

文章编号: 1001-3806(2011)04-0468-04

小波阈值去噪在尾流散射光信号处理中的应用

万俊, 张晓晖*, 饶炯辉

(海军工程大学 兵器工程系, 武汉 430033)

摘要: 为了从噪声背景中有效地提取舰船尾流后向散射光信号, 采用4阶 Daubechies 小波对采集的信号进行了1维离散小波变换, 将主要包含目标船后向散射光信号的低频部分和主要包含噪声的高频部分区别开来, 使用阈值函数进行小波系数处理。在小波软硬阈值去噪方法的基础上, 提出了一种新的阈值函数。该阈值函数克服了硬阈值函数值不连续的问题和软阈值函数存在恒定偏差的问题, 同时引进了度量数据分布稀疏性的熵值作为阈值函数的参量。结果表明, 新的阈值函数不仅滤除了原信号中高频部分包含的噪声, 还弥补了软硬阈值函数的不足, 收到了良好的效果。

关键词: 散射; 舰船尾流探测; 小波变换; 熵

中图分类号: TN911.72 **文献标识码:** A **doi:** 10.3969/j.issn.1001-3806.2011.04.008

Application of wavelet threshold de-noising in scattering optical wake flow signal processing

WAN Jun, ZHANG Xiao-hui, RAO Jiong-hui

(Department of Weapon Engineering, Naval University of Engineering, Wuhan 430033, China)

Abstract: For effectively detecting the backscattering optical wake flow signal from the noise, the collected original signal was transferred into one dimension discrete wavelets based on four Daubechies wavelet decomposition (db4WD) so that the low frequency term, indicating the backscattered signal from the shake waves, was distinguished from the high frequency terms, indicating noise. Then, the wavelet coefficients were obtained based on the threshold function. A new threshold function was put forward on the basis of wavelet soft and hard threshold de-noising method with entropies indicating the sparsity distribution of the original signal data. The new function can not only overcome discontinuity disadvantage of the hard threshold function, but also solve constant deviation in the soft threshold function. The new threshold function can effectively eliminate noise and overcome the disadvantage of soft and hard threshold function so that good results can be obtained.

Key words: scattering; ship wake detection; wavelet transform; entropy

引言

舰船在航行过程中, 由于螺旋桨空化、舰船壳体侧壁与水体摩擦、水中所溶空气或舰船运动时卷入水中的空气因搅动而破碎等因素的影响, 不可避免地在其尾部产生一个包含大量不同尺寸气泡的区域, 称为舰船气泡尾流^[1]。如果能对舰船航行时产生的气泡尾流进行探测和跟踪, 则可以为鱼雷等水下对舰武器提供一种新的自导手段。与声波相比, 光波的波长短、速度高, 在海水中传播方向性好, 对尾流中的气泡非常敏感, 所以相对于声尾流自导等其它尾流制导方式, 激光尾流自导技术有着探测精度高、响应速度快的特点, 尤其是当前已出现大量对抗声尾流自导鱼雷的防御技术

情况下, 对激光尾流自导技术的研究就更显重要。目前, 已有不少学者在该领域取得了一定的研究成果^[2-4]。激光对舰船尾流进行探测主要分为前向散射探测和后向散射探测。虽然前向散射探测的散射光信号较强、探测概率高, 但要求探测系统必须位于尾流区内, 限制了系统的探测范围; 而后向散射探测方法可实现对舰船尾流的远距离探测, 且易于在鱼雷上实现, 是目前对舰船光尾流探测的主要研究方向。

后向光尾流自导的主要工作是对舰船尾流气泡的后向散射光进行探测识别, 而在探测过程中, 不可避免地会受到水体后向散射、固体悬浮颗粒散射以及探测系统自身噪声等影响。为使系统能在噪声干扰下正确地探测并识别目标尾流, 需要首先对舰船尾流后向散射光信号进行去噪滤波预处理。传统的滤波方法是含噪信号通过设计的滤波器, 滤出噪声频率部分^[5]。但尾流后向散射激光脉冲信号作为瞬态、非平稳信号, 使用传统的滤波方法具有一定的局限性。小波变换是

作者简介: 万俊 (1985-), 男, 博士研究生, 现主要从事激光探测舰船尾流及其信号处理的研究。

* 通讯联系人。E-mail: zhangxiaohui505@vip.sina.com

收稿日期: 2010-10-12; 收到修改稿日期: 2010-11-04

20世纪80年代提出的一种时频分析方法,已在信号分析、图像分析等领域得到了迅速发展。小波分析方法具有多分辨率分析的特点,在时域和频域都具有表征信号局部特征的能力,能反映信号的细微变化^[6]。DONOHO和JOHNSTONE又在小波变换的基础上提出了小波阈值去噪的概念,此后该方法在去噪方面得到了广泛的应用^[7]。小波阈值去噪方法非常适合用于对尾流后向散射激光脉冲信号进行滤波去噪,作者在Donoho阈值去噪理论上,结合熵理论提出了一种新的阈值函数,克服了以往阈值函数的不足,更加有利于噪声的滤除。

1 信号的小波分解与重构

尾流后向散射光信号的噪声包括水体后向散射、固体悬浮颗粒散射等,一般认为这些噪声均为加性噪声。因此,设含噪信号为:

$$f(t) = s(t) + n(t) \quad (1)$$

式中, $s(t)$ 为原始信号, $n(t)$ 为方差 σ^2 的 Gaussian 白噪声,服从 $N(0, \sigma^2)$ 。对1维连续信号进行采样,得到 N 点离散信号 $f(n)$, ($n=1, 2, \dots, N$)。其小波变换为:

$$W_f(j, k) = 2^{-\frac{j}{2}} \sum_{n=0}^{N-1} f(n) \psi(2^{-j}n - k) \quad (2)$$

式中, $\psi(2^{-j}n - k)$ 为小波函数, $W_f(j, k)$ 为原始信号的小波系数,通常在实际应用中,使用MALLAT算法来实现小波变换^[8-9]:

$$\begin{cases} S_f(j+1, k) = S_f(j, k) * h(j, k) \\ W_f(j+1, k) = W_f(j, k) * g(j, k) \end{cases} \quad (3)$$

式中, h 和 g 分别是尺度函数 $\varphi(x)$ 和小波函数 $\psi(x)$ 对应的低通和高通滤波器, $S_j(0, k)$ 为原始信号 $f(k)$, $S_f(j, k)$ 为尺度系数。相应地,重构公式为:

$$\begin{aligned} S_f(j-1, k) &= S_f(j, k) * h'(j, k) + \\ &W_f(j, k) * g'(j, k) \end{aligned} \quad (4)$$

由小波变换的线性性质可知 $f(t) = s(t) + n(t)$ 的离散采样信号 $f(n)$ 经小波变换后,其小波系数 $W_f(j, k)$ 仍由两部分组成。其中,一部分是信号对应的小波系数 $W_s(j, k)$,另一部分是噪声对应的小波系数 $W_n(j, k)$ 。

2 Donoho小波阈值去噪原理

DONOHO提出的小波阈值去噪方法^[10-12]分为以下3个步骤:(1)对信号 $f(k)$ 作小波变化,得到一组小波系数 $W_f(j, k)$;(2)对 $W_f(j, k)$ 进行阈值处理,得到修正后的系数值 $W_f'(j, k)$;(3)利用 $W_f'(j, k)$ 进行小波反变换,重构信号 $f'(k)$ 作为去噪后的信号。

阈值去噪的关键步骤是第2步阈值处理,Donoho小波阈值处理的基本思想是当 $W(j, k)$ 小于某个临界

阈值时,认为这时的小波系数主要是由噪声引起的,予以舍弃。当 $W(j, k)$ 大于这个临界阈值时,认为这时的小波系数主要是由信号引起的,则把这一部分 $W(j, k)$ 的保留下来,即硬阈值方法:

$$w_{j,k}' = \begin{cases} w_{j,k}, & (|w_{j,k}| \geq \lambda) \\ 0, & (|w_{j,k}| < \lambda) \end{cases} \quad (5)$$

或者按某一个固定量向零收缩,即软阈值方法:

$$w_{j,k}' = \begin{cases} \text{sgn}(w_{j,k}) (|w_{j,k}| - \lambda), & (|w_{j,k}| \geq \lambda) \\ 0, & (|w_{j,k}| < \lambda) \end{cases} \quad (6)$$

DOHONO从理论上严格证明了非线性软阈值为:

$$\lambda = \sigma \sqrt{2 \log_2 n} \quad (7)$$

式中, n 为信号长度, σ 为信号标准方差。实际中噪声强度是未知的,尺度估计为:

$$\sigma = \text{median}(|X|) / 0.6745 \quad (8)$$

硬、软阈值方法虽然在实际上得到了广泛的应用,也取得了较好的效果,但算法本身存在着不足。硬阈值函数在整个小波域内是不连续的,在 λ 和 $-\lambda$ 存在间断点,信号重构时易产生Pseudo-Gibbs现象。而且它只对小于阈值的小波系数进行处理,对大于阈值的小波系数不加处理,这与实际情况下大于阈值的小波系数中也存在噪声信号的干扰不相符。虽然软阈值函数在小波域内是连续的,不存在间断点问题,同时也对大于阈值的小波系数进行处理,但是软阈值函数对大于阈值的小波系数采取恒定值压缩,使得 $W(j, k)$ 改变前后总是存在着恒定的偏差,这与噪声分量随着小波系数增大而逐渐减小的趋势不相符,将影响重构信号与原始信号的逼近程度,给重构信号带来误差,因此需要对方法进行改进,构造新的阈值函数。

在实际工程应用中,通常原信号多为super-Gaussian分布的,或者说是属于稀疏分布的,所谓super-Gaussian分布是指概率密度函数分布的稀疏性大于Gaussian密度函数的分布。而与信号成分相比,噪声则非稀疏分布。稀疏性的概念来自信息论,一般采用熵测度来量化分布的稀疏性,与之相对应的是均匀性。熵值越小,说明分布越稀疏,均匀性则越差。而稀疏分布并没有一个定量的定义,通常是指概率密度函数在零点处存在一个尖峰的分布^[13]。作者研究的舰船尾流后向散射光信号也是服从super-Gaussian分布的,所以,为了克服软硬阈值方法的不足,作者结合熵理论构造一个新的阈值函数。

3 熵的概念与新的阈值函数

熵是物质系统状态的一个函数^[14]。它表示系统的紊乱程度,是系统的无序状态的量度,经过对原始采

样信号计算而得到的熵值反映了分布的稀疏性。根据信息熵的定义与原理,当系统可能处于几种不同状态,每种状态出现的概率为 $p_i (i = 1, 2, \dots, m)$ 时,系统的熵为:

$$E = - \sum_{i=1}^m p_i \log_2 p_i \quad (9)$$

规定当 $p_i = 0$ 时, $p_i \log_2 p_i = 0$ 。由系统熵的计算公式可以看出,当系统可能处于几种状态的概率相等时,即 $p_i = 1/m$ 时,系统熵值最大,即:

$$E(p_1, p_2, \dots, p_m) \leq E\left(\frac{1}{m}, \frac{1}{m}, \dots, \frac{1}{m}\right) = \log_2 m \quad (10)$$

对后向散射光信号的采样获得 N 个采样值,将这 N 个

$$w_{j,k}' = \begin{cases} w_{j,k} - \lambda \operatorname{sgn}(w_{j,k}) \exp[-(\log_2 m - H)(|w_{j,k}| - \lambda)], & (|w_{j,k}| \geq \lambda) \\ 0, & (|w_{j,k}| < \lambda) \end{cases} \quad (12)$$

该阈值函数在小波域内是连续的,无间断点。对于大于阈值的小波系数也进行处理,且随着小波系数的不断增大, $w_{j,k}'$ 逐渐逼近 $w_{j,k}$, 这与噪声分量随着小波系数增大而逐渐减小的趋势相符,克服了软硬阈值函数的不足。并且新阈值函数引入了可以度量采样值分布稀疏性的熵值作为参量,式中 $(\log_2 m - H)$ 也体现了阈值函数对小波系数的处理量与熵值之间的关系。

4 试验结果与分析

作者所在的教研室长期从事舰船尾流激光探测方面的研究,并多次在北海某海域进行了海洋环境下的舰船尾流探测试验,得到大量试验数据。所设计的基于后向散射的舰船气泡尾流激光探测试验样机的组成如图 1 所示,海上试验方法如图 2 所示,试验样机被安装在自行设计的水下平台上,平台置于海底,距海面约 10m,目标船从样机的正上方驶过,样机垂直向上发射激光并接收后向散射光信号。激光探测试验样机通过同步触发来控制激光器向目标船的气泡尾流发射超短

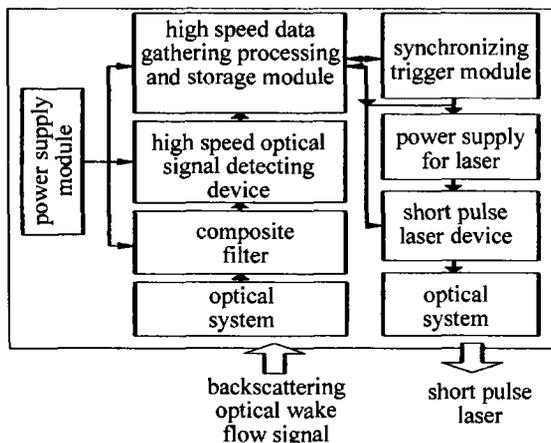


Fig. 1 Experimental setup

采样值所涵盖的区间划分为 m 等分。统计 N 个采样值在这 m 个区间中的个数并除以 N 作为某一状态出现的概率,将其记为 $p_i (i = 1, 2, \dots, m)$ 。则量化本次采样值分布的熵定义为:

$$H = - \sum_{i=1}^m p_i \log_2 p_i \quad (11)$$

规定当 $p_i = 0$ 时, $p_i \log_2 p_i = 0$ 。前面已经论述原始信号大多属于稀疏分布,噪声则非稀疏分布。并且熵值越小,说明采样值分布越稀疏,噪声成分越少。因此,阈值函数对小波系数的处理应随着熵值的增加而增加。根据前面对软硬阈值函数的分析以及对熵值的计算与分析,作者提出一种新的阈值函数:

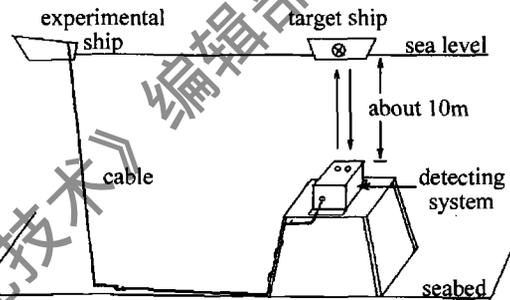


Fig. 2 The schematic plan of an offshore experiment

脉宽(小于 10ns)、高峰值功率(大于 10MW)的脉冲激光,该激光脉冲在向上传输的过程中将历经海水和目标船气泡尾流的散射,其中的后向散射光信号可被接收光学系统收集到高速光电探测器上转换成电信号,高速数据采集模块将此电信号数字化,由此获得激光脉冲从发射光学系统输出到传输至目标船尾流这个过程中的所有后向散射光光强信号^[15]。

由于激光探测系统通常与目标舰船尾流间存在一定的距离,所以探测获得的信号相当一部分是海水的后向散射光信号,其光强随着传输距离呈指数衰减,在波形图上所出现“负峰”信号,同时包含了海水后向散射光信号和目标船气泡尾流的后向散射光信号(因为试验使用的光电探测器是负电平有效,所以当目标船尾流导致后向散射光信号增强时会出现“负峰”),此外,该信号中还包含了杂散光以及探测系统自身噪声等信号。试验使用高速数据采集模块对光电探测器的输出信号以 0.2ns 的间隔取样,一次获得 2500 个数据,目标船以 24kn 的速度驶过探测样机上方 6s 后的数据如图 3 所示。原始信号包含大量噪声,水体的后向散射光信号与尾流后向散射光信号部分叠加在一起,选用 4 阶 Daubechies 小波分别使用软硬阈值方法对原始数据进行处理,得到的结果如图 4、图 5 所示。使用本文中提出的阈值函数处理原始数据,将原始数

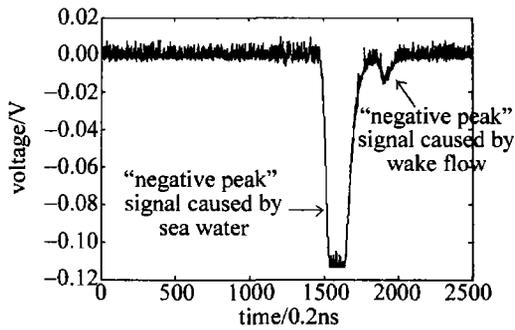


Fig. 3 Detected data of the 6s wake flow

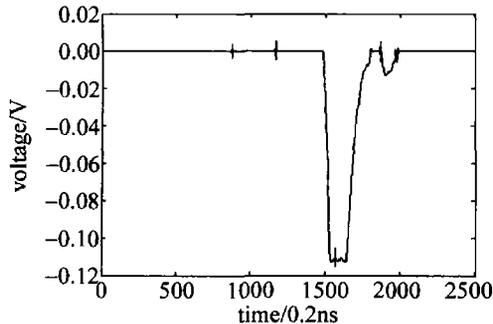


Fig. 4 Processing result with wavelet hard-threshold method

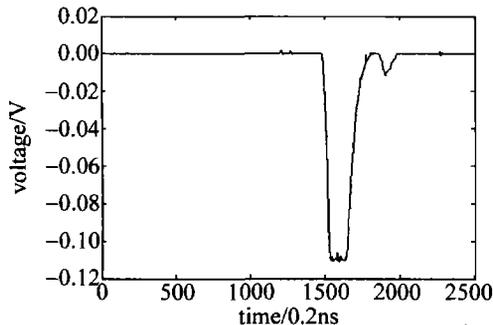


Fig. 5 Result with wavelet soft-threshold method

据划分为 240 等分区间,以求取某一状态出现的概率,并进一步求取熵值。使用 Dohono 在理论上证明了的阈值作为比较阈值,得到的结果如图 6 所示。

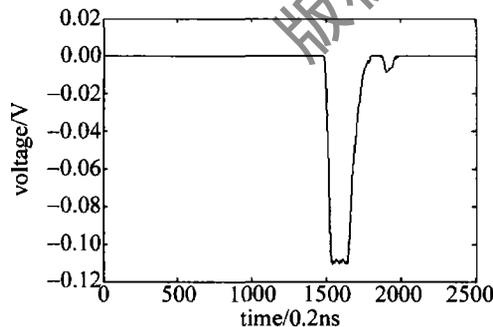


Fig. 6 Result with the new wavelet threshold method described in the paper

由处理结果可以看出,3种小波阈值处理方法都在一定程度上滤除了原始信号的噪声,但硬阈值函数由于存在间断点,信号重构时产生了 Pseudo-Gibbs 现象。虽然软阈值函数无间断点,消除了 Pseudo-Gibbs 现象,然而软阈值函数对大于阈值的小波系数采取恒定值压缩,与噪声分量随着小波系数增大而逐渐减小的趋势不相符,在重构信号时产生误差。本文中提出的阈值函数对

大于阈值的小波系数采取逐渐较小的压缩,并通过熵值将原始信号分布的稀疏性引入到阈值函数的构造中,最后的去噪效果明显好于软硬阈值方法。

5 结论

作者在小波软硬阈值函数和熵理论的基础上,提出了一种新的阈值函数,该函数克服了软硬阈值函数的不足,并且引入了可以度量采样值分布稀疏性的熵值作为参量,经过试验数据计算,表明本文中提出的该方法与其它方法相比去噪效果有明显改善,但本文中的方法运算量较大,下一步将研究使用数据统计量逼近熵,缩短数据处理时间,实现信号的实时去噪处理。

参考文献

- [1] JI B J, ZHOU D S, ZHANG J S. The torpedo based on the ship wake flow optical effect[J]. Torpedo Technology, 2000, 8(3): 40-43 (in Chinese).
- [2] ZHANG X H, LEI X H, RAO J H, et al. Study of homing means for laser-wake-homing torpedoes[J]. Laser Technology, 2005, 29(5): 494-496 (in Chinese).
- [3] RAO J H, GE W L, ZHU D H, et al. Ship wake detecting system based on backscattering light of bubbles[J]. Journal of Naval University of Engineering, 2008, 20(4): 62-65 (in Chinese).
- [4] LIU J F, LEI W N, JI B J. Restraint method of background interference for detection of light wakes[J]. Torpedo Technology, 2007, 15(2): 24-27 (in Chinese).
- [5] MENG L L, LIU C L. Segmental threshold de-noising arithmetic of SNR-vary signals[J]. Vacuum Electronics, 2005, 47(3): 13-16 (in Chinese).
- [6] JING W C, LI Q, REN L, et al. Application of wavelet transform in the data processing of white-light interferometry[J]. Journal of Optoelectronics Laser, 2005, 16(2): 195-198 (in Chinese).
- [7] DONOHO D L, JOHNSTONE I M. Ideal spatial adaptation via wavelet shrinkage[J]. Biometrika, 1994, 81(3): 425-455.
- [8] TANG X. Application of wavelet transform[M]. Chongqing: Chongqing University Press, 2006: 87 (in Chinese).
- [9] QI L M, LI X F, ZHANG G Z. Wavelet transform theory and its application in signal processing[J]. Journal of University of Electronic Science and Technology of China, 2008, 37(3): 386-388 (in Chinese).
- [10] DONOHO D L, JOHNSTONE I M. Adapting to unknown smoothness via wavelet shrinkage[J]. Journal of the American Statistical Assoc, 1995, 90(432): 1200-1224.
- [11] DONOHO D L, JOHNSTONE I M. Wavelet shrinkage asymptopia[J]. Journal of Royal Statistical Society, 1995, 57(2): 301-369.
- [12] DONOHO D L. De-noising by soft-thresholding[J]. IEEE Transaction on Information Theory, 1995, 41(3): 613-627.
- [13] LIN J. Wavelet de-noising based on maximum likelihood estimation and its application for feature extraction[J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2005, 26(9): 923-927 (in Chinese).
- [14] QIU W H. The decision-making in management and the application of entropy[M]. Beijing: China Machine Press, 2002: 24 (in Chinese).
- [15] RAO J H, YANG K C, ZHANG X H, et al. Detecting simulative ship bubbles wake by pulsed laser[J]. Optics & Optoelectronic Technology, 2007, 5(5): 40-41 (in Chinese).