

# 基于电磁理论的水下图像色彩补偿

蒋泽新<sup>\*\*</sup>, 朴燕<sup>\*</sup>

长春理工大学电子信息工程学院, 吉林 长春 130022

**摘要** 在水下环境中, 光波会因散射和被水吸收产生衰减, 导致水下图像存在对比度低、图像模糊、颜色失真等问题。彩色图像传感器具有 RGB 基本颜色传感器, 每个颜色传感器可检测不同波长的光信息。由于不同波长的光具有不同的传输系数, 因此对水下图像进行复原时, 需要考虑这些基本颜色光之间的差异。针对红色波段的光被水严重吸收导致图像 R 通道亮度衰减的问题, 根据电磁波传输理论获得景物与摄像机间的距离, 以及 R 通道因水吸收导致的衰减系数, 求出 R 通道的传输系数。为了验证本文方法的可行性, 通过主观评价和客观评价对实验获得的图像进行质量评估。结果表明, 相比于传统算法, 本文方法可以更有效地对图像色彩进行补偿和去模糊, 其复原图像更真实。

**关键词** 图像处理; 图像复原; 色彩补偿; 电磁理论; 水下暗通道; 成像模型

中图分类号 TP391

文献标识码 A

doi: 10.3788/LOP55.081006

## Underwater Image Color Compensation Based on Electromagnetic Theory

Jiang Zexin<sup>\*\*</sup>, Piao Yan<sup>\*</sup>

*College of Electronic and Information Engineering, Changchun University of Science and Technology,  
Changchun, Jilin 130022, China*

**Abstract** In underwater environments, light waves are attenuated by scattering and absorption, which cause problems such as low contrast, blurred underwater image, and color distortion. The color image sensor has three basic color sensors of RGB and each color sensor can detect light information of different wavelengths. Since different wavelengths of light have different transmission coefficients, the differences within these basic colors need to be considered to solve the above problems. Aiming at the problem that the brightness of R channel is decayed as the red band light is seriously absorbed by water, we propose a new method to obtain the distance between the scene and the camera and the attenuation factor of R channel due to water absorption based on electromagnetic wave theory, and ultimately get the transmission coefficient of R channel. In order to validate the feasibility of proposed method, the quality of experimental images is evaluated both by subjective and objective evaluation. The evaluation results show that compared with the traditional algorithm, the proposed method can compensate the image color and remove blur more effectively and make the restored image more realistic.

**Key words** image processing; image recovery; color compensation; electromagnetic theory; underwater dark channel; imaging model

**OCIS codes** 100.3020; 330.1690; 110.2990

## 1 引言

海洋中蕴含着丰富的自然资源。随着科技的发展、陆地资源的枯竭, 各国纷纷加快对海洋资源的探索。针对当前形势, 我国也大力开展对海洋的探测, 而海洋探测离不开先进的水下成像技术。水下物体成像在海洋科学、船舶检查、安全防卫、水下探测、无

人驾驶水下航行等领域具有多种应用<sup>[1-3]</sup>, 但水下成像环境要比空气环境复杂得多。除了水体会吸收和散射光线之外, 水中的悬浮颗粒、浮游生物也会对光线产生吸收和散射, 而且水对不同波段的光吸收程度不一样, 与在空气中成像相比, 水下成像不但含有噪声和畸变, 还存在着对比度低、图像模糊、颜色信息容易丢失等问题, 严重影响成像质量。

收稿日期: 2018-02-12; 修回日期: 2018-03-05; 录用日期: 2018-03-16

基金项目: 科技部项目(2015DFR10670)

\* E-mail: piaoyan@cust.edu.cn; \*\* E-mail: 651489081@qq.com

光线在水下传播过程中,它的损耗程度会随波长不同而发生改变。导致水下光学成像质量下降的3个主要原因是吸收、散射和颜色失真。水对红光吸收最为强烈,对蓝绿光吸收相对较小,所以水下成像会丢失颜色信息<sup>[4]</sup>;而且水中悬浮颗粒会对光进行散射,使图像的对比度下降。目前,已有的水下图像复原方法主要包括:文献[5]把水下图像看成图像中多了一层雾,将空气中的暗原色先验(DCP)去雾算法直接应用于水下图像复原;文献[6]用DCP原理来提高图像的清晰度,并用自适应亮度调节算法以提高图像对比度;文献[7]用DCP理论求出水下图像的透射率,并依据物体颜色和背景光对透射率进行优化。上述方法虽然在一定程度上改善了水下图像质量,但由于波长衰减差异导致图像颜色失真的问题并未得到很好的解决。

依据光在水下的传播特性,提出一种基于改进的暗原色原理和水下电磁波传播理论的水下图像复原方法(EUD),该方法综合考虑了图像去模糊和颜色补偿等因素。雾天成像模型和水下成像模型的区别在于水下成像时红色通道衰减严重,所以取水下暗原色通道和图像背景光时,仅考虑蓝绿两通道,并根据电磁波传播理论由蓝绿通道的衰减系数估计出红色通道的衰减系数。本文方法可以有效补偿图像颜色失真,且稳健性较高。

## 2 水下图像复原原理

由Jaff-McGlamery模型可知,在水下环境中,摄像机接收到的光强可表示为直接光 $J_d$ 、前向散射光 $J_f$ 和后向散射光 $J_b$ 。如图1所示,到达摄像机的总辐照度 $I$ 是这三部分的线性叠加,即:

$$I = J_d + J_f + J_b. \quad (1)$$

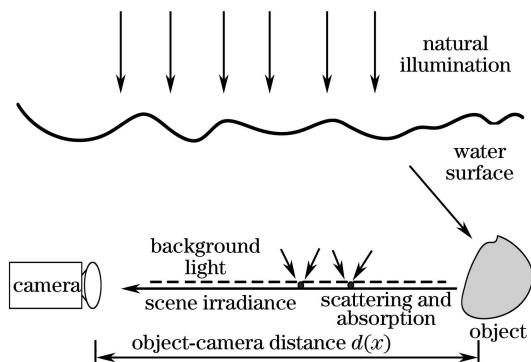


图1 水下光学成像模型

Fig. 1 Underwater optical imaging model

### 1) 直接光

直接光是指直接被物体反射进摄像机的光线,表达式为

$$J_d(x, \lambda) = J(x, \lambda) \exp[-(\alpha_\lambda + \beta_\lambda)d(x)], \quad \lambda \in (R, G, B), \quad (2)$$

式中 $J(x, \lambda)$ 表示物体所在位置的光强, $J_d(x, \lambda)$ 表示摄像机接收的直接光光强, $\alpha_\lambda$ 和 $\beta_\lambda$ 分别表示由吸收和散射造成衰减的衰减系数, $\lambda$ 表示图像的RGB三个通道中的某一通道,因为水对不同波长的光的吸收程度不同,因此衰减系数会随通道波长的变化而变化, $d(x)$ 表示物体与摄像机之间的距离。

### 2) 后向散射光

后向散射光不含物体光,是周围环境光被水中物体,如悬浮颗粒等,散射后进入摄像机的光,表达式为

$$J_b(x, \lambda) = b(\lambda) \{1 - \exp[-\beta_\lambda d(x)]\}, \quad (3)$$

式中 $b(\lambda)$ 为背景光。

忽略前向散射的影响<sup>[8]</sup>,则总光强可表示为

$$I(x, \lambda) = J(x, \lambda) \exp[-(\alpha_\lambda + \beta_\lambda)d(x)] + b(\lambda) \{1 - \exp[-\beta_\lambda d(x)]\} = J(x, \lambda) t_\beta(x) t_a(x) + b(\lambda) [1 - t_\beta(x)], \quad (4)$$

式中 $t_\beta(x) = \exp[-\beta_\lambda d(x)]$ ,表示因散射导致光波衰减的传输系数, $t_a(x) = \exp[-\alpha_\lambda d(x)]$ ,表示因水吸收导致光波衰减的传输系数。文献[6]中把 $t_a(x)$ 看作一个常量,用 $K$ 表示。实际上 $t_a(x)$ 与距离 $d(x)$ 和波长 $\lambda$ 有关,把 $t_a(x)$ 看作一个常量不尽合理。

相对于红色通道,蓝绿通道因水吸收产生的衰减较小,因此,本文忽略蓝绿通道被水吸收的衰减。定义蓝绿通道的成像模型为

$$I(x, \lambda) = J(x, \lambda) t_{BG}(x) + b(\lambda) [1 - t_{BG}(x)], \quad \lambda \in (R, G, B), \quad (5)$$

式中 $t_{BG}(x) = t_\beta(x)$ ,表示蓝绿通道的传输系数。

红色通道的成像模型为

$$I(x, \lambda) = J(x, \lambda) t_R(x) + b(\lambda) [1 - t_{BG}(x)], \quad \lambda \in (R), \quad (6)$$

式中 $t_R(x) = t_\beta(x) t_a(x)$ ,表示红色通道的传输系数。

摄像机所接收到的光强 $I(x, \lambda)$ 就是获取的水下图像,代表模糊的图像。由(5)式和(6)式可知,若想恢复出清晰的图像 $J(x, \lambda)$ ,须计算出传输系数 $t_{BG}(x)$ 、 $t_R(x)$ 和背景光 $b(\lambda)$ 。(5)式和(6)式与有雾天气的大气散射模型很相似,所以本文借鉴DCP去雾的思想来求取背景光和蓝绿通道的传输系数。

### 3 改进的暗原色先验与电磁理论水下图像复原

#### 3.1 DCP 理论

构建光波在有雾条件下的大气散射模型:

$$I(x) = J(x)t(x) + A[1 - t(x)], \quad (7)$$

式中  $I(x)$  表示摄像机捕获的图像,  $J(x)$  表示物体的反射光, 是要求的无雾图像,  $A$  表示大气光强,  $t(x)$  表示光波在大气中的传输系数, 表示物体反射光被大气衰减的程度,  $J(x)t(x)$  表示含有物体信息的光衰减之后的光强,  $A[1 - t(x)]$  表示摄像机接收到的大气光强。(7)式揭示了雾天图像质量退化的原因, 图像去雾等同于从(7)式中求解出  $J(x)$ , 得到清晰的图像, 流程图如图 2 所示。

暗原色一般在阴影、黑色或颜色鲜艳的物体中。所以每个局部区域的 RGB 三通道中都可能存在亮度很低的像素<sup>[6]</sup>, 此统计规律称为暗原色先验, 暗原色本身不具有亮度或亮度很低。

$$J^{\text{dark}}(x) = \underset{c \in (R, G, B)}{\min} [\underset{x \in \Omega(y)}{\min} J^c(x)], \quad (8)$$

式中  $J^c(x)$  代表  $J(x)$  的各个颜色通道强度,  $\Omega(y)$  表示图像的局部区域,  $J^{\text{dark}}(x)$  为  $J(x)$  的暗原色。

根据暗原色理论, 暗原色值可近似为对有雾图像中每一像素点的 RGB 通道进行取最小亮度操作, 即:

$$I^{\text{dark}}(x) = \underset{c \in (R, G, B)}{\min} [I^c(x)], \quad (9)$$

式中  $c$  表示原图像三个通道,  $\underset{c \in (R, G, B)}{\min} [I^c(x)]$  是对原图像中三个颜色通道求最小亮度值。为了估计透射率, 假设大气光强  $A$  为已知, 对(7)式取最小值:

$$\underset{\Omega(y)}{\min} [I^c(x)] = \underset{\Omega(y)}{\min} \{J^c(x)t(x) + A[1 - t(x)]\}. \quad (10)$$

根据暗原色先验理论, 无雾图像的暗原色值趋于零, 即:

$$J^{\text{dark}}(x) = \underset{c \in (R, G, B)}{\min} [\underset{x \in \Omega(y)}{\min} J^c(x)] = 0, \quad (11)$$

则(10)式可变为

$$\underset{c \in (R, G, B)}{\min} [\underset{x \in \Omega(y)}{\min} I^c(x)] = A \underset{c \in (R, G, B)}{\min} \{ \underset{x \in \Omega(y)}{\min} [1 - t(x)] \}. \quad (12)$$

将(12)式两边同时除以  $A$ , 则(12)式变为

$$\underset{c \in (R, G, B)}{\min} [\underset{x \in \Omega(y)}{\min} I^c(x)/A] = 1 - t(x), \quad (13)$$

由此可求出大气的透射率:

$$t(x) = 1 - \underset{c \in (R, G, B)}{\min} [\underset{x \in \Omega(y)}{\min} I^c(x)/A], \quad (14)$$

通过(7)式可求得去雾后的图像:

$$J(x) = \frac{I(x) - A}{t(x)} + A. \quad (15)$$

#### 3.2 改进的水下暗原色先验

水中大量微小悬浮颗粒, 如矿物质、浮游生物等

的散射和吸收作用, 导致水下拍摄的图像存在对比度低、图像模糊、颜色失真等问题, 图像中所含的许多特征都被覆盖或模糊, 直接影响各种水下成像系统的应用。由于雾天图像的退化与水下图像的退化原理较为近似, 从 DCP 用于雾天图像增强取得的良好效果得到启发, 将 DCP 运用于水下图像的去模糊。但是水对光的吸收程度与光的波长有关, 从而引起水下图像的颜色失真。在水下环境, 光的波长越长, 则光的衰减越快。水对红色光和橙色光吸收最多, 而对蓝色光吸收最少<sup>[9]</sup>。而且, 随着光在水中传播距离和水深的不断增加, 这种偏色现象愈加严重。

根据光在水下环境传输的特性, 即依据(9)式和(10)式建立水下光学成像模型, 通过优化和改进水下光学成像模型中水体光强和水体透射率的求解方法, 以更好地去除水下图像的模糊, 并对图像色彩进行补偿, 流程图如图 3 所示。

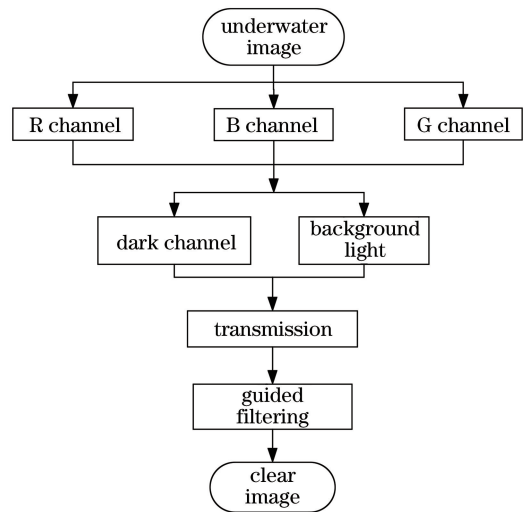


图 2 DCP 流程图

Fig. 2 Flow chart of DCP

#### 3.2.1 水下暗通道

对于在深水区域或浑水下拍摄的图像, 由于红光的能量被大量吸收,  $I^{\text{dark}}(x)$  的强度非常低并趋向于零, 这些水下图像的暗通道不能提供关于场景与摄像机之间正确的距离信息。因此, DCP 在水下图像处理中效果很不理想。

由于大气中的光衰减和水中的蓝光和绿光的衰减几乎都具有相同的散射原理, 所以只考虑蓝色和绿色通道<sup>[9]</sup>, 并重新定义一个新的适合水下图像的暗通道:

$$I^{\text{waterdark}}(x, \lambda) = \underset{\lambda \in (G, B)}{\min} [\underset{x \in \Omega(y)}{\min} I(x, \lambda)], \quad (16)$$

将其称为  $I(x, \lambda)$  的水下暗通道, 式中  $\Omega(y)$  表示一个大小恒定的区域。水下场景的背景一般是蓝色

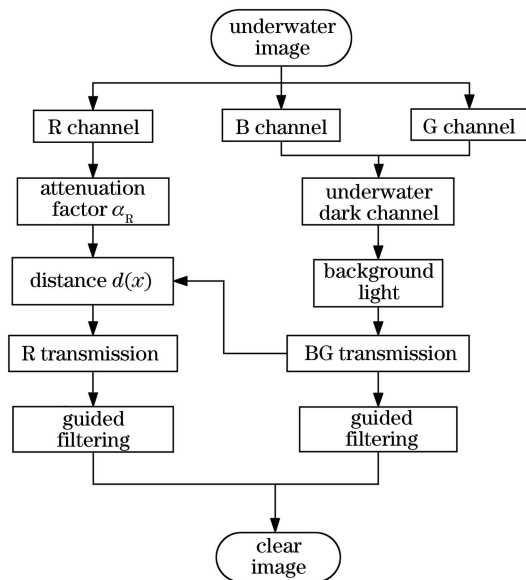


图3 EUD流程图

Fig. 3 Flow chart of EUD

(海洋)或绿色(湖泊)。由于背景光引起颜色偏移,所捕获的水下图像的蓝色或绿色通道的强度应该大于其真实光亮度,而水下图像的水下暗通道在距摄像机较远的地方具有较高的强度,因此水下暗通道可以定性地反映场景点和摄像机之间的水下距离,在后面将用它来估计蓝绿通道传输系数  $t_{BG}(x)$ 。

### 3.2.2 使用统计平均值法估计水体光强

文献[5]在求取大气光强时,首先选取由 R、G、B 三个通道获得的暗原色中亮度最大的 0.1% 的像素,对应这些像素点在原始图像  $I(x, \lambda)$  中的位置,原始图像  $I(x, \lambda)$  在这些位置上强度最大的像素点被原定为大气光。本文求取水体光强的方法与文献[5]相似,具体步骤如下:1) 选取由 G、B 通道获得的暗原色中亮度最大的 0.1% 的像素,记录像素位置信息;2) 获得这些像素对应原始图像位置的 R、G、B 三个通道的像素值;3) 分别求取这些像素在三个通道的平均值  $b(\lambda)$ ,  $\lambda \in (R, G, B)$ , 定义  $b(\lambda)$  为水体光强。

相较于取单一值为水体光强,取平均值作为水体光强的稳健性更高。

### 3.2.3 使用水下暗通道法估计蓝绿通道传输系数

$$t_{BG}(x)$$

由于蓝光和绿光在水中的衰减原理大致相同,因此假设蓝光和绿光通道的传输是相同的。进一步假设传播和散射率在一个区域  $\Omega(y)$  里是恒定的,用  $t_{BG}(x)$  表示这个区域的传输率。根据(14)式,得到

$$t_{BG}(x) = 1 - \min_{\lambda \in (G, B)} \left[ \min_{x \in \Omega(y)} I^r(x) / b(\lambda) \right]. \quad (17)$$

接下来估计输入图像的红色通道的传输系数,水下的景物点离摄像机的距离越远,红色光被吸收的能量就越多,红色通道的能量衰减也就越多。通过电磁理论来估计红色通道水下透射系数  $t_a(x)$ 。

### 3.3 使用电磁理论估计红色通道传输系数

在(6)式中,已知  $t_R(x) = t_\beta(x)t_a(x)$ 。前面已经估计出蓝绿通道的传输系数  $t_{BG}(x)$ 。接下来只须计算出  $t_a(x)$ ,即可得到  $t_R(x)$ 。在(4)式中已知  $t_a(x)$  可表示为

$$t_a = \exp[-\alpha^R d(x)], \quad (18)$$

式中  $d(x)$  为目标距摄像机的距离,  $\alpha^R$  为水吸收导致红色通道光衰减的衰减系数。接下来用电磁理论求取这两个量。

首先,电磁波在空气中传播的波阻抗  $Z_a$  可表示为

$$Z_a = \sqrt{\frac{\mu_0}{\epsilon_0}} \approx 377, \quad (19)$$

式中  $Z_a$  是恒定不变的。水是良好的电介质<sup>[10]</sup>,在良好的电介质中,衰减系数  $\alpha$  可以定义为

$$\alpha = \frac{\delta}{2} \sqrt{\frac{\mu_0}{\epsilon_r \epsilon_0}} = \frac{\delta}{2} z_a \sqrt{\frac{1}{\epsilon_r}} = \frac{\delta}{2n} Z_a. \quad (20)$$

对于红色通道,

$$\alpha^R = \frac{\delta}{2n^R} Z_a, \quad (21)$$

式中  $n^R$  表示红色通道的光波在水下传播时的折射率。

(17)式已经求出了蓝绿通道的传输系数  $t_{BG}(x)$ ,接下来只须求解距离  $d(x)$ 。光线在水下传输时,随着距离增加,能量损耗也将增加<sup>[11]</sup>。

$$d(x) = \frac{\ln t_{BG}(x)}{\ln N_{\text{rer}}(B)}, \quad (22)$$

式中  $N_{\text{rer}}(\lambda)$  表示归一化剩余能量比<sup>[12]</sup>,对应于传播每单位距离的剩余能量与初始能量的比值,归一化剩余能量比  $N_{\text{rer}}(\lambda)$  取决于发射光的波长,这里取蓝色通道的归一化剩余能量比  $N_{\text{rer}}(B) = 0.95$ 。

由(18)式、(21)式和(22)式可以得到  $t_a$ , 并由此得到红色通道传输系数  $t_R(x)$ 。

由(5)式和(6)式可知,蓝绿通道和红色通道复原公式分别为

$$J_{BG}(x, \lambda) = \frac{I(x, \lambda) - b(\lambda)}{t_{BG}(x)} + b(\lambda), \lambda \in (G, B), \quad (23)$$

$$J_R(x, \lambda) = \frac{I(x, \lambda) - b(\lambda)t_{BG}(x)}{t_{BG}(x) \exp\{-\alpha^R [\ln t_{BG}(x) / 0.95]\}},$$



$$\lambda \in \mathbb{R}. \quad (24)$$

## 4 实验结果

为了验证本文方法的有效性,选取不同环境下的多幅图像进行实验,并与原图像,以及文献[5]、文献[9]方法处理后的图像进行对比。从图4可以看出,在不同的水下环境中,文献[5]的方法直接将暗原色先验理论应用于水下图像处理,忽略了光因水

的吸收产生的衰减,无法正确估计出水下环境的背景光和透射率,从而导致处理效果不明显。文献[9]的方法虽然考虑到了光因水的吸收而产生的衰减,但没有正确估计出各个通道的透射系数,导致处理后的图像虽然去模糊效果很好,但颜色会出现失真。本文方法可以正确估计出各个通道的传输系数,从而很好地去除水下图像的模糊,并对色彩进行补偿,使复原的图像细节明显、清晰,色彩自然。

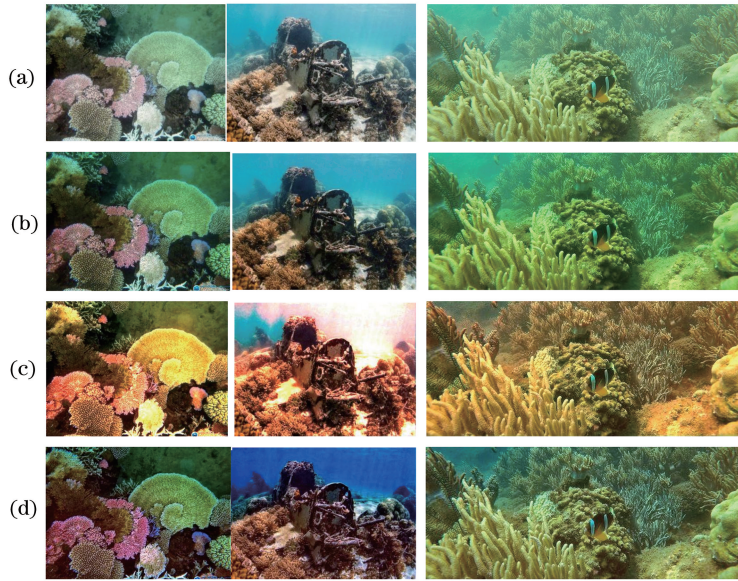


图4 (a)原图像;(b)文献[5]方法所得图像;(c)文献[9]方法所得图像;(d)本文方法所得图像

Fig. 4 (a) Original images; (b) results of method in Ref. [5]; (c) results of method in Ref. [9]; (d) results of proposed method

采用图像清晰度、对比度指标对实验结果图进行客观评价。采用平均梯度来表征清晰度,表达式为

$$G(x, y) = dx_i + dy_j, \quad (25)$$

式中  $dx_i = I(i+1, j) - I(i, j)$ ,  $dy_j = I(i, j+1) - I(i, j)$ 。

对比度的表达式为

$$C = \sum \delta^2(i, j) P_\delta(i, j), \quad (26)$$

式中  $\delta(i, j) = |i - j|$ , 即相邻像素间灰度差,  $P_\delta(i, j)$  为相邻像素间的灰度差为  $\delta$  的像素分布概率。

结果如表1和表2所示。

表1 图像清晰度对比

Table 1 Clarity comparison of test images

Image in Fig. 4	Original image	Method in Ref. [5]	Method in Ref. [9]	Proposed method
Left	31.8268	33.5675	44.5478	51.6942
Middle	26.7597	29.6762	33.3676	38.0594
Right	46.2482	50.8548	67.6124	66.4766

表2 图像对比度对比

Table 2 Contrast comparison of test images

Image in Fig. 4	Original image	Method in Ref. [5]	Method in Ref. [9]	Proposed method
Left	228.1880	231.8839	446.0619	574.4759
Middle	184.7905	217.9501	328.1336	349.6242
Right	412.5629	446.9008	794.1331	866.1486

由表 1 和表 2 可以看出,与原图像相比,文献[5]处理的结果在清晰度和对比度上的提升很小。文献[9]和本文方法在图像的清晰度和对比度上有很大提升,但文献[9]的方法有时会出现严重的颜色失真,而本文方法不仅提高了图像的对比度和清晰度,且能够补偿颜色失真,在主观评价和客观评价上都能获得满意的效果。

## 5 结 论

水下成像环境比空气环境复杂多变,致使采集的水下图像存在对比度低、图像模糊和颜色失真等问题。水对不同波长光的吸收程度不同,导致各颜色通道的透射率也不相同,所以 DCP 理论不能直接用于水下图像处理。本文依据光在水下的传播特性建立水下光学成像模型,考虑到红色波段的光被水吸收最严重,用电磁波传输理论来估计红色通道的传输系数。本文方法可以有效地估计出背景光及各通道的传输系数,对图像颜色进行补偿。实验结果表明,与传统的水下图像复原算法相比,本文算法可以有效地提高图像对比度、清晰度,改善颜色失真。

## 参 考 文 献

- [1] Mullen L J, Vieira A J C, Herezfeld P R, *et al.* Application of RADAR technology to aerial LIDAR systems for enhancement of shallow underwater target detection [J]. *IEEE Transactions on Microwave Theory & Techniques*, 1995, 43(9): 2370-2377.
- [2] Zhu Y. The development of underwater imaging system of foreign[J]. *Ship Electronic Engineering*, 1999(3): 60-64.  
朱耘. 国外水下成像系统的发展[J]. *舰船电子工程*, 1999(3): 60-64.
- [3] Kocak D M, Dalgleish F R, Caimi F M, *et al.* A focus on recent developments and trends in underwater imaging[J]. *Marine Technology Society Journal*, 2008, 42(1): 52-67.
- [4] 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.

- [5] He K, Sun J, Tang X. Single image haze removal using dark channel prior[J]. *IEEE Transactions on Pattern Analysis & Machine Intelligence*, 2011, 33(12): 2341-2353.
- [6] Li X, Yang Z, Shang M, *et al.* Underwater image enhancement via dark channel prior and luminance adjustment[C]. *OCEANS*, 2016: 1-5.
- [7] Ni J Y, Li Q W, Zhou Y Q, *et al.* Underwater image restoration based on transmittance optimization and color temperature adjustment [J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2017, 54(1): 011001.  
倪锦艳, 李庆武, 周亚琴, 等. 基于透射率优化和色温调节的水下图像复原[J]. *激光与光电子学进展*, 2017, 54(1): 011001.
- [8] Zhao X, Jin T, Qu S. Deriving inherent optical properties from background color and underwater image enhancement [J]. *Ocean Engineering*, 2015, 94: 163-172.
- [9] Wen H, Tian Y, Huang T, *et al.* Single underwater image enhancement with a new optical model [C]. *IEEE International Symposium on Circuits and Systems*, 2013: 753-756.
- [10] Balanis C A. *Advanced engineering electromagnetics [M]*. Hoboken: John Wiley & Sons, 1999.
- [11] Hu S Q, Zhou T H, Chen W B. Performance analysis and simulation of maximum ratio combining in underwater laser communication [J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2016, 43(12): 1206003.  
胡思奇, 周田华, 陈卫标. 水下激光通信最大比合并分集接收性能分析及仿真[J]. *中国激光*, 2016, 43(12): 1206003.
- [12] 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.