光电技术及应用

DOI：10.16818/j.issn1001－5868.2021090702

基于非均匀圆偏振光照射的水下偏振图像处理方法

王昊月，陈向宁*，杜姝函，徐碧洁，郑逢杰

（航天工程大学 航天信息学院，北京 101400）

摘　要： 针对浑浊水下成像环境，提出了基于非均匀圆偏振光照射的浑浊水下偏振图像处理方法。首先对非均匀圆偏振光照明条件下目标成像和处理遇到的困难进行了分析，并对圆偏振光作为光源的特点进行阐述；其次设计成像环境对水下目标物的偏振图像和可见光图像进行采集。采用基于CLAHE和MSRCR的方法对可见光图像进行预处理，大幅度消除非均匀光照对图像清晰度的影响；依据水下成像的物理模型，考虑到水下目标物反射光的偏振特性，提出了一种基于偏振信息图像融合的图像去雾方法，实验证明该方法能够对偏振信息图像进行优势融合并增强其边缘轮廓；考虑到人眼视觉特性，将偏振信息融合图像与优化后的可见光图像进行融合，最终实现对水下模糊偏振图像的复原。结果表明，该方法实现了偏振图像边缘轮廓及纹理的增强，显著提高了水下图像的质量。

关键词： 浑浊水体；偏振成像；图像融合；水下去雾

中图分类号： TN219；TP391.41　　**文章编号：** 1001－5868(2022)02－0383－06

Underwater Polarimetric Image Processing Method Based on Non-uniform Circularly Polarized Light Illumination

WANG Haoyue, CHEN Xiangning, DU Shuhan, XU Bijie, ZHENG Fengjie

(School of Aerospace Information, Space Engineering University, Beijing 101400, CHN)

Abstract: Presented is a method for processing polarised images based on non-uniform circularly polarised light irradiation for turbid underwater imaging environments. First, the difficulties encountered in imaging and processing targets under non-uniform circularly polarised light illumination conditions are analyzed and the characteristics of circularly polarised light as a light source are described. Secondly, an imaging environment is designed to acquire polarised and visible images of underwater targets. A method based on CLAHE and MSRCR is proposed for pre-processing visible light images to substantially eliminate the effect of non-uniform illumination on image sharpness. The method is shown to be able to fuse the polarisation information image and enhance its edge contours, and finally to fuse the polarisation information fused image with the optimised visible light image, taking into account the visual characteristics of human eyes. The results show that the method achieves the enhancement of the edge contours and textures of the polarised images, and significantly improves the quality of the underwater images.

Key words: turbid underwater; polarization imaging; image fusion; defogging underwater

收稿日期：2021－09－07.

基金项目：军委科技委引领基金项目(18-163-00-TS-004-080-01).

* **通信作者：**陈向宁　**E-mail:** xn_chen_edu@163.com

0 引言

水体的光学特性决定了光波在水中传输时会产生很大的吸收和散射作用,直接导致水下探测的成像十分模糊。传统强度成像方法在水下受到严重限制[1]。偏振成像因其在减轻水下光线散射与吸收方面发挥的独特作用成为了获取水下目标物信息的重要手段。但水下偏振成像效果也会受到如成像距离远近及水体浑浊程度等因素的影响。针对偏振探测技术存在的问题,多年来研究人员提出了许多方法对相应问题进行优化。

国外的偏振探测成像技术开始较早且在多个领域都有了普遍的应用,目前已拥有了很多成熟的研究成果。20 世纪中叶 Duntley 等对不同波段的光线在水下的衰减过程做了大量实验,实验结果证明不同波长的光线在水下的衰减程度不同[2];Dalgleish 等提出了一种基于压缩感知理论并使用数字镜来进行水下激光成像的新型探测成像系统,实验结果证明该系统可以在一定程度上减少水中微粒对入射光的散射作用[3]。国内对水下偏振探测成像技术的探索较之于国外开始稍晚,目前尚不成熟,但发展非常迅速。曹念文等通过总结偏振成像原理,经过大量实验,证明了偏振光源作为主动照明光时能够比自然光源获得更好的水下成像效果[4];李明杰等使用了一种激光水下偏振成像技术对目标物进行采集,并对采集到的图像进行偏振特征融合,实验结果证明该方法对激光成像的成像效果有很好地提升[5]。此外,中国海洋大学实验室设计了一款水下激光拉曼光谱仪,该系统灵敏度很高、体积小巧,并且可以对探测到的不同材质的水下物体进行相应分类[6];西北农林科技大学在压缩感知高光谱偏振成像方面取得了巨大进展,提出的基于 LCVR 的压缩感知高光谱成像系统及方法可以有效地解决包括通道混叠在内的光谱成像技术中常见的难题[7]。

本文结合水下偏振图像成像特性和图像增强算法,提出了一种新的水下图像清晰化方案。首先设计实验采集水下目标物偏振图像及可见光图像;随后对可见光图像进行优化,并对经斯托克斯矢量法处理后的偏振信息图像进行图像融合;最后对优化后的可见光图像及偏振信息融合图像进行图像融合。实验结果表明,本文算法复原的图像轮廓和细节更清晰,视觉效果更优。

1 圆偏振光主动照明原理

在实际应用中,因为水下环境的低光照、强散射等特点,绝大多数的水下成像探测系统都需要采取基于主动照明的成像方法。传统的主动照明偏振成像方法多使用非偏振光源和线偏振光源。但线偏振光及非偏振光在强散射介质中的偏振保持能力不佳,尤其在高度浑浊水体中非常容易失去其偏振特性从而丢失目标物的偏振信息。而圆偏振光在强散射介质中则具有更好的偏振保持能力。根据对圆偏振光传输特性的研究,本文使用圆偏振光作为照明光源,结合传统的偏振图像处理方法及图像融合的方式实现浑浊水下环境的图像复原与增强[8]。

2 本文算法

2.1 基于 MSRCR 和 CLAHE 的非均匀光照图片增强技术

2.1.1 带颜色恢复的多尺度 Retinex 算法

Retinex 理论的模型可以表示为[9]

$$S(x,y)=L(x,y)\cdot R(x,y) \tag{1}$$

其中,$S(x,y)$代表原始图像,$R(x,y)$代表图像反射分量,$L(x,y)$代表图像照射分量。Retinex 理论在随后的发展中形成了单尺度 Retinex 算法(SSR)、多尺度 Retinex 算法(MSR)和带彩色恢复的多尺度 Retinex 算法(MSRCR)[10]。

MSRCR 算法由 Jobson 等提出,该算法在 MSR 的计算过程中,引入了一个色彩因子 C 用以弥补因为图像局部区域对比度增强而产生的图像颜色失真,MSRCR 算法原理为

$$R_{\mathrm{MSRCR}_k}(x,y)=\alpha_k(x,y)\cdot R_{\mathrm{MSR}_k}(x,y) \tag{2}$$

$$R_{\mathrm{MSR}_k}(x,y)=\sum_k^K \omega_k\{\log S(x,y)-\log[F_k(x,y)\cdot S(x,y)]\} \tag{3}$$

$$\alpha_k(x,y)=\log\left[\beta\frac{I_k(x,y)}{\sum_{n=1}^{N}I_n(x,y)}\right] \tag{4}$$

式中,K 代表高斯中心环绕函数的个数,$F(x,y)$代表中心环绕函数;N 代表波段数,$I_k(x,y)$代表第 k 个波段的图像,β 代表调整参数。

2.1.2 对比度受限自适应直方图均衡化

CLAHE 算法其实就是加入对比度限制的直方图均衡算法,该方法可以实现对图像直方图的再分配,同时对每一小块的直方图进行均衡化处理[13];

再使用双线性插值法连接每个处理后的小块，从而增强图像的局部动态对比度，保留图像纹理和形态特征，并抑制噪声的放大[11]。

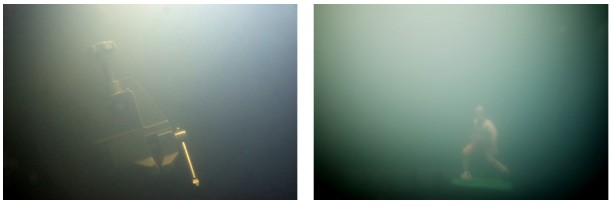
2.1.3　基于 CLAHE 和 MSRCR 融合的新方法

MSRCR 算法对于光照强度改变较为剧烈的图像容易出现光晕从而导致彩色图片颜色泛白、失真。而 CLAHE 算法则是通过限制直方图幅度变化的方式来增加图像的局部对比度、减少光照变化。因此为了解决因光照不均对水下可见光图像造成的影响，本文采用这两种算法融合的方法对可见光图像进行优化[12]。

融合后的图像在保留融合源图像的优势部分的同时，还需要尽可能增加图像细节。加权平均法(Weighted Averaging，WA)可以将几幅画质不同的图像的信息直接融合，简单、直观、运算速度快的同时能够提高融合图像的信噪比。因此本文选择加权平均法将经 CLAHE 算法与 MSRCR 算法分别处理后的水下图像做融合处理。经过多次试验，最终将权值设为 0.9。

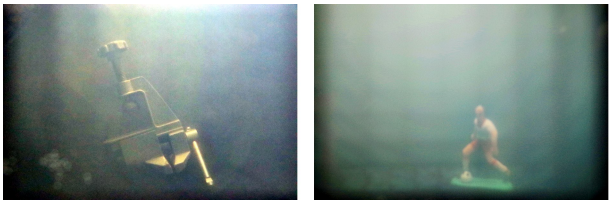
2.1.4　实验结果

对比图 1 和图 2 可以看出，对在非均匀圆偏振光照明下获得的可见光图片在使用本文算法进行图像增强之后，图像的细节更加突出、轮廓更加清晰。



(a)　台虎钳　　(b)　塑料手办

图 1　基于非均匀圆偏振光照明的可见光图片



(a)　台虎钳　　(b)　塑料手办

图 2　经过 CLAHE 和 MSRCR 处理后图像

2.2　基于 NSCT 的偏振信息图像融合技术

对于经 Stokes 矢量法计算得到的偏振信息图像，本文结合图像融合思想，提出了基于 NSCT 的水下图像清晰化方法对其优势部分进行整合。

本文采用的基于 NSCT 变换的图像融合方法主要有以下几个步骤[13]：① 利用 NSCT 对待处理图像分别进行多级 NSCT 分解。选择金字塔滤波器‘maxflat’进行非下采样，‘pkva’作为方向滤波器，分解层数选择 3 层，分解尺度为[1，2，3]。NSCT 分解后，图像的高通系数和低通系数为 $\{C^A_{j0}(m,n),C^A_{j,l}(m,n)\}(j\geqslant j_0)$ 和 $\{C^B_{j0}(m,n),C^B_{j,l}(m,n)\}(j\geqslant j_0)$，其中 $C_{j0}(m,n)$为低频自带系数，$C_{j,l}(m,n)$为 j 尺度下 l 方向上的带通子带系数；②选取一定的融合规则对低频分量和高频分量分别进行图像融合；③通过得到的融合 NSCT 系数进行 NSCT 重构，计算出最后的融合图像[15]。

(1)低频系数融合规则

图像的低频信息是在低分辨率下对原始图像的近似，它反映的是图像的轮廓信息，所以它的选择对图像的视觉效果有着直接的影响。为了更好地运用图像经 NSCT 变换后的低频子带区域特性，本文选择了加权平均的方法。

$$C^F_{j0}(m,n)=\omega_1(m,n)\times C^{I_{vi}}_{j0}(m,n)+\omega_2(m,n)\times C^{i}_{ir_{j0}}(m,n) \tag{5}$$

$$\omega_1(m,n)=\frac{\omega_{vi}(m,n)}{\omega_{vi}(m,n)+\omega_{ir}(m,n)} \tag{6}$$

$$\omega_2(m,n)=\frac{\omega_{ir}(m,n)}{\omega_{vi}(m,n)+\omega_{ir}(m,n)} \tag{7}$$

其中，$\omega_{ir}(m,n)$和 $\omega_{vi}(m,n)$代表两张融合源图像的物理特征。

(2)高频系数融合规则

高频系数反映图像的细节信息，包括边缘和纹理等，对人眼识别和机器视觉最为敏感。考虑到高频部分细节信息的独立性很强，本文采取了像素点绝对值取大的方法[14]：

$$C^F_{j,l}(m,n)=\begin{cases}C^A_{j,l}(m,n), & |C^A_{j,l}(m,n)|\geqslant|C^B_{j,l}(m,n)|\\ C^B_{j,l}(m,n), & |C^A_{j,l}(m,n)|<|C^B_{j,l}(m,n)|\end{cases} \tag{8}$$

3　实验与结果分析

3.1　实验

为验证本文提出的基于主动照明的水下偏振图像处理方法的可行性，搭建了如图 3 所示的实验系统。在该成像系统中，实验水体使用纯净水和脱脂牛奶对自然水体环境进行模拟。

本次实验选择白光 LED 灯作为实验光源，在光源前放置一个大小合适的圆偏振片，使光源发出的

光转换成圆偏振光。放置好实验装置后，将目标置于水下 20 cm 深处，将相机对准目标，并在相机前放置一个可旋转的偏振片来调制和接收目标反射光，最后调整光圈和焦距，使其成像清晰。本次实验选择了一个小型金属台虎钳和塑料手办作为目标，用以观察不同材质目标的成像效果。

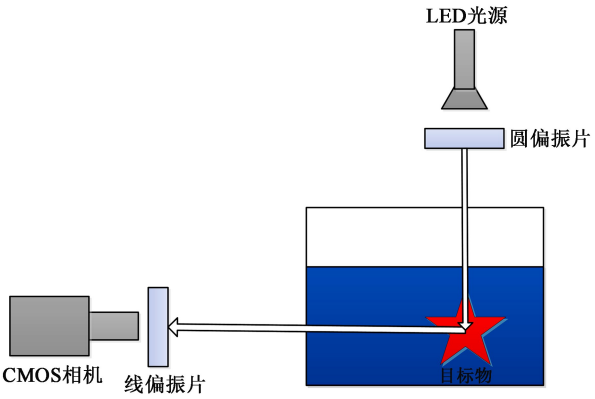


图 3 水下圆偏振光主动照明成像示意图

旋转偏振片采集不同角度的偏振图像，并使用 Stokes 矢量法计算出该图像的偏振信息图像。

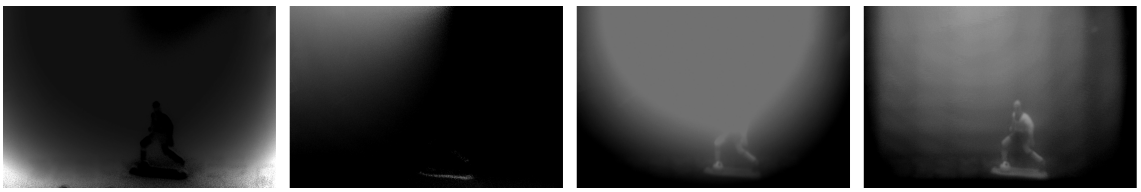
偏振信息图像及预处理后的可见光图像如图 4～5 所示。需要注意的是，由于本实验中获得的偏振图像是灰度图像，因此可见光图像也需要转换为灰度图像。根据 Stokes 矢量的计算结果，可以得到目标物反射光的总光强图像（s_0°）、偏振图像（DOP）和偏振角图像（θ），计算结果如图 4 所示。

根据图 4 和图 5，可以看出图像的亮度下降较大，但图像对比度大幅度增加，整体轮廓完整，边缘纹理信息突出。经过分析比较，本文最终选择 s_0°，DOP 和 θ 作为图像融合源图像，使融合图像具有 s_0° 的整体强度信息、DOP 的边缘轮廓信息和 θ 的目标纹理信息[16]。最后，利用 NSCT 变换将预处理后的的可见光图像与偏振融合图像融合，得到最终结果[17]。



（a） 偏振度图像 （b） 偏振角图像 （c） 反射光总光强图像 （d） 优化后的可见光图像

图 4 台虎钳作为目标的偏振信息图像



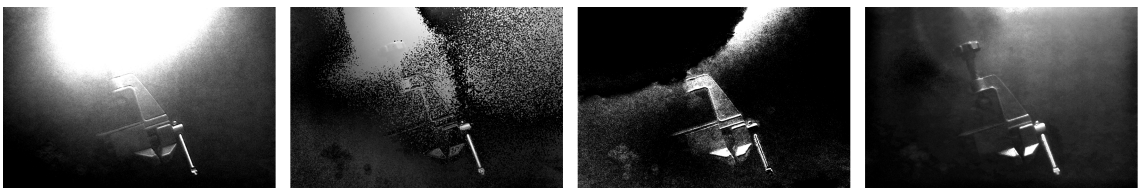
（a） 偏振度图像 （b） 偏振角图像 （c） 反射光总光强图像 （d） 优化后的可见光图像

图 5 塑料手办作为目标的偏振信息图像

3.2 实验结果及分析

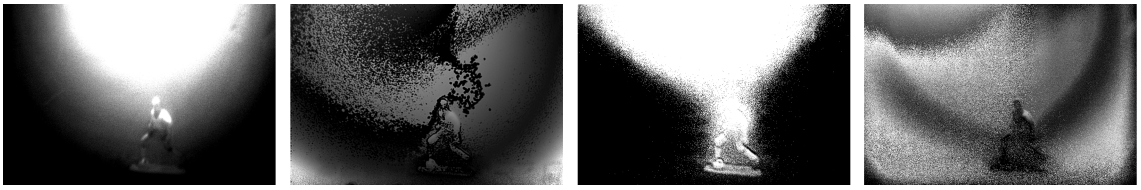
为了验证本文方法的有效性，选择了三种偏振图像处理方法进行对比实验。如图 6～7 所示，方法 1 是基于文献[18]中提出的基于暗通道先验原理的偏振图像去雾方法，方法 2 是文献[14]中提出的基于图像融合的偏振图像处理方法，方法 3 是文献[21]中提出的基于偏振差分成像的图像去雾方法。

实验过程中发现，以上文献中使用的方法在对背景相对单一、光照均匀且充足的图像进行处理时有较好的优化效果，但对于本文实验环境中拍摄的照片效果不佳。但为了对该算法进行更为客观的评价，本文选择了信息熵、平均值、tenengrad函数、图



（a） 方法 1 （b） 方法 2 （c） 方法 3 （d） 本文方法

图 6 台虎钳作为目标物的对比实验结果



(a) 方法 1　(b) 方法 2　(c) 方法 3　(d) 本文方法

图 7　塑料手办作为目标物的对比实验结果

像的点锐度和平均梯度作为客观图像评价指标。几种方法的评价结果如表 1 所示。

图像信息熵作为评价图像的一个量化标准，它从信息论中信息熵的概念出发，反映了图像中平均信息量的大小。通常情况下，图像的信息熵越大其质量越好；均值能反映图像的平均亮度，平均亮度越大，图像质量越好[19]；Tenengrad 函数是一种基于梯度的图像清晰度评价函数，一般而言越清晰的图像边缘越尖锐，因此梯度值更大；点锐度法主要根据图像边缘灰度水平的变化来判断图像的锐度[20]。

表 1　采用不同方法处理后的图像质量评价结果

方法	信息熵	均值	Tenengrad 函数	点锐度
1	7.072 6	140.463 2	0.36	$8.169\,2\times10^{8}$
2	6.447 0	78.727 0	0.29	$9.557\,8\times10^{8}$
3	1.344 2	23.337 9	0.58	$2.166\,3\times10^{9}$
本文	7.476 5	105.789 9	1.00	$2.300\,1\times10^{9}$
1	7.250 6	145.093 0	0.18	$3.509\,8\times10^{8}$
2	7.258 2	97.493 0	0.13	$2.143\,3\times10^{8}$
3	2.232 5	101.396 2	0.33	$9.139\,0\times10^{8}$
本文	7.275 6	157.885 3	0.56	$1.446\,0\times10^{9}$

从上述结果可以看出，经本文算法处理的图像在各个指标上都得到了相应地改进。应当注意的是，使用方法 1 获得的图像的平均值非常高，但通过分析图像可以发现，其平均值的高水平并不意味着其图像质量更好，而是由于处理图像顶部的过度曝光使得图像亮度的平均值更高。

4　结论

本文提出了一种基于非均匀圆偏振光照射的水下偏振图像处理方法，通过改进现有的偏振图像处理方法，结合可见光图像和偏振图像实现水下图像的增强。实验结果证明，本文算法有效提高了水下偏振图像的质量，能够探测到水下目标物更多的纹理及轮廓特征。然而，该方法也存在计算量大、运行速度慢的缺点，下一步将考虑如何减少计算量和运行时间。

参考文献：

[1] Jarina Raihan A, Pg Emeroylariffion Abas, Liyanage C, et al. Review of underwater image restoration algorithms[J]. IET Image Processing, 2019, 13(10): 1587-1596.

[2] 吴中芳，周少聪，何贤强. 水下物体偏振成像探测的实验研究[J]. 激光与光电子学进展，2018，55(8)：283-290.
Wu Zh F, Zhou Sh C, He X Q. Experimental study of polarimetric imaging detection of underwater objects[J]. Advances in Lasers and Optoelectronics, 2018, 55(8): 283-290.

[3] Dalgleish F R, Bing O, Caimi F M, et al. Underwater laser serial imaging using compressive sensing and digital mirror device[J]. Proc. SPIE, 2011, 8037(1): 168-241.

[4] 曹念文，张玉钧，王锋平. 水下目标自然光偏振成像的研究[J]. 量子电子学报，1999，16(2)：110-115.
Cao N W, Zhang Y J, Wang F P. Study of natural light polarisation imaging of underwater targets[J]. J. of Quantum Electronics, 1999, 16(2): 110-115.

[5] 李明杰，刘晓飞，张英华. 激光成像水下偏振成像的特征融合技术研究[J]. 激光杂志，2017，38(5)：94-98.
Li M J, Liu X F, Zhang Y H. Feature fusion technique for laser imaging underwater polarimetric imaging[J]. Laser Magazine, 2017, 38(5): 94-98.

[6] 刘庆省，郭金家，杨德旺，等. 小型高灵敏度水下拉曼光谱系统[J]. 光学精密工程，2018，26(1)：8-13.
Liu Q S, Guo J J, Yang D W, et al. Small, high sensitivity underwater Raman spectroscopy system[J]. Optical Precision Engineering, 2018, 26(1): 8-13.

[7] Ren W Y, Fu Ch, Wu D, et al. Channeled compressive imaging spectropolarimeter[J]. Opt. Express, 2019, 27(3): 2197.

[8] 赵　琳. 基于偏振信息的水下复杂环境中灰度图像复原方法的研究[D]. 天津：天津大学，2018.
Zhao L. Research on grayscale image recovery method in underwater complex environment based on polarization information[D]. Tianjin: Tianjin University, 2018.

[9] 徐清华，戴声奎. 基于域滤波的自适应 Retinex 图像增强[J]. 计算机工程与科学，2016，38(9)：1830-1835.
Xu Q H, Dai Sh K. Adaptive Retinex image enhancement based on domain filtering[J]. Computer Engineering and Science, 2016, 38(9): 1830-1835.

[10] 刘　敏. 基于 Retinex 理论的非均匀光照图像增强研究[D]. 桂林：广西师范大学，2019.
Liu M. Research on non-uniform illumination image enhancement based on Retinex theory[D]. Guilin: Guangxi

Normal University, 2019.

[11] Shi Z, Feng Y, Zhao M, et al. Normalised gamma transformation-based contrast-limited adaptive histogram equalisation with colour correction for sand-dust image enhancement[J]. IET Image Processing, 2020, 14(4): 747-756.

[12] Buades A, Lisani J, Petro A B, et al. Backlit images enhancement using global tone mappings and image fusion [J]. IET Image Processing, 2020, 14(2): 211-219.

[13] 殷 莹, 吴向前, 王 萍, 等. 基于道路监控的图像增强算法研究[J]. 新疆大学学报(自然科学版), 2018, 35(2): 217-221, 234.

Yin Y, Wu X Q, Wang P, et al. Research on image enhancement algorithm based on road surveillance[J]. J. of Xinjiang University (Natural Science Edition), 2018, 35(2): 217-221, 234.

[14] 鲍富成. 水下偏振成像及图像处理方法研究[D]. 长春: 长春理工大学, 2019.

Bao F Ch. Research on underwater polarization imaging and image processing methods [D]. Changchun: Changchun University of Science and Technology, 2019.

[15] 张 全. 基于NSST的红外与可见光图像融合算法研究[D]. 西安: 西安电子科技大学, 2020.

Zhang Q. Study on the fusion algorithm of infrared and visible light image based on NSST [D]. Xi'an: Xidian University, 2020.

[16] Wang S, Shen Y. Multi-modal image fusion based on saliency guided in Nsct domain[J]. IET Image Processing, 2020, 14(13): 3188-3201.

[17] Zhang G, Yan X, Xu Y, et al. Neural guided visual slam system with laplacian of gaussian operator[J]. IET Computer Vision, 2021, 15(3): 181-196.

[18] 游 江, 刘鹏祖, 容晓龙, 等. 基于暗通道先验原理的偏振图像去雾增强算法研究[J]. 激光与红外, 2020, 50(4): 493-500.

You J, Liu P Z, Rong X L, et al. Research on polarization image defogging enhancement algorithm based on dark channel a priori principle[J]. Laser and Infrared, 2020, 50(4): 493-500.

[19] 杨光义. 图像质量评价及其在图像去噪中的应用研究[D]. 武汉: 武汉大学, 2018.

Yang G Y. Research on image quality evaluation and its application in image denoising[D]. Wuhan: Wuhan University, 2018.

[20] Maksimovic-Moicevic S, Lukac Ž, Temerinac M. Objective estimation of subjective image quality assessment using multi-parameter prediction[J]. IET Image Processing, 2019, 13 (13): 2428-2435.

[21] Schechner Y Y, Karpel N. Recovery of underwater visibility and structure by polarization analysis[J]. IEEE J. of Oceanic Engin., 2005, 30(3): 570-587.

作者简介:

王昊月(1997—),女,硕士研究生,主要从事水下偏振成像及去雾方面的研究;

陈向宁(1962—),男,博士,教授,主要从事光学遥感方面的研究。

(上接第 352 页)

[14] Pakarzadeh H, Sharif V. Control of orbital angular momentum of light in optofluidic infiltrated circular photonic crystal fibers[J]. Opt. Commun., 2019, 438: 18-24.

[15] 田 伟. 承载光子轨道角动量光波模式的光纤设计[D]. 北京: 北京邮电大学, 2017.

Tian Wei. Optical fiber design for the photonic orbital angular momentum wave modes [D]. Beijing: Beijing University of Posts and Telecommunications, 2017.

[16] 王沙沙. 生成多种轨道角动量模式光纤的设计研究[D]. 西安: 西安理工大学, 2020.

Wang Shasha. Research and design of the fiber for generating multiple orbital angular momentum modes[D]. Xi'an: Xi'an University of Technology, 2020.

[17] Ashok N, Lee Y L, Shin W. Chalcogenide waveguide structure for dispersion in mid-infrared wavelength[J]. Jap. J. Appl. Phys., 2017, 56(3): 032501.

[18] Nandam A, Jung M, Lee Y L, et al. Reverse ridge silicon strip waveguide and silica slot waveguide structure for the dispersion at 1 550 nm[J]. IEEE Photonics J., 2016, 8(6): 7102609.

[19] Mann V, Askok N, Rastogi V. Coupled strip-slot waveguide design for dispersion compensation [J]. Opt. Quant. Electron., 2015, 47(9): 3161-3169.

[20] 王 霏, 肖平平. 具有混合形状空气孔的OAM传输光纤设计研究[J]. 光电子·激光, 2020, 31(3): 254-261.

Wang Fei, Xiao Pingping. Design and performance of fiber with hybrid shape air holes for OAM mode transmission[J]. J. of Optoelectronics·Laser, 2020, 31(3): 254-261.

[21] Islam M, Hossain M A, Haque F. A comparative analysis between low loss kagome structured THz hollow core and porous core PCF[J]. AIUB J. Sci. Eng., 2017, 16(2): 95-100.

[22] Xu Huizhen, Wu Jian, Xu Kun, et al. Ultra-flattened chromatic dispersion control for circular photonic crystal fibers[J]. J. Opt., 2011, 13(5): 994-1001.

作者简介:

刘兆伦(1978—),男,博士,副教授,主要研究方向为特种光纤及其功能器件。