

基于时空估计的冷像校正方法

魏 伟^{1,2,3,4}, 向 伟^{1,3,4}, 赵耀宏^{1,3,4}

- (1. 中国科学院沈阳自动化研究所, 辽宁 沈阳 110016; 2. 中国科学院大学, 北京 100049;
3. 中国科学院光电信息处理重点实验室, 辽宁 沈阳 110016;
4. 辽宁省图像理解与视觉计算重点实验室, 辽宁 沈阳 110016)

摘 要: 冷像是影响制冷型红外探测器成像质量的重要因素。虽然可以通过非均匀校正技术进行去除, 但当校正后的工作条件发生改变时, 冷像的影响又会显现出来。根据冷像产生的机理以及频率特点, 提出了一种基于时空估计的冷像校正算法。首先, 通过使用小波分解与重构对原始图像进行冷像噪声空间域估计; 然后, 利用自适应时域低通滤波获得冷像噪声的时间域估计; 最后, 利用原始图像与获得的冷像估计噪声做差完成校正过程。使用仿真和实际的红外图像序列进行实验, 结果表明所提算法能够有效地去除冷像噪声。

关键词: 冷像; 非均匀校正; 小波分解与重构

中图分类号: TP391 文献标志码: A DOI: 10.3788/IRLA201847.0626003

An narcissus effect correction method based on spatial and time domain estimation

Wei Wei^{1,2,3,4}, Xiang Wei^{1,3,4}, Zhao Yaohong^{1,3,4}

- (1. Shenyang Institute of Automation, Chinese Academy of Sciences, Shenyang 110016, China;
2. University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China;
3. Key Laboratory of Opto-Electronic Information Processing, Chinese Academy of Sciences, Shenyang 110016, China;
4. The Key Lab of Image Understanding and Computer Vision, Liaoning Province, Shenyang 110016, China)

Abstract: Narcissus effect was an important factor that influence the imaging quality of the cooled infrared detector. Although it can be removed by non-uniform correction techniques, narcissus effect will reappear once the operating conditions have changed. Through analyzing the manifestation of narcissus effect, a correction algorithm based on adaptive spatial-temporal filtering was proposed. First, spatial domain estimation of Narcissus effect was captured by wavelet transform. Then, time domain estimation of Narcissus effect was gained by adaptive time domain low-pass filtering. Finally, the correction was applied by subtracting the estimated spatial-temporal noise from the original image. Experimental results on simulated and actual infrared image sequences have verified the effectiveness of the proposed algorithm.

Key words: narcissus effect; non-uniformity correction; wavelet decomposition and reconstruction

收稿日期: 2018-01-05; 修订日期: 2018-02-03

基金项目: 中国科学院国防创新基金(CXJJ-15-S109)

作者简介: 魏伟(1989-), 男, 硕士生, 主要从事红外图像处理方面的研究。Email: weiwei@sia.cn

导师简介: 向伟(1973-), 男, 研究员, 硕士生导师, 主要从事图像处理等方面的研究。Email: xiangwei@sia.cn

0 引言

为了提高探测器的灵敏度,红外制冷探测器在使用前需要将焦平面进行制冷。实际工作时,焦平面阵列接收到的辐射不仅来自于目标,而且热像仪内部器件的影响会导致图像受到冷像噪声^[1]的干扰。从图像的角度来看,冷像属于低频非均匀噪声的一种,可以通过非均匀校正技术进行消除。

传统的非均匀校正方法主要分为两类:基于标定的方法和基于场景的方法。基于标定的方法如两点校正法发展较为成熟,但随着时间的推移,探测器特性会发生变化,校正好的参数便不再适用,需要重新校正,而标定过程的复杂工艺使得该方法使用受限。而基于场景的方法可以连续校正图像而成为研究热点。传统的神经网络法通过对原图像低通滤波来估计真实图像,然后利用最小二乘法对原图像与估计图像使用梯度下降法进行迭代校正。该方法虽然一定程度上能够校正图像,但由于鬼影问题等因素常常导致校正效果并不总是很理想。针对该问题,参考文献[2-3]通过设定自适应学习率,加入动量项,边缘检测,对原图像与估计图像的时域运动与空域像素相关性检测等方法,对平坦区域和边缘区域进行判定从而分别进行处理,最终能够在有效抑制鬼影的情况下完成图像的校正。参考文献[4]提出使用帧间配准的方法进行校正。通过对相邻两帧图像进行配准从而获得两帧图像的重叠区域,进而在重叠区域使用梯度下降法进行迭代完成校正,虽然校正效果较好,但算法比较依赖运动估计的准确性,而且同样存在鬼影问题。由此,参考文献[5-6]等通过根据场景内容设定自适应学习率、多帧配准、以及基于投影运动估计与双向配准的方法,实现了配准精度和校正效果的提升。时域高通滤波的方法处理速度快,对连续运动场景时处理效果较好。然而对场景运动要求较高,否则容易出现鬼影。参考文献[7-8]针对这种情况,分别提出结合双边滤波的方法及对相邻帧亮度变化分区处理的方法实现参数自适应校正,抑制了鬼影的出现,处理效果表现较好。

综上所述,各种算法都针对运动以及鬼影问题进行了改进,然而这些算法大多都适用于非均匀噪声属于高频而且场景内容比较丰富的情形。实际上,

当处理类似冷像噪声这种低频噪声时,上述方法的效果会受到很大的影响。因此,研究一种针对低频冷像非均匀噪声的算法就显得尤为重要了。

文中在分析了噪声来源的基础上,提出了一种基于小波变换的冷像校正方法。算法首先利用冷像噪声属于低频噪声这一特点,通过小波变换对噪声进行空间域的估计,对获得的空域估计图像进行时域低通滤波,最终获得噪声估计图像,将原始图像与估计图像相减即可完成校正过程。经过实验验证,算法可以有效地消除冷像噪声,同时保留场景信息。

1 冷像来源及特点

在前视热成像系统中,为了提高红外探测器的灵敏度,需要将其放在低温腔(杜瓦瓶)内进行制冷。然而探测器低温腔冷表面产生的冷反射与镜筒产生的热辐射会经红外光学系统到达探测器而影响成像,这种特有的成像缺陷称为冷像^[9]。图1(a)是一幅典型的冷像噪声红外图像。该图像中,冷像表现为图像中间呈明暗相间的圆环状。图1(b)为热像仪成像的原理图。图中折线1、2分别为镜筒热辐射与探测器冷辐射到达探测器的光路示意图。

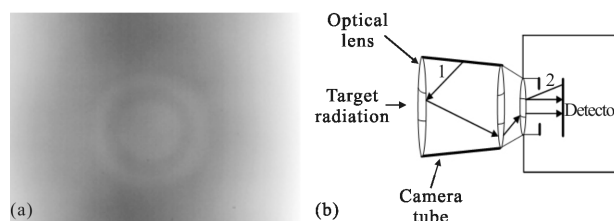


图1 (a)冷像噪声图和(b)冷像形成原理图

Fig.1 (a) Image with narcissus effect and (b) schematic of narcissus effect

冷像与探测器的温度、红外物镜的镜筒温度、折射面的反射率、探测器的光谱响应、光学元件的有效通光口径等因素有关。

探测器任何视场的像面照度为景物的像面照度、探测器冷辐射和镜筒热辐射经所有面(共 n 个面)反射到像面的总照度^[9]。其中目标景物的像面照度为:

$$E_0' = \Omega_0 L_s' = \int_{\lambda_1}^{\lambda_2} \frac{\tau \pi L_s(\lambda, T_s)}{4F^2} d\lambda \quad (1)$$

式中: τ 为光学系统的光谱透射率; λ_1, λ_2 为系统工作的红外波段; T_s 为景物温度; Ω_0 为像方立体角; F 为

光学系统的工作光圈数。

单个折射面反射的冷辐射对像面照度为：

$$E_d'(\omega') = \Omega_j(\omega') L_d' = \int_{\lambda_1}^{\lambda_2} \frac{\tau_j r_j \pi \sigma_j(\omega') L_d(\lambda, T_d)}{4F^2} d\lambda \quad (2)$$

式中： τ_j 为探测器发出的冷辐射经 j 面反射再回到探测器的总光谱透过率； r_j 为第 j 面的反射率； $\Omega_j(\omega')$ 为冷辐射经第 j 面反射后返回到探测器的立体角； $\sigma_j(\omega')$ 为部分立体角或冷像强度比(NIR)， $\sigma_j(\omega') = \frac{\Omega_j(\omega')}{\Omega_0}$ 。

单个折射面反射的镜筒热辐射对像面照度为：

$$E_h'(\omega') = \Omega_h(\omega') L_h' = \int_{\lambda_1}^{\lambda_2} \frac{\tau_j r_j \pi (1 - \sigma_j(\omega')) L_h(\lambda, T_h)}{4F^2} d\lambda \quad (3)$$

式中： $\Omega_h(\omega')$ 为热辐射经第 j 面反射后到达探测器的立体角， $\Omega_h(\omega') = \Omega_0 - \Omega_j(\omega')$ 。

因此总的照度为：

$$E'(\omega') = E_0' + \sum_{j=1}^n E_d'(\omega') + \sum_{j=1}^n E_h'(\omega') \quad (4)$$

式中：第一项为目标辐射；第二项为常数；第三项为探测器和镜筒之间的温差造成的像面非均匀性(即冷像)。

当系统工作在镜筒温度恒定、无变焦的情况下，传统的非均匀校正方法如两点法便可以进行校正。但校正之后，当镜筒温度改变时，镜筒的热辐射量将随之改变，冷像噪声又会重新出现。为验证该结论，将在室温条件下校正好的探测器放入温箱中，对准黑体，保持黑体温度为 25° ，同时调节温箱温度由 10° 升至 40° ，采集热像仪的输出，得到结果如图 2 所

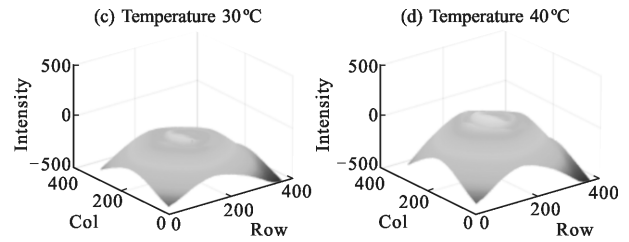


图 2 不同温度下的三维响应图像
Fig.2 3D response images of different temperature

示。从图 2 中可以看出，当温箱内温度逐渐升高时(相应镜筒温度也升高)，冷像噪声逐渐变大。同时，观察冷像噪声图第 150 行的响应曲线(图 3)可以得同样的结论。从图 3 中同样可以看到，冷像噪声在空域上变化较为平缓，属于低频噪声。

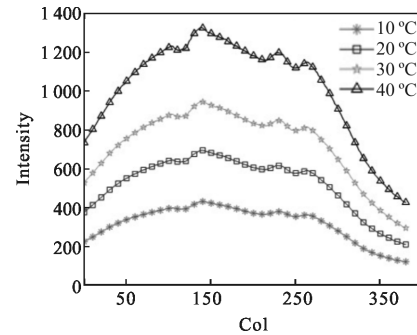


图 3 不同温度下的响应曲线
Fig.3 Response curves in different temperatures

2 文中算法

由前文分析可知，冷像受工作环境温度影响较大。虽然基于标定的校正方法能够进行去除，但该方法工艺复杂，且需要重复标定，使用较为不便。因此，文中采用基于场景的非均匀校正算法。

2.1 算法流程

算法框图如图 4 所示。为了获得冷像噪声的估

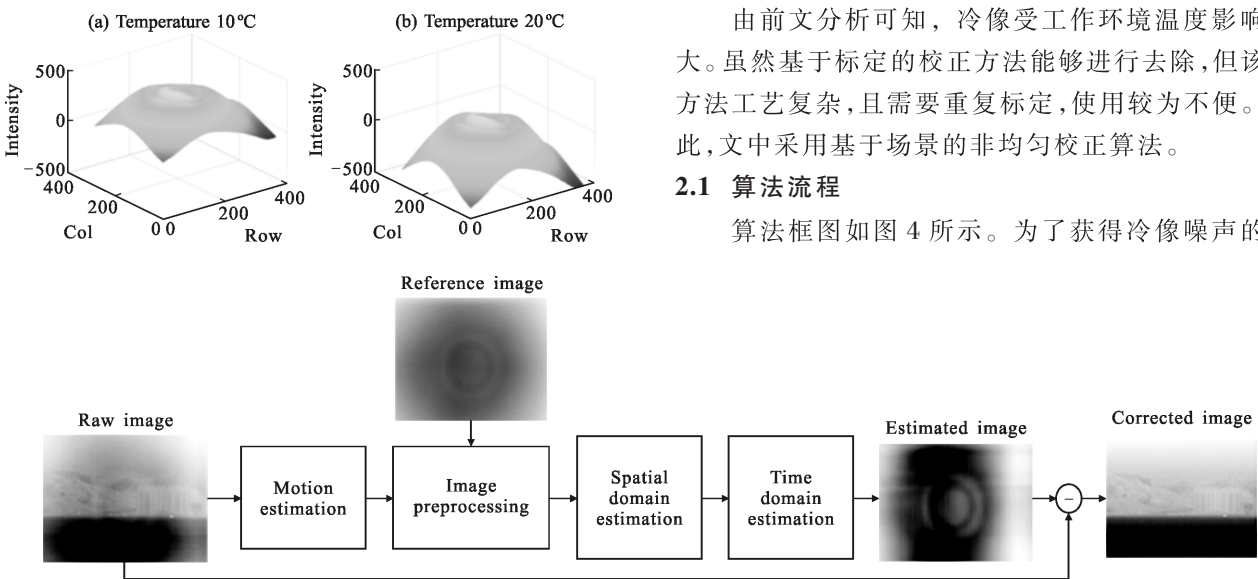


图 4 文中算法流程图

Fig.4 Framework of algorithm in this paper

计图像,算法预先使用热像仪采集多帧黑体图像,将其累加平均后作为冷像参考图像。这是因为实际工作时无法获取真实噪声模型,但参考图像可以提供一个近似的模型作为先验条件,在后续处理时,可以根据该参考图像来抑制部分场景信息,达到预处理的目的。首先对场景进行运动检测;当场景满足运动条件时,利用参考图像对采集到的原始图像进行预处理来抑制原始图像中的强边缘和强角点;然后对预处理之后的图像进行小波滤波,得到冷像噪声的空域估计,再将该估计图像进行时域滤波,最终得到冷像噪声的估计图像。最后利用原始图像与该噪声估计图像做差完成图像的校正过程。

2.2 运动检测

由于文中算法需要进行时域滤波,如果热像仪对某一场景拍摄时间太长后又重新恢复运动时,由于参数的误更新会导致在原图像留下“鬼影”。为了保证算法针对运动场景进行处理,防止“鬼影”的出现,文中算法首先利用帧差法对图像进行运动检测;如果当前图像发生运动,则对其进行处理,否则不处理。运动判别条件如下:

$$\Delta_t = I_t(i, j) - I_{t-1}(i, j) \quad (5)$$

$$\begin{cases} T_0 = \infty \\ T_t = \min(T_{t-1}, \text{var}(\Delta_t)) \end{cases} \quad (6)$$

式中: $I_t(i, j)$ 、 $I_{t-1}(i, j)$ 表示 t 时刻相邻的两帧图像; Δ_t 为两帧图像的差值; T_0 为初始化阈值; $\text{var}(\Delta_t)$ 为帧差图像的方差。

当 $\text{var}(\Delta_t) > 1.2T_t$ 时,则认为当前图像发生了运动,可以对该图像进行后续处理。

2.3 原始图像预处理

在原始图像中,由于场景边缘、反光点或者发光点等高频信号的存在,使得某些区域的灰度值与其周围灰度相差过大,而且这些区域往往形状特征不同,所占的像素也较少。如果算法不能对这些特殊区域进行有效处理,那么在最终获得的冷像估计图像中可能残留大量的高频场景信号,最终用原图像与冷像估计图像相减时,这些残留的高频信号区域由于做了过量减除,反而在结果图像的对应位置处出现明显的“鬼影”。为了防止“鬼影”的出现,文中对满足运动条件的原始图像进行预处理。

首先将原始图像与参考图像进行归一化:

$$I_r = \frac{1}{S} \sum_{a=1}^S I_a \quad (7)$$

$$I(i, j) = I(i, j) - I_m(i, j) \quad (8)$$

$$I_r(i, j) = I_r(i, j) - I_m(i, j) \quad (9)$$

式中: S 为累加帧数; I_r 为参考图像; I_a 为黑体图像; I 为原始图像; $I_m(i, j)$ 与 $I_m(i, j)$ 分别为原始图像和参考图像的均值。

然后求取原图像与参考图像的差值图像,对得到的差值图像进行逐像素判定。若图像中某些点灰度绝对值大于某阈值,则认为该处为强高频信号,需要对其进行抑制。公式如下:

$$d(i, j) = I(i, j) - I_r(i, j) \quad (10)$$

$$I(i, j) = \begin{cases} I(i, j) + Th & \text{if } d(i, j) \geq Th \\ I(i, j) - Th & \text{if } d(i, j) \leq -Th \end{cases} \quad (11)$$

式中: Th 为预先设定的阈值。

通过这个过程,便将原图像与参考图像之间的平均变化限定在某个固定范围,极大地抑制了场景中的高频信号。

2.4 冷像空域估计

结合前文冷像噪声形成机理(图 1)以及响应曲线(图 3)可以看出,冷像噪声曲线在空间上变化较为平缓,属于低频噪声,主要分布在图像的低频部分。因此,为了对冷像噪声进行空域估计,算法需要对图像的低频部分进行提取。由于小波变换^[10]可以比较方便地对图像的低频部分和高频部分进行分别处理,因此文中算法采用小波变换的方式对原图像进行小波分解与重构。将小波分解后的其他三个方向上的高频细节信息置零,利用近似图像进行小波重构,便得到了冷像噪声的初步估计。

小波分解公式如下:

$$W_\varphi(j_0, m, n) = \frac{1}{MN} \sum_{m=0}^M \sum_{n=0}^M I(m, n) \varphi_{j_0, m, n}(m, n) \quad (12)$$

$$W_\psi^k(j, m, n) = \frac{1}{MN} \sum_{m=0}^M \sum_{n=0}^M I(m, n) \psi_{j, m, n}^k(m, n) \quad (13)$$

$$k \in \{H, V, D\}$$

式中: $\varphi_{j_0, m, n}(m, n)$ 与 $\psi_{j, m, n}^k(m, n)$ 为分解尺度函数; j_0 为开始尺度; $W_\varphi(j_0, m, n)$ 为 I 在 j_0 处的近似; $W_\psi^k(j, m, n)$ 为尺度 $j \geq j_0$ 处的水平、垂直与对角方向的细节; H, V, D 分别为水平方向、垂直方向、对角方向。

冷像噪声估计公式如下:

$$I'(i, j) = \frac{1}{\sqrt{MN}} \sum_{m=0}^M \sum_{n=0}^M W_\varphi(j_0, m, n) \varphi_{j_0, m, n}(i, j) \quad (14)$$

图 5 和图 6 是分别原始图像, 重构图像以及小波三层分解后的近似图像与细节图像。

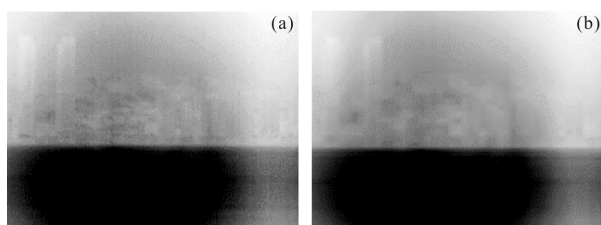
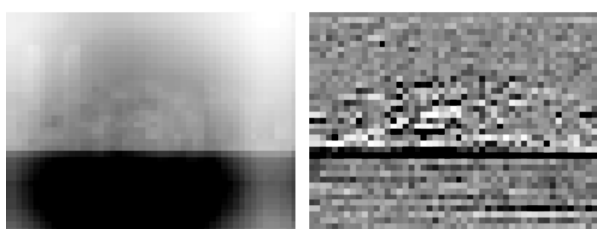


图 5 (a) 待分解原图像, (b) 重构图像

Fig.5 (a) Raw image before decomposition and (b) reconstructed image

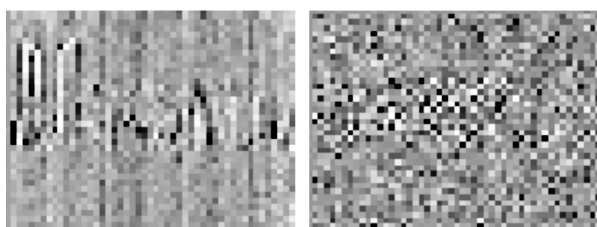


(a) 近似图像

(b) 水平细节

(a) Approximate image

(b) Horizontal details



(c) 垂直细节

(d) 对角细节

(c) Vertical details

(d) Diagonal details

图 6 小波分解后的图像

Fig.6 Images after wavelet decomposition

从图中可以发现, 进行三层分解之后的近似图像中, 场景信息变得模糊而冷像噪声却基本没有发生变化, 利用这个特点重构图像便得到了冷像噪声的空域初步估计。

2.5 冷像时域估计

在获得了低频信息之后, 图像中的很多场景信息被极大地抑制了, 然而还是有一些保留了下来, 因此需要进一步将图像中可能残留的场景信息去除。由于冷像噪声在时域上表现为固定图案噪声, 因此可以利用这一特点, 在时域上对图像进行滤波。这一过程通过在时域上对不同运动场景图像进行累加平均, 这样便可以在模糊场景的同时使得噪声更加突

出。因此文中使用自适应时间常数的时域低通滤波法进行滤波。计算公式为:

$$I_b(n) = \frac{1}{K} I'(n) + \left(1 - \frac{1}{K}\right) I_b(n-1) \quad (15)$$

$$K = \alpha * \text{var}(I') \quad (16)$$

式中: α 为参数; $I_b(n-1)$ 为第 $n-1$ 帧图像滤波结果; $\text{var}(I')$ 为当前图像方差; $I_b(n)$ 为最终滤波结果。

传统的时域低通滤波算法的时间常数都是固定的, 而滤波效果与时间常数密切相关。时间常数太大, 算法收敛速度太慢; 时间常数太小, 则容易产生鬼影。因此文中针对时间常数进行改进, 使其能够根据场景内容进行自适应变化, 从而增强算法的鲁棒性。文中将当前图像方差 $\text{var}(I')$ 与参数 α 的乘积作为滤波时间常数 K 。如果当前图像细节较多方差较大, 则对应的 K 相应变大, 从而使得当前图像 I' 对滤波结果的影响减弱; 当前图像较为平坦, 即方差较小时, 则对应的 K 相应变小, 从而使得当前图像 I' 对滤波结果的影响增强。通过这个过程, 使得算法根据不同的场景自适应调整滤波系数, 既能够保证算法的处理效果和收敛速度, 也能够抑制鬼影的出现。

3 实验结果与对比

3.1 参数调节

由算法分析可知, 影响到处理效果的参数主要有: 小波分解层数, 图像预处理阈值 Th , 自适应时域低通滤波参数 α 。

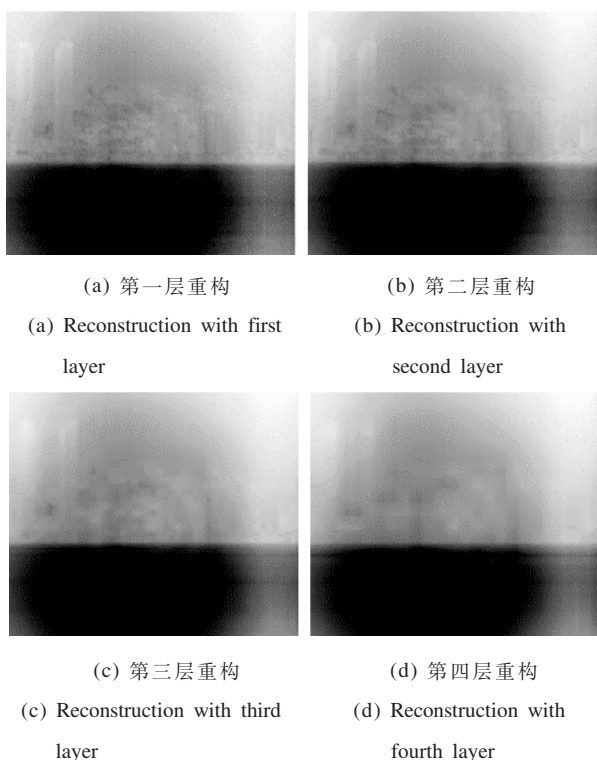
3.1.1 小波分解层数

文中在选取小波分解方法时, 对比了哈尔小波^[10] (Haar)、多贝西小波^[11] (Daubechies) 等变换方法。由于多贝西小波进行图像重构后在抑制场景信息、保留冷像信息方面优于其他方法, 因此文中选取多贝西小波变换来对原图像进行分解与重构。

由于实际工作时, 冷像的强度会发生变化, 因此, 文中在确定分解层数时进行了四种对比:

从图 7 可以看出, 利用第一层和第二层分解后的近似图像进行重构后, 冷像信息得到了很好的保留, 但同时也保留了大量的高频场景信息; 而利用第四层分解后的近似图像重构之后, 图像中的场景信息得到的充分抑制, 然而冷像信息也受到影响, 变得模糊。因此, 文中在进行对比之后选取第三层近似图像进行小波重构, 可以保证在保留冷像的同时抑制

场景信息。然而在实际进行小波分解重构时,可以根据冷像强度对分解层数进行调整。



(a) 第一层重构 (b) 第二层重构
(a) Reconstruction with first layer (b) Reconstruction with second layer
(c) 第三层重构 (d) 第四层重构
(c) Reconstruction with third layer (d) Reconstruction with fourth layer

图 7 不同分解层数重构之后图像对比

Fig.7 Image comparison after reconstruction between different decomposition layers

3.1.2 Th 的选取

在图像预处理时, Th 的大小决定了原始图像中高频信号抑制的强弱程度, Th 太大则对高频信号抑制效果减弱,使得更多的高频信号保留下来,在后续处理中可能会导致鬼影的出现。而 Th 太小则容易使图像太多依赖参考图像,但参考图像仅仅是噪声的一种理想近似,无法充分反映实际拍摄时真实噪声的强度,也会导致无法去除噪声的结果。文中选取阈值为 50,即认为归一化的原始图像与参考图像灰度绝对差值超过 50,则对相应像素点进行替换,否则不进行替换。

3.1.3 α 的选取

时域低通滤波法的时间常数决定了算法的处理效果与收敛速度。文中,太大的 α 会使得算法收敛过慢,而太小的 α 会使得算法对高频信号敏感程度增强。综合以上因素,文中选取 α 为 100,能够保证算法工作的稳定性。

3.2 实际图像对比

为了验证算法的有效性,文中对比了几种基于

场景算法:分别是改进的神经网络算法^[3](Impored-NN)、基于图像配准^[4](REG)的迭代算法和双边-时域高通滤波算法^[8](BF-THPF)。各类算法的参数均按照文献推荐配置。效果对比如图 8 所示。

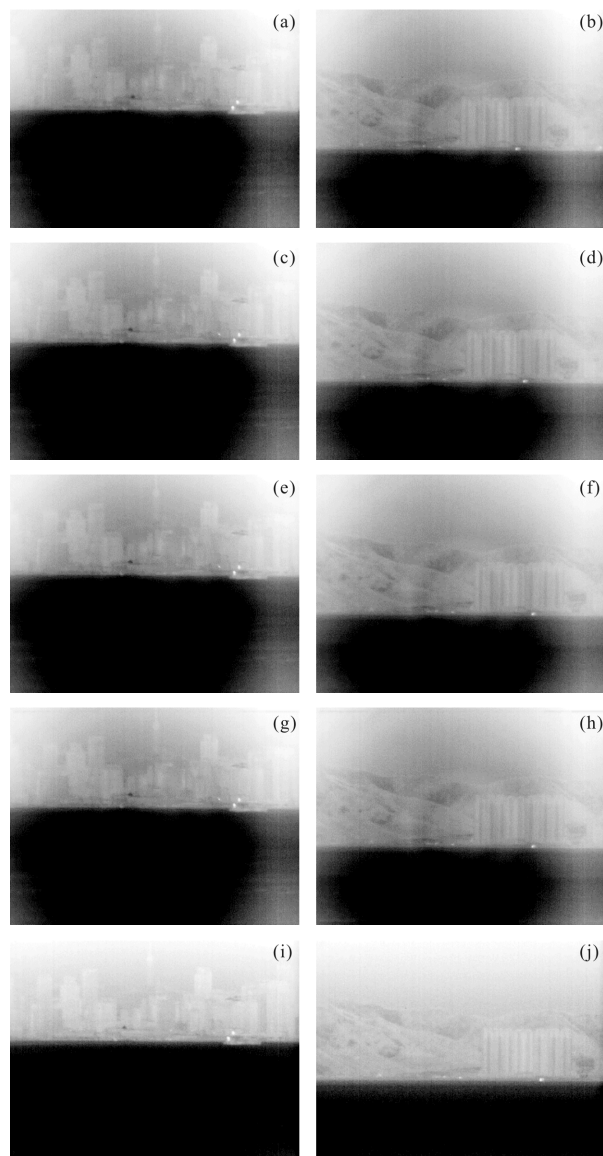


图 8 从上到下依次为:原图像、NN 改进算法、BF-THPF 算法、REG 算法、提出算法

Fig.8 From top to bottom: raw image, improved NN algorithm, BF-THPF algorithm, REG-based algorithm, proposed algorithm

图 8 所示图像为天海图像,冷像噪声较为严重,目标基本上被噪声所淹没,难以分辨。分别使用四种算法对该类图像进行处理。通过对比可以看出,对于低频噪声而言,改进的 NN 算法效果有限,这是因为改进的 NN 算法在计算理想图像时采用了高斯滤波

来获取理想图像,而受噪声影响,获得的理想图像包含场景信息较少,更多的是噪声信息,后续在做相似度检测的时候,会导致将噪声当做图像平坦区域而不对其进行处理,无法实现校正。而 REG 算法由于受噪声的影响,反而对噪声进行了配准,但噪声模式是不变的,从而出现配准失效的情况,因此也无法进行校正。BF-THPF 算法主要对双边滤波后的残差进行进一步抑制,然而残差中场景信号本来就很少,即使后续进行进一步处理也无法完成校正。而文中算法随着迭代的进行逐渐收敛,处理效果优于其他算法。

通常用粗糙度指标^[12]或残留非均匀性指标^[12]来衡量图像校正效果。两者越小,代表校正效果越好。由于粗糙度指标通常用来衡量非均匀噪声属于高频噪声的情况,不适用于文中冷像属于低频的情况,因此文中选用残留非均匀性(RNU)指标进行对比。其计算公式如下:

$$NU = \frac{1}{\bar{V}} \sqrt{\frac{1}{M*N-(d+h)} \sum_{i=1}^M \sum_{j=1}^N (V_{ij} - \bar{V}_{ij})^2} \quad (17)$$

式中: M 和 N 分别表示焦平面阵列总行数和总列数; V_{ij} 表示第 i 行第 j 列探测元输出响应; d 表示死像元个数; h 表示过热像元的个数; \bar{V} 表示焦平面阵列平均响应输出,计算公式如下:

$$\bar{V} = \frac{1}{M*N-(d+h)} \sum_{i=1}^M \sum_{j=1}^N V_{ij} \quad (18)$$

文中分别针对均匀黑体辐射下的采集到的 RNU 为 0.1283 的 200 帧冷像图像使用四种算法进行处理对比如图 9 所示。

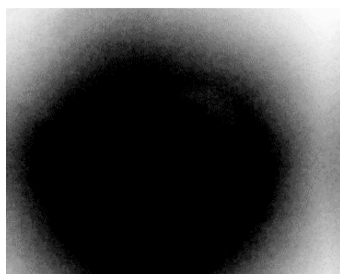
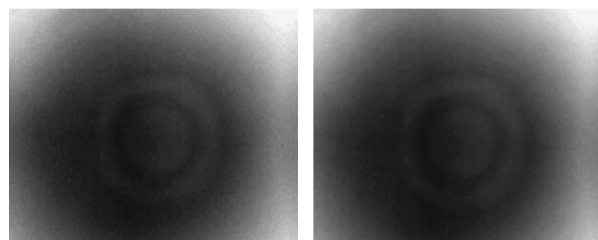


图 9 含有冷像的黑体图像
Fig.9 Blackbody image with narcissus effect

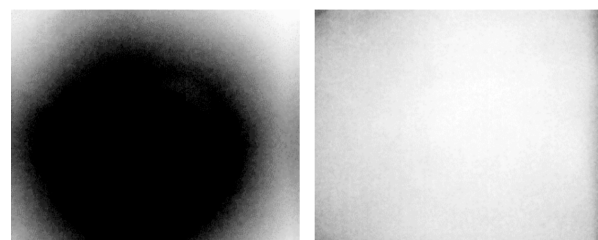
从图 10 可以看出,不同算法分别处理之后,其他算法 RNU 并没有下降,冷像依然存在,而文中算法处理之后有了明显的下降,冷像也得到了消除,验

证了文中算法的有效性。



(a) NN 改进算法 (b) BF-THPF 算法

(a) NN-improve(RNU:0.127 5) (b) BF-THPF(RNU:0.124 4)



(c) REG 算法 (d) 文中算法

(c) REG(RNU:0.128 3) (d) Proposed(RNU:0.057 2)

图 10 不同算法处理后残留非均匀对比

Fig.10 Non-uniformity contrast of residual after processing between different algorithm

4 算法适用性及复杂度分析

为了说明文中算法在不同环境温度下的有效性,文中利用所提算法分别对环境温度为 $-20 \sim +60 \text{ }^\circ\text{C}$ 之间采集到的若干组含有冷像噪声的黑体图像进行了处理,处理之后的图像标准差随温度变化如图 11 所示。

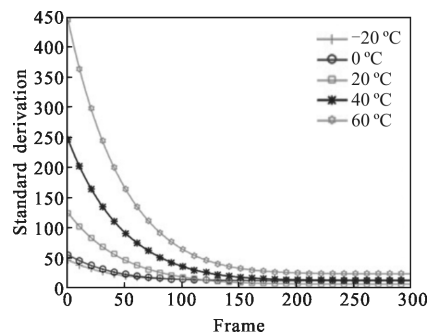


图 11 不同环境温度处理后方差对比

Fig.11 Standard derivation comparison after processing on different ambient temperature

可以看到,经过处理的图像标准差在 200 帧之后不再发生变化,算法已经收敛。说明文中算法在此温度区间内具有良好的适应性。

同时,为了说明算法复杂度,文中在操作系统为 Windows7,处理软件为 Matlab2016b,CPU 为至强

E5, 频率为 1.8 GHz 等配置条件下, 分别对不同尺寸的冷像图像进行了处理, 单帧图像所需时间如表 1 所示。

表 1 处理不同大小单帧图像所用时间

Tab.1 Time spent processing single different size images

Image size	Processing consume/ms
128×128	42
256×256	56
256×320	67
288×384	75

通过上表可以看出, 针对常规的不同图像尺寸, 算法处理时间均在 100 ms 以内, 能够满足一定的实时性的要求。

5 结束语

文中针对红外图像中冷像噪声的特点, 提出了基于小波变换的时域与空域结合的冷像估计校正算法。通过小波分解与重构从原始图像的低频信息中获得了冷像噪声的空域估计, 然后使用自适应时域低通滤波算法对空域估计图像中存在的场景信息进行进一步抑制, 从而获得冷像噪声的估计图像, 最终完成了冷像噪声的去除。通过实际图像对比验证了文中方法的有效性。但由于算法使用小波多层分解并利用低频重构, 使得算法计算复杂度较高, 不利于实时性, 这在今后的研究中需要进一步进行改进。

参考文献:

[1] Howard J W, Abel I R. Narcissus: reflections on retroreflections in thermal imaging systems [J]. *Applied Optics*, 1982, 21(18): 3393-3397.
 [2] Liu X, Lin Z, Song L, et al. Adaptive neural network non-uniformity correction based on edge detection [C]//

International Congress on Image and Signal Processing. IEEE, 2013, 57(1): 288-293.
 [3] Fan F, Ma Y, Huang J, et al. A combined temporal and spatial deghosting technique in scene based nonuniformity correction [J]. *Infrared Physics & Technology*, 2015, 71: 408-415.
 [4] Zuo C, Chen Q, Gu G, et al. Scene-based nonuniformity correction algorithm based on interframe registration [J]. *Journal of the Optical Society of America a Optics Image Science & Vision*, 2011, 28(6): 1164-1176.
 [5] Zuo C, Chen Q, Gu G, et al. Improved interframe registration based nonuniformity correction for focal plane arrays [J]. *Infrared Physics & Technology*, 2012, 55 (4): 263-269.
 [6] Zeng J, Sui X, Gao H. Adaptive image-registration-based nonuniformity correction algorithm with ghost artifacts eliminating for infrared focal plane arrays [J]. *IEEE Photonics Journal*, 2015, 7(5): 1-16.
 [7] Zuo C, Chen Q, Gu G, et al. New temporal high-pass filter nonuniformity correction based on bilateral filter[J]. *Laser & Infrared*, 2011, 18(2): 197-202.
 [8] Li Z, Shen T, Lou S. Scene-based nonuniformity correction based on bilateral filter with reduced ghosting [J]. *Infrared Physics & Technology*, 2016, 77: 360-365.
 [9] Liu Zhixiang, Ma Dongmei, Hu Mingpeng, et al. Simulation analysis of the narcissus in the staring infrared imaging system [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2008, 37 (4): 702-705. (in Chinese)
 刘志祥, 马冬梅, 胡明鹏, 等. 凝视型红外成像系统中冷像的仿真分析[J]. *红外与激光工程*, 2008, 37(4): 702-705.
 [10] Strang G. Wavelet transforms versus Fourier transforms [J]. *Bulletin of the American Mathematical Society*, 1993, 28 (2):288-305.
 [11] Daubechies I. The wavelet transform. time-frequency localisation and signal analysis [J]. *Journal of Renewable & Sustainable Energy*, 2015, 36(5): 961-1005.
 [12] Hardie R C, Baxley F, Brys B, et al. Scene-based nonuniformity correction with reduced ghosting using a gated LMS algorithm [J]. *Optics Express*, 2009, 17 (17): 14918-14933.