

# 水下目标识别的 1/3 倍频程掩蔽谱方法

吴姚振, 杨益新, 王晓宇

(西北工业大学航海学院, 西安 710072)

**摘要:** 在对现有水下目标噪声信号分布研究的基础上, 基于声学分析中的 1/3 倍频程分析和人耳的听觉掩蔽效应, 提出了 1/3 倍频程掩蔽谱特征提取方法, 并对水下目标辐射噪声进行了特征提取和特征分析。结果表明, 不同类的目标, 其主频范围有其固定的区域。I 类目标的主频一般在 100Hz 附近, II 类目标的主频一般在 100Hz 和 200Hz 附近, III 类目标的主频一般在 450Hz 附近。针对从属于三大类目标的 29 种目标中提取出的 1107 个样本进行了分类识别实验, 识别正确率大于 86%, 验证了所提出的方法的有效性。

**关键词:** 目标识别; 1/3 倍频程掩蔽谱; 特征提取

中图分类号: TN911.7

文献标识码: A

文章编号: 1000-3630(2011)-06-0538-04

DOI 编码: 10.3969/j.issn1000-3630.2011.06.015

## One-third octave masking spectrum method for recognition of underwater targets

WU Yao-zhen, YANG Yi-xin, WANG Xiao-yu

(School of Marine Technology, Northwestern Polytechnical University, Xi'an, 710072, China)

**Abstract:** The feature extraction method of 1/3 octave masking spectrum for underwater target noise is proposed in this paper by combing the 1/3 octave analysis in acoustics and masking effect of human ears. The features of three kinds of underwater target noise are extracted by using 1/3 octave masking spectrum. The results show that every kind of target noise has its own main frequency band. The main frequency band of the first kind of targets is near 100Hz, the second kind near 100Hz to 200Hz, and the third kind near 450Hz. Total 1107 noise data sets of 29 targets which belong to three kinds are analyzed, and 86 percent of correct recognition probability obtained, so the effectiveness of 1/3 octave masking spectrum for feature extraction is verified.

**Key words:** target recognition; 1/3 octave masking spectrum; feature extraction

## 0 引言

水下被动目标识别是水声装备发展的关键技术之一, 是水声探测系统智能化的重要技术, 也一直是声纳信号处理中重要的研究问题。利用水下目标的辐射噪声来分类识别水下目标是被动声纳的重要任务, 而目标的特征提取是目标分类的关键环节。要从目标噪声信号中提取出一种能反映目标本质的特征来进行目标的分类, 一直是水声领域的难题。目前研究的特征提取方法<sup>[1]</sup>几乎涉及了所有可能想到的方法, 在实验室仿真中取得了较好的分类效果。但由于水下目标噪声的复杂性和研究样本的局限性, 在实际中的分类效果一直不太如意。

众所周知, 当前对水声信号的识别仍要依靠声纳员的主观听觉, 再辅之以实时信号处理结果(如 LOFAR 谱图和 DEMON 谱图)来进行判别。声纳员在其身体及精神状态良好的情况下, 识别的结果是比较高的, 这表明人耳有其特有的功能。人类的听觉系统是极其敏锐的, 正常人可听声音的频率范围为 16Hz~16kHz, 年轻人可听到 20 kHz 的声音。根据语音学、声学、生理学的研究发现<sup>[2-5]</sup>: (1) 人耳对频率高低的感受近似与该频率的对数成正比; (2) 人耳有掩蔽效应, 即强信号对弱信号有抑制作用, 掩蔽的程度是声音强度与频率的二元函数, 对频率临近分量的掩蔽要比频差大的分量有效得多; (3) 人耳在两人以上的讲话环境中有能力分辨出需要聆听的声音。本文提出的 1/3 倍频程掩蔽谱特征提取方法, 是结合 1/3 倍频程分析和人耳特有的掩蔽效应, 可用于水下目标的识别。通过对海上实际采集的噪声数据进行分段, 得到实验样本数据, 提取其 1/3 倍频程掩蔽谱特征矢量, 进行分类实验, 取得了满意的分类效果。

收稿日期: 2010-12-05; 修回日期: 2011-02-24

基金项目: 国家自然科学基金项目(10974153)、教育部新世纪优秀人才支持计划。

作者简介: 吴姚振(1985-), 男, 浙江象山人, 博士研究生, 研究方向为水声信号与信息处理, 模式识别。

通讯作者: 吴姚振, E-mail: wuyaozhen@mail.nwpu.edu.cn

## 1 1/3 倍频程掩蔽谱原理

### 1.1 1/3 倍频程<sup>[6]</sup>

声学分析中,倍频程分析方式是最常用的分析手段。通常情况下,是将连续频率范围划分为若干个连续的小段,每段叫做频带或频程。划分频带的常用方法有两种,一种是频带宽度恒定,常用于频谱的窄带分析。第二种划分方法是相对恒定带宽比的方式,即频带划分时,需要保持频带的上、下限之比为常数。利用这种频带划分方法所分出的频带通常简称为倍频程频带。假定上、下截止频率各为  $f_2$  和  $f_1$  的频带( $f_2 > f_1$ ),中心频率为  $f_0$ ,满足关系式

$$f_2 = 2^n f_1 \quad (1)$$

式(1)中,  $n$  为倍频程数。 $n=1/3$  就是上、下截止频率的关系为1/3倍频程。中心频率  $f_0$  为上、下截止频率的几何平均值,可以表示为:

$$f_0 = \sqrt{f_1 f_2} \quad (2)$$

1/3 倍频程谱是一种频域分析方法,该方法基于人的听觉相对声音的大小和频率具有对数关系的原理,对可听音的频率范围进行了划分,以频带能量的形式显示频谱分析的结果,分析的效果与人耳的听觉感受比较接近。

### 1.2 听觉掩蔽效应

人耳的感受性和辨别机制与掩蔽效应密切相关。一个较弱的声音(被掩蔽音)被另一个较强的声音(掩蔽音)影响的现象就是人耳的掩蔽效应。听觉的整体掩蔽曲线如图1所示。

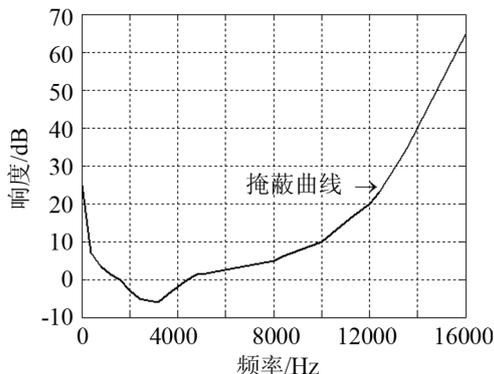


图1 听觉的整体掩蔽曲线  
Fig.1 Masking curve of hearing

心理声学实验表明,人们难以听到在频率或时间上位于强信号附近的弱信号(当然也包括那些同时在频域和时域被掩蔽的弱信号)。总之,一个强度较小的频率成分可能被邻近的一个较强的频率成

分所掩蔽。类似地,两个时间上很接近的信号也可能产生掩蔽现象。掩蔽可分成频域掩蔽和时域掩蔽。应用频域掩蔽时,一个基本的方法是将背景残存噪声控制在听觉掩蔽门限以下。我们感兴趣的是,在掩蔽这些残存噪声的同时,要最大限度地抑制无关噪声,并且使目标噪声失真程度最小<sup>[7]</sup>。

## 2 1/3 倍频程掩蔽效应特征提取技术

1/3 倍频程谱能很好地体现信号带宽的能量分布情况,并逼近人耳的听觉感受,具有较好的稳健性和可分性。用掩蔽谱来表征水下目标特殊音色和节奏的主观感受,既稳定可靠,又符合人的听觉识别机理。因此,结合1/3倍频程分析和人耳的掩蔽效应,本文提出的1/3倍频程掩蔽谱具有更好的稳健性与鲁棒性。

### 2.1 信号预处理

舰船上动力系统的绝大部分频率特征集中在0~2.87 kHz 频带范围内,可以提供相应的信息用于完成分类任务<sup>[8]</sup>。在实际中,获得的噪声信号由于包含加性噪声,因此在特征提取以前,首先对信号进行预处理。本文数据预处理中采用的是20 Hz~2.5 kHz 的带通滤波。这样选的依据有两个:一是人类听觉系统可以听到声音的最小频率为20 Hz;二是针对听觉系统的研究表明人耳对音色具有听觉上的特殊感受性,根据不同的音色,即使在同一音高和同一声强的情况下,也能区分出目标的不同。以音色为出发点,声音可分为3个频段。低音频段20~160 Hz、中音频段160~2500 Hz、高音频段2500~20000 Hz,声纳操作员听音判型过程中最关注的是低音和中音频段。将水下目标信号用这个频带(20 Hz~2.5 kHz)进行带通滤波后,听觉感受上没有明显的变化,说明这个频带选择是合理的,不会为后续的特征提取造成能量上的损失。

根据上述分析,在目标噪声特征提取过程中,使用的是8阶IIR椭圆滤波器(20 Hz~2.5 kHz)对目标噪声信号进行滤波,滤波器的频响特性曲线如图2所示。

### 2.2 功率谱估计<sup>[9]</sup>

经典的功率谱估计方法主要有周期图法和自相关法,但得到的功率谱存在着方差性能不好、谱线起伏加剧(数据  $N$  太大)和分辨率不好( $N$  太小)等缺陷。于是又出现了多种改进的方法,如 Bartlett 法、Nuttall 法和 Welch 法等。通过比较,本文采用 Welch 法对水下目标进行功率谱估计。在 Welch

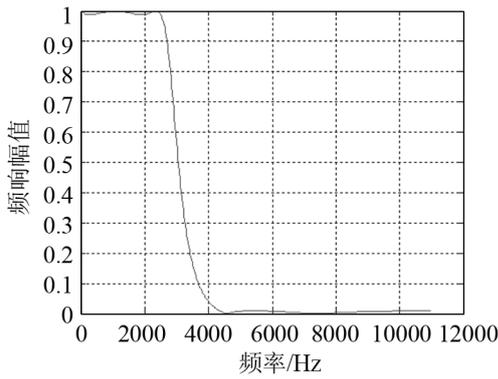


图2 8阶 IIR 椭圆滤波器频响特性曲线  
Fig.2 Characteristic curve of 8 order ellipse filter

法谱估计中，窗函数  $w(n)$  一般采用 Hamming 窗或 Hanning 窗，以改善矩形窗边瓣较大所产生的谱失真。本文采用 Hamming 窗对分段信号进行加权。三类水下目标辐射噪声的功率谱如图 3 所示。

### 2.3 1/3 倍频程掩蔽谱特征提取

1/3 倍频程掩蔽谱是水下目标辐射噪声信号与听觉掩蔽曲线相耦合得到的功率谱，这里的耦合是为了说明 1/3 倍频程谱与掩蔽曲线之间的关系，也就是说，1/3 倍频程掩蔽谱是目标信号的 1/3 倍频程谱经听觉掩蔽之后的频谱。其定义式为：

$$E = E_1 - LE_2 \tag{3}$$

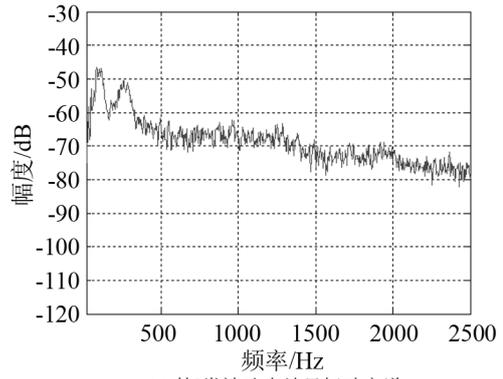
式(3)中： $E$  为 1/3 倍频程掩蔽谱； $E_1$  为 1/3 倍频程谱； $E_2$  为 1/3 倍频程在听觉掩蔽曲线上所对应的能量； $L$  为耦合系数。本文耦合系数  $L$  为 0.2。

图 4(a)给出了以信号幅度谱、功率谱为基础的特征提取过程；图 4(b)给出了以信号功率谱、听觉掩蔽曲线和 1/3 倍频程为基础的特征提取过程。传统的特征提取采用了包括：幅度谱、用 Welch 算法实现的非参数化功率谱和 Burg 算法实现的参数化功率谱。而在 1/3 倍频程掩蔽谱特征提取中，引入了耦合系数  $L$ ，把听觉掩蔽能量加入到特征提取中。

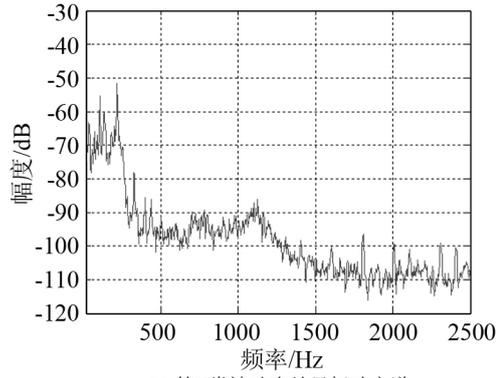
## 3 分类识别

### 3.1 分类器的设计

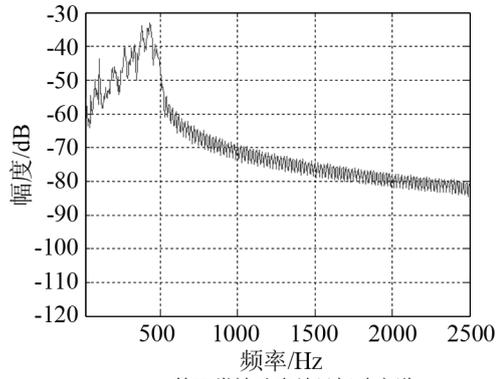
采用三层 BP 神经网络分类器，神经网络结构为  $22 \times 10 \times 3$ ，其中输入层节点数等于输入样本的特征维数 22，隐含层节点数为 10，输出层节点数为类型数 3，期望输出矢量为与该类型对应的输出节点的输出值为 1，而其他节点输出值为 0，即三类目标的期望输出为  $[1 \ 0 \ 0]$ 、 $[0 \ 1 \ 0]$ 、 $[0 \ 0 \ 1]$ 。分类判断正确的标准：当输出矢量与期望矢量一致时，判为正确；否则判为错误。



(a) 第I类被动声纳目标功率谱



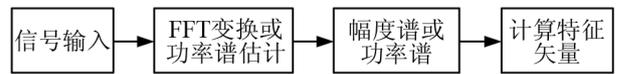
(b) 第II类被动声纳目标功率谱



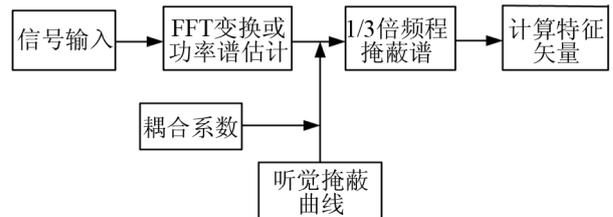
(c) 第III类被动声纳目标功率谱

图3 三类目标的被动声纳目标功率谱

Fig.3 Power spectrums of three kinds of passive sonar targets



(a) 传统谱特征提取过程



(b) 1/3 倍频程掩蔽谱特征提取过程

图4 目标特征的提取流程

Fig.4 Extraction flow of targets' feature

### 3.2 分类实验与识别结果

为验证所提出的特征提取方法是否有效,本文对用于海上实测的噪声数据进行分类识别,将这些数据按照属性分为三个大类,分别定义为I、II、III类目标。其中I类目标23个,II类目标3个,III类目标3个;其信噪比大于6dB。利用图4(a)和4(b)的特征提取流程分别对三类目标进行特征提取,形成了代表1107个样本的1107组特征矢量,其中I类目标特征矢量849个,II类目标特征矢量138个,III类目标特征矢量120个,从这三类特征矢量中分别随机地抽出169、27、24个来训练设计好的分类器,训练的目标误差为0.001。利用全部的特征矢量对传统谱和1/3倍频程掩蔽谱特征提取方法进行测试,分类识别结果如表1、表2所示。

表1 传统谱测试样本识别结果

Table 1 Target recognition of testing samples by traditional spectrum method

目标类别	测试样本数	传统谱识别结果			识别率%	总识别率%
		I	II	III		
I	849	795	54	0	93.64	92.08
II	138	24	114	0	82.61	
III	120	0	0	120	100	

表2 1/3倍频程掩蔽谱测试样本识别结果

Table 2 Target recognition of testing samples by 1/3 octave masking spectrum method

目标类别	测试样本数	1/3倍频程掩蔽谱识别结果			识别率%	总识别率%
		I	II	III		
I	849	819	30	0	96.47	94.23
II	138	19	119	0	86.23	
III	120	0	0	120	100	

### 3.3 分类识别结果分析

从样本测试的总识别率上看,1/3倍频程掩蔽谱提取的特征矢量取得了良好的分类效果;从三类样本的单个识别率来看,1/3倍频程掩蔽谱提取的特征矢量对II类目标的识别率明显低于其它两类,这个在图3给出的三类目标的功率谱中可以得到解释。I类目标样本在100Hz频率附近有一个明显的尖峰,III类目标样本在450Hz频率附近有一个明显的尖峰,而II类目标样本除了在200Hz频率附近有尖峰外,在100Hz频率附近也有一个尖峰,这就解释了目标误判主要集中在I类与II类之间的原因了。从表1与表2的试验结果表明,1/3倍频程掩

蔽谱特征提取方法能够提取出水下目标信号的有效特征,并优于传统谱特征提取方法。

## 4 结论

本文借鉴声学分析中的1/3倍频程分析方法,利用听觉的掩蔽特性,提取了水下目标辐射噪声信号的22维特征。实验结果表明,1/3倍频程掩蔽谱特征提取方法能够很好地提取出鲁棒的体现水下目标信号的特征矢量,不仅分类效果好,而且特征维数较低,便于实时处理。

### 参 考 文 献

- [1] 丁玉薇. 被动声纳目标识别技术的现状与发展[J]. 声学技术, 2004, 23(4): 253-257.  
DING Yuwei. Review on passive sonar target recognition[J]. Technical Acoustics, 2004, 23(4): 253-257.
- [2] Tsuyoshi, Makoto Iwata, Masanao Ebata. Speech parameter extraction in noisy environment using a masking model[C]// IEEE International Conference on Acoustics, Speech, and Signal Processing, 1994: II 81-II 84.
- [3] 李云鸿, 胡修林, 张蕴玉. 基于人耳听觉模型的语音质量客观评价方法[J]. 华中理工大学学报, 2000, 28(5): 63-65.  
LI Yunhong, HU Xiulin, ZHANG Yunyu. Objective evaluation method of speech quality based on human auditory model[J]. Journal Huazhong University of Science and Technology, 2000, 28(5): 63-65.
- [4] Glasberg B R, Moore B C J. Derivation of auditory filter shapes from notched-noise data[J]. Hearing Research, 1990, 47(1-2): 103-108.
- [5] 彭圆, 王晟, 王科俊等. 感知线性预测在水下目标分类中的应用研究[J]. 声学学报, 2006, 31(2): 146-150.  
PENG Yuan, WANG Shen, WANG Kejun. A study on underwater target classification applying perception linear prediction method[J]. Acta Acustica, 2006, 31(2): 146-150.
- [6] 刘兵. 基于听觉特性和神经网络的被动声纳目标识别[D]. 西北工业大学博士论文, 2009.  
LIU Bing. Passive underwater targets recognition based on characteristics of hearing and neural network[D]. Xi'an: Northwestern Polytechnical University, 2009.
- [7] 鲁五一, 吴德华, 谢志明, 等. 基于听觉掩蔽效应的改进 MFCC 特征提取算法[J]. 信息化研究, 2009, 35(9): 16-18.  
LU Wuyi, WU Dehua, XIE Zhiming, et al. Improved MFCC feature extraction algorithm based on hearing masking effect[J]. Information Research, 2009, 35(9): 16-18.
- [8] Urlick R J. Principles of underwater sound[M]. McGraw-Hill, 1983.
- [9] 胡广书. 数字信号处理——理论、算法与实现(第二版)[M]. 北京: 清华大学出版社, 2003.  
HU Guangshu. Digital Signal Processing--Theory, Arithmetic, Realization (Second Edition)[M]. Beijing: TsingHua University Press, 2003.