

文章编号: 2095-2163(2019)05-0205-05

中图分类号: TP391

文献标志码: A

# 基于多分辨谱特征提取的鱼雷攻击目标检测

李斌

(中国人民解放军91640部队, 广东湛江524064)

**摘要:** 为了提高鱼雷的攻击目标检测能力, 提出基于多分辨谱特征提取的鱼雷攻击目标检测方法。采用主动探测方法构建鱼雷攻击目标的发射信号和回波信号模型, 对回波信号采用小波降噪方法进行滤波处理, 提高回波信号的信噪比, 提取鱼雷对敌攻击目标回波探测信号的多分辨谱特征量, 根据特征的聚焦性进行空间波束形成处理, 结合方位估计和多普勒估计方法实现对目标方位的准确估计, 采用联合参量分析和谱峰检测方法, 实现对鱼雷攻击目标的准确检测和目标方位识别。仿真结果表明, 采用该方法进行鱼雷攻击目标检测的抗干扰能力较强, 准确检测概率较高, 具有很好的目标检测和识别能力。

**关键词:** 多分辨谱特征提取; 鱼雷; 攻击; 目标检测; 信号

## Detection of torpedo attack target based on multi-resolution spectral feature extraction

LI Bin

(No. 91640 Troops of PLA, Zhanjiang Guangdong 524064, China)

**[Abstract]** In order to improve the attack target detection ability of the torpedo, a target detection method based on multi-resolution spectral feature extraction is proposed. The active detection method is used to construct the transmit signal and echo signal model of the target, the echo signal is filtered and processed by wavelet denoising method, the signal-to-noise ratio of the echo signal is improved, the multi-resolution spectral characteristic of the echo detection signal of the enemy target is extracted, the spatial beam performance is processed according to the focus of the feature, and the azimuth estimation and Doppler estimation method are combined to realize the accurate estimation of the target azimuth. The joint parameter analysis and spectral peak detection method are used to realize the accurate detection of the target and the recognition of the target azimuth. The simulation results show that this method has strong anti-interference ability, high accurate detection probability and good target detection and recognition ability.

**[Key words]** multi-resolution spectral feature extraction; torpedo; attack; target detection; signal

## 0 引言

随着水下探测制导技术的快速发展, 鱼雷的智能性越来越好, 鱼雷在进行水下攻击过程中, 通过声呐基阵发射探测脉冲信号, 对目标进行有效探测和检测识别, 探测目标信号通过目标回波发射的特征量, 进行目标的准确检测识别, 从而触发控制段实现精准制导和目标攻击, 研究鱼雷的目标检测识别方法, 在整个鱼雷的智能化设计中具有重要意义, 相关的目标检测算法研究受到人们的极大关注<sup>[1]</sup>。

对鱼雷攻击目标检测是建立在对目标回波探测信号的特征分析和滤波处理基础上, 在强海水背景干扰下, 提取鱼雷目标回波信号的探测脉冲量, 根据脉冲的谱峰特征进行信号检测识别<sup>[2-3]</sup>, 文献[4]中提出基于回波盲源分离的水中兵器攻击目标检测算法, 提取回波信号的高阶谱特征, 结合回波探测脉冲

识别方法进行鱼雷攻击目标检测, 但该方法进行目标检测和抗干扰性不好。文献[5]中提出基于自相关匹配滤波的水下目标检测方法, 采用滤波检测方法进行信号的抗干扰处理, 但该方法的计算开销较大, 对目标检测的实时性不好。针对上述问题, 本文提出基于多分辨谱特征提取的鱼雷攻击目标检测方法。采用主动探测方法构建鱼雷攻击目标的发射信号和回波信号模型, 对回波信号采用小波降噪方法进行滤波处理, 提高回波信号的信噪比, 提取鱼雷对敌攻击目标回波探测信号的多分辨谱特征量, 根据特征的聚焦性进行空间波束形成处理, 结合方位估计和多普勒估计方法实现对目标方位的准确估计, 采用联合参量分析和谱峰检测方法, 实现对鱼雷攻击目标的准确检测和目标方位识别。最后进行仿真实验分析, 展示了本文方法在提高鱼雷攻击目标检测能力方面的优越性能。

作者简介: 李斌(1986-), 男, 大专, 主要研究方向: 鱼雷技术保障、鱼水雷检测。

收稿日期: 2019-07-18

哈尔滨工业大学主办 ◆ 专题设计与应用

## 1 信号模型及滤波预处理

### 1.1 鱼雷攻击目标的发射及回波信号模型

为了实现鱼雷攻击目标检测,采用主动探测方法构建鱼雷攻击目标的发射信号和回波信号模型,鱼雷攻击目标的发射信号采用声呐传感基阵进行多分布集成输出控制,采用多分辨的波束阵列形成方法,进行鱼雷攻击目标的发射信号的集成处理,发射信号的离散量为  $x_n$ ,信号回波的期望响应为  $d_n$ ,采用高阶频谱特征监测方法,进行鱼雷攻击目标的发射信号和统计特性,假设攻击目标为水下潜艇,采用声呐脉冲探测方法,获得回波信号,为提高方位分辨力和抗混响能力,采用 Wigner-Vill 分布检测方法,得到鱼雷攻击目标的发射信号的冲激响应为:

$$d(t) = a(t)c(t) = \sum_{n=0}^{\infty} d_n g_c(t - nT_c), \quad (1)$$

对这些信号进行时频联合分析,得到回波信号的频率特征估计为:

$$d_n = \begin{cases} +1, & a_n = c_n; \\ -1, & a_n \neq c_n. \end{cases} \quad (n-1)T_c \leq t \leq nT_c, \quad (2)$$

取窗函数为  $\delta(t)$ ,采用调制滤波方法进行信号的盲源分离,取无穷长的窗函数,即  $g(t) = 1$ ,采用直接序列检测方法进行目标回波检测,得到回波探测的误差分量为:

$$\hat{e}(k) = z_R(k) (|z_R(k)|^2 - \hat{s}_R^2(k)) + jz_I(k) (|z_I(k)|^2 - \hat{s}_I^2(k)), \quad (3)$$

根据回波探测信号的时宽  $\Delta t$  和频宽  $\Delta f$ ,进行信号加窗处理,对所有频率都使用单一的窗,目标检测统计量特征方程描述为:

$$\text{sgn}(z_R^2(k) - R_{MDMMA_R}) = \text{sgn}(z_R^2(k) - \hat{e}_R^2(k)), \quad (4)$$

$$\text{sgn}(z_I^2(k) - R_{MDMMA_I}) = \text{sgn}(z_I^2(k) - \hat{e}_I^2(k)), \quad (5)$$

其中,  $\hat{e}_R^2(k)$  表示鱼雷攻击目标的发射及回波信号的调制误差;  $z_R^2(k)$  为窗口函数;  $z_I^2(k)$  为线性调频系数;  $\hat{e}_I^2(k)$  为时间轴上的高频成分。

在不同尺度上进行鱼雷攻击目标信号的谱估计,输出谱特征量为:

$$\hat{f}_i(n) = \frac{1}{2\pi} \sum_{i=0}^p ia_i n^{i-1}, \quad (6)$$

使用 WVD 时频检测方法,进行鱼雷攻击目标信号的滤波检测,结合小波尺度分解方法,得到输出检测特征量表示为:

$$X_{lk}(t) = \sum_{i=k}^n c_i(t) + r_n(t), \quad (7)$$

其中,  $k$  为阶数,对于信号  $s(t)$ ,指定中心频率,得到鱼雷攻击目标的回波信号为:

$$P(t, f) = \int_{-\infty}^{\infty} s(u + \frac{\tau}{2}) s^*(u - \frac{\tau}{2}) \alpha(\tau, v) e^{-j2\pi(vt + f\tau - v\tau)} du dv d\tau. \quad (8)$$

通过上述处理,实现鱼雷攻击目标的发射及回波信号模型构建,为目标检测提供信号输入基础。

### 1.2 回波信号滤波处理

对回波信号采用小波降噪方法进行滤波处理,提高回波信号的信噪比<sup>[6]</sup>,对于给定的宽带高分辨鱼雷攻击目标回波探测信号  $x(n)$  和尺度  $d$ ,用  $\bar{E}(n_i, d)$  表示鱼雷攻击目标回波探测信号的能量,采用线性调频信号模拟辐射噪声信号,首先得到某尺度  $a^*$  下的  $b_1, b_2$ ,可计算时延和尺度如下:

$$\tau_0 = \frac{1}{2}(b_1 + b_2), \quad (9)$$

$$s_0 = (a^* + \frac{b_1 - b_2}{2t_0})^{-1}, \quad (10)$$

通过时频伸缩,得到鱼雷攻击目标回波探测信号的频谱混迭特征函数为:

$$m_{k_1 k_2 \dots k_n} = E \{ x_1^{k_1} x_2^{k_2} \dots x_n^{k_n} \} = (-j)^r \left[ \frac{\partial^r \Phi(\omega_1, \omega_2, \dots, \omega_n)}{\partial \omega_1^{k_1} \partial \omega_2^{k_2} \dots \partial \omega_n^{k_n}} \right]_{\omega_1 = \omega_2 = \dots = \omega_n = 0}, \quad (11)$$

在未知混合参数的情况下,获取离散的回波攻击目标回波探测信号  $x(n)$ ,采用短时 Fourier 变换进行信号加窗处理<sup>[7]</sup>,结合关联规则挖掘和频谱特征提取方法,得到鱼雷攻击目标回波探测信号在各特征量的聚集中心,滤波传递函数为  $h(t)$ ,故回波探测信号的频谱宽度为  $T = (2d + 1)T_s$ ,  $F_s = 1/T_s$ 。采用时频特征分解方法对攻击目标回波探测信号进行频谱分解:

$$X_p(u) = F^p x(t) = F^\alpha [x(t)] = \int_{-\infty}^{+\infty} K_p(t, u) x(t) dt, \quad (12)$$

结合高阶统计量分析方法进行信号滤波,把  $X_p(u)$  进行时频特征转换,可以表示为:

$$X_p(u) = \begin{cases} \sqrt{\frac{1 - j \cot \alpha}{2\pi}} e^{j \frac{1}{2} \cot \alpha} \int_{-\infty}^{+\infty} x(t) e^{j \frac{t^2}{2} \cot \alpha - j u t} dt; \\ \alpha \neq n\pi; \\ x(u), & \alpha = 2n\pi; \\ x(-u), & \alpha = (2n \pm 1)\pi. \end{cases} \quad (13)$$

提取鱼雷攻击目标回波探测信号的高分辨特征量,采用匹配滤波检测器,进行小波尺度分解,实现对鱼雷攻击目标回波探测信号的滤波和降噪处理,得到滤波器模型如图1所示。

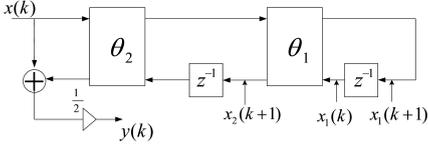


图1 目标信号检测的滤波器结构

Fig. 1 Filter structure of target signal detection

## 2 鱼雷攻击目标检测优化

### 2.1 空间波束形成

在采用主动探测方法构建鱼雷攻击目标的发射信号和回波信号模型,对回波信号采用小波降噪方法进行滤波处理的基础上,进行鱼雷攻击目标检测设计<sup>[8]</sup>,提出基于多分辨谱特征提取的鱼雷攻击目标检测方法,多分辨谱表示为:

$$s_m(t) = \cos\{2\pi f_0[t + \tau_m(\theta)]\}, \quad (14)$$

使用窄时域窗进行鱼雷攻击目标回波探测信号加窗处理,得到波束输出为:

$$l(t) = \left(\sum_{m=1}^M u_m\right) \cos(2\pi f_0 t) - \left(\sum_{m=1}^M v_m\right) \sin(2\pi f_0 t), \quad (15)$$

采用空间波束形成,分析鱼雷攻击目标回波探测信号,得到信号高分辨谱特征提取:

$$u_m = \cos[2\pi f_0 \tau_m(\theta)]; v_m = \sin[2\pi f_0 \tau_m(\theta)], \quad (16)$$

对于鱼雷攻击目标回波探测信号,对提取的谱特征量采用方位和相位联合估计方法,得到目标回波探测信号的调制脉冲量为:

$$l(t) = A_l \cos(2\pi f_0 t + \alpha_l) \quad (17)$$

根据鱼雷攻击目标回波探测信号特征量聚集性,对攻击目标回波探测信号进行检测滤波,得到空间波谱记为:

$$x_k = \sum_{n=0}^{N/2-1} 2 \left( a_n \cos \frac{2\pi kn}{N} - b_n \sin \frac{2\pi kn}{N} \right) \quad (18)$$

$$k = 0, 1, \dots, N-1,$$

其中,  $a_n$  表示变尺度偏移量,采用多分辨谱特征提取方法,得到鱼雷攻击目标回波探测信号的谱峰为:

$$f_{Env}(s) = \begin{cases} \sqrt{\frac{2}{\pi}} e^{-s^2/2}, & s \geq 0; \\ 0, & y < 0. \end{cases} \quad (19)$$

$$f_{power}(p) = \begin{cases} \frac{1}{\sqrt{2\pi}} p^{-1/2} e^{-p/2}, & p \geq 0; \\ 0, & p < 0. \end{cases} \quad (20)$$

采用深度学习方法,进行空间波束形成处理,提高信号的检测和目标的方位识别能力。

### 2.2 目标检测及参量估计

在提取鱼雷对敌攻击目标回波探测信号的多分辨谱特征量,并根据特征的聚焦性进行空间波束形成处理的基础上,进行鱼雷攻击目标检测优化设计,得到空间谱的多普勒频移值为:

$$z_{\max} = \max_y \left\{ \max_{x=m_1}^{m_2} \{z_{xy}\} - \min_{x=m_1}^{m_2} \{z_{xy}\} \right\}, \quad (21)$$

根据信号特征量  $E$  的估计结果,综合反映鱼雷攻击目标回波信号的时间-频率联合特征量<sup>[9]</sup>,得到联合参数  $a_1(t)$  和  $a_2(t)$  由下式确定:

$$\begin{cases} a_1(t) = -2m(t) \cos(\theta(t)); \\ a_2(t) = m^2(t). \end{cases} \quad (22)$$

对鱼雷攻击目标的空间方位进行联合参数估计,最小收敛误差迭代式为:

$$e(n) = d(n) - \hat{\mathbf{w}}^H(n) \cdot \mathbf{x}(n), \quad (23)$$

$$\hat{\mathbf{w}}(n+1) = \hat{\mathbf{w}}(n) + \mu \cdot \mathbf{x}(n) \cdot e(n), \quad (24)$$

采用离散化处理方法进行信号加权控制,提高目标检测的抗干扰能力,并有效实现对旁瓣干扰的抑制,干扰抑制输出向量:

$$\boldsymbol{\mu}(n) = \mathbf{x}^T(n) \mathbf{P}(n-1) \mathbf{x}(n), \quad (25)$$

$$\mathbf{k}(n) = \frac{\mathbf{P}(n-1) \mathbf{x}(n)}{l + \boldsymbol{\mu}(n)}. \quad (26)$$

根据上述分析,采用联合参量分析和谱峰检测方法,实现对鱼雷攻击目标的准确检测和方位识别,提高目标检测和方位估计能力<sup>[10]</sup>。整个信号检测的实现流程结果框图如图2所示。

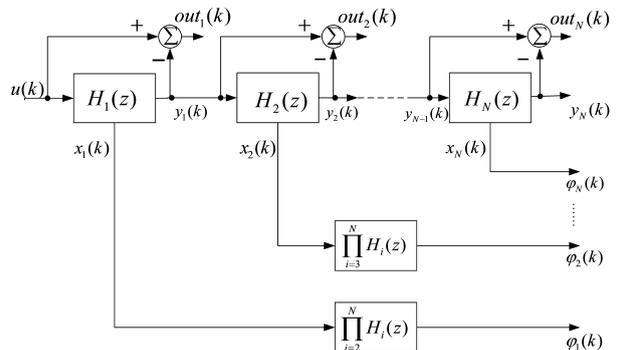


图2 目标检测的实现结构框图

Fig. 2 Realization structure diagram of target detection

### 3 仿真实验与结果分析

为了测试本文方法在实现鱼雷攻击目标检测中的应用性能,进行仿真实验,实验建立在 Matlab 7 仿真工具基础上,鱼雷攻击目标信号采集的最大的频率为 5 Hz,初始频率 0 Hz,截止频率 5 KHz,时宽 100 ms,模糊训练集为 200,自适应滤波的迭代步数为 1 000,根据上述仿真参量设定,进行目标检测仿真分析,给出目标回波信号波形如图 3 所示。

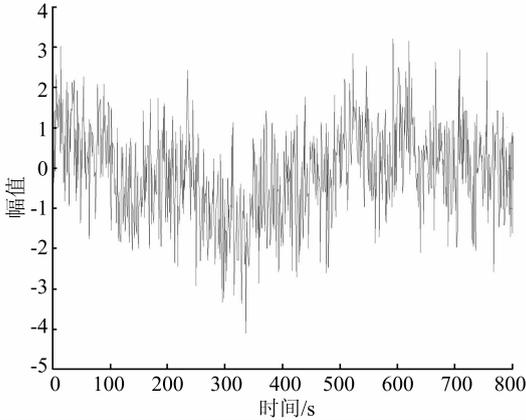


图3 目标回波信号波形

Fig. 3 Waveform of target echo signal

以图 3 的信号为输入,对回波信号采用小波降噪方法进行滤波处理,提高回波信号的信噪比,信号滤波输出如图 4 所示。

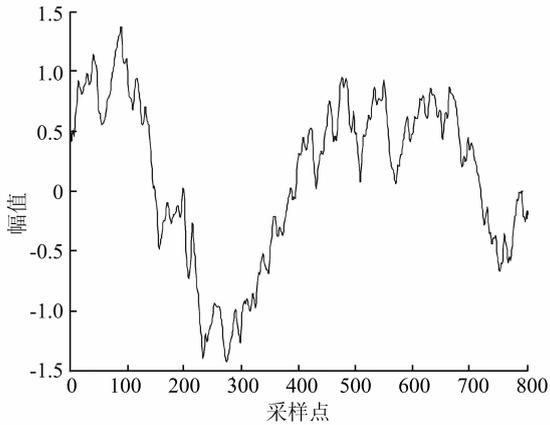


图4 信号滤波输出

Fig. 4 Signal filter output

分析图 4 得知,采用本文方法进行鱼雷对敌攻击目标信号的检测,对回波信号的滤波性能较好,信号的纯度得到有效提升,在此基础上,采用联合参量分析和谱峰检测方法,实现对鱼雷攻击目标的准确检测和目标方位识别,得到目标检测输出如图 5 所示。

分析图 5 得知,采用本文方法能有效实现鱼雷

攻击目标检测,对目标方位估计的空间分辨能力较好,抗干扰能力较强,测试不同方法进行鱼雷攻击目标检测的准确性,得到准确检测概率曲线如图 6 所示。

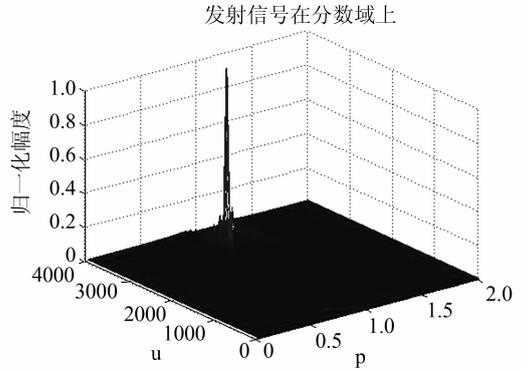


图5 目标检测输出

Fig. 5 Target detection output

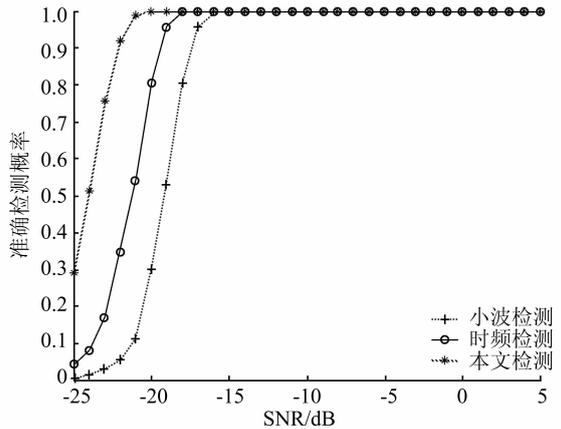


图6 检测性能分析

Fig. 6 Detection performance analysis

分析图 6 得知,采用本文方法进行鱼雷攻击目标检测的准确性较高,具有很好的目标检测和识别能力。

### 4 结束语

通过目标检测提高鱼雷的主动攻击能力,本文提出基于多分辨谱特征提取的鱼雷攻击目标检测方法。采用主动探测方法构建鱼雷攻击目标的发射信号和回波信号模型,对回波信号采用小波降噪方法进行滤波处理,提高回波信号的信噪比,提取鱼雷对敌攻击目标回波探测信号的多分辨谱特征量,根据特征的聚焦性进行空间波束形成处理,结合方位估计和多普勒估计方法实现对目标方位的准确估计,采用联合参量分析和谱峰检测方法,实现对鱼雷攻击目标的准确检测和目标方位识别。分析表明,采

(下转第 213 页)