

文章编号 1004-924X(2025)11-1722-17

基于透射率限制修正的水下偏振图像恢复

段 锦*, 董克晗, 王佳林, 倪新宇, 方瑞森, 赵海丽
(长春理工大学 电信学院, 吉林 长春 130022)

摘要:为了在主动照明条件下进行有效的水下偏振图像恢复,需要获取后向散射偏振度及无穷远的光强值参量。如果对上述两种参量进行粗略估计,会导致透射率估计错误,使恢复后的图像出现大量噪声以及造成部分像元饱和等问题。针对透射率估计错误的问题,提出了一种基于透射率限制修正的水下偏振图像恢复方法,该方法从抑制噪声的角度出发,对透射率参数进行了粗修正,从而减少噪声干扰目标成像的问题,并从提高对比度的角度对透射率参数进行精修正,用以正确地估计透射率,再将透射率代入水下传输模型中获得输出图像。自主搭建了水下主动照明成像实验装置,分别对不同的目标在不同浓度的浑浊水体中进行了图像恢复实验。实验结果表明,提出的方法所恢复后的图像相对于原图像在信息熵和对比度指标上分别平均提升了 33.89% 和 69.01%,并在平均梯度、信噪比、信息熵等指标中普遍高于对比算法,在不同浓度的浑浊水体中目标细节特征得到了明显的恢复。

关键词:偏振成像;主动照明;水下目标图像恢复;透射率估计

中图分类号:O436.3 **文献标识码:**A

doi:10.37188/OPE.20253311.1722

CSTR:32169.14.OPE.20253311.1722

Underwater polarization image restoration based on transmittance-limiting correction

DUAN Jin*, DONG Kehan, WANG Jialin, NI Xinyu, FANG Ruisen, ZHAO Haili

(School of Telecommunications, Changchun University of Science and Technology,
Changchun 130022, China)

* Corresponding author, E-mail: duanjin@vip.sina.com

Abstract: To address errors in transmittance estimation, an underwater polarization image restoration method based on transmittance-limiting correction is proposed. Initially, a coarse correction of the transmittance parameters is applied to suppress noise, thereby reducing interference in target imaging. Subsequently, a fine adjustment of the transmittance parameters is performed to enhance contrast and improve estimation accuracy. The corrected transmittance is then integrated into the underwater transmission model to produce the restored image. An independently developed underwater active illumination imaging experimental device was employed to conduct restoration experiments on various targets in waters of differing turbidity levels. Experimental results demonstrate that the proposed method improves information entropy and contrast indices by averages of 33.89% and 69.01%, respectively, compared to the original images. Additionally, it outperforms other algorithms with respect to average gradient, signal-to-noise ratio,

收稿日期:2025-02-27;修订日期:2025-03-27.

基金项目:国家自然科学基金重大仪器专项(No. 62127813)

and information entropy. Target details were significantly recovered in turbid waters of varying concentrations. Under active illumination conditions, effective restoration of underwater polarization images necessitates accurate acquisition of the backscattered degree of polarization and the light intensity at infinity. Rough estimations of these parameters may lead to transmittance errors, resulting in considerable noise and pixel saturation in the restored images.

Key words: polarization imaging; active illumination; underwater target image restoration; transmittance estimation

1 引 言

水下主动成像技术被广泛地应用于水下搜救、海洋军事目标监测、海洋资源探测等领域^[1-2]。然而,由于水中悬浮粒子对水下传输光的吸收和散射以及水体对波长的选择性吸收,光学探测器获取到的光强图像往往存在着图像细节丢失、模糊、噪声增多等问题。光在水下传输时,水中微粒的后向散射是影响水下成像质量的主要因素,而后向散射具有明显的偏振特性,因此研究人员会结合偏振成像技术来提高水下图像的质量^[3-5]。

在水下成像时通常需要主动照明的辅助,照明光源按照维度大体可分为偏振照明及非偏振照明^[6]。其中,偏振照明可以放大目标与背景之间的偏振信息差异,因此基于主动偏振照明的水下成像技术成为研究热点。Treibitz等^[7]采用主动偏振照明,利用目标在该照明条件下起偏的特点对目标偏振度及后向散射偏振度进行估计以恢复图像。封斐等^[8]考虑到后向散射偏振度是空间变化量,对后向散射偏振度进行全局估计,并针对水下高偏振度目标和低偏振度目标进行恢复。Zhao等^[9]提出了一种无需先验知识的水下成像方法,对目标和后向散射偏振度添加约束条件,解决了无背景的水下目标图像恢复问题。然而,上述方法要求目标反射光整体上呈部分偏振或非偏振特性,若目标表面不同区域的反射光偏振态不一致,则可能导致最终恢复图像质量的下降。在利用非偏振照明光源时,需要对无穷远处后向散射的光强及后向散射偏振度进行估计,从而计算透射率。Schechner等^[10]基于 Jaffe-McGlamery 水下退化物理模型,利用非偏振主动照明条件下后向散射光与目标传输光之间偏振特性差异来恢复图

像。由于该方法对透射率进行了粗略估计,图像恢复后有时并不符合主观感受,在图像中引入了大量噪声,导致图像部分像素过饱和,出现了失真的情况。Yang等^[11]利用偏振角来估算后向散射光的光强对图像进行恢复,但该方法依赖于对偏振角等参数的计算,且对无穷远处后向散射偏振度的估计精度不足,恢复后的图像亮度提升并不明显,且图像易产生噪声。Hu等^[12]利用多项式拟合法对无穷远处散射光强进行全局估计,以改进对无穷远处散射光强的估计精度,但该方法会放大噪声且拟合效果难以得到保证。

针对非偏振主动照明条件下水下图像因粗略估计透射率导致的图像失真及噪声放大等问题,本文提出了一种基于透射率限制修正的水下偏振成像方法。自主搭建了非偏振主动照明水下偏振成像装置,引入修正变量来修正透射率并进行物理意义的约束,通过粗修正和精修正来选取最优的修正变量。在粗修正阶段选用峰值信噪比优化修正变量,以减小恢复后图像噪声的产生;在精修正阶段选用对比度函数,以优化修正变量对图像对比度的影响。最终,通过最优化处理得到透射率的最佳修正变量。本文所提方法对于水下的不同材质的目标均有一定的效果,并且通过对透射率的限制修正能有效抑制后向散射对图像质量的不利影响,有效减少噪声对目标图像的干扰,增强图像的主观视觉,显著提高恢复图像的质量。

2 基本原理

2.1 水下偏振成像模型

探测器接收到的光由前向散射光、后向散射光和直接辐射光组成^[13]。目标反射光传输时因

粒子散射而导致传播方向偏移,形成前向散射光,从而造成图像模糊,如图 1 所示。在水下光传输模型中,前向散射光不是造成图像质量下降的主要因素,可以忽略该分量的影响^[14]。 $I_b(x, y)$ 为后向散射光强,代表光源在未到达目标前由粒子散射传输给探测器的光强,是造成图像质量下降的主要因素。 $I_d(x, y)$ 为直接辐射光强,是光源照射在目标物体表面经过反射到达探测器的光强。综上所述,探测器接收到的总光强可以简化为:

$$I_{\text{total}}(x, y) = I_d(x, y) + I_b(x, y), \quad (1)$$

其中 (x, y) 代表像素坐标。由于水下偏振成像需获取两个正交方向的偏振图像,故本文采用斯托克斯矢量来描述光的偏振态。斯托克斯矢量可以表示为:

$$S = \begin{pmatrix} I \\ Q \\ U \\ V \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} I(0) + I(90) \\ I(0) - I(90) \\ I(45) - I(135) \\ I(R) - I(L) \end{pmatrix}, \quad (2)$$

其中: I 代表总光强; Q 是 0° 和 90° 线偏振分量的光强之差; U 是 45° 和 135° 线偏振分量的光强之差; V 是右旋圆偏振分量与左旋圆偏振分量光强之差。由于自然光和非偏振主动照明光都属于非偏振光,非偏振光经过水体介质的散射会产生线偏振光,但不易产生圆偏振光,因此,本文忽略了圆偏振分量 V ^[15]。线偏振度的公式为:

$$DoLP = \frac{\sqrt{Q^2 + U^2}}{I}, 0 \leq DoLP \leq 1. \quad (3)$$

$I_b(x, y)$ 与无穷远处后向散射的光强 A_∞ 和介质透射率 $t(x, y)$ 直接相关。 $I_d(x, y)$ 为未经衰减的目标反射光光强 $L(x, y)$ 与介质透射率 $t(x, y)$ 的乘积,分别表示为:

$$I_b(x, y) = A_\infty [1 - t(x, y)], \quad (4)$$

$$I_d(x, y) = L(x, y)t(x, y). \quad (5)$$

当 $t(x, y) = 0$ 时,目标反射光全部被水中的介质微粒吸收或散射,全部衰减, $I_d(x, y) = 0$; 当 $t(x, y) = 1$ 时,目标反射光几乎没有被水中的介质微粒吸收或散射,全部透过水体被探测器所接收, $I_d(x, y) = L(x, y)$ 。 $t(x, y)$ 的定义如下:

$$t(x, y) = e^{-\beta(x, y)z(x, y)}, \quad (6)$$

其中: $\beta(x, y)$ 代表消光系数; $z(x, y)$ 代表目标到探测器的距离。联立式(4)和式(5)可以得出:

$$L(x, y) = \frac{I_{\text{total}}(x, y) - A_\infty [1 - t(x, y)]}{t(x, y)}. \quad (7)$$

本文采用非偏振主动照明,在水体相对浑浊的情况下,目标反射光经过水体悬浮粒子的吸收和散射出现明显的退偏,在模型计算中忽略目标反射光偏振度对恢复后图像的影响^[16]。后向散射光呈现部分退偏的状态,因此,通过偏振相机可获取两个正交方向偏振图像 $I''(x, y)$ 和 $I^\perp(x, y)$, 分别为:

$$I''(x, y) = \frac{I_d(x, y)}{2} + I_b''(x, y), \quad (8)$$

$$I^\perp(x, y) = \frac{I_d(x, y)}{2} + I_b^\perp(x, y), \quad (9)$$

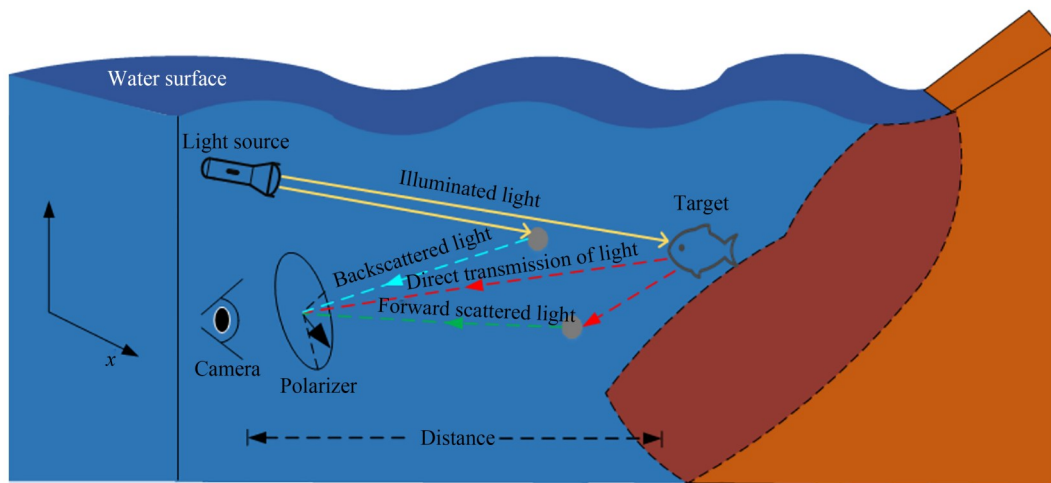


图 1 水下信号传输模型

Fig. 1 Underwater signal transmission model

其中: $I_b^{\parallel}(x, y)$ 和 $I_b^{\perp}(x, y)$ 代表后向散射光两个方向彼此正交的偏振图像。则两个正交方向的总光强图像之差为:

$$\Delta I = I^{\parallel}(x, y) - I^{\perp}(x, y) = I_b^{\parallel}(x, y) - I_b^{\perp}(x, y). \quad (10)$$

探测器接收到的总光强为:

$$I_{\text{total}} = I^{\parallel}(x, y) + I^{\perp}(x, y) = I_d(x, y) + I_b^{\parallel}(x, y) + I_b^{\perp}(x, y). \quad (11)$$

后向散射偏振度可表示为:

$$P_b = \frac{I_b^{\parallel}(x, y) - I_b^{\perp}(x, y)}{I_b^{\parallel}(x, y) + I_b^{\perp}(x, y)}. \quad (12)$$

总后向散射的光强分量可以表示为:

$$I_b(x, y) = I_b^{\parallel}(x, y) + I_b^{\perp}(x, y). \quad (13)$$

将式(4)、式(10)、式(12)和式(13)联立可以得到:

$$t(x, y) = 1 - \frac{I_b(x, y)}{A_{\infty}} = 1 - \frac{\Delta I(x, y)}{P_b A_{\infty}}, \quad (14)$$

其中 ΔI 为已知量, 求解 $t(x, y)$ 需要对未知量 P_b 和 A_{∞} 进行估计。由式(5)和式(6)可知, 当 $z \rightarrow \infty$ 时, $I_b(x, y) = A_{\infty}$ 。本文选取的 A_{∞} 为图像无目标背景处的最大灰度值, 将其所对应的坐标点记为 (x_0, y_0) , 则 P_b 为:

$$P_b = \frac{A_{\infty}(x_0, y_0)^{\parallel} - A_{\infty}(x_0, y_0)^{\perp}}{A_{\infty}(x_0, y_0)^{\parallel} + A_{\infty}(x_0, y_0)^{\perp}} (z \rightarrow \infty). \quad (15)$$

在估计 P_b 和 A_{∞} 后, 由式(7)和(14)可以得出恢复后的目标反射信号 $L(x, y)$ 。

2.2 基于透射率限制修正的水下偏振图像恢复

在传统的水下偏振成像算法中, 通过对 P_b 和 A_{∞} 的估计可以解出透射率, 通常假定距离与消光系数不成函数关系^[17]。然而, 现实条件下水中的粒子分布是不均匀的, 距离与消光系数相互影响, 导致透射率 $t(x, y)$ 在估计上的偏差, 直接影响后续图像恢复的质量, 并且对于 P_b 和 A_{∞} 两个参数的粗略估计也会影响透射率的估计精度^[18]。此时, 恢复后的目标图像存在部分细节丢失或噪声放大等现象, 不符合人的主观视觉。因此, 本文引入透射率修正变量, 修正后的透射率表达式如下:

$$t_{\eta}(x, y) = t(x, y) + \eta, \quad (16)$$

其中: $t_{\eta}(x, y)$ 表示修正后的透射率; η 表示修正变量。当修正变量取值偏低时, 图像对比度虽然有所提高, 但图片存在大量的噪声, 且易造成目

标处像元大面积饱和等问题, 图像的整体恢复效果并不理想。当修正变量取值偏高时, 图像会牺牲一部分对比度, 但图像相对平滑, 整体的视觉效果较好。部分研究人员在定义修正变量时往往没有添加约束条件, 仅追求某一图像指标的提高, 图像会产生大量噪声并且出现过曝光的情况, 使目标的细节信息被饱和像素淹没。为了解决上述问题, 本文给出了修正变量的约束条件, 如下:

$$\frac{\Delta I_{\min}(x, y) - P_b A_{\infty}}{P_b A_{\infty}} < \eta < \frac{\Delta I_{\max}(x, y)}{P_b A_{\infty}}, \quad (17)$$

其中: $\Delta I_{\min}(x, y)$ 表示 $\Delta I(x, y)$ 中的最小灰度; $\Delta I_{\max}(x, y)$ 表示 $\Delta I(x, y)$ 中的最大灰度。进一步结合式(17)、式(16)和式(14), 可以将透射率的取值约束在 0 到 1 之间。为了解决因追求高对比度造成的图像过曝或噪声放大的问题, 粗修正图像评价指标函数为峰值信噪比 (Peak Signal to Noise Ratio, PSNR)^[19], PSNR 数值越大, 代表图像信号的质量更高, 且噪声对目标图像的影响更小。其公式如下:

$$PSNR = 10 \times \log_{10} \left(\frac{(2^b - 1)^2}{E_{\text{MS}}} \right), \quad (18)$$

其中: b 代表图像深度; E_{MS} 表示均方误差, 是衡量恢复图像与原始图像之间差异的评价指标, 定义为两幅图像每个对应像素点差异的平方均值。MSE 的公式如下:

$$E_{\text{MS}} = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (I(i) - I_{\text{noisy}}(i))^2, \quad (19)$$

其中: N 为图像中的总像素数; $I(i)$ 代表原始图像的第 i 个像素值; $I_{\text{noisy}}(i)$ 代表处理后图像的第 i 个像素值。通过比较图像之间的 PSNR, 在 η 的约束条件内以步长为 0.1 的方法进行最优化选择, 最终选取一个最优区间作为粗修正的最优图像集合。然后, 以 0.01 的步长选取最优集中的十幅图像放入精修正图像评价指标中比较, 得出全局对比度效果最佳的图像。精修正图像的评价指标为对比度函数^[20], 其定义为:

$$C = \frac{\sqrt{\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N [I(x, y) - \text{mean}(I)]^2}}{\text{mean}(I)}, \quad (20)$$

其中 $\text{mean}(I)$ 代表图像的平均灰度值。通过精修正图像指标得出 η 最优解, 最终采取最优解修

正透射率后,再根据式(7)得到最终的输出图像。

在选择优化指标时,通过单一指标来优化透射率,恢复后的图像存在失真、噪声放大、过曝光等现象。本文采用 PSNR 与对比度函数的联合优化机制,并对修正变量施加约束条件,在优化过程中先避免图像噪声放大及失真等问题,并在此基础上用对比度函数进行透射率修正,增强图像的对比度,以提升恢复后图像的整体质量。对于步长的选择,可以根据研究者的需求自由调整步长,本文以粗修正图像指标为 0.1、精修正图像指标为 0.01 的步长修正透射率。需要特别说明的是,本文步长的选择不具备特殊性,不会对图

像结果产生直接影响。

2.3 算法概述

本文所提算法的总体流程如图 2 所示,其核心处理流程包含 4 个步骤。首先,通过偏振探测器采集 4 个不同偏振方向的偏振图像,并计算得到强度图像及偏振度图像;其次,通过水下传输模型估计 P_b 和 A_∞ 参数,以得到初步估计的透射率图像;然后构建双层优化框架,提出约束条件对透射率进行粗修正,获取一个最优透射率修正集合,在最优透射率修正集合中再次进行精修正,得到最终优化后的透射率;最后,基于优化后的透射率参数,再由式(7)得出最终恢复后的图像。

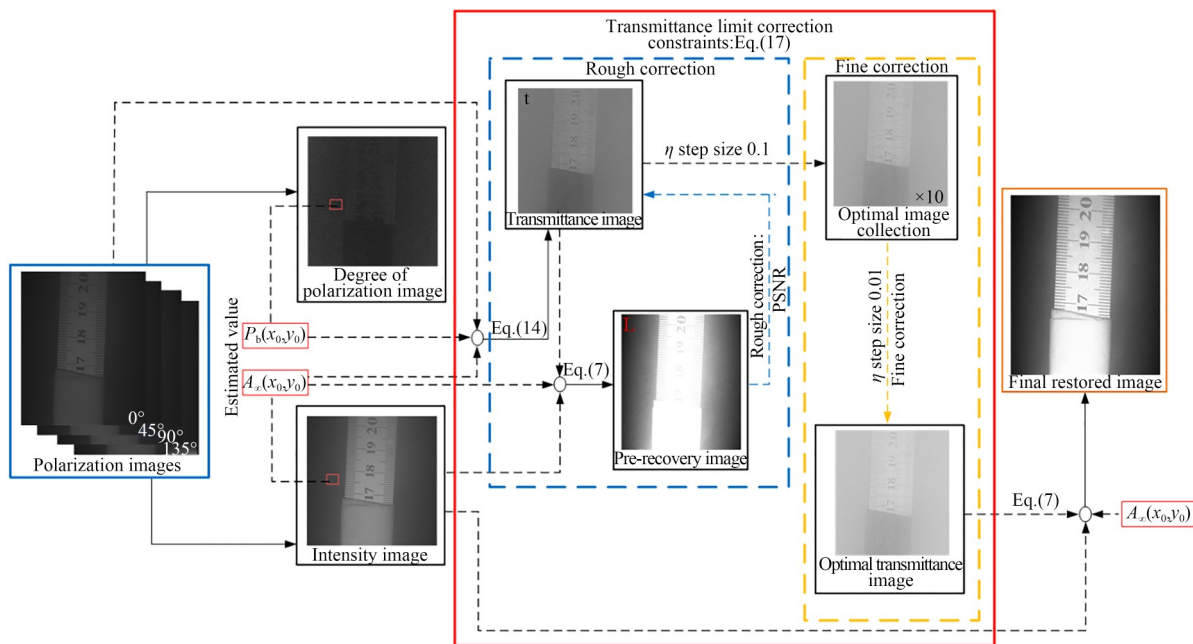


图 2 水下偏振图像恢复算法的总体流程

Fig. 2 Overall flow chart of under-water polarization image restoration algorithm

3 实验与分析

3.1 实验环境搭建

为了避免室内环境中自然光对实验的影响,本文利用遮光布来减少杂光的干扰。实验采用非偏振光主动照明,光源型号为 Super fire 神火 F1-T,额定功率为 5 W,其波长为 380~800 nm,有效照明距离为 200 m。在水下照明时,光在清

水中穿透深度大约为 15 m,可满足水下成像的实验需求。

实验中,将光源与探测器置于同侧,探测器采用大恒光电公司生产的水星系列 MER2-502-79U3M POL 分焦平面偏振相机 (Division of Focal-plane Polarimeter camera, DoFP),该相机采用 Sony IMX250 CMOS 感光芯片,相机可采集的波长为 400~1 000 nm,分辨率为 $2\,448 \times$

2 048,可同时捕获 0° 、 45° 、 90° 和 135° 4个不同偏振方向的图像^[21-22]。所用的高透过率玻璃水箱尺寸为 $100\text{ cm}\times 40\text{ cm}\times 45\text{ cm}$ 。向水箱中添加清水,并混入不同份量的全脂牛奶形成牛奶混合溶液^[23-24],牛奶混合溶液的浓度为 0.41 g/L 和 0.82 g/L ,分别模拟低和高两种不同浑浊度的水体环境。实验对象选用硬币、钢尺和带有图案的水瓶。水下主动照明成像实验装置示意图如图3所示。此外,为了模拟更真实的水下环境并验证本文算法针对不同距离水下目标图像的有效性,还向水箱中添加了取自吉林省长春市南湖公园的湖水,并注入 500 g 的沙子和石块以增大水体的浑浊度。实验对象选用鹅卵石和易拉罐。实验装置实物图如图4所示。

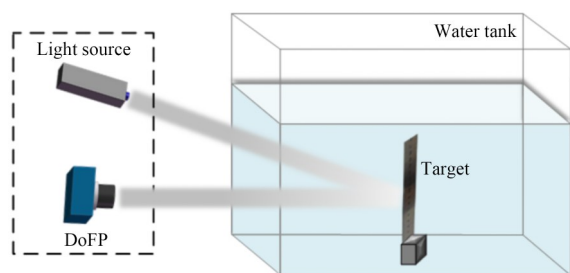


图3 室内水下主动照明成像装置示意图

Fig. 3 Schematic diagram of underwater active illumination imaging devices

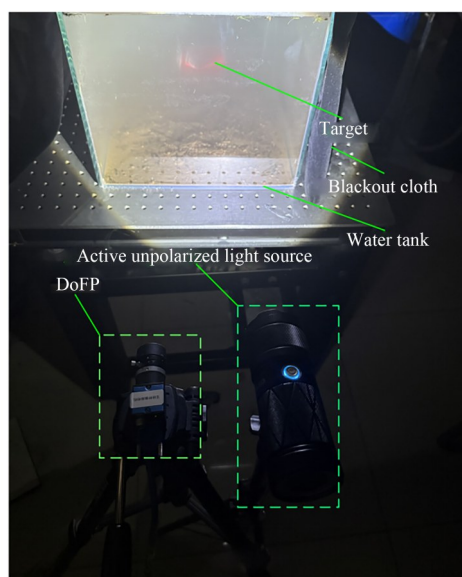


图4 室内水下主动照明成像装置

Fig. 4 Photo of underwater active illumination imaging devices

3.2 实验结果分析

为了验证在非偏振主动照明条件下低退偏特性目标在浑浊水体中反射光呈现低偏振度的特点,实验将硬币作为目标置于牛奶混合溶液浓度为 0.41 g/L 的浑浊水中,在采集完主动非偏振光源条件下的偏振图像后将偏振片置于光源前,再采集偏振光源条件下的偏振图像作为对照实验。图5展示了两种不同光源条件下偏振度的伪彩色图像。

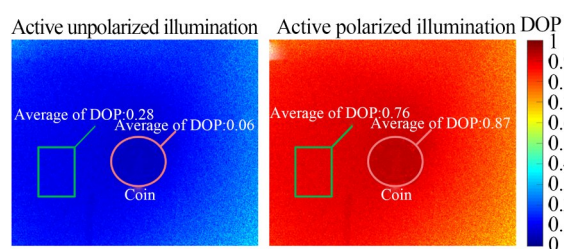


图5 非偏振主动照明和偏振主动照明条件下的DOP图像效果对比

Fig. 5 Comparison of DOP image effects under unpolarized active illumination and polarized active illumination conditions

在非偏振光源照明条件下,水体背景的平均偏振度为 0.28 ,硬币的平均偏振度趋近于 0 。此时,硬币目标反射光的DOP低于水体背景光的DOP,目标反射光的DOP可忽略不计,可以视为非偏振光。在偏振光源照明条件下,目标反射光明显高于水体背景,此时目标反射光和水体背景光均为部分偏振光,目标反射光不可被忽略。综上所述,在非偏振主动照明条件下,即使目标为低退偏目标,但目标反射光的偏振度偏低,仍可忽略不计。

本文针对低浓度浑浊水体环境下的不同目标进行分组实验,图6是目标原始图像、Yang方法^[11]、Schechner方法^[10]、Wang方法^[25]、暗通道先验算法(Dark Channel Prior, DCP)^[26]及本文方法恢复后的图像对比。

从图6中可以看出,在3种不同的目标上,本文方法恢复后的图像相对于原图像及所对比的几种方法得到的恢复图像,在亮度及图像细节恢复上均有很大的提升,在提高图像的整体亮度的同时提高了目标细节特征的辨识度。对于水瓶、硬币和钢尺3种目标,本文方法在提高目标区域亮

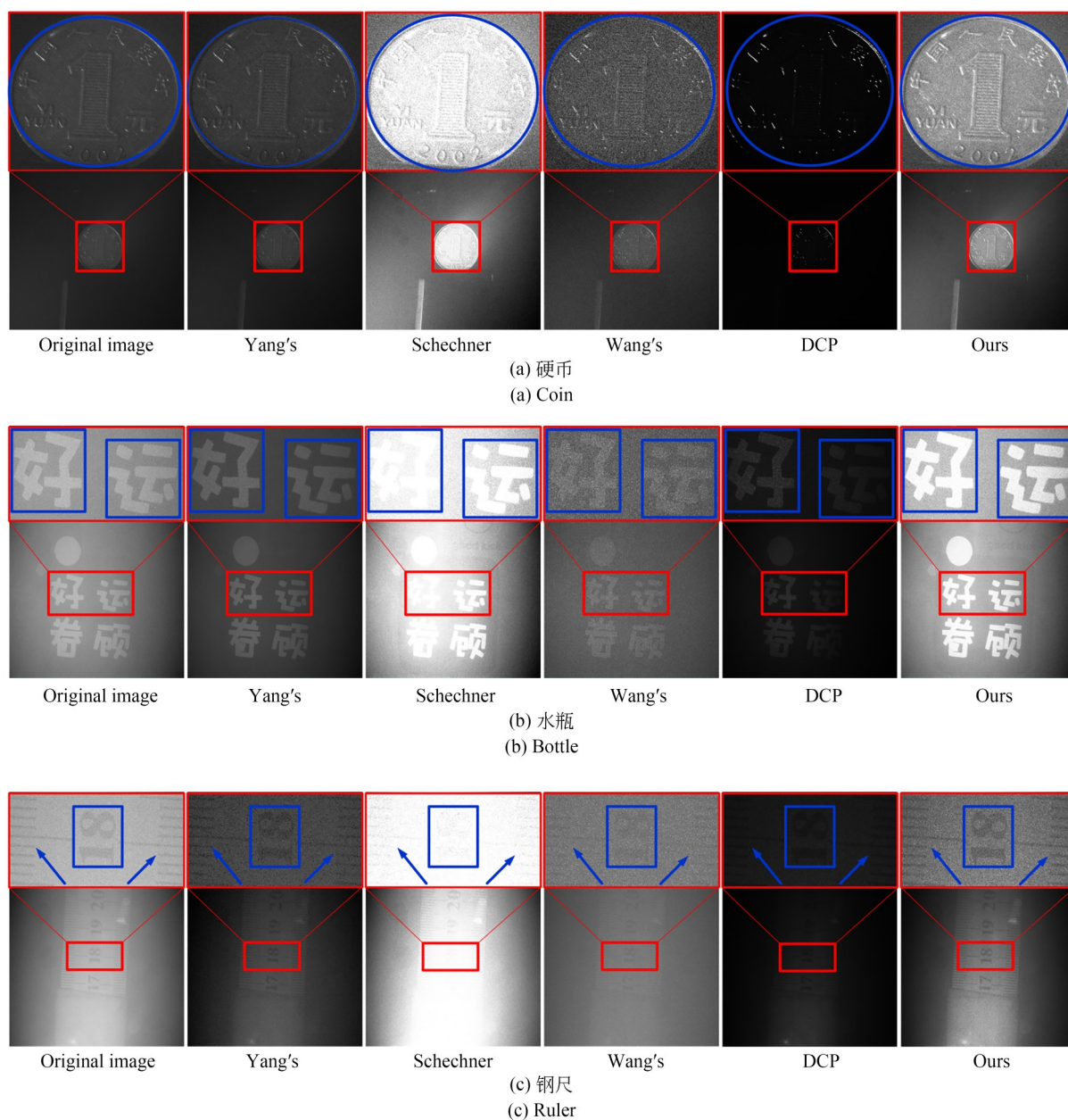


图 6 低浓度浑浊水下不同目标恢复结果对比

Fig. 6 Comparison of recovery results of different targets in low-concentration turbid water

度的同时,使得目标细节信息更加清晰可见。Yang方法在一定程度上恢复了部分的目标细节信息,恢复后的图像虽然提高了目标与背景之间的对比度,但图像整体亮度偏低,部分细节特征的可视性仍然较差。Schechner方法恢复后的图像在整体亮度上明显优于原图像,但在目标区域中部分细节特征被过度饱和的像素所淹没,造成目标细节特征丢失,尤其是在钢尺和硬币这类表面更平滑的目标图像中,过曝现象尤为明显。Wang方法恢复后的图像相对于原图像提升了图像细节

的部分纹理特征,但该方法处理后的图像放大了图像噪声,使得目标图像细节显示受到了影响。DCP方法恢复后的图像虽然没有明显的噪声放大现象,但图像整体偏暗,目标细节难以辨别。

图7展示了原始图像与本文方法恢复后的目标细节图像的灰度值空间分布对比。需要说明的是,由于钢尺数字信息区域相较于水体背景灰度值偏低,对钢尺的目标细节图像进行了灰度值反转,以便于更直观地观察恢复图像相对于原图像的灰度值空间变化。

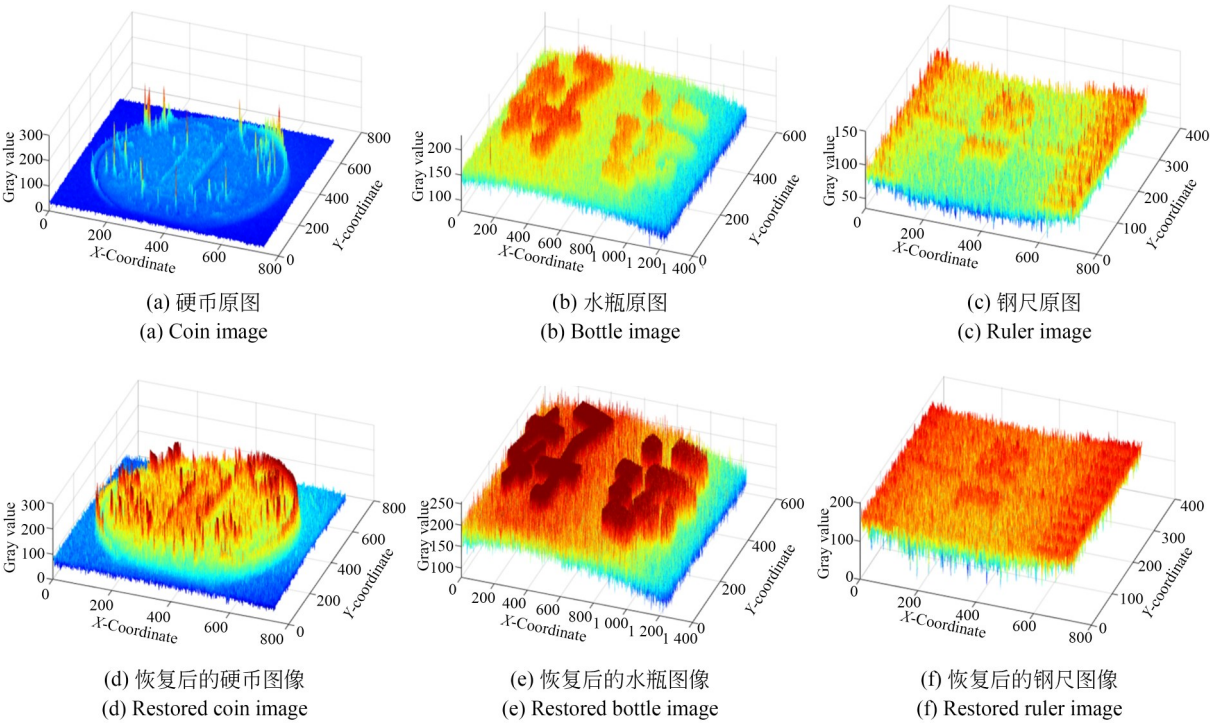


图 7 原图与本文方法目标细节图像灰度值空间分布对比

Fig. 7 Comparison of spatial distribution of grayscale values between original image and target detail image of proposed method

由图 7 可知,相较于原图,本文方法恢复后的目标图像的细节灰度值有了显著的提升,与背景区域的灰度值差异也更加明显。结合图 6 可以观察出,恢复后的目标细节信息相对于原图像有比较明显的增强,且与背景区域差异相对较大,表明本文方法在改善图像细节的对比度方面具有一定的效果。

本文进一步定量分析了不同方法恢复后的图像质量,不同恢复方法及原图 5 种客观图像评价指标如表 1 所示。其中,平均灰度值(Gray-scale Mean, Mean)^[27]代表图像的平均亮度,灰度均值越大,图像的整体亮度越高;平均梯度(Av-

erage Gradient, Gradient)^[28]用来反映了图像中灰度变化的强度,梯度值越大则图像的纹理细节越突出;信息熵(Information Entropy, Entropy)^[29]用来衡量图像细节复杂度的指标,熵值越大意味着图像包含更多的信息量;信噪比(Signal to Noise Ratio, SNR)^[30]用来衡量恢复图像中噪声增量的大小,SNR 越大说明恢复后的图像噪声越小;对比度函数(C)用来反映图像整体的灰度对比度,对比度函数值越大则说明图像中目标与背景之间的差异越明显。需要说明的是,表中加粗的字体为单一指标下的最优值。

表 1 低浓度浑浊水图像的客观评价指标结果

Method	Coin					Bottle					Ruler				
	Mean	Gradient	Entropy	SNR	C	Mean	Gradient	Entropy	SNR	C	Mean	Gradient	Entropy	SNR	C
Original	35.87	3.41	5.26	—	0.32	121.55	9.78	4.27	—	0.25	131.25	8.46	5.41	—	0.26
Yang ^[11]	29.53	4.26	5.65	23.15	0.35	57.04	11.21	4.92	24.41	0.35	47.22	9.92	6.15	18.46	0.41
Schechner ^[10]	97.52	14.57	5.54	22.92	0.37	177.85	15.30	4.35	24.21	0.34	186.94	11.94	5.67	14.02	0.36
Wang ^[25]	49.66	13.74	6.41	20.12	0.25	89.55	6.34	5.24	22.32	0.29	105.77	11.41	6.21	17.24	0.19
DCP ^[26]	2.99	1.63	2.22	5.88	0.22	14.48	4.43	4.43	15.21	0.22	16.39	2.47	4.97	12.58	0.16
Our	63.13	17.89	7.12	28.91	0.41	143.91	19.37	6.24	26.21	0.37	71.87	13.74	6.71	26.43	0.52

由表1可知,在平均灰度指标上,Schechner方法恢复后目标图像的平均灰度值相对较高,在3种不同目标上平均灰度值相对于原图像平均提升了86.87%。虽然Schechner方法提高了图像的整体亮度,但是恢复后的图像出现了局部过曝光的现象,这种现象在目标上尤为明显,并且图像中产生了大量噪声,造成目标部分细节信息丢失。Yang、Wang及DCP方法恢复后的图像平均灰度值相对较低,尤其是在硬币图像中,目标细节图像相对较暗,造成部分目标信息无法辨别。本文方法恢复后图像的平均灰度值虽然低于Schechner方法恢复后图像的平均灰度值,但图像的整体亮度适中,并未出现明显的过曝光现象,恢复后的图像更符合人眼的主观感受,并且相对于原图像亮度提升较为明显。在3种不同目标上平均灰度值相对于原图像平均提升16.39%。

在平均梯度指标上,原图像的平均梯度相对较低,由于浑浊水体的吸收及粒子的散射,目标反射光的有效信息被后向散射光所遮盖,造成原图像清晰度较低。Schechner、Yang及Wang方法恢复后的图像相对于原图像平均梯度有所提高,但是图像的可视性仍然较差,目标细节特征不容易辨识。DCP方法恢复后的图像整体偏暗,虽然一定程度上降低了后向散射的影响,但图像整体表现并不清晰,造成平均梯度偏低。本文方法恢复后的图像的平均梯度明显高于原图像及所对比的几种方法。在3种目标上,相对于原图像平均提升了195.03%;相对于Schechner方法和Wang方法,恢复的图像分别平均提升了21.49%和85.48%。从图6的局部细节图可以看出,本文方法恢复后的图像细节信息更加清晰,目标细节特征更容易辨识。

在信息熵指标上,原图像由于受到后向散射的影响,目标的细节信息大量丢失,信息熵相对较低。DCP方法恢复后的图像信息熵偏低,图像信息显示明显不足。Schechner方法恢复后的图像虽然信息熵相对于原图像有所增加,但图像的部分区域出现过曝光的现象,限制了目标部分细节信息的显示,间接导致该方法恢复后的图像信息熵较低。Yang方法及Wang方法恢复后的图像信息熵相对于原图像和Schechner方法有所提高,但图像信息熵仍然较低,无法从现有图像中

获取目标更多的有效信息。相比之下,本文方法的平均信息熵最高,在3种目标上,相对于原图像平均提升了35.18%。相对于Wang方法和Yang方法恢复的图像分别平均提升了12.74%和20.65%。由此表明,本文方法能够保留更多的图像细节与信息,恢复后的图像不仅亮度适中,而且相对于所对比的两种方法的目标细节保留效果最佳。

在信噪比指标上,Schechner方法恢复后的图像在造成目标像元大面积饱和现象的同时产生了大面积的噪声,导致图像信噪比相对较低,影响了目标图像细节的显示。Yang方法恢复后的图像虽相对于Schechner方法具有更高的信噪比,但仔细观察图像放大细节可以发现,Yang方法恢复后的图像仍然出现部分噪声,影响图像的清晰度。Wang方法的信噪比较低,恢复后的图像产生了较大面积的噪声。DCP方法恢复后的图像由于整体亮度不足,灰度均值偏低,导致图像信噪比偏低。相比之下,本文方法的信噪比相对于Schechner方法和Yang方法在3种不同目标上分别平均提升了47.91%和27.19%,恢复后图像噪声更少,有效增强了目标图像细节,提高了图像的清晰度。

在对比度指标上,原图像中目标与水体背景难以区分,图像对比度普遍偏低。DCP方法恢复后的图像背景与目标灰度值均偏低,目标与背景难以区分,导致对比度偏低。Yang方法及Wang方法在恢复后图像中虽然对比度有所提升,但整体效果仍不够理想。Schechner方法虽然提高了对比度,但其过曝光现象导致部分目标细节丢失,目标图像可视性仍然较差。本文方法恢复的图像相对于原图像提升显著,在3种不同目标上,相对于原图像对比度提升了58.71%,且高于所对比的几种方法所恢复后的图像;相对于Schechner方法和Yang方法所恢复的图像,对比度平均提升了21.36%和16.65%。本文方法在保证亮度适中的同时,大幅提高了目标的对比度,使目标细节特征更加突出,目标与背景之间的差异进一步增大,从而提高了目标细节特征的可辨识性。

综上所述,本文方法在灰度均值、平均梯度、信息熵、信噪比及对比度等各项指标上均表现出

显著优势。

为了进一步验证本文方法在水下强散射环境

中的有效性,在高浓度浑浊水体条件下对钢尺和水瓶目标进行了图像恢复实验,结果如图8所示。

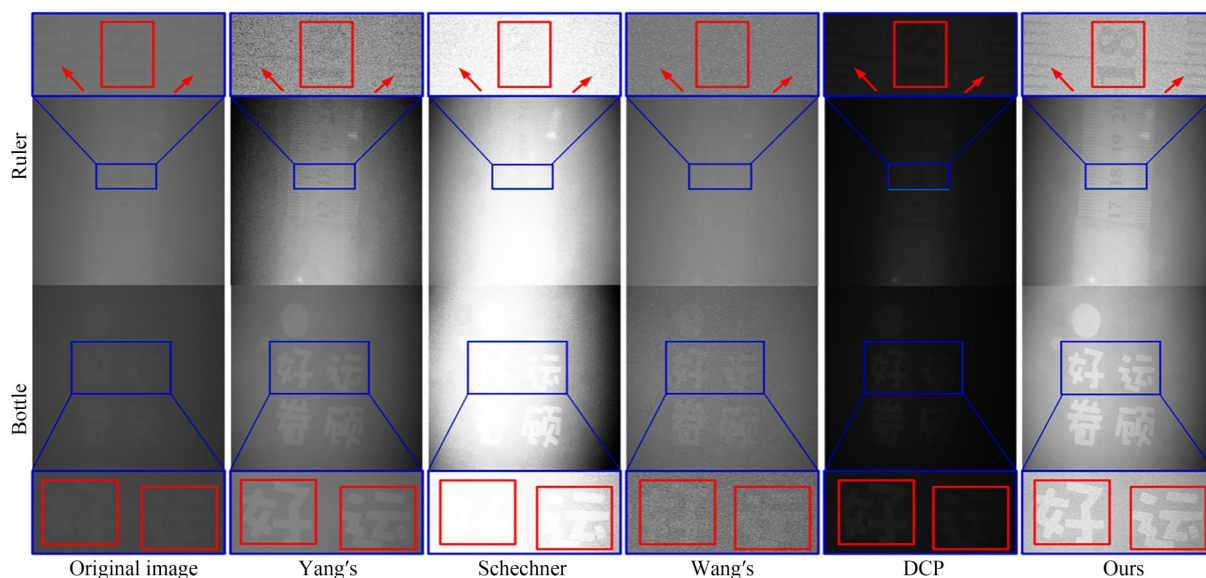


图8 高浓度浑浊水下不同目标恢复结果对比

Fig. 8 Comparison of recovery results of different targets in high-concentration turbid water

从图8可以看出,在高浓度浑浊水体环境下,原图像中钢尺的数字和水瓶上的文字比较模糊,目标细节特征信息不容易被辨认。Yang方法有效恢复了部分细节信息,但该方法恢复后的图像亮度偏低,钢尺目标上的数字较为模糊,且放大了图像的噪声,目标图像的可视性依然较差。Schechner方法恢复后的图像在高浓度浑浊水体环境下恢复后的图像相较于低浓度浑浊水体恢复后的图像的饱和像素数量进一步增加,目标细节特征信息更加不容易被辨识,且噪声明显增多,不符合人的主观感受,进一步验证了该方法在强散射环境下的局限性。Wang方法恢复了目标的部分细节特征,但噪声影响最终的恢复效果,局部放大图中的目标细节信息的表现受噪声影响较大。DCP方法恢复后的图像虽然去除了原图像中后向散射的“朦胧感”,但恢复后的图像整体仍然偏暗,无法完全看清目标细节。本文方法在高浓度的浑浊水体中相对于所对比的两种方法更加有效。在粗修正图像评价指标中避免过度追求对比度的提升,有效避免了过曝现象,并且在一定程度上降低了噪声的产生。本文方法恢复后的图像中钢尺和水瓶目标上的文字信息清晰可见,并且图像亮度显著提升,噪声较少,

证明了该方法在处理高浓度浑浊水中的目标图像恢复时的优势。

图9为高浓度浑浊水下不同算法恢复后的局部灰度空间投影。可以看出,原图的灰度值在空域内浮动较小,背景与目标的灰度值差异不大,导致原图对比度较低,图像可视性较差。Yang方法恢复后的图像灰度范围仍然较为狭窄,对目标细节特征信息的恢复仍有不足。Schechner方法恢复后的图像灰度值大部分集中在220以上,这导致图像大面积像素饱和,造成目标细节信息严重丢失。结合图8可知,尤其是在钢尺目标的数字和水瓶目标的文字部分,过度饱和导致的目标细节丢失明显。Wang方法恢复后的图像在空间上灰度值波动较大,这是由于此方法放大了图像噪声,图像在空域中的噪声分布较为广泛。DCP方法恢复后的图像整体灰度值在空间上较低,目标细节处的灰度值与背景灰度值较为接近,影响了图像的对比度及清晰度。本文方法恢复后的图像灰度值分布更加均匀,且目标与背景之间的强度差异较为明显,图像亮度和对比度得到了有效提升。

本文在高浓度浑浊水环境下通过5种客观图像评价指标对不同恢复方法及原图进行了定量分

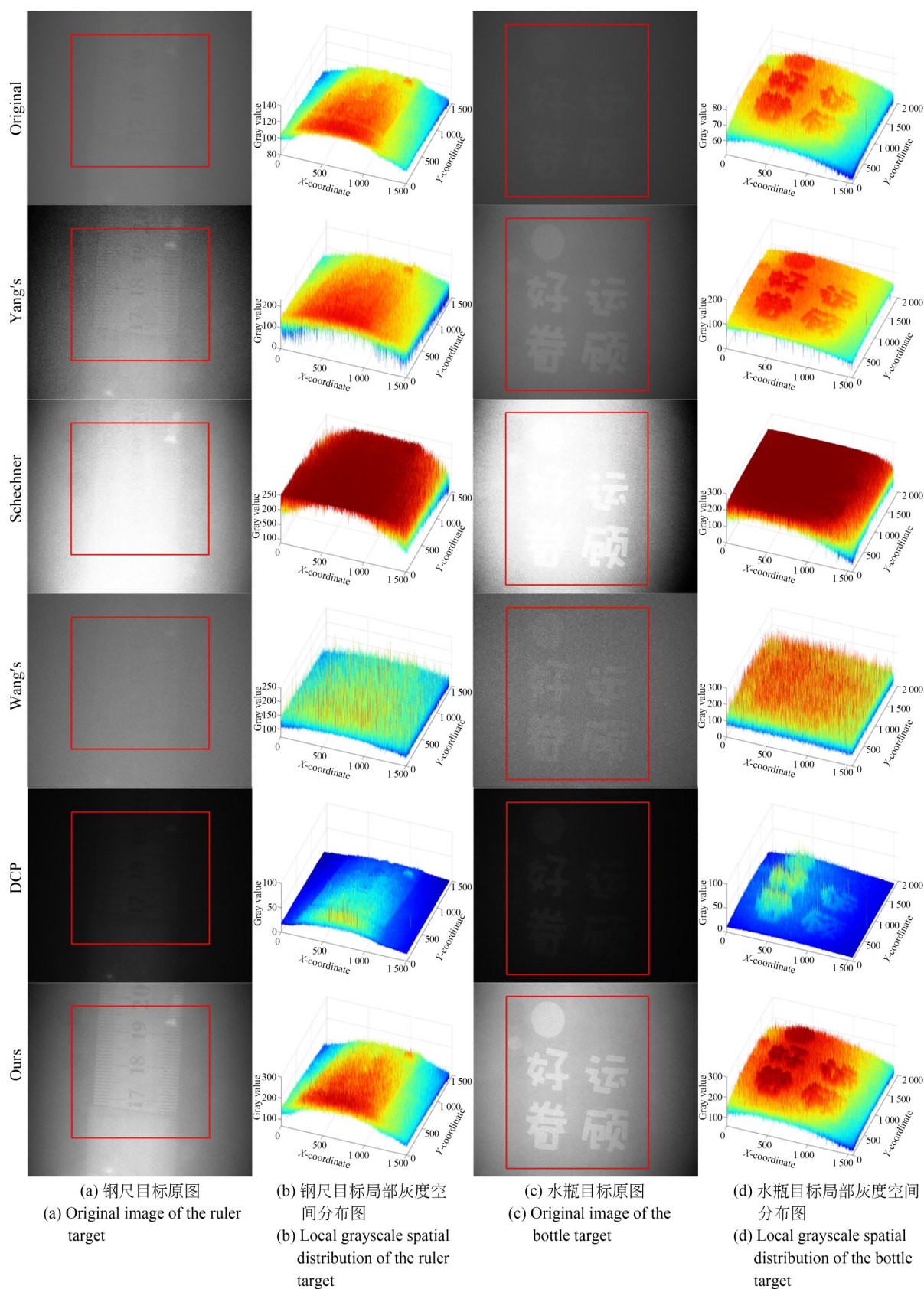


图 9 高浓度浑浊水下恢复结果局部放大图的灰度空间投影对比

Fig. 9 Grayscale spatial projection comparison of local magnified images of restoration results under high-concentration turbid water

析,实验结果如表 2 所示。需要说明的是,表中加粗的字体为单一指标下的最优值。

表 2 高浓度浑浊水图像的客观评价指标结果
Tab. 2 Objective evaluation index results of high concentration turbid water images

Method	Ruler					Bottle				
	Mean	Gradient	Entropy	SNR	C	Mean	Gradient	Entropy	SNR	C
Original	99.26	2.52	5.70	—	0.24	64.01	1.98	4.77	—	0.19
Yang ^[11]	102.74	9.58	6.64	19.72	0.26	93.62	7.01	4.81	19.46	0.21
Schechner ^[10]	187.61	12.62	6.50	25.49	0.33	186.76	14.72	4.70	24.65	0.28
Wang ^[25]	114.54	11.36	6.29	22.85	0.27	105.76	15.89	5.79	21.62	0.20
DCP ^[26]	18.82	1.92	4.80	9.73	0.22	14.21	2.14	4.24	9.83	0.16
Our	131.23	16.74	7.24	29.37	0.43	148.31	18.85	6.53	27.45	0.37

通过表 2 可以观察到,本文方法在平均灰度指标上高于原图像及 Yang 方法、Wang 方法和 DCP 方法恢复后的图像,略低于 Schechner 方法恢复后的图像。本文方法在保持亮度均匀的同时,避免了图像的过曝光。相对于原图像,两种不同目标的灰度均值平均提高了 81.96%。同时,本文方法在平均梯度及信息熵指标上明显高于原图像及所对比的几种方法,恢复后的图像更加清晰,相对于原图像,两种不同目标的平均梯度和信息熵分别平均提高了 703.91% 和 31.69%。特别是在钢尺目标上,通过局部放大图可以明显观察到,目标细节信息的恢复及目标清晰度相比与原图像及对比方法恢复后的图像效果更好。在高浓度的浑浊水体中,本文方法恢复后的图像的信噪比和对比度均最优,进一步结合图 8 可以观察到,本文方法恢复后的图像在两种目标图像的细节部分噪声更少,并且目标与背景之间的差异比较显著,图像可视性有了明显的提高。

综上所述,结合图 8~图 9 及表 2 中的定量数据,本文方法在高浓度浑浊水体环境下,对于目标图像的恢复整体效果最优。

为了验证本文算法在真实水下环境中的恢复效果,向水箱中注入湖水(取自吉林省长春市南湖公园),并向水中混入了 500 g 的沙子和石块,模拟真实的户外水下场景。目标选择鹅卵石和易拉罐,在实验中固定观测点位置,并逐步增加目标与观测点的距离来开展实验,结果如图 10 所示。

从图 10 可以看出,随着目标与观测点的距离

增大,原图像中能显示的目标细节信息逐渐减少,信息熵和对比度指标均有不同程度的下降,目标成像质量受到严重的影响。Yang 和 Wang 方法在一定程度上增强了目标部分细节信息的表现力,但是当目标与观测点的距离增大时,目标的细节特征仍然模糊不清。DCP 方法在目标与观测点相对较短的距离处改善了目标图像的质量,但在更长的距离下目标图像恢复效果相对较差,图像的整体亮度较暗,可视性相对较差。Schechner 方法改善了图像整体的亮度,在目标与观测点距离增大的情况下能保证目标的细节信息较为完整,但该方法放大了图像中的噪声,且在 55~75 cm 距离下产生了图像的“过曝”现象,饱和像素“掩盖”了目标的部分细节信息。本文方法恢复后的图像在不同目标与观测点的距离处均能有效地恢复目标的细节特征,恢复后的图像没有明显的噪声放大现象,更符合人的主观视觉感受。信息熵和对比度指标在两种目标及不同的目标与观测点的距离下,相对于原图平均提升了 20.13% 和 128.73%;相对于 Yang 方法平均提升了 12.89% 和 64.15%;相对于 Schechner 方法平均提升了 18.84% 和 12.89%;相对于 Wang 方法平均提升了 8.85% 和 55.75%;相对于 DCP 方法平均提升了 80.27% 和 153.92%,证明了本文方法在提高目标图像质量上的优越性。

综上所述,本文方法在真实水体环境下依然能有效地恢复图像中的目标细节特征,在不同的目标与观测点的距离处都对目标图像具有一定的恢复效果,提高了水下目标成像的探测距离。

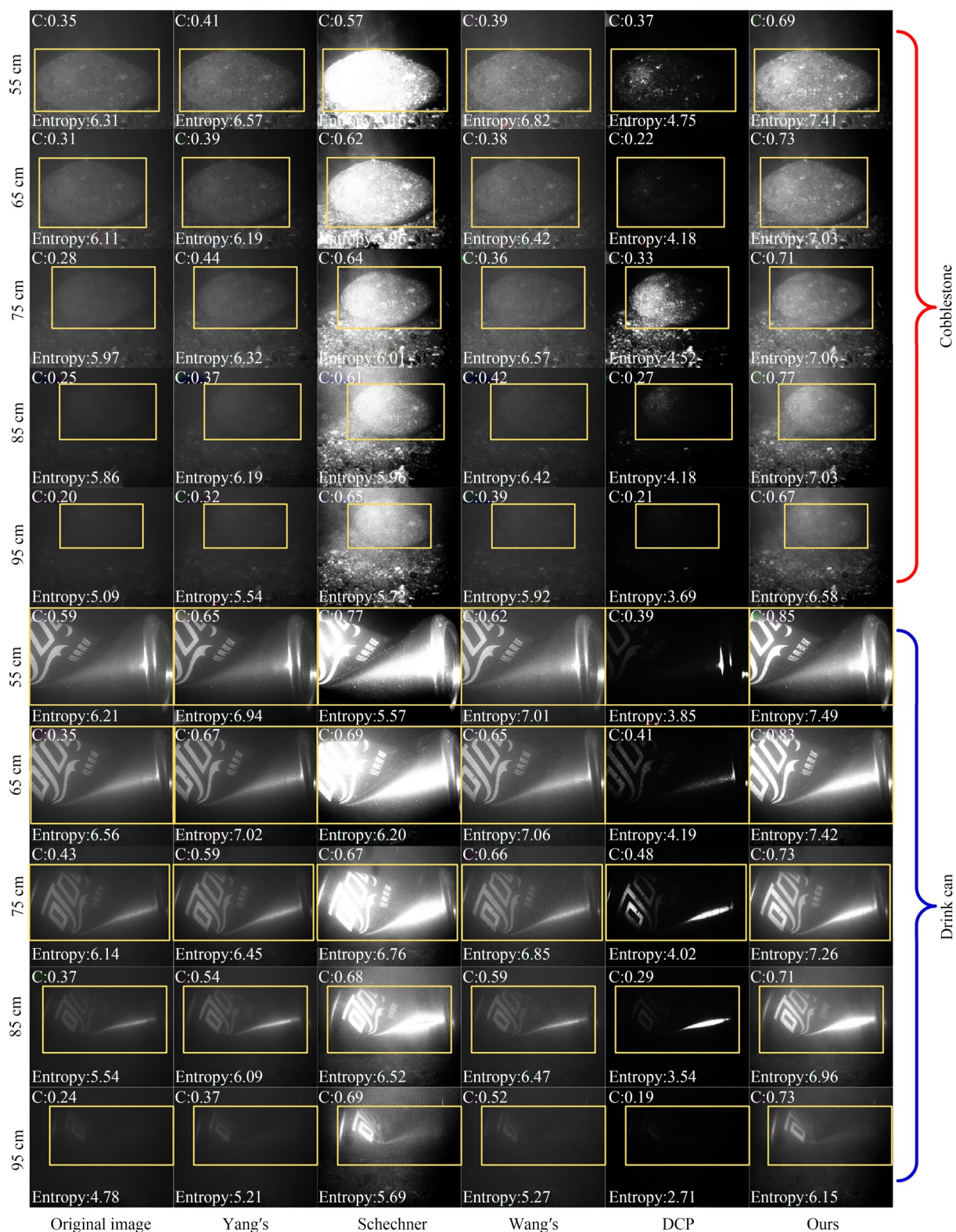


图 10 模拟真实环境水体下不同距离的图像恢复结果对比

Fig. 10 Comparison of image restoration results at different distances in simulated real water environment

3.3 消融实验分析

为了验证通过添加约束条件来修正透射率,可

以有效提高恢复后的图像质量,进行了消融实验的验证。本文将原图像、未修正透射率恢复后的图

像、修正透射率但未添加约束条件恢复后的图像和本文方法恢复后的图像(透射率限制修正恢复后的图像)进行了对比,目标选用钢尺,牛奶混合溶液浓度为 0.82 g/L,实验结果如图 11 所示。

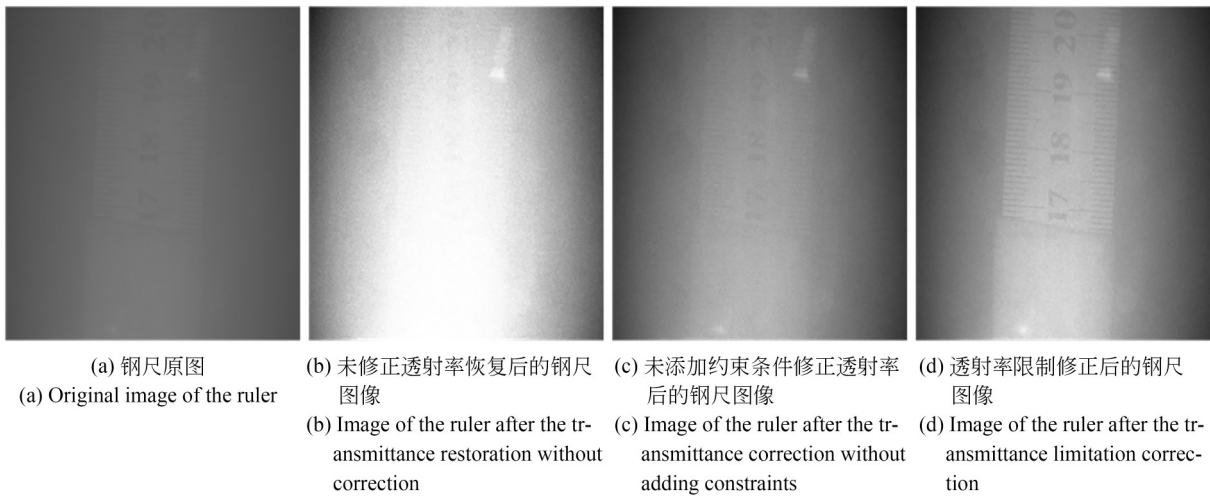


图 11 透射率限制修正的消融实验结果

Fig. 11 Ablation experiment analysis of transmittance limitation correction

从图 11 可以看出,原图像中钢尺的细节信息模糊不清。未经过透射率修正由于错误地估计透射率,目标细节信息被大面积的饱和像素淹没,恢复后的图像中包含了大量的噪声,图像可视性相对较差。未添加约束条件时,由于在粗修正中选用 PSNR 作为修正指标,显著地降低了噪声以及减少了图像部分区域过曝光问题的出现,但由于没有进行约束条件的限制,图像过度地追求降低噪声,导致了目标与水体背景的灰度值差异提升较小,图像对比度相对较低,恢复后目标图像的细节信息仍然不易辨识。本文方法通过限制修正透射率来恢复退化的水下图像,恢复后的图像显著减少了图像噪声,同时也保证了目标图像对比度的提高;相对于原图像,利用本文方法恢复后图像中的目标细节信息更加清晰。

本文在消融实验中通过 5 种不同的图像客观评价指标对 4 幅图像进行定量分析,具体结果如表 3 所示。表中加粗的字体为单一指标下的最优值。在 5 种不同的指标上,经过透射率限制修正后的图像普遍优于原图像、未修正透射率恢复后的图像和未添加约束条件修正透射率恢复后的图像。相对于未修正透射率恢复后的图像,经过透射率限制修正后的图像在平均梯度、信息熵、信噪比和对比度指标上分别提升了

表 3 修正率限制修正的消融实验客观评价指标结果

Tab. 3 Objective evaluation index results of ablation experiment with correction rate limit correction

Figure	Mean	Gradient	Entropy	SNR	C
11(a)	99.26	2.52	5.7	—	0.24
11(b)	187.61	12.62	6.5	25.49	0.33
11(c)	122.37	13.87	6.8	31.28	0.35
11(d)	131.23	16.74	7.24	29.37	0.43

32.65%, 11.38%, 15.22% 和 30.30%。虽然在平均灰度值指标上低于未修正透射率恢复后的图像,但从图 11 中可以看出,未修正透射率恢复后的图像出现了过曝光,目标可视性较差,而经过透射率限制修正后的图像避免了过曝光,目标可视性有了明显的提高;经过透射率限制修正后的图像相对于未添加约束条件修正透射率恢复后的图像在平均灰度值、平均梯度、信息熵和对比度指标上分别提升了 7.24%, 20.69%, 6.47% 和 22.86%。虽然在信噪比指标上,透射率限制修正后的图像要低于未添加约束条件修正透射率恢复后的图像,但由于后者过度地追求降低图像噪声,图像整体清晰度较低,目标部分细节没有得到有效恢复。结合图 11 可知,经

过透射率限制修正后的图像能有效降低噪声产生的同时,还能提高图像的对比度和清晰度,对提升水下图像质量起到了积极的作用。

3.4 计算效率分析

为了验证本文所提算法的实时性,进行了计算效率分析。实验采用的图像处理设备是一台配备 USB3.0 接口的笔记本计算机,图像采集设备通过 USB3.0 接口传输至该计算机中进行数据的处理和分析。图像处理设备配备的中央处理器型号为 Intel(R) Core(TM) i7-13700HX CPU @ 2.10 GHz;图形处理器型号为 NVIDIA GeForce RTX4070;内存的大小为 32 GB。图像处理软件基于 Visual Studio 2022 开发,采用 C++ 编程语言,结合 OpenCV 开源计算机视觉库,并调用 CUDA 技术以加速算法实现。本文所提的算法主要分为 4 个部分:偏振图像解算、透射率初步估计、透射率限制修正和计算最终恢复图像,各部分所需的平均处理时间如表 4 所示。

表 4 所提算法需要的处理时间

Tab. 4 Processing time required by proposed method

Process	Processing time/ms
Polarization image processing	52
Preliminary estimate of transmittance	11
Transmittance limit correction	87
Calculate the output image	13
All processes	163

由表 4 可知,本文算法对一幅图像的处理时间在 163 ms 左右,说明该算法在该实验条件下可以在 1 s 内完成对 6 幅图像的处理,满足实时处理图像的需求。

参考文献:

- [1] 吴厚德, 翟予峥, 王洪昌, 等. 实时输出视频的水下主动偏振成像[J]. 光学精密工程, 2024, 32(10): 1443-1455.
WU H D, ZHAI Y ZH, WANG H CH, *et al.* Real-time video output method for underwater active polarization imaging [J]. *Opt. Precision Eng.*,

4 结 论

针对在非偏振主动照明条件下后向散射偏振度及无穷远光强参量容易被错误估计导致的透射率计算误差的问题,本文提出了修正透射率的方法,采用双指标优化函数两次修正以选择最优解,在粗修正图像指标中选用 PSNR 以最大程度降低噪声对图像的影响,精修正图像指标采用对比度函数来确保恢复后图像中目标与背景之间的强度差异相对较大,并给出了对修正变量的约束方程,对透射率进行了限制修正。同时,自主搭建了水下主动照明成像实验装置,在低、高浓度浑浊水体和在不同距离下真实浑浊水体中进行偏振成像。实验结果表明,本文方法提高了图像的可视性和清晰度,在客观评价指标上总体表现优于所对比的几种方法,恢复后的图像目标细节更突出,噪声更少,图像亮度及对比度都得到了明显的提高。在部分照明和观测几何条件下,若忽略目标反射光的偏振度,可能会导致透射率估计错误,进而会影响最终图像的恢复质量,且透射率修正依赖于人工的步长调整,未来要进行更为深入的研究,对模型进行优化,并将探索透射率修正自适应的优化策略,以获得更高质量的水下目标图像。此外,将采用更大尺寸的水箱,以拓展实验目标与观测点的距离,更好地模拟不同成像距离下的水下目标成像环境。

作者贡献声明:

段锦:提供资源及论文指导;
董克晗:方法提出,论文构思及撰写;
王佳林:实验设计及算法实现;
倪新宇:实验数据测量;
方瑞森:实验数据分析;
赵海丽:实验结果验证。

2024, 32(10): 1443-1455. (in Chinese)

- [2] 巩文哲, 褚金奎, 成昊远, 等. 基于无监督学习和注意力机制的水下偏振图像融合[J]. 光学精密工程, 2023, 31(21): 3212-3220.
GONG W ZH, CHU J K, CHENG H Y, *et al.* Underwater polarization image fusion based on unsupervised learning and attention mechanism[J]. *Opt. Precision Eng.*, 2023, 31(21): 3212-3220. (in

- Chinese)
- [3] GUAN J G, CHENG Y Y, CHANG G L. Time-domain polarization difference imaging of objects in turbid water [J]. *Optics Communications*, 2017, 391: 82-87.
 - [4] WANG J J, WAN M J, CAO X Q, *et al.* Active non-uniform illumination-based underwater polarization imaging method for objects with complex polarization properties [J]. *Optics Express*, 2022, 30 (26): 46926-46943.
 - [5] DENG J X, ZHU J P, LI H X, *et al.* Underwater dynamic polarization imaging without dependence on the background region[J]. *Optics Express*, 2024, 32 (4): 5397-5409.
 - [6] 齐鹏飞. 基于偏振模型的水下图像复原方法研究 [D]. 天津: 天津大学, 2021.
QI P F. *Research on Underwater Image Restoration Method Based on Polarization Model* [D]. Tianjin: Tianjin University, 2021. (in Chinese)
 - [7] LI R H, CAO H T, FAN Y Y, *et al.* Multi-Indicator reconstruction for underwater polarized image de-hazing method [J]. *Optics and Lasers in Engineering*, 2024, 181: 108333.
 - [8] 封斐, 吴国俊, 吴亚凤, 等. 基于全局估计的水下偏振成像算法 [J]. *光学学报*, 2020, 40(21): 75-83.
FENG F, WU G J, WU Y F, *et al.* Algorithm for underwater polarization imaging based on global estimation [J]. *Acta Optica Sinica*, 2020, 40(21): 75-83. (in Chinese)
 - [9] ZHAO Y Z, HE W J, REN H, *et al.* Polarization descattering imaging through turbid water without prior knowledge[J]. *Optics and Lasers in Engineering*, 2022, 148: 106777.
 - [10] TIAN F, XUE J M, SHI Z D, *et al.* Polarimetric image recovery method with domain-adversarial learning for underwater imaging [J]. *Scientific Reports*, 2025, 15(1): 3922.
 - [11] YANG L M, LIANG J, ZHANG W F, *et al.* Underwater polarimetric imaging for visibility enhancement utilizing active unpolarized illumination [J]. *Optics Communications*, 2019, 438: 96-101.
 - [12] HU H F, ZHAO L, LI X B, *et al.* Underwater image recovery under the nonuniform optical field based on polarimetric imaging [J]. *IEEE Photonics Journal*, 2018, 10(1): 1-9.
 - [13] 赵永强, 戴慧敏, 申凌皓, 等. 水下偏振清晰成像方法综述 [J]. *红外与激光工程*, 2020, 49(6): 43-53.
 - ZHAO Y Q, DAI H M, SHEN L H, *et al.* Review of underwater polarization clear imaging methods [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2020, 49(6): 43-53. (in Chinese)
 - [14] SHEN L H, REDA M, ZHANG X, *et al.* Polarization-driven solution for mitigating scattering and uneven illumination in underwater imagery [J]. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 2024, 62: 1-15.
 - [15] WANG J L, DUAN J, XIE G F, *et al.* Sea surface target image enhancement method based on separable reflection and refraction [J]. *Optics & Laser Technology*, 2025, 181: 112012.
 - [16] 杨力铭, 梁健, 张文飞, 等. 基于非偏振光照明的水下偏振成像目标增强技术 [J]. *光学学报*, 2018, 38(6): 162-167.
YANG, L M, LIANG J, ZHANG W F, *et al.* Underwater polarization imaging target enhancement technology based on non-polarized illumination [J]. *Acta Optica Sinica*, 2018, 38(6): 162-167. (in Chinese)
 - [17] 李学龙. 涉水视觉 [J]. *电子学报*, 2024, 52(04): 1041-1082.
LI X L. Water-related vision [J]. *Journal of Electronics*, 2024, 52(4): 1041-1082. (in Chinese)
 - [18] 陈雄锋, 阮驰. 多参数最优重构水下偏振成像复原方法 [J]. *兵工学报*, 2023, 44(7): 2122-2131.
CHEN X F, RUAN CH. Underwater polarization image restoration method using optimal multi-parameter reconstruction [J]. *Acta Armamentarii*, 2023, 44(7): 2122-2131. (in Chinese)
 - [19] HUYNH-THU Q, GHANBARI M. Scope of validity of PSNR in image/video quality assessment [J]. *Electronics letters*, 2008, 44(13): 800-801.
 - [20] 李浩翔, 朱京平, 邓金鑫, 等. 基于斯托克斯参量的水下主动偏振去散射研究 [J]. *数字海洋与水下攻防*, 2023, 6(4): 435-441.
LI H X, ZHU J P, DENG J X, *et al.* Research on underwater active polarization descattering based on stokes vectors [J]. *Digital Ocean and Underwater Offense and Defense*, 2023, 6(4): 435-441. (in Chinese)
 - [21] DUAN J, MO S X, FU Q, *et al.* Texture characterization and classification of polarized images based on multi-angle orthogonal difference [J]. *Op-*

- tics Express*, 2023, 31(26): 44455-44473.
- [22] 王佳林, 段锦, 付强, 等. 基于 Mueller 矩阵的偏振抑制反光方法[J]. 光学学报, 2023, 43(20): 162-174.
WANG J L, DUAN J, FU Q, *et al.* Polarization suppression reflection method based on mueller matrix [J]. *Acta Optica Sinica*, 2023, 43(20): 162-174. (in Chinese)
- [23] DUBREUIL M, DELROT P, LEONARD I, *et al.* Exploring underwater target detection by imaging polarimetry and correlation techniques[J]. *Applied optics*, 2013, 52(5): 997-1005.
- [24] WANG H Y, HU H F, JIANG J F, *et al.* Polarization differential imaging in turbid water via Mueller matrix and illumination modulation[J]. *Optics Communications*, 2021, 499: 127274.
- [25] 汪杰君, 梁磊, 李树, 等. 水下目标偏振差分成像模型修正与实现[J]. 光学学报, 2019, 39(11): 160-166.
WANG J J, LIANG L, LI SH, *et al.* Correction and implementation of underwater target polarization-difference imaging model [J]. *Acta Optica Sinica*, 2019, 39(11): 160-166. (in Chinese)
- [26] 刘国栋, 冯立辉, 卢继华, 等. 基于分类与最小卷积区域暗通道先验的水下图像恢复[J]. 激光与光电子学进展, 2023, 60(4): 66-76.
LIU G D, FENG L H, LU J H, *et al.* Underwater image restoration based on classification and dark channel prior with minimum convolutional ar-
- ea [J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2023, 60(4): 66-76.
- [27] 段锦, 方瑞森, 陈广秋, 等. 基于偏振特征区域分解的耀光抑制方法[J]. 光学精密工程, 2024, 32(10): 1456-1469.
DUAN J, FANG R S, CHEN G Q, *et al.* A method for suppressing glare based on polarization feature region decomposition [J]. *Optics and Precision Engineering*, 2024, 32(10): 1456-1469. (in Chinese)
- [28] 褚金奎, 张培奇, 成昊远, 等. 基于特定偏振态成像的水下图像去散射方法[J]. 光学精密工程, 2021, 29(5): 1207-1215.
CHU J K, ZHANG P Q, CHENG H Y, *et al.* De-scattering method of underwater image based on imaging of specific polarization state [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2021, 29(5): 1207-1215. (in Chinese)
- [29] HU H F, ZHAO L, LI X B, *et al.* Polarimetric image recovery in turbid media employing circularly polarized light[J]. *Optics Express*, 2018, 26(19): 25047-25059.
- [30] 张聪立, 周俊焯, 纵园, 等. 基于偏振信息的海面太阳耀光抑制[J]. 光学精密工程, 2023, 31(15): 2181-2192.
ZHANG C L, ZHOU J ZH, ZONG Y, *et al.* Sun glare suppression on the sea surface based on polarization information [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2023, 31(15): 2181-2192. (in Chinese)

作者简介:



段 锦(1971—),男,吉林长春人,博士,博士生导师,2004年于吉林大学获得博士学位,主要从事偏振成像探测、图像处理与模式识别、数字光学环境仿真的研究。E-mail:duanjin@vip.sina.com



董克晗(2001—),男,吉林松原人,硕士研究生,2023年于吉林师范大学获得学士学位,主要从事水下偏振成像及偏振特性的研究。E-mail:2634438285@qq.com