DOI:10.19652/j.cnki.femt.2304645

基于引导滤波图像分层的红外烟尘图像增强*

张博龙 刘 星 水 晨
(西安工业大学电子信息工程学院 西安 710021)

摘 要:为解决烟尘环境对红外图像增强处理的干扰,突出目标的轮廓细节,提出一种基于引导滤波图像分层的红外烟尘图像增强方法。首先利用引导滤波将图像拆分为基础层与细节层,对细节层使用分数阶微分掩模作增强处理;然后基于红外烟尘图像的特点设计了二次分层方法,利用各项异性扩散将基础层分为原始层与轮廓层;之后对原始层进行自适应直方图均衡化,对轮廓层进行增益放大并与细节层合并;最后利用平均亮度设置权值函数,将两层图像进行加权融合得到增强图像。实验结果表明,相较于其他增强算法,该方法能够更有效的提高烟尘干扰下红外图像的清晰度,突出其细节纹理特征,增强后3组图像的平均梯度和信息熵平均值为7.721 1及5.811 4,相较于原始图像提升1.011 9及3.177 8。

关键词:引导滤波;烟尘图像;细节增强;分数阶微分
中图分类号:TN219 **文献标识码**:A **国家标准学科分类代码**:520.6040

Infrared smoke image enhancement based on guided filtering image stratification

Zhang Bolong Liu Xing Shui Chen
(College of Electronic Information Engineering, Xi′an Technological University, Xi′an 710021, China)

Abstract: To solve the interference of smoke environment on infrared image enhancement processing and highlight the contour details of the target, an infrared smoke image enhancement method based on guided filter image layering is proposed. Firstly, the image is divided into base layer and detail layer by guided filtering, and the detail layer is enhanced by fractional differential mask. Then, based on the characteristics of infrared smoke image, a secondary stratification method is designed. The base layer is divided into original layer and contour layer by anisotropic diffusion. Then adaptive histogram equalization is performed on the original layer, and the contour layer is amplified and merged with the detail layer. Finally, the average brightness is used to set the weight function, and the two layers of images are weighted to obtain the enhanced image. The experimental results show that compared with other enhancement algorithms, the proposed method can more effectively improve the clarity of infrared images under smoke and dust interference and highlight their detailed texture features. The average gradient and information entropy of the three groups of images after enhancement are 7.721 1 and 5.811 4, which are 1.011 9 and 3.177 8 higher than the original images.

Keywords: guided filter; smoke image; detail enhancement; fractional differential

0 引 言

红外成像技术是运用光电技术检测物体热辐射并将辐射信号转化为人眼可分辨图像的一项高新技术,其探测精度高并能够全天候工作的特点为航空航天、军用及民用领域的发展起到了重要的推动作用,但与此同时,复杂环境对成像性能的干扰问题也愈发引起关注。烟尘可以吸收、散射目标产生的红外辐射信号,影响目标的成像效果及清晰度,对其在相应领域的应用造成制约,因此,研究烟尘下红外图像的清晰化是很有必要的。

一般典型红外图像细节增强方法主要分为空域算法和频域算法,空域算法有直方图均衡化、递归子直方图均衡化、对比度受限自适应直方图均衡化[1-3]等,此类直方图均衡化算法虽然提升了图像整体的对比度,但图像中的边

收稿日期:2023-01-11
* **基金项目**:陕西省重点研发计划(2021GY-319)、机电动态控制重点实验室开放课题基金(6142601200301)项目资助

缘细节易被忽视。频域算法中又主要包括了低通/高通滤波和同态滤波等[4]，此类算法可以有效的突出图像结构与细节，但计算量大且对噪声较为敏感。

对烟尘干扰下的红外图像而言，在烟尘施放初期，产生大量热量对目标的红外成像效果造成干扰，施放后，目标的红外辐射会因烟尘而衰减，使目标与背景间的对比度降低[5]。为此，岳贤军等[6]提出了一种基于二维直方图变换的烟幕红外图像增强方法，该方法利用烟幕干扰下热像图高相关性并在二维直方图上呈45°集中的特点，通过二维直方图对分割在不同区域的相邻像素进行差异化的增强，但增强后图像整体层次感差，易产生噪声放大和细节丢失的情况。陈文健等[7]提出了一种减少烟幕干扰时间的动态局部自适应直方图均衡化增强方法，该方法采用一个位置和大小都可变化的滑动窗口，根据该窗口局部直方图均衡化实现整个窗口中像素点的灰度级变换增强，通过该方法能有效减少烟幕遮蔽帧数，但需要手动选择区域。

2009年Branchitta等[8]提出了一种基于双边滤波的图像动态范围分层算法，此后学者们提出了与之类似的图像分层增强方法，使得这种方法在红外图像增强方面的应用越来越广泛[9]。此类方法通过图像滤波器将原始图像分解为包含低频基础分量和高频细节分量，然后分别对其进行对比度拉伸与细节增强处理，最后选择合适的权重系数进行合并得到最终的增强图像，达到了增强原图像中的大动态背景信息和突出其小动态目标细节信息的目的，如基于Retinex[10]、双边滤波[11]和引导滤波(GF)[12]等增强算法。鉴于此，本文针对红外烟尘图像的细节增强问题，提出一种基于引导滤波图像分层的红外烟尘图像增强方法，该方法利用引导滤波对图像动态范围的分割能力及各项异性扩散对梯度信息的敏感特征，实现对不同信息层图像的提取增强，融合后的红外烟尘图像在对比度提升及细节增强方面取得了较好的效果。

1 相关理论

1.1 引导滤波

引导滤波是一种以图像局部线性变换为图像输出的滤波方法，能够在平滑图像的同时起到保持边界的作用[13]。此局部线性变换认为，某函数上一点与其邻近部分的点成线性关系，许多局部的线性函数便可表示为一个复杂的函数，引导滤波的核心即为求出各个像素的线性模型，其输出图像 q 为：

$$q = fguidefilter(p, I, r, \varepsilon) \tag{1}$$

式中：p 为原始输入图像；I 为引导图像；r 为滤波窗口大小；ε 为正则化参数。将原始输入图像看作一个二维函数，该函数的输出与输入在一个二维窗口 ω_k 内满足线性关系如下：

$$q_i = a_k I_i + b_k, \quad \forall i \in \omega_k \tag{2}$$

式中：a_k 和 b_k 为局部窗口 ω_k 中的线性系数；i 为窗口中的像素索引。两边求梯度，可得 $\Delta q = a\Delta I$，即输出图像的梯度信息完全由引导图像的梯度信息决定，因此引导滤波具有良好的边缘保持特性。

为求得线性系数 a_k 与 b_k，需要对输入图像 p 进行条件限制，设输出图像 q 是由输入图像 p 减去噪声形成的，即：

$$q_i = p_i - n_i \tag{3}$$

为了得到与输入图像 p 最接近的输出图像 q，引入最小化代价函数来拟合输入输出图像间的线性关系，其代价函数为：

$$E = \sum_{i \in \omega_k} ((a_k I_i + b_k - p_i)^2 + \varepsilon a_k^2) \tag{4}$$

为求此代价函数最小值，分别求 a_k 与 b_k 的偏导并置0，可得：

$$a_k = \frac{\frac{1}{|\omega|}\sum_{i \in \omega_k} I_i p_i - \mu_k \bar{p}_k}{\sigma_k^2 + \varepsilon} \tag{5}$$

$$b_k = \bar{p}_k - a_k \mu_k \tag{6}$$

式中：$|\omega|$ 是二维窗口中的像素个数；μ_k 和 σ_k^2 分别为该二维窗口中像素的均值和方差；$\bar{p}_k$ 为输入图像在窗口中的均值；因一个像素点可同时被多个窗口所覆盖，在不同的窗口 ω_k 可求得不同的线性系数，故对所有条件求得的线性系数 a_k 与 b_k 取平均值进行求解，即输出图像为：

$$q_i = \frac{1}{|\omega|}\sum_{k, i \in \omega} (a_k I_i + b_k) = \bar{a}_i I_i + \bar{b}_i \tag{7}$$

1.2 分数阶微分

分数阶微分是对传统意义上对整数阶导数的推广，其定义主要有3种表达形式，分别为Caputo定义、Grumwald-Letnikov定义和Riemann-Liouville定义[14]，运用在数字图像中，主要使用G-L定义。

从信号处理的基本角度看，分数阶微分的物理意义可理解为信号调制中的调幅调相，其振幅随频率呈分数阶幂指数变化，相位是频率的广义Hilbert变化[15]。阶次 ν 不同下的幅频特性曲线如图1所示。

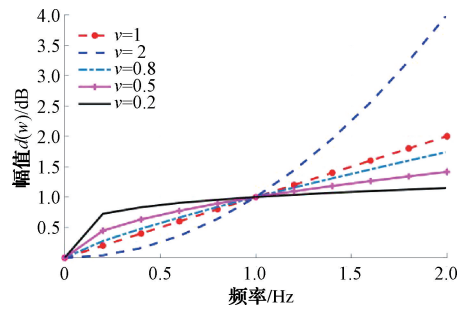


图1 阶次不同下的幅频特性曲线

由图1可以看出，当阶次 $\nu \in (0,1)$ 时，对高频信号仍有增强作用，对低频信号呈现非线性衰减，但明显少于整数阶微分。可见，通过构造分数阶微分掩模算子使其应用于二维图像信号 $P(x,y)$ 上时，可以大幅提升图像的边缘

和加强纹理细节，并非线性的保留平滑区域。

2 算法描述

通过研究烟尘条件下目标的红外成像特征，本文采用引导滤波将图像分为包含大动态范围的基础层与小动态信息的细节层，根据基础层与细节层包含的图像信息不同分别进行相应的增强处理，最后使用基于平均亮度的融合策略将各层图像进行叠加融合，获得输出图像。本文算法流程如图2所示。

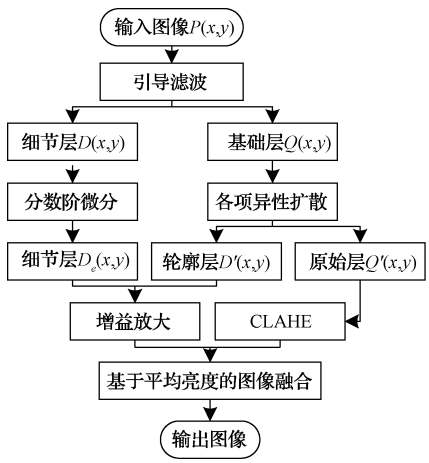


图2 本文算法流程

2.1 引导滤波的分层处理

根据引导滤波原理，以输入图像 $P(x,y)$ 作为引导图进行引导滤波，得到基础层 $Q(x,y)$。

$$Q(x,y)=f_{guidefilter}[P(x,y)] \tag{8}$$

式中：$f_{guidefilter}[\cdot]$ 表示为引导滤波过程，根据参考文献[16]并结合实验测试，滤波窗口与正则化参数分别取值为20和0.02。细节层 $D(x,y)$ 可由输入图像减去基础层获得，即：

$$D(x,y)=P(x,y)-Q(x,y) \tag{9}$$

由引导滤波获得的基础层及细节层如图3所示。

图3 引导滤波对图像的分解结果

2.2 基础层处理及轮廓层提取

经过引导滤波处理的基础层对比度较低，且背景信息模糊，但由于引导滤波优良的边缘保护能力，在图像大部分细节信息被提取的情况下目标的轮廓信息仍能够很好的保存下来，因此利用各项异性扩散对梯度信息敏感的特点来处理引导滤波输出的基础层，能够在除去大部分背景信息干扰的情况下准确提取出目标的“轮廓层”。

各项异性扩散对图象的分解结果如图4所示。各项异性扩散将像素值看作热流，把图像梯度引入扩散系数[17]，通过判断当前像素与邻近像素的梯度关系，来确定是否要向周围扩散，其定义为：

$$\frac{\partial I(x,y;t)}{\partial t}=div(c(x,y;t)\nabla u(x,y;t)) \tag{10}$$

式中：∇ 为梯度算子；div 为散度算子；$c(x,y;t)$ 是扩散系数，控制着扩散速率。两种扩散系数的表达如下：

$$c(|\nabla I|)=\exp\left(-\left(\frac{\nabla I}{k}\right)^2\right) \tag{11}$$

或：

$$c(|\nabla I|)=\frac{1}{1+(\nabla I/k)^2} \tag{12}$$

式中：k 是热传导系数，来控制边缘灵敏度；$|\nabla I|$ 为梯度幅值。由于 $c(\nabla I)$ 与 ∇I 的反比关系，故在图像梯度较大的地方，扩散较小；在图像梯度较小的地方，扩散较大。通过各项异性扩散获得的原始层 $Q'(x,y)$ 为：

$$Q'(x,y)=PM[Q(x,y)] \tag{13}$$

式中：$PM[\cdot]$ 表示为PM模型的各项异性扩散过程。由于其梯度扩散特性，可通过2.1节得到的引导滤波基础层 $Q(x,y)$ 减去各项异性扩散扩散得到的 $Q'(x,y)$ 获得轮廓层 $D'(x,y)$，即：

$$D'(x,y)=Q(x,y)-Q'(x,y) \tag{14}$$

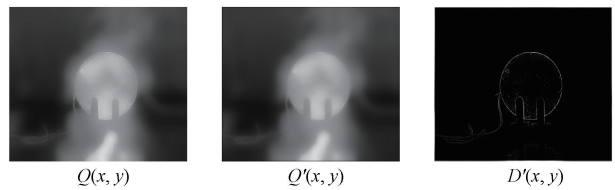


图4 各向异性扩散对图像的分解结果

由于原始层 $Q'(x,y)$ 包含了红外图像的灰度分布情况，需要进一步的扩宽灰度级分布，直方图均衡化(HE)能够使输出图像灰度级分布均匀，有较强的对比度和灰度级范围，但传统直方图均衡化算法对烟尘下目标的红外图像容易造成过增强，并丢失图像的细节信息，而限制对比度自适应直方图均衡化(CLAHE)能够按图像信息自适应确定一个受限制，在增强图像对比度的同时不造成目标区域的失真，采用CLAHE算法对原始层 $Q'(x,y)$ 进行处理：

$$Q'_e(x,y)=CLAHE[Q'(x,y)] \tag{15}$$

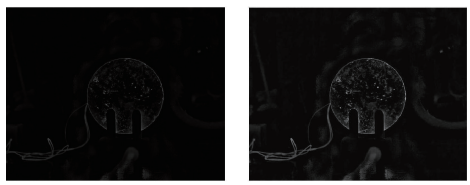
式中：$Q'_e(x,y)$ 为经过限制对比度自适应直方图均衡化后处理的基本层。

2.3 细节部分处理

细节部分主要包括由引导滤波获得的细节层 $D(x,y)$ 及对基础层进行各项异性扩散得到的轮廓层 $D'(x,y)$，由于细节层与轮廓层所含的高频信息形式不同，为进一步提升图像对比度增强图像质量，需要分别对其进行处理。

经引导滤波获得的细节层不仅包含了图像的细节纹

理、边缘信息，还有一部分未消除的噪声，因此处理的重点在于对细节边缘信息的增强和噪声的抑制。为此，选用分数阶微分掩模算子卷积的方法实现对细节层的处理，首先构造 Tiansi 微分算子结合多次实验结果及细节层高频成分较多的特点，选取阶数 $\nu = 0.3$。使用 Tiansi 微分算子对细节层 $D(x,y)$ 进行卷积运算得到增强后细节层 $D_e(x,y)$，结果如图 5 所示。



$D(x,y)$　　$D_e(x,y)$

图 5　细节层增强结果

由基础层进行各项异性扩散得到的轮廓层 $D'(x,y)$ 主要包含了目标的边缘特征，通过对轮廓层进行增益计算，进一步突出目标的边缘轮廓信息，表达式如下：

$$D'_e(x,y) = k \times D'(x,y) \tag{16}$$

式中：k 为增益映射值，本文选取 $k=6$。

2.4　各层分量的图像融合

通过对图像进行引导滤波及各项异性扩散的两次分层，高频分量在原有细节层的基础上增加了轮廓层，对增强后的细节层与轮廓层进行融合得到细节信息层：

$$D_f(x,y) = D_e(x,y) + D'_e(x,y) \tag{17}$$

式中：$D_f(x,y)$ 为细节信息层。将 $D_f(x,y)$ 与 2.2 节中增强后的原始层 $Q'_e(x,y)$ 以不同比例系数进行融合，获得最终高对比度且细节轮廓清晰的增强红外图像，融合规则如下：

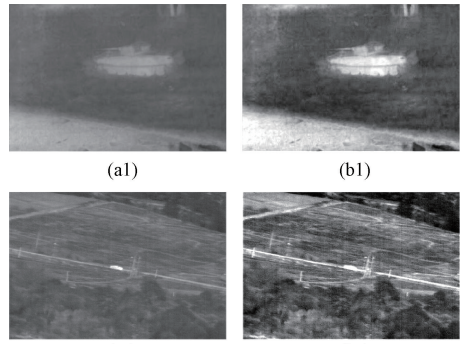
$$G(x,y) = (1-\beta) \cdot Q'_e(x,y) + \beta \cdot D_f(x,y) \tag{18}$$

式中：$G(x,y)$ 为输出的增强红外图像；β 为融合系数，其取值范围为 (0,1)。在基于引导滤波的传统融合策略中，融合系数 β 一般选取 0.2～0.4 的固定值，然而当目标在整幅图像中所占比例较小时，固定的融合系数会突出细节层的融合比例，从而放大背景中的噪声，降低目标与背景中的对比度。针对此问题，本文提出通过对比每个像素点灰度值与平均灰度值的大小，来判断目标所占比例来确定细节层融合系数，如下式所示：

$$\beta = 2^{-\frac{Num(K)}{Num(P)}} - \delta \tag{19}$$

式中：$Num(P)$ 为红外图像中总像素点个数；$Num(K)$ 为红外图像中大于平均灰度的像素点数；δ 为补偿因子。

通过实验发现，固定融合系数对不同类型目标的增强效果不同，如图 6 所示。当目标在图像中所占比例较高时，细节层融合系数选取 0.3～0.5 效果最好，且一般认为目标的高灰度区域在整幅图像中的占比不超过 70%；当目标的高灰度区域占比较低时，细节层的融合系数也要相应降低，选取 0.1～0.3 时效果最好，不会放大噪声从而降低目标与背景间的对比度。因此，取补偿因子 $\delta=0.5$。



(a1)　(b1)

(a2)　(b2)

(a) 原始图像　(b) β=0.3

图 6　固定系数下不同类型目标的融合效果

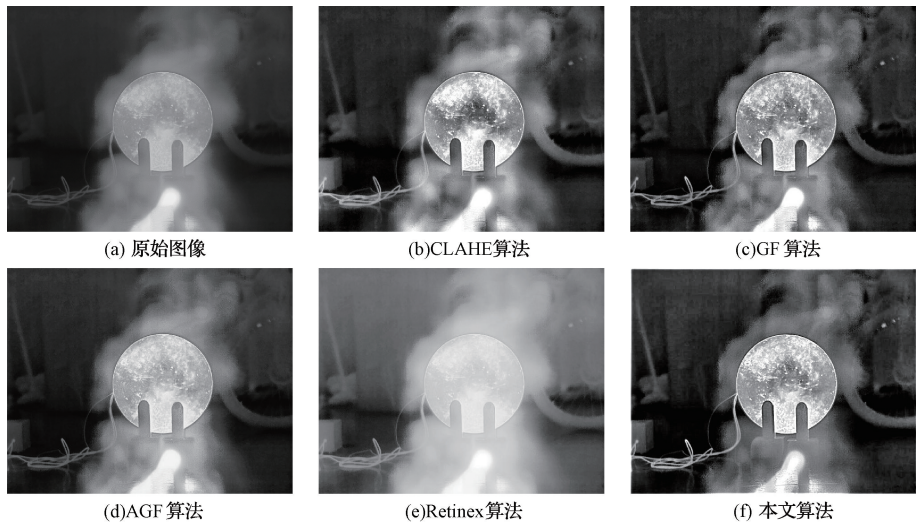
3　实验部分

为了验证并评价本文方法对烟尘下红外图像的增强效果，采用 3 组烟尘干扰下的红外图像对几种图像增强算法进行了测试，这 3 组烟尘干扰下的红外图像分别为烟尘施放时的辐射源效果图；烟幕遮蔽下火炮微缩模型图；烟尘施放时的装甲目标成像效果图。实验的软件运行环境为 MATLAB R2017a 与 Windows 10，硬件环境为 Intel (R) Cor-e i5-8250U CPU @ 1.80 GHz，红外图像采集平台使用非制冷红外焦平面探测器 LA6110，分辨率为 640×512。3 组图像选择 CLHAE、单尺度 Retinex、GF 及基于引导滤波的自适应红外图像细节增强算法(AGF)与本文增强图像增强方法进行比较。

3.1　主观效果对比

图 7～9 所示分别为不同场景下各方法处理后的增强效果，在主观效果对比中，各算法处理结果以实际图像列举。图 7 为第 1 组场景的增强效果对比，从图 7(a)可以看出，图像中目标辐射源与背景间对比度较低，图像整体偏暗，难以看清细节。从图 7(a)～(f)可以看出，CLAHE 方法视觉效果较好，避免了传统直方图增强方法的过度增强，图像整体灰度级得到提高，细节信息也得到增强，但其同时放大了烟尘部分的噪声。GF 方法对于细节部分的呈现较为优异，图像整体对比度得到提高，但由于采用了固定的融合比例，使得图像中烟尘部分没有得到改善，图像较为生硬。AGF 方法对于细节层的融合比例不合理，导致图像的细节信息十分暗淡，增强效果并不明显。Retinex 算法对图像背景中的细节信息有一定程度的增强，但图像过曝、失真的问题较为严重。本文所提方法增强后较好的显示了细节信息，在增强整体对比度的同时减小了烟尘区域对图像造成的影响，进一步的还原了实际场景，视觉效果更好。

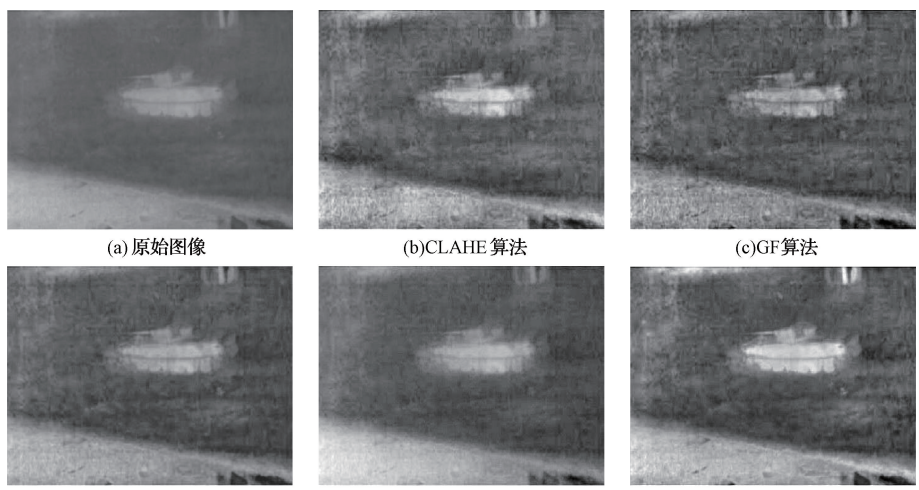
图 8 为第 2 组场景的增强效果对比，该场景包含有装



(a) 原始图像　(b)CLAHE算法　(c)GF 算法

(d)AGF 算法　(e)Retinex算法　(f) 本文算法

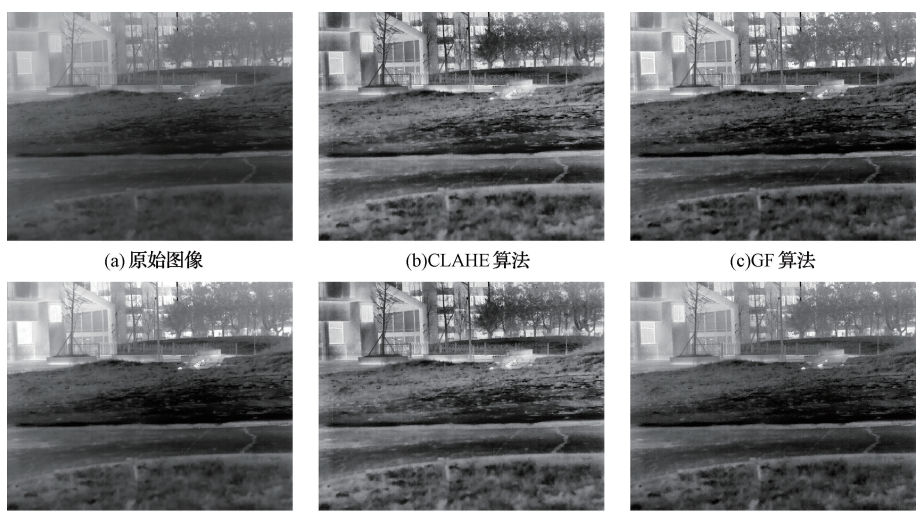
图 7　场景 1 增强效果对比



(a) 原始图像　(b)CLAHE 算法　(c)GF算法

(d)AGF 算法　(e)Retinex算法　(f) 本文算法

图 8　场景 2 增强效果对比



(a) 原始图像　(b)CLAHE 算法　(c)GF 算法

(d)AGF 算法　(e)Retinex算法　(f) 本文算法

图 9　场景 3 增强效果对比

甲车辆、道路和杂草，受大量烟尘遮蔽造成原始图像对比度差、整体偏暗。CLAHE方法与GF方法增强后的图像对比度得到提升，但纹理细节信息不够明显，且GF方法增强后图像中的斑点噪声被放大。AGF方法增强效果较为柔和，整幅图像的对比度和轮廓细节并没有获得明显改善。Retinex方法一定程度上提高了图像的灰度级，但图像整体仍较为模糊。而使用本文方法得到的增强图像细节更多，对于提高烟尘图像的清晰度方面要优于其他算法，如图8(f)所示。场景3中，烟尘在燃烧施放过程产生大量热量，使目标的红外成像效果图出现了模糊、对比度差的问题，如图9(a)所示。采用CLAHE方法增强后的图像对比度有了很大改善，但对于目标区域出现了过曝现象，GF与AGF方法增强后的图像细节得到提升，但也同时都对烟尘区域进行了增强，进一步放大了烟尘区域的模糊影响，Retinex方法增强后的图像在目标区域造成了失真现象，并不适用于此类红外图像的增强，而采用本文方法所获取的增强图像在提高对比度、放大细节纹理的同时，削弱了烟尘区域造成的模糊问题，对比其他算法的增强效果更胜一筹。

3.2 客观指标评价

除了对图像进行主观视觉效果的评价，本文还采用了信息熵(information entropy，IE)和平均梯度(mean gradient，MG)这两个指标对图像处理效果进行客观评价。

信息熵是图像增强中常用的评价指标，表示为度量图像中所含信息的丰富度，其表达式为：

$$IE = -\sum_{i=0}^{L-1} p(s_i)\log_2 p(s_i) \tag{20}$$

式中：$p(s_i)$为图像的灰度直方图；L为图像最大灰度级，信息熵越大反映图像所携带的信息量越丰富，图像质量越好。

图像的平均梯度用于表征图像的细节差异与纹理特征，反映图像的清晰程度。对平均梯度的计算结果越大，图像细节纹理越丰富，清晰度越高，其表达式为：

$$MG = \sum_{x=0}^{M-1}\sum_{y=0}^{N-1} \frac{\sqrt{(\nabla I_r^2(x,y) + \nabla I_c^2(x,y)/2)}}{M \times N} \tag{21}$$

式中：∇I_r与∇I_c分别表示为图像中某像素点行与列方向的梯度；M、N表示图像中行与列的个数。

不同算法的客观评价指标计算结果如表1所示，从表1可以看出，各算法增强后图像的两种评价指标计算值均高于原始图像对应值，图像的质量效果普遍提升，相较其他参考算法，本文算法在3种场景下的信息熵和平均梯度指标均取得了更好的结果，说明本文算法处理后的图像对比度和视觉效果更好，在细节层次和信息量的增强上更具优势。

表1 几种增强方法的客观指标对比结果

图像	指标	原图	CLHAE	GF	AGF	Retinex	本文算法
场景1	IE	7.011 2	7.570 1	7.476 4	7.331 0	7.651 0	7.826 3
	MG	1.664 2	4.637 0	6.009 7	4.466 3	1.793 9	6.118 1
场景2	IE	5.917 5	6.836 6	6.678 7	6.944 1	6.926 1	7.435 5
	MG	1.557 0	4.332 0	4.650 1	4.632 0	2.723 2	4.925 0
场景3	IE	7.199 1	7.568 1	7.625 0	7.668 9	7.538 5	7.901 7
	MG	4.679 1	6.167 8	6.210 6	5.881 9	5.954 7	6.391 2

4 结 论

针对传统红外图像增强算法处理烟尘图像时的缺陷，提出了一种基于引导滤波图像分层的红外烟尘图像增强方法。该方法通过引导滤波对图像进行分层后，采用各项异性扩散的方法来获取所得原始层中的强边缘信息，在准确的提取出目标的轮廓特征后，对其进行增益放大，可以削弱烟尘干扰造成的目标轮廓分割问题；其次，根据细节层中高频信息较多的特征，采用构建分数阶微分掩模的方法进行增强，使边缘纹理效果更加明显；最后设计一种基于平均亮度的融合策略，将高低频两层分量进行叠加，达到增强烟尘下的红外图像目标清晰度的目的。在不同场景下，使用本文方法与4种现有红外图像增强算法进行仿真实验与对比分析，主观评价和客观测试结果都表明本文算法能够有效提高烟尘干扰下红外图像的对比度以及细节清晰度。实验结果表明，本文的研究成果可以为提高烟尘下红外图像信息量和目标识别的准确性提供一种可行的方法。

参 考 文 献

[1] 李凌杰，陈菲菲. 基于改进直方图的红外图像增强方法[J]. 航空兵器，2022，29(2)：101-105.

[2] 丁畅，董丽丽，许文海. “直方图”均衡化图像增强技术研究综述[J]. 计算机工程与应用，2017，53(23)：12-17.

[3] LU P，HUANG Q J. Robotic weld image enhancement based on improved bilateral filtering and CLAHE algorithm[J]. Electronics，2022，11(21)：3629.

[4] 郭永坤，朱彦陈，刘莉萍，等. 空频域图像增强方法研究综述[J]. 计算机工程与应用，2022，58(11)：23-32.

[5] 李楠. 烟幕干扰对红外成像导引头命中概率影响[J]. 激光与红外，2021，51(3)：358-362.

[6] 岳贤军,沈学华,顾永菊.基于二维直方图变换的红外烟幕遮蔽下目标图像增强[J].南通大学学报(自然科学版),2005,4(1):69-72.
[7] 陈文建,迟泽英.红外烟幕遮蔽条件下目标热像的增强[J].红外技术,2003,25(4):66-68,72.
[8] BRANCHITTA F, DIANI M, CORSINI G, et al. New technique for the visualization of high dynamic range infrared images[J]. Optical Engineering, 2009, 48(9):6401.
[9] 葛朋,杨波,洪闻青,等.一种结合PE的高动态范围红外图像压缩及细节增强算法[J].红外技术,2020,42(3):279-285.
[10] 卫凯龙,张武凤,姜峰,等.基于Retinex算法的暗区图像改进方法[J].国外电子测量技术,2021,40(9):13-17.
[11] 陈妍,徐海黎,邢强, 等.结合小波变换和双边滤波的SICM图像降噪算法[J].电子测量技术,2022,45(4):114-119.
[12] HE K M, SUN J, TANG X O. Guided image filtering[J]. IEEE Transactions on Pattern Analysis & Machine Intelligence, 2013,35(6): 1397-1409.
[13] 羊肇俊,曾理.基于加权最小二乘滤波和引导滤波的铸件DR图像融合[J].仪器仪表学报,2021,42(6):211-220.
[14] ZUO L, BAI C, YANG Y, et al. Image Signal Enhancement based on Fractional Differential Technologies[J]. Journal of Multimedia, 2014, 9(9):541-552.
[15] 杨柱中,周激流,晏祥玉,等. 基于分数阶微分的图像增强[J]. 计算机辅助设计与图形学学报, 2008, 20(3):343-348.
[16] 付青青,景春雷,裴彦良,等.基于非锐化掩模引导滤波的水下图像细节增强算法研究[J].海洋学报,2020,42(7):130-138.
[17] 王磊,王敏,张鹏程,等.改进非局部均值各向异性扩散图像去噪算法[J].测试技术学报,2021,35(5):436-442,449.

作 者 简 介

张博龙,硕士研究生,主要研究方向为红外技术、图像处理与识别。
E-mail:623521709@qq.com

刘星,博士,研究员级高工,主要研究方向为数字信号处理、近感探测与目标识别。
E-mail:liushiyin217@sina.com

水晨,硕士研究生,主要研究方向为数字信号处理、近感探测与智能控制。
E-mail:2403877091@qq.com