

文章编号 1004-924X(2025)13-2124-12

面向多模式图像的改进暗通道先验去雾增强

卜祥涛¹, 宋亚芳¹, 王晓宇¹, 姜 珊¹, 李德胜¹, 赵 宇², 李亚红^{1*}

(1. 大连工业大学 信息科学与工程学院, 辽宁 大连 116034;

2. 中国科学院 长春光学精密机械与物理研究所, 吉林 长春 130033)

摘要:针对现有算法存在处理图像模式单一和通用性受限的问题,基于暗通道先验提出了一种多模式图像去雾增强算法,对偏振强度、斯托克斯参量、线偏振度不同模式偏振图像和传统的 RGB 和黑白图像均适用。对偏振图像,利用 K-means 聚类、网格化和双线性插值估计大气光值,引入亮度与结构权重估计大气透射率,暗通道计算采用多尺度高斯滤波与基于梯度的自适应权重融合;对 RGB、黑白图像,利用 K-means 聚类并采用天空像素 95% 分位数估计大气光值,结合高斯拉普拉斯边缘检测和双线性插值估计大气透射率,暗通道计算使用多尺度腐蚀操作和基于局部对比度的权重;在户外薄雾和室内人造浓雾下采集不同模式图像,并与暗通道先验、多尺度 Retinex 算法的去雾增强效果进行了对比。结果表明:所提算法在图像清晰度、边缘和细节恢复方面取得显著提升,平均梯度、图像熵和峰值信噪比较多尺度 Retinex 算法,偏振图像最少提升 112.6%, 14.0%, 5.0%, 非偏振图像最少提升 103.6%, 20.6%, 21.9%。该算法不仅在增强图像质量方面具有优越性,同时对不同模式图像具有通用性。

关键词: 图像去雾; 图像增强; 偏振; 暗通道先验; 多尺度 Retinex 算法

中图分类号: TP391.41 **文献标识码:** A

doi: 10.37188/OPE.20253313.2124

CSTR: 32169.14.OPE.20253313.2124

Improved dark channel prior dehazing enhancement for multi-modal images

BU Xiangtao¹, SONG Yafang¹, WANG Xiaoyu¹, JIANG Shan¹, LI Desheng¹,
ZHAO Yu², LI Yahong^{1*}

(1. School of Information Science and Engineering, Dalian Polytechnic University,
Dalian 116034, China;

2. Changchun Institute of Optics, Fine Mechanics and Physics, Chinese Academy of Sciences,
Changchun 130033, China)

* Corresponding author, E-mail: liyahong@dlpu.edu.cn

Abstract: A multi-modal image dehazing enhancement algorithm based on the dark channel prior is proposed to address the limitations of single-mode processing and restricted generality in existing image enhancement methods. This algorithm is applicable to various polarization image modalities, including polarization intensity, Stokes parameters, and linear polarization images, as well as conventional RGB and grayscale images. For polarization images, atmospheric light estimation is performed through K-means

收稿日期: 2025-03-06; 修订日期: 2025-04-25.

基金项目: 国家自然科学基金资助项目 (No. 11904044); 辽宁省教育厅面上项目 (No. JYTMS20230424)

clustering, grid partitioning, and bilinear interpolation, while atmospheric transmission is derived using brightness and structure-weighted techniques. Dark channel computation incorporates multi-scale Gaussian filtering combined with gradient-based adaptive weight fusion. For RGB and grayscale images, atmospheric light is estimated by K-means clustering and the 95th percentile of sky pixels, and atmospheric transmission is calculated via Gaussian Laplacian edge detection and bilinear interpolation. Dark channel computation utilizes multi-scale erosion operations alongside local contrast-based weighting. Experimental evaluation was conducted using multi-modal images collected under outdoor light mist and indoor artificial thick fog conditions, with dehazing enhancement outcomes compared against conventional dark channel prior and multi-scale Retinex algorithms. The results reveal marked improvements in image clarity, edge definition, and detail restoration. Specifically, polarization images demonstrated minimum enhancements of 112.6%, 14.0%, and 5.0% in average gradient, image entropy, and peak signal-to-noise ratio, respectively, relative to the multi-scale Retinex algorithm. Non-polarization images exhibited minimum improvements of 103.6%, 20.6%, and 21.9% across the same metrics. This comprehensive validation confirms that the proposed algorithm not only significantly enhances image quality but also maintains robust generality across diverse image modalities.

Key words: image defogging; image enhancement; polarization; dark channel prior; multi-scale Retinex algorithm

1 引言

恶劣天气下能见度大大降低,传统相机的成像效果无论是在对比度还是细节保留方面都较差,严重影响后续的处理及应用^[1]。为了保证成像质量,硬件方面可以利用偏振成像技术“穿透雾”的优势,衍生出旋转偏振片型、液晶调制型、分振幅型、分孔径型、分焦平面型等偏振成像系统^[2-4]。随着多维光学探测技术的发展,快照式光谱偏振成像技术能够同时获取目标的二维空间、强度、光谱和偏振信息,不仅兼顾快照式高光光谱成像“高分辨、快速响应”的特点^[5],还具有偏振成像“弱光强化、强光弱化”的优点,抑制检测环境因素对目标成像的影响,有效地改善恶劣天气下的成像质量。因上述成像系统成本较高,其实际应用受到一定的限制。目前的研究大多数集中在图像去雾增强算法上,如暗通道先验、Retinex 等基于数学模型^[6-8]以及基于卷积神经网络的 Transformer、UNet 等深度学习^[9-10]去雾增强算法。

图像去雾增强算法主要利用大气散射模型,通过模拟退化图像形成的逆推过程,分析估计模型参数,恢复得到去雾后的清晰图像。1975 年,Cartney 提出大气散射物理模型^[11],该模型为后续图像去雾增强的研究提供了坚实的理论支撑。

国内外研究者基于此模型开展了一系列的去雾算法研究。2002 年,Narasimhan 等^[12]提出了基于多幅图像的去雾框架,利用大气散射模型和色度效应,从不同天气条件下拍摄的图像中恢复场景三维结构、深度信息及“晴天”颜色,有效提升恶劣天气下的图像清晰度。然而,该方法需多张图像,存在实时性受限、计算复杂、对天气条件变化敏感等局限性。2008 年,Tan^[13]提出单幅图像去雾算法,通过最大化局部对比度估计大气光和透射率,提升雾霾图像清晰度。但该算法在天空区域处理、颜色失真、光照变化、噪声敏感及计算复杂度方面有局限,不适于复杂场景。2009 年,何凯明等^[14]首次提出基于暗通道先验的去雾算法,有效去除雾气并提升图像清晰度,但存在处理天空区域困难、颜色失真、对光照变化和噪声敏感、计算复杂度高等局限性。2012 年,刘楠等^[15]提出了一种基于边缘特征的加权暗通道去雾算法,通过对边缘点和非边缘点赋予不同权值来优化透射图计算,能够有效恢复图像细节并抑制光晕效应。2017 年,肖进胜等^[16]提出基于暗通道的改进去雾算法,通过引导滤波对天空区域优化,提取边缘信息并增强亮度,解决了色彩失真和光晕问题。2020 年,Kim 等^[17]提出了一种快速单幅图像去雾算法,利用饱和度估计传输图,通过简单拉

伸方法计算饱和度,结合白平衡去除雾气。该方法无需训练,计算高效,适合薄雾到中等雾场景,但在浓雾或复杂光照下效果有限,可能有轻微伪影。2024年,杨朔等^[18]提出一种结合区域生长与容差机制的去雾算法,通过分割天空区域估计大气光值,改进透射率修正并使用 Retinex 法调整色彩和亮度,有效改善了天空色彩和图像清晰度。然而,这些算法大多具有较强的针对性,如只针对传统 RGB 或黑白图像,其通用性和稳定性存在一定局限。随着偏振成像技术在图像增强领域的广泛应用,有学者将偏振成像技术与暗通道先验算法进行结合,充分利用偏振成像技术在“穿透云雾”方面的卓越能力,有效获取传统成像模式下无法捕获的偏振信息,显著提升了去雾效果。2020年,游江等^[19]提出了基于暗通道先验的偏振图像去雾增强算法,通过自动提取天空区域提高了图像清晰度和细节,但该算法的适应性较差,计算复杂度较高,且处理图像模式较为单一。2024年,朱思睿等^[20]提出一种偏振暗通道融合去雾方法,通过计算偏振暗通道估计大气光与透过率,结合雾霾成像模型恢复图像,但该算法存在适应场景单一,无法处理多种模式图像的问题。2024年,徐万春等^[21]提出一种基于梯度引导偏振度估算的图像去雾,通过偏振图像与暗通道先验估算目标偏振度,优化大气光强,最终恢复去雾图像,但该算法仍无法处理多种模式的图像。

针对上述问题,本文提出一种能够适用偏振强度、斯托克斯参量、线偏振度不同模式偏振图像和 RGB、黑白图像的暗通道先验去雾增强算法。针对偏振与传统非偏振图像的特性,对大气光值、大气透射率的估计与暗通道计算进行优化,提升了估计与计算精度,有效减少了光圈效应和颜色失真。该算法兼容偏振和传统非偏振图像,具有良好的场景适应性和稳定性,能够在多种图像模式下保持较好的性能,具有较强的通用性。

2 基本原理

2.1 大气散射模型

恶劣天气下的图像退化主要源于散射效应和吸收效应。散射效应是由于空气中悬浮颗粒物增多,这些微小颗粒对光线产生的散射作用,

导致光线偏离直线路径,从而导致图像细节模糊、对比度下降,整体图像质量降低。吸收效应则是指这些颗粒物不仅散射光线,还吸收部分光线,导致光强减弱,图像色彩饱和度降低,尤其在远距离区域更为显著,进一步增加了图像的整体灰度。这两种效应共同作用导致恶劣天气条件下拍摄的图像质量下降,影响目标获取与识别。成像原理可以通过大气散射模型来描述:

$$I(x, y) = J(x, y)t(x, y) + A(1 - t(x, y)), \quad (1)$$

式中: (x, y) 为图像空间像素的坐标值; $I(x, y)$ 为有雾图像; $J(x, y)$ 为需恢复的清晰图像; A 为大气光值; $t(x, y)$ 为透射率,通常在 $[0, 1]$ 之间,与传输距离有关,随着传输距离的增加以指数形式递减^[22]。

2.2 暗通道先验

暗通道先验(Dark Channel Prior, DCP)^[14]是去雾算法的数学依据,定义如下:

$$J^{\text{dark}}(x) = \min_{y \in \Omega(x)} \left(\min_{c \in \{r, g, b\}} J^c(y) \right), \quad (2)$$

式中: $J^{\text{dark}}(x)$ 为像素点 x 处的暗通道值, $J^c(y)$ 为像素值 y 在 RGB 通道上的强度值, $\Omega(x)$ 为以 x 为中心的局部窗口。由暗通道先验原理可知,在无雾的户外图像中, R, G, B 三个颜色通道中至少有一个通道的灰度值极低,接近于 0。暗通道值 $J^{\text{dark}}(x)$ 通过在以像素 x 为中心的邻域 $\Omega(x)$ 内计算所有像素在 RGB 通道中的最暗值,并取这些最暗值的最小值得到。

式(1)中的大气光值 A 确定后, $I(x, y)$ 为原始有雾图像,由于暗通道先验原理假设 $J^{\text{dark}}(x)$ 近似为 0,将其代入式(1),可得透射率 $t(x, y)$,最终可得恢复后的清晰图像如下:

$$J(x, y) = \frac{I(x, y) - A}{\max(t(x, y), 0.01)} + A, \quad (3)$$

式中阈值为 0.01,以防止透射率值过低影响恢复后的图像。

3 算法介绍

3.1 算法原理

基于暗通道先验去雾算法,结合偏振图像(偏振强度、斯托克斯参量、线偏振度)与非偏振

图像(RGB、黑白图像)的特性,设计了针对性处理流程,如图1所示。

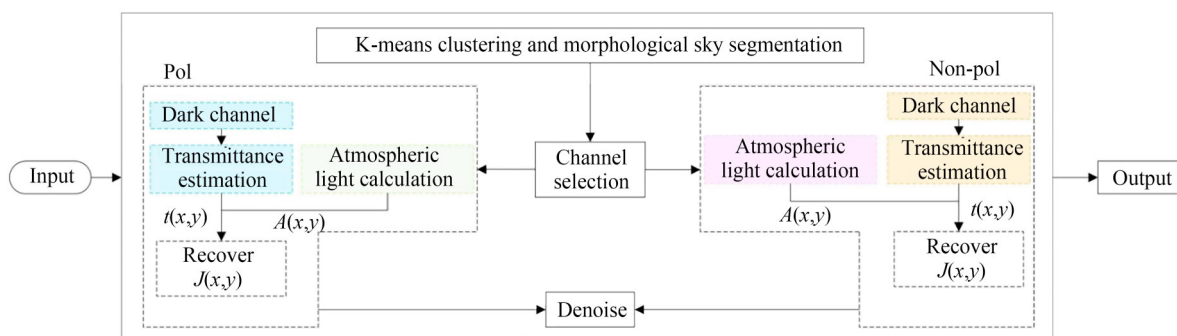


图1 去雾算法的整体流程

Fig. 1 Overall flow chart of defogging enhancement algorithm

首先,对输入图片进行通道选择,Pol代表偏振图像,Non-pol代表传统非偏振图像。根据指令结果,对偏振图像与非偏振图像进行针对性处理。偏振图像利用结合多尺度高斯滤波和基于梯度加权机制的暗通道计算方法获取暗通道值,根据基于亮度权重、结构权重的大气透射率估计方法获取大气透射率,并使用K-means聚类方法将HSV色彩空间与归一化位置坐标构成五维特征向量,通过重叠度与垂直位置权重识别天空区域,在网格划分的图像块中结合天空掩码和梯度信息计算局部大气光值,最后通过双线性插值将这些局部大气光值扩展生成完整的大气光图,利用式(3)得到去雾增强后的图像。非偏振图像利用多尺度腐蚀操作和基于局部对比度权重的大气透射率估计方法进行获取暗通道值,根据结合高斯拉普拉斯(LoG)边缘检测以及双线性插值的大气透射率估计法来获取大气透射率,并使用K-means聚类将灰度值作为特征进行二分类聚类,直接将亮度较高的聚类识别为天空区域,在估计的天空区域中选取95%位数计算大气光值,利用引入深度因子的大气散射模型得到增强后的图像。最后,将增强得到的图像进行后处理。

3.2 偏振去雾

偏振图像相较其他模式图像具有更多维度的信息,因此有更强的图像表达能力。针对偏振图像,提出一种基于亮度权重、结构权重的大气透射率估计方法,其原理如下:

$$\begin{cases} t(x, y) = 1 - \omega \cdot J_{\text{pol}}^{\text{dark}}(x, y) \cdot W_b(x, y) \cdot W_s(x, y) \\ W_b(x, y) = \min \left(\max \left(\frac{G(x, y) - \min(G)}{\max(G) - \min(G)}, 0.4 \right), 1 \right) \\ \lambda_{1,2} = \frac{(J_{xx} + J_{yy}) \pm \sqrt{(J_{xx} + J_{yy})^2 + 4 \cdot J_{xy}^2}}{2} \\ W_s(x, y) = 1 - \frac{\lambda_1 - \lambda_2}{\lambda_1 + \lambda_2 + 10^{-6}} \end{cases}, \quad (4)$$

式中: ω 为去雾程度参数, ω 增大,去雾强度越强,但光圈效应也越明显。经过多组数值测试,最终选取0.15作为参数值,以避免光圈效应和去雾过度,确保去雾效果的自然性与稳定性; $J_{\text{pol}}^{\text{dark}}(x, y)$ 为暗通道值, $W_b(x, y)$ 为亮度权重,其范围设定在0.4~1之间,以防止图像过暗或过亮,保持自然的亮度与对比度; $\max(G)$ 与 $\min(G)$ 分别为全图灰度值的最大值与最小值; $W_s(x, y)$ 为结构权重。 10^{-6} 为接近于0的常数,用于避免分母为0的情况,也不会对权重获取造成较大的影响。 λ_1 , λ_2 为图像二阶矩梯度信息计算得到的特征值,可以通过计算得到的特征值确定图像中的边缘和纹理信息,从而增强图像的细节和对比度。 J_{xx} , J_{yy} 和 J_{xy} 分别为图像灰度值在 x 和 y 方向上的二阶偏导数。

为了提升大气光值估计的精度,引入网格化大气光估计法,并结合双线性插值,进一步提高了计算的准确性和稳定性。

$$A_{\text{grid}}(x, y) = \frac{\sum_{(x, y) \in \text{grid}} B(x, y) \cdot W_g(x, y) M_{\text{sky}}(x, y)}{\sum_{(x, y) \in \text{grid}} W_g(x, y) \cdot M_{\text{sky}}(x, y)}, \quad (5)$$

式中: $B(x, y)$ 为 (x, y) 处的像素值, $W_g(x, y)$ 为基于原始图像灰度图梯度的权重, $M_{\text{sky}}(x, y)$ 为天空掩码。

$$A(x, y) = \max(100, \min(\bar{A}_{\text{grid}}(x, y), 240)), \quad (6)$$

式中: $\bar{A}_{\text{grid}}(x, y)$ 为网格大气光值的平均值, 根据 He 等的统计, 户外图像大气光估计值一般不超过 240 (在亮度为 0~255 的情况下)^[23]。因此, 本研究选取 240 与 $\bar{A}_{\text{grid}}(x, y)$ 进行对比, 取其中的最小值, 选择 100 与最小值对比, 以避免亮度过低影响去雾效果。

在暗通道定义式(2)中引入多尺度高斯滤波代替局部窗口最小值操作并加入基于梯度的加权机制, 用于获取暗通道值, 即:

$$J_{\text{pol}}^{\text{dark}}(x, y) = \sum_{i=1}^n \omega_i(x, y) \cdot G_{\sigma_i} * \min_c J^c(x, y), \quad (7)$$

式中: $\omega_i(x, y)$ 为基于暗通道图像的梯度的权重; G_{σ_i} 为高斯核, 这里取值为 3, 7 与 15, 其中 $G_{\sigma_i} = 3$ 用于捕捉图像细节, $G_{\sigma_i} = 7$ 和 $G_{\sigma_i} = 15$ 用于捕捉全局信息; $*$ 为卷积运算。将获得的 $t(x, y)$, $A(x, y)$ 代入式(3), 即可得到无雾图像。

3.3 非偏振去雾

针对 RGB 和黑白图像特性, 利用暗通道先验、LoG 边缘检测以及双线性插值法来估计大气透射率, 避免去雾过度现象的发生, 提升算法的稳定性, 得到:

$$t(x, y) = 1 - \omega \cdot J_{\text{Non-pol}}^{\text{dark}}(x, y) \cdot W_{\text{edge}}(x, y), \quad (8)$$

式中: ω 为去雾程度参数, 取值过大时会产生光晕效应, 故取 0.7^[24]; $J_{\text{Non-pol}}^{\text{dark}}(x, y)$ 为暗通道值; $W_{\text{edge}}(x, y)$ 为边缘权重。

利用天空区域像素的 95% 分位数作为大气光值估计的依据, 在不存在天空区域时则采用全图像像素的 95% 分位数替代, 从而有效减少局部异常高亮区域的干扰。在暗通道定义式(2)中引入多尺度腐蚀操作和基于局部对比度的权重, 用于

获取暗通道值, 得到:

$$J_{\text{Non-pol}}^{\text{dark}}(x, y) = \sum_{i=1}^n u_i(x, y) \cdot E_k \min_{y \in Q(x)} \left(\min_c J^c(x, y) \right), \quad (9)$$

式中: $u_i(x, y)$ 为基于拉普拉对比度的权重; E_k 为进行腐蚀操作, k 为腐蚀操作结构元素大小, 这里取 3, 7 和 15, 其中 $k=3$ 用于捕捉图像的细节, 而 $k=7$ 和 $k=15$ 则用于平滑图像, 以减少噪声。在大气散射模型式(1)中引入深度因子 $F_d = e^{-t(x, y)}$, 用于最后推导无雾图像, 如式(10)所示。其中, 权重设置为 0.7, 避免去雾过度造成失真, 深度因子引用可以减少伪影并保留结构和纹理细节。

$$J(x, y) = \left(\frac{I(x, y) - A(x, y)}{t(x, y)} + A(x, y) \right) (1 - 0.7 \cdot F_d) + (I(x, y) \cdot 0.7 F_d). \quad (10)$$

4 实验与结果分析

4.1 实验环境

实验在人造浓雾环境以及户外薄雾环境中采集多模式偏振图像。室内实验的具体方法为: 将金属玩具小车、树枝等物体置于长 0.5 m 的透明塑料箱内, 通过点燃烟饼生成浓雾环境, 随后使用偏振相机进行图像采集。户外实验则直接在自然薄雾环境中采集偏振图像, 实验装置如图 2 所示。

依据 GB/T 27964-2011 规定浓雾可见度为 200~500 m, 由于本实验中可见度远远低于这一范围, 故将室内人造烟雾归为浓雾。室内人造浓雾由烟饼在塑料箱内燃烧生成, 涉及因素包括微米级烟雾粒径和封闭环境, 这些导致米氏散射, 引发强烈的去偏振效应, 使偏振对比度快速衰减, 同时动态浓度变化和二次散射进一步干扰图像的一致性和细节清晰度。室外薄雾在偏振图像采集中的关键因素包括自然雾滴粒径分布以及开放环境。这些因素导致瑞利散射与米氏散射共存, 远距离目标信号因瑞利散射和环境光噪声而显著衰减, 背景偏振干扰降低偏振对比度, 大气湍流进一步引起光路波动, 造成图像模糊和

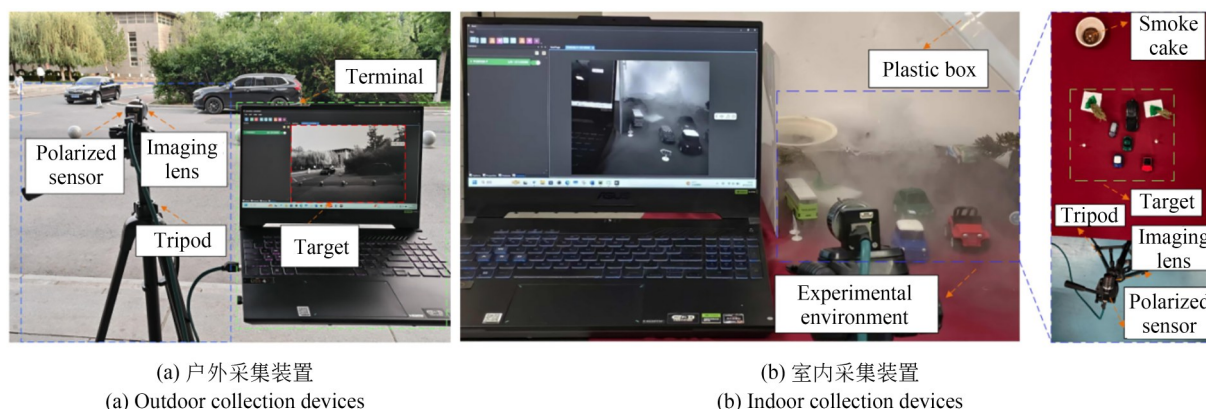


图 2 实验采集装置

Fig. 2 Experimental acquisition devices

偏振信息失真,削弱目标检测能力。

4.2 结果与分析

为了验证所提出算法的可行性及其在去雾中的应用效果,本研究采用 Lucid 的偏振相机 (Triton 500 万像素偏振千兆以太网工业相机) 拍摄的图像进行测试。采集户外薄雾 (Light Mist, LM) 与室内人造浓雾 (Dense Fog, DF) 下的强度图像 I_0 、斯托克斯参量图像 S_1 、线偏振度图像 DoLP, 这些参量的定义详见第二版《Polarized Light》^[25], 这里不再赘述。将所提出方法 (Proposed Method, PM) 与原图像 (Original Drawing, OD) 以及暗通道先验算法 (Dark Channel Prior, DCP)^[14] 和多尺度 Retinex 算法 (Multi-Scale Retinex, MSR)^[26] 的最佳去雾效果进行对比分析, 结果如图 3 所示。其中, 相机与图 3(a) 红色框出物体的直线距离分别约为 30, 50, 100 m。DCP 的最佳参数取值为: 去雾程度参数 $\omega = 0.9$, 暗通道窗口大小 $r = 7$, 引导滤波窗口 $S = 81$ 。MSR 的最佳参数取值为: 高斯核大小 $\sigma = [30, 100, 250]$ 、后处理增益参数 $G = 5$ 、后处理偏置参数 $\beta = 20$ 、颜色恢复参数 $b = 35, \alpha = 125$ 。

由图 3 可知, 暗通道先验算法在薄雾和浓雾环境下处理后的图片存在亮度过低和对比度过高的问题。在薄雾环境下, 所提算法不仅有效避免了暗通道先验算法中亮度不足和对比过强的现象, 还能保持良好的去雾效果。相比多尺度 Retinex 算法, 所提算法显著提升了图像的清晰度, 并增强了边缘轮廓和细节表现。在浓雾环境下, 暗通道先验算法亮度过低及对比度过高问题更加明显, 而多尺度 Retinex 算法在 DoLP 模式

存在图像信息丢失的现象。相比之下, 所提算法在改善图像质量、清晰度、边缘细节和对比度方面表现出色, 并有效避免了上述问题。如图 3(b) 中 S_1 与 DoLP 绿框所示, 在处理图片中的树木时相较于对比算法去雾增强效果更为明显。

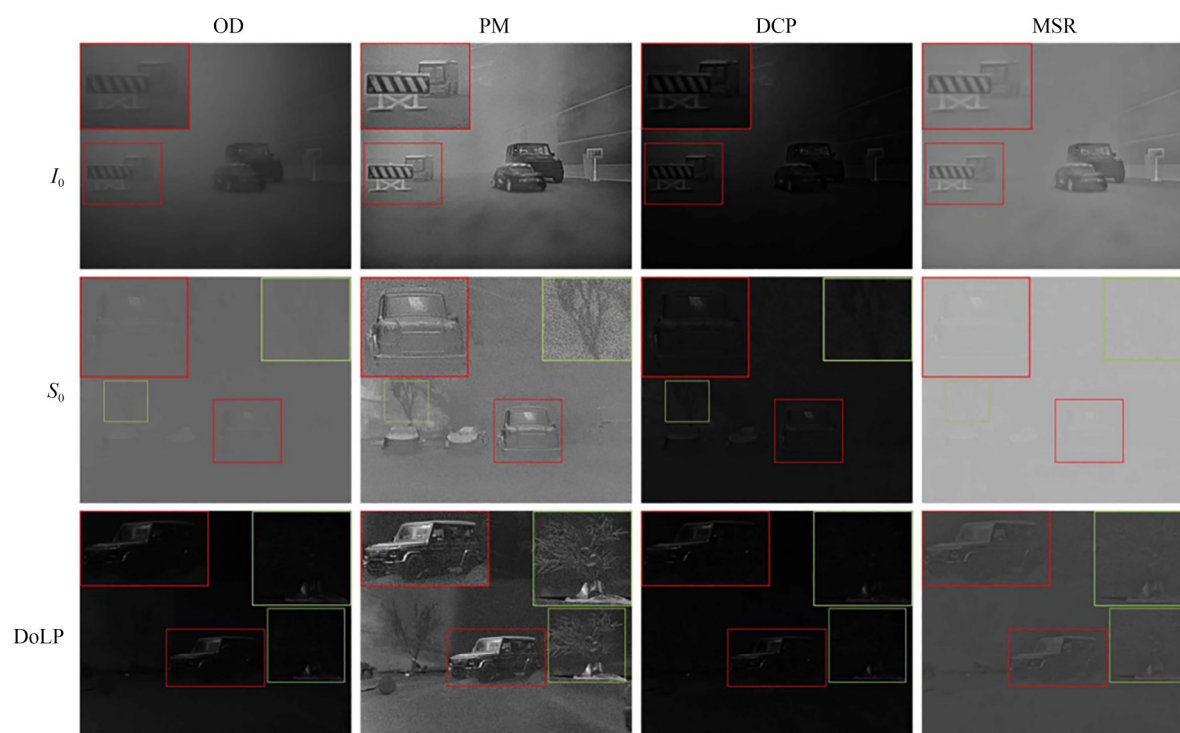
为验证算法的通用性, 分别选取 3 张 RGB 与 3 张黑白雾天图像, 对图像进行去雾处理, 各算法的去雾效果如图 4 所示。对比可知, 暗通道先验算法在处理传统非偏振 RGB 与黑白雾天图像时出现天空及高亮区域色彩失真的问题, 在 RGB 图像部分, 多尺度 Retinex 算法出现严重信息丢失和去雾效果失效的现象。相比之下, 所提算法能够显著提升图像质量, 且具备更高的色彩还原能力。在黑白图像部分, 所提算法相较于多尺度 Retinex 算法去雾效果更加明显, 有效地改善了图像质量和清晰度, 同时避免了暗通道先验算法在天空及高亮区域出现的色彩失真问题。

综上可知, 所提算法在处理薄雾、浓雾环境下的偏振图像以及传统非偏振 RGB 和黑白雾天图像时, 均表现出良好的去雾效果。该算法能够显著提升图像质量、清晰度、对比度及边缘轮廓信息, 具备较强的通用性和稳定性, 适用于多种模式图像处理需求。

为了定量描述去雾后的图像质量, 选用平均梯度 (Average Gradient, AG)、图像熵 (Image Entropy, IE) 和峰值信噪比 (Peak Signal-to-Noise Ratio, PSNR) 作为评价指标, 对上述各算法的处理结果进行客观评价对比。平均梯度、图像熵分别反映图像的清晰度、所含信息量, 其值越大, 图像清晰度和所含信息量就越大; PSNR



(a) 室外薄雾
(a) Outdoor light mist



(b) 室内浓雾
(b) Indoor dense fog

图 3 偏振图像去雾增强效果比较

Fig. 3 Comparison of enhancement effect of defogging polarization images

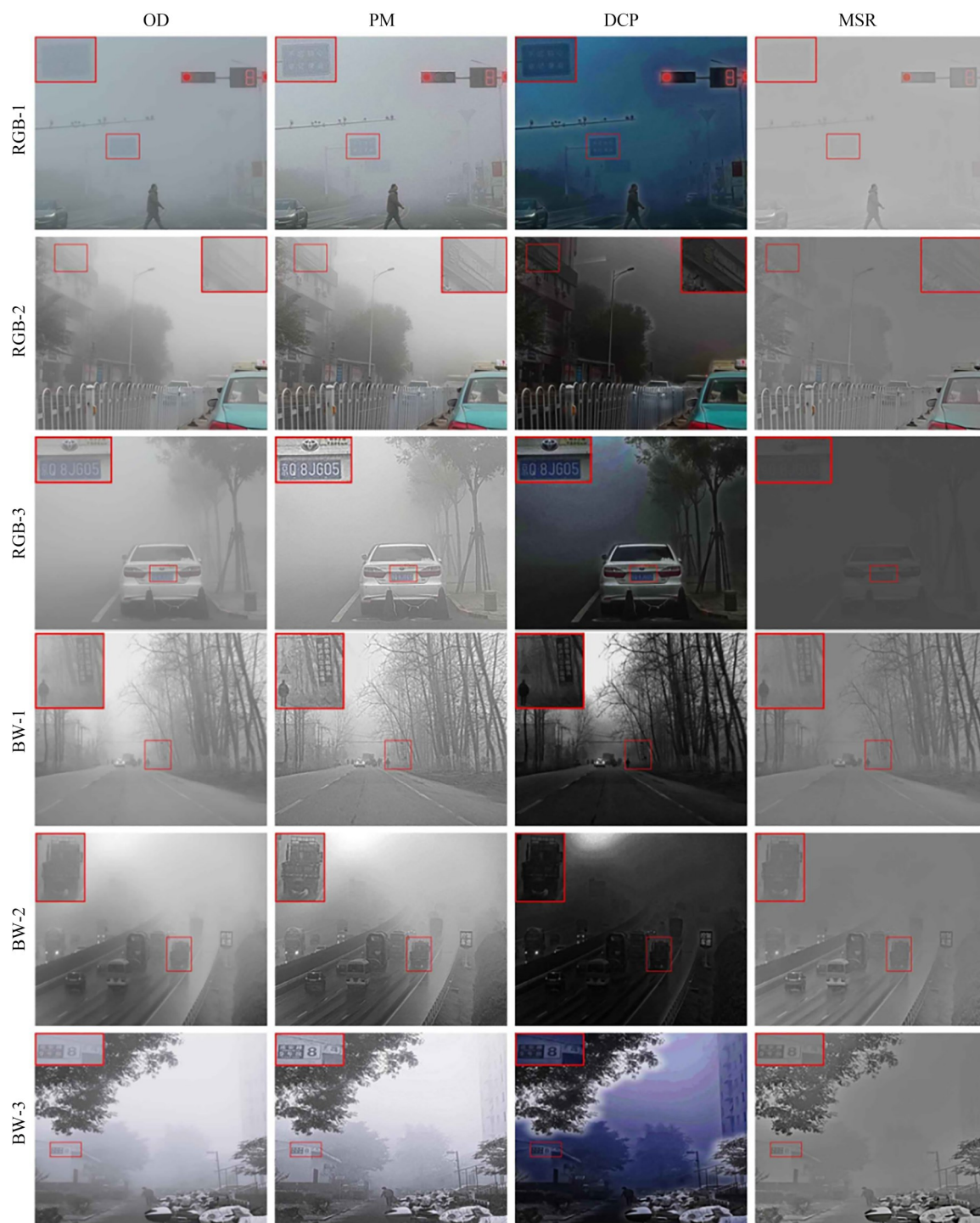


图 4 非偏振图像去雾增强效果比较

Fig. 4 Comparison of enhancement effect of defogging in unpolarized images

反应图像之间的差异,其值越大,与原图像越相似,图像质量越好。表 1 列出各算法对各图像去雾效果的评价指标。

为了能够更加直观地对比提出算法与暗通道先验、多尺度 Retinex 算法对各图像的去雾性

能,依据表 1 中的数据绘制可视化柱状图,如图 5 所示。

由表 1 和图 5 可知,所提算法在薄雾环境下,AG、IE 和 PSNR 方面均优于对比算法。多尺度 Retinex 算法处理的 I_0 图像出现了图像熵低于原

表 1 各算法对各图像去雾效果的评价指标比较

Tab. 1 Comparison of dehazing performance metrics of different algorithms on various images

MD	AG				IE				PSNR/dB			
	OD	PM	DCP	MSR	OD	PM	DCP	MSR	OD	PM	DCP	MSR
LM(I_0)	8.7	51.4	19.9	8.2	7.1	7.4	7.0	5.2	—	15.6	6.3	11.9
LM(S_1)	12.7	63.1	50.3	18.8	5.9	7.1	6.9	5.9	—	21.1	14.7	20.1
LM(DoLP)	3.9	46.3	15.9	3.4	3.3	5.6	5.0	2.9	—	19.9	5.2	11.9
DF(I_0)	5.8	56.1	16.4	14.6	6.2	6.8	5.4	4.7	—	16.0	14.2	12.6
DF(S_1)	9.9	114.6	28.5	21.8	3.5	5.0	4.7	3.2	—	20.5	10.6	12.8
DF(DoLP)	13.5	79.1	13.6	37.2	4.6	5.7	4.0	5.0	—	14.6	33.0	10.6
RGB-1	7.5	36.7	18.9	5.8	5.8	6.5	6.3	3.4	—	24.5	9.2	20.1
RGB-2	13.2	53.4	26.8	15.7	7.0	7.5	6.9	5.0	—	22.9	7.5	13.7
RGB-3	7.1	39.9	20.5	2.1	6.4	6.9	6.8	2.8	—	24.1	7.4	9.0
BW-1	27.8	98.5	65.2	26.2	6.7	7.1	7.0	5.7	—	22.5	8.4	14.1
BW-2	7.7	34.9	16.4	9.8	7.4	7.6	6.3	4.7	—	25.3	6.5	13.5
BW-3	33.5	84.9	49.0	41.7	7.2	7.6	7.3	6.3	—	21.7	9.1	12.3

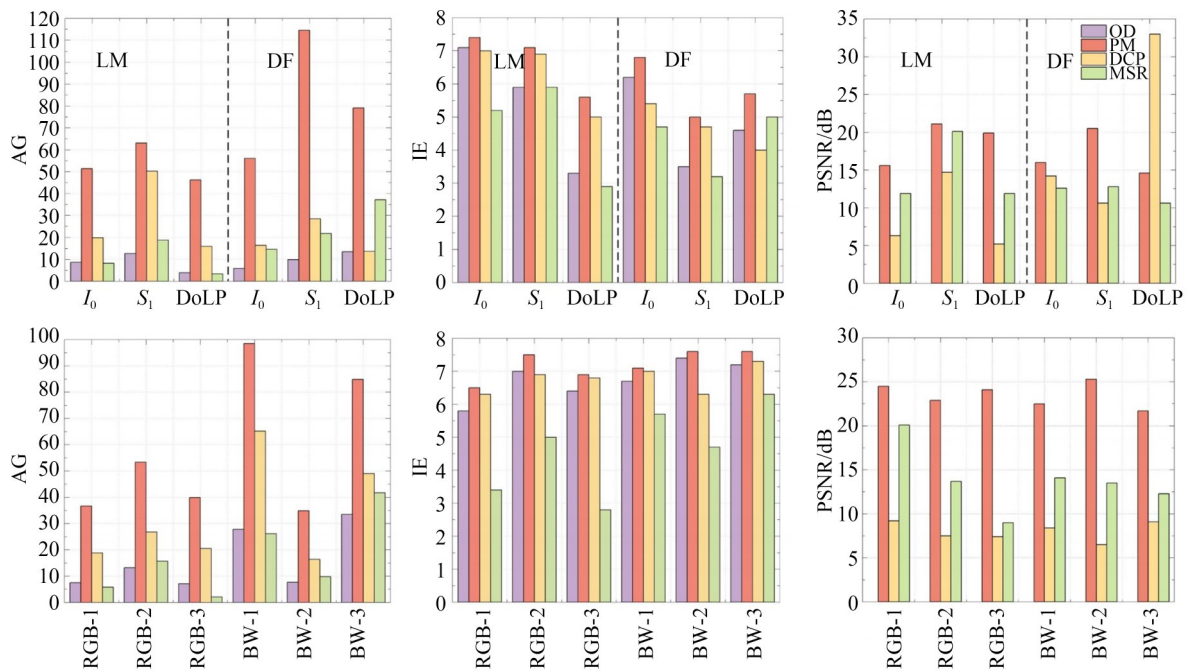


图 5 各去雾算法指标比较可视化柱状图

Fig. 5 Bar chart for visualizing metric comparison of different dehazing algorithms

图像的情况,这是由于照明分量估计不够准确,照明分量的估计是Retinex算法的基础,当其估计不够准确时,增强后的图像会在某些区域出现过度平滑或者对比度失真,这直接导致了图像熵的降低。在浓雾环境下,所提算法的评价指标大多优于对比算法,仅在DoLP图像模式下,其PSNR低于暗通道先验算法。在图像熵方面,暗

通道先验处理后图像质量低于原图像,这是由于透射图估计不准确,导致去雾过程中局部区域像素值趋同,降低了像素值分布的随机性,使得图像熵降低。多尺度Retinex算法处理的图像,在 I_0 模式下也出现了图像熵低于原图像的现象。相比之下,所提算法在薄雾和浓雾环境下,平均梯度和图像熵至少分别提升了396.9%,4.2%和

486.0%, 9.7%, 并且指标浮动较小, 在薄雾、浓雾下任意偏振模式性能表现都十分稳定, 具有较强通用性。无论是RGB还是黑白图像, 所提算法在各项指标上均优于暗通道先验和多尺度Retinex算法。特别地, 暗通道先验和多尺度Retinex算法在处理黑白图像时, 图像熵低于原图像。此外, 多尺度Retinex去雾后平均梯度部分低于原图像, 这种情况的成因是雾浓度分布不均匀导致光照分量建模不准、暗区域低信噪比与噪声干扰使反射分量恢复时细节丢失等问题, 共同造成增强图像细节不足和梯度下降。相比之下, 所提算法在RGB与黑白原图像上平均梯度、图像熵分别至少提高304.5%, 7.1%与153.4%, 2.7%, 指标变化平稳, 仅表现出较小的浮动。这充分证明了所提算法在处理不同类型图像时, 具有较好的稳定性和较强的通用性。

通过视觉效果和评价指标的对比分析可见, 所提算法在处理偏振和非偏振图像时均能实现有效的去雾, 且综合性能均优于对比算法。各项评价指标均呈现稳定的提升, 且未出现对比算法在某些模式下评价指标低于原图像的情况。

5 结 论

为解决现有去雾算法通用性差的问题, 本文提出了一种基于暗通道先验适用于偏振强度、斯托克斯参量、线偏振度和传统的RGB、黑白图像的去雾算法, 有效拓展了算法的适用范

围, 为对多种模式图像提供了通用的去雾解决方案。实验结果证明: 此算法相较原始图像, 偏振图像其平均梯度值提升396.9%以上, 图像熵提升4.2%以上; 非偏振图像其平均梯度值提升153.4%以上, 图像熵提升2.7%以上。该算法兼容偏振和非偏振图像, 具有良好的场景适应性, 能够在多种图像模式下保持优异的性能, 具有较强的通用性和稳定性。算法采用模块化设计, 具备良好的可扩展性, 未来可以通过深度学习融合、多模态数据整合及边缘计算等技术进一步优化。该方法在智能驾驶、视频监控、遥感图像处理、交通监管和低空经济等领域具有广阔的应用前景。不过, 本文所提出的去雾模型未考虑空气中微小颗粒对光的多次散射效应, 并且天空区域的精准分割方面仍存在一定局限。因此, 未来的研究将集中在优化模型的稳定性和精度, 以应对更复杂的环境和应用需求。

作者贡献声明:

卜祥涛: 算法改进, 数据整理和分析, 论文构思和撰写;

宋亚芳: 实验调查, 数据可视化;

王晓宇: 论文审核与编辑, 实验数据分析;

姜珊: 实验数据测量与整理;

李德胜: 论文审核与数据分析;

赵宇: 论文审核与编辑;

李亚红: 算法设计, 论文指导与审核。

参考文献:

- [1] 吕建威, 钱锋, 韩昊男, 等. 结合天空分割和雾气浓度估计的图像去雾[J]. 光学精密工程, 2022, 30(4): 404-477.
LV J W, QIAN F, HAN H N, *et al.* Single image dehazing with sky segmentation and haze density estimation[J]. *Opt. Precision Eng.*, 2022, 30(4): 404-477. (in Chinese)
- [2] 李智渊, 翟爱平, 冀莹泽, 等. 光学偏振成像技术的研究、应用与进展[J]. 红外与激光工程, 2023, 52(9): 298-313.
LI ZH Y, ZHAI A P, JI Y Z, *et al.* Research, application and progress of optical polarization imaging technology [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2023, 52(9): 298-313. (in Chinese)
- [3] 李智翔, 吴泉英, 范君柳, 等. 稀疏孔径光学成像系统的偏振特性研究[J]. 光学学报, 2024, 44(19): 1911004.
LI ZH X, WU Q Y, FAN J L, *et al.* Polarization characteristics of sparse aperture optical imaging systems [J]. *Acta Optica Sinica*, 2024, 44(19): 1911004. (in Chinese)
- [4] 吴笑天, 吕博, 刘博, 等. 组合曝光的计算成像系统及其复原[J]. 光学精密工程, 2021, 29(2): 452-462.
WU X T, LÜ B, LIU B, *et al.* Combined exposure computational imaging system and image restoration method [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2021, 29

- (2): 452-462. (in Chinese)
- [5] 谢辉, 段萌, 武伟, 等. 基于编码压缩的快照式高光谱成像技术综述[J]. 激光杂志, 2024, 45(12): 1-15.
- XIE H, DUAN M, WU W, *et al.* The review of snapshot hyperspectral imaging technology based on coded compression [J]. *Laser Journal*, 2024, 45 (12): 1-15. (in Chinese)
- [6] 贺文靖, 张俊生, 景宁, 等. 基于暗通道先验的多尺度融合去雾算法[J]. 舰船电子工程, 2024, 44 (1): 33-39.
- HE W J, ZHANG J SH, JING N, *et al.* A multi-scale fusion defogging algorithm based on dark channel priors [J]. *Ship Electronic Engineering*, 2024, 44(1): 33-39. (in Chinese)
- [7] 王楚宁, 赵开春. 基于暗通道先验原理的偏振图像去雾[J]. 光学精密工程, 2023, 31(23): 3474-3481.
- WANG CH N, ZHAO K CH. Polarization image defogging based on dark channel prior principle [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2023, 31 (23): 3474-3481. (in Chinese)
- [8] 王宇勃, 甄荣. 基于改进多尺度 Retinex 理论的海上图像去雾算法[J]. 中国航海, 2024, 47(1): 155-161.
- WANG Y B, ZHEN R. Marine image dehazing algorithm based on improved Multi-scale Retinex theory [J]. *Navigation of China*, 2024, 47 (1): 155-161. (in Chinese)
- [9] ZHOU H, CHEN Z K, LI Q, *et al.* Dehaze-UNet: a lightweight network based on UNet for single-image dehazing [J]. *Electronics*, 2024, 13 (11): 2082.
- [10] NING J, YIN J, DENG F, *et al.* MABDT: Multi-scale attention boosted deformable transformer for remote sensing image dehazing [J]. *Signal Processing*, 2025, 229: 109768.
- [11] MCCARTNEY E J, HALL F F Jr. Optics of the atmosphere: scattering by molecules and particles [J]. *Physics Today*, 1977, 30(5): 76-77.
- [12] NARASIMHAN S G, NAYAR S K. Vision and the atmosphere [C]. *ACM SIGGRAPH ASIA 2008 courses on - SIGGRAPH Asia '08. December 10-13, 2008. Singapore*. ACM, 2008: 1-22.
- [13] TAN R T. Visibility in bad weather from a single image [C]. 2008 *IEEE Conference on Computer Vision and Pattern Recognition*. June 23-28, 2008. Anchorage, AK, USA. IEEE, 2008: 1-8.
- [14] HE K M, SUN J, TANG X O. Single image haze removal using dark channel prior [J]. *IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence*, 2011, 33(12): 2341-2353.
- [15] 刘楠, 程咏梅, 赵永强. 基于加权暗通道的图像去雾方法[J]. 光子学报, 2012, 41(3): 320-325.
- LIU N, CHENG Y M, ZHAO Y Q. An image dehazing method based on weighted dark channel prior [J]. *Acta Photonica Sinica*, 2012, 41 (3): 320-325. (in Chinese)
- [16] 肖进胜, 高威, 邹白昱, 等. 基于天空约束暗通道先验的图像去雾[J]. 电子学报, 2017, 45(2): 346-352.
- XIAO J SH, GAO W, ZOU B Y, *et al.* Image dehazing based on sky-constrained dark channel prior [J]. *Acta Electronica Sinica*, 2017, 45 (2): 346-352. (in Chinese)
- [17] KIM S E, PARK T H, EOM I K. Fast single image dehazing using saturation based transmission map estimation [J]. *IEEE Transactions on Image Processing*, 2020, 29: 1985-1998.
- [18] 杨翔, 张相芬, 姜臻, 等. 结合区域生长与容差机制的暗通道去雾算法[J]. 光电子·激光, 2024, 35 (3): 293-302.
- YANG SH, ZHANG X F, JIANG ZH, *et al.* Dark channel dehazing algorithm combining region growing and tolerance mechanism [J]. *Journal of Optoelectronics·Laser*, 2024, 35 (3): 293-302. (in Chinese)
- [19] 游江, 刘鹏祖, 容晓龙, 等. 基于暗通道先验原理的偏振图像去雾增强算法研究[J]. 激光与红外, 2020, 50(4): 493-500.
- YOU J, LIU P Z, RONG X L, *et al.* Dehazing and enhancement research of polarized image based on dark channel priori principle [J]. *Laser & Infrared*, 2020, 50(4): 493-500. (in Chinese)
- [20] 朱思睿, 王霞, 焦岗成, 等. 偏振暗通道融合去雾方法[J]. 红外与激光工程, 2024, 53(12): 186-194.
- ZHU S R, WANG X, JIAO G CH, *et al.* Polarization dark channel-based fusion dehazing method [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2024, 53 (12): 186-194. (in Chinese)
- [21] 徐万春, 张焱, 张景华, 等. 基于梯度引导偏振度估算的图像去雾[J]. 电子学报, 2024, 52(6):

- 2011-2024.
- XU W CH, ZHANG Y, ZHANG J H, *et al.* Image dehazing based on gradient guided polarization degree estimation [J]. *Acta Electronica Sinica*, 2024, 52(6): 2011-2024. (in Chinese)
- [22] 杨燕, 张浩文, 张金龙. 结合天空分割和透射率映射的图像去雾[J]. *光学精密工程*, 2021, 29(2): 400-410.
- YANG Y, ZHANG H W, ZHANG J L. Single image dehazing combining sky segmentation and transmission mapping[J]. *Optics and Precision Engineering*, 2021, 29(2): 400-410. (in Chinese)
- [23] 黄鹤, 吴琨, 宋京, 等. 融合全局与区域大气光值图的暗通道图像去雾方法[J]. *南京大学学报(自然科学)*, 2021, 57(4): 551-565.
- HUANG H, WU K, SONG J, *et al.* A dark channel image dehazing algorithm based on the fusion of global and regional airlight map [J]. *Journal of Nanjing University (Natural Science)*, 2021, 57(4): 551-565. (in Chinese)
- [24] 庄秀玲, 谭福奎, 李震, 等. 基于暗通道先验和优化自动色阶的图像去雾算法[J]. *计算机应用与软件*, 2021, 38(7): 190-195.
- ZHUANG X L, TAN F K, LI ZH, *et al.* Image defogging algorithm based on dark channel prior and optimized auto-color [J]. *Computer Applications and Software*, 2021, 38(7): 190-195. (in Chinese)
- [25] GOLDSTEIN D. *Polarized Light* [M]. Second Edition. New York: Marcel Dekker, Inc, 2003.
- [26] RAHMAN Z U, JOBSON D J, WOODDELL G A. Retinex processing for automatic image enhancement [J]. *Journal of Electronic Imaging*, 2004, 13: 100-110.

作者简介:



卜祥涛(2000—),男,黑龙江佳木斯人,硕士研究生,主要从事基于偏振成像的图像增强技术的研究。E-mail: 13845472759@163.com

通讯作者:



李亚红(1990—),女,甘肃天水人,博士,副教授,硕士生导师,主要从事偏振光谱成像、工业在线视觉AI检测、目标识别与跟踪以及面向恶劣天气的光学成像增强技术等研究。E-mail: liyahong@dlpu.edu.cn