

文章编号: 1002-2082(2007)03-0245-06

# 尾流散射光性质的一维小波变换分析

张建生<sup>1,2</sup>, 林书玉<sup>1</sup>, 苗润才<sup>1</sup>, 杨万民<sup>1</sup>

(1. 陕西师范大学 物理系, 西安 710062; 2. 西安工业大学 数理系, 西安 710032)

**摘要:** 船舶尾流具有特殊的声学、电学、磁学和光学特性。选用一维小波变换含离散小波变换、连续小波变换、小波包变换、复小波变换对测量的尾流光学性质进行了分析, 其结果表明: 不同条件下尾流散射光信号具有不同的自动阈值, 经小波变换后保留的能量比例、小波系数置零比率不同, 变换的小波系数染色模式、系数曲线、最大系数线区别明显。一维连续小波变换显示出细节信号具有一定周期性, 说明在测量过程存在周期性的干扰因素。通过小波分解的各层细节信号, 为在测量结果中消除或降低这些因素的影响指明了方向。一维连续小波变换结果显示, 在不同压强下小波系数大小及分布、极大值分布都有明显区别。一维小波包变换的压缩信号保留了原始信号绝大部分的能量, 选择的系数可作为不同压强下尾流气泡幕的特征系数, 而一维复小波变换变换的模、模角以及系数随时间轴的分布, 其相对大小都不相同。经小波分析, 可以提取出散射光信号的共性, 也可以直观地展示不同散射光信号的区别。

**关键词:** 小波变换; 尾流; 气泡幕; 光学信号

中图分类号: O439-34

文献标志码: A

## One-dimensional wavelet transformation analysis on specialty of scattered light from ship wakes

ZHANG Jian-sheng<sup>1,2</sup>, LIN Shu-yu<sup>1</sup>, MIAO Run-cai<sup>1</sup>, YANG Wan-min<sup>1</sup>

(1. Physics Department, Shaanxi Normal University, Xi'an 710062, China;

2. Math-Physical Department, Xi'an Technological University, Xi'an 710032, China)

**Abstract:** Ship wakes have special acoustic, electromagnetic and optical characteristics. One-dimensional wavelet transformations, including dispersive wavelet, continuous wavelet, wavelet packet and complex continuous wavelet transformations, are used to analyze the scattered optical specialty of ship wakes (SOSSW). SOSSW under different conditions have distinct auto-thresholds, different retained energy and zero setting ratio of the wavelet coefficient. The coloration modes, coefficient curves, and local maximal coefficient lines vary distinctly. The one-dimensional disperse wavelet transformation reveals that the detailed signal holds particular periodicity. The analysis of the wavelet detailed semaphore demonstrates the way to eliminate or decrease the effects of these factors. Wavelet coefficients, its distributions and maximal lines differentiate obviously under different pressures according to the one-dimensional continuous wavelet transformation. The compression signal of the one-dimensional wavelet packet transformation retains the major energy of the original signal. The selected coefficients can act as a characteristic coefficient of the wake bubble curtain under different pressures. The relative

收稿日期: 2006-06-08; 修回日期: 2006-09-06

基金项目: 国家自然科学基金(10274046); 武器装备预研基金(51448030101ZK1801)

作者简介: 张建生(1966—), 男, 陕西子洲人, 博士后, 教授, 主要从事光学、水下信息等研究工作。E-mail: zhangjsh@mail.xait.edu.cn

magnitude of the mode, mode angle and coefficient distribution along time axis differ from each other based on the one-dimensional complex continuous wavelet transformation. The common characteristics of the scattered light signal can be extracted and the difference of various scattered light signals can be directly observed through wavelet analysis, which is useful in wake identification.

**Key words:** wavelet transformation; wake; bubble curtain; optical signal

## 引言

舰船在航行过程中,由于螺旋桨搅动产生的空化现象,海面波浪的翻卷、破碎,以及从吃水线部分卷入的大量空气,在舰船的尾部形成了一条含有大量气泡的气幕带,这就是常说的尾流<sup>[1]</sup>。尾流的几何特性与产生它的舰船大小、航行速度、海面风速等因素有很大的关系。一般情况下,大多数舰船尾流垂直方向的厚度大约是舰船吃水深度的(1.5~2)倍,尾流的下边界上升到海面相对于水平面的空间斜率约为0.1°;在舰船过后(0.2~0.5)min,尾流在水平面的宽度约为舰船宽度的(2~3)倍;在时间大于0.5 min时,尾流边界的扩展角约为1°。就物理场而言,尾流具有声学特性、光学特性、磁特性及热特性等<sup>[2-4]</sup>。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使用成为可能。光尾流自导鱼雷是一个全新意义上的自导鱼雷。要发展这种鱼雷,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,这是尾流探测的基本物理学问题。

尾流光学性质的研究是一个较新的领域,近年国内对尾流气泡幕光学性质的测试及光学信号的分析等内容进行了一些研究,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<sup>[5]</sup>。尾流光学特性研究的关键问题是尾流光学特性特征信号的提取。对尾流光学性质的分析,多采用现有的模型进行计算。随着小波分析的发展,近年来有人将其应用于尾流性质的研究中。Siegel 和 Weiss<sup>[6]</sup>采用小波包算法提取和分析湍流的涡量结构和特征。陈文学<sup>[7]</sup>等提出了一种分析钝体尾流的双重小波分解算法,并分析了钝体前后缘对钝体尾迹流特性的影响。顾巍<sup>[8]</sup>等利用小波分析研究了空泡尾流场中的速度脉动问题。

## 1 尾流散射光性质的测量结果

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、信号接收以及数据采集装置。光源为He-Ne激光器,其输出功率>5 mW,波长为632.8 nm;信号接收装置由照度计及探头组成。该装置将通过气幕的光信号加以接收,通过其视窗读取信号强度,并可转换为模拟信号输出;数据采集系统由数据采集卡和计算机组成。该系统可采样、存储和程序化处理照度计的模拟输出信号。气幕模拟装置主要由水槽、微孔陶瓷管、气体钢瓶组成,其核心是微孔陶瓷管。微孔陶瓷管的孔径平均约为2 μm,所产生的气泡直径约在(300~1 000) μm之间。水槽的外形尺寸在制作时以鱼雷的外径为依据,其长度为50 cm。气体钢瓶内装氮气(N<sub>2</sub>),通过软管与微孔陶瓷管相连,软管同时接有压力表,以读取软管中N<sub>2</sub>压强,一定压强气体通过微孔陶瓷管产生实验所需气幕。产生气幕的气体压强可调,气幕中气体含量、气泡大小随气泡压强变化而变化。

在不同气体压强下,测量了激光透射及散射特性。图1给出N<sub>2</sub>压强为0.03 MPa下的散射光信号,图中横坐标为时间( $\times 10^{-1}$ s),纵坐标为照度(lx)。

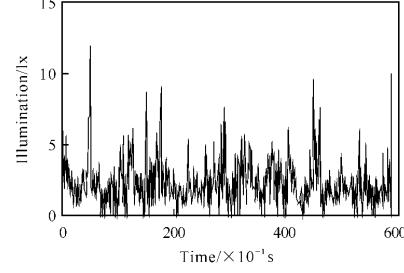


图1 压强为0.03 MPa 气泡幕散射光照度随时间的变化

Fig. 1 Variation of scattering illumination of bubble curtain under the pressure of 0.03 MPa with time

## 2 一维小波变换对尾流散射光性质的处理

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的分析处理工具,被誉为信号分析的“数学显微镜”。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、图像处理、数字水印、量子物理等专业和领域得到了广泛的应用<sup>[9-11]</sup>。本文尝试用一维小波变换对尾流光学性质进行分析和处理, 试图用小波分析工具找出尾流散射光性质的特征, 从而为光尾流自导鱼雷提供一种新的线索。实验取得的尾流气泡幕散射光信号为一维离散信号, 选择不同的一维小波变换希望从不同侧面对测量结果进行较为全面的分析, 并从不同角度分析测量数据的规律。选用一维小波变换含离散小波变换、连续小波变换、小波包变换、复小波变换对图1所示的散射光实验测量结果即原始信号进行分析, 得到了一些有意义的结果及线索。

## 2.1 一维离散小波变换

选取 Dmeyer 小波对 0.03 MPa 下气泡幕散射光信号进行一维离散小波变换分析。Dmeyer 即离散的 Meyer 小波, 是 Meyer 小波基于 FIR(有限冲激响应)的近似, 用于快速离散小波变换的计算。Meyer 小波的小波函数和尺度函数都是在频率域中进行定义的, 其定义式为

$$\Psi(\omega) = \begin{cases} \frac{1}{\sqrt{2\pi}} e^{\frac{j\omega}{2}} \sin\left[\frac{\pi}{2}v\left(\frac{3}{2\pi}|\omega|-1\right)\right] & \frac{2\pi}{3} \leq \omega \leq \frac{4\pi}{3} \\ \frac{1}{\sqrt{2\pi}} e^{\frac{j\omega}{2}} \cos\left[\frac{\pi}{2}v\left(\frac{3}{2\pi}|\omega|-1\right)\right] & \frac{4\pi}{3} \leq \omega \leq \frac{8\pi}{3} \\ 0 & |\omega| \notin \left[\frac{2\pi}{3}, \frac{8\pi}{3}\right] \end{cases}$$

式中  $v(\omega)$  为构造 Meyer 小波的辅助函数, 具有

$$v(a) = a^4(35 - 84a + 70a^2 - 20a^3) \quad a \in [0, 1]$$

图 2 给出原始信号 5 层 Dmeyer 小波的分析结

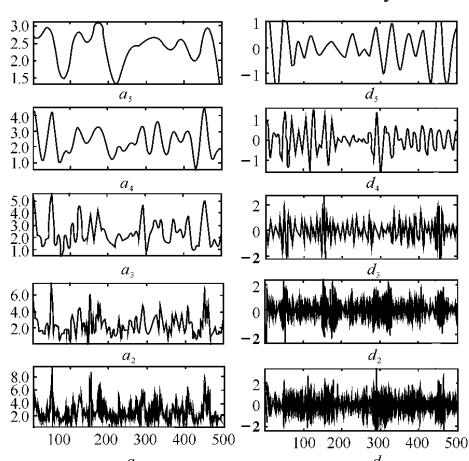


图 2 尾流散射光信号的一维离散小波变换

Fig. 2 One-dimensional disperse wavelet transformation of scattered signal from ship wakes

果,  $a_1 \sim a_5$ ,  $d_1 \sim d_5$  为原始信号分解得到的各层信号,  $a_n (n=1, 2, 3, 4, 5)$  为小波分解后的各层逼近信号,  $d_n (n=1, 2, 3, 4, 5)$  为小波分解后的各层细节信号。各层信号图线的横坐标为时间序列, 单位为 0.1 s; 纵坐标为信号的相对幅值, 取任意单位 (a.u.)。

显然, 各层逼近信号包含了信号的包络特征, 各层细节信号均含有白噪声, 白噪声的强度受到逼近信号的调制, 调制效果随着分解层的深入而愈加明显。图中清晰显示出细节信号具有一定周期性, 这种周期性出现在每一次测量结果中, 说明在测量过程存在周期性的干扰因素。这些因素包括电源输出波动、光源的不稳定性、实验装置的振动等。通过小波分解的各层细节信号, 为在测量结果中消除或降低这些因素的影响指明了方向。

## 2.2 一维连续小波变换

选取 Mexican Hat (mexh) 小波对原始信号做一维连续小波变换分析。Mexican Hat 函数为 Gauss 函数的二阶导数:

$$\Psi(t) = (1 - t^2)e^{-\frac{t^2}{2}}$$

$$\Psi(\omega) = \sqrt{2\pi}\omega^2 e^{-\frac{\omega^2}{2}}$$

式中:  $\Psi$  为小波函数;  $t$  和  $\omega$  分别表示时间和频率。因其形状像墨西哥帽的截面, 所以称这个函数为墨西哥帽函数, 墨西哥帽函数在时间域与频率域都有很好的局部化。

用  $s$  表示原始信号, 则对应于尺度  $a$  和位置  $b$  的小波系数为

$$C_{a,b} = \int_R s(t) \frac{1}{\sqrt{a}} \overline{\Psi}\left(\frac{t-b}{a}\right) dt$$

图 3 为 mexh 小波对原始信号的一维连续小波分析结果, 尺度设置为分级模式, 最小尺度 1, 步长 1, 最大尺度 64; 染色模式选择所有系数(init) + 层次(by scale) + 绝对值(abs) 模式。图中给出了染色以后的系数(图 3(a), 纵坐标为尺度)、尺度为 32 时的系数线(图 3(b), 纵坐标表示系数值, 任意单位 a.u.) 以及系数极大值线(图 3(c), 纵坐标为尺度)。各图线的横坐标均为时间序列, 单位 0.1 s。

为了找出不同条件下尾流散射光性质的区别, 对不同压强下的测量数据进行了对比分析。一维连续小波变换结果显示不同压强下小波系数大小及分布、极大值分布都有明显区别, 从染色图可直观看到其不同, 这一区别或许为不同条件下尾流的识别提供一个有用的线索。

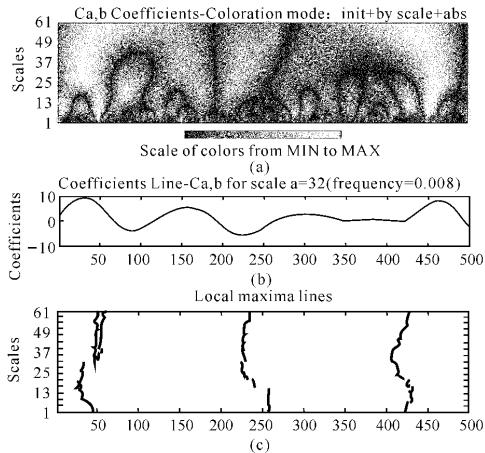


图 3 尾流散射光信号的一维连续小波变换

Fig. 3 One-dimensional continuous wavelet transformation of scattered signal from ship wakes

### 2.3 一维小波包变换

利用 Dmeyer 小波对原始信号进行 3 层小波包分析, 在信号小波包分解后对各层高频系数进行阈值量化处理, 选择全局阈值(global threshold)。进行阈值量化时, 熵标准选择 Shannon 熵(Shannon entropy), 若用  $E$  来表示 Shannon 熵, 则

$$E(s) = - \sum_i s_i^2 \log(s_i^2)$$

其中约定  $0 \log(0) = 0$ 。

分析结果如图 4 所示, 其中系数图的横坐标为时间( $0.1\text{ s}$ ), 纵坐标为小波包分解的终结点(对于

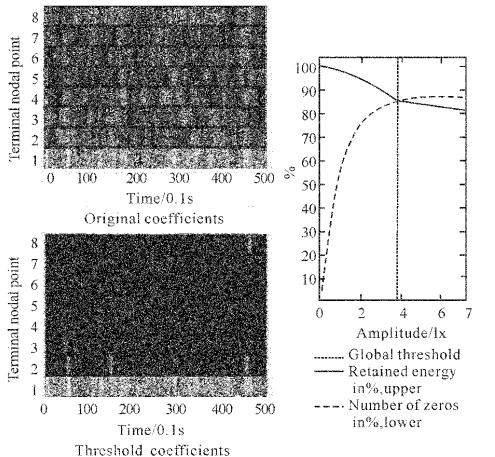


图 4 尾流散射光信号的一维小波包变换

Fig. 4 One-dimensional wavelet packet transformation of scattered signal from ship wakes

3 层分解, 终结点有  $2^3 = 8$  个)。阈值图的横坐标表示测量结果的幅值, 单位勒克斯(lx), 纵坐标为百分比(%). 系统自动选取的阈值为 3.815, 这个值是在置零系数的百分比和压缩后保留的信号能量百分比之间进行折衷得到的, 此时, 置零系数的百分比为 85.92%, 压缩后保留了原始信号 86.02% 的能量, 压缩信号保留了原始信号绝大部分的能量, 为信号的进一步处理奠定了基础。第一个终结点保留了原始信号的所有系数, 其他终结点处, 根据阈值对系数进行选择, 选择的系数可作为不同压强下尾流气泡幕的特征系数, 在原始系数与阈值系数的比较中, 提供了尾流散射光信号的特征线索。同时, 在测量结果幅值范围内, 不同值位置的置零系数百分比有很大差别, 从而保留能量的比变化明显, 这也为不同压强下尾流气泡幕的区别与判断提供了线索。

### 2.4 一维连续复小波变换

Complex Gaussian 小波属于一类复小波, 是从复高斯函数  $f(x) = C_p e^{-ix} e^{-x^2}$  的  $p$  阶倒数派生而来的。其中  $p$  是整数,  $C_p$  是使得  $\|f^{(p)}\|^2 = 1$  的常数,  $f^{(p)}$  是  $f$  的  $p$  阶导数。

利用 Complex Gaussian 小波对原始信号进行变换分析时, 尺度设置为加强模式, 从而得到模和相位角的变换系数, 分别对应于图 5 左、右 2 列。图 5 所有图线的横坐标均表示时间序列, 单位为  $0.1\text{ s}$ , 纵坐标表示分解系数的相对值, 单位任意(a.u)。不同压强下的尾流气泡幕信号, 其变换系数的染色模式、系数曲线、最大系数线均有明显的区别, 其变换的模、模角以及系数随时间轴的分布和相对大小都不相同。

结合一维离散小波变换、连续小波变换和小波包变换, 比较不同条件下尾流性质的一维小波变换结果, 从变换结果的异同判定不同尾流的性质及特点, 是一个识别尾流的有意义的途径。

## 3 讨论

基于尾流光学特性的自导鱼雷是国外秘密研究的最先进的武器之一, 未见实际应用的报道。光尾流自导鱼雷摆脱了常规的声场以光波作为探测目标的手段, 使得尾流自导的作用距离大幅度地提高, 使常规的声学干扰和对抗手段失去作用, 也使鱼雷自噪声的干扰大大减小。而且, 利用尾流的光学特性, 不但可以探测尾流较强的水面舰船, 也可以用来探测尾流较弱的潜艇目标, 这是尾流的声探测所达不到的。尾流的存在可能提供一种探测、跟

踪或识别产生尾流的舰船的方法。光学尾流的研究主要有 2 个目的:一是深入研究尾流的光学特性,

以论证其可能的战术应用;二是对尾流的结构和物理性质做深入的基础研究。

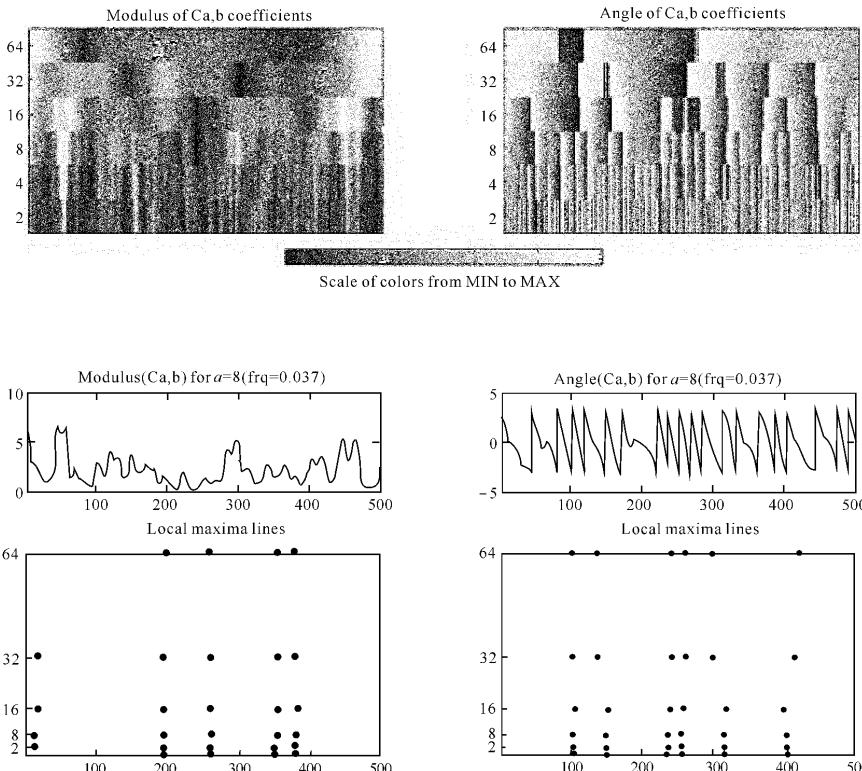


图 5 尾流散射光信号的一维复小波变换

Fig. 5 One-dimensional complex continuous wavelet transformation of scattered signal from ship wakes

小波分析或多分辨分析是傅里叶分析发展史上里程碑式的进展,近年来在法、美、英等国家成为众多学科关注的热点。它被看成是调和分析这一数学领域半个世纪以来工作的结晶,其理论知识涉及到泛函分析、傅里叶分析、信号与系统、数字信号处理等方面,同时具有理论深刻和工程应用十分广泛的双重意义。

张建生等<sup>[12]</sup>曾利用滤波器、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、处理和计算,从能量角度结合图像处理,取得了一些定性结果。本文利用一维小波变换对尾流光学性质进行分析和处理,试图结合小波这一数学领域的概念,剖析不同条件尾流光学性质的异同,找出尾流光学性质的基本特征,为尾流自导提出一种新的思路。文中小波分析的过程显示出不同条件下尾流经一维小波变换呈现不同的特点,从小波系数、逼近信号、细节信号、自动选取的阈值、染色图等方面反映了尾流光学性质的共性,也

揭示了其异性,这或许是识别尾流的一个线索。

#### 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[J]. 鱼雷技术,2000,8(3):29-31.  
JI Bang-jie, ZHOU De-shan, ZHANG Jian-sheng. Control and guide torpedo based on optical effect of ship wakes [J]. Torpedo Technology, 2000,8 (3): 29-31. (in Chinese)
- [2] 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.  
CUI Xu-sheng. Actuality and trend of the world torpedo weapon in recent years [J]. Torpedo Technology, 1997,5(1):1-4. (in Chinese)
- [3] 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.  
ZHOU De-shan, WANG Ming-zhou, JI Bang-jie, et al. Consideration on the development of self-guided torpedo [J]. Torpedo Technology, 2000, 8 (3):29-31. (in Chinese)

- [4] 张建生, 刘健康, 冀邦杰, 等. 真实尾流的光学特性 [J]. 光子学报, 2002, 31(10): 1284-1288.  
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. (in Chinese)
- [5] 张建生, 刘健康, 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.  
ZHANG Jian-sheng, LIU Jian-kang, JI Bang-jie, et al. Math-physical model for the optical specialty of bubble film in ship wakes [J]. Acta Photonica Sinica, 2002, 31(8): 1032-1036. (in Chinese)
- [6] SIEGEL A, WEISS J B. A wavelet-packet census algorithm for calculating vortex statistics [J]. Phys. Fluids, 1997, 67(9): 1988-1999.
- [7] 陈文学, 赵建福, 李长河. 钝体尾流的双重小波包分解 [J]. 应用基础与工程科学学报, 2003, 11(4): 405-410.  
CHEN Wen-xue, ZHAO Jian-fu, LI Chang-he. A dual decomposition algorithm for turbulent wake flows after blunt bodies using the wavelet packet method [J]. J. Basic Science and Engineering, 2003, 11(4): 405-410. (in Chinese)
- [8] 顾巍, 何友声, 胡天群. 空泡尾流场中的速度脉动与子波分析 [J]. 水动力学研究与进展, 2001, A16(2): 239-246.  
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. (in Chinese)
- [9] 那彦, 殷廷瑞, 杨万海. 基于成像机理的小波包变换多聚焦图像融合 [J]. 应用光学, 2004, 25(2): 51-54.  
NA Yan, YIN Ting-rui, YANG Wan-hai. Multi-focus image fusion based on imaging mechanism with wavelet packet transform [J]. Journal of Applied Optics, 2004, 25(2): 51-54. (in Chinese)
- [10] 武东生, 刘秉琦. 小波变换在CCD图像边缘检测中的应用 [J]. 应用光学, 2004, 25(2): 48-50.  
WU Dong-sheng, LIU Bing-qi. The application of wavelet transform in CCD image edge detection [J]. Journal of Applied Optics, 2004, 25(2): 48-50. (in Chinese)
- [11] 王玉田, 李艳春. 小波阈值去噪法在农药荧光分析中的应用 [J]. 应用光学, 2006, 27(3): 192-194.  
WANG Yu-tian, LI Yan-chun. Application of wavelet threshold denoising method in the fluorescence analysis of pesticides [J]. Journal of Applied Optics, 2006, 27 (3): 192-194. (in Chinese)
- [12] 张建生, 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.  
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. (in Chinese)