

基于全局估计的水下偏振成像算法

封斐^{1,2}, 吴国俊^{1,2*}, 吴亚凤^{1,2}, 苗宇宏^{1,2}, 刘博^{1,2}

¹中国科学院西安光学精密机械研究所海洋光学技术研究室, 陕西 西安 710119;

²青岛海洋科学与技术试点国家实验室, 山东 青岛 266071

摘要 为了实现高偏振度(HDOP)水下目标的清晰成像,分析了传统水下偏振成像模型,从 Schechner 模型出发,以偏振度定义为基础,提出了一种对后向散射光偏振度进行全局估计的偏振成像复原算法,该算法考虑了目标反射光的偏振度。进行了水槽偏振成像实验,对拍摄的三种目标在不同浓度浑浊水体中的偏振图像进行了复原。复原结果表明,与 Schechner 原算法相比,经所提偏振成像算法处理后,复原图像的增强测度值提高了90%以上,图像灰度的平均梯度、图像灰度的标准差和信息熵也都有提升。不同目标偏振图像的复原结果表明,所提算法不但适用于表面粗糙的低偏振度(LDOP)水下目标,对表面光滑的 HDOP 水下目标也能取得满意的复原效果。

关键词 成像系统; 偏振成像; 水下图像复原; 后向散射; 全局估计

中图分类号 O436.3

文献标志码 A

doi: 10.3788/AOS202040.2111002

Algorithm for Underwater Polarization Imaging Based on Global Estimation

Feng Fei^{1,2}, Wu Guojun^{1,2*}, Wu Yafeng^{1,2}, Miao Yuhong^{1,2}, Liu Bo^{1,2}

¹Marine Optical Technology Laboratory, Xi'an Institute of Optics and Precision Mechanics, Chinese Academy of Sciences, Xi'an, Shaanxi 710119, China;

²Pilot National Laboratory for Marine Science and Technology, Qingdao, Shandong 266071, China

Abstract In order to realize the clear imaging of underwater targets with high degree of polarization (HDOP), the traditional polarization imaging model is analyzed. Based on the Schechner polarization imaging model and the definition of polarization degree, a polarization imaging restoration algorithm is proposed to globally estimate the polarization degree of backscattered light, which considers the polarization degree of reflected light of targets. The polarization imaging experiment is conducted, in which the polarization images of three kinds of targets in turbid water with different concentrations are restored. The restoration results show that the measure of enhancement value of the restored image is increased by more than 90% compared to the original Schechner algorithm. Meanwhile, the average gradient, standard deviation and information entropy of image grey are also increased. The restoration results of different polarization images of targets show that the proposed algorithm is not only suitable for the underwater targets with low degree of polarization (LDOP) and rough surfaces, but also makes the underwater targets with HDOP and smooth surfaces gain satisfactory restoration effect.

Key words imaging systems; polarization imaging; underwater image restoration; backscatter; global estimation

OCIS codes 110.3010; 260.5430; 290.5855

1 引言

水下成像技术在海底目标监测、海洋资源勘探和海洋生物学等领域均有广泛的应用^[1-2],但由于水中粒子的前向和后向散射的影响,成像系统的分辨

率和有效作用距离明显受限^[3]。采用有源成像技术虽然在一定程度上可增加相机的有效作用距离,但是随着照明功率的提升,后向散射光明显增强,成像对比度降低,从而限制了有效作用距离的增加。为此,科研人员采用偏振成像的方法来进一步提升水

收稿日期: 2020-06-08; 修回日期: 2020-06-24; 录用日期: 2020-07-15

基金项目: 国家重点研发计划(018YFC0307900)

* E-mail: wuguojun@opt.ac.cn

下成像系统的成像质量。

目前,水下偏振成像技术主要有基于物理退化模型的偏振成像技术、基于偏振差分的偏振成像技术以及基于图像相关的偏振成像技术^[18-19]。Schechner 等^[3,20]以大气去雾模型为基础,建立了水下偏振成像模型,并反演了水下成像退化过程,得到了水体透射系数和背景光强,从而分离了背景光和信号光。汪杰君等^[21]以 Schechner 水下偏振成像模型为基础,增加了目标透射光辐射强度的反演过程,同时引入一个参量对算法进行修正。Huang 等^[12]在 Schechner 模型的基础上考虑了物体的偏振度,同时引入三个参量对算法进行修正。Treibitz 和 Schechner^[5]重新建立了水下偏振成像模型,相比原偏振模型,该模型的原理简单清晰,无需反演退化过程,无需获取水体透射系数和无穷远处背景光强。但是,无论是 Schechner 的新建模型还是传统的通过重构透过率的大气去雾模型,都认为目标反射光是非偏振光,后向散射光是部分偏振光,该类模型对低偏振度(LDOP, Low Degree of Polarization)目标(如木制品、石头、塑料、橡胶和羽毛球等)有一定效果。但对于高偏振度(HDOP, High Degree of Polarization)目标(如金属、涂漆表面、海洋生物和光滑物体等),由于目标反射光是偏振或部分偏振的,该类模型在复原时会出现不可忽略的误差,从而导致 HDOP 物体复原失败^[22]。而实际海水中的人造目标和自然目标多为表面光滑的 HDOP 目标,因此实现水下 HDOP 目标的清晰成像意义重大。Huang 等^[12]考虑了物体的偏振度,但只是取某块背景来估计整个图像范围内的后向散射光偏振度,这种估计存在误差。

以水下 HDOP 目标偏振成像为目的,在文献[5]新建的偏振成像模型基础上,考虑了目标信号反射光的偏振度对最终图像复原的影响,提出了一种对后向散射光偏振度进行全局估计的偏振成像复原算法。所建立的算法模型对 LDOP 和 HDOP 目标均可获得较好的偏振成像效果。

2 基本原理

2.1 Schechner 模型原理

水下主动偏振成像模型如图 1 所示,该模型由可见光光源、起偏器、成像目标、浑浊水体、检偏器和成像系统组成,其中 LED 表示光源,CCD 表示探测相机。其工作过程为:光源发出可见光,经起偏器起偏后成为线偏振光,线偏振光经水中悬浮粒子散射

和目标表面反射后改变传播方向,并进入检偏器,进入检偏器的光以新的偏振方向被成像系统接收。成像系统所接收到的信号 I 中包括目标信息光 T 、目标信息光的前向散射信号 F 以及水中悬浮粒子对光源出射光的后向散射光 B ,后向散射光包括单次后向散射光和多次后向散射光。目标信息光的前向散射光和粒子对光源出射光的多次后向散射光到达成像面的相对占比较小,在模型中未计入。因此,成像系统接收到的光信号 I 表示为

$$I = B + T. \quad (1)$$

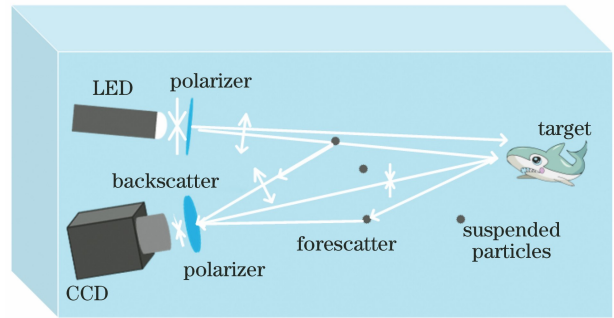


图 1 水下主动偏振成像模型

Fig. 1 Underwater active polarization imaging model

此处考虑后向散射光和目标反射光均为部分偏振光,这种考虑是最符合水下实际情况的。因此,成像系统所接收到的信号光也是部分偏振的,其通过旋转检偏器后会有明暗变化。找到亮度最亮和亮度最暗的两个正交图像,分别记为 I_{\max} 和 I_{\min} ,同时每幅图像也如(1)式所述可分为后向散射光和目标反射光两部分,可表示为

$$\begin{cases} I_{\max} = B_{\max} + T_{\max} \\ I_{\min} = B_{\min} + T_{\min} \end{cases}, \quad (2)$$

式中: B_{\max} 为后向散射光亮度最亮图; B_{\min} 为后向散射光亮度最暗图; T_{\max} 为目标反射光亮度最亮图; T_{\min} 为目标反射光亮度最暗图。

由偏振知识可知,部分偏振光可在两个相互正交的方向上进行分解,因此总体信号光 I 可表示为

$$I = I_{\max} + I_{\min}. \quad (3)$$

由(1)~(3)式得出后向散射光和目标反射光可表示为

$$\begin{cases} B = B_{\max} + B_{\min} \\ T = T_{\max} + T_{\min} \end{cases}, \quad (4)$$

即后向散射光和目标反射光均由两个相互正交的部分组成。根据偏振度的定义,整体信号光、后向散射光和目标反射光的偏振度可分别表示为

$$\begin{cases} P = \frac{I_{\max} - I_{\min}}{I_{\max} + I_{\min}} \\ P_{\text{scat}} = \frac{B_{\max} - B_{\min}}{B_{\max} + B_{\min}}, \\ P_{\text{target}} = \frac{T_{\max} - T_{\min}}{T_{\max} + T_{\min}} \end{cases}, \quad (5)$$

式中： P 为整体信号光偏振度； P_{scat} 为后向散射光偏

振度； P_{target} 为目标反射光偏振度。由(1)、(3)式可得

$$I_{\max} + I_{\min} = B + T. \quad (6)$$

由(2)、(4)、(5)式可得

$$I_{\max} - I_{\min} = P_{\text{scat}} B + P_{\text{target}} T, \quad (7)$$

联立(6)、(7)式,可得后向散射光和目标反射光信号分别为

$$\begin{cases} B = \frac{1}{P_{\text{scat}} - P_{\text{target}}} [I_{\max}(E - P_{\text{target}}) - I_{\min}(E + P_{\text{target}})] \\ T = \frac{1}{P_{\text{scat}} - P_{\text{target}}} [I_{\min}(E + P_{\text{scat}}) - I_{\max}(E - P_{\text{scat}})] \end{cases}, \quad (8)$$

式中： E 为单位矩阵。由(8)式可知,要准确获得目标图像,就必须能准确估计出后向散射光的偏振度 P_{scat} 和目标反射光偏振度 P_{target} 。文献[5]认为,后向散射光的偏振度 P_{scat} 在整个成像区域是均匀稳定的,因此可在无目标的背景处选取一块区域通过求均值获得 P_{scat} 。

$$\hat{p}_{\text{scat}} = \text{mean} \left[\frac{B_{\max}(X_{\text{void}}) - B_{\min}(X_{\text{void}})}{B_{\max}(X_{\text{void}}) + B_{\min}(X_{\text{void}})} \right], \quad (9)$$

式中： $\text{mean}[\cdot]$ 表示对矩阵中的所有元素求平均； X_{void} 为选取的背景区域。由于背景处无目标图像,因此有 $B(X_{\text{void}}) = I(X_{\text{void}})$,则此时 P_{scat} 可表示为

$$\hat{p}_{\text{scat}} = \text{mean} \left[\frac{I_{\max}(X_{\text{void}}) - I_{\min}(X_{\text{void}})}{I_{\max}(X_{\text{void}}) + I_{\min}(X_{\text{void}})} \right], \quad (10)$$

式中： \hat{p}_{scat} 是 P_{scat} 的估计值,是一个标量。 P_{target} 的估计值 \hat{p}_{target} 可以通过三种方法获得。1)取目标反射光信号和后向散射光信号两者互信息值最小时所对应的目标反射光偏振度^[5],但该算法复杂,计算量庞大。2)可以考虑目标反射光是非偏振的,因此取 $\hat{p}_{\text{target}} = 0$ 。3)考虑目标是部分偏振的,取目标反射光偏振度为 $0 \sim 1$ 之间的微小量 \hat{p}_{target} ,通过最优化算法而获得,该思想在文献[12]中体现。将估计值 \hat{p}_{target} 和 \hat{p}_{scat} 代入(8)式,即可得出目标图像为

$$T = \frac{1}{\hat{p}_{\text{scat}} - \hat{p}_{\text{target}}} [I_{\min}(1 + \hat{p}_{\text{scat}}) - I_{\max}(1 - \hat{p}_{\text{scat}})]. \quad (11)$$

2.2 全局估计后向散射光偏振度

在现有偏振成像研究中,多认为后向散射光偏振度 \hat{p}_{scat} 和目标反射光偏振度 \hat{p}_{target} 在成像范围内是均匀的,通过取块估计或者利用其他算法估计得

出单个值,并用其代替整个像面的偏振度。对于目标反射光偏振度 \hat{p}_{target} ,当使用有源偏振光照射 HDOP 目标表面时,由于实质发生的是镜面反射,目标反射光的保偏性较好,且表面均匀,用单一值代替整个像面信号光的偏振度是比较接近实际情况的。但对于后向散射光偏振度 \hat{p}_{scat} ,有目标和没目标区域的散射次数和后向散射光的光程有差别,采用无目标背景区域来估计有目标区域的后向散射光偏振度是存在一定误差的,因此有必要对后向散射光进行全局估计,以提高估计精度。

由(3)、(5)、(7)式可得

$$P_{\text{scat}} = \frac{PI - P_{\text{target}} T}{B}. \quad (12)$$

将(1)、(4)代入(12)式,可得

$$P_{\text{scat}} = \frac{(I_{\max} - I_{\min}) - P_{\text{target}} [(I_{\max} + I_{\min}) - (B_{\max} + B_{\min})]}{B_{\max} + B_{\min}}. \quad (13)$$

由(13)式可知,要准确估计 P_{scat} ,关键在于 P_{target} 、 B_{\max} 和 B_{\min} 的获取。对于 P_{target} ,如前所述,用标量 \hat{p}_{target} 对其大小进行估计,其取值范围为 $[0, 1]$,并通过最优化算法获取其最优值。此估计法的精度是可以保证的,因为在目标区域,受金属表面均匀性和镜面反射效果的影响,目标反射光偏振度是均匀的,可以用单一值代替 P_{target} 。而对于背景区域,由于无目标信号的存在, $(I_{\max} + I_{\min}) - (B_{\max} + B_{\min}) = 0$,其中 0 为零矩阵,因此 P_{target} 的取值也不会对背景区域的 P_{scat} 产生影响。在 I_{\max} 和 I_{\min} 中取同一块背景区域并求均值以获得 B_{\max} 和 B_{\min} ,即

$$\begin{cases} \hat{b}_{\max} = \text{mean}[I_{\max}(\mathbf{X}_{\text{void}})] \\ \hat{b}_{\min} = \text{mean}[I_{\min}(\mathbf{X}_{\text{void}})] \end{cases}, \quad (14)$$

式中： \hat{b}_{\max} 和 \hat{b}_{\min} 分别为 \mathbf{B}_{\max} 和 \mathbf{B}_{\min} 的估计值。将 \hat{p}_{target} 、 \hat{b}_{\max} 和 \hat{b}_{\min} 的估计值代入(13)式得

$$\hat{\mathbf{P}}_{\text{scat}} = \frac{(\mathbf{I}_{\max} - \mathbf{I}_{\min}) - \hat{p}_{\text{target}} [(\mathbf{I}_{\max} + \mathbf{I}_{\min}) - (\hat{b}_{\max} + \hat{b}_{\min})\mathbf{A}]}{\hat{b}_{\max} + \hat{b}_{\min}}, \quad (15)$$

式中： $\hat{\mathbf{P}}_{\text{scat}}$ 为 \mathbf{P}_{scat} 的估计值； \mathbf{A} 为所有元素全为 1 的矩阵。 $\hat{\mathbf{P}}_{\text{scat}}$ 是一个二维矩阵，矩阵元素的值是变化的，即后向散射光偏振度在整幅图像内是变化的，而 \hat{p}_{target} 、 \hat{b}_{\max} 和 \hat{b}_{\min} 是标量，认为它们在整个像面范围内是均匀的。

将 $\hat{\mathbf{P}}_{\text{scat}}$ 代入(8)式，并引入修正参量 ϵ_{scat} 和 ϵ_{target} 对 \mathbf{P}_{scat} 和 $\mathbf{P}_{\text{target}}$ 的估计值进行修正，可得最终目标信号光表达式为

$$\mathbf{T} = \frac{1}{\epsilon_{\text{scat}} \hat{\mathbf{P}}_{\text{scat}} - \mathbf{A} \epsilon_{\text{target}} \hat{p}_{\text{target}}} \cdot [I_{\min}(\mathbf{E} + \hat{\mathbf{P}}_{\text{scat}}) - I_{\max}(\mathbf{E} - \hat{\mathbf{P}}_{\text{scat}})]. \quad (16)$$

2.3 图像质量评价和最优化处理

利用全局估计偏振成像算法对水下偏振图像进行复原时， \hat{p}_{target} 、 ϵ_{scat} 和 ϵ_{target} 三个待定参量对图像的最终复原效果有很大影响。采用图像增强测度 (EME) 对图像进行优化处理^[25]，以寻找三个修正参量的最优值。算法中将原图像灰度值归一化到 0~1 之间进行计算，为了避免灰度值在 0 附近导致的计算失效问题，将原有 EME 的定义修改为

$$E_{\text{EME}} = \frac{1}{k_1 k_2} \sum_{l=1}^{k_2} \sum_{k=1}^{k_1} 20 \log \frac{I_{\max;k,l}(x,y) + 1}{I_{\min;k,l}(x,y) + 1}, \quad (17)$$

式中： E_{EME} 为图像增强测度值； k_1 为图像分割的总行数； k_2 为图像分割的总列数； l 为行编号； k 为列编号； $I_{\max;k,l}(x,y)$ 为第 l 行第 k 列小块区域的最大灰度值； $I_{\min;k,l}(x,y)$ 为第 l 行第 k 列小块区域的最小灰度值； (x,y) 为像素点坐标。

该评价方法的原理是将图像分割为 $k_1 \times k_2$ 个小块区域，用 l 和 k 两个坐标参数对分割的小区域进行编号，先计算每一小块区域中的最大灰度值 $I_{\max;k,l}(x,y)$ 和最小灰度值 $I_{\min;k,l}(x,y)$ 的比值的对数，再计算所有区域的均值，乘以 20 并利用对数函数是为了满足人眼对亮度的感知机理。同时采用图像灰度的平均梯度、标准差和信息熵等常用图像评价指标进行辅助评价。

\hat{p}_{target} 、 ϵ_{scat} 和 ϵ_{target} 三个参量以 EME 为优化目标，采用最优值搜寻算法，寻找 EME 值最大时所对应的参量最优值。由参量的来源可知， \hat{p}_{target} 、 ϵ_{scat} 和 ϵ_{target} 的取值范围为 0~1。三个参量首先在 0~1 范围内以 0.1 为步长进行搜索，寻找 EME 的最大值所对应的取值组合，然后在最大值周围，以 0.01 为步长进行搜索。全局估计偏振成像算法原理如图 2 所示。

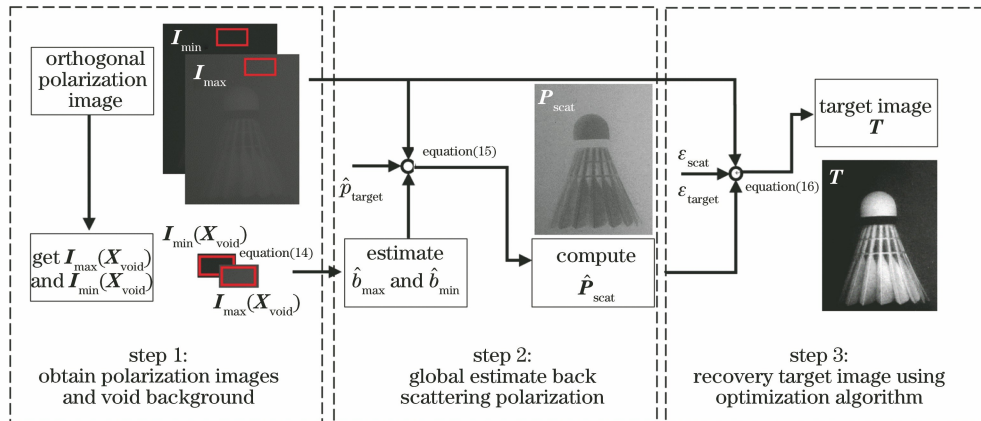


图 2 全局估计偏振成像算法原理

Fig. 2 Principle of polarization imaging algorithm based on global estimation

3 实验与结果分析

3.1 实验平台搭建与图像采集

实验采用白光 LED 光源照明,在光源后方加入一个通光方向为水平方向的线偏振片对照明光进行起偏。起偏器起偏后产生一束线偏振光照入盛有 100 L 浑水的水槽中,对浑浊水中的目标进行照明,目标的反射光通过浑浊水体后进入一个由旋转偏振片构成的偏振分析器进行检偏,最后由 CCD 相机接收光信号。

实验中使用的光源型号为 CREE Q5;起偏器采用恒洋光学公司的 GSP-50 型线偏振片,通光口径为 45.7 mm,消光比为 1:1000,设计波长为 400~700 nm;目标为羽毛球、写字金属体和金属散热片;水槽为有机玻璃水槽,大小为 100 cm×40 cm×40 cm,水槽中的浑水由 80 mL 或 100 mL 的脱脂牛奶与 100 L 水掺兑而成;检偏器采用卓立汉光 OPSP25.4 型线偏振片,通光口径为 20.3 mm,设计波长为 400~700 nm;相机为通用 4K 相机。实验中光源距离目标 60 cm,起偏器紧贴光源,目标距离水槽边缘 50 cm,水槽边缘距离相机 5 cm,检偏器紧贴相机。光源出射光路和目标反射到相机的光路之间的夹角大约为 30°,实验光路原理图如图 3 所示。

实验分别在 100 L 水中加入 80 mL 和 100 mL 脱脂牛奶,并分别拍摄了三个目标的无偏振光强图、

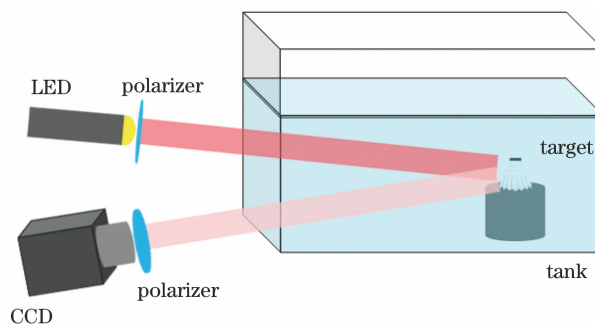


图 3 偏振成像实验的光路图

Fig. 3 Optical path for polarization imaging experiment

最大光强图和最小光强图。

3.2 图像复原和算法对比分析

按照图 2 所描述的全局估计偏振成像算法,对在浑浊水体中拍摄的图像分别进行最优化复原处理,得出 \hat{p}_{target} 、 ϵ_{scat} 和 ϵ_{target} 三个参量的最优值,如表 1 所示。从三个参量的定义可知, \hat{p}_{target} 表示目标反射光的偏振度, ϵ_{scat} 与后向散射光偏振度有关。实际计算结果也验证了此种相关性,如羽毛球为 LDOP 目标, $\hat{p}_{\text{target}} = 0$,而金属是 HDOP 目标, $\hat{p}_{\text{target}} \neq 0$ 。随着浓度的升高,后向散射光发生多次散射的概率增大,因此后向散射光的偏振度相应减小,这与通过最优算法获得的 ϵ_{scat} 随着浓度的升高而降低的结果相吻合。

表 1 修正参量的最优值

Table 1 Optimal values of modified parameters

Parameter	Badminton		Metal block		Cooling fin	
	80 mL milk+ 100 L water	100 mL milk+ 100 L water	80 mL milk+ 100 L water	100 mL milk+ 100 L water	80 mL milk+ 100 L water	100 mL milk+ 100 L water
\hat{p}_{target}	0	0	0.35	0.35	0.33	0.29
ϵ_{scat}	0.26	0.18	0.12	0.07	0.17	0.14
ϵ_{target}	0	0	0	0	0	0

通过全局估计偏振成像算法,得出在 80 mL 牛奶+100 L 水中的三个目标的后向散射光偏振度 \hat{P}_{scat} 的灰度图,如图 4 所示,可以看出,后向散射光偏振度 \hat{P}_{scat} 在整幅图像中的分布是变化的,而非在全图中是均匀一致的,因此对后向散射光进行全局估计是有必要的。

按照表 1 中列出的各目标的 \hat{p}_{target} 、 ϵ_{scat} 和 ϵ_{target} 最优值对拍摄图像进行复原处理。在 80 mL 牛奶+100 L 水中,三个目标的拍摄图和复原结果图

如图 5 所示,其中从左到右分别为实验中拍摄的无偏振图、最大光强图、最小光强图、Schechner 原算法复原图和全局估计偏振成像算法复原图。图 6 是图 5 中原始图、Schechner 原算法处理结果图和本文算法处理结果的灰度直方图。

从图 5 可以看出,本文算法的复原结果在图像清晰度和对比度上相对于未加偏振时拍摄的图像有很大提升。从图 6 可以看出,原始图像的灰度直方图主要集中在部分较窄灰度区域,图像中的细节信息被淹没;经本文算法复原后,图像的灰度直方图分

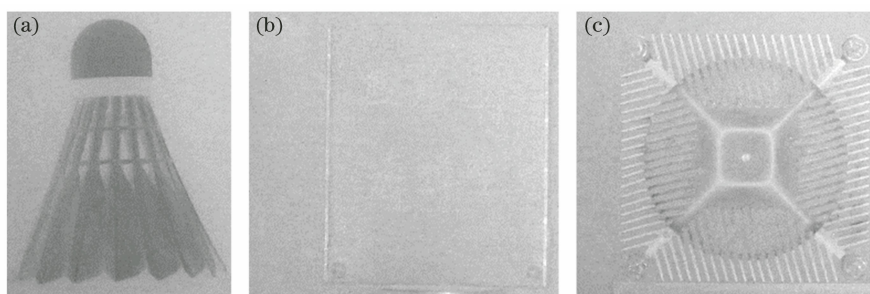


图 4 后向散射光偏振度灰度图。(a)羽毛球;(b)金属块;(c)金属散热片
Fig. 4 Gray-scale images of degree of polarization of backscattered light.
(a) Badminton; (b) metal block; (c) metal cooling fin

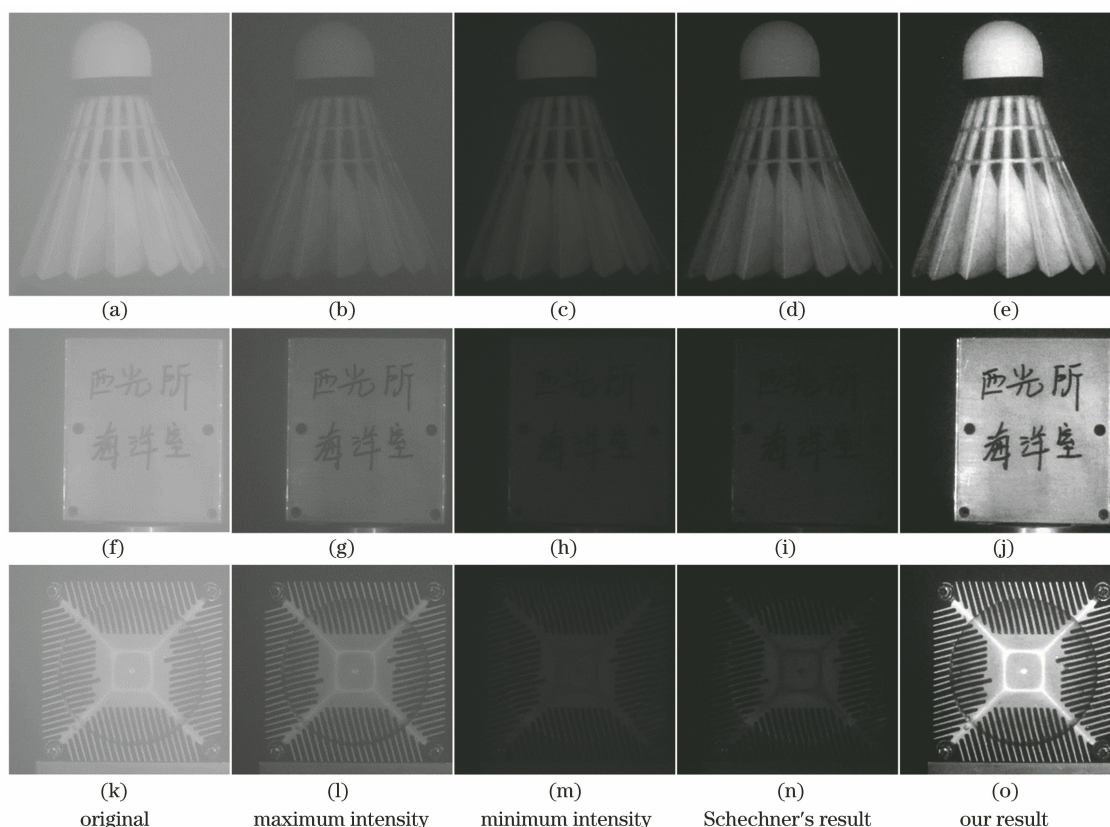


图 5 复原图像对比

Fig. 5 Comparison of restored images

布更加均匀,灰度信息被拉伸,对比度得到提升,目标的边缘细节得到增强。从图 5、6 中可以看出,全局估计偏振成像算法的复原效果远好于 Schechner 原算法。Schechner 原算法对后向散射光偏振度采用单值估计,且认为目标反射光为非偏振光,该估计对于羽毛球这种 LDOP 目标有一定效果,但是对于 HDOP 目标,由于实际上发生的是镜面反射,将其表面反射光考虑为非偏振光的估计方式与实际情况相差较远,因此复原效果差。而本文的全局估计偏振成像算法考虑了目标反射光偏振度,且将后向散射光偏振度进行全局估计,实际复原情况表明,全局

估计偏振成像算法不仅对 LDOP 目标可以得到很好的复原效果,对于表面光滑的 HDOP 目标同样可以取得很好的复原效果。

利用 EME、图像灰度的平均梯度、图像灰度的标准差和图像信息熵 4 个指标对复原图像进行客观评价。100 L 水+80 mL 牛奶中的复原图像的评价结果如表 2 所示。从评价结果可以看出,无论是 LDOP 目标还是 HDOP 目标,本文算法的复原结果相对于无偏振图像的 EME 提升了一个数量级,相对于 Schechner 原算法的 EME 提升了 90% 以上,可见本文算法同时适用于水下 LDOP 和 HDOP 目

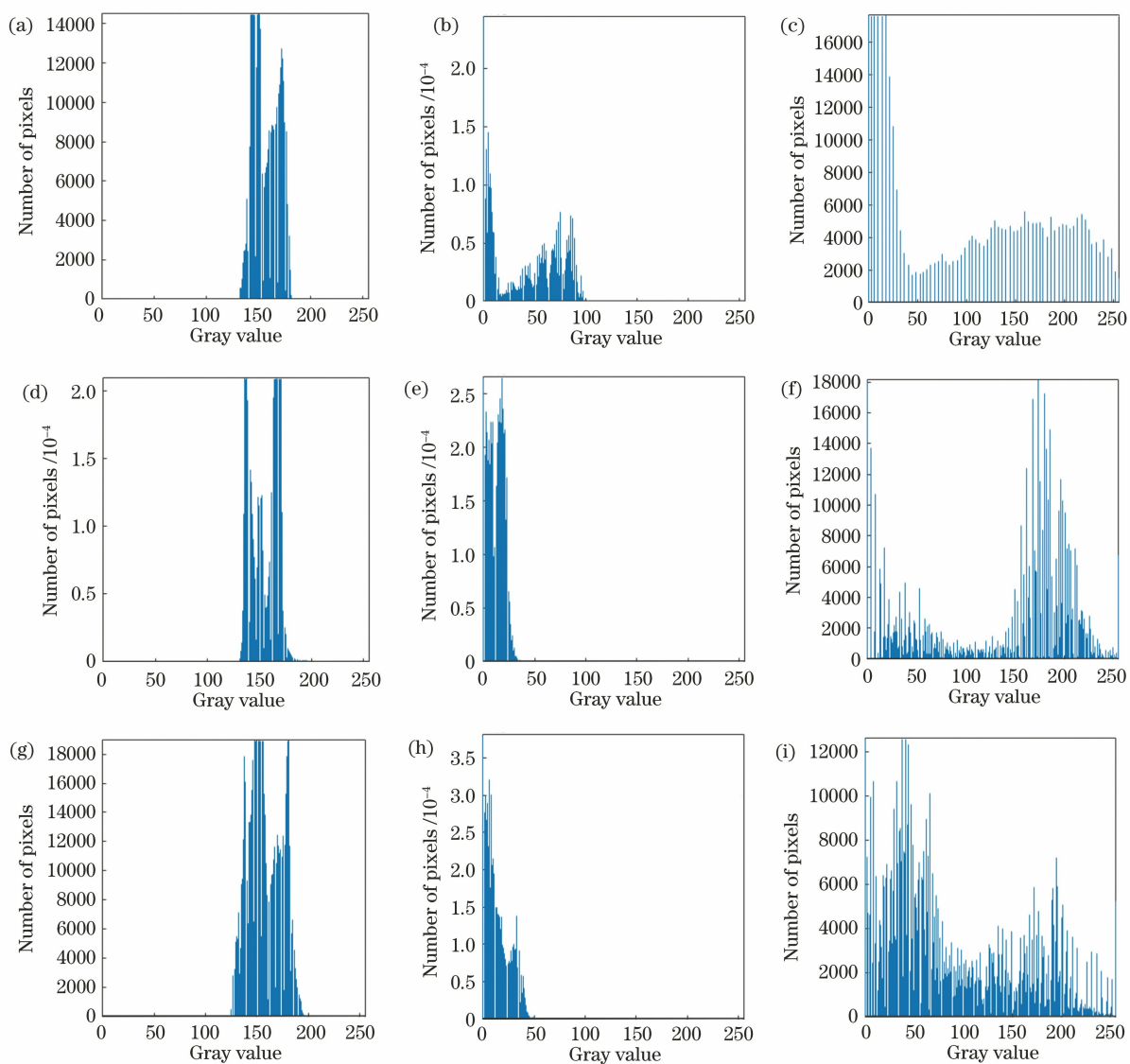


图 6 复原结果的直方图对比

Fig. 6 Histogram comparison of restored results

表 2 复原图像的评价结果

Table 2 Evaluation results of restored images

Evaluation index	Badminton			Metal block			Cooling fin		
	Original image	Schechner's result	Our result	Original image	Schechner's result	Our result	Original image	Schechner's result	Our result
EME	0.218	0.889	1.971	0.223	0.817	2.016	0.595	0.929	3.703
Average gradient	0.002	0.005	0.014	0.002	0.005	0.015	0.004	0.005	0.022
Standard deviation	0.045	0.131	0.327	0.051	0.033	0.311	0.060	0.046	0.281
Information entropy	5.058	5.078	5.200	4.909	4.433	6.540	5.663	4.553	7.335

标。相比 Schechner 原算法,本文算法对 HDOP 目标的复原有着较明显的提升效果。

4 结 论

以 Schechner 偏振成像模型为基础,对后向散

射光偏振度进行了全局估计,并且考虑了目标反射光偏振度,通过引入三个参量,重构了偏振成像算法模型。从全局估计偏振成像算法估计得出的后向散射光偏振度灰度图可以看出,后向散射光偏振度在整幅图像中的分布是变化的,而非在全图中是均匀一致的,因此对后向散射光偏振度进行全局估计是有必要的。通过对不同偏振度水下目标图像进行复原,可以看出,无论是人眼实际观测效果还是客观图像评价结果,所提算法对不同目标的复原质量均优于 Schechner 原算法。由于考虑了物体本身的偏振特性,所提算法同时适用于 LDOP 和 HDOP 目标,克服了原算法只适用于 LDOP 目标的缺陷。研究结果为浑浊水下偏振成像图像的复原提供了参考。

参 考 文 献

- [1] Watson J. Underwater visual inspection and measurement using optical holography [J]. *Optics and Lasers in Engineering*, 1992, 16(4/5): 375-390.
- [2] Bailey G N, Flemming N C. Archaeology of the continental shelf: marine resources, submerged landscapes and underwater archaeology [J]. *Quaternary Science Reviews*, 2008, 27 (23/24): 2153-2165.
- [3] 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.
- [4] Lewis G D, Jordan D L, John Roberts P. Backscattering target detection in a turbid medium by polarization discrimination [J]. *Applied Optics*, 1999, 38(18): 3937-3944.
- [5] Treibitz T, Schechner Y Y. Active polarization descattering [J]. *IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence*, 2009, 31(3): 385-399.
- [6] Chang P, Flitton J C, Hopcraft K I, et al. Improving visibility depth in passive underwater imaging by use of polarization [J]. *Applied Optics*, 2003, 42(15): 2794-2803.
- [7] Wolff L B. Polarization vision: a new sensory approach to image understanding [J]. *Image and Vision Computing*, 1997, 15(2): 81-93.
- [8] Sabbah S, Lerner A, Haspel C, et al. Under water polarization vision—a physical examination [EB/OL]. (2005-01-07) [2020-01-18]. https://www.researchgate.net/profile/Carynelisa_Haspel/publication/255626764_Under_water_polarization_vision_A_physical_examination/links/0a85e537c752960ca5000000.pdf.
- [9] Giakos G C. Active backscattered optical polarimetric imaging of scattered targets [J]. *Proceedings of the IEEE*, 2004, 88(6): 6726415.
- [10] Cariou J, Le Jeune B, Lotrian J, et al. Polarization effects of seawater and underwater targets [J]. *Applied Optics*, 1990, 29(11): 1689-1695.
- [11] Li X B, Hu H F, Zhao L, et al. Polarimetric image recovery method combining histogram stretching for underwater imaging [J]. *Scientific Reports*, 2018, 8(1): 12430.
- [12] 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.
- [13] Yang L M, Liang J, Zhang W F, et al. Underwater polarimetric imaging target enhancement technology based on unpolarized illumination [J]. *Acta Optica Sinica*, 2018, 38(6): 0611003.
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.
- [14] Schechner Y Y, Karpel N. Clear underwater vision [C]//*Proceedings of the 2004 IEEE Computer Society Conference on Computer Vision and Pattern Recognition*, June 27-July 2, 2004, Washington, DC, USA. New York:IEEE, 2004: 8161435.
- [15] Guan J G, Zhu J P, Tian H, et al. Real-time polarization difference underwater imaging based on Stokes vector [J]. *Acta Physica Sinica*, 2015, 64(22): 224203.
管今哥, 朱京平, 田恒, 等. 基于 Stokes 矢量的实时偏振差分水下成像研究 [J]. *物理学报*, 2015, 64(22): 224203.
- [16] Tyo J S, Rowe M P, Pugh E N, et al. Target detection in optically scattering media by polarization-difference imaging [J]. *Applied Optics*, 1996, 35(11): 1855-1870.
- [17] Tian H, Zhu J P, Zhang Y Y, et al. Image contrast for different imaging methods in turbid media [J]. *Acta Physica Sinica*, 2016, 65(8): 084201.
田恒, 朱京平, 张云尧, 等. 浑浊介质中图像对比度与成像方式的关系 [J]. *物理学报*, 2016, 65(8): 084201.
- [18] Miller P C, Caprari R S. Demonstration of improved automatic target-recognition performance by moment analysis of correlation peaks [J]. *Applied Optics*, 1999, 38(8): 1325-1331.
- [19] Dubreuil M, Delrot P, Leonard I, et al. Exploring underwater target detection by imaging polarimetry and correlation techniques [J]. *Applied Optics*, 2013, 52(5): 997-1005.

- [20] Schechner Y Y, Karpel N. Recovering scenes by polarization analysis [C]//Oceans' 04 MTS/IEEE Techno-Ocean' 04, November 9-12, 2004, Kobe, Japan. New York: IEEE, 2004: 8304660.
- [21] Wang J J, Liang L, Li S, et al. Correction and implementation of polarization-difference imaging model for underwater target[J]. Acta Optica Sinica, 2019, 39(11): 1111003
汪杰君, 梁磊, 李树, 等. 水下目标偏振差分成像模型修正与实现 [J]. 光学学报, 2019, 39 (11): 1111003.
- [22] Hu H F, Li X B, Liu T G. Recent advances in underwater image restoration technique based on polarimetric imaging [J]. Infrared and Laser Engineering, 2019, 48(6): 603006
- 胡浩丰, 李校博, 刘铁根. 基于偏振成像的水下图像复原技术研究最新进展 [J]. 红外与激光工程, 2019, 48(6): 603006.
- [23] Schechner Y Y, Narasimhan S G, Nayar S K. Polarization-based vision through haze [J]. Applied Optics, 2003, 42(3): 511-525.
- [24] Treibitz T, Schechner Y Y. Instant 3Descatter[C]//2006 IEEE Computer Society Conference on Computer Vision and Pattern Recognition, June 17-22, 2006, New York, NY, USA. New York: IEEE, 2006: 1861-1868.
- [25] Agaian S S, Panetta K, Grigoryan A M. Transform-based image enhancement algorithms with performance measure [J]. IEEE Transactions on Image Processing, 2001, 10(3): 367-382.