

## 基于同步累积法的舰船尾流微弱信号检测方法研究

宗思光 段子科 张鑫 余扬 王柏雄

### Detection method of weak ship wake signals based on the synchronous accumulation method

ZONG Si-guang, DUAN Zi-ke, ZHANG Xin, YU Yang, WANG Bai-xiong

#### 引用本文:

宗思光, 段子科, 张鑫, 余扬, 王柏雄. 基于同步累积法的舰船尾流微弱信号检测方法研究[J]. *中国光学*, 2024, 17(6): 1272–1280. doi: 10.37188/CO.2024–0014

ZONG Si-guang, DUAN Zi-ke, ZHANG Xin, YU Yang, WANG Bai-xiong. Detection method of weak ship wake signals based on the synchronous accumulation method[J]. *Chinese Optics*, 2024, 17(6): 1272–1280. doi: 10.37188/CO.2024-0014

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.37188/CO.2024–0014>

## 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>

#### 雷体罩模态振型与激光散斑干涉信号的关系解析

Analysis of the relationship between the mode shapes of a landmine's upper casing and its laser speckle interference signal

中国光学 (中英文). 2022, 15(4): 812 <https://doi.org/10.37188/CO.EN.2022–0001>

#### 基于差分传递函数法的大口径平面镜检测

Detection of large aperture flat mirror based on the differential optics transfer function method

中国光学 (中英文). 2022, 15(5): 992 <https://doi.org/10.37188/CO.2022–0122>

#### 基于互补集合经验模态分解结合希尔伯特变换的光频扫描干涉信号相位提取方法

Phase-extracting method of optical frequency scanning interference signals based on the CEEMD-HT algorithm

中国光学 (中英文). 2023, 16(3): 682 <https://doi.org/10.37188/CO.2022–0173>

#### 光致热弹光谱气体检测技术研究进展

Research progress of gas detection based on laser-induced thermoelastic spectroscopy

中国光学 (中英文). 2023, 16(2): 229 <https://doi.org/10.37188/CO.2022–0137>

#### 基于偏振差分图像的海天线检测方法

Sea-sky-line detection method based on polarization difference images

中国光学 (中英文). 2023, 16(3): 596 <https://doi.org/10.37188/CO.2022–0181>

文章编号 2097-1842(2024)06-1272-09

## 基于同步累积法的舰船尾流微弱信号检测方法研究

宗思光<sup>1</sup>, 段子科<sup>1</sup>, 张鑫<sup>2\*</sup>, 余扬<sup>3</sup>, 王柏雄<sup>1</sup>  
(1. 海军工程大学 电子工程学院, 湖北 武汉 430033;  
2. 海军航空大学 青岛校区, 山东 青岛 266041;  
3. 武汉大学, 湖北 武汉 430070)

**摘要:** 为适应复杂的动态变化的尾流气泡场环境, 提高水下探测装置对舰船尾流微弱信号的探测信噪比与检出率, 本文提出了一种基于同步累积法的舰船尾流微弱信号检测方法。利用周期信号的重复性与噪声的随机性, 对连续多个周期信号做累积归一化处理, 降低随机噪声对探测性能的干扰, 提升探测信噪比。建立了针对舰船尾流微弱信号多时间尺度检测能力评估模型, 评估本方法在多参量耦合下的探测性能。通过在室内水池、室外湖泊条件下开展大量模拟舰船尾流探测实验, 验证了该方法适配稀疏微小的远场尾流气泡至高湍流扰动下的大尺度近场气泡检测。本文方法可实现全域舰船尾流的跟踪检测, 有效提升水下兵器的打击能力, 为舰船尾流激光探测识别工程实践提供支撑。

**关键词:** 激光探测; 舰船尾流; 信号处理

中图分类号: TN249 文献标志码: A doi: 10.37188/CO.2024-0014 CSTR: 32171.14.CO.2024-0014

## Detection method of weak ship wake signals based on the synchronous accumulation method

ZONG Si-guang<sup>1</sup>, DUAN Zi-ke<sup>1</sup>, ZHANG Xin<sup>2\*</sup>, YU Yang<sup>3</sup>, WANG Bai-xiong<sup>1</sup>  
(1. College of Electronic Engineering, Naval University of Engineering, Wuhan 430033, China;  
2. Qingdao Branch, Naval Aeronautical University, Qingdao 266041, China;  
3. Wuhan University, Wuhan 430070, China)  
\* Corresponding author, E-mail: 1714308601@qq.com

**Abstract:** In order to adapt to the complex dynamic changing wake bubble field environment, improve the detection signal-to-noise ratio and detection rate of the weak ship wake signals, and expand the detection range, a method of detecting weak ship wake signals based on the synchronous accumulation method is proposed. By taking advantage of the repeatability of periodic signals and the randomness of noise, cumulative normalization is performed on successive periodic signals, effectively improving the detection signal-to-noise ratio and reducing the interference of random noise on detection performance. In order to evaluate the detection performance of the algorithm under multi-parameter coupling, a multi-time scale detection capability evaluation model for weak ship wake signals is established. By conducting many simulated ship wake detec-

收稿日期: 2024-01-17; 修订日期: 2024-02-22

基金项目: 国防预研基金(No. 2020-JCJQ-ZD-099-00-02)

Supported by the National Defense Pre-Research Foundation of China (No. 2020-JCJQ-ZD-099-00-02)

tion experiments in large indoor pools and typical outdoor lakes, it is verified that the algorithm is suitable for the detection of various bubbles from smaller ones in sparse and discrete tiny far-field wakes to larger near-field ones under high turbulence disturbance, thus realizing full-time ship wake tracking and detection. This can effectively improve underwater weapon strike capability. It can support ship wake laser detection and identification engineering practice.

**Key words:** laser detection; ship wake; signal processing

## 1 引言

舰船在水面航行的过程中,由于波浪破碎及螺旋桨的空化作用会产生大量的气泡,在其尾部会形成一条动态气幕带,即舰船尾流。舰船尾流所在区域的物理特性与周围环境存在显著差异,因此,通过研究舰船尾流探测技术,可以大大提升水下平台的制导能力与制导范围。

基于激光后向散射的舰船尾流探测技术因其准直性好,探测灵敏度高,成为各国研究的重点。该技术主要包括:舰船尾流的光学特性研究以及基于光学效应的探测技术研究,关键在于通过分析激光后向散射回波信号的变化情况,反演尾流气泡群的特征参数,进而确定目标舰船的航向、航速、吃水深度等关键信息。国内外学者开展了大量研究,韩彪等<sup>[1]</sup>基于 Fournier Forand 体积散射函数,利用蒙特卡罗方法理论分析了近距离尾流气泡对激光脉冲后向散射特性的影响并结合仿真结果,使用蓝绿脉冲激光器、光电倍增管构建了一套光尾流探测装置,验证了光尾流探测方法的可行性;石晟玮<sup>[2]</sup>等对舰船尾流的气泡分布规律与激光后向散射特性展开了大量研究,提出了利用气泡激光后向散射特性探测舰船尾流的方法;宗思光<sup>[3]</sup>等结合舰船尾流仿真模型,分析了多尺度、宽数密度、大厚度舰船尾流气泡群的后向散射回波信号特性,并系统地阐述了水下航行器探测舰船尾流的过程,分析了激光探测系统在搜索、跟踪不同阶段中激光回波信号的变化趋势,以及不同目标舰船的激光回波信号变化规律,并在室外湖泊条件下开展了典型船只尾流探测实验,验证了仿真结果的可靠性。

上述研究均对舰船尾流气泡特性进行了系统分析,并基于舰船尾流气泡激光后向散射特性设计了探测方法,但这些研究多考虑单脉冲周期探测,受海洋水体杂质干扰大、探测虚警率高且无

法实现对远场稀疏离散微小气泡的可靠检测<sup>[4-8]</sup>。

本文通过深入分析舰船尾流激光后向散射回波信号的特点以及探测难点,提出了一种基于同步累积法的舰船尾流微弱信号检测方法。利用周期信号的重复性与噪声的随机性,对连续多个周期信号做累积归一化处理,降低随机噪声干扰,有效提升了对舰船尾流微弱信号的探测性能;结合信噪比、信背比、检出率3个参量构建了多时间尺度检测性能评估模型,详细评估了该方法在从远场尾流至近场尾流探测过程中对微弱尾流信号检测性能的提升效果;搭建了室内可等效模拟舰船尾流从远场尾流至近场尾流(气泡尺度70~300 μm)的激光探测及信号分析处理系统<sup>[9-12]</sup>,并进行了外场湖泊条件下的民用运砂船尾流激光探测实验,以验证该方法性能。

## 2 尾流微弱激光回波信号检测及性能评估

针对舰船尾流探测的实时性和可靠性要求,本文提出了适配稀疏离散微小远场尾流气泡至高端流扰动下的大尺度近场气泡的检测方法及评估模型,以实现舰船尾流探测全时段检测性能提升与效果评估。

### 2.1 基于同步累积法的尾流微弱信号检测算法

同步累积法,是一种时域上对信号做累积平均处理的方法。其利用周期信号的重复性与噪声的随机性,通过对多周期信号做同相累积,使周期信号成倍数增长,噪声信号因其随机性则无法同相累积,从而降低噪声信号强度,提升了信噪比。理论上累积次数越多,效果越明显。且同步累积法算法时间复杂度低,所需算力小,具备部署至端侧系统能力。

设输入信号为 $v(t) = s(t) + n(t)$ ,其中 $s(t)$ 为周期信号, $n(t)$ 为噪声信号。设信号功率为 $P_s$ ,噪声

功率为  $P_n$ , 周期信号电压为  $v_s(t)$ , 噪声信号电压为  $v_n(t)$ , 则根据信噪比计算公式得到输入信号信噪比  $SNR_{in}$  为:

$$SNR_{in} = \frac{P_s}{P_n} = \frac{v_s(t)}{v_n(t)} \quad (1)$$

设累积次数为  $N$ , 则累积后的输出周期信号电压  $v_{sout}$  可表示为:

$$v_{sout}(t) = \sum_{i=1}^N v_{si}(t) = N \times \frac{1}{N} [v_{s1}(t) + v_{s2}(t) + \dots + v_{sN}(t)] = N\bar{v}_s, \quad (2)$$

式中,  $\bar{v}_s = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N v_{si}$  为累积周期信号的均值。而对于噪声, 因其不相关性, 则累积后输出噪声信号幅值电压  $v_{nout}$  可表示为:

$$v_{nout}(t) = \sqrt{\sum_{i=1}^N v_{ni}^2(t)} = \sqrt{[v_{n1}^2(t) + v_{n2}^2(t) + \dots + v_{nN}^2(t)]} = \sqrt{N \times \frac{1}{N} [v_{n1}^2(t) + v_{n2}^2(t) + \dots + v_{nN}^2(t)]} = \sqrt{NE_n} \quad (3)$$

式中,  $E_n$  为累积噪声的均方根值, 代入式 (1) 可得到输出信号信噪比  $SNR_{out}$  为:

$$SNR_{out} = \frac{v_{sout}(t)}{v_{nout}(t)} = \frac{N\bar{v}_s}{\sqrt{NE_n}} = \sqrt{N} SNR_{in} \quad (4)$$

显然, 随着累积次数的增加, 信噪比相应提升, 但这一提升会耗费更多的时间, 所以还要结合具体的工程需求确定累积次数。

## 2.2 基于多时间尺度的全时域检测效果评估模型

为评估检测效果, 本文引入信背比、信噪比两个参数对单周期检测效果进行评估, 引入检出率这一参数对多周期信号检测效果进行评估, 三个参数结合构成对舰船尾流探测多时间尺度检测效果评估模型:

$$v(t) = s(t) + n_{water}(t) + n_{system}(t) \quad (5)$$

其中,  $s(t)$  表示周期脉冲激光信号,  $n_{water}(t)$  表示水体后向散射信号,  $n_{system}(t)$  表示系统噪声信号。

在不同探测过程中, 不同噪声对探测性能的影响占比有较大差异。当探测远程尾流信号时,

目标回波信号与水体背景信号差异很小, 系统噪声  $n_{system}(t)$  叠加在目标与背景信号的差值中, 是主要的干扰信号, 此时采用信噪比 (signal to noise ratio, SNR) 来衡量单周期信号检测效果。当探测近程尾流信号时, 目标回波信号与水体背景信号存在显著差异, 此时水体背景信号是主要的干扰源, 系统噪声的干扰可以忽略不计, 此时采用信背比 (signal to backscatter ratio, SBR) 来衡量单周期信号的检测效果。SNR 与 SBR 计算公式如式 (6)、式 (7) 所示:

$$SBR = \frac{V_s}{V_b} \quad (6)$$

$$SNR = \frac{\Delta V}{V_n} \quad (7)$$

式中  $V_s$  为目标回波信号幅值,  $V_b$  为水体背景信号幅值,  $\Delta V$  为目标回波信号幅值与水体背景信号幅值的差值,  $V_n$  为系统噪声幅值。

在探测舰船尾流的过程中, 常用的方法是设定阈值电压, 若信号幅度超过阈值电压, 则判定该周期信号成功探测到目标舰船尾流。但从 2.1 节中分析可知单周期信号的检测可靠性不高, 为评估检测效果, 还需要分析多周期信号的整体检测性能。为此采用检出率 (detection rate,  $R$ ) 这一参数来衡量多周期信号检测效果。 $R$  计算公式如 (8) 所示:

$$R = \frac{N_o}{N} \quad (8)$$

式中  $N_o$  指超出阈值电压的周期数,  $N$  指探测总周期数。检出率  $R$  值越大, 则探测到目标信号次数越多, 探测性能更好。

3 个评估参量相互结合构成检测舰船尾流信号评估模型, 在舰船尾流探测全过程中, 评估单周期与多周期的信号检测性能, 构成多时间尺度全过程检测能力评估模型。

## 3 实验系统设计与测试分析

在室内水池开展了等效模拟全时域舰船尾流目标激光探测实验, 结合室内实验结果, 对样机系统及数据处理算法进行优化。在此基础上, 开展了室外湖泊船舶尾流测试实验, 进一步验证本方法是否具备全时域舰船尾流跟踪检测能力。



### 3.1 室内实验系统设计与测试

#### 3.1.1 实验系统设计

为在室内条件下模拟舰船尾流激光后向散射探测, 本文首先采用波长为 532 nm, 激光能量为 1~10 mJ 可调, 重频为 1~10 kHz 的脉冲激光发射系统与 APD 光电接收系统构建了一套舰船尾流激光探测系统。随后, 使用示波器采集 APD 接收到的激光后向散射信号, 示波器的采样率为 5 GSa/s。最后, 依据舰船尾流气泡特性, 采用钼丝电解模拟生成远程尾流气泡群, 气泡尺寸近似满足以 70  $\mu\text{m}$  为期望的正态分布。采用微孔陶瓷可调节气泵生成尺寸以 300  $\mu\text{m}$  为正态分布的大气泡群模拟近程尾流气泡群, 通过变换通电电流大小以及气压大小, 改变生成气泡群数密度、厚度、尺寸, 模拟全时段舰船尾流特征, 研究本探测系统的全时域适配性与算法有效性<sup>[13]</sup>。

实验在室内 18 m $\times$ 2 m $\times$ 3 m 水池中开展, 通过加入固体颗粒及海盐, 近似模拟近海及远海水质。将探测装置放置于水池一端的光学窗口处, 气泡发生装置放置于距光学窗口 2 m 处, 实验系统如图 1 所示。实验装置如图 2 所示。其中, 图 2(a) 为蓝绿激光探测装置, 2(b) 为可调节气泵发生装置与钼丝电解板气泡发生装置。

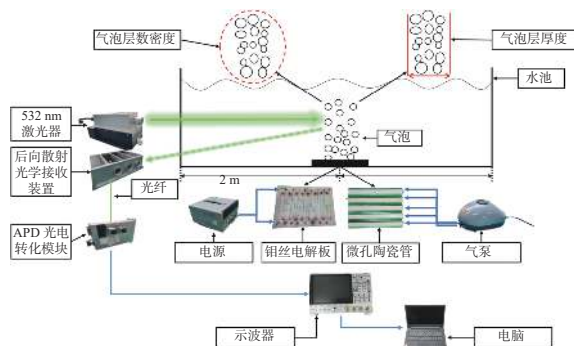


图 1 实验系统示意图

Fig. 1 Schematic diagram of experimental system

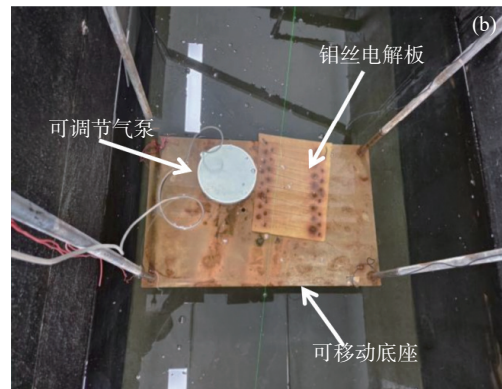
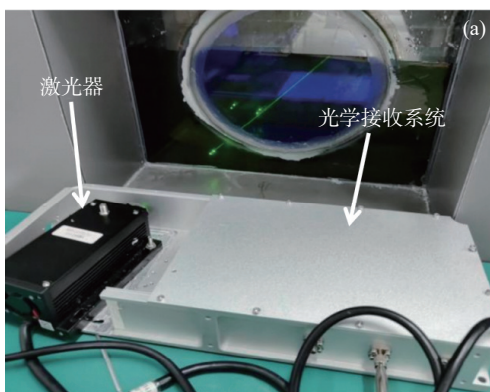


图 2 实验装置图。(a) 探测装置; (b) 气泡发生装置

Fig. 2 Experimental setup. (a) Detection devices; (b) bubble generator

#### 3.1.2 实验结果及分析

实验过程中, 为模拟分析由远及近探测舰船尾流气泡群过程中激光后向散射信号的变化情况, 共连续采集了 420 个周期信号。采集过程中通过变换气泡发生装置参数模拟舰船尾流气泡群特性变化, 实验流程如下:

(1) 开始采集时, 气泡发生装置均关闭, 采集信号为水体激光后向散射回波信号, 后简称无气泡信号;

(2)  $T_0$  时刻, 钼丝板通电, 电解水逐渐生成稀疏小气泡群。通过将钼丝通电电流由 0.3 A 逐渐增加至 0.6 A, 使钼丝电解产生的模拟气泡群数密度、厚度、尺寸逐渐增大<sup>[14]</sup>, 采集激光回波信号对应模拟远程尾流稀疏小气泡目标信号, 后简称小气泡信号;

(3)  $T_1$  时刻, 保持钼丝板通电的情况下, 开启可调节气泵, 生成密集大气泡群, 并在采集过程中, 不断增加气泵阀门档位, 使泵出的模拟气泡数密度、厚度、尺寸逐渐增大, 采集激光回波信号对应近程尾流密集大气泡目标回波信号, 后简称大气泡信号;

(4)  $T_2$  时刻, 同时关闭可调节气泵与钼丝通电开关, 采集激光回波信号对应模拟逐渐驶出尾流时信号变化情况。

取每个周期信号幅值, 最后得到回波信号幅值变化情况, 如图 3 所示。由图 3 可知, 未探测到气泡目标时, 信号幅值约为 0.15 V, 信号幅值变化相对较小。 $T_0$  时刻, 当钼丝板开始通电并产生稀疏小气泡群后, 回波信号幅值变化逐渐变得十分剧烈, 离散出现幅值显著变大的信号, 幅值最高可

达 0.4 V, 但信号幅值整体变化较小, 大部分信号幅值与无气泡信号幅值接近。这一现象产生的主要原因是探测视场小, 气泡稀疏, 其符合远程尾流信号变化特征。 $T_1$  时刻, 开启可调节气泵产生密集大气泡群, 回波信号幅值迅速上升至约 0.65 V 处, 且信号幅值整体变化明显, 平均信号幅值约为 0.4 V, 远高于无气泡信号幅值, 符合近程尾流信号变化特征。 $T_2$  时刻, 断开铝丝板与可调节气泵电源后, 气泡逐渐消散, 回波信号幅值逐渐降低至无气泡信号幅值水平, 符合驶出尾流时信号变化特征。

为研究基于同步累积法的舰船尾流微弱信号检测方法性能, 以 10、30、50 为累积周期数, 通过同步累积处理后得到单周期信号, 如图 4(彩图见期刊电子版)所示。计算对应信号的全过程变化情况, 得到评估模型结果, 如表 1 所示。

由图 4 可发现, 经累积处理后的信号波形更加平滑, 且随机噪声强度显著降低, 并且经同步累积处理后的信号与背景信号差异更大, 更加便于

设定阈值。由表 1 可知, 相较于原始信号, 经同步累积处理后的小气泡信号与大气泡信号, 均有效提升了探测信噪比与信背比, 其中对于信噪比的提升效果更加显著。对于整体探测过程, 检出率随着累积周期数的增加呈不断增加的趋势, 在累积周期数为 50 时, 检出率最高为 87.5%, 较原始信号有 22.14% 的显著提升。

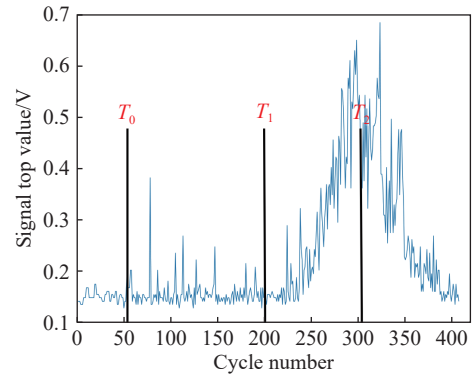


图 3 模拟探测尾流实验结果

Fig. 3 Simulated wake detection experiment results

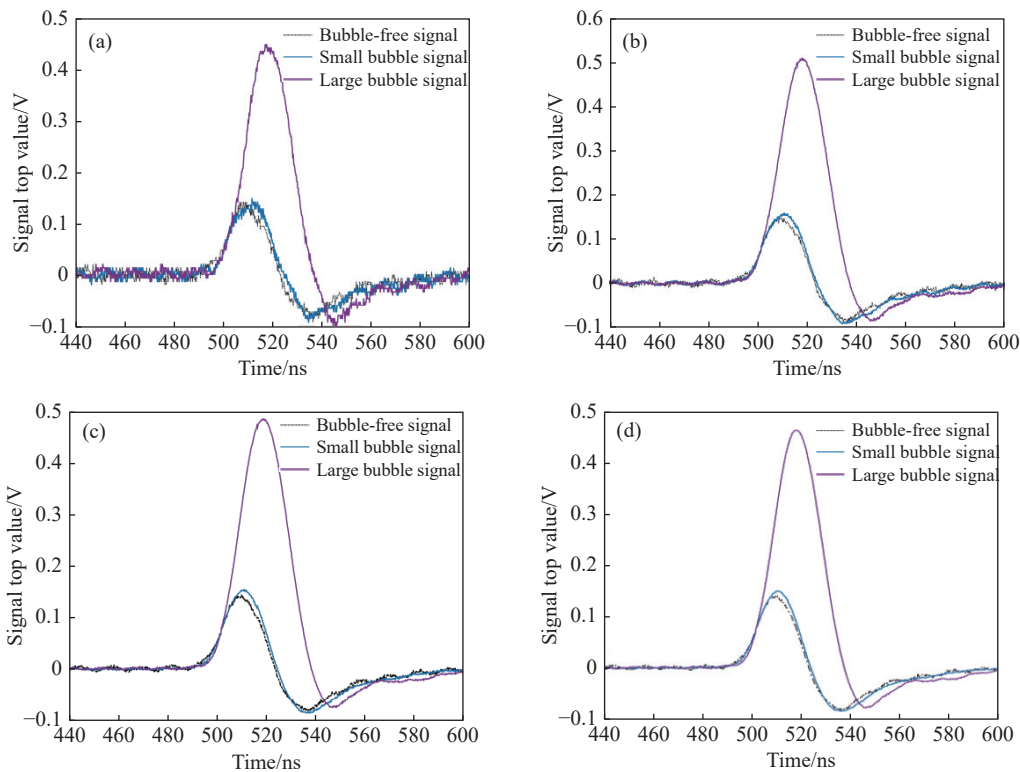


图 4 室内水池尾流气泡探测回波及信号处理波形。(a) 原始信号; (b) 10 周期累积信号; (c) 30 周期累积信号; (d) 50 周期累积信号

Fig. 4 Waveforms of wake bubble echoes and signal processing in an indoor pool. (a) The original signal; (b) 10-cycle cumulative signal; (c) 30-cycle cumulative signal; (d) 50-cycle cumulative signal;

表 1 室内水池尾流气泡探测信号处理效果评估结果

Tab. 1 Evaluation results of signal processing effectiveness of wake bubble detection in an indoor pool

累积周期数	信噪比		信背比		检出率
	小气泡	大气泡	小气泡	大气泡	全探测过程
原始	0.3182	14.0000	1.0493	3.1690	65.36%
10	0.7905	34.2381	1.0549	3.3792	72.50%
30	1.8034	57.8258	1.0743	3.3815	84.62%
50	2.1925	75.6432	1.0655	3.2582	87.50%

### 3.2 室外典型湖泊实验

#### 3.2.1 实验系统设计

经过室内实验验证可行后, 将系统放置于外场湖泊环境中, 借助民用运砂船(吨位约为 1000 T)开展了外场实验, 进一步验证本方法的外场环境适应性。在试验船艏部安装固定支架, 该支架与船体刚性连接, 通过吊架将探测系统与支架连接。通过吊杆将探测系统放至水下, 通过水密电缆将探测系统与船上数据处理设备相连接。连接示意图如图 5 所示。

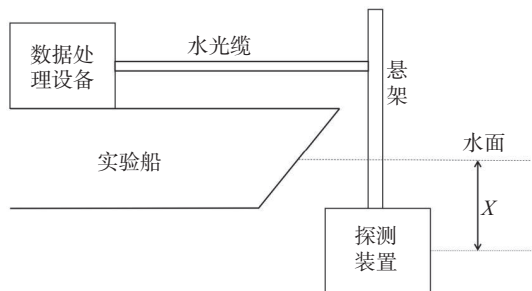


图 5 湖泊实验探测装置安装状态

Fig. 5 Installation state of lake experimental detection equipment

图 6(a) 为外场湖泊水域舰船尾流激光探测实验实拍图。

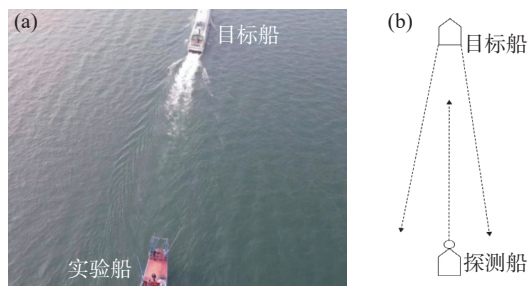


图 6 湖泊水域舰船尾流激光探测实验。(a) 实验实拍图; (b) 实验示意图

Fig. 6 Ship wake laser detection experiment in a lake. (a) Actual photo of the experiment; (b) schematic diagram of experiment

图 6(a) 上方为目标运砂船, 下方为实验船, 即搭载探测设备的船只。目标船沿直线匀速航行, 实验船沿着目标船的尾流进行跟踪探测, 图 6(b) 为实验设置示意图。

#### 3.2.2 模拟探测尾流实验

为研究本系统在追随目标船姿态下探测舰船尾流的能力, 首先将探测船行驶至目标水域, 将目标船航行至探测船船头约 5 m 处, 开始采集信号。在第 19000 个周期时, 目标船启动, 以 11 节航速高速直线行驶, 探测船始终保持静止处于目标船尾流中的状态; 在约第 32000 个周期, 尾流的在第一个开尔文波到达探测视场处, 导致信号幅值突然降至接近于 0 V 的水平; 第 235000 个周期, 目标船停止, 持续采集信号; 第 544000 个周期时, 采集结束, 得到激光回波信号幅值变化情况, 如图 7 所示。

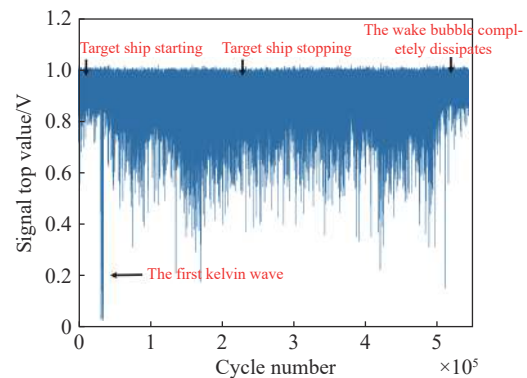


图 7 湖泊条件激光回波信号幅值变化情况

Fig. 7 Changes in the amplitude of the laser echo signal under lake conditions

在整个探测过程中, 由于探测系统放置深度不够, 一旦进入目标尾流区域, 激光光路上便存在大量尾流气泡遮挡了大部分激光回波, 使得激光回波信号强度较水体背景信号强度有较大下降, 但通过分析信号变化情况, 仍可以判定是否探测到目标尾流。观察回波信号强度变化情况发现,

在探测过程中,未进入目标尾流带时,背景信号幅值最低,在 0.8 V 左右变化,变化幅度相对较小;当探测到第一个开尔文波后,回波信号幅值迅速下降,平均约为 0.6 V,且变化十分剧烈,信号幅值最低可达约 0.2 V,可以判定接收到的为目标舰船

尾流信号。研究开始探测后 2 min、4 min、6 min、8 min 时回波信号的变化情况,分别以 10、50、100、500、1000 为累积周期数,原始信号如图 8(a)所示,经同步累积处理后信号如图 8(b)~8(f)所示,评估模型处理结果如表 2 所示。

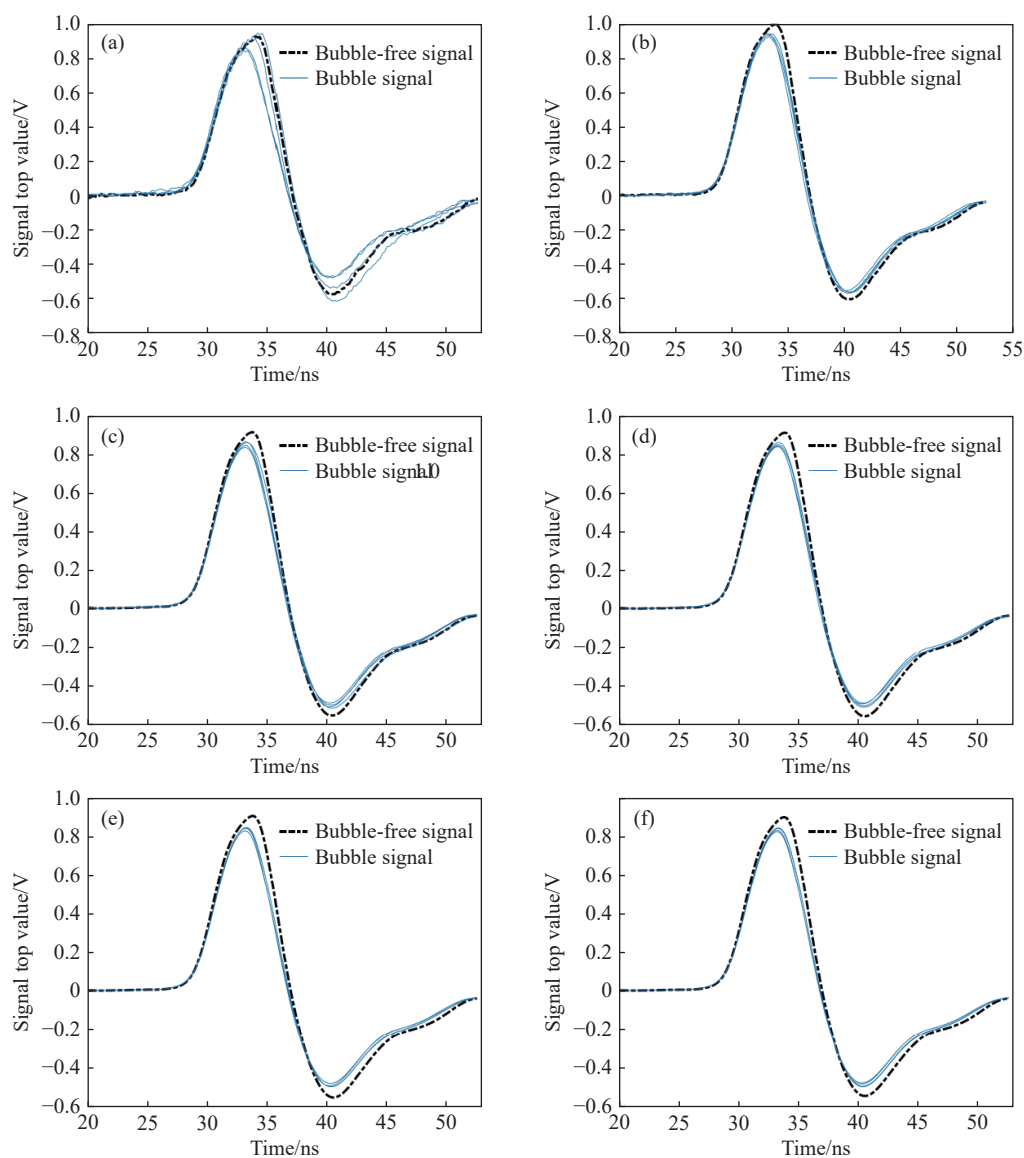


图 8 湖泊水域尾流气泡探测回波及信号处理波形。(a) 原始信号; (b) 10 周期累积信号; (c) 50 周期累积信号; (d) 100 周期累积信号; (e) 500 周期累积信号; (f) 1000 周期累积信号

Fig. 8 Waveforms of wake bubble echo detection and signal process in a lake. (a) The original signal; (b) 10-cycle cumulative signal; (c) 50-cycle cumulative signal; (d) 100-cycle cumulative signal; (e) 500-cycle cumulative signal; (f) 1000-cycle cumulative signal

由图 8 可知,随着累积周期数的不断增加,系统噪声显著降低,并且目标信号与背景信号的差异也更加明显。分析表 2 发现,在时域上,随着目标船只的驶离,探测信噪比与信背比均呈现先增大后减小的趋势,当采集 4 min 时,信噪比

最高,随着目标船驶离,尾流遮挡效应逐渐减弱,信噪比也随之下降。这个过程中信背比变化不大,主要是因为尾流信号过于微弱,与背景信号间差异较小;同时,随着累积周期数的增加,各时间段信号的信噪比均有所提升,但信背比变化较



小。说明本方法可有效降低系统噪声的干扰,但对于提升目标信号与背景信号之间的差值所做出的贡献相对较小。整体上,检出率随着累积周期数增加呈现先增加后减小的趋势,在累积周期数为50个周期时,检出率最高,可达到89.32%,有效提升了探测性能与可靠性。本方法以降低

探测频率为代价,可有效提高探测检出率,具体的累积周期数需结合工程实际进行设置。对于舰船尾流激光探测工程实践来讲,目前使用的激光发射装置大多采用高重频脉冲激光器,探测频率极高,同步累积后引起的探测频率少量降低不会影响最终探测效果。

表2 湖泊水域尾流气泡探测信号处理效果评估

Tab. 2 Evaluation results of signal processing effectiveness of wake bubble detection in a lake

叠加周期数	信噪比				信背比				检出率 全过程
	2 min	4 min	6 min	8 min	2 min	4 min	6 min	8 min	
1	3.9828	6.0263	4.9828	1.7403	0.9240	0.9872	0.9049	1.0188	79.88%
10	7.0033	8.1485	7.3742	5.9902	0.9348	0.9430	0.9266	0.9442	89.26%
50	11.7589	12.5028	11.7459	6.0344	0.9147	0.9413	0.9238	0.9463	89.32%
100	11.7314	18.4155	11.7865	7.6769	0.9242	0.9322	0.9208	0.9439	89.19%
500	15.9158	19.0482	12.9746	12.0893	0.9288	0.9151	0.9321	0.9337	89.06%
1000	15.9447	17.6144	11.6551	13.0707	0.9248	0.9168	0.9383	0.9351	88.97%

## 4 结 论

本文首先详细分析了舰船尾流特性与激光探测舰船尾流工程实践约束,提出了一种基于同步累积法的舰船尾流微弱信号检测方法,并构建了多时间尺度舰船尾流信号检测效果评估模型。随之构建了一套舰船尾流激光后向散射探测系统,

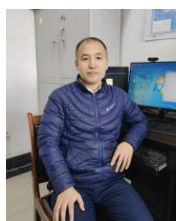
在室内水池、室外湖泊条件下开展了大量模拟实验。通过分析实验结果发现:本方法具备全时段舰船尾流探测能力,可有效提升尾流探测信噪比与信背比,提升系统探测性能;同时,本方法可在不影响系统探测能力情况下,少量降低探测频率,有效提升探测检出率,进一步提升探测可靠性;并且,本方法时间复杂度低,实现简单,可适应复杂水体环境,具备较强舰船尾流激光探测工程实践潜力。

## 参考文献:

- [1] 韩彪,刘继芳,刘昆仑,等.舰船尾流气泡后向光学检测方法研究[J].*光学学报*,2012,32(1):9-13.  
HAN B, LIU J F, LIU K L, *et al.*. Study of backward optical detection method for ship wake bubbles[J]. *Acta Optica Sinica*, 2012, 32(1): 9-13. (in Chinese).
- [2] 彭晓雷,马傲玲,刘翼民.舰船尾流后向光学检测方法研究[J].*舰船科学技术*,2016,38(22):133-135.  
PENG X L, MA A L, LIU Y M. The study on backward optical detection method for ship wake bubbles[J]. *Ship Science and Technology*, 2016, 38(22): 133-135. (in Chinese).
- [3] 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):205-216.  
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): 205-216. (in Chinese).
- [4] 王赞,刘继芳,鲁振中,等.尾流气泡群的激光多普勒检测方法[J].*中国激光*,2014,41(8):0813002.  
WANG Y, LIU J F, LU ZH ZH, *et al.*. Laser Doppler method for the detection of wake bubbles[J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2014, 41(8): 0813002. (in Chinese).
- [5] 张晓晖,雷选华,饶炯辉,等.舰船尾流激光制导方法的研究[J].*激光技术*,2005,29(5):494-496,500.  
ZHANG X H, LEI X H, RAO J H, *et al.*. Study of homing means for laser-wake-homing torpedoes[J]. *Laser Technology*, 2005, 29(5): 494-496,500. (in Chinese).
- [6] 张群,王英民.尾流中多气泡模型及有限元分析[J].*鱼雷技术*,2014,22(4):316-320.

- ZHANG Q, WANG Y M. Multi-bubble models in ship wake and finite element analysis[J]. *Torpedo Technology*, 2014, 22(4): 316-320. (in Chinese).
- [7] 顾建农, 张志宏, 王冲, 等. 舰船尾流气泡数密度分布的实验模拟[J]. *华中科技大学学报(自然科学版)*, 2012, 40(10): 78-81.  
GU J N, ZHANG ZH H, WANG CH, *et al.*. Simulating density distribution of bubble number in a ship's far field wakes[J]. *Journal of Huazhong University of Science & Technology (Natural Science Edition)*, 2012, 40(10): 78-81. (in Chinese).
- [8] 高江, 张静远, 杨力. 舰船气泡尾流特性研究现状[J]. *舰船科学技术*, 2008, 30(4): 27-32.  
GAO J, ZHANG J Y, YANG L. The present situation of research on shipwake characteristic[J]. *Ship Science and Technology*, 2008, 30(4): 27-32. (in Chinese).
- [9] 高可心, 金良安, 苑志江, 等. 舰船气泡尾流场气泡数密度衰减模型研究[J]. *中国测试*, 2019, 45(8): 61-66.  
GAO K X, JIN L A, YUAN ZH J, *et al.*. Research on bubble number density attenuation model of ship's bubble wake field[J]. *China Measurement & Test*, 2019, 45(8): 61-66. (in Chinese).
- [10] CHEN Y ZH, XIA M, LI W, *et al.*. Comparison of point spread models for underwater image restoration[J]. *Optik*, 2012, 123(9): 753-757.
- [11] HE H L, XIA M, LI W, *et al.*. Light scattering by a spheroid bubble with ray tracing method[J]. *Optik*, 2013, 124(10): 871-875.
- [12] 宗思光, 张鑫, 杨劲鹏, 等. 舰船尾流气泡目标激光后向散射特性研究[J]. *中国光学(中英文)*, 2023, 16(6): 1333-1342.  
ZONG S G, ZHANG X, YANG SH P, *et al.*. Laser backscattering characteristics of ship wake bubble target[J]. *Chinese Optics*, 2023, 16(6): 1333-1342. (in Chinese).
- [13] 刘昱, 李永胜, 刘礼文, 等. 基于时频分析和迁移学习的舰船尾流检测方法[J]. *水下无人系统学报*, 2022, 30(4): 465-473.  
LIU G, LI Y SH, LIU L W, *et al.*. Method of ship wake detection based on time-frequency analysis and transfer learning[J]. *Journal of Unmanned Undersea Systems*, 2022, 30(4): 465-473. (in Chinese).
- [14] 顾建农, 张志宏, 张晓晖. 舰船远场尾流气泡分布特性的数值模拟[J]. *光子学报*, 2007, 36(8): 1504-1509.  
GU J N, ZHANG ZH H, ZHANG X H. Numerical simulation of bubble distribution characters in ship's far field wakes[J]. *Acta Photonica Sinica*, 2007, 36(8): 1504-1509. (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, 目前为海军工程大学电子工程学院副教授, 主要从事信息对抗技术、光电对抗、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](mailto: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, 目前为海军航空大学青岛校区助教, 主要从事信息对抗技术、水下激光探测、光电对抗等方面的研究。E-mail: [1714308601@qq.com](mailto:1714308601@qq.com)