

应用短时 Fourier 变换对尾流光学信号分析*

纪延俊^{1,2} 何俊华¹ 郑黎¹ 陈良益¹

(1 中科院西安光学机械精密研究所, 西安 710068)

(2 山东滨州学院, 山东 256604)

摘要 为弥补声探测尾流的不足, 利用激光的独特优势, 采用激光探测舰船尾流的方法. 根据光信号的随机特性, 确定了信号的分析方法: 短时 Fourier 变换. 在信号的时-频分布图中, 表征了信号频率随时间的变化关系. 通过对气泡幕光学信号时-频图的分析, 推测舰艇尾流的强弱. 把这种探测手段应用于鱼雷自导, 可提高鱼雷的作用距离、减小鱼雷半径, 增强战斗力.

关键词 尾流; 尾流自导; 气泡幕; 短时傅里叶变换

中图分类号 O436 **文献标识码** A

0 引言

目前在鱼雷制导技术中, 前景看好的是尾流自导. 尾流自导可分为: 尾流声自导、尾流磁自导、尾流电阻抗自导、尾流热自导、尾流光自导、尾流放射性自导等. 由于目前舰艇大都采用了吸声、消声材料, 使鱼雷声自导作用距离明显下降, 最多的下降 75%^[1]; 同时, 舰艇采用多种反鱼雷措施(如机械发声干扰器、假目标、电子诱饵、反鱼雷鱼雷等). 这就要求对鱼雷进行改进, 以提高其性能. 由于蓝绿激光在水中具有最小衰减的特性, 使激光水中探测成为可能, 成为水下探测中声纳的有益补充. 激光探测具有自身独特的优势^[2], 它可以实现主动方式工作, 不受环境噪声与环境光的影响.

用光电探测器接收通过气泡幕的散射光, 通过对散射光的分析得出气泡幕的强弱, 从而确定舰船尾流强弱, 推测舰船的位置, 这是国际上全新的一种测量方法. 这种方法, 处理速度快、数据量小、简单方便.

1 理论

舰船尾流主要是由大量气泡组成, 距离舰船的距离不同, 其中气泡的半径和速度就不同. 距离舰船越近, 气泡的半径、速度越大, 随着大气泡的上升、破裂, 在距舰船比较远的地方, 只剩下速度比较小的小气泡. 如果确定了气泡的尺寸和速度, 也就确定了尾流的强弱, 进而可推测舰船的位置.

在尾流不同部位中, 气泡幕中气泡的尺寸分布可以看作是在某一半径值两侧的漂移^[3], 半径分布范围为 $0 \sim R_{\max}$, 符合 Passion 分布. 所以透射光可

以看作是在半径尺度范围内, 各种半径大小的气泡在一定速度下对光散射的随意叠加. 据气泡半径在 $0 \sim R_{\max}$ 的随机性, 可推得通过气泡幕的散射光为随机信号^[4].

对尾流光信号我们可以从两个方面来描述和分析它, 一是时域, 二是频域. 时域分析是研究信号的形态随时间的变化规律, 抽取必要的特征量(如幅度、周期、局部的上升时间与下降时间等)以作为对信号判断与识别的依据. 频域分析是研究信号的能量或功率随时间的变化规律, 从而为信号的进一步处理提供依据和手段.

信号的时域、频域描述通过 Fourier 变化联系起来. 散射光信号的时域代表了散射光强的大小随时间的变化关系. 通过 Fourier 变换, 信号被分成不同的频率分量. 但是 Fourier 分析存在固有的缺点, Fourier 分析方法只适用于平稳信号或短时间内平稳的信号以及确定性信号, 而对非平稳信号, 要有一种分析方法把时域分析和频域分析结合起来, 即找到一个二维函数, 它既能反映该信号的频率内容, 也能反映出该频率内容随时间变化的规律, 即所谓的时-频分析.

气泡幕中各个时刻通过光束的气泡半径、速度不定, 也就导致了各个时刻信号的频率不同. 但是在很小的一个时间段内, 通过光束的气泡半径是一定的, 则信号的频率一定, 也就是说, 在很短时间内信号为平稳信号. 由信号的这个性质, 对散射光信号的时-频分析可采用短时 Fourier 变换法(STFT).

针对散射光信号的非平稳性^[4], 为实现时域的局部化, 把待分析的时变信号 $z(t)$ 乘以时窗函数 $r(t)$, 时窗沿时间轴滑动, 如果在窗口宽度足够窄的情况下, 便把原为非平稳的信号分段化为若干局部平稳信号, 所以时窗函数 $r(t)$ 又称为分析窗. 对加窗后的信号进行 Fourier 变换, 所得信号的频谱可以

*51448 国防科技重点实验室资助项目

Tel: 029-88483821 Email: jiyangjg@163.com

收稿日期: 2003-09-24

看作是时刻的局部频谱,时窗起着时限作用,因此称为短时 Fourier 变换^[5]. 在实际应用中,信号为离散信号,设 $T > 0, F > 0$, 分别为时间变量和频率变量的采样周期, m 和 n 为整数, $z(k)$ 为离散信号,则它的 STFT 离散化形式为

$$STFT(m, n) = \sum_{k=-\infty}^{\infty} z(k) r^*(kT - mT) e^{-j2\pi(nF)k} \quad (1)$$

式中, * 代表复数共轭,为使信号 $z(t)$ 能够由 STFT 完全重构出来,必须满足重构公式,即要求窗函数满足下列条件

$$\int_{-\infty}^{\infty} r^*(t) g(t) dt = 1 \quad (2)$$

$g(t)$ 为综合窗,对于给定的分析窗 $r(t)$, 可以选择 $g(t) = r(t)$.

在尾流中气泡的半径与速度的关系为^[6]

$$\rho_p \frac{dv_i}{dt} = \rho_p (u_i - v_i) / \tau_p + \rho_f \frac{du_i}{dt} + \frac{1}{2} \frac{\pi d^3}{6} \rho_f \left(\frac{du_i}{dt} - \frac{dv_i}{dt} \right) + (\rho_p - \rho_f) g_i \quad (3)$$

d 是气泡直径, ρ 为密度,下标 p 代表气泡, f 代表液体, u_i, v_i 分别为载波流速和气泡速度, g_i 为重力加速度. 等式左边为气泡的惯性力,由于气泡的加速度而产生. 等式右边分别为粘滞拉力、液体的压力梯度和粘滞压力、由于气泡运动所带动的周围介质的附加质量产生的重力和浮力.

由式(3)可知,气泡速度是其直径的函数,所以光强的浮动情况仅是气泡密度和尺度的函数,进而推得信号频谱也仅是气泡密度和尺度的函数. 在信号的短时傅里叶频谱中,信号谱峰的大小是气泡直径的函数,气泡直径越大,受到的浮力就越大,运动速度越大,信号谱峰越高. 根据短时 Fourier 变换的性质和气泡与光强信号之间的关系,气泡进入光束引起光强的波动,所以信号谱峰的位置应是气泡出现在探测光束中的时刻. 由此可知信号频谱中间断点的多少代表了出现在光束中气泡的个数.

2 实验

在实验室里采用微孔陶瓷管产生模拟尾流. 微孔陶瓷管的壁上布满微孔,中间是中空的,一头封闭,将其放入水中,通过气泵对其充气,便产生了一定厚度的气泡幕,其中气泡的尺寸与管子上的微孔大小有关,气泡的速度又与气泡的尺寸有关. 这里用的是微孔分别为 $20 \mu\text{m}$ 、 $40 \mu\text{m}$ 的陶瓷管,由其来模拟不同强度的尾流. 用发光功率为 3 mW 、波长为 632 nm 的激光器作为探测光源,光束经静止的水后,其直径为 0.8 mm ,激光垂直射入气泡幕,经气泡幕散射后,直接用 Si 光电二极管接收变为电信号.

二极管的光敏面直径为 5 mm ,远大于激光束直径,所以不必考虑光经气泡散射后扩束的干扰. 电信号经直流放大后,输入 A/D 采样卡,最终输入计算机,完成存储和处理.

3 分析

利用 FFT 编程计算信号的短时 Fourier 变换,采样点数为 500,根据所测得的大、小气泡的速度及直径^[7],确定采用窗口长度 $L = 20$ 点的海宁窗

$$w = 0.5 * (1 - \cos(2 * \pi * (0:L-1)/(L-1))) \quad (4)$$

取样频率为 3 kHz ,信号的重叠点数 10 点.

为验证以上理论的正确性,先做低密度气泡幕的散射光信号的短时 Fourier 变换,微孔陶瓷管的微孔直径是 $20 \mu\text{m}$,气泵输出气压为 0.15 个大气压.

图 1(a) 中横坐标为采样点数,纵坐标为散射光强引起的电压值,与散射光强成正比; (b) 中横坐标为采相应的点数所经历的时间,纵坐标为信号频率随时间的变化情况. (a) 图中光强浮动有两个大的波谷①、②,说明有两个气泡经过光束,相应地在图 (b) 中低频部分很明显的两个断点,与光强浮动图相对照,此处对应两个气泡出现的时间,第一个波谷对应的气泡直径较大,运动速度大,所以光强波动频率较高,由理论公式^[7]得,两个气泡的直径分别为 0.667 mm 、 0.438 mm ,速度分别为 200 mm/s 、 133 mm/s ,由 (b) 图得两气泡所对应的频率值分别为 630 Hz 、 280 Hz .

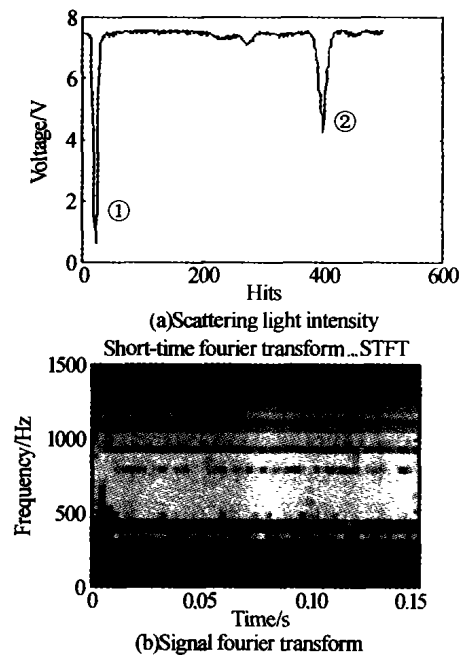


图 1 散射光强信号与其短时 Fourier 变换图
Fig. 1 The scattering light intensity and its Fourier transform

在气泡密度很高时,经过光束的气泡直径是满足 Passion 分布的尺度范围内的随机值,进入光束的时间也是随机的,此时对信号应用短时 Fourier 变

换,从频谱中可判断气泡进入光束的时间和其产生的信号峰值.

微孔陶瓷管的微孔直径是 $40\ \mu\text{m}$,气泵输出气压为 0.15 个大气压,高密度气泡幕产生的散射光信号和其短时 Fourier 变换图如图 2.

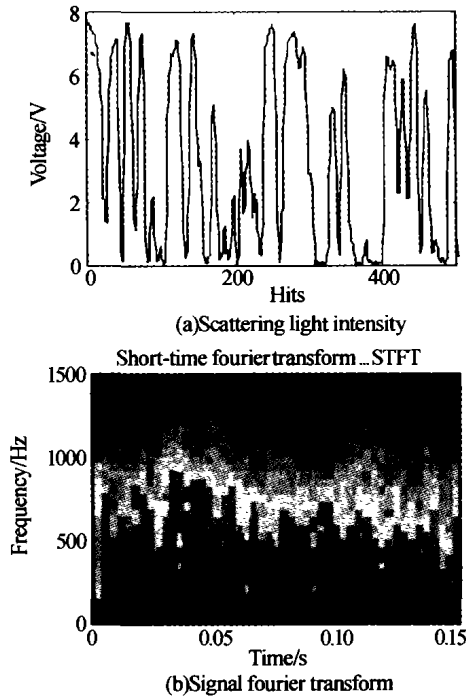


图 2 微孔直径为 $40\ \mu\text{m}$ 光学信号时-频图

Fig. 2 Time-frequency fig of light signal when the tiny hole diameter is $40\ \mu\text{m}$

从图 2 可看出,信号的频率主要集中在 $0\sim 1000\ \text{Hz}$ 范围内,在高频部分的微小波动由噪声引起,信号频率随时间没有明确的变化趋势,说明了信号的随机性.

根据信号频谱的变化情况,做气泡个数与时间的关系图.

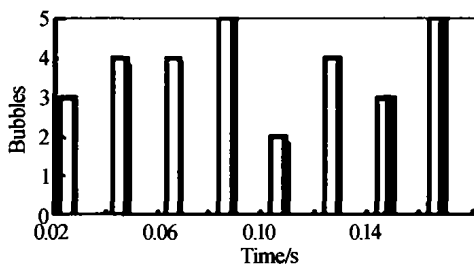


图 3 通过光束的气泡个数随时间的变化

Fig. 3 The number of air bubbles passed light changing with time

4 结论

实验表明,微孔直径为 $20\ \mu\text{m}$ 的频谱图中,信号的频率相对来说比较低,说明与微孔直径为 $40\ \mu\text{m}$

时相比,产生的气泡幕中气泡尺寸比较小,所以运动速度慢.这完全符合前面的理论分析,气泡的运动速度是其直径的函数.

通过对高密度气泡幕时频图的分析,得出了气泡个数随时间的变化,也就是气泡幕的密度随时间的变化.所以通过对时-频图的分析,可以确定尾流的强弱.证明了这种方法在尾流光探测中的可使用性.对于气泡幕的参数与时-频分布之间是否存在定量的关系还有待于继续研究.

针对散射光信号是随机信号的特性,只能用它的宏观特性来表示.以上通过对经气泡幕的散射光的时-频分析,判断出了尾流的强弱.这在实际中是意义重大的,在鱼雷探测中,只要确定了尾流的相对强弱,也就确定了跟踪方向、确定了舰船的位置,加上这种方法,数据处理量小,实时处理速度快,为实现鱼雷的尾流跟踪缩短了反应时间,提高了鱼雷的作战威力.

参考文献

- 姚蓝,刘平香.反鱼雷水声对抗技术的现状与发展.声学技术,2001,20(4):183~187
Yao L, Liu P X. *Acoustical Technology*, 2001, 20(4):183~187
- 冯包根.机载激光反潜探雷系统发展现状.电光与控制,1995,48(3):37~41
Feng B G. *Electricity-Light and Control*, 1995, 48(3):37~41
- Norman Davids and E G Thurston. The acoustical impedance of a bubbly mixture and its size distribution function. *The Acoustical Society of America*, 1950, 22(1):20~23
- 纪延俊,何俊华,董晓娜,等.气泡幕散射光的性质.光子学报,2004,33(8):
Ji Y J, He J H, Dong X N, et al. *Acta Photonica Sinica*, 2004, 33(8):
Zhang X D, Bao Z. Analyzing and disposal of non-calm signal, Beijing: National defense industry publishing company, 1998(9):20~25
- Smirnov A, Shi S, Celik I. Random flow generation technique for large eddy simulations and particle-dynamics modeling. *Fluids Engineering*, 2001, 12(3):359~371
- 纪延俊,马祥,何俊华,等.水中气泡对光传播的影响.光子学报,2004,33(5):626~628
Ji Y J, Ma X, He J H, et al. *Acta Photonica Sinica*, 2004, 33(5):626~628

Analyzing Signal Applying Time-dependent Fourier Transform

Ji Yanjun^{1,2}, He Junhua¹, Zheng Li¹, Chen Liangyi¹


¹ Xi'an Institute of Optics and Precision Mechanics of CAS, Xi'an 710068

² Binzhou University of Shandong, Binzhou 256604

Received date: 2003-09-24

Abstract Redeeming the shortage of sonar and making use of the advantage of laser, it was used in detecting the wake of ship. Time-Dependent Fourier Transform was used for the reason of the light signal is random signal. The signal time-frequency fig tokens the relation of frequency and time. Differentia of time-frequency figs between differ air bubbles was used to speculate that the ship's wake is strive or feebleness. Applying this detection method in the self-directing of fish torpedo can increase its effect distance, reduce its radix and build up its battle effectiveness.

Keywords Wake; Wake self-directing; Air bubbles wall; Time-dependent Fourier transform



Ji Yanjun was born in 1974 in Shandong Province. She is the teacher of Shandong Binzhou University. Now, she is studying for M. S. degree in Xi'an Institute of Optics and Precision Mechanics of Chinese Academy of Sciences. Her main study direction is the optical character of the wake of naval vessel.