gu. Space low-pass and temporal high-pass nonuniformity correction algorithm [J]. *Opt. Rev.*, 2010, 17(1): 24 - 29.
- [12] C Zuo, Q Chen, G Gu, et al. New temporal high-pass filter nonuniformity correction based on bilateral filter[J]. *Opt. Rev.*, 2011, 18(2): 197 - 202.
- [13] C Tomasi, R Manduchi. Bilateral filtering for gray and color images[C]. *Sixth International Conference on Computer Vision*, 1998: 839 - 846.
- [14] F Durand, J Dorsey. Fast bilateral filtering for the display of high-dynamic-range images[J]. *Acm T Graphic*, 2002, 21(3): 257 - 266.