

## 改进暗通道方法的水下强散射介质目标探测

梁天全<sup>1\*</sup>, 张晓云<sup>2</sup>, 段朋<sup>3</sup>, 于会山<sup>2</sup>, 张保华<sup>1</sup>, 汤庆新<sup>1</sup>

- (1. 聊城大学 环境与规划学院, 山东 聊城 252059;
2. 聊城大学 物理科学与信息工程学院, 山东 聊城 252059;
3. 聊城大学 计算机学院, 山东 聊城 252059)

**摘要:** 针对水下场景目标探测图像质量退化问题, 提出了一种自适应计算水体衰减系数暗通道融合多尺度 Retinex(Multi-scale Retinex, MSR)的复原算法, 有效实现了水下目标的复原。通过搭建的水下成像测量装置, 借助成像系统获取水下模拟环境的探测图像, 对水下探测图像按照算法流程图逐步处理, 得到了有效复原水下目标辐射信息的图像。为客观评价算法的效果, 采用对比度、平均梯度与信息熵作为定量评价指标因子, 对该算法与常规三种算法进行了定量对比研究, 结果表明, 该算法处理结果各项定量评价指标因子均优于选取的对比算法。研究结果为水下目标探测提供了基础理论探索方法, 对水下目标探测实施开展具有一定的指导意义。

**关键词:** 水下目标; 暗通道算法; 目标探测; 定量评价; MSR

**中图分类号:** P235.2 **文献标志码:** A **DOI:** 10.3788/IRLA202049.0203012

## Underwater target detection under strong scattering medium using improved dark channel method

Liang Tianquan<sup>1\*</sup>, Zhang Xiaoyun<sup>2</sup>, Duan Peng<sup>3</sup>, Yu Huishan<sup>2</sup>, Zhang Baohua<sup>1</sup>, Tang Qingxin<sup>1</sup>

- (1. School of Environment and Planning, Liaocheng University, Liaocheng 252059, China;
2. School of Physics Science and Information Technology, Liaocheng University, Liaocheng 252059, China;
3. School of Computer, Liaocheng University, Liaocheng 252059, China)

**Abstract:** For the problems of image quality degradation in underwater scene target detection, an algorithm which combined the improved dark channel with MSR was proposed, which could adaptively compute water attenuation coefficient and effectively realize the recovery of underwater target. Through the built-in underwater imaging measurement device, the detection image of the underwater simulated environment with the aid of imaging system was obtained, the underwater detection image was processed step by step according to the algorithm flow chart, and an image for the effective recovery of underwater target radiation information was obtained. In order to objectively evaluate the algorithm effect, contrast,

收稿日期: 2019-10-10; 修订日期: 2019-11-15

基金项目: 山东省自然科学基金(ZR2018BD008; ZR2016FL13; ZR2017MD017)

作者简介: 梁天全(1987-), 男, 讲师, 博士, 主要从事光学图像处理及目标探测方面的研究。Email: liangpolaris@126.com

average gradient and information entropy were adopted as quantification to evaluate indexes factors. A quantitative comparison study between this algorithm and the conventional three algorithms was performed. The result show that the improved algorithm to deal with the results is better than the selected compared algorithms under all the quantitative evaluation indexes factors. The research results provide a basic theoretical exploration method for the underwater target detection, as well as have certain guiding significance for the implementation of underwater target detection.

**Key words:** underwater target; dark channel algorithm; target detection; quantitative evaluation; MSR

## 0 引言

水下目标探测分析在水下探测领域具有重要意义,诸如水下救援、考古探测、水下环境监测、水下目标追踪分析等应用领域。受水体散射介质吸收与散射的影响,造成水下目标辐射信息衰减与水体散射背景光信息的干扰,因此,获取的水下场景图像质量严重退化<sup>[1]</sup>。目标特征有效分析是解译水下目标的关键,如何有效剥离目标辐射信息是亟需解决的科学问题。

通常,提升水下目标探测能力的方式包含:改进水下探测成像体制与方式、空间相干技术与优化图像复原算法<sup>[2-5]</sup>。可见不同的研究者给出不同的水下目标探测形式,技术方案可归纳为:时间区分/距离选通光电成像技术、空间区分/激光同步线扫描技术、结构光成像技术、调制/解调抑制散射光技术、偏振探测技术和多视角图像结构技术<sup>[6-12]</sup>。

文中依据 Jaffe-McGlamery 水下成像物理模型,着重于研究优化的目标辐射信息复原算法,提出有效水下目标辐射信息解耦合算法,提升水下目标探测能力。常规的水下图像处理算法有诸如直方图均衡化、小波变换、同态滤波等,文中提出一种自适应计算透射率的改进暗通道算法,并结合多尺度 Retinex 算法对获取的水下场景退化图像进行融合复原处理。为定量客观评价算法效果,采用对比度、平均梯度与信息熵作为定量指标体系,对该算法与常规 SSR<sup>[13]</sup>、MSR 算法<sup>[14]</sup>、暗通道算法<sup>[15-16]</sup>进行了对比研究。结果表明:该算法各项定量评价指标体系均处于较好水平,验证了算法的有效性,文中的研究有助于对水下目标进行有效观测、信息提取及分析,具

备较强的基础科学问题探究价值与意义。

## 1 基本理论

通常,水下成像系统获取的光辐射信息划分为不同来源:水下目标反射辐射信息经水体退化介质的吸收和散射,被成像系统接收的辐射信息;光源信息在水中传播时由于多次散射及水体体散射,形成漫射光辐射信息。水下成像探测原理如图 1 所示,所以,成像设备接收的总光强可表示为:

$$I_{total} = I_{dir} + I_f + I_b \quad (1)$$

式中:  $I_{total}$ 、 $I_{dir}$ 、 $I_f$ 、 $I_b$  分别表示成像系统获取的总光辐射信息、水下目标反射辐射信息、水体前向散射辐射和后向散射辐射信息。

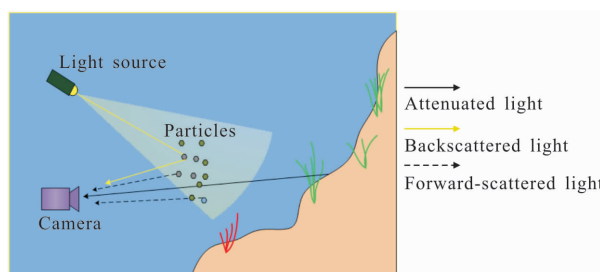


图 1 水下成像探测原理图

Fig.1 Principle diagram of the underwater imaging detection

水下成像系统模型表征形式如公式(2)所示:

$$I_{\lambda}(x) = J_{\lambda}(x)t_{\lambda}(x) + [J_{\lambda}(x) * h_{\lambda}(x)]t_{\lambda}(x) + B_{\lambda, \infty} [1 - t_{\lambda}(x)] \quad (2)$$

水下成像模型可进一步简化为:

$$I_{\lambda}(x) = J_{\lambda}(x)e^{-\beta_c^{\lambda}(V_b)Z} + B_{\lambda, \infty}(1 - e^{-\beta_c^{\lambda}(V_b)Z}) \quad (3)$$

其中,目标辐射信息随探测距离的增大而指数衰减,背景散射光辐射信息随探测距离的增大而汇聚。

## 2 实验装置与算法

### 2.1 实验装置

实验装置系统由数据采集系统、成像系统、水下环境模拟系统与光源系统四部分构成。实验装置示意图如图 2 图所示。

其中，水下环境模拟系统采用 600 mm×600 mm×360 mm 的透明水槽作为储水载体，为避免器壁的多次反射辐射信息的干扰，在水槽内壁铺设低反射率黑布；光源系统采用光谱稳定性能较好的卤钨灯；成像系统采用多波段相机，包含红绿蓝三波段，传感器尺寸为 13.2 mm×8.8 mm，图像分辨率为 2896×1944；数据采集系统由笔记本与相应采集软件构成。通过不同配比的脱脂牛奶与水体，模拟不同浑浊等级水体环境。

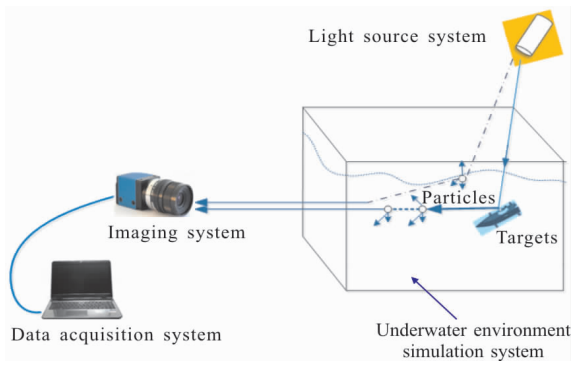


图 2 水下探测实验装置系统示意图

Fig.2 Schematic diagram of underwater detection experiment equipment system

实验装置平台的有效构建影响了获取数据的质量，固定光源系统与成像系统的相对位置，水下环境模拟系统有效模拟不同水体浑浊等级，数据采集系统通过 USB 数据线将成像系统拍摄的图像通过控制软件传输到 PC 端，将获得的水下环境模拟图像通过 MATLAB 软件进行相应算法处理，流程如图 3 所示。

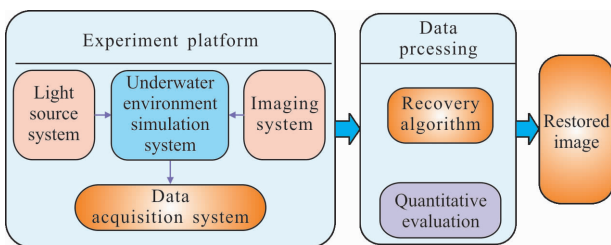


图 3 数据采集处理流程

Fig.3 Flow chart of data acquisition and processing

### 2.2 算法

水下场景图像蕴含水体背景辐射聚集信息与目标辐射信息，此两部分信息耦合传输至成像系统。为有效解耦目标辐射信息，并补偿水体衰减量，需有效估算水体背景辐射聚集信息并求解水体衰减系数。基于大量的统计经验，在获取的图像场景中，存在像元点其辐射信息由背景辐射信息聚集贡献，基于此暗通道先验知识，对公式(3)进行推导得：

$$\min_{\lambda \in \{R,G,B\}} \left\{ \frac{\min_{y \in \varphi(x)} [I_{\lambda}(y)]}{B_{\lambda,\infty}} \right\} = \min_{\lambda \in \{R,G,B\}} \left\{ \frac{\min_{y \in \varphi(x)} [J_{\lambda}(y)t_{\lambda}(y)]}{B_{\lambda,\infty}} \right\} + (1-t(x)) \quad (4)$$

基于暗通道先验理论假设条件，目标辐射信息贡献忽略不计，上式右边第一项数值应趋近于 0，因此，水体衰减系数的计算可表示为：

$$t(x) = 1 - \frac{\min_{\lambda \in \{R,G,B\}} \left\{ \min_{y \in \varphi(x)} [I_{\lambda}(y)] \right\}}{B_{\lambda,\infty}} \quad (5)$$

对常规的暗通道处理，对估算的暗通道数值进行升序排序，选取像元数值前 0.1% 的数值进行均值处理，估算水体背景光信息。当获取的水下场景图像，在视场范围内存在像元的目标辐射信息与水体背景辐射信息量级相差较小时，水体衰减系数可表示如下：

$$t(x) = \frac{\|B-I(x)\|}{\|B-J(x)\|} = \frac{B_{\lambda}-I_{\lambda}(x)}{B_{\lambda}-J_{\lambda}(x)} = \frac{1 - \min_{\lambda \in \{R,G,B\}} \left\{ \min_{y \in \varphi(x)} \frac{I_{\lambda}(x)}{B_{\lambda,\infty}} \right\}}{1 - \min_{\lambda \in \{R,G,B\}} \left\{ \min_{y \in \varphi(x)} \frac{J_{\lambda}(x)}{B_{\lambda,\infty}} \right\}} \quad (6)$$

即  $\min_{\lambda \in \{R,G,B\}} \left\{ \min_{y \in \varphi(x)} \frac{J_{\lambda}(x)}{B_{\lambda,\infty}} \right\} \neq 0$ ，上式的分母小于 1，基于暗通道算法，求得水体衰减系数比实际值偏小。因此，为抑制水体衰减系数求解的偏差在水下图像复原过程中产生的不利因素，引入一个补偿因子  $Q$ ，当  $|I(x)-B_{\lambda,\infty}| < Q$  时，对水体衰减系数进行修正后的结果可表示为：

$$t'(x) = \left| \frac{Q}{I(x)-B_{\lambda,\infty}} \right| \cdot t(x) \quad (7)$$

根据水下环境图像数据分析，补偿因子  $Q$  的设置阈值范围应采用 [20, 40]。

为更加直观展示算法处理流程，绘制改进的暗通道处理算法的程序流程图，如图 4 所示。

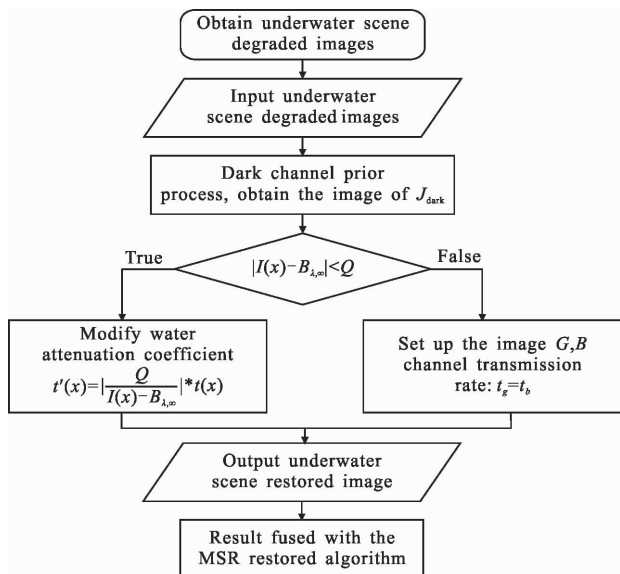


图 4 改进暗通道算法程序流程图

Fig.4 Flow chart of improved dark channel algorithm

基于改进的暗通道算法对水下场景获取的图像可进行有效的复原，抑制了水体背景辐射信息的影响，增强了图像的对比度，有效获取水下目标本征辐射信息。为进一步提升水下复原图像颜色保真，结合基于色彩恒常性理论的 MSR 算法，有效获取了清晰的水下复原图像，算法处理的程序流程如图 5 所示。

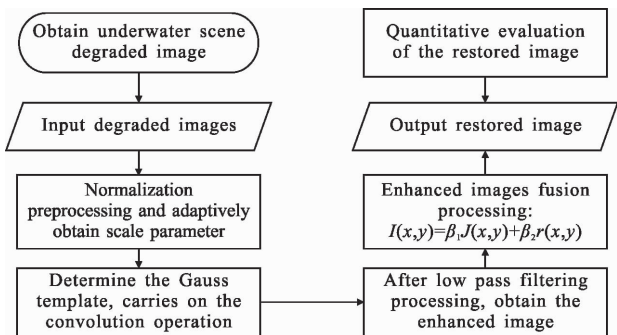


图 5 MSR 算法的程序流程图

Fig.5 Flow chart of the MSR algorithm

将算法的处理结果进行融合处理，采用像素融合表征形式，结果可表示为：

$$I(x, y) = \beta_1 J(x, y) + \beta_2 r(x, y) \quad (8)$$

式中： $\beta_1$  和  $\beta_2$  表示加权系数，设定数值  $\beta_1 = 0.75$ 、 $\beta_2 = 0.25$ 。

### 3 实验结果与定量评价

为有效验证改进暗通道算法理论分析结果，通

过如图 2 所示的实验装置系统，获取了水下模拟环境系统的水下场景退化图像，分别按照图 4、图 5 所示的算法处理流程，逐步进行水下场景退化图像的复原处理，算法处理结果如图 6 所示。水下场景退化图像与复原图像的结果，从主观角度去评判，水下场景复原图像对比度明显提升，复原图像中珊瑚石、贝壳类与潜艇模型形态可辨，细节纹理清晰，对比度较高。可见运用改进暗通道算法，可有效提取水下强散射介质背景中水下目标辐射信息。

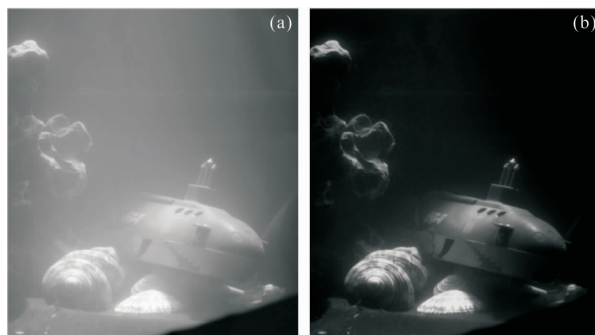


图 6 (a) 水下场景退化图像；(b) 水下场景复原图像

Fig.6 (a) Degraded image of underwater scene; (b) restored image of underwater scene

为了定量评价文中算法，采用图像对比度、平均梯度与信息熵三个量化评价指标因子，对文中算法、SSR 算法、MSR 算法与暗通道算法的水下复原处理结果进行综合定量对比分析。

其中图像的对比度是衡量图像清晰度、纹理细节及结构层次的重要指标，图像对比度的数值越大，表明图像蕴含纹理细节越丰富，其表示形式如下：

$$c = \sum_{\delta} \delta(i, j) P_{\delta}(i, j) \quad (9)$$

平均梯度能反映图像中细节的反差以及图像纹理的变换，在一定程度上可以反映图像的清晰度。对于梯度的计算结果，数值越大表明图像的结构层次越丰富，蕴含目标细节越清晰，其计算公式如下：

$$ag = \frac{1}{M \times N} \sum_{x=1}^M \sum_{y=1}^N \sqrt{\frac{1}{2} \left[ \left( \frac{\partial f(i, j)}{\partial x} \right)^2 + \left( \frac{\partial f(i, j)}{\partial y} \right)^2 \right]} \quad (10)$$

图像的信息熵属于结构特征统计表征，可以反映图像蕴含平均信息量，信息熵值越大，图像系统越混沌，其蕴含的信息量越多，目标细节越清晰，场景结构层次丰富，表明图像复原效果越好，其表示形式如下：

$$H(x) = - \sum_i^L P_i \ln(P_i) \quad (11)$$

对获取的水下模拟环境图像，选取 SSR 算法、MSR 算法、暗通道算法与文中算法分别对其进行处理，结果如图 7 所示。主观评价借助四种不同的处理算法对获取的水下图像，复原图像均有一定程度提升，但 SSR 算法存在晕环效应，MSR 算法处理结果偏离目标原始辐射信息，暗通道算法水下目标复原纹理细节存在模糊现象，文中算法从主观评价上而言优于其余三类算法。

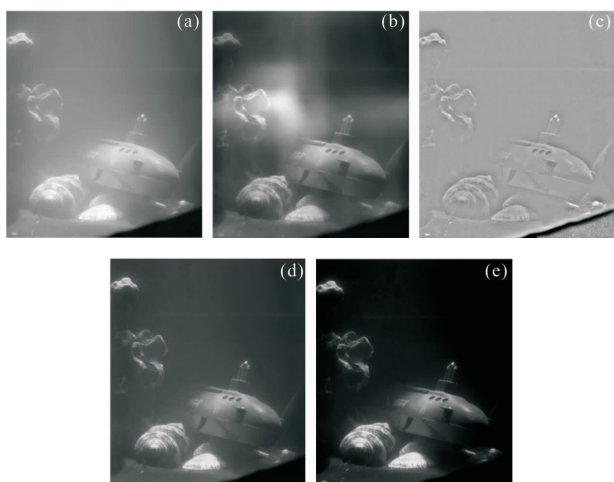


图 7 (a) 退化图像；(b) SSR 算法结果；(c) MSR 算法结果；  
(d) 暗通道算法结果；(e) 文中算法结果

Fig.7 (a) Degraded image; (b) results of SSR algorithm; (c) results of MSR algorithm; (d) results of dark channel algorithm; (e) results of proposed algorithm

借助上文所述定量评价指标，选取对比度、平均梯度与信息熵三个不同的定量评价因子，客观定量评价各个算法的复原效果，结果如表 1 所示。

表 1 水下图像不同算法处理定量评价结果

Tab.1 Underwater image quantitative evaluation result of different algorithms processing

	Contrast	Mean gradient	Information entropy
Degraded image	4.393 1	6.619 3	5.290 3
SSR algorithm	6.478 0	8.037 9	7.373 7
MSR algorithm	69.122 9	8.431 0	15.990 0
Dark channel algorithm	5.519 8	7.419 7	5.502 2
Our method	80.549 9	9.200 0	17.957 0

通过对表 1 中不同算法定量评价指标计算结果分析可知，选取的 SSR 算法、MSR 算法、暗通道算法与本文所运用的算法，复原图像对比度、平均梯度与信息熵均获得了不同程度的提升，说明各算法对水下退化图像的信息提取均有一定作用。但是各项定量评价指标因子提升程度存在较大差异，表 1 中计算数据显示，运用文中算法进行水下图像复原处理，其复原图像在对比度、平均梯度、信息熵三个不同的评价指标均优于选取的对比算法。

#### 4 结论

文中针对水下复杂环境目标探测成像质量退化的问题，详细分析了水下环境成像探测影响因素，依据水下成像物理模型，分析水体背景光信息与目标辐射信息的耦合机理，阐述了目标辐射信息解耦算法，有效提取了水下目标特征信息。根据水下环境获取图像的固有物理特性，提出了自适应计算水体透射率的暗通道算法，结合多尺度 MSR 算法实现了水下场景退化图像的有效融合复原。对获取的实验数据进行相应算法处理分析，进行主观与客观定量评价，经算法处理后有效复原了水下目标场景。选取定量评价指标因子对文中算法与常规算法进行了综合对比，结果表明，文中算法在各项指标因子均优于对比处理算法。研究结果为水下强散射介质目标探测提供了有益的方法探索，为水下目标实时有效工程探测提供了一定的理论指导与技术支持。

#### 参考文献：

[1] Corchs S, Schettini R. Underwater image processing: state of the art of restoration and image enhancement methods [J]. *Eurasip J Adv Sig Pr*, 2010: 746052.

[2] William K L, Kargl S G, Thorsos E I, et al. Acoustic scattering from a solid aluminum cylinder in contact with a sand sediment: Measurements, modeling, and interpretation [J]. *J Acoust Soc Am*, 2010, 127(6): 3356-3364.

[3] Mei Fenghua, Li Chao, Zhang Yuxin. Application of spectral imaging technology in maritime target detection [J]. *Chinese Optics*, 2017, 10(6): 708-718. (in Chinese)  
梅风华, 李超, 张玉鑫. 光谱成像技术在海域目标探测中的应用[J]. *中国光学*, 2017, 10(6): 708-718.

[4] Jaffe J S. Performance bounds on synchronous laser line scan systems[J]. *Opt Express*, 2005, 13(3): 738-748.

- [5] Lu Chenxiang, Wang Lu, Zeng Xiangyang. A structured sparse feature extraction method of acoustic signal emitted from underwater target [J]. *Journal of Harbin Engineering University*, 2018, 39(262): 26–30. (in Chinese)  
陆晨翔, 王璐, 曾向阳. 水下目标信号的结构化稀疏特征提取方法[J]. 哈尔滨工程大学学报, 2018, 39(262): 26–30.
- [6] Shen Zhenmin, Zhao Tong, Wang Yuncai, et al. Underwater target detection of chaotic pulse laser radar [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2019, 48(4): 0406004. (in Chinese)  
沈振民, 赵彤, 王云才, 等. 混沌脉冲激光雷达水下目标探测[J]. 红外与激光工程, 2019, 48(4): 0406004.
- [7] Yang Liming, Liang Jian, Zhang Wenfei, et al. Underwater polarimetric imaging target enhancement technology based on unpolarized illumination [J]. *Acta Optica Sinica*, 2018, 38(6): 0611003. (in Chinese)  
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.
- [8] Fan Zhiguo, Song Qiang, Dai Qingqing, et al. Underwater target polarization recovery method based on global parameter estimation [J]. *Optics and Precision Engineering*, 2018, 26(7): 1621–1632. (in Chinese)  
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.
- [9] Kocak D M, Dalglish F R, Caimi F M, et al. A focus on recent developments and trends in underwater imaging [J]. *Mar Technol Soc J*, 2008, 42(1): 52–67.
- [10] Schechner Y Y, Karpel N. Recovery of underwater visibility and structure by polarization analysis [J]. *IEEE J Ocean Eng*, 2005, 30(3): 570–587.
- [11] Klausner N H, Azimi-Sadjadi M R. Performance prediction and estimation for underwater target detection using multichannel sonar[J]. *IEEE J Ocean Eng*, 2019(99): 1–13.
- [12] Wang Xinwei, Sun Liang, Lei Pingshun, et al. Underwater 3D triangular range-intensity correlation imaging beyond visibility range(invited)[J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2018, 47(9): 0903001. (in Chinese)  
王新伟, 孙亮, 雷平顺, 等. 水下超视距三角形距离能量相关三维成像(特邀)[J]. 红外与激光工程, 2018, 47(9): 0903001.
- [13] Guo Jichang, Li Chongyi, Guo Chunle, et al. Research progress of underwater image enhancement and restoration methods [J]. *Journal of Image and Graphics*, 2017, 22(3): 0273–0287. (in Chinese)  
郭继昌, 李重仪, 郭春乐, 等. 水下图像增强和复原方法研究进展[J]. 中国图象图形学报, 2017, 22(3): 0273–0287.
- [14] Wang Hao, Zhang Ye, Shen Honghai, et al. Review of image enhancement algorithms[J]. *Chinese Optics*, 2017, 10(4): 438–448. (in Chinese)  
王浩, 张叶, 沈宏海, 等. 图像增强算法综述[J]. 中国光学, 2017, 10(4): 438–448.
- [15] Wang Yibin, Yin Shibai, Lv Zhuowen. Underwater image restoration with adaptive background light estimation and non-local prior [J]. *Optics and Precision Engineering*, 2019, 27(2): 499–510. (in Chinese)  
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.
- [16] He K M, Sun J, Tang X O. Single image haze removal using dark channel prior[J]. *IEEE T Pattern Anal*, 2011, 33(12): 2341–2353.