

文章编号:1004-4213(2011)01-0073-5

检偏角对水中光脉冲后向散射特性的影响

韩彪,刘继芳,周少杰,孙艳玲,马琳

(西安电子科技大学 技术物理学院 501 教研室,西安 710071)

摘 要:针对水下光脉冲后向检测装置中偏振检测系统的检偏角对激光脉冲后向散射特征的影响,首先运用光波在散射面的反射和折射理论,定性分析了偏振光在水中传输时,由于散射引起的退偏效应;然后采用线偏振激光脉冲作为光源,实验探测不同检偏角时的光脉冲后向散射信号;最后通过对比不同检偏角时,激光脉冲后向散射信号前沿位置、后沿位置、脉宽、峰值、形状和面积等特征的统计平均值,分析检偏角对激光脉冲后向散射特性的影响.实验结果表明:随着检偏角的增大,光脉冲后向散射信号脉宽变窄,形状变得平缓,峰值和面积减小;信号前沿和后沿位置向后移动,前沿的移动幅度远大于后沿;并且偏振检测系统对近处水域后向散射信号的滤除越明显.

关键词:水下探测;后向散射;光脉冲;偏振技术

中图分类号:TN249

文献标识码:A

doi:10.3788/gzxb20114001.0073

0 引言

利用水下目标对光脉冲的后向散射特性对其进行探测和识别,目前是海洋光学领域研究的热点^[1-4].由于水体本身对光波有着强烈的散射,使得探测器接收到的后向散射信号主要来自于近处水域,这极大地限制了目标的有效探测距离^[5-6].因此,为了提高探测距离,必须对近处水域的后向散射进行抑制.光波在水下传输时,由于散射的作用,偏振特性会发生改变;对于偏振光而言,存在着一定的退偏现象^[7-8].利用这种退偏效应,基于偏振技术对目标进行探测,在水下物体成像和目标探测等领域已得到了广泛的应用^[9-12].然而检偏角的存在,会使得激光脉冲后向散射信号的形状、脉宽、脉冲在时间轴上的位置等特征发生变化,现有文献缺乏这方面的系统报道.本文以实际应用为背景,实验研究静水中探测器检偏角对蓝绿激光脉冲后向散射特性的影响,重点分析检偏角对激光脉冲后向散射信号前沿位置、后沿位置、脉宽、峰值、形状和面积的影响.

1 理论分析

光波在水中传输时,散射主要有由两部分引起:纯水自身的散射和水中杂质的散射.对于纯水,空间不同位置处的折射率存在着微小的差异;对于杂质,其形状分布比较复杂,缺乏对称性.这使得水体的光学性质表现出一定的各向异性.因此光波经过水体

时,受散射的作用,偏振特性会有所改变;对于线偏振光而言,会发生退偏现象.

严格地解释这种退偏现象,可以利用瑞利散射和米氏散射等理论,结合 Monte Carlo 方法进行研 究^[7,13].但用这种方法进行解释比较麻烦,并且不直观.文献^[14]利用衍射理论和几何光学的方法对水中的光散射进行了分析.本文沿用这一思路对这种退偏效应作进一步说明.

水中散射体(杂质或不同折射率的纯水)对光波的作用可以看成是衍射、折射和反射效应的叠加.当散射体尺寸比较小时,衍射效应比较明显;当散射体尺寸比较大时,折射和反射效应比较明显.由于衍射只发生在前向很小的范围内,对后向散射信号贡献不大,因此只考虑折射和反射的影响.

如图 1,光波到达散射界面 L 时发生反射和折射.图中 E 表示光场,下标 i, r, t 分别对应入射光、

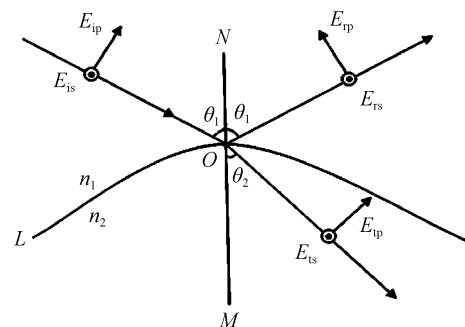


图 1 散射界面的反射与折射

Fig. 1 The reflection and refraction on scattering interface

基金项目:中国船舶重工集团公司第七〇五研究所基础研究基金资助

第一作者:韩彪(1987-),男,硕士研究生,主要研究方向为水下光学信息处理. Email:hanbiaoshaanxi@163.com

导师:刘继芳(1957-),男,教授,主要研究方向为非线性光学和光电技术应用.

收稿日期:2010-07-07;修回日期:2010-08-26

反射光和透射光,下标 s 、 p 表示垂直和平行于入射面振动的光场分量. n_1 和 n_2 分别是散射界面两侧介质的折射率, θ_1 和 θ_2 分别是入射角和折射角, MN 为法线, O 为光波入射点.

根据菲涅尔公式^[15], s 分量和 p 分量经过界面后的反射率和折射率分别为

$$R_s = \frac{\sin^2(\theta_1 - \theta_2)}{\sin^2(\theta_1 + \theta_2)} \quad (1)$$

$$R_p = \frac{\tan^2(\theta_1 - \theta_2)}{\tan^2(\theta_1 + \theta_2)} \quad (2)$$

$$T_p = \frac{\sin 2\theta_1 \sin 2\theta_2}{\sin^2(\theta_1 + \theta_2)} \quad (3)$$

$$T_p = \frac{\sin 2\theta_1 \sin 2\theta_2}{\sin^2(\theta_1 + \theta_2) \cos^2(\theta_1 - \theta_2)} \quad (4)$$

$$n_1 \sin \theta_1 = n_2 \sin \theta_2 \quad (5)$$

一般情况下 $R_s \neq R_p$ 、 $T_s \neq T_p$, 因此经过散射界面作用后, 光波的偏振会发生变化. 光波在水中传输时, 受到若干个这种散射体的作用, 由于纯水折射率分布和水中杂质形状分布比较复杂, 并且不具有对称性, 因此光波在水中传输时会表现出一定的各向异性, 偏振态会发生变化; 对于线偏振光而言, 会出现退偏现象.

在探测系统中放置检偏器, 通过检测和分析不同检偏角时的后向散射信号的变化, 可以对这种退偏现象进行观察.

2 实验装置和原理

实验装置由激光光源、水槽、检偏器、探测器和数据采集装置组成, 如图 2.

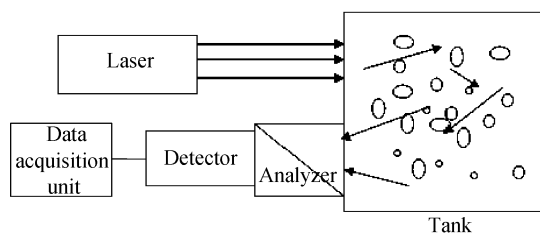


图 2 实验装置

Fig. 2 Experimental set-up diagram

光源用波长为 532 nm 的脉冲激光, 发射脉宽约 10 ns, 功率为 8 mW, 偏振方向垂直于试验平台的线偏振光. 水槽体积为 $100 \times 40 \times 40 \text{ cm}^3$, 为了消除槽壁的影响, 用吸光材料将水槽四周和底部遮挡起来. 检偏器用偏振分光棱镜, 紧贴槽壁, 其中心距离激光入射点 34 mm. 探测器选用光电倍增管, 增益系数 $> 10^6$. 用数字示波器作为数据采集装置对探测到的信号进行采集和存储, 采样率为 5 GS.

实验时, 向水槽中注满自来水, 并将其放置约 3 h, 待水体静止后开始测量. 改变检偏角, 分别测量

检偏方向与入射光偏振方向夹角为 0° 、 30° 、 60° 和 90° 时激光脉冲的后向散射信号. 每个角度采集 10 000 个数据. 分别对后向散射脉冲的前沿位置、后沿位置、脉宽、峰值、面积、形状进行分析.

提取后向散射有效信号时, 以 0.05 V 为阈值, 认为数据中幅值大于 0.05 V 的部分为有效信号. 基于此, 分别计算出后向散射信号的前沿位置、后沿位置、脉宽(前后沿位置之差)、峰值和面积.

分析形状的变化时采用以下算法: 先对原始脉冲信号的幅值进行归一化, 使其峰值大小为 1 V; 然后以 200 ns 为基准, 将脉冲的宽度都扩展为 200 ns; 最后对变换后的信号进行傅里叶变换. 由于之前对原始信号的幅值进行了归一化处理, 并且将其脉宽都变为了 200 ns, 因此, 傅里叶变换后的频谱特性中只包含原始脉冲的波形信息. 当信号峰值和时域宽度一定时, 频谱半宽越宽, 原始信号形状越“陡峭”; 频谱半宽越窄, 原始信号的形状越“平缓”. 以此为基础, 对原始信号波形进行分析.

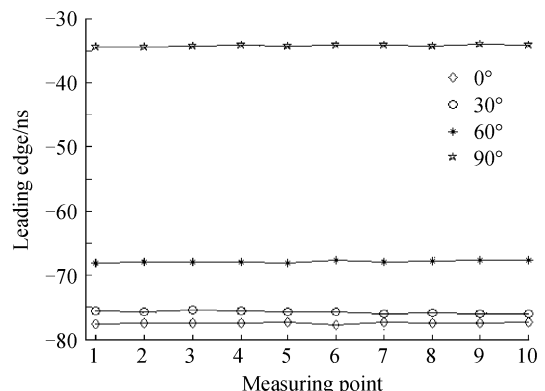
由于水体散射比较复杂, 单个脉冲信号的特征难以体现检偏角对后向散射信号的影响. 因此分析时, 以 1 000 个数据为单位, 对计算结果进行统计处理. 通过比较不同检偏角时, 后向散射脉冲前沿位置、后沿位置、脉宽、峰值、面积、频谱半宽的统计平均值的变化, 来分析检偏角对激光脉冲后向散射特性的影响.

3 实验结果及分析

3.1 检偏角对后向散射信号前沿和后沿的影响

不同检偏角时后向散射信号前沿位置和后沿位置的变化如图 3(a) 和 (b).

随着检偏角的增大, 后向散射信号脉冲前沿和后沿在时间轴上的位置逐渐向右移动, 并且前沿的移动幅度远大于后沿. 这是因为随着线偏振光脉冲在水中传播距离的增大, 退偏效应变得越来越明显. 对应在时间轴上, 越往右, 后向散射信号中含有的退偏



(a) On the leading edge of optical pulse

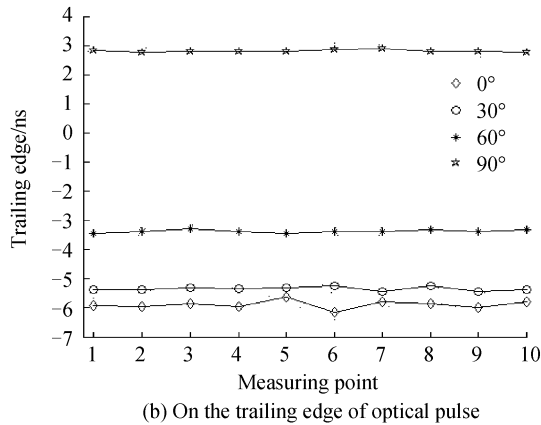


图 3 检偏角对脉冲前沿及后沿位置的影响
Fig. 3 The influence of analyzer angle on the leading and trailing edges of optical pulse

信号越多. 因此当检偏角增大时, 脉冲信号的前沿和后沿位置会往右移动.

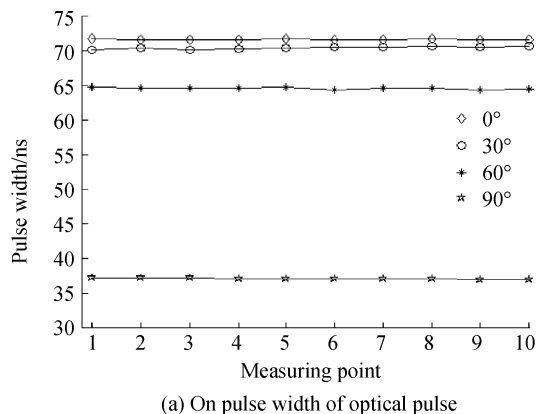
光脉冲前沿和后沿位置分别对应光在水中传输的最近距离和最远距离. 由于激光脉冲在水中传输时存在衰减, 越远处激光脉冲的能量越弱, 因而脉冲前沿部分对应的激光能量远大于后沿部分, 所以对检偏角的变化也相对敏感, 当检偏角增大时, 前沿部分在时间轴上的移动距离远大于后沿部分.

由于检偏角增大时后向散射信号前沿和后沿都会在时间轴上往右移动, 并且前沿部分的移动幅度远大于后沿部分, 所以, 增大检测角, 利用偏振检测的方法可以有效的抑制探测器接收到的近处水域信号.

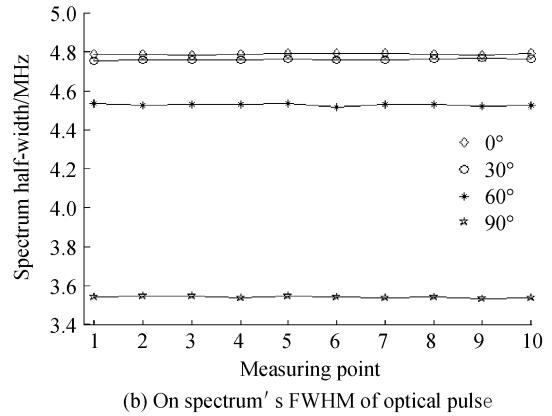
3.2 检偏角对后向散射信号脉宽和形状的影响

不同检偏角对应的后向散射信号脉宽和频谱半宽的变化如图 4(a)和(b).

随着检偏角的增大, 后向散射信号脉宽减小. 结合 3.1 节中的分析可以知道, 由于检偏角增大时, 脉冲前沿和后沿在时间轴上都往右移动, 并且前沿的移动幅度远大于后沿, 因此脉宽减小. 换言之, 脉宽的减小主要是由于前沿和后沿在时间轴上的移动幅



(a) On pulse width of optical pulse



(b) On spectrum's FWHM of optical pulse

图 4 检偏角对脉冲脉宽频谱宽度的影响
Fig. 4 The influence of analyzer angle on the pulse width and spectrum's FWHM of optical pulse

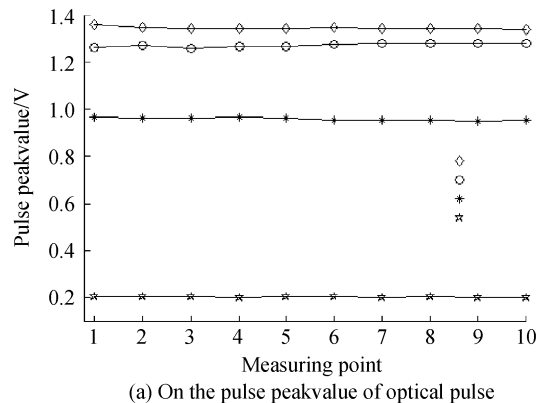
度不同造成的, 并且前沿的移动是脉宽减小的主要原因.

随着检偏角的增大, 频谱宽度减小, 即信号形状变得“平缓”. 这是因为随着光脉冲在水中传播, 能量的衰减和偏振的退化是同时进行的. 光脉冲的 s 分量(与初始光脉冲偏振方向垂直)和 p 分量(与初始光脉冲偏振方向平行)在水中传播时能量都会衰减, 这会使得后向散射信号在时域上能量的变化比较大, 即形状变得“陡峭”. 但由于退偏效应的存在, 随着光脉冲的传播, 会有一部分能量从 p 分量耦合到 s 分量中去, 即退偏效应使得 p 分量的能量减小, s 分量的能量增加. 这使得 p 分量形状变“陡峭”的趋势增强; s 分量的变化趋势有所减缓. 因此, 随着检偏角的增大, 探测器检测到的形状变得“平缓”.

3.3 检偏角对后向散射信号峰值和面积的影响

不同检偏角对应的后向散射信号脉冲峰值和脉冲面积的变化如图 5(a)和(b).

随着检偏角的增大, 后向散射信号峰值和面积都减小. 这是因为入射光是线偏振光, 虽然在水中传输时由于退偏效应的存在, 部分能量从 p 分量耦合到了 s 分量, 但相对而言耦合到 s 分量的能量比较



(a) On the pulse peakvalue of optical pulse

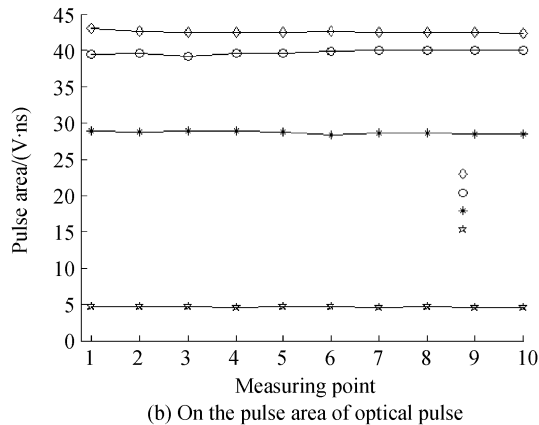


图5 检偏角对峰值及面积的影响

Fig. 5 The influence of analyzer angle on the pulse peakvalue and pulse area of optical pulse

小,因此当检偏角增大时后向散射峰值会有所减小.

由于检偏角增大时,峰值有所降低,结合 3.2 节中的分析,脉宽也有所收缩,因此面积会减小.

4 结论

本文实验研究了探测器检偏角对水中激光脉冲后向散射信号的影响.综合分析可以得到:1)随着检偏角的增大,后向散射信号脉冲前沿和后沿在时间轴上的位置向右移动,并且前沿的移动幅度远大于后沿;脉宽变窄,形状变得“平缓”;脉冲峰值和面积减小.2)利用偏振检测技术可以对近处水域后向散射信号进行滤除.随着检偏角的增大,近处水域的后向散射信号得到有效的抑制,但探测到的后向散射强度会有所减小.因此在设置探测系统检偏角时,要根据实际探测距离的需要,进行合理的选择.

参考文献

- [1] GUO Yan, WANG Jiang-an. Analysis of development of optical-electric detection in the field of submarine detection[J]. *Ship Science and Technology*, 2002, **24**(4): 42-45.
国妍,王江安.光电探测在探潜方面的发展分析[J]. *舰船科学与技术*, 2002, **24**(4): 42-45.
- [2] JIANG Hong-wang. Underwater electro-optical detecting system status and development[J]. *Laser & Infrared*, 1999, **29**(3): 136-138.
蒋鸿旺.水下光电探测系统现状与发展[J]. *激光与红外*, 1999, **29**(3): 136-138.
- [3] DENG Zhong-fang, LIU Ji-fang, LI Zeng-rong. Study of air bubbles in water based on spatial spectrum intensity of backward scattered light[J]. *Acta Photonica Sinica*, 2006, **35**(8): 1216-1220.
邓仲芳,刘继芳,李增荣.利用后向散射光空间谱强度分布探测尾流气泡的实验研究[J]. *光子学报*, 2006, **35**(8): 1216-1220.
- [4] LI Zeng-rong, LIU Ji-fang, DENG Zhong-fang. Study of attenuation characteristic of ship wake's backward scattered light based on the detection of optical power [J]. *Acta Photonica Sinica*, 2006, **35**(9): 1417-1420.
李增荣,刘继芳,邓仲芳.尾流后向散射光功率衰减特性研究[J]. *光子学报*, 2006, **35**(9): 1417-1420.
- [5] MA Zhi-guo, WANG Jiang-an, JIANG Xing-zhou, et al. Research of the temporal spread of laser pulse by wake bubbles [J]. *Laser Technology*, 2008, **32**(2): 198-200.
马治国,王江安,蒋兴舟,等.尾流气泡对脉冲激光时间展宽的研究[J]. *激光技术*, 2008, **32**(2): 198-200.
- [6] ZHANG Zheng-yu, ZHOU Shou-huan. Analysis of the signal noise ratio in the laser underwater target detection system[J]. *Journal of Xidian University*, 2002, **29**(5): 619-623.
章正宇,周寿桓.激光水下目标探测系统信噪比分析[J]. *西安电子科技大学学报*, 2002, **29**(5): 619-623.
- [7] XIA Min, YANG Ke-cheng, XU De-sheng, et al. Monte Carlo simulation of depolarization during laser transferring in the water[J]. *Laser Technology*, 2005, **29**(1): 24-27.
夏珉,杨克成,许德胜,等.激光在水下传输过程中退偏的蒙特卡罗模拟[J]. *激光技术*, 2005, **29**(1): 24-27.
- [8] ZENG Nan, JIANG Xiao-yu, GAO Qiang, et al. Linear polarization difference imaging and its potential applications [J]. *Applied Optics*, 2009, **48**(35): 6734-6739.
- [9] CAO Nian-wen, LIU Wen-qing, ZHANG Yu-jun, et al. The circular polarization image and the calculation for the farthest imaging range for underwater objects[J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2000, **27**(2): 150-154.
曹念文,刘文清,张玉钧,等.水下目标圆偏振成像及最远成像距离的计算[J]. *中国激光*, 2000, **27**(2): 150-154.
- [10] LIU Wen-qing, CAO Nian-wen, ZHAO Gang, et al. Laser polarization image of underwater objects[J]. *Chinese Journal of Quantum Electronics*, 1997, **14**(6): 520-526.
刘文清,曹念文,赵刚,等.水下物体的激光偏振成像研究[J]. *量子电子学报*, 1997, **14**(6): 520-526.
- [11] CAO Nian-wen, LIU Wen-qing, ZHANG Yu-jun, et al. An experiment comparison of the laser circular polarization imaging to the laser linear polarization imaging for underwater objects[J]. *Acta Photonica Sinica*, 1998, **27**(6): 568-572.
曹念文,刘文清,张玉均,等.水下物体激光圆偏振成像实验及与线偏振成像的比较[J]. *光子学报*, 1998, **27**(6): 568-572.
- [12] BARTEL S, HIELSCHER A H. Monte Carlo simulations of the diffuse backscattering Mueller matrix for highly scattering media[J]. *Applied Optics*, 2000, **39**(10): 1580-1588.
- [13] GUO X, WOOD M F G, GHOSH N, et al. Depolarization of light in turbid media: a scattering event resolved Monte Carlo study[J]. *Applied Optics*, 2010, **49**(2): 153-162.
- [14] JONASZ M, FOURNIER G. Light scattering by particles in water[M]. New York: Academic Press, 2007: 102-130.
- [15] 石顺祥,张海兴,刘劲松.物理光学与应用光学[M].西安:西安电子科技大学出版社, 2000: 28-31.

Influence of Analyzer Angle on Backscatter Characteristic of Optical Pulse in Water

HAN Biao, LIU Ji-fang, ZHOU Shao-jie, SUN Yan-ling, MA Lin
(Lab 501, School of Technical Physics, Xidian University, Xi'an 710071, China)

Abstract: In order to study the influence of the analyzer angle of polarization detection system on the backscatter characteristic of optical pulse in the backward detection device of optical pulse underwater, firstly, the depolarization by scattering was analyzed qualitatively when polarized light travelled in the water using the reflection and refraction theory on the scattering interface. Secondly, with linear polarized laser pulse as incident light, backscatter signals of optical pulse were detected experimentally at different analyzer angles. Finally, after comparing statistical average of leading edge, trailing edge, width, peakvalue, shape and area of optical pulse's backscatter signal at different analyzer angles, the influence of analyze angle on the backscatter characteristic of optical pulse was analyzed. The result shows that, with the increase of analyzer angle, the backsctter singal's width becomes narrow, the shape becomes gentle, the peakvalue and area are decreased. The leading edge and trailing edge move backward and the moving distance of leading edge is much larger than that of trailing edge. And the backscatter signal from nearby water area is restrained more effectively by the polarization detection system.

Key words: Underwater detection; Backscatter; Optical pulse; Polarization technique