

文章编号:1001-5078(2007)11-1153-03

水体散射对气泡后向光散射特性的影响

马治国^{1,2}, 王江安¹, 蒋兴舟²

(1. 海军工程大学电子工程学院, 湖北 武汉 430033; 2. 海军工程大学兵器工程系, 湖北 武汉 430033)

摘要:采用 Lambert-Beer 定律对水中气泡前向、后向散射激光功率进行了理论推导, 得出了接收信号信噪比的计算公式。采用光学遮挡的方法对近距离水体后向光散射信号进行屏蔽, 采用激光功率计对后向光散射信号进行测量。结果表明, 近距离水体后向光散射对气泡的后向光散射影响显著, 对近距离水体的后向光散射信号进行抑制, 可以显著提高接收信号的信噪比。

关键词: 气泡; 光散射; 光功率; 信噪比

中图分类号: TN216 **文献标识码:** A

Effect of Water Scattering on Light Backscattering Properties of Bubbles

MA Zhi-guo^{1,2}, WANG Jiang-an¹, JIANG Xing-zhou²

(1. College of electronic Engineering, Naval University of Engineering, Wuhan 430033, China;

2. Department of Weaponry Engineering, Naval University of Engineering, Wuhan 430033, China)

Abstract: The power of light forward and backward scattered by bubbles in water was predicted by the Lambert-Beer law, and the formula of SNR was deduced. The light backward scattered by water at close quarters was shielded by optical shelter and the power of backward scattered light was measured by a laser power meter. The results show that the effect of water scattering on light backscattering properties of bubbles is obvious, and SNR of received signals will be improved if the light backscattered from water at close quarters is restrained.

Key words: bubble; light scattering; light power; SNR

1 引言

舰船在航行过程中产生了大量的气泡, 并在很长时间内存在^[1]。由于气泡的存在, 海水的光学特性与无气泡时会有显著的区别。这就为通过测量激光在水下的传输特性来探测和跟踪舰船提供了可能。近年来, 气泡的光散射特性逐渐成为一个研究重点, 众多学者对此进行了研究^[2-5]。

对于气泡尾流激光探测系统来说, 气泡尾流的后向散射光信号是有用信号。除此之外, 系统还会接收到环境背景光信号以及水体后向散射光信号。这里, 环境背景光信号主要来自太阳辐射, 这种干扰可以利用太阳辐射与激光之间光谱分布的不同来加以抑制。而水体后向散射光信号主要来自于水分

子、水中杂质对激光的散射, 这与气泡对激光的散射都属于微小粒子的光散射, 其本质并没有多大区别^[6]。尤其是近距离水体后向光散射信号较强, 对气泡的后向光散射信号造成了干扰, 给尾流气泡的探测带来了极大的困难。本文从理论和实验上对水体散射对气泡后向光散射的影响进行了研究。

2 理论分析

如图1所示, 激光在水中传播距离 L_1 后进入厚度为 l 的气泡幕, 采用光电探测器对前向、后向散射光信号分别进行接收。

作者简介: 马治国 (1978 -), 男, 博士研究生, 主要研究方向为激光水下目标探测。E-mail: madaoh@163.com

收稿日期: 2007-05-31

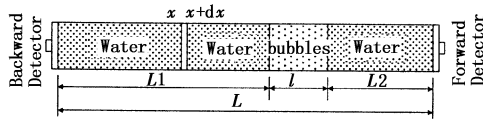


图1 水体散射对气泡散射的影响

Fig.1 effect of water on light scattering of bubbles

设激光器发射的光功率为 P_0 , 水体的衰减系数为 α , 体积散射函数为 β , 气泡幕的衰减系数为 α' , 体积散射函数为 β' 。又设在没有气泡的情况下前向和后向散射光功率分别为 P_f, P_b , 而在有气泡时分别为 P'_f, P'_b 。

由 Lambert-Beer 定律, 前向散射接收器接收到的光功率为:

$$P_f = P_0 e^{-\alpha L} \quad (1)$$

$$P'_f = P_0 e^{-\alpha(L_1+L_2) - \alpha' l} \quad (2)$$

取水体中的小体积元 $x \sim x + dx$, 可推导得到无气泡幕时后向散射接收器接收到的光功率为^[6]:

$$P_b = \int_0^L \beta P_0 e^{-2\alpha x} dx = \frac{\beta(1 - e^{-2\alpha L})}{2\alpha} P_0 \quad (3)$$

当对近距离水体散射进行屏蔽时(设屏蔽长度为 L_3), 后向散射接收器接收到的光功率为:

$$P_b = \frac{\beta(e^{-2\alpha L_3} - e^{-2\alpha L})}{2\alpha} P_0 \quad (3')$$

当有气泡幕存在时, 后向散射接收器接收到的光功率包括三部分: 气泡幕后向散射光功率 P_1 以及气泡前、后水体后向散射光功率 P_2, P_3 , 其中:

$$P_1 = \frac{\beta' e^{-2\alpha l_1} (1 - e^{-2\alpha' l})}{2\alpha'} P_0$$

$$P_2 = \frac{\beta(1 - e^{-2\alpha l_1})}{2\alpha} P_0$$

$$P_3 = \frac{\beta e^{-2(\alpha l_1 + \alpha' l)} \cdot (1 - e^{-2\alpha l_2})}{2\alpha} P_0$$

所以:

$$P'_b = P_1 + P_2 + P_3 = \frac{\beta' e^{-2\alpha l_1} (1 - e^{-2\alpha' l})}{2\alpha'} P_0 + \frac{\beta(1 - e^{-2\alpha l_1})}{2\alpha} P_0 + \frac{\beta e^{-2(\alpha l_1 + \alpha' l)} \cdot (1 - e^{-2\alpha l_2})}{2\alpha} P_0 \quad (4)$$

当对近距离水体散射进行屏蔽时, 后向散射接收器接收到的光功率为:

$$P'_b = \frac{\beta' e^{-2\alpha l_1} (1 - e^{-2\alpha' l})}{2\alpha'} P_0 + \frac{\beta(e^{-2\alpha L_3} - e^{-2\alpha l_1})}{2\alpha} P_0 + \frac{\beta e^{-2(\alpha l_1 + \alpha' l)} \cdot (1 - e^{-2\alpha l_2})}{2\alpha} P_0 \quad (4')$$

不考虑环境背景光信号的干扰, 则后向散射测量时的信噪比为:

$$\text{SNR}_b = \frac{P_1}{P_2 + P_3} = \frac{\alpha'}{\alpha} \cdot \frac{\beta'}{\beta} \cdot \frac{e^{-2\alpha l_1} (1 - e^{-2\alpha' l})}{(1 - e^{-2\alpha l_1}) + e^{-2(\alpha l_1 + \alpha' l)} \cdot (1 - e^{-2\alpha l_2})} \quad (5)$$

3 实验研究

3.1 实验装置

实验系统如图2所示, 由光源、气泡发生器以及激光功率计组成。其中, 光源使用的是输出功率为 100mW、波长为 532nm 的半导体激光器。采用激光功率计对气泡幕的散射光功率进行测量, 激光功率计探头面积为 1.0cm^2 , 精度为 1pW, 其光轴与激光器光轴基本平行, 相距 10cm。

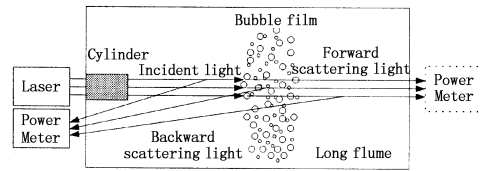


图2 测量装置示意图

Fig.2 sketch map of the measurement system

实验在自制 7m 长玻璃水槽内进行, 其宽和高分别为 1m 和 0.5m。水槽内侧和底部以黑纸覆盖, 以消除水槽各表面反射光对测量结果的影响。另外, 由于后向散射光信号较弱, 容易受到外界环境的影响, 因此, 实验是在黑暗环境下进行的。

为考察近距离水体散射对气泡后向光散射的影响, 采用光学遮挡的方法对近距离水体的后向光散射信号进行屏蔽。发射的激光束穿过一定长度的圆筒后再向气泡方向传播, 这样, 圆筒就挡住了一定距离内水体的后向散射光信号。圆筒的直径为 16cm, 其长度为 0.5 ~ 2.5m, 间隔 0.5m。

3.2 实验结果及分析

3.2.1 参数的测定

在不采用光学屏蔽的情况下, 采用激光功率计分别对前向、后向散射光功率进行测量。气泡幕厚度为 20cm, 位于 3m 处, 此时测得: $P_f = 3.29\text{mW}$, $P'_f = 2.05\text{mW}$, $P_b = 17.99\text{nW}$, $P'_b = 23.17\text{nW}$ 。

联立方程(1) ~ (4), 可以解得: $\alpha = 0.49$, $\alpha' = 2.85$, $\beta = 0.18 \times 10^{-6}$, $\beta' = 7.53 \times 10^{-6}$ 。

3.2.2 气泡后向光散射功率的测量

在无气泡与有气泡(距离为 3m)两种情况下, 采用不同长度的遮光筒对近距离的水体后向光散射进行屏蔽, 所测得的后向散射光功率如图3、图4所示。

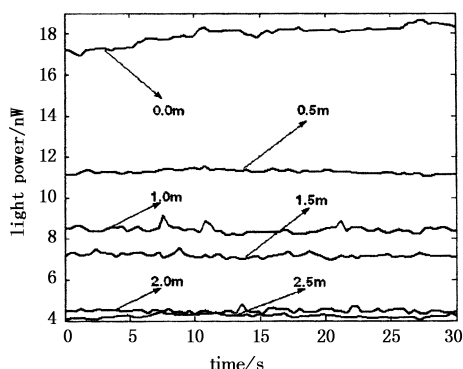


图3 无气泡时后向散射光功率的变化

Fig.3 light power of light scattered from bubbles

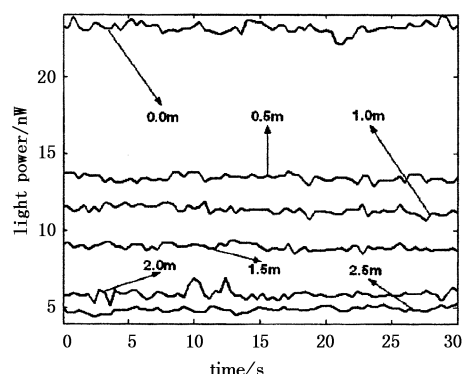


图4 有气泡时后向散射光功率的变化

Fig.4 light power of light scattered from bubbles

3.2.3 计算与分析

测量过程中,由于气泡的随机运动,气泡在空间和时间上的分布是随机的,导致后向散射光信号随时间的起伏。为减少这一影响,对30s内的90个测量值进行平均,作为相应条件下的后向散射光功率。另外,利用测得的参数 $\alpha, \alpha', \beta, \beta'$,在无气泡幕时采用式(3')对后向散射光功率进行计算;在有气泡幕存在时,采用式(4')对后向散射光功率进行计算,其结果如图5所示。

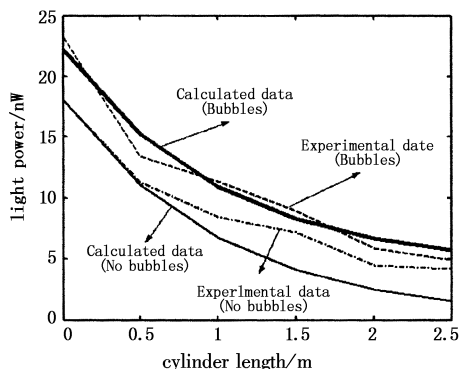


图5 后向散射光功率随遮光长度的变化

Fig.5 light power vs. cylinder length

从图5可以看出,随着遮光长度0~2.5m逐渐加长,后向散射光功率逐渐减弱:当没有气泡幕时,其值从17.99nW下降到4.23nW;当有气泡幕时,其

值从23.18nW下降到4.94nW。另外,测量值与理论计算值相比,在没有气泡幕的情况下,当遮光长度较小时,测量值与计算值非常吻合,而当遮光长度较长时,误差较大,测量值明显要大于理论计算值;在有气泡存在的情况下,测量值和计算值非常吻合,误差非常小。

采用测得的有关参数,由式(5)对采用不同长度遮光筒时后向散射光信号的信噪比进行计算,其结果如图6所示。从中可以看出,对于3m处的气泡幕,当没有对水体后向散射光信号进行抑制时,后向散射光功率为23.18nW,信噪比为1.2,当采用2.5m长的遮光筒时,后向散射光功率为4.94nW,此时信噪比为3.7,提高了3.1倍。因此,采用光学遮挡方法对近距离水体散射光信号进行抑制后,虽然后向散射信号有很大程度的衰减,但信噪比有了显著的提高,屏蔽的距离越长,信噪比提高越显著,越有利于信号的接收和气泡尾流的探测。

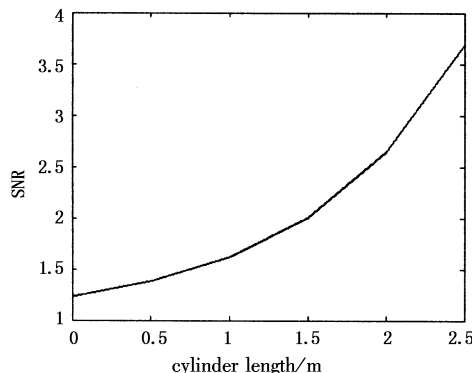


图6 信噪比随遮光长度的变化

Fig.6 SNR vs. cylinder length

3.2.4 误差分析

有多种因素会对测量结果造成影响。水槽壁面尤其是前后两个壁面对光都有一定程度的反射作用,从而造成测量误差。后壁面反射的光会再次返回接收器,造成测量值的偏大。气泡的产生会导致水体的流动,带动水底杂质上浮,从而导致水体衰减系数以及体积散射函数的增大。

另外,采用圆筒对近距离水体散射光信号进行屏蔽,也会带来一定的影响。如图7所示,在遮光筒长度为 L_3 的情况下,由于遮光筒具有一定的直径 D ,而激光功率计与激光器之间有一定的距离 d ,因此,实际上被遮挡的距离 $L_4 = \frac{d}{d - D/2} L_3 > L_3$ 。由式(3')可以知道,随着遮光长度 L_3 的增大,后向散射信号光功率 P_b 会减小。因此,遮光筒的使用会造成测量值偏小。

(下转第1167页)

条件不变时腔长与脉冲宽度的关系。图3模拟计算得到了当设计输出能量为150mJ,激光器腔长为45cm,其他条件不变时激光晶体直径与脉冲宽度的关系。

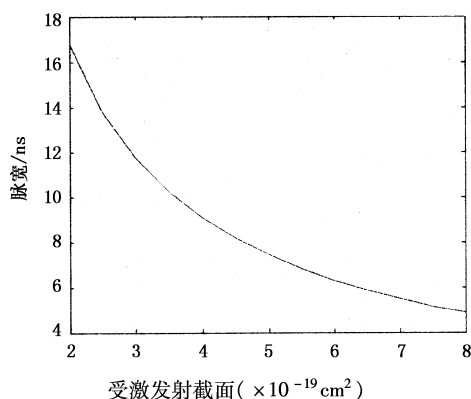


图1 受激发射截面与脉冲宽度的关系

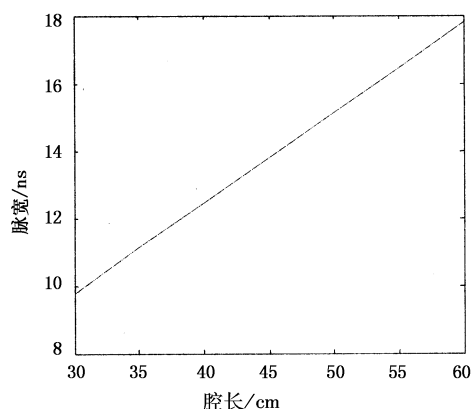


图2 其他条件不变时腔长与脉冲宽度的关系

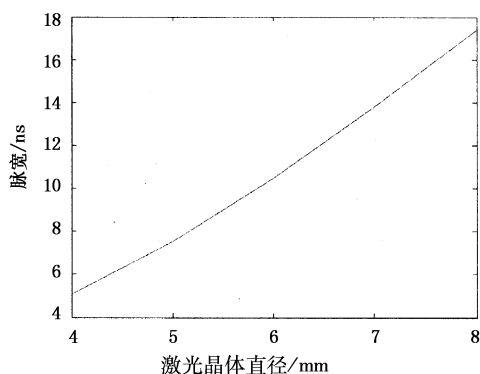


图3 其他条件不变时激光晶体直径与脉冲宽度的关系

4 结论

本文主要从与空间相关的速率方程出发,给出了速率方程解的过程,同时根据 Degnan 推导的优化Q开关激光器运转的解析解,求出了二极管泵浦激光器脉冲宽度与激光晶体的直径、受激发射截面、腔长之间的关系。此法计算过程简单,大大简化了激光器的设计;得到了腔长,晶体直径等等对激光脉冲的影响趋势。其计算结果与实际情况基本相符,对激光器参数的设计具有参考作用。

参考文献:

- [1] W 克希耐尔. 固体激光工程[M]. 孙文,等译. 北京:科学出版社,2002.
- [2] John J Degnan. Theory of the optimally coupled Q-switched laser. [J]. IEEE J,1989, QE-25:214.

(上接第1155页)

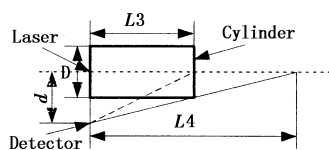


图7 遮光筒对测量结果的影响
Fig.7 effect of the cylinder

4 结论

在气泡尾流激光探测系统中,水体后向散射光信号较强,而气泡后向光散射信号较弱,因此,水体散射对气泡的后向光散射影响显著。对近距离水体的后向光散射信号进行抑制,可以显著提高接收信号的信噪比,从而有利于气泡尾流的探测。

参考文献:

- [1] Pereira F, Gharib M, Dabiri D, et al. Instantaneous whole

field measurement of velocity and size of air microbubbles [C]//Tenth International Symposium on Application of Laser Techniques to Fluid Mechanics, Portugal, 2000, 38 (4): 1-11.

- [2] Zhang Xiaodong, Marlon Lewis. The volume scattering function of natural bubble populations[J]. Limnology & Oceanography, 2002, 47(5): 1273-1282.
- [3] Zhang Xiaodong, Marlon Lewis, Bruce Johnson. Influence of bubbles on scattering of light in the ocean[J]. Applied Optics, 1998, 37(27): 6525-6536.
- [4] Alexander A Kokhanovsky. Optical properties of bubbles [J]. Journal of Optics A, 2003, 5: 47-52.
- [5] Alexander A Kokhanovsky. Single light scattering: bubbles versus droplets [J]. American Journal of Physics, 2004, 72(2): 258-263.
- [6] 刘继芳, 雷卫宁, 冀邦杰. 光检测尾流特征中抑制背景干扰的方法[J]. 鱼雷技术, 2007, 15(2): 24-27.