光电技术及应用

DOI：10.16818/j.issn1001－5868.2023072301

复杂混合尾流气泡场的激光探测特性研究

宗思光[1]，段子科[1]，张　鑫[2*]，刘扬帆[3]

（1. 海军工程大学 电子工程学院，武汉 430034；2. 海军航空大学 青岛校区，山东 青岛 266041；
3. 哈尔滨工程大学 船舶工程学院，哈尔滨 150000）

摘　要： 在实际舰船尾流激光探测过程中，激光探测系统与目标气泡层之间会存在杂质（气泡群、悬浮粒子），导致气泡回波信号信噪比降低。为了提高实际舰船尾流探测的信噪比，采用蒙特卡洛方法，仿真模拟了不同气泡层特性遮挡的情况，通过改变遮挡气泡层的厚度、数密度来探究其对目标气泡回波特性的影响，仿真得到：当遮挡气泡层存在时，回波信号会明显降低，且降低趋势随着遮挡气泡层厚度和数密度的增加而更为剧烈。搭建了实验室条件下的模拟舰船尾流激光探测系统，对不同气泡层特性遮挡的情况进行了验证，得到了遮挡效应会随着气泡层的厚度、数密度增大而不断变强的变化规律。对测试数据进行归一化处理，实现了仿真与实验的相互验证，可为舰船尾流激光探测工程化提供支撑。

关键词： 舰船尾流；激光探测；复杂气泡场

中图分类号： TN249　**文章编号：** 1001－5868(2023)05－0741－06

Study on Laser Detection Characteristics of Complex Mixed Wake Bubble Field

ZONG Siguang[1], DUAN Zike[1], ZHANG Xin[2], LIU Yangfan[3]

（1. College of Electronic Engineering, Naval University of Engineering, Wuhan 430034, CHN;
2. Qingdao Branch, Naval Aeronautical University, Qingdao 266041, CHN;
3. College of Shipbuilding Engineering, HARBIN ENGINEERING UNIVERSITY, Hei Longjiang 150000, CHN）

Abstract: In the actual laser detection process of ship wake, there are impurities (bubble groups, suspended particles) between the laser detection system and the target bubble layer, resulting in the reduction of the signal-to-noise ratio of bubble echo signal. In order to improve the signal-to-noise ratio of the actual ship wake detection, Monte Carlo method was adopted to simulate the occlusion of different bubble layer characteristics. By changing the thickness and number density of the occlusion bubble layer, the influence of the occlusion bubble layer on the target bubble echo characteristics was explored. The simulation results show that when the occlusive bubble layer exists, the echo signal decreases obviously, and the decreasing trend is more severe with the increase of the occlusive bubble layer thickness and number density. A simulation ship wake laser detection system was built under laboratory conditions, and the occlusion of different bubble layers was verified. It is concluded that the occlusion effect becomes stronger with the increase of bubble layer thickness and number density. The normalization of test data is carried out to realize the mutual verification of simulation and experiment, which can provide support for the engineering of ship wake laser detection.

Key words: ship wake; laser detection; complex bubble field

收稿日期：2023－07－23.

基金项目：国防科研基金项目(2019-JCJQ-JJ-056).

* **通信作者：**张　鑫　**E-mail:** 41119749@qq.com

0 引言

舰船在行驶过程中，由于螺旋桨扰动带来的空化效应，会在其尾部产生一条气泡带，一般称其为尾流。尾流是一种运动气泡幕，由许多不同运动状态的气泡组成，其与周围环境存在极大的差异。通过对尾流带中的微弱气泡特性进行检测，可以进一步反演出舰船的行驶方向、吃水深度，以及速度等特性，为跟踪制导水面舰船提供了一种新的手段。

相较于传统声学尾流探测方法，激光探测尾流系统因其分辨率高、精度高，抗干扰能力强等优势，成为各国研究的重点。国内外许多学者进行了研究。1998 年，Zhang 等[1]利用 Mie 散射理论估计了干净气泡与覆有有机物薄层的气泡的光学特性，发现两者光散射特性区别不大，但是覆有有机薄膜层的气泡比纯净气泡的后向散射系数要大很多；石晟玮等[2]针对舰船尾流气泡层散射相位函数及其后向散射信息特性进行过分析；韩彪等[3]提出了舰船尾流气泡后向光学检测的方法，为工程实现提供了方法支撑；宗思光等[4]提出了针对舰船尾流激光探测系统的跟踪方法，仿真了整个跟踪与搜索的过程，并且在湖泊环境下进行了外场实验，进一步验证了激光尾流探测手段在工程上的可行性。

上述研究中的激光探测系统接收参数大多固定不变，但在实际外场实验中，接收面与舰船尾流探测系统视场内往往存在不同厚度、数密度的气泡干扰，导致实际的探测效果较实验室环境下存在较大差异[5-7]。因此，将不同气泡厚度、气泡数密度的气泡群置于接收面与尾探测系统最佳配置视场位置之间来研究气泡群对于激光探测系统的最优参数选取具有重要的理论与实际应用价值，可为舰船尾流激光探测工程化提供支撑。

本文以提升舰船尾流激光探测微弱目标强度信噪比为目标，分析了当探测系统放置于尾流带中，整个探测光路上都分布大量气泡对目标信号的影响。为降低近处水体后向散射干扰，本文设计的探测系统为离轴定焦探测模式[8-10]。于是根据气泡层所处位置将其划分为目标气泡层和遮挡气泡层：在探测焦点附近的气泡层为目标气泡层，在其他位置的为遮挡气泡层。首先借助蒙特卡洛方法，建立仿真模型，来探究当目标气泡层前方存在不同厚度、不同数密度的遮挡气泡层的目标气泡层回波信号；然后在实验室环境下，针对仿真设置的条件进行了复现，两者相互验证，证明了遮挡效应的存在，并对其有了系统的认识，为提升舰船尾流激光探测系统的环境适应性提供了支撑。

1 蒙特卡洛仿真

1.1 蒙特卡洛方法

蒙特卡洛方法是一种基于概率统计原理的数值模拟方法，可以利用其来模拟光子穿透舰船尾流的运动过程，从而定性地得到尾流的后向散射特性变化规律[11-12]。目前使用蒙特卡洛方法来模拟舰船尾流的研究已经得到了广泛的应用[13]，对探测舰船尾流进行模拟的主要思路就是通过随机抽样和统计分析的方法，模拟大量的光子运动，并对其进行统计分析，光子的运动过程可以概括为：光子从指定位置以固定角度射入介质，在未发生碰撞之前认为其运动为匀速直线运动；当发生碰撞之后，用适当的散射相位函数计算散射后的运动方向，同时对光子能量重新计算；在这一过程中，若光子能量低于阈值，则判定其消亡，直至光子进入接收镜头，则该运动过程结束，仿真流程图如图 1 所示。

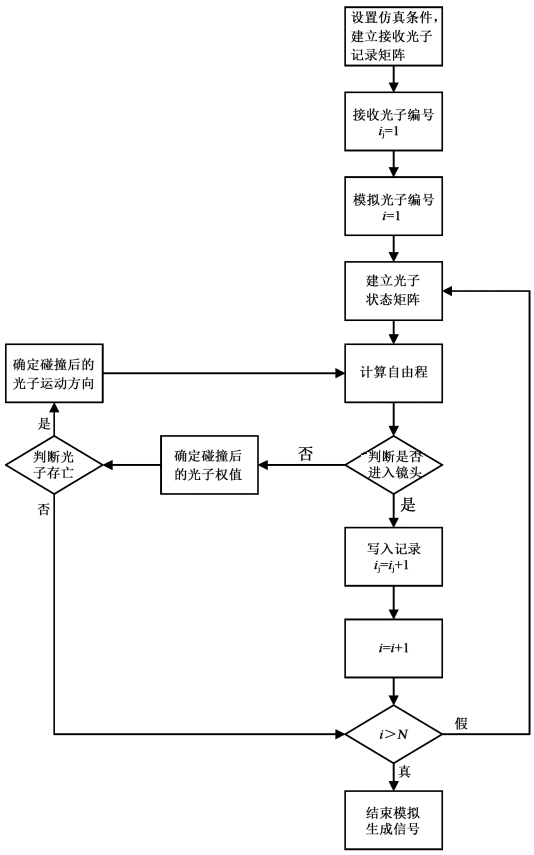
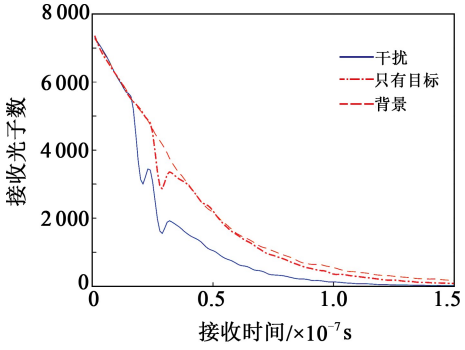


图 1 仿真流程图

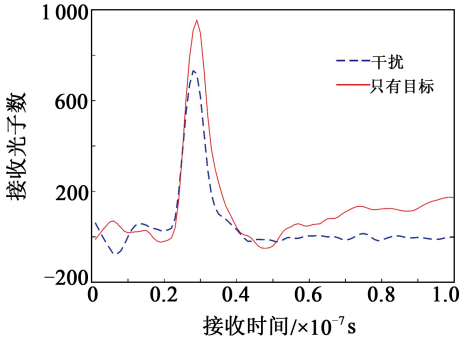
1.2　仿真实验与结果分析

根据上述建立的气泡与光子运动相互作用模型，设计了针对气泡层遮挡效应的仿真实验。仿真环境条件设置如下：发射端发射光子为 10^7 个，激光波长为 532 nm；水体折射率为 1.3；水体衰减系数为 0.151，接近清澈海水衰减系数；接收面与激光器间距离 L_2 为 0.3 m。

当未放置气泡层时，得到激光回波信号如图 2(a)“背景”所示，随着时间的增加接收光子数逐渐减少。在 3.5 m 处设置一个厚为 0.3 m、数密度为 1.9×10^{-7} m^{-3}、气泡直径为 140 μm 的目标气泡层，得到的接收光子数如图 2(a)中“只有目标”所示，存在一个明显的向下的波峰，即对应目标气泡层；当在距离发射装置 2.5 m 处放置一个厚度为 0.3 m、数密度为 2.4×10^{-7} m^{-3}、气泡直径为 140 μm 的遮挡气泡层时，接收光子数如图 2(a)中“干扰”所示，存在两个向下的波峰，其前后分别对应遮挡气泡层和目标气泡层。可以发现后一波峰的下降幅度较之前有所减小。为方便观察，将存在气泡层时的信号分别与水体背景信号作差，得到目标气泡层信号的变化如图 2(b)所示：当前方设置遮挡气泡层时，目标气泡层回波信号有明显的下降。



(a) 原始图像



(b) 作差后图像

图 2　气泡层遮挡效应

下面针对这一现象，分别对遮挡气泡层的厚度和数密度两个参数做仿真研究，探究其对遮挡效应的影响。

1.2.1　遮挡气泡层厚度变化对目标特性的影响

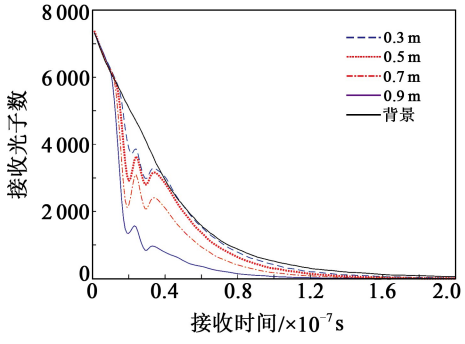
在上述实验基础上，变换遮挡气泡层的厚度，统计接收到的总光子数变化，结果如表 1 所示。

表 1　光子数随厚度的变化

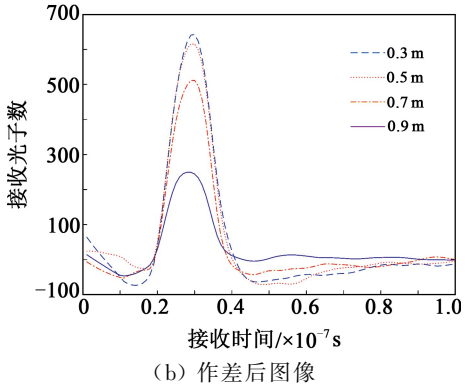
遮挡汽泡层厚度/m	接收光子数
0	300 084
0.3	280 308
0.5	256 902
0.7	210 241
0.9	141 415

发现随着遮挡气泡层厚度的增加，接收到的光子数随之逐步减小。分析认为，这主要是因为光子在气泡层内运动时，会与气泡发生大量的相互作用，使得一部分光子权值低于阈值，这一相互作用的次数会随着气泡层厚度的增加而不断增加，导致接收到的光子数随之减小。

随厚度变化的接收光子数如图 3(a)所示，为了分析目标气泡层回波信号的变化，将目标和遮挡气泡层同时存在时的接收光子数与对应的背景光子数作差，得到目标气泡层信号变化，如图 3(b)所示。模拟了实际探测过程中会显示的目标区域的回波信号变化。从图 3(a)和(b)中可以清楚地看到随着遮挡气泡层厚的增加，目标气泡层的回波信号随之减



(a) 原始图像



(b) 作差后图像

图 3　厚度变化对遮挡效应的影响

小，说明遮挡气泡层的遮挡效应会随着遮挡气泡层厚度增加而变强。

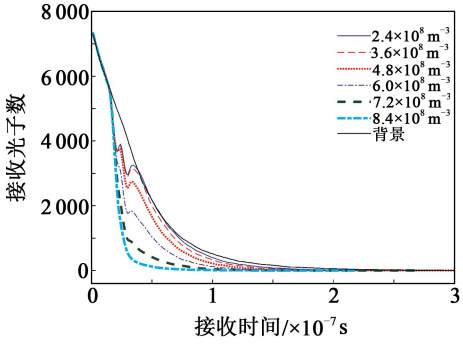
1.2.2 遮挡气泡层数密度变化对目标特性的影响

同上，变换遮挡气泡层的数密度，得到不同的数密度和接收到的总光子数，如表 2 所示。

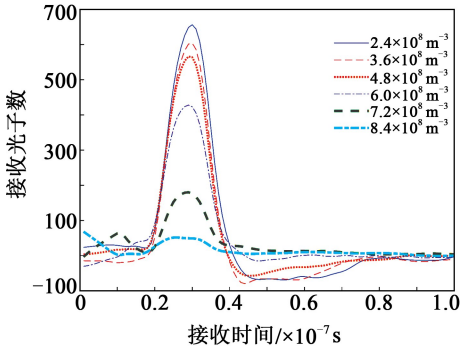
表 2 接收光子数随数密度的变化

汽泡层数密度/m^{-3}	接收光子数
0	306 712
2.4×10^8	280 258
3.6×10^8	265 949
4.8×10^8	243 143
6.0×10^8	203 471
7.2×10^8	161 351
8.4×10^8	138 558

由表 2 可以看到随着遮挡气泡层密度增加，镜头接收到的光子数有明显的下降。分析认为，这主要是因为气泡数密度的增加，光子与气泡相互作用的几率大大增加，导致接收光子数下降。仿真结果如图 4(a)，(b)所示，可以发现随着遮挡气泡层数密度的增加，目标气泡层信号的衰减十分剧烈，当遮挡气泡层数密度达到 8.4×10^8 m^{-3} 时，目标信号甚至降到接近水体背景。



(a) 原始图像



(b) 作差后图像

图 4 数密度变化对遮挡效应的影响

通过上述两个仿真实验可以看出，目标前方存在气泡层遮挡，对目标回波信号的遮挡效应十分明显；当遮挡气泡层的厚度和数密度达到一定程度时，甚至会将目标信号衰减至接近水体背景，导致探测信噪比大大降低，难以实现有效探测。遮挡效应随厚度和数密度变化的趋势相近，在相同变化间隔情况下，开始时，厚度与数密度增大，遮挡效应变化愈加剧烈；当目标回波信号接近背景信号时，厚度与数密度增大，遮挡效应变化放缓。

2 实验室水池实验

针对上述仿真实验的结果，结合激光发射系统、激光接收系统、APD 探测模块构建了一套单通道尾流气泡激光后向散射探测装置[14-16]。该探测系统采用半导体泵浦激光器，波长为 532 nm，脉冲最大能量为 20 mJ，脉冲重复频率为 20 Hz，脉宽为 9～10 ns，采用离轴定焦探测模式，即仅接收焦点处附近的回波信号，所以在后续的实验结果中，仅存在的一个波峰即目标气泡层的回波信号。为了在室内条件下模拟舰船尾流气泡，采用钼丝电解水的模式产生气泡[17]，这个过程中产生的气泡半径符合以钼丝直径为期望的正态分布，为方便研究，假定产生的气泡直径与钼丝直径相同。实验室水池的长×宽×深为 18 m×1 m×1 m，通过在其中加入海盐模拟清澈海水环境。

实验装置如图 5 所示，设 O 点为接收发射轴的焦点，L_1 为 O 点(目标气泡层)与接收发射平面距离，L_2 为激光器与接收器间距离，L_3 为遮挡气泡层位置与接收发射平面距离。后续展示的回波信号均为 O 点附近的信号，即目标气泡层的回波信号。

下面分别对遮挡气泡层的厚度与数密度进行变换，来探讨其对目标回波信号的影响。控制产生气泡的数密度，是通过变换钼丝上的电流大小来实现的，计算公式如下：

$$C_N = 4.074 \times \frac{10^{-13} I}{d^5 A} \tag{1}$$

式中，C_N 是指气泡层数密度，d 为钼丝直径，A 为钼丝板面积，I 为通电电流。

气泡层的厚度则是通过变换钼丝网布设的范围来进行调整的。

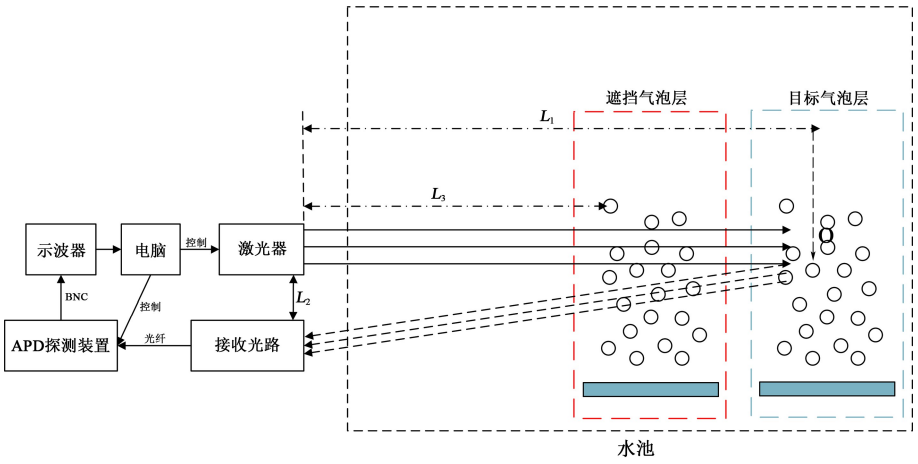


图 5　实验装置示意图

2.1　厚度变化实验

在实验过程中，首先在距离探测器接收端 3.5 m 处水中放置一块厚度为 0.3 m 的钼丝板，用于电解水生成目标气泡层；然后在距离探测器接收端 2.5 m 处放置另外一块钼丝板，生成用来遮挡的气泡层。两块钼丝板电流恒定为 0.2 A 且钼丝直径均为 180 μm。通过变换钼丝板的厚度，来生成不同厚度的遮挡气泡层。当 2.5 m 处的钼丝板厚度分别为 0.3，0.5，0.7 和 0.9 m 时，由接收端得到的目标回波信号如图 6 所示。

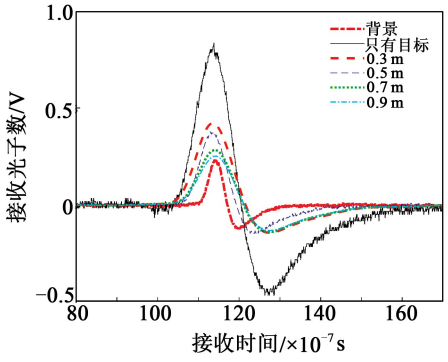


图 6　不同厚度下的目标回波信号

图中仅有目标信号是指，仅存在 3.5 m 处的目标气泡层时，探测器的回波信号，可以看到幅值约为 800 mV；背景信号是指水体本身的后向散射信号，约为 230 mV。当放置遮挡气泡层后，目标信号直接降低了约一半，从 800 mV 降低至 416 mV；随着厚度的增加，目标信号最低降至 240 mV，十分接近水体信号。在下降的过程中，厚度由 0.5 m 增加至 0.7 m 时下降幅度最大，目标回波信号从 350 mV 降至 270 mV，降幅达到 80 mV，符合仿真中的下降趋势。将仿真数据与实验数据进行归一化处理，结果如图 7 所示，可以看到仿真结果与实际结果中，目标回波信号的变化趋势是相同的，均为随着遮挡气泡层厚度的增加，回波信号不断下降，仿真的结果变化更为剧烈一点，验证了仿真结果的可靠性。

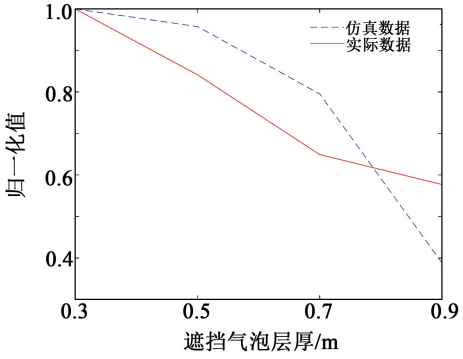


图 7　厚度仿真结果与实验结果对比

2.2　数密度变化实验

在数密度变化实验过程中，结合公式(1)，变换通过钼丝板电流大小，来控制其产生的气泡层的数密度。在 3.5 和 2.5 m 处分别放置两块钼丝板，厚度均为 0.3 m，其中 3.5 m 处钼丝板将电流恒定在 0.2 A，而 2.5 m 处钼丝板的电流逐步设置为 0.1，0.15，0.2，0.25，0.3 A，对应遮挡气泡层数密度为 2.4×10^8 m^{-3}，3.6×10^8 m^{-3}，4.8×10^8 m^{-3}，6.0×10^8 m^{-3}，7.2×10^8 m^{-3}，8.4×10^8 m^{-3}。得到的回波信号如图 8 所示。

由图 8 可以看到仅有目标回波信号约为 800 mV，水体背景信号约为 220 mV。当放置遮挡气泡层后，目标回波信号降低至 600 mV，且随着遮挡气泡层数密度的增加，目标回波信号不断降低，当数密度为 8.4×10^8 m^{-3} 时，目标回波信号降至最低 307 mV。在下降的过程中，数密度由 3.6×10^8 m^{-3}

增加至 4.8×10^{8} m^{-3} 时下降幅度最大，目标回波信号从 520 mV 降至 430 mV，降幅达到 90 mV。将仿真数据与实验数据进行归一化处理，结果如图 9 所示，可以看到仿真结果与实际结果中，目标回波信号的变化趋势是相同的，均为随着遮挡气泡层数密度的增加，回波信号不断下降，仿真的结果变化更为剧烈，验证了仿真结果的可靠性。

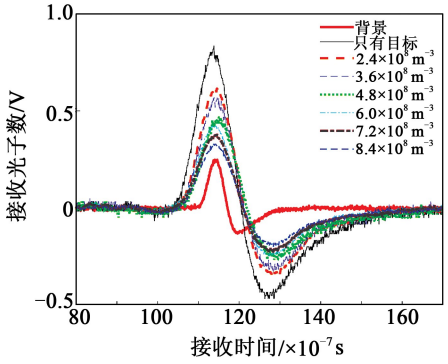


图 8 不同数密度下的目标回波信号

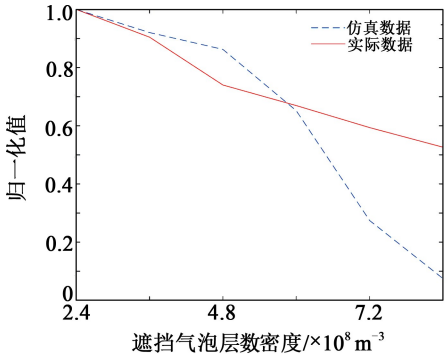


图 9 数密度仿真结果与实验结果对比

3 总结

本文基于蒙特卡洛模拟进行了舰船尾流激光后向散射探测仿真实验，通过在探测系统与目标间设置不同厚度、数密度的遮挡气泡层，来探究其对目标信号的遮挡效应。设计了可实现数密度、厚度可调的尾流气泡激光测试分析系统，开展了室内环境下尾流气泡检测性能测试，对信号进行归一化处理，结果显示理论、仿真可与实验相互验证。

测试结果显示：在进行尾流探测的过程中，目标前方有气泡遮挡，会对系统的探测结果有较明显的遮挡效应，即降低了目标回波信号的幅值，并且这种遮挡效应会随着气泡层的厚度，数密度的变化而逐渐增强，以至于将目标信号幅值衰减至水体信号相近，极大地降低了尾流气泡的探测信噪比。后续针对该情况可通过动态调整探测系统接收增益、激光能量等参数，提升探测系统工作水深等办法进一步提升系统的抗干扰能力，同时也可以借助激光照明成像的方式来判断探测器前方是否存在大量遮挡，进而做出相应的调整。

参考文献：

[1] Zhang X, Johnson B, Lewis M. Influence of bubbles on scattering of light in the ocean[J]. Appl. Opt., 1998, 37(27): 6525-6536.

[2] 石晟玮，王江安，蒋兴舟，等. 舰船尾流气泡层散射相位函数及其后向散射信号特性分析[J]. 光学学报，2008(10)：1861-1866.
Shi Shengwei, Wang Jiangan, Jiang Xingzhou, et al. The scattering phase function of bubble layer in ship wake and the characteristic analysis of backscattered signal[J]. Acta Optica Sinica, 2008(10): 1861-1866.

[3] 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 Biao, Liu Jifang, Liu Kunlun, et al. Study on backward optical detection method of ship wake bubble[J]. Acta Optica Sinica, 2012, 32(1): 9-13.

[4] 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 Siguang, Zhang Xin, Cao Jing, et al. Methods and experiments of laser detection and tracking of ship wake[J]. Infrared and Laser Engineering, 2023, 52(3): 205-216.

[5] 王羽佳，宗思光，张 鑫. 基于 Mie 散射特性的微气泡激光探测仿真与实验研究[J]. 舰船电子工程，2022，42(5)：150-153.
Wang Yujia, Zong Siguang, Zhang Xin, et al. Simulation and experimental study of microbubble laser detection based on Mie scattering characteristics[J]. Naval Electronic Engineering, 2022, 42(5): 150-153.

[6] 张 辉，高晓成. 舰船尾流的光学特性分析及尾流检测技术研究[J]. 舰船科学技术，2021，43(24)：52-54.
Zhang Hui, Gao Xiaocheng. Analysis of optical characteristics of ship wake and research on wake detection technology[J]. Ship Science and Technology, 2021, 43(24): 52-54.

[7] 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 Kexin, Jin Liangan, Yuan Zhijiang, et al. Study on bubble number density attenuation model of ship bubble wake[J]. China Test, 2019, 45(8): 61-66.

[8] 金良安，闫雪飞，王 涌，等. 基于大涡模拟方法和修正的气泡平衡方程的舰船尾流气泡聚并研究[J]. 科学技术与工程，2014，14(24)：141-145.
Jin Liangan, Yan Xuefei, Wang Yong, et al. Study on bubble coalescence in ship wake based on large eddy simulation method and modified bubble equilibrium equation [J]. Science, Technology and Engineering, 2014, 14(24): 141-145.

（下转第 781 页）

& Technol.，2011，54(5)：403-411.

[16] Liu J，Ji H B. An improved robust estimation algorithm for small IR target detection [C]// IEEE Symposium on Industrial Electronics & Applications，2009：394-398.

[17] Hwang S，Park J，Kim N，et al. Multispectral pedestrian detection：Benchmark dataset and baseline[C]// 2015 IEEE Conf. on Computer Vision and Pattern Recognition (CVPR)，2015：1037-1045.

[18] Xu D，Ouyang W L，Ricci E，et al. Learning cross-modal deep representations for robust pedestrian detection[C]// 2017 IEEE Conf. on Computer Vision and Pattern Recognition (CVPR)，2017：4236-4244.

[19] Wagner J，Fischer V，Behnke S，et al. Multispectral pedestrian detection using deep fusion convolutional neural networks[C]// 24th European Symposium on Artificial Neural Networks，Computational Intelligence and Machine Learning (ESANN)，2016：1-6.

[20] Liu J J，Zhang S T，Wang S，et al. Multispectral deep neural networks for pedestrian detection [EB/OL]. 2016-11-8. https://arxiv.org/pdf/1611.02644.pdf.

[21] König D，Adam M，Jarvers C，et al. Fully convolutional region proposal networks for multispectral person detection [C]// 2017 IEEE Conf. on Computer Vision and Pattern Recognition Workshops (CVPRW)，2017：243-250.

[22] Gupta S，Girshick R，Arbeláez P，et al. Learning rich features from RGB-D images for object detection and segmentation[C]// Computer Vision-ECCV 2014，2014：345-360.

[23] Chen X Z，Kundu K，Zhu Y K，et al. 3D object proposals for accurate object class detection [C]// NIPS'15：Proceedings of the 28th International Conference on Neural Information Processing Systems，2015：424-432.

[24] Gao C Z，Li W. Multi-scale PIIFD for registration of multi-source remote sensing images[J]. J. of Beijing Institute of Technol.，2021，30(2)：113-124.

[25] Harris C G，Stephens M J. A combined corner and edge detector[C]// Alvey Vision Conference，1988：147-151.

[26] Lowe D G. Object recognition from local scale-invariant features[J]. Proc. of the Seventh IEEE Inter. Conf. on Computer Vision，1999，2：1150-1157.

[27] Rublee E，Rabaud V，Konolige K，et al. ORB：An efficient alternative to SIFT or SURF[C]// 2011 Inter. Conf. on Computer Vision，2011：2564-2571.

[28] Rosten E，Drummond T. Machine learning for high-speed corner detection[C]// Computer Vision-ECCV 2006，2006：430-443.

作者简介：

裘一鸣(1995—)，男，上海市人，硕士，主要从事多模态目标识别方面的研究；

李范鸣(1969—)，男，研究员，博士生导师，主要从事红外系统工程、红外成像技术、多维信息获取及微弱目标探测技术方面的研究。

(上接第 746 页)

[9] Chen P，Li X N，Zhang G. Rapid detection to long ship wake in synthetic aperture radar satellite imagery [J]. J. of Oceanology and Limnology，2019，37(5)：1523-1532.

[10] 李　海，贾宏光，陈在斌. 共轴双旋翼系统的气动特性分析及试验[J]. 光学精密工程，2021，29(9)：2140-2148.
Li Hai，Jia Hongguang，Chen Zaibin. Analysis and experiment on aerodynamic characteristics of coaxial rotor system [J]. Optics and Precision Engineering，2021，29(9)：2140-2148.

[11] 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 Qun，Wang Yingmin. Multi bubble model and finite element analysis in wake[J]. Torpedo Technology，2014，22(4)：316-320.

[12] 张银波，李思宁，姜　鹏，等. PCA 特征提取和弹性 BP 神经网络的水下气泡识别[J]. 红外与激光工程，2021，50(6)：209-215.
Zhang Yinbo，Li Sining，Jiang Peng，et al. PCA feature extraction and elastic BP neural network for underwater bubble recognition[J]. Infrared and Laser Engineering，2021，50(6)：209-215.

[13] 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(4)：27-32.
Gao Jiang，Zhang Jingyuan，Yang Li. Research status of ship bubble wake characteristics[J]. Ship Science and Technology，2008(4)：27-32.

[14] 田恒斗，金良安，王　涌，等. 考虑单气泡运动特性的舰船尾流气泡分布研究[J]. 兵工学报，2011，32(9)：1126-1130.
Tian Hengdou，Jin Liangan，Wang Yong，et al. Study on bubble distribution in ship wake considering single bubble motion characteristics[J]. Acta Armamentarii，2011，32(9)：1126-1130.

[15] Zhang X X，Wu Z S，Su X. Influence of breaking waves and wake bubbles on surface-ship wake scattering at low grazing angles[J]. Chin. Phys. Lett.，2018，35(7)：32-35.

[16] Guo C Y，Wu T C，Zhang Q，et al. Numerical simulation and experimental research on wake field of ships under off-design conditions[J]. China Ocean Engineering，2016，30(5)：821-834.

[17] Wang B L，Guo X Y，He C. Numerical simulations of wake signatures around high-speed ships [J]. J. of Hydrodynamics，2014，26(6)：986-989.

作者简介：

宗思光(1979—)，男，博士，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。