

# 抑制视场光源干扰的水下图像复原方法研究

钱立进<sup>1</sup>, 金海红<sup>1,2\*</sup>, 范之国<sup>1</sup>, 庄子杰<sup>1</sup>, 官凯强<sup>1</sup>

<sup>1</sup>合肥工业大学计算机与信息学院, 安徽 合肥 230601;

<sup>2</sup>安徽建筑大学电子与信息工程学院, 安徽 合肥 230601

**摘要** 针对视场中光源对成像的影响问题,提出了一种新的抑制光源干扰的水下图像复原方法。建立了考虑光源干扰的水下成像模型,利用光源辐射图像和无光源影响图像的梯度分布不同的特点来分离光源辐射,在获得的抑制光源影响的水下图像中,利用最大值滤波和中值滤波分别估计出全局背景光和水下透射率,有效地降低了视场光源对参数估计的影响。实验结果验证了抑制光源干扰的水下图像复原方法的有效性,能够显著提升水下场景的可视性。此外,该方法在无光源影响的水下图像中也取得了良好的复原效果。

**关键词** 海洋光学; 水下成像; 光源辐射; 水下图像复原; 梯度平滑; 全局背景光

中图分类号 TP391

文献标志码 A

doi: 10.3788/AOS202141.1801001

## Underwater Image Restoration Method Suppressing Interference of Light Source in Field of View

Qian Lijin<sup>1</sup>, Jin Haihong<sup>1,2\*</sup>, Fan Zhiguo<sup>1</sup>, Zhuang Zijie<sup>1</sup>, Gong Kaiqiang<sup>1</sup>

<sup>1</sup> School of Computer Science and Information Engineering, Hefei University of Technology, Hefei, Anhui 230601, China;

<sup>2</sup> School of Electronic and Information Engineering, Anhui Jianzhu University, Hefei, Anhui 230601, China

**Abstract** To tackle the influence of a light source in the field of view on imaging, this paper presents a new underwater image restoration method suppressing its interference. The underwater imaging model considering the influence of a light source is first established, and then the light source radiation is separated depending on the different gradient distribution between the image interfered by the light source radiation and the image without the influence of light source. With regard to the acquired image after the interference of light source is suppressed, its global background light and the underwater transmittance are estimated by the maximum filter and the median filter, respectively, which effectively reduces the influence of the light source in the field of view on parameter estimation. The experimental results verify the effectiveness of the underwater image restoration method proposed in this paper, which can significantly improve the visibility of underwater scenes. In addition, this method can also achieve a good effect of underwater image restoration without the influence of light source.

**Key words** oceanic optics; underwater image; light source radiation; underwater image restoration; gradient smooth; global background light

**OCIS codes** 010.7295; 010.4450; 100.2000; 100.2980; 100.3020

## 1 引言

随着海洋资源勘探、水下探测和海洋国防等领

域的发展,水下光学成像技术受到了越来越多的关注<sup>[1-2]</sup>。光在水下传输时会与水体以及水体中的悬浮粒子发生吸收和散射作用,其中,散射作用产生的

收稿日期: 2021-03-04; 修回日期: 2021-03-29; 录用日期: 2021-04-07

基金项目: 国家自然科学基金(61571177)、安徽省高等学校自然科学研究项目(KJ2018JD12)

通信作者: \*hellen8228@163.com

散射光进入成像系统后会使得图像表面附加一层“雾”，导致水下成像质量下降，这给计算机视觉应用的后续处理带来了不利的影响。

长期以来，国内外众多学者针对水下图像质量降低问题做了大量的研究工作，提出了很多有效的水下图像复原方法<sup>[3-6]</sup>，该方法主要分为基于图像增强的方法和基于物理模型的方法。基于图像增强的方法<sup>[3-4]</sup>是针对水下退化图像的具体表现，是利用数字图像处理技术来增强水下图像的视觉效果。基于物理模型的复原方法<sup>[5-6]</sup>是通过水下图像的退化过程进行反演来去除水体散射和衰减的影响。相比于图像增强的方法可以重构出更加真实的目标信息，基于物理模型方法的关键在于成像模型的建立以及模型中相关参数的估计。现有水下模型将成像系统获取的光描述为直接传输光和散射光的组合。其中，直接传输光是由目标反射光经水体衰减得到，散射光是由背景光与水体散射产生。基于此水下模型，受大气去雾思路的启发，学者们利用各种线索或者先验信息来估计水下的背景光和透射率，进而完成水下图像复原。例如：暗通道<sup>[7]</sup>及其各种改进方法<sup>[8-10]</sup>，最小信息丢失原则<sup>[11]</sup>，边界约束<sup>[12]</sup>等。这些方法在一定程度上提升了水下图像的质量，增强了水下场景的可视性，但水下环境相较于大气环境更为复杂，这些用于估计背景光和透射率的方法难以适用于大部分的水下场景。例如，在水下成像系统的视场内存在其他光源干扰时（这些光源可能是产生镜面反射的物体或者水下的一些自发光体），现有方法很难取得令人满意的效果。视场中光源对成像的影响是由光源直接传输到成像系统的光以及光源在传输过程中的散射光共同作用产生的，这种影响不仅会使水下的光照分布不均匀，而且会使水下成像过程更加复杂，这种影响作用在图像上增加了散射光的比重，进而降低了水下图像的对比度和清晰度，极大地影响了水下图像的视觉效果。现有的水下成像模型，大多数没有考虑成像视场中存在的光源影响这一因素，在受视场光源影响的水下图像质量提升方面，基于现有水下成像模型的水下图像复原方法也很难达到满意的复原效果。

本文针对成像视场中存在光源干扰的水下场景，提出了一种抑制光源干扰的水下图像复原方法，建立了一种新的水下成像模型，该模型除直接传输光和散射光外，还增加了一项光源辐射项用于描述视场光源在水下成像中的影响。基于该模型，利用光源辐射水下图像相较于无光源影响的水下图像更

为平滑的特点，分离光源辐射，获得抑制光源影响后的水下图像，再利用最大值滤波和中值滤波分别估计出全局背景光和水下透射率，极大地减少了光源对图像复原的干扰，得到清晰度更高的水下复原图像。值得注意的是，由于光源干扰的场景下光强分布是不均匀的，图像中的背景光实际上是一个全局变量，本文采用局部估计方法来估计图像背景光，这样更符合水下场景的实际情况，最后通过大量实验验证了方法在视场内存在光源干扰的水下图像复原中的有效性。

## 2 光源干扰下的水下成像模型

在水下成像中，视场内存在光源干扰的成像过程比无光源时的成像过程更加复杂。光源发出的一部分光与水体和水中悬浮粒子发生吸收和散射作用，增强了水下的散射效应，造成图像中的散射光更加明亮。而光源发出的另一部分光直接经水体传输进入成像系统，对目标信息造成了遮蔽作用。如图 1 所示比较了视场中存在光源干扰和无光源干扰下的两种场景的水下图像，可以看到，在同样的水下环境中，有光源干扰的水下图像相比无光源干扰的水下图像，散射光的影响更加严重，水下图像的对比度和清晰度更低。在进一步的细节信息分析中也可以看出，有光源干扰的水下图像的梯度分布更为集中，目标的边缘信息更难以检测。

在现有的水下成像模型中，成像系统接收到的光可分为三个部分<sup>[13]</sup>：目标反射光经水体衰减后形成的直接传输光  $S$ 、目标反射光与粒子产生散射形成的前向散射光  $F'$ ，以及背景光与粒子散射产生的后向散射光  $B$ 。由于前向散射作用机理较为复杂，且对成像的影响较后向散射的影响小得多，一般不考虑前向散射在水下成像中的影响<sup>[14]</sup>，故水下成像模型可以表示为

$$I(x, y) = S(x, y) + B(x, y) =$$

$$R(x, y) \cdot t(x, y) + L_B [1 - t(x, y)], \quad (1)$$

式中： $(x, y)$ 表示图像像素点的坐标位置， $I(x, y)$ 是成像系统捕获到的每一像素点的总光强； $R(x, y)$ 是没有产生衰减和散射的每一像素点的目标反射光； $L_B$ 是背景光，在模型中通常被看作是全局常数； $t(x, y) = \exp[-\beta d(x, y)]$ 表示场景到达成像系统的每一像素点的透射率， $\beta$ 是水体的衰减因子， $d(x, y)$ 是相机与场景之间每一像素点的水体厚度或距离。已知水下图像总光强  $I(x, y)$ ，实现水下图像复原时首先需要估计出背景光  $L_B$  和透射率

$t(x, y)$ , 但水下成像视场中存在光源干扰时, 直接估计水下背景光和透射率会受到光源的影响, 因此, 首先需要去除光源对图像的干扰, 再在分离光源影

响后的水下图像中对水下背景光和透射率进行估计。视场中存在光源干扰时的水下成像过程如图 2 所示。

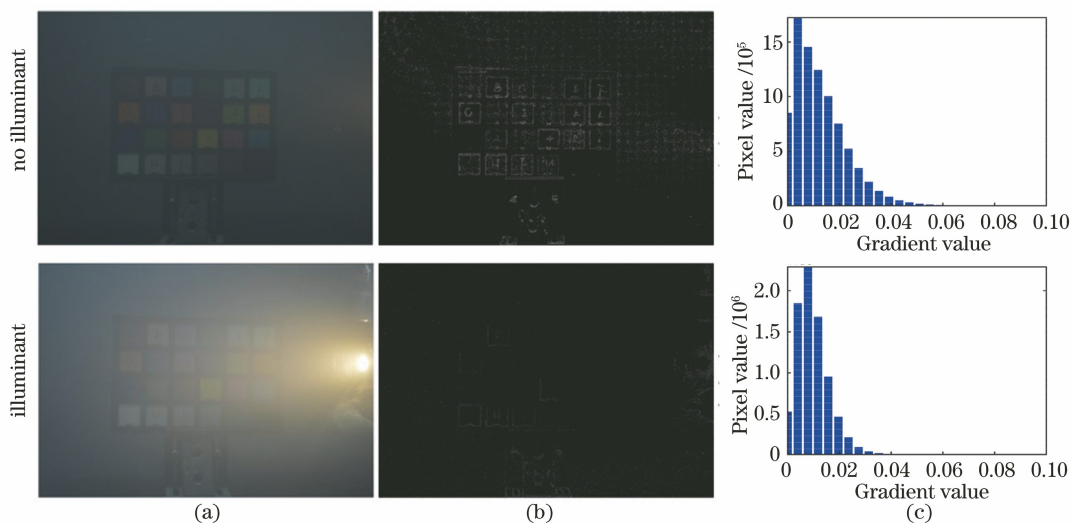


图 1 无光源和有光源干扰的水下图像对比。(a)水下场景的原图像;(b)水下图像的边缘信息;(c)水下图像的梯度直方图  
Fig. 1 Comparison of underwater images without light source and light source interference. (a) Underwater raw images; (b) edge information of underwater images; (c) gradient histogram of underwater images

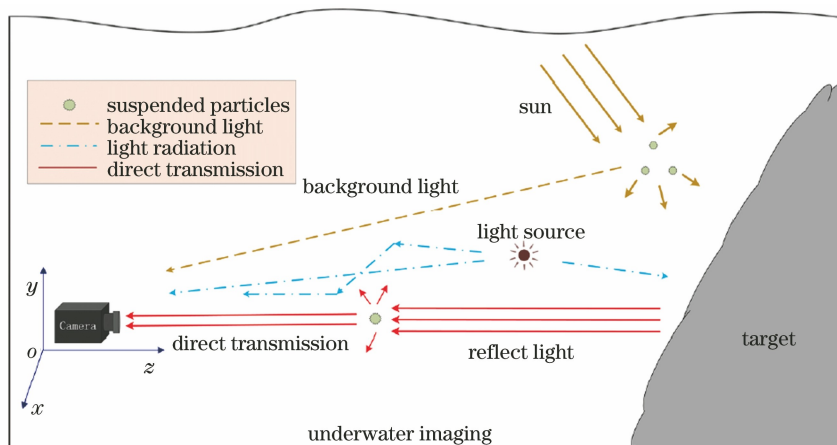


图 2 成像视场中存在光源干扰时的水下成像过程

Fig. 2 Underwater imaging process with influence of illuminant in imaging field of view

在图 2 中可以看到, 当成像视场中存在光源干扰时, 光源发出的一部分光直接传输到成像系统, 另一部分光与水体发生散射作用, 增加了进入成像系统的散射光, 导致水下图像质量进一步降低。考虑到视场内光源对成像过程的干扰, 本研究将这一影响统一用光源辐射表示, 并添加到现有的水下成像模型中, 则修正后的水下成像模型可表示为

$$I(x, y) = S(x, y) + B(x, y) + L_1(x, y) = R(x, y) \cdot t(x, y) + L_B(x, y) \cdot [1 - t(x, y)] + L_1(x, y), \quad (2)$$

式中: 前两项与现有的成像模型一致, 最后一项

$L_1(x, y)$  组成的二维矩阵  $L_1$  表示成像过程中的光源辐射图像, 它与直接传输光和后向散射光呈线性关系, 修正项是用来整体描述成像视场中干扰光源对水下成像过程影响的参量; 背景光  $L_B$  不再被看作是一个常数,  $L_B$  随图像像素点坐标位置的变化而变化, 故  $L_B(x, y)$  组成了一个二维矩阵  $L_B$ , 该矩阵表示背景光图像。这是因为在视场中存在光源影响时, 光源的一部分光散射后对背景光产生了影响, 使得背景光在图像中呈现非均匀分布, 此时仍将其看作全局常量时会影响水下图像的复原效果。

### 3 光源干扰下的水下图像复原

#### 3.1 光源辐射的分离

为了抑制光源辐射的影响而获得无光源干扰的水下图像,首先需要将输入的水下图像进行分解,通过分离光源辐射实现图像中光源辐射的抑制。(2)式中的水下成像模型可以表示为

$$I(x, y) = L_R(x, y) + L_I(x, y), \quad (3)$$

式中,  $L_R(x, y)$  组成的二维矩阵  $L_R$  表示分离光源干扰后的抑光图像。光在水中传输时,会经过多次吸收和散射作用,光源发出的光距离光源越远强度越小,这对图像造成的影响也越小。在图 1(b)中可

以看到,靠近光源的地方受到的影响最严重,此时无法检测到目标的边缘信息,而远离光源的地方,目标的边缘信息清晰可见,此时的光源对目标信息造成的影响很小。由图 1(b)中边缘信息分布情况的分析也表明,水下图像中的光源辐射会造成图像局部平滑。在此基础上,针对大量存在光源干扰的水下图像,统计光源辐射附近区域的梯度分布情况,结果如图 3 所示,可以看出,光源辐射区域的梯度较为集中,且主要集中在零附近,相较于无光源影响的水下图像,光源辐射区域的梯度更小,通过对比图 1(c),能够说明光源辐射图像  $L_I$  相较于无光源影响的图像  $L_R$  更平滑。

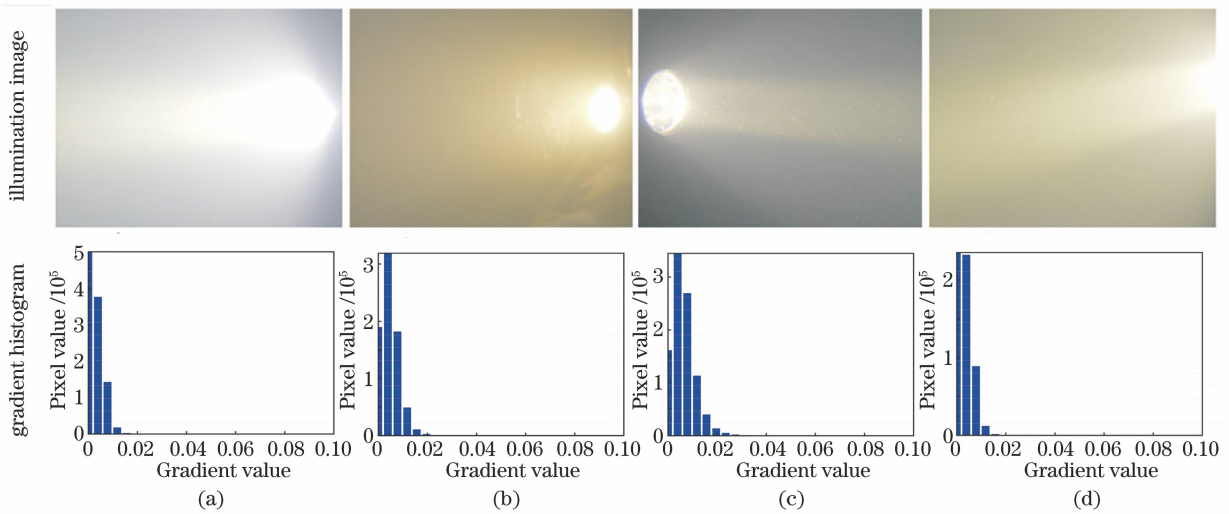


图 3 不同的水下干扰光源辐射区域的梯度直方图分布。(a)~(d)不同的水下干扰光源辐射图像

Fig. 3 Gradient histogram distributions of light source radiation. (a)~(d) Radiation images for different underwater interference illumination

根据 Levin 等<sup>[15-16]</sup>在分离反射方面所做的工作,可知对于光源辐射图像的梯度分布比无光源影响时的梯度分布更为集中,故可通过最大化光源辐射图像与抑光图像二者的梯度分布概率来分离光源辐射。针对光源辐射图像和抑光图像的梯度直方图分布,其概率分布函数  $P_R(\mathbf{X})$  和  $P_I(\mathbf{X})$  可描述为

$$P_R(\mathbf{X}) = \frac{1}{z_1} \exp\left(-\frac{\mathbf{X}^2}{\sigma_1^2}\right), \quad (4)$$

$$P_I(\mathbf{X}) = \frac{1}{z_2} \exp\left(-\frac{\mathbf{X}^2}{\sigma_2^2}\right), \quad (5)$$

式中:  $\mathbf{X}$  是梯度图像;  $z_1$  和  $z_2$  是归一化常数;  $\sigma_1$  和  $\sigma_2$  是一个关键的参数值,影响着梯度直方图的分布情况,  $\sigma_1$  和  $\sigma_2$  值越小,曲线下降得越快。为了解决光源辐射分离的问题,采用概率模型来求解符合(4)式和(5)式中概率分布的光源辐射图像和抑光图像。要使得  $L_I$  和  $L_R$  同时符合上述概率分布,可以最大化  $L_I$

和  $L_R$  的联合概率密度。由于光源对图像的影响仅与水体和光源相关,故可以认为水下图像和光源辐射之间是相互独立的。根据联合概率密度的定义,可得

$$\max P(\nabla L_R, \nabla L_I) = \max[P_R(\nabla L_R) \cdot P_I(\nabla L_I)], \quad (6)$$

式中,  $\nabla L_R$  和  $\nabla L_I$  是梯度图像。最大化联合概率密度运算可通过最小化其负对数来实现<sup>[17]</sup>。对(6)式同时取负对数,可得

$$\min[-\ln P(\nabla L_R, \nabla L_I)] = \min[-\ln P_R(\nabla L_R) - \ln P_I(\nabla L_I)], \quad (7)$$

令  $\lambda_1 = 1/\sigma_1^2$ ,  $\lambda_2 = 1/\sigma_2^2$ , 有

$$\begin{cases} -\ln P_R(\nabla L_R) = \frac{\nabla L_R^2}{\sigma_1^2} + \ln z_1 = \lambda_1 \nabla L_R^2 + \ln z_1 \\ -\ln P_I(\nabla L_I) = \frac{\nabla L_I^2}{\sigma_2^2} + \ln z_2 = \lambda_2 \nabla L_I^2 + \ln z_2 \end{cases} \quad (8)$$

将(8)式代入(7)式中,假设梯度图像中的每个像素点相互独立,由于不影响最终的求解,(8)式的常数可以删除,则最小化 $-\ln P(\nabla \mathbf{L}_R, \nabla \mathbf{L}_1)$ 可以写成为

$$\begin{aligned} & \min_{\mathbf{L}_R, \mathbf{L}_1} \sum_{i,j} [\lambda_1 (\nabla_j * \mathbf{L}_R)_i^2 + \lambda_2 (\nabla_j * \mathbf{L}_1)_i^2] = \\ & \min_{\mathbf{L}_R, \mathbf{L}_1} \sum_{i,j} [\lambda_1 (\nabla_j * \mathbf{L}_R)_i^2 + \lambda_2 (\nabla_j * (\mathbf{I} - \mathbf{L}_R)_i^2], \end{aligned} \quad (9)$$

式中,\*表示卷积, $i$ 是图像中的像素点, $\nabla_j$ 是不同的梯度算子。本文利用双向(横纵坐标方向)一阶梯度算子计算 $\mathbf{L}_R$ 的梯度,利用二阶 Laplacian 算子计算 $\mathbf{L}_1$ 的梯度<sup>[16]</sup>。由于(9)式是一个非凸函数,可以直接通过求导和快速二维傅里叶变换<sup>[18]</sup>得到其闭式解,闭式解可表示为

$$\mathbf{L}_R = \mathcal{F}^{-1} \left[ \frac{\lambda_2 \overline{\mathcal{F}(\nabla_3)} \mathcal{F}(\nabla_3) \mathcal{F}(\mathbf{I})}{\lambda_1 \sum_{j=1,2} \overline{\mathcal{F}(\nabla_j)} \mathcal{F}(\nabla_j) + \lambda_2 \overline{\mathcal{F}(\nabla_3)} \mathcal{F}(\nabla_3) + \tau} \right], \quad (10)$$

式中, $\mathcal{F}, \mathcal{F}^{-1}$ 分别表示快速傅里叶变换和其逆变换, $\overline{\mathcal{F}(\cdot)}$ 表示傅里叶变化的复共轭形式, $\tau$ 是一个极小值( $10^{-16}$ ),以防止分母为零。令 $k = \lambda_1/\lambda_2$ ,则(10)式为

$$\mathbf{L}_R = \mathcal{F}^{-1} \left[ \frac{\overline{\mathcal{F}(\nabla_3)} \mathcal{F}(\nabla_3) \mathcal{F}(\mathbf{I})}{k \sum_{j=1,2} \overline{\mathcal{F}(\nabla_j)} \mathcal{F}(\nabla_j) + \overline{\mathcal{F}(\nabla_3)} \mathcal{F}(\nabla_3) + \tau} \right]. \quad (11)$$

在求解过程中,需要注意的是参数 $k$ 的取值问题。由于 $\mathbf{L}_1$ 图像相比于 $\mathbf{L}_R$ 图像更加平滑,因此取值时应满足 $\lambda_2 > \lambda_1$ 的原则,即 $1 > k > 0$ 。研究中采用迭代的方法寻找 $k$ 的最佳值,具体步骤如下:为了有效评估光源辐射的去除效果,利用能量梯度函数(EOG,  $f_{\text{EOG}}$ )来描述去除光源辐射后的图像质量,EOG的表达式为

$$f_{\text{EOG}} = \sum_x \sum_y \{ [f(x+1, y) - f(x, y)]^2 + [f(x, y+1) - f(x, y)]^2 \}, \quad (12)$$

式中, $f(x, y)$ 表示图像像素点的灰度值, $(x, y)$ 表示像素点的坐标。EOG将 $x$ 和 $y$ 方向的相邻像素的灰度值之差的平方和作为每个像素点的梯度值,对所有像素梯度值的累加值作为清晰度评价函数值,可以很好地反映图像中的梯度信息。当 $k$ 取不同值时,可得到不同的 $\mathbf{L}_R$ 图像,对应的每一幅 $\mathbf{L}_R$ 图像都可得到一个EOG值。通过大量的实验分析,

发现EOG值随 $k$ 值的变化曲线是一个凸曲线形式(EOG值在到达最大值前呈单调递增趋势,到达最大值后呈单调递减趋势)。为提高程序运行效率,实验中设定当EOG的值达到最大值后跳出迭代。

### 3.2 背景光和透射率的估计

在水下模糊图像中分离光源辐射得到抑光图像后,需要对抑光图像进行复原处理以得到更清晰的图像。成像模型中分离光源辐射后的未知参量有水体透射率 $t(x, y)$ 和背景光 $L_B(x, y)$ 。常见的求解背景光的方法是将图像中最亮的一点或暗通道前0.1%最亮点对应像素的平均值作为背景光的值,这种方法不适用于背景光不均匀的水下图像复原。本方法在分离光源辐射后,光源的影响被极大地抑制,但图像中仍存在光照不均匀区域。为了更准确地估计背景光的值,假设背景光在局部是恒定的,并且选取局部区域中最亮的一点作为该区域的背景光,这个操作可以利用最大值滤波来实现。由于滤波后的图像有着明显的块状效应,利用引导滤波<sup>[19]</sup>对图像进行进一步的平滑处理,则水下全局背景光的估计可表示为

$$\begin{cases} \bar{L}_B(x, y) = \max_{\bar{x}, \bar{y} \in \Omega(x, y)} [L_R(\bar{x}, \bar{y})] \\ L_B(x, y) = F_{\text{gradient}}[\bar{L}_B(x, y)] \end{cases}, \quad (13)$$

式中, $\max[\cdot]$ 表示最大值滤波, $F_{\text{gradient}}[\cdot]$ 表示引导滤波函数。

获得图像背景光后,估计水下透射率。在现有的研究中,采用暗通道的方法求解透射率比较常见。但实际上,在水下图像中,由于不同波长的光在水下传输时的散射和衰减不同,直接利用暗通道方法求解透射率容易产生失真现象,故如果简单地对某个通道或某两个通道求最小值并不能解决这个失真问题。为了解决水下透射率估计的失真问题,本研究利用Tarel<sup>[20]</sup>在去雾中使用的中值滤波法来求解透射率,计算公式为

$$t(x, y) = 1 - \frac{B(x, y)}{L_R(x, y)}, \quad (14)$$

其中 $B(x, y) = \min\{p * A(x, y), F_{\text{median}, s \times v}[L_R(x, y)]\}$ , $A(x, y) = F_{\text{median}, s \times v}[L_R(x, y)] - F_{\text{median}, s \times v}\{L_R(x, y) - F_{\text{median}, s \times v}[L_R(x, y)]\}$ , $F_{\text{median}, s \times v}[\cdot]$ 表示中值滤波, $s \times v$ 指中值滤波的尺寸, $p$ 是比例参数。根据Tarel等<sup>[20]</sup>的研究,可知当 $p$ 取0.95时,中值滤波的效果最好。

将求解得到的背景光和透射率代入水下成像模型(2)式中,可以得到最终恢复的水下复原图像为

$$R(x, y) = \frac{L_R(x, y) - L_B(x, y) \cdot [1 - t(x, y)]}{t(x, y)} \quad (15)$$

综合上述抑制光源干扰和水下图像复原过程, 水下图像复原算法的流程如图 4 所示。

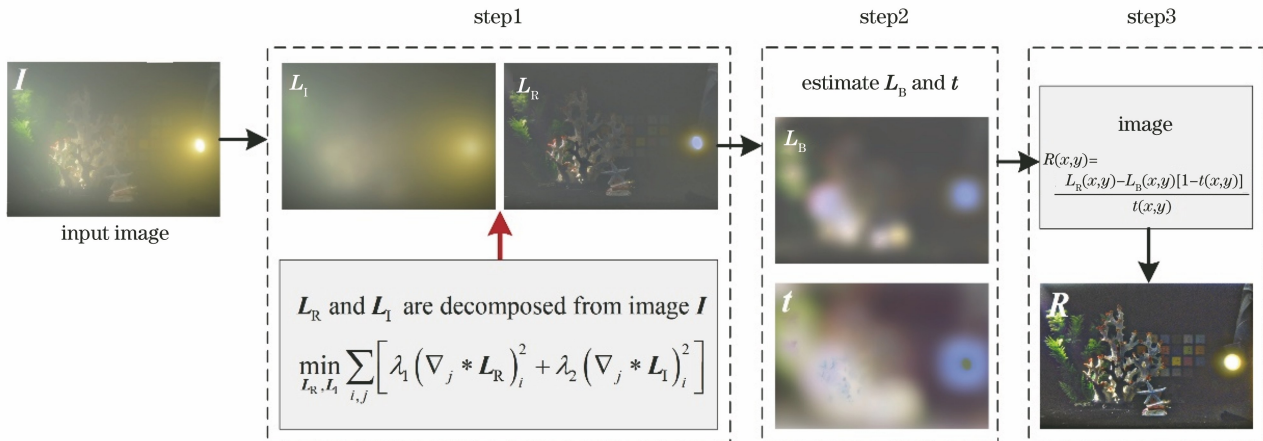


图 4 抑制光源干扰的水下图像复原算法流程图

Fig. 4 Flow chart of underwater image restoration algorithm for suppressing light source interference

## 4 实验与分析

为了验证抑制光源干扰的水下图像复原方法的有效性, 首先分析算法中重要参数  $k$  在不同取值情况下对光源辐射分离的影响, 并给出其取值方法的可行性分析。然后, 对多组视场内存在光源干扰的水下图像进行了光源辐射分离和水下图像复原的实验, 并与常见的经典水下图像复原方法进行了比较。另外, 为了验证本文方法对一般无光源干扰的水下图像的复原也具有普适性, 进行了相关的测试。在所有的实验中, 对所有图像都设置了相同大小的滤波窗口, 尺寸为  $35 \times 35$ 。本节中用于比较的水下图像复原方法的复原结果均来自作者本人在个人主页和 Github 上共享的数据, 或是由作者共享的代码以默认参数直接运行的结果。

### 4.1 参数 $k$ 的取值与分析

在方法中,  $\lambda_1, \lambda_2$  的取值对光源辐射的分离效果有着重要的影响, 它们决定了图像梯度直方图的分布形状和集中程度。当  $\lambda_1, \lambda_2$  取值较大时, 图像梯度趋近于零, 图像较为平滑; 当其取值较小时, 图像含有较多的纹理信息, 图像的清晰度更高。然而,  $L_R, L_I$  图像呈负相关关系, 实际上是  $\lambda_1, \lambda_2$  之间的比值  $k$  最终决定光源辐射分离的效果。由于  $\sigma_1, \sigma_2$  影响梯度概率曲线的分布情况, 故当  $\sigma_1, \sigma_2$  取值较小时, 曲线下降较快, 当  $\sigma_1, \sigma_2$  取值较大时, 曲线下降较慢。由于光源辐射图像具有平滑的特征, 其梯度分布较为集中, 反映在梯度分布曲线上即曲线下

降较快, 故  $\sigma_2$  应取较小值。同理, 由于无光源的图像具有较多的纹理特征, 其梯度分布较为分散, 反映在梯度分布曲线上即曲线下降较慢, 故  $\sigma_1$  应取较大值。由  $k = \sigma_2^2 / \sigma_1^2$  可推出  $k$  取值为  $0 \sim 1$  之间, 且取较小值时会取得满意的分离效果。在图 5 中, 展示了  $k$  取不同值时的光源辐射分离结果, 可以看到, 在  $k$  取值 0 或 1 时, 光源辐射分离效果最差, 在  $k$  取值 0.001 时, 光源辐射分离的效果较好, 与理论分析情况一致。

为了能够确定最优的  $k$  值以达到最好的光源辐射分离效果, 采用迭代算法来获取  $k$  的最优值。下面进一步讨论利用迭代方法进行取值的可行性。首先,  $k$  是  $\lambda_1, \lambda_2$  的比值, 反映了代价函数中的比例关系, 当  $k$  值偏离最佳值, 分离光源辐射的效果则会逐渐地减弱, 在 EOG 随  $k$  值变化的曲线上即表现为在最佳值  $k$  之前, EOG 值逐渐增大, 到达最佳值之后, EOG 值逐渐减小, 在区间内存在一个最佳值  $k$  使 EOG 最大。其次, 进行了大量实验来验证算法的可行性, 图 6 中展示了部分实验结果, 在图中可以看到两幅不同图像的光源辐射分离结果的归一化 EOG 值随  $k$  取不同值时的变化情况 (当 EOG 值达到最大值后会单调递减, 故图中仅截取了  $0.01 > k > 0$  部分), 从曲线上可以看到, 随着  $k$  值的不断增大, 能量梯度函数值随之先增大后减小, 在区间内能够找到一个最优值  $k$  使得 EOG 达到最大, 这与分析结果一致。因此, 利用迭代的方法进行  $k$  值的最优值获取具有可行性。

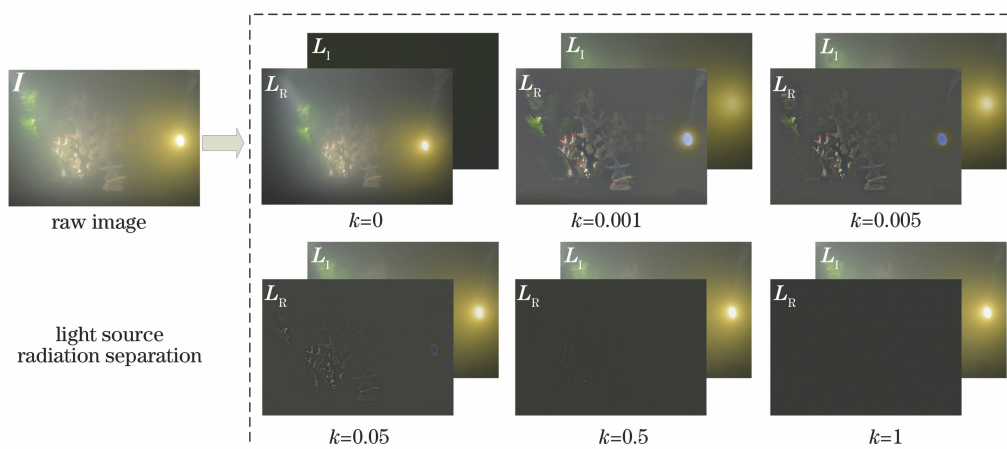


图 5 不同  $k$  值对光源辐射分离的影响

Fig. 5 Effect of different  $k$  values on radiation separation of light source

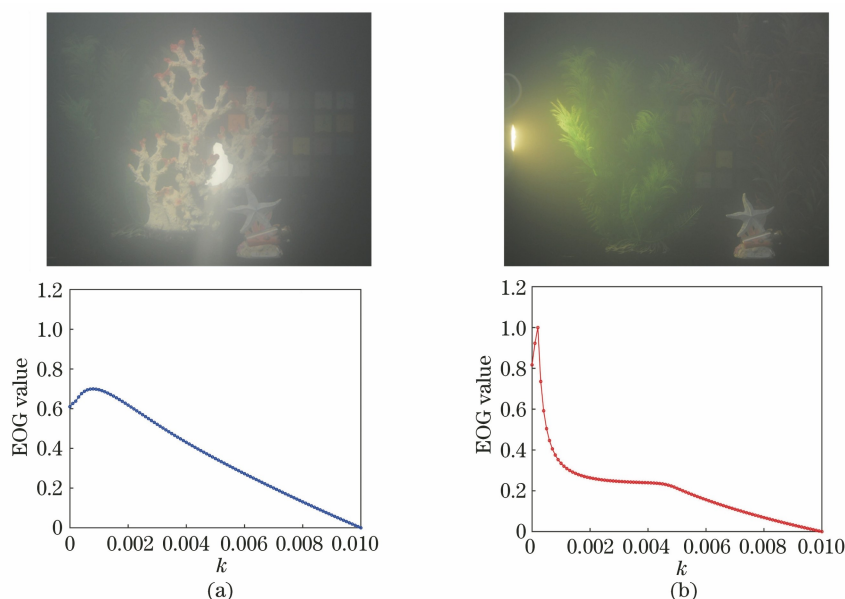


图 6 EOG 值随  $k$  取不同值的变化情况。(a)存在镜面反射干扰的水下场景与 EOG 值随  $k$  值的变化情况；  
(b)存在侧面光源干扰的水下场景与 EOG 值随  $k$  值的变化情况

Fig. 6 Change of EOG with the value of  $k$ . (a) Underwater scene with specular interference and change of EOG with the value of  $k$ ; (b) underwater scene with side light interference and change of EOG with the value of  $k$

## 4.2 实验结果

为了验证方法对水下图像复原的有效性,在实验室环境下进行了模拟实验。实验水深为 50 cm,目标与相机(采用视展偏振相机 SZ-SR500C)间的距离为 1.5 m,光源放置在目标侧方不同位置处来模拟不同方向的光照。针对不同的水下目标场景在不同的光照条件下进行了实验,光源辐射抑制和最后的水下图像复原效果如图 7 所示。从实验结果可以看出,利用分离光源辐射的方法可以较好地抑制光源对图像的影响,在光源辐射分离后对水下图像进行复原,可以进一步提高水下目标的清晰度和对比度,目标的细节也可以得到较好的恢复。由于光

源辐射分离后再进行图像复原,获得的最终图像复原结果整体偏暗,为获得更好的视觉效果,对复原结果乘以一个常数可以提高图像的亮度。

为了进一步说明算法的重要性和有效性,将本文方法与经典的水下图像复原方法进行比较,分别在有光源的水下场景和光照不均匀的水下场景中进行实验。在图 8 中可以看到,直接利用常见的水下图像复原方法进行图像复原,会产生失真、过亮的现象,无法抑制光源的影响,无法进行有效的图像复原。并且,对于图 8 中存在光源的水下场景,常见的复原方法的图像复原效果较差,复原后产生了明显的光晕效应,影响图像的视觉效果。本文方法先进

行光源辐射的分离,再完成水下图像复原,在有光源干扰和光照不均匀的水下场景都取得了较好的复原

结果,复原的图像中无光晕现象产生,显著提高了水下场景的清晰度,提升了可视性。

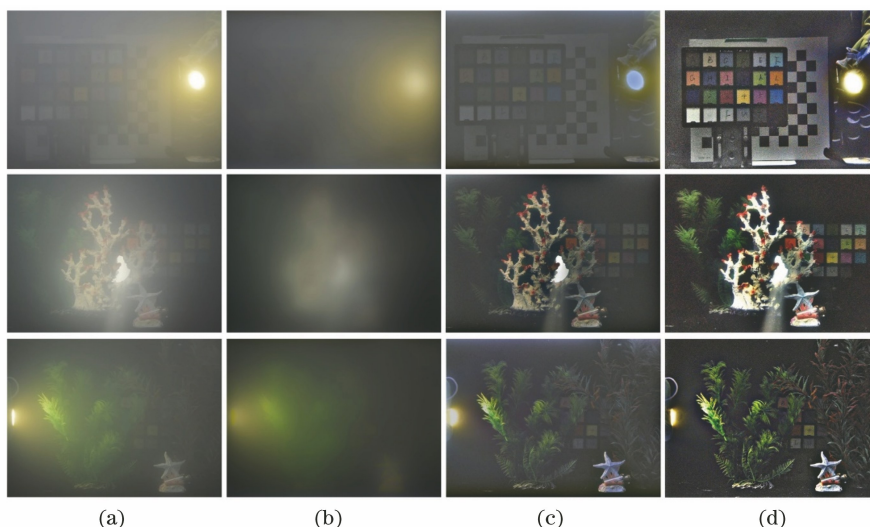


图 7 不同水下场景和不同光照条件下的水下图像光源辐射抑制和复原结果。(a)存在光源干扰的原图像;  
(b)光源辐射图像;(c)分离光源辐射后的抑光图像;(d)分离光源辐射后的复原图像

Fig. 7 Suppression of illumination radiation and restoration results of underwater images under different underwater scenes and different illumination conditions. (a) Raw images with illumination interference; (b) light source radiation images; (c) images after removing the radiation of light source; (d) underwater restoration images after removing the radiation of light source

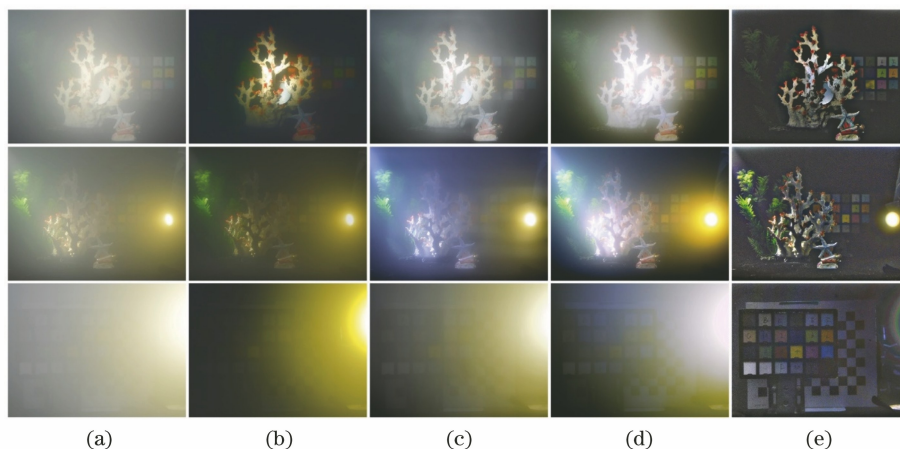


图 8 不同复原方法对于存在光源干扰的水下图像复原结果比较。(a)光源干扰下的原图像;  
(b) Drows 等<sup>[8]</sup>的方法;(c) Ancuti 等<sup>[21]</sup>的方法;(d) Li 等<sup>[11]</sup>的方法;(e)本文的方法

Fig. 8 Comparison of restoration results of underwater images with illumination by different methods. (a) Raw images; (b) method of Drows *et al*<sup>[8]</sup>; (c) method of Ancuti *et al*<sup>[21]</sup>; (d) method of Li *et al*<sup>[11]</sup>; (e) our method

在图 9 中,提取了本文方法和其他方法复原结果的边缘信息。可以看到,Drows 和 Ancuti 的方法只能检测出较少的边缘信息,Li 的方法检测出的边缘信息较多,但只能检测到离光源较远区域的目标边缘。本文方法与其他复原方法相比,能检测到更多的目标边缘信息,包括距离光源附近较近的目标边缘信息。实验结果表明,本文方法能够有效地抑制光源对成像的影响,能够更好地恢复目标的细节信息。

为了测试本文方法对无光源干扰下的一般水下图像中的复原效果,对水下图像增强基准(UIEB)数据集<sup>[22]</sup>中的图像进行了实验,并与几种常用的方法进行了比较,图 10 中展示了实验的部分结果(这里可以将背景光看作常数处理)。在图 10 中可以看到,本文方法与现有水下图像复原方法的结果相似,在非均匀光照的场景下本文方法的去散射效果更好,但由于本文方法对水下图像进行了两次处理,其颜色恢复效



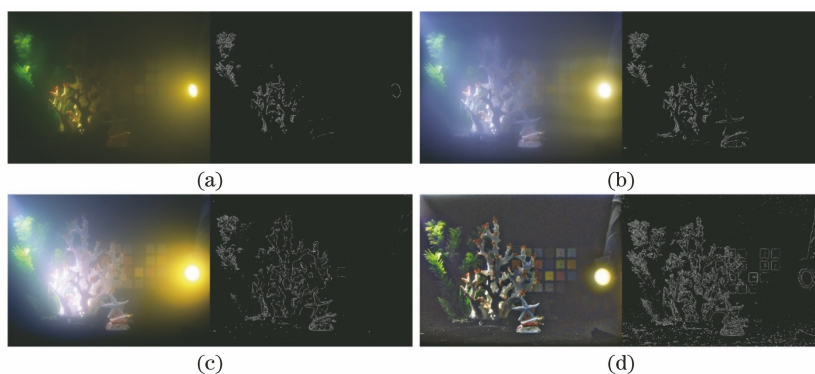


图 9 不同复原方法复原结果的边缘信息检测。(a) Drews 等<sup>[8]</sup>的方法;(b) Ancuti 等<sup>[21]</sup>的方法;(c) Li 等<sup>[11]</sup>的方法;(d)本文的方法

Fig. 9 Edge information detection of different restoration results. (a) Method of Drews *et al*<sup>[8]</sup>; (b) method of Ancuti *et al*<sup>[21]</sup>; (c) method of Li *et al*<sup>[11]</sup>; (d) our method

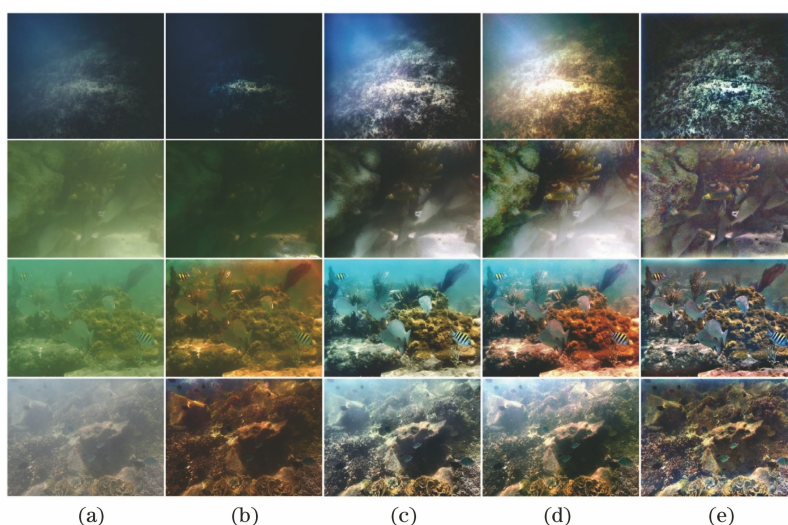


图 10 不同复原方法对于一般无光源干扰的水下图像的复原结果。(a)原图像;(b) Drews 等<sup>[8]</sup>的方法;

(c) Ancuti 等<sup>[21]</sup>的方法;(d) Li 等<sup>[11]</sup>的方法;(e)本文方法

Fig. 10 Restoration results of underwater images without illumination interference by different restoration methods.

(a) Raw images; (b) method of Drews *et al*<sup>[8]</sup>; (c) method of Ancuti *et al*<sup>[21]</sup>; (d) method of Li *et al*<sup>[11]</sup>; (e) our method

果相较于 Ancuti 和 Li 的方法不够自然。

此外,在客观评价方面,采用水下彩色图像质量评价指标 (UCIQE)<sup>[23]</sup>、水下图像质量测量 (UIQM)<sup>[24]</sup>、峰值信噪比 (PSNR) 和图像平均梯度作为客观评价指标对复原结果进行了定量比较,如表 1 所示。结果表明,本文方法在定量评价方面也

表 1 水下图像复原结果定量评价的平均值

Table 1 Average value of quantitative evaluation of restoration results for the underwater images

Method	UCIQE	UIQM	PSNR	Mean gradient
Method in Ref. [8]	0.4725	4.0822	14.3233	0.1425
Method in Ref. [21]	0.5128	4.3822	13.7086	0.1058
Method in Ref. [11]	0.6227	4.9635	14.8936	0.1805
Ours	0.6113	5.7409	15.6134	0.2213

取得了较好的结果,各项指标都优于或接近于其他复原方法。上述实验的对比结果表明,尽管本文方法是针对有光源影响的水下特殊场景设计的,但对于一般的水下场景,也有着良好的复原效果,能有效地去除图像中的“雾”,显著提高了水下模糊图像的清晰度和对比度。

## 5 结 论

针对视场中存在光源干扰的水下图像复原问题,建立新的成像模型来描述光源在水下成像过程中的影响,并提出了一种抑制光源干扰的水下图像复原方法。根据光源辐射图像相较于无光源影响的图像更加平滑的特点,分离光源的影响,完成水下图像的复原。大量的复原实验结果表明,与常见的水

下复原方法相比,本方法能够有效地抑制水下光源的影响,提升水下场景的视觉效果,这为水下特殊场景下的计算机视觉应用提供了一种有效的预处理手段。在本文方法中,参数 $k$ 的选取对光源辐射分离的效果起着至关重要的作用,目前 $k$ 的选取采用迭代的方法来获得,但迭代的方法在运算效率上较低,需要花费大量时间。理想情况下 $k$ 应该是自动估计的,它的取值会受到光源、目标、水体的影响,如何更为快速和准确地获取 $k$ 值是我们今后的一项重要工作。此外,颜色恢复也是需要关注的问题,我们将开展后续相关的研究工作以改善最终的视觉效果。

### 参 考 文 献

- [1] Guo J C, Li C Y, Guo C L, et al. Research progress of underwater image enhancement and restoration methods[J]. *Journal of Image and Graphics*, 2017, 22(3): 273-287.  
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): 273-287.
- [2] Schettini R, Corchs S. Underwater image processing: state of the art of restoration and image enhancement methods [J]. *EURASIP Journal on Advances in Signal Processing*, 2010, 2010(1): 746052.
- [3] Dai C G, Lin M X, Wang Z, et al. Color compensation based on bright channel and fusion for underwater image enhancement [J]. *Acta Optica Sinica*, 2018, 38(11): 1110003.  
代成刚, 林明星, 王震, 等. 基于亮通道色彩补偿与融合的水下图像增强[J]. *光学学报*, 2018, 38(11): 1110003.
- [4] Ancuti C, Ancuti C O, de Vleeschouwer C, et al. Multi-scale underwater descattering [C] // 2016 23rd International Conference on Pattern Recognition (ICPR), December 4-8, 2016, Cancun, Mexico. New York: IEEE Press, 2016: 4202-4207.
- [5] Fan Z G, Song Q, Dai Q Q, et al. Underwater target polarization recovery method based on global parameter estimation [J]. *Optics and Precision Engineering*, 2018, 26(7): 1621-1632.  
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.
- [6] Xie H L, Peng G H, Wang F, et al. Underwater image restoration based on background light estimation and dark channel prior [J]. *Acta Optica Sinica*, 2018, 38(1): 0101002.
- [7] He K M, Sun J, Tang X O. Single image haze removal using dark channel prior [J]. *IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence*, 2011, 33(12): 2341-2353.
- [8] Drews P, Jr, do Nascimento E, Moraes F, et al. Transmission estimation in underwater single images [C] // 2013 IEEE International Conference on Computer Vision Workshops, December 2-8, 2013, Sydney, NSW, Australia. New York: IEEE Press, 2013: 825-830.
- [9] Galdran A, Pardo D, Picón A, et al. Automatic red-channel underwater image restoration [J]. *Journal of Visual Communication and Image Representation*, 2015, 26: 132-145.
- [10] 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.
- [11] Li C Y, Guo J C, Cong R M, et al. Underwater image enhancement by dehazing with minimum information loss and histogram distribution prior [J]. *IEEE Transactions on Image Processing*, 2016, 25(12): 5664-5677.
- [12] Meng G F, Wang Y, Duan J Y, et al. Efficient image dehazing with boundary constraint and contextual regularization [C] // 2013 IEEE International Conference on Computer Vision, December 1-8, 2013, Sydney, NSW, Australia. New York: IEEE Press, 2013: 617-624.
- [13] McGlamery B L. A computer model for underwater camera systems [J]. *Proceedings of SPIE*, 1980, 208: 221-231.
- [14] Chiang J Y, Chen Y C. Underwater image enhancement by wavelength compensation and dehazing [J]. *IEEE Transactions on Image Processing*, 2012, 21(4): 1756-1769.
- [15] Levin A, Weiss Y. User assisted separation of reflections from a single image using a sparsity prior [M] // Pajdla T, Matas J. *Computer vision-ECCV 2004. Lecture notes in computer science*. Heidelberg: Springer, 2004, 3021: 602-613.
- [16] Li Y, Brown M S. Single image layer separation using relative smoothness [C] // 2014 IEEE Conference on Computer Vision and Pattern Recognition, June 23-28, 2014, Columbus, OH, USA. New York:

- IEEE Press, 2014: 2752-2759.
- [17] Shao Z Q, Jin H H, Qian L J, et al. Method of haze image reconstruction based on polarization layering and analysis of airlight[J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2020, 57(22): 221009.  
邵子奇, 金海红, 钱立进, 等. 基于大气光偏振层析的雾天图像重构方法[J]. *激光与光电子学进展*, 2020, 57(22): 221009.
- [18] Chen L, Fang F M, Wang T T, et al. Blind image deblurring with local maximum gradient prior [C]// 2019 IEEE/CVF Conference on Computer Vision and Pattern Recognition (CVPR), June 15-20, 2019, Long Beach, CA, USA. New York: IEEE Press, 2019: 1742-1750.
- [19] He K M, Sun J, Tang X O. Guided image filtering [J]. *IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence*, 2013, 35(6): 1397-1409.
- [20] Tarel J P, Hautière N. Fast visibility restoration from a single color or gray level image [C]// 2009 IEEE 12th International Conference on Computer Vision, September 29-October 2, 2009, Kyoto, Japan. New York: IEEE Press, 2009: 2201-2208.
- [21] Ancuti C, Ancuti C O, Haber T, et al. Enhancing underwater images and videos by fusion [C]// 2012 IEEE Conference on Computer Vision and Pattern Recognition, June 16-21, 2012, Providence, RI, USA. New York: IEEE Press, 2012: 81-88.
- [22] Li C Y, Guo C L, Ren W Q, et al. An underwater image enhancement benchmark dataset and beyond [J]. *IEEE Transactions on Image Processing*, 2020, 29: 4376-4389.
- [23] Yang M, Sowmya A. An underwater color image quality evaluation metric [J]. *IEEE Transactions on Image Processing*, 2015, 24(12): 6062-6071.
- [24] Panetta K, Gao C, Agaian S. Human-visual-system-inspired underwater image quality measures [J]. *IEEE Journal of Oceanic Engineering*, 2016, 41(3): 541-551.