

三自由度偏振差分水下成像技术

胡浩丰, 李嘉琦, 李校博, 刘铁根*

天津大学精密仪器与光电子工程学院光电信息技术教育部重点实验室, 天津 300072

摘要 影响水下成像质量的核心因素是后向散射光的干扰。偏振差分水下成像技术能够显著抑制后向散射光, 是在水下散射环境中获取清晰图像的有效方法。传统的偏振差分方法是基于两个正交偏振方向上的偏振图像进行差分的, 该方法虽然对后向散射光有明显的抑制效果, 但其调制自由度低, 限制了成像质量的进一步提升。针对这一问题, 提出一种改进型偏振差分水下成像方法, 该方法基于两个最优偏振方向的偏振图像进行差分, 并通过引入差分项的权重系数, 最终实现具有三个自由度的偏振差分水下成像。实验结果显示, 该方法相对于传统的偏振差分成像方法, 可更好地抑制后向散射光、凸显物体信号光, 最终实现了更高质量的水下清晰成像。

关键词 散射; 偏振; 后向散射光; 偏振差分; 三自由度

中图分类号 O438

文献标志码 A

doi: 10.3788/AOS202141.0329001

Underwater Polarization Difference Imaging with Three Degrees of Freedom

Hu Haofeng, Li Jiaqi, Li Xiaobo, Liu Tiegeng*

Key Laboratory of Opto-Electronics Information Technology, Ministry of Education, School of Precision Instrument and Opto-Electronics Engineering, Tianjin University, Tianjin 300072, China

Abstract The technology of underwater polarization difference imaging can significantly suppress the backscattered light, the key factor affecting the quality of underwater imaging. Therefore, it is an effective method to obtain clear images in the underwater scattering environment. Traditional polarization difference methods are based on the polarization images at two orthogonal polarization directions and have obvious effects on suppressing the backscattered light. However, the corresponding degree of modulation freedom is low, which limits the further improvement of imaging quality. To solve this problem, we proposed an improved method of underwater polarization difference imaging in this paper. After the difference of polarization images in two optimal polarization directions and the introduction of the weight coefficient for the difference item, this method could realize the underwater polarization difference imaging with three degrees of freedom. The experimental results show that compared with the traditional polarization difference imaging, the proposed method can better restrain the backscattered light, highlight the signal light of the objects, and finally achieve the underwater clear imaging with higher quality.

Key words scattering; polarization; backscattered light; polarization difference; three degrees of freedom

OCIS codes 290.5855; 260.5430; 200.4740; 100.2980

1 引言

在水下环境中, 悬浮的散射颗粒对光场的散射和吸收作用会导致成像清晰度和成像探测距离显著

下降^[1-3]。针对水体散射环境下“看不清、看不远”的问题, 研究和改进光学信息的成像和处理方法, 可以针对性地克服水体环境下的图像退化机制, 实现水体环境中的清晰成像, 这对于国防、海洋、水下救援、

收稿日期: 2020-08-04; 修回日期: 2020-08-29; 录用日期: 2020-09-24

基金项目: 国家自然科学基金(61775163)

* E-mail: tgliu@tju.edu.cn

渔业等多个领域具有极为重要的意义^[4-6]。

在水体散射环境下,后向散射光的干扰是引起图像质量退化的主要原因。后向散射光是部分偏振光^[7-9],基于偏振信息的获取和处理,可有效抑制后向散射光的影响,实现成像质量的显著提升。基于偏振信息的水下成像技术是水下清晰成像的有效方法之一^[10]。其中,偏振差分水下成像技术是一种具有代表性的水下偏振成像方法^[11-12]。该技术基于后向散射光与场景光的偏振性差异,通过获取两个正交偏振方向上的偏振图像,并将其进行差分处理,实现了对后向散射光的共模抑制,从而提高了成像的清晰度^[12]。然而,传统的偏振差分水下成像方法,是将两个偏振方向的夹角固定为 90° ,故其调制自由度较低,成像质量的进一步提升受限^[11]。另一方面,传统的偏振差分水下成像方法,仅关注对于后向散射光的抑制,对物体信号光的考虑较少^[12]。

针对上述问题,本文对偏振差分水下成像技术在成像调制的自由度上进行了改进,提出了三自由度偏振差分水下成像方法。一方面,打破差分偏振图像偏振方向夹角须 90° 的限制,搜寻得到两个最优偏振方向的偏振图像并对其进行差分处理;另一方面,在差分项中引入权重系数,最终实现了具有三个自由度的偏振差分水下成像。本文开展了不同浑浊水体环境下的实验研究,并将所提方法与传统偏振差分水下成像技术进行了对比研究,验证了该方法的有效性和优越性。

2 基本原理

Stokes 矢量常被用于表征光束的偏振状态。在仅考虑线偏振的情况下,为了计算光束的 Stokes 矢量,可通过旋转偏振片角度得到的不同光强图进行计算。假设通过 0° 偏振片的光强为 I_1 ,通过 90° 偏振片的光强为 I_2 ,通过 45° 偏振片的光强为 I_3 ,则这束光的线偏振 Stokes 矢量可表示为^[13-15]

$$\mathbf{S} = \begin{bmatrix} S_0 \\ S_1 \\ S_2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} I_1 + I_2 \\ I_1 - I_2 \\ 2I_3 - I_1 - I_2 \end{bmatrix}。 \quad (1)$$

穆勒矩阵常被用于描述物体的偏振信息。设线偏振片偏振角与水平方向的夹角为 γ ,则偏振片的穆勒矩阵为^[16]

$$\mathbf{M}_p = \frac{1}{2} \begin{bmatrix} 1 & \cos 2\gamma & \sin 2\gamma \\ \cos 2\gamma & \cos^2 2\gamma & \sin 2\gamma \cos 2\gamma \\ \sin 2\gamma & \sin 2\gamma \cos 2\gamma & \sin^2 2\gamma \end{bmatrix}。 \quad (2)$$

当得到一束光的 Stokes 矢量,且已知偏振片的穆勒矩阵时,这束光通过偏振片后的 Stokes 矢量可表示为

$$\mathbf{S}^{\text{out}} = \mathbf{M}_p \cdot \mathbf{S}^{\text{in}}。 \quad (3)$$

因此只要得到场景光的 Stokes 矢量,就可以计算场景光通过任意角度偏振片后的 Stokes 矢量。特别地,该出射光 Stokes 矢量的第一个元素 S_0 即为相机的接收光强。

当相机前偏振片的角度分别旋转至 γ_1 和 γ_2 时,对应得到的两张光强图为

$$\begin{cases} I_{\gamma_1} = \frac{1}{2} [S_0 + S_1 \cos(2\gamma_1) + S_2 \sin(2\gamma_1)] \\ I_{\gamma_2} = \frac{1}{2} [S_0 + S_1 \cos(2\gamma_2) + S_2 \sin(2\gamma_2)] \end{cases}。 \quad (4)$$

与传统偏振差分方法不同,本文所提方法并不限制偏振片两次旋转的角度,故偏振方向的调制具有两个自由度。

在此基础之上,引入差分系数 k ,可得修正后的偏振差分光强为

$$I = kI_{\gamma_1} - I_{\gamma_2}, 0 < k \leq 1。 \quad (5)$$

为了定量地评估图像成像质量,本研究采用图像细节增强评价指标(EME, f_{EME})作为评价函数来评价图像的质量,其表达式为^[16]

$$f_{\text{EME}} = \left| \frac{1}{m_1 m_2} \sum_{l=1}^{m_2} \sum_{m=1}^{m_1} 20 \log \frac{i_{\max; m, l}^{(\omega)}(x, y)}{i_{\min; m, l}^{(\omega)}(x, y) + q} \right|, \quad (6)$$

式中: (m, l) 为图像的横纵两个维度; $m_1 \times m_2$ 为图像的分块数; ω 用于标记每一块的序号,便于区分不同区域; $i_{\max; m, l}^{(\omega)}(x, y)$ 和 $i_{\min; m, l}^{(\omega)}(x, y)$ 表示第 ω 块中的最大光强和最小光强; q 为一个非常小的常数,以避免(6)式中分母出现为 0 的情况,本文中取 1×10^{-8} ,该操作不影响 EME 的计算结果。由(6)式计算出的 EME 值越高,图像质量越好。

为使图像效果最佳,偏振片的两个角度和系数 k 应满足图像的 EME 值最大化,即

$$(\gamma_{1\text{opt}}, \gamma_{2\text{opt}}, k_{\text{opt}}) = \underset{(\gamma_{1\text{opt}}, \gamma_{2\text{opt}}, k_{\text{opt}})}{\arg} \max \{f_{\text{EME}}(I)\}。 \quad (7)$$

基于(7)式搜寻得到偏振片的两个角度和系数 k 的最优值后,根据(4)式计算得到偏振片的两个最优旋转角度对应的图像,最后基于(5)式可得最优的偏振差分图像。

3 结果与讨论

本研究的水下偏振成像装置如图 1 所示。目标被放在一个装满水的透明有机玻璃水缸中。浑浊水体由清水和牛奶混合产生。本研究使用中心波长为 630 nm 的发光二极管(LED)作为照明光源。光源产生的光经过偏振角为 0° 的偏振片-1, 被调制为水

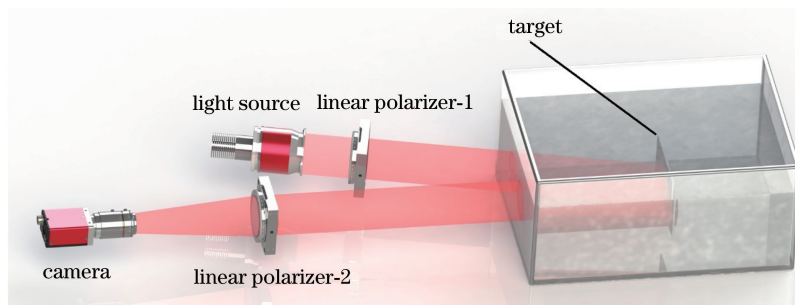


图 1 三自由度偏振差分水下成像实验装置图

Fig. 1 Experimental setup of three-degree of freedom polarization difference underwater imaging

基于图 1 的实验装置, 首先开展牛奶质量浓度为 2.75 g/L 的浑浊水体环境下的实验研究。基于对浑浊水体环境下场景光 Stokes 矢量的测量, 根据(7)式, 以获得 EME 的最大值为目标, 搜寻得到该实验条件下偏振片-2 的两个最佳角度和差分系数 k 的最优值 $(\gamma_{1opt}, \gamma_{2opt}, k_{opt}) = (-1.533^\circ, 84.648^\circ, 0.284)$ 。两个最佳角度以及差分系数 k 是由场景和背向散射光共同决定的, 在场景或背向散射光发生变化时, 最佳角度和差分系数的值都会发生改变。其改变数值由场景和背向散射光的偏振特性的变化量共同决定。另外, 场景与背向散射光的偏振特性相差越大, 偏振差分得到的

平方向的偏振光照射目标物, 反射的光经由偏振片-2 进入相机。通过旋转放置于相机前的偏振片-2, 可获得三个不同偏振角度的光强图, 从而得到场景光的线偏振 Stokes 矢量, 最后基于此矢量进行偏振差分成像计算。本实验中采用相机的型号为 AVT Stingray F-033B, 拍摄照片像素数为 492×656 。

结果越好。

为了展示图像质量与偏振片-2 的两个最优角度和差分系数 k 的关系, 绘制了 $k=0.284$ (最优值) 与 $k=1$ (传统差分方法的系数) 时图像 EME 值随偏振片角度 γ_1 和 γ_2 变化的曲线, 如图 2 所示。从图 2(a) 可以看到, 在 $k=0.284$ 时, 图像 EME 的高值区域更多, 并且可以在 $(\gamma_{1opt}, \gamma_{2opt}) = (-1.533^\circ, 84.648^\circ)$ 时达到最大值 7.356。而对于传统的偏振差分成像方法, $k=1$, 此时图像整体的 EME 值较低, 如图 2(b) 所示。上述现象说明在不同的系数 k 下, 图像质量有着较大的差距, 因此合理地调整 k 值可显著提升偏振差分图像质量。

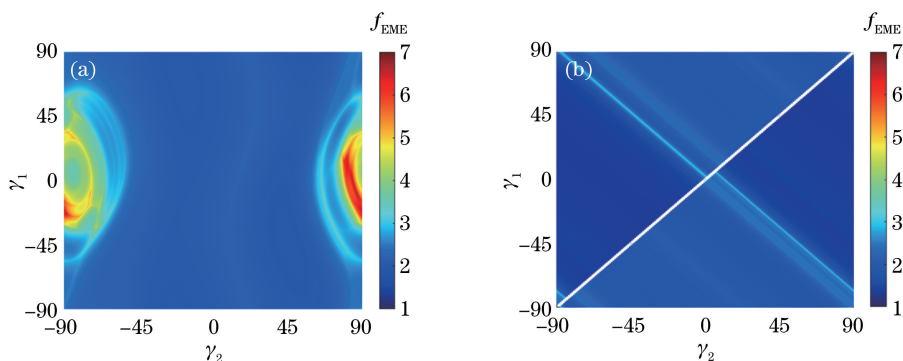


图 2 不同 k 值下 EME 随两个差分偏振图像偏振角度变化图。(a) $k=0.284$; (b) $k=1$

Fig. 2 EME values vary with the angle of polarization at different values of k . (a) $k=0.284$; (b) $k=1$

保持偏振片角度不变、场景不变, 对不同系数 k 的差分图像进行对比, 结果如图 3 所示。从图中可以看出, 当系数 k 为最优值 0.284 时, 差分方法得到的图像相较其他系数 k 值对应的图像而言, 图像质

量得到了较大的提升, 清晰度更高, 这说明系数 k 对偏振差分方法的影响较大。

基于获得的系统最优参数 $(\gamma_{1opt}, \gamma_{2opt}, k_{opt}) = (-1.533^\circ, 84.648^\circ, 0.284)$, 由(4)式和(5)式可以

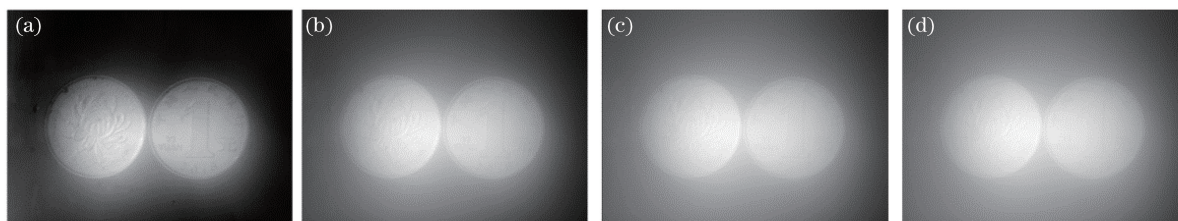


图 3 同差分角度不同 k 值下偏振差分图。(a) $k=0.284$; (b) $k=0.5$; (c) $k=0.75$; (d) $k=1$

Fig. 3 Polarization difference images processed at different values of k . (a) $k=0.284$; (b) $k=0.5$; (c) $k=0.75$; (d) $k=1$

计算得出三自由度偏振差分图像,如图 4(b)所示。图 4(a)是浑浊水下的原始光强图,图 4 中所有图片均为此浑浊度下的处理结果,图 4 所有子图的光照条件、拍摄距离与相机分辨率一致。对比图 4(a)和图 4(b)可以看出,本文所提方法可显著提升水下成像的质量,具体表现为背景处灰度值较低,由此表明后向散射光去除效果明显;同时,在硬币背面的花图案和硬币正面的汉字的复原方面,相较原始光强图,

三自由度偏振差分水下成像方法计算得出的图像的细节更加清晰,我们能清楚看到硬币的花纹路和汉字内容。此外,将本文方法与两种传统差分方法(光强差分方法^[11]和朱京平教授课题组差分方法^[12])进行比较,两种传统差分方法的结果见图 4(c)和图 4(d)。通过比较,可以看到,本文所提方法相较传统偏振方法图像更加清晰,物体的细节信息更加明显,同时在去除后向散射光方面将做得更好。

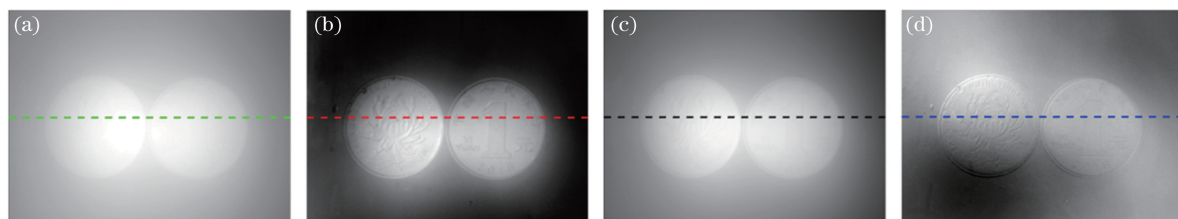


图 4 不同方法处理效果图。(a)原始光强图;(b)三自由度偏振差分图;
(c)光强偏振差分方法结果^[11];(d)朱京平教授课题组偏振差分方法结果^[12]

Fig. 4 Images processed by different methods. (a) Raw image; (b) image processed by our method;
(c) image processed by intensity difference method; (d) image processed by Zhu's method

此外,图 5 中亦给出图 3 中各个图像虚线部分处的光强值分布曲线。由曲线图可以看出,相较其他图像,本文所提方法的强度峰值值相差较大,同时在硬币细节处的像素分布表现出更大的波动性,在图像中表现出更高的对比度和更清晰的细节。

为了定量评价图像质量,表 1 给出了图 4 中各个图像对应的 EME 值。另外,引入标准差(STD)^[17]作为图像质量的另一判据,以更全面地定

量评价图像质量。从表 1 可以看出,本文所提方法在 EME 和 STD 上均明显高于其他方法,这说明该方法得到的图像质量相对于其他方法有较大的提升,这与图 4 中本方法复原结果对比度更高、细节更加清晰的定性视觉判别结果相吻合。

表 1 不同量化指标评价图像质量

Table 1 Comparative analysis of different methods based on quantitative criterions

Method	EME	STD
Our method	7.356	0.260
Intensity difference method	1.354	0.198
Zhu's method	2.075	0.193
Raw image	0.744	0.143

为了进一步验证所提方法的有效性,还开展了不同浑浊度水体环境下的实验研究,并与两种传统方法进行了对比。分别使用浓度相对较低的牛奶(质量分数为 2.30 g/L)和浓度较高的牛奶(质量分数为 3.21 g/L),构造了不同的浑浊水体环境,相应实验结果如图 6 所示。图 6(a)和图 6(b)分别为较

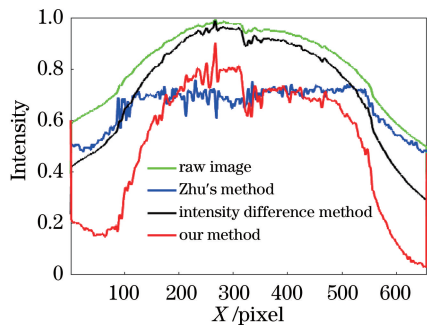


图 5 不同方法图划线处光强值分布曲线

Fig. 5 Intensity distribution at the scribe line

低和较高浓度牛奶原始光强图、三自由度偏振差分结果图以及两种传统方法处理结果图。可以看出,无论在低浑浊度和高浑浊度的水体环境下,三自由

度偏振差分法均有较好的图像质量,在硬币的细节凸显和后向散射光的去除方面效果提升显著,图像清晰度大幅提升。

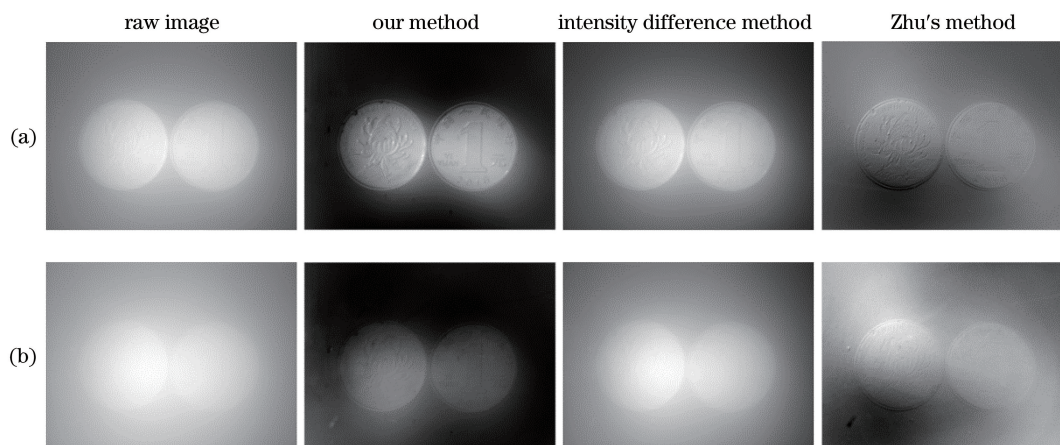


图 6 不同浑浊度水体原始光强图与不同偏振差分方法效果图。(a)低浑浊度图;(b)高浑浊度图

Fig. 6 Raw images and images processed by different methods with different turbidity. (a) Images with low turbidity;

(b) images with high turbidity

4 结 论

针对传统偏振差分水下成像技术中调制自由度低、复原效果受限这一关键问题,开展了三自由度偏振差分水下成像技术的研究。通过增加两个偏振差分图像偏振方向的自由度,以及引入差分权重系数这一自由度,实现了具有三个全自由度的偏振差分水下成像方法。开展了在不同浑浊程度水体环境下的实验研究,并对成像质量进行了定性和定量分析。结果表明,本文方法相对于传统的偏振差分方法,可更好地抑制后向散射光,凸显物体的信号光,实现目标物细节信息的清晰获取,最终实现水下成像质量的进一步提升。

考虑到本文的优化方法未讨论圆偏振光对复原效果的影响,引入圆偏振光照明和圆偏振器件解析全 Stokes 矢量^[9],进一步扩大偏振差分系统的可调自由度,是未来工作的一个重要研究方向。

参 考 文 献

- [1] Bailey G N, Flemming N C. Archaeology of the continental shelf: marine resources, submerged landscapes and underwater archaeology [J]. Quaternary Science Reviews, 2008, 27 (23/24): 2153-2165.
- [2] 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.
- [3] 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.
- [4] 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.
- [5] Liang J, Ren L Y, Qu E S, et al. Method for enhancing visibility of hazy images based on polarimetric imaging [J]. Photonics Research, 2014, 2(1): 38-44.
- [6] Liu F, Han P, Wei Y, et al. Deeply seeing through highly turbid water by active polarization imaging [J]. Optics Letters, 2018, 43(20): 4903-4906.
- [7] 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.
- [8] Li N, Zhao Y Q, Pan Q, et al. Removal of reflections in LWIR image with polarization characteristics [J]. Optics Express, 2018, 26(13): 16488-19504.
- [9] Hu H F, Zhao L, Li X B, et al. Polarimetric image recovery in turbid media employing circularly

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.

- polarized light[J]. Optics Express, 2018, 26(19): 25047-25059.
- [10] Tian H, Zhu J P, Tan S W, et al. Rapid underwater target enhancement method based on polarimetric imaging[J]. Optics & Laser Technology, 2018, 108: 515-520.
- [11] Schechner Y Y, Narasimhan S G, Nayar S K. Polarization-based vision through haze[J]. Applied Optics, 2003, 42(3): 511-525.
- [12] Guan J G, Zhu J P, Tian H, et al. Real-time polarization difference underwater imaging based on Stokes vector[J]. Acta Physica Sinica, 2015, 64(22): 224203.
管今哥, 朱京平, 田恒, 等. 基于 Stokes 矢量的实时偏振差分水下成像研究[J]. 物理学报, 2015, 64(22): 224203.
- [13] Li H Y, Li C, Li X B, et al. Optimization of polarization-camera-based full Stokes polarimeter[J]. Acta Optica Sinica, 2020, 40(3): 0326001.
黎海育, 李抄, 李校博, 等. 基于偏振相机的全斯托克斯偏振仪优化研究[J]. 光学学报, 2020, 40(3): 0326001.
- [14] Mu T K, Bao D H, Han F, et al. Optimized design, calibration, and validation of an achromatic snapshot full-Stokes imaging polarimeter[J]. Optics Express, 2019, 27(16): 23009-23028.
- [15] Gao J, Bi R, Zhao L J, et al. Global optimized hazed image reconstruction based on polarization information[J]. Optics and Precision Engineering, 2017, 25(8): 2212-2220.
高隽, 毕冉, 赵录建, 等. 利用偏振信息的雾天图像全局最优重构[J]. 光学精密工程, 2017, 25(8): 2212-2220.
- [16] 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.
- [17] Li X, Hu H, Zhao L, et al. Polarimetric image recovery method combining histogram stretching for underwater imaging[J]. Scientific Reports, 2018, 8(1): 12430.