



光子学报
Acta Photonica Sinica
ISSN 1004-4213, CN 61-1235/O4

《光子学报》网络首发论文

题目: 基于多尺度分析和加权最小二乘法的非制冷红外条纹噪声校正算法
作者: 姜平, 王恩德, 金磊, 齐凯, 易春林, 韩冰
收稿日期: 2019-05-10
网络首发日期: 2019-07-26
引用格式: 姜平, 王恩德, 金磊, 齐凯, 易春林, 韩冰. 基于多尺度分析和加权最小二乘法的非制冷红外条纹噪声校正算法. 光子学报.
<http://kns.cnki.net/kcms/detail/61.1235.O4.20190726.0923.004.html>



网络首发: 在编辑部工作流程中, 稿件从录用到出版要经历录用定稿、排版定稿、整期汇编定稿等阶段。录用定稿指内容已经确定, 且通过同行评议、主编终审同意刊用的稿件。排版定稿指录用定稿按照期刊特定版式(包括网络呈现版式)排版后的稿件, 可暂不确定出版年、卷、期和页码。整期汇编定稿指出版年、卷、期、页码均已确定的印刷或数字出版的整期汇编稿件。录用定稿网络首发稿件内容必须符合《出版管理条例》和《期刊出版管理规定》的有关规定; 学术研究成果具有创新性、科学性和先进性, 符合编辑部对刊文的录用要求, 不存在学术不端行为及其他侵权行为; 稿件内容应基本符合国家有关书刊编辑、出版的技术标准, 正确使用和统一规范语言文字、符号、数字、外文字母、法定计量单位及地图标注等。为确保录用定稿网络首发的严肃性, 录用定稿一经发布, 不得修改论文题目、作者、机构名称和学术内容, 只可基于编辑规范进行少量文字的修改。

出版确认: 纸质期刊编辑部通过与《中国学术期刊(光盘版)》电子杂志社有限公司签约, 在《中国学术期刊(网络版)》出版传播平台上创办与纸质期刊内容一致的网络版, 以单篇或整期出版形式, 在印刷出版之前刊发论文的录用定稿、排版定稿、整期汇编定稿。因为《中国学术期刊(网络版)》是国家新闻出版广电总局批准的网络连续型出版物(ISSN 2096-4188, CN 11-6037/Z), 所以签约期刊的网络版上网络首发论文视为正式出版。

基于多尺度分析和加权最小二乘法的非制冷红外条纹噪声校正算法

姜平^{1,2}, 王恩德², 金磊², 齐凯², 易春林¹, 韩冰²

(1. 沈阳理工大学 自动化与电气工程学院, 沈阳 110159)

(2. 中国科学院沈阳自动化研究所, 沈阳 110016)

摘要: 为了提高红外成像质量的同时更大程度地保持纹理信息,提出一种多尺度分析和加权最小二乘法的条纹噪声非均匀性校正算法。该算法利用加权最小二乘法对图像进行平滑,应用小波变换提取平滑图像的垂直分量,并将其垂直分量替换为原始图像的垂直分量,利用小波重构输出校正后的图像。算法能够精准地去除红外噪声,而不会带来更加麻烦的“鬼影”问题。用该算法对多组不同红外图像数据进行仿真实验,并与其他先进的红外条纹非均匀校正算法进行对比分析,结果表明所提算法校正结果有较好的视觉效果和图像质量评估参数。

关键词: 红外图像; 非均匀校正; 条纹噪声去除; 加权最小二乘法; 焦平面阵列

中图分类号: TN215

文献标识符: A

Uncooled Infrared Stripe Noise Correction Algorithm Based on Multi-scale Analysis and Weighted Least Squares

JIANG Ping^{1,2}, WANG En-de², JIN Lei², QI Kai², YI Chun-lin¹, HAN Bing²

(1. School of Automation & Electrical Engineering, Shenyang Ligong University, Shenyang 110159, China)

(2. Shenyang Institute of Automation, Chinese Academy of Sciences, Shenyang 110016, China)

Abstract: In order to improve the quality of infrared images while maintaining texture information to a greater extent, a multi-scale analysis and weighted least squares method for stripe noise non-uniformity correction is proposed. The algorithm uses the weighted least squares method to smooth the image, applies the wavelet transform to extract the vertical component of the smooth image which is replaced with the vertical component of the original image subsequently, and reconstructs the corrected image by wavelet reconstruction. The proposed algorithm can accurately remove infrared noise without causing more troublesome "ghosting" problems. The proposed algorithm is experimented on multiple sets of different infrared image data, and compared with the state-of-the-art destriping algorithms. The results show that the proposed algorithm has better visual effects and image quality evaluation parameters.

Key words: Infrared imaging; Nonuniformity correction; Strip noise removal; Weighted least squares; Focal Plane Array

OCIS Codes: 130.3060; 130.6750; 110.4280

0 引言

非制冷红外焦平面阵列 (Focal Plane Array, FPA), 的空间非均匀性由探测单元响应的差异和读出电路的不均匀性造成, 在红外图像中产生严重的空间域固定模式噪声 (Fixed Pattern Noise, FPN)^[1]。对于非制冷红外凝视型探测器, 这种噪声通常表现为条纹状。为了提高红外图像的质量, 需要进行条纹非均

基金项目: 装备预研领域基金 (No.61404150302)

第一作者: 姜平 (1995-), 男, 硕士研究生, 主要研究方向为非制冷红外成像和图像处理. E-mail: pingjiang415@163.com

导师: 王恩德 (1980-), 男, 研究员, 博士, 主要研究方向为电子信息与光电技术. E-mail: ende_wang@163.com

收稿日期: 2019-05-10; 录用日期: 2019-07-03

匀性校正。

非均匀性校正算法 (Non-Uniformity Correction, NUC) 具备良好的去除 FPN 能力, 大致分为两类: 基于校正的算法^[2-4]和基于场景的算法^[5-8]。两点校准方法^[3]作为经典的校正算法会中断系统的工作以消除温度漂移的影响, 不适用于动态红外成像的应用。场景算法中基于多帧场景信息的 NUC 算法^[6,7]局限性在于处理数据量大, 硬件实现变得困难, 且容易导致图像出现累积的重影问题。目前一些研究主要集中于场景算法中基于单帧图像的 NUC 方法, 能够很好地解决上述限制。

单帧 NUC 算法^[9-10]通常将图像分成高频部分和平滑部分, 对高频部分进行去噪, 如果图像的纹理信息不足, 那么分离噪声和图像的纹理是十分困难的。保边滤波去噪的方法 (双边滤波和引导滤波)^[11-13]可通过设置阈值来区分边缘和噪声, 以达到边缘保持的作用。然而, 当图像的纹理信息较弱时, 算法可能会错误地把纹理信息当作噪声删除掉, 或将振幅较大的条纹噪声当作纹理信息保存下来。CAO 等^[14]提出小波条纹校正算法, 对图像进行三级尺寸分解且在每级尺寸上进行滤波, 但算法复杂, 且去噪效果不理想。L-model 算法利用读出电路结构的先验知识, 对像素进行分组, 并应用校正模型对像素进行归一化处理, 使相同组的像素有相似的输出^[15]。基于统计的灰度校正算法^[16-18]假设相邻列的直方图相同, 通过相邻直方图关系来修改列的直方图信息。基于约束优化方法^[19-20]假设条纹噪声影响水平方向梯度, 而对垂直方向梯度几乎没有影响, 因此将其转换为能量函数最小化的问题。

本文基于单帧图像的 NUC 算法, 提出一种多尺度的校正方法, 以精准去除条纹噪声而保留图像的细节信息。该算法不需要处理多帧图像从而避免产生不必要的重影, 可以从第一帧就实现条纹非均匀性校正, 且不会丢失图像边缘信息。算法直接对垂直分量进行替换, 不破坏其它分量。

1. 基于多尺度分析和加权最小二乘法的校正算法

如图 1, 提出的 NUC 算法主要流程为: 1) 利用小波分解提取原始图像的高频分量, 包括水平分量、垂直分量和对角分量。2) 利用加权最小二乘法对原始红外图像进行约束平滑, 选取小正则化参数保留边缘细节, 并平滑图像的平坦区域。将平滑后的图像进行小波变换, 分解出垂直分量。3) 将原始红外图像的垂直分量替换为加权最小二乘法约束后的垂直分量, 最后进行小波重构。

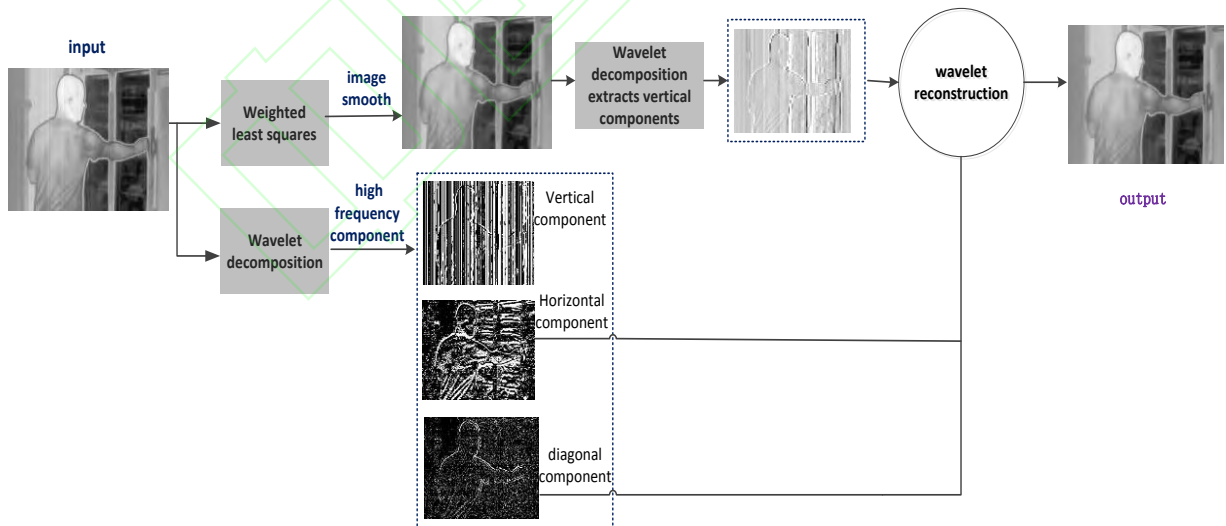


图 1 算法的工作流程

Fig. 1 Workflow of the proposed algorithm.

1.1 小波变换图像多尺度分析

小波变换将任意函数表示为小波的叠加。与傅里叶变换不同, 小波变换同时保留了空间和频率信息, 利用不同形状的窄群小波表示信号的局部和非周期性模式, 具有多尺度分析的特点, 能够有效地从信号中提取信息^[14,21]。小波变换的一个最重要的性质就是可以把图像不同方向的信息分解到对应的分量中^[22,23]。因此本文选用小波分解表示图像的不同方向信息。

对于连续小波变换, 小波系数的实现公式为

$$W_{a,b} = \frac{1}{\sqrt{a}} \int f(x) \varphi_{a,b}(x) dx \quad (1)$$

式中, a 和 b 为沿 x 轴的比例参数和平移参数, $f(x)$ 表示原始输入信号, $\varphi_{a,b}(x)$ 表示母波基函数, 可以表示为

$$\varphi_{a,b} = \varphi\left(\frac{x-b}{a}\right) \quad (2)$$

在实际图像去噪中, 需要将连续的小波及其小波变换离散化^[21]。数学定义为

$$\varphi_{m,n} = 2^{-m/2} \varphi(2^{-m} x - n) \quad (3)$$

式中, m 和 n 为沿 x 轴确定小波的位置和宽度。式(3)为离散小波函数, 则函数 $g(t)$ 的离散小波变换 (Discrete Wavelet Transformation, DWT) 为

$$W_f(m,n) = \int_R g(t) \varphi_{m,n}^*(t) dt \quad (4)$$

小波变换从原始图像 $f(i)$ 提取出高频分量 $U(i)$ 和近似分量 $X(i)$, 其公式为

$$f(i) = X(i) + U(i) = X(i) + N(i) + V(i) \quad (5)$$

由式(5)可知, 高频分量中不仅包含条纹噪声 $N(i)$, 还有垂直纹理信息 $V(i)$ 。小波分解后信号 $U(i)$ 表示为

$$U(i) = \{H_i, V_i, D_i\} \quad (6)$$

式中, H_i 代表水平分量, V_i 代表垂直分量, D_i 代表对角线分量。由图 2 可以清晰地观察到条纹噪声存在于高频分量的垂直部分, 因此直接在原始图像的垂直分量部分进行校正。

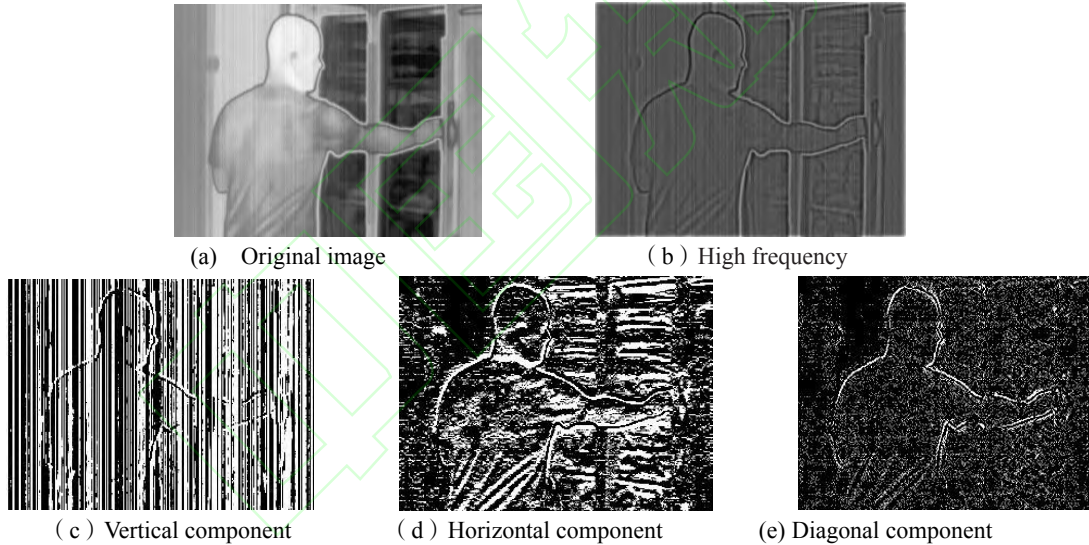


图 2 小波分解原始红外图像

Fig. 2 Wavelet decomposition of a raw infrared image.

1.2 加权最小二乘法条纹平滑

目前, 非制冷红外成像系统的读出电路大多采用 CMOS 架构, 与 CCD 读出电路不同的是, CCD 读出电路中所有像素通过一个放大器对信号进行处理, 而 CMOS 读出电路中每一列像素公用一个放大器。由于不同运放之间的电子学性质差异, 会在 CMOS 读出电路的列与列之间产生非均匀性, 在图像中表现为条纹状。

对于一幅带有条纹噪声的红外图像 g , 通常期望输出图像 u 能够保留图像的边缘细节信息, 同时, 除了边缘梯度变化大的地方外应该尽量平滑^[24]。数学模型为

$$u = \arg \min_{u_p} \sum_p (u_p - g_p)^2 + \lambda a_{x,p}(g) \frac{\partial u^2}{\partial x_p} + \lambda a_{y,p}(g) \frac{\partial u^2}{\partial y_p} \quad (7)$$

式中, 下标代表像素点空间位置, 其中 p 表示像素的位置, λ 是正则项参数; 第一项 $(u_p - g_p)^2$ 是图像的

目标函数，代表输出图像和输入图像越相似越好；第二项是正则项，通过最小化的偏导，使得输出图像越平滑越好。 $a_{x,p}(\mathbf{g}) = \left(\left| \frac{\partial l}{\partial x}(p) \right|^a + \varepsilon \right)^{-1}$ 和 $a_{y,p}(\mathbf{g}) = \left(\left| \frac{\partial l}{\partial y}(p) \right|^a + \varepsilon \right)^{-1}$ ，平滑项的权重采用相加的形式，当输入图像的边缘梯度变化比较大的时候，希望其约束小一些，以保留图像的边缘结构信息；当图像的边缘梯度变化很小的时候，这些细节信息被认为是平坦区域，约束自然可以大一些， λ 平衡两者比重， λ 越大图像也就越平滑^[25,26]。式(7)写成矩阵为

$$\mathbf{u} = \arg \min_{\mathbf{u}} (\mathbf{u} - \mathbf{g})^T (\mathbf{u} - \mathbf{g}) + \lambda (\mathbf{u}^T \mathbf{D}_x^T \mathbf{A}_x \mathbf{D}_x \mathbf{u} + \mathbf{u}^T \mathbf{D}_y^T \mathbf{A}_y \mathbf{D}_y \mathbf{u}) \quad (8)$$

式中， $\mathbf{A}_x, \mathbf{A}_y$ 为以 $a_{x,p}, a_{y,p}$ 为对角元素的对角矩阵， $\mathbf{D}_x, \mathbf{D}_y$ 为前向差分矩阵和后向差分算子，要使得式(8)取得最小值，把输入图像 \mathbf{g} 的矩阵表示形式设定为 \mathbf{I} ，输出图像 \mathbf{u} 需满足

$$\mathbf{u} = (\mathbf{I} + \lambda \mathbf{L}_g)^{-1} \mathbf{g} \quad (9)$$

其中

$$\mathbf{L}_g = \mathbf{D}_x^T \mathbf{A}_x \mathbf{D}_x + \mathbf{D}_y^T \mathbf{A}_y \mathbf{D}_y \quad (10)$$

由此可知，正则化参数 λ 的值将影响图像平滑的输出质量。图3是采用不同 λ 值的校正结果，可知，正则化参数 λ 不能采用太小的值 ($\lambda=0.2$)，会有残余的条纹噪声存在，如图3(b)中方框所示；当然 λ 也不能太大 ($\lambda=2$)，如图3(d)中箭头所指的部分，会明显地模糊图像细节。图4为相对应的高频部分，从高频分量能够更加清晰地观察图像的校正质量。实验中正则化参数采用 $\lambda=0.8$ 。

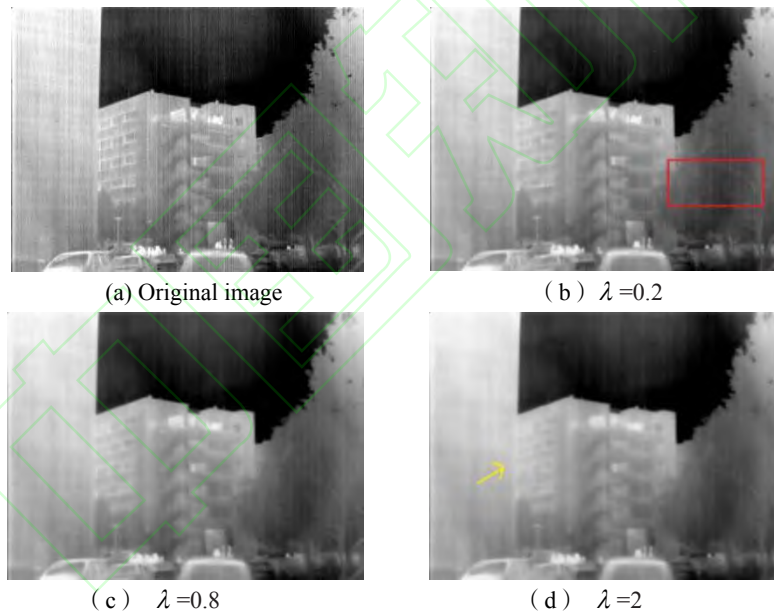
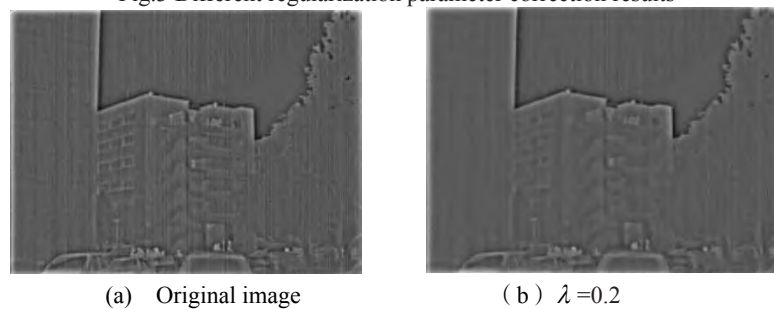


图3 不同正则化参数校正结果

Fig.3 Different regularization parameter correction results



(a) Original image

(b) $\lambda=0.2$

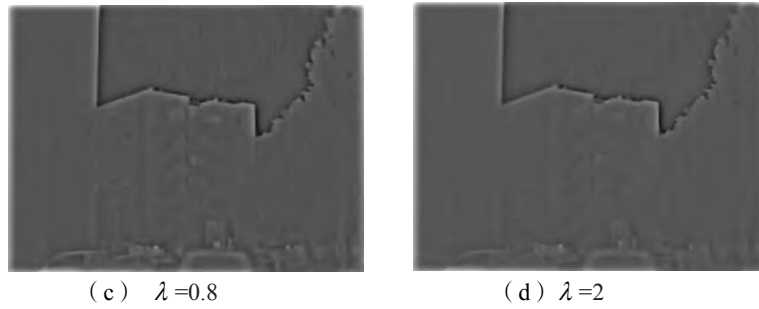


图 4 不同正则化参数校正高频

Fig.4. Different regularization parameters to correct high frequency

2.实现细节

2.1 细节说明

对于 $M \times N$ 大小的图像 (M 和 N 默认为偶数), 经过 db1 小波基分解后舍弃图像的垂直分量, 保留其它分量。进行图像平滑时, 采用加权最小二乘法, 将边缘以外的区域进行平滑操作。为了避免图像细节信息丢失, 采用正则化参数 $\lambda=0.8$ 。输入图像为 g , 首先对 g 矩阵的第一维度上做差分, 也就是相邻行相减, 得到 $(N-1) \times M$ 维的矩阵, 按列生成向量, 就是 A_y 对角线上的元素构成的矩阵。然后对 g 矩阵的第二维度做差分, 也就是相邻的列进行相减, 得到 $N \times (M-1)$ 的矩阵, 按列生成向量, 对应 A_x 的对角线元素, 最后代入式 (9) 进行计算。将平滑后的图像进行小波分解, 提取垂直分量, 并替换原始红外图像的垂直分量, 最后进行小波重构, 输出校正后的图像。

2.2 程序

Algorithm 1. Single frame infrared image stripe non-uniformity correction method

Input: The original infrared image g .

1. Wavelet decomposition original image .

Parameter: Use db1 wavelet base.

Initialization: Decompose the original image g into approximate components A_1 , vertical components V_1 , horizontal components H_1 , diagonal components D_1 .

2. Weighted least squares constrained image smoothing

Parameter: The input image is g . The regularization parameter $\lambda=0.8$.

Initialization: $(u_p - g_p)^2$ converges the edge information of the image, Smoothing with regular terms. Smoothed image extracts vertical component is V_1'

Output: The final corrected result $I=A_1+V_1'+H_1+D_1$.

3.实验结果和分析

为了验证本文算法的去噪能力, 在原始红外图像上对算法进行了测试, 并将其与目前处理条纹非均匀性效果较好的方法进行实验对比, 这些比较方法的所有自由参数都是使用相应的引用设置为默认值。

3.1 数据集和对比算法

图 5 为待处理的原始红外图像。这些图像由不同的传感器得到, 受到轻微或严重的条纹噪声, 详细说明见表 1。



图 5 待处理的三幅原始红外图像

Fig. 5 Three raw infrared images for testing.

表 1 测试数据的详细信息

Table 1 The details of the test data

Test data	Source	Size	Sensor	Description
Building	Tendero's dataset	640 × 480	Thales Minie-D camera	Rich scene information, obvious edge information and obvious stripe nonuniformity.
Street	Tendero's dataset	384 × 288	Thales Minie-D camera	Rich scene information, small details and obvious stripe nonuniformity.
Suitcase	Tendero's dataset	320 × 220	Thales Minie-D camera	Simple scene, slight stripe nonuniformity.

针对这三幅不同程度条纹噪声的红外图像,利用三种效果优秀的非均匀条纹校正算法,包括中间均衡直方图(Midway Histogram Equalization, MHE) 算法^[16]、深度卷积神经网络算法 (Convolutional Neural Network, CNN) 算法^[27]和引导滤波算法 (Guide Filter, GIF) 算法^[12], 以及本文算法进行校正处理。MHE 算法假设相邻列的直方图相同, 通过相邻直方图关系来修改列的直方图信息。GIF 算法通过引导图片对输入图片进行保边去噪, 其本质是假设引导滤波的输出图像与引导图像之间存在线性关系。CNN 算法是将神经网络的方法引入红外图像处理领域, 解决传统的条纹噪声问题。

3.2 主观效果对比

原始图像及经 NUC 处理后的图像如图 6~8 所示。观察图像可以发现, 这三种校正算法的处理效果有明显区别。GIF 算法处理的结果并不理想, 图像中会残留较多的条纹噪声 (如椭圆圈中区域所示)。MHE 算法能够有效去除非均匀条纹噪声, 但是图像过于平滑, 模糊了边缘细节。CNN 算法得到的结果有较温和的视觉效果, 但图像同样会存在细节的丢失问题。本文提出的算法得到了最好的视觉效果, 去除了条纹噪声而没有引入虚影, 且保存了图像的大部分边缘细节。

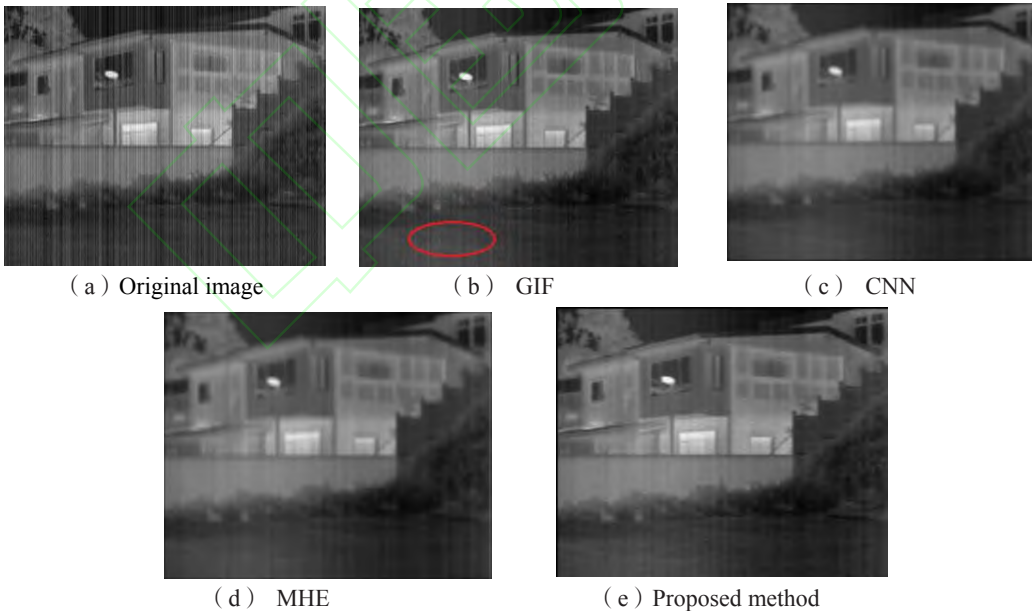


图 6 建筑物的条纹非均匀校正结果

Fig. 6 Stripe nonuniformity correction results for Building.

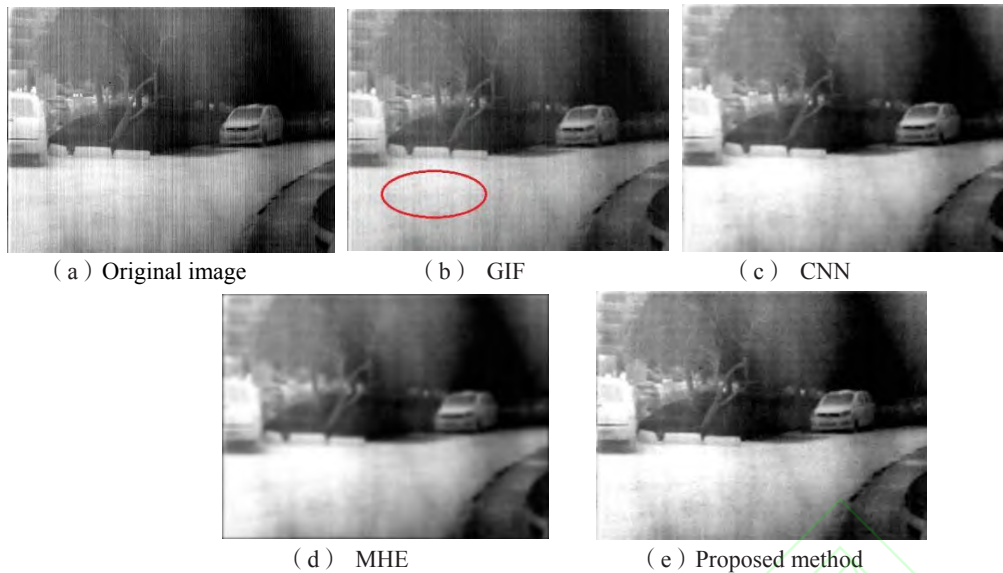


图 7 街道的条纹非均匀校正结果

Fig. 7 Stripe nonuniformity correction results for Street.

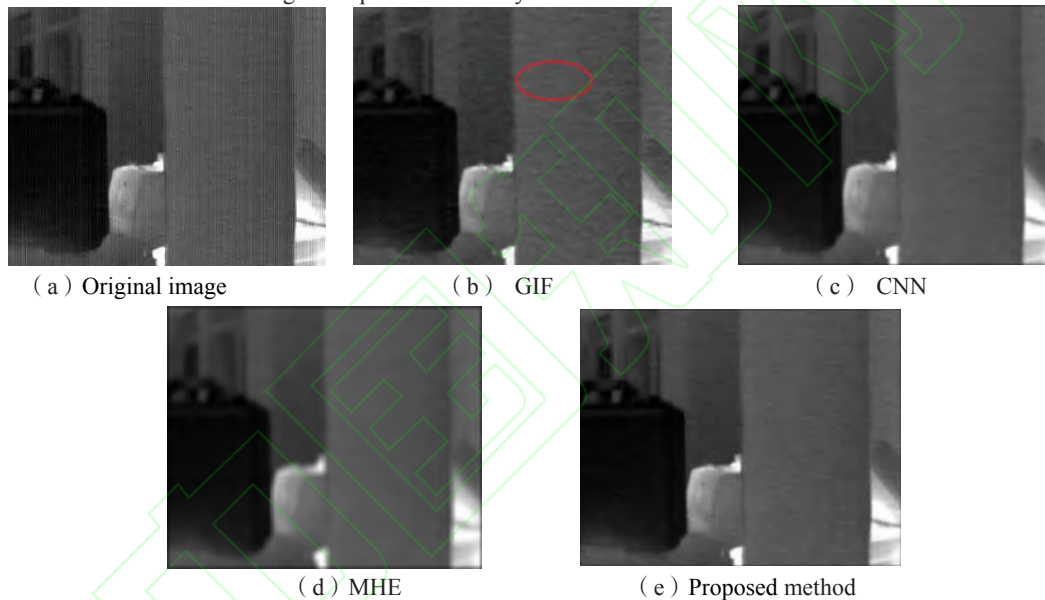


图 8 手提箱的条纹非均匀校正结果

Fig. 8 Stripe nonuniformity correction results for Suitcase.

为了进一步证明上述观点，计算原始图像和经算法校正后图像的列均值，结果如图 9 所示，条纹噪声的影响可以看作是列均值之间的快速变化。图 9(a)为图 7(a)的列均值变化曲线，经 GIF 算法校正后减少了由条纹噪声引起的变化，但仍能观察到一些小波动，表示未校正的残余非均匀性，如图 9(b)。MHE 算法基本修正了这些小波动，然而，可以看出曲线过于平滑，说明属于图像细节的变化也因为过平滑而损失了，如图 9(d)。本文提出的算法和 CNN 算法得到的曲线相似，如图 9(e)和(c)，在平滑了条纹噪声的同时保持了图像细节相对应的小变化。

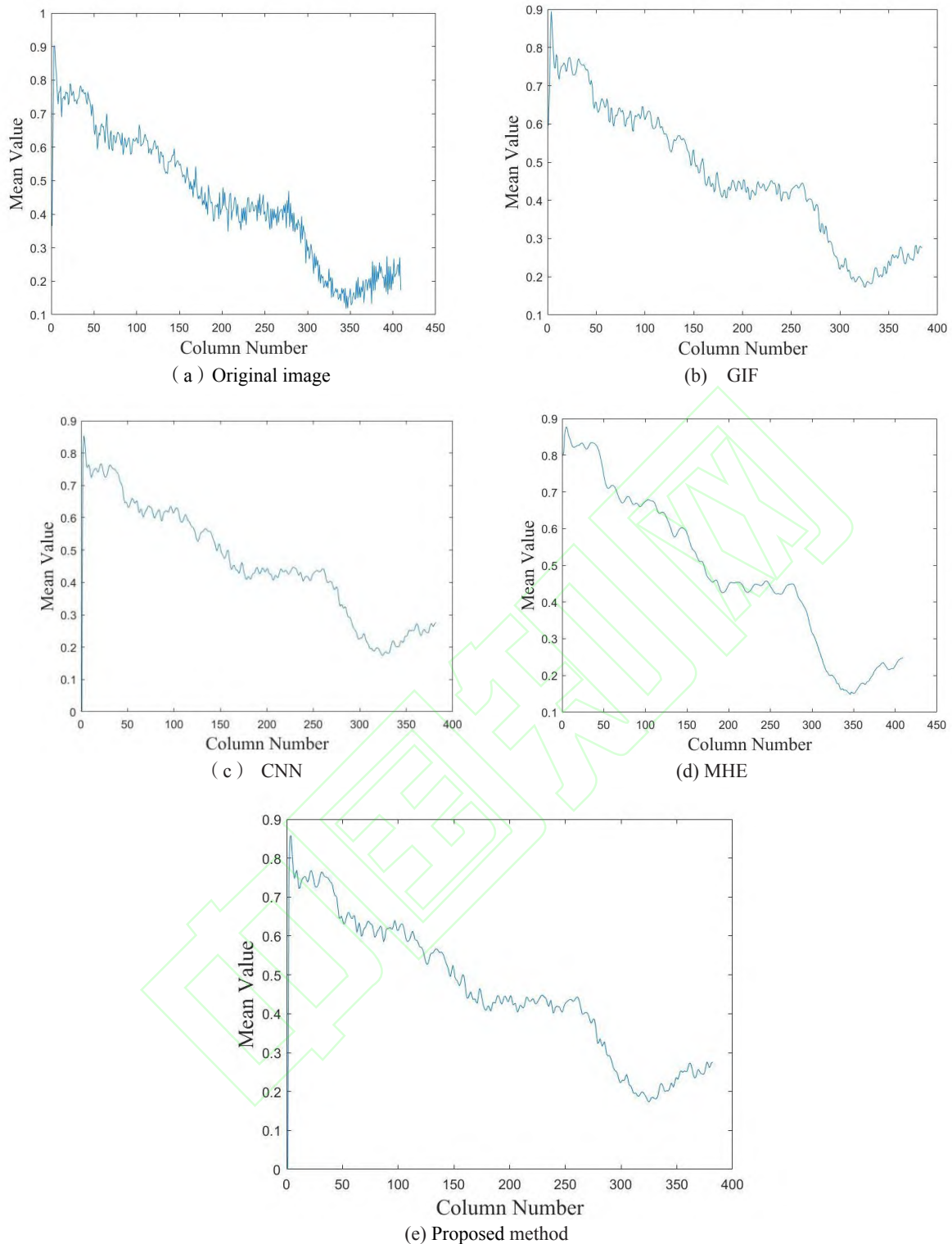


图 9 原始图像及其校正图像的列均值变换曲线

Fig.9 Column mean transformation curves of original and corrected images.

3.3 客观指标对比

用两种常见的图像质量度量参数来评估算法的去条纹性能，即峰值信噪比（PSNR）和结构相似性指数（SSIM）^[19]。PSNR 表示输出图像与参考图像之间的像素误差，其值越高代表图像的失真程度越小。公式定义为

$$PSNR = 10 \log_{10} \frac{255^2}{MSE} \quad (11)$$

式中，MSE 表示输出图像与参考图像之间的均方误差。

SSIM 提供了图像滤波结果的结构感知评价，公式定义为

$$SSIM(E, F) = \frac{(2\mu_E\mu_F + k_1)(2\sigma_{EF} + k_2)}{(\mu_E^2 + \mu_F^2 + k_1)(\sigma_E^2 + \sigma_F^2 + k_2)} \quad (12)$$

式中， E 和 F 表示滑动窗口从过滤图像和引用图像提取的图像块， $\sigma_E, \sigma_F, \mu_E, \mu_F, \sigma_{EF}$ 分别表示 E 和 F 的标准差、均值、互相关。 k_1 和 k_2 取常数，作用是避免除法中分母为零的错误。在实际的测量结果中，通常 SSIM 值的范围为 0 到 1，越接近 1 说明图像过滤后结构保持效果越好。

表 2 和表 3 分别显示了三种方法实验处理三幅红外图像后得到的 PSNR 值和 SSIM 值。对比可以发现，本文提出方法的 PSNR 值和 SSIM 值都相对地达到了最高，验证了其优越性。

表 2 原始红外图像的 PSNR(单位: dB)

Table 2 PSNR for raw infrared images (unit: dB)

Method	Building	Street	Suitcase
MHE	27.26	24.83	21.08
GIF	29.32	28.74	26.47
CNN	30.07	29.54	31.02
Proposed	31.84	30.97	31.56

表 3 原始红外图像的 SSIM

Table 3 SSIM for raw infrared images

Method	Building	Street	Suitcase
MHE	0.704	0.824	0.902
GIF	0.827	0.896	0.975
CNN	0.879	0.902	0.983
Proposed	0.936	0.954	0.983

为了评估算法的细节保护能力，引进垂直梯度均值误差 (AVGE) [28]。其数学公式为

$$AVGE = \frac{1}{P} \sum_{p=1}^P \left| |\nabla_y \Gamma(Q_p)| - |\nabla_y Q_p| \right| \quad (13)$$

式中， Q_p 是像素为 p 的带噪图像， P 为像素的个数， $\Gamma(\cdot)$ 为去噪方法， ∇_y 表示垂直梯度算子。因此，AVGE 表示校正图像和原始图像梯度的变化，条纹校正算法的优越性应体现在减少不均匀性的同时保持垂直梯度不变，因此 AVGE 的值越接近 0，表明算法的保留图像细节能力越好。从表 4 中可以看出，CNN 和本文算法得到较小的 AVGE 值，能够体现出本文算法有较好的细节保护能力。

表 4 不同场景下校正算法的 AVGE 值

Table 4 AVGE value of the correction algorithm in different scenarios

Method	Building	Street	Suitcase
GIF	0.026	0.037	0.142
MHE	0.124	0.431	0.283
CNN	0.019	0.215	0.185
Proposed	0.014	0.026	0.135

统计了几种方法的运行时间来检验算法的复杂程度，实验环境为 Matlab 2016a，英特尔酷睿 i5 CPU (3.40 GHz) 和 8 GB RAM。统计结果见表 5。与其他三种算法相比，本文方法所需的运行时间最少，且随着图像场景复杂程度增加，其所需的运行时间稳定在一个很低的程度，意味本文算法有潜力应用在硬件电路系统中。

表 5 不同方法计算原始红外图像的时间 (单位: s)

Table 5 Computing time of different methods for raw infrared images (unit: s)

Sequence	Resolution	GIF	MHE	CNN	Proposed
Building	640 × 480	1.264	1.782	3.756	0.643
Street	384 × 288	0.352	0.864	1.952	0.146
Suitcase	320 × 220	0.172	0.468	1.260	0.109

3.4 更多讨论

条纹噪声有其自身的特征，其每一列强度可看作是大致相同，且列与列之间明显不同，条纹噪声基

本存在于图像的高频分量，如图 10 (b)，经过本文算法校正后消除了条纹噪声且保留图像细节信息，如图 10(c)。进一步通过图像的边缘检测直观地展示本文算法性能，如图 10(d)，未经校正的红外图像边缘存在大量噪声，会把强噪声当作图像的边缘细节，严重影响后续的应用。经过本文算法校正后可以清晰地识别出图像的边缘信息，如图 10(e)。证明了本文算法的应用价值。

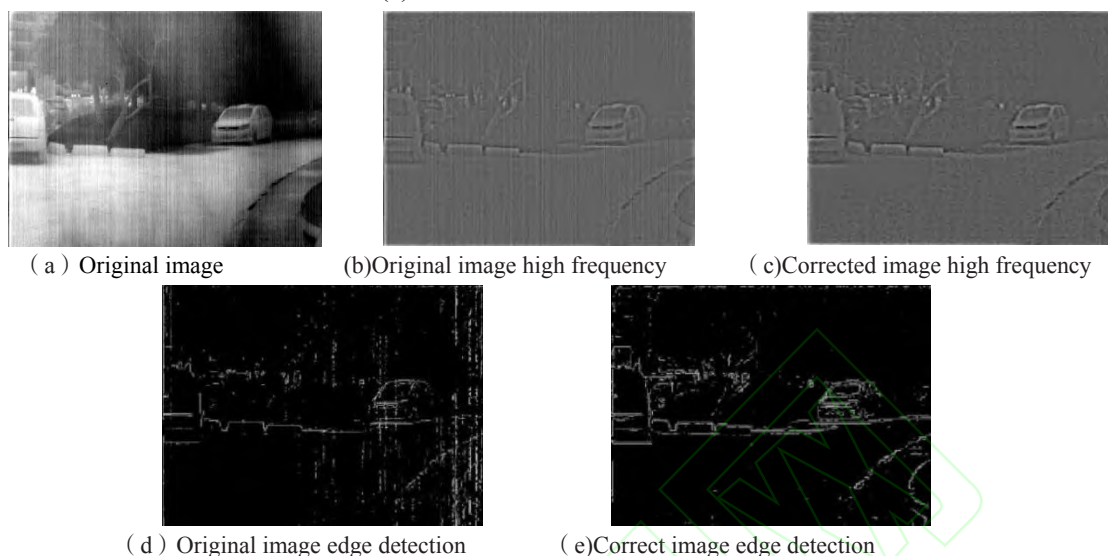


图 10 提出的算法校正结果
Fig.10 Proposed algorithm correction result

4.结论

本文提出了一种多尺度分析和加权最小二乘法的校正算法，算法的优势在于利用小波变换对图像进行多尺度表示，引入加权最小二乘法进行图像的保边平滑，避免了算法处理过程中将强噪声作为细节信息保留下来，保证了去噪的过程中不会丢失图像细节。与几种条纹效果较好的算法进行实验对比，结果表明，本文算法的校正结果具有较好的视觉效果，且算法得到的 SSIM 和 PSNR 指标最佳，能够去除条纹噪声并保持图像的边缘细节。

未来的工作将集中在条纹噪声的频谱分析上，开发自适应条纹噪声频率检测器。此外，对于条纹不均匀性校正，将考虑更多关于红外图像的先验知识。

参考文献

- 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*, 2011, 28: 1164-1176.
- WANG Y, CHEN J, LIU Y, *et al.* Study on two-point multi-section IRFPA nonuniformity correction algorithm[J]. *Journal of Infrared and Millimeter Waves*, 2003, 22: 415-418.
- LI Bu-chan. Study of calibration-based nonuniformity correction algorithms for IRFPA[J]. *Infrared*, 2008, 29 (6): 5-8.
- SHENG M, XIE J T. Calibration-based NUC method in real-time based on IRFPA[J]. *Physics Procedia*, 2011, 22: 372-380.
- PIPA D R, SILVA E A B, PAGLIARI C L, *et al.* Recursive algorithms for bias and gain nonuniformity correction in infrared videos[J]. *IEEE Transactions on Image Processing*, 2012, 21(12): 4758-4769.
- MAGGIONI M, SNCHEZ-MONGE E, FOI A. Joint removal of random and fixed-pattern noise through spatiotemporal video filtering[J]. *IEEE Transactions on Image Processing*, 2014, 23(10): 4282-4296.
- HARRIS J G, CHIANG Y M. Nonuniformity correction of infrared image sequences using the constant-statistics constraint[J]. *IEEE Transactions on Image Processing*, 1999, 8(8): 1148-1151.
- HARDIE R C, HAYAT M M, ARMSTRONG E, *et al.* Scene-based nonuniformity correction with video sequences and registration[J]. *Applied Optics*, 2000, 39(8): 1241-1250.
- CAO Y, YANG M Y, TISSE C L. Effective strip noise removal for low-textured infrared images based on 1-D guided filtering[J]. *IEEE Transactions on Circuits and Systems for Video Technology*, 2016, 26(12): 2176-2188.
- LIU L, ZHANG T X. Optics temperature-dependent nonuniformity correction via L_0 -regularized prior for airborne infrared imaging systems[J]. *IEEE Photonics Journal*, 2016, 8(5): 1-10.
- TOMASI C, MANDUCHI R. Bilateral filtering for gray and color images[C]. Sixth International Conference on Computer Vision, 1998: 839-846.
- HE K, SUN J, TANG X. Guided image filtering[J]. *IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence*, 2012, 10: 1397-1409.
- KOU F, CHEN W, WEN C, *et al.* Gradient domain guided image filtering[J]. *IEEE Transactions on Image Processing*, 2015, 24(11): 4528-4539.
- CAO Y L, HE, Z W, YANG J X, *et al.* A multi-scale non-uniformity correction method based on wavelet decomposition and guided filtering for uncooled long wave infrared camera[J]. *Signal Processing: Image Communication*, 2018, 60: 13-21.

15. NARAYANAN B, HARDIE R C, MUSE R A. Scene-based nonuniformity correction technique that exploits knowledge of the focal-plane array readout architecture[J]. *Applied Optics*,2005,44(17): 3482–3491.
16. TENDERO Y, LANDEAU S, GILLES J. Non-uniformity correction of infrared images by midway equalization[J]. *Image Processing on Line*,2012, 2: 134–146.
17. TENDERO Y, GILLES J. Admire: a locally adaptive single-image, nonuniformity correction and denoising algorithm: application to uncooled IR camera[C]. SPIE, 2012:83531.
18. SUI X B, CHEN Q, GU G H. Adaptive grayscale adjustment-based stripe noise removal method of single image[J]. *Infrared Physics & Technology*,2013, 60: 121–128.
19. BOUTEMEDJET A, DENG C, ZHAO B. Edge-aware unidirectional total variation model for stripe non-uniformity correction[J]. *Sensors*, 2018, 18:1164-1176.
20. HUANG Y, HE C, FANG H, *et al.* Iteratively reweighted unidirectional variational model for stripe non-uniformity correction[J]. *Infrared Physics & Technology*, 2016, 75: 107–116.
21. PANDE-CHHETRI R, ABD-ELRAHMAN A. De-stripping hyperspectral imagery using wavelet transform and adaptive frequency domain filtering[J]. *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*, 2011,66(5): 620–636.
22. ZHOU Xian-chun, WU Ting, SHI Lan-fang, *et al.* A kind of wavelet transform image denoising method based on curvature variation regularization[J]. *Acta Electronica Sinica*, 2018,46(3):621-628.
周先春, 吴婷, 石兰芳, 等. 一种基于曲率变分正则化的小波变换图像去噪方法[J]. 电子学报, 2018,46(3):621-628.
23. LAAVANYA M, KARTHIKEYAN M. Dual tree complex wavelet transform incorporating SVD and bilateral filter for image denoising[J]. *International Journal of Biomedical Engineering and Technology*,2018,26: 266-278.
24. FARBMAN Z, FATTAL R, LISCHINSKI D, *et al.* Edge-preserving decompositions for multi-scale tone and detail manipulation[J]. *ACM Transactions on Graph*, 2008, 27: 1-10.
25. ZHANG Jing, CHEN Hong-tao, LIU Fan. Remote sensing image fusion based on multivariate empirical mode decomposition and weighted least squares filter[J]. *Acta Photonica Sinica*, 2019,48(5):0510003
张静,陈宏涛,刘帆. 结合多元经验模态分解和加权最小二乘法滤波器的遥感图像融合[J]. 光子学报, 2019,48(5):0510003.
26. LI Hong-yun, YUN Li-jun, GAO Yin. Fog image enhancement algorithm based on boundary-limited weighted least squares filtering[J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2019,46(3):0309002.
李红云, 云利军, 高银. 基于边界限制加权最小二乘法滤波的雾天图像增强算法[J]. 中国激光, 2019,46(3):0309002.
27. KUANG X, SUI X, CHEN Q, GU G, *et al.* Single infrared image stripe noise removal using deep convolutional networks[J]. *IEEE Photonics Journal*, 2017, 9: 1–13.
28. ZENG Q, QIN H, YAN X, *et al.* Single infrared image-based stripe nonuniformity correction via a two-stage filtering method[J]. *Sensors*, 2018, 18: 4299-4317.

Foundation item: Fund for Equipment Pre-research (No.61404150302)