

# 基于区域对比度约束的暗通道图像去雾

王振东<sup>1,2</sup>, 靖旭<sup>1\*</sup>, 孙国栋<sup>1</sup>, 程乙轮<sup>1,2</sup>, 喻璐璐<sup>1,2</sup>, 管雯璐<sup>1,2</sup>, 秦来安<sup>1</sup>,  
谭逢富<sup>1</sup>, 张巴龙<sup>1</sup>, 何枫<sup>1</sup>, 侯再红<sup>1\*\*</sup>

<sup>1</sup>中国科学院安徽光学精密机械研究所大气光学重点实验室, 安徽 合肥 230031;

<sup>2</sup>中国科学技术大学, 安徽 合肥 230026

**摘要** 为了保持图像明暗区域的对比度约束, 提出了一种改进的暗通道去雾算法; 该算法首先将原始图像分割成适当的明暗双区域, 并计算相应的对比度比值, 再使用基于中值滤波的暗通道去雾算法处理图像暗区域部分, 最后利用亮度精确控制的双直方图均衡算法, 以最大程度保持区域对比度不变为约束条件, 修正图像较亮区域的亮度分布。结果表明: 对比相关去雾算法, 利用所提算法最终处理后的图像能够在信息熵值、平均梯度和亮度标准差等方面取得明显增益, 进一步凸显图像中被雾霾环境所掩盖的细节特征。

**关键词** 大气光学; 图像增强; 大气透过率; 图像去雾; 暗通道

**中图分类号** O435.1; TP391.4

**文献标识码** A

**doi:** 10.3788/CJL201946.0810003

## Image Dehazing of Dark Channels Based on Area Contrast Constraint

Wang Zhendong<sup>1,2</sup>, Jing Xu<sup>1\*</sup>, Sun Guodong<sup>1</sup>, Cheng Yilun<sup>1,2</sup>, Yu Lulu<sup>1,2</sup>,  
Guan Wenlu<sup>1,2</sup>, Qin Laian<sup>1</sup>, Tan Fengfu<sup>1</sup>, Zhang Silong<sup>1</sup>, He Feng<sup>1</sup>, Hou Zaihong<sup>1\*\*</sup>

<sup>1</sup>Key Laboratory of Atmospheric Optics, Anhui Institute of Optics and Fine Mechanics,  
Chinese Academy of Sciences, Hefei, Anhui 230031, China;

<sup>2</sup>University of Science and Technology of China, Hefei, Anhui 230026, China

**Abstract** An improved dark channel dehazing algorithm is proposed to maintain the contrast constraints of the bright and dark areas of an image. According to this algorithm, the original image is first divided into light and dark two areas and the corresponding contrast ratio is calculated. Then, the dark channel dehazing algorithm based on median filtering is used to process the dark area of the image. Finally, the double histogram equalization algorithm with accurate brightness control is used to enhance the brighter area of the image with the constraint that the regional contrast constant is maximized. The results show that compared with that processed by the correlation dehazing algorithm, the final image processed by the proposed algorithm can be significantly improved in terms of information entropy, average gradient and standard deviation of brightness. The proposed algorithm can further highlight the details of the image covered by a hazy environment.

**Key words** atmospheric optics; image enhancement; atmospheric permeability; image dehazing; dark channel

**OCIS codes** 010.1290; 100.2980; 010.3640

## 1 引言

雾霾现象是指空气中的大量气溶胶团簇对可见光的色散作用而导致的视觉障碍现象<sup>[1]</sup>。雾霾会降低获取图像的质量, 从而直接影响视觉监控和目标跟踪等设备。因此, 研究去雾技术以改善雾天图像

中的颜色失真、细节退化和对比度降低等缺陷, 进而保持原始图像的真实性具有重要的现实意义。目前的去雾算法可分为两类: 基于非物理模型的去雾算法和基于物理模型的去雾算法<sup>[2]</sup>。常用的非物理模型去雾算法主要是基于灰度变换的图像增强算法。图像增强方法一般是根据一定要求来扩展图像

收稿日期: 2019-02-01; 修回日期: 2019-03-04; 录用日期: 2019-03-10

基金项目: 国家自然科学基金(41405014)

\* E-mail: xjing@mail.ustc.edu.cn; \*\* E-mail: zhhou@aiofm.ac.cn

的灰度级动态范围,以增强图像的对比度,从而突出显示目标区域,实现去雾的效果。虽然这种方法可以快速改善图像的对比度效果,但未考虑雾的形成机制,忽略了雾的浓度与景深的内在联系,去雾后的图像易出现色彩失真或者细节模糊的现象<sup>[3]</sup>。

雾天图像的退化机制较为复杂,常见的退化还原模型主要是 He 等<sup>[4]</sup>总结的暗通道先验理论,通过该理论的逆向计算来实现图像去雾,对大多数情况下的雾天图像能够获得较好的清晰化效果,但算法的计算较为复杂<sup>[5]</sup>。在暗通道先验去雾的基础上,Tarel 等<sup>[6]</sup>采用中值滤波算法优化透射率图,He 等<sup>[7]</sup>使用引导滤波算法优化透射率,黄黎红<sup>[8]</sup>提出采用四叉树分割法对图像进行分块处理,庞春颖等<sup>[9]</sup>建议使用双边滤波代替软映射方法来修复透射率图等,上述做法虽然都在一定程度上提高了算法的效率,但对于含有大量天空区域的图像,算法的去雾效果仍不明显。为此,杨爱萍等<sup>[10]</sup>提出了基于透射率融合与多重导向滤波的单幅图像去雾算法,姜沛沛等<sup>[11]</sup>提出了基于高斯衰减的自适应线性变换的方法,并通过构造高斯函数来解决雾天明亮区域的复原失真问题,且取得了较好的去雾效果,但该算法存在一定的复杂性。

上述研究均能在一定程度上使图像的细节更清晰,增强图像的可识别效果,但在实际应用领域,雾天图像质量的改善不仅需要去除雾天干扰的影响,使图像细节更清晰,还有必要保持原始图像的真实性,以防止过度增强。本文将暗通道先验去雾与引导滤波相结合,通过透射率图分割图像的明区和暗区,使用亮度精控的双直方图均衡算法与基于快速中值的暗通道去雾算法分别处理分割后图像的明、暗区域,并以原始图像的区域对比度作为约束来实现雾图像的增强。实验结果表明,该算法不仅能同时实现图像去雾与对比度增强,还可以在较大程度上保持图像的真实性,所得雾天图像具有较高的清晰度。

## 2 相关去雾算法与分析

### 2.1 经典的暗通道先验去雾算法

在有雾的天气下,获取图像时,大气中随机分布的介质的干扰会使反射光线存在部分衰减,进而影响图像的视觉质量,而大气散射程度与监控设备到景物间的距离相关,因此图像的质量损失是随着景深在空间变化的。单幅图像去雾的方法大多采用 He 等<sup>[4]</sup>提出的基于导向滤波的暗通道先验去雾算

法,大气光学模型为

$$\begin{cases} I(x,y) = J(x,y)t(x,y) + A[1 - t(x,y)] \\ t = -\exp[\beta d(x,y)] \end{cases}, \quad (1)$$

式中: $I$ 为获取的含雾原始图像; $(x,y)$ 为坐标; $J$ 为理想无雾状况下的清晰图像,即待恢复的目标图像; $t$ 为透射率; $A$ 为整体大气光照强度; $\beta$ 为大气散射系数; $d(x,y)$ 为场景深度信息。根据暗通道先验规律统计,在无雾、清晰的图像中,每个局部区域都可能存在阴影,因此,每个局部区域至少存在一个像素点在某颜色分量上的强度值近似为 0。据此,图像  $J$  的暗通道图像  $J_{\text{dark}}$  为

$$J_{\text{dark}}(x,y) = \min_{c \in \{R,G,B\}} \left\{ \min_{(x,y) \in \Omega(x,y)} [J_c(x,y)] \right\}, \quad (2)$$

式中: $c$ 为颜色分量类别; $J_c$ 为 R、G、B 三基色中的任一颜色分量; $\Omega(x,y)$ 为一个局部领域。当透射率和大气光照强度均为已知时,恢复无雾图像的公式为

$$J(x,y) = \frac{I(x,y) - A}{\max\{t(x,y), 0.1\}} + A. \quad (3)$$

不妨规定大气光照强度为一个全局参数,根据文献<sup>[4]</sup>,选取暗通道中最亮的 0.1% 的像素均值,即雾最浓区域对应的亮度均值,为大气光照强度,而透射率图则可以通过导向滤波<sup>[7]</sup>得到。对于给定的待处理含雾图像,由估计的大气光照强度和透射率,以及(3)式,可以将其恢复为无雾图像。

导向滤波算法可以快速平滑图像细节和保持图像的边缘信息,能够很好地优化获取的透射率图,从而改善最终无雾图像的视觉质量。实际上,导向滤波就是在输入图像与输出图像之间建立一个基于二维窗口的局部线性模型。记雾霾图像的暗通道结果为  $\mathbf{D}$ ,则输出图像为

$$t_i = a_k D_i + b_k, \quad \forall i \in \omega_k, \quad (4)$$

式中: $i$ 为领域  $\omega_k$  中的像素; $D_i$ 为对应暗通道结果  $\mathbf{D}$  中的取值; $\omega_k$ 为矩阵  $\mathbf{D}$  中以像素点  $k$  为中心的区域; $(a_k, b_k)$ 为区域  $D_i$  中的常数。导向滤波算法通过保证输出图像  $t_i$  与输入图像  $t_0$  之间的差异最小来筛选最优的系数  $(a_k, b_k)$ , 即

$$E(a_k, b_k) = \sum_{i \in \omega_k} [(a_k D_i + b_k - t_0)^2 + \epsilon a_k^2], \quad (5)$$

式中: $E$ 为最小化输出图像与输入图像之间差异的代价函数; $\epsilon$ 为防止  $a_k$  过大的调整参数。通过最小化(5)式,输出图像在整体上能保持与输入图像的相似性<sup>[12]</sup>。通过导向滤波优化,最终输出的透射率图

包含更丰富的细节信息<sup>[13]</sup>。为了进一步改善暗通道去雾算法在实际产品中的使用效果,姜春霞等<sup>[14]</sup>对导向滤波器的透射率图进行了快速中值滤波,提高了后续算法处理的精度。

尽管将暗通道先验去雾算法直接用于雾天图像增强时在局部细节与颜色退化上有理想的恢复效果,但由于场景的反射光强通常小于大气光强,去雾后的图像通常比去雾前要黯淡一些,图像的全局对比度无法与原始图像相匹配。图 1 所示为



图 1 去雾图像实例。(a)输入图像;(b)归一化透射率图;(c)中值滤波的暗通道先验去雾图;(d) HSI 空间双直方图均衡图像  
Fig. 1 Example of dehazed images. (a) Input image; (b) normalized transmittance image; (c) dehazed image based on dark channel prior with median filtering; (d) enhanced image using bi-histogram equalization in HSI

## 2.2 基于亮度精确控制的双直方图均衡化

实际的图像增强效果表明,传统的双直方图均衡算法在估计输出图像的亮度时存在明显的误差。为了使输出图像的亮度与预期值更加一致,文献<sup>[15]</sup>给出了具有精确亮度控制的双直方图均衡算法。首先,基于图像亮度直方图建立输出图像亮度与灰度阈值之间的对应关系,从而确定满足输出图像亮度要求的若干阈值;然后利用直方图相似性的最大原理来选择最佳灰度阈值,从而执行图像增强过程。该算法能够快速、准确地保持输出图像的亮度控制目标,并能在增强图像对比度的同时满足不同需求下对输出图像亮度的要求。

## 2.3 基于区域对比度约束的暗通道去雾算法

基于区域对比度约束的暗通道去雾算法步骤如下:

1) 利用暗通道先验规律,获取雾天图像  $I$  的归一化透射率图  $T$ ,使用最大类间方差法分割出图像的明暗区域  $R_L$  和  $R_A$ ,并进行标记,计算明暗区域中像素平均值的比值  $k'$ ;

2) 使用基于中值导向滤波的暗通道先验去雾算法<sup>[14]</sup>处理雾天图像  $I$ ,获得去雾图像  $J_1$ ,标记出亮区域  $R'_L$  部分的像素值;

3) 以最大程度保持  $k'$  值来计算去雾后暗区域  $R_A$  应达到的亮度值,统计出剩余暗区域  $R_A$  的亮度直方图分布,采用亮度精控的双直方图均衡算法进行增强处理,得到约束后的暗区域图像  $R'_A$ ;

去雾图像实例。由图 1(c)可知,上述缺点体现在场景中人与车的亮度与对比度没有明显改善,输出图像的亮度整体偏暗,与输入图像的原始明暗区域对比有明显差异。由图 1(d)可知,在以色调、饱和度、亮度来描述物体的 HSI (Hue-Saturation-Intensity) 颜色空间中,对雾天图像进行双直方图均衡增强处理,导致原始图像中较明亮的区域(如右上方的天空区域、大理石等)也出现了明显的失真现象。

4) 合并最终亮暗区域修正后的图像,得到去雾后的图像  $J$ 。

## 3 仿真实验与结果分析

选取几幅雾天拍摄的图像来检测算法对雾天图像的清晰化效果,运行算法的计算机配置如下: 3.20 GHz Intel Core (TM) i5-6500 中央处理器, 8 GB 内存。使用 MATLAB(R2010b) 软件进行仿真实验,操作系统为 Windows 7。

### 3.1 主观评价

雾天图像透射率图中远景部分的透射率值相对较小,对应透射率图中的较暗部分,受雾气影响,该部分细节会严重退化,是雾天图像清晰化的处理难点。图 2(a)所示为待清晰化处理的原始雾天图像。采用亮度精确控制的双直方图均衡算法<sup>[13]</sup>,通过灰度级的分段展宽来清晰化图像细节,得到的结果如图 2(b)所示。由图 2(b)可知,由于未考虑雾天图像的形成机理,双直方图均衡算法虽然能在一定程度上清晰化图像的局部细节,但去雾效果甚微。图 2(c)所示为使用传统暗通道先验去雾算法<sup>[4]</sup>得到的雾天图像清晰化效果图,可知,导向滤波较好地实现了雾天图像的清晰化。图 2(d)所示为采用中值暗通道去雾算法<sup>[14]</sup>得到的雾天图像的清晰化效果图,可知,该算法优化了透射率图的效果,能够进一步改善去雾后图像的质量,但该算法对于透射率较小部分的细节恢复得仍不理想。所提算法以最大程度保持原

始图像相应区域对比度不变为原则,分别使用快速中值的暗通道去雾算法处理透射率较小的暗区域部分,而采用亮度精控的双直方图均衡处理算法对透射率较大的亮区域进行处理,结果如图 2(e)所示。通过比较可以看出,采用所提算法去雾后,图像的对比度有

明显提升。通过最大类间方差法分割处理不同算法去雾后的图像,结果发现,所提算法得到的分割图像可以保留较多层次的细节信息,如图 2(a)中桥梁镂空部分和图 2(b)中部的窗户都得到了较好的体现,具有良好的去雾效果。

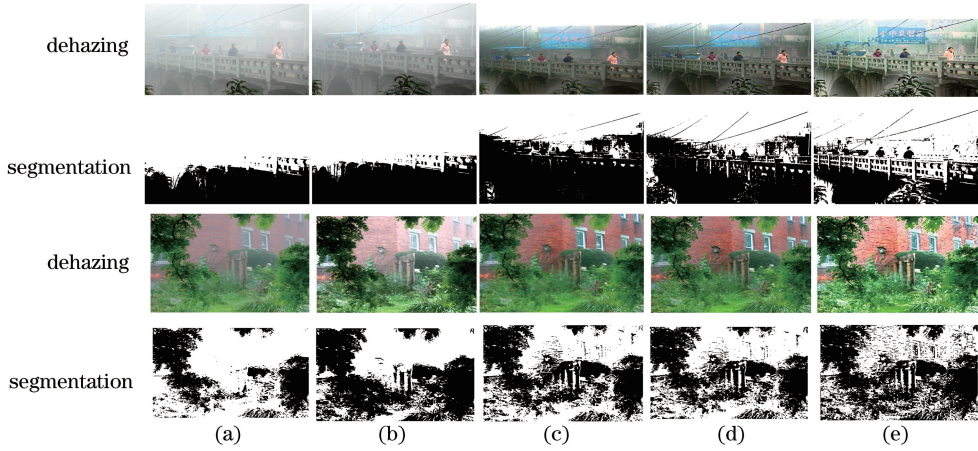


图 2 雾天图像的清晰化效果。(a)原始图像;(b)文献[13]的算法;(c)文献[4]的算法;(d)文献[14]的算法;(e)所提算法

Fig. 2 Clear effect of foggy images. (a) Original image; (b) algorithm in Ref. [13]; (c) algorithm in Ref. [4];

(d) algorithm in Ref. [14]; (e) proposed algorithm

综上所述,所提算法通过结合分段直方图均衡算法来修正暗通道先验算法对透射率较小部分去雾效果的不足,进一步增强了图像的局部细节,所得雾天图像具有较高的清晰度,且处理后图像的各部分也保持了相对合理的亮度分布。

### 3.2 客观评价

为了客观评价各算法的去雾性能,选用亮度标准差、平均梯度和信息熵值来判断雾天图像的清晰化效果。上述三项指标均为常见的用于表述去雾效

果的参量<sup>[16]</sup>,其中亮度标准差和平均梯度可以敏感地反映图像对微小细节反差表达的能力,而信息熵值则反映了图像细节的清晰度。表 1 所示为不同算法的各项参数指标。由表 1 可知,提出的图像去雾算法可以保持较多的细节特征,且恢复后的图像层次感也较强。与常用的文献[14]中的算法相比,采用所提算法得到的图像的标准差、平均梯度和信息熵值的平均值约提升了 28.3%、56.4%和0.97%,图像得到了更合理的恢复。

表 1 不同算法的客观评价

Table 1 Objective evaluation of different algorithms

Image number	Image dehazing algorithm	Standard deviation of brightness	Information entropy	Average gradient
1	Original image	72.2005	7.8185	4.7986
	Algorithm in Ref. [13]	53.3021	7.5741	5.9176
	Algorithm in Ref. [4]	76.8539	7.9100	4.7088
	Algorithm in Ref. [14]	54.4848	7.6130	7.8072
	Proposed algorithm	71.9606	<b>7.9659</b>	<b>12.8912</b>
2	Original image	41.2135	7.2144	8.0648
	Algorithm in Ref. [13]	39.4639	7.2350	9.9588
	Algorithm in Ref. [4]	71.8828	7.9618	13.7041
	Algorithm in Ref. [14]	40.1882	7.2559	10.5607
	Proposed algorithm	64.5442	7.8963	<b>21.7560</b>

在算法效率方面,所提算法仅引入了亮度精确控制的双直方图均衡处理进行修正,其复杂程度远低于去雾过程的计算。以分辨率为 512 pixel ×

512 pixel 的测试图像为例,文献[14]的算法耗时为 1.479 s,所提算法的耗时为 1.582 s,并未较多地增加算法的计算复杂度。

## 4 结 论

将暗通道去雾与直方图均衡处理相结合,提出了一种有效的雾天图像增强算法。通过归一化透射率图将图像分割为明暗区域,以最大程度地保持原始图像相应区域对比度不变为原则,采用中值滤波的暗通道去雾算法对透射率较暗的区域进行处理,采用亮度精控的双直方图均衡处理算法对透射率高的区域进行处理。实验结果表明,所提算法能够有效保持雾天图像的真实度,可以较好地恢复被雾掩盖的场景细节,显著提升图像的全局对比度,可以满足一般电子类消费产品的需求。所提算法中引入了亮度保持的直方图均衡处理,虽然清晰化了图像的细节特征,但对含大面积天空区域的雾天图像的高斯噪声仍有一定的放大效果,从而影响所得图像的质量,这需要在后续研究中予以考虑。

## 参 考 文 献

- [1] Zuo F. Applied mathematics in digital image processing[M]. Beijing: Tsinghua University Press, 2017: 405-411.  
左飞. 图像处理中的数学修炼[M]. 北京: 清华大学出版社, 2017: 405-411.
- [2] Wu D, Zhu Q S. The latest research progress of image dehazing[J]. Acta Automatica Sinica, 2015, 41(2): 221-239.  
吴迪, 朱青松. 图像去雾的最新研究进展[J]. 自动化学报, 2015, 41(2): 221-239.
- [3] Yu M J, Zhang H F. Single-image dehazing based on dark channel and incident light assumption [J]. Journal of Image and Graphics, 2014, 19(12): 1812-1819.  
於敏杰, 张浩峰. 基于暗原色及入射光假设的单幅图像去雾[J]. 中国图象图形学报, 2014, 19(12): 1812-1819.
- [4] He K M, Sun J, Tang X O. Single image haze removal using dark channel prior [C] // 2009 IEEE Conference on Computer Vision and Pattern Recognition, June 20-25, 2009, Miami, FL, USA. New York: IEEE, 2009: 1956-1963.
- [5] Dong Y Y, Bi D Y, He L Y, *et al.* Single image dehazing algorithm based on non-local prior[J]. Acta Optica Sinica, 2017, 37(11): 1110001.  
董亚运, 毕笃彦, 何林远, 等. 基于非局部先验的单幅图像去雾算法[J]. 光学学报, 2017, 37(11): 1110001.
- [6] Tarel J P, Hautière N. Fast visibility restoration from a single color or gray level image [C] // 2009 IEEE 12th International Conference on Computer Vision, September 29-October 2, 2009, Kyoto, Japan. New York: IEEE, 2009: 2201-2208.
- [7] He K M, Sun J, Tang X O. Guided image fitting [M] // Daniilidis K, Maragos P, Paragios N. Computer vision — ECCV2010. Lecture notes in computer science. Berlin, Heidelberg: Springer, 2010, 6311: 1-14.
- [8] Huang L H. A novel algorithm for single image dehazing[J]. Acta Photonica Sinica, 2011, 40(9): 1419-1422.  
黄黎红. 单幅图像的去雾新算法[J]. 光子学报, 2011, 40(9): 1419-1422.
- [9] Pang C Y, Ji X Q, Sun L N, *et al.* An improved method of image fast defogging[J]. Acta Photonica Sinica, 2013, 42(7): 872-877.  
庞春颖, 嵇晓强, 孙丽娜, 等. 一种改进的图像快速去雾新方法[J]. 光子学报, 2013, 42(7): 872-877.
- [10] Yang A P, Wang H X, Wang J B, *et al.* Image dehazing based on transmission fusion and multi-guided filtering [J]. Acta Optica Sinica, 2018, 38(12): 1210001.  
杨爱萍, 王海新, 王金斌, 等. 基于透射率融合与多重导向滤波的单幅图像去雾[J]. 光学学报, 2018, 38(12): 1210001.
- [11] Jiang P P, Yang Y. Adaptive linear transformation image dehazing algorithm based on Gaussian attenuation[J]. Laser & Optoelectronics Progress, 2019, 56(10): 101002.  
姜沛沛, 杨燕. 基于高斯衰减的自适应线性变换去雾算法[J]. 激光与光电子进展, 2019, 56(10): 101002.
- [12] Chen S Z, Ren Z G, Lian Q S. Single image dehazing algorithm based on improved dark channel prior and guided filter [J]. Acta Automatica Sinica, 2016, 42(3): 455-465.  
陈书贞, 任占广, 练秋生. 基于改进暗通道和导向滤波的单幅图像去雾算法[J]. 自动化学报, 2016, 42(3): 455-465.
- [13] Han Z T, Lu W, Yang S Y, *et al.* Improved natural image dehazing algorithm based on guided filtering [J]. Journal of Frontiers of Computer Science & Technology, 2015, 9(10): 1256-1262.  
韩正汀, 路文, 杨舒羽, 等. 基于导向滤波优化的自然图像去雾新方法[J]. 计算机科学与探索, 2015, 9(10): 1256-1262.
- [14] Jiang C X, Wang C J, Chen J. Sun centroid extraction algorithm for solar tracker with double modes[J]. Chinese Journal of Lasers, 2015, 42(2): 0213002.  
姜春霞, 王灿进, 陈娟. 双模式太阳跟踪器太阳质心

- 提取算法[J]. 中国激光, 2015, 42(2): 0213002.
- [15] Jiang J L, Wang Z D, Zhong L C, *et al.* Bi-histogram equalization algorithm with precise control of image brightness [J]. Journal of University of Electronic Science and Technology of China, 2018, 47(1): 105-111.  
江巨浪, 王振东, 钟伦超, 等. 图像亮度精确控制的双直方图均衡算法[J]. 电子科技大学学报, 2018, 47(1): 105-111.
- [16] Jiang J L, Sun W, Wang Z D, *et al.* Integrated enhancement algorithm for hazy image using transmittance as weighting factor [J]. Journal of Electronics & Information Technology, 2018, 40(10): 2388-2394.  
江巨浪, 孙伟, 王振东, 等. 基于透射率权值因子的雾天图像融合增强算法[J]. 电子与信息学报, 2018, 40(10): 2388-2394.