

# 水下目标特征提取方法研究

郭丽华, 王大成, 丁士圻

(哈尔滨工程大学水声工程学院, 哈尔滨 150001)

**摘要:** 有效的特征提取技术是水雷目标识别的基础。文章采用了两种前期研究中较为有效的水雷目标特征提取方法(频域离散小波变换法和常数  $Q$  滤波带能量法), 并引入了一种应用在水下目标识别领域中的特征提取方法(波形结构法)。应用此三种特征提取方法提取的特征来识别实雷目标以及假目标, 分类器采用三层 BP 算法的前向神经网络, 给出了具体的识别率, 说明该特征提取算法是有效的, 用波形结构法进行水雷目标的特征提取是可行的。

**关键词:** 水雷目标识别; 特征提取; 波形结构; 人工神经网络

中图分类号: TN911      文献标识码: A      文章编号: 1000-3630(2005)03-0148-04

## Extraction of features of underwater target

GUO Li-hua, WANG Da-cheng, DING Shi-qi

(College of Underwater Acoustic Engineering, Harbin Engineering University, Harbin 150001, China)

**Abstract:** Effective feature extraction is fundamental in the underwater mine recognition. Two feature extraction techniques effective in the mine recognition are discussed, namely, frequency discrete wave transform (FDWT) and  $Q$ -filter. A feature extraction technique, wave structure (WS), is introduced for underwater target recognition. The achieved recognition ratio with 3-layer BP network indicates the effectiveness of the applied techniques and feasibility of the WS technique used in feature extraction of mines.

**Key words:** mine target recognition; feature extraction; waveform structure; artificial neural network

## 1 引 言

声纳目标识别系统对水下目标的正确识别是建立在有效的特征提取技术基础上的<sup>[1,2]</sup>。只有提取到区别于其它目标的特征, 才能保证较准确的探测和识别<sup>[3]</sup>。

在回波特性研究中, 亮点具有更广泛的含义。任何一个复杂目标的回波都可以等效成若干个散射回波相干迭加的结果。根据形成机理可以把亮点分成几何亮点和弹性亮点两类<sup>[4]</sup>。大量的前期工作表明弹性亮点在实际回波信号中较难生成, 所以本文重

点的特征提取方法在于寻找真实目标与假目标在几何亮点上的差异。在基于弹性亮点的回波特征提取方法中, 目前应用较好的是“信号频谱离散小波变换特征”, 因此本文也采用了该方法。在基于几何亮点的回波特征提取方法中, 本文采用常数  $Q$  子带能量法和波形结构法。文中所用的特征提取方法提取了目标的几何亮点和弹性亮点, 已经较为全面地反映了整个信号的特征, 为分类系统的正确实现提供了坚实的基础。

## 2 目标特征提取方法

本文使用信号频谱离散小波变换特征、常数  $Q$  子带能量法和波形结构法分别对湖试数据进行分类识别。以下对三种特征提取方法分别予以介绍。

## 2.1 频域离散小波变换特征

信号频域离散小波变换(FDWT)<sup>[5]</sup>是一种能消除几何亮点的影响,只提取目标弹性亮点的方法。具体算法为:对目标回波进行 Hilbert 变换,然后对得到的解析信号做 FFT,再对 FFT 的结果取模,最后对回波的幅频信号做离散小波变换。经过分析,信号幅频特性的离散小波变换的第四级近似系数中主要包含目标的弹性特征,几何特征被滤除在各个细节系数中。因此采用信号幅频特性的离散小波变换的第四级近似系数作为目标特征,能够区分几何尺度相似的雷与石头(弹性与非弹性目标),但不能区分不同的弹性目标。

## 2.2 常数 Q 滤波带能量特征

本文采用该方法来区分几何形状有较大差异的目标。例如,试验中采用的水雷模型的几何亮点明显少于假目标。

常数 Q 滤波带能量特征提取法(Q-Filter)<sup>[5]</sup>是在目标回波的频带内,将通频带分为若干频段,求出每一子带的能量,即:

$$E_i = \int_{f_{i-1}}^{f_i} |Y(f)|^2 df \quad i=1, \Lambda, N \quad (1)$$

其中,  $Y(f)$  是回波的频谱,  $f_1$  是通频带的下限频率,  $f_N$  是通频带的上限频率。频带按下式划分:

$$f_i = \frac{2Q+1}{2Q-1} f_{i-1} \quad (2)$$

式中,  $Q$  为每一子带的中心频率与其对应的带宽之比,为常数。  $Q$  值决定子带数目,  $Q$  值大,频带划分精细,但特征的维数随之增加。根据信号的带宽的特征维数  $N$  决定  $Q$  的取值。本文取  $N=15$ , 则  $Q$  值为:

$$\left( \frac{f_N}{f_1} \right)^{\frac{1}{N}} = k \quad Q = \frac{k+1}{2(k-1)} \quad (3)$$

这种常数  $Q$  子带能量特征方法难以区分弹性目标和非弹性目标。

## 2.3 波形结构特征

波形结构特征在参考文献[6]中主要应用于水下目标识别系统的特征提取。本文将其引入到具体的水雷目标特征提取中。

背景回波反映了目标附近的混响和环境干扰的特性,比较目标回波和背景回波的各变换序列的差异可以得到和环境变化基本无关的目标特征信息。考虑到介质的随机性会造成回波信号的起伏,可利用二者的统计特征的差异,以获得较为稳定的特征,

并称之为统计比较特征。

### 2.3.1 平滑能量扫描特征

平滑能量扫描(Smoothed Energy Scan, SES)变换是对目标回波作时域能量平均,得到所谓的能量曲线,并在此基础上直接计算目标回波的亮点结构特征。

设目标回波为  $\{u_i(k)\} (k=1, 2, \dots, K)$ , 使用宽度为 256、步长为 64 的移动窗,计算其能量曲线  $\{E_i(n)\} (n=1, 2, \dots, N)$ :

$$E_i(n) = \frac{1}{256} \sum_{k=64(n-1)+1}^{64(n-1)+256} |u_i(k)|^2, \quad N = \text{int}((K-256)/64) + 1 \quad (4)$$

将  $\{E_i(n)\}$  规范成等距频率直方图的形式  $\{e_i(n\epsilon)\} (n=1, 2, \dots, N)$ , 计算  $\{e_i(n\epsilon)\}$  偏离高斯曲线的程度,取  $S_e = (N, \mu_{e_i}, \sigma_{e_i}, \alpha_{e_i}, \beta_{e_i})$  作为平滑能量扫描特征,其中:  $\mu_{e_i}$  为均值,  $\sigma_{e_i}$  为标准差,  $\alpha_{e_i}$  为偏度系数,  $\beta_{e_i}$  为峰度系数,文中以下符号意义相同。

平滑能量扫描特征反映了目标回波的能量曲线在时域上的延展程度和偏离高斯曲线的程度,以此反映目标的亮点结构特征。

### 2.3.2 原始变换一维特征

对于原始变换序列,即目标回波和背景回波,使用一维特征提取计算其响应的亮点结构特征。一维序列的特征提取包括提取波长、峰间幅值和帧平均 FFT 变换的统计比较特征。其算法包括多门限统计、主部筛选、统计特性计算、帧平均 FFT 变换和差异比较几个步骤。

#### (1) 多门限统计

利用多门限统计方法<sup>[6]</sup>得到背景原始变换序列过门限波的波长样本  $\{\Lambda_b(l)\}$  和峰间幅值样本  $\{\Gamma_b(l)\} (l=1, 2, \dots, L_b)$ 。同理可得目标原始变换序列过门限波的波长样本  $\{\Lambda_t(l)\}$  和峰间幅值样本  $\{\Gamma_t(l)\} (l=1, 2, \dots, L_t)$ 。

#### (2) 主部筛选

波长样本和峰间幅值样本的分布特性通常在某个有限的区域内具有明显的统计规律,该区域内反映了序列的本质特性。由于发射波形的不同、环境的变化以及变换算法的不同,集中分布的区域带有很大的不确定性,必须设法自动筛选出该区域,这就是所谓的主部筛选。主部筛选可选用  $4\sigma$  迭代筛选法。经过主部筛选得到样本  $\{\Lambda_b(l)\}$  的主部  $\{\lambda_b(l)\} (l=1, 2, \dots, L_{b\lambda})$ , 同理可得样本  $\{\Lambda_t(l)\}$ 、 $\{\Gamma_t(l)\}$  和  $\{\Gamma_b(l)\}$  的主

部 $\{\lambda_l(l)\}(l=1,2,\dots,L_{\lambda})$ 、 $\{\gamma_l(l)\}(l=1,2,\dots,L_{\gamma})$ 和 $\{\gamma_b(l)\}(l=1,2,\dots,L_{b\gamma})$ 。

### (3) 统计特性计算

对样本主部 $\{\lambda_l(l)\}$ 、 $\{\gamma_l(l)\}$ 、 $\{\lambda_b(l)\}$ 和 $\{\gamma_b(l)\}$ 的统计特性的计算是类似的,这里主要就背景原始变换序列的波长样本主部 $\{\lambda_b(l)\}(l=1,2,\dots,L_{b\lambda})$ 加以说明。

先作出 $\{\lambda_b(l)\}$ 的等距频率直方图 $f_{b\lambda}(h)$ ,即

$$f_{b\lambda}(h) = \begin{cases} \frac{L_{b\lambda} - \sum_{l=1}^{L_{b\lambda}} |\text{sgn}(\lambda_b(l) - h)|}{L_{b\lambda}} & h = a_{b\lambda}, a_{b\lambda+1}, \dots, b_{b\lambda} \\ 0 & \text{其他} \end{cases} \quad (5)$$

设波长 $h_0$ 的频数最大,众数

$$m_{b\lambda} = (h_0 - 0.5) + \frac{f_{b\lambda}(h_0 - 1)}{f_{b\lambda}(h_0 - 1) + f_{b\lambda}(h_0 + 1)}$$

众数的频数  $P_{b\lambda} = f_{b\lambda}(h_0)$  (6)

从而得背景原始变换序列的波长主部 $\{\lambda_b(l)\}$ 的统计特性,记为:

$$S_{b\lambda} = (\mu_{b\lambda}, \sigma_{b\lambda}, \alpha_{b\lambda}, \beta_{b\lambda}, m_{b\lambda}, p_{b\lambda}) \quad (7)$$

同理可得目标原始变换序列的波长主部 $\{\lambda_l(l)\}$ 的统计特性 $S_{l\lambda}$ 。

由于峰间幅值的分布是连续的,从而等距直方图有关众数及其频数的计算和波长有所不同。基于前面的规范化和主部筛选,对任意的目标和背景变换序列,直方图的间距几乎总是可以取为0.05。这里就背景原始变换序列的峰间幅值样本主部 $\{\gamma_b(l)\}(l=1,2,\dots,L_{b\lambda})$ 说明众数及其频数的计算。

先作出 $\{\gamma_b(l)\}$ 的等距直方图 $f_{b\gamma}(h)$ ,即

$$f_{b\gamma}(h) = \begin{cases} \frac{L_{b\gamma} - \sum_{l=1}^{L_{b\gamma}} \left| \text{sgn} \left( \text{int} \left( \frac{\gamma_b - a_{b\gamma}}{0.05} \right) - (h-1) \right) \right|}{L_{b\gamma}} & h=1,2,\dots,H \\ 0 & \text{其他} \end{cases} \quad (8)$$

设样本落入第 $h_0$ 个小区间的频数最大,则众数

$$m_{b\gamma} = a_{b\gamma} + 0.05 \cdot \left( (h_0 - 1) + \frac{f_{b\gamma}(h_0 - 1)}{f_{b\gamma}(h_0 - 1) + f_{b\gamma}(h_0 + 1)} \right) \quad (9)$$

定义和 $m_{b\gamma}$ 对应的众数区间为 $M = [m_{b\gamma} - 0.025, m_{b\gamma} + 0.025]$ ,众数的频数是指落入区间 $M$ 的频数,其值

$$\text{是: } P_{b\gamma} = \sum_{l=1}^{L_{b\gamma}} [\text{sgn}(\text{sgn}(\gamma_b(l) - (m_{b\gamma} - 0.025)) + 0.5) + 1] \cdot [\text{sgn}(\text{sgn}(m_{b\gamma} + 0.025 - \gamma_b(l)) - 0.5) + 1] / (4L_{b\gamma}) \quad (10)$$

从而可以得到 $\{\gamma_b(l)\}$ 的统计特性,记为:

$$S_{b\gamma} = (\mu_{b\gamma}, \sigma_{b\gamma}, \alpha_{b\gamma}, \beta_{b\gamma}, m_{b\gamma}, p_{b\gamma}) \quad (11)$$

同理可得目标原始变换序列的峰间幅值样本主部 $\{\gamma_l(l)\}$ 的统计特性 $S_{l\gamma}$ 。

### (4) 帧平均 FFT 变换

选择 256 点的不重叠帧平均 FFT 变换的统计特性作为谱特征。对每帧 FFT 变换取幅值后再平均,得到帧平均幅值谱。在帧平均幅值谱中,第一个点反映的是直流分量,其余呈中心对称的 255 个点的相对大小反映了交流分量的分布情况。因此,可选取帧平均幅值谱的第 2 到第 129 的 128 个点作为帧平均 FFT 变换的结果,并分别记目标和背景序列的帧平均 FFT 变换的结果为 $X_l(l)$ 和 $X_b(l)$  ( $l=1,2,\dots,128$ )。计算它们的统计特性的方法相同并且和前面类似,从而得到背景原始变换序列的帧平均 FFT 变换的统计特性。

同理可得目标原始变换序列的帧平均 FFT 变换的统计特性 $S_{l\chi}$ 。

### (5) 差异比较

比较目标和背景原始变换序列的各统计特性可以作为原始变换的一维特征,取

$$\begin{aligned} \Delta S_{\lambda} &= S_{l\lambda} - S_{b\lambda} & \Delta S_{\gamma} &= S_{l\gamma} - S_{b\gamma} \\ \Delta S_{\chi} &= S_{l\chi} - S_{b\chi} \end{aligned} \quad (12)$$

使用该种方法比较目标和背景原始变换序列的差异,可以实现特征提取对环境的自适应。

## 3 实验及结果

为了获取实际的水雷回波原始数据,曾做多次水池试验、湖上试验以及海上试验。本文所处理的数据主要是来自于 1998 年 10 月的松花湖试验。松花湖试验回波测量示意图如图 1 所示。

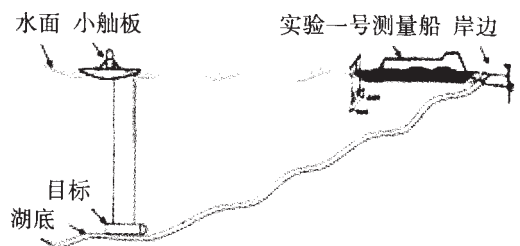


图 1 松花湖试验测量回波示意图

Fig.1 Sketch map for collection echos of SongHuaHu Test

船靠岸系缆固定。在船尾安装吊放支架,用于起降收、发换能器阵,发射阵固定在接收阵之上,处于收发一体的状态。阵所在位置水深 3m,阵位于水下 1m。目标利用小舢板自舷侧吊于放水中。

目标:实验采用 3 个目标,分别称为目标一、目标二、目标三。目标一、目标二分别是雷壳,目标三是

用木板和石块组成的假目标。为了使目标能沉于水中,目标内注入部分湖水。

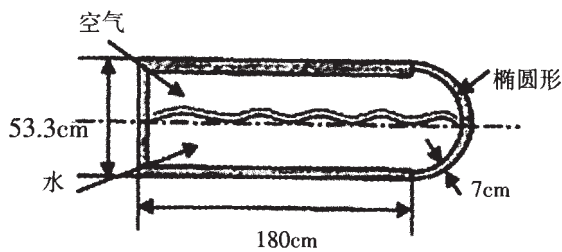


图 2 目标一  
Fig.2 Target 1

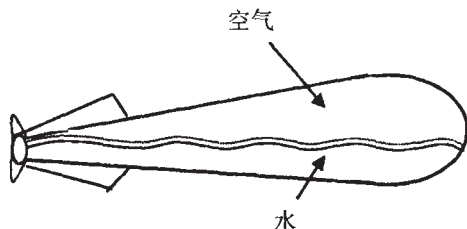


图 3 目标二  
Fig.3 Target 2

训练和分类样本数 524 个,是在不同的发射波形、不同的发射频率条件下采集的,分别来自两类不同形状的目标与木板及石块组成的假目标,均为松花湖实验实测的回波信号。

本文采用三层 BP 算法的前向神经网络(简称 BP 神经网络)对三种目标进行识别。

在三层 BP 神经网络的学习训练过程中,对于水雷目标的学习,采用了共 16 个数据样本;对于假目标的学习,采用了共 22 个数据样本。

对于学习样本分类识别结果如表 1 和表 2 所示,其中, EQ 代表常数 Q 子带能量特征, TZ 代表波形结构特征, WT 代表信号频谱小波变换特征。将湖试所有目标信号作为测试样本,各种方法的总体识别结果如表 3 所示。

## 4 结 论

综合分类识别结果可得出如下结论:

(1) 三种特征提取方法,其分类的性能是略有不同的:常数 Q 子带能量特征法的识别率相对较高,而信号频谱小波变换法的识别率相对较低。这可能是由于在湖试的条件下,因为环境的关系,目标的弹性特征相对来说不够明显,而目标的几何特征相对来说较为突出的缘故。

表 1 湖试水雷目标分类识别结果(学习样本)

Table 1 The identification result of mine target samples of SongHuaHu test(study samples)

识别方法	WT	EQ	TZ
正确识别样本数	16	16	16
错误识别样本数	0	0	0
正确识别率	100%	100%	100%

表 2 湖试假目标分类识别结果(学习样本)

Table 2 The identification result of stone target samples of SongHuaHu test(study samples)

识别方法	WT	EQ	TZ
正确识别样本数	19	21	20
错误识别样本数	3	1	2
正确识别率	86.4%	95.5%	90.9%

表 3 湖试目标信号分类识别结果(测试样本)

Table 3 The identification result of mine & stone target samples of SongHuaHu test(test samples)

识别方法	WT	EQ	TZ
正确识别样本数	345	372	369
错误识别样本数	179	152	155
正确识别率	65.8%	71.0%	70.4%

(2) 从总体上来看,本文所采用的特征提取方法基本上是有用的,尤其是从其它水下目标识别领域中所引入的波形结构法,其分类的效果大体上介于其它两种特征提取方法的分类效果之间,而这两种方法已经成功的应用于水雷目标识别领域,所以作者认为可以把波形结构法作为一种新的水雷目标识别方法加以深入的研究。

## 参 考 文 献

- [1] 张明之. 声纳目标的分类识别研究[D]. 哈尔滨工程大学硕士论文.1997.1-3.  
ZHANG Mingzhi. Sort & recognition research on sonar targets[D]. Master's dissertiaon of Harbin Engineering University. 1997.1-3.
- [2] Richard J. Vaccaro. The past, present, and future of underwater acoustic signal processing [J]. IEEE Signal Processing Magazine, 1998, 21:1-2.
- [3] 章新华. 水下目标自动识别的核心技术[J]. 兵工学报, 1998, 19(3):275-280.  
ZHANG Xinhua. A survey on the core techniques in the automatic recognition of sonar targets[J]. Acta Armamentar, 1998, 19(3):275-280.



好的检测效果。第三种子阵结构的输出信噪比比第二种子阵高,从图中也可以看到,其检测性能比第二种子阵还要好。本文前面已经分析得到子阵的长度不能很长,而对于第三种子阵结构,子阵长度  $H=24$ ,是整个基阵长度的  $3/4$ ,比较长的子阵却还能得到比较理想的效果,是因为试验海区的水深比较深的原因。

## 6 结 论

本文从多波束测深系统的两种相位检测法出发,分析了分裂子阵相位检测法和多子阵检测法的处理过程及特点,讨论并推导了它们对应的输出信噪比,得出如下结论:

(1) 在基元总数、子阵长度和子阵间隔相同的情况下,因为多子阵利用了全部的基元数据,多子阵处理的输出信噪比显然高于同子阵长度的分裂子阵。应优先选用多子阵处理方法。

(2) 对于多子阵检测法来说,为了提高输出信噪比,子阵结构的选取与基元总数、子阵个数、子阵长度、子阵的中心间隔等有关。根据多子阵检测法的要求,在优化参数的基础上,可以实现多波束测深系统的超宽覆盖,改善海底检测性能。

### 参 考 文 献

[1] 聂良春,朱琦,李海森.幅度-相位联合检测法在多波束测

深系统中的应用研究[J].声学技术,2005, 24(2):85-88  
NIE Liang-chun, ZHU Qi, LI Hai-sen. Research On application of amplitude-phase detection method in multi-beam bathymetric system[J]. Technical Acoustics, 2005, 24(2):85-88.

[2] Luren Yang, Torfinn Taxt. Multibeam sonar bottom detection using multiple subarrays[A]. In Proc Oceans' 97 [C], 1997:932-938.

[3] 聂良春,朱琦,李海森.多波束相位差序列多项式回归模型阶次的确定[J].海洋测绘,2003, 23(5):1-5.

NIE Liangchun, ZHU Qi, LI Haisen. The determination of orders of the polynomial regression model in multi-beam phase difference series[J]. Hydrographic Surveying and Charting, 2003, 23(5):1-5.

[4] 周天,朱志德,李海森.多子阵幅度-相位联合检测法在多波束测深系统中的应用[J].海洋测绘,2004,24(4):7-10.

ZHOU Tian, ZHU Zhide, LI Haisen. The application of multi-subarray amplitude-phase united detection method in multi-beam bathymetry system[J]. Hydrographic Surveying and Charting, 2004, 24(4):7-10.

[5] 田坦.声纳技术[M].哈尔滨:哈尔滨工程大学出版社,2000  
TIAN Tan. Sonar Technology[M]. Harbin:Harbin Engineering University Press, 2000.

[6] 郑兆宁,向大威.水声信号被动检测与参数估计理论[M].北京:科学出版社,1981.

ZHENG Zhaoning, XIANG Dawei. Passive detection and parameter estimation theories of underwater acoustic signal[M]. Beijing:Science Press, 1981.

(上接第 151 页)

[4] 汤渭霖.声呐目标回波的亮点模型[J].声学学报,1994, 3(19):92-100.

TANG Weilin.Highlight model of echos from sonar targets[J].ACTA ACUSTICA, 1994, 3(19):92-100;

[5] 李秀坤.水雷目标特征提取与识别研究[D].哈尔滨工程大学博士论文. 2000.58-66.

LI Xiu-kun.Extraction and recognition of mine character-

istics[D]. Doctor's Dissertation of Harbin Engineering University. 2000.58-66.

[6] 王学军.水下目标回声识别的特征提取和分类研究 [D].上海交通大学博士论文, 1998.20-23.

WANG Xuejun. Research on extraction and recognition of the underwater targets[D]. Doctor's Dissertation of Shanghai Jiao tong University, 1998.20-23.