

复杂水文微弱多目标激光探测仿真与实验

宗思光 杨劭鹏 张鑫 彭丹 段子科 陈报

Simulation and experiment of weak multi-target laser detection in complex hydrology

ZONG Si-guang, YANG Shao-peng, ZHANG Xin, PENG Dan, DUAN Zi-ke, CHEN Bao

引用本文:

宗思光, 杨劭鹏, 张鑫, 彭丹, 段子科, 陈报. 复杂水文微弱多目标激光探测仿真与实验[J]. *中国光学*, 2024, 17(3): 560-571.

doi: 10.37188/CO.2023-0141

ZONG Si-guang, YANG Shao-peng, ZHANG Xin, PENG Dan, DUAN Zi-ke, CHEN Bao. Simulation and experiment of weak multi-target laser detection in complex hydrology[J]. *Chinese Optics*, 2024, 17(3): 560-571. doi: 10.37188/CO.2023-0141

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.37188/CO.2023-0141>

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

舰船尾流气泡目标激光后向散射特性研究

Laser backscattering characteristics of ship wake bubble target

中国光学 (中英文). 2023, 16(6): 1333 <https://doi.org/10.37188/CO.2023-0043>

空间引力波探测望远镜光学系统设计

Optical design of space gravitational wave detection telescope

中国光学 (中英文). 2022, 15(4): 761 <https://doi.org/10.37188/CO.2022-0018>

基于数字高程模型高程快速迭代的航拍图像目标定位方法

A target location method for aerial images through fast iteration of elevation based on DEM

中国光学 (中英文). 2023, 16(4): 777 <https://doi.org/10.37188/CO.2022-0215>

太极计划中的星间激光测距地面电子学验证

Ground electronics verification of inter-satellites laser ranging in the Taiji program

中国光学 (中英文). 2023, 16(4): 765 <https://doi.org/10.37188/CO.2022-0041>

用于声-地震耦合探雷的激光测振技术研究进展

Research progress of the laser vibration measurement techniques for acoustic-to-seismic coupling landmine detection

中国光学 (中英文). 2021, 14(3): 487 <https://doi.org/10.37188/CO.2020-0134>

多靶点全景数字病理: 从原理到应用

Multi-target panoramic digital pathology: from principle to application

中国光学 (中英文). 2022, 15(6): 1258 <https://doi.org/10.37188/CO.2022-0091>

文章编号 2097-1842(2024)03-0560-12

复杂水文微弱多目标激光探测仿真与实验

宗思光¹, 杨劭鹏¹, 张鑫^{2*}, 彭丹¹, 段子科¹, 陈报¹
(1. 海军工程大学 电子工程学院, 湖北 武汉 430034;
2. 海军航空大学 青岛校区, 山东 青岛 266041)

摘要: 为了探究在近岸复杂水体中激光探测对微弱目标的探测能力, 研究水质、目标特征、目标距离对水下激光探测的影响具有重要理论和应用价值。论文建立了水下微弱目标激光探测模型, 采用蒙特卡洛仿真验证了不同浊度微弱多目标激光探测性能, 模拟了不同距离下微弱目标的激光后向散射回波信号, 对多个不同反射系数的目标后向散射回波特性进行了分析。同时设计并研制了灵巧便携式水下微弱目标激光探测系统, 进行了实验室及外场湖泊环境下的多目标探测、测距测试验证。在浊度为 12.87 NTU 的近岸湖泊水域, 该系统可在 10 m 范围内对 3~4 个直径为 80~400 μm 的不同低反射系数的混合小目标进行有效探测, 平均测量误差为 ± 0.11 m, 与理论仿真结果一致。本文研究结果可为蓝绿激光水下多微弱目标探测链路计算、系统设计及参数优化提供参考, 可以支撑近海浑浊水体水下障碍物激光探测工程实践。

关键词: 激光探测与测距; 微弱多目标; 复杂水文; 蒙特卡洛

中图分类号: TN249 文献标志码: A doi: 10.37188/CO.2023-0141

Simulation and experiment of weak multi-target laser detection in complex hydrology

ZONG Si-guang¹, YANG Shao-peng¹, ZHANG Xin^{2*}, PENG Dan¹, DUAN Zi-ke¹, CHEN Bao¹
(1. College of Electronic Engineering, Naval University of Engineering, Wuhan 430034, China;
2. Qingdao Branch, Naval Aeronautical University, Qingdao 266041, China)
* Corresponding author, E-mail: 1714308601@qq.com

Abstract: Investigating the impact of water quality, target characteristics, and target distance on underwater laser detection is crucial to assessing the effectiveness of laser detection for weak targets in complex coastal water bodies. We examine the theoretical and practical significance of understanding these factors in underwater laser detection. In this study, a laser detection model for detecting weak underwater targets is established. Monte Carlo simulation is used to verify the detection performance of weak multi-target laser ranging under different turbidities. The laser backscattering echo signals of weak targets at different distances are simulated, and the backscattering echo characteristics of multiple targets with various reflection coefficients are analyzed. Additionally, a smart and portable laser detection system for detecting weak underwater targets

收稿日期: 2023-08-20; 修订日期: 2023-09-08

基金项目: 国防科研基金 (No. 2019-JCJQ-JJ-056)

Supported by The National Defense Foundation of China (No. 2019-JCJQ-JJ-056)

has been designed and developed. Laboratory and field lake environment tests were conducted to detect and range for multi-target. In a near-shore lake with a turbidity of 12.87 NTU, the system can effectively detect 3–4 mixed small target groups. These groups have different low reflection coefficients and diameters varying from 80 to 400 μm , all within a range of 10 meters. The average measurement error is ± 0.11 m, which is consistent with the theoretical simulation results. The research results serve as a guide for computing links, designing systems, and optimizing parameters for detecting weak underwater multi-targets using blue and green lasers. Furthermore, the results assist in the engineering practice of detecting underwater obstacles in offshore turbid waters.

Key words: laser detection and ranging; weak multi-target; complex hydrology; Monte Carlo

1 引言

水下目标探测技术在海底地质勘探、水下避障及导航、水下障碍物定位搜索等领域有着非常重要的应用。在水下目标探测中,目标距离位置信息的获取是目前研究的重中之重^[1-2]。据资料显示:全球管道泄漏事故中有40%发生在水下端,在管道泄漏初期会产生100~200 μm 的微量气泡;全球船舶故障事故中80%都是鱼线渔网缠绕发动机导致的^[2]。由此可知,在近岸复杂水文环境(水质混浊、涨退潮等)下微米级极弱小目标(如气泡、鱼线、渔网等一类障碍物)的探测、识别、分析、定位是海洋安全生产的关键^[3-6]。但是传统声呐探测受水体混响大、目标反射率低、空间尺度小等因素影响,难以快速准确地对障碍物进行探测、识别、定位,同时针对微米级目标,传统声呐也束手无策。激光探测具有探测距离分辨力强、方位分辨精度高等优点,在水下微小障碍物探测上具有优势,是传统声呐探测的有益补充^[7-8]。

2019年,广州海洋地质调查局的胡波等研究了基于图像的水下三点激光测距方法,8.4 m范围内平均测量误差小于0.15 m^[9],2021年,北京理工大学的刘欣宇等提出基于小波变换的激光水下测距方法,当目标物为高反射玻璃板时,探测距离为0 m~1.0071 m,测量误差为0.071 m^[10]。同年,北京理工大学的李坤等提出强度调制532 nm波长激光水下测距方法,其使用连续光测距,最大探测距离为2.5 m^[11]。2023年,中国科学院上海光学精密机械研究所申玲菲等利用水下激光四点单目测距,对水下60 mm的四点梯形光信标进行探测,探测距离为2 m,平均误差为0.08 m^[12]。同

年,来自海军工程大学的张鑫等利用激光脉冲测距方法,对水下直径为0.2 mm的渔网实现了0~10 m的有效探测^[13]。

在水下管道泄漏气泡、鱼线、渔网等极微弱目标探测方面,由于目标尺度小及对探测激光束形成的透射、反射效应,激光探测系统需具备径向多目标探测能力^[14-15]。传统的水下目标激光探测主要采用首末探测方式,即一次只能针对测量量程和测量方向上的两个测量目标,难以满足近海环境下混合气泡、鱼线、渔网等混合微弱目标组探测的探测需求^[16]。为实现水下微弱多目标高精度探测,克服由于水体强散射效应导致的目标回波展宽及变弱、近距离微弱目标回波易饱和、远距离微弱目标回波信噪比低、及多目标距离分辨力降低等问题,本文建立了水下微弱目标激光探测模型,采用蒙特卡洛仿真验证了近岸不同浊度海域背景下微弱多目标激光探测性能。基于仿真验证,设计并研制了适合工作于水下强混响背景下的微弱目标激光探测系统,进行了实验室及外场湖泊环境下的测试验证。

2 水下多目标探测模拟与仿真

2.1 激光对水下目标探测距离建模

脉冲激光测距是通过测量激光器发出光脉冲的时刻与光脉冲到达目标并由目标返回接收机的时间差计算出目标距离的^[17-18]。

$$R = (C_w \times T) / 2, \quad (1)$$

式中: R 为目标距离, T 为光脉冲往返时间, C_w 为光在水中的传播速度。

多目标脉冲测距与单目标测距的原理基本相

同,不同点在于,测距时,发射出的激光在其传播路径上,由于发散角的影响,遇到距离不同的障碍物,发生多次反射后被探测器接收到。探测电路对这些信号进行处理后发送给控制端,即接收到的信号可以是多个脉冲。计算这些脉冲信号与发射时采集到的起始信号之间的时间间隔,经过公式换算就可以得到相应的多个目标的距离值^[19]。传统脉冲测距系统中,由计数器采用直接计数法完成时间 T 测量,主波作为开门信号,计数器开始工作,回波作为关门信号,计数器停止工作^[20]。在门被打开期间,计数器计算出时间测量基准单位的晶振脉冲的个数,从而求出待测时间 T ,如图 1 所示。

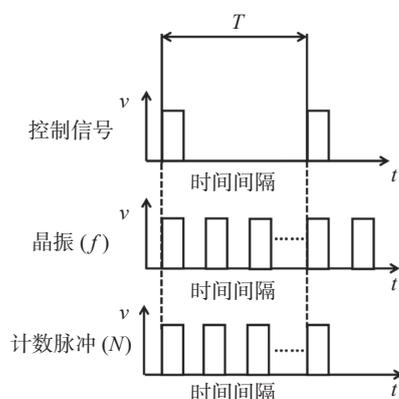


图 1 单目标测距

Fig. 1 Single target ranging

其中待测时间 T 可表示为:

$$T = N/f \quad (2)$$

其中 f 为晶振频率, N 为计数器的计数结果。

将式 (2) 代入式 (1), 则被测距离 R 为:

$$R = C_w \times N/2f \quad (3)$$

传统测距只能得到单一的 N 值, 完成单一目标测量。在多目标测距系统中, 回波信号不作为关门信号, 而是经过处理作为捕捉信号, 捕获某个目标回波时刻的计数结果, 由此求出待测时间^[21]。假设第一个目标的计数结果为 N_1 , 待测时间为 T_1 , 第 m 个目标的计数结果为 N_m , 待测时间为 T_m , 如图 2 所示。计数器溢出时, 停止计数并清零, 等待下次开门信号。被测目标 m 的距离 R_m 如下:

$$R_m = C_w \times N_m/2f \quad (4)$$

式中: N_m 为计数器的计数。

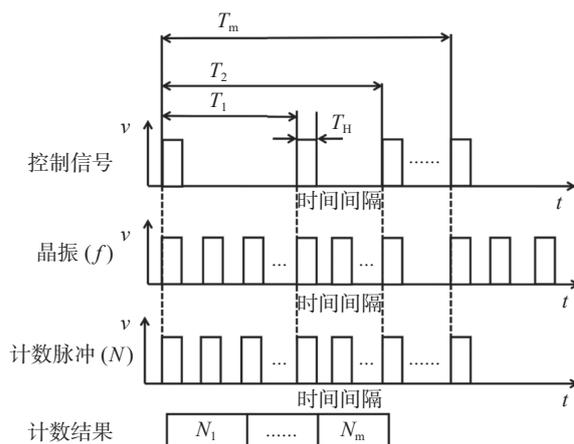


图 2 多目标测距

Fig. 2 Multi-target ranging

多目标激光脉冲测距系统的目标分辨距离由回波信号的脉宽决定, 回波在高电平时计数器不能处理其他回波, 如图 2 所示, 则:

$$d = C_w \times T_H/2f \quad (5)$$

其中 T_H 为回波脉宽, d 为目标分辨距离, 即目标距离大于 d 的不同目标才能被测距系统分辨出来。

2.2 激光对水下微弱目标探测蒙特卡洛仿真

蒙特卡洛方法是基于光子运动轨迹的计算机模拟, 其基本过程是: 光子以一个特殊的方向进入介质, 确定发生碰撞时光子运动的距离, 若发生散射, 则由适当的散射相位函数就能选取散射后新的运动方向。若发生吸收, 光子便消亡^[22]。这些过程随机重复进行, 直到光子被接收面所接收。本文考虑水体介质多次散射的情况, 即水中散射粒子很稠密, 同时考虑单次, 二次, 及更高次的散射和衰减路径上的衰减, 能适用于绝大多数海域^[23]。

蒙特卡罗模拟可以分为六个步骤, 一, 发射条件: 波长, 能量的确定。二, 运动轨迹(自由程): 传输距离 l 后, 发生碰撞。三, 散射过程: 散射角计算。四, 碰撞后的运动方向。五, 新的自由程。六, 终止条件: 接收或消亡^[23]。蒙特卡罗光子模拟运动程序图如图 3 所示。

依据上述原理, 采用蒙特卡洛仿真模拟近岸不同浊度背景下不同反射率的目标回波光信号特性, 仿真条件设置为: 一、水中仅存在单个目标且位于不同位置; 二、水中存在多个不同反射率的混合目标物, 且为无序放置。仿真中, 激光波束部分在目标表面发生反射及散射, 由于目标尺寸小

于激光光斑大小, 部分激光波束透射过目标, 从而保证每个目标都能被激光照射。通过改变目标的反射系数(不同目标反射系数如表 1 所示)及目标位置研究不同目标的激光回波特性。仿真实验中光子数设置为 10^6 , 模拟了东海台湾海峡、黄海中部、渤海中部的水质浊度, 分别为 3 NTU、12 NTU、22 NTU^[24], 仿真中设置气泡数密度为 $6 \times 10^6 \text{ m}^{-3}$, 气泡直径为 $80 \mu\text{m}$ ^[4]。

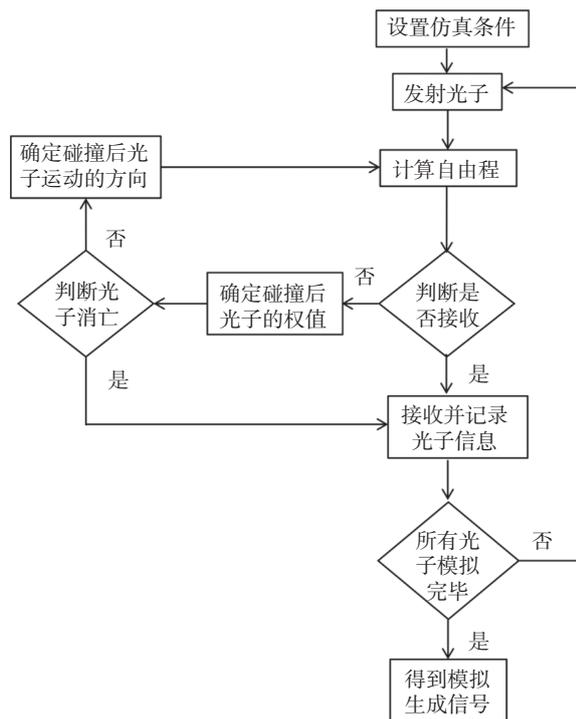


图 3 光子模拟运动程序

Fig. 3 Program of photon simulation motion

表 1 不同目标反射系数^[25]

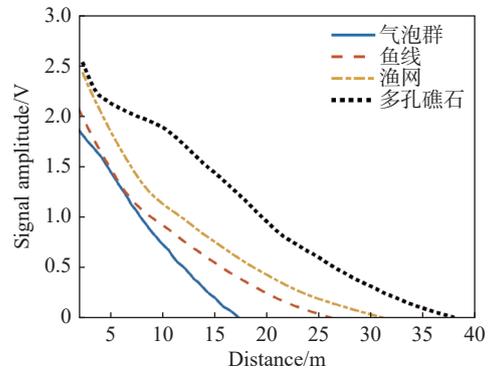
Tab. 1 Reflection coefficients of different targets^[25]

目标类型	反射系数
气泡群	0.05
鱼线	0.1
渔网	0.23
多孔礁石	0.36

2.3 激光对水下单微弱目标探测性能测试

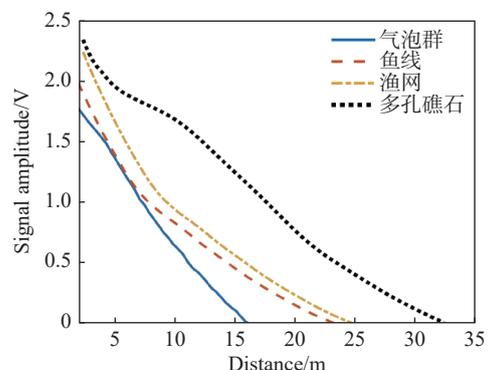
图 4 展示了单个不同目标、不同距离、不同浊度下的激光后向散射信号峰值图, 其中图 4(a)、4(b) 与 4(c) 水质浊度分别设置为 3 NTU、12 NTU 和 22 NTU, 可等效模拟东海台湾海峡水质、黄海中部及渤海中部水质。通过对 3 种海域不同水质下, 气泡群、鱼线、渔网、多孔礁石等 4 种微弱目

标激光回波的强度统计, 可得到不同海域激光探测系统模型对微弱目标的最远探测距离, 见表 2 所示。



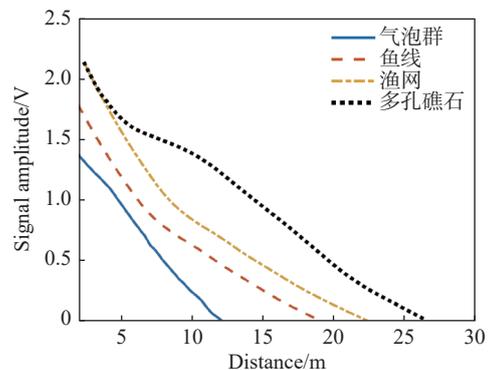
(a) 东海台湾海峡水质

(a) Water quality in the Taiwan Strait in the East China Sea



(b) 黄海中部水质

(b) Water quality in the central Yellow Sea



(c) 渤海中部水质

(c) Water quality in the central Bohai Sea

图 4 不同水质、不同距离下单个目标激光后向散射峰值图
Fig. 4 Laser backscattering peak values of a single target at different distances under different water quality conditions

由图 4 及表 2 可得出, 随着目标反射率与距离的不同, 其激光回波信号幅值有明显变化, 回波信号大小与目标位置和反射系数相关。总体上, 目标距离越远, 回波信号越弱; 反射系数越小, 回波信号越弱, 可探测距离近。这是因为随着距离

的增大,光子衰减长度增加,光子碰撞概率增加,其吸收与散射的概率增加。另外,反射系数越小,返回的光子数越少,接收到的光子数减少,导致接收器的光生电流减小,目标信号幅度下降,目标可探测距离减小。同时随着水质浊度增加,目标可探测距离变小,回波信号变弱,尤其图 4(c)中,在 22 NTU 模拟渤海中部的水质下,同距离下,相较图 4(a)与图 4(b),目标信号幅值锐减。这是由于随着水体浊度的增加,即水体衰减系数的增加,使得传输过程中的光子数损耗增加,进而导致接收回来的光子数减小,信号幅度下降。

表 2 不同水质下 4 种探测目标最远距离统计

Tab. 2 Statistics of the farthest distances of four detection targets under different water quality conditions (m)

水质	目标类型			
	气泡群	鱼线	渔网	多孔礁石
东海台湾海峡	17.2	25.4	30.5	38.8
黄海中部	15.8	22.7	25	32
渤海中部	12.4	19.6	22	26

2.4 典型条件下激光对水下多微弱目标组的探测性能测试

由于激光对水下微弱多目标的探测性能与目标种类、目标数量、多目标与激光探测系统空间相对分布等多因素相关。下文依据水下运动平台避障、测绘、障碍物探测等应用场景,设置了 3 种典型仿真场景。场景一为渔网、气泡群、鱼线 3 种目标依次分别放置于 5.5 m、10 m、13 m 距离处;场景二为渔网、气泡群、多孔礁石 3 种目标依次分别放置于 5.5 m、10 m、13 m 距离处;场景三为渔网、气泡群、鱼线、多孔礁石 4 种目标依次分别于 2 m、4 m、8 m、10 m 距离处,可近似模拟复杂水下探测环境。

图 5 分别展示了近岸水体反射率分别为 0.23、0.05、0.1 的 3 个目标(可等效模拟渔网、气泡群、鱼线目标)的激光后向散射信号图,目标距接收端的距离分别为 5.5 m、10 m、13 m。其余条件不变,改变目标的反射系数,目标的反射系数设置为 0.23、0.05、0.36(可等效模拟渔网、气泡、多孔礁石目标),仿真结果如图 6 所示。表 3 为不同水质下 3 种目标探测距离。

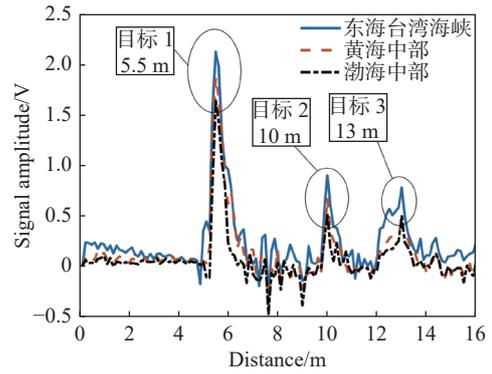


图 5 不同浊度下三目标回波信号图

Fig. 5 Echo signal diagrams of three targets with different turbidity values

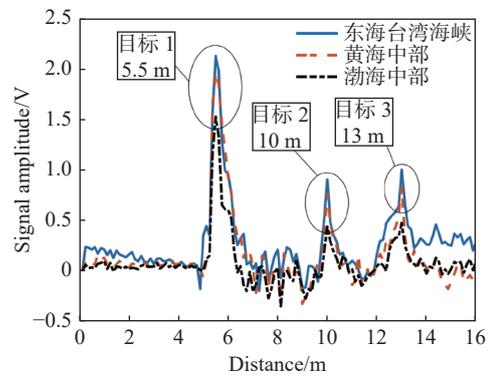


图 6 不同反射率目标回波信号图

Fig. 6 Echo signal diagrams of target with different reflectance values

表 3 不同水质下 3 种目标探测距离

Tab. 3 Three target detection distances under different water quality conditions

目标类型	时间/ms	探测距离/m
渔网	47.8	5.5
气泡群	87.0	10
鱼线/多孔礁石	113.1	13

从图 5 与图 6 分析得出,在激光探测系统对多个目标进行探测时,其信号幅值的变化规律大体与单目标时相同,随着目标反射率与距离的不同,其回波波形相较于水体原始波形有明显的峰值,峰值大小与目标距离呈负相关,尤其在 22 NTU 水质下,远距离 13 m 模拟鱼线目标信号幅度仅有 400 mV。回波信号幅值与目标的反射系数整体呈正相关,即目标反射系数越大,回波信号越强,但这种增强效应不是线性的,同时随着浊度的增加,增强效应越来越不明显。对 13 m 位置

的同一水质条件下不同目标进行对比分析可见, 差值随着水体浊度增加越来越小, 在 3 NTU 模拟东海水质下, 其回波信号强度相差 230 mV, 而在 22 NTU 模拟渤海水质下仅有 50 mV, 目标回波信号幅值增强效应并不明显。原因是虽然目标反射率增大了, 但由于水体浊度增加, 水体对激光传输信道的影响大于目标反射影响, 导致浑浊水中激光探测性能急剧下降。同时对比 13 m 处模拟鱼线与礁石的结果, 图 5 中鱼线信号存在明显的波形畸变与展宽。这是由于水体强散射效应, 导致目标回波展宽及变弱, 反射率越低、目标距离越远, 其激光探测回波信噪比越低。

图 7 分别展示了不同浊度水体反射率分别为 0.23、0.05、0.1、0.36 的 4 个目标(可等效模拟渔网、气泡群、鱼线、礁石目标)的激光后向散射信号图, 目标距接收端的距离分别为 2 m、4 m、8 m、10 m。表 4 为不同水质下 4 种目标探测距离。

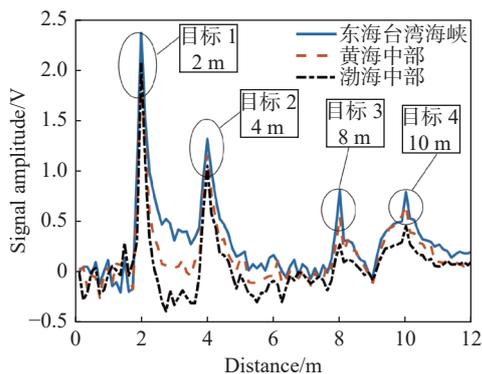


图 7 不同浊度下四目标回波信号图

Fig. 7 Echo signal diagrams of four targets with different turbidity values

表 4 不同水质下 4 种目标探测距离

Tab. 4 Four target detection distances under different water quality conditions

目标类型	时间/ns	探测距离/m
渔网	17.4	2
气泡群	34.8	4
鱼线	69.6	8
多孔礁石	87.0	10

结合图 4、图 6 与图 7, 可以得出目标回波信号幅度与目标个数呈负相关特性, 模拟多孔礁石目标在东海台湾海峡水质条件下激光探测回波达到 1 V 的信号幅值, 当为唯一单目标时, 探测距离

可达 22.5 m, 当探测通道上存在气泡、鱼线等目标时(等效三目标探测), 探测距离为 13 m, 当探测通道上存在气泡、鱼线、渔网等目标时(等效四目标探测), 探测距离仅为 10 m。其原因是: 在增加目标后, 前一个目标相对于后一个目标起到了遮挡效应, 导致到达后一目标的光子数显著减少, 间接导致接收光子数下降, 从而使信号幅度下降, 因为发射的光子数总量是不变的, 故到达目标的光子数显著减少后, 回波信号幅度减弱。

3 水下激光多目标探测系统设计

3.1 实验系统总体设计

系统总体设计如图 8(彩图见期刊电子版)所示。主要包括激光发射(激光器、光学整形等)、激光接收(接收镜头、APD 光电转换模块)以及信号控制及处理(控制触发电路、FPGA 信号处理模块)等。

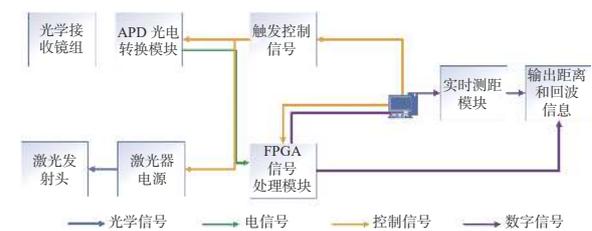


图 8 激光多目标探测系统组成图

Fig. 8 Composition of laser detection system for multi-target

3.2 实验系统激光收发系统模组设计

其中激光发射系统采用发射波长为 532 nm, 脉冲宽度为 8~10 ns 的激光器, 激光器出光口径为 0.1 mm, 焦距在 10~50 mm 范围内可调, 波束角为 1~2 mrad, 重复频率为 1~20 Hz 可调, 激光器能量为 1~20 mJ 可调。通过调节激光能量和接收增益, 采取激光能量和接收增益不固定的模式, 可避免近场因水体强散射回波信号饱和以及远场回波信号过弱而导致的探测误差。

同时, 为了提高探测系统的目标精度、抑制近场水体噪声, 探测系统采用收发异轴的模式。接收系统轴距为 40 mm, 接收望远镜直径为 50 mm, 焦距为 20 mm, 光敏面直径为 1 mm, 接收视场角为 2.85°。工作时, 将激光出光时的部分光采集到测距接收通道中, 这部分光作为时间参考信号, 充当目标信号回波时间参考。试制样机如图 9 所示。



图 9 试验样机

Fig. 9 Experimental prototype

3.3 实验系统信号控制处理模组设计

信号控制与处理模块如图 10 所示, 主要由 APD 接收电路、高速比较器和 FPGA 模块组成, 其中 FPGA 模块由晶体振荡器、开关电路、复零电路、计数器、寄存器组成。当 PC 端发出控制指令, 开关电路开启, 复零指令使整机复零, 仪器处于待测状态, 同时触发激光器发出脉冲激光, 射向目标后反射回接收系统, 经光纤耦合至 APD 探测器上, 转换为电信号, 并借助级联放大电路经降噪、差分放大、增益调节、包络检波等处理整形成宽度和幅度一定的矩形脉冲, 取样脉冲给门控电路输出一个开关脉冲, 电子门打开, 晶体振荡器产生时标脉冲, 时标脉冲通过电子门进入计数器, 同时目标脉冲信号进入测距模块, 通过与时基参考信号的边沿信息进行比较, 最后经过高精度时间测量, 实时输出距离信息, 测距算法流程如图 11 所示。

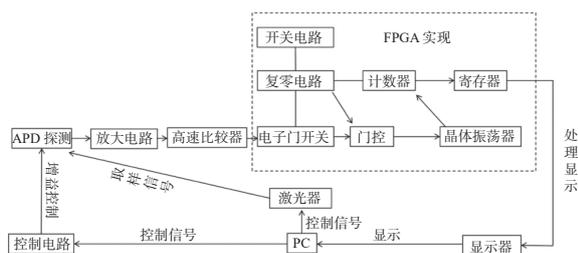


图 10 系统信号处理模块组成

Fig. 10 Composition of system signal processing module

与此同时, 由于目标回波信号进入探测器较取样信号晚, 较近目标回波信号进入电子门开关后, 开关电路不再关闭, 计数器计完第一个数后存取至寄存器, 显示第一个目标距离, 较远目标回波进入至计数器记下第二个数后存取至寄存器, 显示第二个距离, 直至在量程范围内激光光束上所有目标距离显示完成, 开关电路关闭, 复零电路使整机复零, 进行下一次探测。多目标探测过程如图 12 所示。



图 11 测距算法原理图

Fig. 11 Principle diagram of ranging algorithm

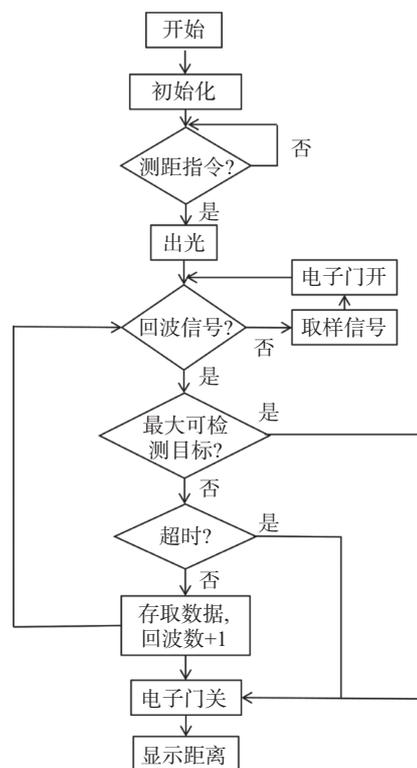


图 12 探测系统工作流程图

Fig. 12 Working flow chart of detection system

4 典型场景下实验验证与分析

为了验证系统的探测性能, 实验环境选择某湖泊, 其近岸环境水质较为浑浊, 经水质检测仪检测水质环境为 12.87 NTU, 可模拟黄海中部海水水质。实验场景如图 13 所示。

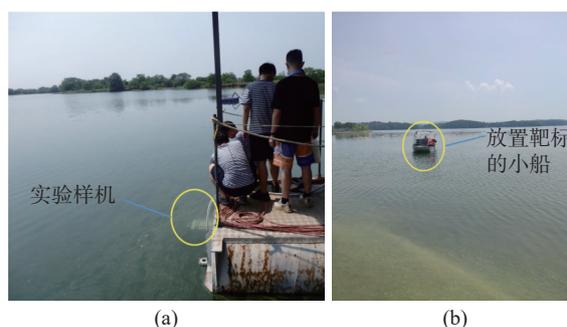


图 13 近岸实验场景

Fig. 13 Nearshore experimental scenarios

实验系统如图 14 所示, 将水下多目标探测实验系统密封至罐中, 将密封罐拖入水中悬挂于码头, 利用一个伸缩杆件将密封壳体沉入水中。依次放置目标, 使得激光部分在目标表面发生反射及散射, 部分透射过目标, 保证每个目标都能被激光照射, 目标 1 设置为网眼大小为 2.5 cm, 网线直

径为 300 μm , 长 3 m 的渔网; 通过室内显微镜头拍摄测量可知, 利用 170 μm 铅丝电解可产生气泡直径为 70~90 μm 的气泡群, 因此目标 2 设置为 70~90 μm 的气泡群, 目标 3 设置为单根鱼线, 模拟行船航道上存在多个微小混合障碍物的典型场景。测试目标尺寸如表 5 所示。

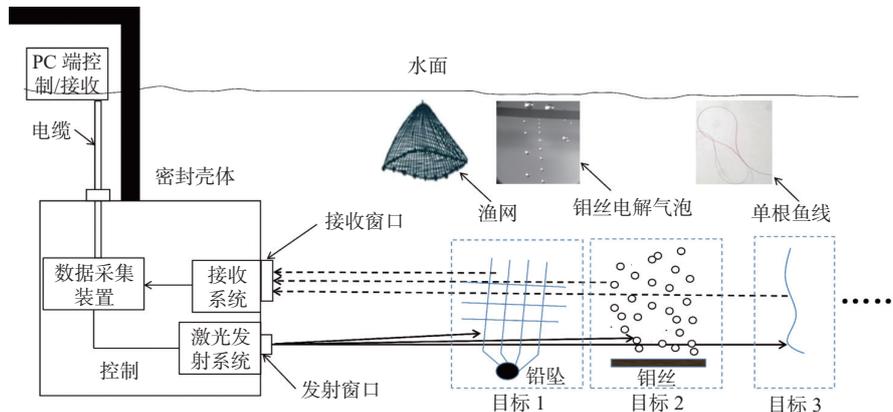


图 14 某湖泊多目标激光探测实验系统

Fig. 14 An experimental system for multi-target laser detection in a certain lake

表 5 测试目标尺寸
Tab. 5 Size of test target

目标类型	尺寸
气泡群	D 为70~90 μm
鱼线	$D=210 \mu\text{m}$
渔网	$\Phi=2.5 \text{ cm}; D=280 \mu\text{m}; l=3 \text{ m}$
多孔礁石	$L=15 \text{ cm}; W=13 \text{ cm}; H=20 \text{ cm}$

4.1 激光对微弱三目标探测实验

对渔网、气泡群、单根鱼线进行多目标探测实验验证, 测距系统到渔网的距离为 5.5 m, 到气泡群的距离为 10 m, 到鱼线的距离为 13 m。得到的原始回波信号如图 15 所示。可见, 原始回波信号图存在 4 个波峰, 第 1 个波峰为取样信号, 第 2 个波峰为渔网回波信号, 第 3 个波峰为气泡群回波信号, 第 4 个波峰为单根鱼线回波信号。经低通滤波、包络检波、峰值提取后的回波信号如图 16 (彩图见期刊电子版) 所示。

经过数据处理后的距离信息如表 6 所示。由表 6 可知, 激光探测系统对气泡群探测的标准差最大, 说明 3 组气泡群测距数据波动较大, 原因可能是目标分布不均匀造成的波动较大。渔网的相对误差最小。鱼线的相对误差较大, 但测距数据波动不大。分析可知, 这是由于在实际环境中鱼线容易随着水体摆动, 导致激光束不能稳定照射到鱼线上, 从而出现误差。通过在湖泊环境下对渔网、气泡、单根鱼线等多目标进行探测验证, 将

多组测试数据的误差取均值, 该系统三目标平均测量误差为 $\pm 0.113 \text{ m}$ 。

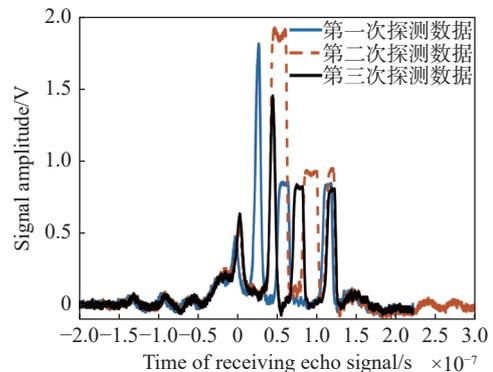


图 15 三目标探测原始回波信号图

Fig. 15 Original echo signal diagram for three target detection

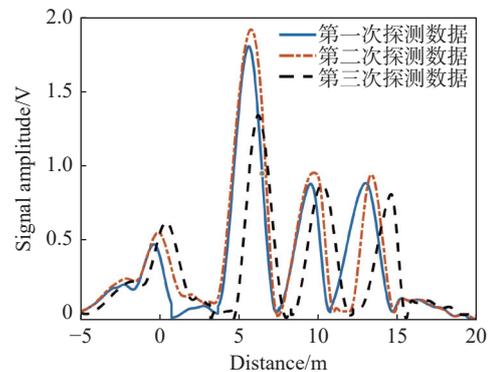


图 16 峰值提取信号图

Fig. 16 Peak extraction signal diagram

表 6 三目标探测距离与实际距离结果对比

Tab. 6 Comparison of detection distance and actual distance for three targets

目标类型	探测距离/m	时间/ns	实际探测距离/m	平均值/m	相对误差/m	标准差				
渔网	5.5	51.2	46.5	48.6	5.894	5.345	5.582	5.607	0.107	0.1548
气泡群	10	91.9	87.85	84.05	10.366	9.909	9.475	9.916	0.084	0.210
鱼线	13	114.8	116.55	115.6	12.955	13.35	13.039	13.15	0.150	0.0538

4.2 激光对微弱四目标探测实验

对单根鱼线、气泡群、渔网、多孔礁石进行四目标探测实验验证,测距系统到鱼线的距离为 2 m,到气泡群的距离为 4 m,到渔网的距离为 8 m,到多孔礁石的距离为 10 m。得到的原始回波信号如图 17(彩图见期刊电子版)所示。原始回波信号图存在 5 个波峰,第 1 个波峰为取样信号,第 2 个波峰为单根鱼线回波信号,第 3 个波峰为气泡群回波信号,第 4 个波峰为多孔礁石回波信号,第 5 个波峰为渔网回波信号。经低通滤波、峰值提取后的回波信号如图 18(彩图见期刊电子版)所示。

经过信息处理后的距离信息如表 7 所示。分析表 7 可得,激光探测系统多孔礁石的探测相对误差最小,鱼线与气泡群的变化规律与三目标时相似,但是渔网的标准差较之三目标时有所增大,说明渔网的数据波动增大,其原因是增加了一个目标,导致目标遮挡效应增强,同时伴随水流使得激光照射点位发生变化使得渔网的信号幅度出现波动。四目标下实际探测距离为 10 m,将多组测试数据的误差取均值,该系统四目标平均测量误差为 ± 0.11 m,相较于三目标,探测距离有所下降,但探测精度无明显变化。对比仿真环境,在外场湖泊环境下,近岸湖泊水质较为浑浊,近距散射增强,目标回波信号可能会隐藏在水体背景信号

中,同时存在背景光干扰及湍流等因素,从而导致误差。

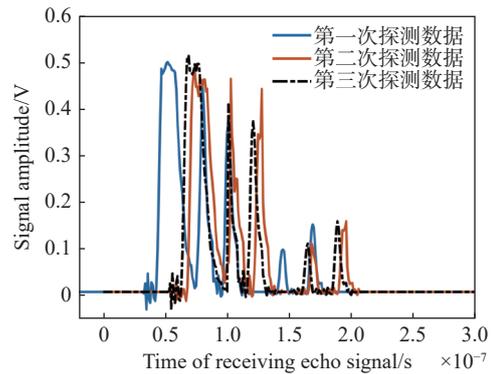


图 17 四目标探测原始回波信号图

Fig. 17 Original echo signal diagram for four-target detection

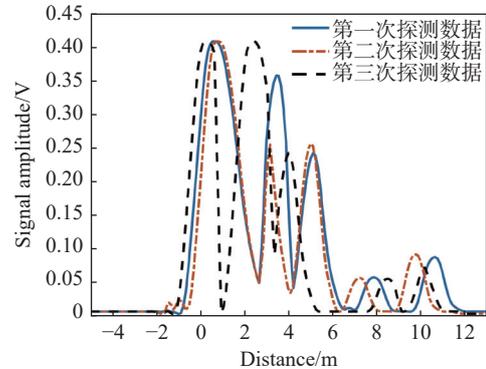


图 18 峰值提取信号图

Fig. 18 Peak extraction signal diagram

表 7 四目标探测距离与实际距离结果对比

Tab. 7 Comparison of detection distance and actual distance for four targets

目标类型	探测距离/m	时间/ns	实际探测距离/m	平均值/m	相对误差/m	标准差				
鱼线	2	18.5	18.3	18.05	2.128	2.105	2.075	2.102	0.102	0.03
气泡群	4	34.5	36.2	37.7	3.968	4.163	4.334	4.155	0.155	0.259
渔网	8	70.1	69.3	68.3	8.05	7.970	7.855	7.958	0.042	0.133
多孔礁石	10	91.1	86.5	87.15	10.477	9.940	10.010	10.142	0.142	0.413

4.3 激光对微弱目标探测实验结果分析

通过对实验数据进行统计,并将其与仿真

结果进行比较分析,将仿真结果与实验数据进行归一化处理,得到不同目标、不同距离下激光

后向散射回波时间与回波强度图, 如图 19、20 所示。

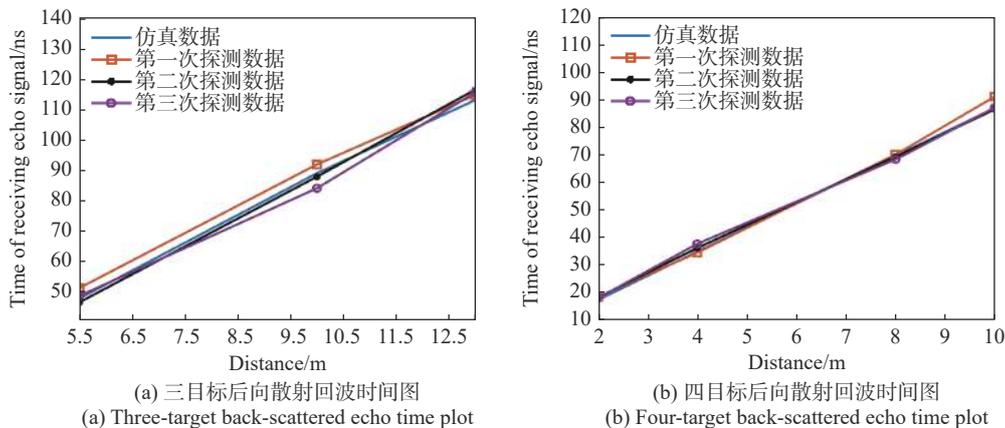


图 19 不同目标激光后向散射回波时间图

Fig. 19 Laser backscattering echo time plots with different targets

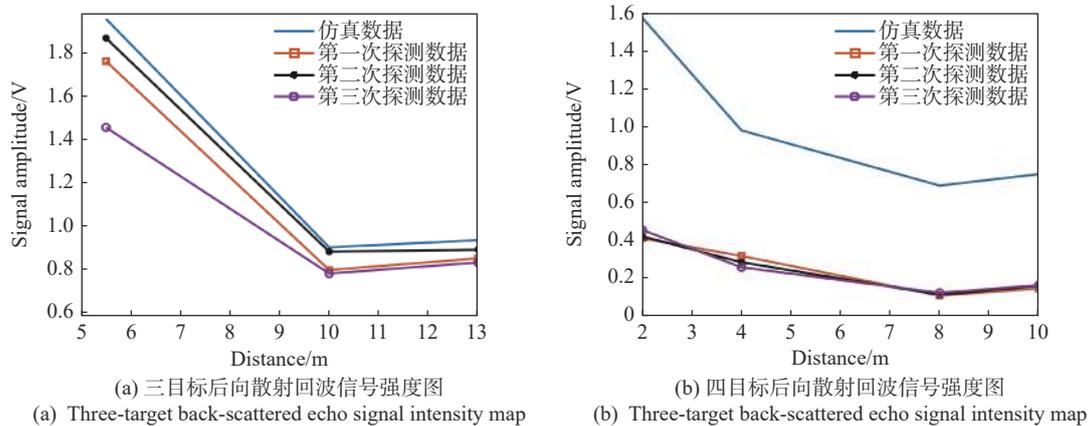


图 20 不同目标激光后向散射回波强度图

Fig. 20 Laser backscatter echo intensity plots with different targets

从图中可以得出, 仿真回波时间图与实验结果基本相同, 而信号幅度的实验结果比仿真结果大, 这是由于仿真环境为理想环境, 没有考虑水体湍流与背景光干扰等其他因素的影响, 使得实验结果偏大。图 20(a) 中, 三目标探测的第三次实验, 信号幅度明显小于前两次, 这是由于探测目标为渔网, 其可能随着水流有轻微晃动, 导致激光在探测中照射位置发生变化, 信号出现起伏。总体来看, 目标激光探测特性的实验与仿真结果趋势相同, 实验数据验证了仿真的准确性。

5 结 论

论文针对复杂水文条件下微弱多目标探测的应用背景, 建立了水下微弱目标激光探测模型, 采

用蒙特卡洛仿真验证了近岸浑浊水体背景下微弱多目标激光探测性能, 对多个不同反射系数的目标后向散射回波特性进行了分析。仿真结果表明: 回波信号幅值与目标反射率成正相关, 与目标距离与目标个数成负相关。搭建了水下异轴激光探测系统与实验模拟平台, 开展了外场湖泊下的多目标探测、测距实验。结果表明, 在浊度为 12.87 NTU 的近岸湖泊水域, 该系统实现了 10 m 范围内对 3-4 个直径在 80~400 μm 不同的低反射系数的混合小目标组的有效探测, 平均测量误差为 ± 0.11 m。实验验证了仿真模拟结果的准确性, 可为近岸复杂水域条件下渔网、鱼线、气泡等微弱目标探测提供支撑。下一步该系统可通过加装振镜扫描增大系统探测视场, 并通过多通道偏振检测, 提升对目标特征的识别能力。

参考文献:

- [1] JANTZI A, JEMISON W, LAUX A, *et al.*. Enhanced underwater ranging using an optical vortex[J]. *Optics Express*, 2018, 26(3): 2668-2674.
- [2] WANG Y Q, ZHANG J H, ZHENG Y CH, *et al.*. Brillouin scattering spectrum for liquid detection and applications in oceanography[J]. *Opto-Electronic Advances*, 2023, 6(1): 220016.
- [3] 王翀, 杨嘉皓, 朱炳利, 等. 距离选通成像系统中短脉冲激光驱动技术研究[J]. *中国光学(中英文)*, 2023, 16(3): 567-577.
WANG CH, YANG J H, ZHU B L, *et al.*. Short pulse laser drive technology in a distance-selective imaging system[J]. *Chinese Optics*, 2023, 16(3): 567-577. (in Chinese).
- [4] 宗思光, 张鑫, 梁善永, 等. 多尺度复杂水质尾流气泡的激光探测仿真与实验[J]. *中国激光*, 2023, 50(5): 0504003.
ZONG S G, ZHANG X, LIANG SH Y, *et al.*. Laser detection simulation and experiment of multiscale complex water wake bubble[J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2023, 50(5): 0504003. (in Chinese).
- [5] 刘东, 姚清睿, 张思诺, 等. 拉曼激光雷达大气温湿压探测技术研究进展[J]. *中国光学(中英文)*, 2023, 16(2): 243-257.
LIU D, YAO Q R, ZHANG S N, *et al.*. Research progress of temperature, humidity and pressure detection technology using Raman Lidar[J]. *Chinese Optics*, 2023, 16(2): 243-257. (in Chinese).
- [6] JIANG Z Q, LIU X M, CAI F H, *et al.*. Imaging comparison experiment of an underwater imaging system with a semiconductor white laser, a monochromatic laser and an LED white light as the light source[J]. *Chinese Optics*, 2023, 16(2): 466-478.
- [7] 彭波, 钟昆, 赵慧, 等. 水下目标激光周向扫描探测模型与仿真分析[J]. *红外与激光工程*, 2019, 48(12): 135-141.
PENG B, ZHONG K, ZHAO H, *et al.*. Laser circumferential scanning detection model and simulation analysis of underwater targets[J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2019, 48(12): 135-141. (in Chinese).
- [8] 郜魏柯, 杜小平, 王阳, 等. 激光散斑目标探测技术综述[J]. *中国光学*, 2020, 13(6): 1182-1193.
GAO W K, DU X P, WANG Y, *et al.*. Review of laser speckle target detection technology[J]. *Chinese Optics*, 2020, 13(6): 1182-1193. (in Chinese).
- [9] 胡波, 张云菲, 吴超鹏, 等. 基于图像的水下三点激光测距方法研究[J]. *红外与激光工程*, 2019, 48(10): 1005011.
HU B, ZHANG Y F, WU CH P, *et al.*. Image-based three-beam underwater laser ranging method[J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2019, 48(10): 1005011. (in Chinese).
- [10] 刘欣宇, 杨苏辉, 廖英琦, 等. 基于小波变换的激光水下测距[J]. *物理学报*, 2021, 70(18): 184205.
LIU X Y, YANG S H, LIAO Y Q, *et al.*. Laser underwater ranging based on wavelet transform[J]. *Acta Physica Sinica*, 2021, 70(18): 184205. (in Chinese).
- [11] 李坤, 杨苏辉, 廖英琦, 等. 强度调制 532 nm 激光水下测距[J]. *物理学报*, 2021, 70(8): 084203.
LI K, YANG S H, LIAO Y Q, *et al.*. Underwater ranging with intensity modulated 532 nm laser source[J]. *Acta Physica Sinica*, 2021, 70(8): 084203. (in Chinese).
- [12] 申玲菲, 范婷威, 胡谷雨, 等. 基于蒙特卡洛仿真的水下四点单目测距研究[J]. *光通信研究*, 2023(4): 60-67.
SHEN L F, FAN T W, HU G Y, *et al.*. Research on underwater four-point monocular ranging based on Monte Carlo simulation[J]. *Study on Optical Communications*, 2023(4): 60-67. (in Chinese).
- [13] 张鑫, 宗思光, 余扬, 等. 近岸渔网激光探测特性与实验研究[J]. *激光杂志*, 2023, 44(3): 105-110.
ZHANG X, ZONG S G, YU Y, *et al.*. Laser detection characteristics and experimental study of inshore fishing net[J]. *Laser Journal*, 2023, 44(3): 105-110. (in Chinese).
- [14] 孔琪. 相位式激光测距技术研究及实现[D]. 成都: 四川师范大学, 2018.
KONG Q. *Research and implementation of phase laser ranging technology*[D]. Chengdu: Sichuan Normal University, 2018. (in Chinese).
- [15] 宗思光, 张鑫, 曹静, 等. 舰船尾流激光探测跟踪方法与试验[J]. *红外与激光工程*, 2023, 52(3): 20220507.
ZONG S G, ZHANG X, CAO J, *et al.*. Method and experiment of laser detection and tracking of ship wake[J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2023, 52(3): 20220507. (in Chinese).
- [16] 钟昆, 苏伟, 彭波, 等. 水下脉冲激光探测后向散射噪声自适应滤波算法[J]. *太赫兹科学与电子信息学报*, 2023, 21(2): 208-215, 224.

- ZHONG K, SU W, PENG B, *et al.*. An adaptive filter algorithm of underwater pulse laser detection based on backscattering correlative characters[J]. *Journal of Terahertz Science and Electronic Information Technology*, 2023, 21(2): 208-215,224. (in Chinese).
- [17] 刘心溥, 元志安, 王玲, 等. 副载波调制水下激光雷达测距性能仿真[J]. *红外与激光工程*, 2020, 49(S2): 20200193.
LIU X F, YUAN ZH A, WANG L, *et al.*. Performance simulation of underwater lidar ranging system based on subcarrier modulation technology[J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2020, 49(S2): 20200193. (in Chinese)
- [18] 张鑫, 宗思光, 余扬, 等. 水下微弱目标双通道激光探测方法研究[J]. *激光与红外*, 2023, 53(2): 185-193.
ZHANG X, ZONG S G, YU Y, *et al.*. Research on dual-channel laser detection method for underwater weak target[J]. *Laser & Infrared*, 2023, 53(2): 185-193. (in Chinese).
- [19] 邢刚, 许冬生, 夏云. 基于 CPLD 的多目标脉冲激光测距系统的设计与实现[J]. *激光与红外*, 2010, 40(2): 152-154.
XING G, XU D SH, XIA Y. Design and realization of multi-target pulsed laser range finder on CPLD[J]. *Laser & Infrared*, 2010, 40(2): 152-154. (in Chinese).
- [20] 魏昊, 姜建芳, 施峰, 等. FPGA 的多目标激光测距系统的设计与实现[J]. *火力与指挥控制*, 2007, 32(7): 120-122,125.
WEI H, JIANG J F, SHI F, *et al.*. The design and realization of multi-target laser range finder on FPGA[J]. *Fire Control and Command Control*, 2007, 32(7): 120-122,125. (in Chinese).
- [21] 董驰, 赵宇, 张翀, 等. 基于 FPGA 的相位式激光测距系统[J]. *国外电子测量技术*, 2021, 40(8): 36-40.
DONG CH, ZHAO Y, ZHANG CH, *et al.*. Phase laser ranging system based on FPGA[J]. *Foreign Electronic Measurement Technology*, 2021, 40(8): 36-40. (in Chinese).
- [22] 纪荣祎, 赵长明, 任学成, 等. 脉冲激光测距高精度计时系统的设计[J]. *工矿自动化*, 2010, 36(8): 18-22.
JI R Y, ZHAO CH M, REN X CH, *et al.*. Design of timing system with high precision of pulse laser ranging[J]. *Industry and Mine Automation*, 2010, 36(8): 18-22. (in Chinese).
- [23] 谭亚运. 水下脉冲激光近程周向扫描探测技术研究[D]. 南京: 南京理工大学, 2017.
TAN Y Y. Research on underwater laser proximity circumferential scanning detection technology[D]. Nanjing: Nanjing University of Science & Technology, 2017. (in Chinese).
- [24] 李铜基, 林明森, 何贤强, 等. 中国近海海洋——海洋光学特性与遥感[M]. 北京: 海洋出版社, 2012.
LI T J, LIN M S, HE X Q, *et al.*. *Offshore China - Marine Optical Properties and Remote Sensing*[M]. Beijing: China Ocean Press, 2012. (in Chinese).
- [25] 胡江华, 贾其, 李凌, 等. 伪装技术[M]. 2 版. 北京: 兵器工业出版社, 2022.
HU J H, JIA Q, LI L, *et al.*. *Camouflage Technology*[M]. 2nd ed. Beijing: Weapon Industry Press, 2022. (in Chinese).

作者简介:



宗思光(1979—), 男, 河南开封人, 博士, 2009 年于海军工程大学获得工学博士学位, 海军工程大学电子工程学院副教授, 主要从事水下激光探测、激光通信、激光致声等方面的研究。
E-mail: 41119749@qq.com



张鑫(1998—), 男, 山东临沂人, 硕士, 2023 年于海军工程大学获得工学硕士学位。海军航空大学助教, 主要从事激光探测等方面的研究。E-mail: 1714308601@qq.com