

文章编号 1004-924X(2024)10-1443-13

## 实时输出视频的水下主动偏振成像

吴厚德, 翟予峥\*, 王洪昌, 李持尧, 郭睿琦

(大连海事大学 信息科学技术学院, 辽宁 大连 116026)

**摘要:**针对在水下主动偏振成像方法中,需要机械旋转相机前的检偏器获取正交偏振态图像,导致无法实时输出去后向散射视频的问题,提出了实时输出视频的水下主动偏振成像方法。首先,本方法将正交偏振切换位置从相机端更换到光源端,而相机端的检偏器偏振状态保持不变,并论证了此改变并不影响去后向散射的效果;然后,设计了阵列正交偏振光源,即光源由偏振态正交的两组 LED 灯珠交错排列组成,通过独立的驱动电路分别控制两组灯珠,输出偏振态正交的偏振光,从硬件上取消了偏振态切换的机械结构;第三,设计了同步控制装置,分别控制光源输出的偏振态和相机拍照,实现了正交偏振态图像数据的采集;最后,通过流水线式主动偏振图像处理方法,实现实时的视频输出。实验结果表明,本方法可以实时输出去后向散射视频,且在去后向散射性能上,与机械式主动偏振成像方法性能接近,两者去后向散射性能的背离度均低于 4%,图像 EME 值增长倍数最大可达 17.96。本方法具有结构简单、成本低、输出帧频不受影响以及相机选择性多等优点,能够广泛应用在水下成像领域。

**关键词:**主动偏振成像;去后向散射;阵列正交偏振光源;实时视频

**中图分类号:** TP394.1; TH691.9 **文献标识码:** A **doi:** 10.37188/OPE.20243210.1443

## Real-time video output method for underwater active polarization imaging

WU Houde, ZHAI Yuzheng\*, WANG Hongchang, LI Chiyao, GUO Ruiqi

(College of Information Sciences and Technology, Dalian Maritime University, Dalian 116026, China)

\* Corresponding author, E-mail: zyz\_9937@dlnu.edu.cn

**Abstract:** In the underwater active polarization imaging method, it is necessary to mechanically rotate the polarizer in front of the camera to obtain the orthogonal polarization state images, which makes it difficult to output the de-backscattering video in real time. The method of real-time video output method for underwater active polarization imaging was proposed. Firstly, the orthogonal polarization switching position was changed from the camera side to the light source side, while the polarization state of the analyzer at the camera end remained unchanged, and it was proved that this change did not affect the effect of de-backscatter. Then, the arrayed orthogonal polarization light source was designed. The light source was composed of two groups of LED lamp beads with orthogonal polarization. The two groups of LED lamp beads were controlled by an independent drive circuit to output polarized light with orthogonal polarization state, and the mechanical structure of polarization state switching was eliminated from the hardware. Third, a syn-

收稿日期:2024-01-05;修订日期:2024-02-21.

基金项目:中央高校基础研究基金资助项目(No. 3132019340, No. 3132019200);中华人民共和国工业和信息化部高新技术船舶研究项目(No. MC-201902-C01)

chronous control device was designed to control the polarization state of the light source output and the camera to take pictures, which realized the acquisition of orthogonal polarization state image data. Finally, the pipelined active polarization image processing method was used to realize real-time video output. The experimental results show that the proposed method can output the de-backscattering video in real time, and the performance of the de-backscatter is close to that of the mechanical active polarization imaging method. The deviation degree of the de-backscattering performance of the two methods is less than 4%, and the improvement factor of the image EME value is up to 17.96. This method has the advantages of simple structure, low cost, no influence on output frame rate, and wide selectivity of the camera, and can be widely used in the underwater imaging field.

**Key words:** active polarization image; de-backscatter; arrayed orthogonal light source; real-time video

## 1 引言

水下光学成像在海底资源勘探、海洋生物监测、水下考古<sup>[1-3]</sup>等工程领域展现了各种应用价值。然而,由于海水对光的吸收和散射<sup>[4]</sup>,目标经常被淹没在后向散射中,导致图像的对比度显著下降,从而削弱了对水下目标的探测和识别能力。因此,有效抑制后向散射来获取高质量的图像一直是一项研究难点。目前,从光学角度来看,已经提出了多种有效抑制后向散射的方法,包括偏振成像、激光同步扫描成像<sup>[5]</sup>、距离选通成像<sup>[6]</sup>和图像增强<sup>[7]</sup>等。

与这些方法相比,偏振成像因其结构简单、易于实现和对比度增强明显等优势受到了广泛关注。现阶段,水下偏振成像的研究包括以下几点。第一是对参数的估计,如透射率和偏振度<sup>[8-10]</sup>。克服了图像颜色失真和高偏振物体恢复困难的问题。二是对光源特性的分析。探讨了线偏振光和圆偏振光、不同光源波长以及点光源引起的光场分布不均匀对水下偏振成像恢复的影响<sup>[11-13]</sup>。最后是通过增加约束条件来修改偏振成像模型<sup>[14]</sup>。实现了无先验参数的目标恢复<sup>[15-16]</sup>。这些方法在图像质量上有着明显的改善,但是它们都存在着共同的问题。那就是在获取正交偏振态图像的过程中,不可避免地需要旋转相机前面的检偏器。导致正交偏振态图像的获取时间非常长,往往为秒级。这导致其只能对相对静止的目标进行成像,无法实时输出视频。

为了解决偏振成像的实时性,提出了一种基于斯托克斯矢量计算的实时偏振水下成像方法<sup>[17]</sup>。索尼推出的偏振图像传感器通过斯托克

斯分量获取目标偏振信息。虽然可以实时偏振成像,但是传感器的像元尺寸小、进光量低以及灵敏度低的缺点,主要用于工业领域<sup>[18]</sup>,难以广泛应用于水下环境。

基于以上不足,提出了实时输出视频的水下主动偏振成像方法。本方法使用阵列正交偏振光源代替传统光源与起偏器的组合,分时输出偏振态正交的偏振光,再结合相机前方向固定的检偏器,就可以快速地获取正交偏振态图像。取代了机械旋转偏振片的过程,实现了全固态结构。之后通过流水线式主动偏振图像处理方法,可以有效地去除后向散射,输出帧率不受影响的去后向散射视频,让主动偏振成像方法在海洋工程中得到应用。

## 2 方法

本文提出了一种新的水下主动偏振成像方法,克服了其实时性差、无法实际应用的问题。本方法继承了主动偏振成像的理论模型,设计了新的光源结构,实现了水下去后向散射视频的实时输出。该方法侧重于主动偏振成像方法的实际应用,而不是改进图像去后向散射算法。

### 2.1 主动偏振成像

#### 2.1.1 主动偏振成像模型

由于海水对自然光的强吸收,人工光源在水下打捞、水产养殖和海洋研究等方面的应用愈发广泛。图1为水下光学成像的模型图。由于光在水中传播时,受到介质微粒的作用,即水自身及其悬浮粒子所引起的散射。因此在水下成像中,相机接收的图像由多个分量组成,其中包含目标

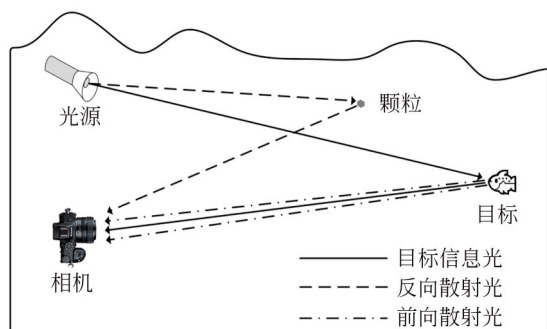


图 1 水下光学成像模型

Fig. 1 Underwater optical imaging model

信息分量、后向散射分量和前向散射分量<sup>[19]</sup>。相较于前向散射造成的模糊,后向散射引起的水下图像对比度下降和可视距离缩减是图像质量下降的主要原因。因此在忽略前向散射的影响下,水下成像模型可以简化为等式(1):

$$I(x, y) = S(x, y) + B(x, y), \quad (1)$$

其中: $I(x, y)$ 为获取的图像分量, $S(x, y)$ 为衰减后的目标信息分量, $B(x, y)$ 为后向散射分量。

传统的主动偏振成像方法可以有效地消除后向散射对图像质量的影响<sup>[20]</sup>。在该方法中,光源前的起偏器用来改变光的偏振状态,相机前的检偏器用来检测光的偏振状态。由于后向散射保持了大量的偏振态,当旋转检偏器的方向与后向散射偏振方向平行时,可以得到后向散射量最多的图像,定义为最亮图像 $I_{\max}$ 。同样地,当两个方向垂直时,可以获得后向散射量最小的图像,定义为最暗图像 $I_{\min}$ 。利用目标与后向散射偏振特性的差异,对采集的正交偏振态图像进行处理,有效消除后向散射对图像质量的影响。等式(2)和等式(3)可以表示传统的主动偏振成像模型<sup>[20]</sup>:

$$O(x, y) = \frac{I_{\min}(x, y)(1 + p_{\text{back}}) - I_{\max}(x, y)(1 - p_{\text{back}})}{e^{-cz}(p_{\text{back}} - p_{\text{obj}})}, \quad (2)$$

$$B(x, y) = \frac{I_{\max}(x, y)(1 - p_{\text{obj}}) - I_{\min}(x, y)(1 + p_{\text{obj}})}{p_{\text{back}} - p_{\text{obj}}}, \quad (3)$$

其中: $O(x, y)$ 为目标信息分量, $B(x, y)$ 为后向散射分量, $p_{\text{obj}}$ 为目标偏振度, $p_{\text{back}}$ 为后向散射偏

振度, $c$ 为衰减系数, $z$ 为系统到目标的距离。

偏振度是影响去除后向散射效果的关键因素之一,目标偏振度和后向散射偏振度可用等式(4)和等式(5)表示:

$$p_{\text{obj}} = \frac{S_{\max}(x, y) - S_{\min}(x, y)}{S_{\max}(x, y) + S_{\min}(x, y)}, \quad (4)$$

$$p_{\text{back}} = \frac{B_{\max}(x, y) - B_{\min}(x, y)}{B_{\max}(x, y) + B_{\min}(x, y)}, \quad (5)$$

其中: $S_{\max}(x, y)$ 为最亮图像下的目标值, $S_{\min}(x, y)$ 为最暗图像下的目标值; $B_{\max}(x, y)$ 为最亮图像下的后向散射值, $B_{\min}(x, y)$ 为最暗图像下的后向散射值。

后向散射的偏振度在整个成像区域是均匀稳定的,因此可在无目标的背景处选取一块区域通过求均值获得。目标的偏振度可考虑目标是部分偏振的,取目标的偏振度为0~1之间的微小量,并直接代入。

尽管主动偏振成像方法在去除后向散射对图像质量的影响方面表现出良好的效果。但由于水体和目标的实时运动,机械旋转检偏器会导致图像采集的间隔时间较长。因此仅适用于拍摄静态目标,否则会导致图像信息差异明显,影响最终恢复效果,无法实时输出视频。综上所述,机械旋转装置是导致主动偏振成像方法难以实际应用的根本原因。

### 2.1.2 机械旋转装置的替代方案

#### (1) 成像光路互易性分析

在主动偏振成像方法中,最亮图像定义为当起偏器和检偏器偏振方向相同时的图像。最暗图像被定义为当起偏器和检偏器偏振方向相互垂直时的图像。图像的亮度实际上取决于起偏器和检偏器之间的相对偏振夹角。根据成像光路的互易性,光源的光场与相机的视场重合。因此,如果光源和相机的位置保持不变,并且检偏器的偏振方向固定。旋转起偏器让光源发出偏振态正交的偏振光,同样可以获得与旋转检偏器时相一致的最亮和最暗图像。因此在获取正交偏振态图像的方式上,旋转光源端的起偏器与旋转相机端的检偏器是等价的。这种修改不影响主动偏振成像方法中去除后向散射的有效性。在主动偏振成像方法中,理论上已经表明,通过旋转起偏器或检偏器都可以获得正交偏振态图

像<sup>[20]</sup>。后面的实验也验证了这一结论的正确性。

## (2) 光源偏振态的分离

无论是旋转起偏器还是检偏器,机械旋转所带来的问题并未得到很好地解决。但若用两个光源让其偏振态分离,一个发出与检偏器偏振方向相平行的偏振光,另一个发出与检偏器偏振方向相垂直的偏振光,就保证了光源发出正交偏振光的同时,取消了机械旋转的结构。由于需要确保两个光源的光场分布一致,理想情况下应使用无限靠近的点光源,但实现这种情况非常困难。因此,保证两种光源的光场分布均匀性是解决上述问题的核心关键所在。

## (3) 光场分布均匀性提升方法

提升光场分布均匀的方法主要有以下五个要点。第一,每个偏振态需要由多个LED灯珠构成,以达到更均匀的光场分布;第二,每个偏振态需要使用独立的LED驱动电路,以保证电流一致,发光亮度一致;第三,每个灯珠的前面放置规定偏振方向的偏振片,以控制光的偏振状态;第四,每个灯珠前面的偏振片要从同一个偏振片上剪切下来,保证其一一致性。第五,不同偏振态的灯珠交错排列,以增强两组灯珠之间光场分布的一致性。

### 2.1.3 系统介绍

基于上述分析,本文提出了实时输出视频的水下主动偏振成像方法。系统设计如图2所示,包括一个相机和一个位于相机上方的阵列式正交偏振光源,相机与光源通过开关控制电路相连接,相机前放置一个固定方向的检偏器。开关控制电路可以控制阵列正交偏振光源交替发射平行和垂直于检偏器偏振方向的偏振光,并输出控制信号触发相机拍照。相机与阵列正交偏振光源同步工作,不断采集最亮和最暗图像。然后,

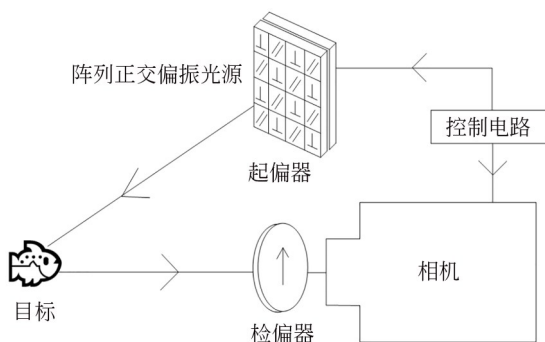


图2 系统设计

Fig. 2 System design

通过流水线式主动偏振图像处理方法,实时输出去后向散射视频,实现主动偏振成像方法在海洋工程中的实际应用。

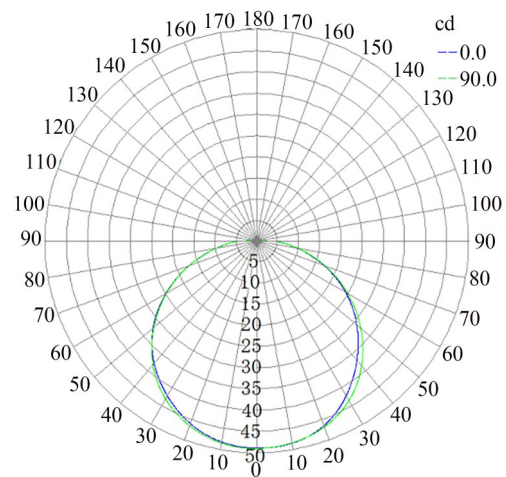
## 2.2 阵列正交偏振光源设计

阵列正交偏振光源由空分交错起偏阵列和LED灯珠阵列组成。LED灯珠阵列由行数和列数均为偶数的灯珠所组成,可由下述矩阵(6)表示:

$$\begin{bmatrix} (1,1) & (1,2) & \cdots & (1,N) \\ (2,1) & (2,2) & \cdots & (2,N) \\ \vdots & \vdots & (i,j) & \vdots \\ (M,1) & (M,2) & \cdots & (M,N) \end{bmatrix}_{M \times N}, \quad (6)$$

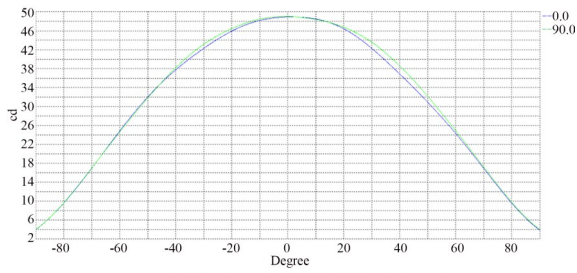
其中: $i$ 为灯珠在阵列中的行号, $j$ 为灯珠在阵列中的列号, $M$ 为灯珠阵列的行数, $N$ 为灯珠阵列的列数。

为等效于机械旋转方式中的光源,阵列正交偏振光源的均匀性包括两个方面。首先是阵列规格对均匀性的影响,其次是两组光源均匀性的一致性。在光学软件(TracePro)中对未经过二次光学设计的裸灯珠进行了建模。LED的发光面是 $1.35 \text{ mm} \times 1.35 \text{ mm}$ 的正方形,发射形式为光通量,单位为光度学,场角分布为朗伯发光场型,发光角度为 $120^\circ \sim 140^\circ$ ,光通量为 $160 \text{ lm}$ 。在追迹过程中,使用十万条光线。为生成LED表面材质特性,结合了实验所采用的LED灯珠说明书中的辐射方向图和相对发光效率曲线图。如图3所示,为不同坐标系下模拟的LED灯珠candela分布图。



(a) 极坐标系下的坎德拉分布图

(a) Candela distribution map in the polar coordinate system



(b) 直角坐标系下的坎德拉分布图

(b) Candela distribution map in the right-angle coordinate system

图 3 不同坐标系下模拟的坎德拉分布图

Fig. 3 Simulated Candela distribution in different coordinate systems

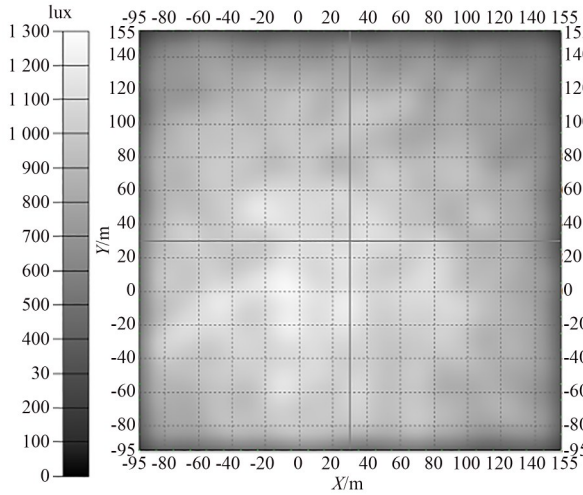
生成 LED 表面材质特性后,利用 TracePro 对不同规格的 LED 阵列光源的光照强度分布进

行了模拟,相邻灯珠的距离设定为 10 mm。此过程中,设定接受面与 LED 阵列光源之间的距离为 300 mm,接收面为 250 mm×250 mm 的正方形,平滑程度为 20。同时,使用等式(7)计算不同阵列规格光源的均匀性<sup>[21]</sup>:

$$u = \left( 1 - \frac{L_{\max} - L_{\min}}{L_{\max} + L_{\min}} \right) \times 100\%, \quad (7)$$

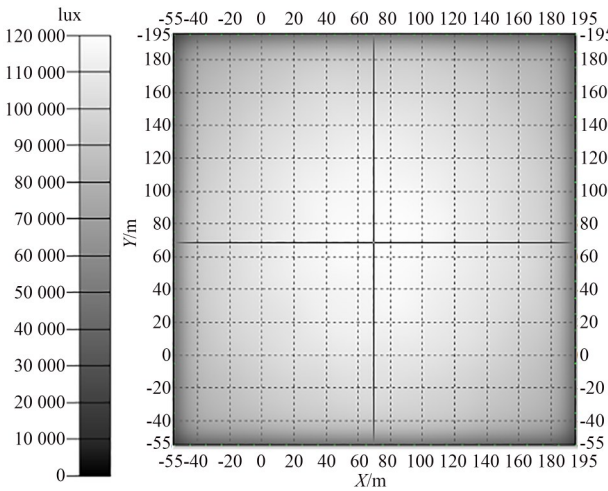
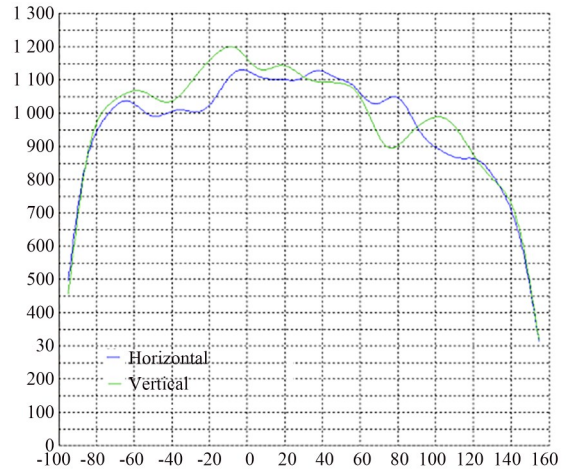
其中: $L_{\max}$ 是接收面上照度的最大值, $L_{\min}$ 是接收面上照度的最小值。计算的百分比值越大,均匀性越好。

在 TracePro 软件上,模拟了行数从 1 到 15 的 LED 方形阵列(除第一组),记录了每组模拟结果中的最大照度值和最小照度值,计算了每组的均匀性。在图 4 中分别展示了 2×1 和 15×15 LED



(a) 2×1阵列

(a) 2×1 array



(b) 15×15阵列

(b) 15×15 array

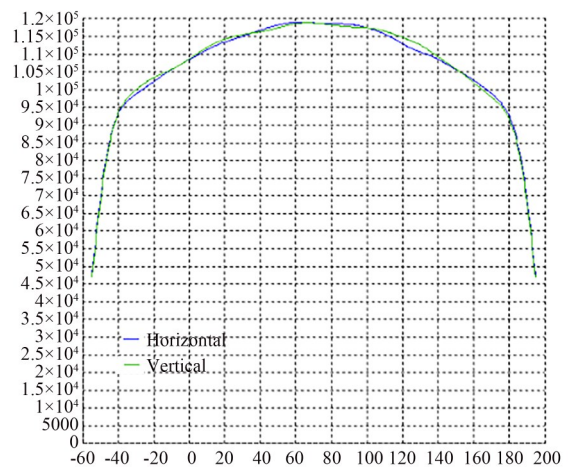


图 4 不同规格光源的照明分布

Fig. 4 Distribution of illumination of different specifications of light sources

阵列光源的光强分布。在每组图像中,接收表面上的照度分布绘制在左侧,轮廓曲线绘制在右侧。

通过计算不同规格阵列光源的光度均匀性,在有效光斑范围内,均匀性由 50.37% 提高到 56.91%。结果表明,随着阵列结构规模的增大,光场分布的均匀性逐渐增强。需要注意的是,由于此次是对未经过二次光学设计的裸灯珠所建模,光场的均匀性理论上可能更好,但仍然能够证明阵列光源可以有效解决光场分布不均的问题。

空分交错起偏阵列具有与 LED 灯珠阵列相同的结构,其奇数行奇数列和偶数行偶数列处放置与检偏器偏振方向相互垂直的偏振片,奇数行偶数列和偶数行奇数列处放置与检偏器偏振方向相互平行的偏振片。将规定偏振方向的偏振片放置在 LED 灯珠的前面,使不同偏振态的 LED 灯珠交错排列。交错排列结构提高了两组灯珠光场分布的一致性。此外,由于偏振片仅改变了光的偏振特性,所以只需要保证偏振片本身是均匀的,就不会影响光强的分布。

对于空分交错起偏阵列,不仅要保证偏振片本身的均匀性,还要保证每个 LED 灯珠前面的偏振片的均匀性是一致的。因此,空分交错起偏阵列必须满足以下要求。首先,每个偏振单元需要来自相同的均匀偏振片或偏振玻璃,以确保它们具有相同的光学特性。第二,在偏振片切割的过程中,需要注意应力对每个偏振单元的影响,以保证每个偏振单元的特性不被改变。第三,在安装偏振片时,需要考虑安装时的误差,保证平行偏振片相互平行,正交偏振片相互垂直。

为确保两组偏振灯珠光场均匀性一致,选用具有相同参数的灯珠,并采用串联的电路结构来连接相同偏振态的灯珠,同时使用独立的 LED 驱动电路,以保证两路灯珠所通过的电流大小一致,从而保证两组灯珠的亮度一致。电路设计框图如图 5 所示。

恒流模块用于输出恒定的电流,通过调节反馈模块中电位器的阻值来改变电流值的大小,从而改变光源的亮度。控制模块用于输出控制信号,以控制开关模块中两个场效应管的开启和关闭,使光源交替输出偏振态正交的偏振光。

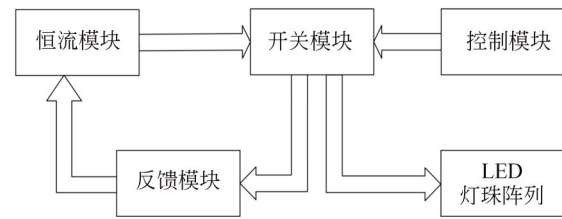


图 5 LED 驱动电路设计框图

Fig. 5 LED driver circuit design block diagram

通过两组灯珠交错排列的阵列结构,使阵列正交偏振光源等效于单个光源的机械旋转,取消了机械旋转装置,实现了全固态结构,是主动偏振成像方法得以实际应用的关键。

### 2.3 图像采集器设计

本文采用海康威视 CMOS 相机(型号为 MV-CA023-10UM)进行正交偏振态图像的采集,相机的具体规格参数详见表 1。将相机设置为硬触发采集模式,并通过光耦隔离线输入外部信号来触发相机拍摄,曝光时间等参数也提前在软件中设置。

表 1 相机参数

Tab. 1 Camera parameters

参数	数值
传感器型号	Sony IMX249
像素尺寸	5.8 $\mu\text{m}$ $\times$ 5.8 $\mu\text{m}$
分辨率	1 920 $\times$ 1 200
快门类型	全局快门
数据接口	USB3.0
镜头接口	C-Mount
焦距	12 mm
相对孔径	F2.0-F22

在主动偏振成像方法中,由于机械结构的限制,正交偏振态图像采集的时间间隔通常为秒量级,这极大地限制了该方法的实时性能。将采集的时间间隔缩小到视频帧周期  $T_{\text{video}}$ ,在时间上提高了几个数量级,大大增强了实时性。然而,由于主动偏振成像方法在时间间隔方面的共性问题。这种方法对于高运动速度的目标仍然会有误差,可以通过提高相机帧率来缓解这种需求。同时,对于相机曝光时间  $T_{\text{camera}}$ ,帧周期  $T_{\text{video}}$  确定其最大值,光源的开/关时间  $T_{\text{source}}$  确定其最小值。

本方法具有相机选择不受限的优点,因此带有同步输出的拍照和摄像系统也可以与之应用。相机的传感器类型也可以根据实际的应用情况进行多种选择,可以是科学级互补型金属氧化物半导体图像传感器(sCMOS)、电子倍增电荷耦合器件(EMCCD)、像增强型电荷耦合器件(ICCD)等。

#### 2.4 同步控制设计

光源与相机的同步是连续获取正交偏振态图像的关键,采用ESP32单片机实现对两者的控制与同步,将I/O引脚与光源开关模块上的接口以及相机的光耦隔离输入线相连接,单片机上的独立按键作为系统的开关。当按下按键时,单片机输出控制信号至阵列正交偏振光源驱动电路中的开关模块,从而点亮垂直偏振态的灯珠,熄灭平行偏振态的灯珠。随后单片机输出控制信号至相机,触发相机拍摄,从而获取最暗图像。接着,单片机输出控制信号点亮平行偏振态的灯珠,熄灭垂直偏振态的灯珠,并再次触发相机拍摄,从而获取最亮图像。不断循环上述流程,直至再次按下按键时结束。通过上述方式对光源与相机的同步控制,实现对正交偏振态图像的连续获取。

#### 2.5 去后向散射生成方法

在获取正交偏振态图像后,采用流水线式主动偏振图像处理输出后向散射序列。图6为流水线式主动偏振图像处理的过程,上行为相机不断采集的正交偏振态图像,下行为去后向散射图像。这种方法可由等式(8)表示:

$$O_i = \begin{cases} \frac{I_i(1+p_{\text{back}}) - I_{i+1}(1-p_{\text{back}})}{e^{-cz}(p_{\text{back}} - p_{\text{obj}})}, & i \text{ 为奇数} \\ \frac{I_{i+1}(1+p_{\text{back}}) - I_i(1-p_{\text{back}})}{e^{-cz}(p_{\text{back}} - p_{\text{obj}})}, & i \text{ 为偶数} \end{cases} \quad (8)$$

流水线处理方式以传统主动偏振成像算法为基础,将当前帧和上一帧进行图像处理,即最

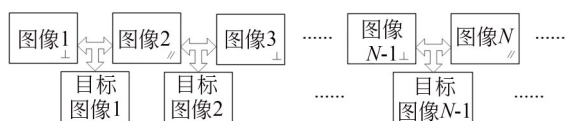


图6 流水线式主动偏振图像处理方法

Fig.6 Pipelined active polarization image processing method

亮与最暗图像间,输出后向散射图像序列。此方式具有不影响输出视频帧数的优势,即能够输出与相机同样帧数的视频。现存的主动偏振成像方法在处理速度满足的情况下,也可以与此系统相结合,具备较强的实用性。

对于偏振度的确定,结合不同的物体预设不同的目标偏振度。除少部分高偏振度物体,大部分物体的偏振度近似,对图像的恢复效果影响很小。后向散射偏振度的估计,由光源与相机的摆放位置决定。此系统中光源与相机为上下位置关系,因此设定图像正上方居中的矩形位置用于估计后向散射偏振度。

不同浊度的海水具有不同的衰减系数,对于衰减系数的确定,首先将 $c$ 的起始值设置为0.1,并以0.1为步长递增。在每次图像处理后,将当前帧去后向散射图像的EME值与上一帧的EME值进行比较。通过这样的循环方式,最终在一秒内,选取最优EME值对应的衰减系数作为后续图像的衰减系数。虽然此时估计得到的衰减系数不一定是真实环境下的衰减系数,但最终目的是获取高对比度的目标图像,因此在这里使用优化系数 $\alpha$ ,定义优化后的衰减系数为 $\alpha c$ ,并且海水的浊度相对稳定,因此在流水线式主动偏振成像方法中,后续的图像使用该衰减系数即可。

选择每隔一分钟牺牲前一秒图像来确定衰减系数和后向散射偏振度,不仅不会影响整体的视频效果和实际应用,还可以增强其可靠性。此外,随着帧数的提高,估计的参数也会变得更为准确。

#### 2.6 实验结果的评价方法

本研究中使用EME(Enhancement Measure by Entropy)<sup>[22]</sup>和背离度作为实验结果的评价指标。EME由公式(9)表示,其原理是对图像分块处理,每块中最大灰度值和最小灰度值衡量整幅图像的对比度。

$$\text{EME} = \frac{1}{k_1 k_2} \sum_{l=1}^{k_2} \sum_{k=1}^{k_1} 20 \log \frac{i_{\text{max}; k, l}^{\omega}(x, y) + p}{i_{\text{min}; k, l}^{\omega}(x, y) + q} \quad (9)$$

其中: $k_1, k_2$ 分别表示整幅图像高和宽分块时序号的末尾值, $i_{\text{max}; k, l}^{\omega}(x, y)$ 和 $i_{\text{min}; k, l}^{\omega}(x, y)$ 分别表示图像中序列号为 $(k, l)$ 的块 $\omega$ 中的最大值和最小值。

实际计算时为避免分式无意义,引入一个小的常数 $p$ 和 $q$ (等于0.0001),并不显著修改EME的结果。同时采用 $3 \times 3$ 大小的块,按各块相等的权重计算出每幅图像的结果。EME已经广泛应用于图像对比度的评价,EME值越大,证明图像的对比度越高,图像质量越好。

计算两个数据之间的百分比能够有效正确衡量两个数据之间的关系,将此定义为背离度。百分比数值越小,证明两者关系越接近,计算公式为等式(10):

$$D_{\text{degree}} = \frac{L_{\text{value}} - S_{\text{value}}}{L_{\text{value}}} \times 100\%, \quad (10)$$

其中: $D_{\text{degree}}$ 为背离度,用百分比表示, $L_{\text{value}}$ 为两者间较大的数值, $S_{\text{value}}$ 为两者间较小的数值。

### 3 实验配置

本实验旨在证明光源端切换偏振光取代相机端旋转检偏器获取正交偏振态图像的可行性,去后向散射性能的有效性以及实时输出视频的可实现性。

#### 3.1 系统配置

实验装置的示意图如图7所示。阵列正交偏振光源安装在相机上方,ESP32单片机被用于连接光源和相机,实现对二者的控制。相机的工作参数,如曝光时间,增益,触发模式等,由PC通过USB3.0接口配置。数据输出后经PC上运行的Matlab实时图像处理,输出视频,不经压缩存储在移动硬盘上。图8所示为此系统的实验设备图。

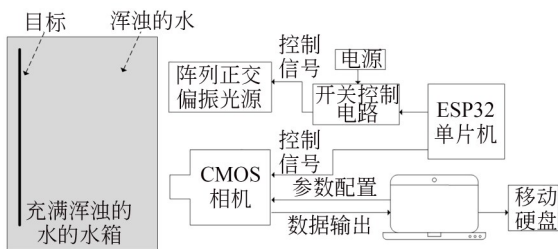


图7 实验装置示意图

Fig. 7 Schematic diagram of experimental setup

#### 3.2 实验水箱

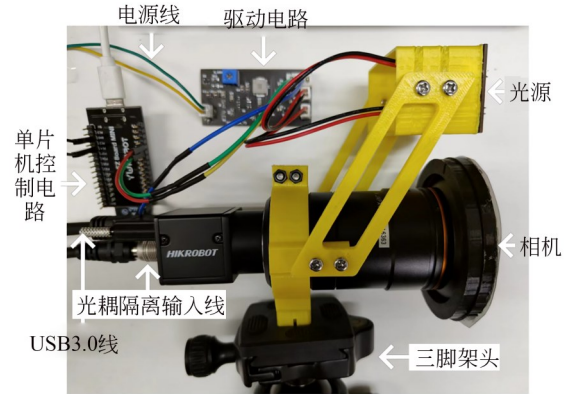


图8 实验设备图

Fig. 8 Photograph of experimental apparatus

水箱尺寸为 $1\,000\text{ mm} \times 590\text{ mm} \times 590\text{ mm}$ ,装满水箱的水量为313 L。水箱内部粘有黑色防水壁纸,减少反射,只有照明和成像窗是透明的。一个尺寸为 $250\text{ mm} \times 250\text{ mm}$ 的USAF-1951技术靶标,放置在相机的对面和实验箱内部,用于证明光源端切换偏振光取代相机端旋转检偏器获取正交偏振态图像的可行性,以及去后向散射性能的有效性。小型潜水艇模型放置在相机的对面和实验箱内部,用于证明实时输出视频的可实现性。水的浊度由海水浊度仪测量。系统装置放置在水箱外侧,与目标距离为700 mm。实验布局如图9所示。



图9 实验布局

Fig. 9 Experimental layout

#### 3.3 系统参数

##### 3.3.1 光源参数

对于LED灯珠阵列,使用了8个3 000 K暖黄色LED灯珠,以 $2 \times 4$ 的结构排列在灯板上。每个LED灯珠之间的距离为10 mm。对于空分交错起偏阵列,3D打印了一个与灯珠排列相同的外壳结构,并且根据标准在同一块偏振玻璃上切割了八个偏振单元。在外壳结构上,按照相邻

灯珠偏振方向相互正交的标准放置偏振片,构成交错排列的偏振结构。同时,设计了独立的控制驱动电路。其输出电压为 12.0 V,电流为 500 mA,用于控制灯珠的亮灭,实现交替输出正交偏振光的功能。

为了检测光源的均匀性,使用万用表和照度计分别测量了两个光源的电流值和照度。照度计距离光源 700 mm。测得两个光源的电流值相差 0 mA,照度仅相差 9 Lux,证明两个光源的均匀性是一样的。

### 3.3.2 成像单元参数

相机采用海康威视型号为 MV-CA023-10UM 230 万像素 CMOS USB3.0 工业面阵相机,图像传感器型号为 Sony IMX249。相机镜头是由 kowa 公司制造的 CA-LHE12 定焦镜头,焦距为 12 mm,F 数设置为 2。相机镜头前安装外壳结构并在其上面粘贴规定偏振方向的线偏振片。为保证图像不过曝的情况下获取高质量的图像数据,需要合理设置相机的曝光时间和增益。在实验中,视频帧速率设置为 25 FPS,这意味着每帧之间的时间间隔为 40 ms。由于需要遵守视频帧速率的限制,相机的曝光时间应小于 40 ms。同时,可以通过调整增益值来增加图像的亮度,以增强图像的可视性。

### 3.3.3 浊度调节

牛奶由不同大小的球形颗粒(酪蛋白分子 $\sim 0.04\sim 0.3\ \mu\text{m}$ 和脂肪球状分子 $\sim 1\sim 20\ \mu\text{m}$ )<sup>[23]</sup>组成。为了模拟海水的瑞利和米氏散射特性,向水箱中加入全脂牛奶来调节浊度,并使用 WGZ-200 型浊度计来测量水箱中水的浊度。在水箱中每次加入 8 g 牛奶,将浊度从 0 NTU 调节至 15.21 NTU(浊度单位)。

### 3.3.4 偏振度

偏振度是影响去后向散射效果的关键因素之一。对于目标偏振度的确定,在清水中对两个目标进行了正交偏振态图像的获取,依据模型中偏振度的公式进行计算,得出 USAF-1951 技术靶标和小型玩具潜水艇的偏振度分别为 0.09 和 0.12。可见,根据数据以及在公式(2)中的体现,目标偏振度近似且对图像的恢复效果影响很小,所以采用了预设的处理方法。

对于后向散射偏振度的确定,依据软件设计

的循环方式,测得 6 组实验的后向散射偏振度,将数据记录于表 2。由于以一分钟一循环去测量后向散射偏振度的值,且后向散射值稳定,所以保留小数点后两位。

表 2 不同浊度下后向散射偏振度

Tab. 2 DOP of backscatter under different turbidity

浊度/NTU	后向散射偏振度
0	0.45
2.86	0.52
5.77	0.59
8.65	0.66
11.18	0.72
15.21	0.79

## 3.4 图像采集过程

实验在暗室进行,数据采集步骤如下:

(1) USAF-1951 技术靶标作为目标。首先,独立驱动控制电路点亮平行偏振态灯珠,熄灭垂直偏振态灯珠,拍摄 1 张图片输出。然后,点亮垂直偏振态灯珠,熄灭平行偏振态灯珠,拍摄 1 张图片输出。

(2) 系统位置和各参数保持不变,点亮平行偏振态灯珠,熄灭垂直偏振态灯珠,拍摄 1 张图片输出。相机端的检偏器旋转  $90^\circ$ ,拍摄 1 张图像输出。旋转相机端的检偏器回到初始位置。

(3) 更换小型潜水艇模型作为目标。在阵列正交偏振光源与相机同步工作下,连续拍摄 250 张图像输出。

(4) 通过 Matlab 对输出图像进行流水线式主动偏振图像处理,合成 10 s 的视频输出。

(5) 向水箱中加入 8 g 牛奶,并用造流器均匀搅拌,取样等待浊度计数值稳定后,记录浊度数据,然后回到步骤(1),直到牛奶总量达到 40 g。

图像与视频输出以未压缩的格式记录。

## 4 结 果

### 4.1 目标物为 USAF-1951 技术靶标

图 10 展示了目标物为 USAF-1951 技术靶标时,不同浊度下的实验数据图像。经测试 USAF-1951 技术靶标的前三列分别是在光源端切换偏振光情况下,相机获得的最亮图像和最暗图像,

以及处理后的去后向散射图像。最后一列是在相机端旋转偏振片情况下,处理后的去后向散射图像。

为评估本方法的去后向散射性能,计算了图 10 中每个图像的 EME 值,并将具体数据列于表 3。由于起偏器与检偏器偏振方向正交时,可以滤除大量的后向散射,所以最暗图像的 EME 值

要高于最亮图像的 EME 值。选择 EME 值更高的最暗图像,计算它与去后向散射图像之间的 EME 增长倍数。EME 增长倍数均大于 11,最大可达 17.96。本方法的去后向散射效果得到了图像和数据的双重验证,从而证明了其有效性。

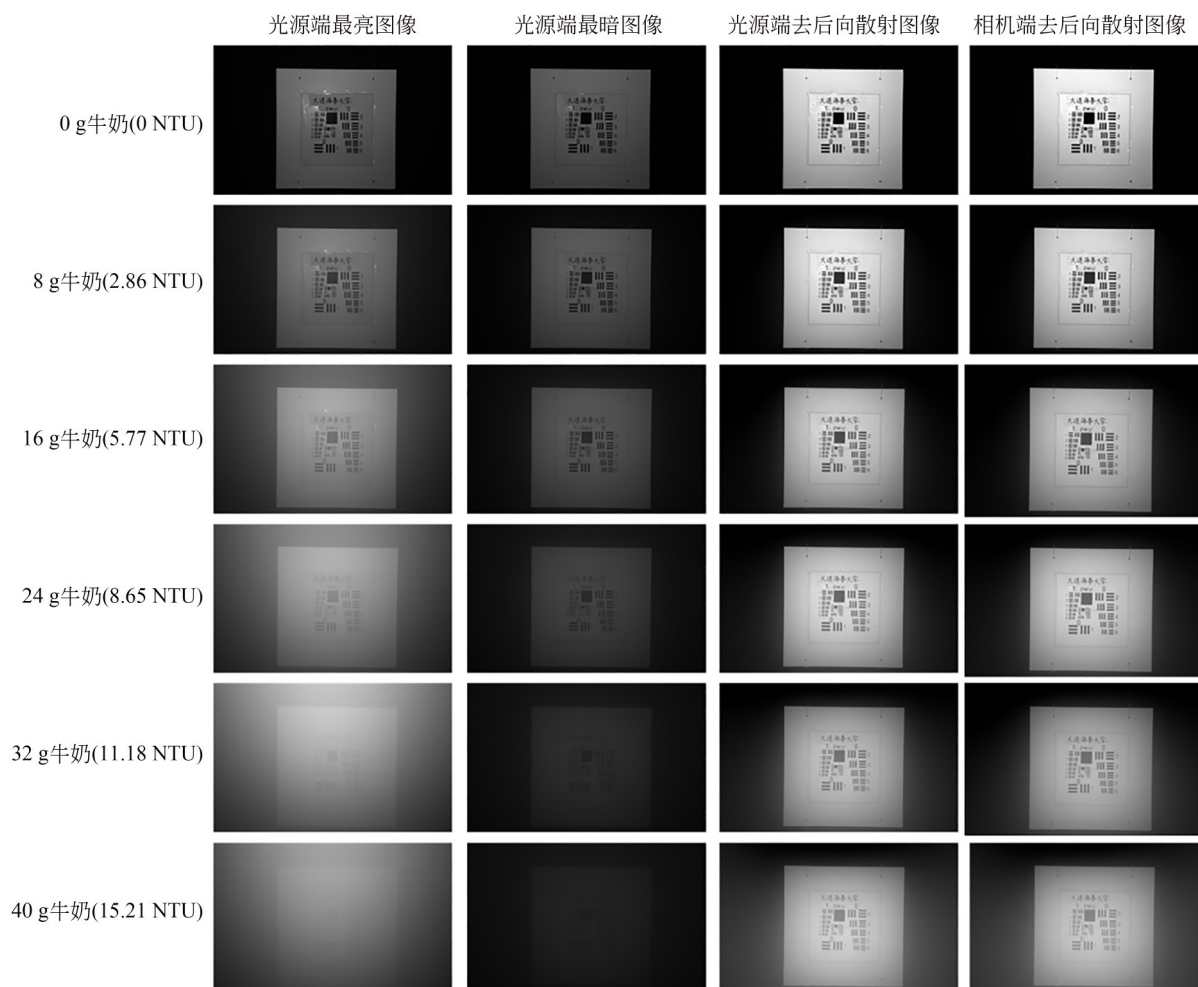


图 10 USAF-1951 技术靶标实验数据

Fig. 10 USAF-1951 technical target experimental data

表 3 不同浊度下光源端与相机端的评价指标结果

Tab. 3 Evaluation index results of the light source side and camera side under different turbidity

浊度参数/NTU	0	2.86	5.77	8.65	11.18	15.21
光源端最亮图像 EME	3.81	1.18	0.94	0.86	0.68	0.70
光源端最暗图像 EME	6.73	2.21	1.75	1.62	1.58	1.52
光源端去后向散射图像 EME	111.57	35.68	27.52	31.21	29.54	19.28
相机端去后向散射图像 EME	110.29	36.11	26.63	30.72	28.59	19.41
光源端 EME 增长倍数	15.58	15.34	14.21	17.96	17.09	11.77
背离度	1.14%	1.19%	3.23%	1.57%	3.21%	0.67%

为证明光源端切换偏振光取代相机端旋转偏振片获取正交偏振态图像的可行性,计算了两种方式去后向散射图像 EME 值的背离度。两者去后向散射图像 EME 值的背离度均低于 4%,最大背离度为 3.23%,最小背离度为 0.67%。说明了两者的去后向散射性能接近,进而证明了光源端切换偏振光取代相机端旋转偏振片获取正交偏振态图像的可行性。

#### 4.2 目标物为小型潜水艇模型

小型潜水艇模型按照指定路线从右向左移动。如图 11 所示,上行是在浊度为 11.18 NTU 的环境下,从相机拍摄的图像中,随机选取的连续六帧图像。下行是通过流水线式主动偏振处理后的去后向散射图像。在小型潜水艇模型上选取了坐标参考点,并将其标记在图像的正下方,以更好说明实时输出视频的可实现性。

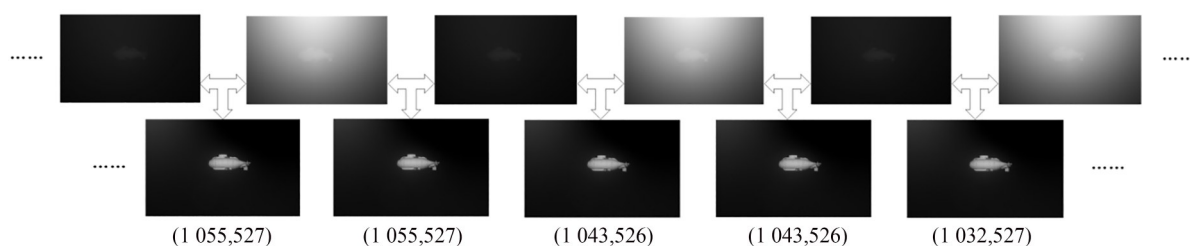


图 11 小型潜水艇实验数据

Fig. 11 Small submarine model experimental data

实验结果表明,在有效去除后向散射对图像清晰度影响的同时,通过当前帧与上一帧的流水线式主动偏振处理方法,成功将恢复的目标图像输出为视频序列。在一台 Intel(R) Core(TM) i7-5600U CPU @ 2.60 GHz 处理器的计算机上运行 Matlab 软件,计算出每两帧图像处理的时间大约为 0.253 ms。视频设定的帧数为每秒 25 帧,每帧的时间为 40 ms,远远超过了两帧图像处理的时间。这意味着,本方法可以实时输出视频。为更好说明去后向散射视频的可实现性,分享了视频链接 <https://www.bilibili.com/video/BV11w41137Si/>

## 5 结 论

本方法采用全固态结构和流水线式主动偏振图像处理方法,成功实现了实时输出去后向散射视频的功能,解决了机械旋转偏振片带来的一系列问题,实现了主动偏振成像技术在水下的实际应用。本方法在去后向散射性能上与机械式

主动偏振成像性能接近,图像 EME 值增长倍数最大可达 17.96,两者去后向散射性能的背离度均低于 4%,但本方法可以实时输出去后向散射视频。

然而,输出视频存在卡顿的情况。为有效解决此问题,可以使用 FPGA 提高图像的处理速度,加倍图像的帧数,然后再减半至设定的帧数。同时,由于主动偏振成像属于分时偏振成像方法,对于高速移动的物体,在获取正交偏振态图像后,仍难以恢复目标图像。因此可以采用开关响应更快的灯珠,更灵敏的图像传感器,从而更快速地获取正交偏振态图像以应对速度更快的目标。本次采用的是外触发信号来控制相机拍照,但对于带有同步输出的拍照和摄像系统也可以应用于系统中。相机输出的同步信号以控制光源,输出帧频不受影响的去后向散射视频。同时可以根据实际情况,采用更大结构的灯珠阵列、更灵敏的图像传感器和更高的帧率。该系统可用于检测水下废弃船体,探索海洋生物等,具有广阔的应用前景。

#### 参考文献:

[1] 全向前,陈祥子,全永前,等. 深海光学照明与成像系统分析及进展[J]. 中国光学, 2018, 11(2):

153-165.

QUAN X Q, CHEN X Z, QUAN Y Q, *et al.* Analysis and research progress of deep-sea optical il-

- lumination and imaging system[J]. *Chinese Optics*, 2018, 11(2): 153-165. (in Chinese)
- [2] WATSON J. Underwater visual inspection and measurement using optical holography [J]. *Optics and Lasers in Engineering*, 1992, 16(4): 375-390.
- [3] GAO S B, ZHANG M, ZHAO Q, *et al.* Underwater image enhancement using adaptive retinal mechanisms[J]. *IEEE Transactions on Image Processing*, 2019, 28(11): 5580-5595.
- [4] JAFFE J S. Underwater optical imaging: the past, the present, and the prospects[J]. *IEEE Journal of Oceanic Engineering*, 2015, 40(3): 683-700.
- [5] WU H D, ZHAO M, XU W H. Underwater descattering imaging by laser field synchronous scanning[J]. *Optics and Lasers in Engineering*, 2020, 126: 105871.
- [6] CUI Z H, TIAN Z S, ZHANG Y C, *et al.* Research on streak tube imaging lidar based on photocathode range gating method[J]. *Optics Communications*, 2019, 432: 79-83.
- [7] 陈小国, 胡锦涛. 基于颜色校正和细节保持的水下图像增强[J]. *激光与光电子学进展*, 2020, 57(24): 241013.  
CHEN X G, HU J Q. Underwater image enhancement based on color correction and detail preservation [J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2020, 57(24): 241013. (in Chinese)
- [8] ZHAO X W, JIN T, QU S. Deriving inherent optical properties from background color and underwater image enhancement[J]. *Ocean Engineering*, 2015, 94: 163-172.
- [9] HU H F, ZHAO L, HUANG B J, *et al.* Enhancing visibility of polarimetric underwater image by transmittance correction [J]. *IEEE Photonics Journal*, 2017, 9(3): 6802310.
- [10] 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): 2111002.  
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): 2111002. (in Chinese)
- [11] 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.
- [12] 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.
- [13] 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): 6900309.
- [14] 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. (in Chinese)
- [15] 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.
- [16] 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.
- [17] 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): 141-147.  
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): 141-147. (in Chinese)
- [18] ATKINSON GA, O'HARA NASH S, SMITH LN. Precision fibre angle inspection for carbon fibre composite structures using polarisation vision [J]. *Electronics*, 2021, 10(22): 2765.
- [19] JAFFE J S. Computer modeling and the design of optimal underwater imaging systems [J]. *IEEE Journal of Oceanic Engineering*, 1990, 15(2): 101-111.
- [20] TREIBITZ T, SCHECHNER Y Y. Active polarization descattering[J]. *IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence*, 2009, 31(3): 385-399.
- [21] 张曼. 基于 Tracepro 的 LED 光照均匀性二次光学设计[J]. *扬州职业大学学报*, 2020, 24(3): 38-42.  
ZHANG M. The secondary optical design for light emitting diodes illumination uniformity based on tracepro [J]. *Journal of Yangzhou Polytechnic Col-*

*lege*, 2020, 24(3): 38-42. (in Chinese)

- [22] AGAIAN S S, PANETTA K, GRIGORYAN A M. Transform-based image enhancement algorithms with performance measure[J]. *IEEE Transactions on Image Processing*, 2001, 10 (3) :

367-382.

- [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.

#### 作者简介:



吴厚德(1982—),男,辽宁大连人,博士,副教授,硕士生导师,2008年、2012年于大连海事大学分别获得硕士学位和博士学位,主要从事低照度成像的设计和性能评估、水下图像增强技术和嵌入式系统的研究。E-mail: wuhoude@dlnu.edu.cn



翟予峥(1999—),男,辽宁铁岭人,硕士研究生,2021年于沈阳工程学院获得学士学位,主要研究方向为水下光电成像。E-mail: zyz\_9937@dlnu.edu.cn