

# 水下物体偏振成像探测的实验研究

吴中芳<sup>1</sup>, 周少聪<sup>2</sup>, 何贤强<sup>3\*</sup>

<sup>1</sup>中国地质大学(武汉)地球物理与空间信息学院, 湖北 武汉 430074;

<sup>2</sup>海南热带海洋学院海洋信息工程学院, 海南 三亚 572022;

<sup>3</sup>卫星海洋环境动力学国家重点实验室, 国家海洋局第二海洋研究所, 浙江 杭州 310000

**摘要** 偏振包含丰富的物体表面反射、散射信息, 可有效提高成像探测能力。当前, 水下物体偏振成像探测实验主要集中在偏振度研究, 而缺乏对 Stokes 矢量各元素成像效果的研究。通过水槽实验, 开展不同水下物体放置深度、泥沙浓度、目标物材质及探测波段的因素对偏振成像探测的影响。结果表明, 偏振成像可获得比传统辐射强度成像更为清晰的水下目标物图像, 能够更好地获取水下物体的边界轮廓、纹理等信息, 可以有效抑制水体对光的吸收、散射影响; 与传统的辐射强度成像相比, 偏振成像图像的信息量随目标物放置深度衰减较为缓慢, 可探测更大深度的水下目标; 泥沙浓度对偏振图像的影响比辐射强度图像大, 但偏振图像仍然可以较好地在高泥沙水体中检测出目标物的边缘轮廓, 且比传统辐射强度图像更为清晰; 波长对水下物体偏振成像探测具有一定的影响, 在清洁水体, 蓝绿波段偏振成像总体效果最佳。

**关键词** 成像系统; 水下目标物; 偏振成像; 水槽实验

中图分类号 P733.3+2; O439

文献标识码 A

doi: 10.3788/LOP55.081101

## Experimental Study on Underwater Objects Detection Based on Polarization Imaging

Wu Zhongfang<sup>1</sup>, Zhou Shaocong<sup>2</sup>, He Xianqiang<sup>3\*</sup>

<sup>1</sup> Institute of Geophysics and Space Information, China University of Geosciences (Wuhan), Wuhan, Hubei 430074, China;

<sup>2</sup> Institute of Marine Information Engineering, Hainan Tropical Marine College, Sanya, Hainan 572022, China;

<sup>3</sup> State Key Laboratory of Satellite Ocean Environment Dynamics, Second Institute of Oceanography, State Oceanic Administration, Hangzhou, Zhejiang 310000, China

**Abstract** Polarization includes rich information of the reflection and scattering properties of the objects, which can effectively improve the detection capability. Previous studies on the polarization imaging of underwater objects mainly focused on the degree of the polarization, however, the capacities of Stokes components for imaging the underwater objects are poorly known. Based on the tank experiments, the influences of object depth, sediment concentration, object material and detection band on the polarization imaging detection are investigated. The results show that compared with the traditional imaging based on radiation intensity, the polarization imaging can obtain clearer image and better information of boundaries and textures of underwater objects, with the capacity of diminishing the impacts of the water absorption and scattering effects. Moreover, the detection capacity of polarization imaging with increasing object depth deceases more slowly than that of the traditional imaging based on radiation intensity, indicating that polarization imaging can detect deeper objects. The influence of sediment concentration on polarization imaging is more significant than that on the radiation intensity imaging, but the polarization imaging can still detect the edge contour of the target in the high concentration of sediment. The detection wavelength has some influence on the capacity of the polarization imaging, and the blue and green light wavelengths are the optimal bands for polarization imaging of the underwater objects.

收稿日期: 2017-12-05; 修回日期: 2018-01-10; 录用日期: 2018-03-07

基金项目: 国家重点研发计划(2017YFA0603004)、国家863计划(2014AA123301)、全球变化与海气相互作用专项(GASI-03-03-01-01)、国家自然科学基金(41676170, 41676172, 41621064, 41476155)

\* E-mail: hexianqiang@sio.org.cn

**Key words** imaging systems; underwater objects; polarization imaging; tank experiment

**OCIS codes** 110.5405; 010.4450; 010.4458

## 1 引言

水下目标物成像探测在海洋地质、生物调查和安全保障等方面有着重要应用。由于海水的吸收和散射作用,传统基于辐射强度的水下物体成像作用距离非常有限,存在局限性<sup>[1]</sup>。偏振作为光波的固有和独立特性,同样包含丰富的物体表面反射、散射信息,可提高物体成像的探测能力<sup>[2-4]</sup>。为此,国内外开展了相关的实验研究。

Vasilkov 等<sup>[5]</sup>进行了机载激光雷达探测海水散射层的研究,利用偏振激光雷达探测海水散射系数的垂直分层结构,并确定成像的最大深度。Cariou 等<sup>[6]</sup>对水下人工目标进行偏振成像,发现偏振成像效果与人工目标的表面粗糙度、材料电磁属性、入射光方向及水中粒子有关,并提出可以利用偏振成像对不同材料的水下目标进行识别。

刘晓等<sup>[7]</sup>开展了伪装目标偏振特性检测实验,研究了观测角度、目标表面粗糙度、材料等的关系。曹念文等<sup>[8]</sup>开展了偏振成像技术对提高成像清晰度、成像距离的实验,通过定量计算成像图像的清晰度,得出偏振图像清晰度与距离的定量关系,发现在水质较清时,圆偏振度成像效果比线偏振成像效果好,随着水体衰减系数变大,线偏振成像效果好于圆偏振的重要结论。曾延安等<sup>[9]</sup>开展偏振图像处理算法的研究,得到了清晰度较好的偏振融合图像。

综上所述,国内外在偏振成像研究领域重点是通过偏振度来描述偏振特性,从而评价偏振成像效果。然而,偏振度不仅决定于 Stokes 矢量中的偏振元素,且与非偏振的辐射强度有关。本文采用太阳光源对水下目标进行偏振成像,对比分析 Stokes 矢量中偏振元素与辐射强度的成像效果,并探讨水下目标物深度、泥沙浓度、材质及观测波段对偏振成像探测的影响。

## 2 实验方法

### 2.1 实验装置

实验装置采用 Bossa Nova Tech 公司研制的全斯托克斯相机(SALSA)偏振相机,如图 1 所示。该偏振相机结合该公司研发的专用软件,可以实时对目标进行全 Stokes 偏振成像,获得每个像元的 Stokes 矢量 4 个元素(S0、S1、S2、S3),以及线偏振度、圆偏振度、偏

振度和偏振角。SALSA 偏振相机具备常规数码相机的成像镜头,在镜头和偏振成像系统之间有偏振器和不同波段的滤波片,并且可以通过专用软件控制,进行机械旋转选择不同波段,采集的数据通过光纤传输至电脑,具有操作简便,数据传输迅速的优点。SALSA 偏振相机的详细参数如表 1 所示。此外,实验采用直径 80 cm、高 80 cm 的圆形水槽,并且四周用黑色油漆完全涂黑,消除内壁反射光的影响。实验时模拟海上机载偏振相机垂直向下探测海水中物体。

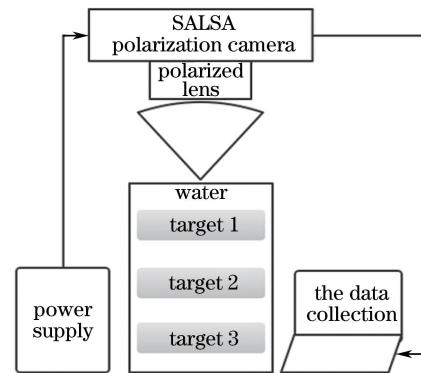


图 1 实验装置。(a)水下物体偏振成像实验系统框图;  
(b)水槽装置图;(c)数据采集

Fig. 1 Experimental schematic. (a) Underwater object polarization imaging experiment; (b) tank device diagram;  
(c) data collection

表 1 SALSA 偏振相机参数

Table 1 SALSA polarization camera parameters

Parameter	Value
Camera size /(mm×mm×mm)	80×80×100
Resolution /(pixel×pixel)	1040×1040
Frame rate /(frame·s <sup>-1</sup> )	12 (12 bit), 20 (8 bit)
Bitnumber for each pixel	8 or 12
Access port	USB
Wavelength range /nm	410-685
Lens caliber /mm	77
Software	SALSA version 2.3.5

### 2.2 实验步骤

搭建好实验平台之后,调整 SALSA 偏振相机镜头的光圈和焦距,使水下目标物清晰。根据光照情况,设置合适的曝光时间(1~200 ms)和增益等级,避免图像的某些区域像素 DN 值饱和溢出。SALSA 偏振相机可实时显示 S0、S1、S2、S3 图像和其他偏振图像,当成像达到最优时,保存相应的偏振成像数据并导出。依次分别开展不同水下目标物放置深度、泥沙

浓度、材质及观测波段对偏振成像探测影响的实验。

对于水下目标物不同放置深度的影响实验,通过改变槽中物体支撑底座的高度,调整水下目标物的放置深度分别为 20,40,60,80 cm。利用 SALSA 偏振相机得到目标物随放置深度变化的一系列偏振成像数据。

对于悬浮泥沙浓度(TSM)的影响实验,配比 TSM 浓度分别为 120,240,360,480 mg·L<sup>-1</sup> 的水体,对相同深度的同一水下目标物进行偏振成像,得到一系列随泥沙浓度变化的偏振成像数据。

对于不同材质物体的影响实验,保持目标物在清澈水体(不添加泥沙)中深度一致,放置铁块、塑料

和铝块 3 种不同材质制成的目标物,对其进行水下偏振成像。

对于探测波段的影响实验,SALSA 偏振相机提供 685,660,620,550,520,490,443,410 nm 等 8 个可选波段,分别采集各个波段下不同水下深度目标物的水下成像图像,分析波段对偏振成像效果的影响。

### 2.3 图像特征提取

采用 SALSA 偏振相机软件,分别输出 Stokes 矢量 S0、S1、S2、S3 等 4 个参数的图像,在此基础上进行图像处理,并提取图像特征信息,具体处理流程如图 2 所示。

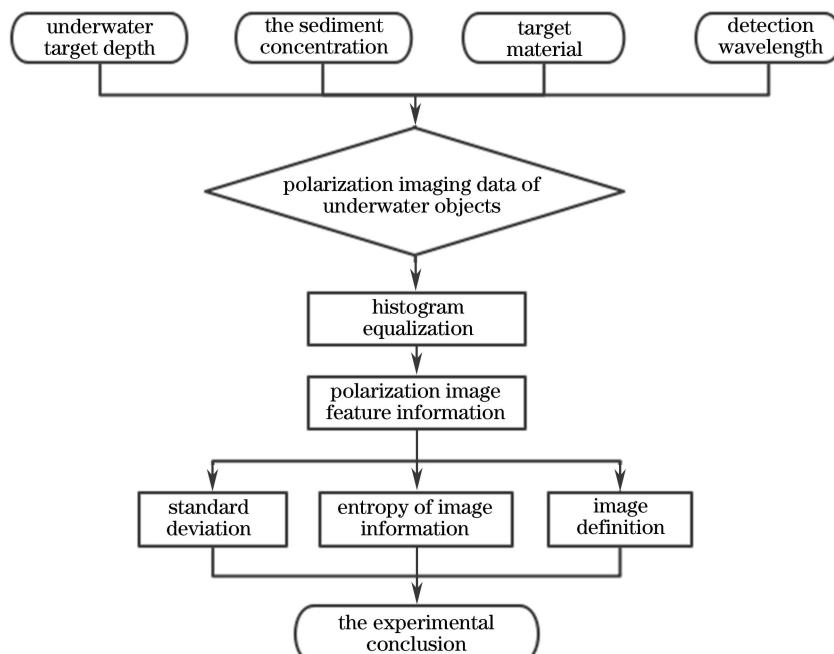


图 2 偏振图像数据处理流程

Fig. 2 Processing of polarization image data

#### 2.3.1 直方图均衡化

由于采用自然光源成像,受云层等天气影响较大,得到的图像可能是灰度值较低且灰度级分布又较窄。因此,为了提高图像的清晰度和对比度,采用直方图均衡化的处理方式,对原图像的灰度级进行拉伸,降低水下的后向散射,以便更好地展示图像的细节信息<sup>[10]</sup>。

直方图均衡方法如下:

$$s_k = T(r_k) = (L-1) \sum_{j=0}^k p_r(r_j) = \frac{L-1}{M \cdot N} \sum_{j=0}^k n_j, k = 0, 1, 2, \dots, L-1, \quad (1)$$

式中  $s_k$  为均衡化处理之后图像的灰度级,  $r_k$  为原

图灰度级,  $T(r_k)$  为累计分布函数(CDF),代表输出与原图之间的某种映射关系。 $T(r_k)$  满足以下两个条件:1)  $T(r_k)$  在  $[0, L-1]$  的灰度级上是单调递增的,像素在原图的灰度级高,在输出的图像中灰度级也同样也高,保证原图各灰度级在变换后仍保持相同的排列次序;2) 输出图像的灰度级与原图灰度级相同,依然为  $[0, L-1]$ ,保证了变换前后灰度值的变化范围一致。 $p_r(r_j)$  表示灰度级为  $r_j$  的概率密度函数(PDF),离散化公式为  $p_r(r_j) = \frac{n_j}{M \cdot N}$ ,  $n_j$  为该灰度级的像元个数,  $M \cdot N$  表示图像的总像元个数。

#### 2.3.2 图像特征信息提取

基于 SALSA 偏振相机采集的 Stokes 矢量 S0、S1、

S2、S3 元素图像, 经过相应的图像处理技术, 提取水下目标物的特征信息, 进而定量比较分析放置深度、泥沙浓度、材质和观测波长等因素对水下目标偏振成像的影响。主要采用以下图像质量评价指标<sup>[11]</sup>:

1) 标准差  $D$ ,

$$D = \sqrt{\frac{\sum_{x=1}^M \sum_{y=1}^N [f(x, y) - \mu]^2}{M \cdot N}}, \quad (2)$$

式中  $\mu$  为图像均值,  $\mu = \frac{1}{M \cdot N} \sum_{x=1}^M \sum_{y=1}^N f(x, y)$ , ( $x = 1, 2, \dots, M; y = 1, 2, \dots, N$ ),  $f(x, y)$  表示图像在二维空间域的灰度值,  $D$  反映图像中目标与背景反差的大小,  $D$  越大则图像中灰度值分布的越离散, 肉眼观察的效果则越好。

2) 图像熵  $H$ ,

$$H = - \sum_{r=0}^{L-1} p_r \cdot \ln(p_r), r = 0, 1, 2, \dots, L-1, \quad (3)$$

式中  $p_r$  表示灰度级为  $r$  的像素概率。根据 Shannon 的信息论可知, 图像熵的含义是从统计学的角度来评价图像中总体信息含量多少, 不涉及局部分析, 表征的是图像灰度分布的聚集特性, 但不反映图像灰度的空间特征。一般而言, 图像所含信息量越大, 图像的质量越高;

3) 图像清晰度  $G$ ,

$$G = \frac{1}{(M-1)(N-1)} \sum_{x=1}^{M-1} \sum_{y=1}^{N-1} \sqrt{\frac{\left[ \frac{\partial f(x, y)}{\partial x} \right]^2 + \left[ \frac{\partial f(x, y)}{\partial y} \right]^2}{2}}, \quad (4)$$

$G$  可以通过计算相邻像元之间的梯度值, 用来表征

表 2 不同深度的偏振图像质量

Table 2 Quality of polarized images at different depths

Depth / cm	Standard deviation				Information entropy				Clarity			
	S0	S1	S2	S3	S0	S1	S2	S3	S0	S1	S2	S3
20	75.364	74.239	73.877	72.712	3.878	5.046	4.992	4.890	11.73	39.29	36.82	33.56
40	75.279	71.918	72.080	69.397	3.833	4.867	4.628	4.876	11.39	30.84	33.65	30.46
60	74.926	70.687	71.651	71.939	4.658	4.525	4.346	4.101	7.49	27.02	28.85	28.96
80	73.995	70.575	70.576	73.413	3.382	4.248	4.354	3.504	6.31	26.25	26.13	23.21

### 3.2 不同泥沙浓度水体的偏振成像

配制 TSM 分别为 120, 240, 360, 480 mg·L<sup>-1</sup> 的混浊水并与清水(泥沙浓度近似为 0)对比, 得到一系列随着泥沙浓度变化的水下目标物偏振成像结果, 如图 5 所示。表 3 给出了不同泥沙浓度下, S0、S1、S2、S3 图像的信息指标。图 6 为对应的 S0、S1、

图像的纹理两侧附近的灰度值差异情况, 反映图像微小细节反差变化的速率, 可以评价图像清晰度。一般而言,  $G$  值越大, 图像的层次越多, 也就越清晰。

## 3 结果与分析

### 3.1 不同深度目标物的偏振成像

根据实验步骤, 分别设置水下目标的放置深度为 20, 40, 60, 80 cm, 得到一系列随深度变化的偏振成像数据, 如图 3 所示。从偏振图像中发现, 随着水下目标物深度增加, 成像目标在减小, 同时由于水体对光的吸收作用和水中粒子散射作用, 使得目标物的偏振成像表现更多背景噪声, 图像变模糊。相比于传统的辐射强度 S0 图像, 偏振图像(S1、S2、S3)的目标轮廓更为清晰。表 2 为 S0、S1、S2、S3 图像的信息指标。图 4 为 S0、S1、S2、S3 图像信息指标随目标物放置深度的变化曲线。可以看出, 辐射强度 S0 图像和线偏振 S1、S2 图像的标准差随着目标物深度加深而减小, 说明在水越深的地方, 进入偏振相机的目标物反射光越弱, 水体后向散射影响越大, 导致目标物逐渐淹没在背景噪声中。圆偏振 S3 图像的标准差表现为先减弱后增强。S1、S2、S3 偏振图像的信息熵均表现为随着目标物深度加深, 信息量减小, 反映图像质量逐渐下降, 目标物细节部分逐渐模糊了。但与辐射强度图像 S0 对比, 图像信息量减少的趋势略慢, 反映了偏振成像比传统辐射强度成像具有探测优势, 偏振成像能够抑制水体散射和吸收对成像质量的影响。从图像清晰度指标来看, S1、S2、S3 偏振图像均比辐射强度 S0 图像的值大, 进一步说明偏振成像能够得到更清晰的水下目标物图像。

S2、S3 图像信息指标随泥沙深度的变化曲线。可以看出, 随着泥沙浓度加大, 水中粒子散射加强, S0、S1、S2、S3 图像标准差逐渐减小, 反映目标物与背景反差减小, 目标物逐渐被背景噪声淹没。泥沙浓度对 S1、S2、S3 偏振图像的影响比对辐射强度 S0 图像大, 这是由于水体中泥沙粒子多次散射导致显著

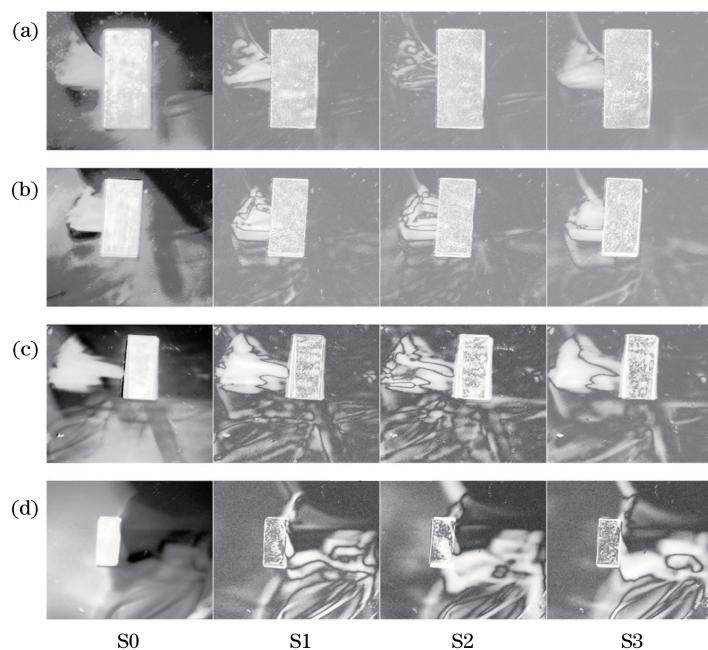


图 3 不同水下物体深度的偏振图像。(a) 20 cm; (b) 40 cm; (c) 60 cm; (d) 80 cm

Fig. 3 Polarized images at different depths of underwater target. (a) 20 cm; (b) 40 cm; (c) 60 cm; (d) 80 cm

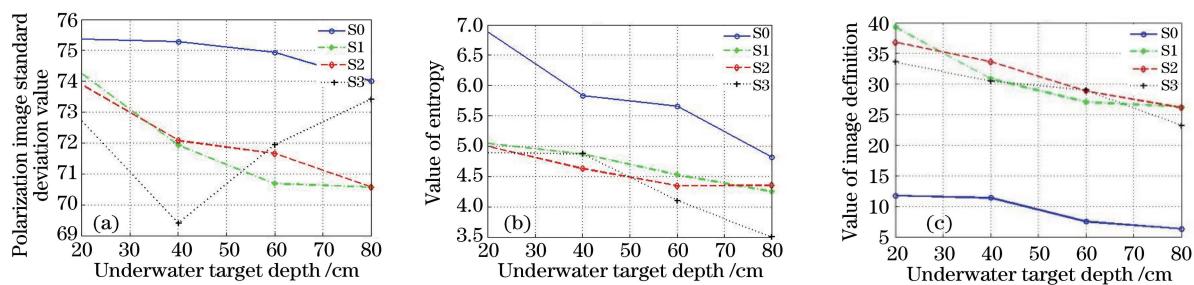


图 4 不同深度偏振图像质量指数的折线图。(a) 图像标准差; (b) 图像信息熵; (c) 图像清晰度

Fig. 4 Quality of polarized images versus underwater depths.

(a) Standard deviation; (b) entropy of image information; (c) image definition

的退偏作用<sup>[12]</sup>。总体来看,随着泥沙浓度增大,S1、S2、S3 偏振图像的目标信息量逐渐减少,背景噪声逐渐增大,目标图像质量下降。从图像清晰

度来看,在泥沙水体中,S1、S2、S3 偏振图像可以较好地检测出目标物的边缘轮廓,比传统辐射强度 S0 图像更为清晰。

表 3 不同泥沙浓度的偏振图像质量

Table 3 Quality of the polarization images for different sediment concentrations

TSM / (mg·L <sup>-1</sup> )	Standard deviation				Information entropy				Clarity			
	S0	S1	S2	S3	S0	S1	S2	S3	S0	S1	S2	S3
0	75.24	72.16	72.025	69.589	5.573	4.829	4.745	4.831	17.501	44.390	44.214	41.131
120	75.07	71.37	71.176	72.424	5.411	4.103	4.103	4.565	9.790	39.033	40.588	36.349
240	74.86	69.16	69.469	73.734	5.307	3.671	3.687	4.181	8.916	38.832	40.379	34.927
360	74.65	66.88	67.853	70.555	5.049	2.525	2.484	3.025	6.043	37.857	38.227	32.315
480	74.03	63.44	64.435	60.124	4.746	2.581	2.388	3.417	3.660	36.346	36.356	30.127

### 3.3 不同材质目标物的偏振成像

实验设置了 4 种不同材质的水下目标物:铁块、铝质、塑料、白色涂漆塑料,尺寸均为 50 mm × 20 mm × 10 mm 的长方体。这些目标物在清水条件下进行偏振成像,得到辐射强度 S0 图像,以及 S1、S2、S3 偏振图像,如图 7 所示。

由图 7 可知,由于塑料表面的反射率较高,塑料材质辐射强度 S0 图像灰度值更大。不同材质物体的 S0、S1、S2、S3 图像清晰度指标如图 8 所示。可以看出,金属铁和铝的 S0 图像清晰度低于塑料,但是圆偏振图像 S3 中,金属的清晰度明显大于塑料和表面涂漆的塑料,验证了圆偏振光对金属与塑料材质的良好区分性。

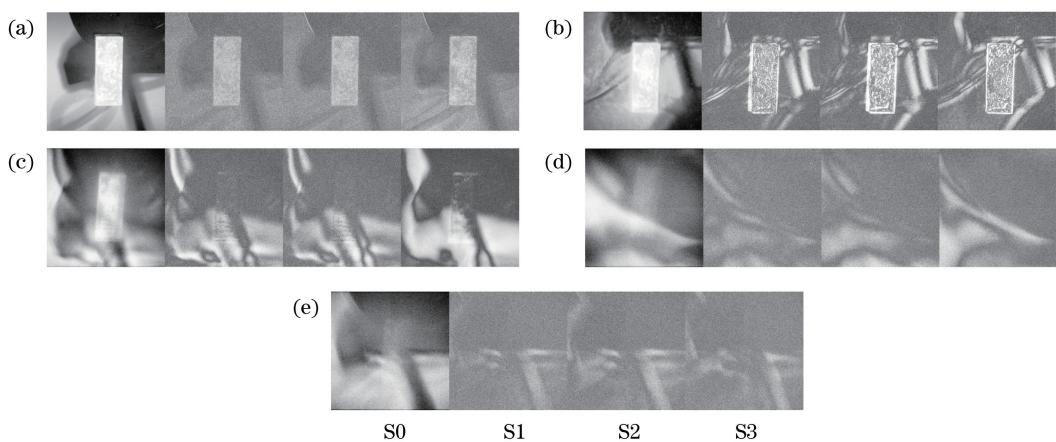


图 5 不同泥沙浓度下的偏振图像。(a)  $0 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ ; (b)  $120 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ ; (c)  $240 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ ; (d)  $360 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ ; (e)  $480 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$

Fig. 5 Polarized images for different sediment concentrations.

(a)  $0 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ ; (b)  $120 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ ; (c)  $240 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ ; (d)  $360 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ ; (e)  $480 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$

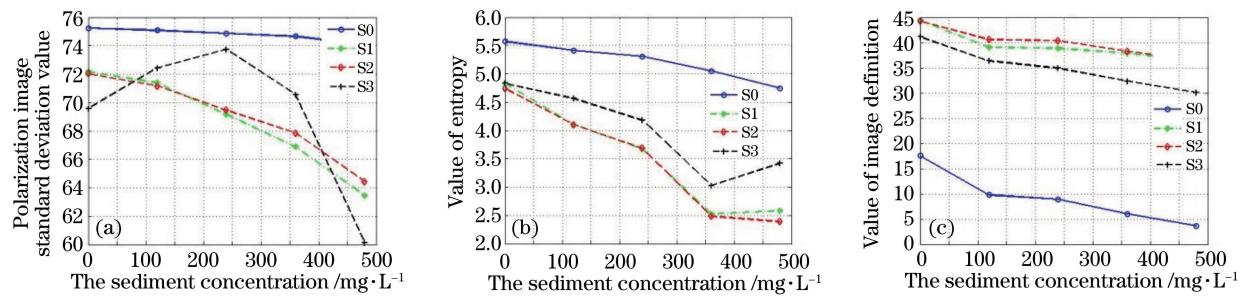


图 6 偏振图像质量指标随泥沙浓度的变化。(a)图像标准差; (b)图像信息熵; (c)图像清晰度

Fig. 6 Quality of polarized images versus sediment concentrations.

(a) Standard deviation; (b) entropy of image information; (c) image definition

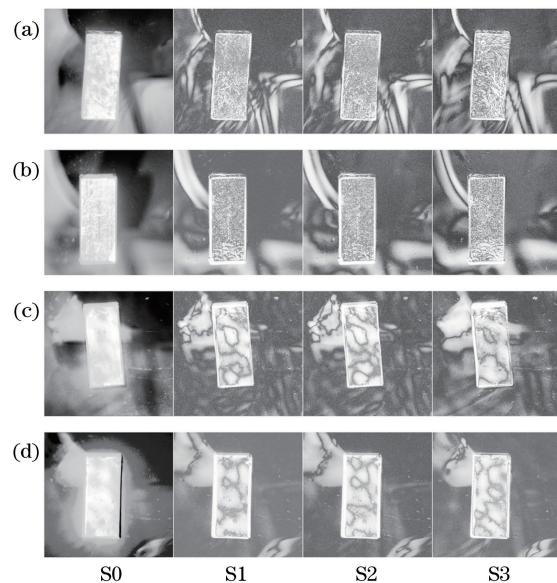


图 7 4 种材质目标物的偏振图像。(a)铁块;(b)铝质;(c)塑料;(d)白色涂漆塑料

Fig. 7 Polarized images of four different material objects. (a) Iron; (b) aluminum;

(c) plastic; (d) plastic with white paint

### 3.4 不同波段的偏振成像

在清水条件下,选用 410, 443, 490, 520, 550, 620, 660, 685 nm 波段,对放置深度为 40 cm 的铁质长方体进行偏振成像,如图 9 所示。由于水体吸收和散射具有显著的波长选择性<sup>[13]</sup>(图 10),因此,不同波段水下偏振成像,其成像效果也存在显著的差异。从吸收曲线来看,在可见光谱内,蓝绿光(490~515 nm)在水中的衰减系数最小,穿透力最强,因此该波段范围内的偏振成像效果比较好,目标物较清晰,红光的吸收最为强烈,成像效果较差<sup>[14]</sup>。对比分析所采用的 8 个波段的偏振成像效果图,发现 490 nm 波段的图像最为清晰,这与该波段水体吸收相对较小一致。

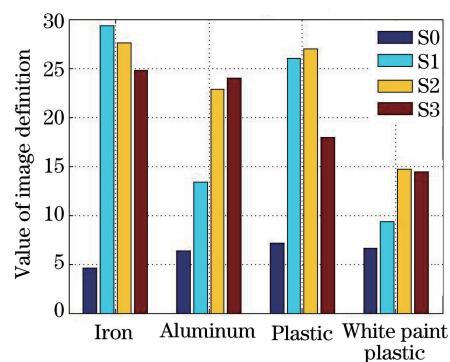


图 8 不同材质物体偏振图像的清晰度

Fig. 8 Polarized images definition of different material objects

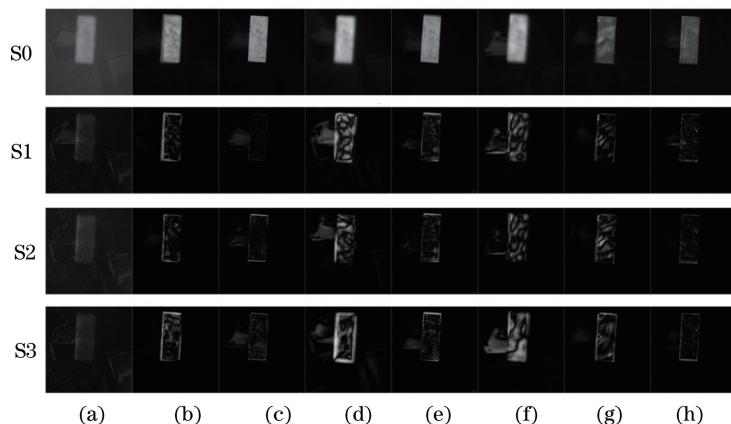


图 9 不同波长下的偏振图像。(a) 410 nm; (b) 443 nm; (c) 490 nm; (d) 520 nm;  
(e) 550 nm; (f) 620 nm; (g) 650 nm; (h) 685 nm

Fig. 9 Polarized images at different wavelengths. (a) 410 nm; (b) 443 nm; (c) 490 nm; (d) 520 nm;  
(e) 550 nm; (f) 620 nm; (g) 650 nm; (h) 685 nm

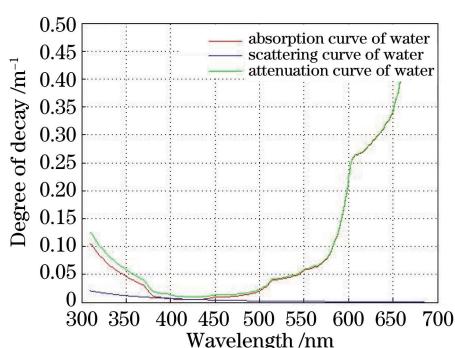


图 10 水体衰减趋势曲线

Fig. 10 Water attenuation trend curves

## 4 结 论

从 Stokes 矢量各参数图像的角度,研究了偏振成像相比于传统辐射强度成像的优势。分别从水下物体放置深度、泥沙浓度、目标物材质及观测波段等 4 个方面进行了偏振成像实验,得到以下结论:

1) 偏振成像可获得比传统辐射强度成像更为清晰的水下目标物图像,能够更好地获取水下物体的边界轮廓、纹理等信息,有效抑制水体对光的吸收、散射影响。

2) 与传统的辐射强度成像相比,偏振成像图像的信息量随目标物放置深度衰减较为缓慢,可探测更大深度的水下目标。

3) 泥沙浓度对偏振图像的影响比辐射强度图像大,但偏振图像仍然可以较好地在高泥沙水体中检测出目标物的边缘轮廓,且比传统辐射强度图像更为清晰;泥沙浓度对水下偏振探测的影响主要体现在水中泥沙粒子对光的散射作用上,泥沙浓度增大,水中粒子后向散射系数增大,图像背景噪声增强,目标物不清晰,根据图像的清晰度计算可知,偏振图像可以较好的提取水下物体的边界轮廓。

4) 波长对水下物体偏振成像探测具有一定的影响,在清洁水体中,蓝绿波段偏振成像总体效果最佳。

由于采用自然光源,光照强度和水面波浪对成像有一定的影响;另外,由于水槽深度有限,没有测得水下最大偏振成像深度;在研究泥沙浓度影响时,泥沙颗粒在水中有一定的沉降,这些需要在后续研究中进一步改进。

## 参 考 文 献

- [1] Mclean E A, Burris H R, Strand M P. Short-pulse rang-gated optical imaging in turbid water [J]. Applied Optics, 1995, 34(21): 4343-4351.
- [2] Hu D M, Liu Q, Niu G C. Low contrast target detection based on visible light polarization imaging system[J]. Laser & Optoelectronics Progress, 2017, 54(6): 061101.  
胡冬梅, 刘泉, 牛国成. 可见光偏振成像系统对低对比度目标的探测[J]. 激光与光电子学进展, 2017, 54(6): 061101.
- [3] Sun Z Q, Zhao Y S. Polarized reflectance characteristics of vegetation canopies based on polarization reflection model [J]. Laser & Optoelectronics Progress, 2016, 53(10): 102802.  
孙仲秋, 赵云升. 基于地表偏振反射模型的植被冠层偏振反射特性研究[J]. 激光与光电子学进展, 2016, 53(10): 102802.
- [4] Liu J, Huang H Q, Bai Y, et al. Influences of linear polarization light on the measurement of water absorption coefficient[J]. Acta Optica Sinica, 2014, 34(6): 0601003.  
刘佳, 黄海清, 白雁, 等. 不同线偏振光对水体吸收系数测量的影响[J]. 光学学报, 2014, 34(6): 0601003.
- [5] Vasilkov A P, Goldin Y A, Gureev B A. Airborne polarized lidar detection of scattering layers in the ocean[J]. Applied Optics, 2001, 40(24): 4353-4364.
- [6] Cariou J, Le Jeune B, Lotrian J, et al. Polarization effects of seawater and underwater targets [J]. Applied Optics, 1990, 29(11): 1689-1695.
- [7] Liu X, Wang F, Xue M G. The study of camouflage target detection based on polarization characteristics [J]. Optical Technique, 2008, 34(7): 787-790.  
刘晓, 王峰, 薛模根. 基于偏振特性的伪装目标检测方法研究[J]. 光学技术, 2008, 34(5): 787-790.
- [8] Cao N W, Liu W Q, Zhang Y J. Quantitative study of improvement of the imaging contrast and imaging range by the polarization technique[J]. Acta Physica Sinica, 2000, 49(1): 61-66.
- [9] 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.
- [10] Shen Y, Dang J W, Wang Y P, et al. A color underwater image clearness algorithm based on Tetrolet transform[J]. Acta Optica Sinica, 2017, 37(9): 091002.  
沈瑜, 党建武, 王阳萍, 等. 基于Tetrolet变换的彩色水下图像清晰化算法[J]. 光学学报, 2017, 37(9): 091002.
- [11] Yin H N, Hu L M, Fan Z G. Fusion method for polarization images based on images analysis of features[J]. Journal of Applied Optics, 2015, 36(2): 220-226.  
尹海宁, 胡良梅, 范之国. 一种基于特征分析的偏振图像融合方法[J]. 应用光学, 2015, 36(2): 220-226.
- [12] Han J F, Xia M, Sun L Y, et al. Influence of underwater targets with different polarization properties on the resolution of imaging system [J]. Acta Optica Sinica, 2016, 36(3): 0311001.  
韩捷飞, 夏岷, 孙立颖, 等. 水下目标不同偏振特性对成像系统分辨率的影响[J]. 光学学报, 2016, 36(3): 0311001.
- [13] Guan F, Zhang X H. Optimal wavelength selection of illumination source for underwater continuous light imaging system [J]. Optics & Optoelectronic Technology, 2016, 14(4): 48-52.  
管风, 张晓晖. 水下连续光成像系统照明光源的最优化波长选择[J]. 光学与光电子技术, 2016, 14(4): 48-52.
- [14] Li L, Wang H G, Liu X. Underwater image enhancement based on improved dark channel prior and color correction[J]. Acta Optica Sinica, 2017, 37(12): 1211003.  
李黎, 王惠刚, 刘星. 基于改进暗原色先验和颜色校正的水下图像增强[J]. 光学学报, 2017, 37(12): 1211003.