

不同水质下光学偏振对距离选通成像目标识别距离的影响分析

苏乐伟¹, 段存丽¹, 孙亮^{2*}, 宋博², 雷平顺², 陈嘉男², 何军², 周燕^{2,3,4}, 王新伟^{2,3,4}

1. 中国科学院半导体研究所光电系统实验室, 北京 100083;
2. 中国科学院大学材料与光电研究中心, 北京 100049;
3. 西安工业大学光电工程学院, 陕西西安 710021;
4. 中国科学院大学电子电气与通信工程学院, 北京 100049)

摘要: 水下光学成像技术对于海底资源勘测、海洋生态监测、水下搜索救援、水下考古等应用具有重要意义。相比传统水下摄像机, 距离选通成像技术可以过滤选通切片外的后向散射噪声和环境背景噪声, 实现高质量水下成像, 但是在浑浊水体中仍然会受到切片内后向散射噪声影响, 导致成像距离缩短。对此, 开展了光学偏振与距离选通成像结合的水下偏振选通成像技术研究, 利用后向散射光良好的保偏性去除选通切片范围内的后向散射噪声, 提升目标识别距离。通过理论仿真和实验研究, 对比分析了不同水质下距离选通成像和偏振选通成像目标识别距离的差异。发现存在临界衰减系数 c_0 : 当水体衰减系数小于等于 c_0 时, 光学偏振对于提升距离选通成像工作距离无效果; 当水体衰减系数大于 c_0 时, 偏振可提升距离选通成像工作距离。实验中还发现, 目标反射率会影响临界衰减系数。该研究有利于不同水质下距离选通成像的优化应用。

关键词: 水下光学成像; 偏振距离选通成像; 距离选通成像; 偏振成像; 信噪比; 识别距离
中图分类号: TN249 **文献标志码:** A **DOI:** 10.3788/IRLA20230372

0 引言

光学成像技术可获得直观、高分辨率的图像信息, 便于海底目标识别和详查。在水下低照度环境下, 通常采用主动光源进行照明, 但在水体浑浊度较高时, 受水体吸收和散射作用影响, 水下光学成像存在工作距离近、图像信噪比低的问题。随着海底资源开发、海洋生态监测、海洋渔业评估、水下考古、搜索救援等水下作业需求的日益增高, 对水下光学成像提出了更高要求: 远距离、高分辨率、高信噪比成像。如何实现高性能的水下光学成像成为研究热点和难点。

水下光学图像模糊主要来源于水体散射噪声。整体上, 水体散射包括前向散射和后向散射, 其中后

向散射会降低图像信噪比和对比度^[1], 前向散射主要影响图像的空间分辨率。相比前向散射, 后向散射对水下光学图像的影响更为突出。相比传统水下光学成像, 距离选通成像技术^[2-5]在抑制后向散射方面具有明显效果。距离选通成像技术是一种主动激光成像技术, 通过对目标进行选通切片成像, 可减小后向散射噪声。选通切片的景深影响后向散射噪声的抑制效果, 其景深大小与激光脉宽和选通门宽有关, 通常切片景深越小, 水体后向散射噪声越小。为降低水体后向散射噪声, 需压窄选通切片景深, 但这会影响大景深目标的观测。因此, 在大切片景深下如何进一步抑制后向散射成为研究重点。

不同于距离选通成像, 光学偏振成像技术可利用

收稿日期: 2023-06-19; 修订日期: 2023-10-11

基金项目: 国家自然科学基金项目 (62005264, 42276197)

作者简介: 苏乐伟, 男, 硕士生, 主要从事水下偏振选通成像方面的研究。

导师简介: 段存丽, 女, 副教授, 硕士, 主要从事光学检测及信息处理方面的研究。

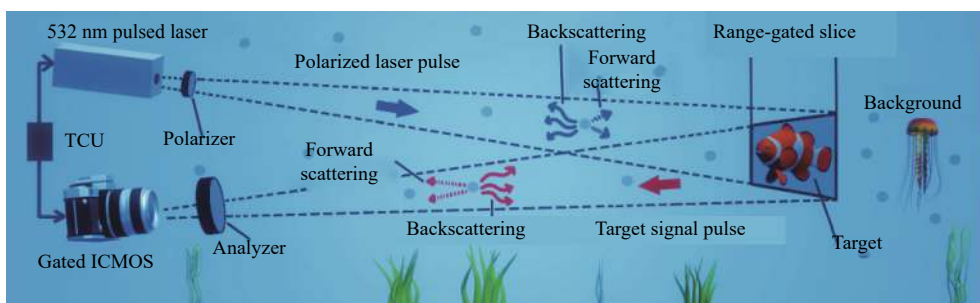
王新伟, 男, 研究员, 博士, 主要从事透散射超视距成像、高精度光视觉测量与导航技术方面的研究。

通讯作者: 孙亮, 男, 助理研究员, 博士, 主要从事主动光学成像、激光雷达、图像可视化增强方面的研究。

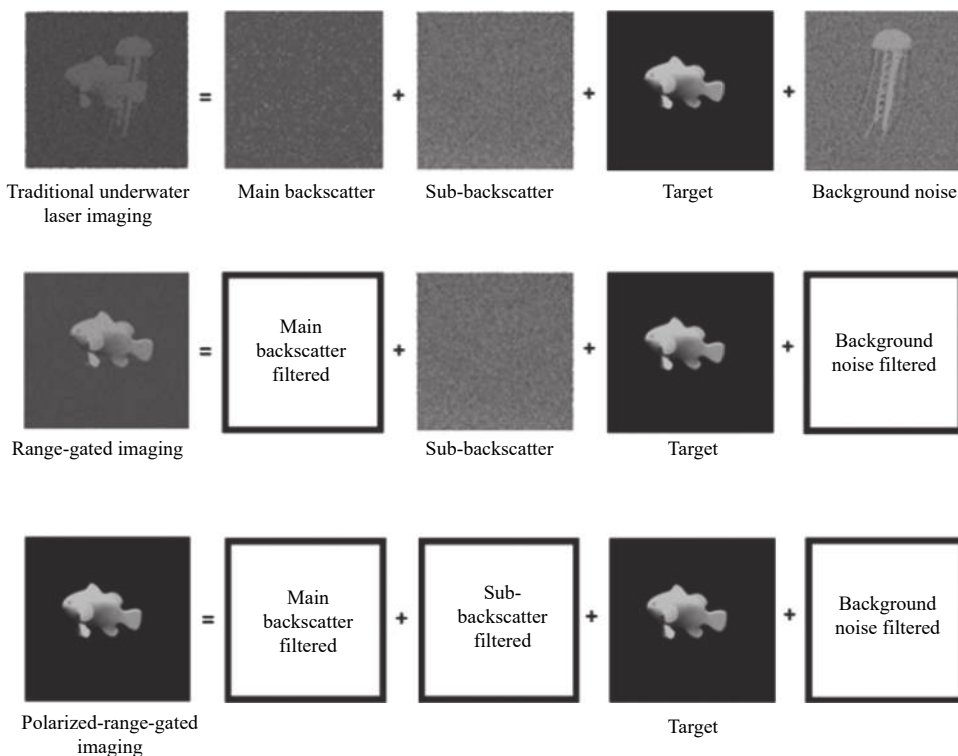
目标反射光和后向散射光之间的偏振差异来过滤后向散射噪声^[6-8]。鉴于此,秦琳将光学偏振成像与距离选通成像结合^[9],利用光学偏振成像进一步去除距离选通成像中的后向散射噪声,证明了偏振选通成像的可行性,但其并未建立和分析成像物理模型,且受室内环境限制,对衡量自然水体中成像距离的参考意义不大。文中在建立偏振选通物理模型的基础上,通过不同水质下距离选通成像(简称“选通成像”)和偏振距离选通成像(简称“偏振选通成像”)的对比研究,分析距离选通成像和偏振选通成像的水下目标探测的适用条件。

1 偏振选通成像物理模型

图 1 为水下偏振距离选通成像物理模型示意图。如图 1(a) 所示,典型的水下偏振距离选通成像系统主要由脉冲激光器、门控成像器件、起偏器、光学发射镜头、检偏器、光学接收镜头、时序控制器(TCU)等组成。工作过程中,TCU 控制脉冲激光器和门控成像器件 ICMOS 按照设计的选通时序工作。其中,脉冲激光器发出激光脉冲,通过起偏器起偏后产生线偏振光,并由光学发射镜头整形后产生所需的偏振脉冲光,偏振脉冲光经目标反射后产生含有目标偏



(a) 水下偏振选通成像模型示意图
(a) Schematic diagram of underwater PRGI model



(b) 水下偏振选通成像与不同成像技术去噪对比
(b) Denoising comparison between underwater PRGI and other methods

图 1 水下偏振选通成像示意图

Fig.1 Schematic diagram of underwater PRGI

振信息的回波信号;在设定延时下,ICMOS 开启选通快门,接收由光学接收镜头采集并由检偏器过滤的目标信号,利用选通空间滤波抑制选通切片与成像系统间传输链路上水体后向散射噪声,并利用偏振滤波进一步抑制选通切片内水体后向散射噪声,实现水下光学图像信噪比和对比度的提升。图 1(b)对比示意了成像过程中传统水下光学成像、选通成像和偏振选通成像接收目标信号、水体噪声和背景噪声的差异。传统水下光学成像包含了整个链路上全部的噪声和目标信号,具体包括目标与成像系统间的主要后向散射噪声(main backscatter)、目标附近的残留噪声(sub-backscatter)、目标信号、水体背景噪声;相比传统水下光学成像,选通成像则有效过滤了目标与成像系统间的主要后向散射噪声和水体背景噪声,但是选通图像中还存在选通切片内的残留后向散射噪声;相比选通成像,将光学偏振成像引入选通成像后,偏振选通成像则可进一步抑制选通图像中的残留噪声。需说明的是,成像系统自身噪声在各成像技术中均存在,因此在图 1(b)中均未单独示意。偏振选通成像虽然可以进一步抑制选通图像中的残留噪声,但由于起偏器和检偏器对光能量存在衰减,因此在实际应用中,不同水质下选通成像和偏振选通成像需对比研究,以明确适用条件。

王新伟^[10]和葛卫龙^[11]等对选通成像目标光能量进行了计算,相机接收到的距离 r 处的目标能量:

$$E_r = \frac{\rho f_L}{f_c} \eta_r \eta_t \left(\frac{D}{2r}\right)^2 e^{-2cr} \cdot \int_0^\infty \frac{G(t)Q(t)}{t_p} dt \quad (1)$$

式中: f_L 为脉冲激光重复频率; f_c 为相机帧频; ρ 为水下目标(视为朗伯体)的反射率; $G(t)$ 为激光函数; D 为接收光学系统直径; η_r 和 η_t 为发射和接收光学系统的效率; $Q(t)$ 为门函数; c 为水体衰减系数; t_p 为脉冲宽度。

在对目标信号光进行计算后,需要对水体后向散射光能量进行计算。王新伟^[10]和李丽等^[12]计算了选通成像过程中的后向散射光能量,综合上述研究成果,文中给出后向散射光能量为:

$$E_b = \frac{f_L}{f_c} \left(\frac{D}{2}\right)^2 \sigma \eta_r \eta_t \int_0^\infty \int_{\frac{V_w(\tau_d-t_p)}{2}}^{\frac{V_w(\tau_d+t_g)}{2}} \frac{G(t)Q(t)e^{-2cr}}{\tau_p r^2} dt dr \quad (2)$$

式中: σ 为水体后向散射系数; V_w 为水中光速; τ_d 为开

门时刻(延时); t_g 为选通门宽。 $G(t)$ 和 $Q(t)$ 取值如下:

$$G(t) = \begin{cases} G, & \tau_d \leq t \leq \tau_d + t_g \\ 0, & \text{else } t \end{cases} \quad (3)$$

$$Q(t) = \begin{cases} Q, & \tau_d \leq t \leq \tau_d + t_g \\ 0, & \text{else } t \end{cases} \quad (4)$$

式中: G 为相机增益; Q 为激光单脉冲能量。

偏振选通成像无法过滤切片内的前向散射光,在高浑浊水体中,前向散射光对成像质量影响严重,因此,文中在建立偏振选通成像物理模型时计算前向散射光能量^[13]:

$$E_f = \frac{f_L}{f_c} \eta_r \eta_t \int_{t_g}^{\tau_d + \tau_d} \int_{\frac{V_w(\tau_d-t_p)}{2}}^{\frac{V_w(\tau_d+t_g)}{2}} \frac{\pi D^4 G(t)Q(t)\beta(\theta)\rho e^{-2cr}}{16\tau_p r^2 r'^2} dt dr' \quad (5)$$

式中: r' 为前向散射体积元距相机距离。体积散射函数采用 Henyey-Greenstein 函数:

$$\beta(\theta) = \frac{b}{4\pi} (1-g^2)(1+g^2-2g\cos\theta)^{-2/3} \quad (6)$$

式中: b 为总散射系数; g 为非对称因子。取 $b=0.45c$, $g=0.8$, 前向截获因子取 $1^{[14-15]}$ 。

距离选通成像信噪比如下:

$$SNR_{RGI} = \frac{E_r}{E_d + E_b + E_f} \quad (7)$$

式中: E_d 为系统噪声功率。

当水体散射系数低于 0.5 mm^{-1} 时,532 nm 线偏振光入射水体时产生的后向散射光的线偏振度随散射系数的增加呈 e 指数衰减,圆偏振度呈 e 指数上升^[16-17]。假设线偏振度为 DOP_l ,圆偏振度为 DOP_c ,已知检偏器可以过滤 100% 的线偏振态后向散射光和 50% 的圆偏振态后向散射光。单个偏振器的光衰减为 50%^[18],定义偏振选通信噪比如下:

$$SNR_{PRGI} = \frac{0.25E_r}{0.25[(1-0.5DOP_c - DOP_l)E_b + E_f] + E_d} \quad (8)$$

化简后可得:

$$SNR_{PRGI} = \frac{E_r}{(1-0.5DOP_c - DOP_l)E_b + E_f + 4E_d} \quad (9)$$

由于较难获得准确的水体后向散射光偏振度数据,假设当水体散射系数远低于 0.5 mm^{-1} 时,后向散射光的线偏振度近似为 1,圆偏振度为 0,即偏振器能完全过滤后向散射光^[16-17]。此外,因模拟深海全黑光照环境,可忽略环境光影响。

文中基于相机接收的目标光和水体散射光能量建立信噪比模型,通过反射率 ρ 来区分不同目标,与目标频率特性无关。

2 仿真结果及结论

为对比分析选通成像与偏振选通成像的识别距离差异,在偏振选通成像的信噪比模型仿真分析中,选择 $SNR=2.5$ 作为图像识别的最低标准^[19]。取 $Q=0.2$ mJ, $\rho=0.4$, $D=0.1$ m, $t_g=t_p=10$ ns, $V_w=2.25e^8$ m/s, 系统噪声功率 $E_d=4.9\times 10^{-6}$ mW。需说明的是,文中所述的目标识别距离仅用于分析同等实验条件下选通成像和偏振选通成像的识别距离的差异,并不代表选通成像和偏振选通成像的极限工作距离。

图 2 为水体衰减系数 0.21 m^{-1} 时选通成像与偏振选通成像的识别距离和 SNR 关系归一化仿真结果。如图 2 所示,偏振选通成像识别距离约为 15 m,选通成像识别距离约为 17 m。根据前述仿真模型可知,造成偏振选通成像小于选通成像识别距离的原因是水体衰减系数较低时,水体后向散射较小,水体的吸收作用对识别距离的限制起主要作用。

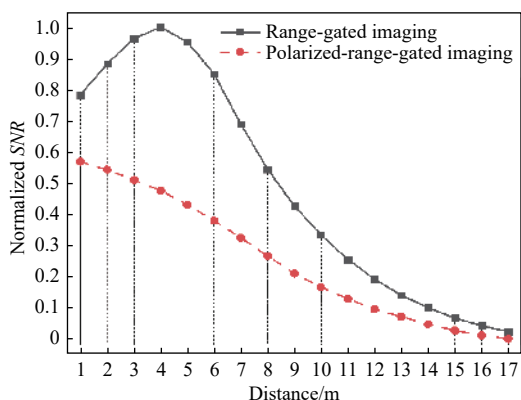


图 2 水体衰减系数 0.21 m^{-1} 时识别距离和信噪比关系归一化仿真结果

Fig.2 Normalized simulation results between recognition distance and SNR under the water attenuation coefficient of 0.21 m^{-1}

图 3 为水体衰减系数 0.42 m^{-1} 时选通成像与偏振选通成像的识别距离和 SNR 关系归一化仿真结果。如图 3 所示,偏振选通成像的识别距离约为 8 m,选通成像识别距离约为 9 m。在该衰减系数下偏振选通成像依然小于选通成像的识别距离,但两者之间差距缩小。根据前述仿真模型可知,当水体衰减系数增加

时,水体后向散射增加,水体的散射作用会降低目标识别距离。

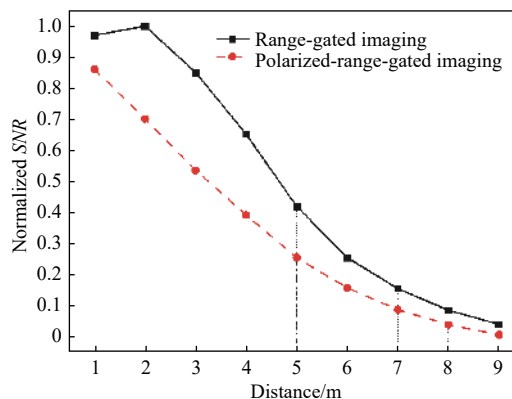


图 3 水体衰减系数 0.42 m^{-1} 时识别距离和信噪比关系归一化仿真结果

Fig.3 Normalized simulation results between recognition distance and SNR under the water attenuation coefficient of 0.42 m^{-1}

图 4 为水体衰减系数 0.63 m^{-1} 时选通成像与偏振选通成像的识别距离和 SNR 关系归一化仿真结果。如图 4 所示,偏振选通成像的识别距离在 5.5~6 m 之间,选通成像识别距离在 5~5.5 m 之间。根据前述仿真模型可知,当水体衰减系数相对较高时,水体后向散射影响严重,相比选通成像,偏振选通成像可提升识别距离。

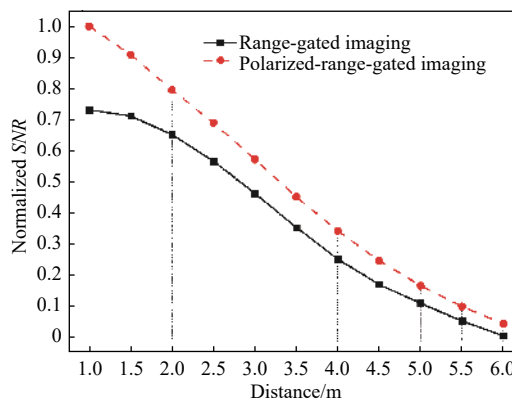


图 4 水体衰减系数 0.63 m^{-1} 时识别距离和信噪比关系归一化仿真结果

Fig.4 Normalized simulation results between recognition distance and SNR under the water attenuation coefficient of 0.63 m^{-1}

综上,当水体的衰减系数较低时,偏振选通成像难以提升目标识别距离,主要原因是引入偏振后起偏器和检偏器对光能量的衰减作用远大于对后向散射

抑制带来的有益效果;当水体衰减系数较大,偏振选通成像可有效抑制后向散射,有效提升目标识别距离。

对比公式 (5) 和公式 (6),由于偏振器的衰减作用,偏振选通成像在过滤后向散射光的同时放大了器件噪声 E_d ,若将 E_d 视为定量,可得出如下结论:

- 1) 在低衰减系数水体中,偏振选通成像无法有效提升选通成像的目标识别距离;
- 2) 在高衰减系数水体中,偏振选通成像可有效提升选通成像的目标识别距离。

由上述结果可发现,应存在临界衰减系数 c_0 。当水体衰减系数为 c_0 时,选通成像的识别距离与偏振选通成像的识别距离相当,后续水池实验将进一步验证上述结论。

3 水池实验及分析

3.1 实验装置

实验装置和实验目标如图 5 所示。选通成像系统为中国科学院半导体研究所研制的水下距离选通成像系统“凤眼 3”,该系统采用 532 nm 固体半导体激光器作为照明光源,高性能自研 IC MOS 作为图像采集模块;偏振选通成像系统是在“凤眼 3”的基础上增加起偏器和检偏器,其中,起偏器与检偏器依靠支架固定在“凤眼 3”系统上。实验目标选用海洋中典型目

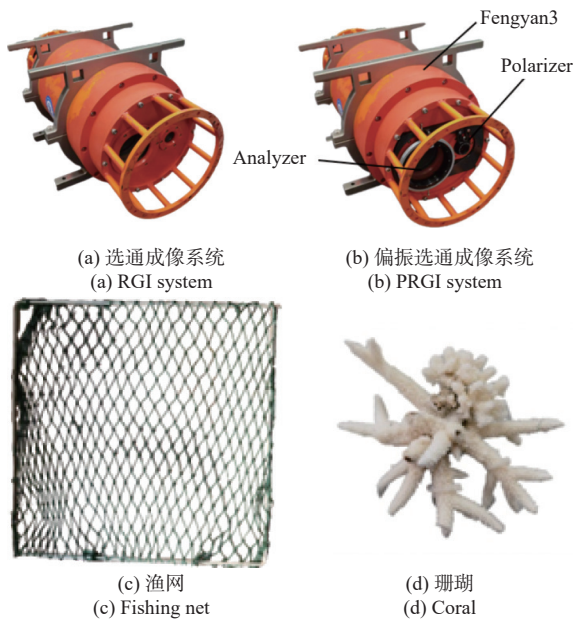


图 5 实验系统与实验目标

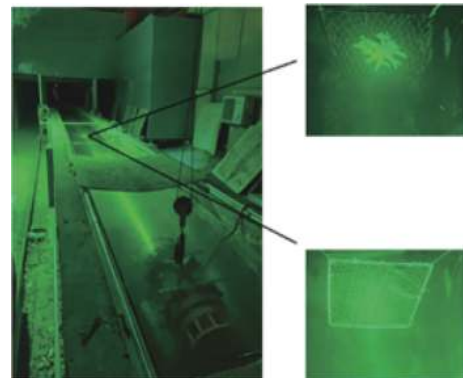
Fig.5 Experimental systems and experimental targets

标渔网和珊瑚,水体衰减系数测量设备为水体衰减系数测量仪 C-Star。为模拟深海无光环境,实验在夜间进行。

实验场景图如图 6 所示,衰减仪与后向散射仪分别用于测量水体的衰减系数与后向散射系数。实验过程中从 5 m 开始对目标进行成像实验,在低衰减系数下以 1 m 或 2 m 为间隔增加目标距离,在高衰减系数下以 0.5 m 为间隔增加目标距离,直至人眼无法清晰识别成像结果。实验通过添加牛奶调制水体衰减系数,并每隔 30 min 监测水体参数变化量,以保证实验过程中水体衰减系数的一致性。针对不同水体进行选通成像和偏振选通成像,保证两者视场相同且目标处于相同激光照射下,由于环境因素造成细微的位置偏差对最终结果影响不大。利用算法对不同距离下选通成像和偏振选通成像信噪比进行计算,绘制归一化 SNR 曲线,验证两者成像效果差异。在绘制过程中,将 $SNR=2.5$ 作为图像识别最低标准^[19],此时对应的成像距离即为最远识别距离。



(a) 实验场景白天照片
(a) Experiment scene at daytime



(b) 夜间实验场景照片
(b) Experiment scene diagram at nighttime

图 6 实验场景图

Fig.6 Experiment scene diagram

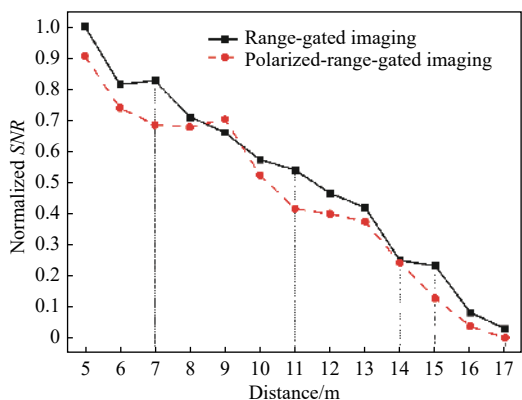
3.2 实验结果

3.2.1 渔网实验结果

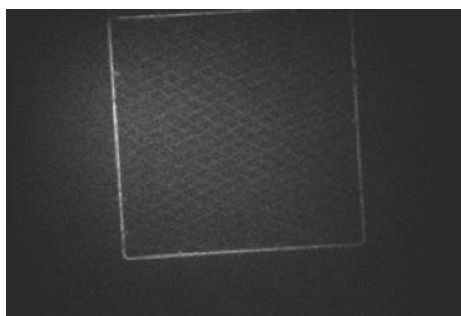
图 7 给出了 0.21 m^{-1} 衰减系数下渔网成像实验结果, 实验中选通参数 IC MOS 门宽和激光脉宽均为 10 ns 。图 7(a) 为渔网识别距离与信噪比归一化曲线实验结果; 图 7(b) 为 16 m 处渔网选通成像结果, 图 7(c) 为 16 m 处渔网偏振选通成像结果。由图 7(a) 可知, 选通成像渔网最大识别距离在 $16\sim 17 \text{ m}$ 之间, 偏振选通成像的渔网最大识别距离在 $15\sim 16 \text{ m}$ 之间, 偏振选

通成像小于选通成像的最大识别距离; 如图 7(b) 和图 7(c) 所示, 16 m 处偏振选通成像的图像信噪比差于选通成像。

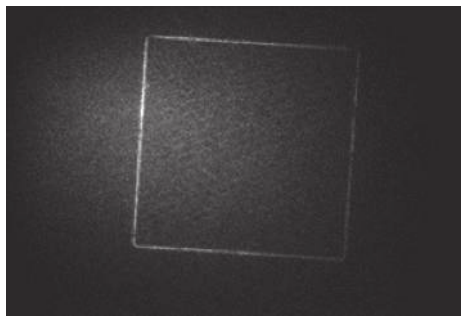
图 8 给出了 0.42 m^{-1} 衰减系数下渔网成像实验结果。图 8(a) 为渔网识别距离与信噪比归一化曲线实验结果; 图 8(b) 为 9 m 处渔网选通成像结果; 图 8(c) 为 9 m 处渔网偏振选通成像结果。由图 8(a) 可知, 选通成像渔网最大识别距离在 $9\sim 10 \text{ m}$ 之间, 偏振选通成像的渔网最大识别距离在 $8\sim 9 \text{ m}$ 之间, 偏振选通成



(a) 渔网识别距离与信噪比归一化曲线实验结果
(a) Result of fishing net recognition distance and SNR



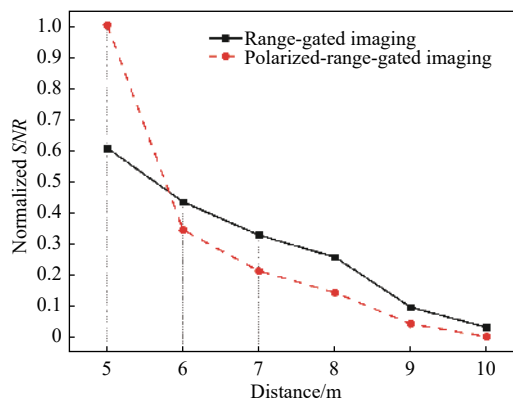
(b) 16 m 选通成像
(b) RGI image at 16 m



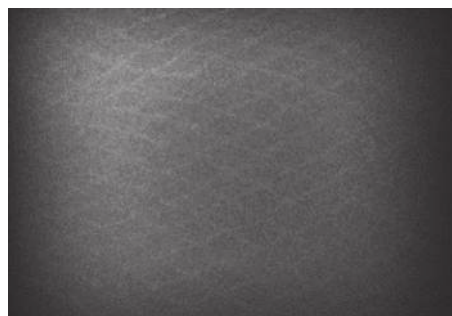
(c) 16 m 偏振选通成像
(c) PRGI image at 16 m

图 7 衰减系数 0.21 m^{-1} 下渔网成像实验结果

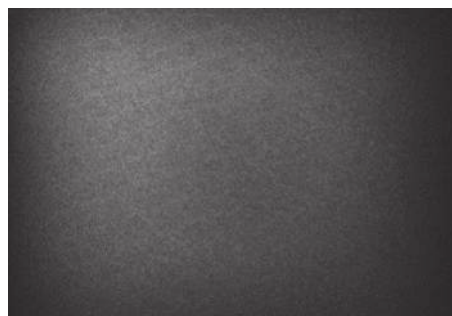
Fig.7 Experimental results of fishing net under 0.21 m^{-1} attenuation coefficient



(a) 渔网识别距离与信噪比归一化曲线实验结果
(a) Result of fishing net recognition distance and SNR normalization curve



(b) 9 m 选通成像
(b) RGI image at 9 m



(c) 9 m 偏振选通成像
(c) PRGI image at 9 m

图 8 衰减系数 0.42 m^{-1} 下渔网成像实验结果

Fig.8 Experimental results of fishing net under 0.42 m^{-1} attenuation coefficient

像小于选通成像的最大识别距离;如图 8(b)和图 8(c)所示,9 m 处偏振选通图像信噪比差于选通成像。

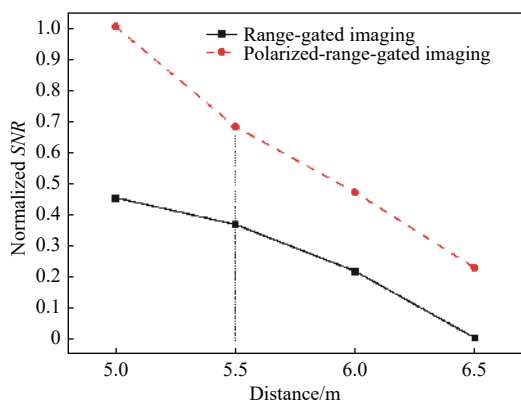
图 9 给出了 0.63 m^{-1} 衰减系数下渔网成像实验结果。图 9(a) 为渔网识别距离与信噪比归一化曲线实验结果;图 9(b) 为 5.5 m 处渔网选通成像结果;图 9(c) 为 5.5 m 处渔网偏振选通成像结果。由图 9(a) 可知,选通成像渔网最大识别距离小于 5 m, 偏振选通成像渔网最大识别距离在 5.5~6 m 之间, 偏振选通成像大

于选通成像最大识别距离;如图 9(b)和图 9(c)所示,5.5 m 处偏振选通图像信噪比优于选通成像。

综合三组渔网对照实验可知,在 $0.42\sim 0.63 \text{ m}^{-1}$ 之间应存在一临界衰减系数 c_{01} 。当水体衰减系数大于 c_{01} 时,渔网偏振选通成像最大识别距离大于选通成像。

3.2.2 珊瑚实验结果

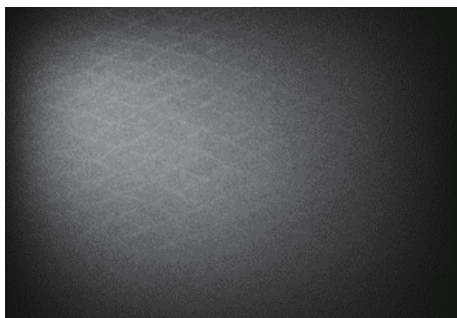
图 10 给出了 0.21 m^{-1} 衰减系数下珊瑚成像实验结果。图 10(a) 为珊瑚识别距离与信噪比归一化曲线



(a) 渔网识别距离与信噪比归一化曲线实验结果
(a) Result of fishing net recognition distance and SNR normalization curve



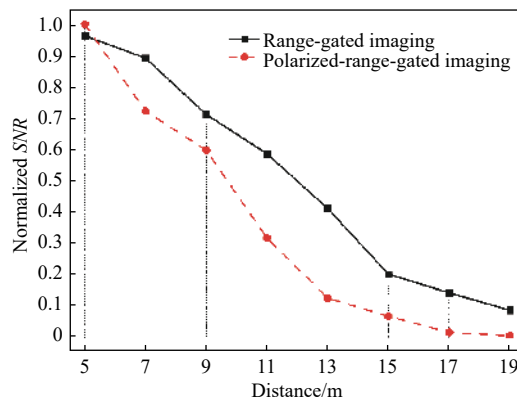
(b) 5.5 m 选通成像
(b) RGI image at 5.5 m



(c) 5.5 m 偏振选通成像
(c) PRGI image at 5.5 m

图 9 衰减系数 0.63 m^{-1} 下渔网实验结果

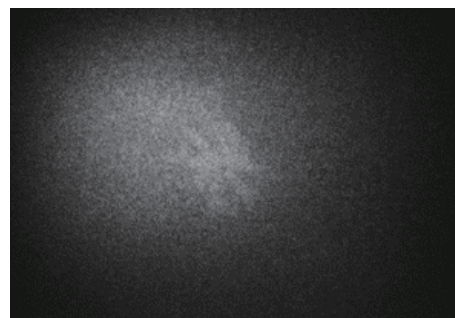
Fig.9 Experimental results of fishing net under 0.63 m^{-1} attenuation coefficient



(a) 珊瑚识别距离与信噪比归一化曲线实验结果
(a) Results of coral recognition distance and SNR normalization curve



(b) 19 m 选通成像
(b) RGI image at 19 m



(c) 19 m 偏振选通成像
(c) PRGI image at 19 m

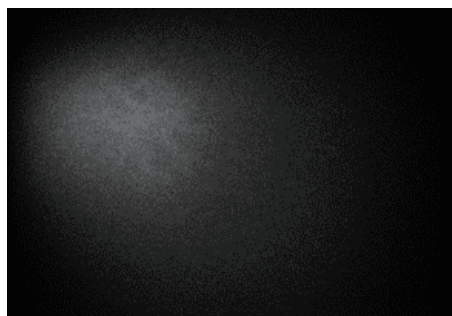
图 10 衰减系数 0.21 m^{-1} 下珊瑚实验结果

Fig.10 Experimental results of coral under 0.21 m^{-1} attenuation coefficient

实验结果；图 10(b) 为 19 m 处珊瑚选通成像结果；图 10(c) 为 19 m 处珊瑚偏振选通成像结果。由图 10(a) 可知，选通成像珊瑚最大识别距离大于 19 m，偏振选通成像珊瑚最大识别距离在 15~17 m 之间，选通成像大于偏振选通成像的最大识别距离；如图 10(b) 和图 10(c) 所示，19 m 处偏振选通成像器件噪声严重，图像信噪比差于选通成像。

图 11 给出了 0.54 m^{-1} 衰减系数下珊瑚成像实验结果。图 11(a) 为珊瑚识别距离与信噪比归一化曲线实验结果；图 11(b) 为 9.5 m 处珊瑚选通成像结果；图 11(c) 为 9.5 m 处珊瑚偏振选通成像结果。由图 11(a) 可知，选通成像珊瑚最大识别距离在 9~10 m 之间，偏振选通成像珊瑚最大识别距离在 8~9 m 之间，两者识别距离差距缩小；如图 11(b) 和 11(c) 所示，9.5 m 处偏振选通图像略差于选通成像。

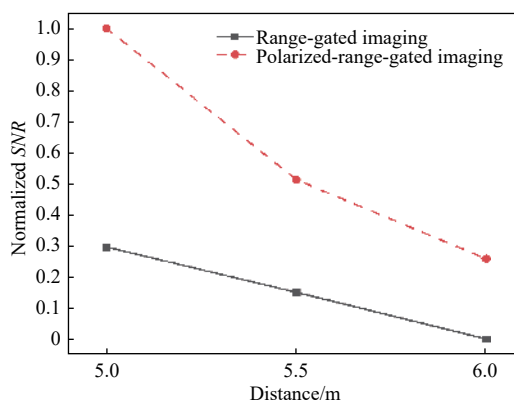
图 12 给出了 0.89 m^{-1} 衰减系数下珊瑚实验结果。图 12(a) 为珊瑚识别距离与信噪比归一化关系实验结果；图 12(b) 为 5 m 处珊瑚选通成像结果；图 12(c) 为 5 m 处珊瑚选通成像结果。由图 12(a) 可知，选通成像珊瑚最大识别距离小于 5 m，偏振选通成像珊瑚



(c) 9.5 m 偏振选通成像
(c) PRGI image at 9.5 m

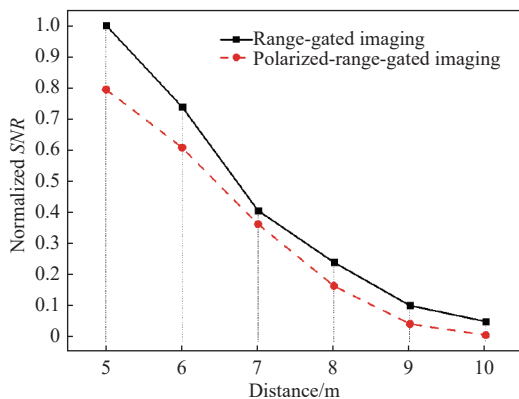
图 11 衰减系数 0.54 m^{-1} 下珊瑚实验结果

Fig.11 Experimental results of coral under 0.54 m^{-1} attenuation coefficient



(a) 珊瑚识别距离与信噪比归一化曲线实验结果

(a) Results of coral recognition distance and SNR normalization curve

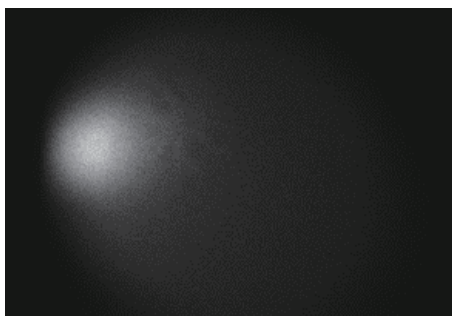


(a) 珊瑚识别距离与信噪比归一化曲线实验结果

(a) Results of coral recognition distance and SNR normalization curve



(b) 9.5 m 选通成像
(b) RGI image at 9.5 m



(b) 5 m 选通成像
(b) RGI image at 5 m



(c) 5 m 偏振选通成像
(c) PRGI image at 5 m

图 12 衰减系数 0.89 m^{-1} 下珊瑚实验结果

Fig.12 Experimental results of coral under 0.89 m^{-1} attenuation coefficient

最大识别距离约为 5.5 m, 偏振选通成像识别距离大于选通成像; 如图 12(b) 和 12(c) 所示, 5 m 处偏振选通图像信噪比优于选通成像。

综合三组珊瑚对照实验可知: 在 $0.54\sim 0.89\text{ m}^{-1}$ 之间存在临界衰减系数 c_{02} 。当水体衰减系数大于 c_{02} 时, 偏振选通成像珊瑚最大识别距离大于选通成像。

3.3 分析与结论

综合理论仿真与实验结果, 可得出如下结论:

1) 存在临界衰减系数 c_0 , 该系数决定选通成像和偏振选通成像的适用水质。

当水质较好、水体衰减系数小于 c_0 时, 选通成像的作用距离远于偏振选通成像, 偏振引起的能量损失负面问题强于后向散射抑制带来的有益效果, 即弊大于利, 从而对于提升选通成像无效果; 当在 c_0 水质时, 选通成像和偏振选通成像的作用距离相当, 偏振引起的能量损失负面问题与后向散射抑制带来的有益效果相抵消, 即利弊相抵, 偏振对于提升选通成像的作用距离无明显效果; 当水质较差、水体衰减系数大于 c_0 时, 偏振选通成像的作用距离远于选通成像, 偏振抑制后向散射带来的有益效果强于偏振引起的能量损失负面问题, 即利大于弊, 从而提升了选通成像的作用距离。

2) 临界衰减系数 c_0 与目标反射率有关。

从渔网和珊瑚等典型海洋目标实验结果可以发现, 两者的临界衰减系数不同。主要原因是渔网和珊瑚的反射率不同, 目标反射率会影响到图像的信噪比, 从而影响目标识别距离。因此, 使用偏振提升不同水下目标选通成像作用距离时, 临界衰减系数也不同。

4 结 论

针对浑浊水体中选通成像质量受切片内残留后向散射噪声影响的问题, 文中将光学偏振成像与选通成像结合, 利用目标反射光和水体后向散射光之间的偏振度差异来过滤后向散射噪声, 提升选通成像的作用距离和信噪比。通过理论仿真和水池实验对比分析了不同水质下选通成像和偏振选通成像目标识别距离的差异, 并发现存在临界衰减系数。在水质较清时 (小于等于临界衰减系数), 单纯采用选通成像即可, 效果最佳; 在水质浑浊时 (不小于临界衰减系数), 偏振与选通成像结合, 可提升作用距离。该研究结果

有益于不同水质下合理应用选通成像, 特别是浑浊水体下, 利用光学偏振可以进一步提升选通成像的工作距离。

参考文献:

- [1] Deng X, Wang H, Liu X, et al. State of the art of the underwater image processing methods [C]//2017 IEEE International Conference on Signal Processing, Communications and Computing (ICSPCC). IEEE, 2018: 8242429.
- [2] Cao Fengmei, Jin Weiqi, Huang Youwei, et al. Review of underwater opto-electrical imaging technology and equipment (I) —— Underwater laser range-gated imaging technology [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2011, 33(2): 1001-8891. (in Chinese)
- [3] Philip Church, Weilin Hou, Georges Fournier, et al. Overview of a hybrid underwater camera system [C]//Proceedings of SPIE, 2014, 9111: 911100.
- [4] Wang Xinwei, Sun Liang, Wang Minmin, et al. Deblurring methods for underwater 2D and 3D range gated imaging [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2020, 49(2): 003002. (in Chinese)
- [5] Wang M, Wang X, Zhang Y, et al. Range-intensity-profile prior dehazing method for underwater range-gated imaging [J]. *Optics Express*, 2021, 29(5): 7630-7640.
- [6] Hu Haofeng, Li Xiaobo, Liu Tiegeng. Recent advances in underwater image restoration technique based on polarimetric imaging [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2019, 48(6): 0603006. (in Chinese)
- [7] Treibitz T, Schechner Y Y. Active polarization descattering [J]. *IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence*, 2009, 31(3): 385-399.
- [8] Cheng Q, Wang Y, Li D. Analysis of polarization characteristics of backscattered light and reflected light of underwater active light source [J]. *Optical Engineering*, 2021, 60: 126105.
- [9] Qin Lin, Chen Mingsong, Que Feiyi. Investigation of underwater polarization imaging system based on range-gated techniques [J]. *Electronic Design Engineering*, 2011, 19(7): 184-186. (in Chinese)
- [10] Wang Xinwei, Sun Liang, Liu Yuliang. Impact of echo broadening effect on active range-gated imaging [J]. *Chinese Optics Letters*, 2012, 10(10): 101101.
- [11] Ge Weilong, Hua Lianghong, Zhang Xiaohui. Signal to noise research in range-gated underwater laser imaging system [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2013, 42(8): 2022-2026. (in Chinese)

- Chinese)
- [12] Li Li, Gao Zhiyun, Wang Xia, et al. Optical backscatter calculation for an underwater range-gated imaging system [J]. *Transactions of Beijing Institute of Technology*, 2003, 23(4): 4882491. (in Chinese)
- [13] Maffione R A, Spinrad R W, Dana D R, et al. Instrument for underwater measurement of optical backscatter [C]//Proceedings of SPIE, 1991, 1537: 173-184.
- [14] Liu Quanhua, Weng Fuzhong. Combined Henyey-Greenstein and Rayleigh phase function [J]. *Applied Optics*, 2006, 45(28): 7475-7479.
- [15] Cornette W M, Shanks J G. Physically reasonable analytic expression for the single-scattering phase function [J]. *Applied Optics*, 1992, 31(16): 3152-3160.
- [16] Morgan S P, Ridgway M E. Polarization properties of light backscattered from a two layer scattering medium [J]. *Optics Express*, 2000, 7(12): 395-402.
- [17] Cao Xianping, Sun Ping. Characteristics of degree of polarization of backscattering light in scattering medium at different wavelengths [J]. *Acta Photonica Sinica*, 2012, 41(5): 608-613. (in Chinese)
- [18] 石顺祥, 王学恩, 马琳. 物理光学与应用光学 [M]. 西安: 西安电子科技大学出版社, 2014.
- [19] 白廷柱, 金伟其. 光电成像原理与技术 [M]. 北京: 北京理工大学出版社, 2006.

Influence of optical polarization on underwater range-gated imaging for target recognition distance under different water quality conditions

Su Lewei¹, Duan Cunli¹, Sun Liang^{2*}, Song Bo², Lei Pingshun²,
Chen Jianan², He Jun², Zhou Yan^{2,3,4}, Wang Xinwei^{2,3,4}

(1. Optoelectronic System Laboratory, Institute of Semiconductors, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100083, China;

2. College of Materials Science and Opto-Electronic Technology, University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China;

3. School of Opto-electronical Engineering, Xi'an Technological University, Xi'an 710021, China;

4. School of Electronic, Electrical and Communication Engineering, University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China)

Abstract:

Objective Underwater optical imaging technology is of great significance for applications such as seabed resource exploration, marine ecological monitoring, underwater search and rescue, and underwater archaeology. Compared to traditional underwater cameras, underwater range-gated imaging (RGI) technology can filter out backscattered noise and environmental background noise outside the gated slice, achieving high-quality underwater imaging. However, in turbid water bodies, it is still affected by backscattered noise inside the slice, resulting in a shorter imaging distance.

Methods In view of the problem of short RGI distance in highly turbid water bodies, underwater polarization gating imaging technology combining optical polarization and RGI was studied. By utilizing the good polarization preservation of backscattered light, the backscattered noise within the gating slice range was removed, and the target recognition distance was improved (Fig.1). Firstly, a physical model for polarized-range-gated imaging (PRGI) is established, a formula for calculating the signal-to-noise ratio of PRGI is derived, a normalized simulation curve for signal-to-noise ratio is drawn. Subsequently, RGI and PRGI are performed on underwater targets such as fishing nets and corals, and signal-to-noise ratio normalization experimental curves are drawn. The simulation curves and experimental curves are compared and analyzed.

Results and Discussions When the water attenuation coefficient is 0.21 m^{-1} , the PRGI recognition distance is

about 15 m, and the RGI recognition distance is about 17 m (Fig.2). The reason why the recognition distance of PRGI is smaller than RGI is that under the low water attenuation coefficient, the backscattering of the water body is small, and the absorption effect of the water body plays a major role in limiting the recognition distance. When the water attenuation coefficient is 0.42 m^{-1} , the recognition distance of PRGI is about 8 m, and RGI recognition distance is about 9 m (Fig.3). The gap between the two has narrowed. The reason is that as water attenuation coefficient increases, the backscattering of water increases, and the scattering effect of water will reduce the target recognition distance. When the water attenuation coefficient is 0.63 m^{-1} , the recognition distance of PRGI is between 5.5 m and 6 m, and the recognition distance of RGI is between 5 m and 5.5 m (Fig.4). When the water attenuation coefficient is relatively high, the backscattering effect of water is severe, PRGI can improve the recognition distance compared with RGI. The experimental results of fishing net imaging under the water attenuation coefficient of 0.21 m^{-1} show that the signal-to-noise ratio of PRGI at 16 m is lower than RGI (Fig.7). The experimental results of fishing net imaging under the water attenuation coefficient of 0.42 m^{-1} show that the signal-to-noise ratio of PRGI at 9 m is lower than RGI (Fig.8). The experimental results of fishing net imaging under the water attenuation coefficient of 0.63 m^{-1} show that the signal-to-noise ratio of PRGI at 5.5 m is better than RGI (Fig.9). The experimental results of coral imaging under the water attenuation coefficient of 0.21 m^{-1} show that PRGI have severe device noise at 19 m, and the signal-to-noise ratio of the image is worse than RGI (Fig.10). The experimental results of coral imaging under the water attenuation coefficient of 0.54 m^{-1} show that PRGI at 9.5 m is slightly worse than RGI (Fig.11). The coral experiment results under the water attenuation coefficient of 0.89 m^{-1} show that the signal-to-noise ratio of PRGI at 5 m is better than RGI (Fig.12).

Conclusions According to the comparison experiment between fishing nets and coral, there should be a critical attenuation coefficient c_{01} between 0.42 m^{-1} and 0.63 m^{-1} . When the water attenuation coefficient is higher than c_{01} , the maximum recognition distance of PRGI of fishing nets is greater than RGI; There is a critical attenuation coefficient c_{02} between 0.54 m^{-1} and 0.89 m^{-1} . When the water attenuation coefficient is higher than c_{02} , the maximum recognition distance of PRGI of coral is greater than RGI.

Based on the comprehensive simulation and experimental results, the following conclusions can be drawn.

- 1) There exist a critical attenuation coefficient c_0 , which determines the applicable water quality for RGI and PRGI.
- 2) The critical attenuation coefficient c_0 is related to the target reflectivity.

Key words: underwater optical imaging; polarized-range-gated imaging; range-gated imaging; polarization imaging; signal-to-noise ratio; recognition distance

Funding projects: National Natural Science Foundation of China (62005264, 42276197)