

文章编号: 0258-7025(2009)04-0814-05

# 气泡激光散射信号处理方法

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

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

**摘要** 提出了阈值检测、降噪处理和功率谱估计三种分析和处理水中气泡激光散射信号的方法。利用这三种方法分别对不同散射角时的测量信号进行了处理,得到了水中气泡激光散射强度随散射角的分布特性,并将实验结果与米氏(Mie)理论结果及水的散射强度进行了对比,比较和分析了三种方法的优劣。阈值检测法和降噪处理法分别以平均值和绝对偏差为中心来估计气泡散射强度,它们不能隔离直流分量。功率谱估计法处理得到的气泡角散射特性与 Mie 理论结果一致,能够区别开气泡散射和水的散射,两者相差近 1 个数量级。实验结果表明功率谱估计法是最合理的处理气泡激光散射信号的方法。

**关键词** 海洋光学; 气泡散射; 功率谱估计; 阈值检测; 降噪

**中图分类号** TN959.1<sup>+</sup>7 **文献标识码** A **doi**: 10.3788/CJL20093604.0814

## Processing Methods for Laser Scattering Signals of Bubbles

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

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

**Abstract** Three methods for analyzing and processing the laser scattering signal of bubbles in water, the threshold detection, noise elimination processing and power spectral estimation, are put forward. Using the above three methods, the measured signals for different scattering angles are processed respectively and the angular distribution of light intensity scattered by bubbles in water is obtained. Compared with Mie result and water scattering intensity, advantages of three methods are analyzed. The average value and the absolute deviation respectively are centered in the threshold detection and noise elimination method to estimate the bubble scattering intensity, and the DC component could not be isolated by them. The angular scattering property of bubbles obtained using the power spectral estimation agrees with the result based on Mie theory. Bubble and water scattering could be distinguished based on this method, and the difference of them would be nearly one order of magnitude. Experimental results show that the power spectral estimation is the most reasonable method for processing the laser scattering signal of bubbles.

**Key words** ocean optics; bubble scattering; power spectral estimation; threshold detection; noise elimination

## 1 引 言

最近几年,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,并据以判断目标尾流的相对位置。气泡的光散射对水下目标的探测以及遥感技术的应用具有重要作用,确定水中气泡群的散射光强度随散射角的分布是研究水下目

标探测、水中光场分布的基础。理论上,几何光学<sup>[1]</sup>、物理光学<sup>[2]</sup>、米氏(Mie)理论<sup>[3,4]</sup>以及蒙特卡罗模拟<sup>[5,6]</sup>等方法已经用来研究气泡的光散射特性。实验上,具有代表性的是 X. Zhang 等<sup>[7]</sup>进行的对自然水域内气泡群在散射角 10°~170°范围内体散射函数的测量。国内已经有人先后开展了这方面的工作<sup>[8~10]</sup>,但他们的研究主要集中在前向小角

收稿日期: 2008-04-30; 收到修改稿日期: 2008-07-15

作者简介: 苏丽萍(1975—),女,黑龙江人,讲师,博士,主要从事蓝绿激光技术及水下目标探测研究。

E-mail: laserslp@sohu.com



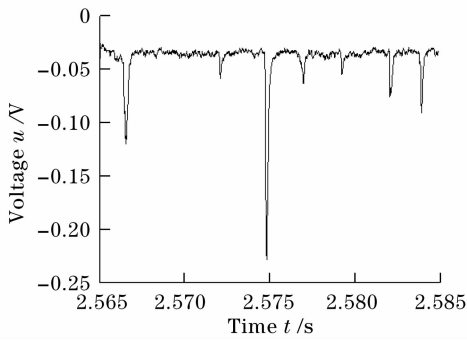


图2 散射角  $155^\circ$  时测量信号的局部放大

Fig. 2 Partial enlarged detail of the measured signal at the scattering angle of  $155^\circ$

即阈值,来衡量气泡散射信号的有无。考虑到测量信号均为负,小于此门限的为气泡散射信号,大于此门限的为非信号(即直流偏压),将此部分剪辑掉,将剩余部分连接起来,对时间积分取平均,平均值与门限之差为相应散射角时的散射功率。不同的散射角存在不同的门限,门限的选取至关重要,决定了气泡散射信号的采样点数和统计特征。对于一个特定的散射角,将没有气泡时测到的水散射信号的均值与标准偏差之差作为门限。设门限为  $A$ ,则气泡散射信号可表示为

$$y(k) = x(n), x(n) < A, \\ k = 0, 1, 2, \dots, K-1, \quad (1)$$

其中  $K$  为气泡散射信号的采样点数。 $\theta$  散射角时的散射功率为

$$P_s(\theta) = \left[ \sum_k y(k) / K \right] - A. \quad (2)$$

### 3.2 降噪处理法

阈值检测法利用门限衡量信号的有无,若门限选择过高,将损失一些有用信息,若门限选择过低,将增加无用信息的比例。阈值检测法还导致了新序列  $y(k)$  中高斯白噪声的平均值不再为 0。这些都给气泡散射强度的估计带来了误差。所以,在降噪处理法中,首先消除高频噪声的影响。降噪处理法也是在时域内进行的。利用数字式移动平均算法对测量信号  $x(n)$  进行降噪处理,改善它的信噪比

$$y(k) = \begin{cases} x(k) & k < T \\ \frac{1}{T} \sum_{i=1}^T x(k-i) & k \geq T \end{cases} \quad (3)$$

从而得到一个新的序列  $y(k)$ ,  $T$  是移动因子<sup>[16,17]</sup>。设  $\mu_y$  为  $y(k)$  的平均值,则  $\theta$  散射角时的散射功率为

$$P_s(\theta) = \frac{\sum_n [|x(n) - \mu_y|]}{2N}. \quad (4)$$

### 3.3 功率谱估计法

鉴于信号频域分析具有独到的优越性,将气泡散射信号当作平稳随机过程,对信号进行功率谱估计,这是一个统计平均的频谱特性。用给定的一组样本数据估计一个平稳随机信号的功率谱密度称为功率谱估计。功率谱估计能够给出被分析对象的功率随频率的分布情况,提取信号中的有用信息。稳定随机信号  $x(n)$  的功率谱是其自相关函数  $R_{xx}$  的傅里叶变换,即

$$S_{xx}(f) = \sum_{-\infty}^{+\infty} R_{xx}(m) e^{-2\pi i f m / f_s}, \quad (5)$$

其中  $R_{xx}(m) = \lim_{N \rightarrow \infty} \frac{1}{N} \sum_0^{N-1} x(n)x(n+m)$ ,  $f_s$  为采样频率。

功率谱密度定义为

$$P_{xx}(f) = S_{xx}(f) / f_s. \quad (6)$$

然后对气泡散射脉冲所覆盖的频率范围积分得到  $\theta$  散射角时的散射功率为

$$P_s(\theta) = \int_{f_1}^{f_2} P_{xx}(f), \quad (7)$$

其中,  $f_1$  和  $f_2$  分别为气泡散射脉冲所覆盖的频率范围的下限和上限<sup>[11]</sup>。

## 4 结果分析

图 3~5 分别为阈值检测法、降噪处理法和功率谱估计法的处理结果,图中三条曲线分别为 Mie 理论结果、气泡散射强度和没有气泡时水的散射强度(是指螺旋桨不旋转时水散射信号的平均值)。

与 Mie 计算结果<sup>[16]</sup>相比,阈值检测法的偏差最大,而功率谱估计法的偏差最小。将散射信号当作平稳随机过程来处理,即意味着统计量不随时间变化。阈值检测法是以平均值来估计气泡散射强度的,在利用门限选择有用信息时,将低于门限值的大

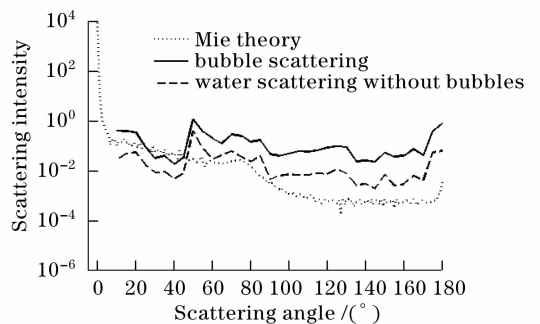


图3 阈值检测法处理得到的气泡群的角散射特性

Fig. 3 Angular scattering property of bubbles obtained by using the threshold detection

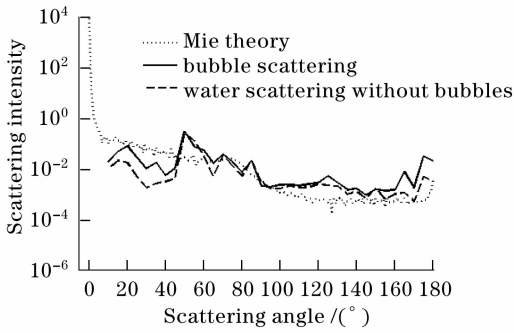


图4 降噪处理法得到的气泡群的角散射特性

Fig. 4 Angular scattering property of bubbles obtained by using the noise elimination method

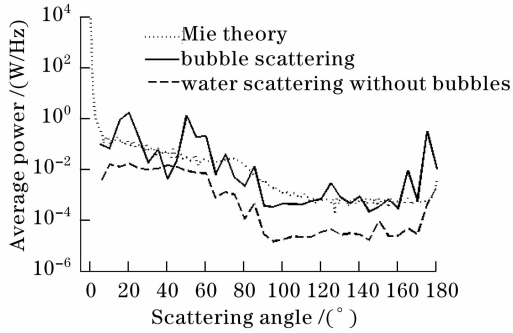


图5 功率谱估计法得到的气泡群的角散射特性

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

量小信号剪辑掉,在实验中发现真正能体现每一个角度散射特征的恰恰是这些被割舍掉的小信号。从图3中可以发现,前向小角度的偏差要小于后向小角度的偏差,这是由于前向小角度的散射较强,决定气泡散射特性的脉冲大部分都高于门限,而后向小角度的信号相对来说特别弱,决定气泡散射特性的脉冲大部分低于门限,因此,大部分有用信息都被割舍掉了。虽然水散射强度低于气泡散射的测量值,但却高于气泡散射的理论计算值,这是不可能的。所以,以平均值为核心的阈值检测法不能真实地反映出气泡和水的散射特性。

降噪处理法是以绝对偏差为中心来估计气泡散射强度的,移动因子  $T$  是一个重要的量,决定了降噪之后波形的光滑程度和计算速度。当  $T$  取不同值时对图2所示的散射角  $155^\circ$  时测量信号分别进行处理<sup>[16]</sup>,结果发现  $T$  越大,波形就越光滑,气泡散射脉冲的幅值就越小,同时脉冲被展宽,脉冲与时间轴围成的面积不变。移动平均算法的滤波效果也与  $T$  有关, $T$  越大,滤波效果越明显。当  $T=500$  时,该算法才能对高于  $4000$  Hz 的频率部分起到一定的滤波作用,此时信号的时域特征受到了严重影响。要

想保持良好的时域特性,应该令  $T$  很小,大约  $10$  左右,而这时频域滤波效果又很差。移动平均算法的致命缺陷是不能隔离直流分量。

虽然降噪处理法存在着上述不足,但与阈值检测法相比,处理结果仍然有了一定的改善,尤其是后向散射。从图4( $T=50$ )可以看出水的散射和气泡群的散射强度十分接近,降噪处理法不能将气泡和水的散射区别开来。

阈值检测和降噪处理方法估计的都是信号的一阶矩,并且都是在时域内完成的,两种方法处理得到的气泡角散射特性在曲线发展趋势和数值上均与 Mie 理论计算结果不符,也不能将气泡散射和水的散射区别开。而功率谱估计法则是以信号的二阶矩——自相关函数为基础进行的,从图5中可以看出利用功率谱估计法处理得到的气泡散射随散射角的分布特性与 Mie 理论计算结果吻合得很好,能够反映出散射强度随散射角的变化规律,数值上与 Mie 理论结果处于相同数量级上,并以其为中心上下波动。没有气泡时水散射强度低于气泡散射的理论值和测量值接近  $1$  个数量级,可见,利用功率谱估计对信号的频域分析可以将气泡散射和水散射区别开。

## 5 结 论

提出了气泡激光散射信号的两种时域处理方法:阈值检测和降噪处理法,以及一种频域处理方法:功率谱估计法。基于频域的功率谱估计能够很好地将气泡激光散射信号从各种噪声中提取出来,利用功率谱估计法处理得到的气泡激光散射强度随散射角的分布特性与 Mie 理论结果吻合得很好,同时能区分开气泡和水的光散射。实验研究表明功率谱估计是最合理的气泡激光散射信号的处理方法。结果进一步表明利用激光可以探测到水中气泡的存在,从而实现用激光探测鱼群或舰船等水下目标。

## 参 考 文 献

- 1 G. E. Davis. Scattering of light by an air bubble in water[J]. *J. Opt. Soc. Am.*, 1955, **45**(7): 572~581
- 2 P. L. Marston. Critical angle scattering by a bubble: physical-optics approximation and observations[J]. *J. Opt. Soc. Am.*, 1979, **69**(9): 1205~1211
- 3 D. Stramski. Gas microbubbles: an assessment of their significance to light scattering in quiescent seas[C]. *SPIE*, 1994, **2258**:704~710
- 4 X. Zhang, M. R. Lewis, B. D. Johnson. Influence of bubbles on scattering of light in the ocean[J]. *Appl. Opt.*, 1998, **37**(27): 6525~6536

- 5 A. A. Kokhanovsky. Optical properties of bubbles[J]. *J. Opt. A: Pure Appl. Opt.*, 2003, **5**: 47~52
- 6 M. Xia, K. Yang, X. Zhang *et al.*. Monte Carlo simulation of backscattering signal from bubbles under water[J]. *J. Opt. A: Pure Appl. Opt.*, 2006, **8**: 350~354
- 7 X. Zhang, M. Lewis. The volume scattering function of natural bubble populations[J]. *Limnol. Oceanogr.*, 2002, **47**(5): 1273~1282
- 8 Zhang Jiansheng. The development and measurement of ship wake optical specialty[D]. Xi'an: Xi'an Institute of Optics and Precision Mechanics, Chinese Academy of Sciences, 2001: 140~158  
张建新. 尾流的光学特性研究与测量[D]. 西安:中国科学院西安光学精密机械研究所, 2001:140~158
- 9 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**: 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**:205~206
- 10 Li Zengrou, 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**: 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**: 1417~1420
- 11 Zhao Weijiang, Su Liping, Ren Deming *et al.*. Measurement on the angular scattering properties of wake bubbles[J]. *Chinese J. Lasers*, 2008, **35**(5):744~747  
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
- 12 Su Liping, Zhao Weijiang, Ren Deming *et al.*. The backscattering property experiment research of wake bubbles [C]. *SPIE*, 2007, **6595**: 659524
- 13 Ji Yanjun, He Junhua, Zheng Li *et al.*. Analyzing signal applying time-dependent Fourier transform[J]. *Acta Photonica Sinica*, 2004, **33**(12): 1533~1536  
纪延俊, 何俊华, 郑黎 等. 应用短时 Fourier 变换对尾流光学信号分析[J]. *光子学报*, 2004, **33**(12): 1533~1536
- 14 Zhang Jiangsheng, 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
- 15 Liping Su, Weijiang Zhao, Xiaoyong Hu *et al.*. Experimental investigation on wake profile detection by laser[J]. *Chin. Opt. Lett.*, 2007, **5**(10):609~612
- 16 Su Liping. Investigation on laser scattering property and profile simulation of wake[D]. Herbin: Harbin Institute of Technology, 2007:59~113  
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:哈尔滨工业大学, 2007:59~113
- 17 Gao Jinzhan. Weak Signal Detection[M]. Beijing: Tsinghua University Press, 2004. 134~136  
高晋占. 微弱信号检测[M]. 北京:清华大学出版社, 2004. 134~136