舰船噪声听觉特征增强方法

李训诰[1]，周利辉[1,2]，李馨子[3]
(1. 海军潜艇学院，山东青岛 266041；2. 海军装备研究院，北京 100171；3. 国家海洋局第一海洋研究所，山东青岛 266041)

摘要：为改善新声呐兵听音训练效果，强化噪声样本中与目标属性紧密相关的听觉特征，将处理后的舰船噪声用于听音训练，提高舰船噪声样本利用率。提出的舰船噪声听觉特征增强模型及其实现方法主要包括四个步骤：噪声分解、子带分析、子带加权、噪声重建。首先采用多分辨分解将舰船噪声信号划分为若干子带，对子带进行逐个地听音分析和各种谱分析，选择特征信息稳定且丰富的子带进行强化，选取并微调各子带加权系数，采用多分辨分析理论重建舰船噪声，并根据重建噪声的功率谱、包络谱分析和听音分析结果调整加权系数，进而用于听音训练。仿真分析中，采用听音分析和谱分析比对原始噪声和重建噪声，验证了该方法的合理性和实用价值。

关键词：舰船噪声；听觉特征增强；听音训练；分解重建
中图分类号：TB556　　**文献标识码：**A　　**文章编号：**1000-3630(2017)-03-0233-05
DOI 编码：10.16300/j.cnki.1000-3630.2017.03.007

Listening feature enhancing algorithm for ship noise

LI Xun-gao[1], ZHOU Li-hui[1,2], LI Xin-zi[3]
(1. *Navy Submarine Academy, Shandong Qingdao* 266041, *Shandong, China*;
2. *Naval Academy of Armament , Beijing* 100171, *China*;
3. *First Institute of Oceanography*, *State Ocean Administration*, *Qingdao* 266041, *Shandong*, *China*)

Abstract: In order to improve ship noise listening training for new sonar men, the listening features of the ship noise are enhanced, which are closely related to the properties of the targets. The processed signals are applied to listening training and the operation rate of ship noise samples is increased. The presented listening feature enhancement and its implementation method included 4 steps that are ship noise decomposition, sub-band analyzing, sub-band weighting and ship noise reconstruction. Firstly, multi-resolution is introduced to decompose ship noise into several sub-bands and every sub-band is analyzed through listening and various spectrum analyses. The sub-bands with stable and abundant information are selected and enhanced with power spectrum, DEMON (detection of envelope modulation on noise) spectrum and listening analysis. By fine turning the weighted coefficient of each sub-band, the ship noise is reconstructed with multi-resolution and applied to listening training. The comparison between original ship noise and reconstructed noise is done with listening analysis and spectrum analysis. It illustrates the rationality and application value.
Key words: ship noise; listening feature enhancing; listening training; decomposition and reconstruction

0 引 言

根据目标辐射噪声判断目标性质通常是机器自动识别和声呐兵人工识别、或两者相结合的方式。自动识别受限于数据样本、识别准确率等因素限制，而声呐兵具有识别模式的能力，可根据目标噪声信号的音色、节拍、起伏等特征辨识目标，对于未曾出现过的目标也可根据听音经验判断目标属性。因此，在当前以及未来很长一段时间内，以听音分析的方式，并辅以噪声信号频谱等自动识别的手段，是被动声呐辨识目标的主要工作模式[1]。

声呐兵辨识目标准确率受其经验影响，培养一名合格或优秀的声呐兵需要大量的时间和经验积累。本文的目的就是对舰船噪声信号样本进行处理，以信号处理的手段增强目标特征，抑制背景干扰，有意识地培养未经专门训练的声呐兵更多地了解和掌握舰船噪声本质特征，提高听音训练的效率。

听觉特征源于语音信号处理，部分学者在舰船噪声听觉特征提取方面做了一些有意义的尝试，主要包括从生理学角度的近似人耳特性的小波分析特征与 Mel 频率倒谱系数(Mel-Frequency Cepstral Coefficients，MFCC)特征，从心理声学角度提取的音调、响度、音色等特征。其中，文献[2]对矢量水听器获取的声压和质点振速信息进行了小波包能量、MFCC 特征、Moore 特性响度等特征的提取；

收稿日期：2016-06-19; **修回日期：**2016-10-17
作者简介：李训诰(1960－)，男，山东青岛人，教授，研究方向为声纳装备战斗使用研究。
通讯作者：周利辉，E-mail: zhoulihui8341@aliyun.com

文献[3]以子带包络变化的归一化方差、谱下降值、音调强度、节拍特性等特征进行水下声目标分类；文献[4]采用多元线性回归分析手段对水下噪声音色属性建立回归模型，提取音色特征进行识别。

1 听觉特征增强原理与方法

舰船辐射噪声包括机械噪声、螺旋桨噪声和水动力噪声等，通过功率谱、连续谱、线谱分析等方法可反映舰船噪声频谱特性。对于声呐兵来说，一方面可根据舰船噪声的音调、响度、音色等判断目标基本类型；另一方面，可根据噪声的某些线谱、频段所包含的有用信息，判断与各线谱或频段相对应的各种发声源，例如齿轮摩擦、机械振动、柴油机气缸中气体的爆炸、螺旋桨轴频等，进而判断舰船的属性和类型。

通常，用于听音训练的噪声信号是声呐录制的原始噪声样本。噪声样本不同程度上含有各种干扰，对于新的声呐兵来说，难以抓住符合目标本质特征的特征信息。舰船噪声的听觉特征信息大量分布在不同的频率上或者窄频段内。本文的听觉特征增强方法，就是将噪声频域分解成若干不同的子带，对每个子带进行处理，加强应关注的特征信息所对应的子带，然后重建舰船噪声，使声呐兵将注意力集中到目标本质的特征信息上。

舰船噪声听觉特征增强模型如图 1 所示。

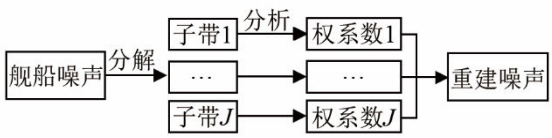


图 1 舰船噪声听觉特征增强模型
Fig.1 Listening feature enhancing model for ship noise

该方法涉及舰船噪声分解与重建的方法、子带划分的规则、子带加权系数的选择等方面。由于多分辨分析(正交小波)能实现信号的完全重建[5]，且无冗余，因此采用多分辨分析理论进行舰船噪声的分解和重建。多分辨分析，在信号低频部分的频率分辨率高，在高频部分的时间分辨率高，信号实际上是经过一恒 Q 特性的滤波器组，即子带按照中心频率/带宽为常数(比例带宽滤波器组)的规则进行划分，这在一定程度上符合人耳耳蜗对声音的频率响应特性。因此，在多分辨分析的框架下，依据噪声样本的实际特性划分子带；以单个子带的听音分析为主，结合单位频段内的噪声功率、线谱数及线谱强度等参数，选择各子带的加权系数，并进行子带加权重构。

值得注意的是，听觉特征增强方法对每个频域子带进行加权后重建的舰船噪声，必将导致噪声信号的音调、音色发生变化。本方法的目的是为了突出某些频点或窄频段上的特征信息。

2 听觉特征增强建模

2.1 舰船噪声分解与重建

舰船噪声分解与重建采用多分辨分析，即正交小波变换进行。多分辨分析，就是以不同分辨率显示信号的特征，其实质是把信号在一系列不同层次的空间进行分解。在大尺度空间中，对应于信号大致的概貌；在小尺度空间中，对应于信号的细微部分。随着尺度由大到小的变化，在各尺度上可以由粗及精地观察信号。这就是多分辨分析的思想。

对于舰船噪声数字信号，即离散时间序列 $s(n)$，采用 Mallat 快速算法，采用式(1)进行分解[6]：

$$\begin{aligned} C_{j+1,k} &= \sum_{n=-\infty}^{\infty} h^*(n-2k)C_{j,n} \\ D_{j+1,k} &= \sum_{n=-\infty}^{\infty} g^*(n-2k)C_{j,n} \end{aligned} \tag{1}$$

其中：式(1)的 Mallat 算法为迭代算法，n 为尺度系数序号，$j\in[0,J-1]$，J 为最大分解层数；$C_{j,k}$ 与 $D_{j,k}$ 分别为分辨率 2^{-j} 下的尺度系数和小波系数；$j=0$ 时，$C_{0,n}$ 即为信号 $s(n)$；h、g 为展开系数，分别对应低通和高通滤波器，由选用的小波基决定。

$C_{j,k}$ 可通过式(2)由 $C_{j+1,k}$ 与 $D_{j+1,k}$ 完全重建。

$$C_{j,n} = \sum_{k=-\infty}^{\infty} h(n-2k)C_{j+1,k} + \sum_{k=-\infty}^{\infty} g(n-2k)D_{j+1,k} \tag{2}$$

进而 $s(n)$也可由最低一层(j 最大)的尺度系数和各层小波系数重建。

舰船噪声与分解示意图如图 2 所示，Level 1 表示第 1 层分解，分解时从第 1 层分解直到第 J 层；重建为分解的逆过程。值得注意的是，对于有限长时间序列 $C_{0,n}$，进行分解得到的每一层小波系数与尺度系数长度不同，由上一层尺度系数长度与分解时采用的滤波器长度决定。

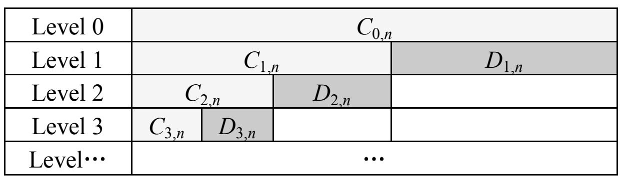


图 2 舰船噪声分解与重建方法
Fig.2 The method of decompostion and reconstruction of ship noion

2.2　舰船噪声子带分析方法

采用式(1)对信号进行 J 层分解，每运算一次，将低频部分的子带分解为两个子带，得到 J+1 个相互独立的子带。为了确定子带 j 在重建噪声时的权系数 λ_j，首先将子带 j 以外的子带置零，利用子带 j 的尺度/小波系数，以式(3)进行迭代，重建仅含该子带的噪声 $C_{0,n}$，式(3)表达式为

$$C_{j,n}=\begin{cases}\sum\limits_{k=-\infty}^{\infty}\gamma_1 h(n-2k)C_{J,k}+\sum\limits_{k=-\infty}^{\infty}\gamma_2 g(n-2k)D_{J,k} & (j=J-1)\\ \sum\limits_{k=-\infty}^{\infty}h(n-2k)C_{j+1,k}+\sum\limits_{k=-\infty}^{\infty}\gamma_{J-j+1}g(n-2k)D_{j+1,k} & (j<J-1)\end{cases}\tag{3}$$

其中，γ_j 为 0-1 函数，若选择子带 j 进行分析，则 γ_j=1，否则 γ_j=0。对子带 j 重建的噪声 $s_j(n)$ 进行听音分析和谱分析，进而确定 λ_j。

2.3　舰船噪声子带加权重建建模

将舰船噪声分解为若干子带后，对每个子带的子带系数加权，根据子带特征信息的多少赋予权系数，然后利用多分辨分析 Mallat 算法进行噪声重建。

设对信号进行 J 层分解，在重建时，

$$C_{j,n}=\begin{cases}\sum\limits_{k=-\infty}^{\infty}\lambda_1 h(n-2k)C_{J,k}+\sum\limits_{k=-\infty}^{\infty}\lambda_2 g(n-2k)D_{J,k} & (j=J-1)\\ \sum\limits_{k=-\infty}^{\infty}h(n-2k)C_{j+1,k}+\sum\limits_{k=-\infty}^{\infty}\lambda_{J-j+1}g(n-2k)D_{j+1,k} & (j<J-1)\end{cases}\tag{4}$$

其中，λ_j 为子带 j 的权系数。通过对重建噪声进行听音分析和谱分析，并根据分析结果微调权系数 λ_j，可以获得比原始舰船噪声特征更加明显的重建噪声。

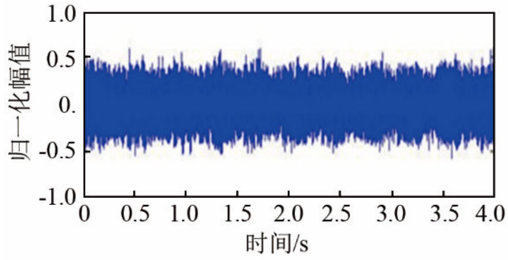
3　仿真与实验结果分析

对于 A、B、C 三例舰船噪声样本信号，采样率 f_s 分别为 44.1、16.0、16.0 kHz，信号长度取 4 s。

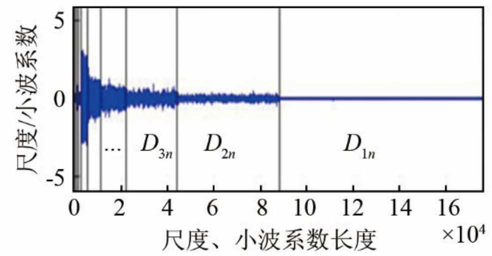
3.1　舰船噪声分解仿真

在听音时发现，舰船噪声 A 轻快，突突声节奏明显，机械噪声基本可辨；舰船噪声 B 中柴油机噪声可辨，螺旋桨划水的沙沙声轻快；舰船噪声 C 节奏清脆，但背景干扰嘈杂。

经大量仿真检验，结合人耳听觉敏感频段，选用 coif5 小波对舰船噪声进行 8 级分解，获取到 9 个子带。舰船 A、B、C 噪声波形及多分辨分解后的尺度/小波系数如图 3～5 所示，其中图 3(a)、4(a)、5(a)为原始噪声信号，图 3(b)、4(b)、5(b)为分解后得到的尺度系数和小波系数，尺度系数和小波系数按照 $C_{8,n}, D_{8,n}, D_{7,n}, \cdots, D_{1,n}$ 的顺序排列。



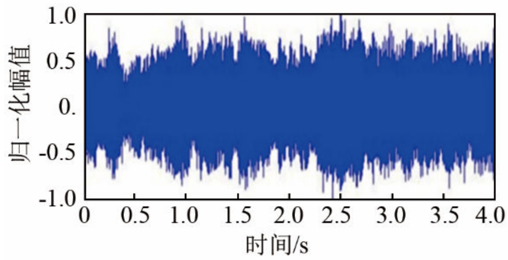
(a) 舰船噪声 A 的原始波形



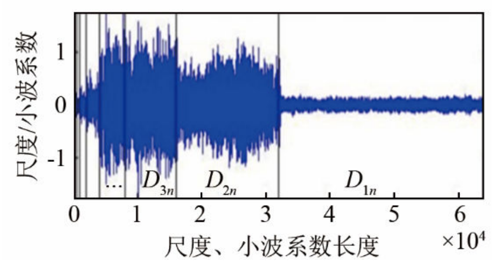
(b) 舰船噪声 A 分解

图 3　舰船噪声 A 波形及分解

Fig.3　Ship noise A and its decomposition



(a) 舰船噪声 B 的原始波形



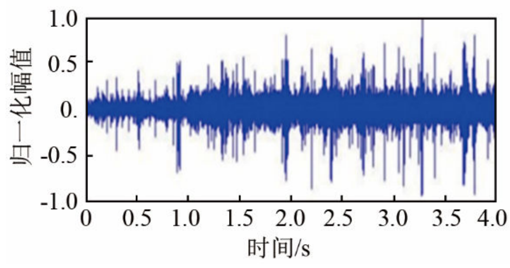
(b) 舰船噪声 B 分解

图 4　舰船噪声 B 波形及分解

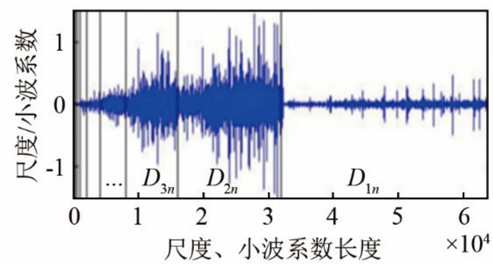
Fig.4　Ship noise B and its decomposition

3.2　舰船噪声子带加权重建仿真分析

对于舰船噪声 A、B、C，分别采用式(3)对子带 1～9 进行单子带噪声信号重建，对重建信号进行听音分析和线谱分析，结合各子带能量密度分析[7]，给出三种型舰船噪声子带加权重建时的权系数，如表 1 所示。



(a) 舰船噪声 C 的原始波形



(b) 舰船噪声 C 分解

图 5 舰船噪声 C 波形及分解

Fig.5 Ship noise C and its decomposition

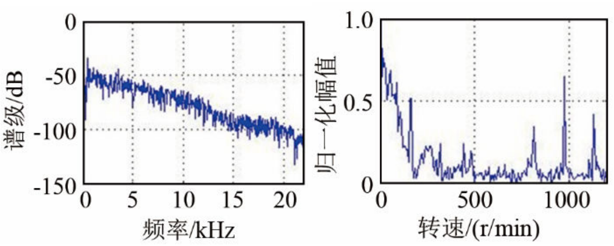
表 1 三例舰船噪声子带加权系数

Table 1 The weighting coefficients of sub-bands for three ship noise samples

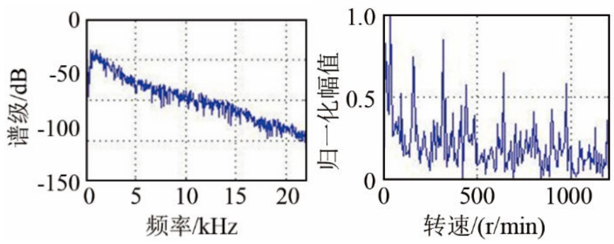
	1	2	3	4	5	6	7	8	9
A	0.1	0.71	0.28	0.3	1.0	0.54	0.09	0.04	0.01
B	0.01	0.01	0.78	0.71	1	0.3	0.01	0.02	0.01
C	0.11	0.69	0.78	1	0.3	0.13	0.05	0.03	0.02

三例舰船噪声重建后的功率谱与包络谱如图 6～8 所示。

对三例舰船重建噪声功率谱和包络谱分析后发现，经过听觉特征增强后，舰船噪声 A 的重建功率谱结构基本不变，而轴频更加突出，且原始噪声信号中并不明显的 2 倍、4 倍频均明显展现出来，原先较为明显的 7、8、9 倍频也基本保留。舰船噪声B的重建功率谱中，低频段的若干线谱凸显出来，包络谱中轴频及其 2 倍频得以保留，在转速 600～1 000 r/min 之间出现若干原始噪声包络谱没有的谱线。



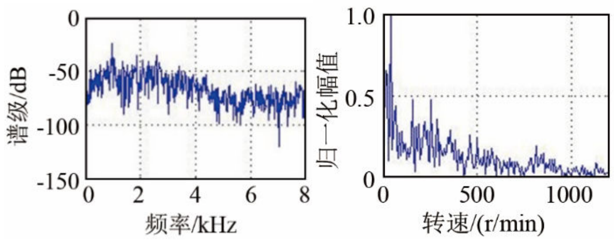
(a) 舰船噪声 A 的功率谱 (b) 舰船噪声 A 的包络谱



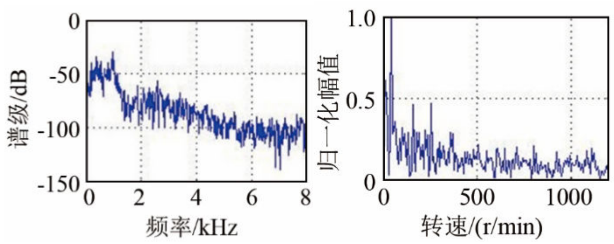
(c) 舰船噪声 A 的重建功率谱 (d) 舰船噪声 A 的重建包络谱

图 6 舰船噪声 A 及其重建噪声的功率谱、包络谱

Fig.6 Power spectrums and DEMON spectrums of ship A noise and its reconstruction



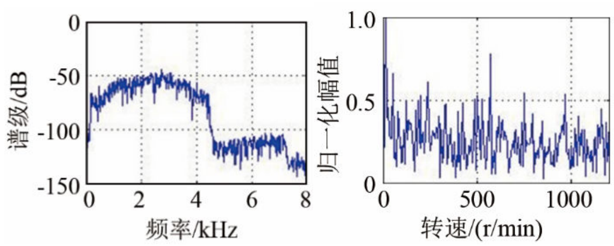
(a) 舰船噪声 B 的功率谱 (b) 舰船噪声 B 的包络谱



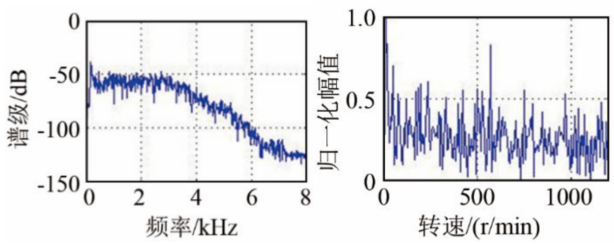
(c) 舰船噪声 B 的重建功率谱 (d) 舰船噪声 B 的重建包络谱

图 7 舰船噪声 B 及其重建噪声的功率谱、包络谱

Fig.7 Power spectrums and DEMON spectrums of ship noise B and its reconstruction



(a) 舰船噪声 C 的功率谱 (b) 舰船噪声 C 的包络谱



(c) 舰船噪声 C 的重建功率谱 (d) 舰船噪声 C 的重建包络谱

图 8 舰船噪声 C 及其重建噪声的功率谱、包络谱

Fig.8 Power spectrums and DEMON spectrums of ship noise C and its reconstruction

舰船 C 经过多次权系数的调整后，其节奏清晰度有所提高，部分低频段的机械噪声比原始噪声更加明显，但背景干扰仍然没有得到有效抑制，重建噪声相比原始噪声有一定程度的变调。以上功率谱和包络谱分析的结论，结合了听音分析结构，两者相互印证。

4 结 论

(1) 采用听觉特征增强模型，对含有丰富噪声特征信息或者比较感兴趣的子带进行增强，即可重建出特征信息明显、且与原始噪声具有很高相似度的噪声样本，用于指导新声呐兵的听音训练，使其更多专注于稳定、可靠的舰船噪声特征，减少听音训练过程中的不确定性。但该方法需要对舰船噪声进行逐个子带的分析和评估，进行大量听测和谱分析才可确定加权系数

(2) 若噪声的某些子带特征信息不明显或者无法判明舰船噪声类型时，该方法仅能在有限程度内改善听音效果。

(3) 下一步将根据人耳蜗特点，更深层次引入人耳听觉生理学和心理学知识，进一步细化子带划分。同时，建立子带特征量、特征明显程度定量描述规章，规范加权系数的选择，以减轻逐个子带听音分析带来的工作量。

参 考 文 献

[1] 谢俊，胡均川．舰船噪声听觉节奏特征[J]．应用声学，2008，**27**(6): 444-448.
XIE Jun, HU Junchuan. Audition rhythm feature of vessel's noise[J]. Applied Acoustics, 2008, **27**(6): 444-448.

[2] 韩雪．基于听觉特征的水中目标辐射噪声特征提取[D]．哈尔滨：哈尔滨工程大学, 2013.
HAN Xue. Feature extraction of underwater target based on auditory feature[D]. Harbin: Haerbin Engineering University, 2013.

[3] 杨立学，陈克安，张冰瑞，等．基于不相似度评价的水下声目标分类与听觉特征辨识[J]．物理学报, 2014, **63**(13): 236-245.
YANG Lixue, CHEN Kean, ZHANG Bingrui, et al. Underwater acoustic target classification and auditory feature identification based on dissimilarity evaluation[J]. Acta Phys. Sin., 2014, **63**(13): 236-245.

[4] 王娜，陈克安．水下噪声音色属性回归模型及其在目标识别中的应用[J]．物理学报, 2010, **59**(4): 2873-2881.
WANG Na, CHEN Kean. Regression model of timbre attribute for underwater noise and its application to target recognition[J]. Acta Phys. Sin., 2010, **59**(4): 2873-2881.

[5] Daubechies I. Ten lectures on wavelets[M]. Philadelphia, PA: SIAM, 1992: 107-166.

[6] 裴善报，刘荣忠，郭锐．基于小波变换的水下连续爆炸声信号特征分析[J]．爆炸与冲击, 2015, **35**(4): 520-526.
PEI Shanbao，LIU Rongzhong, GUO Rui. Analysis of characteristics of sequential underwater explosion sound signal based on wavelet transform[J]. Explosion and Shock Waves, 2015, **35**(4): 520-526.

[7] 李训诰，周利辉．基于多分辨分析的舰船噪声能量特征提取方法[J]．火力与指挥控制, 2009, **34**(S1): 23-25.
LI Xungao, ZHOU Lihui. Ship radiated noise energy feature extraction based on multi-resolution[J]. Fire Control and Command Control, 2009, **34**(S1): 23-25.