

文章编号: 0258-7025(2008)05-0744-04

# 尾流气泡激光散射的测量

赵卫疆<sup>1</sup> 苏丽萍<sup>2</sup> 任德明<sup>1</sup> 曲彦臣<sup>1</sup> 胡孝勇<sup>1</sup>

(<sup>1</sup> 哈尔滨工业大学可调谐激光技术国家级重点实验室, 黑龙江 哈尔滨 150080)  
<sup>2</sup> 哈尔滨工程大学理学院, 黑龙江 哈尔滨 150001

**摘要** 采用收发分置的光学结构实现了尾流气泡对 532 nm 激光在散射角  $5^\circ \sim 175^\circ$  内的散射测量, 同时测量了水的激光散射。散射角度的改变是通过发射系统不动而转动接收系统来实现的。解决了散射信号大动态范围的压缩问题, 讨论了接收视场内散射体积随散射角的变化。分析了气泡散射的信号特征, 并提出了气泡散射信号的功率谱密度处理法。将实验结果与米氏理论结果进行了对比, 发现尾流气泡的激光散射强度及其随散射角的变化趋势与米氏理论结果吻合得很好, 与水的散射相差近一个数量级。研究结果表明利用激光可以将气泡和水的散射区别开, 即利用激光探测尾流气泡的存在具有可行性。

**关键词** 激光技术; 尾流; 气泡散射; 收发分置; 功率谱密度

**中图分类号** TN 959.1<sup>+</sup>7 **文献标识码** A

## Measurement on the Angular Scattering Properties of Wake Bubbles

Zhao Weijiang<sup>1</sup> Su Liping<sup>2</sup> Ren Deming<sup>1</sup> Qu Yanchen<sup>1</sup> Hu Xiaoyong<sup>1</sup>

(<sup>1</sup> State Key Laboratory of Tunable Laser Technology, Harbin Institute of Technology, Harbin, Heilongjiang 150080, China)  
<sup>2</sup> College of Science, Harbin Engineering University, Harbin, Heilongjiang 150001, China

**Abstract** Laser scattering by bubbles over a range of scattering angles from  $5^\circ$  to  $175^\circ$  is achieved using the bistatic optical geometry. In the meantime, laser scattering by water is measured. The scattering angle is changed by moving the receiving system on the condition that the transmitting system is fixed. The compress of the large dynamic range for the bubble scattering signal is solved and the change of the scattering volume with scattering angles in the receiver's field of view is discussed. Then, the characteristics of the bubble scattering signal are analyzed and the power spectral density estimation method is put forward to process this signal. The experimentally measured and theoretically calculated results are compared, which show that both results are agreed and bubble scattering is about one order of magnitude higher than water scattering without bubbles. Results indicate that bubble scattering can be distinguished from water scattering, and thus bubbles can be detected by laser.

**Key words** laser technique; wake; bubble scattering; bistatic; power spectral density

## 1 引 言

最近, 光尾流自导鱼雷引起了人们的广泛关注, 其基本原理是利用目标尾流气泡与非尾流海水的激光散射特性的差异来识别尾流, 并据此判断目标尾流的相对位置。可见, 尾流气泡光散射特性<sup>[1~7]</sup>是激光探测跟踪鱼群或舰船技术的基础。具有代表性的是加拿大达尔豪西大学进行的对自然水域内气泡群在散射角  $10^\circ \sim 170^\circ$  范围内体散射函数的测量<sup>[1]</sup>。国内中国科学院西安光机所、海军工程大学、大连测控技术研究所和西安电子科技大学等单位也初步开展了这方面的工作, 但他们的研究主要集中在前向

小角度(小于  $1.5^\circ$ ) 散射<sup>[3]</sup> 和对  $180^\circ$  后向散射方面<sup>[4,5]</sup>, 均没有涉及气泡对激光角散射特性的系统测量。本文利用收发分置的光学结构测量了尾流气泡在  $5^\circ \sim 175^\circ$  内的角散射, 解决了测量过程中遇到的一些问题, 同时提出检测气泡散射信号的功率谱密度估计法, 为寻找探测水下目标的方法提供了实验基础和技术支持<sup>[8]</sup>。

## 2 实 验

### 2.1 实验装置

图 1 是利用收发分置的光学结构测量散射角在

收稿日期: 2007-08-30; 收到修改稿日期: 2007-11-08

作者简介: 赵卫疆(1971—), 男, 黑龙江人, 副教授, 博士, 主要从事激光技术及应用方面的研究。E-mail: zhaoweijiang@sohu.com

5°~175°较宽范围内尾流气泡散射的实验装置图。收发分置是指信号光接收平台和激光发射平台彼此分开。探测目标是在实验室条件下利用自制的直径 46 mm 两叶螺旋桨(如图 2 所示)及其驱动系统<sup>[9]</sup>生成的模拟尾流,尾流内含有大量气泡。螺旋桨位于  $P$  点,水流方向沿水箱长度方向,如箭头所示,实验中具体的探测点为  $O$  点。散射角度的改变是通过发

射系统不动而旋转接收系统来实现的。实验分为四个部分:当发射系统在实方框所示的位置 1 时,聚焦透镜分别沿着两个半径为  $r_1$  的四分之一圆弧移动完成 5°~45°和 135°~175°的散射测量;然后将发射系统移到虚线框所示的位置 2,聚焦透镜仍然沿着这两个四分之一圆弧移动完成 45°~90°和 90°~135°的散射测量。

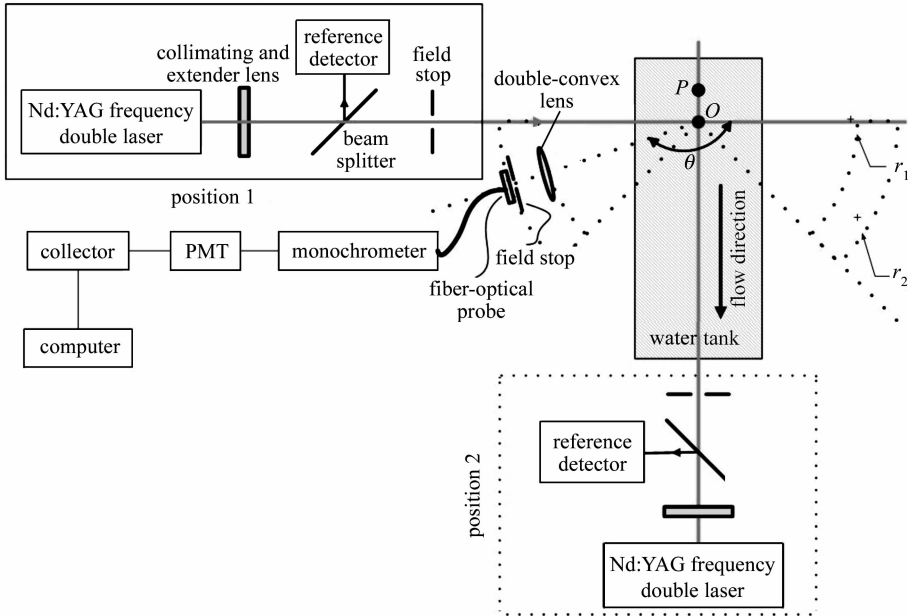


图 1 利用收发分置光学结构测量散射角 5°~175°内气泡散射强度的实验装置(俯视)  
Fig. 1 Experimental setup for measuring bubble scattering intensity from 5° to 175° using the bistatic optical geometry (top view)



图 2 直径 46 mm 两叶螺旋桨  
Fig. 2 Propeller with a diameter of 46 mm

Nd:YAG 倍频激光器输出 50 mW 连续单纵模线偏振光,准直扩束镜将激光束宽度扩大到 5 mm,光束发散角缩小为 0.026°。然后入射光经透射率为 65%的分光镜变为两束,反射光进入参考探测器,用以监控激光功率的变化,透射光则照射到水中的气泡上。在  $\theta$  散射方向上,距离探测点  $r_1$  的位置上放置一双凸透镜,用以搜集会聚  $\theta$  方向上的散射光。光纤探头前的小孔光阑孔径大约为 0.5 mm,起到了空间滤波的作用。

### 2.2 散射体积的修正

在接收系统旋转过程中,接收视场内散射体积随散射角发生了复杂的变化,这将影响气泡角散射特性的测量精度。图 3 为收发分置光学结构的示意图。假设探测点  $O$  始终为散射体积的中心,即聚焦透镜运动轨迹的中心;  $r_1$  为聚焦透镜运动轨迹的半径,  $s'$  为光纤头到聚焦透镜的垂直距离,光纤头的运动轨迹的半径为  $r_1 + s'$ ;  $\beta$  为接收系统的视场角;  $D$  为激光束宽度。

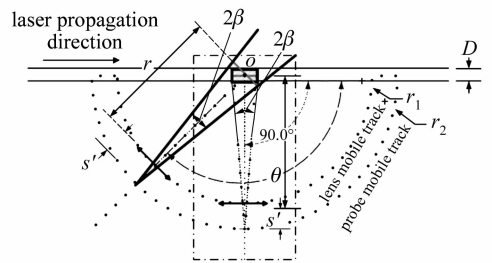


图 3 收发分置光学结构的示意图  
Fig. 3 Bistatic optical geometry

散射角  $\theta = 90^\circ$  时的散射体积可表示为

$$V(90^\circ) = 2(r_1 + s') \tan \beta (\pi D^2 / 4), \quad (1)$$

经过复杂的几何推导,其他散射角时的散射体积为

$$V(\theta) = V(90^\circ) \cdot \frac{\sin \theta \cos^2 \beta}{\sin^2 \theta - \sin^2 \beta}, \quad (2)$$

当  $\beta$  很小,且  $\theta \gg \beta$  时,  $\cos^2 \beta \approx 1$ ,  $\sin^2 \beta \approx 0$ , (2) 式可以简化为

$$V(\theta) \simeq \frac{V(90^\circ)}{\sin \theta}, \quad (3)$$

这一结论与 Lee 等给出的一致<sup>[10]</sup>。一般情况下,接收系统的视场角  $\beta$  在几度到十几度范围内,所以散射角位于  $30^\circ \sim 150^\circ$  范围内时,可以利用(3)式来近似地进行散射体积的修正。从(2)式可以看出,对于散射测量系统,尽可能地降低接收系统的视场角,这样散射体积的变化就仅仅受散射角自身的影响,波动很小,散射强度的测量精度就会提高。

### 2.3 信号大动态范围的压缩

气泡群的散射回波信号不仅光强微弱,而且动态范围很大,一般可达到  $10^5 \sim 10^6$ 。这样大的动态范围与现有的测量、数据存储和处理设备所能接受的动态范围( $10^2 \sim 10^3$ )不匹配,所以必须对散射信号进行预处理,压缩其动态范围以满足后续设备的需要。在实验中通过改变光电倍增管(PMT)电流增益的方法来解决大动态范围的压缩问题。光电倍增管的电流增益与电压成对数关系。根据采集卡的可编程范围和信号的强弱,对光电倍增管的电压进行调整,可以达到控制电流增益的目的,使得弱信号时增益高,强信号时增益低,从而将大动态范围的光信号压缩为可被后续设备接受的电信号。光、电信号以及电压和电流增益之间的关系为

$$P_s = \frac{u_L}{MS_k R_L} = \frac{u_L}{KU^\alpha S_k R_L}, \quad (4)$$

式中  $P_s$  为气泡散射光功率,  $u_L$  为阳极输出电压,  $R_L$  为光电倍增管的负载电阻,  $S_k$  为阴极辐照灵敏度,  $M$  为增益系数,  $U$  为光电倍增管的输入电压,  $\alpha$  为由倍增管材料及其几何结构决定的系数,  $n$  为倍增管个数,  $K$  是与  $n$  和  $\alpha$  有关的常数<sup>[11]</sup>。根据(4)式可以将不同增益下测到的散射信号修正到同一增益下。

## 3 理论模型

为了简便,忽略了水箱壁对光束的折射作用。图3中,散射角  $\theta$  方向上的光强度为

$$I(\theta) = \beta(\theta) \frac{4c_1 P_0 e^{-AR_1}}{\pi D^2} V(\theta), \quad (5)$$

到达探测器的光功率为

$$P_s(\theta) = c_2 I(\theta) \Delta \Omega e^{-AR_2} = c P_0 \beta(\theta) \frac{\Delta \Omega}{\pi D^2} V(\theta) e^{-A(R_1+R_2)}, \quad (6)$$

式中  $P_0$  为发射激光束的功率;  $c_1, c_2, c$  为校正常数;  $A$  为尾流场的消光系数;  $\Delta \Omega$  为立体角;  $R_1, R_2$  分别为入射光和散射光在尾流场内的传播距离;  $\beta(\theta)$  为尾流场的体散射函数,具体表示为

$$\beta(\theta) = \frac{\lambda^2}{8\pi^2} \times \int_{a_{\min}}^{a_{\max}} [ |S_1(a, \theta)|^2 + |S_2(a, \theta)|^2 ] n(a) da, \quad (7)$$

式中  $\lambda$  为入射光波长;  $a$  为气泡半径,  $a_{\max}, a_{\min}$  为散射体积  $V(\theta)$  内气泡尺寸的上下限;  $S_j(a, \theta)$  为散射振幅<sup>[12]</sup>。体散射函数体现了回波信号与气泡尺寸及密度的关系。

## 4 测量结果及分析

### 4.1 气泡光散射信号的特征

图4为散射角为  $155^\circ$  时的测量信号。螺旋桨开始旋转时,出现了很多非等间距、非等强度和非等宽度的脉冲;在螺旋桨停止转动的瞬间,观察到大量气泡迅速消失,脉冲数量和脉冲强度明显降低,即气泡数量和运动学特征都发生了突变。而水中的其他杂质和粒子的浓度、运动学特征处于缓变化状态,在螺旋桨停止的瞬间它们对测量信号不会产生影响。所以断定大量的脉冲是由螺旋桨转动时产生的大量气泡引起的<sup>[9,13]</sup>。

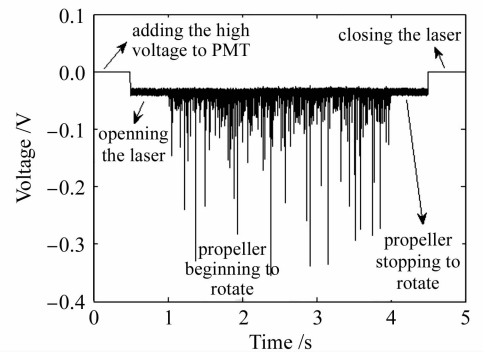


图4 散射角  $155^\circ$  时的测量信号

Fig. 4 Measured signal at  $155^\circ$

实验中采样时间设为 10 s。气泡散射脉冲并不是连续的脉冲串,脉冲的宽度和幅值随时间变化很大,具有一定的随机性。脉冲的幅值取决于入射光的强度、散射方向、气泡的大小和数量;脉宽取决于入射光的束宽和气泡的运动速度,而脉宽又决定了

采集卡的采样速率。利用等效阻抗1 MΩ与50 Ω的示波器和负载为67 kΩ与50 Ω的光电倍增管组成四种电路大致估计了气泡散射信号中没有纳秒量级的脉冲,所以取采样率80 kHz,光电倍增管负载取67 kΩ,能测到的最小脉宽为25 μs。气泡散射信号主要分布在低频段内,根据实际观察,取其频率范围为500~4000 Hz。

#### 4.2 气泡光散射信号的处理

除了气泡散射脉冲外,同频率同相位的背景光(图4中表现为直流分压)、50 Hz工频及其谐波和低频噪声等也包含在测量信号中,它们严重地影响了气泡散射脉冲的提取。为了提高信噪比,尝试用功率谱密度函数来描述测量信号的频域特性。功率谱密度估计能够将测量信号中各个频率分量分离开,达到从各种噪声中检测出气泡散射信号的目的。利用功率谱密度估计得到的气泡散射信号的平均功率为

$$P = \int_{f_1}^{f_2} P_{xx}(f) df, \quad (8)$$

式中  $P_{xx}(f)$  为功率谱密度,  $f_1 = 500$  Hz,  $f_2 = 4000$  Hz。

#### 4.3 尾流气泡的角散射特性

图5为利用功率谱估计法得到的气泡散射信号的平均功率随散射角度的变化曲线。曲线趋势与米氏(Mie)理论计算结果吻合得很好,数值上以米氏理论结果为中心上下波动,和理论计算结果处于相同数量级上。并且,气泡散射的理论值和测量值高于没有气泡时水散射强度大约1个数量级。

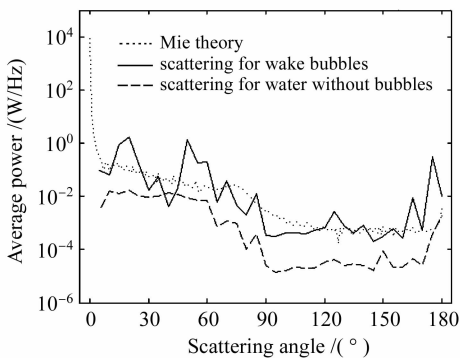


图5 气泡的角散射特性

Fig. 5 Angular scattering property of bubbles using the power spectral estimation

## 5 结论

研究了尾流气泡在 $5^\circ \sim 175^\circ$ 内的角散射特性,

与米氏理论计算结果相比较,取得了良好的效果,与水的散射相差近一个数量级。研究结果表明利用激光可以将气泡和水的散射区别开,即利用激光探测尾流气泡的存在具有可行性。

## 参 考 文 献

- X. Zhang, M. Lewis, M. Lee *et al.*. The volume scattering function of natural bubble populations [J]. *Limnol. Oceanogr.*, 2002, **47**(5):1273~1282
- Zhang Xiaohui, Ge Weilong, Zhu Donghua. Research on torpedo wake homing by laser [J]. *Chinese J. Lasers*, 2004, **31**(11):1355  
张晓晖,葛卫龙,朱东华. 鱼雷激光尾流自导方法的研究[J]. *中国激光*, 2004, **31**(11):1355
- Zhang Jiansheng, Liu Jiankang, Zhang Yi'an *et al.*. Mathematical model of the optical characteristics of bubble film in ship wakes and the experiment [J]. *Journal of Xi'an Institute of Technology*, 2003, **23**(1):1~10  
张建新,刘建康,张义安等. 尾流光学特性的数理模型及试验[J]. *西安工业学院学报*, 2003, **23**(1):1~10
- Wang Jiang'an, Jiang Xingzhou, Ma Zhiguo *et al.*. Study on back light-scattering property of bubbles in ship wake [J]. *Laser Technology*, 2005, **29**(2):205~206  
王江安,蒋兴舟,马治国等. 舰船尾流气泡后向光散射特性研究[J]. *激光技术*, 2005, **29**(2):205~206
- Li Zengrong, Liu Jifang, Deng Zhongfang. Study of attenuation characteristic of ship wake's backward scattered light based on the detection of optical power [J]. *Acta Photonica Sinica*, 2006, **35**(9):1417~1420  
李增荣,刘继芳,邓仲芳. 尾流后向散射光功率衰减特性研究[J]. *光子学报*, 2006, **35**(9):1417~1420
- Zhang Jiansheng, He Junhua, Ji Bangjie *et al.*. Managing of wake optical signal [J]. *Acta Photonica Sinica*, 2005, **34**(8):1274~1277  
张建新,何俊华,冀邦杰等. 尾流光学信号的处理方法[J]. *光子学报*, 2005, **34**(8):1274~1277
- Li Wei, Yang Kecheng, Zhang Xiaohui *et al.*. Simulation and computation of bubbles volume scattering function in water [J]. *Acta Optica Sinica*, 2006, **26**(5):647~651  
李微,杨克成,张晓晖等. 水中气泡上的体散射函数的模拟与计算[J]. *光学学报*, 2006, **26**(5):647~651
- Liping Su, Weijiang Zhao, Xiaoyong Hu *et al.*. Simple lidar detecting wake profiles [J]. *J. Opt. A: Pure Appl. Opt.*, 2007, **9**:842~847
- Liping Su, Weijiang Zhao, Xiaoyong Hu *et al.*. Experimental investigation on wake profile detection on laser scattering by bubbles [J]. *Chin. Opt. Lett.*, 2007, **5**(10):609~612
- M. E. Lee, M. R. Lewis. A new method for the measurement of the optical volume scattering function in the upper ocean [J]. *J. Atmos. Ocean. Technol.*, 2003, **20**(4):563~571
- Su Liping. Investigation on Laser Scattering Property and Profile Simulation of Wake [D]. Ph. D Dissertation. Harbin Institute of Technology, 2007. 59~69  
苏丽萍. 舰船尾流的激光散射特性和轮廓的半实物仿真研究[D]. 哈尔滨工业大学博士论文, 2007. 59~69
- H. C. Van de Hulst. *Light Scattering by Small Particles* [M]. New York: Wiley, 1957. 82~129
- Su Liping, Zhao Weijiang, Ren Deming *et al.*. The backscattering property experiment research of wake bubbles [C]. *SPIE*, 2007, **6595**:659524-1~659524-6