

# 一种宽动态范围下的红外图像局部细节增强算法

李继泉, 时勤功, 李井文

(湖南华南光电(集团)有限责任公司, 湖南 常德 415000)

**摘要:**针对红外图像在宽动态范围下压缩到窄动态范围时带来的图像细节显示模糊、暗处细节丢失以及对比度偏低等问题,提出了一种基于引导滤波分层的红外图像细节自适应增强算法。对背景层利用优化的CLAHE算法来进行压缩,对细节层利用脉冲噪声的多尺度检测并结合韦伯定理的方法进行压缩;解决前述的弱细节模糊以及暗部细节丢失问题。综合主、客观实验结果表明,相对于映射类、分层增强类以及Retinex和集成学习类增强算法,本文所提算法在背景层对比度和光照强度优化、细节层噪声抑制和弱细节增强上取得优异效果;在信息熵、PSNR和SSIM三种客观评测指标下综合效果最佳;处理速度达到150 f/s。在保证实时性的同时,不仅提高了图像的整体对比度,还突出了图像的局部细节,适用于宽温度范围下复杂环境的应用。

**关键词:**红外图像;引导滤波;图像增强;脉冲噪声;直方图均衡

**中图分类号:**TP391.41 **文献标识码:**A **DOI:**10.3969/j.issn.1001-5078.2019.08.021

## A local details enhancement algorithm for high dynamic range infrared images

LI Ji-quan, SHI Qin-gong, LI Jing-wen

(Hunan Huanan Opto-Electro-Sci-Tech Co., LTD., Changde 415000, China)

**Abstract:** The image details are blurred, the details in the dark areas are lost, and the contrast becomes low during the high dynamic infrared images compression. To solve the above mentioned problems, an infrared image details adaptive enhancement algorithm based on guided filtering layering is proposed. The histogram equalization method with optimized penalty term is used for the background compression, and the combination of impulse noise multi-scale detection and Weber's theorem is adopted to solve the dark areas detail loss and the blurring of weak detail. Compared with the traditional enhancement algorithms based on layered idea, mapping, Retinex and integrated learning, the integrated main and objective experimental results show that the proposed algorithm has good effects in background layer contrast and illumination intensity optimization, detail layer noise suppression and weak detail enhancement. The proposed algorithm provides the optimistic results in terms of information entropy, PSNR and SSIM. And the processing speed reaches 150 frames per second. The proposed algorithm not only improves the overall contrast of the image, but also highlights the local details of the image. It is suitable for the wide temperature application under complex environments.

**Key words:** infrared image; guided filter; image enhancement; impulse noise; histogram equalization

## 1 引言

红外成像技术因其极强的适应性和抗干扰性使其在军用制导、遥感和民用安防、测温等领域广泛应用。受限于显示设备,红外图像弱细节和暗部区域易在压缩过程中丢失。因此,增强图像的暗部区域、提升图像的弱细节,消除模糊、改善图像的对比度是红外成像技术发展中急需解决的关键问题。目前的红外图像增强算法,主要有:直方图均衡类<sup>[1~2]</sup>的映射算法;引导滤波<sup>[3]</sup>或双边滤波类<sup>[4~5]</sup>的分层处理算法;局部保边类<sup>[6]</sup>的梯度保边算法;Retinex 增强<sup>[7]</sup>算法四大类,但四类方法均有一定不足。映射类方法,复杂度低,实现简单,但易出现弱细节丢失和对比度过增强的问题;分层类方法,能够有效的增强弱细节,但容易带来伪像、模糊以及梯度翻转等问题;梯度保边算法,复杂度过大,实时性差,且无法很好的抑制背景噪声;Retinex 增强算法,增强参数过大易造成模糊、光晕问题。

其他如分层处理再对细节频域补偿的算法<sup>[8]</sup>和整合集成学习的增强算法<sup>[9]</sup>存在复杂度过高问题。针对前述问题,本文在分层实现的基础上,基于红外图像噪声模型对脉冲噪声进行多尺度去噪,结合韦伯定理进行暗部增强,同时在背景层对局部直方图联合全局直方图进行对比度受限的直方图均衡增强,最后融合两者结果的增强方法。

## 2 引导滤波

局部线性模型驱动的引导滤波,其核心是假定图像中的任意点一定与其邻近区域的点线性相关,则对于复杂函数而言,求解函数上某一点的值只需计算所有包含该点的线性函数值即可。引导滤波模型参考公式(1):

$$q_i = a_k I_i + b_k, \forall i \in w_k \quad (1)$$

其中,  $I$  是输入图像;  $p$  是引导图像;  $q$  是输出图像;  $i$  是引导图像像素点的索引;  $k$  是半径为  $r$  的局部方窗口  $w$  的索引。

对公式(1)两边求导,通过岭回归找到最佳  $q$  时的系数  $a_k$ 、 $b_k$ ,参考公式(2):

$$\begin{cases} a_k = \frac{1}{|w|} \frac{\sum_{i \in w_k} I_i p_i - u_k \bar{p}_k}{\sigma_k^2 + \varepsilon} \\ b_k = \bar{p}_k - a_k u_k \end{cases} \quad (2)$$

其中,  $\mu_k$  和  $\sigma_k^2$  分别为引导图像  $I$  在区域  $w$  内的均值

和方差;  $\bar{p}_k$  为输入图像  $p$  的均值;  $\varepsilon$  为控制平滑度的正则化参数。

由公式(2)可知引导滤波的输出,参考公式:  $q_i = \bar{a}_i I_i + \bar{b}_i$ , 其中,  $\bar{a}_i$  和  $\bar{b}_i$  是以像素点  $i$  为中心的窗口  $w_i$  内  $a, b$  的均值。相对于双边滤波,引导滤波计算更简单,且不会产生梯度翻转问题。对公式(1)求导可以发现输出图像  $q$  和引导图像  $I$  有相似的梯度变化,如果  $I = p$ , 则能实现对输入图像的保边滤波。

## 3 红外图像噪声

常见的红外图像增强算法主要重心放在弱细节还原和增强,忽略了细节层的噪声影响。红外成像系统其噪声主要源于目标背景的红外辐射、红外探测器的噪声以及成像系统的硬件电子线路的固有噪声<sup>[10]</sup>。

在传统的红外噪声模型基础上,本文主要细节层考虑高斯噪声和脉冲噪声。对细节层的两种噪声进行简单建模,  $y$  为噪声观测矩阵,对于图像中的像素点值  $f(x, y)$ , 公式(3)为混合噪声模型。

$$y(x, y) = \begin{cases} S_{\min} & \text{probability: } s/2 \\ S_{\max} & \text{probability: } s/2 \\ f(x, y) + v(x, y) & \text{probability: } 1 - s \end{cases} \quad (3)$$

其中,  $S_{\min}, S_{\max}$  为脉冲噪声的峰值;  $v(x, y)$  为高斯加性噪声。对于归一化后的 8 bit 图像,灰度值也就是 0,255,脉冲噪声的概率为  $s$ 。

结合该模型对细节噪声图像采取先高斯滤波再中值滤波的方案进行验证测试,方案的关键参数:高斯为中值滤波为  $3 \times 3$  大小的全局中值滤波,图 1(a)为原始细节层图像,图 1(b)为降噪的基础效果,可以发现框中的部分出现部分黑块,由于尺度小于噪声块尺寸引起,其他的较小噪声得到一定程度的减弱。



(a)

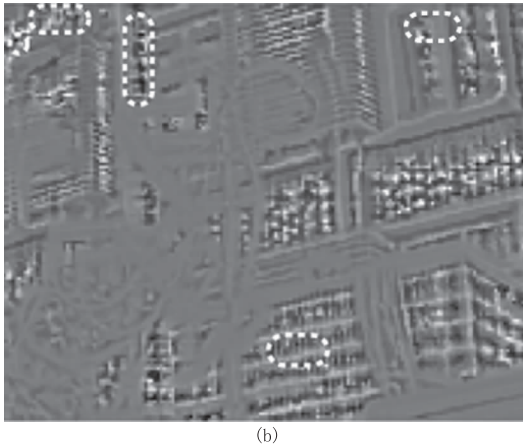


图 1 高斯 + 全局中值滤波效果

Fig. 1 The result of Gaussian and global median filter

#### 4 本文算法

虽然引导滤波在细节层一定程度上增强了弱细节,但仍然存在一定的噪声,如细节模糊和暗部细节丢失。同时背景层的直方图均衡也存在过增问题。为了解决上述问题,本文对背景层的直方图均衡进行优化,同时在细节层基于脉冲噪声模型进行多尺度降噪,再根据韦伯定理,基于 Gamma 变换调整图像对比度,最后对图像进行融合。算法框架如图 2 所示。

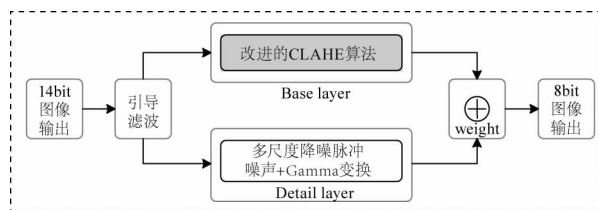


图 2 本文所提算法框架

Fig. 2 The algorithm framework proposed in this paper

##### 4.1 改进的直方图均衡算法

直方图均衡方法作为红外成像系统常用的增强算法,其公式参考式(4):

$$T[n] = \lfloor (L-1) \sum_{i=0}^n p[i] + 0.5 \rfloor \quad (4)$$

其中,  $L$  为灰阶数;  $n \in [0, L-1]$ ;  $p[i]$  为原图直方图;  $T[n]$  为映射结果。HE 对低信噪比的红外图像效果并不好,如图 3 所示(图 3 数据采自国产红外偏振机芯),原图对比度太低,直方图均衡后细节得到增强,但噪声也增强,参考建筑物和车辆前部栅格。如果使用对比度受限的局部自适应直方图均衡(CLAHE)<sup>[2]</sup>,噪声得到的极大的改善,但对比度仍然偏低。



图 3 直方图均衡的算法效果对比

Fig. 3 Comparison of algorithm effects of histogram equalization

CLAHE 算法的核心是分块裁剪直方图再映射,再利用双线性插值解决块效应以还原。其中,关键裁剪点  $\beta$  的计算公式参考式(5):

$$\beta = \frac{M}{N} \left( 1 + \frac{\alpha}{100} S_{\max} \right) \quad (5)$$

式中,  $M$  是每个块中的像素个数;  $N$  是块的动态范围大小;  $S_{\max}$  是最大斜率;  $\alpha$  是裁剪因子。当  $\alpha$  接近 0 时,限幅点将为  $M/N$ , 此时该块中的像素将是常数。当  $\alpha$  接近 100 时,对比度在很大程度上得到增强,裁剪点是调整对比度增强的关键因素。如何平衡局部和全局影响,降低  $\alpha$  的影响,需要考虑。

针对上述问题,对直方图计算加入一个调整因子  $\theta$ , 来平衡局部直方图对比度扩大问题。参考公式(6):

$$\text{hist}_w(i) = (\text{hist}_w(i) \times \theta + (100 - \theta) \times \text{hist}_c(i)) / 100 \quad (6)$$

其中,  $\text{hist}_w$  为  $w$  块处的局部直方图;  $\text{hist}_c$  为全局直方图;  $i$  为直方图灰阶索引。

CLAHE ( $\alpha = 5$ ) 的优化算法 UCLAHE ( $\theta = 50, \alpha = 5$ ) 结果参考图 4(d)。相比于 CLAHE 的明显对比度, UCLAHE 的平坦区域更易接受,且噪声水平没有明显增加。

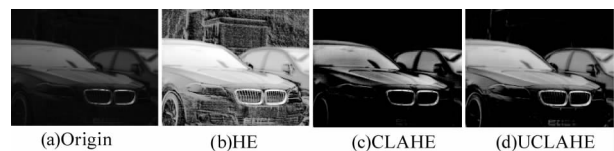


图 4 改进算法效果测试

Fig. 4 Improved algorithm performance test

##### 4.2 细节层多尺度降噪与增强

从第 3 节结论可知,细节层图像中的块状噪声通过高斯滤波或自适应中值滤波无法有效的去除脉冲噪声。本文在前述思路进行改进,在原始高斯滤波的基础上增加多尺度中值滤波。文献[11]提出的迭代滤波窗口尺度,直至脉冲区域回归阈值范围。本文基于“先全局再分块多尺度局部计算”的原则。

首先,对细节层图像进行高斯滤波,其次使用滤波模板对图像进行全局滑窗滤波。

然后,对红外图像进行动态范围检测,如果超过动态范围则标记为脉冲点,参考公式(7):

$$f(x,y) = \begin{cases} \text{flag}_{nf}, & f(x,y) \in [S_{\min}, S_{\max}] \\ \text{flag}_f, & f(x,y) \notin [S_{\min}, S_{\max}] \end{cases} \quad (7)$$

其中,  $[S_{\min}, S_{\max}]$  为红外图像实际允许的有效动态范围,  $\text{flag}_{nf}$ ,  $\text{flag}_f$  分别为脉冲点标记和非脉冲点标记,一般对于 14 bit 输入数据  $\text{flag}_{nf} = 0$ ,非脉冲点保持原始值不变。

再对图像进行分块(9×9),通过 8 方向算子  $K_i$  滑窗逐点求解块内极值,参考公式(8):

$$\begin{cases} E(x,y) = \min\{E_i(x,y)\} \\ E_i(x,y) = F(x,y) * K_i \end{cases} \quad (8)$$

其中,  $F(x,y)$  为卷积区域,  $i \in [0,7]$ 。8 方向卷积算子参考图 5。其中,黑色像素点值为 8 灰色像素点值为 -1,白色像素值为 0。

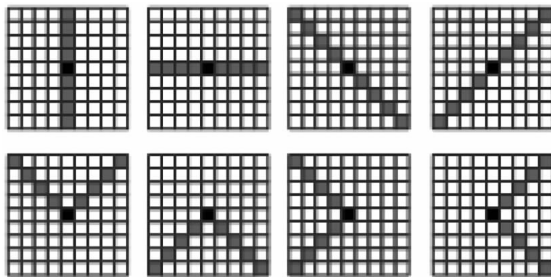


图 5 8 方向检测算子

Fig. 5 8 - direction detection operator

接着通过自适应双阈值  $T$  进行脉冲点判断,阈值的计算公式参考式(9(a))。如果  $E(x,y) \in [T_{\min}, T_{\max}]$ ,则证明对应点  $E(x,y)$  非脉冲点,不进行标记,反之标记。公式(9(b))中计算中值时,先丢弃区域内的全部脉冲点再计算中值,相对于直接取区域均值更符合无噪声图像的结构。对于阈值的计算,本文考虑分割区域(多尺度下)的均值  $\bar{m}$  和方差  $\sigma$  来生成阈值,参考公式(9(c)、9(d)),其中,  $P$ ,  $Q$  为划分的块大小。

$$\begin{cases} T_{\min} = \text{mid} - 2\sigma, T_{\max} = \text{mid} + 2\sigma & (9a) \\ \text{mid} = \text{median}\{E(x,y)\}, E(x,y) \in (S_{\min}, S_{\max}) & (9b) \\ \bar{m} = \frac{1}{P \times Q} \sum_{x=1}^P \sum_{y=1}^Q (E(x,y)), P = Q = \text{block\_size} & (9c) \\ \sigma = \sqrt{\frac{1}{P \times Q} \left( \sum_{x=1}^P \sum_{y=1}^Q (\bar{m} - E(x,y))^2 \right)} & (9d) \end{cases}$$

如果块中脉冲噪声总数不能降低到 2 个以下,则在相应的块中按照  $8 \times 8, 4 \times 4, 2 \times 2, 1 \times 1$  尺度进行依次分解迭代,直到块中脉冲数小于 2。如果依然无法去除,则再用最大尺度再进行一次中值滤波。考虑人眼对暗区细节敏感的视觉特性,使用韦伯定理对降噪后的细节层图像进行亮度调整,参考公式(10):

$$I_{d\_layer} = I_d^\gamma \times I_b \quad (10)$$

其中,  $I_d$  为降噪后的细节层图像;  $I_b$  为增强后的背景层图像;  $\gamma$  为放大系数。

再处理好细节层和背景层后,需要对细节层和背景层进行加权归一化。参考公式(11),其中:

$$I_{out} = I_b + \beta \times I_{d\_layer} \quad (11)$$

其中,  $\beta$  为权重系数。

### 4.3 算法流程

结合前述图 2 算法框架,算法流程细节参考图 6,本文算法流程见后。

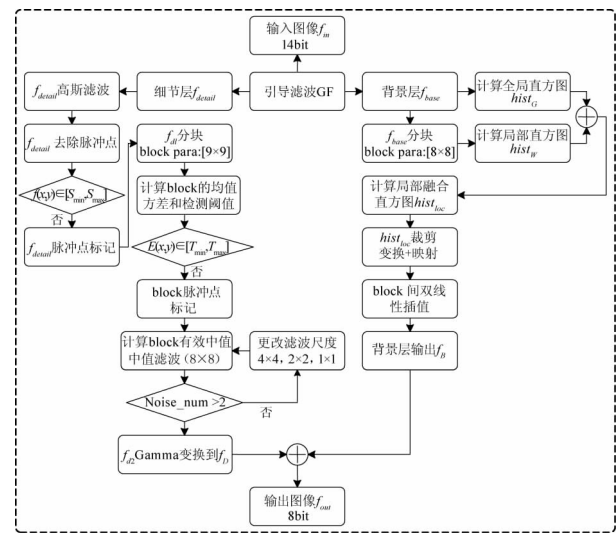


图 6 算法流程图

Fig. 6 Algorithm flowchart

- 1) 对输入数据  $f_{in}$  使用引导滤波进行分层,细节层  $f_{detail}$  和背景层  $f_{base}$ ;
- 2) 对背景层  $f_{base}$  分块,计算局部直方图  $hist_w$  和  $hist_c$ ,计算  $hist_{loc}$ ,再进行 CLAHE 得到背景层增强结果  $f_b$ ;
- 3) 对细节层  $f_{detail}$  进行全局高斯滤波,在进行全局脉冲点标记,得到  $f_{dt}$ ,再按  $9 \times 9$  尺寸对图像分块 block;
- 4) 在每一个 block 中计算脉冲阈值  $T$ 、均值  $\bar{m}$  和方差  $\sigma$ ;

5) 多方向算子卷积计算,找到最小值与双阈值进行对比标记,对 block 中脉冲点标记进行非对称中值滤波;

6) 如果 block 中出现噪声个数依然大于 2 则循环步骤 5,最终得到  $f_{d2}$ ;

7) 对细节层使用全局 Gamma 变换得到  $f_d$ ,在加权回背景层图像得到输出图像  $f_{out}$ 。

## 5 实验结果与分析

实验从主观视觉评价和客观指标评价两方面对算法性能进行评测,场景 1 选择大温差环境且存在一定目标细节的场景,以测试宽温度范围下的高低温细节是否丢失以及暗部去除效果;场景 2 选择室外复杂远场景图,噪声较大,测试图像对细节的增强能力。本文测试平台: Intel Core i5, 8G 内存笔记本,软件环境: MATLAB 2016b, Visual Studio 2015, 图像数据: 国产非制冷红外机芯 (640 × 512 分辨率) 外场采集。

### 5.1 主观视觉评价

首先本文使用人眼的直观感受进的相对主观评价,从细节区域增强、去噪效果和图像对比度三方面对不同细节增强算法进行对比。选择直方图均衡 (HE)、对比度受限的自适应直方图均衡 (CLAHE)、多尺度 Retinex (MSR)、非锐化掩模 (UM)<sup>[12]</sup> 以及两种双边滤波增强 (BF) 共 6 种算法进行对比测试。首先使用场景 1 的室外红外变压器数据。由于其局部超高温像素点会抑制全局的低温像素点的显示,如图 7 所示。其中,图 7(a) 为未处理的原图,图 7(b)~7(g) 为对比算法效果图,图 7(h) 为本文算法效果。

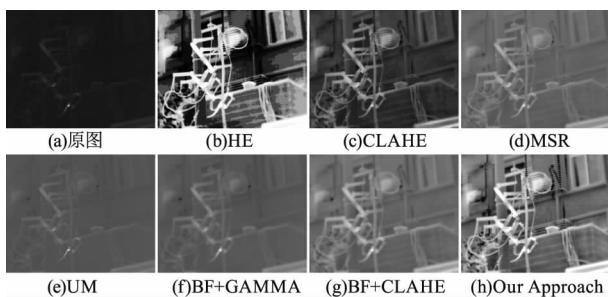


图 7 红外场景 1 测试

Fig. 7 Test infrared scene 1

1) 噪声评估,局部模糊: HE 算法和 CLAHE 算法均出现对比度过增强,右侧窗户玻璃和左上角均出现严重模糊,MSR 算法和 BF 结合 CLAHE

增强算法也在右侧窗台下侧出现了一定的模糊,本文算法和 UM 算法相对于 BF 类算法和 HE 类算法,空调外机外格栅均未被严重模糊,细节效果最好。

2) 对比度评估,暗部细节:考虑左下侧的变压器后面的植物,MSR 算法、UM 算法以及本文算法对植物的显示表现效果较好,但 UM 算法和 MSR 算法对比度偏低,且在空调外机处出现突兀的黑斑。

3) 细节增强效果:考虑变压器线路、右下众多长栅格和空调外机线,UM 算法在变压器线表现最锐利,但更弱的细节没有体现,MSR 算法在右下的长栅格细节模糊,空调外机线细节仅本文算法表现较好。

故可得由局部高温像素点造成的偏暗红外图像,本文算法能有效地增强对比度和弱细节的结论。

除了暗部细节恢复,细节部分增强的噪声控制也很重要,这里选择如图 8(a) 所示复杂红外环境。从建筑物的阴面(背阳面)观察暗部细节地恢复,可以发现基于映射方法的 HE 算法和 CLAHE 算法都较好地恢复了暗处的窗户和植物轮廓,但 UM 算法和 BF 类算法部分对比度依然偏弱。本文算法在暗部对比度调整以及细节恢复有较好的表现。再看楼顶植物以及瓦房的瓦片纹理,HE 算法和 CLAHE 算法出现部分纹理变块,但楼房侧面的外墙出现了灰度变化,基于分层思想的 BF 类算法相对于 UM 算法和本文算法,细节相对较为模糊。综上,本文算法在暗部细节恢复以及噪声抑制表现优异。如图 8 各分图所示。

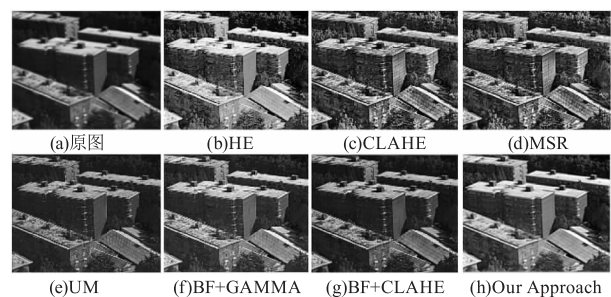


图 8 红外场景 2 测试

Fig. 8 Test infrared scene 2

最后测试天空和建筑物的细节增强,参考图 9(a)。先看算法对天空云层和地面环境的对比度效果,可以发现基于映射的 HE 算法、CLAHE 算法以及 MSR 算法均出现了不均匀的增强效果,而且

CLAHE 算法和 MSR 算法在建筑物边界产生了模糊 (或称光晕) 效果, 相比之下 UM 算法和 BF (GAMMA) 算法最稳定, 本文算法次之。但在弱细节上本文算法在近处的窗户以及桥上的车辆和路灯细节上表现最好。如图 9 各分图所示。



图 9 红外场景 3 测试  
Fig. 9 Test infrared scene 3

### 5.2 客观指标评价

图像质量评价, 从图形峰值信噪比 (Peak Signal-to-Noise Ratio, PSNR)<sup>[13]</sup> 和图像结构相似度 (Structure Similarity, SSIM)<sup>[13]</sup>, 以及运行速度、信息熵四方面进行测试。结果如表 1 所示。其中, 基于 C 和 C++ 的移植使用了部分加速和优化算法。表 1 按背景横、竖、斜纹, 进行客观指标从优到劣的评价。本文提出的算法基于前述硬件条件使用 C 和 C++ 封装后能够实现每帧 6.5 ms (150 f/s) 的处理速度实时工作。再考虑可见光图像常用的评估指标 PSNR 和 SSIM, 如表 1 的 PSNR 列和 SSIM 列。可以发现本文算法相对于 UM 算法还有不足, 但考虑到评价指标并不完全适用于红外图像。因此, 在此基础上在进行红外图像常用评估图像质量的信息熵指标。

表 1 细节增强算法客观评价指标测试结果

Tab. 1 Detail enhancement test results of objective evaluation indicators

类别	单帧处理时间 (frame/ms)												
	MATLAB			C&C++	PSNR			SSIM			信息熵		
	场景 1	场景 2	场景 3	场景 2	场景 1	场景 2	场景 3	场景 1	场景 2	场景 3	场景 1	场景 2	场景 3
HE	3.713	7.325	7.657	0.71	5.7	14.34	17.919	0.106	0.546	0.677	3.317	5.979	5.886
CLAHE	6.266	21.983	27.775	2.45	13.696	14.979	14.505	0.317	0.479	0.531	6.7647	7.9115	7.6595
MSR	53.996	158.027	182.154	16.87	9.075	15.251	14.962	0.242	0.487	0.557	5.727	7.6045	7.5828
UM	10.992	11.024	10.425	1.13	11.615	21.694	22.545	0.359	0.754	0.838	4.320	7.255	7.207
FBF + GAMMA	44.924	104.538	103.61	6.68	12.89	19.299	20.728	0.332	0.688	0.778	5.085	7.552	7.291
FBF + CLAHE	50.371	113.563	106.77	9.24	8.544	14.979	21.529	0.223	0.789	0.811	6.1515	7.383	7.182
Proposed	23.851	77.584	80.853	6.46	9.192	16.556	21.679	0.338	0.696	0.785	7.417	7.6236	7.6615

从信息熵测试结果栏可以看出, 本文算法与主观评测结论基本一致, 保持着较强的领先优势。UM 算法在信息熵的测试中出现大幅下降, 仅比 HE 算法好, 这与 PSNR 和 SSIM 测试结果有差距, 因此其在客观指标的综合考虑下仅占比较小的权重。但也反映出多尺度中值滤波虽然能较好的解决脉冲噪声, 但对细节层对比度和亮度的变化无法较好的处理。综合来看, 本文算法在主观评测上有较好的细节增强效果, 在客观指标上也有极大的优势。相对于传统的映射类算法在保持较好图像对比度的同时, 也在细节上较好的抑制了噪声, 相对于 MSR 算法, 抑制了增强参数过大的模糊效果, 相对于传统的分层类算法, 改善了背景层的对比度和亮度, 抑制了细节层的噪声。

### 6 结论

本文在引导滤波的基础上, 通过分析红外图像细节层的块状脉冲噪声, 利用多尺度中值滤波对块状脉冲噪声进行降噪, 结合局部的方差和均值自适应中值滤波的参数, 以实现细节层的块状脉冲噪声抑制; 同时对背景层联合直方图对局部区域增强进行对比度优化, 改善 CLAHE 的局部光照和对比度过增问题; 再对细节层结合 GAMMA 转换对全局进行偏暗光照情况调整; 最后将细节层和背景层加权输出。通过暗部细节增强、复杂环境和天空地面复合环境的细节增强和对比度改善三方面的不同环境测试, 主观实验测试结果表明本文算法能够有效改善暗部图像的细节恢复和增强, 同时也能较好的控制图像的弱细节处的噪声水平以及复杂环境下的对

比度优化,有效的改善了细节层的模糊问题。在客观指标评价上,能够保证 150 f/s 的速度实时运行,同时在信息熵上的测试结果符合主观评测结果。综合来看,本文算法相对于传统的映射类算法和分层增强算法,甚至基于人眼视觉的 Retinex 算法,极大的优化了背景层的对比度和光照强度,抑制了细节层的脉冲噪声水平。在信息熵、PSNR 和 SSIM 三种客观评测指标测试中取得最佳综合测试指标。因此本文算法适用于宽温度范围下的复杂应用,具有较高的实际应用价值。

#### 参考文献:

- [1] PIZER S M, AMBURN E P, AUSTIN J D, et al. Adaptive histogram equalization and its variations [J]. *Computer Vision Graphics & Image Processing*, 1987, 39(3): 355 - 368.
- [2] ZUIDERVELD K. Contrast limited adaptive histogram equalization [M]. San Diego: Academic Press Professional, Inc. 1994: 474 - 485.
- [3] LIU N, ZHAO D X. Detail enhancement for high-dynamic-range infrared images based on guided image filter [J]. *Infrared Physics & Technology*, 2014, 67: 138 - 147.
- [4] ZUOC, CHEN Q, REN J. Display and detail enhancement for high dynamic-range infrared images [J]. *Optical Engineering*, 2011, 50(12): 895 - 900.
- [5] YANG Jing, LI Zheng. Detail enhancement method for infrared image based on bilateral filter [J]. *Laser & Infrared*, 2016, 46(4): 507 - 511. (in Chinese)  
杨静, 李争. 一种基于双边滤波的红外图像细节增强方法 [J]. *激光与红外*, 2016, 46(4): 507 - 511.
- [6] SONG Q, WANG Y H, BAI K. High dynamic range infrared images detail enhancement based on local edge preserving filter [J]. *Infrared Physics & Technology*, 2016, 77: 464 - 473.
- [7] WEN Haibin, BI Duyan, MA Shiping, et al. Halo-free and detail enhancement based on multi-scale retinex for infrared image [J]. *Infrared Technology*, 2016, 38(2): 149 - 156. (in Chinese)  
温海滨, 毕笃彦, 马时平, 等. 消除光晕和细节增强的多尺度 Retinex 红外图像增强 [J]. *红外技术*, 2016, 38(2): 149 - 156.
- [8] QI Yuhua, HE Rulong, LIN Haitao. Novel infrared image enhancement technology based on the frequency compensation approach [J]. *Infrared Physics & Technology*, 2016, 76: 521 - 529.
- [9] FAN Zunlin, BI Duyan, DING Wenshan. Infrared image enhancement with learned features [J]. *Infrared Physics & Technology*, 2017, 86: 44 - 51.
- [10] HU Jinsheng. Research on infrared image denoising and segmentation algorithm [D]. Wuhan: Wuhan University of Science and Technology, 2009. (in Chinese)  
胡进生. 红外图像去噪及分割算法的研究 [D]. 武汉: 武汉科技大学, 2009.
- [11] WEI Yanyan. Study on impulse noise removal of digital images based on complementary directions [D]. Lanzhou: Lanzhou University, 2015. (in Chinese)  
魏艳艳. 方向互补的数字图像脉冲噪声去除算法研究 [D]. 兰州: 兰州大学, 2015.
- [12] V S Hari, V P Jagathy Raj, R Gopikakumari. Unsharp masking using quadratic filter for the enhancement of fingerprints in noisy background [J]. *Pattern Recognition*, 2013, 46: 3198 - 3207.
- [13] LIU Yiming, WANG Xiaoming, ZHAO Xin. Infrared image quality evaluation based on CSF and gradient similarity [J]. *Laser & Infrared*, 2018, 48(6): 795 - 800. (in Chinese)  
刘弋名, 王晓明, 赵昕. 基于 CSF 和梯度相似度的红外图像质量评价 [J]. *激光与红外*, 2018, 48(6): 795 - 800.