

水下高速目标声谱图特征提取及分类设计

王森^{*①} 王余^② 王易川^① 李海涛^①

^①(海军潜艇学院 青岛 266000)

^②(中国人民解放军 31001 部队 北京 100094)

摘要: 为了增加水下高速目标的识别特征维度, 优化识别效果, 该文设计了一种基于目标辐射噪声高速特征量 (High Speed Characteristic Quantity, HSCQ) 的分类方法。首先, 针对水下高速目标辐射噪声的 DEMON (Detection of Envelope Modulation On Noise) 谱特征进行分析, 根据 DEMON 谱的频率可分性, 定义了 DEMON 谱调制分布比 (Modulation Distribution Ratio, MDR)。然后, 根据水下高速目标辐射噪声的功率谱历程图直纹特征, 应用图像边缘检测、线谱生长等理论进行特征提取, 并分析了功率谱历程图的直纹特征量 (Straight-line Characteristic Quantity of Spectrum, SCQS)。最后, 根据 2 种特征量的实测信号分析结果, 定义了目标辐射噪声的 HSCQ, 实现了一种新的水下高速目标分类方法。实测信号分析结果显示, 采用 MDR 或 SCQS 进行单特征量分类, 非高速目标的误报率分别为 21.4% 和 16.3%; 采用 HSCQ 进行分类, 非高速目标的误报率仅为 4.1%。

关键词: 水下高速目标; 声谱图; 调制分布比; 直纹特征量

中图分类号: TB56

文献标识码: A

文章编号: 1009-5896(2017)11-2684-06

DOI: 10.11999/JEIT170283

Feature Extraction and Classification of Spectrum of Radiated Noise of Underwater High Speed Vehicle

WANG Sen^① WANG Yu^② WANG Yichuan^① LI Haitao^①

^①(Navy Submarine Academy, Qingdao 266000, China)

^②(PLA 31001, Beijing 100094, China)

Abstract: In order to improve the result of underwater high speed vehicle classification, a classification method that is based on High Speed Characteristic Quantity (HSCQ) of vehicle radiated noise is designed. Firstly, analysis of Detection of Envelope Modulation On Noise (DEMON) spectrum of actual measured radiated noise is finished. The Modulation Distribution Ratio (MDR) of radiated noise is defined based on the separability of modulation frequency of DEMON spectrum. Then the spectrograms feature analysis and feature extraction of underwater high speed radiated noise are done based on image edge detection and edge growing. The Straight-line Characteristic Quantity of Spectrum (SCQS) of vehicle radiated noise is analyzed. Finally, considering the analysis results of two types of characteristic quantity, a new classification method of underwater high speed vehicle is realized and HSCQ of vehicle radiated noise is designed. The actual measured radiated noise analysis shows that, the false alarm rate of non-high speed vehicle is respectively 21.4% (only using MDR), 16.3% (only using SCQS), and 4.1% (using HSCQ).

Key words: Underwater high speed vehicle; Spectrum of radiated noise; Modulation Distribution Ratio (MDR); Straight-line Characteristic Quantity (SCQ)

1 引言

随着水下航行器技术的发展运用, 水下航行器的航行速度、航行里程、航行深度、噪音控制等各方面显著提升, 其水下高速状态航行对现代海运航行安全的威胁不可避免。针对水下高速航行器开展目标识别预警研究的重要性已经日益凸显。

现有的水下高速目标分类识别手段包括目标运动特性分析^[1-3]、主动声呐信号分析^[4]、被动声呐信号分析^[5-7]等。水下高速目标航行过程中多伴有较快的方位变化率, 目标运动特性分析法据此进行目标运动态势信息的求解解算, 达到目标分类识别的目的。该类方法一般需要较长的解算时间以获得稳定的收敛解, 而且不适用于迎面来向目标方位变化率较小的情况。主动声呐信号分析法利用主动声呐回波进行目标探测, 通过分析回波特性及多普勒频

收稿日期: 2017-04-01; 改回日期: 2017-08-25; 网络出版: 2017-09-14

*通信作者: 王森 wangsen0828@163.com

移特性进行目标分类。该类方法难以实现隐蔽探测，而且主动声呐的声脉冲信号会对目标航行器产生不可避免的惊扰。被动声呐信号分析法对目标的辐射噪声信号及声自导信号进行分析，通过功率谱分析、DEMON(Detection of Envelope Modulation On Noise)谱分析等谱图分析手段判别目标性质。该类方法适用于各类水下目标的分类，针对高速目标的专用算法研究较少。水下高速目标的分类识别受限于复杂的海洋环境^[8]，具有一定的不确定性和随机性，现有的水下高速目标分类识别手段尚不具备独立的可靠分类能力。水下高速目标的分类识别过程需要融合多种特征信息进行综合决策^[9,10]，新的识别特征量的获取对提高识别正确率、优化识别结果具有关键作用。

本文根据水下高速目标分类识别快速、准确的需求，针对基于调制统计量的分类算法^[11]实时处理能力差的缺点，定义了DEMON谱调制分布比MDR(Modulation Distribution Ratio)，在保证较低误报率的前提下有效缩短了判型时间。同时结合高速目标功率谱历程图的直纹特征量SCQS^[12](Straight-line Characteristic Quantity of Spectrum)，设计了一种基于目标辐射噪声MDR和SCQS的高速特征量HSCQ(High Speed Characteristic Quantity)分类方法。

2 DEMON 谱特征提取

2.1 DEMON 基本原理

DEMON 谱分析是一种常用的辐射噪声分析手段，可获得目标舰船的螺旋桨转速、叶片等固有特征。单载频调制信号可以写为

$$x(t) = A(1 + m \sin \Omega t) \cdot \cos \omega t \quad (1)$$

式中， A 表示信号的幅值强度大小； m 表示信号的调制度， $0 < m < 1$ ； ω 表示信号的载波频率； Ω 表示信号的调制频率。

根据调制信号的平方解调数学模型，求得 $x^2(t)$ 为

$$\begin{aligned} x^2(t) &= A^2(1 + m \sin \Omega t)^2 \cdot \cos^2 \omega t \\ &= \frac{A^2}{2} + \frac{A^2}{2} \cos 2\omega t + mA^2 \cdot \sin \Omega t \\ &\quad + \frac{mA^2}{2} \cdot \sin(2\omega + \Omega)t - \frac{mA^2}{2} \sin(2\omega - \Omega)t \\ &\quad + \frac{m^2 A^2}{4} + \frac{m^2 A^2}{4} \cos 2\omega t - \frac{m^2 A^2}{4} \cos 2\Omega t \\ &\quad - \frac{m^2 A^2}{8} \cdot \cos(2\omega + \Omega)t - \frac{m^2 A^2}{8} \cos(2\omega - \Omega)t \quad (2) \end{aligned}$$

由式(2)可见，在 $x^2(t)$ 中包含两类成分，即：信号的直流成分和调制频率谐波成分。利用低通滤波

器对该信号进行低通滤波，就可以得到该信号的调制频率成分：

$$x^2(t) \Big|_{LF=F_{lpf}} = \frac{A^2}{2} + \frac{m^2 A^2}{4} + mA^2 \cdot \sin \Omega t \quad (3)$$

其中低通滤波器满足： $\Omega < F_{lpf} < 2\omega - \Omega$ 。

2.2 调制分布比 MDR

根据舰船辐射噪声的调制谱理论，其辐射噪声受到螺旋桨调制的影响，具有多个满足谐波关系的调制频率成分。因此，单载频的多倍谐波调制信号为

$$x(t) = A \left(1 + \sum_{k=1}^K m_k \sin k\Omega t \right) \cdot \cos \omega t \quad (4)$$

其中， K 为调制频率的谐波倍数。对其进行平方低通检波，即

$$\begin{aligned} x^2(t) &= A^2 \left(1 + \sum_{k=1}^K m_k \sin k\Omega t \right)^2 \cdot \cos^2 \omega t \\ &= A^2 \left[1 + 2 \sum_{k=1}^K m_k \sin k\Omega t \right. \\ &\quad \left. + \sum_{k_1=1}^K \sum_{k_2=1}^K m_{k_1} m_{k_2} \sin k_1 \Omega t \sin k_2 \Omega t \right] \\ &\quad \cdot \left(\frac{\cos 2\omega t + 1}{2} \right) = \frac{A^2}{2} \left[1 + 2 \sum_{k=1}^K m_k \sin k\Omega t \right. \\ &\quad \left. + \sum_{k_1=1}^K \sum_{k_2=1}^K m_{k_1} m_{k_2} \sin k_1 \Omega t \sin k_2 \Omega t \right] \\ &\quad + \frac{A^2 \cos 2\omega t}{2} \left[1 + 2 \sum_{k=1}^K m_k \sin k\Omega t \right. \\ &\quad \left. + \sum_{k_1=1}^K \sum_{k_2=1}^K m_{k_1} m_{k_2} \sin k_1 \Omega t \sin k_2 \Omega t \right] \quad (5) \end{aligned}$$

水下高速目标具有较高的转速，其 DEMON 谱具有较高的调制频率。根据式(5)，设水下高速目标的单载频调制信号为 $x_1(t)$ ，水下非高速目标的单载频调制信号为 $x_2(t)$ ：

$$x_1(t) = A_1 \left(1 + \sum_{k=1}^K m_{1,k} \sin k\Omega_1 t \right) \cdot \cos \omega_1 t \quad (6)$$

$$x_2(t) = A_2 \left(1 + \sum_{k=1}^K m_{2,k} \sin k\Omega_2 t \right) \cdot \cos \omega_2 t \quad (7)$$

根据二者的实际转速关系，调制基频显然满足 $\Omega_1 > 2\Omega_2$ 。故首先将低通滤波器设置为

$$F_{lpf} = 2\Omega_2 + \varepsilon_1 < \Omega_1 \quad (8)$$

其中， ε_1 表示一正极小量。

现阶段民用船舶的螺旋桨以为三、四叶桨为主，故先对四叶桨的情况进行讨论，令谐波倍数 $K = 4$ ，将式(6)、式(7)代入式(5)展开，低通滤波后可得：

$$x_1^2(t)|_{LF=F_{\text{lpf}}} = \frac{A_1^2}{2} \left[1 + \frac{m_{1,1}^2}{2} + \frac{m_{1,2}^2}{2} + \frac{m_{1,3}^2}{2} + \frac{m_{1,4}^2}{2} \right] \quad (9)$$

$$x_2^2(t)|_{LF=F_{\text{lpf}}} = \frac{A_2^2}{2} \left[1 + \frac{m_{2,1}^2}{2} + \frac{m_{2,2}^2}{2} + \frac{m_{2,3}^2}{2} + \frac{m_{2,4}^2}{2} \right. \\ \left. + 2m_{2,1} \sin \Omega_2 t + 2m_{2,2} \sin 2\Omega_2 t \right. \\ \left. + (m_{2,1}m_{2,2} + m_{2,2}m_{2,3} + m_{2,3}m_{2,4}) \cdot \cos \Omega_2 t + \left(m_{2,1}m_{2,3} + m_{2,2}m_{2,4} - \frac{m_{2,1}^2}{2} \right) \cdot \cos 2\Omega_2 t \right] \quad (10)$$

对比可以发现，采用相同截止频率的低通滤波器， $x_1(t)$ 的 DEMON 谱中仅包含直流分量，而 $x_2(t)$ 的 DEMON 谱则包含调制频率的一、二次谐波成分。上述推导同样适用于谐波倍数 $K = 3$ 的情况，这里不再赘述。

据此可以定义辐射噪声的 MDR:

$$K_{\text{MDR}} = \frac{\sum \left[\left| \int_{-\infty}^{\infty} \left(x_1^2(t) |_{LF=F_{\text{lpf}}} \right) e^{-i\omega t} dt \right| > B \right]}{F_{\text{lpf}}} \quad (11)$$

式中， B 表示所设线谱门限，表示线谱相对于连续谱的相对高度。 K_{MDR} 反映了辐射噪声 DEMON 谱分析频段内线谱幅值大于预设门限 B 的线谱数量与频带宽度的比值。根据目标辐射噪声信号 DEMON 的 MDR 求解原理，当频率分辨率为 0.1 Hz 时，信号时长满足大于等于 10 s 即可应用该算法进行分类，而调制统计量的分类算法^[11]需要一定时长的信

号累积来获得 DEMON 谱历程图，信号时长必须满足大于等于 100 s 的必要条件。也就是说，使用基于目标辐射噪声的 DEMON 谱 MDR 方法具有更好的短时处理能力。

3 功率谱特征提取

3.1 功率谱历程图

目标辐射噪声经过滤波处理、时间分段后，通过短时傅里叶变换可以获得其功率谱频谱。高速目标相对而言具有较高的航速，其功率谱频谱的高频段与非高速目标存在一定差异。实测水下高速目标和非高速目标的功率谱频谱如图 1 所示。

对比可以看出，二者的瞬时功率谱谱图包含较多噪声干扰信息，目标特征信息几乎被淹没。据此，对每个时刻的功率谱进行积累排列，得到功率谱历程图(图 2)。功率谱历程图既可以反映目标信号的频率分布，又可以体现各频点声强随时间的变化关系^[13-15]，而且目标信号时长大于等于 10 s 即可绘制，满足高速目标特征计算的快速性要求。通过对比可以看出，水下高速目标的功率谱历程图横向灰度幅值变化较大，具有较为明显的直纹特征，可分性特征较瞬时功率谱谱图明显改善。

3.2 直纹特征量 SCQS

设目标辐射噪声的功率谱历程图矩阵为 F_0 ，根据图像边缘检测^[16-18]理论，通过图像预处理、边缘检测、边缘生长等相关操作(流程图见图 3)，可以得到 M 个长度为 N 的特征序列，即功率谱历程图的特征矩阵 F_{final} :

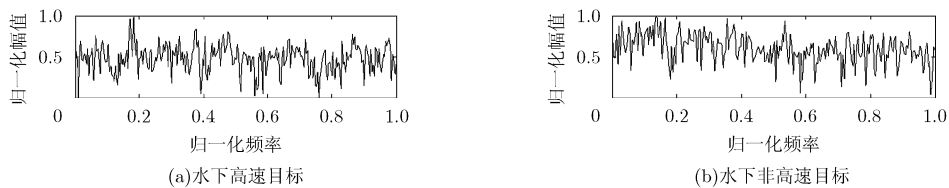


图 1 实测目标辐射噪声瞬时功率谱

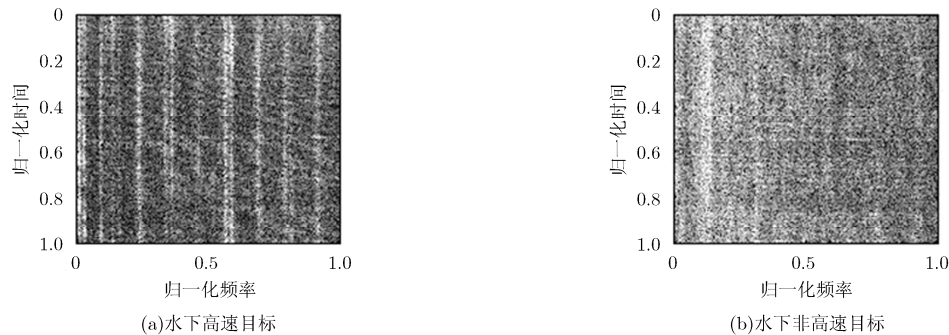


图 2 实测目标辐射噪声历程图对比

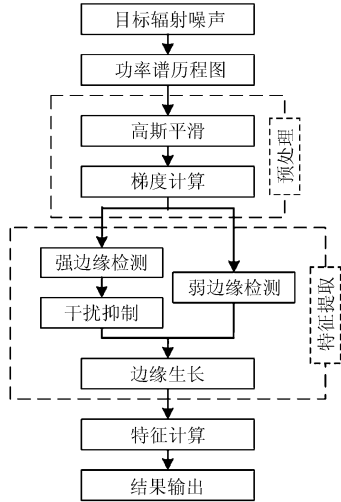


图 3 功率谱历程图边缘特征提取方法流程图

$$F_{\text{final}} = \begin{bmatrix} G_f(n_1, \omega_1) & \cdots & G_f(n_1, \omega_N) \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ G_f(n_M, \omega_1) & \cdots & G_f(n_M, \omega_N) \end{bmatrix}_{M \times N} \quad (12)$$

则辐射噪声功率谱历程图的 SCQS 可以写为

$$K_{\text{SCQS}} = \frac{\sum_{i=1}^M \sum_{j=1}^N G_f(n_i, \omega_j)}{M \times N} \quad (13)$$

4 信号分析与特征量设计

当今水下航行器的发展日新月异，这对水下高速目标分类识别提出了新的要求。本文在前期工作基础上，对实测目标辐射噪声信号进行筛选，剔除使用率低的老旧目标信号的同时，补充新测目标信号。最终选取 57 个高速目标、98 个非高速目标的实测辐射噪声信号进行频谱分析与特征量设计。

4.1 MDR 实测信号分析

根据目标辐射噪声 MDR 的相关理论，对所选实测目标辐射噪声信号库中的信号进行分析处理，计算各目标信号的 MDR，绘制统计柱状图如图 4 所示。

通过比较可以看出，水下高速目标相对于非高

速目标的 MDR 值普遍较小。若以水下高速目标的最大 MDR 为检测门限，则会有 21 个非高速目标发生误报，误报率为 21.4%。

4.2 SCQS 实测信号分析

根据目标辐射噪声 SCQS 的相关理论，对所选实测目标辐射噪声信号库中的信号进行分析处理，计算各目标信号的 SCQS，绘制统计柱状图如图 5 所示。

通过比较可以看出，水下高速目标相对于非高速目标的 SCQS 值普遍较大。若以水下高速目标的最小 SCQS 为检测门限，则会有 16 个非高速目标发生误报，误报率为 16.3%。

4.3 高速特征量 HSCQ

根据上述实测信号分析情况，考虑结合 2 个特征量进行综合分析。分别以 SCQS 和 MDR 为横纵坐标，绘制所选实测信号的特征量分布情况(见图 6)。

根据图 6 中实测信号特征量的分布情况可以看出，高速目标与非高速目标 MDR 和 SCQS 的特征分布存在差异性。因此，定义融合后的高速特征量(HSCQ)为

$$K_{\text{HSCQ}} = \lg(K_{\text{SCQS}}) - \beta \lg(K_{\text{MDR}}) \quad (14)$$

式中 K_{SCQS} , K_{MDR} 分别为目标直纹特征量和调制统计量， β 为特征融合系数，可以根据实际样本情况通过遍历搜索获得。若目标信号的融合特征量 K_{HSCQ} 大于预设识别门限 K_0 ，则判定所测目标为水下高速目标，否则判定为非高速目标。

4.4 HSCQ 实测信号分析

根据目标辐射噪声高速特征量的相关理论，对所选实测目标辐射噪声信号库中的信号进行分析处理，计算各目标信号的 HSCQ 值，并绘制统计柱状图如图 7 所示。

通过比较可以看出，高速目标的 HSCQ 值普遍较大，如表 1 所示。若以高速目标的最小融合特征量为检测门限，则仅有 4 个非高速目标发生误报，误报率仅为 4.1%。

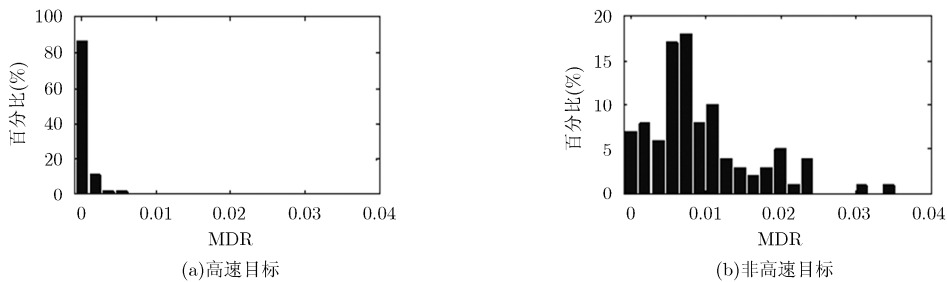


图 4 MDR 对比图

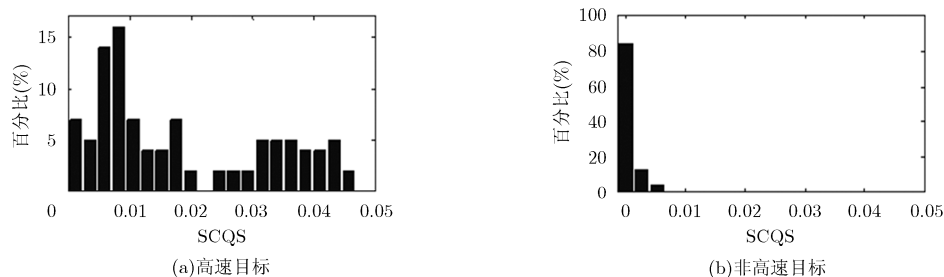


图 5 SCQS 对比图

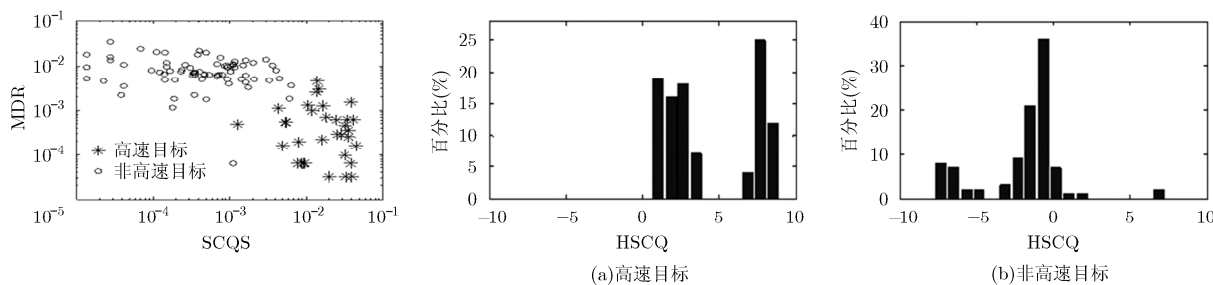


图 6 实测信号分布图

图 7 HSCQ 对比图

表 1 HSCQ 分布图统计

	最大值	最小值	平均值	标准差
高速目标	8.5308	0.7245	4.3898	2.9847
非高速目标	1.0532	-7.3369	-1.9440	2.6503

5 结论

本文依据水下高速目标分类识别快速、准确的需求,针对基于调制统计量的分类算法的不足,结合水下高速目标功率谱历程图的直纹特征,通过定义目标辐射噪声的高速特征量实现了对水下高速目标的分类。通过对作者所掌握的实测目标辐射噪声信号库分析,得出了如下结论:(1)由于水下高速目标的转速高于非高速目标,所以二者的 DEMON 谱频谱的调制频率分布存在差异性。(2)采用 DEMON 谱的调制分布比和功率谱历程图的直纹特征,构建高速特征量 HSCQ 对水下高速目标进行分类,在高速目标正确识别率 100% 的条件下对低速目标的误报率仅为 4.1%,且对信号时长的要求较低,更有利于水下高速目标的快速分类判型。

参考文献

- [1] 余跃, 孙振新, 陈颜辉. 基于累积方位变化量的来袭鱼雷制导方式识别[J]. 火力与指挥控制, 2015, 40(10): 87-89.
YU Yue, SUN Zhenxin, and CHEN Yanhui. Guidance type identification based on cumulative azimuth variation of incoming torpedo[J]. *Fire Control & Command Control*, 2015, 40(10): 87-89.
- [2] 孙向前, 范展, 李晴. 一种基于相关积分的互谱WVD目标方位估计方法[J]. 声学技术, 2015, 34(1): 23-28. doi: 10.16300/j.cnki.1000-3630.2015.01.005.
SUN Xiangqian, FAN Zhan, and LI Qing. A method of target DOA estimation based on correlation integral and cross spectrum WVD[J]. *Technical Acoustics*, 2015, 34(1): 23-28. doi: 10.16300/j.cnki.1000-3630.2015.01.005.
- [3] 周殿宝, 张奎, 易红. 水下高速航行体的航向角和距离估计方法[J]. 鱼雷技术, 2007, 15(1): 38-41.
ZHOU Dianbao, ZHANG Kui, and YI Hong. Estimation of course angle and distance for high speed underwater vehicles[J]. *Torpedo Technology*, 2007, 15(1): 38-41.
- [4] 孙常存, 邢国强, 曲兆宇. 一种水下高速小目标的多普勒频率估计方法[J]. 舰船电子工程, 2015, 35(10): 162-165. doi: 10.3969/j.issn.1672-9730.2015.10.041.
SUN Changcun, XING Guoqiang, and QU Zhaoyu. Doppler frequency estimation method of underwater high-speed small target[J]. *Ship Electronic Engineering*, 2015, 35(10): 162-165. doi: 10.3969/j.issn.1672-9730.2015.10.041.
- [5] 李海涛, 程玉胜, 戴卫国, 等. 小波包分形与支持向量机在水声目标识别中的应用研究[J]. 声学技术, 2015, 34(3): 219-222. doi: 10.3969/j.issn.1000-3630.2015.03.006.
LI Haitao, CHENG Yusheng, DAI Weiguo, et al. A method based on wavelet fractal and support vector machine for underwater target recognition[J]. *Technical Acoustics*, 2015, 34(3): 219-222. doi: 10.3969/j.issn.1000-3630.2015.03.006.
- [6] 吴姚振, 杨益新, 杨龙, 等. 基于恒定束宽波形保真及干扰抑制的水下目标识别方法[J]. 西北工业大学学报, 2015, 33(5): 843-848.

- WU Yaozhen, YANG Yixin, YANG Long, *et al.* Underwater target recognition based on constant-beamwidth waveform fidelity and interference-suppression[J]. *Journal of Northwestern Polytechnical University*, 2015, 33(5): 843-848.
- [7] 吴国清, 王美刚, 陈耀明. 水声波导中包络线谱强度数值预报[J]. *声学学报*, 2013, 37(4): 432-439.
- WU Guoqing, WANG Meigang, and CHEN Yaoming. Numerical prediction of envelope line spectrum intensity in underwater acoustic waveguide[J]. *Acta Acustica*, 2013, 37(4): 432-439.
- [8] 文洪涛, 杨燕明, 周鸿涛, 等. 海洋水下声探测信号的分类与分析[J]. *应用海洋学学报*, 2015, 34(2): 272-278. doi: 10.3936/j.issn.2095-4972.2015.02.017.
- WEN Hongtao, YANG Yanming, ZHOU Hongtao, *et al.* Classification and analysis on the ocean underwater acoustic detection signals[J]. *Journal of Applied Oceanography*, 2015, 34(2): 272-278. doi: 10.3936/j.issn.2095-4972.2015.02.017.
- [9] 黄文斌, 陈颜辉, 薛昌友. 来袭鱼雷类型识别指标提取与算法设计[J]. *南京理工大学学报*, 2011, 35(2): 199-203.
- HUANG Wenbin, CHEN Yanhui, and XUE Changyou. Indices extraction and algorithm design for recognizing type of incoming torpedo[J]. *Journal of Nanjing University of Science and Technology*, 2011, 35(2): 199-203.
- [10] 江向东. 水下高速目标多传感器联合谱特征分布识别方法[J]. *舰船科学技术*, 2012, 34(4): 86-88. doi: 10.3404/j.issn.1672-7649.2012.04.020.
- JIANG Xiangdong. Line spectrum distribute based high speed underwater vehicle classification method[J]. *Ship Science and Technology*, 2012, 34(4): 86-88. doi: 10.3404/j.issn.1672-7649.2012.04.020.
- [11] 王森, 高鑫, 程玉胜. 基于调制统计量的水下高速目标分类算法[J]. *声学技术*, 2014, 33(1): 61-64. doi: 10.3969/j.issn.1000-3630.2014.01.013.
- WANG Sen, GAO Xin, and CHENG Yusheng. A classification method of high speed underwater vehicle based on modulation statistics[J]. *Technical Acoustics*, 2014, 33(1): 61-64. doi: 10.3969/j.issn.1000-3630.2014.01.013.
- [12] 海深, 王森. 边缘检测结合高斯平滑的鱼雷声谱图识别方法[J]. *计算机工程与应用*, 2017, 53(3): 160-163. doi: 10.3778/j.issn.1002-8331.1506-0021.
- HAI Shen and WANG Sen. Combination of Gaussian smoothing and edge detection of torpedo spectrum recognition method[J]. *Computer Engineering and Applications*, 2017, 53(3): 160-163. doi: 10.3778/j.issn.1002-8331.1506-0021.
- [13] 弓彦婷, 程小雪, 任洪梅, 等. 声谱图显著性在音频识别中的应用[J]. *合肥工业大学学报(自然科学版)*, 2016, 39(1): 62-66.
- GONG Yanting, CHENG Xiaoxue, REN Hongmei, *et al.* Application of the saliency of spectrogram in audio recognition[J]. *Journal of Hefei University of Technology*, 2016, 39(1): 62-66.
- [14] SONG J, YANG Y, HUANG Z, *et al.* Effective multiple feature hashing for large-scale near-duplicate video retrieval[J]. *IEEE Transactions on Multimedia*, 2013, 15(8): 1997-2008.
- [15] 马理想, 曾向阳. 一种视听融合的水下目标识别方法研究[J]. *声学技术*, 2015, 34(3): 209-213. doi: 10.3969/j.issn.1000-3630.2015.03.004.
- MA Lixiang and ZENG Xiangyang. Study of underwater targets recognition based on audiovisual feature integration [J]. *Technical Acoustics*, 2015, 34(3): 209-213. doi: 10.3969/j.issn.1000-3630.2015.03.004.
- [16] WU Y, YANG Y, TIAN F, *et al.* Robust target feature extraction based on modified cochlear filter analysis model[C]. *IEEE International Conference on Signal Processing*, Kunming, China, 2013: 1-5.
- [17] 石美红, 李青, 赵雪青, 等. 一种基于保角相位的图像边缘检测新方法[J]. *电子与信息学报*, 2015, 37(11): 2594-2600. doi: 10.11999/JEIT150364.
- SHI Meihong, LI Qing, and ZHAO Xueqing, *et al.* A new approach for image edge detection based on conformal phase[J]. *Journal of Electronics & Information Technology*, 2015, 37(11): 2594-2600. doi: 10.11999/JEIT150364.
- [18] WONG Y P, SOH V C M, BAN K W, *et al.* Improved canny edges using ant colony optimization[C]. *The Fifth International Conference on Computer Graphics, Imaging and Visualization*, Penang, 2008: 197-202.
- 王 森: 男, 1988 年生, 博士生, 研究方向为水声目标识别.
- 王 余: 男, 1981 年生, 助理工程师, 研究方向为水下预警理论设计.
- 王易川: 男, 1976 年生, 副教授, 研究方向为模式识别.
- 李海涛: 男, 1988 年生, 博士, 助教, 研究方向为声呐信号处理.