

水下偏振成像技术研究及进展

刘飞^{1,2}, 孙少杰^{1,2}, 韩平丽^{1,2,3}, 杨奎^{1,2}, 邵晓鹏^{1,2*}

¹ 西安电子科技大学物理与光电工程学院, 陕西 西安 710071;

² 西安市计算成像重点实验室, 陕西 西安 710071;

³ 中国科学院光束控制重点实验室, 四川 成都 610209

摘要 受水体自身吸收和悬浮颗粒强散射的作用, 水下光学成像存在严重的“帷幔效应”, 造成场景中目标细节信息被淹没在背景散射光中, 图像对比度大幅降低。由于目标和背景信息所具有的唯一性和差异性, 从光场的偏振特性发展出的水下偏振成像技术可以对水下背景散射光进行有效抑制, 利用目标信息光与背景散射光的偏振差异特性将二者有效分离, 实现清晰成像。目前, 水下偏振成像技术发展迅猛, 已在众多领域具有广泛应用和全新的研究成果。系统地介绍了水下偏振成像技术的基本原理、实现算法和成像效果, 并依据现有技术的优缺点对水下偏振成像技术的未来发展进行分析展望。

关键词 物理光学; 偏振; 水下成像; 散射; 图像清晰度

中图分类号 O436.3

文献标志码 A

doi: 10.3788/LOP202158.0600001

Development of Underwater Polarization Imaging Technology

Liu Fei^{1,2}, Sun Shaojie^{1,2}, Han Pingli^{1,2,3}, Yang Kui^{1,2}, Shao Xiaopeng^{1,2*}

¹ School of Physics and Optoelectronic Engineering, Xidian University, Xi'an, Shaanxi 710071, China;

² Xi'an Key Laboratory of Computational Imaging, Xi'an, Shaanxi 710071, China;

³ Key Laboratory of Optical Engineering, Chinese Academic of Sciences, Chengdu, Sichuan 610209, China

Abstract Due to the absorption of water body and strong scattering of suspended particles, there is a serious “curtain effect” in underwater optical imaging, which causes the details of the target in the scene to be submerged in the background scattered light, and the image contrast is greatly reduced. Due to the uniqueness and difference of target information and background information, the underwater polarization imaging technology developed from the polarization characteristics of light field can effectively suppress the scattering light of underwater background. The polarization differences between the target information light and the background scattered light are used to separate them effectively and realize the clear imaging. At present, underwater polarization imaging technology is developing rapidly, which has been widely used in many fields and new research results. This paper systematically introduces the basic principle, implementation algorithm, and imaging effect of underwater polarization imaging technology, and analyzes and prospects the future development of underwater polarization imaging technology according to the advantages and disadvantages of existing technologies.

Key words physical optics; polarization; underwater imaging; scattering; image clarity

OCIS codes 260.5430; 010.4450; 010.4458

收稿日期: 2021-02-21; 修回日期: 2021-03-02; 录用日期: 2021-03-08

基金项目: 国家自然科学基金(62075175, 62005203)、中国科学院光束控制重点实验室基金(QC20191097)

* E-mail: xpshao@xidian.edu.cn

1 引言

水下光学成像技术在海洋科考、海底资源勘探、海底地形地貌绘制、水下考古等领域具有重要的应用前景^[1-4]。然而,受水体吸收和散射作用影响,尤其是浑浊水体的强散射作用影响,水下成像存在严重的“帷幔效应”,细节信息被淹没于背景散射光中,导致图像对比度大幅降低,大大降低了对水下目标的探测、识别能力。此外由于水体对光的吸收具有波长选择性,水下成像还常伴有色彩畸变等问题^[5-7]。因此,探究水下散射光场的强度、偏振等多维物理信息分布特性,去除背景散射光,恢复水下场景原有色彩,提升成像对比度、清晰度是水下成像亟待解决的热点问题。

目前,水下场景清晰化成像方法主要分为声学成像技术和光电成像技术。声学成像技术主要包括主动式和被动式声呐成像技术^[8-11],其在水下目标远距离成像方面具有优势,但是该技术的成像分辨率低,受环境波动等外界条件影响严重。因此,为获取高清晰度、高对比度、符合人类视觉系统的高分辨率图像,水下场景清晰化成像技术多采用光电成像技术。

水下光电成像技术主要为数字图像处理技术^[12-13]和基于物理模型的图像复原技术^[14-15]。数字图像处理技术以像素值的调整优化提升水下成像视觉效果,实现图像质量的提升,具体又可分为数字图像复原技术和数字图像增强技术^[16-19]。数字图像复原技术利用退化模型反演真实场景,依据水体中的衰减因子、散射系数等先验信息消除叠加于目标上的干扰信息,提升图像对比度。但该技术要求过多的先验信息,算法复杂耗时,且对于远距离、高浑浊的场景复原有限。目前,典型的数字图像复原技术有多颜色模型成像技术^[20]、图像融合技术^[21]。而数字图像增强技术不依赖任何物理模型的反演计算,常使用定性的主观标准来产生视觉观感佳的图像,只为改善图像的视觉效果。该技术往往通过简单的算法和较短的时间便能生成视觉效果提升明显的图像,但是由于其成像方式未考虑图像质量下降的本质原因,因此环境适应性较差,图像细节信息增强有限。目前,典型的数字图像增强技术有直方图均衡技术^[22-23]、小波变换技术^[24]等。数字图像处理技术易于实现、算法简单,因此发展较快,算法种类繁多。然而,不全面深入地探究光在水下传播中的衰减过程就难以反演未退化场景的真实原貌,此外

真实水下环境复杂多变,对单一场景进行优化的图像处理技术无法对不同场景进行及时调整,且过多的需求先验信息又将致使算法复杂且在实际中应用繁琐。

而基于物理模型的图像复原技术可以弥补数字图像处理技术的不足,其主要包括结构光成像^[25-26]、距离选通成像^[27-28]、同步扫描成像技术^[29-30]、条纹管成像技术^[31-32]、偏振成像技术^[33-35]等,该类技术主要利用光波的强度、光谱、偏振等信息,通过建立光在水下传播中的散射、传输物理模型来解决水下光电成像过程中水体散射造成的水下场景图像对比度降低、图像解析度差、颜色失真、成像距离受限等问题。基于光学成像模型的复原技术多存在体积质量大、系统复杂、成本高等问题,但偏振成像技术却有着设备简单、操作方便、性价比高等特点,因此受到了诸多研究学者的关注。偏振成像技术通过深度挖掘散射光场偏振信息的唯一性和差异性,分析图像中目标与背景偏振特性的变化趋势,准确估算目标信息光和背景散射光的偏振特性及二者间的联系与差异,反演目标信息光和背景散射光的光强变化,有效去除背景散射光,实现水下清晰成像。此外,由于偏振成像技术具有对目标形状、材料等信息的反演能力,在实现清晰化成像时能够快速实现目标的探测、识别及三维重建^[36-37],因此,单维度信息获取、多维度信息还原也使偏振成像技术优势更为凸显,成为了目前水下成像技术的热门研究方向。

本文基于不同水下成像的物理模型与成像体系对水下偏振成像技术进行系统性分析,从偏振差分成像、被动水下偏振成像、主动水下偏振成像、基于深度学习的偏振成像 4 方面进行介绍,综述水下偏振成像技术的代表性方法,探究偏振成像技术在自然水体、高浑浊度水体及针对不同偏振特性目标物体、场景色彩畸变等水下场景下的成像效果。

2 水下偏振成像技术

图 1 对水下偏振成像方法进行了归类总结。在水下清晰化成像领域,偏振技术由于能够充分利用水下散射光场偏振信息的差异性和唯一性,有效去除水体散射、提高成像质量、增加成像距离,一直以来都是国内外科研人员的研究重点。目前,水下偏振成像技术主要分为水下偏振差分成像技术、被动水下偏振成像技术、主动水下偏振成像技

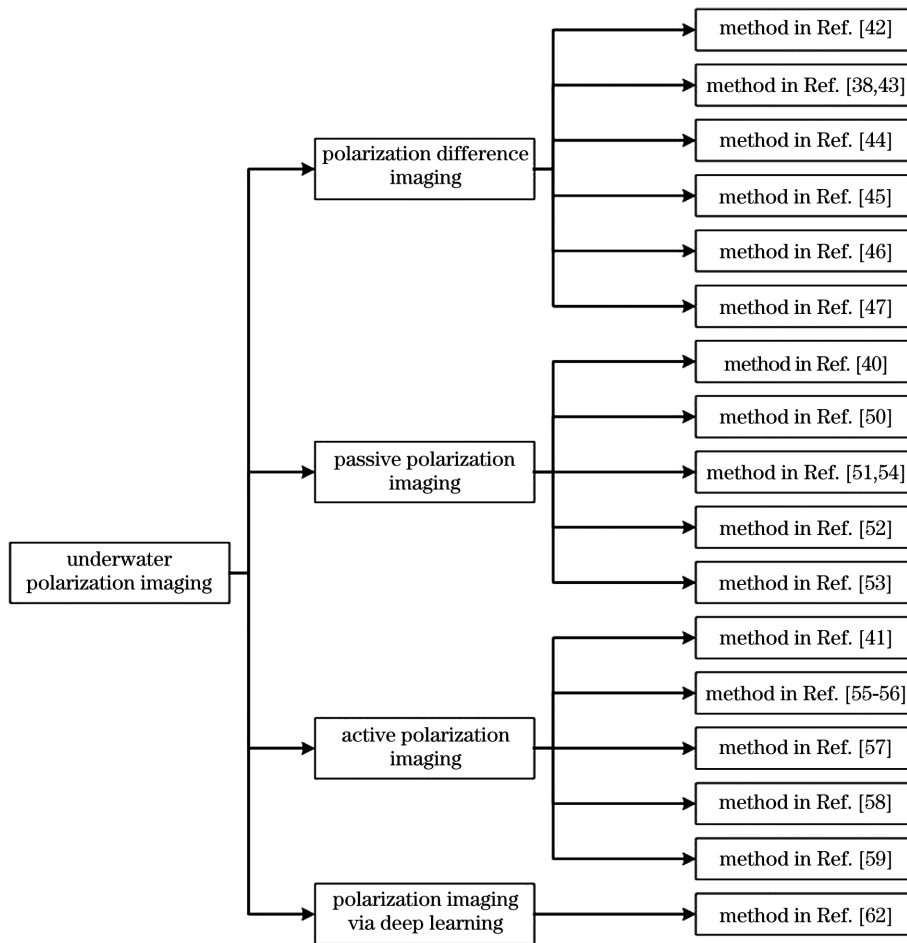


图 1 水下偏振成像方法归类

Fig. 1 Categories of underwater polarization imaging methods

术、基于深度学习的水下偏振成像技术。水下偏振差分成像技术是水下偏振门成像技术的发展,利用偏振信息的共模抑制特性,通过对两种不同偏振态图像的差分,可反映出场景不同偏振状态的变化情况,利用两种图像的差异抑制背景散射光,实现水下场景的清晰成像^[38-39]。此外,该成像技术还为水下偏振度信息的利用奠定了基础。而自然水体中的被动水下偏振成像技术和深海中的主动水下偏振成像技术通过将水下场景偏振特性与水体物理特征相结合,产生一系列水下图像清晰场景重建模型与算法。其中被动偏振成像技术多基于 Schechner 等在 2005 年提出的清晰化成像模型^[40],以水体透射系数的估计为重点,通过研究自然光散射特性建立被动水下偏振成像模型;主动偏振成像技术则多基于 Treibitz 等在 2009 年提出的浑浊水体成像模型^[41],引入主动光源对场景进行成像,将目标偏振特性变化考虑进成像模型中,进一步提升成像对比度与清晰度。基于深度学习的水下偏振成像技术是近年来新提出的一种成像方法,通过训练所得的神经网络

对偏振特征信息进行提取、融合,对水下浑浊水体图像信息退化过程进行非线性建模,从而反演水下浑浊水体的清晰化过程,实现清晰成像。

2.1 水下偏振差分成像技术

通过在探测器前方调制偏振器件,水下偏振差分成像技术分别获取场景中相互正交的最优场景图像,并利用正交偏振图像的差异性来滤除背景散射噪声,实现对物体的清晰成像、探测与识别。偏振差分图像获取的公式为

$$I_{pd} = I_{//} - I_{\perp}, \quad (1)$$

式中: $I_{//}$ 与 I_{\perp} 分别为偏振方向相互正交的图像强度分布。其物理模型如图 2 所示,B 为背景散射光, α 为其偏振角,S 为目标信息光, β 为其偏振角, P_1 和 P_2 为相互正交的检偏器。根据 Malus Law 可知,当背景光偏振方向与相互正交的检偏器透过方向均为 45° 时,偏振差分成像技术通过光学检偏器的共模抑制作用来滤除背景。

偏振差分成像技术的思想主要来源于仿生学,1995 年,受到动物视觉系统中对正交态偏振信息的

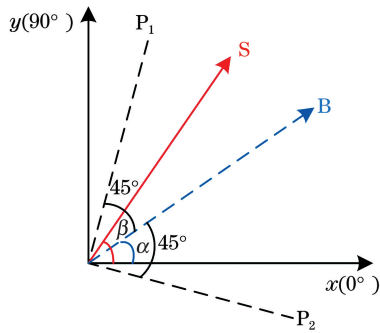
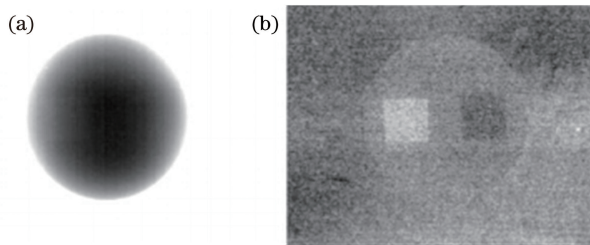


图 2 偏振差分成像探测原理

Fig. 2 Detection principle of polarization difference imaging

获取解译这一特性的激发, Rowe 等^[42]提出了偏振差分成像方法,与偏振求和图像相比,偏振差分成像解译了强度图像中不易看到的细节信息,如图 3 所示,提高了水下成像的探测能力,为水下成像提供了新的技术思路。

图 3 原始强度图像与复原图像的对比^[42]。

(a)原始强度图像;(b)复原图像

Fig. 3 Comparison of original intensity image and recovered image^[42]. (a) Original intensity image; (b) recovered image

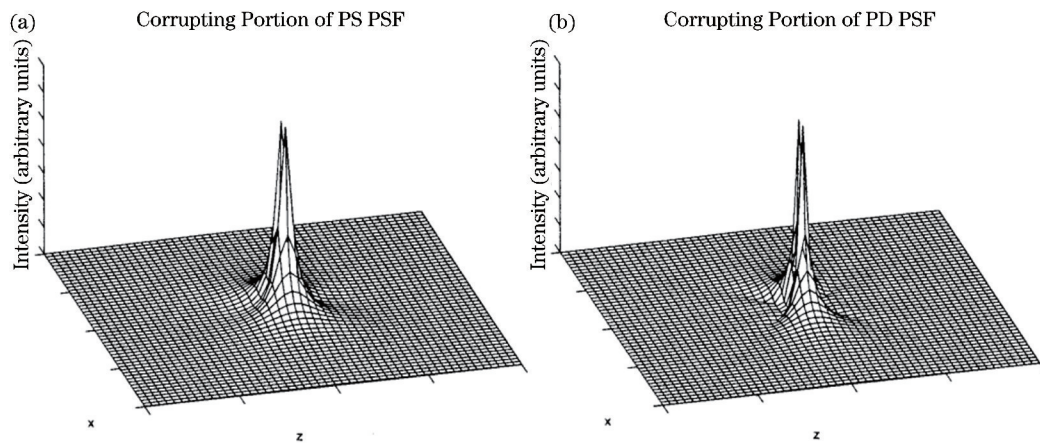
图 4 偏振求和图像与偏振差分图像的 PSF 对比^[43]。(a)偏振求和图像的 PSF;(b)偏振差分图像的 PSF

Fig. 4 Comparison of polarization-sum image's PSF and polarization-difference image's PSF^[43]. (a) Polarization-sum image's PSF; (b) polarization-difference image's PSF

2015 年,管今哥等^[46]利用 Stokes 矢量,设计了一种基于 Stokes 矢量的计算偏振差分实时成像系统,这是一种对偏振成像方式的改进。团队利用 Stokes 矢量 $[I \ Q \ U \ V]^T$ 对于光偏振态的完备表征代替光

在偏振差分成像方法的基础上,1996 年, Tyo 等^[38]进一步研究对比了不同散射程度下偏振差分图像与偏振求和图像对于目标信息的复原能力,结果表明,相较于传统成像,偏振差分成像技术在目标特性探测上能增加 2~3 倍的探测距离。2000 年, Tyo^[43]对偏振差分图像和偏振求和图像的点扩散函数(PSF)进行了分析研究,并使用蒙特卡罗算法模拟研究了单散射介质和多散射介质中的 PSF,研究发现偏振差分图像的 PSF 较偏振求和图像窄,如图 4 所示,意味着在透散射介质成像中偏振差分技术能够获取具有更多高频信息的目标图像,成像效果更优。同年, Walker 等^[44]利用偏振减法成像技术进行水下物体的探测,偏振减法成像技术对平行分量进行加权,从而消除背景散射光的影响,恢复图像场景目标,同时利用蒙特卡罗模拟对其所提出方法的效果进行了测试。2012 年, Miller 等^[45]设计了一套可在同一焦平面呈现视场正交偏振图像的实时成像系统,该系统可通过设置不同权值和载入处理算法实现水下清晰成像。此外,该团队还对水下偏振差分成像技术的成像质量进行了讨论,实验结果表明,对于退偏的目标,透过雾、水等散射介质进行成像时,主动照明的线偏振光成像效果好于圆偏振光;而对于反射光能够保持入射偏振态的目标而言,使用圆偏振光进行主动照明成像时目标对比度更高,成像效果更优。该结论给以后水下成像偏振光的选取提供了重要的依据。

学检偏器的无规则机械转动,具体成像公式为

$$I_{\text{Stokes-pd}} = Q - \gamma U, \quad (2)$$

式中: γ 为权重系数; Q 为 Stokes 矢量中表示 0° 与 90° 方向偏振光的强度差值分量; U 为 Stokes 矢量

中 45° 与 135° 方向偏振光的强度差值分量。通过模型分析,当 $\gamma=1/\tan(2\alpha)$ 时,背景可通过共模抑制作用被完全消除。目前,现有的偏振成像系统能实现实时的 Stokes 矢量获取,结合成像方法可实现实

时水下成像,其成像效果如图 5 所示。偏振差分成像技术虽然在一定程度上能抑制背景杂散光,提升成像效果,但未考虑水体本身对光的吸收与散射作用,因此提升能力有限,难以恢复目标细节。

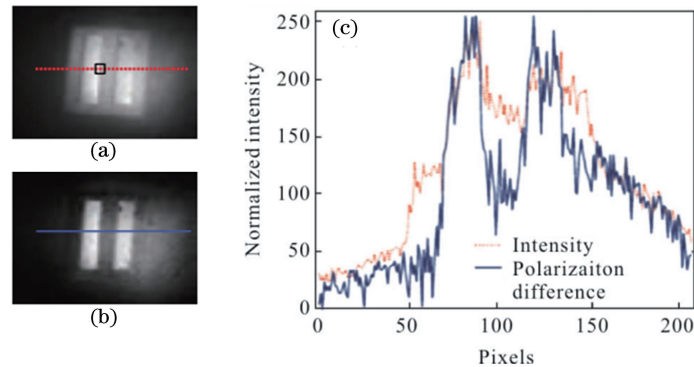


图 5 原始光强图像与基于 Stokes 矢量的计算偏振差分图像比较^[46]。(a)强度成像;(b)偏振差分成像;(c)归一化强度曲线
Fig. 5 Comparison of original intensity image and computational polarization-difference image based on the Stokes vector^[46]. (a) Intensity image; (b) polarization-difference image; (c) normalized intensity curves

偏振差分成像中, $I_{//}$ 与 I_{\perp} 的选定通常以偏振图像中亮度最亮与最暗的 I_{\max} 与 I_{\min} 两张图像为主,但当图像亮度变化不明显时,无法准确获取最优的 $I_{//}$ 与 I_{\perp} ,使得成像效果差,目标检测可能失败。2020 年, Han 等^[47] 提出了一种基于光学相关性寻找偏振特性最优图像对的方法,通过 peak-to-correlation energy(PCE)对两幅偏振图像的相似度进行量化,最终得出相似度最小时两张图像为最优图像对的结论,实验结果证明,该方法能准确选取最优图像对并提升成像效果,如图 6 所示。该方法的提出给偏振差分输入图像的选取提供了理论支持,有效提升了偏振差分成像技术进行目标探测的能力。

2.2 水下被动偏振成像技术

2005 年, Schechner 等^[40] 提出水下被动偏振成像模型,利用光在水下传输过程中的衰减模型,结合目标与背景偏振特性差异建立物理模型,重建清晰的水下场景图像。诸多学者在水下被动偏振成像模型基础上进行了进一步的研究和发展,使其成为了水下偏振成像技术的一个重要分支^[48-49]。水下被动偏振成像方法主要应用于自然光照射的水下环境中。水下自然光场景的光主要来自于场景上方,光线在经过海水与空气的表面时会发生折射效应,场景中某一点的光是该点上方一个有限圆锥体中的会聚光线。在水下透混沌介质成像过程中,探测器端目标的直接辐射光分量很少,一般不予考虑,物体的直接辐射分量转换为前向散射光分量,因此水下被动偏振成像模型只考虑水下场景的前向散射光分量

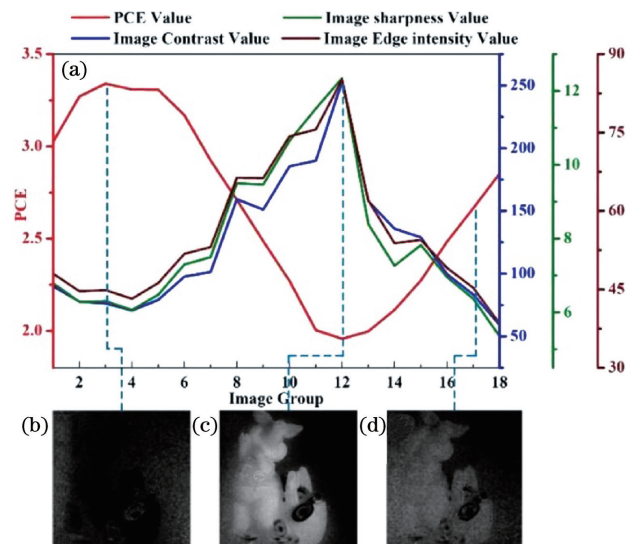
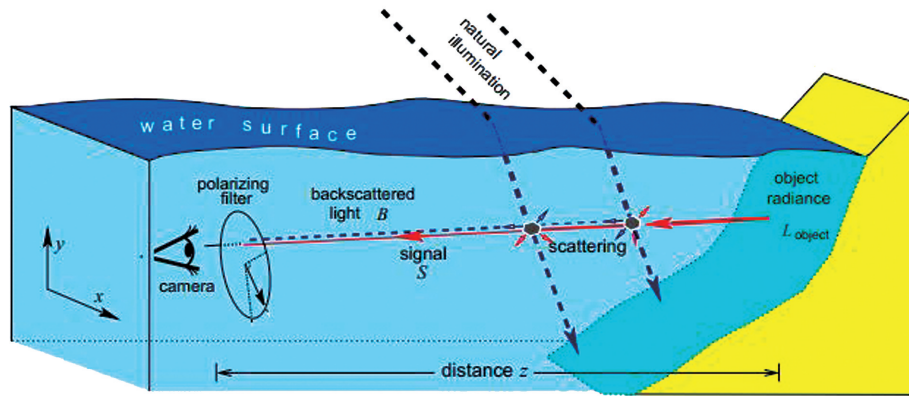


图 6 复原结果与评价曲线^[47]。(a)图像 PCE、对比度、清晰度及边缘强度曲线;(b)~(d)不同图像对复原图像

Fig. 6 Recovered results and evaluation curves^[47]. (a) Curves of PCE, contrast, image sharpness, and image edge intensity; (b)~(d) recovered images of different image pairs

与后向散射光分量,基本原理如图 7 所示。但在实际应用中发现,自然光经水体散射吸收后到达目标的光照较弱,难以满足成像要求,故多数成像技术也加入了人造光源以满足光照需求。

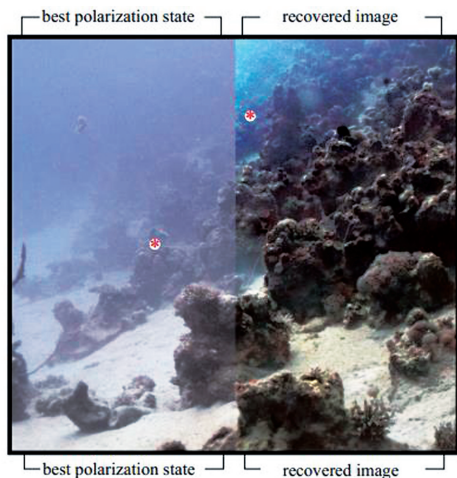
水下被动偏振成像过程是求解物体直接辐射光 L 的过程,物体直接辐射光 L 经水体传输到达探测器时变成前向散射光,在水下被动偏振成像模型中

图 7 水下被动偏振成像物理模型^[40]Fig. 7 Physical model of underwater passive polarization imaging^[40]

一般认为其不具有偏振性,而背景散射光 B 经海水散射后会具有一定的偏振信息。在水下偏振被动成像过程中,目标信息光 L 可表示为

$$L = \frac{I(x, y) - B}{t(x, y)}, \quad (3)$$

式中:探测到的总光强 $I(x, y) = I_{\max} + I_{\min}$, I_{\max} 和 I_{\min} 是通过调整偏振片的不同位置而获得的两幅正交的偏振子图像,其中一幅包含的后向散射光的光强最大,记作 I_{\max} ,而与之正交的图像包含最小的后向散射光,记作 I_{\min} ;介质透射率 $t(x, y) = 1 - B/B_{\infty}$; B_{∞} 为无穷远处的背景散射光,一般选取水下场景没有目标区域的光作为场景无穷远处的背景散射光;背景散射光 B 的求取借助于背景散射光的偏振度 p_B 。背景散射光的偏振度的求取主要基于水下被动成像的另一重要假设,即整个场景的背景散射光偏振度恒定,可利用无穷远处的场景来求取。通过水下偏振模型得到的复原图像如图 8 所示。

图 8 传统水下被动偏振成像技术复原效果的对比^[40]Fig. 8 Comparison of recovered result of traditional underwater passive polarization imaging^[40]

$$B = (I_{\max} - I_{\min}) / p_B. \quad (4)$$

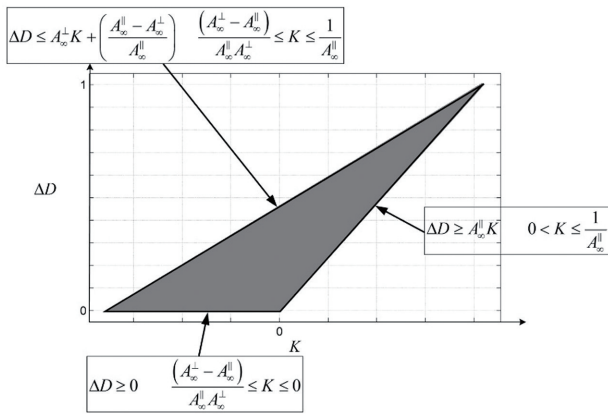
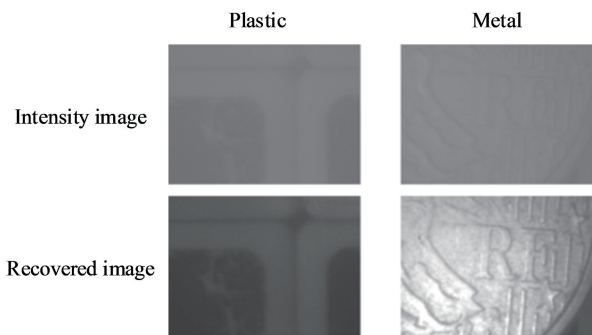
水下被动偏振成像模型的提出,综合考虑了水体散射、吸收、衰减等因素,同时结合偏振成像的去散射特性,对水下透浑浊介质的清晰成像具有里程碑式的意义。在水下被动偏振成像模型中具有几个典型假设:背景散射光的偏振度恒定;目标信息光偏振度忽略不计;忽略水体对不同波段的选择性散射和吸收等。这里需要注意的是,国内外诸多学者对背景光与目标信息光偏振度之间的关系进行了研究, Schechner 等^[40]认为目标信息光的偏振度远小于背景散射光的偏振度,以致可以忽略不计,而 Tyo 等^[38]认为物体散射光的偏振度比背景散射光的偏振度更强,因此,对目标信息光和背景散射光偏振度在不同水体条件下的不同表现特性规律进行探索,是未来水下被动偏振成像发展的一个重要问题。

针对以上假设和问题,诸多学者对 Schechner 等^[40]提出的传统水下偏振成像模型进行了新的研究与优化。2016 年, Huang 等^[50]在水下被动偏振成像模型的基础上,提出了一种考虑目标信息光的偏振度的水下被动成像模型,在模型中引入中间图像 $K(x, y)$ 和偏振正交差分信号 $\Delta D(x, y)$, 并探究了两者之间的变换关系。

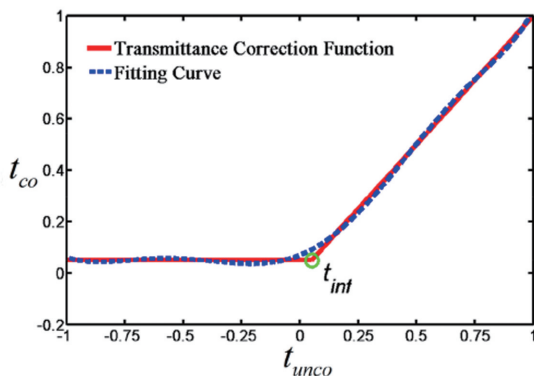
$$\Delta D(x, y) = a \cdot \exp[b \cdot K(x, y)], \quad (5)$$

式中: a 和 b 为大于 0 的两个优化系数, a 用于调整尺度, b 用于调整指数函数的基值。调整参数,使关系曲线在图 9 所示的范围内时,便可准确推导场景透过率,实现清晰成像,成像结果如图 10 所示。

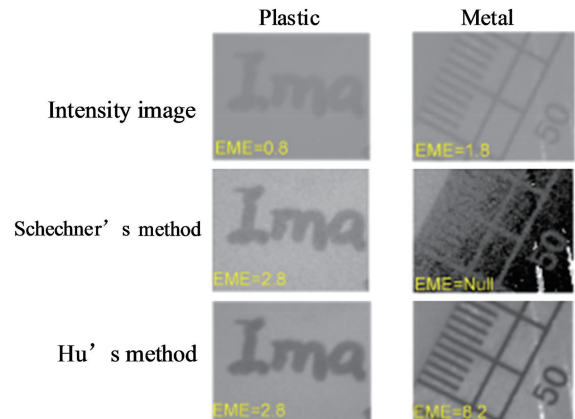
该成像方法解决了传统模型中对于反光目标,即高偏振度物体(金属、陶瓷等具有光滑表面的物体)复原失效的问题,且对于高、低偏振度物体均有清晰化成像的能力,改善了水下散射环境中偏振成像的适用范围,拓展了应用环境。

图 9 $K(x, y)$ 和 $\Delta D(x, y)$ 的关系^[50]Fig. 9 Relationship between $K(x, y)$ and $\Delta D(x, y)$ ^[50]图 10 原始强度图像与 Huang 等所提方法复原结果的对比^[50]Fig. 10 Comparison between original intensity image and the recovered image by Huang's method^[50]

2017 年, Hu 等^[51]将目标的偏振信息纳入模型进行分析,提出了基于透过率校正的水下偏振成像技术。该方法考虑到高偏振度物体的水下透过率值在计算中出现负值的问题,通过多项式曲线拟合结合透过率阈值设置,如图 11 所示,将估计错误的负值校正为正值,然后将正确的透过率代入水下偏振成像模型,提升高偏振度物体成像质量,成像结果

图 11 透过率校正图^[51]Fig. 11 Schematic of transmittance correction^[51]

如图 12 所示。该成像方法在水下清晰化成像的同时恢复了目标的细节信息,对高偏振度物体的成像效果较文献^[50]提升明显。

图 12 原始强度图像与不同方法复原结果的对比^[51]Fig. 12 Comparison between original intensity images and the recovered images by different methods^[51]

2018 年,卫毅等^[52-53]综合考虑水体吸收和不同波段的成像特异性,将海水对光的选择性吸收特性加入到物理模型中,提出了浅海被动水下偏振成像技术,该技术解决了水下自然光场景的水体吸收和颜色失真等问题。该技术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,该技术的成像处理结构如图 13 所示。

该方法先采用彩色魔方作为水下实验目标,图 14 为模型重建结果,由于水体吸收的影响,图像整体呈现偏蓝特性,对比度低,视觉效果差。重建后,背景散射光被移除,对比度提升,目标真实色彩得到有效复原,色彩畸变得得到校正。

该课题组还对真实水下场景进行了处理,处理结果如图 15 所示,相比原始强度图,该技术的成像结果有效复原了海底真实色彩,物体颜色鲜艳,同时图像的高频信息得到修复,背景散射光遮蔽或者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。

在使用主动光源照明时,由于传输距离的增加和散射面积的扩展,散射程度呈指数衰减,背景散射光强度和偏振度均呈现非均匀分布特性,传统被动水下偏振成像模型中选取某一块无目标区域的光

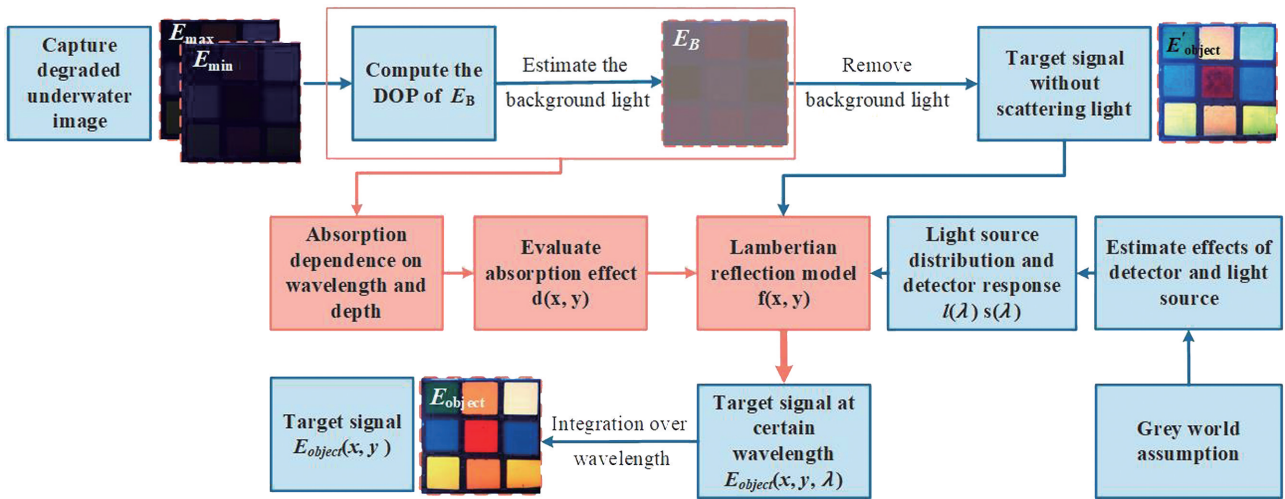
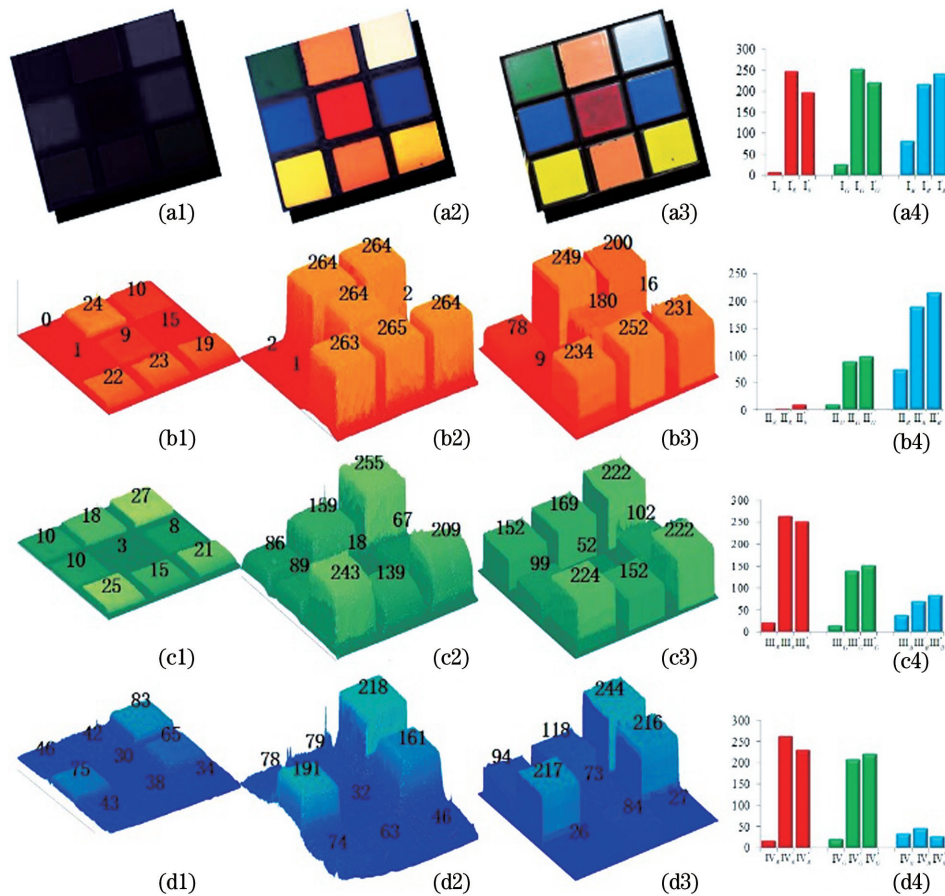
图 13 浅海被动水下偏振成像技术处理流程^[52]Fig. 13 Flowchart of passive underwater polarization imaging technology in neritic area^[52]

图 14 浅海被动水下偏振成像技术复原效果^[53]。(a1)原始强度图像;(b1)~(d1)原始强度图像的 RGB 三通道的强度分布;(a2)重建图像;(b2)~(d2)重建图像的 RGB 三通道的强度分布;(a3)清水中的强度图像;(b3)~(d3)清水中强度图像的 RGB 三通道的强度分布;(a4)~(d4)不同区域的强度值统计

Fig. 14 Recovered images of passive underwater polarization imaging technology in neritic area^[53]. (a1) Original intensity image; (b1)~(d1) intensity distribution in the R, G, B channels of original intensity image; (a2) reconstructed image; (b2)~(d2) intensity distribution in the R, G, B channels of reconstructed image; (a3) intensity image in clear water; (b3)~(d3) intensity distribution in the R, G, B channels of intensity image in clear water; (a4)~(d4) statistics of intensity values in different regions

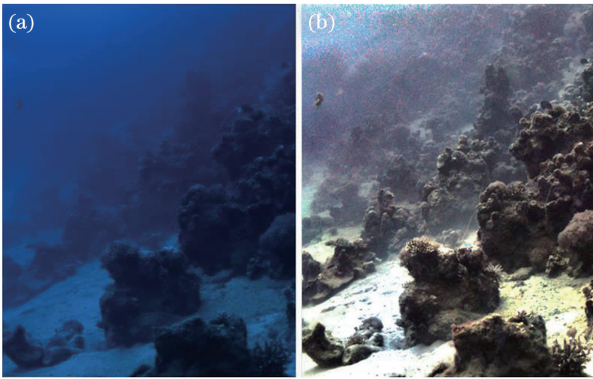


图 15 真实场景下浅海被动水下偏振成像技术的复原效果^[53]。(a)原始强度图像;(b)复原图像

Fig. 15 Recovered image of passive underwater polarization imaging technology in neritic area in real scene^[53]. (a) Original intensity image; (b) recovered image

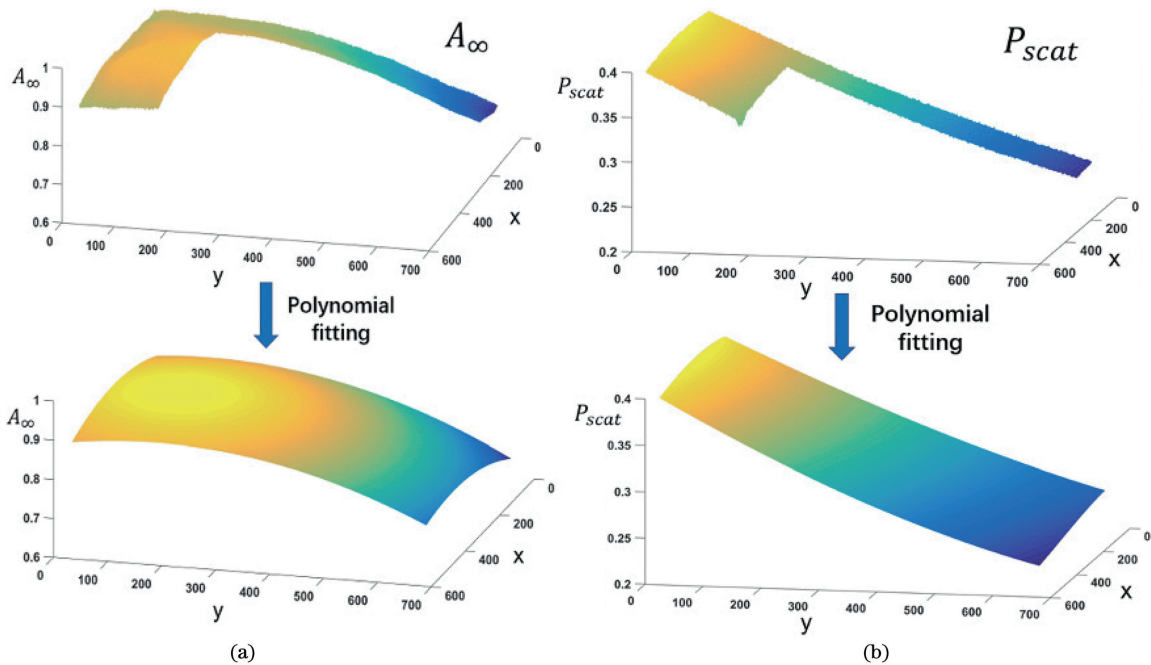


图 16 非均匀场景区域多项式拟合^[54]。(a)背景散射光强度拟合;(b)背景散射光偏振度拟合

Fig. 16 Polynomial fitting of non-uniform scene area^[54]. (a) Intensity fitting of backscattered light; (b) degree of polarization fitting of backscattered light

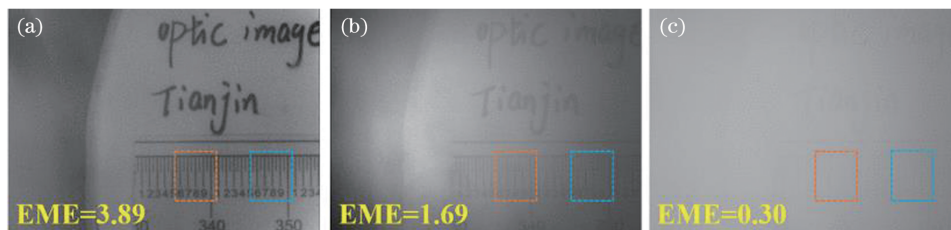


图 17 非均匀场景图像复原对比。(a)Hu 等所提方法^[54];(b)Schechner 等所提方法^[40];(c)原始强度图像

Fig. 17 Comparison of image restoration in non-uniform scene. (a) Recovered image by Hu's method^[54]; (b) recovered image by Schechner's method^[40]; (c) original intensity image

作为背景散射光和背景散射光偏振度恒定的假设便不再成立,图像复原效果受到限制。2018 年,Hu 等^[54]提出了一种基于非均匀散射场的偏振成像方法,该方法截取掉偏振图像中目标区域的光,然后利用剩余的背景区域对背景散射光强度和偏振度进行多项式拟合,如图 16 所示,补全目标区域的光强与偏振度,然后通过进一步计算实现清晰成像。

通过实验结果可以对比看出,相较原始强度图,Hu 等^[54]所提方法的成像清晰度和对比度提升明显,如图 17 所示。对于背景散射光强度不同的位置,图像复原程度也保持较高的一致性,细节信息恢复完整。该方法有效改善了散射光非均匀分布对偏振成像带来的问题。

2.3 水下主动偏振成像技术

水下主动偏振成像模型是水下基于物理模型的

另一重要成像方法, Treibitz 等于 2009 年提出^[41], 物理模型如图 18 所示。与水下被动偏振成像模型相同, 水下主动成像也不考虑探测器端直接辐射光的影响, 探测器接收到的场景信息仅包含目标信息光 S 和背景散射光 B 。在水下主动偏振成像过程中, 目标信息光 S 和背景散射光 B 可表示为

$$\begin{cases} S = \frac{1}{p_B - p_S} [I_{\min}(1 + p_B) - I_{\max}(1 - p_B)] \\ B = \frac{1}{p_B - p_S} [I_{\max}(1 - p_S) - I_{\min}(1 + p_S)] \end{cases}, \quad (6)$$

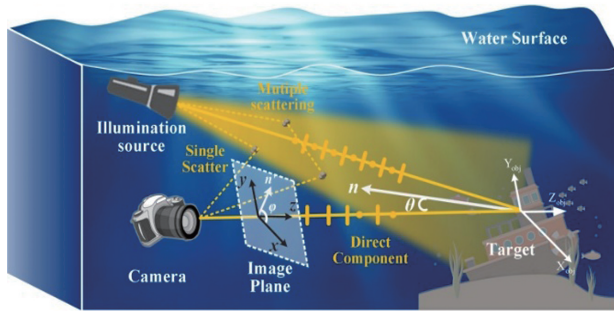


图 18 水下主动偏振成像物理模型^[41]

Fig. 18 Physical model of underwater active polarization imaging^[41]

式中: p_S 为目标信息光的偏振度。背景散射光偏振度 p_B 的求取与水下被动偏振成像模型相同, 均通过选取水下场景空白区域进行求取。目标信息光偏振度 p_S 的求取主要采用互信息最小化法:

$$M_I(B, S) =$$

$$\sum_{b \in B} \sum_{s \in S} \text{prob}(b, s) \log \left[\frac{\text{prob}(b, s)}{\text{prob}(b) \text{prob}(s)} \right], \quad (7)$$

式中: b 和 s 分别为图像 $B(x, y)$ 和 $S(x, y)$ 的灰度级; $\text{prob}(b, s)$ 为联合概率分布函数, 表示 $B(x, y)$ 灰度值为 m 且 $S(x, y)$ 灰度值为 n 的概率; $\text{prob}(b)$ 和 $\text{prob}(s)$ 为边缘分布函数。当互信息 M_I 取最小值时, 图像目标信息光中不再分离出背景散射光, 此时 $B(x, y)$ 和 $S(x, y)$ 分离效果最好, 能够获得最好的场景中目标信息光偏振度 p_S 和背景散射光偏振度 p_B 。由 Treibitz 等^[41] 提出的传统水下主动偏振成像技术的成像结果如图 19 所示。

与水下被动偏振成像中采用自然光照明的方式不同, 水下主动偏振成像技术采用主动式宽波段偏振光源对水下场景成像进行照明。二者的差异性在于, 水下被动偏振成像技术采用自然光照明, 由于水体对不同偏振态光波的衰减与吸收, 自然光变成部分偏振光; 而水下主动偏振成像技术采用主动式偏

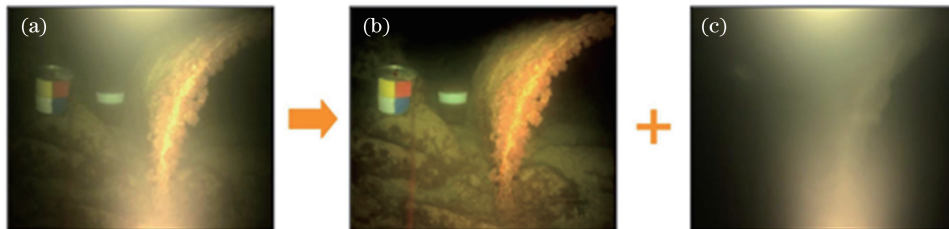


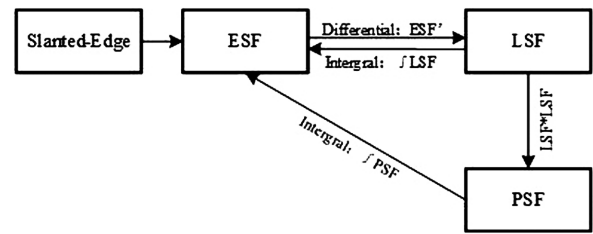
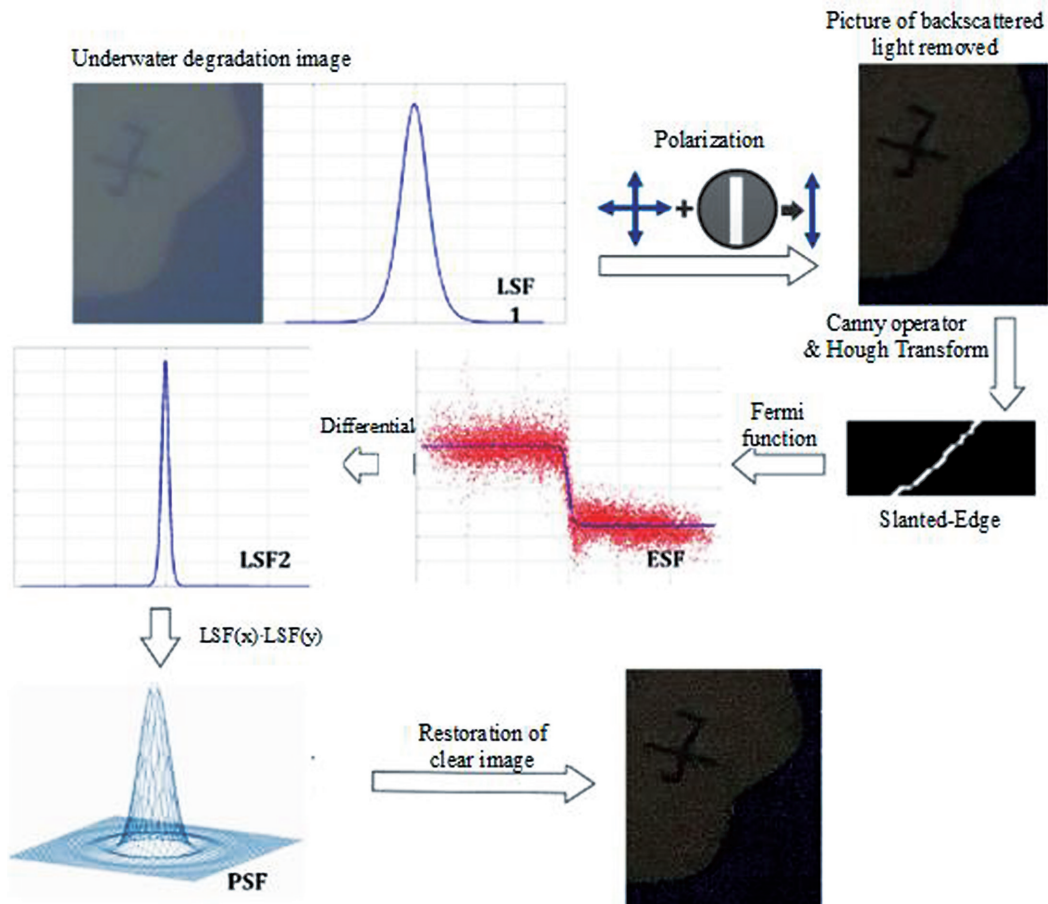
图 19 传统水下主动偏振成像技术的复原效果^[41]。(a)原始强度图像;(b)目标信息光图像;(c)背景散射光图像

Fig. 19 Recovered image of traditional underwater active polarization imaging^[41]. (a) Original intensity image; (b) picture of target information light; (c) picture of backscattered light

振光源照射, 由于水体衰减和吸收, 完全偏振光变成部分偏振光。但目前水下被动偏振成像中也引入主动光源, 以对抗水体对自然光的吸收、散射及衰减, 水下主、被动偏振成像技术的差异更多地在于目标信息光偏振度的引入与忽略。在目前的光学成像尺度下, 目标信息光的偏振特性在水下主动偏振成像中较水下被动偏振成像方式更明显, 从而在主动成像过程中, 目标信息光的偏振度不可忽略。传统水下主动偏振成像模型的另外几个重要假设是: 背景散射光的偏振度恒定; 目标信息光和背景散射光的偏振方向一致; 忽略水体对不同波段光的选择性散射和吸收; 采用互信息最小时的目标信息光偏振度作为实际场景的目标信息光偏振度。

基于上述重要假设, 水下主动偏振成像模型方法被成功应用于水下场景中, 并成功去除场景的背景散射光对图像的帷幔作用, 但是这些假设也成为限制水下主动偏振成像模型进一步发展的限制条件, 因此, 国内外诸多学者对其进行了进一步研究。2018 年, 韩平丽^[55] 考虑到前向散射光中也包含目标信息, 直接抑制或去除目标信息将降低探测结果中目标信息的解译能力, 因此提出了一种利用图像刃边法估计前向散射光的退化函数的方法, 从而解决前向散射光造成的图像质量退化问题。该算法的核心在于在退化图像中选取灰度值或对比度差异比较明显的刀型区域, 利用此区域计算造成图像最终退化的 PSF, 即退化函数, 并进一步利用图像退化模型

原理计算清晰场景图像。图 20 为通过刃边法估计退化函数 PSF 的主要思路,根据边缘扩散函数定义,首先在退化图像中选取合适的刃边估计边缘扩散函数(ESF),然后对估计的边缘扩散函数计算微分,获取线扩散函数(LSF),最后利用线扩散函数得到点扩散函数,即退化函数。该方法的具体成像流程如图 21 所示。

图 20 ESF、LSF 和 PSF 的关系^[55]Fig. 20 Relationship between ESF, LSF, and PSF^[55]图 21 去除主动水下成像中前向散射光的流程^[55]Fig. 21 Flowchart of removing forward scattered light in active underwater imaging^[55]

该方法的成像结果如图 22 所示。通过退化模型去除散射光影响后,图像整体不受散射光影响,对比度明显提升,如图 22(c)所示。对比图 22(d)和(b),复原图像中能够有效分辨目标细节和纹理,表明成像结果中前向散射光得到有效抑制。根据重建图像的频谱特性,对重建效果进行分析,复原图像的背景散射光不仅得到去除,图像对比度也得到提高,而且解决了前向散射光造成的分辨率降低和图像模糊问题,目标信息有效凸显,证明该方法适用性广泛,如图 23 所示。

2018 年,韩平丽等^[56]针对传统水下主动偏振成

像技术中在背景散射光和目标信息光分离时的噪声放大现象导致重建图像质量受限的问题,提出多尺度水下偏振成像方法。该方法从散射光的空间特性和频谱特性入手,将偏振图像分为对比度高的基础层与对比度低的细节层,对基础层利用联合双边滤波法抑制噪声,对细节层则使用小波变换进行多尺度小波收缩,最后利用小波逆变换对水下退化图像进行高质量重建。从图 24 成像结果可看出,多尺度水下偏振成像结果不仅在视觉观感上改善明显,提升对比度的同时还保留了大量细节信息,且对于多种材质目标的处理结果具有一致性,算法鲁棒性良好。

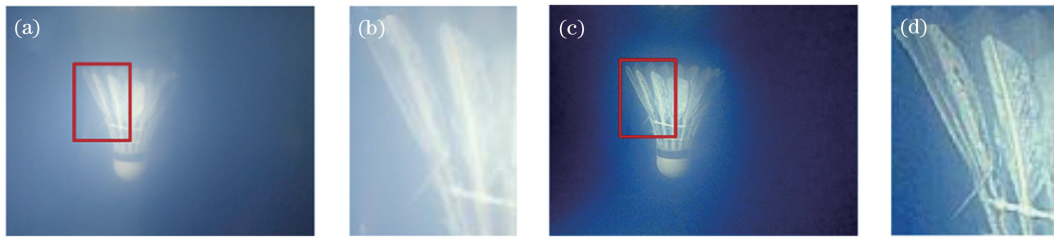


图 22 羽毛球目标复原效果^[55]。(a)原始强度图像;(b)强度图像细节放大图;(c)复原图像;(d)复原图像细节放大图
Fig. 22 Restoration of badminton target^[55]. (a) Original intensity image; (b) detail enlarged view of intensity image; (c) recovered image; (d) detail enlarged view of recovered image

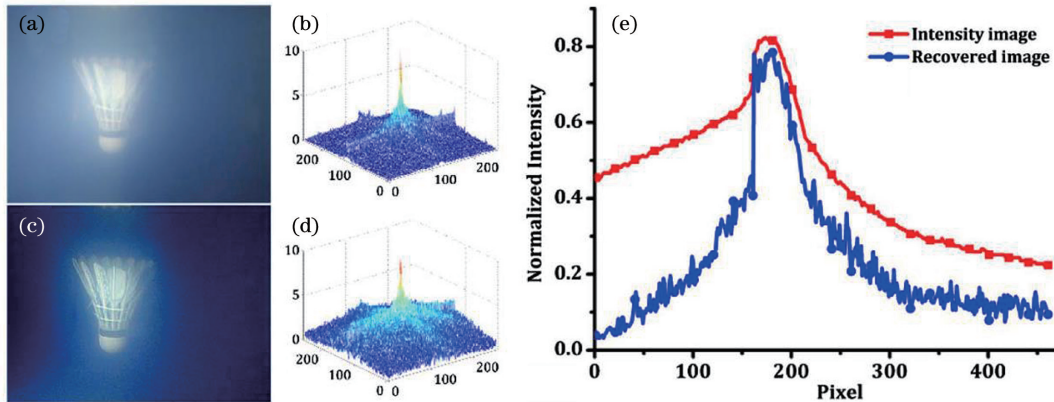


图 23 复原前后频谱及强度统计对比图^[55]。(a)(b)原始水下强度图像和傅里叶频谱图;(c)(d)重建图像和傅里叶频谱图;
(e)强度图像和复原图像第 240 行像素的强度统计值

Fig. 23 Comparison of Fourier spectra and intensity statistics values of intensity image and recovered image^[55].
(a)(b) Original intensity image and its Fourier spectrum; (c)(d) recovered image and its Fourier spectrum;
(e) intensity statistics value of the 240th row pixel of intensity image and recovered image

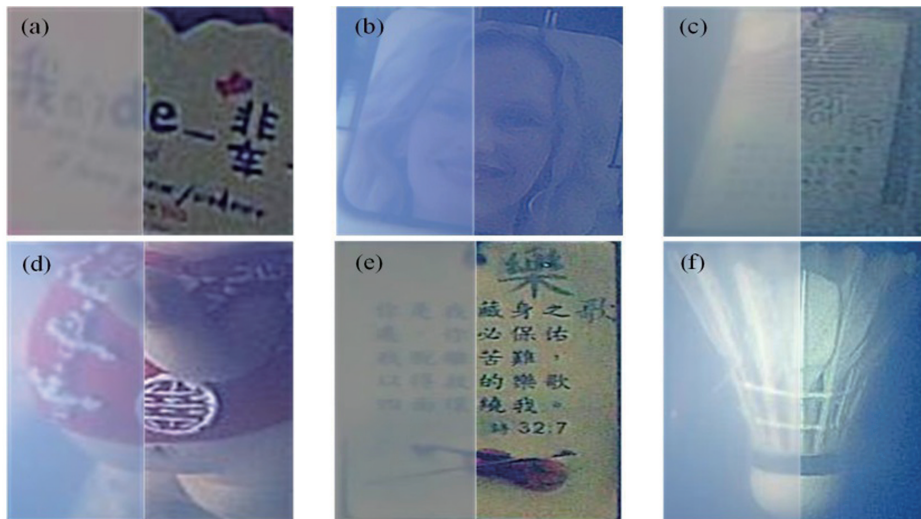


图 24 不同目标多尺度水下偏振成像的复原效果^[56]。左部分为原始强度图像,右部分为复原效果

Fig. 24 Restoration results of different targets by multi-scale underwater polarization imaging^[56]. The left part is original intensity image and the right part is the recovered image

同年,Liu 等^[57]在考虑水体不同散射和吸收特性的基础上,根据波长选择特性,采用单色光源进行成像,并提出一种高浑浊度水下偏振成像方法,该方

法在成像质量和成像距离上都取得了大幅提升。探究了不同波长的光在浑浊水体中的散射与吸收程度,并通过实验说明:随着水体浑浊度的增加,红光

传输性能超过蓝光,因此在高浑浊水体中采用传输性能更优的红光作为主动光源。为有效表征背景散射光与目标信息光的相关性,该方法利用光学相关技术判断两者相似关系,如图 25 所示,在相似度最

低时进行重建,提升成像效果。结果证明,如图 26 所示,该方法能在高浑浊水体中有效去除背景散射光并同时恢复目标细节和纹理信息,为远距离、高浑浊度偏振成像探测奠定了应用基础。

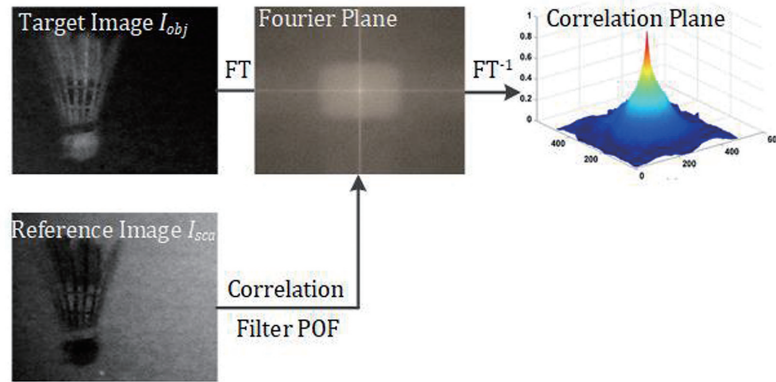


图 25 图像相关性求解示意图^[57]

Fig. 25 Diagram of imaging correlation solution^[57]

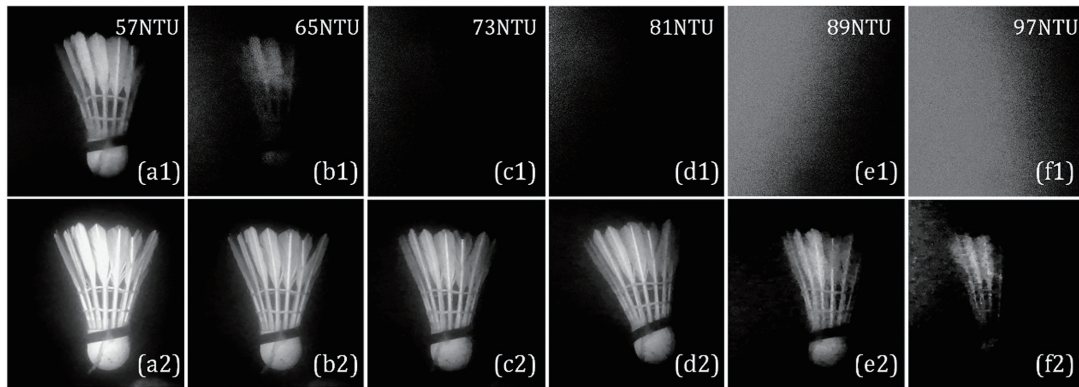


图 26 不同浑浊水体中的复原结果^[57]。(a1)~(f1)采用蓝光照明;(a2)~(f2)采用 Liu 等所提方法

Fig. 26 Recovered results in water with gradually varied turbidity^[57]. (a1)~(f1) Using blue light illumination; (a2)~(f2) using Liu's method

2020 年,封斐等^[58]针对水下高偏振度物体难以复原的问题,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。作者考虑到高偏振度物体的反射光保偏性较好,使用单一值估计像面

的目标偏振度,但有、无目标处的背景散射光因光程不同,不可使用无目标处的散射光来估计整个后向散射光,因此需对后向散射光进行全局估计,表达式为

$$\hat{P}_B = \frac{(I_{\max} - I_{\min}) - \hat{p}_s [(I_{\max} + I_{\min}) - (\hat{b}_{\max} - \hat{b}_{\min})]}{\hat{b}_{\max} + \hat{b}_{\min}}, \quad (8)$$

式中: \hat{P}_B 为背景散射光偏振度的估计; \hat{b}_{\max} 和 \hat{b}_{\min} 分别为 I_{\max} 和 I_{\min} 中同一无目标区域的均值,用以表示背景散射光的估计值。通过(8)式,传统主动水下偏振成像技术对背景散射光的估计误差有一定修正,能够有效复原水下高偏振度物体。如图 27 所示,实验结果证明,该方法对浑浊水体中的高、低偏振度物体成像都具有良好效果,细节保留完整,对比

度提升明显。

2020 年,Guan 等^[59]针对无散射参照的水下场景成像,提出了偏振减方法,用于对水体散射噪声和目标信号的退偏振特性进行正确估计。因为背景散射光是部分偏振的,在旋转偏振片得到 I_{\perp} 时,一些背景散射光仍存在于图像中,因此引入偏振减方法用于尽可能多地消除背景散射光。该方法以传统水

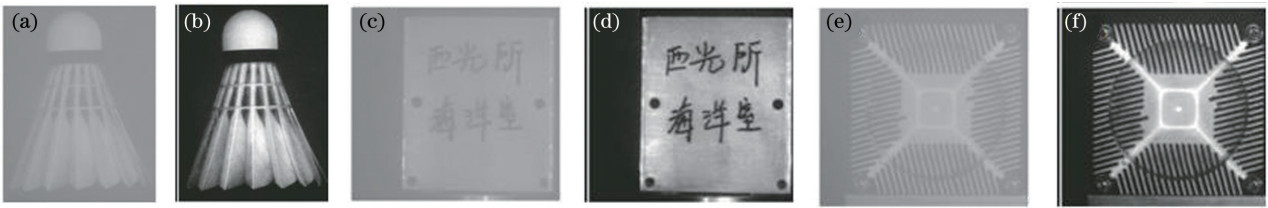


图 27 原始强度图像与封斐等所提方法复原图像的对比^[58]。(a)(c)(e)原始强度图像;(b)(d)(f)复原图像

Fig. 27 Comparison between original intensity images and the recovered images by Feng's method^[58].

(a)(c)(e) Original intensity images; (b)(d)(f) recovered images

下主动偏振成像模型为基础,在求取目标信息光与背景散射光偏振度时引入偏振减方法:

$$I_{ps}(x, y) = I_{\perp}(x, y) - \gamma I_{\parallel}(x, y), \quad (9)$$

式中: I_{ps} 为偏振减图像; γ 为减因子。偏振减方法估计的偏振度为

$$\begin{cases} p_s = \frac{1 - \gamma_1}{1 + \gamma_1} \\ p_B = \frac{1 - \gamma_2}{1 + \gamma_2} \end{cases}, \quad (10)$$

式中: γ_1 为偏振减图像质量最差时 γ 的取值; γ_2 为偏振减图像质量最优时 γ 的取值。通过引入减因子,对目标与背景的偏振度值进行修正,再利用水下主动偏振成像模型便可获取更优成像效果的复原图像,提升探测能力,如图 28 所示,其中 N 为目标距离, C 为图像对比度。该方法由于需要确定两个减因子,因此在场景中有多个不同材质目标时减因子不易确定,故有待进一步优化提升。

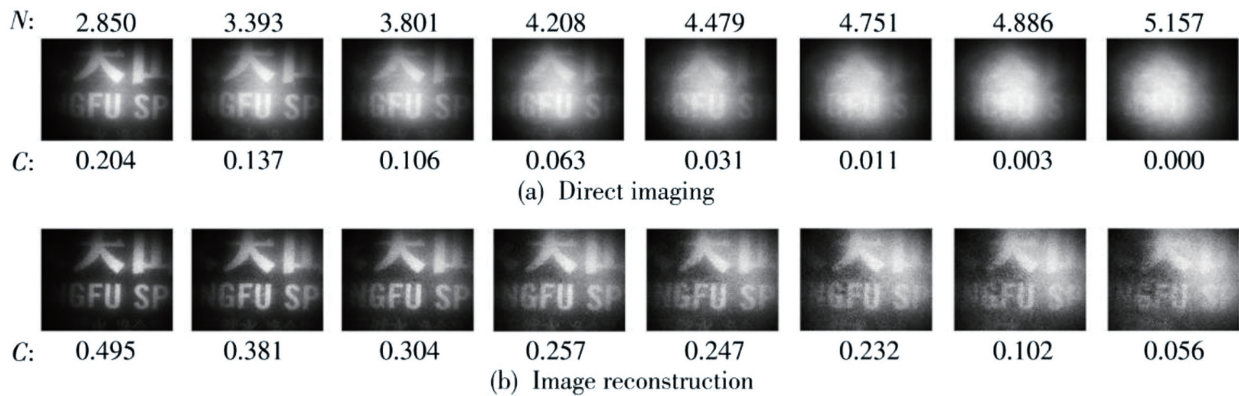


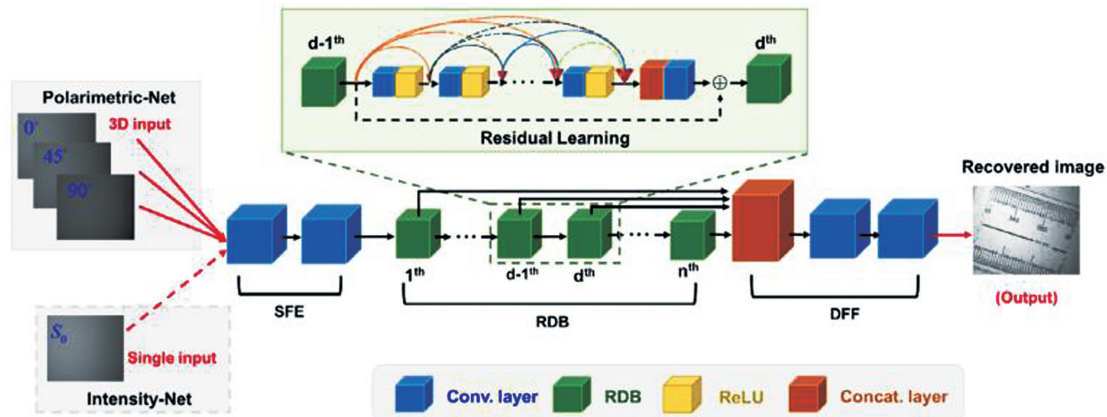
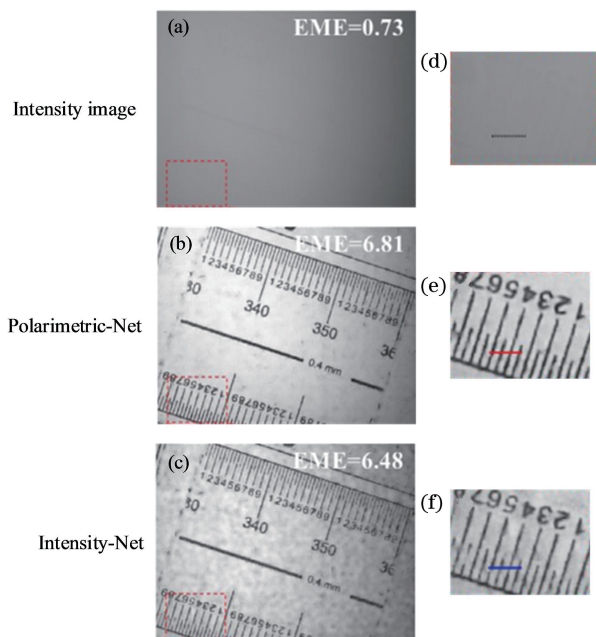
图 28 Guan 等所提方法在不同深度浑浊水体中的原始光强图和复原图像^[59]

Fig. 28 Original intensity images and recovered images by Guan's method in turbid water with gradually varied depth^[59]

2.4 基于深度学习的水下偏振成像技术

近年来,深度学习作为神经网络延伸出去的一支强有力的工具,在包括去散射介质等多个成像领域的应用中开始发挥着强大的能力^[60-61]。它利用广泛的数据集对同一类事物的特征进行提取,通过多层处理的方式,将底层特征转换为高层特征,然后利用这些特征对新输入数据进行处理,获取与特征相匹配的内容,完成复杂任务。偏振作为一种不同于光强的信息,本身就有着明显的特征标志。从 Schechner 等^[40]的水下被动偏振成像模型的假设来看,目标信息光偏振信息可忽略,而受水体散射的背景散射光却部分偏振,这种具有差异的特征信息适合进行特征提取、建立模型,因此 Hu 等^[62]提出了一种基于深度学习的水下偏振图像复原方法。他们

通过模拟实验获取了大量水下场景清晰和浑浊的图像对,然后将图像对建立为数据集后对密集连接神经网络进行训练,学习丰富的多层特征信息,基于完整的网络再进行水下图像复原。在训练网络的过程中,由于 Stokes 矢量中 0° 、 45° 、 90° 三张图像已包含全部偏振信息,为减少训练量便去掉 135° 图像,将三张图像作为网络的输入,然后通过浅层特征提取(SFE)、残差密集块(RDB)和密集特征提取(DFE)三部分模块进行偏振信息的特征提取,最后实现图像复原。网络具体模型如图 29 所示。为体现偏振信息特征提取的优势,同时也将单张光强图像作为输入进行对比,图 30 的实验结果表明,对偏振图像和光强图像进行深度学习训练后,图像对比度、清晰度提升明显,且偏振细节保留完整,局部放大图中数

图 29 偏振密集网络架构^[62]Fig. 29 Architecture of polarimetric dense network^[62]图 30 偏振神经网络、光强神经网络复原图对比^[62]。

(a)~(c)原始光强图像、偏振神经网络复原图像、光强神经网络复原图像；(d)~(f)框选区域放大图

Fig. 30 Comparison between recovered images by Polarimetric-Net and Intensity-Net^[62]. (a)~(c) Original intensity image, recovered image by Polarimetric-Net, recovered image by Intensity-Net; (d)~(f) enlarged frame of selection area

字轮廓完整,边缘清晰,较光强组提升较大。

3 结 论

水下偏振成像技术因设备简便、性价比高、无先验信息、成像质量佳等特点在海底资源探测、水下救援、水下工程等领域发挥着重要作用。随着人类对海洋的深入探索,水下偏振成像技术的发展充满了

机遇和挑战,面对众多水下场景清晰化成像模型,水下偏振成像技术也相对有了更高、更严苛的要求。本文主要从成像原理、重建算法、成像效果评价三方面介绍了具有代表性的最新研究进展。为全面地介绍最新研究进展,通过偏振差分成像技术、水下被动偏振成像技术、水下主动偏振成像技术、基于深度学习的偏振成像技术 4 个方向来对水下偏振成像技术进行分析研究。

偏振差分成像技术的基本原理和实现方法最为简便,利用两幅正交偏振子图像便可实现对背景散射光的抑制,但应用只限于目标识别,对于复杂场景和水体浑浊度稍高的环境,成像效果有限。水下被动偏振成像技术通过探究背景散射光的偏振特性,估计场景透过率,利用水下光传输物理模型反演原始场景,实现清晰化成像。目前发展的新型水下被动偏振成像技术弥补了传统水下偏振成像技术中存在的背景散射光偏振度恒定、忽略目标信息光偏振度等模型漏洞,扩展了该模型的适用范围,进一步提升了成像效果,但是对于高浑浊度场景的清晰化成像有待改进。而水下主动偏振成像技术则将目标的偏振信息引入模型之中,通过寻找目标与背景偏振信息相关性最小的情况进行高效分离,复原后的图像细节信息丰富,但相关性分离意味着某一项偏振信息计算失败整个算法便会失效,对算法的鲁棒性和适用性提出了较高要求,且对于同时包含高、低偏振度物体的复杂环境复原效果差。基于深度学习的偏振成像技术利用偏振信息特征提取实现清晰成像,将神经网络与偏振信息相结合,是偏振水下成像技术的新探索。其成像效果质量优秀、细节完整,但目前只是初步探索,还有多种情况有待研究发展,如对线偏振光、圆偏振光等不同光源入射时分离效果

的探讨,对偏振度、偏振角信息作为输入的网络训练于成像效果的探讨,对高、低偏振度物体同时存在分离效果的探讨,对目标与背景偏振特征信息同时提取、按特征分离的探讨等。目前基于深度学习的偏振成像技术虽然方法较新,但可拓展思路较多,神经网络的构建、训练、优化及偏振信息特征化将成为发展的重点、难点问题,有待进一步解决。

上述成像技术中的缺陷是未来水下偏振成像技术亟待解决的关键问题。此外,成像技术不能只关注成像系统中的某一物理特性,应从全链路方位考虑,对光源的调制、光的传输过程、探测器的接收编码、图像处理算法多方面进行考虑以提升成像效果。如何更为合理、有效地综合各种技术与模型,实现实时动态高质量地清晰化成像仍是水下偏振成像的重要发展方向。

参 考 文 献

- [1] Panetta K, Gao C, Agaian S. Human-visual-system-inspired underwater image quality measures [J]. *IEEE Journal of Oceanic Engineering*, 2016, 41(3): 541-551.
- [2] Watson J. Underwater visual inspection and measurement using optical holography [J]. *Optics and Lasers in Engineering*, 1992, 16(4/5): 375-390.
- [3] 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.
- [4] Shao X P, Liu F, Li W, et al. Latest progress in computational imaging technology and application [J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2020, 57 (2): 020001.
邵晓鹏, 刘飞, 李伟, 等. 计算成像技术及应用最新进展 [J]. *激光与光电子学进展*, 2020, 57 (2): 020001.
- [5] Jaffe J S. Computer modeling and the design of optimal underwater imaging systems [J]. *IEEE Journal of Oceanic Engineering*, 1990, 15(2): 101-111.
- [6] Zhao X W, Jin T, Chi H, et al. Modeling and simulation of the background light in underwater imaging under different illumination conditions [J]. *Acta Physica Sinica*, 2015, 64(10): 104201.
赵欣慰, 金韬, 池灏, 等. 不同光照条件下水下成像背景光的建模与研究 [J]. *物理学报*, 2015, 64(10): 104201.
- [7] Schechner Y Y, Averbuch Y. Regularized image recovery in scattering media [J]. *IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence*, 2007, 29(9): 1655-1660.
- [8] Miao S F, Yang H, Huang Y H, et al. Research progresses of photoacoustic imaging [J]. *Chinese Optics*, 2015, 8(5): 699-713.
苗少峰, 杨虹, 黄远辉, 等. 光声成像研究进展 [J]. *中国光学*, 2015, 8(5): 699-713.
- [9] Grelowska G, Kozaczka E. Underwater acoustic imaging of the sea [J]. *Archives of Acoustics*, 2015, 39(4): 439-452.
- [10] Abraham D A, Willett P K. Active sonar detection in shallow water using the Page test [J]. *IEEE Journal of Oceanic Engineering*, 2002, 27(1): 35-46.
- [11] Glegg S A L, Olivieri M P, Coulson R K, et al. A passive sonar system based on an autonomous underwater vehicle [J]. *IEEE Journal of Oceanic Engineering*, 2001, 26(4): 700-710.
- [12] Zhang K, Jin W Q, Qiu S, et al. Multi-scale Retinex enhancement algorithm on luminance channel of color underwater image [J]. *Infrared Technology*, 2011, 33 (11): 630-634.
张凯, 金伟其, 裘溯, 等. 水下彩色图像的亮度通道多尺度 Retinex 增强算法 [J]. *红外技术*, 2011, 33 (11): 630-634.
- [13] 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.
- [14] Zhao X W, Jin T, Qu S. Deriving inherent optical properties from background color and underwater image enhancement [J]. *Ocean Engineering*, 2015, 94: 163-172.
- [15] Wang Y B, Yin S B, Lü Z W. Underwater image restoration with adaptive background light estimation and non-local prior [J]. *Optics and Precision Engineering*, 2019, 27(2): 499-510.
王一斌, 尹诗白, 吕卓纹. 自适应背景光估计与非局部先验的水下图像复原 [J]. *光学精密工程*, 2019, 27(2): 499-510.
- [16] Rizzi A, Gatta C, Marini D. A new algorithm for unsupervised global and local color correction [J]. *Pattern Recognition Letters*, 2003, 24 (11): 1663-1677.
- [17] Xu Y, Wen J, Fei L K, et al. Review of video and image defogging algorithms and related studies on image restoration and enhancement [J]. *IEEE Access*, 2016, 4: 165-188.
- [18] Emberton S, Chittka L, Cavallaro A. Underwater image and video dehazing with pure haze region segmentation [J]. *Computer Vision and Image*

- Understanding, 2018, 168: 145-156.
- [19] Chen X G, Hu J Q. Underwater image enhancement by color correction and detail preserve[J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2020, 57(24): 241013.
陈小国, 胡锦涛. 基于颜色校正和细节保持的水下图像增强[J]. *激光与光电子学进展*, 2020, 57(24): 241013.
- [20] Abdul Ghani A S, Mat Isa N A. Underwater image quality enhancement through integrated color model with Rayleigh distribution [J]. *Applied Soft Computing*, 2015, 27: 219-230.
- [21] Bazeille S, Quidu I, Jaulin L, et al. Automatic underwater image pre-processing [C]//*Proceedings of Characterization Du Milieu Marin (CMM'06)*, October 16-19, 2006, Brest, France. France: Archive Ouverte HAL, 2006.
- [22] Kumar Rai R, Gour P, Singh B. An enhancement of underwater images using DCP and CLAHE algorithm [J]. *International Journal of Recent Technology and Engineering*, 2019, 8(4): 2805-2813.
- [23] Li C L, Zhang X. Underwater image restoration based on improved background light estimation and automatic white balance[C]//2018 11th International Congress on Image and Signal Processing, BioMedical Engineering and Informatics (CISP-BMEI), October 13-15, 2018, Beijing, China. New York: IEEE Press, 2018.
- [24] Singh G, Jaggi N, Vasamsetti S, et al. Underwater image/video enhancement using wavelet based color correction (WBCC) method [C] // 2015 IEEE Underwater Technology (UT), February 23-25, 2015, Chennai, India. New York: IEEE Press, 2015.
- [25] Narasimhan S G, Nayar S K, Sun B, et al. Structured light in scattering media[C]//Tenth IEEE International Conference on Computer Vision (ICCV'05), October 17-21, 2005, Beijing, China. New York: IEEE Press, 2005: 420-427.
- [26] Sarafraz A, Haus B K. A structured light method for underwater surface reconstruction[J]. *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*, 2016, 114: 40-52.
- [27] McLean E A, Burris H R, Strand M P. Short-pulse range-gated optical imaging in turbid water [J]. *Applied Optics*, 1995, 34(21): 4343-4351.
- [28] Vollmerhausen R H, Jacobs E L, Devitt N M, et al. Modeling the target acquisition performance of laser-range-gated imagers[J]. *Proceedings of SPIE*, 2003, 5076: 101-111.
- [29] Jaffe J. Performance bounds on synchronous laser line scan systems[J]. *Optics Express*, 2005, 13(3): 738-748.
- [30] Kulp T J, Garvis D, Kennedy R, et al. Development and testing of a synchronous-scanning underwater imaging system capable of rapid two-dimensional frame imaging[J]. *Applied Optics*, 1993, 32(19): 3520-3530.
- [31] Sun J F, Gao J, Wei J S, et al. Research development of under-water detection imaging based on streak tube imaging lidar[J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2010, 39(5): 811-814.
孙剑峰, 郜键, 魏靖松, 等. 条纹管激光成像雷达水下探测成像研究进展[J]. *红外与激光工程*, 2010, 39(5): 811-814.
- [32] Gao J, Sun J F, Wei J S, et al. Research of underwater target detection using a Slit Streak Tube Imaging Lidar [C] // 2011 Academic International Symposium on Optoelectronics and Microelectronics Technology, October 12-16, 2011, Harbin, China. New York: IEEE Press, 2011: 240-243.
- [33] Han J F, Yang K C, Xia M, et al. Resolution enhancement in active underwater polarization imaging with modulation transfer function analysis [J]. *Applied Optics*, 2015, 54(11): 3294-3302.
- [34] Amer K O, Elbouz M, Alfalou A, et al. Enhancing underwater optical imaging by using a low-pass polarization filter[J]. *Optics Express*, 2019, 27(2): 621-643.
- [35] Yao T F, Zhu J, Fan Y, et al. Usage of polarization characteristic of laser beam in underwater target image detection [J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2010, 47(6): 061402.
姚天甫, 朱靖, 樊焯, 等. 激光偏振特性用于水下目标探测[J]. *激光与光电子学进展*, 2010, 47(6): 061402.
- [36] Li X, Liu F, Chen F Y, et al. A depth information acquisition method through 3D polarization imaging technology[C] // *Conference on Lasers and Electro-Optics*, May 5-10, 2019, San Jose, California. Washington, D.C.: OSA, 2019: JTu2A. 14.
- [37] Cai Y D, Han P L, Liu F, et al. Polarization-based extracting diffuse reflection from light-field of object surface [J]. *Acta Physica Sinica*, 2020, 69(23): 234201.
蔡玉栋, 韩平丽, 刘飞, 等. 基于光场偏振特性的目标表面漫反射分量获取技术[J]. *物理学报*, 2020, 69(23): 234201.
- [38] 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.
- [39] 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.
- [40] 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.
- [41] Treibitz T, Schechner Y Y. Active polarization descattering [J]. IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence, 2009, 31(3): 385-399.
- [42] Rowe M P, Pugh E N, Tyo J S, et al. Polarization-difference imaging: a biologically inspired technique for observation through scattering media [J]. Optics Letters, 1995, 20(6): 608-610.
- [43] Tyo J S. Enhancement of the point-spread function for imaging in scattering media by use of polarization-difference imaging [J]. Josa A, 2000, 17(1): 1-10.
- [44] Walker J G, Chang P C Y, Hopcraft K I. Visibility depth improvement in active polarization imaging in scattering media [J]. Applied Optics, 2000, 39(27): 4933-4941.
- [45] Miller D A, Dereniak E L. Selective polarization imager for contrast enhancements in remote scattering media [J]. Applied Optics, 2012, 51(18): 4092-4102.
- [46] 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.
- [47] Han P L, Liu F, Wei Y, et al. Optical correlation assists to enhance underwater polarization imaging performance [J]. Optics and Lasers in Engineering, 2020, 134: 106256.
- [48] Xu Q, Guo Z Y, Tao Q Q, et al. A novel method of retrieving the polarization qubits after being transmitted in turbid media [J]. Journal of Optics, 2015, 17(3): 035606.
- [49] Xu Q, Guo Z Y, Tao Q Q, et al. Transmitting characteristics of polarization information under seawater [J]. Applied Optics, 2015, 54(21): 6584-6588.
- [50] 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.
- [51] Hu H F, Zhao L, Huang B J, et al. Enhancing visibility of polarimetric underwater image by transmittance correction [J]. IEEE Photonics Journal, 2017, 9(3): 1-10.
- [52] Wei Y, Liu F, Yang K, et al. Passive underwater polarization imaging detection method in neritic area [J]. Acta Physica Sinica, 2018, 67(18): 184202.
- 卫毅, 刘飞, 杨奎, 等. 浅海被动水下偏振成像探测方法 [J]. 物理学报, 2018, 67(18): 184202.
- [53] Liu F, Wei Y, Han P L, et al. Polarization-based exploration for clear underwater vision in natural illumination [J]. Optics Express, 2019, 27(3): 3629-3641.
- [54] Hu H F, Zhao L, Li X B, et al. Underwater image recovery under the nonuniform optical field based on polarimetric imaging [J]. IEEE Photonics Journal, 2018, 10(1): 1-9.
- [55] Han P L. Underwater targets detection based on polarization imaging [D]. Xi'an: Xidian University, 2018: 67-78.
- 韩平丽. 水下目标偏振成像探测技术研究 [D]. 西安: 西安电子科技大学, 2018: 67-78.
- [56] Han P L, Liu F, Zhang G, et al. Multi-scale analysis method of underwater polarization imaging [J]. Acta Physica Sinica, 2018, 67(5): 054202.
- 韩平丽, 刘飞, 张广, 等. 多尺度水下偏振成像方法 [J]. 物理学报, 2018, 67(5): 054202.
- [57] Liu F, Han P L, Wei Y, et al. Deeply seeing through highly turbid water by active polarization imaging [J]. Optics Letters, 2018, 43(20): 4903-4906.
- [58] 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.
- [59] Guan J G, Zhao Y, Zheng Y Q, et al. Optical polarization imaging for underwater target detection with non-scatter background [J]. Journal of Measurement Science and Instrumentation, 2020, 11(4): 335-342.
- [60] Li Y Z, Xue Y J, Tian L. Deep speckle correlation: a deep learning approach toward scalable imaging through scattering media [J]. Optica, 2018, 5(10): 1181-1190.
- [61] Zhang J C, Shao J B, Luo H B, et al. Learning a convolutional demosaicing network for microgrid polarimeter imagery [J]. Optics Letters, 2018, 43(18): 4534-4537.
- [62] Hu H F, Zhang Y B, Li X B, et al. Polarimetric underwater image recovery via deep learning [J]. Optics and Lasers in Engineering, 2020, 133: 106152.