

文章编号: 2095-2163(2019)01-0084-05

中图分类号: TN911

文献标志码: A

# 微弱信号背景下鱼雷对敌目标的有效检测算法研究

张成刚, 鞠晓东

(1 中国人民解放军 92819 部队, 辽宁 大连 116041; 2 中国人民解放军 91827 部队, 山东 威海 264300)

**摘要:** 在海水混响背景下, 鱼雷对敌目标检测受到的干扰较大, 检测信号微弱, 为了提高微弱信号背景下鱼雷对敌目标的检测能力, 提出一种基于主动脉冲回波探测和盲源分离技术的信号检测算法。构建鱼雷对比目标检测的微弱信号回波模型, 采用级联匹配滤波方法进行信号的干扰抑制和谱增强处理, 采用自相关波束形成方法进行信号的去盲处理, 提高微弱信号背景下鱼雷的主动目标探测能力, 提取目标回波信号的高阶谱特征量, 采用复包络检测方法实现对目标回波信号的准确定位和参数估计, 实现对微弱信号背景下鱼雷对敌目标的准确检测。仿真结果表明, 采用该算法进行目标检测的准确性较高, 提高了鱼雷的准确探测和对敌攻击能力。

**关键词:** 微弱信号; 鱼雷; 目标检测; 主动脉冲

## Research on effective detection algorithm of torpedo to enemy target in the background of weak signal

ZHANG Chenggang, JU Xiaodong

(1 No. 92819 Troops of PLA, Dalian Liaoning 116041, China; 2 No. 91827 Troops of PLA, Weihai Shandong 264300, China)

**【Abstract】** Under the background of sea water reverberation, torpedo's detection to enemy target is greatly disturbed and the detection signal is weak. In order to improve the detection ability of torpedo to enemy target under weak signal background, a signal detection algorithm based on aortic impulse echo detection and blind source separation is proposed. The weak signal echo model of torpedo contrast target detection is constructed, the interference suppression and spectrum enhancement are processed by cascaded matched filtering method, and the signal blind processing is carried out by auto-correlation beamforming method. The detection ability of torpedo active target in weak signal background is improved, the high order spectral characteristic of target echo signal is extracted, and the accurate location and parameter estimation of target echo signal are realized by using complex envelope detection method. The accurate detection of torpedo to enemy target under the background of weak signal is realized. The simulation results show that the accuracy of target detection using this algorithm is high and the ability of torpedo detection and enemy attack is improved.

**【Key words】** weak signal; torpedo; target detection; active pulse

## 0 引言

鱼雷作为一种重要的水中兵器, 在水下实现对目标潜艇、水面舰艇、水下设施的有效攻击中发挥重要作用, 利用水下爆炸的威力, 提高对敌方目标舰船的毁伤能力。在鱼雷的研究设计中, 鱼雷对敌目标的有效检测是鱼雷实现有效攻击的关键技术, 然而在复杂的海洋环境下, 受到海水背景噪声和敌方声诱饵的干扰, 导致鱼雷对敌目标探测的有效性大大下降。鱼雷对敌目标检测的方法主要有被动探测方法和主动探测方法<sup>[1]</sup>, 其中被动探测方法是通过接收地方舰船和潜艇的噪声, 实现目标攻击。主动探测方法是鱼雷通过发射主动脉冲信号, 通过目标回波反射, 实现对敌目标的探测与攻击。无论是哪种

探测方法, 都需要在微弱信号背景下进行目标检测算法的优化设计, 结合信号处理技术, 提高对敌目标的探测和识别能力, 研究微弱信号背景下鱼雷对敌目标的准确检测方法, 在进行鱼雷对敌目标定位和识别中具有重要意义<sup>[2]</sup>。

传统方法中, 鱼雷对目标的检测方法主要有匹配滤波检测方法、基于分数阶傅里叶变换的鱼雷目标检测算法、基于小波变换的目标检测算法等<sup>[3]</sup>, 上述方法通过对鱼雷目标的亮点回波模型构建, 结合时频分解和特征分离方法, 实现信号检测。其中, 文献[4]中提出基于分数阶傅里叶变换的鱼雷目标自动检测算法, 采用 FIR 滤波器进行了鱼雷主动目标回波信号的降噪处理, 提高信号的盲源分离能力, 降低输出信噪比, 但该方法进行水下潜艇的目标回

**作者简介:** 张成刚(1987-), 男, 学士, 助理工程师, 主要研究方向: 海军武器装备技术; 鞠晓东(1980-), 男, 硕士, 助理工程师, 主要研究方向: 兵器技术。

收稿日期: 2018-10-26

波信号检测时的自适应性能不好<sup>[5]</sup>。文献[6]中提出一种基于希尔伯特变换的鱼雷攻击目标信号检测,通过对目标的距离和速度参量估计,提高了信号的可识别能力,但该方法进行目标回波信号受到背景干扰较大,信号检测的抗干扰性能不好。

针对传统方法存在的弊端,为了提高微弱信号背景下鱼雷对敌目标的检测能力,提出一种基于主动脉冲回波探测和盲源分离技术的信号检测算法。构建鱼雷对比目标检测的微弱信号回波模型,首先采用级联匹配滤波方法进行信号的干扰抑制和谱增强处理,采用自相关波束形成方法进行信号的去盲处理,提高微弱信号背景下鱼雷的主动目标探测能力,提取目标回波信号的高阶谱特征量。然后采用复包络检测方法实现对目标回波信号的精确定位和参量估计,实现对微弱信号背景下鱼雷对敌目标的准确检测。最后进行仿真实验分析,展示了本文方法在提高鱼雷对敌目标检测能力方面的优越性能。

## 1 微弱信号背景下的鱼雷主动脉冲回波信号和特征分析

### 1.1 微弱信号背景下的鱼雷主动脉冲回波信号模型

为了实现在敌方声诱饵干扰和海水背景干扰下鱼雷对敌主动脉冲回波信号检测,首先给出微弱信号背景下的鱼雷主动脉冲回波信号模型,采用水下阵列传感跟踪识别技术,进行多阵列环境下的脉冲回波探测和目标检测,进行微弱信号背景下的鱼雷主动脉冲回波信号的原始数据采集,对采集的微弱信号背景下的鱼雷主动脉冲回波信号进行小波变换和滤波分析<sup>[7]</sup>,给出微弱信号背景下的鱼雷主动脉冲回波信号的数学模型表达式为:

$$z(t) = s(t) + js(t) \otimes h(t) = s(t) + j \int_{-\infty}^{+\infty} \frac{s(u)}{t-u} du = s(t) + jH[s(t)] \quad (1)$$

式中,  $a(t)$  称为微弱信号背景下的鱼雷主动脉冲回波信号  $z(t)$  的检测幅度,有时也称为包络;  $\varphi(t)$  称为鱼雷声自导头阵列进行信号检测的分布相位;  $Z(f)$  可由  $S(f)$  通过傅立叶变换得到;  $H(f)$  为微弱信号背景下的鱼雷主动脉冲回波信号的阶跃式传输函数。

采用平滑 WVD (Smoothed - wigner - ville distribution, SWVD) 变换进行脉冲回波信号的时频分解,SWVD 的定义式为:

$$SWVD_z(t, f) = W_z(t, f) * * G(t, f) \quad (2)$$

式中:  $* *$  表示对时间和频率的二维卷积,  $G(t, f)$  为平滑滤波器。采用相关波束形成方法,进行鱼雷主动脉冲回波信号的跳变特征定位,得到定位节点,定义为:  $v_m, m \in [1, n]$ 。微弱信号背景下的鱼雷主动脉冲回波信号的谱图可以看作是 SWVD 的一个特例,得到目标回波脉冲的谱图和短时 Fourier 变换的定义易知:

$$SPEC(t, f) = |STFT(t, f)|^2 = \int_{-\infty}^{\infty} z(u) \gamma^*(u-t) e^{-j2\pi fu} du \int_{-\infty}^{\infty} z^*(u) \gamma(s-t) e^{-j2\pi fs} ds = W_z(t, f) * * W_\gamma(-t, f) \quad (3)$$

其中,  $W_\gamma(-t, f)$  是微弱信号背景下的鱼雷主动脉冲短时 Fourier 变换的窗函数  $\gamma(t)$  的 WVD  $W_\gamma(t, f)$  的脉冲回波的时间反转形式,所以谱图可以看作是鱼雷声自导探测脉冲信号和窗函数的 WVD 的二维卷积,由此构建了微弱信号背景下的鱼雷主动脉冲回波信号模型,为信号检测和目标识别提供了原始信号基础。

### 1.2 级联匹配滤波和信号增强处理

在构建了微弱信号背景下的鱼雷主动脉冲回波信号模型的基础上,采用级联匹配滤波方法进行信号的干扰抑制和谱增强处理<sup>[8]</sup>,级联匹配滤波检测器如图 1 所示。

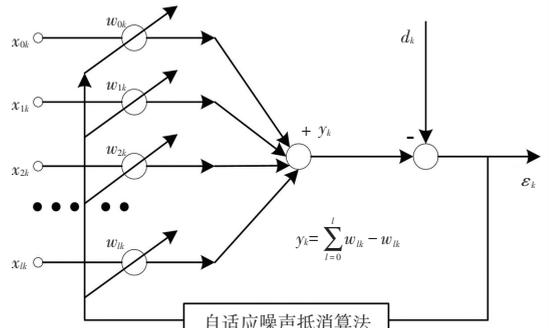


图 1 滤波器的结构模型

Fig. 1 Structure model of filter

根据图 1 所示的滤波器结构模型,进行信号的噪声滤波,在微弱信号背景下,若 SWVD 中选择平滑滤波器:  $G(t, f) = W_\gamma(-t, f)$ , 得到目标回波探测的 SWVD 谱退化为高阶特征谱图。结合自适应频谱分离方法,得到鱼雷回波脉冲可写作:

$$\tilde{y}(t) = \iint_{\tau\phi} b(\tau, \phi) \exp[j2\pi\phi t] \tilde{f}(t - \tau) dt d\phi \quad (4)$$

其中,  $b(\tau, \phi)$  是鱼雷主动脉冲回波信号的输出扩展函数;  $\tilde{f}(t)$  为鱼雷主动脉冲回波信号各频率分量信号的复包络;  $\tau$  为信号采集特征扩展带宽;  $\phi$

为鱼雷主动脉冲回波信号的频移特征量,对目标回波探测的WVD变形称为伪WVD(Pseudo-wigner-ville distribution, PWVD),定义为:

$$PWVD_z(t, f) = \int_{-\infty}^{\infty} z(t + \frac{\tau}{2}) z^*(t - \frac{\tau}{2}) h(\tau) e^{-j2\pi f \tau} d\tau = W_z(t, f) * H(f) \quad (5)$$

其中: \* 表示回波信号探测频域卷积,  $h(\tau)$  为窗函数,本质上  $h(f)$  是一个低通滤波器,采用短时傅立叶变换进行时频分解,得到信号增强输出为:

$$SPWVD_z(t, f) = \int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} g(u) h(\tau) z(t - u + \tau/2) z^*(t - u - \tau/2) e^{-j2\pi f \tau} du d\tau \quad (6)$$

其中,  $h(\tau)$  和  $g(u)$  是 Hilbert 谱和边际谱的偶函数,且  $h(0) = g(0) = 1$ , 采用修正平滑伪 WVD 进行目标回波信号的谱特征分离<sup>[9]</sup>, 提高信号的波束聚焦性。

## 2 目标检测算法优化

### 2.1 自相关波束形成及信号去盲处理

在上述构建了鱼雷对比目标检测的微弱信号回波模型,并采用级联匹配滤波方法进行信号的干扰抑制和谱增强处理的基础上,进行目标检测算法的优化设计,本文提出一种基于主动脉冲回波探测和盲源分离技术的信号检测算法。结合分数阶傅里叶变换进行频谱分离,得到鱼雷主动脉冲回波信号的谱分离结果为:

$$y(t) = \iint_{a,b} \rho(a, b) \frac{1}{\sqrt{|a|}} f\left(\frac{t-b}{a}\right) \frac{dadb}{a^2} \quad (7)$$

式中,  $f(t)$  为接收到的鱼雷主动脉冲回波信号的瞬时频率估计值;  $\rho(a, b)$  为准平稳随机扩展函数;  $a$  为鱼雷主动脉冲回波信号检测的实验参数;  $b$  为频移参数,其中分数阶傅里叶变换的表达式为:

$$X_p(u) = F^p x(t) = F^\alpha [x(t)] = \int_{-\infty}^{+\infty} K_p(t, u) x(t) dt \quad (8)$$

其中,分数阶变换的频谱分离式  $X_p(u)$  可以表示为:

$$X_p(u) = \begin{cases} \sqrt{\frac{1-j\cot\alpha}{2\pi}} e^{j\frac{u^2}{2\cot\alpha}} \int_{-\infty}^{+\infty} x(t) e^{j\frac{t^2}{2\cot\alpha} - jtu\csc\alpha} dt & \alpha \neq n\pi \\ x(u), \alpha = 2n\pi \\ x(-u), \alpha = (2n \pm 1)\pi \end{cases} \quad (9)$$

其中,  $p$  为 FrFT 的阶数,采用修正的平滑伪 WVD (modified smoothed pseudo wigner ville

distribution, MSPWVD) 技术进行目标信号的自相关波束形成,定义为:

$$MSPWVD_z(t, f) = \int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} SPWVD_z(t', f') \delta(t - \hat{t}(t', f')) \delta(f - \hat{f}(t', f')) dt' df' \quad (10)$$

其中:  $\hat{t}(t', f')$ ,  $\hat{f}(t', f')$  分别是接收到的信号输出波束的时间和频率点,提取目标回波信号的高阶谱特征量,利用点-线对偶原理,得到目标回波信号  $x(t)$  的高阶谱特征量定义为:

时域表示:

$$W_x(t, v) = \int_{-\infty}^{+\infty} x(t + \tau/2) x^*(t - \tau/2) e^{-j2\pi v \tau} d\tau \quad (11)$$

频域表示:

$$W_x(t, v) = \int_{-\infty}^{+\infty} X(v + \xi/2) X^*(v - \xi/2) e^{j2\pi \xi t} d\xi \quad (12)$$

可以看作是某种能量分布特征函数的傅立叶变换。通过时域和频域分离,实现对目标信号的去盲预处理,提高了微弱信号的探测识别能力。

### 2.2 鱼雷对敌目标的准确检测输出

采用分数阶傅里叶变换进行鱼雷主动脉冲回波信号动态压缩处理,微弱信号背景下的鱼雷主动脉冲回波信号长度  $l$ , 得到回波的脉冲波峰跨度为:

$$fl = x\left(\min_{x=m_b}^{m_2} z_{xn_b}\right) - x\left(\min_{x=m_1}^{m_b} z_{xn_b}\right) \quad (13)$$

$$l = a \cdot fl + b \quad (14)$$

其中,  $a, b$  表示耦合系数。对于给定的宽带高分辨微弱信号背景下的鱼雷主动脉冲回波信号  $x(n)$  和尺度  $d$ , 鱼雷主动脉冲回波信号的最大波峰和波谷差值:

$$z_{\max} = \max_{y=n_1}^{n_2} \{ \max_{x=m_1}^{m_2} \{z_{xy}\} - \min_{x=m_1}^{m_2} \{z_{xy}\} \} \quad (15)$$

回波信号幅度检测模型的阶数为 2 阶,得到信号的波束形成参数  $a_1(t)$  和  $a_2(t)$  由下式确定:

$$\begin{cases} a_1(t) = -2m(t) \cos(\theta(t)) \\ a_2(t) = m^2(t) \end{cases} \quad (16)$$

根据微弱信号背景下的鱼雷主动脉冲回波信号方位信息以及信号的其它分布信息<sup>[10]</sup>, 得到微弱信号背景下的鱼雷主动脉冲回波信号输出包络特征为:

$$\begin{cases} a(t) = \sqrt{s^2(t) + x^2(t)} \\ \phi(t) = \arctan\left\{\frac{x(t)}{s(t)}\right\} \end{cases} \quad (17)$$

式中,  $a(t)$  称为  $z(t)$  瞬时幅度,  $\phi(t)$  称为信号的自导检测相位。根据上述算法设计,采用复包络检测方法实现对目标回波信号的准确定位和参量估计,实现对微弱信号背景下鱼雷对敌目标的准确

检测。

### 3 仿真实验与检测性能测试

为了测试本文算法在实现微弱信号背景下的鱼雷主动脉冲回波信号检测中的性能,进行仿真实验,实验采用 Matlab 7 仿真软件设计,实验中的鱼雷主动脉冲回波信号采用线性调频信号作为测试信号,对目标回波信号检测的采样点数为1 000点,目标的回波脉冲为300 Hz的频率分量信号,高频IMF分量的采样间隔为0.24 s,信号的时长为1 024,根据上述方程环境和参数设定,进行目标检测算法研究,得到输入的目标回波信号波形如图2所示。

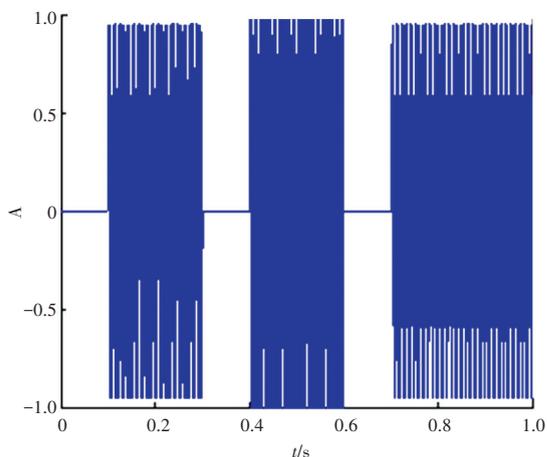


图2 目标回波信号波形

Fig. 2 Target echo waveform

以图2的信号为测试对象,用级联匹配滤波方法进行信号的干扰抑制和谱增强处理,提取目标回波信号的高阶谱特征量,得到特征提取结果如图3所示。

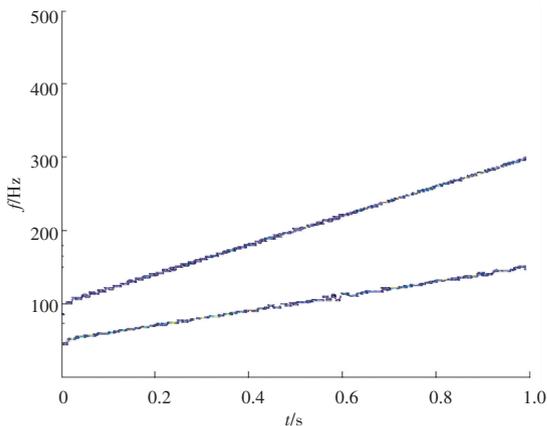


图3 信号的特征提取结果

Fig. 3 Feature extraction of signal

分析图3得知,采用本文方法进行目标信号检测,能准确实现对不同频率分量的目标信号的准确

定位和识别,频谱的分辨能力较好,杂波的干扰去除能力较强。测试不同方法进行微弱信号背景下鱼雷对敌目标检测的性能,测试信噪比的范围为-8~10 dB,蒙特卡洛实验次数为1 000次,得到检测性能曲线对比结果如图4所示,分析图4得知,本文方法进行目标检测的准确性高于传统方法,平均提升13.5%,检测性能较优。

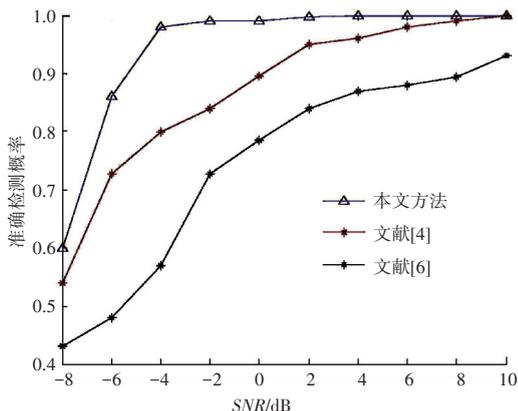


图4 检测性能对比

Fig. 4 Test performance comparison

### 4 结束语

在复杂的海洋环境下,受到海水背景噪声和敌方声诱饵的干扰,导致鱼雷对敌目标探测的有效性大大下降,为了提高微弱信号背景下鱼雷对敌目标的检测能力,提出一种基于主动脉冲回波探测和盲源分离技术的信号检测算法。构建鱼雷对比目标检测的微弱信号回波模型,采用级联匹配滤波方法进行信号的干扰抑制和谱增强处理,采用自相关波束形成方法进行信号的去盲处理,提高微弱信号背景下鱼雷的主动目标探测能力,提取目标回波信号的高阶谱特征量,采用复包络检测方法实现对目标回波信号的准确定位和参量估计,实现对微弱信号背景下鱼雷对敌目标的准确检测。研究得知,本文方法进行鱼雷对敌目标信号检测的有效性较高,检测准确概率高于传统方法,抗干扰能力较强。

### 参考文献

- [1] 赵威. 强海水混响背景下水中兵器攻击目标检测研究[J]. 智能计算机与应用, 2016, 6(2): 51-54.
- [2] 刘晨晨, 梁红. 线性调频信号参数估计和仿真研究[J]. 计算机仿真, 2011, 28(2): 157-159, 263.
- [3] 武思军, 张锦中, 张曙. 阵列波束的零陷加宽算法研究[J]. 哈尔滨工程大学学报, 2004, 25(5): 658-661.
- [4] 胡光波, 何席兵, 甘新年. 基于分数阶 Fourier 变换累积量的目标检测算法[J]. 鱼雷技术, 2011, 19(5): 344-348.