

小波分析在气泡幕散射光信号处理中的应用*

张建生^{1,2}, 林书玉¹, 苗润才¹, 杨万民¹

(1 陕西师范大学物理系, 西安 710062)

(2 西安工业学院数理系, 西安 710032)

摘 要:选取 Daubechies 小波对尾流气泡幕散射光信号做一维离散小波变换, 小波阶数为 3, 尺度数 Level 为 5, 得到了原始信号的小波分析和重构误差结果. 经 db3 小波分解, 散射光信号的低频及高频部分区别不大, 可能是信号采集频率过低($\times 10^{-1}$ s)导致的结果. 对原始信号进行小波分析容易得到均值、中值、模式、标准差等统计量. 通过对散射光信号进行一维平稳小波去噪、小波变换密度估计、小波系数选取等方面的分析, 揭示了不同压强下散射光信号具有不同的性质.

关键词:散射光; 信号处理; 小波; 尾流; 气泡幕

中图分类号: O439

文献标识码: A

文章编号: 1004-4213(2007)03-0557-8

0 引言

尾流的存在可能提供一种探测、跟踪、或识别产生尾流舰船的方法. 尾流中有特殊的声学、电学、磁学和光学特性、热学特性^[1-3]. 舰艇尾流的物理特性和几何结构特征可以作为水下航行体跟踪、识别和定位目标的重要信息源. 激光的波长比声波短得多, 它可探测到更微小的气泡, 因而利用光尾流自导将会提高目标的跟踪距离, 为鱼雷尾流自导提供一种新的理念. 光尾流制导鱼雷具有以下特点^[4-5]: 可实现水下攻击武器的远程非声探测和跟踪、提高尾流自导的作用距离、受海洋环境的影响小、对抗能力强、可用光尾流制导同时实现反舰和反潜的目的. 近年来, 国内不少人对尾流气泡幕光学性质的测试及光学信号的分析等进行了一些研究, 包括舰船尾流的光散射性质、消光特性、光尾流的数学物理模型等^[6]. 对尾流光学性质的分析中, 多采用现有的模型进行计算, 所得结果大同小异, 也有人在尝试用一些新的数学工具来处理光尾流信号^[7], 张建生等基于统计基础建立了尾流光学性质的数学物理模型^[8]. 本文选取 Daubechies 小波对尾流气泡幕散射光信号做一维离散小波变换, 得到原始信号的小波分析和重构的误差结果. 通过对散射光信号进行一维平稳小波去噪、小波变换密度估计、小波系数选取的分析, 表明不同压强下散射光信号具有不同的性质.

1 尾流气泡幕光学信号测量结果

为了研究尾流气泡、气幕的光学特性, 自行设计、配置了实验系统. 系统主要包括光源、气幕模拟器、信号接受以及数据采集装置(图 1). 图中

CTMH 表示微孔陶瓷管(Ceramic tube with micro-hole), 微孔陶瓷管的孔径平均约为 $2 \mu\text{m}$, 所产生的气泡直径约在 $300 \sim 1000 \mu\text{m}$ 之间.

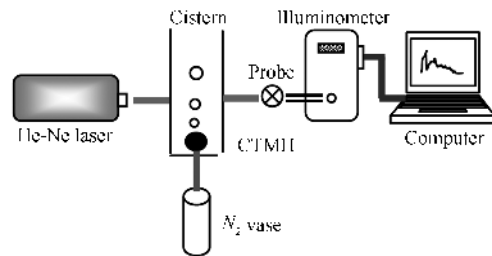


图 1 实验系统图

Fig. 1 Scheme of experiment

在不同气体压强下, 测量了激光透射及散射特性. 图 2 给出两个压强下散射光信号.

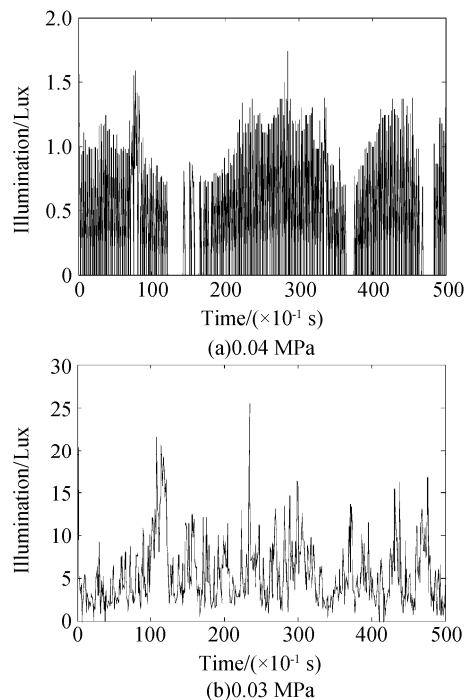


图 2 压强分别为 0.04 MPa, 0.03 MPa 气泡幕散射光照度随时间变化

Fig. 2 Scattering illumination with bubble film of N_2 pressure 0.04 MPa and 0.03 MPa

*国家自然科学基金(10274046)和武器装备预研基金(51448030101ZK1801)资助

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

收稿日期: 2005-12-06

2 小波分析简介

小波分析是建立在泛函分析、Fourier 分析、样条分析及调和分析基础上的新分析处理工具,又被称为多分辨分析.在时域和频域同时具有良好的局部化特性,常被誉为信号分析的“数学显微镜”^[9].近十年来,小波分析的理论和方法在信号处理、语音分析、模式识别、数据压缩、图象处理、数字水印、量子物理等专业和领域得到了广泛的应用^[10-11].

小波分析在工程应用中,一个重要的问题是最优小波基的选择问题,因为用不同的小波基分析同一个问题会产生不同的结果.常用的小波包括 Haar 小波、Daubechies (dbN) 小波、Mexican Hat (mexh) 小波、Morlet 小波等 10 余种.其中 Daubechies 小波是由世界著名的小波分析学者 Inrid Daubechies 构造的小波函数,一般简称为 dbN, N 是小波的阶数.

dbN 小波 $\psi(t)$ 和尺度函数 $\phi(t)$ 中的支撑区为 $2N-1$, $\psi(t)$ 的消失矩为 N .除 $N=1$ 外,dbN 不具有对称性(即非线性相位),没有明确的表达式,但转换函数 h 的平方模是很明确的.

令 $P(y) = \sum_{k=0}^{N-1} C_k^{N-1+k} y^k$, 其中, C_k^{N-1+k} 为二项式的系数,则有

$$|m_0(\omega)|^2 = (\cos^2 \frac{\omega}{2})^N P(\sin^2 \frac{\omega}{2})$$

式中, $m_0(\omega) = \frac{1}{\sqrt{2}} \sum_{k=0}^{2N-1} h_k e^{-jk\omega}$.

dbN 小波具有以下特点:1)在时域上是有限支撑的, $\psi(t)$ 长度有限,而且其高阶原点矩 $\int t^p \psi(t) dt = 0$, $p=0 \sim N$, N 值越大, $\psi(t)$ 的长度就越长;2)在频域上 $\psi(t)$ 在 $\omega=0$ 处有 N 阶零点;3) $\psi(t)$ 和其整数位移正交归一,即 $\int \psi(t) \psi(t-k) dt = \delta_k$;4)小波函数可由尺度函数求出来.尺度函数为低通函数,长度有限,支撑域在 $t=0 \sim (2N-1)$ 范围内. $\psi(t)$ 是 $\phi(2t)$ 的位移加权和

$$\psi(t) = \sum_k g_k \phi(2t-k)$$

k 值为 $2 \sim 2N-1$, N 值不同,权重 g_k 也不同.

3 db3 小波变换对尾流散射光信号分析结果

3.1 尾流散射光信号的小波分解

实验取得尾流气泡幕散射光信号为一维离散信号,选用三阶 Daubechies 小波 (db3) 对图 2 原始信

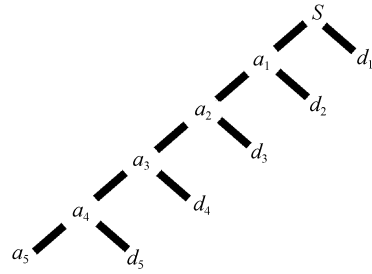


图 3 散射光信号小波分解

号做一维离散小波变换,对原始散射光信号 S 进行 5 层小波分解,分解示意图如图 3.将信号表示为各层高频部分及低频部分之和,即

$$S = a_1 + d_1 = a_2 + d_2 + d_1 = a_3 + d_3 + d_2 + d_1 = a_4 + d_4 + d_3 + d_2 + d_1 = a_5 + d_5 + d_4 + d_3 + d_2 + d_1$$

图 4 给出 S 及小波分析和重构误差结果.图中最上面为原始散射光信号 S , $a_1 \sim a_5$, $d_1 \sim d_5$ 为原始信号分解而得到的各层信号,各层的重构误差为原始信号 S 与各层小波重构所得信号之差.各图均为线性坐标,原始信号单位为 Lux(纵坐标),横坐标为时间轴 ($\times 10^{-1}$ s).重构误差用 $e-an$ ($n=1, 2, 3, 4, 5$) 表示.

显然,db3 小波分解后,尾流气泡幕散射光信号的低频及高频部分并无明显区别,这可能是由于信号的采集频率过低 ($\times 10^{-1}$ s) 产生的结果.从这一分析过程至少可以肯定,用小波分析能够对尾流气泡幕散射光信号进行处理.从重构误差图容易看出,各层分解基本将信号的高频及低频部分分隔开来,这可从分解的三列图中清楚地看到.虽然对重构误差并没有作出定量估计,但在一定意义上反映了利用小波对尾流气泡幕散射光信号进行分析和处理是有意义的.

除小波分析及重构误差之外,可直接得到原始信号的统计结果,给出均值、中值、模式、标准差等统计量,分别为:(a)均值 0.4703、中值 0.495、模式 0.476、最大值 1.36、最小值 0.00、范围 (range) 1.36、标准差 (standard deviation) 0.2301、中值绝对误差 0.105、均值绝对误差 0.1621;(b)均值 5.451、中值 4.513、模式 3.264、最大值 21.58、最小值 0.845、范围 (range) 20.73、标准差 (standard deviation) 3.485、中值绝对误差 1.885、均值绝对误差 2.656,可以想象,通过统计量也可从一个侧面反映尾流散射光信号的特性.

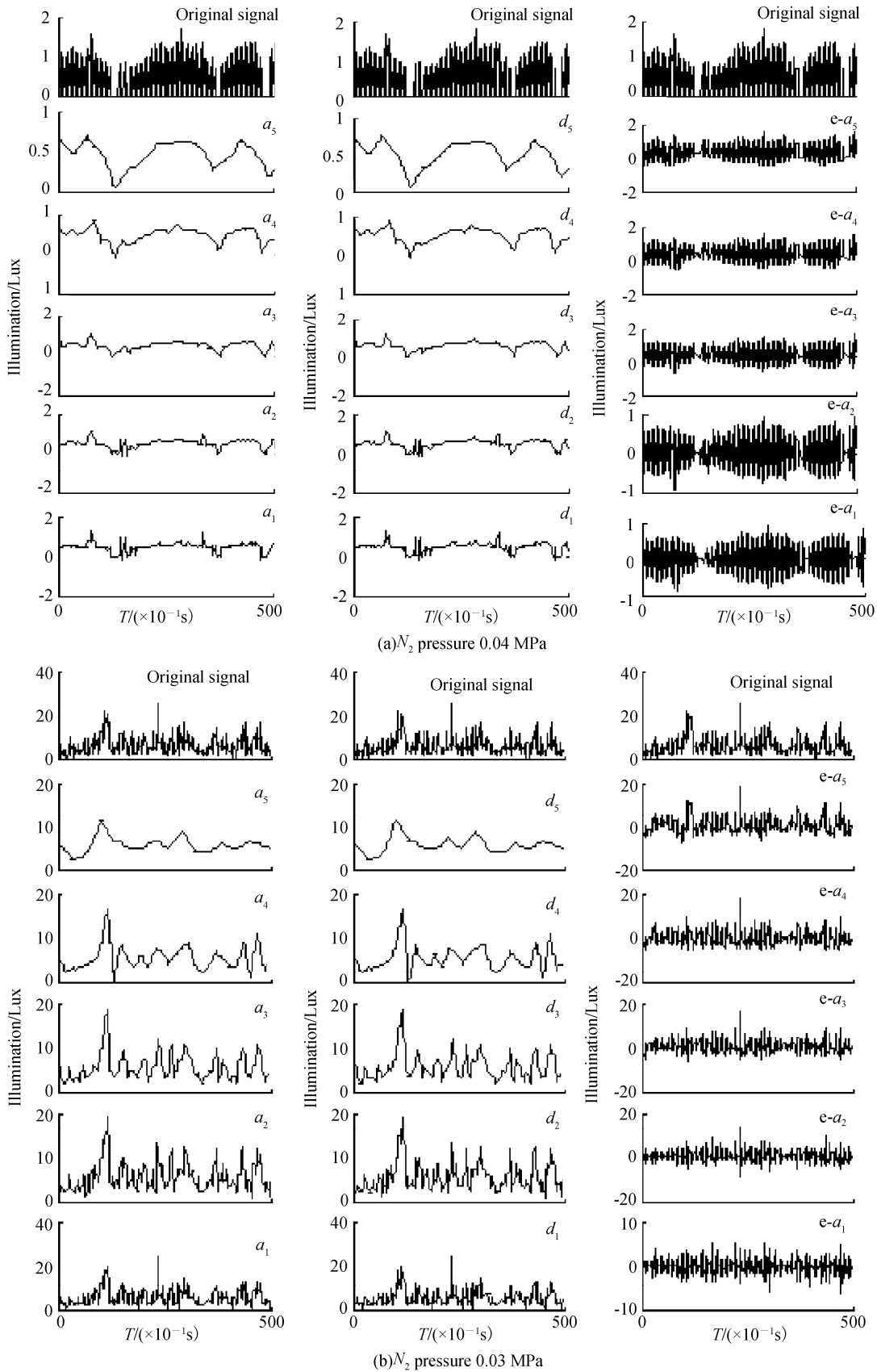


图 4 不同压强下散射光信号小波分解及重构误差
 Fig. 4 Wavelet decomposition and reconfiguration deviation of scattering illumination of different pressure

3.2 一维平稳小波去噪

针对两个压强下的散射光信号,进行固定软阈值一维平稳小波 (Stationary Wavelet

Transformation, SWT)去噪处理. 为了更清楚地观察去噪结果,选择基本小波 db3,尺度数 Level 为 2,进行小波分解,噪音结构选择尺度未知的白噪音,确

定两种情况下的阈值分别为 0.105 和 5.009 (两层阈值相同), 得到如图 5、图 6 所示的信号关系. 图中同时绘出原始信号图 5(a)、图 6(a)、去噪信号图 5(b)、图 6(b)、信号残差图 5(c)、图 6(c) 及 db3 小波

的两层分解系数图, 近似系数图 5(d)、图 6(d), 细节系数图 5(e)、图 5(f)、图 6(e)、图 6(f) 和去噪后的系数图, 近似系数图 5(g)、图 6(g), 细节系数图 5(h)、图 5(i)、图 6(h)、图 6(i).

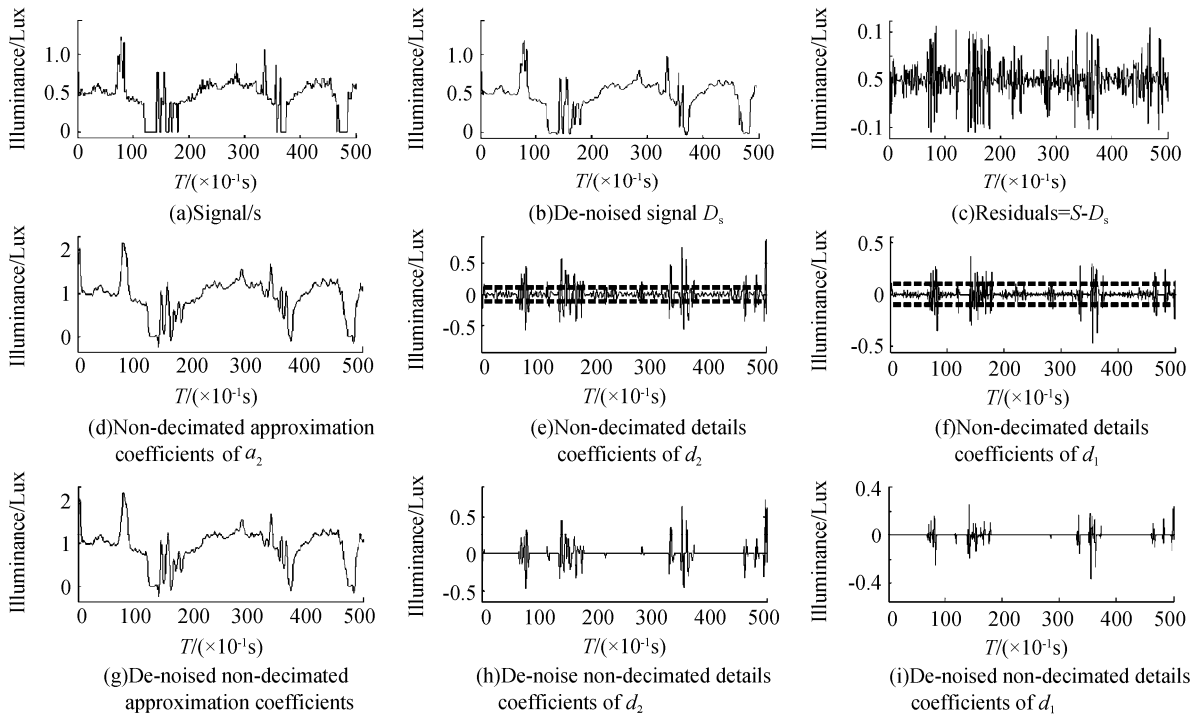


图 5 一维平稳小波 (db3) 去噪, N_2 压强 0.04 MPa

Fig. 5 One dimension SWT (db3) de-noising of N_2 pressure 0.04 MPa

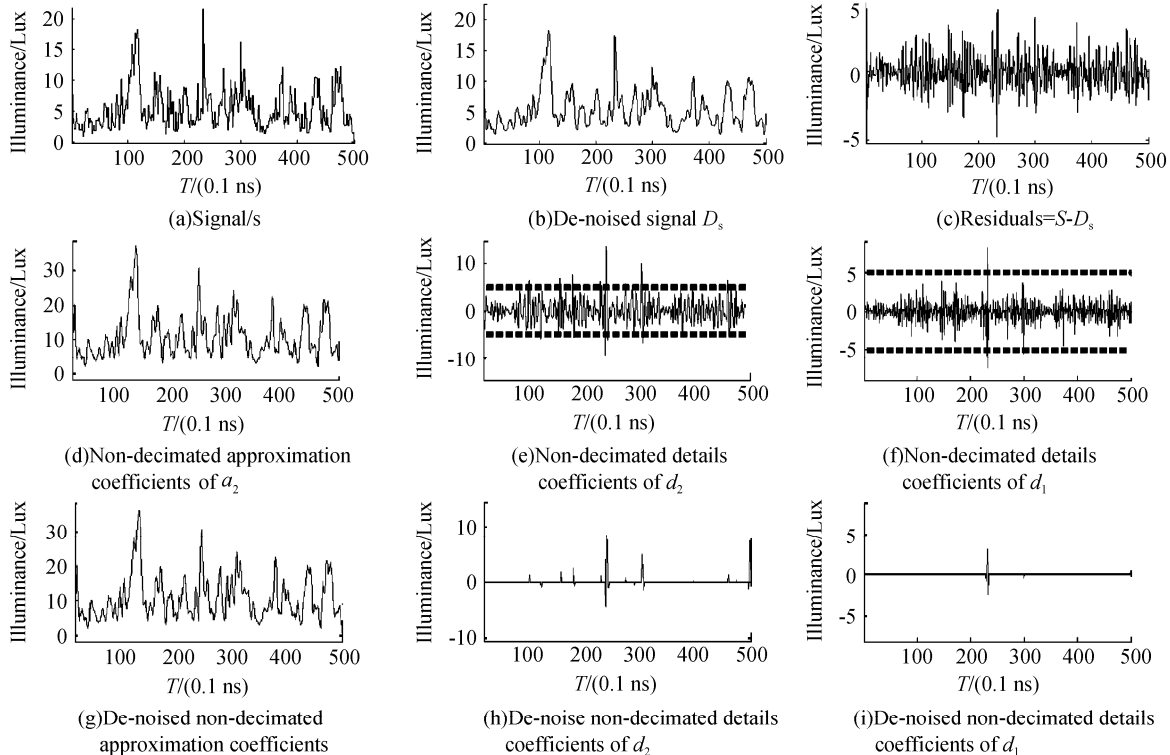


图 6 一维平稳小波 (db3) 去噪, N_2 压强 0.03 MPa

Fig. 6 One dimension SWT (db3) de-noising of N_2 pressure 0.03 MPa

从图 5、图 6 的去噪信号不难看出, 不同压强下去噪信号保留了原始信号能量的绝大部分, 不同压

强下有相似的残差信号. 经 db3 分解后低频信号保留了原始信号的轮廓, 高频信号包含着白噪音, 去噪

后高频信号保留的能量份额很少.

取柱条数为 125, 经过直方图划分处理后的数据进行小波分解. 选取基本小波 db3, 尺度数 Level

3.3 一维小波变换密度估计

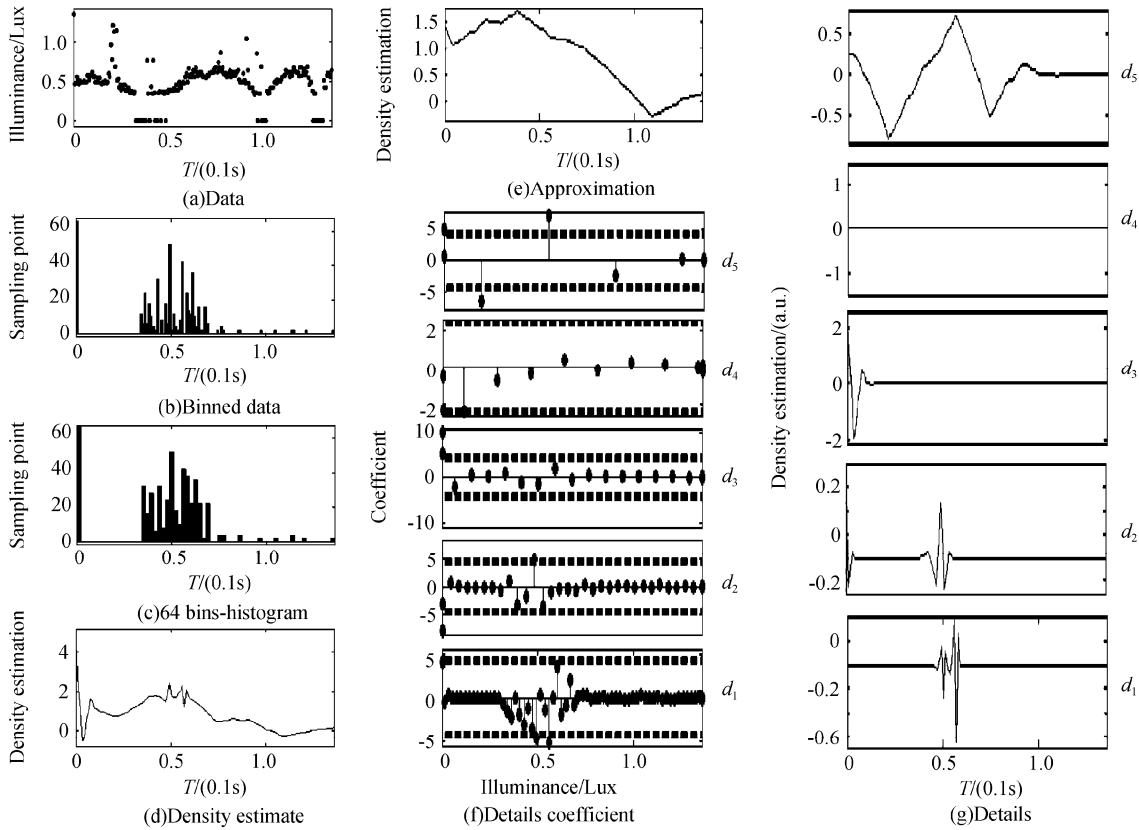


图 7 一维小波 (db3) 变换密度估计, N_2 压强 0.04 MPa

Fig. 7 One dimension wavelet (db3) transformation density estimation of N_2 pressure 0.04 MPa

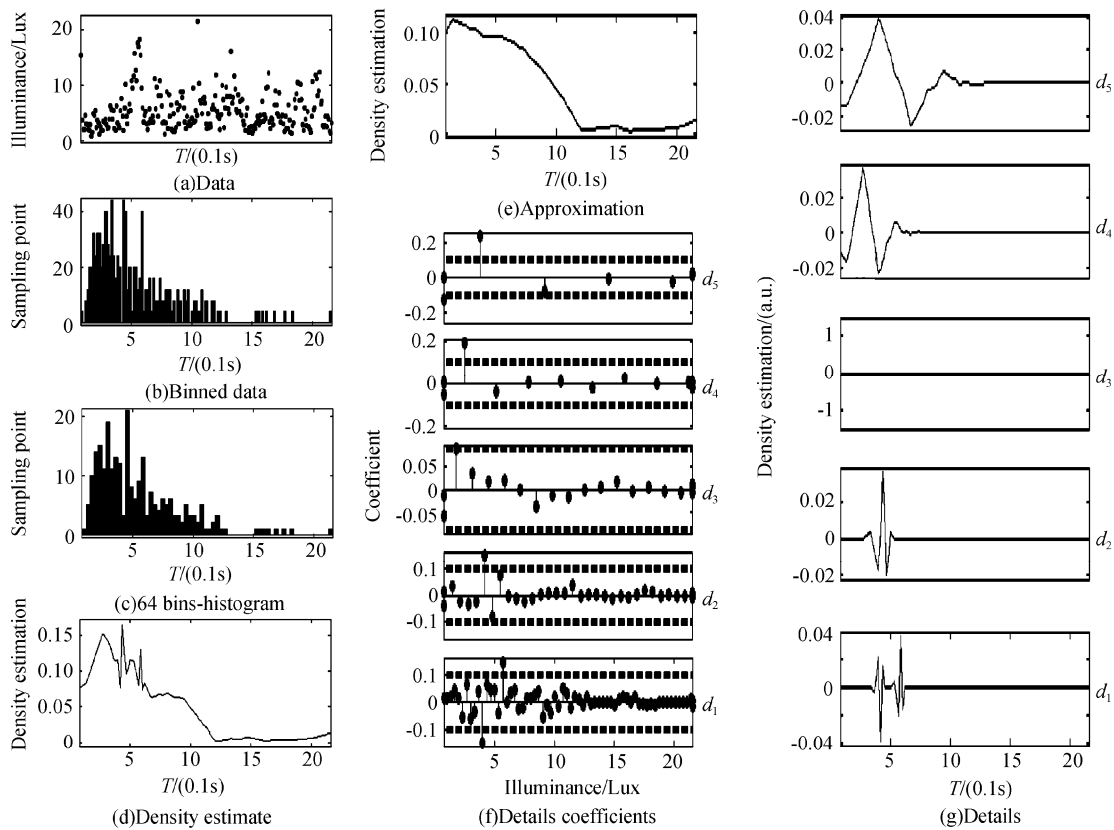


图 8 一维小波 (db3) 变换密度估计, N_2 压强 0.03 MPa

Fig. 8 One dimension wavelet (db3) transformation density estimation of N_2 pressure 0.03 MPa

为 5. 采用全局软阈值,对于压强为 0.04 MPa 的情形,各层(5~1)阈值为 4.313、2.363、4.313、4.313、4.313;对于压强为 0.03 MPa 的情形,各层(5~1)阈值为 0.101、0.101、0.088、0.101、0.101. 估计结果如图 7、图 8. 图 7、图 8(a)为阈值估计的原始数据点状图,其横坐标为时间(0~500,0.1s), (b)、(c)、(d)分别为经直方图划分处理后的压缩信号、64 条柱状图和密度估计图. 图 7、图 8(e)为小波分解的近似信号分布. 图 7、图 8(e)是小波分解的各层系

数;(f)是小波分解的各层细节信号.

比较两个压强下经直方图划分处理后的信号(BD, Binned data),以及密度估计结果图线,区别明显,二者在细节、细节系数方面也有差别,这或许为识别不同压强下的气泡幕信号提供了有用线索.

3.4 一维小波系数选取

互关联;高频系数全部选择,即各层系数原始数和保留数相等,分别为(5~1):20、20、35、66、128、252. 不同压强下的系数选择结果如图 9. 图 9(a)对

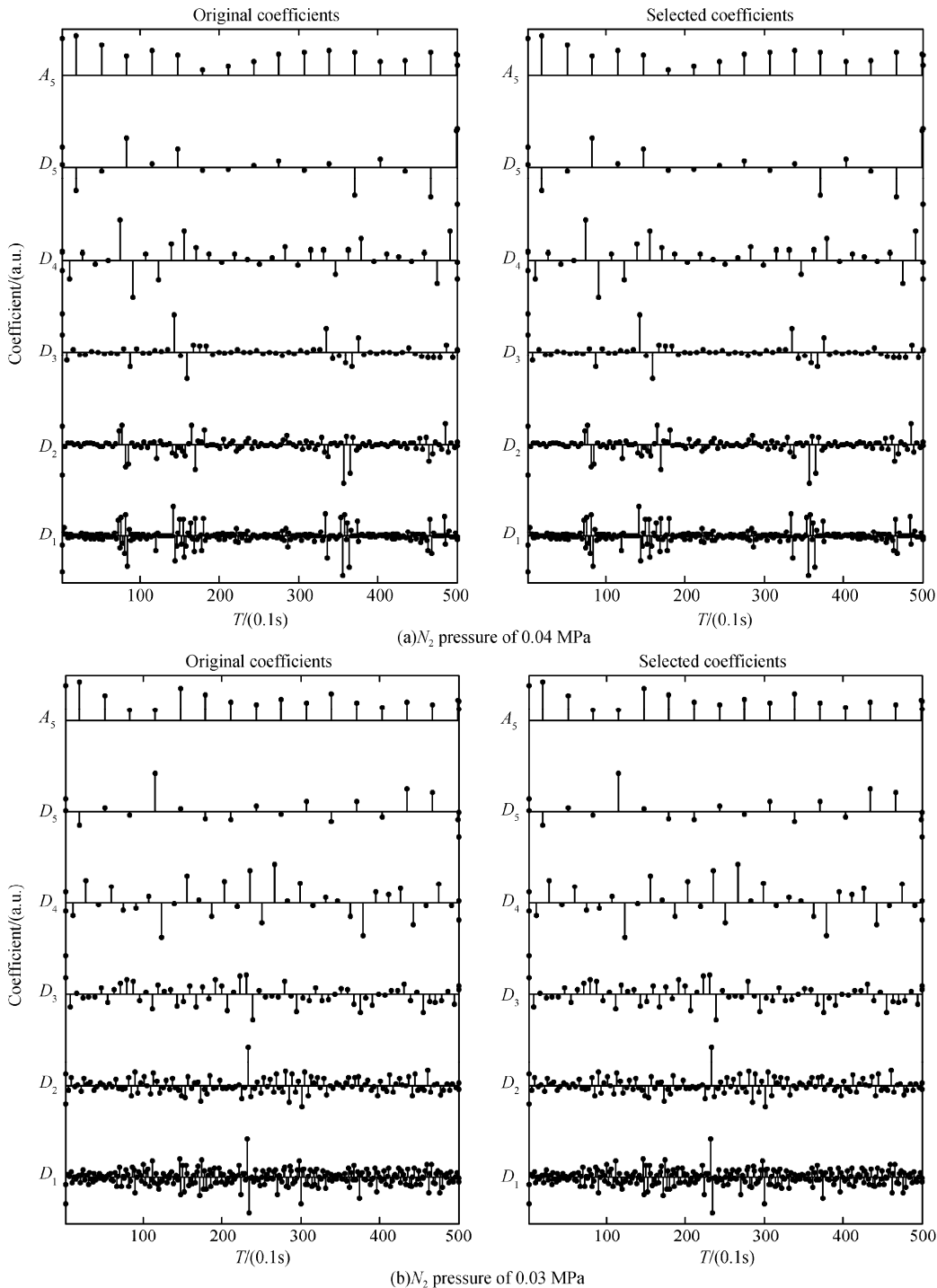


图 9 一维小波(db3)系数选取

Fig. 9 One dimension wavelet (db3) coefficient selection

应于氮气压强 0.04 MPa, (b) 对应于氮气压强 0.03 MPa) 的 D_1 、 D_2 、 D_3 、 D_4 、 D_5 表示原始小波系数(左列)与选择的小波系数(右列)。

图 9 显示, 不同压强下低频信号的原始系数基本相同, 体现了不同压强下散射光信号的共同点; 各层高频信号的原始系数均存在明显区别, 可从各层系数的分布得到不同压强下散射光信号的特征所在。

关于尾流光学特性的研究尚属起步阶段, 对尾流光学性质的认识还远未达到实际应用的要求。小波分析理论日渐完善, 应用愈来愈广泛, 用小波分析来处理尾流散射光信号在不同尾流特征的提取方面或许能够提供有用线索。

4 分析讨论

选取基本小波 db3, 对不同压强下尾流气泡幕散射光信号进行的分解及分析表明, 经 db3 小波分解后, 尾流气泡幕散射光信号的低频及高频部分并无明显区别, 这可能是由于信号的采样频率过低产生的结果。通过一维平稳小波去噪处理, 气泡幕散射光信号分解的低频及高频成分表现出直观的差异。可以预计, 采样频率会影响分解信号的低频及高频成分, 随着信号采样频率的提高, 分解信号的低频及高频成分将呈现出显著差异。在对原始信号进行小波分析的同时, 容易得到其统计量和压缩信号, 并可直观地得到压缩信号中保留的原始信号的能量百分比及小波变换置 0 系数的百分比。通过对散射光信号进行一维平稳小波去噪、一维小波变换密度估计、一维小波系数选取等方面的分析, 揭示了不同压强下散射光信号具有不同的性质。经一维平稳小波去噪处理, 表明不同的散射光信号有相似的残差信号。经全局软阈值一维小波变换密度估计, 可直观地比较不同散射光信号的 BD 信号, 同时重构细节信号、细节系数的差异必然包含着不同散射光信号的特征因素。不同压强下散射光信号具有不同的原始小波系数和选取的小波系数。这些分析表明, 经小波分析, 可以提取出散射光信号的共性, 也可以直观地展示散射光信号的区别, 这为不同情况下尾流的识别提供了有意义的线索和方法。

致谢 感谢西安工业学院数理系张国华教授对本文的指导。

参考文献

[1] JI Bang-jie, ZHOU De-shan, ZHANG Jian-sheng. Guided torpedo based on ship wakes' optical specialty [J]. *Torpedo Technology*, 2000, **8**(3): 29-31.
冀邦杰, 周德善, 张建新. 基于舰船尾流光效应的制导鱼雷[J].

鱼雷技术, 2000, **8**(3): 29-31.

- [2] CUI Xu-sheng. Actuality and trend of torpedo weapon development in recent years[J]. *Torpedo Technology*, 1997, **5**(1): 1-4.
崔绪生. 近年来世界鱼雷武器发展现状及走向[J]. 鱼雷技术, 1997, **5**(1): 1-4.
- [3] ZHOU De-shan, WANG Ming-zhou, JI Bang-jie, et al. Consideration on the development of homing torpedo [J]. *Torpedo Technology*, 2000, **8**(3): 29-31.
周德善, 王明洲, 冀邦杰, 等. 发展自导鱼雷的思考[J]. 鱼雷技术, 2000, **8**(3): 29-31.
- [4] ZHANG Jian-sheng, LIU Jian-kang, JI Bang-jie, et al. Optical specialty of real wakes[J]. *Acta Photonica Sinica*, 2002, **31**(10): 1284-1288.
张建新, 刘建康, 冀邦杰, 等. 真实尾流的光学特性[J]. 光子学报, 2002, **31**(10): 1284-1288.
- [5] ZHANG Jian-sheng, LIU Jian-kang, JI Bang-jie, et al. Mathematical model for the optical specialty of bubble film in ship wakes[J]. *Acta Photonica Sinica*, 2002, **31**(8): 1032-1036.
张建新, 刘建康, 冀邦杰, 等. 尾流气泡幕光学特性的数理模型[J]. 光子学报, 2002, **31**(8): 1032-1036.
- [6] ZHANG Jian-sheng, WANG Hao, JI Bang-jie, et al. Possible optical specialties used for torpedo self-guiding in wakes[J]. *Torpedo Technology*, 2002, **10**(3): 27-31.
张建新, 王浩, 冀邦杰, 刘娟. 有可能用于鱼雷尾流自导的某些光学特征[J]. 鱼雷技术, 2002, **10**(3): 27-31.
- [7] ZHANG Jian-sheng, HE Jun-hua, JI Bang-jie, 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.
- [8] ZHANG Jian-sheng. The development and measurement of ship wake optical specialty[D]. Xi'an: Xi'an Institute of Optics and Precision Mechanics, Chinese Academy of Science, 2001.
张建新. 尾流光学特性的研究与测量[D]. 西安: 中国科学院西安光学精密机械研究所博士论文, 2001.
- [9] Feisi technological product investigating center. Wavelet analysis theory and MATLAB7 actualization[M]. Beijing: Publishing House of Electronics Industry, 2005: 123-270.
飞思科技产品研发中心编著. 小波分析理论与 MATLAB7 实现[M]. 北京: 电子工业出版社, 2005: 123-270.
- [10] GU Wei, HE You-sheng, HU Tian-qun. Velocity fluctuation in the cavitating wake and its wavelet analysis[J]. *Journal of Hydrodynamics*, 2001, **A16**(2): 239-246.
顾巍, 何友声, 胡天群. 空泡尾流场中的速度脉动与小波分析[J]. 水动力学研究与进展, 2001, **A16**(2): 239-246.
- [11] YAN Long, HE Yong-long, SONG Yong-ping, et al. Wavelet analysis on pressure wave in fuel injection system of diesel engine[J]. *Journal of Luoyang Institute of Technology*, 2001, **22**(3): 36-39.
颜龙, 何勇灵, 宋永平, 等. 柴油机供油系统中压力波信号的小波分析[J]. 洛阳工学院学报, 2001, **22**(3): 36-39.

Wavelet Analysis on Managing of Scattered Optical Semaphore from Bubble Films

ZHANG Jian-sheng¹, LIN Shu-yu¹, MIAO Run-cai¹, YANG Wan-min¹

(1 *Physics department, Shaanxi normal university, Xi'an 710062, China*)

(2 *Math-physical department, Xi'an Institute of Technology, Xi'an 710032, China*)

Received date: 2005-12-06

Abstract: The wavelet analysis and reconfiguration deviation are gotten by use of five level third Daubechies (db3) wavelet decomposition (db3WD) of one dimension DWT (Disperse Wavelet Transformation) on dispersive scattering signal of wakes. Results of db3WD show that the low and high frequency section have little difference possibly due to the lowness of collection frequency ($\times 10^{-1}$ s). Along the wavelet analysis on original semaphore, one can get the homologous statistics such as mean, median, mode and standard deviation etc. One dimension SWT (Stationary Wavelet Transformation) de-noising, density estimation, and coefficient selection are carried out on the scattered signal.

Key words: Scattered light; Signal processing; Wavelet; Wake; Bubble film



ZHANG Jian-sheng was born in 1966. He graduated from Shaanxi Normal University (SNNU) in 1988 and received his master's degree from Physics Department of SNNU in 1991 and got his Ph. D. from Xi'an Institute of Optics and Precision Mechanics, Academia Sinica in 2001. He is currently a professor in Xi'an Institute of Technology, and postdoctor of SNU. His research interests include acoustics, magnetic material, SERS and optical engineering.