第 50 卷 第 5 期/2023 年 3 月/中国激光 研究论文

中国激光

多尺度复杂水质尾流气泡的激光探测仿真与实验

宗思光*，张鑫，梁善永，曹静

海军工程大学电子工程学院，湖北 武汉 430034

摘要 舰船尾流气泡具有尺度范围大、稀疏、离散等特征。利用蓝绿激光的海水穿透性能以及气泡对激光的后向散射特性，可以实现舰船尾流气泡的远场检测。舰船尾流的稀疏、离散特征导致气泡的激光散射回波信噪比极低，对光学接收处理系统及尾流信号处理方法带来了困难与挑战。建立了舰船尾流气泡的激光后向散射模型，通过蒙特卡罗仿真验证了不同水质、不同气泡距离和不同尺度气泡的激光后向散射特性，设计了可抑制近场水体强散射干扰的水下气泡激光测试分析系统，实现了激光能量与雪崩光电二极管接收增益间的匹配调节。针对室内和湖泊环境，开展了不同水质和光电探测参数下的尾流气泡检测性能测试，通过对数据进行统计处理分析得到了舰船尾流气泡的激光探测特征规律。设计的水下气泡激光测试分析系统可以实现对舰船尾流气泡的有效探测，为舰船尾流探测系统在不同水质环境下的工程应用提供了理论及数据支撑。

关键词 海洋光学；舰船尾流；蒙特卡罗；后向散射；仿真研究；实验研究

中图分类号 TN249 **文献标志码** A **DOI:** 10.3788/CJL220853

1 引 言

舰船尾流是由舰船航行时螺旋桨转动引起的水流扰动。螺旋桨通过转动将部分空气卷入水中形成气泡，螺旋桨本身的空化作用也会在螺旋桨周围产生大量气泡，从而使得舰船尾部产生了一条充斥着气泡的尾流带。尾流具有与四周水体环境差别极大的光学特性[1-2]。通过对舰船尾流的激光特性进行研究，可以进一步判断舰船在海洋中的航行轨迹、速度等特征，进而实现鱼雷等水下航行器的精确制导和毁伤打击[3-5]。探测舰船尾流时，传统声学方法的探测距离短，而且受鱼雷运动噪声的干扰较大，限制了鱼雷航速的提升。利用舰船尾流气泡的蓝绿激光后向散射特性，可以实现对尾流中更小气泡的检测，进而增加对舰船的发现距离。同时，激光探测受平台振动干扰的影响小，可以适配更高航速的水下航行器载体[6-7]。

舰船尾流气泡的尺度、数密度与舰船航速、螺旋桨转速以及测量区域距舰船的距离有关。舰船尾流形成的近程尾流气泡直径通常在 1000 μm 以下，远程尾流气泡直径一般在 10～300 μm 范围内，舰船尾流气泡的数密度一般要比周围海水中的气泡高 1～3 个量级。舰船尾流气泡具有明显的稀疏、离散特征，气泡尺寸和数密度均较小[8]。因此，舰船尾流激光探测方法需要同时具备对 10～1000 μm 大动态尺寸范围气泡的感知能力，进而实现对近场、远场舰船尾流的探测。同时，舰船尾流激光探测方法也需要适应不同的水质环境。水体介质会对激光产生强的后向散射作用，因此舰船尾流的水下激光探测属于在气泡大尺度动态变化、不同水质、强水体散射背景下的极微弱信号探测问题[9]。在远海、近海、港口等不同海域，水体对激光消光性能的差异直接影响着水下激光探测系统的探测性能。在控制激光器能量和接收系统增益不变的情况下，若水质浑浊，水体的后向散射回波信号就会比较强，强的水体散射回波信号就会成为舰船尾流回波信号的背景噪声。近场的强水体信号极易导致接收系统信号饱和，而远场目标回波信号极易淹没在水体的后向散射背景信号中。因此，在光学系统不变的情况下，水下激光探测系统的目标检测能力与接收系统的增益密切相关，理想的舰船尾流激光探测系统应具备自适应增益调节功能，根据不同的水质背景选取匹配的接收系统增益[10]。

本文采用蒙特卡罗方法实现了纯海水、清洁海水、沿岸海水和港口海水舰船尾流的后向散射仿真，得到了不同水质下尾流气泡的激光雷达回波信号特征，可为舰船尾流气泡探测系统在不同水质下的光学接收自适应设计提供理论支撑。针对水下激光尾流探测存在的近距强水体散射干扰、微弱信号探测信噪比低的问题，本文提出了一种抗饱和及增益控制信号处理方法，通过调节偏置电压的大小调节雪崩光电二极管（APD）的光电流增益，实现了 APD 增益的可控调节。

收稿日期：2022-05-12；**修回日期**：2022-06-16；**录用日期**：2022-06-22；**网络首发日期**：2022-07-05

基金项目：国家国防基金（2019-JCJQ-JJ-056）

通信作者：*41119749@qq.com

设计了可抑制近场水体强散射干扰的水下微小气泡激光测试分析系统，该系统可以实现激光APD接收增益的匹配调节。开展了室内、湖泊环境下不同水质和光电探测参数下的尾流气泡检测性能测试，通过数据统计处理分析，得到了舰船尾流气泡激光探测特征规律。验证了利用舰船尾流远场微气泡的激光后向散射进行探测的可行性，为舰船尾流探测系统在不同水质环境下的使用提供了理论及数据支撑。

2 舰船尾流的激光后向散射特性

2.1 蒙特卡罗方法

蒙特卡罗方法是基于光子运动轨迹的计算机模拟方法，其基本过程为：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；若光子发生散射，则由适当的散射相位函数就能确定散射后新的运动方向；若光子发生吸收，光子便消亡[11]。这些过程随机重复进行，直到光子被接收面接收[12]。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散射路径上的衰减[13]，以便能适用于绝大多数海域。

蒙特卡罗模拟可以分为6个步骤。1)设置发射条件(波长、能量)；2)计算运动轨迹(自由程)；3)计算散射角；4)确定碰撞后的运动方向；5)计算新的自由程；6)判断是否达到终止条件(接收或消亡)。

1) 自由程及新自由程的确定

准直光束在介质中传播的朗伯-比尔定律[14]为

$$E_l = E_0 \cdot \exp(-cl), \tag{1}$$

由式(1)推导可得

$$l = -\frac{\ln \frac{E_l}{E_0}}{c}, \tag{2}$$

式中：c为介质的光学衰减系数；l是光束传播距离；E_0是光束的初始能量；E_l是准直光束传播l距离之后的剩余能量。

令$\xi = \frac{E_l}{E_0}$，$0<\xi<1$，则$l = -\frac{\ln \xi}{c}$，可得

$$P_{\mathrm{m}} = \frac{\pi r^2}{N^{-2/3}}, \tag{3}$$

$$P_{\mathrm{n}} = 1 - P_{\mathrm{m}} = \exp(-cl) = \exp(-cN^{-1/3}), \tag{4}$$

$$c = -\frac{\ln P_{\mathrm{m}}}{N^{-1/3}} = \ln P_{\mathrm{n}} \cdot N^{1/3} = \ln\left(1 - \pi r^2 \cdot N^{1/3}\right) \cdot N^{1/3}, \tag{5}$$

$$l = -\frac{\ln \xi}{N^{1/3} \ln(1 - \pi r^2 \cdot N^{1/3})}, \tag{6}$$

式中：P_{m}为运动l距离后发生碰撞的概率；P_{n}为运动l距离后不发生碰撞的概率；r为粒子半径；N为c的对数密度；ξ为(0,1)内均匀分布的随机数。

新的自由程为

$$l_{m+1} = -\frac{\ln \xi_{m+1}}{N^{1/3} \ln(1 - \pi r^2 \cdot N^{1/3})}, \tag{7}$$

式中：l_{m+1}碰撞m次后新的光束传播距离；ξ_{m+1}为(0,1)内均匀分布的随机数。

2) 散射角及新运动方向的确定

图1是单个光子两次碰撞散射示意图。I_0为初始入射方向，以入射方向为x轴建立坐标系O-xyz，三个方向余弦分别为$\cos\alpha = 1$，$\cos\beta = 0$，$\cos\gamma = 0$。第一次碰撞引起散射后，光子的运动方向变为I_1，以I_1方向为x轴建立坐标系O'-$x_1y_1z_1$，那么坐标系O-xyz中的方向余弦变为$\cos\alpha_1$、$\cos\beta_1$、$\cos\gamma_1$，其中$\alpha_1 = \theta_1$，θ_1为第一次散射角。

设φ_1为第一次偏转角，在$\Delta X'OY$中，$OY = 1$，则$X'O = \csc\varphi_1$；在$\Delta X'OO'$中，$\sin\theta_1 = \frac{OX'}{OO'} = \frac{\csc\varphi_1}{OO'}$，则$OO' = \csc\varphi_1 \cdot \csc\theta_1$；在$\Delta YOO'$中，$\cos\beta_1 = \frac{1}{OO'} = \sin\varphi_1 \cdot \sin\theta_1$。接着求取$\gamma_1$，$\cos\gamma_1 = \cos\varphi_1 \cdot \cos\theta_1$。那么$I_1$在坐标系$O$-$xyz$中的方向余弦为$\left(\cos\theta_1, \sin\varphi_1 \cdot \sin\theta_1, \cos\varphi_1 \cdot \cos\theta_1\right)$。

第二次碰撞引起散射后，光子的运动方向变为I_2，以I_2方向为x轴建立坐标系O''-$x_2y_2z_2$，散射角为θ_2，偏转角为φ_2，那么I_2在坐标系O'-$x_1y_1z_1$中的方向余弦为$\left(\cos\alpha_2, \cos\beta_2, \cos\gamma_2\right) = \left(\cos\theta_2, \sin\varphi_2 \sin\theta_2, \cos\varphi_2 \cos\theta_2\right)$。现需将此方向余弦转换为$O$-$xyz$中的方向余弦。经过坐标系转换后，$I_2$在坐标系$O$-$xyz$中的方向余弦变为

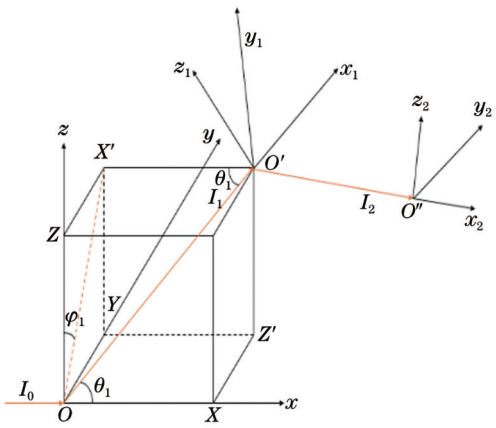

图1 单个光子两次碰撞散射示意图

Fig. 1 Schematic of double collision scattering of a single photon

$$\begin{cases} \cos\alpha_2 = \cos\theta_1 \cos\theta_2 - \sin\varphi_2 \sin\theta_2 \sin\theta_1 \\ \cos\beta_2 = \cos\varphi_1 \sin\theta_1 \cos\theta_2 + \cos\varphi_1 \cos\theta_1 \sin\varphi_2 \sin\theta_2 + \sin\varphi_1 \cos\varphi_2 \sin\theta_2 \\ \cos\gamma_2 = -\sin\varphi_1 \sin\theta_1 \cos\theta_2 - \sin\varphi_1 \cos\theta_1 \sin\varphi_2 \sin\theta_2 + \cos\varphi_1 \cos\varphi_2 \sin\theta_2 \end{cases}。 \tag{8}$$

光子在第 m 次碰撞后，出射方向相对于上一层坐标系中的三条坐标轴为 $(\alpha_m, \beta_m, \gamma_m)$；在第 $m+1$ 次碰撞后，出射方向相对于第 m 坐标系为 $(\alpha_{m+1}, \beta_{m+1}, \gamma_{m+1})$。其中，

$$\begin{cases} \cos\alpha_{m+1} = \dfrac{\sin\theta_{m+1}\left(\cos\alpha_m \cdot \cos\gamma_m \cdot \cos\varphi_{m+1} - \sin\varphi_{m+1} \cdot \cos\beta_m\right)}{\sqrt{\cos^2\alpha_m + \cos^2\beta_m} + \cos^2\alpha_m \cdot \cos\theta_{m+1}} \\ \cos\beta_{m+1} = \dfrac{\sin\theta_{m+1}\left(\cos\beta_m \cdot \cos\gamma_m \cdot \cos\varphi_{m+1} - \sin\varphi_{m+1} \cdot \cos\alpha_m\right)}{\sqrt{\cos^2\alpha_m + \cos^2\beta_m} + \cos^2\beta_m \cdot \cos\theta_{m+1}} \\ \cos\gamma_{m+1} = -\sin\theta_m \cdot \cos\varphi_m \cdot \sqrt{\cos^2\alpha_m + \cos^2\beta_m} + \cos\gamma_m \cdot \cos\theta_m \end{cases}。 \tag{9}$$

3）光子生存的确定

设光子生存权值的阈值为 W_Y，单次散射率为 W_D，则第 $m+1$ 次碰撞后光子权值 W_{m+1} 的表达式可以写成

$$W_{m+1} = W_m \cdot W_D。 \tag{10}$$

若 $W_{m+1} \geqslant W_Y$，光子继续运动；若 $W_{m+1} < W_Y$，光子被吸收。

蒙特卡罗光子模拟运动程序图如图 2 所示。

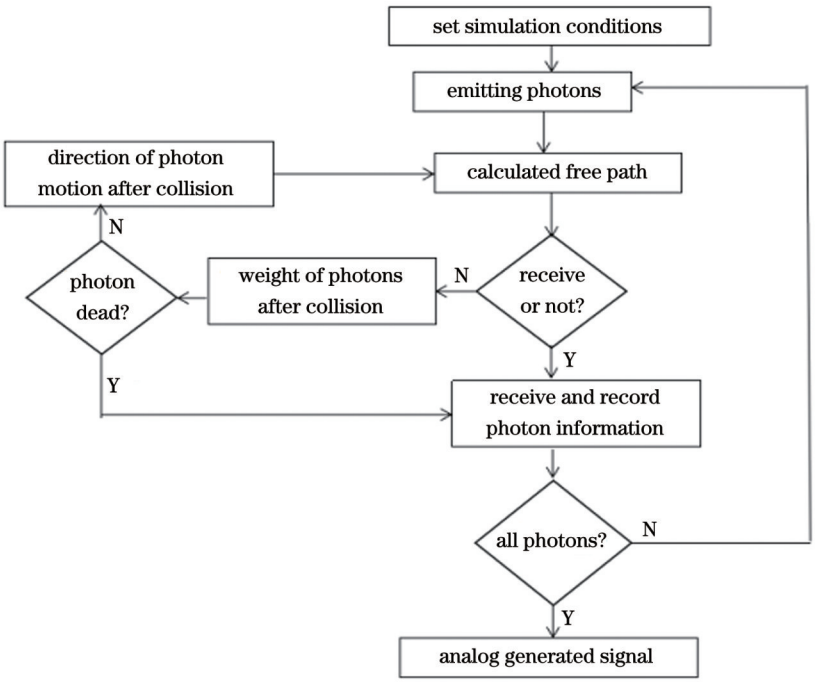

图 2 光子模拟运动程序图

Fig. 2 Program diagram of photon simulated motion

2.2 舰船尾流气泡的后向激光散射特性仿真

根据舰船尾流气泡与光子相互作用的模型，利用蒙特卡罗模拟对纯海水、清洁海水、沿岸海水和港口海水尾流气泡的激光后向散射特性进行仿真实验，仿真条件设置如下：输出波长为 532 nm，水体折射率为 1.3，气泡直径为 80 μm，气泡数密度为 10^6 m^{-3}，气泡距离分别为 3、5、7、9、11 m，气泡层厚度为 1 m。不同水质对应的水体系数如表 1 所示。

表 1 不同水质的水体系数

Table 1 Water body coefficient of different water qualities

Water quality	Absorption coefficient /m^{-1}	Scattering coefficient /m^{-1}	Attenuation coefficient /m^{-1}	Single scattering rate
Pure seawater	0.053	0.003	0.056	0.054
Clean seawater	0.069	0.080	0.150	0.533
Coastal seawater	0.088	0.216	0.305	0.708
Port seawater	0.295	1.875	2.170	0.864

当舰船尾流气泡距离设置为 3 m 时，根据表 1 所示水体系数进行模拟得到的仿真结果如图 3 所示，4 种水质对应的峰值光子数如图 4 所示。分析图 3 可得：纯海水、清洁海水、沿岸海水均出现了舰船尾流的气泡回

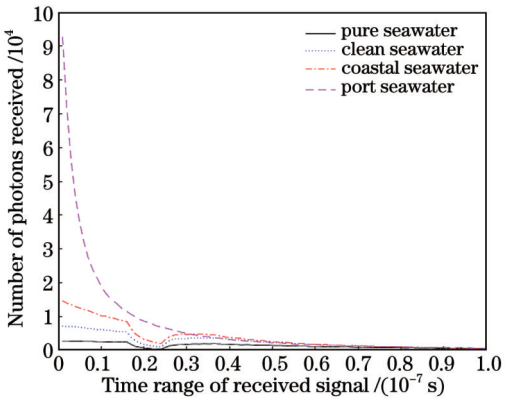

图 3　不同水质下的气泡回波信号

Fig. 3　Bubble echo signal under different water qualities

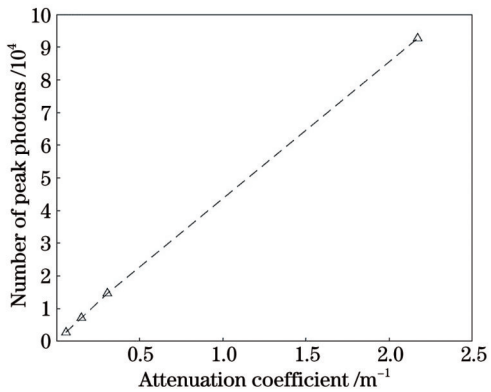

图 4　不同水质下接收探测器接收的峰值光子数

Fig. 4　Peak photon number received by receiving detector under different water qualities

波信号，且气泡的回波幅度依次降低；在港口海水情况下，气泡回波与水体回波一致。分析图 4 可知：随着衰减系数从 0.056 m^{-1} 增大到 2.170 m^{-1}，接收系统探测器接收到的峰值光子数逐渐增加，且接收的峰值光子数-衰减系数曲线整体接近于一条直线，近似呈线性变化。光子数增加的原因是：随着衰减系数增大，单次散射率增大，海水后向散射增强，因此接收到的光子数增加。

研究了不同水质下气泡距离对舰船尾流气泡回波幅度的影响，气泡距离分别设置为 3、5、7、9、11 m，其余条件不变，得到的仿真图如图 5 所示。通过分析可得：气泡的激光后向散射回波逐渐后移，且回波幅度逐渐降低；在纯海水条件下，气泡的激光后向散射信号幅度最强；沿岸海水在气泡距离为 9 m 时已与水体信号一致；在具有较大衰减系数的港口海水条件下，气泡的激光后向散射强度一直与自然水体的激光后向散射信号强度保持一致。

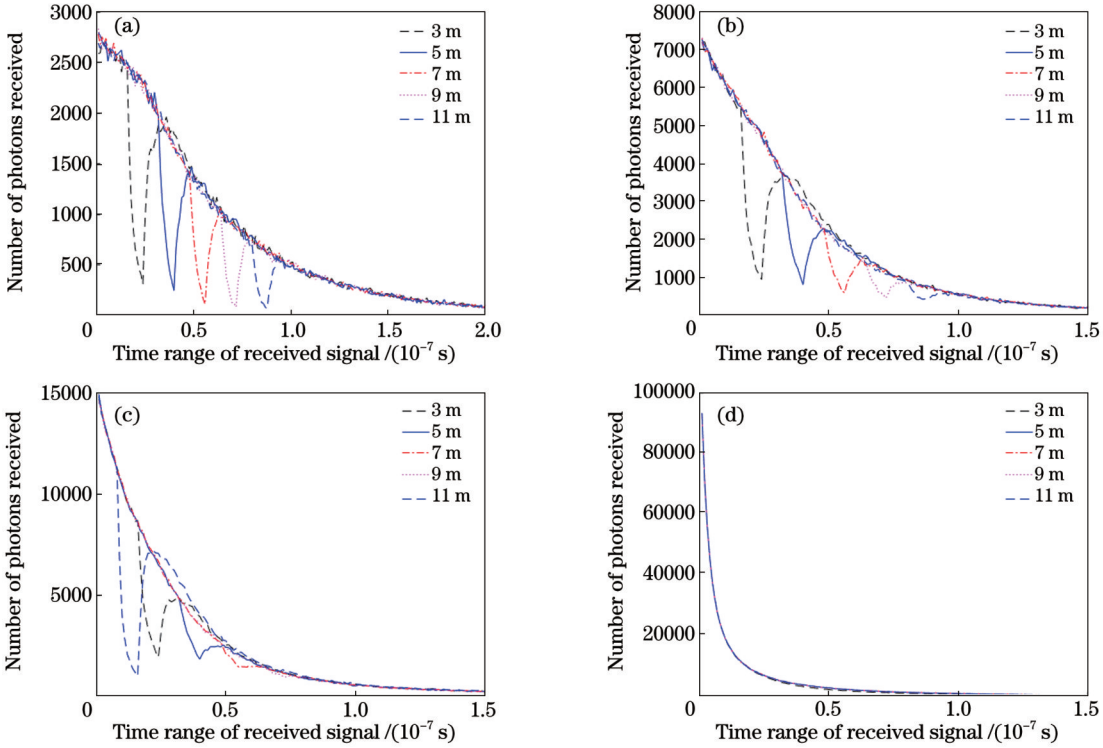

图 5　气泡的回波信号。(a)纯海水；(b)清洁海水；(c)沿岸海水；(d)港口海水

Fig. 5　Echo signal of bubbles. (a) Pure seawater; (b) clean seawater; (c) coastal seawater; (d) port seawater

研究了不同水质下气泡尺度对气泡回波幅度的影响，气泡尺度（直径）分别设置为 40、60、80、100、300、500 μm，气泡数密度设置为 10^9 m^{-3}，气泡距离设置为 3 m。得到的仿真图如图 6(a)、(b)、(c)所示，通过分析可得：在纯海水、清洁海水和沿岸海水条件下，舰船尾流气泡的激光后向散射回波幅度依次降低；在纯海水条件下，直径为 80 μm 的气泡的激光后向散射回波幅度相比直径为 60 μm 的气泡降低得更显著，直径为 100 μm 的气泡的激光后向散射回波消失。在清洁海水和沿岸海水条件下，直径为 80 μm 的气泡的激光后

向散射回波幅度较低，直径为100 μm的气泡的激光后向散射回波消失。

其他条件不变，设置气泡层厚度分别为1.5、1.8、2.0、2.3、2.5 m，得到了各气泡层厚度条件下港口海水气泡的回波信号变化，如图6(d)所示。通过分析可以得出：在港口海水条件下，气泡的激光后向散射强度一直与自然水体的激光后向散射信号强度保持一致；当气泡层厚度为1.5 m时，气泡的激光后向散射回波幅度与水体的回波幅度保持一致；当气泡层厚度为1.8 m时，开始出现气泡的激光散射回波；当气泡层厚度为2.5 m时，后向散射回波幅度最强。

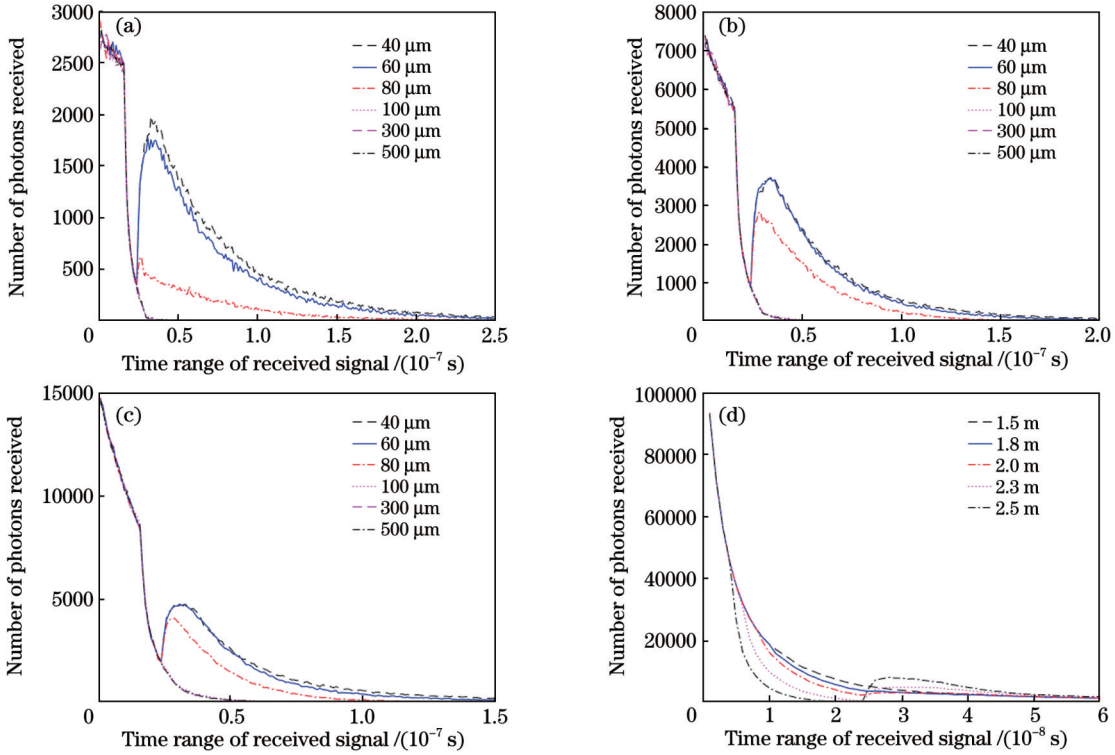

图6 气泡的回波信号。(a)纯海水；(b)清洁海水；(c)沿岸海水；(d)港口海水

Fig. 6 Echo signal of bubbles. (a) Pure seawater; (b) clean seawater; (c) coastal seawater; (d) port seawater

对上述仿真实验数据进行分析可得到以下结论：1)纯海水尾流气泡的激光后向散射回波信号的幅度最强，港口海水的最弱。2)随着衰减系数增大，尾流气泡的激光后向散射回波幅度逐渐降低。3)随气泡距离增加，尾流气泡的激光后向回波逐渐后移，且幅度逐渐降低。4)当气泡数密度为$10^9\ \mathrm{m}^{-3}$时，随气泡尺度增加，纯海水、清洁海水和沿岸海水气泡的回波幅度依次降低，港口海水则一直与水体信号保持一致。5)在港口海水环境下，当气泡层厚度小于1.8 m时，激光探测系统难以检测到气泡回波；当气泡层厚度大于1.8 m时，激光探测系统可以检测到气泡回波。

3 实验系统设计

3.1 室内实验设计

采用激光发射系统、激光接收系统、激光回波APD接收处理系统以及气泡源发生器构建了不同气泡距离和气泡尺度的激光后向散射测试实验系统。实验系统采用双通道复合探测模式，双通道分为近场接收通道和远场接收通道。实验系统设计如图7所示。采用半导体泵浦激光器，激光发射波长为532 nm，单脉冲最大能量为10 mJ，脉冲重复频率为50 Hz，脉冲宽度为9～10 ns。为在室内模拟舰船尾流气泡，分别采用微孔陶瓷、钼丝电解两种模式产生典型的不同尺度的气泡。选用微孔陶瓷产生用于模拟舰船尾流近场的大尺度气泡，气泡直径在100～300 μm之间；选用钼丝电解方法产生用于模拟舰船尾流远场的小尺度气泡，气泡直径在20～30 μm之间[15]。

3.2 尾流检测的抗饱和及增益控制优化设计

为了防止APD饱和或者放大电路输出饱和，对系统进行优化控制。通过调节偏置电压的大小来调节APD的电流增益，从而实现APD接收增益的控制。实验中选用APD800雪崩光电二极管，其具有较高的量子效率、较高的响应以及高的接收灵敏度。由APD800的暗电流、光电流和偏置电压之间的关系可知，在相同的光照下，120 V和180 V电压下的光电流相差了10倍[16]。通过调节偏置电压的大小来调节APD的光电流增益；选用数字电位器AD5245调节偏置电压，通过IIC接口发送命令，调节电位器触点的位置，进而改变输出电压。AD5245是一个数字电位器，具有256个可设置游标，可替代

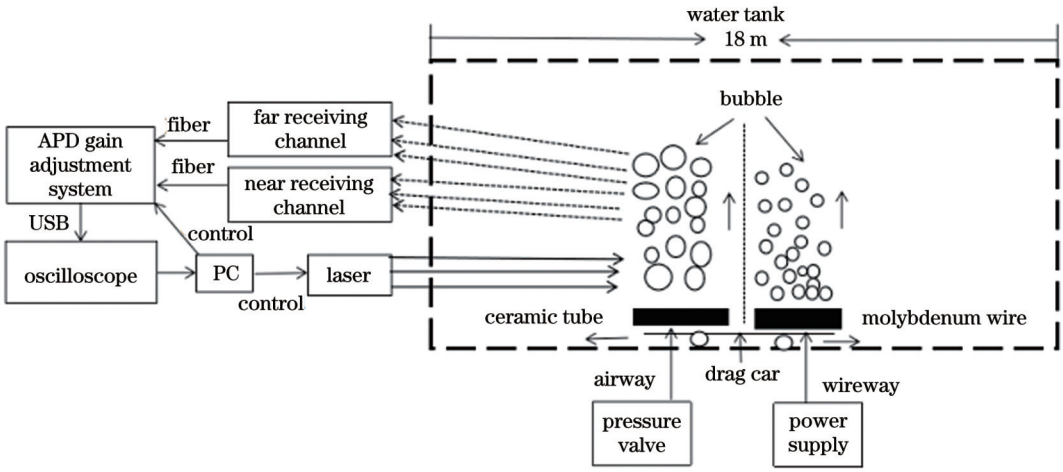

图 7 实验系统设计

Fig. 7 Experimental system design

机械电位计或可变电阻。该器件具有低温度系数特性，非常适合用于高精度、高稳定性的变阻调节。游标设置可以通过 I2C 兼容型数字接口进行控制，也可以使用该接口回读当前的游标寄存器控制字[9]。设计前后的 APD 偏置电源分别如图 8 和图 9 所示。

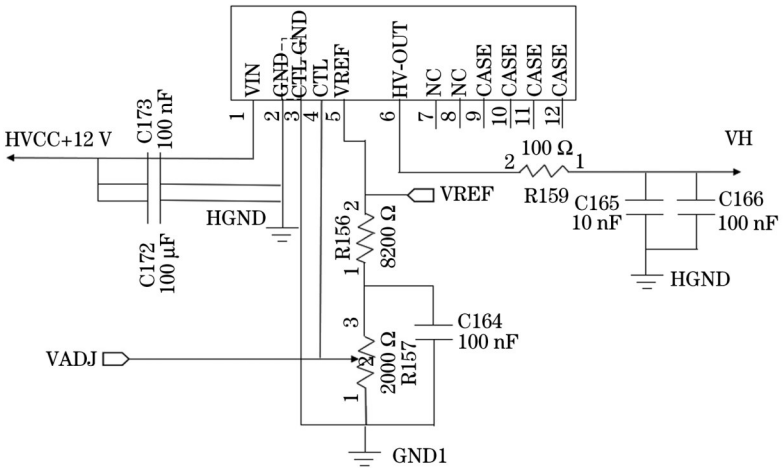

图 8 设计前的 APD 偏置电源

Fig. 8 APD bias power supply before design

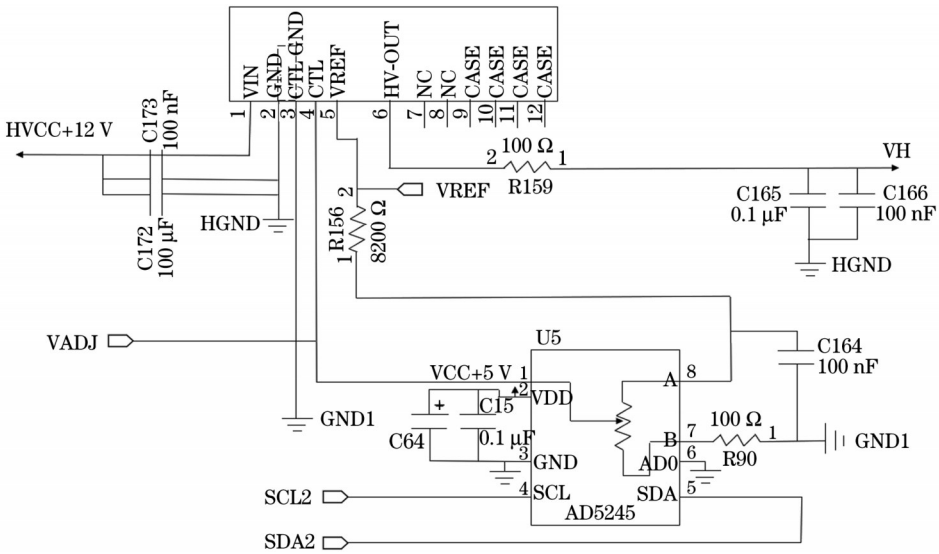

图 9 设计后的 APD 偏置电源

Fig. 9 APD bias power supply before design

4 实验数据处理与分析

为了更好地模拟舰船尾流在不同环境下的回波信号，分别设置了不同的水体浊度，在不同水质的室内水池、某大型消声水池及某湖泊进行实验。室内水池的长×宽×深为 18 mm×1 m×1 m，通过加入海盐、固体颗粒等模拟近海海水水质，进行距离检测实验。某大型消声水池的长×宽×深为 50 m×25 m×10 m，水池内长期存放水体，同时池壁四周铺设有消声橡胶，水质较浑浊，可模拟港口水质，进行气泡尺度回波检测实验。湖泊水质比较清澈，为国家一类水源地，可等效模拟远海海水水质，进行实际尾流场探测实验。三种水体的浊度如表 2 所示。在进行实验数据处理时，对不同接收增益下多组测量产生的激光后向散射回波信号的幅值求均值和最大值，依此表征 30 s 内气泡激光后向散射回波信号幅值的变化趋势。

表 2 不同实验环境下的水体参数

Table 2 Water body parameters of different water qualities

Experimental environment	Turbidity /NTU
Laboratory pool	0.65
Anechoic tank	7.46
Lake	0.09

4.1 室内实验室实验

实验中，将等效模拟的舰船尾流气泡置于距激光发射、接收装置 2～8 m 的位置进行探测，光电探测 APD 的增益分别为 10 dB、15 dB 和 17 dB，三种 APD 增益下的均值幅度与峰值幅度如图 10～12 所示。通过分析可以得出最基本的结论：不论接收增益为多大，气泡置于 3 m 时近场接收的回波信号相对最强，气泡置于 4 m 时远场接收的回波信号相对最强。另外，近场回波信号在 4 m 后基本保持不变，远场回波信号在 5 m 后基本保持不变。这一现象出现的原因是更远处的回波信号不在接收系统的视场范围内，近场信号接收系统的视场在水下不能超过 4 m，远场接收系统的视场在水下不能超过 5 m。信号的幅度呈先上升后下降的趋势，与仿真结果相符。

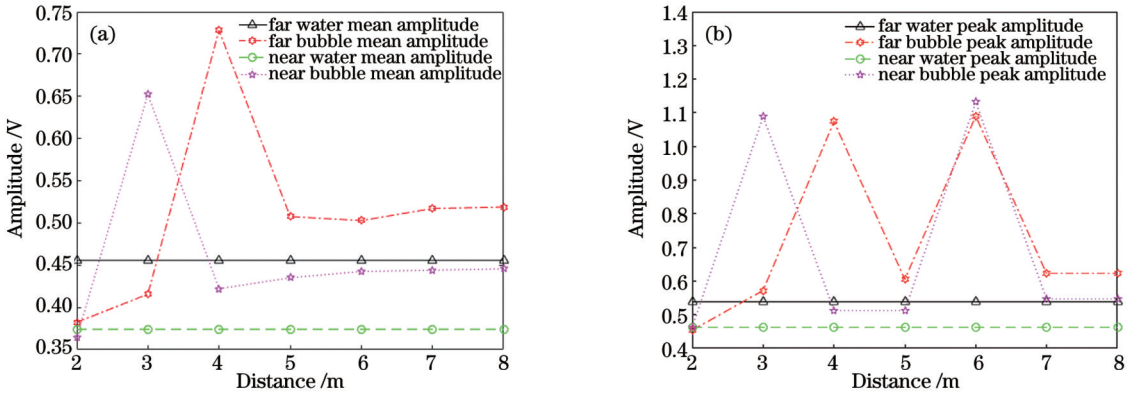

图 10 APD 接收增益为 10 dB 时尾流气泡的激光散射回波信号。(a)均值；(b)峰值

Fig. 10 Laser scattering echo signal of ship wake bubbles with 10 dB receiving gain. (a) Mean value; (b) peak value

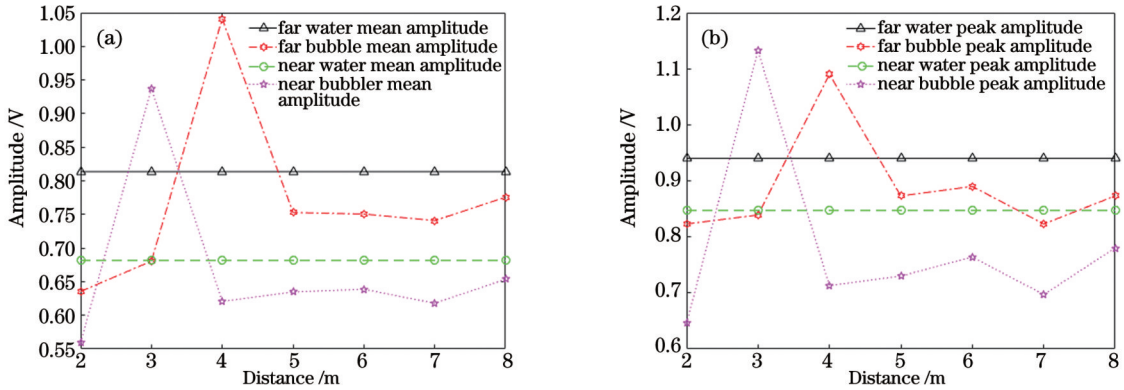

图 11 APD 接收增益为 15 dB 时尾流气泡的激光散射回波信号。(a)均值；(b)峰值

Fig. 11 Laser scattering echo signal of ship wake bubbles with 15 dB receiving gain. (a) Mean value; (b) peak value

水下存在气泡幕时气泡的回波信号与水体背景回波信号的幅度比随着距离的变化如图 13 所示，通过数据分析可以看出：对于远场激光接收通道，当气泡幕位于 4 m 位置时，气泡的激光后向回波信号具有最大的信噪比；对于近场激光接收通道，当气泡幕位于 3 m 位置时，气泡的激光后向回波信号具有最大的信噪比。当光电探测 APD 的增益设置为 10 dB 时，信号同比增幅是最大最明显的，适合用于水下微气泡激光探测实

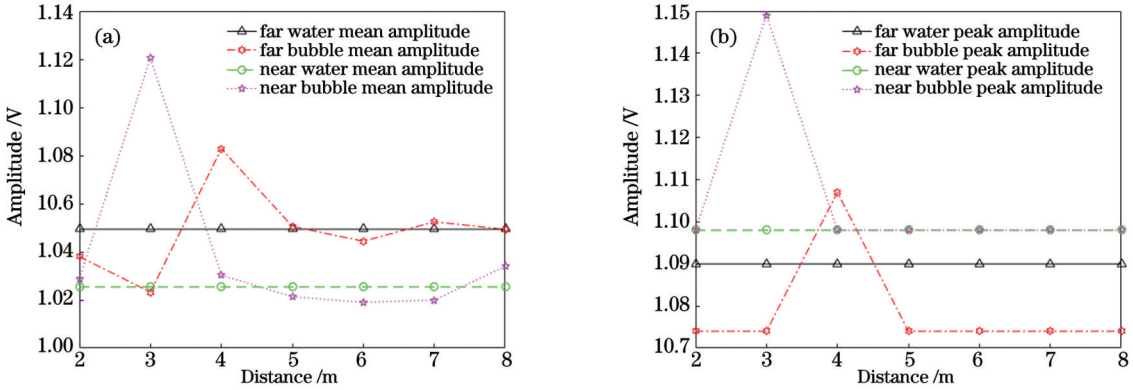

图 12 APD 接收增益为 17 dB 时尾流气泡的激光散射回波信号。(a)均值;(b)峰值

Fig. 12 Laser scattering echo signal of ship wake bubbles with 15 dB receiving gain. (a) Mean value; (b) peak value

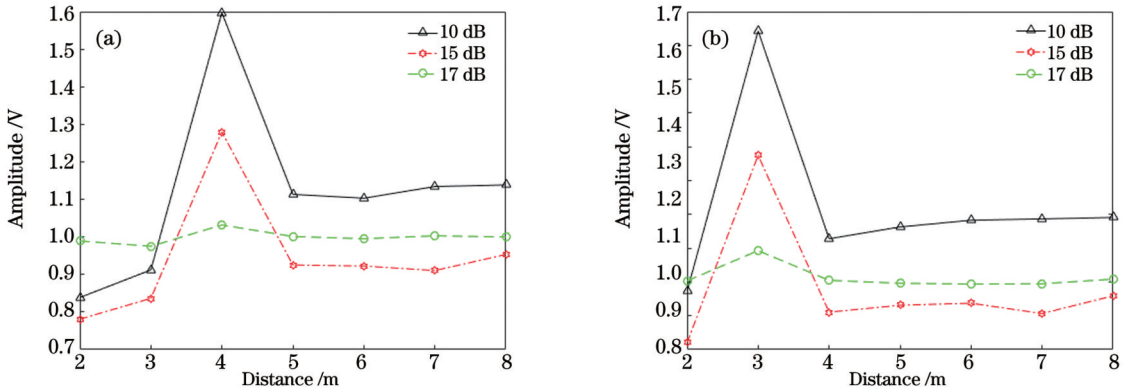

图 13 目标信号与水体背景信号的幅度比。(a)远场;(b)近场

Fig. 13 Amplitude ratio of target signal to water background signal. (a) Far field; (b) near field

验;当增益设置为 15 dB 时,信号同比增幅也有较大变化,但相比 10 dB 增益时的增幅较小;当增益设置为 17 dB 时,气泡的激光后向散射回波信号与水体背景回波信号的幅度比接近 100%,增益过大,水体背景信号与气泡回波信号同步增大导致信号饱和,接收到的气泡的激光后向散射回波信号与水体背景回波信号极为接近,信噪比增幅不明显。因此,对于舰船尾流气泡的激光探测而言,激光散射信号接收系统存在一个最优的增益设置,该增益在同等的光学系统参数下主要与水质有关。

4.2 消声水池实验

消声水池中的水质比较浑浊,测试时选择激光接收 APD 的增益为 15 dB。图 14 与图 15 分别是将直径分别为 100~300 μm 和 20~30 μm 的气泡放置于水体中产生的回波信号。将图 14(a)和图 15(a)进行平滑处理,可显示出回波信号的最大值与最小值。从图中可以观察到,背景信号未饱和,在水中放入气泡后,不论气泡的尺度如何,气泡的激光后向散射回波信号均

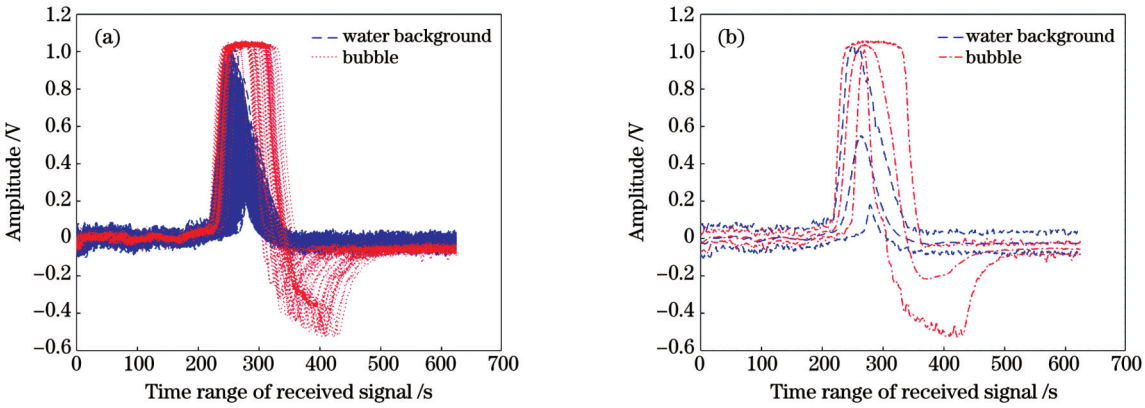

图 14 水体激光散射背景信号与大尺度气泡激光散射回波信号的对比。(a)原始信号;(b)平滑处理后的信号

Fig. 14 Comparison between water body laser scattering background signal and large-scale bubble laser scattering echo signal. (a) Original signal; (b) smoothed signal

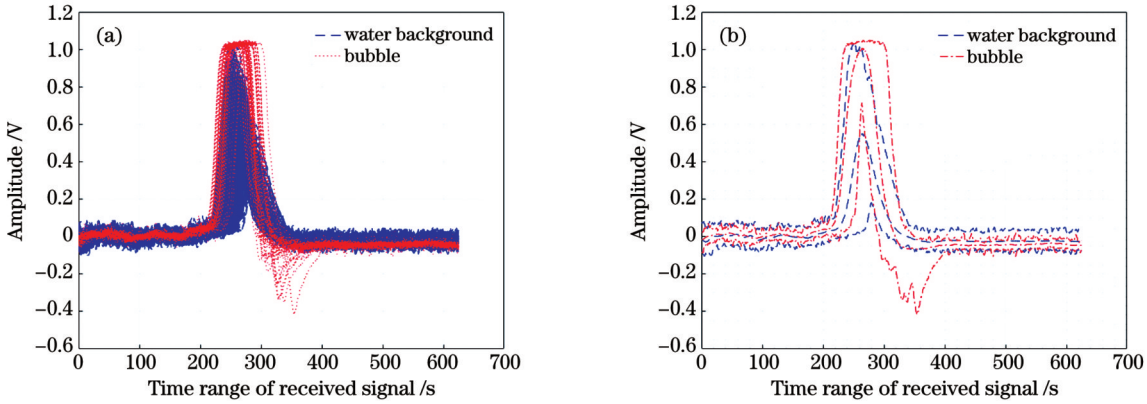

图 15 水体激光散射背景信号与小尺度气泡激光散射回波信号的对比。(a)原始信号;(b)平滑处理后的信号

Fig. 15 Comparison between water body laser scattering background signal and small-scale bubble laser scattering echo signal. (a) Original signal; (b) smoothed signal

达到了饱和状态,且放入大尺度气泡相比放入微小气泡的激光后向散射回波信号在时域上有一定程度的展宽,与仿真结果相符。

4.3 外场实验

外场实验在湖泊环境下进行,湖泊环境可等效模拟远海海水水质。外场测试时,激光接收 APD 的增益选择 27.5 dB。水体的激光散射背景信号与尾流的激光散射回波信号如图 16 所示。在外场测试中,当水中存在尾流时,真实舰船尾流的激光散射回波信号相对于水体背景的散射信号变化明显,但尾流的激光后向散射回波信号较背景信号明显减弱。外场测试结果与气泡数密度为 $10^9\ \mathrm{m}^{-3}$ 时气泡可加速水体对光子衰减的仿真结果一致。其原因有三:一是激光束向上发射到尾流气泡后,大部分光束被遮挡,导致到达水面的光束减少,丢失了部分水体的回波信号;二是真实船舶尾流气泡较实验室人工模拟尾流气泡稀疏,回波信号降低;三是真实的舰船尾流场存在涡流、湍流效应,会改变激光束的传输路径。

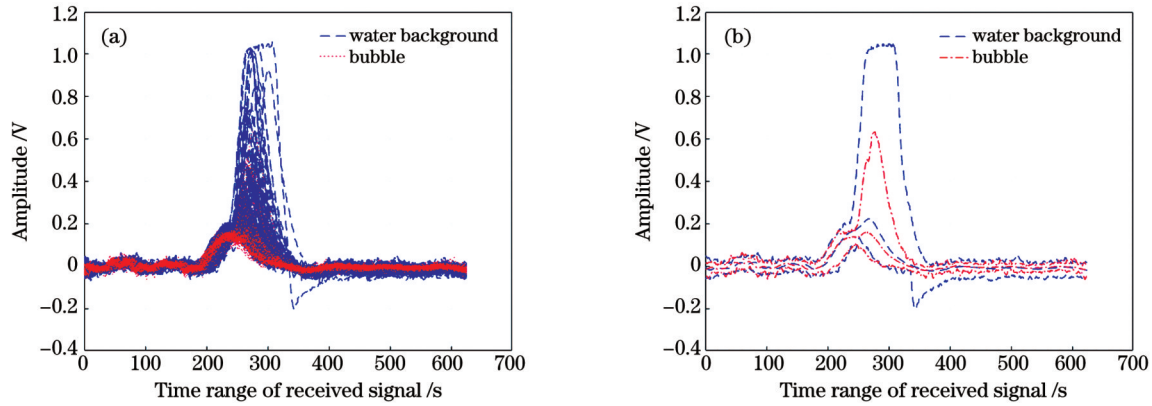

图 16 水体背景激光散射信号与尾流激光散射回波信号的对比。(a)原始信号;(b)平滑处理后的信号

Fig. 16 Comparison between water body background laser scattering signal and ship wake laser scattering echo signal. (a) Original signal; (b) smoothed signal

通过分析实验室室内水池、消声水池及外场湖泊环境下尾流气泡的激光后向散射数据可以看出,舰船尾流探测在室内和外场实验中均有比较明显的特征变化。

5 结 论

本文建立了舰船尾流气泡激光后向散射模型,通过蒙特卡罗仿真验证了不同水域、不同尺度气泡的激光后向散射特性,通过仿真分析得到以下结论:纯海水尾流气泡的激光后向散射回波幅度最强,港口海水的最弱;随着衰减系数增大,尾流气泡的激光后向散射回波幅度逐渐降低;随着距离增加,尾流气泡的激光后向回波逐渐后移,且幅度逐渐降低;在气泡数密度为 $10^9\ \mathrm{m}^{-3}$ 的条件下,随着气泡尺度增加,纯海水、清洁海水和沿岸海水的气泡回波幅度依次降低,港口海水则一直与水体信号保持一致;在港口海水环境下,气泡层厚度小于 1.8 m 时激光探测系统难以检测到气泡回波,气泡层厚度大于 1.8 m 时激光探测系统可以检测到气泡回波。

设计了可实现激光发射能量、激光 APD 接收增益间匹配调节的尾流气泡激光测试分析系统。开展了室内、湖泊环境下尾流气泡检测性能测试,测试结果显示:在实验室室内环境下,当增益为 10 dB 时,探测信噪比最高;在消声水池环境下,气泡回波较水体背景回波变化明显,可实现对直径为 20~30 μm 和 100~300 μm

的舰船尾流模拟气泡的有效探测;在湖泊环境下,气泡回波较水体背景回波变化也较为明显,可以实现对实际舰船尾流气泡的有效探测。本文为舰船尾流探测系统在不同水质环境下的工程应用提供了理论及数据支撑。

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): 0101001.
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): 0101001.

[2] 王向伟, 周田华, 陈卫标. 舰船尾流激光后向散射特性研究[J]. 光学学报, 2010, 30(1): 14-18.
Wang X W, Zhou T H, Chen W B. Study on laser backscattering properties by ship wakes[J]. Acta Optica Sinica, 2010, 30(1): 14-18.

[3] 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, 28(10): 1861-1866.
Shi S W, Wang J A, Jiang X Z, et al. Analysis of scattering phase function and backscattering signal characteristic of bubble films in ship wake[J]. Acta Optica Sinica, 2008, 28(10): 1861-1866.

[4] 王赟, 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 Z Z, et al. Laser Doppler method for the detection of wake bubbles[J]. Chinese Journal of Lasers, 2014, 41(8): 0813002.

[5] 赵卫疆, 苏丽萍, 任德明, 等. 尾流气泡激光散射的测量[J]. 中国激光, 2008, 35(5): 744-747.
Zhao W J, Su L P, Ren D M, et al. Measurement on the angular scattering properties of wake bubbles[J]. Chinese Journal of Lasers, 2008, 35(5): 744-747.

[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 H, Gao X C. Analysis of optical characteristics of ship wake and research on wake detection technology[J]. Ship Science and Technology, 2021, 43(24): 52-54.

[7] 张庆国, 刘竹青, 黄其培, 等. 舰船尾流气泡声学测试系统研究[J]. 声学技术, 2020, 39(6): 660-668.
Zhang Q G, Liu Z Q, Huang Q P, et al. Research on acoustic measurement system for ship wake bubbles[J]. Technical Acoustics, 2020, 39(6): 660-668.

[8] 刘文鹏. 典型水文条件对气泡运动的影响规律研究[J]. 海洋技术学报, 2021, 40(3): 58-66.
Liu W P. Study on the influence of typical hydrological conditions to bubble motion[J]. Journal of Ocean Technology, 2021, 40(3): 58-66.

[9] 王明军, 王宇航, 陈丹, 等. 二维动态海面-气泡层中蓝绿激光的透射特性[J]. 光学学报, 2022, 42(2): 0214001.
Wang M J, Wang Y H, Chen D, et al. Transmission characteristics of blue-green laser through two-dimensional dynamic sea surface-bubble layer[J]. Acta Optica Sinica, 2022, 42(2): 0214001.

[10] 梁秀满, 刘文涛, 牛福生, 等. 基于机器视觉的浮选气泡体积和表面积测量研究[J]. 光学学报, 2018, 38(12): 1215009.
Liang X M, Liu W T, Niu F S, et al. Research on measurement of volume and surface area of flotation bubbles based on machine vision[J]. Acta Optica Sinica, 2018, 38(12): 1215009.

[11] 叶得前. 航迹尾流的散射光偏振探测及特性研究[D]. 长春: 长春理工大学, 2020.
Ye D Q. Polarization detection and characteristics of scattered light in track wake[D]. Changchun: Changchun University of Science and Technology, 2020.

[12] 吕金光, 梁静秋, 王维彪, 等. 快照傅里叶变换成像光谱仪阵列非均匀特性的 Monte Carlo 分析[J]. 光学学报, 2021, 41(24): 2430001.
Lü J G, Liang J Q, Wang W B, et al. Monte Carlo analysis of array non-uniformity in snapshot Fourier transform imaging spectrometer[J]. Acta Optica Sinica, 2021, 41(24): 2430001.

[13] 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 G, Yuan Z 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.

[14] 张冲, 袁志勇, 张锐, 等. 舰船尾流气泡检测系统设计[J]. 兵器装备工程学报, 2017, 38(8): 45-49.
Zhang C, Yuan Z Y, Zhang R, et al. Design of detect system for ship wake bubble[J]. Journal of Ordnance Equipment Engineering, 2017, 38(8): 45-49.

[15] Li S M, Zhang A M, Liu N N. Effect of a rigid structure on the dynamics of a bubble beneath the free surface[J]. Theoretical and Applied Mechanics Letters, 2021, 11(6): 100311.

[16] 董渊, 王頔, 魏智, 等. 长脉冲激光辐照 Si-APD 温度演化过程的数值模拟与实验研究[J]. 光学学报, 2018, 38(5): 0514005.
Dong Y, Wang D, Wei Z, et al. Numerical simulation and experimental study of temperature evolution of Si-APD irradiated by long-pulse laser[J]. Acta Optica Sinica, 2018, 38(5): 0514005.

Laser Detection Simulation and Experiment of Multiscale Complex Water Wake Bubble

Zong Siguang*, Zhang Xin, Liang Shanyong, Cao Jing

College of Electronic Engineering, Naval University of Engineering, Wuhan 430034, *Hubei, China*

Abstract

Objective Ship wake is the disturbance of water flow caused by the propeller when the ship is sailing, drawing air into the water to form bubbles. In addition, the cavitation of the propeller itself also generates a large number of bubbles around the propeller, creating a wake belt full of bubbles in the stern of the ship. The optical characteristics of the wake differ from those of the surrounding water environment. By studying the laser characteristics of the ship wake, we can further judge the characteristics of the ship's trajectory and speed in the sea and then realize the precise guidance and damage attack of underwater vehicles such as torpedoes. The bubbles in the ship wake have the characteristics of sparsity, discreteness, small scale, and low numerical density. The scale and number density are related to the ship speed, propeller speed, and distance from the measurement area to the ship. The laser detection method of ship wake must have the ability to sense bubbles with a large dynamic diameter range of 10–1000 μm, and it must adapt to different water

environments.

Methods In this study, the Monte Carlo simulation method is used to simulate the backscattering of wake bubbles with diameter of 40–500 μm in pure seawater, clean seawater, coastal seawater, and port seawater. To address strong water scattering interference in close range and low signal-to-noise ratio of weak signal detection in underwater laser wake detection, an anti-saturation and gain control signal processing method is studied. By adjusting the bias voltage to change the photocurrent gain of the avalanche photodiode, the APD (avalanche photo diode) gain can be controlled. An underwater microbubble laser measurement and analysis system that can suppress the strong scattering interference of near-field water is designed, and the matching adjustment between the APD receiving gain and the signal strength under different water environments can be realized.

Results and Discussions The backscattering law of wake bubbles in different seawater qualities is investigated. The echo amplitude of laser backscattering of wake bubbles in pure seawater is the strongest, and the amplitude of laser backscattering echo of port seawater is the weakest. With the increase in the water quality attenuation coefficient, the laser backscattering echo amplitude of wake bubbles gradually decreases (Fig. 3). With the increase in the distance, the backward laser echo of wake bubble gradually moves backward, and the amplitude gradually decreases (Fig. 5). When the bubble number density is below 10^9 m^{-3}, the bubble echo amplitudes of pure, clean, and coastal seawater decrease with the increase in the bubble size. In the port seawater environment, the backward echo of bubbles always maintains consistency with the water signal. In the port seawater environment, when the bubble layer thickness is less than 1.8 m, the laser detection system faces difficulty in detecting the bubble echo. When the bubble layer thickness is greater than 1.8 m, the laser detection system can detect the bubble echo (Fig. 6). By designing an underwater micro bubble laser test and analysis system that can suppress the strong scattering interference of near-field water body, the detection of large-scale wake bubbles in different water environments can be realized (Figs. 10, 14, 15, 16).

Conclusions The simulation results show that the echo amplitude of laser backscattering of wake bubbles in pure seawater is the strongest and the amplitude of laser backscattering echo in port seawater is the weakest. With the increase in the water quality attenuation coefficient, the laser backscattering echo amplitude of wake bubbles decreases gradually. With the increase in the distance, the laser backscattering echo delay of wake bubbles increases and the amplitude decreases gradually. When the bubble number density is below 10^9 m^{-3}, with the increase in the bubble size, the bubble echo amplitude of pure, clean, and coastal seawater decreases in order, and the echo amplitude of port seawater maintains consistency with the water signal. In the port seawater environment, the laser detection system faces difficulty in detecting the bubble echo when the bubble layer thickness is less than 1.8 m, while the system can detect the bubble echo when the thickness is greater than 1.8 m. In the indoor laboratory environment, when the APD gain is 10 dB, the detection signal-to-noise ratio is the highest. In the anechoic pool environment, the bubble echo changes more evidently than the water background echo, effectively detecting the simulated bubbles with diameter of 20–30 μm and 100–300 μm. In the lake environment, the bubble echo changes more evidently than the water background echo, effectively detecting the bubbles in the wake of actual ships.

Key words oceanic optics; ship wake; Monte Carlo; backscattering; simulation research; experimental study