

激光偏振特性用于水下目标探测

姚天甫 朱靖 樊烨 陈廷斌 王武 王泽锋

(国防科学技术大学光电科学与工程学院, 湖南长沙 410072)

摘要 偏振检测技术用于水下目标探测,为复杂海洋环境下的目标探测提供了一条全新的技术途径。阐述了水下激光偏振探测的基本原理,并搭建了简单的实验系统,对不同材料的人造目标进行了探测。结果表明,不同材料的目标具有不同的偏振特性,偏振信息在改善水下人造目标检测性能方面具有重要的价值。提出了基于 Matlab 的图像处理方法,最终处理的偏振图像包含了目标的偏振信息和细节信息,提高了图像的对比度和清晰度。通过偏振图像处理,可以有效地区分不同水下条件中人造目标与自然背景,极大地压缩自然背景噪声。

关键词 偏振成像; 目标探测; 斯托克斯参量; 图像处理

中图分类号 O436

OCIS 140.3295 110.2970

文献标识码 A

Usage of Polarization Characteristic of Laser Beam in Underwater Target Image Detection

Yao Tianfu Zhu Jing Fan Ye Chen Tingbin Wang Wu Wang Zefeng

(College of Photoelectric Science and Engineering, National University of Defense Technology, Changsha, Hunan 410072, China)

Abstract Polarization detection method is used in underwater target image detection, which provides a new method for underwater targets detection in complicated ocean environment. The laser polarization detection principle is introduced, and a simple polarization detection system is constructed to detect different man-made targets. Experimental results show that different targets of different materials have different polarization properties, which is very useful for underwater targets detection and identification. An image processing method based on Matlab is proposed. Polarization images improve the definition and the contrast between targets and background. Therefore, man-made targets can be easily distinguished from natural background.

Key words polarization imaging; target detection; Stokes parameters; image processing

1 引言

激光作为一种电磁波,是具有偏振特性的横波。处于自然偏振状态的激光经物体反射后,反射光中电矢量垂直分量和平行分量的复振幅发生变化,成为部分偏振光或线偏振光。物体表面结构、纹理、光入射角度的不同,都会影响反射光波的偏振状态。反射光的偏振状态蕴含了物体多种信息,为物体的识别提供了大量的资料,在某种程度上能大大提高识别的准确度,具有很高的利用价值。

目前,水下探测与识别技术有被动声纳、主动声纳、激光测距技术等。被动声纳通过接收目标发出的噪声进行探测,随着水下目标噪声等级的不断降低,对声纳的灵敏度要求越来越高;主动声纳隐蔽性差,易暴露,应用范围受到一定的限制。考虑到光波相对于微波而言,其衰减较少,特别是位于“水下窗口”的蓝绿激光技术的进步,使得在水下有限的距离内,测距、准直、照明、摄像、识别等成为可行。为了有效解决水下目标识别问题,本文采取基于激光偏振特性的水下目标识别方式,采用斯托克斯矢量 S 中的 4 个分量 I, Q, U, V 表征光的偏振态,通过获得 4 个不同偏振角度的目标图像,通过简单的算法即可获得更为清晰的偏振度图。

收稿日期: 2009-05-29; 收到修改稿日期: 2009-09-28

作者简介: 姚天甫(1989—),女,本科生。E-mail: yaotianfumary@163.com

导师简介: 王泽锋(1980—),男,博士,讲师,主要从事光信息技术方面的研究。E-mail: hotrosemaths@163.com

2 理论依据

斯托克斯矢量 \mathbf{S} 中的 4 个分量 I, Q, U, V 的定义为

$$\begin{aligned} I &= \langle E_x^2 \rangle + \langle E_y^2 \rangle, & U &= 2\langle E_x E_y \cos[\phi_y(t) - \phi_x(t)] \rangle, \\ Q &= \langle E_x^2 \rangle - \langle E_y^2 \rangle, & V &= 2\langle E_x E_y \sin[\phi_y(t) - \phi_x(t)] \rangle, \end{aligned} \quad (1)$$

式中 I 为辐射总强度的度量, Q 为用于计量水平方向的线偏振度, U 为用于计量与水平夹角 45° 的线偏振量, V 表示右旋还是左旋圆偏振分量占优势。由于目标对激光入射的偏振效应中圆偏振的分量极小, 仪器可检测范围有限, 相对于仪器误差可以忽略, 故假设 $V=0$ 。因而, 要完全确定一束光的偏振状态只需 I, Q, U 这 3 个参量。

对于偏振参数的测量, 考虑到入射光经过偏振器件, 出射光束的斯托克斯参量与入射光束呈线性函数关系

$$\mathbf{S}_{\text{out}} = \mathbf{M} \cdot \mathbf{S}_{\text{in}}, \quad (2)$$

式中 \mathbf{M} 为一个 4×4 阶矩阵, 称米勒矩阵, 偏振器件的作用即为米勒矩阵。当光波顺序受级联的 N 个光学元件作用时, 总的组合效果的米勒矩阵为

$$\mathbf{M} = \mathbf{M}_N \mathbf{M}_{N-1} \cdots \mathbf{M}_2 \mathbf{M}_1, \quad (3)$$

式中 \mathbf{M}_K 为第 K 个光学元件对光波施加作用的米勒矩阵, $1, 2, \dots, N$ 为光学元件与光波相遇的次序。对于理想的线偏振片, 透过轴与 OX 轴(即光轴)成 θ 方位角, 米勒矩阵为

$$\mathbf{M} = \frac{1}{2} \begin{bmatrix} 1 & \cos 2\theta & \sin 2\theta & 0 \\ \cos 2\theta & \cos^2 2\theta & \sin 2\theta \cos 2\theta & 0 \\ \sin 2\theta & \sin 2\theta \cos 2\theta & \sin^2 2\theta & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix}. \quad (4)$$

若 θ 取 4 个偏振角度, 如 $0^\circ, 45^\circ, 90^\circ, 135^\circ$, 得到

$$\mathbf{S} = \begin{bmatrix} I_i \\ Q_i \\ U_i \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} (I_{0^\circ} + I_{45^\circ} + I_{90^\circ} + I_{135^\circ})/2 \\ I_{0^\circ} - I_{90^\circ} \\ I_{45^\circ} - I_{135^\circ} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} I_{0^\circ} + I_{90^\circ} \\ I_{0^\circ} - I_{90^\circ} \\ I_{45^\circ} - I_{135^\circ} \end{bmatrix}, \quad (5)$$

只需测出光线 4 个方向不同角度的线偏振分量的光强, 就可以求得来自目标的光波的斯托克斯矢量, 其 3 个分量 I_i, Q_i, U_i 完全定量确定了整束光的偏振状态, 进而得出光波的偏振度等重要偏振特性。

3 实 验

为研究场景与目标的偏振特性, 利用自行设计的水下激光偏振识别系统, 进行了图像采集与处理分析。根据系统的基本结构和原理, 将系统分为图像获取和图像处理两个部分。数据处理过程的框图如图 1 所示。图像获取部分利用绿激光照射到目标, 采集其反射光中所反映的偏振图像。利用一个 CCD 加偏振装置, 对同一景物分别在偏振角度为 $0^\circ, 45^\circ, 90^\circ, 135^\circ$ 时拍摄 4 次, 获得 4 幅强度图像。图像获取部分由绿激光器、偏振装置、窄带滤光片、高灵敏度 CCD 摄像机等组成。绿激光由半导体抽运, 峰值波长为 532 nm。偏振装置使用电控偏振片, 用于控制目标反射光的偏振方向, 使不同偏振角度的目标反射光被摄像机接收成像。窄带滤波器放置在 CCD 摄像机前, 滤除其他波段的背景光波。CCD 摄像机用于记录目标反射回来的激光光强。定义逆时针角度为正, 光源垂直入射目标, 仪器观测角为传感器光学系统轴线与目标面法线的夹角, 仪器光学系统光轴、光源光轴和目标法线 3 轴共面。图 2 为系统结构原理框图。

图像处理部分由预处理、计算偏振度、获得偏振图像组成, 最终实现目标识别。预处理部分包含了常用的图像处理算法, 包括灰度均衡、灰度拉伸、阈值分割、图像平滑、图像滤波、图像锐化等。通过预处理将图像

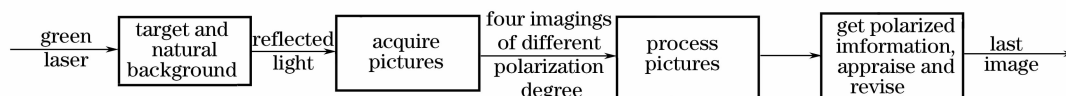


图 1 数据处理流程框图

Fig. 1 Flow chart of data processing

中的噪声减小,便于后续图像处理与识别。偏振度计算部分利用 Matlab 软件做出两幅偏振图像的灰度直方图,并算出其平均灰度值。根据进入 CCD 的光子数与平均灰度值成正比,光强又与光子数成正比,可以用平均灰度值来衡量光强。不同目标的偏振度为

$$P = (I_x - I_y) / (I_x + I_y), \quad (6)$$

式中 I_x 是偏振角为 0° 图像的光强, I_y 是偏振角为 90° 图像的光强。

获得偏振图像部分,依据斯托克斯参量法,基于 Matlab 软件,对系统采集到的强度图像进行相关处理,获得偏振图像,包括 I 参数图像、 Q 参数图像、 U 参数图像。对铁靶进行了研究,结果如图 3 所示。假设 CCD 摄像机获得强度图像偏振方向分别为 $0^\circ, 45^\circ, 90^\circ, 135^\circ$ 。 I 参数图像由图 3(a), (c) 的图像矩阵进行加法运算得到, Q 参数图像由图 3(a), (c) 的图像矩阵进行减法运算得到, U 参数图像由图 3(b), (d) 的图像矩阵进行减法运算得到。经边缘检测和区域处理后,实现对目标的识别。铁靶强度图和偏振图对应的灰度图如图 4 所示。

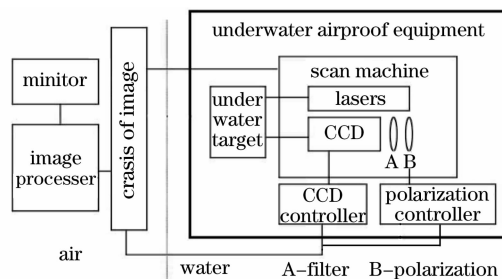


图 2 实验系统原理图

Fig. 2 Principle map of experimental system

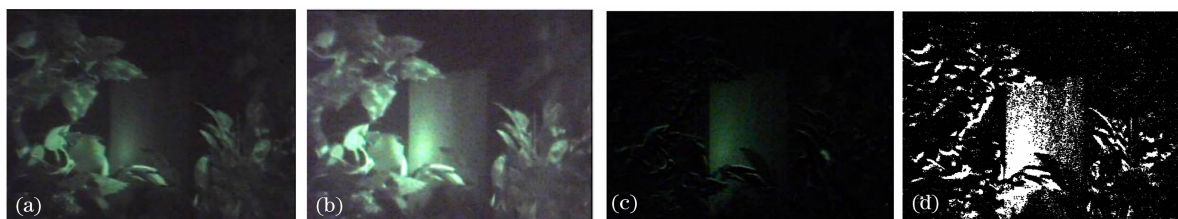


图 3 铁靶图像的处理结果。(a) 偏振度为 0° , (b) 偏振度为 90° , (c) 偏振差分图, (d) 目标识别图

Fig. 3 Processing results of iron. (a) polarizing degree of 0° , (b) polarizing degree of 90° , (c) polarization-difference image (PDI) picture, (d) the picture of identifying target

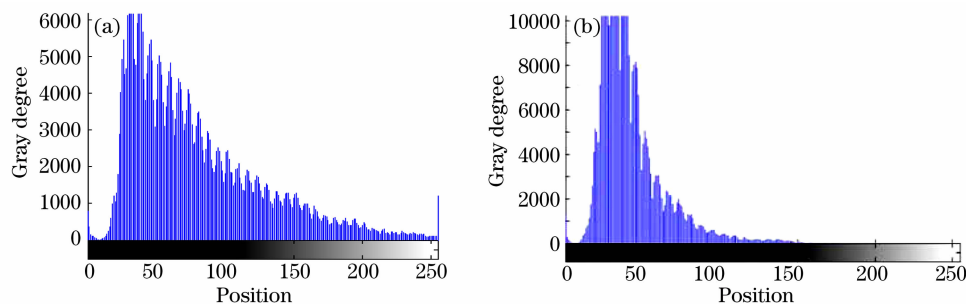


图 4 铁靶强度图(a)和偏振图(b)对应的的灰度图

Fig. 4 Gray degree picture of intensity (a) and polarizing map (b) for iron target

通过对图 3 和图 4 的分析,可以得出以下结论:

1) 参数图像 I 反映了目标的强度信息,强度表示目标的反射率;参数图像 Q 包含了目标的材料特征,不同材料的目标在参数 Q 上有较大的差异;参数图像 U 包含了丰富的边缘和轮廓信息。

2) 人造目标的偏振度往往高于自然背景的偏振度,人造目标可以明显地识别,其主要原因是自然背景表面起伏较大,基本上已没有偏振特性。

3) 偏振图像灰度分布范围较宽,而强度图像灰度范围较窄,且主要集中在低灰度值一边,故偏振图像可更好地发现目标的细节。

4) 偏振参数与物体表面的材料、表面纹理等有关。金属表面表现出较小的线偏振度,绝缘体表面具有较大的线偏振度。这是由于金属和绝缘体对反射光相位改变不同,产生不同的线偏振度。

4 结 论

本文通过理论和实验,对激光偏振特性用于水下人造目标识别的可行性进行了初步的探索。理论上,利用已有的斯托克斯矢量对激光传输过程中的偏振态进行描述,为之后的实验提供了分析依据,给出了最终识别目标的测量计算方法。在搭建的试验平台上,使用波长在水下窗口的蓝绿激光做光源,模拟水下环境,通过 CCD 采集包含偏振信息的目标图像。利用 Matlab 软件对图像进行处理,有效地将人造目标从自然背景中分离出来,大大降低了噪声的影响。通过识别不同材料的人造目标,发现其图像中包含不同的偏振特性,为将来进一步完善识别功能提供了思路。

基于激光偏振特性的目标检测技术可以应用于水下复杂背景下对敌潜艇等军事目标侦测、识别和搜救工作。此外,偏振信息在研究确定水中粒子尺度、化学组成以及总量方面有重要的应用价值。同时,由于偏振信息与目标的结构、化学成分等有关,该技术在水产养殖、水下作业环境等方面同样有着广阔的应用前景。

参 考 文 献

- 1 Mullen Linda J., Contarino Vincent M.. Modulated laser line scanner for enhanced underwater imaging[C]. *SPIE*, 1999, **3761**: 2~9
- 2 He Duomin, Gerald G.. Laser gated-ranging for underwater Robot vision in turbid waters[C]. *SPIE*, 2002, **4546**: 11~22
- 3 A. G. Andreou, Z. K. Kalayjian. Polarization imaging: principles and integrated polarimeters[J]. *IEEE Sensors J.*, 2002, **2**(6): 566~576
- 4 M. Totzeck, P. Gräupner, T. Heil *et al.*. How to describe polarization influence on imaging[C]. *SPIE*, 2005, **5754**: 23~37
- 5 Hidenobu Arimoto. Visualization technique for water content distribution of skin tissue by dualband polarization imaging [C]. Proceedings of the 2005 IEEE Engineering in Medicine and Biology 27th Annual Conference, 2005. 3165~3168
- 6 Gao Zhiyun, Gao Yue, Zhang Kaihua. Opti-Electronic System for Army[M]. Beijing: Beijing Institute of Technology Press, 1995
高秩允,高岳,张开华. 军用光电系统[M]. 北京:北京理工大学出版社, 1995
- 7 Tan Xianyu. Underwater imaging status and developing pulse[J]. *Infrared and Laser Engineering*, 1996, **25**(3): 61~64
谭显裕. 水下成像的现状和发展动向[J]. *红外与激光工程*, 1996, **25**(3): 61~64
- 8 Liu Guangrong, Huang Rui, Jin Weiqi *et al.*. Photoelectricity imaging technology and developing of underwater detecting [J]. *Optical Technology*, 2004, **30**(6): 732~737
刘广荣,黄睿,金伟其等. 水下探测光电成像技术及其进展[J]. *光学技术*, 2004, **30**(6): 732~737
- 9 Sun Wei, Liu Zhengkai, Shan Lie. Using polarizing technology to detecting manmade target[J]. *Optical Technology*, 2004, **30**(3): 267~269
孙玮,刘政凯,单列. 利用偏振技术识别人造目标[J]. *光学技术*, 2004, **30**(3): 267~269
- 10 Tan Zuojun, Li Jun, Chen Haiqing. The application of polarizing detecting technology for space target[J]. *Laser and Infrared*, 2007, **37**(3): 200~203
谭佐军,力俊,陈海清. 偏振探测技术在空间目标识别中的应用[J]. *激光与红外*, 2007, **37**(3): 200~203