

尾流光学信号的处理方法*

张建生¹ 何俊华² 冀邦杰³ 陈良益²

(1 西安工业学院数理系, 西安 710032)

(2 中国科学院西安光学精密研究所, 西安 710068)

(3 第七〇五研究所, 西安 710075)

摘要 主要利用滤波器、离散傅里叶变换、以及统计信号处理方法等对实验室模拟的尾流信号进行分析和处理、计算。从能量的角度来看, 光学信号在有无气泡幕情况下的区别是非常明显的; 利用滤波器只能作为尾流光学信号的预处理, 从实际应用来看, 需要做进一步处理; 离散傅里叶变换对不同气压下得到的处理结果存在的区别, 必然也为判断不同航速、不同尾龄下的尾流提供了一种线索; 以 Chirp z 变换的形式对尾流光学信号进行处理, 使得这种分布具有相当直观的图形, 结合适当的图形处理方式, 将有可能确定探测尾流光学性质的特征信号。

关键词 尾流; 光学信号; MATLAB; 信号处理

中图分类号 O439 **文献标识码** A

0 引言

尾流的几何特性与其产生的舰船的几何尺度、航行速度、海面风速等因素密切相关。一般情况下, 大多数舰船尾流垂直方向的厚度约为舰船吃水深度的 1.5~2 倍, 尾流的底面与水平面夹角约为 0.1° , 舰船航行超过 0.5 min 时, 尾流扩展角约为 1° 。就物理场而言, 尾流具有声学特性、光学特性、磁特性以及热特性等^[1]。舰船尾流的这些物理特性是进行尾流探测、跟踪和识别的基础, 使其在水下武器中的应用成为可能^[2]。

光用于水下航行体的尾流和涡流探测主要有四个特点: 可实现水下攻击武器的远程非声探测及跟踪、受海洋环境影响小、对抗能力强、一雷可同时具备反舰反潜性能。光尾流自导鱼雷是一个全新意义上的自导鱼雷, 发展这种鱼雷具有重要的战略意义, 要发展这种新型鱼雷, 首先应解决一系列关键技术, 其中之一就是尾流中光学场的特性技术研究^[3], 这是尾流探测的基本物理学问题, 主要研究光波通过局域或尾流后光学特性的变化。

作者在实验室利用模拟尾流气泡幕对模拟尾流的光学特性进行了深入的研究, 并对尾流气泡幕中气泡的运动及动力学规律进行了详细的测量和分析。在实验室测试的基础上, 作者利用自行研制的实验设备对湖面船只的尾流进行了光学特性的测量和分析, 得到了大量实验数据, 并建立了尾流的数学物理模型^[4~7]。作者所建立的尾流模型虽然与真实尾流

存在差异, 但仍不失为一个有用的模型。

1 尾流光学特性的测量

图 1 是在实验室气体压力为 0.035 MPa 时所得透射光照度随时间变化的曲线, 此时水池中有强气泡幕。图中横坐标为时间轴, 单位是 10^{-1} s, 纵坐标为照度值, 单位勒克司(lx)。若不特别强调, 以下照度随时间的变化曲线中坐标轴的含义以及单位与此相同。

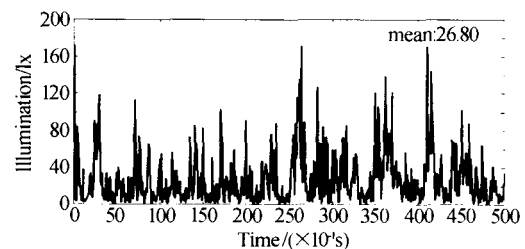


图 1 有气泡幕时透射光照度随时间的变化

Fig. 1 Transmission illumination with bubble film

实验测量结果表明, 无气泡幕时照度基本不随时间发生变化, 照度平均值为 2.7080×10^4 lx, 而图 1 中的平均值为 26.80 lx, 前者约等于后者的 1010 多倍, 从能量的角度看, 有无气泡幕时的区别是十分明显的; 拿工程惯用的计量单位分贝来说, 两种情况下平均能量的差别为 $10 \log \frac{2.7080 \times 10^4}{26.8} \cong 30$ dB, 这一差别用于检测无疑足够大。

为了从多种途径来判断气泡幕的存在与否, 可定义一个特征量

$$\zeta = \frac{\sigma}{\bar{E}}$$

式中 σ 、 \bar{E} 分别表示透射光照度采样数据的标准差和平均值, ζ 可称为相对标准差 $\zeta = 0.0983$, 而在图

* 武器装备预研基金项目(编号: 51448030101ZK1801)

Tel: 029-83208068 Email: zhangjsh@mail.xait.edu.cn

收稿日期: 2004-01-09

1 的情形里相对标准差 $\zeta=1.0722$, 后者是前者的 10 倍以上. 显然, 利用相对标准差这一特征量来判断气泡幕的存在与否也是可行的.

湖试时用于产生尾流的船(下称尾流船)是千湖 1 号, 排水量 5000 kg, 螺旋桨深度 0.60 m, 船长 60 m、宽 3 m、龙骨宽 2.5 m, 最大航行速度为 15 km/h. 实验时的环境参量为气温 15℃、湿度 80%、风速约 2 级.

2 尾流光学信号的 MATLAB 处理

MATLAB 的含义是矩阵实验室 (Matrix Laboratory), 最初由 Linpa 和 Eispack 计划研制, 主要用于方便矩阵的存取, 其基本元素是无须定义维数的矩阵. 经过十几年的完善和扩充, 已发展成为许多领域的实用工具. 本文主要利用滤波器、离散傅里叶变换、以及统计信号处理方法对实验室模拟的尾流信号进行分析和处理、计算, 此外, 如何利用小波分析的方法来处所得到的离散信号正在探讨之中.

2.1 滤波器

在 FIR(有限冲击响应)情况下, 应用到数据时, 用固定数目的采样值对输出延迟可设计出相位滤波

器(利用普通滤波器 filter 函数); 然而对 IIR(无限冲击响应)滤波, 相位失真通常是强非线性的, 非因果滤波器 filtfilt 函数使用信号中当前点前后的数据点信息, 本质上是消除了相位失真.

创建 10 点 FIR 滤波器, 使用 filter 和 filtfilt 函数进行比较, 得到不同情况下透射光照度的处理结果如图 2、3、4. 为了便于比较分析, 同时给出了不同情况下透射光照度的原始信号, 图 2(a)、3(a)、4(a)分别是气泡模拟器气体压强为 0.040 MPa、0.030 MPa、0.020 MPa 情况下采集的原始信号. 图 2、3、4 中的 (b)、(c)分别是普通滤波器和非因果滤波器对信号的处理结果.

比较两种滤波器的处理结果, 从图中可以看出, 两种滤波器都保留了原始信号中轮廓即低频成分, 比较而言, 普通滤波器存在着显著相位非线性失真, 且得到的曲线中仍然保留着较高的频率成分, 这可从曲线上的细小毛刺观察到. 非因果滤波器较好地消除了相位失真, 只保留了较为光滑的原始信号曲线轮廓, 曲线上毛刺明显减弱. 从反映原始信号的特点角度出发, 普通滤波器保留了原始信号中较多的细节或称精细结构, 而非线性滤波器则给出原始信号清晰的轮廓, 更便于把握信号的特征, 从实际应

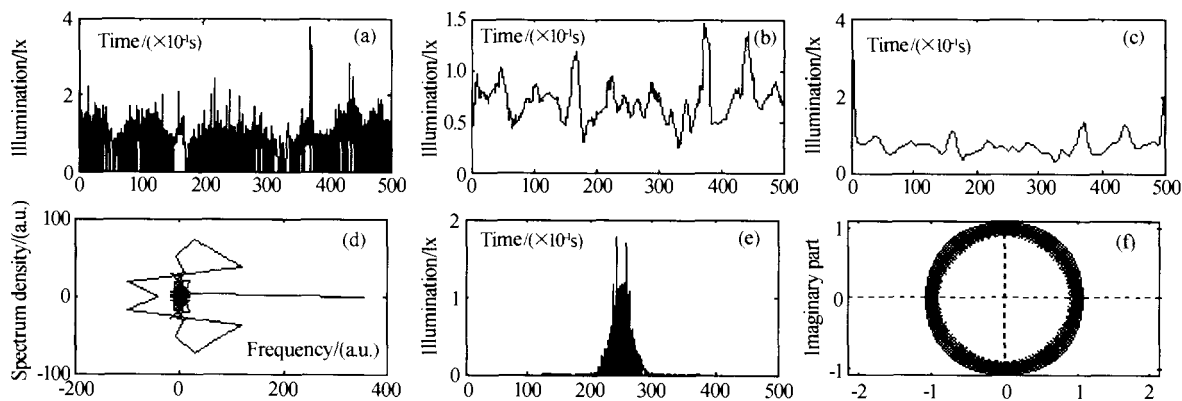


图 2 气压为 0.040 MPa

Fig. 2 With the air pressure of 0.040 MPa

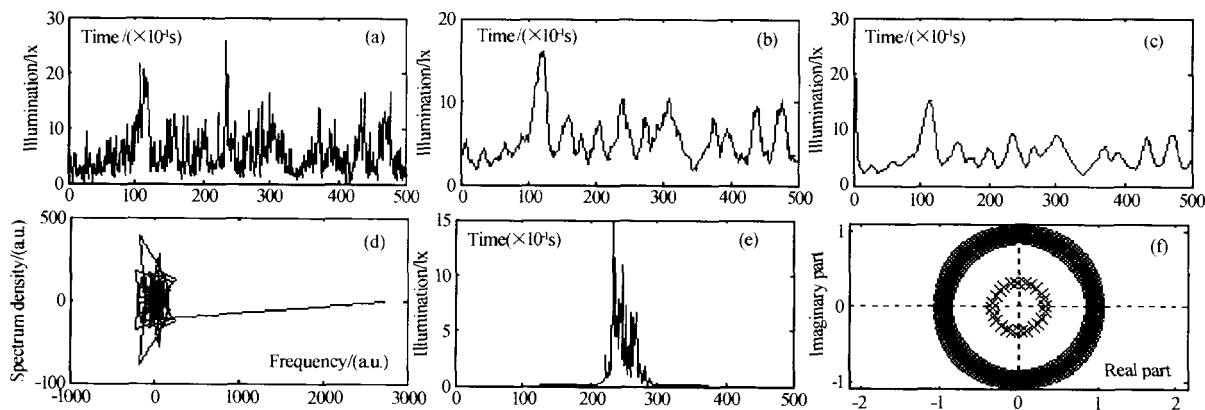


图 3 气压为 0.030 MPa

Fig. 3 With the air pressure of 0.030 MPa

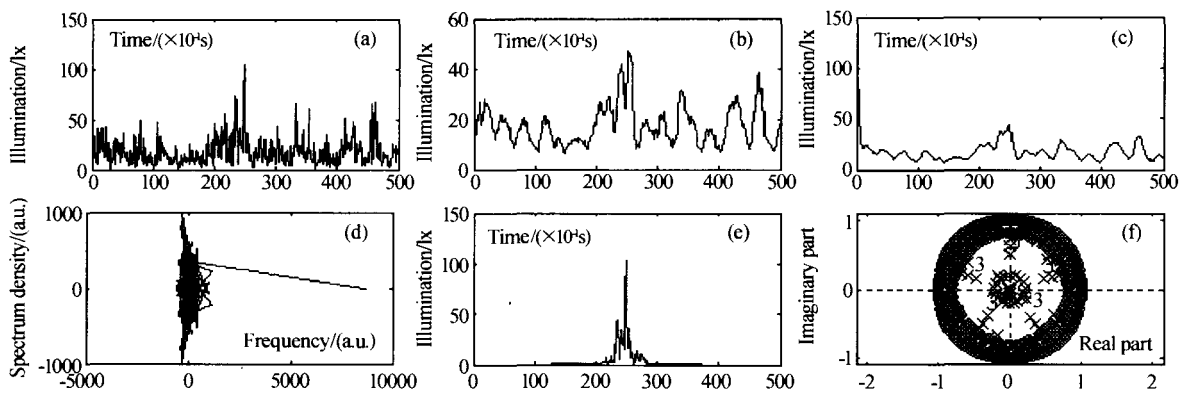


图4 气压为 0.020 MPa

Fig. 4 With the air pressure of 0.020 MPa

用的角度来看,简单、清晰无疑是非线性滤波器的一个优点。

通过对不同气压下两种滤波器的处理结果进行比较,除了幅值以外,对不同气压没有明显的区别,所以利用滤波器只能作为尾流光学信号的预处理,从实际应用来看,需要做进一步处理。

2.2 离散傅里叶变换

离散傅里叶变换(DFT)是信号处理的主要工具,fft函数用来计算输入向量或矩阵的DFT,输入序列 x 及其变换的关系如下

$$X(k+1) = \sum_{n=0}^{N-1} x(n+1)W_N^{kn}$$

等式中,下标从1开始,且

$$W_N = e^{-j\frac{2\pi}{N}}$$

默认fft长度为输入序列的长度,利用fft函数对三种情况下透射光的照度信号进行处理,得到的结果如图2(d)、3(d)、4(d)。

离散傅里叶变换对离散原始照度信号的处理结果实质是给出了输入信号的频谱,结果的物理意义事实上并不非常清楚,但是利用离散傅里叶变换对原始照度信号进行处理或许能够找到尾流光学信号的新的方面,这也正是尝试利用这一工具的目的。对于尾流光学信号的测量、处理等方面的研究工作国内仍然处于探索阶段,所以利用不同方法对所得到的原始信号进行处理是有用的尝试。

图2(d)、3(d)、4(d)反映出,在三种不同的气体压强下,原始信号经离散傅里叶变换得到的频谱存在三个方面的区别,即频谱强度、分布、密度。从这些曲线直观来看,随着气压的减小,频谱的强度在增加,分布趋向于集中,但不同强度的密度减小。尾流信号的一个已知特征就是随着尾龄(尾流产生后的时间)的增加,尾流中所包含的气泡幕的分布相当于不同气体压强下的气泡幕,也相当于舰船在不同航速下产生的气泡幕。既然对不同气压下得到的处理结果存在一些方面的区别,必然也为判断不同航速、

不同尾龄下的尾流提供了一种线索。

2.3 凯瑟窗

窗函数在数字滤波技术和谱分析中得到了广泛的应用,加窗的主要作用是消除吉布斯现象。凯瑟窗定义了一组可调的窗函数,由贝塞尔函数构成,这种窗函数可以在主瓣宽度与旁瓣宽度之间自由地选择其比重。在长度为500的凯瑟窗中,参数beta选为250,之所以选择较大的beta参数,是要减小旁瓣,以便更清楚地对比不同情况下尾流光学信号的精细结构。图2(e)、3(e)、4(e)给出了三种情况下利用凯瑟窗的显示结果。

从几个图的比较中不难看出,随着气体压强的减小,尾流光学信号的精细结构逐渐清晰,在小压强下信号精细结构的清晰程度很好,而在大压强下,精细结构还不能清晰地显示出来。另外在幅值方面,随着压强的减小,幅值持续增加,压强每减小0.010 MPa,幅值约增加6~10倍。基于凯瑟窗的处理,可进一步分析尾流光学信号应用于实践的可能性。

2.4 Chirp z变换

Chirp z变换(CZT),指在 z 域内输入序列沿螺旋轮廓线进行 z 变换,CZT并不是限制在单位圆上,而是可沿如下的轮廓线进行 z 变换

$$z_l = AW^{-l}, l=0, 1, \dots, M-1$$

其中 A 是复数起点, W 是描述轮廓线上点间复比率的复数标量, M 是变换的长度。

选择复数起点 $0.5e^{j\pi/6}$ 、复数标量选择幅值小于1即 $0.995e^{-j\pi/20}$ 、变换长度默认为信号数组长度,画出的图形如图2(f)、3(f)、4(f)。

图2(f)是一个相当规则的圆环,处理后的数据相对集中;图3(f)表现是两个同心圆环,小圆环集中的数据量较少,且圆环的宽度较图2(f)的宽一些;图3(f)看起来是三个同心圆环,且圆环的宽度更大,在大圆环内侧还存在对称的五对零散数据分布。这些图的区别是明显的,每个图的数据量都相同,实质上体现了在不同情况下尾流光学信号的一种分布。以

Chirp z 变换的形式将其进行处理,使得这种分布具有相当直观的图形,结合适当的图形处理方式,将有可能确定探测尾流光学性质的特征信号。

3 结论

①从能量的角度来看,光学信号在有气泡幕情况下的区别是非常明显的;

②利用滤波器只能作为尾流光学信号的预处理,从实际应用来看,需要做进一步处理;

③离散傅里叶变换对不同气压下得到的处理结果存在一些方面的区别,必然也为判断不同航速、不同尾龄下的尾流提供了一种线索;

④以 Chirp z 变换的形式对尾流光学信号进行处理,使得这种分布具有相当直观的图形,结合适当的图形处理方式,将有可能确定探测尾流光学性质的特征信号。

参考文献

- 1 冀邦杰,周德善,张建生. 基于舰船尾流光效应的制导鱼雷. 鱼雷技术, 2000, 3(31): 29~31
Ji B J, Zhou D S, Zhang J S. *Torpedo Technology*, 2000, 3(31): 29~31
- 2 崔绪生. 近年来世界鱼雷武器发展现状及走向. 鱼雷技术, 1997, 1(17): 1~4
Cui X S. *Torpedo Technology*, 1997, 1(17): 1~4
- 3 周德善,王明洲,冀邦杰,等. 发展自导鱼雷的思考. 鱼雷技术, 2000, 8(3): 29~31
Zhou D S, Wang M Z, Ji B J, et al. *Torpedo Technology*, 2000, 8(3): 29~31
- 4 张建生,刘建康,冀邦杰,等. 真实尾流的光学特性. 光子学报, 2002, 31(10): 1284~1288
Zhang J S, Liu J K, Ji B J, et al. *Acta Photonica Sinica*, 2002, 31(10): 1284~1288
- 5 张建生,刘建康,冀邦杰,等. 尾流气泡幕光学特性的数理模型. 光子学报, 2002, 31(8): 1032~1036
Zhang J S, Liu J K, Ji B J, et al. *Acta Photonica Sinica*, 2002, 31(8): 1032~1036
- 6 张建生,王浩,冀邦杰,等. 有可能用于鱼雷尾流自导的某些光学特征. 鱼雷技术, 2002, 3(39): 27~31
Zhang J S, Wang H, Ji B J, et al. *Torpedo Technology*, 2002, 3(39): 27~31
- 7 张建生,吕青,冀邦杰,等. 实验室模拟尾流的光学特性. 光子学报, 2001, 30(9): 1146~1149
Zhang J S, Lü Q, Ji B J, et al. *Acta Photonica Sinica*, 2001, 30(9): 1146~1149

Managing of Wake Optical Signal

Zhang Jiansheng¹, He Junhua², Ji Bangjie³, Chen Liangyi²

¹ Department of maths & physics, Xi'an Institute of Technology, Xi'an 710032

² Xi'an Institute of Optics and Precision Mechanics, CAS, Xi'an 710068

³ Institute of No. 705, Xi'an 710075

Received date: 2004-01-09

Abstract The optical signals of wakes stimulated in laboratory are analyzed and calculated mainly by using MATLAB tools of filter, disperse Fourier transformation (DFT), and statistic semaphore managing etc. The optical semaphores with and without bubble film are much different on the point of energy. Filter can only be used to manage the signals as pretreatment which needs to be treated more in order to practice. Results of DFT under various pressures are different that provide a clew for estimating wakes of different speed and age. By Chirp z transformation, which can provide visual graphs and a proper way to manage graphs, it is possible to confirm the characteristic of optical signals for detecting ship wakes.

Keywords Wake; Optical signal; MATLAB; Signal management



Zhang Jiansheng was born in 1966. He graduated from Normal University of Shaanxi (NUX) in 1988 and received his master degree from Physics Department of NUX in 1991 and got his Ph. D. from Xi'an Institute of Optics and Precision Mechanics, Academy Sinica in 2001. He is currently a professor in Xi'an Institute of Technology. His research interests include SERS and optical engineering.