

文章编号 1004-924X(2020)07-1485-09

## 短相干照明与偏振相结合的水下远距离成像

张若兰<sup>1,2</sup>, 邵晶<sup>1,2,3\*</sup>, 聂真威<sup>4</sup>, 吕占伟<sup>5</sup>, 王燕<sup>6</sup>, 孙树峰<sup>1,2</sup>

(1. 青岛理工大学 山东省激光绿色智能制造与设备协同创新中心, 山东 青岛 266520;

2. 工业流体节能与污染控制教育部重点实验室, 山东 青岛 266520;

3. 奥克兰大学 物理系光子工厂, 新西兰 奥克兰 1010;

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

5. 中国人民解放军 91550 部队, 辽宁 大连 116023;

6. 青岛海镭激光科技有限公司, 山东 青岛 266100)

**摘要:**随着透明海洋战略的提出,低成本的凝视成像装备在水下光学成像中独具优势。然而,后向散射和成像目标难以分离,远距离凝视成像极为困难。更为严重的是,在采集到有效目标图像之前,过强的后向散射噪声已经使图像提前饱和,无法进行后续处理。本文提出了短相干照明与偏振成像相结合的水下远距离成像方法,利用短相干光源照明简化后向散射与成像目标的分离过程,同时,采用偏振技术有效抑制后向散射,防止图像提前饱和,保障目标图像的有效采集。为此,搭建了大型水下光学成像实验平台,并对 22 m 的远距离水下目标进行了成像试验研究。试验结果表明,该复合成像方法获得的图像信噪比由 0.50 dB 提高到 13.57 dB,设备的抗提前饱和能力提高了 1.42 倍,优于传统的偏振成像,可以为大范围水下光学监控提供技术支撑。

**关键词:**水下光学成像;后向散射分离;偏振成像;短相干;远距离成像

**中图分类号:**O43;TH766 **文献标识码:**A **doi:**10.37188/OPE.20202807.1485

## Underwater long-distance imaging method based on combination of short coherent illumination and polarization

ZHANG Ruo-lan<sup>1,2</sup>, SHAO Jing<sup>1,2,3\*</sup>, NIE Zhen-wei<sup>4</sup>, LÜ Zhan-wei<sup>5</sup>, WANG Yan<sup>6</sup>, SUN Shu-feng<sup>1,2</sup>

(1. Shandong Collaborative Innovation Center of Laser Green Intelligent Manufacturing and Devices, Qingdao University of Technology, Qingdao 266520, China;

2. Key Lab of Industrial Fluid Energy Conservation and Pollution Control, Qingdao 266520, China;

3. Photon Factory, Physics Department, University of Auckland, Auckland 1010, New Zealand;

4. Changchun Institute of Optics, Fine Mechanics and Physics, Chinese Academy of Sciences, Changchun 130033, China;

5. Unit 91550 of PLA, Dalian 116023, China;

6. Qingdao Hailaser Technology Co., Ltd, Qingdao 266100, China)

\* Corresponding author, E-mail: qunying12@163.com

**收稿日期:**2019-12-10; **修订日期:**2020-01-01.

**基金项目:**中国博士后科学基金资助项目(No. 2018M632639);山东省自然科学基金资助项目(No. ZR2017BF010);山东省重点研发计划资助项目(No. 2019GGX104106);青岛市应用基础研究计划资助项目(No. 17-1-1-91-JCH);国家自然科学基金资助项目(No. 51775289);国家留学基金委访学项目(No. esc 2019008010008);山东省重大科技创新工程项目(No. 2019JZZY010402)

**Abstract:** Considering the development of transparent ocean strategy, low-cost staring imaging equipment have unique advantages in underwater optical imaging. However, it is difficult to separate the backscattering and imaging target, as well as to capture a clear image at a long distance. More importantly, before acquiring the effective target image, the strong scattering noise saturates the image and prevents subsequent processing. Thus, we propose a novel imaging method that combines short coherent illumination and polarization imaging. The short coherent illumination simplifies the separation of the backscattering and imaging target while the polarization technology prevents image saturation in advance and ensures the effective acquisition of the target image. In addition, we built a large-scale underwater optical imaging platform and conducted imaging tests at a long-distance of 22 m. The experimental results showed that the signal-to-noise ratio increased from 0.50 dB to 13.57 dB, and the anti-image early saturation ability of the device increased 1.42 times. These results are superior to the traditional polarization imaging. The proposed composite imaging method can provide technical support for large-range underwater optical monitoring.

**Key words:** underwater optical imaging; separation of backscattering; polarization imaging; short coherence; long-range imaging

## 1 引 言

水下光学成像因探测目标直观、成像分辨率高等优点,被广泛应用于海洋石油钻探、水下搜救、海洋环境监测等领域。然而,水下光学成像由于强烈的散射和衰减,图像信噪比较低,严重影响成像质量并限制成像距离。

水下散射包括前向散射和后向散射。其中,前向散射易造成成像目标表面照明不均匀,后向散射由于与成像目标传播方向一致,二者难以分离,严重影响成像质量。为此,水下成像多采用后向散射。为获取清晰的水下目标图像,时间/距离选通成像技术、空间区分/激光同步线扫描技术(Laser Line Scanner,LLS)、偏振成像技术、结构光成像技术等水下成像技术被提出<sup>[1-2]</sup>。其中,以距离选通成像为代表的水下扫描成像技术,其最大成像距离已经能够达到 40 m<sup>[3]</sup>,但是成像设备十分昂贵。

随着海洋经济的发展,透明海洋工程需要低成本、可便于大范围铺展的成像设备。偏振成像技术利用后向散射和目标光束之间的偏振特性差异抑制后向散射,提高图像信噪比且成本较低,成为水下凝视成像的优选方法。陈慧敏等理论仿真和实验研究了收发同轴脉冲激光在不同尺寸散射粒子发生后向散射的不同偏振特性<sup>[4]</sup>。LIU 等建立了一个考虑水的散射效应和吸收效应的水下偏振成像模型,能够有效地校正吸水引起的色偏

问题,缓解水下图像退化问题<sup>[5]</sup>。韩平丽等针对偏振成像技术在后向散射光和目标光束分离时由于噪声放大现象导致重建图像质量受限的问题,提出了多尺度水下偏振成像方法,在提高对比度,复原图像细节信息的同时有效抑制放大噪声,提高重建图像的信噪比<sup>[6]</sup>。YANG 等提出了一种基于非偏振光照明的水下偏振成像目标增强技术,有效地增强了浑浊水体中水下图像的可见度和对比度<sup>[7]</sup>。TIAN 等简化了偏振差分成像的实现,在斯托克斯矢量的基础上获得偏振差图像,有利于快速成像<sup>[8]</sup>。AMER 等基于暗通道先验方法的优化版本,利用偏振成像光学系统来识别物体,提高了浑浊环境中的水下图像质量<sup>[9]</sup>。

近年来,图像复原技术成为了水下光学成像的研究热点。ZHENG 等采用逻辑随机共振辅助高斯噪声的方式提高对微弱输入信号的响应,来恢复浑浊水域中严重退化的水下图像<sup>[10]</sup>。HAN 等提取的倾斜边缘进行点扩散函数估计,引入调制传递函数,减少了散射对偏振成像方法的影响,实现了图像的恢复和分辨率的增强<sup>[11]</sup>。范之国等利用构建的精简水下目标偏振重构模型,通过自动估计全局最优偏振信息重构参数,复原出水下目标图像,降低水体对图像质量的影响<sup>[12]</sup>。王一斌等采用自适应背景光估计与非全局先验的水下图像复原算法,去除复原过程中的加性噪声<sup>[13]</sup>。

凝视成像具有低成本优势,是水下扫描成像的有力竞争对手。但是,大部分偏振成像、图像复

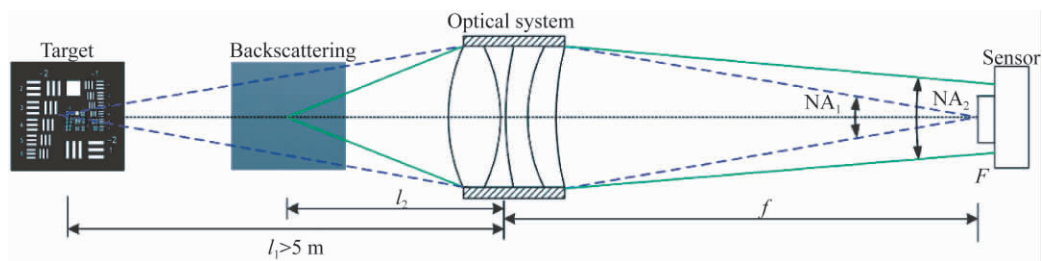
原等研究多集中于短距离、浑浊水体环境,现有的水下凝视成像设备的最大工作距离一般为 3~5 m,能够与距离选通成像相媲美的远距离低成本水下凝视成像装备与方法仍未见相关报道。

本文分析了后向散射与目标图像的像方差异,发现在短相干照明的远距离成像工况下,后向散射可以与目标图像进行有效分离,因此,搭建了大型的水下光学成像实验平台并进行了初步验证。然而,当后向散射过强时,图像将提前饱和,无法采集有效目标信息,该方法仍将失效。因此,提出了短相干照明与偏振成像相结合的方法,并

建立了成像效果评价机制。

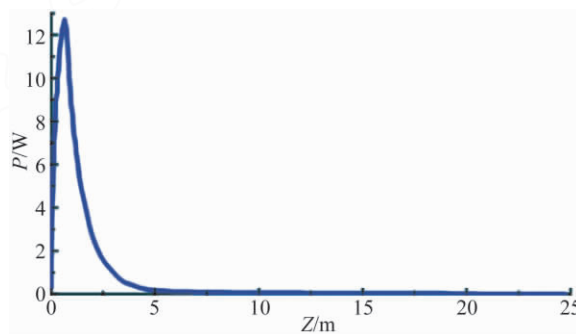
## 2 后向散射与目标图像分离

由于能够进入光学成像系统的后向散射具有一定的分布距离<sup>[14]</sup>,不同作用距离下的后向散射光入射到光学系统的强度分布仿真结果如图 1 所示。后向散射的距离主要分布在 0.5~2 m 处(这一结论已经被距离选通成像所证实),与远距离目标图像相比,二者有不同的成像光路,特别是像方数值孔径和离焦因子。



(a) 水下目标与后向散射的成像光路差异

(a) Difference of optical path between underwater target and backscattering



(b) 仿真计算后向散射能够进入光学系统的能量随工作距离的变化

(b) Simulated energy of backscattering captured by optical system as a function of working distance

图 1 后向散射与目标图像的成像光路差异

Fig. 1 Difference of optical path between backscattering and target

由此,根据傅里叶光学的表征方法,成像目标在 CCD 的成像可以被表述为:

$$U_1(x, y) = \frac{1}{\pi} \iint_{u^2+v^2 \leq 1} \exp[i(u^2 + v^2)f_1] \times P(u, v) \times \exp(2\pi i u x + 2\pi i v y) dv du, \quad (1)$$

其中: $U_1(x, y)$ 是目标图像的点扩散振幅和相位函数, $x, y$ 是在像面经 $\lambda/NA_1$ 归一化的笛卡尔坐标系, $NA_1$ 是成像目标像方数值孔径, $u, v$ 是出瞳的归一化坐标, $f_1$ 是离焦因子。

进入成像系统的后向散射在 CCD 的成像可

以表述为:

$$U_2(x, y) = \frac{1}{\pi} \iint_{u^2+v^2 \leq 1} \exp[i(u^2 + v^2)f] \times P(u, v) \times \exp(2\pi i u x + 2\pi i v y) dv du, \quad (2)$$

其中: $U_2(x, y)$ 是后向散射的点扩散振幅和相位函数, $x, y$ 是在像面经 $\lambda/NA_2$ 归一化的笛卡尔坐标系, $NA_2$ 是后向散射像方数值孔径, $u, v$ 是出瞳的归一化坐标, $f_2$ 是离焦因子。

当后向散射与目标图像具有较大的距离差异,即远距成像时,后向散射与成像目标具有较大

的像方数值孔径和离焦因子差异。如果后向散射与目标光束之间没有任何关联,后向散射可以作为一种背景噪声,叠加在成像目标上。

激光具有良好的单色性、优越的方向性,常被用作水下成像的照明光源。激光作为一种相干光源,其照明条件下所形成的图像光强为:

$$I = I_1 + I_2 + 2\sqrt{I_1 I_2} \cos \theta + n, \quad (3)$$

其中:  $I_2$  为目标图像光强,  $I_1$  为后向散射光强,  $n$  为相机自身所产生的背景噪声。相机的信噪比为 56 dB, 相对于后向散射所产生的噪声而言, 可以忽略不计, 因此, 公式(3)可以近似为:

$$I = I_1 + I_2 + 2\sqrt{I_1 I_2} \cos \theta. \quad (4)$$

为获取清晰的目标图像, 可以获得先验信息, 直接减除后向散射光强  $I_1$ , 由公式(4)可得目标图像为:

$$I_2 = I - I_1 - 2\sqrt{I_1 I_2} \cos \theta. \quad (5)$$

由公式(5)中可以看出, 当光源的相干性较长时, 由于  $2\sqrt{I_1 I_2} \cos \theta$  项的存在, 水中的后向散射  $I_1$  与返回的目标图像  $I_2$  之间会相互干涉, 后向散射噪声与目标图像往往不能很好地分离, 最终的成像结果会存在较为明显的后向散射噪声。图 2 为长相干光源照明下的模拟仿真实验结果, 其中, 图 2(a) 为目标图像, 图 2(b) 为后向散射噪声图像, 图 2(c) 为减除后向散射噪声的结果。由图 2(c) 可见, 由于受到相干交叉项的影响, 减除后向散射噪声所得图像仍有部分散射光强与目标图像光强重叠。当噪声强于信号或者与信号强度相近时, 相干交叉项会显著影响图像的识别, 使图像分离失败。这也是水下成像的后向散射噪声难以采用数字处理进行分离的难点之一。由此出发, 如果消除交叉项的影响, 后向散射的分离会得到简化。

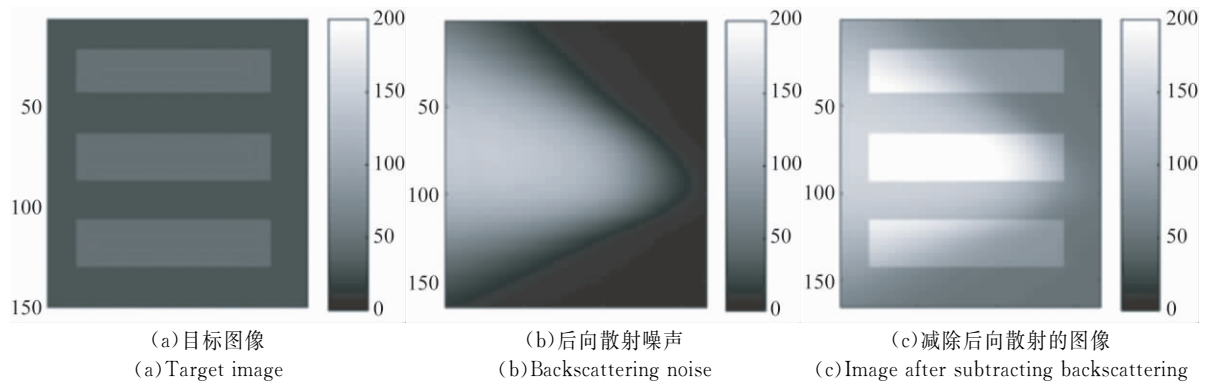
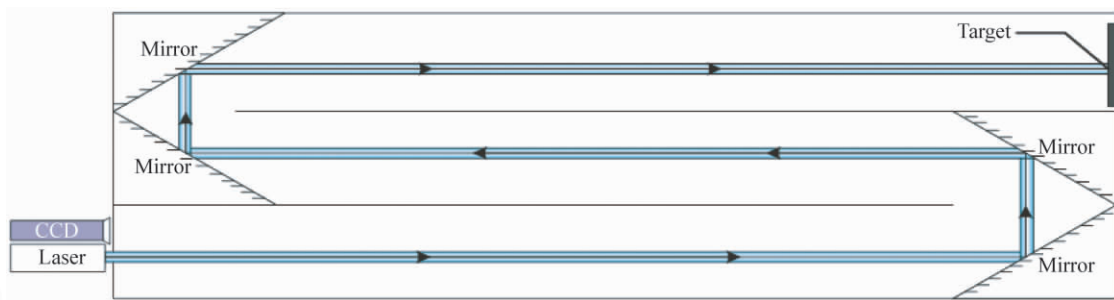


图 2 长相干光源照明下的模拟仿真实验结果

Fig. 2 Results of simulation experiment under long-distance coherent illumination



(a) 实验原理示意图

(a) Schematic diagram of experimental principle



图 3 短相干光源水下远距离目标成像实验原理及装置

Fig. 3 Experimental principle and device for underwater long-distance target imaging with short-coherent light source

如果采用短相干光源进行照明,由于后向散射与远距离目标的轴向分布存在差异,干涉项将会消除,图像光强变为:

$$I = I_1 + I_2. \quad (6)$$

此时所采集到的水下远距离图像仅为目标图像光强和后向散射光强的叠加,对于同一水体下,只需要采集没有目标图像的后向散射图像作为背景减除,即可分离消除后向散射。

利用后向散射与远距离目标的轴向分布差异特性,本文采用激光来增强水下照明的距离,同时,为使探测器上的后向散射与远距离目标光束不相干,便于分离,需要采用相干长度小于 10 mm 的短相干激光器作为照明光源。光源的相干长度与光的波长和光谱宽度有关,即  $\Delta L = \lambda^2 / \Delta \lambda$ ,其中  $\lambda$  为光的波长,  $\Delta \lambda$  为光谱宽度。所选用的 445 nm 波长的半导体激光器,采用的光谱宽度为 1 nm,由  $\Delta L = \lambda^2 / \Delta \lambda$  可求得该激光器的干涉长度

仅为 0.2 mm,满足设计要求。此外,选用 Basler ACA 相机搭配蔡司 180 mm 长焦镜头(F#4)作为采集相机,利用四片 40 cm×30 cm 的大尺寸反射镜,搭建了 22 m 长的折叠水体光路。实验原理及装置如图 3 所示,445 nm 波长的半导体激光器输出的激光束通过 22 m 的折叠水体光路,照亮成像目标,再返回进入采集相机进行水下目标图像的采集。由此出发,本文采用短相干照明直接分离后向散射提取有效目标,是一种有效的水下成像方法。

基于后向散射与成像目标的差异,采用短相干照明处理后的结果如图 4 所示(彩图见期刊电子版)。其中,图 4(a)为实验采集的原始图像(图中红色方框内为散射光斑,蓝色方框内为目标图像),图 4(b)为所采集图像的伪彩显示图,图 4(c)为短相干照明下直接减除后向散射所得的图像。

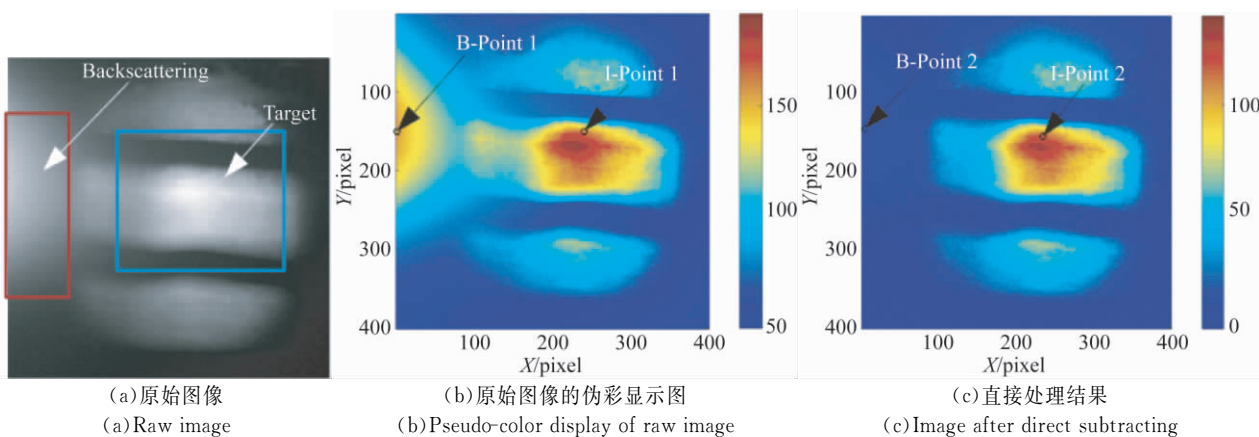


图 4 短相干光源照明下的实验结果

Fig. 4 Experimental results under short-coherent illumination

为了便于观察,后文图像均采用伪彩显示图进行表述。受后向散射作用的影响,大量的后向散射光进入相机,导致采集到的图像出现很明显的散射光斑,取处理前后图像中相同位置处的信号和噪声的数值。图 4(b)中的 B-Point 1 和图 4(c)中的 B-Point 2 为处理前后相同位置处的噪声值,图 4(b)中的 I-Point 1 和图 4(c)中的 I-Point 2 为处理前后相同位置处的信号值,采用图像信噪比公式  $10\lg(s/n)$  求解图像的信噪比。原始图像的伪彩显示图如图 4(b)所示,图像的左侧有明显的散射光斑,经计算,原始图像的信噪比仅为 0.5 dB。经过直接减除后向散射信息处理得到的图像如图 4(c)所示,图中的散射光斑被明显消除,图像信噪比提高到了 9.59 dB。由此可见,在短相干照明下采用直接分离后向散射噪声的方式可以有效去除后向散射噪声,且处理过程简单便捷。同时,图像中的后向噪声能够直接被减除,左侧图像质量改善明显,间接地证明了前向散射对水下目标识别的影响不大。

### 3 短相干照明下的偏振成像

#### 3.1 偏振成像

上述实验是在短相干照明下后向散射噪声和目标图像呈现简单叠加特性的原理上进行的。如果水体环境继续恶化,后向散射噪声过强,图像将提前饱和,有效信息无法获取,上述方法失效。以采样深度为 10 bit 的采集相机为例,信噪比为 -30.1 dB,图像饱和时,其采集到的有效信息数

值不到 1,这时无法完全获取有效信息。

成像目标与散射粒子具有不同的解偏振度,目标光束和后向散射光的偏振态不一致<sup>[15-16]</sup>。刘文清、曹念文、张玉钧等进行了大量的水下光学成像实验研究,结果表明,成像光束通过正交起偏器和检偏器(两个正交线偏振片)时,大部分的后向散射光能够被有效地抑制<sup>[17]</sup>。在采用线偏振光进行水下照明时,在成像端加载垂直正交的线偏振检偏器,能够得到最优的图像清晰度<sup>[18-19]</sup>。基于此项结论,本文采用线偏振的正交起偏器和检偏器,进行了偏振成像实验,结果如图 5 所示。对比图 5(b)和 5(c)两幅图像可以看出,安装正交线偏振片后图像中大部分散射光被滤除,但是仍有部分后向散射光进入相机。此时,沿照明、成像传播路径,相对于光学成像系统,不同作用距离下后向散射光的解偏振度并不固定。为此,范之国等采用全局估计参数来研究偏振成像<sup>[12]</sup>。目前,偏振成像技术只能减弱后向散射,一部分后向散射仍然无法去除。然而,偏振成像和直接分离后向散射噪声相结合的处理方式能够进一步地提高信噪比。

基于上述实验结果,本文采用正交线偏振起偏器和检偏器方案来抑制过强的噪声,使有效信息具有足够的采样深度,而图像不会提前饱和,提升成像设备的抗图像提前饱和能力。采用上述实验装置,在激光器前设置一片线偏振起偏器(如果激光器为线偏振激光器,该起偏器可省略),在成像系统物方设置一片垂直正交放置的线偏振检偏器,采集水下 22 m 处的目标图像。



图 5 有/无偏振片采集到的图像对比

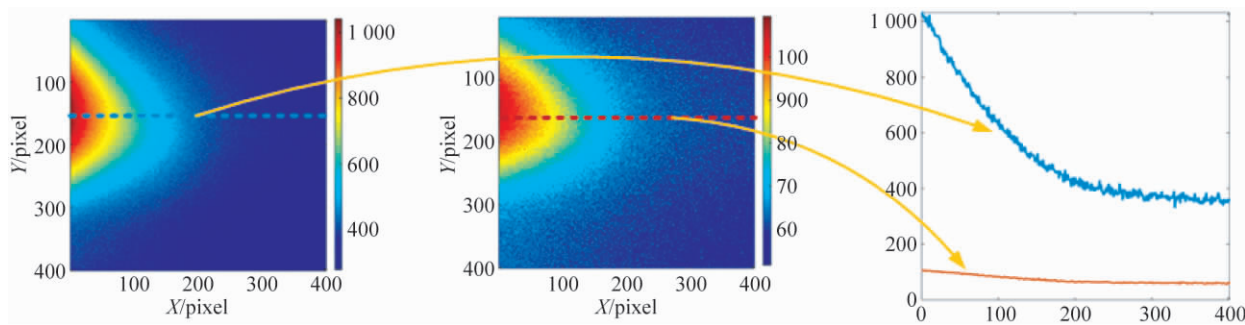
Fig. 5 Comparison of images captured with or without polarizers

在 22 m 的水下通道中,不设置任何的目标图像,分别采集原始状态和偏振状态下的水下散

射背景图像进行对比,所得到的图像如图 6 所示,其中图 6(a)为加装正交线偏振检偏器前的后向

散射图像,图 6(b)为加装正交线偏振检偏器后的后向散射图像,图 6(c)为图像在 150 行像素位置处的后向散射噪声曲线对比图。由图 6(c)可以看出,后向散射噪声在加装正交线偏振检偏器后得到了明显的抑制,后向散射的数值也由原来的

1 032 下降到了 106,降低了 9.74 倍,结果表明,偏振能有效地抑制后向散射噪声。这仅仅是在透过率较差的一组偏振片下所做的实验,如果偏振片的透过率较高,后向散射噪声能得到更加明显的抑制。



(a) 加装正交线偏振检偏器前的后向散射图像 (b) 加装正交线偏振检偏器后的后向散射图像 (c)  $Y=150$  时的后向散射噪声曲线  
 (a) Backscattering image captured without orthogonal linear polarizers (b) Backscattering image captured with orthogonal linear polarizers (c) Backscattering noise curve at  $Y=150$

图 6 加装正交线偏振检偏器前/后得到的后向散射对比结果

Fig. 6 Comparison results of backscattering before / after adding an orthogonal linear polarization detector

### 3.2 偏振处理后的后向散射与目标图像分离

为进一步验证短相干照明与偏振相结合的处理方式能否获取远距离的水下目标图像,在上述实验的基础上在 22 m 处设置目标板,对非偏振处理与偏振处理后的成像效果进行采集分析。相较于图像的灰度数值而言,图像的对比度更能反映图像质量,本研究中更加关注对比度的最大值和最小值,为此,不同方法所产生的图像,采用对比度最大值为标准,对图像进行均一化处理。图 7 为无偏振片时直接去除后向散射噪声,与加装正交线偏振检偏器后去除后向散射噪声的对比图。由图 7(b)与图 7(d)对比可以看出,两者的差距并不明显,这是图像均一化处理的结果,而图 7(a)与图 7(c)对比可以发现,加装正交线偏振片后的后向散射明显得到抑制,由此可知,偏振处理是防止图像过早饱和的有效方式。

与目标图像分离的最终处理使信噪比提升到了 13.57 dB,偏振片的加入明显提高了后向散射的抑制效果。

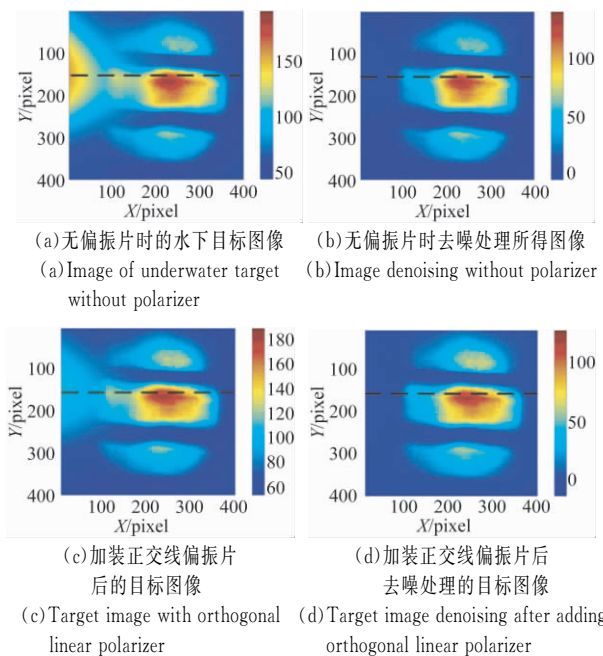


图 7 水下目标加装正交线偏振检偏器前/后图像实验结果对比  
 Fig. 7 Comparison of experimental results of underwater target without and with orthogonal linear polarization detector

同时,对图 7(虚线位置图像行  $Y=160$  像素处)进行了数值化分析,以图像行  $Y=160$  像素处的水下目标处理前后图像信噪比的变化曲线为例,采用对比度最大值为标准,对图像进行均一化处理,结果如图 8 所示。原始图像加装正交线偏振片后,散射噪声有明显的下降,此时,后向散射

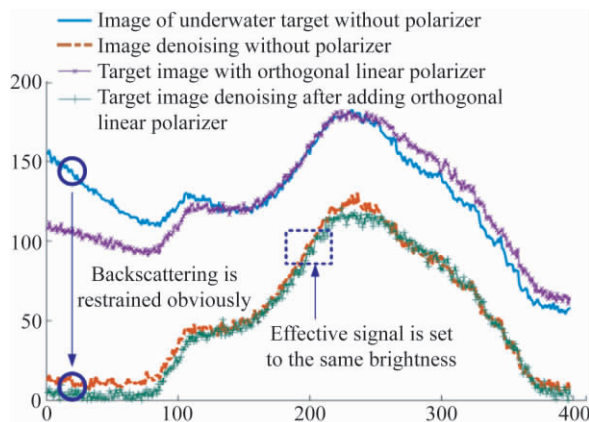


图 8 水下目标处理前后图像信号与噪声的变化曲线

Fig. 8 Variation of signals and noises of underwater target with different processing methods

以采样深度为 10 bit 的采集相机为例,未加偏振片的图像信噪比为 0.50 dB,图像饱和时,有效信息值为 541,此时的后向散射噪声为 483;添加偏振片后,图像的信噪比增强至 2.01 dB 时,图像的有效信息值增强到 629,后向散射噪声降低到 395,由此可以得出,偏振与短相干相结合的处理方式使整体设备的抗图像提前饱和能力提高了 1.42 倍,整体设备的抗图像提前饱和能力得到了显著提升。显然,上述短相干照明与偏振相结合的处理方式能大幅度提升水下远距离成像的成像质量,明显优于传统的偏振成像(图 5(c))。然而,由于所采用的相机为非水下专用相机,采集相

机置于空气中,所采用折叠式水箱中的反射镜尺寸较大,有明显的像散现象,加之激光器光束照明均匀性较差的原因,图像成像效果较差,但是这并不影响实验原理准确性的验证。

## 4 结 论

本文进行了后向散射与目标图像分离研究,提出了短相干照明与偏振相结合的水下远距离成像方法。利用短相干光源照明下后向散射与成像目标的特性差异进行分离;采用偏振技术有效抑制后向散射,防止图像提前饱和,保障有效信号采集。为此,搭建了水下光学成像实验平台,并对 22 m 距离的水下目标成像进行了实验研究。经过实验验证,短相干照明技术可以有效提升信噪比,图像的信噪比由 0.50 dB 提高到 13.57 dB。偏振技术可以有效抑制部分后向散射光,防止强烈的后向散射噪声引起图像过早饱和,设备的抗图像提前饱和能力提高了 1.42 倍。该方法优于传统的偏振成像,可以为远距离大范围的深海光学监控提供了新的研究思路。

**致 谢:** 本文全体作者感谢青岛理工大学机械与汽车工程学院测控 16 级 2 班全体成员对大型水下光学成像平台搭建所做出的努力和贡献,感谢青岛市溢发惠友工业装备有限公司对成像系统的机械加工所做出的支持。

## 参考文献:

- [1] 曹峰梅, 金伟其, 黄有为, 等. 水下光电成像技术与装备研究进展(上): 水下激光距离选通技术[J]. 红外技术, 2011, 33(2): 63-69.  
CAO F M, JIN W Q, HUANG Y W, *et al.*. Review of underwater opto-electrical imaging technology and equipment( I ): underwater laser range-gated imaging technology [J]. *Infrared Technology*, 2011, 33(2): 63-69. (in Chinese)
- [2] 金伟其, 王霞, 曹峰梅, 等. 水下光电成像技术与装备研究进展(下)[J]. 红外技术, 2011, 33(3): 125-132.  
JIN W Q, WANG X, CAO F M, *et al.*. Review of underwater opto-electrical imaging technology and equipment( II ) [J]. *Infrared Technology*, 2011, 33(3): 125-132. (in Chinese)
- [3] 储开丽, 黄有为, 金伟其, 等. 水下激光距离选通成像系统及其实验研究[C]. 第九届全国光电技术学

术交流会论文集(上册). 北京, 2010: 218-222.

- CHU K L, HUANG Y W, JING W Q, *et al.*. System and experimental study of underwater laser range-gated imaging [C]. *Proceedings of the 9th National Optoelectronic Technology Academic Exchange Conference (Volume I)*. Beijing, 2010: 218-222. (in Chinese)
- [4] 陈慧敏, 刘新阳. 收发同轴脉冲激光引信在水雾中的后向散射偏振特性[J]. 光学精密工程, 2015, 23(3): 626-631.  
CHEN H M, LIU X Y. Backscattering polarization characteristics of pulsed laser fuze with coaxial optical system in water fog [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2015, 23(3): 626-631. (in Chinese)
- [5] 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.
- [6] 韩平丽, 刘飞, 张广, 等. 多尺度水下偏振成像方法[J]. 物理学报, 2018, 67(5): 118-127.



- HAN P L, LIU F, ZHANG G, *et al.*. Multi-scale analysis method of underwater polarization imaging [J]. *Acta Physica Sinica*, 2018, 67(5): 118-127. (in Chinese)
- [7] 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.
- [8] 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.
- [9] AMER K O, ELBOUZ M, ALFALOU A, *et al.*. Enhancing underwater optical imaging by using a low-pass polarization filter [J]. *Optics Express*, 2019, 27(2): 621-643.
- [10] ZHENG B, WANG N, ZHENG H Y, *et al.*. Object extraction from underwater images through logical stochastic resonance [J]. *Optics Letters*, 2016, 41(21): 4967-4970.
- [11] HAN P L, LIU F, YANG K, *et al.*. Active underwater descattering and image recovery [J]. *Applied Optics*, 2017, 56(23): 6631-6638.
- [12] 范之国, 宋强, 代晴晴, 等. 全局参数估计的水下目标偏振复原方法[J]. *光学精密工程*, 2018, 26(7): 1621-1632.
- FAN Z G, SONG Q, DAI Q Q, *et al.*. Underwater target polarization recovery method based on global parameter estimation [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2018, 26(7): 1621-1632. (in Chinese)
- [13] 王一斌, 尹诗白, 吕卓纹. 自适应背景光估计与非局部先验的水下图像复原[J]. *光学精密工程*, 2019, 27(2): 499-510
- WANG Y B, YIN SH B, LU ZH W. Underwater image restoration with adaptive background light estimation and non-local prior [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2019, 27(2): 499-510. (in Chinese)
- [14] 钟森城, 李泽仁, 王荣波. 后向散射对激光水下成像的影响研究[J]. *激光与红外*, 2012, 42(7): 735-738.
- ZHONG S CH, LI Z R, WANG R B. Influence of back-scattering on underwater laser imaging [J]. *Laser & Infrared*, 2012, 42(7): 735-738. (in Chinese)
- [15] TREIBITZ T, SCHECHNER Y Y. Active polarization descattering [J]. *IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence*, 2009, 31(3): 385-399.
- [16] 刘文清, 曹念文, 赵刚, 等. 水下物体的激光偏振成像研究[J]. *量子电子学报*, 1997, 14(6): 520-526.
- LIU W Q, CAO N W, ZHAO G, *et al.*. Laser polarization image of underwater objects [J]. *Chinese Journal of Quantum Electronics*, 1997, 14(6): 520-526. (in Chinese)
- [17] 曹念文, 张玉钧, 王锋平, 等. 水下目标自然光偏振成像的研究[J]. *量子电子学报*, 1999, 16(2): 110-115.
- CAO N W, ZHANG Y J, WANG F P, *et al.*. White light polarization imaging for underwater objects [J]. *Chinese Journal of Quantum Electronics*, 1999, 16(2): 110-115. (in Chinese)
- [18] 曹念文, 刘文清, 张玉钧. 偏振成像技术提高成像清晰度、成像距离的定量研究[J]. *物理学报*, 2000, 49(1): 61-66.
- CAO N W, LIU W Q, ZHANG Y J. Quantitative study of improvements of the imaging contrast and imaging range by the polarization technique [J]. *Acta Physica Sinica*, 2000, 49(1): 61-66. (in Chinese)
- [19] 曹念文, 刘文清, 张玉钧, 等. 偏振成像清晰度与成像距离关系的讨论[J]. *光学学报*, 2000, 20(8): 1145-1147.
- CAO N W, LIU W Q, ZHANG Y J, *et al.*. Relation between contrast of image and imaging range for underwater object [J]. *Acta Optica Sinica*, 2000, 20(8): 1145-1147. (in Chinese)

## 作者简介:



张若兰(1996—),女,山东济南人,硕士研究生,2018年于青岛理工大学获得学士学位,主要从事水下远距离成像方面的研究。E-mail: 1334833054@qq.com

## 通讯作者:



邵晶(1984—),男,山东烟台人,博士,讲师,硕士生导师,2008年于山东大学获得学士学位,2013年于中科院长春光学精密机械与物理研究所获得博士学位,新西兰奥克兰大学访问学者,主要从事光学成像、光学测试、激光加工方面的研究。E-mail: qunying12@163.com