

浑浊介质下的偏振差分关联成像研究

李宜泽^{1,2}, 邓陈进^{1,2*}, 龚文林^{1,2}, 韩申生^{1,2,3}

¹中国科学院上海光学精密机械研究所量子光学重点实验室, 上海 201800;

²中国科学院大学, 北京 100049;

³中国科学院大学杭州高等研究院, 浙江 杭州 310024

摘要 为提高浑浊介质下关联成像系统的成像质量, 提出了一种基于直方图预处理的水下偏振差分关联成像方法。首先, 通过偏振探测获取两个正交偏振方向的关联成像图像, 然后, 借助图像的灰度拉伸方法对重构图像进行预处理, 最后, 运用偏振差分算法得到目标图像。实验结果表明, 所提方法可以改善浑浊水体下散射所造成的像质退化问题, 增强图像细节, 提高成像质量。利用重建图像的灰度直方图进行灰度统计分析表明, 相比于现有偏振关联成像方法, 该方法在水体介质浑浊浓度较高的情况下仍可以区分浑浊介质与目标。

关键词 成像系统; 关联成像; 偏振差分; 灰度拉伸; 散射介质

中图分类号 O436

文献标志码 A

doi: 10.3788/AOS202141.1511004

Polarization Difference Ghost Imaging in Turbid Medium

Li Yize^{1,2}, Deng Chenjin^{1,2*}, Gong Wenlin^{1,2}, Han Shensheng^{1,2,3}

¹Key Laboratory of Quantum Optics, Shanghai Institute of Optics and Fine Mechanics, Chinese Academy of Sciences, Shanghai 201800, China;

²University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China;

³Hangzhou Institute for Advanced Study, University of Chinese Academy of Sciences, Hangzhou, Zhejiang 310024, China

Abstract To improve the imaging quality of ghost imaging systems in turbid media, we propose an underwater polarization difference ghost imaging method based on histogram preprocessing. Firstly, two images in orthogonal polarization directions are acquired by polarization detection. Then, the images are preprocessed by gray-scale stretching. Finally, the reconstructed image is obtained with the polarization difference algorithm. Experimental results show that proposed method can not only improve the image quality degraded by scattering in turbid media but also enhance image details. In addition, compared with the existing polarization ghost imaging method, the gray-scale statistical analysis using the gray-scale histograms of the reconstructed images shows that when the medium has a higher turbidity concentration, the proposed method can still distinguish the target from the turbid medium.

Key words imaging systems; ghost imaging; polarization difference; gray-scale stretching; turbid medium

OCIS codes 110.1758; 260.5430; 110.0113

1 引言

关联成像(GI)是一种基于光场涨落关联的计

算成像技术^[1-2]。与传统成像不同, GI系统中采用随机散斑照射目标, 通过单像素探测器接收目标反射或者透射信号, 最后通过计算强度关联函数重建

收稿日期: 2020-12-30; 修回日期: 2021-01-22; 录用日期: 2021-03-09

基金项目: 国防基础科研计划(D040301)、中国科学院青年创新促进会优秀会员基金(Y201740)、国家自然科学基金(61991454)

通信作者: *dcj@siom.ac.cn

目标图像^[1-3]。由于 GI 具有高探测灵敏度、抗干扰等优势特点^[4-7],在遥感、三维成像、生物软组织成像等领域有着重要应用前景^[7-12]。2010 年,本课题组较早开展了散射介质中的关联成像理论和实验研究,证明了关联成像技术可以一定程度上改善散射引起的像质退化问题^[7],并通过室外公里级雾天环境下的激光关联成像进一步验证其有效性^[6]。随后,研究人员引入了一些新技术,以进一步提升浑浊或散射介质下的关联成像质量,比如差分鬼成像^[12]、记忆效应^[13]、压缩感知^[14]等。关联成像技术与传统成像不同的是,目标与探测系统之间的散射对关联成像质量几乎无影响^[15],而照明光源与目标之间的散射导致空间关联性的退化是引起关联成像质量下降的主要原因,从而影响浑浊介质或者水下环境下的目标探测与识别。因此,要想大幅度提升浑浊介质下的关联成像能力,其核心在于增强弹道光信号强度或者抑制散射介质引起的散射光信号进入单像素探测器。

近年来,基于光偏振特性的偏振成像技术受到了许多关注^[16-18]。由于目标和环境的偏振特性不同,可以通过对光波偏振特性的检测,从浑浊和散射介质中获取目标的清晰图像,该技术已在生物组织成像、烟雾环境成像以及水下目标成像中得到了相关应用^[19-22]。借鉴传统光学成像中的偏振测量方法,已有实验表明,在无混浊介质的条件下,将偏振测量与关联成像相结合的偏振差分关联成像区分待测目标和背景时极其有效^[23-25]。然而,浑浊或者散射介质下的偏振差分关联成像目前还未见过报道。本文实验上分析了浑浊介质的浓度变化对偏振差分关联成像的影响,发现偏振差分关联成像质量随着浑浊介质浓度的增加急剧退化。在此基础上,结合正交偏振图像直方图拉伸处理技术^[26],提出了一种基于直方图预处理的偏振差分关联成像方法,用以提升浑浊介质下的关联成像质量,并且通过实验证明了所提方法的有效性。

2 成像模型与图像重建算法

2.1 基于偏振测量的关联成像

图 1 为基于数字微镜器件(DMD)的浑浊介质偏振关联成像原理图。激光器出射的线偏振激光经过 DMD 的空间调制形成散斑场,该散斑场依次通过与激光器同偏振方向的偏振片、浑浊介质后辐照于待测目标上。经目标反射后的光子经过浑浊介质和选偏器后,由单像素光电倍增管(PMT)探测目标

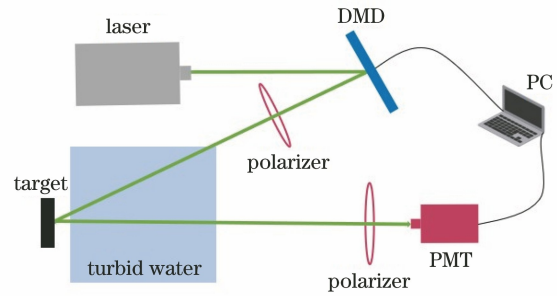


图 1 浑浊介质偏振关联成像原理结构图

Fig. 1 Principle structure of turbid media polarization GI reflected signal.

根据傅里叶光学和关联成像理论^[3,27],浑浊介质关联成像系统第 k 次照明时 PMT 接收到的信号 I_k 可以表达为

$$I_k = \int [A_k(x, y) + A_s(x, y)] t(x, y) dx dy, \quad (1)$$

式中: $A_k(x, y)$ 表示 DMD 上生成的第 k 次散斑场的空间分布; $A_s(x, y)$ 表示目标与光源之间因浑浊介质而引起的散斑畸变量; $t(x, y)$ 表示待测目标的空间幅度分布。根据关联成像原理^[2-3],无偏振检测时的关联成像结果为

$$O_{GI}(x, y) = \langle I_k - \langle I_k \rangle \rangle \langle A_k(x, y) - \langle A_k(x, y) \rangle \rangle, \quad (2)$$

式中: $\langle \cdot \rangle$ 表示系综平均。已有大量实验结果表明,浑浊或者散射介质会改变光场的偏振特性^[19-21]。因此,根据目标和浑浊介质的偏振特性差异,借助正交偏振探测手段^[23]可以获取 0° 和 90° 偏振信息,并利用关联成像方法得到的偏振图像 O_{PGI}^m 为

$$O_{PGI}^m(x, y) = \langle I_k^m - \langle I_k^m \rangle \rangle \langle A_k(x, y) - \langle A_k(x, y) \rangle \rangle, \quad (3)$$

式中: m 表示偏振方向的角度为 0° 或 90° ; I_k^m 表示偏振方向为 m 条件下第 k 次 PMT 探测得到的信号。

2.2 偏振差分关联成像重建算法

考虑到各类物体偏振特性的不同,将偏振测量与关联成像结合的偏振差分关联成像在区分没有浑浊介质干扰情况下的待测目标和背景时是比较有效的^[24-25]。然而,在实际应用过程中,往往存在烟雾、水体等散射环境对光学成像系统的干扰。当采用线偏振激光照明处于浑浊介质中的目标和 $0^\circ/90^\circ$ 正交偏振测量时,基于偏振差分关联成像^[24],得到的偏振图像 $O_{PGI}^0(x, y)$ 和 $O_{PGI}^{90}(x, y)$ 可表示为

$$\begin{cases} O_{PGI}^0(x, y) = T_0(x, y) + B_0(x, y) \\ O_{PGI}^{90}(x, y) = T_{90}(x, y) + B_{90}(x, y) \end{cases}, \quad (4)$$

式中: $T_0(x, y)$ 与 $T_{90}(x, y)$ 分别表示偏振方向为 0° 和 90° 条件下目标的直接透射光; 由于目标和照明光源之间的浑浊介质会导致散斑场发生畸变, $B_0(x, y)$ 和 $B_{90}(x, y)$ 为偏振方向 0° 和 90° 条件下因散斑畸变形成的干扰图像。

由于散斑畸变主要源于浑浊介质, 根据偏振度的定义^[28], 目标区域偏振度 p_{obj} 和目标外的浑浊介质区域偏振度 p_{bg} 表示为

$$\begin{cases} p_{\text{obj}} = \frac{T_0(x, y) - T_{90}(x, y)}{T_0(x, y) + T_{90}(x, y)} \\ p_{\text{bg}} = \frac{B_0(x, y) - B_{90}(x, y)}{B_0(x, y) + B_{90}(x, y)} \end{cases} \quad (5)$$

根据(4)式, 目标图像和干扰图像同样可以表示为 0° 、 90° 偏振分量之和, 即:

$$\begin{cases} O_T = T_0(x, y) + T_{90}(x, y) \\ O_B = B_0(x, y) + B_{90}(x, y) \end{cases} \quad (6)$$

结合(4)~(6)式, 可以得到:

$$\begin{cases} O_{\text{PGI}}^0 + O_{\text{PGI}}^{90} = O_T + O_B \\ O_{\text{PGI}}^0 - O_{\text{PGI}}^{90} = p_{\text{obj}} O_T + p_{\text{bg}} O_B \end{cases} \quad (7)$$

将(7)式合并化简可以得到:

$$O_T(p_{\text{obj}} - p_{\text{bg}}) = O_{\text{PGI}}^0(1 - p_{\text{bg}}) - O_{\text{PGI}}^{90}(1 + p_{\text{bg}}) \quad (8)$$

因此, 根据(8)式, 所得到关于目标 O_T 的偏振差分关联成像 $O_{\text{PDGI}}(x, y)$ 结果为

$$O_{\text{PDGI}}(x, y) = \frac{1}{p_{\text{bg}} - p_{\text{obj}}} \times [O_{\text{PGI}}^{90}(x, y)(1 + p_{\text{bg}}) - O_{\text{PGI}}^0(x, y)(1 - p_{\text{bg}})] \quad (9)$$

2.3 基于直方图预处理的偏振差分关联成像重建算法

随着浑浊度增大, 偏振差分成像算法很难在高浓度下将目标信息从浑浊介质中分离, 这是因为随着浑浊度的增大, 目标区域 $T(x, y)$ 越来越小, 浑浊介质所带来的干扰 $B(x, y)$ 越来越大, 二者的比值, 即信杂比 $\gamma = \langle T(x, y) \rangle / \langle B(x, y) \rangle$ 逐渐降低, 图像的灰度动态范围被压缩到很窄的范围内, 造成图像的对比特过低。而利用直方图预处理技术导致的对比度增强可以补偿图像在视觉以及后续算法处理上难以区分灰度级的问题, 使图像具有高对比度的外观并展示灰色调的较大变化, 利用其他算法进行后续处理的结果会更好, 并提升高浓度环境下的成像质量^[26, 28-30]。因此, 本文将 Li 等^[26] 提出的直方图预处理技术引入到偏振差分关联成像中以期望提升浑浊介质中的偏振关联成像质量。基于正交偏振

图像直方图拉伸方法, 在进行偏振差分处理之前, 需要对正交偏振测量所得到的关联成像结果 $O_{\text{PGI}}^0(x, y)$ 与 $O_{\text{PGI}}^{90}(x, y)$ 进行图像预处理。首先将 $O_{\text{PGI}}^0(x, y)$ 变换为

$$O_{\text{est}}^{90}(x, y) = \frac{O_{\text{PGI}}^{90}(x, y) - \min[O_{\text{PGI}}^{90}(x, y)]}{\max\{O_{\text{PGI}}^{90}(x, y) - \min[O_{\text{PGI}}^{90}(x, y)]\}} \quad (10)$$

式中: $O_{\text{est}}^{90}(x, y)$ 表示预处理后的 90° 偏振方向图像。根据偏振度的定义^[25], 关联成像的图像偏振度 p_{GI} 定义为

$$p_{\text{GI}}(x, y) = \frac{O_{\text{PGI}}^0(x, y) - O_{\text{PGI}}^{90}(x, y)}{O_{\text{PGI}}^0(x, y) + O_{\text{PGI}}^{90}(x, y)} \quad (11)$$

根据(11)式可以得到 0° 偏振方向图像的预处理结果:

$$O_{\text{est}}^0(x, y) = \frac{1 + p_{\text{GI}}(x, y)}{1 - p_{\text{GI}}(x, y)} O_{\text{est}}^{90}(x, y) \quad (12)$$

最后, 将得到的 $O_{\text{est}}^{90}(x, y)$ 与 $O_{\text{est}}^0(x, y)$ 分别替换掉(9)式中的 $O_{\text{PGI}}^{90}(x, y)$ 与 $O_{\text{PGI}}^0(x, y)$, 便可得到基于直方图预处理的偏振差分关联成像的结果:

$$O_{\text{HPDGI}}(x, y) = \frac{1}{p_{\text{bg}} - p_{\text{obj}}} \times [O_{\text{est}}^{90}(x, y)(1 + p_{\text{bg}}) - O_{\text{est}}^0(x, y)(1 - p_{\text{bg}})] \quad (13)$$

对于基于灰度直方图预处理的偏振差分关联成像重建算法, 选用 $O_{\text{PGI}}^{90}(x, y)$ 进行估算而不是用 $O_{\text{PGI}}^0(x, y)$ 的原因是: 系统发射端采用 90° 偏振光照明目标, 经目标反射的直接透射光在偏振方向为 90° 的方向上携带更多偏振信息, 即使在浓度变大时, 该方向的偏振信息相比其他偏振方向的偏振信息受浑浊介质的影响较弱, 而后续通过正交偏振探测的方法, 可以有效获取并利用该方向的偏振信息。同时, 旋转到该偏振方向的选偏器也会阻挡其他偏振方向的散射光进入 PMT, 从而一定程度上减弱散射所导致的探测信噪比降低问题。

3 实验与讨论

为了分析浑浊介质对偏振差分关联成像质量的影响以及验证基于直方图预处理的偏振差分关联成像算法的有效性, 搭建了如图 2 所示的实验装置。选用波长为 532 nm、重复频率为 1 kHz、偏振方向为 90° 的脉冲激光器作为照明光源, 激光束经过扩束镜扩束后辐照于 DMD 上, 依次经过焦距为 120 mm 的发射透镜和偏振方向为 90° 的偏振片后照射到浑浊介质和待测目标上。然后, 经目标反射

的光依次经过浑浊介质、选偏器与会聚透镜,最后经由分束器(BS)将会聚的光 1:1 分束到 PMT 与电荷耦合元件(CCD)上,其中 CCD 的具体型号为 AVT Stringray 504B,主要用于获取不同偏振角下的偏振图像,以便于进行成像对比实验。另外,选偏器采用机械旋转的偏振片来筛选偏振方向为 0° 和 90° 的探测信号;实验选用计算机预先生成的哈达玛矩阵对

激光进行空间调制产生散斑场,DMD 的尺寸为 $1024 \text{ pixel} \times 768 \text{ pixel}$,其中采用中间 $512 \text{ pixel} \times 512 \text{ pixel}$ 用于成像;DMD 的镜元尺寸为 $13.68 \mu\text{m}$,将 8×8 块镜元合并为 1 个分辨单元,所对应的目标图像大小为 $64 \text{ pixel} \times 64 \text{ pixel}$ 。实验过程中,脉冲激光器、DMD 和 PMT 在同步系统的控制下完成数据采集。

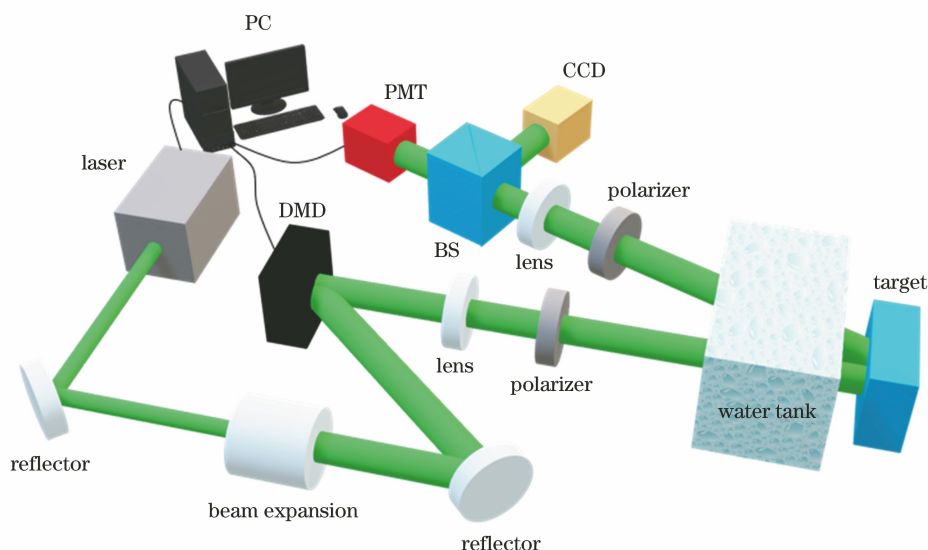


图 2 浑浊介质下偏振差分关联成像实验装置图

Fig. 2 Polarization ghost imaging experimental device in turbid media

选用形状为字母“H”的塑料作为待测目标,如图 3(a)所示。浑浊介质选用水与牛奶的混合液体,该浑浊介质装在如图 3(b)所示的 $200 \text{ mm} \times 200 \text{ mm} \times 150 \text{ mm}$ 玻璃水箱里。实验中向装满清水的水箱中注入不同量的牛奶(蛋白质含量 $3.2 \text{ g}/100 \text{ ml}$ 、脂肪含量 $3.8 \text{ g}/100 \text{ ml}$)以改变介质浑浊度,共设置了 4 种环境,分别对应 1.0 ml 、 1.5 ml 、 2.0 ml 、 2.5 ml 的牛奶添加量。其中在注入 2.5 ml 牛奶下 CCD 相机拍摄得到的偏振方向为

0° 和 90° 的图像如图 3(c)和(d)所示。由于目标具有一定的保偏特性,当采用偏振方向为 90° 的偏振照明时,目标反射后的光在该方向上偏振特性较高。同时,由于浑浊介质无保偏特性,当采用正交偏振探测时,将选偏器旋转到 90° 偏振方向时可以获取 90° 方向保偏光和混浊介质散射后 90° 偏振方向的目标信号光,而选偏器在偏振方向为 0° 方向时,只能获取浑浊介质因散射作用导致退偏后的 0° 偏振方向的目标反射光信号。因此,CCD 在偏振方向为 90°

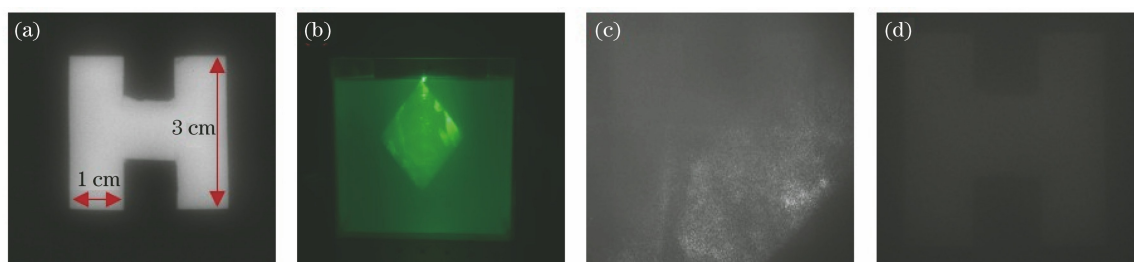


图 3 实验结果。(a)塑料目标;(b)浑浊介质环境;(c)牛奶添加量为 2.5 ml 时 CCD 相机在选偏器为 0° 时拍摄的图像;(d)牛奶添加量为 2.5 ml 时 CCD 相机在选偏器为 90° 时拍摄的图像

Fig. 3 Experimental results. (a) Plastic target; (b) turbid media environment; (c) image taken by CCD camera when the polarizer is 0° with the amount of milk at 2.5 ml ; (d) image taken by CCD camera when the polarizer is 90° with the amount of milk at 2.5 ml

的偏振测量结果比偏振方向 0° 的情况要好。

利用图 2 的实验装置,在去掉选偏器时,采用 CCD 相机对处于四种浓度混浊介质下的目标进行拍照,作为浑浊介质下关联成像实验环境的参考,其结果如图 4(a)中 $O_{TR}(x, y)$ 所示,从左到右曝光时间分别为 400 ms、600 ms、800 ms、1.5 s,可以发现,随着浑浊介质浓度的提高,目标逐渐被浑浊介质淹没,在浓度较高时已无法识别目标的细节和位置。图 4(b)为无偏振测量的关联成像结果 $O_{GI}(x, y)$; 图 4(c)、(d)分别为采用 0° 和 90° 偏振测量所得到的偏振关联图像结果 $O_{PGI}^0(x, y)$ 和 $O_{PGI}^{90}(x, y)$; 图 4(e)为基于直方图预处理的偏振差分关联算法得到处理结果 $O_{HPDGI}(x, y)$; 图 4(f)为偏振差分关联算法得到处理结果 $O_{PDGI}(x, y)$ 。

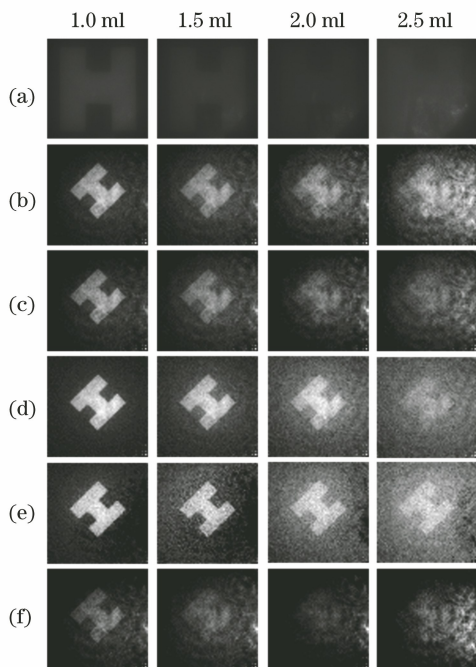


图 4 不同浑浊浓度下的实验结果。(a)无偏振测量时传统成像结果;(b)无偏振测量时关联成像结果;(c)(d) 0° 和 90° 正交偏振测量关联成像结果;(e)基于直方图预处理偏振差分关联成像结果;(f)偏振差分关联成像结果

Fig. 4 Experimental results at different turbidity concentrations. (a) Results of CCD camera without polarization detection; (b) results of GI without polarization detection; (c)(d) results of 0° polarization and 90° polarization GI, respectively; (e) results of polarization difference GI based on histogram preprocessing; (f) results of polarization difference GI

从图 4(b)重建结果可以发现,随着牛奶剂量的增大,水体浑浊度不断提高,浑浊介质对系统发射端干扰逐渐增大,产生散斑畸变现象逐渐明显,进而导致无偏振测量下的关联成像质量越来越差,目标细节难以分辨。此外,对比图 4(c)和(d)的实验结果看出,图 4(d)的结果优于图 4(c),其原因与 CCD 拍摄得到的图 3(c)和(d)结果解释相类似,这里不赘述。而利用 90° 方向偏振照明与 $0^\circ/90^\circ$ 正交偏振测量的方式可以改善浑浊介质下的关联成像质量,且图 4(d)的结果优于图 4(b),这是因为接收端的 90° 偏振测量可以过滤目标与照明光源之间的非 90° 偏振方向畸变散斑场,提升了探测信噪比。与图 4(b)和(d)相比,在浓度为 2.5 ml 的条件下,本文所提的基于直方图预处理偏振差分关联成像所重建的图像仍可以还原与识别出目标的位置与细节。该方法在不改变原有偏振状态的情况下,利用 90° 偏振方向图像提高目标在浑浊介质中的对比度,并借助原有偏振信息恢复 0° 偏振方向图像,随后将预处理的两张偏振图像进行偏振差分运算可得到优于图 4(b)和(d)的成像结果。此外,我们发现,随着水体浑浊程度不断提高,由于目标区域与浑浊介质区域之间的偏振差异逐渐降低,导致现有的偏振差分关联成像算法完全失效。

为了对上文所述的 4 种不同处理结果进行评价,利用图像的灰度直方图对不同浑浊程度的重建结果进行统计分析^[31],结果如图 5 所示。第 1~4 列分别对应于以下 4 种算法:偏振差分关联算法、无偏振测量的关联成像算法、偏振方向为 90° 的偏振测量关联成像算法和基于直方图预处理偏振差分关联算法。从图 5 结果可以得到,随着牛奶添加量的不断增大,采用偏振差分关联算法得到的第一列结果始终不好。采用无偏振测量的关联成像算法和偏振方向为 90° 的偏振测量关联成像算法得到的第二列与第三列结果在浓度为 2.0 ml 时,目标的灰度分布与浑浊介质的灰度分布开始出现明显的交叠,而在 2.5 ml 时得到的结果已经无法从直方图中分辨目标与浑浊介质灰度分布的具体位置,二者的灰度信息完全交叠在一起。利用本文方法得到的结果,在 4 种浑浊介质浓度下均可以有效区分目标与浑浊介质的灰度分布区间^[30],其结果均优于其他三种算法处理的结果,说明基于直方图预处理的偏振差分关联算法具备更好的目标识别能力与成像质量^[26,32-33],并且该结果与图 4 所示的重构结果相吻合。

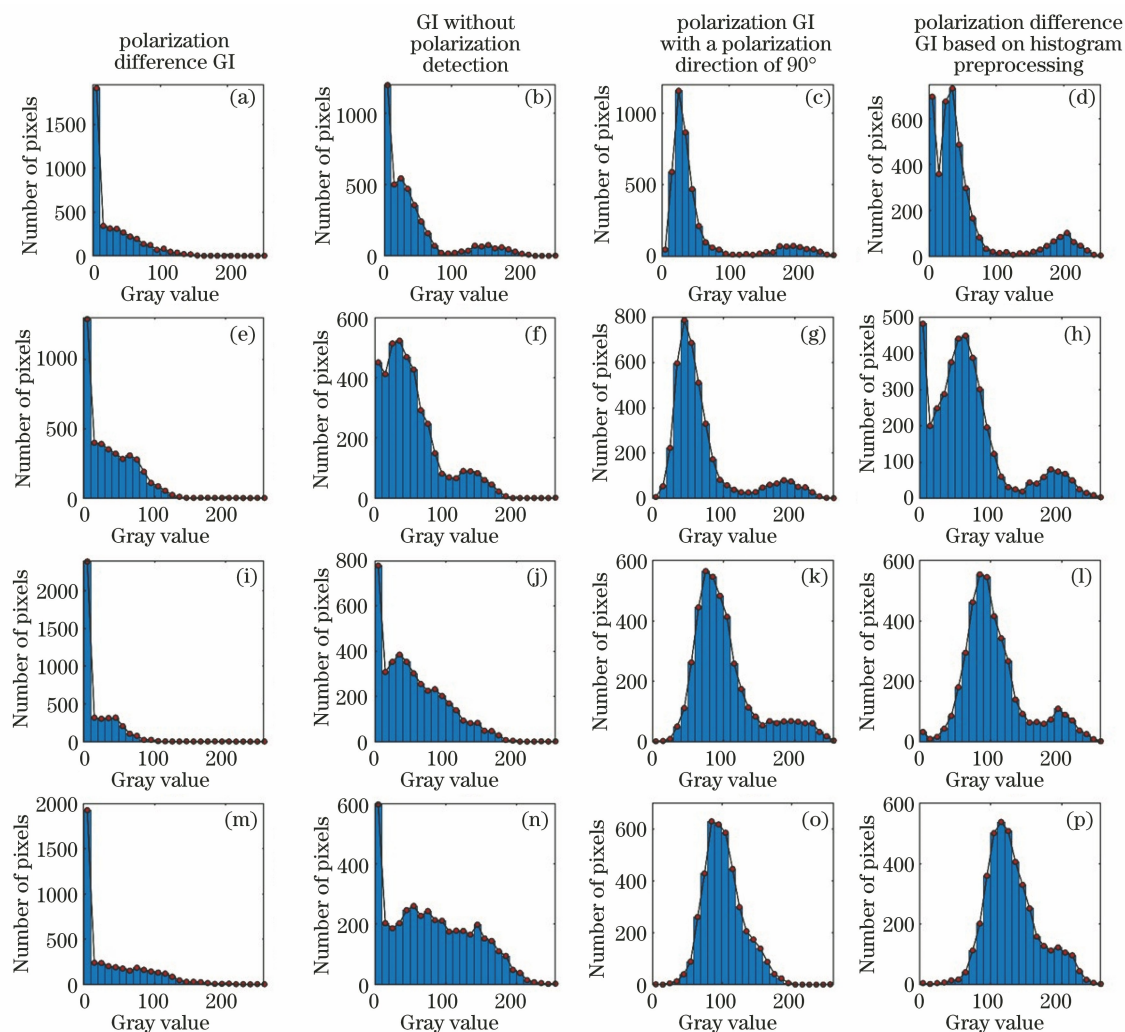


图 5 不同浓度下的重建图像灰度直方图统计结果。(a)~(d)牛奶添加量为 1.0 ml 时的灰度直方图结果;(e)~(h)牛奶添加量为 1.5 ml 时的灰度直方图结果;(i)~(l)牛奶添加量为 2.0 ml 时灰度直方图结果;(m)~(p)牛奶添加量为 2.5 ml 时灰度直方图结果

Fig. 5 Statistical results of gray-scale histograms of reconstructed images under different concentrations. (a)~(d) Gray-scale histogram results of adding 1.0 ml milk; (e)~(h) gray-scale histogram results of adding 1.5 ml milk; (i)~(l) gray-scale histogram results of adding 2.0 ml milk; (m)~(p) gray-scale histogram results of adding 2.5 ml milk

4 结 论

本文开展了浑浊介质下的偏振关联成像实验研究,研究表明,随着浑浊介质浓度的不断提高,偏振差分关联成像质量急剧退化。通过将正交偏振图像直方图拉伸方法与偏振差分关联成像相结合,提出了一种基于直方图预处理的偏振差分关联成像算法,可有效解决浑浊介质下的偏振差分关联成像所带来的像质退化问题,并大幅度提升浑浊介质下的关联成像质量。此外,与正交偏振探测关联成像相比,所提方法的成像质量更好。该技术有望为生物组织成像、烟雾成像以及水下目标成像等应用提供了一种新手段。下一步的工作,计划在本文基础

上基于标准浑浊介质,定量研究浑浊介质下关联成像图像质量退化机理,并改进所述方法以提高成像质量。

参 考 文 献

- [1] Cheng J, Han S S. Incoherent coincidence imaging and its applicability in X-ray diffraction[J]. Physical Review Letters, 2004, 92(9): 093903.
- [2] Bennink R S, Bentley S J, Boyd R W, et al. Quantum and classical coincidence imaging [J]. Physical Review Letters, 2004, 92(3): 033601.
- [3] Shapiro J H, Boyd R W. The physics of ghost imaging[J]. Quantum Information Processing, 2012, 11(4): 949-993.

- [4] Liu X L, Shi J H, Sun L, et al. Photon-limited single-pixel imaging [J]. *Optics Express*, 2020, 28 (6): 8132-8144.
- [5] Cheng J. Ghost imaging through turbulent atmosphere [J]. *Optics Express*, 2009, 17 (10): 7916-7921.
- [6] Chen M L, Li E R, Gong W L, et al. Ghost imaging lidar via sparsity constraints in real atmosphere [J]. *Optics and Photonics Journal*, 2013, 3(2): 83-85.
- [7] Gong W L, Han S S. Correlated imaging in scattering media [J]. *Optics Letters*, 2011, 36(3): 394-396.
- [8] Zhao C Q, Gong W L, Chen M L, et al. Ghost imaging lidar via sparsity constraints [J]. *Applied Physics Letters*, 2012, 101(14): 141123.
- [9] Erkmen B I. Computational ghost imaging for remote sensing [J]. *Journal of the Optical Society of America A*, 2012, 29(5): 782-789.
- [10] Gong W, Zhao C, Yu H, et al. Three-dimensional ghost imaging lidar via sparsity constraint [J]. *Scientific Reports*, 2016, 6: 26133.
- [11] Sun M J, Edgar M P, Gibson G M, et al. Single-pixel three-dimensional imaging with time-based depth resolution [J]. *Nature Communications*, 2016, 7: 12010.
- [12] Bina M, Magatti D, Molteni M, et al. Backscattering differential ghost imaging in turbid media [J]. *Physical Review Letters*, 2013, 110(8): 083901.
- [13] Li L, Li Q, Sun S, et al. Imaging through scattering layers exceeding memory effect range with spatial-correlation-achieved point-spread-function [J]. *Optics Letters*, 2018, 43(8): 1670-1673.
- [14] Chen Q, Chamoli S K, Yin P, et al. Active mode single pixel imaging in the highly turbid water environment using compressive sensing [J]. *IEEE Access*, 2019, 7: 159390-159401.
- [15] Zhang Z, Ma X, Zhong J. Single-pixel imaging by means of Fourier spectrum acquisition [J]. *Nature Communications*, 2015, 6: 6225.
- [16] Liang J, Ju H J, Zhang W F, et al. Review of optical polarimetric dehazing technique [J]. *Acta Optica Sinica*, 2017, 37(4): 0400001.
梁健, 巨海娟, 张文飞, 等. 偏振光学成像去雾技术综述 [J]. *光学学报*, 2017, 37(4): 0400001.
- [17] 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): 0603006.
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): 0603006.
- [18] Chen W, Qiao Y L, Sun X B, et al. Method for water surface sun glint suppression based on polarized radiation image fusion [J]. *Acta Optica Sinica*, 2019, 39(5): 0529001.
陈卫, 乔延利, 孙晓兵, 等. 基于偏振辐射图融合的水面太阳耀光抑制方法 [J]. *光学学报*, 2019, 39(5): 0529001.
- [19] Liang J, Ren L Y, Ju H J, et al. Polarimetric dehazing method for dense haze removal based on distribution analysis of angle of polarization [J]. *Optics Express*, 2015, 23(20): 26146-26157.
- [20] 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.
- [21] Zhang W F, Liang J, Ju H J, et al. A robust haze-removal scheme in polarimetric dehazing imaging based on automatic identification of sky region [J]. *Optics & Laser Technology*, 2016, 86: 145-151.
- [22] Zhang S, Zhan J T, Fu Q, et al. Simulation research on sky polarization characteristics under complicated marine environment [J]. *Acta Optica Sinica*, 2020, 40(22): 2201001.
张肃, 战俊彤, 付强, 等. 复杂海洋环境下天空光偏振特性模拟研究 [J]. *光学学报*, 2020, 40(22): 2201001.
- [23] Shi D F, Hu S X, Wang Y J. Polarimetric ghost imaging [J]. *Optics Letters*, 2014, 39 (5): 1231-1234.
- [24] Zhu Y C, Shi J R, Yang Y, et al. Polarization difference ghost imaging [J]. *Applied Optics*, 2015, 54(6): 1279-1284.
- [25] Xiao X, Sun S, Lin H Z, et al. Ghost imaging utilizing experimentally acquired degree of linear polarization with no prior information [J]. *Optics Express*, 2019, 27(20): 28457-28465.
- [26] 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.
- [27] Goodman J W. *Introduction to Fourier optics* [M]. 3rd ed. New York: McGraw-Hill, 2005: 63-96.
- [28] Treibitz T, Schechner Y Y. Active polarization descattering [J]. *IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence*, 2009, 31 (3): 385-399.
- [29] Jain K A. *Fundamentals of digital image processing* [M]. London: Prentice-Hall, 1989: 241-244.
- [30] Gonzalez R C, Woods R Z. *Digital image processing* [M]. 2nd ed. Beijing: Publishing House of Electronics Industry, 2009: 460-514.

冈萨雷斯, 伍德. 数字图像处理[M]. 第二版. 北京: 电子工业出版社, 2009: 460-514.

- [31] Kaeli D, Mistry P, Schaa D, et al. Examples[M]// Heterogeneous Computing with OpenCL 2.0. 3rd ed. Amsterdam: Elsevier, 2015: 75-109.
- [32] Feng F, Wu G J, Wu Y F, et al. Algorithm for underwater polarization imaging based on global estimation[J]. Acta Optica Sinica, 2020, 40(21):

2111002.

封斐, 吴国俊, 吴亚风, 等. 基于全局估计的水下偏振成像算法[J]. 光学学报, 2020, 40(21): 2111002.

- [33] Wang Y, Chen Q, Zhang B. Image enhancement based on equal area dualistic sub-image histogram equalization method [J]. IEEE Transactions on Consumer Electronics, 1999, 45(1): 68-75.