

## 基于频谱信息的浑浊水下偏振成像技术

许珈诺<sup>1</sup>, 赵健<sup>1</sup>, 李校博<sup>2</sup>, 刘贺东<sup>1</sup>, 刘铁根<sup>1</sup>, 翟京生<sup>2</sup>, 胡浩丰<sup>1,2\*</sup><sup>1</sup>天津大学精密仪器与光电子工程学院, 天津 300072;<sup>2</sup>天津大学海洋科学与技术学院, 天津 300072

**摘要** 水体中悬浮粒子对光的散射导致浑浊水下成像质量下降。偏振光学成像技术可基于偏振信息分离散射光和信号光,是浑浊水下成像的有效方法。然而,现有的水下偏振成像技术主要从空域分离散射光和信号光,对于散射光的抑制效果较为有限。利用散射光和信号光在频域的差异性,基于对偏振图像频谱信息的处理实现了对后向散射光的有效抑制,从而实现了成像清晰度的显著提升。在不同浑浊程度水体环境下对于不同物体开展了多组实验,实验结果表明,所提方法相对于传统的水下偏振成像方法可更好地抑制后向散射光和凸显物体信号光,最终实现在浑浊水体环境下的清晰成像,尤其对于高浑浊水体,成像清晰度提升效果明显。

**关键词** 偏振成像; 水下成像; 频谱; 后向散射光

中图分类号 O438.2

文献标志码 A

DOI: 10.3788/AOS230463

## 1 引言

在浑浊水下环境中实现清晰的光学成像对于海洋、水下救援、渔业等多个领域具有极为重要的意义<sup>[1-3]</sup>。然而,浑浊水体中大量的悬浮颗粒会对光产生显著的散射和吸收,从而导致浑浊水下环境中成像清晰度和成像探测距离显著下降<sup>[4]</sup>。针对浑浊水体散射环境下“看不清、看不远”的问题,以更为丰富的光学信息获取和更为先进的光学信息处理方法为核心,从而针对性地解决浑浊水体环境下的图像退化问题,是实现浑浊水体环境中成像质量提升的主要发展方向。

在浑浊水体成像环境中,导致图像质量退化的最主要因素是后向散射光,而后向散射光是部分偏振光<sup>[5]</sup>,且后向散射光的偏振特性与目标信号光的偏振特性具有差异性<sup>[6]</sup>。因此,基于偏振信息的获取和处理可有效分离目标信号光和后向散射光,从而抑制后向散射光的影响,最终实现成像质量的显著提升<sup>[7]</sup>。正因如此,偏振成像技术也成为水下清晰成像的有效方法之一。水下偏振成像技术的核心就是抑制后向散射光<sup>[8]</sup>。现有的水下偏振成像技术主要基于后向散射光和目标信号光在空域上偏振信息的差异性抑制后向散射光<sup>[9-12]</sup>。然而,目标信号光和后向散射光在空域上是重合的,仅利用目标信号光和后向散射光的偏振差异性难以充分抑制后向散射光<sup>[13-14]</sup>。

针对这一问题,本文从频域的角度入手,探索后向

散射光和目标信号光在频域上的差异性,从而提出一种基于偏振图像频谱处理的水下偏振成像方法,在频谱空间上对偏振图像的关联性进行优化滤波处理,有效抑制后向散射光,并进一步结合水下偏振图像复原算法,实现了浑浊水体环境下的清晰成像。在不同浑浊程度水体环境下对不同目标进行水下偏振成像实验,并与传统偏振成像技术进行对比,实验结果验证了所提方法的有效性和优越性。

## 2 基本原理

根据经典水下散射环境中的偏振成像模型,水下成像时相机接收到的总光强  $I(x, y)$  包含目标物体信号光  $O(x, y)$  以及后向散射光  $B(x, y)$  两部分<sup>[15]</sup>:

$$I(x, y) = O(x, y) + B(x, y) = L(x, y) \cdot t(x, y) + A_{\infty} [1 - t(x, y)], \quad (1)$$

式中:目标物体实际反射光  $L(x, y)$  经过传输函数为  $t(x, y)$  的介质散射和吸收后到达探测器的光强为  $O(x, y)$ ;  $B(x, y)$  为水下无穷远处(即背景处)后向散射光光强  $A_{\infty}$  和传输函数  $t(x, y)$  的函数。水体中的悬浮粒子对光的散射产生的后向散射光  $B(x, y)$  是水下成像质量下降的主要原因,其是部分偏振的,这也正是偏振成像技术可提升水下成像质量的原因。

由式(1)可推导出物体实际反射光  $L(x, y)$ , 即清

收稿日期: 2023-01-10; 修回日期: 2023-02-11; 录用日期: 2023-02-24; 网络首发日期: 2023-03-09

基金项目: 国家自然科学基金(62075161)、广西创新驱动发展专项(桂科AA21077008)

通信作者: \*haofeng\_hu@tju.edu.cn

晰的水下物体图像可表示为

$$L(x, y) = \frac{I(x, y) - A_\infty [1 - t(x, y)]}{t(x, y)}. \quad (2)$$

水下偏振成像技术基于正交偏振图像  $I_{//}(x, y)$  和  $I_{\perp}(x, y)$ , 并结合上述物理模型来实现对目标物清晰图像的复原<sup>[16]</sup>。此时, 式(2)中的  $I(x, y)$  为未放置线性偏振片时相机接收的光强信号:

$$I(x, y) = I_{//}(x, y) + I_{\perp}(x, y) = [O_{//}(x, y) + B_{//}(x, y)] + [O_{\perp}(x, y) + B_{\perp}(x, y)]. \quad (3)$$

由于水体的散射和吸收, 所获得的两幅正交偏振图像  $I_{//}(x, y)$  和  $I_{\perp}(x, y)$  均难以准确体现原始目标体的光强及偏振信息。如果采用这两幅正交偏振图像进行后续的偏振图像复原, 则难以获得高质量的成像效果。实际上, 目标物体反射光信号光和散射介质后向散射光在偏振图像的频谱上存在差异: 相对高偏的散射介质信息后向散射光主要集中在频谱的低频成分中; 而目标信号光信息则主要集中在频谱高频成分中。因此可以通过设计频域高通滤波器对正交偏振图像进行预处理, 提取高频成分从而使目标信号光与后向散射光分离。

垂直于主动照明线偏光方向的最小光强图  $I_{\perp}(x, y)$  中散射光被初步抑制, 使得其中目标信息更明显, 因此对其进行频域预处理操作。将  $I_{\perp}(x, y)$  经由傅里叶变换至频域, 并进行截止频率为  $D_0$  的高斯高通滤波, 从而过滤掉后向散射光, 得到目标信号光相对集中的高频部分。经由频域高通滤波后得到修正后的最小光强图  $I_{\perp}^h(x, y)$  为

$$I_{\perp}^h(x, y) = \mathcal{F}^{-1} \left\{ \mathcal{F} \{ I_{\perp}(x, y) \} \left[ 1 - \exp \left[ \frac{-D^2(u, v)}{2D_0^2} \right] \right] \right\}, \quad (4)$$

式中:  $\mathcal{F}$  为傅里叶变换;  $D(u, v)$  代表频谱中两点间距离。

滤波前的原始正交偏振图像对之间存在固有的偏振关系, 可用二者间偏振度  $P(x, y)$  表示。滤波后的图像对间也应保持同样的偏振关系, 即滤波前后每一对正交偏振图像对的偏振度  $P(x, y)$  应保持不变<sup>[17-18]</sup>。

$$P(x, y) = \frac{I_{//}(x, y) - I_{\perp}(x, y)}{I_{//}(x, y) + I_{\perp}(x, y)} = \frac{I_{//}^h(x, y) - I_{\perp}^h(x, y)}{I_{//}^h(x, y) + I_{\perp}^h(x, y)}. \quad (5)$$

为了不破坏式(5)所描述的这种偏振关系, 在处理最大光强图  $I_{//}(x, y)$  时不可对其直接进行高通滤波处理, 而应根据滤波后的最小光强图  $I_{\perp}^h(x, y)$  进行

偏振度保持及关联计算, 预处理后的最大光强图  $I_{//}^h(x, y)$  为

$$I_{//}^h(x, y) = \frac{1 + P(x, y)}{1 - P(x, y)} I_{\perp}^h(x, y). \quad (6)$$

经过频域滤波预处理后的正交偏振图像对  $I_{//}^h(x, y)$  和  $I_{\perp}^h(x, y)$  包含原始图像频谱中的高频部分, 即过滤一部分后向散射光从而凸显出更多的目标物体信息。基于频域滤波预处理后的正交偏振图像对结合传统偏振散射抑制成像模型, 可以更好地实现对目标物体图像的复原, 具体步骤如下。

后向散射光的偏振度  $P_{bs}$  可由  $B_{//}^h$  和  $B_{\perp}^h$  计算得到:

$$P_{bs} = \frac{B_{//}^h - B_{\perp}^h}{B_{//}^h + B_{\perp}^h}. \quad (7)$$

传统水下偏振成像模型假设后向散射光为部分偏振光, 而目标光为非偏振光, 在通过偏振的方式抑制散射光时, 后向散射光偏振度越高对应的消光比就越高, 从而更为彻底消除散射光。在计算过程中具体体现为尽量增大后向散射光偏振度  $P_{bs}$  从而实现更好的散射抑制。此处可将  $P_{bs}$  看作  $B_{//}^h(x, y)$  及  $B_{\perp}^h(x, y)$  的二元函数, 对于归一化图像, 在其物理可行域<sup>[19]</sup> 范围内,  $P_{bs}$  的最大值将在  $B_{//}^h(x, y)$  最大同时  $B_{\perp}^h(x, y)$  最小时取得。为了尽可能使得  $P_{bs}$  最大, 此处令

$$\begin{cases} B_{//}^h = \max \{ \max [ I_{//}^h(x, y) ] \} \\ B_{\perp}^h = \min \{ \min [ I_{\perp}^h(x, y) ] \} \end{cases}. \quad (8)$$

由传输函数  $t^h(x, y)$  的表达式及式(1)可知, 当  $t^h(x, y)$  趋于 0 时, 无穷远处后向散射光  $A_\infty^h$  可由式(9)近似表达:

$$B^h(x, y) = A_\infty^h [1 - t^h(x, y)] \rightarrow A_\infty^h. \quad (9)$$

传统模型假定目标光的偏振度可以忽略, 则目标光的偏振差分参量  $\Delta O = 0$ , 此时结合式(1)及式(7)即可得到传输函数  $t^h(x, y)$ :

$$t^h(x, y) = 1 - \frac{B^h(x, y)}{A_\infty^h} = 1 - \frac{\Delta B^h(x, y)}{P_{bs} A_\infty^h} = 1 - \frac{\Delta I^h(x, y)}{P_{bs} A_\infty^h}, \quad (10)$$

式中:  $\Delta I$  代表偏振正交图像之差。将传输函数  $t^h(x, y)$  以及无穷远处后向散射光  $A_\infty^h$  代入式(2)即可得到图像最终复原结果。

所提方法最终复原图像的质量与频域预处理中高通滤波器的截止频率  $D_0$  相关。为实现最优的图像复原效果, 需要找到最优截止频率  $D_0^{\text{opt}}$ 。将最小光强图的高频部分  $I_{\perp}^h(x, y)$  与原始最小光强图  $I_{\perp}(x, y)$  相加以实现对频域的增强, 并结合无参考条件下图像质量评价函数  $f_{\text{EME}}$  对其图像质量进行定量评价:

$$f_{\text{EME}} = \left| \frac{1}{m_1 m_2} \sum_{l=1}^{m_2} \sum_{m=1}^{m_1} 20 \log \frac{i_{\text{max}; m, l}^{(\omega)}(x, y)}{i_{\text{min}; m, l}^{(\omega)}(x, y) + q} \right|, \quad (11)$$

式中:图像在  $(m, l)$  两个维度上被分割为  $m_1 \times m_2$  块并用序号  $\omega$  标记区分;  $i_{\text{max}; m, l}^{(\omega)}(x, y)$  和  $i_{\text{min}; m, l}^{(\omega)}(x, y)$  分别表示第  $\omega$  块图像中光强的最大值与最小值;  $q$  为一个充分小的常数,用于修正分母可能为 0 的情况,其对  $f_{\text{EME}}$  值的影响可忽略。  $f_{\text{EME}}$  值越大,说明图像细节越清晰,图像质量越高。

将较多含有高频目标物体信息的  $I_{\perp}^h(x, y)$  与原始最小光强图  $I_{\perp}(x, y)$  相加,得到的图像  $I_{\perp}^h(x, y) + I_{\perp}(x, y)$  对目标物体的轮廓细节有了增强呈现。  $I_{\perp}^h(x, y) + I_{\perp}(x, y)$  图像评价函数  $f_{\text{EME}}$  的值越高则表明图中目标物体细节信息在整幅图中越清晰、突出,即在

使用滤波器进行高通滤波得到  $I_{\perp}^h(x, y)$  时可更为全面有效地获得目标物体的信息。  $f_{\text{EME}}$  取得峰值时对应滤波器的截止频率即为实际处理中所需的最优截止频率  $D_0^{\text{opt}}$ ,即

$$D_0^{\text{opt}} = \arg \max_{D_0} \left\{ f_{\text{EME}} \left[ I_{\perp}(x, y) + I_{\perp}^h(x, y) \right] \right\}. \quad (12)$$

用最优截止频率  $D_0^{\text{opt}}$  对应的  $I_{\perp}^h(x, y)$  关联出修正后的  $I_{\perp}^h(x, y)$ ,并基于水下偏振成像模型和修正后的正交偏振图像计算得到目标物体的复原图  $L(x, y)$ 。

$$L(x, y) = \frac{I^h(x, y) - A_{\infty}^h [1 - t^h(x, y)]}{t^h(x, y)}. \quad (13)$$

上述基于频域处理与偏振度关联相结合的水下图像复原流程如图 1 所示。

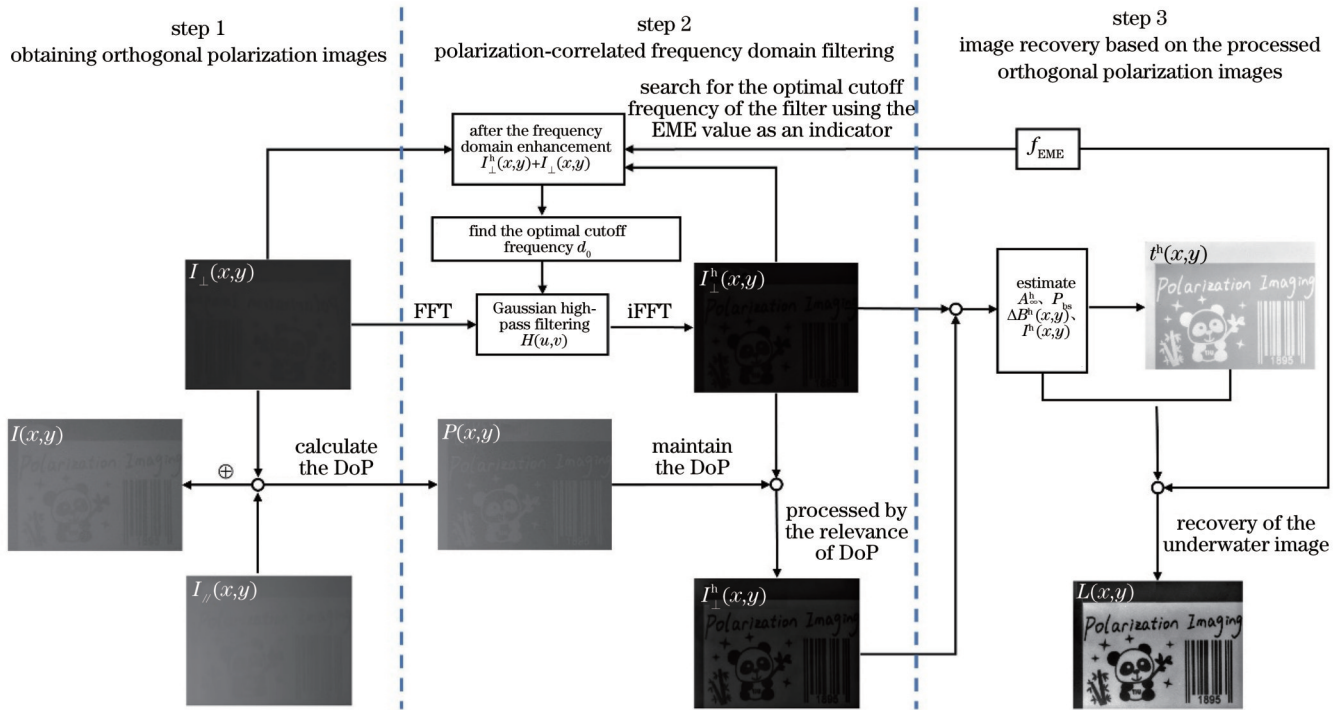


图 1 基于频域的水下偏振成像算法流程图

Fig. 1 Flowchart of the underwater polarization imaging algorithm based on spectral information

### 3 结果与讨论

为了验证所提方法的可行性,开展了浑浊水下环境中的偏振成像实验,实验装置如图 2(a)所示。实验中选用中心波长为 625 nm 的准直 LED 光源配合线性偏振片 Polarizer 1 实现水平方向的主动照明。通过向装有水 (63.5 cm × 25 cm × 22 cm) 的玻璃缸中加入牛奶来模拟实际水下浑浊的散射环境,将图 2(b)所示带有熊猫图案的目标物体放在水中距玻璃缸前表面 48 cm 处,对其开展不同浊度牛奶溶液的水下成像实验。实验中逐次加入牛奶从而产生高 (106 NTU)、中 (80 NTU)、低 (60 NTU) 等 3 种不同浑浊程度的水体

环境。对同一目标物体在每个浊度的水中,调整相机前可旋转线性偏振片 polarizer 2 的角度,至其与偏振片 polarizer 1 轴夹角为 0° 时获得最大光强图  $I_{\parallel}(x, y)$  和夹角为 90° 垂直时获得最小光强图  $I_{\perp}(x, y)$ ,如图 3(a)、(b)所示,用于后续的图像复原处理。实验中使用的相机为 14 位灰度工业级 CCD (AVT Stingray F-033B),相机几乎正对目标物体接收,与入射光源夹角约为 20°。

首先,以中浊度牛奶溶液为例,选择目标成分相对更明显的最小光强图  $I_{\perp}(x, y)$  进行高斯高通滤波预处理,提取其频谱中集中反映目标物体纹理、细节等信息



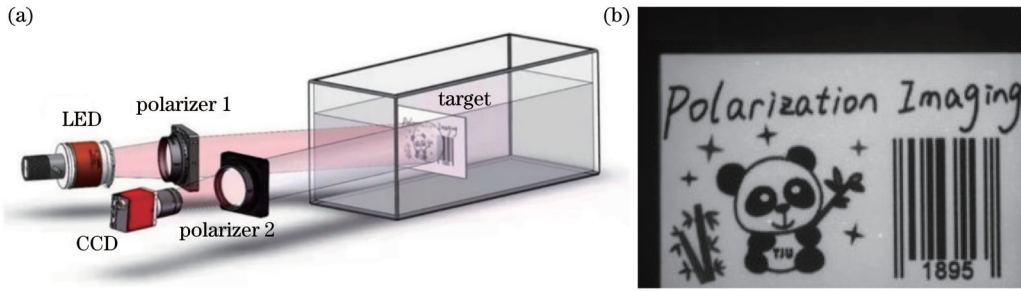


图 2 水下偏振成像实验。(a)实验装置图;(b)清水下目标物体原始光强图

Fig. 2 Underwater imaging experiment. (a) Experimental setup; (b) intensity image in clear water

的高频成分,经由傅里叶逆变换得到滤波后的最小光强图  $I_{\perp}^h(x, y)$ ,从而实现散射光的初步抑制。滤波前、后的频谱图分别如图 3(e)、(f)所示。需要说明的是,在两张正交偏振图像信息处理过程中,保持正交图像对间的偏振度  $P(x, y)$  不变,由最小光强图的高频部

分  $I_{\perp}^h(x, y)$  通过偏振度关联得到滤波后的最大光强图  $I_{\parallel}^h(x, y)$ ,基于该方法既可以实现两张正交偏振图像中散射光的初步抑制,又可保证每一正交图像对间的固有偏振关系不被破坏,从而便于后续的偏振图像准确复原。

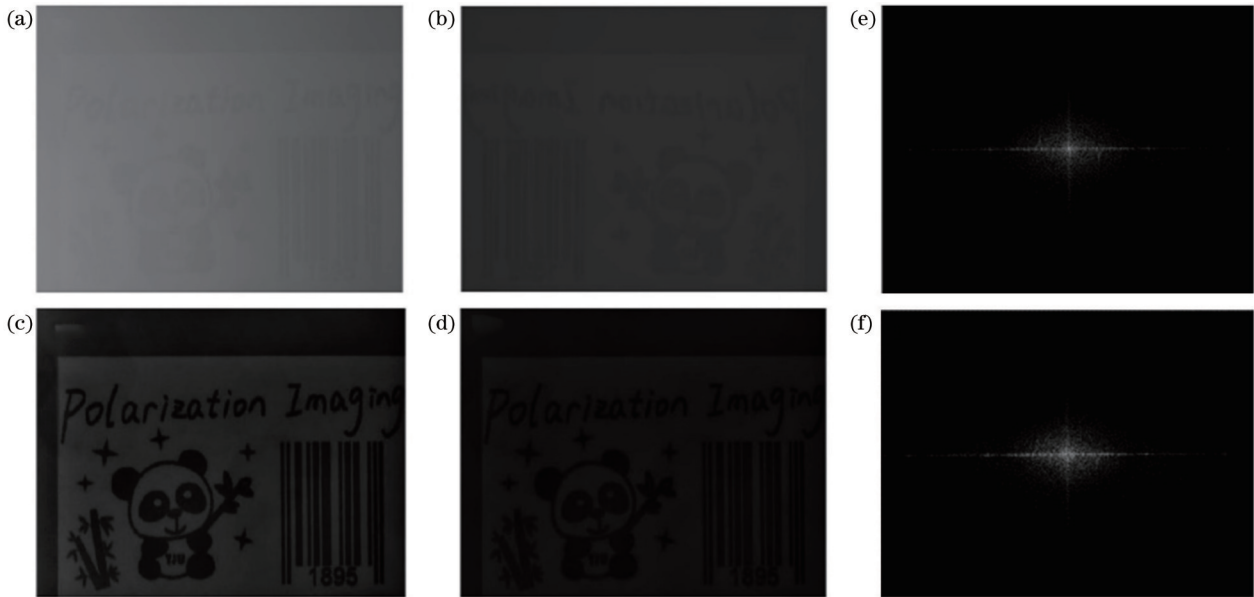


图 3 中浊度浑浊水中原始正交线图像对及预处理结果图。(a)最大光强图;(b)最小光强图;(c)滤波后的最大光强图;(d)滤波后的最小光强图;(e)(f)滤波前后最小光强图频谱

Fig. 3 Original orthogonal polarization images and processed images in the turbid water with medium turbidity. (a)  $I_{\parallel}^h(x, y)$ ; (b)  $I_{\perp}^h(x, y)$ ; (c)  $I_{\parallel}^h(x, y)$ ; (d)  $I_{\perp}^h(x, y)$ ; (e)(f) spectrums of  $I_{\perp}^h(x, y)$  before and after filtering

此外,为了实现最优的图像复原效果,需要在频域滤波预处理时对高斯高通滤波器的截止频率进行自动优化搜寻。使用评价函数  $f_{\text{EME}}$  定量评价频域增强后的最小光强图  $I_{\perp}^h(x, y) + I_{\perp}^l(x, y)$  的图像质量,并以图像的  $f_{\text{EME}}$  值为优化目标,在 0.1~5 的范围内以 0.01 为步长对高斯高通滤波器的截止频率  $D_0$  进行全局搜索,以找到相对于场景而言目标信息最清晰的状态以及此时滤波器的最优截止频率  $D_0^{\text{opt}}$ 。图 4 为该目标场景置于高、中、低等 3 个浊度水下时,对最优截止频率的搜寻结果曲线。由图可知,对于每个最小光强图分别存在一个最优截止频率,使其频域增强后的图像  $f_{\text{EME}}$  值达

到极值,如图 4 中圆点所示。另外,从图 4 可以看出,同一目标在不同浊度的场景中所对应的最优截止相频率接近,但整体趋势与浊度呈正相关。

修正后的正交偏振图像对的图像细节已得到初步恢复,如图 3(c)、(d)所示。根据传统散射环境偏振图像复原模型,分别寻找  $I_{\parallel}^h(x, y)$  灰度最大值及  $I_{\perp}^h(x, y)$  的灰度最小值用以估算  $P_{\text{bs}}$  和  $A_{\infty}^h$  并计算得到传输函数  $t^h(x, y)$ ,进而获得所提方法目标物体的复原结果图,如图 5 所示。此外,图 5 还展示了不同浊度下的原始光强图、Schechner 方法<sup>[20]</sup>复原结果,用以和所提方法的结果进行比较。从图 5 可以看出,所提方法对于低、

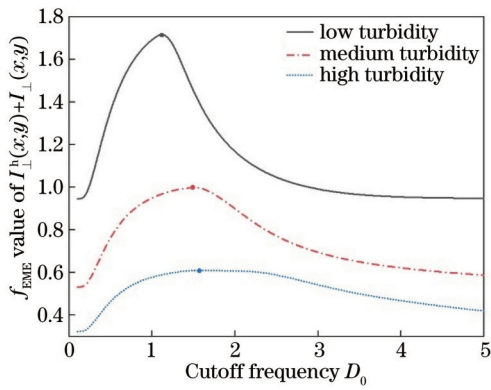


图 4 不同浊度场景下滤波预处理时最优截止频率搜寻  
Fig. 4 Optimal cut-off frequency search for filter preprocessing in different concentration scenarios

中、高等 3 种浊度水体中的图像均具有良好的散射抑

制效果,图像复原结果对比度较高、细节相对更清晰。相较于 Schechner 方法的结果,所提方法可以更好改善非均匀照明以及散射粒子非均匀分布所导致的不均匀后向散射光分布问题,显著提升浑浊水体环境下的图像质量。

为了更加清晰地对图像进行细节对比和定量分析,将图中条形码下方“1895”字样进行局部放大展示。可以直观看出,即便在高浊度情况下,所提方法复原图像中数字字样也清晰可辨。另外,还在图中细节对比最明显的条形码处划线,并以灰度值分布曲线的方式在图 5 最右侧进行展示。由曲线可以定量分析得出,相较于原图及 Schechner 方法,所提方法复原结果所对应的曲线峰谷差值最大,且图中从左到右的峰谷差值下降趋势明显被抑制,验证了其在凸显物体细节信息、抑制非均匀散射方面的优势。

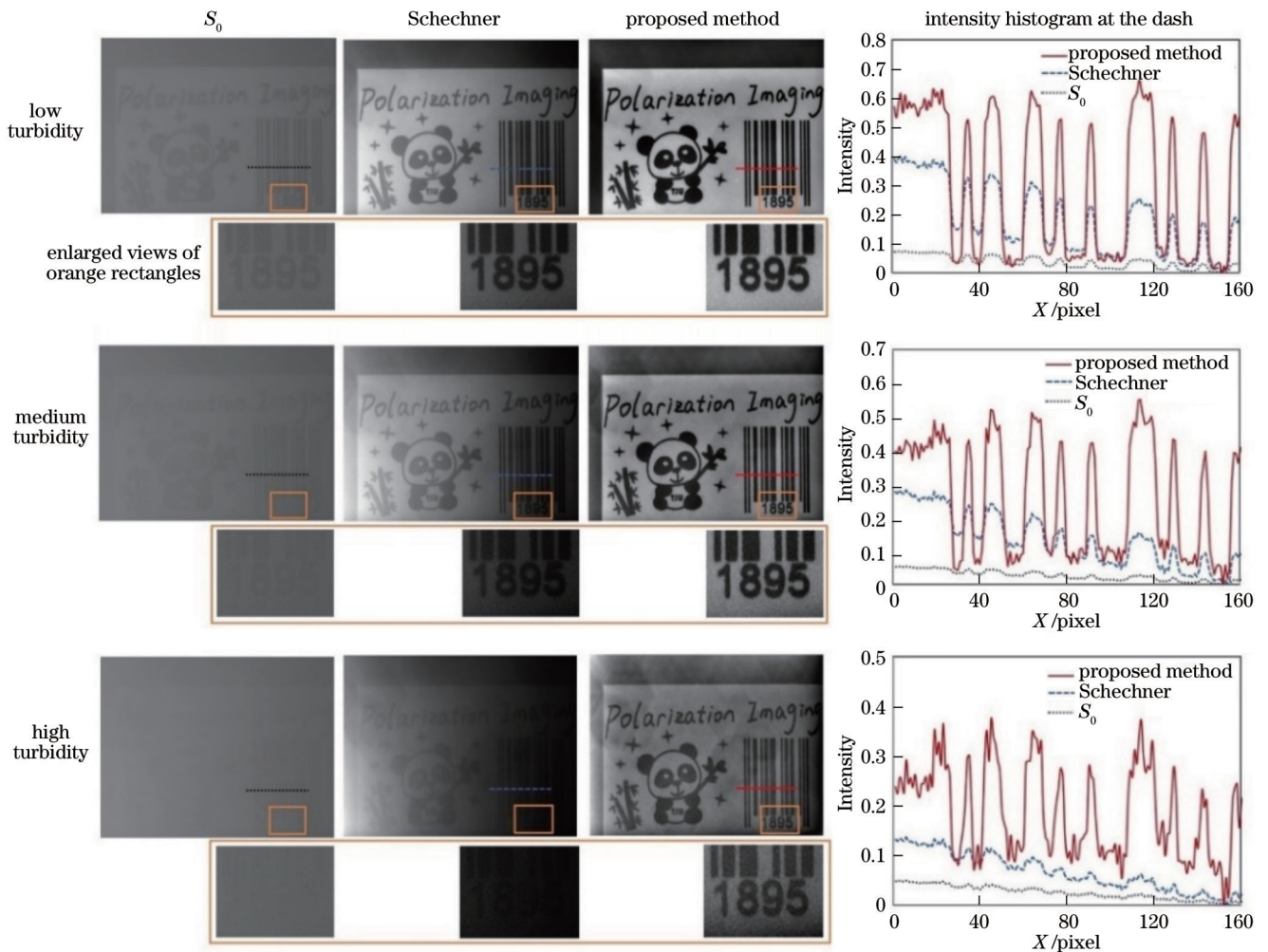


图 5 不同方法、不同浊度组别的场景复原结果、局部放大图及划线处灰度曲线分布对比  
Fig. 5 Images processed by different methods and partial enlarged images and light intensity distribution at the scribe line in underwater environments with different turbidity

为进一步验证所提方法相对于其他方法的优势,进行了不同浑浊程度水环境中不同场景的成像实验,不同方法的复原图像如图 6 所示。从图中可以看出,

由于后向散射光的存在,带有奶牛图案的目标物体的光强图中,本应是黑色的背景区域呈现出“偏白”的效果,即背景区域的灰度值偏高。经典的 Schechner 方



法由于散射抑制不完全导致其背景区域仍然存在后向散射光, 细节退化及光照不均的问题严重。CLAHE 方法<sup>[21]</sup>及 Retinex 方法<sup>[22]</sup>主要对图像中信息进行数字信号处理实现图像增强。从结果来看, Retinex 方法复原结果对比度较低, 而 CLAHE 方法虽

然清晰地复原了图案细节, 但对背景区域的视觉改善并不明显。相较而言, 所提方法的复原结果中图案更清晰并且背景处灰度值更低, 这是由于经过了频谱滤波及物理模型图像复原的分步处理, 后向散射光去除更完全。

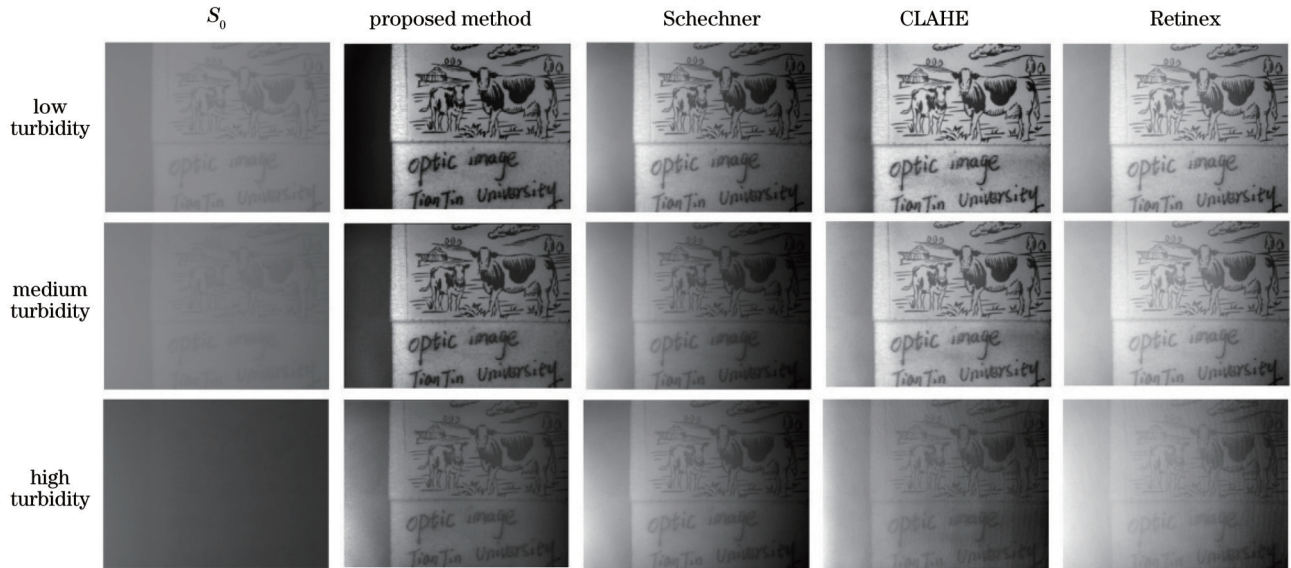


图 6 不同方法、不同浊度组别奶牛图案目标物复原图像

Fig. 6 Images of cows processed by different methods with different turbidity

另外, 采用无参考条件下的图像质量评价指标  $f_{EME}$  对不同方法得到的图像质量进行定量评价, 不同浊度牛奶溶液中各方法复原结果的  $f_{EME}$  值与加入牛奶后溶液浊度的关系曲线如图 7 所示。从图中可以看出, 所提方法在不同浑浊程度(不同浓度牛奶溶液)的水体环境下, 均具有更高的  $f_{EME}$  值, 说明所提方法在图像质量提升方面相对于其他方法均具有显著优势。

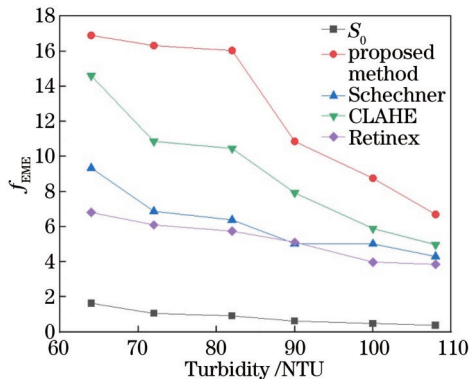


图 7 图 6 中的奶牛场景复原图像对应  $f_{EME}$  值折线图

Fig. 7  $f_{EME}$  value line chart of processed images in Fig. 6

为了进一步验证所提方法对不同场景的鲁棒性及在较混浊水下环境中的有效性, 选取了魔方以及光盘两个新的目标物, 分别进行了中、高等浊度牛奶溶液散射环境的成像实验, 实验结果如图 8 所示。通过对比

背景区域灰度可以看出: 对于中浊度下的魔方目标物, 所提方法抑制后向散射光效果最为明显; 而对于高浊度下的魔方目标物, 所提方法虽与 CLAHE 方法在对比度上的效果相近, 但 CLAHE 方法与所提方法相较而言, 图像失真更为明显。对于光盘目标物, 不论中浊度还是高浊度, 所提方法复原结果明显优于其他方法, 光盘上字迹清晰、光照分布均匀, 整体图像对比度更高。

## 4 结 论

针对浑浊水下环境中清晰成像的需求, 利用目标物体信息和散射介质信息在图像频谱上分布的差异, 提出一种基于频域处理与偏振度保持相结合的浑浊水下偏振图像增强方法。通过对正交偏振态图像对在频域上进行高通滤波预处理, 初步分离并去除集中在低频成分中的后向散射光, 随后对不同浊度及场景中滤波器的最优参数通过合适的评价指标进行自动搜寻从而获取更准确的目标物体信息, 再通过偏振度保持关联出更加准确的正交偏振图像对, 结合传统的物理模型实现浑浊水下图像的复原。在不同浑浊程度水体环境下对于不同目标开展了水下成像实验, 一系列实验结果表明, 所提基于频域处理的浑浊水下偏振图像增强方法可以有效抑制散射光对偏振成像质量的影响, 改善浑浊水下光照不均问题, 提高图像的对比度与清晰度, 相对于传统方法具有显著优势。

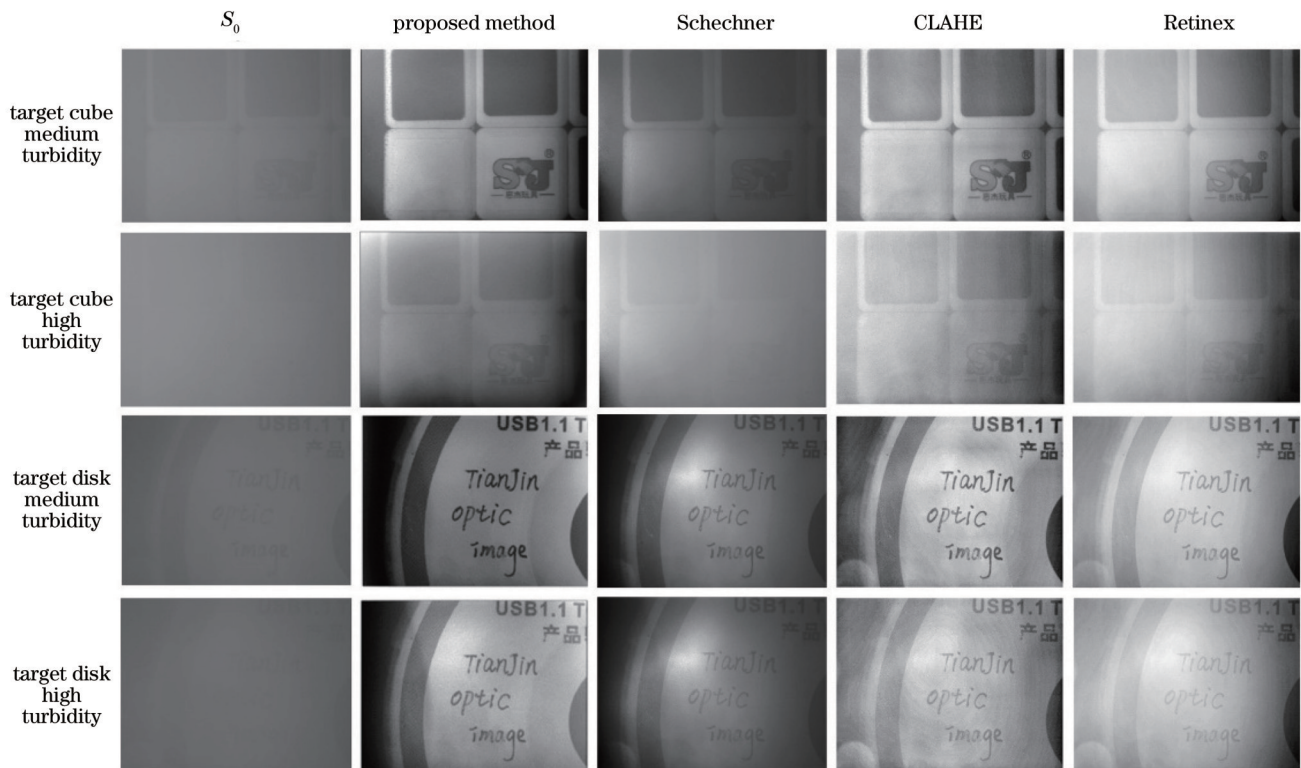


图 8 中、高浊度组别魔方与光盘场景复原图像

Fig. 8 Images of cube and disk processed by different methods with medium and high turbidity

## 参 考 文 献

- Wu Q, Guo Y J, Hou J C, et al. Underwater optical image processing based on double threshold judgements and optimized red dark channel prior method[J]. *Multimedia Tools and Applications*, 2021, 80(19): 29985-30002.
- Lin Y, Zhou J C, Ren W Q, et al. Autonomous underwater robot for underwater image enhancement via multi-scale deformable convolution network with attention mechanism[J]. *Computers and Electronics in Agriculture*, 2021, 191: 106497.
- 胡浩丰, 李校博, 刘铁根. 基于偏振成像的水下图像复原技术研究最新进展[J]. *红外与激光工程*, 2019, 48(6): 0603006.
- Hu H F, Li X B, Liu T G. Recent advances in underwater image restoration technique based on polarimetric imaging[J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2019, 48(6): 0603006.
- Guan J G, Ma M, Sun P. Optimization of rotating orthogonal polarization imaging in turbid media via the Mueller matrix[J]. *Optics and Lasers in Engineering*, 2019, 121: 104-111.
- Sabbah S, Shashar N. Light polarization under water near sunrise[J]. *Journal of the Optical Society of America A*, 2007, 24(7): 2049-2056.
- Schechner Y Y, Karpel N. Recovery of underwater visibility and structure by polarization analysis[J]. *IEEE Journal of Oceanic Engineering*, 2005, 30(3): 570-587.
- 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): 0611003.
- Yang L M, Liang J, Zhang W F, et al. Underwater polarimetric imaging target enhancement technology based on unpolarized illumination[J]. *Acta Optica Sinica*, 2018, 38(6): 0611003.
- Wei Y, Han P L, Liu F, et al. Polarization descattering imaging: a solution for nonuniform polarization characteristics of a target surface[J]. *Chinese Optics Letters*, 2021, 19(11): 111101.
- 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.
- Wang J J, Wan M J, Gu G H, et al. Periodic integration-based polarization differential imaging for underwater image restoration[J]. *Optics and Lasers in Engineering*, 2022, 149: 106785.
- 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): 1111003.
- Wang J J, Liang L, Li S, et al. Correction and implementation of polarization-difference imaging model for underwater target[J]. *Acta Optica Sinica*, 2019, 39(11): 1111003.
- 刘飞, 孙少杰, 韩平丽, 等. 水下偏振成像技术研究及进展[J]. *激光与光电子学进展*, 2021, 58(6): 0600001.
- Liu F, Sun S J, Han P L, et al. Development of underwater polarization imaging technology[J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2021, 58(6): 0600001.
- Liu F, Han P L, Wei Y, et al. Deeply seeing through highly turbid water by active polarization imaging[J]. *Optics Letters*, 2018, 43(20): 4903-4906.
- Liu F, Cao L, Shao X P, et al. Polarimetric dehazing utilizing spatial frequency segregation of images[J]. *Applied Optics*, 2015, 54(27): 8116-8122.
- 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.
- Schechner Y Y, Narasimhan S G, Nayar S K. Polarization-based vision through haze[J]. *Applied Optics*, 2003, 42(3): 511-525.
- Li X B, Hu H F, Zhao L, et al. Polarimetric image recovery method combining histogram stretching for underwater imaging[J]. *Scientific Reports*, 2018, 8(1): 1-10.
- 李宜泽, 邓陈进, 龚文林, 等. 浑浊介质下的偏振差分关联成像研究[J]. *光学学报*, 2021, 41(15): 1511004.
- Li Y Z, Deng C J, Gong W L, et al. Polarization difference ghost imaging in turbid medium[J]. *Acta Optica Sinica*, 2021, 41(15): 1511004.

- [19] Wang H Y, Hu H F, Jiang J F, et al. Automatic underwater polarization imaging without background region or any prior[J]. *Optics Express*, 2021, 29(20): 31283-31295.
- [20] Schechner Y Y, Narasimhan S G, Nayar S K. Instant dehazing of images using polarization[C]//Proceedings of the 2001 IEEE Computer Society Conference on Computer Vision and Pattern Recognition. CVPR, December 8-14, 2001, Kauai, HI, USA. New York: IEEE Press, 2003.
- [21] Reza A M. Realization of the contrast limited adaptive histogram equalization (CLAHE) for real-time image enhancement[J]. *Journal of VLSI Signal Processing Systems for Signal, Image and Video Technology*, 2004, 38(1): 35-44.
- [22] Jobson D J, Rahman Z, Woodell G A. A multiscale retinex for bridging the gap between color images and the human observation of scenes[J]. *IEEE Transactions on Image Processing*, 1997, 6(7): 965-976.

## Polarization Imaging in Turbid Water Based on Spectral Information

Xu Jianuo<sup>1</sup>, Zhao Jian<sup>1</sup>, Li Xiaobo<sup>2</sup>, Liu Hedong<sup>1</sup>, Liu Tiegen<sup>1</sup>, Zhai Jingsheng<sup>2</sup>,  
Hu Haofeng<sup>1,2\*</sup>

<sup>1</sup>*School of Precision Instrument and Opto-Electronics Engineering, Tianjin University, Tianjin 300072, China;*

<sup>2</sup>*School of Marine Science and Technology, Tianjin University, Tianjin 300072, China*

### Abstract

**Objective** Scattering and absorption of light by suspended particles in scattering media can lead to significant degradation of image quality. In the imaging environment of turbid water, the interference of backscattered light leads to image degradation, and the light is partially polarized. In order to obtain clear images, it is necessary to suppress backscattered light, which is also the core of underwater polarization imaging technology. Most of the existing underwater polarization imaging methods distinguish scattered light from signal light in the spatial domain based on their polarization information. However, overlapping in the spatial domain makes it difficult to fully suppress the backscattered light only by using the polarization characteristic difference between the target signal light and the backscattered light. In fact, the two kinds of lights are distributed differently in the spectrum of a linearly polarized image. The backscattered light, which is the main cause of image degradation, is relatively concentrated in the low-frequency components of the spectrum, while the information of the target signal light is mainly distributed in the high-frequency components. In this paper, an underwater polarization imaging method based on polarization image spectrum processing is proposed, which effectively suppresses backscattered light by the frequency domain filtering and polarization correlation processing of orthogonally polarized images and improves the contrast and clarity of underwater images. The method proposed in this paper and the results are of great significance to the research on polarization image enhancement and underwater clear imaging.

**Methods** The proposed method mainly utilizes the spectrum distribution differences between the target signal light and backscattered light. With the help of frequency domain filtering and polarimetric recovery, this method separates and suppresses scattered light in steps and finally achieves high-quality image recovery. First, the cross-linear image in orthogonal polarization images is processed by a high-pass filter, which contains more target information, so as to automatically search for the optimal cut-off frequency of the filter. By extracting high-frequency components, the target signal light and backscattered light are preliminarily separated. With the high-frequency components of the cross-linear image, polarization-related processing is performed on the co-linear image. In fact, there is a polarization relation between the two orthogonal polarization images, which can be represented by the degree of polarization (DOP). In order to maintain this intrinsic polarization relation, it is necessary to keep DOP constant and process the co-linear image based on the high-frequency component of the cross-linear image filtered by the optimal filter. Then the processed orthogonal polarization images are employed to estimate parameters including the DOP of backscattered light, the value of backscattered light from infinity in turbid media, and the transmission based on the improved traditional polarimetric recovery method, and then the recovered image of the target objects in underwater can be finally obtained.

**Results and Discussions** The results of polarization imaging experiments of different objects in water with different turbidity show that the proposed method can efficiently restore the images of target objects and improve the underwater imaging quality. In experiments of the panda-pattern target, search results of the optimal cut-off frequency of each filter are visualized in Fig. 4. By analyzing the intensity histogram at the dash of the result images (Fig. 5), it is found that the proposed method is superior to the Schechner's method. Several methods are used to recover a series of images of another target, and the result shows that the proposed method displays better performance in restoring object details and improving



the overall visual effect (Fig. 6). Meanwhile, according to the value of enhancement measure evaluation function (Fig. 7), the proposed method has achieved the highest value representing the most significant improvement in image quality. Further experiments are carried out to verify the effectiveness of the proposed method for different objects in highly turbid water. Compared with other methods, the proposed method can better suppress scattered light. Therefore, the result images by the proposed method are more evenly illuminated, and the details are clearer (Fig. 8).

**Conclusions** In this paper, in order to obtain clear images, a turbid underwater polarization image enhancement method is proposed based on frequency domain processing and polarization preservation, and the difference between the scattered light and the signal light in the frequency domain is utilized. By applying a high-pass filter on the orthogonal polarization image pair in the frequency domain, the backscattered light concentrated in the low-frequency component is initially separated and removed. Here, the optimal parameters of each filter in different concentrations and scenes are automatically searched to obtain more accurate target object information. Then the polarization degree is maintained to correlate more accurate orthogonal polarization image pairs. Finally, on the basis of the traditional physical model, the images of objects have been successfully recovered. This paper has carried out a series of experiments on different objects in underwater environments with different turbidity, and the results show that the proposed method based on frequency domain processing can effectively suppress the impact of scattered light on polarization imaging and highlight the signal light of objects. Compared with the traditional underwater polarization imaging methods, the proposed method can improve the uneven illumination problem in turbid water and significantly enhance the contrast and clarity of images, especially for highly turbid water.

**Key words** polarimetric imaging; underwater imaging; spectrum; backscattered light