

文章编号 1004-924X(2018)07-1621-12

## 全局参数估计的水下目标偏振复原方法

范之国\*, 宋 强, 代晴晴, 闫 羽

(合肥工业大学 计算机与信息学院, 安徽 合肥 230061)

**摘要:** 水体介质对光的吸收和散射是导致水下成像退化的两大主要影响因素。针对水下目标成像, 本文提出了一种全局参数估计的水下目标偏振复原方法, 利用构建的精简水下目标偏振重构模型, 通过自动估计全局最优偏振信息重构参数, 复原出水下目标图像, 降低水体对图像质量的影响。在估计重构参数的过程中, 首先, 采用偏振中值滤波方法和基于亮原色原理的方法, 分别估算水下背景光偏振度信息和无穷远处水下背景光强值; 再利用基于最小互信息原则对估计的背景光偏振度信息进行优化; 然后采用水下目标偏振图像增强算法将得到的水下目标重构图进行细节增强处理, 最终获得复原后的水下目标辐射信息图。实验结果表明, 在性能评价指标方面, 相较于水下原图和其他水下复原方法处理图, 利用本文方法处理后所得的图像增强测量值 EME 平均提高了 120%, 图像质量得到了明显的改善。该方法解决了人工取景估计参数不佳的问题, 提高了复原目标图像的对比度, 可以用于浑浊水下的目标探测与识别。

**关键词:** 偏振成像; 水下目标成像; 偏振增强; 最小互信息; 图像复原

**中图分类号:** TP391 **文献标识码:** A **doi:** 10. 3788/OPE. 20182607. 1621

## Underwater target polarization recovery method based on global parameter estimation

FAN Zhi-guo\*, SONG Qiang, DAI Qing-qing, YAN Yu

(School of Computer and Information, Hefei University of Technology, Hefei 230061, China)

\* Corresponding author, E-mail: fzhghfut@163.com

**Abstract:** The absorption and scattering of underwater light by water are the two main factors influencing image degradation. With a focus on underwater target imaging, this paper proposes an underwater target polarization recovery method by global parameter estimation, using a simplified underwater target polarization reconstruction model, which recovers an underwater target image by automatically estimating global optimal polarization information reconstruction parameters to reduce the impact of the medium on image quality. First, a polarization median filter method and the bright primary principle method were used to estimate the underwater background light polarization degree information and the infinite underwater background light intensity values, respectively. Based on the principle of minimum mutual information, the background light polarization degree information was optimized and estimated. Then, adopting the underwater target polarization image enhancement algorithms to enhance the details of the underwater reconstruction target, a clear figure of the underwater target's radiation information was produced. The experimental results show that the value

收稿日期: 2017-12-19; 修订日期: 2018-02-10.

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(No. 61571177, No. 61571175); 装备预研教育部联合基金资助项目(No. 6141A02022609)

of the measure of enhancement (EME) in the suggested method increased by 120% on average, compared with the original strength of the figure and that of other underwater recovery methods for the calculation of the performance evaluation index. Further, the image quality was significantly improved. The method has solved the inaccuracy problem while estimating parameters via artificial view and improved the contrast of the restored target image. The method can be used to detect and identify turbid underwater targets.

**Key words:** polarization imaging; underwater target imaging; polarization enhancement; minimum mutual information; image recovery

## 1 引 言

水下光学成像技术在海洋资源勘探、军事侦查以及水下救生等领域具有非常重要的应用。光学成像系统获得的图像质量容易受水体散射效应的影响,导致成像质量下降。一方面,水体对光的散射使得包含目标物信息的光线不能进行清晰成像,导致水下目标景物模糊;另一方面,背景散射光与成像光线叠加在一起形成噪声,降低了图像对比度<sup>[1]</sup>。水体对光的散射作用是一个比较复杂的过程,如何消除散射效应对水下成像的影响是一项富有挑战性的工作。国内外许多研究机构对水下散射现象进行了一系列的理论与实验研究,例如,如何使水中的散射光线聚焦以提高成像质量<sup>[2-3]</sup>;如何将来自水体的散射光线与成像光线进行区分,提高图像对比度,如距离选通技术<sup>[4]</sup>、分级多尺度融合技术<sup>[5]</sup>以及鬼成像<sup>[6]</sup>等。在水下成像领域,偏振技术是一种十分有效的成像探测手段。根据光在水下传播的散射理论,水中粒子对光的散射作用会改变光的偏振状态,而且目标反射光的退偏度大于水中粒子散射光的退偏度。当接收器前偏振片的偏振方向与光源的偏振方向相同时,对比度最小,图像最模糊;当偏振片的偏振方向与光源偏振方向垂直时,对比度最大,图像最清晰。因此,根据目标和背景散射光偏振特性的差异,利用偏振技术可在一定程度上减少散射光能量,提高成像对比度。

Schechner 等人<sup>[7-8]</sup>采用主动光照明并利用水下偏振差分方法复原出水下图像,通过旋转偏振片方式获取同一水下场景下垂直和平行入射面的两幅正交偏振图像,然后粗估计水下背景光的偏振度和无穷远处水下背景光强值等参数来重构出图像,该方法具有简单高效、容易实现等特点。但是其复原结果的好坏与最佳偏振化方向和最差

偏振化方向关系较大,同时对模型中相关偏振参数的估计只是以水下背景某一点值替代,未考虑照片中不同位置、远近的散射光不均匀的特点,方法存有一定的缺陷。Huang 等人<sup>[9]</sup>采用蓝绿激光主动照明技术,在水下目标重构模型的构建过程中同时考虑了目标物和水下背景的偏振信息,引入数学模型并利用逐步搜索法求解目标物的偏振差分信息和其他最优参数,步骤推理严密、算法逻辑性较强。但是其重构模型较为复杂,同样是人工取背景某一区域粗估计偏振重构参数,图像恢复的质量与所选取位置、区域大小、有无背景和重构模型的其他参数估计有关,影响因素较多,而且数学模型的构建使得算法处理难度和时间复杂度加大,在实际工程应用中存在较多不便。

Tali Treibitz 等人<sup>[10]</sup>在水下偏振重构模型中对水下成像的各类影响因素考虑的较为全面,利用拍摄的两幅最佳正交偏振图像、采取手动取景方式分别求水下目标物的偏振度信息、水下背景光的偏振度信息、水下无穷远处光强值等参数,目标复原效果相对较好。但该方法中重构模型较为繁琐,而且人工多次求参数的方式在实际应用中无法满足全自动化求取参数复原水下图像的工程要求。为了减少人工取水下背景区域估计偏振信息参数带来的误差,上述 3 种水下复原方法都采用带入变量与偏振度相乘积的方式进行参数校正,以获得最佳偏振度信息,但该方式不仅加大了复原算法的复杂度,而且并未真正解决人工选取某一背景区域估计偏振信息参数所存在的缺陷。此外,这三类复原方法还存在求取参数图像须有水下背景区域等限制因素。

针对现有水下复原方法中存在依赖无目标背景区域求取参数、人工估计参数不佳,以及复原方法无法满足实际应用需求等问题,本文采用主动偏振光源进行水下目标成像,为降低重构模型的复杂度,通过理论推导建立精简水下重构模型,主

动估计出全局最优水下背景光偏振度信息和无穷远处水下背景光强信息,自动地从浑浊介质中复原出水下目标,无需人工选择无目标背景区域。该方法考虑了图像中不同位置水下散射光强的不一致,通过对水下图像的每一点像素分别进行重构参数运算,降低了用水下背景中某一区域的水下背景光强和水下背景光的偏振度替代整幅图像的水下背景光强和水下背景光的偏振度信息所带来的误差,而且精简的重构模型和主动全局最优重构参数的估计提高了图像复原结果的稳定性。

## 2 水下目标偏振重构模型的建立

在水下环境中,成像系统获得的图像主要由两部分组成,一是经由水体粒子吸收和散射作用而衰减后的目标反射光,二是由于水体粒子散射形成的背景光,其数学表达式为:

$$I_{\text{total}}(x, y) = D(x, y) + B(x, y), \quad (1)$$

式中:  $I_{\text{total}}(x, y)$  表示成像系统获得的原始图像,即为水下模糊图像;  $D(x, y)$  为景物表面反射的光经过水体衰减和经过前向散射作用后到达成像系统的光强;  $B(x, y)$  为由水下粒子后向散射产生的水下背景光强。图 1 是水下主动偏振成像示意图。

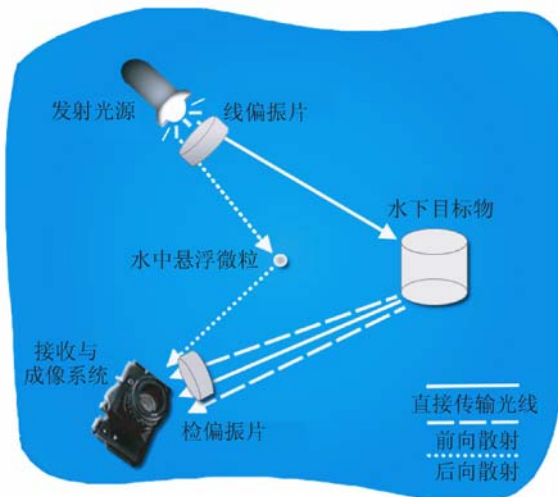


图 1 水下主动偏振成像示意图

Fig. 1 Underwater active polarization imaging

$D(x, y)$  的表达式为:

$$D(x, y) = L_{\text{object}}^{\text{effective}}(x, y) e^{-\beta(x, y)\rho(x, y)}, \quad (2)$$

其中:  $L_{\text{object}}^{\text{effective}}(x, y)$  为水下目标的有效辐射信息,

它既包含水下目标的直接辐射信息,又包含水下目标辐射信息在传输过程中与水中粒子相互作用而产生的前向散射光。由于前向散射作用机理较为复杂,且对图像的影响较吸收和后向散射的影响小得多<sup>[7-8]</sup>,因而在本文中未考虑前向散射对成像的影响。 $t(x, y) = e^{-\beta(x, y)\rho(x, y)}$  为光在水下的传输率,  $\rho(x, y)$  是光源和成像系统间的相对距离;假设水体介质是各向同性且均匀分布的,  $\beta(x, y)$  为水体对传输光吸收和散射效应的总衰减系数。为了简化,本文认为在水下空间环境中,  $\beta(x, y)$  是不变的,即  $\beta(x, y) = \beta$ ,  $\beta$  为常量。

由于水下目标物周边环境光与水中的粒子发生了多次散射,其后向散射光形成了背景光。后向散射产生的光是在一个分布很广的角度下进入相机的。考虑将水下场景与水下成像接收系统之间的水体分成  $N$  个小水体  $\Delta V$ , 对每一个小水体用后向散射体积元函数在散射角度集内积分,得到全局背景光强。因而将背景光定义如下<sup>[7]</sup>:

$$B(x, y) = \int_{\Theta} B(\Theta)_{\text{approx}} d\Theta = B_{\infty} (1 - t(x, y)), \quad (3)$$

其中:  $B(\Theta)_{\text{approx}}$  为后向散射体积元函数,  $\Theta$  表示对一确定的水体体积元所有可能发生的散射角度集,  $B_{\infty} = \int_{\Theta} B_{\infty}(\Theta) d\Theta$  表示为水下无穷远处的背景光强,  $B(x, y)$  表示全局背景光。

利用式(1),可以求出成像系统获得的图像光强表达式为:

$$I_{\text{total}}(x, y) = L_{\text{object}}^{\text{effective}}(x, y) t(x, y) + B_{\infty} (1 - t(x, y)). \quad (4)$$

在此,变换式(3)可得水下传输率  $t(x, y)$  的表达式为:

$$t(x, y) = 1 - \frac{B(x, y)}{B_{\infty}}. \quad (5)$$

当水下传输光与水中的溶胶粒子发生散射或在物体表面发生反射时,会改变其偏振特性。假设在同一时刻任意散射粒子的散射源来自同一个方向,定义光源、散射粒子、成像系统这三点确定的平面为一个入射平面,总光强  $I$  可以分为平行于入射平面的部分  $I_{\text{max}}$  和垂直于入射平面部分  $I_{\text{min}}$ 。同样,水下目标物的辐射光强  $D$  可以分为平行于入射平面部分  $D_{\text{max}}$  和垂直于入射平面部分  $D_{\text{min}}$ ,水下背景光强  $B$  可以分为平行于入射平面的部分  $B_{\text{max}}$  和垂直于入射平面部分  $B_{\text{min}}$ 。

在水下偏振成像技术中,相对于退偏振强的

目标,退偏振弱的目标图像亮度变化明显。依据这一理论,根据目标与水中粒子对水下传输光作用的差异性,由于目标光退偏振较强,水下背景光退偏振较弱,所以调整成像系统前检偏振片的偏振方向,水下背景光强度变化明显,水下背景光对整幅场景图像光强的影响较大。因此,当光线进入成像系统时,利用检偏振片可以分别获取场景的最大、最小光强  $I_{\max}$  和  $I_{\min}$ , 同时也能获取水下背景的最大、最小光强  $B_{\max}$  和  $B_{\min}$ 。

依据上述理论分析,由于水下目标物辐射光具有退偏振较强、光强变化不明显的特点,可以由式(1)得出场景的最大光强为:

$$I_{\max}(x, y) = D_{\max}(x, y) + B_{\max}(x, y). \quad (6)$$

同理,由式(1)可得出场景的最小光强为:

$$I_{\min}(x, y) = D_{\min}(x, y) + B_{\min}(x, y). \quad (7)$$

所以求得总光强如下:

$$I(x, y) = I_{\max}(x, y) + I_{\min}(x, y). \quad (8)$$

同理,可以得到  $B(x, y) = B_{\max}(x, y) + B_{\min}(x, y)$ ,  $D(x, y) = D_{\max}(x, y) + D_{\min}(x, y)$ 。

由偏振度定义可知,水下场景的偏振度  $P_1(x, y)$  定义如下:

$$P_1(x, y) = \frac{I_{\max}(x, y) - I_{\min}(x, y)}{I(x, y)}. \quad (9)$$

水下背景光的偏振度  $P_B(x, y)$  表示为:

$$P_B(x, y) = \frac{B_{\max}(x, y) - B_{\min}(x, y)}{B(x, y)}. \quad (10)$$

水下目标物的辐射反射光  $P_D(x, y)$  表示为:

$$P_D(x, y) = \frac{D_{\max}(x, y) - D_{\min}(x, y)}{D(x, y)}. \quad (11)$$

联立式(6)~式(11)可得光强合成和光强差分的关系式:

$$I_{\max}(x, y) + I_{\min}(x, y) = B(x, y) + D(x, y), \quad (12)$$

$$I_{\max}(x, y) - I_{\min}(x, y) =$$

$$P_B(x, y)B(x, y) + P_D(x, y)D(x, y). \quad (13)$$

再联立式(9)~式(13)求得水下目标的辐射信息  $D(x, y)$  和 underwater 背景散射光的辐射信息  $B(x, y)$ , 分别为:

$$D(x, y) = \frac{1}{P_B(x, y) - P_D(x, y)} \cdot [I_{\min}(x, y)(1 + P_B(x, y)) - I_{\max}(x, y)(1 - P_B(x, y))], \quad (14)$$

$$B(x, y) = \frac{1}{P_B(x, y) - P_D(x, y)} \cdot [I_{\max}(x, y)(1 - P_D(x, y)) - I_{\min}(x, y)(1 + P_D(x, y))]. \quad (15)$$

这里假设背景反射回来的辐射光强是偏振的,水下目标物反射回来的辐射光强是非偏振的,因而令  $P_D(x, y) = 0$ , 由式(14)和式(15)可以得到:

$$D(x, y) = \frac{1}{P_B(x, y)} [I_{\min}(x, y)(1 + P_B(x, y)) - I_{\max}(x, y)(1 - P_B(x, y))], \quad (16)$$

$$B(x, y) = \frac{1}{P_B(x, y)} [I_{\max}(x, y) - I_{\min}(x, y)]. \quad (17)$$

联立式(5)和式(16),能够得出最后复原图像  $L_{\text{object}}^{\text{effective}}(x, y)$  为:

$$L_{\text{object}}^{\text{effective}}(x, y) = \left\{ \frac{1}{P_B(x, y)} \left[ I_{\min}(x, y)(1 + P_B(x, y)) - I_{\max}(x, y)(1 - P_B(x, y)) \right] \right\} / \left[ 1 - \frac{B(x, y)}{B_{\infty}} \right]. \quad (18)$$

可以看出,此时  $L_{\text{object}}^{\text{effective}}(x, y)$  表达式较为复杂,需要求解  $I_{\max}$ ,  $I_{\min}$ ,  $P_B(x, y)$ ,  $B(x, y)$  和  $B_{\infty}$  五个参量。在现有的人工求取参数的方式中,某一参量的计算稍有偏差,最终得到的复原图像会与期望的结果有所偏差。因此,简化  $L_{\text{object}}^{\text{effective}}(x, y)$  的表达式,并估计出最优参量信息,不仅可以降低表达式的复杂度,提高复原结果的稳定性,而且可以得出更为理想的复原图像。

在此,从水下全局背景光强定义式(17)出发,并联立水下场景偏振度信息  $P_1(x, y)$  的定义式(9),可以得出:

$$B(x, y)P_B(x, y) = I(x, y)P_1(x, y). \quad (19)$$

变换式(19)并联立式(1)可得:

$$P_B(x, y) = \frac{I(x, y)P_1(x, y)}{B(x, y)} = \frac{B(x, y) + D(x, y)}{B(x, y)} P_1(x, y). \quad (20)$$

将式(20)变换为:

$$D(x, y) = \frac{P_B(x, y)}{P_1(x, y)} B(x, y) - B(x, y). \quad (21)$$

最后联立式(2)、式(5)和式(21),得到浑浊水下的目标辐射信息:

$$L_{\text{object}}^{\text{effective}}(x, y) = \frac{D(x, y)}{I(x, y)} = \left\{ \frac{P_B(x, y)}{P_1(x, y)} B(x, y) - B(x, y) \right\} / \left[ 1 - \frac{B(x, y)}{B_{\infty}} \right]. \quad (22)$$

经算法推导,简化了最终复原图像  $I_{\text{object}}^{\text{effective}}(x, y)$  的表达式,需要求解的参量只有4个,分别为水下背景光偏振度信息  $P_B(x, y)$ 、水下场景偏振度信息  $P_I(x, y)$ 、水下背景光信息  $B(x, y)$  和无穷远处水下背景光强值  $B_\infty$ ,降低了重构算法的计算复杂度和求解繁琐性。针对人工选取背景区域估计重构参数带来复原效果不佳的问题,采用主动估计全局最优重构参数方式可以避免上述问题。

### 3 参数估计以及偏振图像增强算法

#### 3.1 利用偏振中值滤波方法求解水下偏振信息

现有的滤波方法,例如暗通道先验模型、导向滤波等<sup>[11]</sup>,对背景光  $B(x, y)$  的估算,大部分都是针对非偏振图像进行滤波处理,得到背景光强图像。但是此类方法未考虑不同目标对偏振度的影响,而是近似认为偏振度是全局不变量,导致水下目标复原效果明显下降。本文利用偏振中值滤波法,针对偏振图像进行滤波处理,对图像每个像素进行滤波估计,估算出水下背景光强信息  $B(x, y)$ ,并以此求出全局水下背景光的偏振度信息  $P_B(x, y)$ ,这种滤波方法可以很好地避免因未考虑不同目标对偏振度的影响而导致图像复原效果不佳的问题。

通过对相机获取的不同偏振片角度(本文采用的偏振角度分别为  $0^\circ, 60^\circ, 120^\circ$ )下的偏振图像  $I_0, I_{60}, I_{120}$  进行如式(23)相关的 Stokes 矢量计算<sup>[12]</sup>,分别得到  $I, Q, U$  三个参量,即  $S=[I, Q, U]^T$ 。

$$\begin{cases} I = \frac{2}{3}(I_0 + I_{60} + I_{120}) \\ Q = \frac{2}{3}(2I_0 - I_{60} - I_{120}) \\ U = \frac{2\sqrt{3}}{3}(I_{60} - I_{120}) \end{cases} \quad (23)$$

得到 Stokes 矢量之后,利用式(24)得出总光强图  $I$  的偏振度  $P_1$ 。

$$P_1 = \frac{\sqrt{Q^2 + U^2}}{I} \quad (24)$$

为获取水下背景图像  $B(x, y)$ ,将3幅偏振图像  $I_0, I_{60}, I_{120}$  分别进行偏振中值滤波处理,滤波算法如下:

$$B(x, y) = \min[p(\text{median}(I(x, y)) - \text{median}(|I(x, y) - I_m(x, y)|)), I(x, y)], \quad (25)$$

其中:  $I(x, y)$  是相机接收的光强图,  $\text{median}(\cdot)$  表示中值滤波,  $I_m$  表示目标偏振图像  $I$  经式(26)滤波后的图像,  $p$  是比例参数。根据文献[13],当  $p$  值取 0.95 时,偏振中值滤波算法结果最好。

$$I_m(x, y) = \text{median}_{s_v}(I(x, y)). \quad (26)$$

在式(26)中  $s_v$  指中值滤波的邻域的尺寸,其中,  $s_v = 2 * \text{floor}(\max(\text{size}(I))/25) + 1$ 。将3幅原偏振图经偏振中值滤波处理后,获得三幅不同偏振角度下的水下背景光强图  $B_0, B_{60}, B_{120}$ 。再将3幅水下背景光强图带入式(23)中,求出水下背景光的 Stokes 矢量  $S_B = [I_B, Q_B, U_B]^T$ ,得出水下背景光强  $B(x, y) = I_B$ ,最后利用式(24)求解出全局水下背景光的偏振度信息  $P_B(x, y)$ 。

#### 3.2 利用互信息方法优化水下背景光偏振度信息

水下环境跟大气环境相比,由于水中含有溶解物、有机悬浮颗粒物和无机悬浮颗粒物等多种光学成分,其成像情况更为复杂,仅仅利用偏振中值滤波法对原始偏振图像进行平滑滤波处理,求取的水下背景光强图像  $B_0, B_{60}, B_{120}$  中会存在目标边缘细节模糊等问题;而且若水下背景光偏振度信息  $P_B(x, y)$  估计不当,把水下目标周围背景光当做噪声进行滤除会丢失水下目标部分细节信息,最后复原结果可能不尽如意。根据式(24)求解出的水下背景光偏振度信息  $P_B(x, y)$  是原始水下背景光偏振度估计值,需要对水下背景光偏振度信息做进一步的优化估计。将式(1)变换得到  $D(x, y)$ ,如式(27)所示:

$$D(x, y) = I_{\text{total}}(x, y) - B(x, y). \quad (27)$$

联立式(21)和式(27)可以看出:  $D(x, y)$  的估计精度与  $P_B(x, y)$  的估计结果密切相关。由于目标辐射  $D(x, y)$  和 underwater 背景光辐射  $B(x, y)$  反应不同的信息,因此,精确且合适的  $P_B$  应当使得两者之间的相关性越小越好。为了描述两者之间的相关程度,本文采用互信息 MI 来度量两者之间的关系<sup>[10]</sup>:

$$MI(B, D) = - \sum_i P_i(B) \log_2 P_i(B) - \sum_j P_j(D) \log_2 P_j(D) + \sum_i \sum_j P_{i,j}(B, D) \log_2 P_{i,j}(B, D). \quad (28)$$

式中:  $P_i$  是灰度级  $i$  的分布概率,  $P_{i,j}(B, D)$  为两幅图像灰度的联合概率分布。互信息越大, 说明  $B(x, y)$  和  $D(x, y)$  之间相关性越强, 从而可以借助互信息对  $P_B$  进行优化。参数  $P_B^{\text{optimal}}(x, y)$  的优化过程如式(29)所示:

$$P_B^{\text{optimal}}(x, y) = \arg \min_{t \in Z^+} MI(B, D). \quad (29)$$

由此可知, 当获得最小 MI 值时其所对应的  $P_B(x, y)$  为所求最优水下背景光的偏振度信息值  $P_B^{\text{optimal}}(x, y)$ 。

### 3.3 无穷远处水下背景光的估算

如果采用人为选取图像中水下背景区域某一点的强度值, 作为整幅图像无穷远处的水下背景光强值, 这样选取存在着一定的偶然性<sup>[7-9]</sup>, 本文采用基于亮原色原理的方法估算无穷远处水下背景的光强值<sup>[14]</sup>, 可以避免人机交互的繁琐性和偶然性, 亮原色的表达式为:

$$L_{\text{bright}} = \max_{c \in \{r, g, b\}} (\max_{z \in \Omega(x, y)} (L^c(z))). \quad (30)$$

式中:  $L^c$  表示输入图像  $L$  的一个颜色通道,  $\Omega(x, y)$  表示以点  $(x, y)$  为中心的图像块。根据亮通道的定义式可以看出, 本文的亮通道图像是输入图像  $I$  (由偏振图像  $I_0, I_{60}, I_{120}$  合成得到的原强度图像) 经过两个最大值算子得到的。根据式(4)变换可得:

$$I = L(x, y)t(x, y) + B_{\infty}(1 - t(x, y)) = B_{\infty}\rho t(x, y) + B_{\infty}(1 - t(x, y)). \quad (31)$$

其中  $\rho$  是物体表面反射率。文献[14]指出, 在亮通道中  $\rho=1$ , 此时式(30)可表述为:

$$L_{\text{bright}} = B_{\infty}. \quad (32)$$

因此, 可以使用亮通道方法来估算无穷远处水下背景的光强值, 而且与现有其他技术相比, 使用亮通道估算无穷远处水下背景的光强值, 可以自动选取无穷远处的光强值, 使得每一个像素点都有与之相对应的无穷远处水下背景的光强值, 从而避免了人为选取的偶然性, 使得对无穷远处的水下背景光强值  $B_{\infty}$  的估算更加合理。

### 3.4 水下偏振图像增强算法

在浑浊水体环境下光线散射严重, 有时水下目标物本身材质较黑或者水下光线弱、散射严重而使目标成像较暗, 这对于水下图像的清晰度恢复效果有较大的影响。因此, 本文采用亮度增强

融合算法提高目标物的亮度和清晰度, 抑制水下背景光, 从而提高图像的成像质量。亮度增强融合算法具体如式(33)和式(34)所示:

$$L'(x, y) = -L(x, y), \quad (33)$$

$$L'_{\text{object}}(x, y) = L'(x, y) \left[ 1 + \frac{D(x, y)}{B(x, y)} \right] P_1(x, y). \quad (34)$$

由于水下目标与水下背景对线偏振光作用的差异性,  $P_1(x, y)$  含有目标的辐射信息, 但模糊不清。由式(27)得到的  $D(x, y)$ , 可以通过  $D(x, y)/B(x, y)$  比值计算, 如式(35)所示。 $D(x, y)$  的目标像素灰度值得到了提高, 而且在此过程中, 水下背景光的灰度值几乎没有改变, 即能直接抑制水下背景散射光对目标成像的影响。

$$P_i \left[ \frac{D(x, y)}{B(x, y)} \right] > P_i(D(x, y)). \quad (35)$$

针对前期处理后的水下目标图像过亮、部分细节不清晰的问题, 本文利用偏振度图像所含有的纹理信息, 通过纹理增强方法复原图像中部分细节变白的部分。因此, 在获得图像  $L'_{\text{object}}(x, y)$  之后, 使用偏振度局部纹理增强法, 按照偏振度图像的纹理分布, 使用式(36)对每个像素点基于其邻域计算增强参数, 然后带入式(37), 最终获得局部对比度增强之后的图像。纹理增强算法解决了亮度较高物体模糊不清的问题, 使图像对比度更好, 目标物细节更为清晰可见。纹理增强算法如下:

$$\bar{P}(x, y) = \text{average}_{z \in \Omega(x, y)} (P(x, y)), \quad (36)$$

$$L_{\text{object}}(x, y) = L'_{\text{object}}(x, y) \left( \frac{\bar{P}(x, y)}{P(x, y)} \right)^n. \quad (37)$$

对于偏振度图像  $P(x, y)$ , 取其每点在邻域  $\Omega(x, y)$  内的均值作为  $\bar{P}(x, y)$  图像对应点的值,  $n$  为增强系数。使用水下目标偏振图像增强算法最终获得的  $L_{\text{object}}(x, y)$  图像, 相比未处理前的重构图像  $L_{\text{object}}^{\text{effective}}(x, y)$ , 其图像纹理细节清晰度更高, 而且提高了图像中具有不同偏振特性目标的对比度。

## 4 实验与结果分析

### 4.1 实验设计

本文使用经过标定的三通道偏振成像系统进

行原始图像的采集<sup>[15-16]</sup>,如图 2 所示。成像系统使用三棱分光的方法获得同一视场不同偏振化方向的偏振图像,成像系统的波段为 380~800 nm,采用 3 路面阵 CCD 同时成像,每一路 CCD 前都装有线偏振器,其方向与参考方向夹角分别为  $0^\circ, 60^\circ, 120^\circ$ 。通过该成像系统可以获得同一时刻同一视场 3 个不同偏振化方向的灰度图像。图片像素为  $1\ 383\ \text{pixel} \times 986\ \text{pixel}$ 。

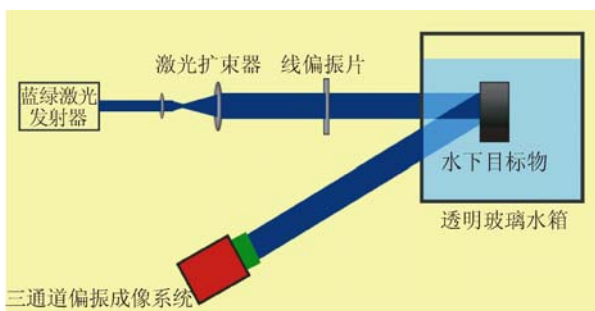


图 2 水下目标偏振成像实验装置模拟图

Fig. 2 Schematic of experimental devices for polarization imaging of underwater target

本文实验过程如下:激光发生器产生波段为 532 nm 的蓝绿激光,激光通过激光扩束器进入线偏振片,出射为水平线偏振光入射到目标物上,然后照射到目标物上的入射光沿着水下路径反射进入接收端,最终进入终端进行图像数据处理。在实验过程中,通过在清水中加入牛奶的方式对实验的散射介质进行相应的控制<sup>[17]</sup>。为了模拟水下悬浮粒子的情况,采用  $50\ \text{cm} \times 40\ \text{cm} \times 30\ \text{cm}$  的玻璃水箱,里面注入了用 40 L 自来水稀释 15 mL 牛奶得到的混合溶液。在实验中,目标区域包含一枚铜质金属奖牌,未做实验前的强度图像,如图 3 所示。

在本文的水下实验中,偏振激光是唯一的成像光源,实验过程无其他杂散光混入。由于水中混有一定浓度的悬浮粒子,造成水质不均匀,使得光在水中传输时的散射和能量衰减相较于空气中严重得多,浑浊水中的衰减系数  $\beta_w$  远大于空气中的衰减系数  $\beta_a$ ,因而偏振激光经空气入射到水中进行水下成像,本文的实验条件设置与第 2 节水下偏振成像理论推导并无矛盾。



图 3 实验目标图

Fig. 3 Experimental target

## 4.2 实验结果与分析

通过 3 通道偏振成像系统进行原始图像采集,获得 3 幅不同偏振角度下的原始偏振图像  $I_0, I_{60}, I_{120}$ ,以及经过式(23)处理得到原始强度图像  $I$ ,如图 4 所示。

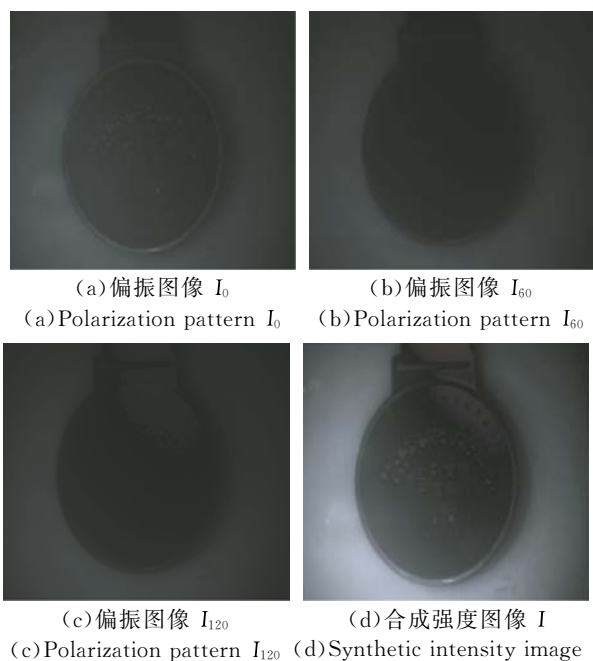


图 4 不同偏振角度图像和强度图像

Fig. 4 Images with different polarization angles and intensity image

为了体现对比效果,按照 Schechner 方法<sup>[7-8]</sup>、Huang 方法<sup>[9]</sup>、Tali 方法<sup>[10]</sup>、本文方法(图像增强前)、本文方法(图像增强后)这一顺序对水下实验图进行复原处理。图 5(a)、图 5(b)是用 Schechner 方法得到的水下复原图,图 5(c)、图 5(d)是使用 Huang 方法复原出来的水下图

像,两种方法都是人工取水下背景不同位置(如图中长方形区域所示)估计  $B_{\infty}$  和  $P_B$  值。对比可知,所选位置不同,估计出的参数会有差异,图像的复原效果也会因参数估计的不同而有所变化。图 5(e)、图 5(f)是 Tali 方法得到的处理结果。根据文献 [10],该水下偏振复原方法求取偏振参数的方法与前面两种方法类似<sup>[7-8,11]</sup>。该方法采用手动机械转动偏振片的方式求取最佳偏振化方向(使图像达到最亮时候的偏振片方向)和最差偏振化方向(使图像达到最暗时候的偏振片方向)的光强图像  $I_{\max}$  和  $I_{\min}$ ,操作主观性较强,求取结果与真实值往往存有误差。通过最大最小光强法拟合<sup>[18]</sup>,求出偏振片取  $20^\circ$  时该场景最佳偏振化方向的光强图像  $I_{\max}$ 。图 5(e)是人工取水下背景某一位置求取的  $B_{\infty}$  和  $P_B$ ,重构出的图像局部像素较黑,视觉效果较差。图 5(f)是 Tali 方法取另一组不同角度的两幅互相垂直的偏振图像(最佳偏振片方向取  $40^\circ$ ),人工估计参数的位置与图 5(e)相同,可以看出,当最佳与最差偏振化方向的图像选择有所偏差时,重构后的水下目标图趋向模糊,图像整体质量偏低。前 3 种水下复原方法都考虑通过人工旋转偏振片方式求取两幅互相正交的偏振图像,然而选取某一无目标背景区域来计算水下背景光的偏振度信息容易带来误差,采取带入

合适的变量  $\epsilon$  值方式对偏振度信息  $P_B(x, y)$  进行校正,可以获得最佳偏振度信息值<sup>[7-10]</sup>。但在实验处理过程中发现,该方式不仅加大了复原算法的时间复杂度,而且由结果显示,以某一背景区域估计偏振信息参数来代替全局偏振信息参数所带来的复原效果不佳的弊端并未真正得到解决。

图 5(g)和 5(h)是本文方法的复原处理结果。本文方法(图像增强前)是在使用水下偏振图像增强算法前获得的复原图像,可以看出,增强前的重构图像与合成强度图 4(d)相比,对比度和清晰度都有较大的提高。本文利用全局偏振参数估计的方式主动求取重构参数,认为背景光偏振度是一个全局变量,并根据偏振度计算公式得到场景图像中每一个像素点的背景光偏振度,而且像素点不同其偏振度值也不相同,该方法较合理地解决了以水下某一背景区域估计偏振信息参数所带来的复原效果不佳的问题。跟前面 3 种复原方法相比,本文方法重构出的图像整体质量更佳,视觉更好,无像素乌黑的区域。本文方法(图像增强后)即图 5(h)是对重构结果图 5(g)使用水下偏振图像增强算法之后的复原图像,增强算法弥补了重构图像中目标物成像较黑导致视觉不佳的缺陷,并凸显出水下目标物表面的纹理信息。根据主观分析判断,图 5(h)人眼视觉为最优。

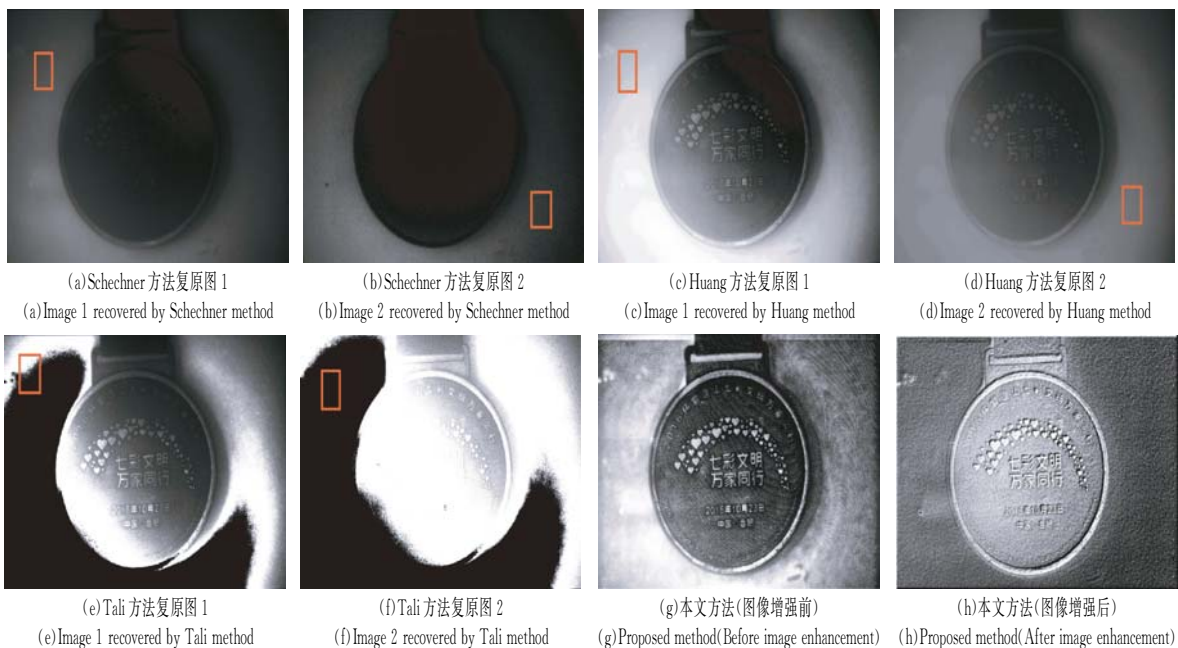


图 5 各种水下复原方法处理结果对比

Fig. 5 Comparison of results among different underwater recovery methods

在相同的实验条件下,本文开展另外几组不同目标物的水下实验,并分别利用 Schechner 方法、Huang 方法、Tali 方法、本文方法(图像增强前)、本文方法(图像增强后)进行处理,结果如图 6 所示。每一行代表一组实验,且前 3 种复原方法人工取景求取参数的位置相同。在图像复原处理

前,由于水中浑浊粒子对光线的散射作用,原水下强度图像较黑,细节模糊,目标物无法辨识。为了验证全局最优参数估计方法的有效性和检测图像中无水下背景区域对复原结果的影响,与第一、二组实验相比,在第三、四组实验中,偏振成像系统拍摄的图像内部水下无目标背景区域相对较少。

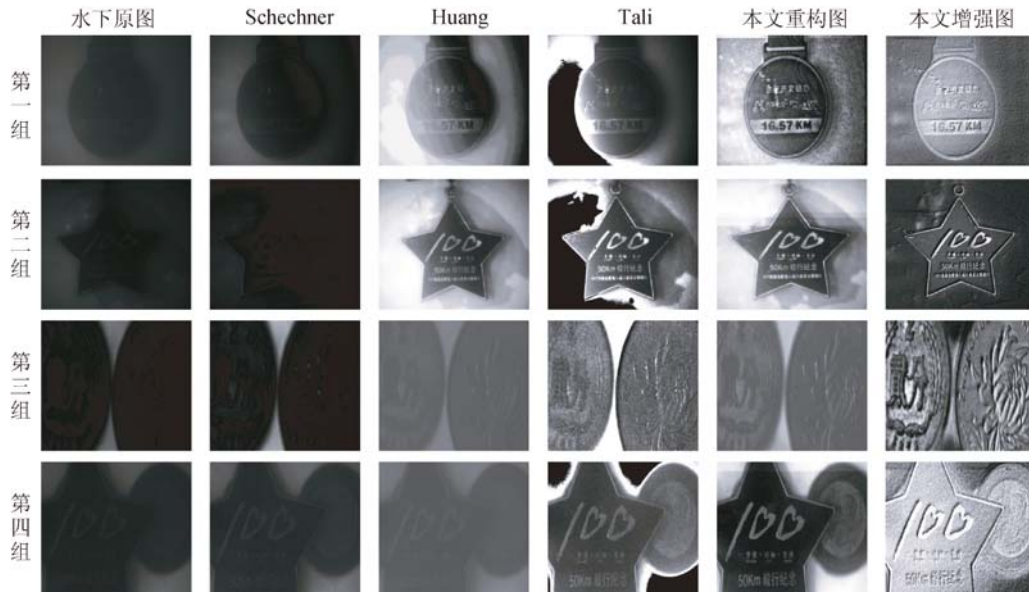


图 6 各种水下复原方法处理图的定性对比

Fig. 6 Qualitative comparison of recovery image among different underwater recovery methods

对比图 5 和图 6 可知,由于光强的非均匀分布和偏振重构参数估计的缺陷,使用 Schechner 方法、Huang 方法和 Tali 方法处理,一般对整幅图像局部区域有较好效果,但是复原图中会存在其他区域重构效果不理想的问题。本文方法自动估计出最优重构参量,图像的复原效果不会因手动取景估计重构参量产生的偏差而受到影响,复原结果的稳定性有着一定的提高。与前面 3 种方法相比,本文方法可靠,无需考虑光强分布、有无背景区域等外界条件,而且偏振参数的全局估计能有效解决非均匀光强分布带来复原图像明暗不均和参数估计依赖水下背景区域人工选择等问题。

目前,水下图像的评测方式一般分为主观评价方法或者客观质量评价方法两大类<sup>[19-20]</sup>,现有的多数文章采用图像的信息熵、平均梯度、灰度标准差等统计方法对水下图像进行量化评价分析。

本文引入图像评价标准 EME<sup>[21]</sup>来评估本文复原方法的性能。图像增强测量值(EME)用来量化评价图像质量,EME 数值越大,代表图像质量越好。EME 定义如下:

$$EME = \left| \frac{1}{k_1 k_2} \sum_{l=1}^{k_2} \sum_{k=1}^{k_1} 20 \log \frac{i_{\max, k, l}^{\omega}(x, y)}{i_{\min, k, l}^{\omega}(x, y) + t} \right|, \quad (38)$$

其中:水下图像按像素分布被平均分为  $k_1 \times k_2$  个小块,  $(k, l)$  表示每个小块所在的位置序列,并且  $i_{\max, k, l}^{\omega}(x, y)$  和  $i_{\min, k, l}^{\omega}(x, y)$  分别代表图像里序列为  $(k, l)$  小块  $\omega$  中的最大像素值和最小像素值。  $t$  是一个极小的常量值,只起到避免公式中分母被 0 整除的作用,对最后的 EME 结果几乎没有影响。表 1 总结了图 6 中各组复原方法的 EME 值,其中黑体表示最好的结果。

表 1 EME 数值定量比较

Tab. 1 Quantitative comparison of EME values

	水下原图	Schechner	Huang	Tali	本文重构图	本文增强图
第一组	4.43	5.68	21.69	8.69	26.22	<b>30.84</b>
第二组	1.86	2.39	11.45	9.94	24.96	<b>30.51</b>
第三组	5.08	6.56	10.57	11.83	12.19	<b>20.76</b>
第四组	2.56	3.14	5.89	6.68	10.37	<b>16.81</b>

为了验证本文提出的水下复原方法的适用性,开展了另外一组自然光条件下水下非金属目标成像实验,玻璃水箱中注入了用 40 L 自来水稀释的 30 mL 牛奶混合溶液。在实验中,目标区域包含一束塑料水草,且目标物在高浓度浑浊水质下变得更加模糊。图 7(a)是由 3 幅不同偏振角度图像合成的原强度图像,图 7(b)、图 7(c)、图 7(d)是分别使

用 Schechner 方法、Huang 方法和 Tali 方法处理后的图像,图 7(e)是本文重构的图像,图 7(f)是本文增强的图像。由主观视觉判断,与其他方法相比,本文方法处理得到的图像的对比度和视觉清晰度最佳,水中目标可以被较好的识别。此实验也证明了本文方法在光源为自然光、浑浊粒子浓度提高、目标为非金属材质的条件下,复原效果依然良好。

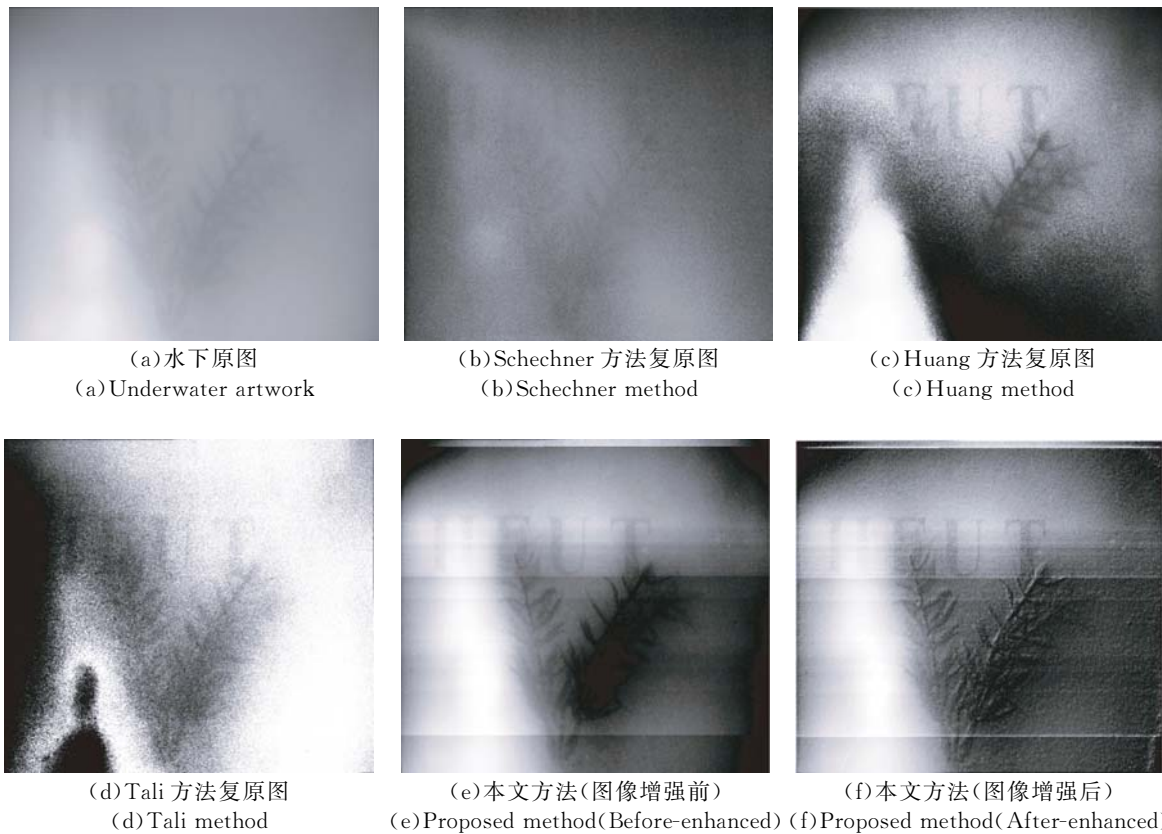


图 7 水下复原方法处理图对比(粒子浓度提高)

Fig. 7 Comparison of processing results among different underwater recovery methods with particle concentration increased

## 5 结 论

本文从理论和实验两个方面进行了浑浊水下目标偏振清晰成像研究。通过构建出浑浊水下目标辐射信息与场景和水下背景光偏振度信息之间的简化目标重构模型,提出主动估计全局最优偏振信息重构参数的方法,该方法具有较好的复原效果。本文针对复原出的水下金属目标图像存在细节模糊、清晰度不高等不足之处,利用水下目标

偏振图像增强算法提高了图像的复原质量。全程无需手动选取某一背景区域,主动估计全局最优偏振参数的方式,免去了人机操作的繁琐。开展水下实测实验,并采用多种复原方法进行水下目标复原处理。实验结果表明,本文方法在处理过程中无需考虑图像有无背景区域、水下散射光强分布,恢复出的水下场景目标具有很高的清晰度和对比度,以及较好的复原稳定性。本文方法在水下目标探测领域,特别是金属、人造物体的水下成像识别方面有着广阔的应用空间。

### 参考文献:

- [1] 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.  
GUO J CH, LI CH Y, GUO CH L, *et al.*. Research progress of underwater image enhancement and restoration methods [J]. *Journal of Image and Graphics*, 2017, 22(3): 273-287. (in Chinese)
- [2] JI T T, WANG J Y. An approach to underwater image enhancement based on image structural decomposition [J]. *Journal of Ocean of China*, 2015, 14(2): 255-260.
- [3] LI C Y, GUO J C. Underwater image enhancement by dehazing and color correction [J]. *Journal of Electronic Imaging*, 2015, 24(3): 033023.
- [4] JIN W Q, CAO F M, WANG X, *et al.*. Rang gated underwater laser imaging system based on intensified gate imaging technology [J]. *SPIE*, 2008: 6621.
- [5] LI L, ZHANG SH J. A survey on algorithms of nonnegative matrix factorization [J]. *Acta Electronica Sinica*, 2008, 36(4): 737-743.
- [6] XIANG Q, YANG K, YU L, *et al.*. Reflective underwater ghost imaging [J]. *Acta Optica Sinica*, 2015, 35(7): 0711002.
- [7] SCHECHNER Y Y, KARPEL N. Recovery of underwater visibility and structure by polarization analysis [J]. *IEEE Journal of Oceanic Engineering*, 2005, 30(3): 570-587.
- [8] SCHECHNER Y Y, KARPEL N. Clear underwater vision [C]. *IEEE Conference on Computer Vision and Pattern Recognition*, 2004, 1: I-I.
- [9] HUANG B J, LIU T G, HU H F, *et al.*. Underwater image recovery considering polarization effects of objects [J]. *Optics Express*, 2016, 24(9): 9826-9838.
- [10] SCHECHNER Y Y, TREIBITZ T. Active polarization descattering [J]. *IEEE Trans. Pattern Anal. Mach. Intell.*, 2009, 31: 385-399.
- [11] 吴斌,付辉,张红英. 大气光雾图像清晰度复原 [J]. 光学精密工程, 2016, 24(8): 2018-2026.  
WU B, FU H, ZHANG H Y. De-hazing of atmosphere veil haze images [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2016, 24(8): 2018-2026. (in Chinese)
- [12] 朱攀,刘泽阳,黄战华. 基于DTCWT和稀疏表示的红外偏振与光强图像融合 [J]. 光子学报, 2017, 46(12): 1210002.  
ZHU P, LIU Z Y, HUANG ZH H. Infrared polarization and intensity image fusion based on dual-tree complex wavelet transform and sparse representation [J]. *Acta Photonica Sinica*, 2017, 46(12): 1210002. (in Chinese)
- [13] 王卫星,肖翔,陈良琴. 结合最小滤波和引导滤波的暗原色去雾 [J]. 光学精密工程, 2015, 23(7): 2100-2108.  
WANG W X, XIAO X, CHEN L Q. Image dark channel prior haze removal based on minimum filtering and guided filtering [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2015, 23(7): 2100-2108. (in Chinese)
- [14] FU X, LIN Q, GUO W. Single image de-haze under non-uniform illumination using bright channel prior [J]. *Journal of Theoretical & Applied Information Technology*, 2013, 48(3): 1843-1848.
- [15] 怀宇,范之国,孙洁,等. 三通棱镜同时偏振测量系统的标定 [J]. 光电工程, 2015, 42(11): 18-24.  
HUAI Y, FAN ZH G, SUN J, *et al.*. Calibration of the three links prism simultaneous polarization measurement system [J]. *Opto-Electronic Engineering*, 2015, 42(11): 18-24. (in Chinese)

- [16] 孙洁, 高隽, 怀宇, 等. 全天域大气偏振模式的实时测量系统 [J]. 光电工程, 2016, 43(9): 45-50.  
SUN J, GAO J, HUAI Y, *et al.*. Real-time measurement system for the pattern of all skylight polarization [J]. *Opto-Electronic Engineering*, 2016, 43(9): 45-50. (in Chinese)
- [17] HAN P, LIU F, YANG K, *et al.*. Active underwater descattering and image recovery [J]. *Applied Optics*, 2017, 56(23): 6631.
- [18] BICKEL W S, VIDEEN G W. Polarized light scattering applications and measurements of fundamental systems [J]. *SPIE*, 1994, 1746:14-21.
- [19] MANTIUK R, KIM K J, REMPEL A G, *et al.*. HDR-VDP-2: A calibrated visual metric for visibility and quality predictions in all luminance conditions [J]. *ACM Transactions on Graphics*, 2011, 30(4): 40.
- [20] YANG M, SOWMYA A. New image quality evaluation metric for underwater video [J]. *IEEE Signal Letters*, 2014, 21(10): 1215-1219.
- [21] AGAIAN S S, PANETTA K, GRIGORYAN A M. Transform-based image enhancement algorithms with performance measure [J]. *IEEE Trans. Image Process*, 2001, 10(3): 367-382.

#### 作者简介:



范之国(1979—),男,安徽霍山人,博士,副教授,硕士生导师,2002年于辽宁科技大学获得学士学位,2007年、2011年于合肥工业大学分别获得硕士、博士学位,主要从事偏振光学探测及偏振光导航方面的研究。E-mail: fzghfut@163.com



宋 强(1992—),男,安徽长丰人,硕士研究生,2015年于安徽工业大学获得学士学位,主要从事偏振光学探测及水下偏振光学成像方面的研究。E-mail: 1522108669@qq.com