

浅海被动水下偏振成像探测方法

卫毅 刘飞 杨奎 韩平丽 王新华 邵晓鹏

Passive underwater polarization imaging detection method in neritic area

Wei Yi Liu Fei Yang Kui Han Ping-Li Wang Xin-Hua Shao Xiao-Peng

引用信息 Citation: *Acta Physica Sinica*, 67, 184202 (2018) DOI: 10.7498/aps.67.20180692

在线阅读 View online: <http://dx.doi.org/10.7498/aps.67.20180692>

当期内容 View table of contents: <http://wulixb.iphy.ac.cn/CN/Y2018/V67/I18>

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

[激光器内腔频差对双折射外腔激光回馈系统输出影响的理论及实验研究](#)

Theoretical and experimental research on influence of cavity frequency difference in birefringent laser feedback system

物理学报.2018, 67(15): 154201 <http://dx.doi.org/10.7498/aps.67.20180230>

[考虑探测器 \$\gamma\$ 特性的光电偏振成像系统偏振信息重构方法](#)

A new algorithm for polarization information restoration with considering the γ property of optoelectronic polarimeter

物理学报.2016, 65(9): 094201 <http://dx.doi.org/10.7498/aps.65.094201>

[浑浊介质中图像对比度与成像方式的关系](#)

Image contrast for different imaging methods in turbid media

物理学报.2016, 65(8): 084201 <http://dx.doi.org/10.7498/aps.65.084201>

[基于可调谐复振幅滤波器的超长焦深矢量光场](#)

The focused vectorial fields with ultra-long depth of focus generated by the tunable complex filter

物理学报.2016, 65(4): 044202 <http://dx.doi.org/10.7498/aps.65.044202>

[离轴径向偏振光束及其传输特性](#)

Off axial radially polarized beam and its propagation characteristics

物理学报.2015, 64(20): 204201 <http://dx.doi.org/10.7498/aps.64.204201>

浅海被动水下偏振成像探测方法*

卫毅¹⁾ 刘飞¹⁾²⁾ 杨奎¹⁾ 韩平丽¹⁾ 王新华²⁾ 邵晓鹏^{1)†}

1) (西安电子科技大学物理与光电工程学院, 西安 710071)

2) (中国科学院长春光学精密机械与物理研究所, 应用光学国家重点实验室, 长春 130033)

(2018年4月14日收到; 2018年5月21日收到修改稿)

针对传统被动水下偏振成像方法忽略水体对光的吸收效应, 成像结果中存在严重的色彩失真, 且并未深入发掘利用背景散射光中包含的场景信息的问题. 提出浅海被动水下偏振成像探测方法, 该方法从水体中背景散射光的传输特性出发, 分析场景深度信息与散射光的物理关系, 建立基于深度信息的水下 Lambertian 反射模型, 实现无色彩畸变的水下目标场景清晰成像探测. 实验结果表明, 该方法能够提供接近水下目标真实色彩、符合人眼视觉特性的清晰探测结果, 提高水下成像探测能力.

关键词: 偏振, 成像及光学处理, 海洋光学

PACS: 42.25.Ja, 42.30.-d, 42.68.Xy

DOI: 10.7498/aps.67.20180692

1 引言

水下光学成像技术因能够提供信息丰富、分辨率高、易解析的目标图像, 在海水养殖、油气勘探与开采以及水下考古等领域具有重要应用价值^[1-3]. 水下光学成像技术面临的主要问题为水体对光波的吸收作用和散射作用, 其中吸收会造成水下图像颜色失真, 散射会使背景散射光叠加在目标弹道光上, 造成图像对比度降低, 细节信息丢失^[4].

长期以来, 为去除背景散射光的影响、复原水下真实场景, 国内外学者们进行了大量研究^[5,6], 其中水下偏振成像技术由于具备设备结构简单、成像效果好及性价比高等特点备受关注^[7]. 而以 Huang 等^[8]以及 Schechner 和 Karpel^[9]的研究为代表的水下主动成像方法, 通过在成像光路中增加主动偏振光源, 并利用正交偏振图像的差异来实现对物体的探测与识别. 此外, Han 等^[10]利用水下散射光的偏振特性, 并结合刃边法求取退化图像的退化函数, 不仅抑制了背景散射光影响, 而且有效去除了前向散射光. 主动成像探测方法在深海区域可以有

效去除背景散射, 获取清晰水下图像, 但在浅海地区, 主动光源与自然光叠加后将导致水下散射光复杂性增大, 进而影响成像效果^[11]. Schechner 等^[12]通过对浅海地区自然光散射特性的研究, 首次提出了被动水下偏振成像模型, 通过采集两幅偏振态正交的偏振子图像, 利用背景散射光和目标信息光偏振特性的差异, 重建清晰的场景图像. 该成像模型的重点在于背景散射光与目标信息光的分离, 成像结果中存在严重的色彩失真, 且并未深入发掘利用背景散射光中包含的信息.

针对以上问题, 本文提出浅海被动水下偏振成像探测方法, 该方法从水体中背景散射光的传输特性出发, 通过分析场景深度信息与散射光的物理关系, 建立了基于深度信息的水下 Lambertian 反射模型. 该模型描述了能量相同、波长不同的目标辐射光经水中传输后到达探测器的能量不同, 能够在不增加任何先验条件的前提下, 实现无色彩畸变的水下目标场景清晰成像探测. 对于传统客观评价参数(如图像清晰度、对比度、信息熵等)无法表征图像色彩偏移这一问题, 本文采用图像色偏值这一客

* 国家自然科学基金青年科学基金(批准号: 61705175)、中国博士后科学基金(批准号: 2017M613063)、中国科学院长春光学精密机械研究所应用光学国家重点实验室基金(批准号: CS16017050001)和中央高校基本科研业务费(批准号: JB170503)资助的课题.

† 通信作者. E-mail: xps hao@xidian.edu.cn

观评价标准来衡量探测结果的视觉特性. 实验结果表明, 该方法能够提供接近水下目标真实色彩、符合人眼视觉特性的清晰探测结果, 避免由于色彩畸变造成的识别误差, 提高水下成像探测能力.

2 被动水下偏振成像模型

在自然光照射的浅海区域进行水下成像时, 探测器接收到的信息包含两部分, 一部分为目标辐射光经过水体的吸收与散射后被探测器接收, 称为目标信息光 I_O , 其表达式为

$$I_O = I_{\text{Object}} e^{-\beta z}, \quad (1)$$

其中, I_{Object} 为目标辐射光, β 表示光波的衰减系数, z 为探测距离. 目标信息光随着探测距离的增加其能量呈指数衰减^[13]. 另一部分为自然光经水体及悬浮粒子散射并到达探测器的光, 称为背景散射光 I_B ,

$$I_B = I_B^\infty (1 - e^{-\beta z}), \quad (2)$$

其中, I_B^∞ 表示无穷远处背景散射光强度. 与目标信息光相反, 背景散射光强度随着 z 增加而增加^[9], 因此, 探测器获得的总光强 I_{Total} 为

$$I_{\text{Total}} = I_{\text{Object}} e^{-\beta z} + I_B^\infty (1 - e^{-\beta z}). \quad (3)$$

如图 1 所示, 被动水下偏振成像时, 自然光经水中粒子的散射会带有偏振特性^[14]. 通过旋转偏振片使探测器获取偏振态正交的两幅偏振子图像, I^{\min} 和 I^{\max} , 其中 I^{\min} 所具有的背景散射光强度最小, 而与其偏振态正交的图像 I^{\max} 具有最大的背景散射光强度. 由于目标信息光为非偏振光, 因此当其通过任意角度的线偏振片时, 目标信息光的能量被滤掉一半, 即 I^{\max} 和 I^{\min} 中所包含的目标信息光相同^[12], 因此 I^{\min} , I^{\max} , I_O 与 I_{Total} 存在如下关系^[15]:

$$\begin{cases} I^{\max} = I_O/2 + I_B^{\max}, \\ I^{\min} = I_O/2 + I_B^{\min}, \\ I_{\text{Total}} = I^{\max} + I^{\min}, \end{cases} \quad (4)$$

其中, I_B^{\max} 和 I_B^{\min} 分别为 I^{\max} 和 I^{\min} 中的背景散射光强度, 则目标场景中的背景散射光强度为

$$I_B = (I^{\max} - I^{\min})/p, \quad (5)$$

式中, p 表示背景散射光的偏振度. 通过在采集到的偏振子图像 I^{\max} 和 I^{\min} 中选取背景散射均匀的

区域 $I_B^{\max}(x, y)$ 和 $I_B^{\min}(x, y)$, 结合偏振度的定义, 可以计算背景散射光偏振度为^[16]

$$p = \frac{I_B^{\max}(x, y) - I_B^{\min}(x, y)}{I_B^{\max}(x, y) + I_B^{\min}(x, y)}. \quad (6)$$

联立 (3), (4) 和 (6) 式可得清晰场景估计模型为

$$I_{\text{Object}} = \frac{[I_{\text{Total}} - (I^{\max} - I^{\min})/p]}{1 - I_B/I_B^\infty}. \quad (7)$$

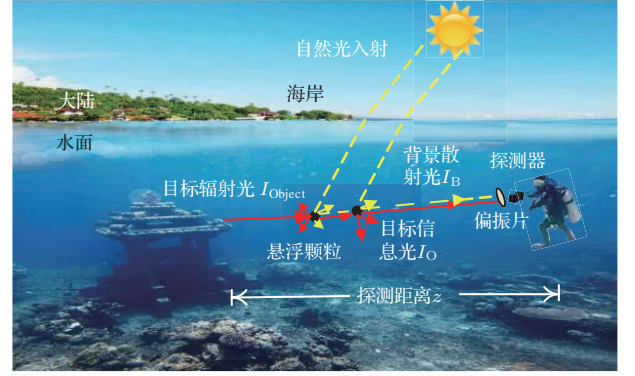


图 1 被动水下偏振成像原理示意图

Fig. 1. Schematic of passive underwater polarization imaging.

图 2 (d) 为利用上述偏振成像模型对图 2 (c) 中 Schechner 和 Karpel^[12] 在地中海拍摄的真实强度图像进行重建的结果, 其中图 2 (a) 和图 2 (b) 分别为通过图 1 所示采集方法所获取的光强最大偏振子图像 I^{\max} 和光强最小偏振子图像 I^{\min} . 相比其他探测结果, 图 2 (d) 的图像对比度得到有效提升, 表明利用该估计模型能够有效去除背景散射光对成像质量的影响. 但最终成像结果中存在明显的颜色失真现象, 图像整体呈现蓝色基调, 视觉效果差. 通过统计图像红、绿、蓝 (R, G, B) 三个色彩通道的像素强度值分布情况能够更清晰地了解图像色彩的动态范围, 图 2 (e) 和图 2 (f) 分别为原始的水下强度图像和通过被动水下偏振成像模型获得的图像的 R, G, B 三个色彩通道的像素强度值分布. 图 2 (e) 中 R, G, B 三通道像素强度值的分布范围分别为 0—20, 0—100 和 0—220. 图 2 (f) 中 R, G, B 三通道像素强度值的分布范围分别为 0—80, 0—190 和 0—250, 分布情况相比于图 2 (e) 有明显提高, 对应图像动态范围增大, 表明偏振成像方法对各彩色通道均起到了拉伸作用, 增强了图像层次感. 但图 2 (f) 的三通道像素强度统计图中蓝色通道明显占优, 表明探测结果色彩并未得到有效复原, 存在明显的颜色失真问题, 导致图像视觉效果受限.

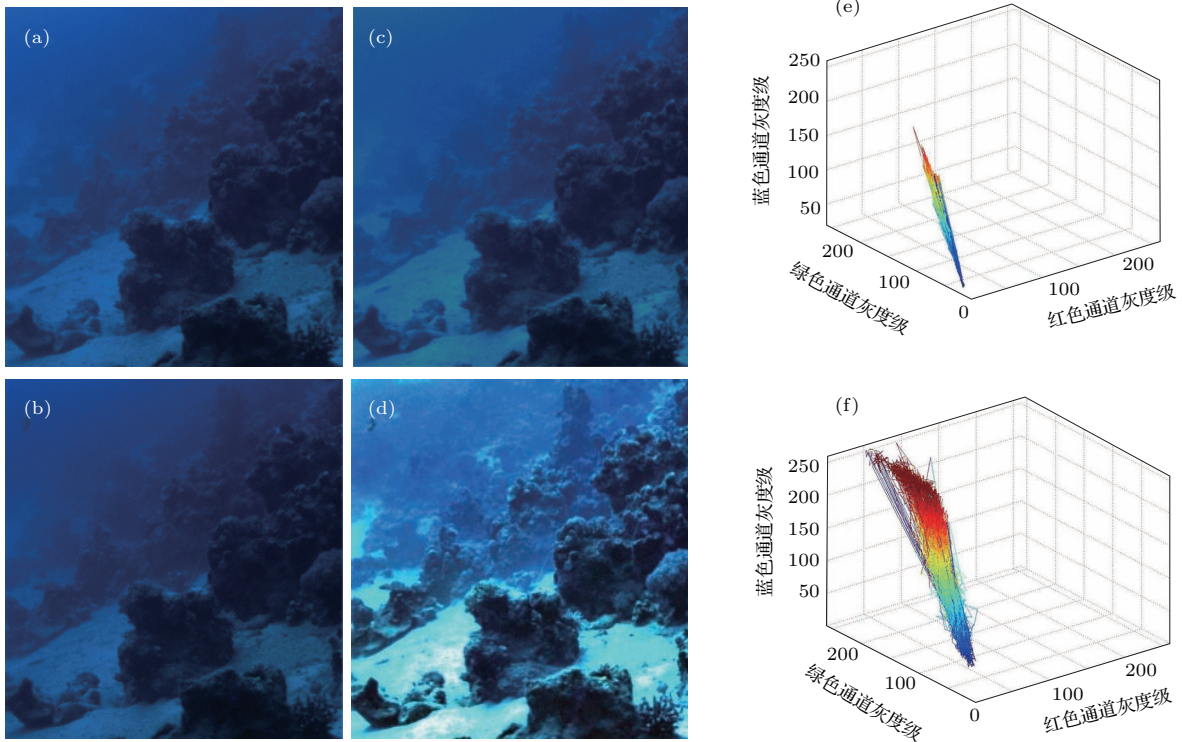


图2 (a) 光强最大偏振子图像; (b) 光强最小偏振子图像; (c) 原始强度图像 [12]; (d) 传统被动偏振成像探测结果; (e) 和 (f) 分别为图 (c) 和图 (d) 的 R, G, B 三通道像素强度统计值
 Fig. 2. (a) Polarization image which has the maximum backscatter; (b) polarization image which has the minimum backscatter; (c) raw image of an underwater scene [12]; (d) detection result of (c) by traditional polarization imaging method; (e) and (f) are the pixel intensity distribution of channel R, G and B of (c) and (d).

3 基于深度信息的水下 Lambertian 反射模型

水下被动偏振成像方法能够有效解决背景散射光影响造成的成像结果对比度降低的问题,但在浅海区域,除了散射会影响图像质量外,水体对不同波长的自然光的吸收以及散射的差异性会造成重建图像存在严重的色彩失真 [17]. 图 3 所示为海水对不同波长光波的吸收与散射系数曲线,海水对光波的吸收与光波的波长成正比 [18,19],与此相反,海水中粒子对光波的散射与光波的波长成反比 [20]. 成像过程中,目标信息光与背景散射光经海水衰减后,波长较短的蓝光由于吸收较小而被探测器大量接收;同时,由于海水对波长较短的蓝光散射最大,造成散射光中蓝光占主导地位 [13]. 本文从水下成像的图像颜色失真问题出发,分析造成颜色失真的物理原因,结合浅海地区自然光的偏振散射特性和 Lambertian 反射模型 [21],设计新型浅海被动水下偏振成像探测方法,用以获取无色彩畸变的水下目标清晰场景.

由 Lambertian 反射模型可知,探测场景中物

体表面上某一点颜色 $f(x)$ 可由整个可见光范围内对光源的分布、物体表面的反射率以及相机感光系数积分得到 [21], 即

$$f(x) = \int_{\omega} e(\lambda)s(x, \lambda)c(\lambda)d\lambda, \quad (8)$$

其中, λ 为光波波长, ω 表示光谱范围, x 为场景中的像素点位置, $e(\lambda)$ 为光源的分布, $s(x, \lambda)$ 表示空间中的某一点对某一波长的反射率, $c(\lambda)$ 为相机的感光系数.

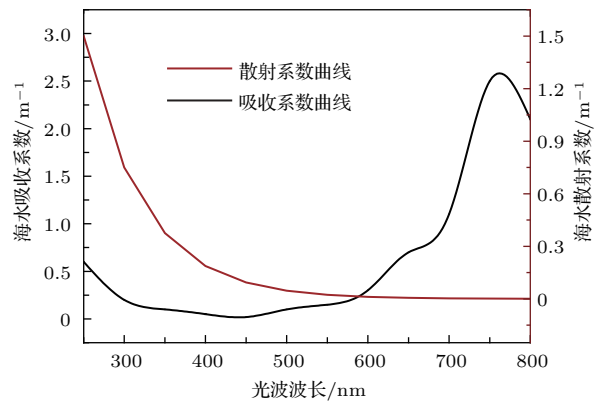


图3 海水对可见光波的吸收系数和散射系数曲线
 Fig. 3. The absorption and scattering coefficient of seawater during the visible light wave band.

在水下偏振成像中, 探测器接收到的光波与其传输距离 z 的关系为^[22,23],

$$E_{\text{object}} = E_{\text{in}} e^{-\alpha z}, \quad (9)$$

式中, E_{in} 和 E_{object} 分别表示入射光波和衰减后光波的强度; α 表示光波的衰减系数, 其大小与光波波长有关. 根据(9)式可知对于反射光能量相同、波长不同的物体, 探测器接收到的能量随光波波长的增大而减小, 因此造成水下图像中同一物体不同程度的颜色失真. 本文将由于波长不同致使相机接收到不同能量的原因假设为照射物体的光源强度不同, 而此时光源的分布为

$$\tilde{e}(\lambda) = a(x)e(\lambda). \quad (10)$$

联立(8)和(10)式可得基于深度信息的 Lambertian 水下反射模型为

$$f(x) = \int_{\omega} a(x)e(\lambda)s(x, \lambda)c(\lambda) d\lambda, \quad (11)$$

式中, $a(x)e(\lambda)$ 表示场景中光源在不同位置的强度分布, $a(x)$ 表示场景中不同位置的深度信息. 由水下偏振成像模型可知背景散射光强度与探测距离成正比, 因此, 可以通过背景散射光强度表征场景中不同位置的深度信息, 即^[9]

$$a(x) = \beta z = -\ln\left(1 - \frac{B}{B_{\infty}}\right). \quad (12)$$

根据 Weijer 等^[21]提出的水下 Gray World 算法可知, 场景中所有物体表面的平均反射是无色差的, 即

$$\frac{\int a(x)s(x, \lambda) dx}{\int a(x) dx} = g(\lambda) = k, \quad (13)$$

其中, k 为取值范围在 $[0, 1]$ 之间的一个常数. 联立(12)和(13)式可得场深度信息、光源强度以及探测器响应率之间的关系为

$$\begin{aligned} \frac{\int f(x) dx}{\int a(x) dx} &= \frac{1}{\int a(x) dx} \int a(x)e(\lambda)s(x, \lambda)c(\lambda) dx \\ &= e(\lambda)c(\lambda)k, \end{aligned} \quad (14)$$

式中, $s(x, \lambda)$ 即为所求的目标反射光能量, 而光源强度与探测器响应率的乘积可以根据(15)式来求解, 因此, 水下图像颜色失真校正模型为

$$e(\lambda)c(\lambda) = \frac{\int f(x) dx}{\int a(x) dx} \cdot k^{-1}. \quad (15)$$

$$\begin{aligned} &\begin{bmatrix} s(x, R) \\ s(x, G) \\ s(x, B) \end{bmatrix} \\ &= \begin{bmatrix} [e(R)c(R)]^{-1} & 0 & 0 \\ 0 & [e(G)c(G)]^{-1} & 0 \\ 0 & 0 & [e(B)c(B)]^{-1} \end{bmatrix} \\ &\times \begin{bmatrix} f_R(x) \\ f_G(x) \\ f_B(x) \end{bmatrix}, \end{aligned} \quad (16)$$

其中, $[e(R)c(R)]^{-1}$, $[e(G)c(G)]^{-1}$, $[e(B)c(B)]^{-1}$ 分别表示 R, G, B 三通道中光源强度与探测器响应率的乘积. 根据(16)式建立水下 Lambertian 反射模型, 结合(7)式对水下目标场景进行无色彩畸变的清晰成像探测.

4 实验结果分析

为了验证浅海被动水下偏振成像方法的有效性, 根据图1所示的被动水下偏振成像原理进行实验, 通过旋转偏振片获取相互正交的两幅偏振子图像. 此外, 通过在自来水溶液中加入脱脂牛奶(分子大小约为 $0.04\text{--}0.3 \mu\text{m}$) 模拟实际海洋环境中粒子对光波的吸收以及散射情况^[24,25], 比例为 300 L 自来水加 100 mL 脱脂牛奶, 实验在体积为 $2.5 \text{ m} \times 0.4 \text{ m} \times 0.5 \text{ m}$ 的水槽中进行. 为了模拟浅海区域自然光照射场景, 本实验在户外进行, 以太阳光作为光源.

图4(a)所示为实验采集到的原始水下强度图像, 由于背景散射光的存在导致目标信号被覆盖, 图像清晰度不足、信息的可识别度大大降低; 同时由于水体对光波的选择性吸收使图像颜色失真, 难以观测到真实场景. 图4(b)为传统被动偏振成像探测结果, 与原始强度图像相比, 背景散射光被有效移除, 图像的清晰度以及对对比度得到明显提升. 但图4(b)的真实色彩信息没有得到有效复原, 视觉效果差, 说明传统的被动水下偏振成像方法并没有解决水下图像颜色失真这一问题. 图4(c)所示为浅海被动水下偏振成像探测结果, 不仅有效去除了背景散射光的影响, 而且探测结果接近水下目标真实色彩, 符合人眼视觉特性.

图5分别为图4(a)—图4(c)的 R, G, B 三个颜色通道的像素强度统计值. 原始强度图中, R,

G, B三通道的像素强度值分布在极小的范围内, 并且图 5(a1) 和图 5(a2) 表明蓝色通道的像素强度值分布范围明显优于红色与绿色通道. 经传统被动偏振成像方法处理后, R, G, B三通道的像素强度值分布范围扩大, 但从图 5(b1) 和图 5(b2) 可以看出蓝色通道占优的情况仍未改变, 图像仍存在颜

色失真. 图 5(c) 中像素分布不仅优于原始强度图像, 同时相对于传统被动偏振成像方法也有明显提升, 图像的动态范围增大, 层次感增强; 图 5(c1) 和图 5(c2) 表明图像各个颜色通道的强度值分布范围相等, 原始图像中存在的颜色畸变问题得到有效复原, 视觉效果增强.

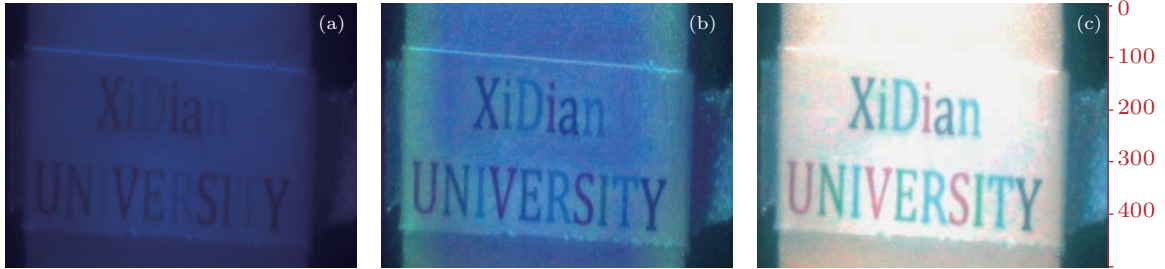


图 4 (a) 原始强度图像; (b) 传统被动偏振成像探测结果; (c) 浅海被动水下偏振成像探测结果

Fig. 4. (a) A raw underwater image; (b) detection result by traditional passive polarization imaging method; (c) detection result by the method of this paper.

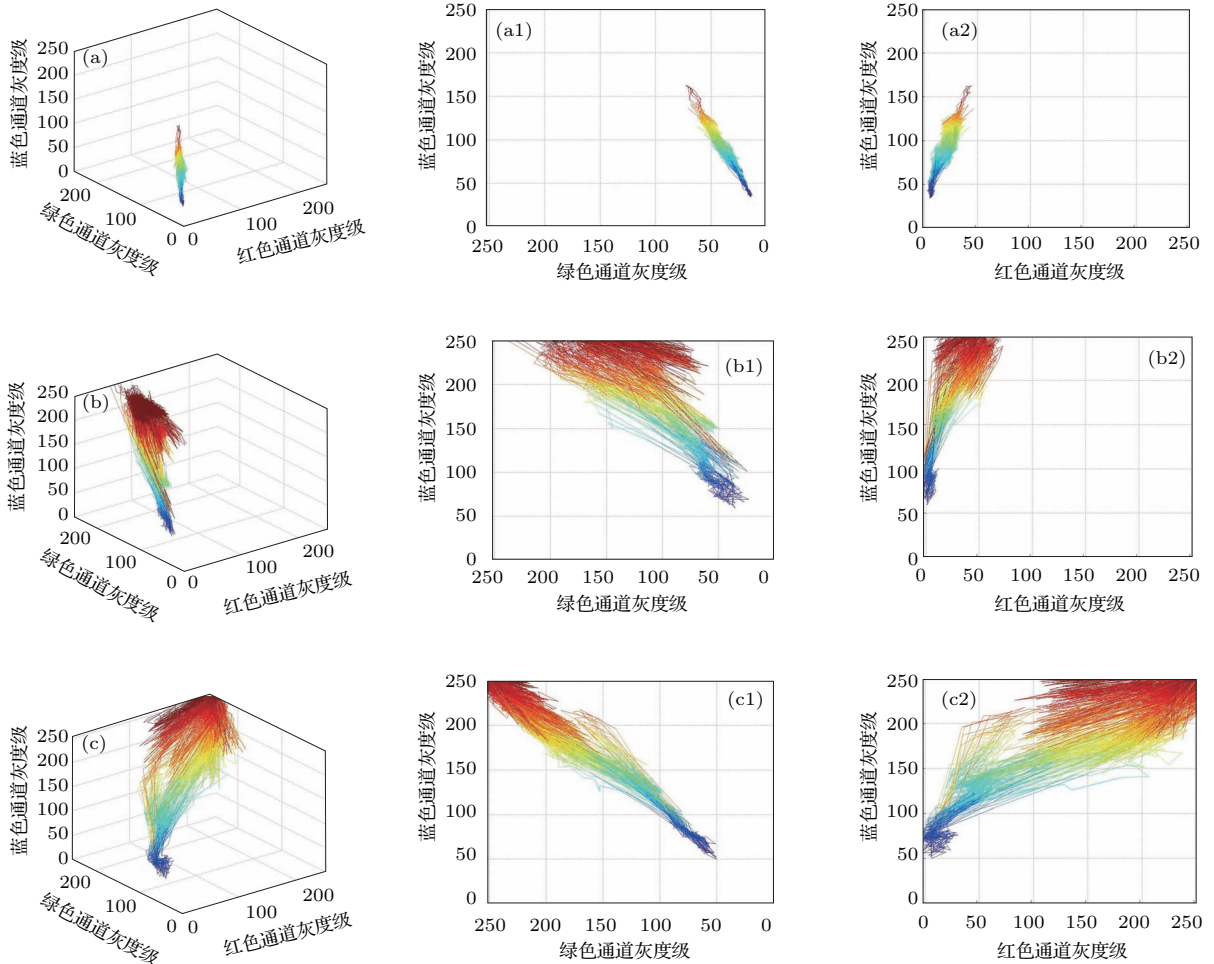


图 5 (a), (b) 和 (c) 分别为图 4(a)、图 4(b) 和图 4(c) 的 R, G, B 三通道像素强度统计值; (a1) 和 (a2), (b1) 和 (b2), (c1) 和 (c2) 分别为图 (a), (b) 和 (c) 的截面图

Fig. 5. (a), (b), and (c) are the pixel intensity distribution of channel R, G and B of Fig. 4(a), Fig. 4(b), and Fig. 4(c); (a1) and (a2), (b1) and (b2), (c1) and (c2) are the sectional view of panels (a), (b), and (c).

图6(a)—(c)分别为图4(a)—(c)的R, G, B三通道中第199行像素强度值分布图. 对比发现, 原始强度图与传统被动偏振成像结果中蓝色通道强度值明显高于红色与绿色通道, 图像存在严重的色彩畸变. 而浅海被动水下偏振成像探测结果中目标信息光与背景散射光的差异明显增大, 图像对比度提升, 并且R, G, B三通道中像素强度值分布均匀, 不存在某一通道占优情况, 图像质量得到极大提升.

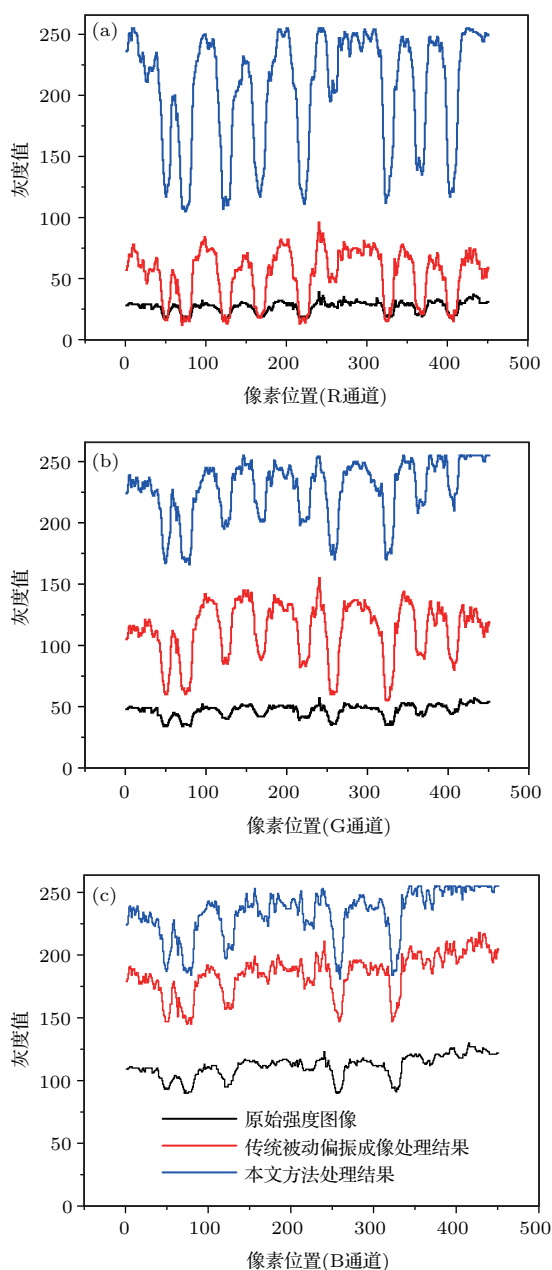


图6 (a), (b) 和 (c) 分别为图4(a)、图4(b) 和图4(c) 的 R, G, B 三通道中第 199 行像素强度值分布图
 Fig. 6. (a), (b), and (c) are the horizontal line plots at the vertical position pixel 199 for channel R, G and B of Fig. 4 (a), Fig. 4 (b) and Fig. 4 (c).

在此基础上, 为了说明本文探测方法的普适性, 对图7所示的真实水下场景进行探测. 图7(a)所示的原始强度图中, 目标信息光被背景散射光淹没, 图像清晰度不足, 远处的礁石几乎不可见; 同时图像色彩失真严重, 视觉效果差. 相比之下, 图7(b)中颜色畸变问题得到有效复原, 物体颜色鲜艳, 其真实色彩得以显露, 同时图像的高频信息得到修复, 被背景散射光遮蔽或者由于水体吸收导致模糊的目标信号得到凸显, 远处的礁石能直接辨识, 视觉效果更加自然.

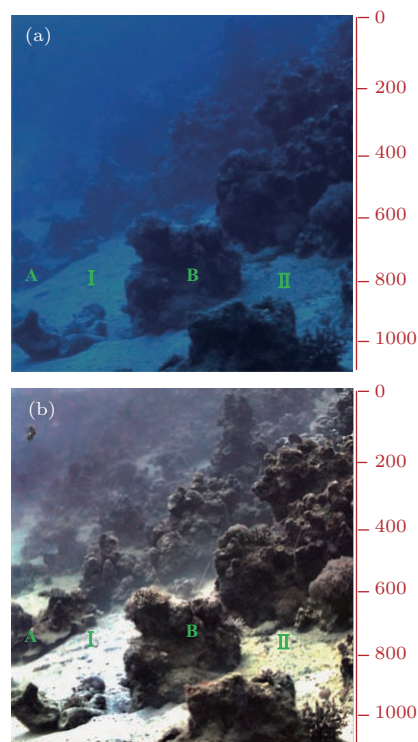


图7 (a) 原始强度图像 [12]; (b) 浅海被动水下偏振成像探测结果
 Fig. 7. (a) Raw underwater image of another scene [12]; (b) detection result by the method of this paper.

图8(a)—(c)所示为分别选取图7(a)和图7(b)三通道中第700行(由上至下)像素的强度分布曲线, 该行像素穿过礁石A和礁石B、海底I和海底II, 其强度值变化能够直观表征场景中不同物体之间的差异以及对比度变化. 原始强度图像的三通道像素强度值分布图中红色通道的整体强度值明显低于绿色和蓝色通道, 图像存在严重的颜色失真. 浅海被动水下偏振成像探测结果的三通道像素强度值分布均匀, 不存在某一通道像素值占优的情况, 图像的色彩畸变问题得到复原, 视觉效果提升, 同时去除了背景散射光的影响, 礁石与海底交界处的像素强度值变化剧烈, 表明图像对比度

增强. 图 9(a) 和图 9(b) 分别对应图 7(a) 和图 7(b) 的 R, G, B 三个颜色通道的像素强度统计值, 对比发现浅海被动水下偏振成像不仅能够复原图像的色彩信息, 而且增强了图像的层次感.

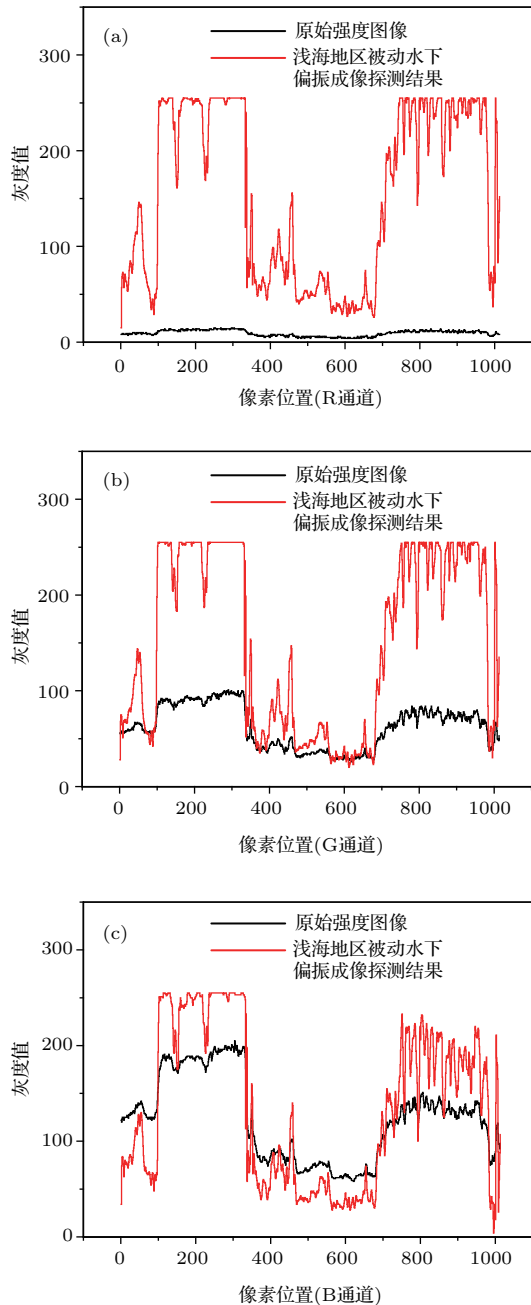


图 8 (a), (b) 和 (c) 分别为图 7(a) 和图 7(b) R, G, B 三通道中第 700 行像素强度值分布图
Fig. 8. (a), (b) and (c) are the horizontal line plots at the vertical position pixel 700 for channel R, G and B of Fig. 7(a) and Fig. 7(b).

为了表征颜色校正前后图像质量的提升, 用图像色偏值来对该探测方法的性能进行客观评价. 首先将图像由 RGB 空间转换到 CIE Lab 空间, 通过

下式有效获取图像色偏值 K [26],

$$K = D/M, \quad (17)$$

其中, D 表示图像平均色度, M 表示色度中心距. D 与 M 的求解过程如下所示:

$$D = \left[\left(\frac{1}{MN} \sum_{i=1}^M \sum_{j=1}^N a \right)^2 + \left(\frac{1}{MN} \sum_{i=1}^M \sum_{j=1}^N b \right)^2 \right]^{1/2}, \quad (18)$$

$$M = \left\{ \left[\frac{1}{MN} \sum_{i=1}^M \sum_{j=1}^N (a - d_a)^2 \right]^2 + \left[\frac{1}{MN} \sum_{i=1}^M \sum_{j=1}^N (b - d_b)^2 \right]^2 \right\}^{1/2}, \quad (19)$$

其中, M, N 分别为图像的宽和高, 以像素为单位; (d_a, d_b) 表示 a-b 色度平面上等效圆的中心坐标. 计算所得的色偏值 K 越大, 表明图像色偏越严重.

浅海被动水下偏振成像探测结果与传统水下偏振成像探测结果的色偏值如表 1 所列. 以图 4(a) 为例, 与传统水下成像方法相比, 经本文方法处理后图像的色偏值明显降低, 表明图像的颜色得到校正, 图像视觉效果提升, 进一步说明了本文探测方法提供接近水下目标真实色彩、符合人眼视觉特性的清晰图像的有效性.

表 1 不同方法处理后图像的 K 值

Table 1. The value of K of reconstructed images by different methods.

	原始强度图像 K 值	本文方法处理后 K 值
图 4(a)	1.7363	0.5217
图 7(a)	0.1994	0.1062

分别计算原始图像和浅海被动水下偏振成像探测结果的各项客观评价指标 (包含信息熵、清晰度、平均梯度和对比度), 结果如表 2 所列, 其中信息熵反应图像的平均信息量, 信息熵越大, 表明图像中所包含的信息越多; 清晰度和平均梯度能够反映图像中的边缘和细节等高频信息, 其值越大,

表 2 水下成像结果的客观评价参数

Table 2. Objective evaluations of underwater images.

场景	评价参数				
	信息熵	清晰度	平均梯度	对比度	
图 4	原始图像	4.1689	0.0047	0.0038	0.4577
	本文方法探测结果	5.8432	0.0151	0.0132	3.2742
图 7	原始图像	6.8231	0.0040	0.0032	0.7234
	本文方法探测结果	7.4690	0.0188	0.0154	6.5759

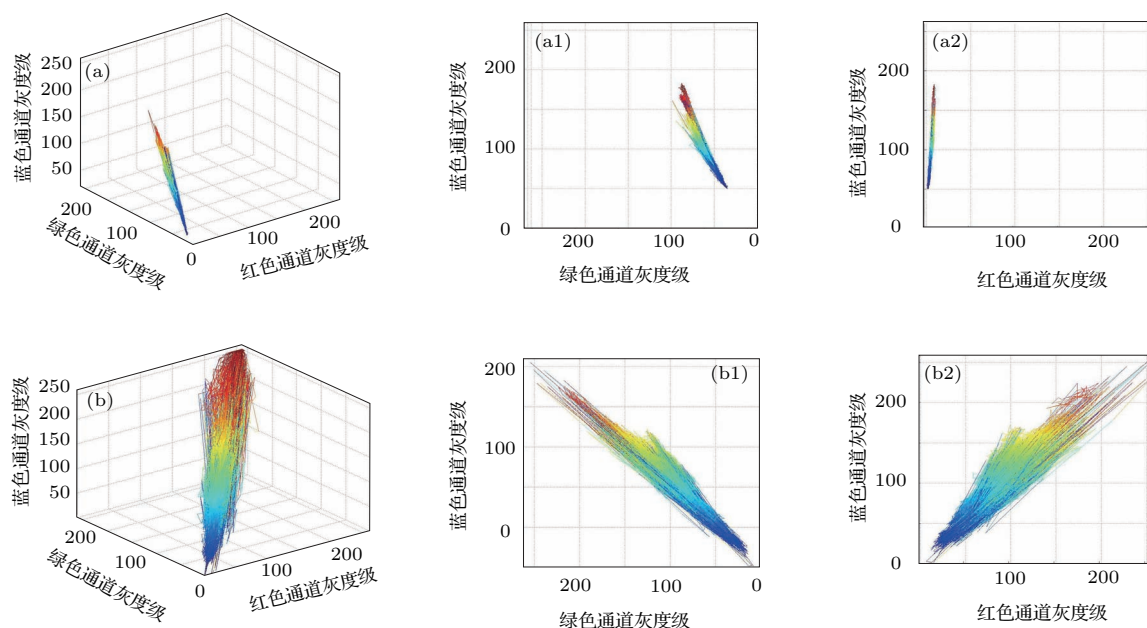


图9 (a)和(b)分别为图7(a)和图7(b)的R, G, B三通道像素强度统计值; (a1)和(a2), (b1)和(b2)分别为图(a)和(b)的截图

Fig. 9. (a) and (b) are the pixel intensity distribution of channel R, G and B of Fig. 7(a) and Fig. 7(b); (a1) and (a2), (b1) and (b2) are the sectional view of Fig. 9(a) and Fig. 9(b).

图像边缘越清晰, 所包含的细节越明显; 图像对比度则能够表示图像中灰度反差的大小, 其值越大, 表明图像中亮暗渐变层次越多, 图像中物体表面的纹理越明显, 图像信息越丰富. 从表2可以很明显地看出, 经过浅海被动水下偏振成像探测方法得到的图像与原始图像相比在各项指标上都有了明显提升, 如清晰度较原始强度图像普遍提升了4倍左右, 图像的平均梯度提升了4.5倍左右; 与此同时, 图像的对比度相对于原始强度图提升了10倍左右, 图像的信息熵也有所提高. 这些参数的提升都表明图像的质量得到了极大的改善, 尤其是在图像对比度以及图像的细节方面有显著增强. 这些结论与图像主观评价和分析结果一致, 客观表明了浅海被动水下偏振成像探测方法的有效性.

5 结 论

为了解决传统被动水下偏振成像结果中存在严重的色彩失真问题, 设计了浅海被动水下偏振成像探测方法. 该方法将背景散射光的传输特性与场景深度信息联系起来, 建立了水下Lambertian反射模型, 不仅去除了背景散射光的影响, 还复原了由于水体选择性吸收及散射造成的色彩畸变问题. 结果表明, 该方法能够提供接近水下目标真实色彩的清晰探测结果. 成像结果中R, G, B三通道的像

素强度统计值直观地表明本文方法在提供无色畸变的水下目标清晰场景方面的有效性. 客观评价指标相比于原始强度图都有所提升, 其中图像对比度提升了10倍左右, 图像清晰度提升了4倍左右, 以上结果证明了本文方法所得图像的质量得到了极大改善. 此外, 图像色偏值的减小也反映了颜色恢复模型的有效性.

参考文献

- [1] Lavest J M, Guichard F, Rousseau C 2002 *International Conference on Image Processing* Rochester, NY, USA, September 22–25, 2002 p813
- [2] Panetta K, Gao C, Aгаian S 2016 *IEEE J. Oceanic Eng.* **41** 541
- [3] Chennu A, Färber P, De’Ath G, de Beer D, Fabricius K E 2017 *Sci. Rep.* **7** 7122
- [4] Chiang J Y, Chen Y C 2012 *IEEE Trans. Image Process.* **21** 1756
- [5] Zhao X W, Jin T, Chi H, Qu S 2015 *Acta Phys. Sin.* **64** 104201 (in Chinese) [赵欣慰, 金韬, 池灏, 曲嵩 2015 物理学报 **64** 104201]
- [6] Han P L, Liu F, Zhang G, Tao Y, Shao X P 2018 *Acta Phys. Sin.* **67** 054202 (in Chinese) [韩平丽, 刘飞, 张广, 陶禹, 邵晓鹏 2018 物理学报 **67** 054202]
- [7] Liu F, Cao L, Shao X, Han P L, Bin X 2015 *Appl. Opt.* **54** 8116
- [8] Huang B J, Liu T G, Han H F, Han J H, Yu M X 2016 *Opt. Express* **24** 9826

- [9] Schechner Y Y, Karpel N 2005 *IEEE J. Oceanic Eng.* **30** 570
- [10] Han P L, Liu F, Yang K, Ma J Y, Li J J, Shao X P 2017 *Appl. Opt.* **56** 6631
- [11] Schechner Y Y, Averbuch Y 2007 *IEEE Trans. Pattern Anal. Mach. Intell.* **29** 1655
- [12] Schechner Y Y, Karpel N 2004 *IEEE Computer Vision and Pattern Recognition* Washington, USA, June 22–25, 2004 p536
- [13] Jaffe J S 2010 *Opt. Express* **18** 12328
- [14] Guan J G, Zhu J P, Tian H, Hou X 2015 *Acta Phys. Sin.* **64** 224203 (in Chinese) [管今哥, 朱京平, 田恒, 侯洵 2015 物理学报 **64** 224203]
- [15] Treibitz T, Schechner Y Y 2009 *IEEE Trans. Pattern Anal. Mach. Intell.* **31** 385
- [16] Liu F, Shao X, Gao Y, Xiang L B, Han P L, Li G 2016 *J. Opt. Soc. Am. A* **33** 237
- [17] Ellis J W, Bath J 1938 *J. Chem. Phys.* **6** 723
- [18] Pegau W S, Gray D, Zaneveld J R V 1997 *Appl. Opt.* **36** 6035
- [19] Pope R M, Fry E S 1997 *Appl. Opt.* **36** 8710
- [20] Kopelevich O V, Burenkov V I 1977 *Oceanology* **17** 278
- [21] Weijer J V D, Gevers T, Gijssenij A 2007 *IEEE Trans. Image Process* **16** 2207
- [22] Lee Z, Wei J, Voss K, Lewis M, Bricaud A, Huot Y 2015 *Appl. Opt.* **54** 546
- [23] Le M N, Wang G, Zheng H B, Liu J B, Zhou Y, Xu Z 2017 *Opt. Express* **25** 22859
- [24] Dubreuil M, Delrot P, Leonard I, Alfalou A, Brosseau C, Dogariu A 2013 *Appl. Opt.* **52** 997
- [25] Piederrière Y, Boulvert F, Cariou J, Jeune B L, Guern Y, Brun G L 2005 *Opt. Express* **13** 5030
- [26] Li F, Wu J, Wang Y, Zhao Y, Zhang X 2012 *IEEE Fifth International Conference on Advanced Computational Intelligence* Nanjing, China, March 29–31, 2012 p662

Passive underwater polarization imaging detection method in neritic area*

Wei Yi¹⁾ Liu Fei¹⁾²⁾ Yang Kui¹⁾ Han Ping-Li¹⁾ Wang Xin-Hua²⁾ Shao Xiao-Peng^{1)†}

1) (School of Physics and Optoelectronic Engineering, Xidian University, Xi'an 710071, China)

2) (State Key Laboratory of Applied Optics, Changchun Institute of Optics, Fine Mechanics and Physics, Chinese Academic of Sciences, Changchun 130033, China)

(Received 14 April 2018; revised manuscript received 21 May 2018)

Abstract

Underwater imaging is widely applied to mariculture, archaeology, and hydrocarbon exploration, because it can provide the information about visualized target. Among various underwater imaging techniques, polarization imaging is of particular interest to us, due to its simple system structure and low cost. It images the waterbody through using the polarization characteristics of light, specifically, the background light and target light. Active polarization imaging method illuminates a target scene with an artificial polarized light source to provide polarization information for imaging. But in neritic area, active imaging leads to complex light scattering conditions when artificial light and natural light are superimposed together, which further leads to poor image quality. Passive underwater polarization imaging attempts to recover a clear image by utilizing the polarization characteristics of background light and target light. However, serious color cast always appears in the final image, resulting from light absorbed by water, which may further result in target distortion.

In this manuscript, we present a passive underwater polarization imaging method for detecting a target in neritic area. A depth-information-based underwater Lambertian reflection model is established by incorporating the depth information into the traditional Lambertian reflection model. First, we attribute the light changes in color and brightness of a Lambertian surface to the spatial variation of the light. According to Lambertian reflection model, the appearance of a target on a detector depends on the light source, the surface reflectance, and the camera sensitivity function. But in underwater imaging, light attenuation at different wavelengths also varies with depth. By analyzing the transmission characteristics of background light in water, we build a physical relationship between the depth information of the scene and the background light. After that, we take the depth information as the weight of light intensity distribution. Then we calculate the product of the light intensity and the camera sensitivity function in the underwater scene according to gray world algorithm, and the real color information of the target can be obtained. Finally, the clear image of an underwater target scene can be obtained, where color cast is calibrated and background light is removed. Underwater experiments are conducted to demonstrate the validity of the proposed method. Besides, the quantitative analyses also verify the improvement of the quality in final target image.

Compared with conventional passive underwater polarization imaging methods, the proposed method is capable of detecting targets in various conditions, with the color cast problem solved. It can provide underwater images with better quality and valid detailed information. Furthermore, the proposed method is easy to conduct with no need to change the conventional polarization imaging system and is promising in various practical applications.

Keywords: polarization, imaging and optical processing, ocean optics

PACS: 42.25.Ja, 42.30.-d, 42.68.Xy

DOI: 10.7498/aps.67.20180692

* Project supported by the Young Scientists Fund of the National Natural Science Foundation of China (Grant No. 61705175), the China Postdoctoral Science Foundation (Grant No. 2017M613063), the State Key Laboratory of Optical Technology for Applied Optics, Changchun Institute of Optics, Fine Mechanics and Physics, Chinese Academy of Sciences (Grant No. CS16017050001), and the Fundamental Research Fund for the Central Universities, China (Grant No. JB170503).

† Corresponding author. E-mail: xpshao@xidian.edu.cn