

# 机动小目标的时空联合检测技术

邵云生

(海军驻无锡地区军事代表室, 江苏无锡 214061)

**摘要:** 主动声呐信号处理中一般采用匹配滤波和背景均衡等算法检测回波信号, 为提高信号的检测性能, 还需利用信号与混响和环境噪声在时间、空间上的统计特征差异。文章在对信号的时、空特征算法进行简单描述的基础上, 提出了频率能量统计特征和方位能量统计特征, 将两种特征检测器的输出进行融合处理构成时、空联合检测器。仿真和试验数据处理结果证明, 此方法可有效提高机动小目标在混响及环境噪声中的检测性能。

**关键词:** 主动声呐; 机动小目标; 时空联合检测; 混响

中图分类号: TB556

文献标识码: A

文章编号: 1000-3630(2015)-06-0497-04

DOI 编码: 10.16300/j.cnki.1000-3630.2015.06.005

## Research on the algorithm of moving target detection with joint space-time processing

SHAO Yun-sheng

(Navy's Military Representative Office in Wuxi, Wuxi 214061, Jiangsu, China)

**Abstract:** In active sonar signal processing, the matched filtering and background smoothing algorithms are used to detect the echo signals. The time-space statistic difference between the signal and environmental noise should be used in order to improve the detection. This paper proposes the energy statistical characteristics both in frequency and direction based on the description of the characteristic algorithm of signal in space and time, and combines the outputs of the two algorithms to form a space-time joint detector. The simulation and experimental data show that this joint detector can improve the detection performance of remote moving targets in environmental noise background.

**Key words:** active sonar; moving target; space-time processing; reverberation

## 0 引言

混响是浅海主动声呐信号检测过程中的主要干扰。如何抑制混响, 加强回波信号的检测, 是提高主动声呐性能的关键技术之一。

对于机动小目标的探测, 传统的信号处理中往往采用长 CW 等多普勒敏感信号, 使回波信号频谱偏离混响带, 从而有效地抑制混响<sup>[1]</sup>。但此种方法需多通道匹配, 运算量较大。以载频  $f_0=20$  kHz、脉宽  $T=16$  ms 的 CW 信号为例, 其多普勒容限为  $0.88/T$ , 相应的速度分辨力约为  $v=2$  m/s。对于探测速度范围在  $\pm 15$  m/s 的  $M$  个多波束系统而言, 其多普勒通道多达  $15M$  个。为了减少运算量, 同时又不损失信号在环境噪声背景下的检测性能, 本文在对信号与混响(噪声)分布变化规律的分析基础上, 利

用回波信号与混响(噪声)在空间、结构上的差异, 分别构成空间特征检测器和时间特征检测器, 并将两种特征检测器输出进行融合处理的研究。

## 1 时、空特征算法介绍

信号和混响(噪声)的特征区别主要有两方面:

(1) 时间特征检测。以 CW 信号为例采用前向差分技术得到信号的瞬时频率序列, 回波序列在持续时间  $T$  内是稳定相关的。

(2) 空间特征检测。对左右子阵相同波束的输出做互相关处理, 在脉冲持续时间  $T$  内回波具有稳定相位差的序列。

### 1.1 时间特征检测

一般海洋混响的相位起伏率要比振幅起伏小, 声信号的相位起伏十分缓慢, 因而信号相位在海洋信道中是缓慢变化的<sup>[2]</sup>。本文介绍的差分方法分别称为前向差分<sup>[3-6]</sup>、后向差分、中心有限差分。

接收信号离散表达式为:  $x_n = a_n e^{j\omega n}$ , 其中  $w$  为

收稿日期: 2015-09-30; 修回日期: 2015-11-22

作者简介: 邵云生(1964—), 男, 浙江衢州人, 高级工程师, 研究方向为信息工程。

通讯作者: 邵云生, E-mail: shaoyun@qq.com

接收信号频率,  $a_n$  为信号包络。经过频谱搬移、降采样后, 信号的表达式为  $x'_n = a'_n e^{j\omega n}$ , 令  $\phi(n) = (\omega - \omega_0)n\tau_s$  为降采样信号在  $n$  时刻的瞬时相位,  $\omega_0$  为去载频的频率,  $\tau_s$  为降采样周期。对某波束的输出数据做互相关处理:

$$x'_n \cdot x'_{n+1} = a_n^* a_{n+1} e^{j[\phi(n+1) - \phi(n)]} \quad (1)$$

瞬时频率偏移量估计的表达式如下:

$$\hat{f}_f(n) = \frac{1}{2\pi\tau_s} [\phi(n+1) - \phi(n)] \quad (2)$$

$$\hat{f}_b(n) = \frac{1}{2\pi\tau_s} [\phi(n) - \phi(n-1)] \quad (3)$$

$$\hat{f}_c(n) = \frac{1}{4\pi\tau_s} [\phi(n+1) - \phi(n-1)] \quad (4)$$

通过式(2)~(4)可求出瞬时频率偏移量  $f$  的表达式。差分方法对单分量 CW 信号具有远比傅里叶谱线高得多的频率估计精度。

由于采用了差分技术, 因此序列是相关的。信号在  $T_0$  内具有固定的相位差, 混响(噪声)的相位和幅值是随机的, 不具有稳定的相干结构。对输出回波复数序列进行累加, 可达到同相相加, 其频率幅值特征表达式为

$$S_p(f) = \text{abs}\left(\sum_{n=0}^{N-2} a_n^* a_{n+1} e^{j[\phi(n+1) - \phi(n)]}\right) \quad (5)$$

积分长度  $N$  与发射脉冲  $T_0$  相匹配。瞬时频率偏移量  $f$  序列在某波束上  $T_0$  时间内的均值和方差(二阶中心矩)离散化表达式如下:

$$\bar{f}(n) = \frac{1}{N} \sum_{i=0}^{N-2} f(i+n) \quad (6)$$

$$\sigma_f^2(n) = \frac{1}{N} \sum_{i=0}^{N-2} [f(i+n) - \bar{f}(n)]^2 \quad (7)$$

采用瞬时频率偏移量方差作为检测统计量的瞬时频率方差检测器(Varicance-of Instantaneous-Frequency Detector, VIFD)。利用序列的短时方差构造权函数, 用于对多波束输出进行加权, 即:

$$y_l(n) = W[\sigma_{f_l}^2(n)] \cdot x_l(n) \quad (8)$$

其中:  $l$  为波束序列号;  $n$  为时间序列号;  $W[\sigma_{f_l}^2(n)]$  为频率方差的单调递减函数, 频率方差  $\sigma_{f_l}^2(n)$  越大, 权重越小, 反之亦然。  $W[\sigma_{f_l}^2(n)] = \alpha[\sigma_{f_l}^2(n)]^{-\beta}$ ,  $\alpha$ 、 $\beta$  均为正数<sup>[3]</sup>。

方差是一个统计概念, 短脉冲信号, 由于信号脉宽短, 采集后的用于参加方差估计的点数也较少, 统计平均受信道的影响相对较大, 估计性能下降。反之, 长脉冲信号用于参加方差估计的点数多, 统计平均受信道的影响相对较小, 估计也就较为准确。因此选择长脉冲信号是提高特征检测技术的有效手段。

## 1.2 空间特征检测

空间处理的物理基础是信号场和干扰场的空间相关特性差别。目标有确定的方位, 而混响、环境噪声干扰则是近似随机的<sup>[7]</sup>。

设第  $i$  个阵元接收的信号表达式为  $x_i(t)$ , 可知左右子阵相同波束的输出为

$$y_L(t) = \sum_{\tau=1}^{N/2} x_i(t-\tau) \quad (9)$$

$$y_R(t) = \sum_{\tau=N/2+1}^N x_i(t-\tau) = e^{j\omega \frac{N}{2}(\tau-\tau)} y_L(t) \quad (10)$$

其中,  $\omega$  为接收信号频率, 对式(9)、式(10)去载频、降采样处理后, 左右子阵第  $l$  波束互相关输出的离散表达式如下:

$$y_L(n)^* y_R(n) = |y_L(n)|^2 e^{-jN(\phi-\phi_0)/2} \quad (11)$$

同样利用方位的幅值特征信息对回波信号累加, 可得方位幅值特征表达式:

$$S_p(\theta) = \text{abs}\left(e^{-jN(\phi-\phi_0)/2} \sum_{n=0}^{N-1} |y_L(n)|^2\right) \quad (12)$$

利用两子阵指向相同波束的时延差或相位差测量干扰和目标的视在方位序列  $\theta_l(n)$ 。这里分两种情况讨论: 若发射换能器无指向性, 散射体是均匀分布在空间中或平面上, 混响的空间相关半径为半波长<sup>[7]</sup>; 若发射换能器具有尖锐的指向性, 混响的空间相关半径会增加到若干倍波长。一般说来, 混响的视在方位方差比环境噪声略小, 但仍显著大于目标回波。因而, 视在方位方差检测器(Varicance-of Pseudo-Bearing Detector, VPBD)可用于回波信号的检测。  $\theta_l(n)$  的短时平均值  $\overline{\theta_l(n)}$  和方差  $\sigma_{\theta_l}^2(n)$  如下:

$$\overline{\theta_l(n)} = \frac{1}{N} \sum_{i=0}^{N-1} \theta_l(i+n) \quad (13)$$

$$\sigma_{\theta_l}^2(n) = \frac{1}{N} \sum_{i=0}^{N-1} [\theta_l(i+n) - \overline{\theta_l(n)}]^2 \quad (14)$$

同样, 权因子  $W[\sigma_{\theta_l}^2(n)] = \alpha[\sigma_{\theta_l}^2(n)]^{-\beta}$  作为检测统计量即为视在方位方差检测器, 其中  $\alpha$ 、 $\beta$  均为正数<sup>[1]</sup>。

VIFD 和 VPBD 检测器都是利用相位自身变化的规律性, 与干扰背景起伏无关, 只与信噪比有关, 因而本身就具有恒虚警特性。方差特征检测器和幅值特征检测器不依赖于参考信号, 对多普勒目标也具有稳健的检测性。

需要注意的是: 对于待估计的频率方差, 不应随回波频率的不同而有较大的方差起伏。对此, 利用时、空特征检测技术探测机动小目标时, 最好采用分频带处理模式, 将处理频带分为静止和运动两大频段, 其优点主要有以下两方面:

(1) 防止水下固定目标(岛屿、海岸)对多普勒目标回波方差检测器的抑制。

(2) 滤除混响带，使目标回波工作于噪声背景下，提高了信噪比。

### 1.3 时空联合检测技术

在信号处理中，往往采用多种信息，以提高系统的检测、识别、决策能力。数据融合技术<sup>[8]</sup>可能给系统带来的好处主要表现在以下几个方面：

(1) 使系统具有良好的鲁棒性。采用多信息融合技术，减少了因环境的突然变化对系统性能的影响，对环境的变化有较强的适应性。

(2) 增加系统的可信度。用多个信息对一个目标或事件进行判决和确认，增加了结果的可信程度。

(3) 减少系统的信息模糊程度。由于采用多信息进行检测、判决、推理等运算，降低了事件的不确定性。

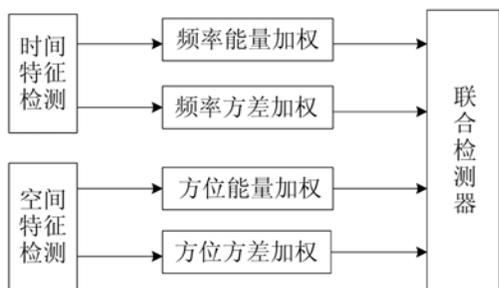


图 2 联合检测框图  
Fig.2 Block diagram of combined detection

这里频率方差加权、方位方差的加权表达式分别为  $W[\sigma_f^2(n)]$ 、 $W[\sigma_{\theta}^2(n)]$ 。频率能量加权、方位的能量加权分别为式(5)在时间差分上互谱输出的复累加、式(12)在方位上互谱输出的复累加。

## 2 仿真和实验数据处理

### 2.1 仿真数据分析

图 3 给出了单路高斯白噪声仿真数据和处理结果。插入目标速度为  $v = 10 \text{ m/s}$  的 CW 信号，信号脉宽  $T = 30 \text{ ms}$ ，插入时刻为 0.3 s。单路信噪比  $SNR = -3 \text{ dB}$ ，32 元半波长布距的线阵。

### 2.2 试验数据分析

图 4 给出了实际录取的混响数据和处理结果。插入目标的回波与图 3 相同，单路信混比  $SRR = -3 \text{ dB}$ ，插入时刻为 2.45 s。滤波器的中心频率与发射载频相差 0.26 kHz，滤除静止目标及主混响带。

从图 3、图 4 的处理结果表明：时间、空间特征检测算法不受信道起伏影响，并对多普勒目标具有宽容性。综合利用各种特征检测器的处理结果构成联合检测器，可有效抑制水下干扰，提高机动小

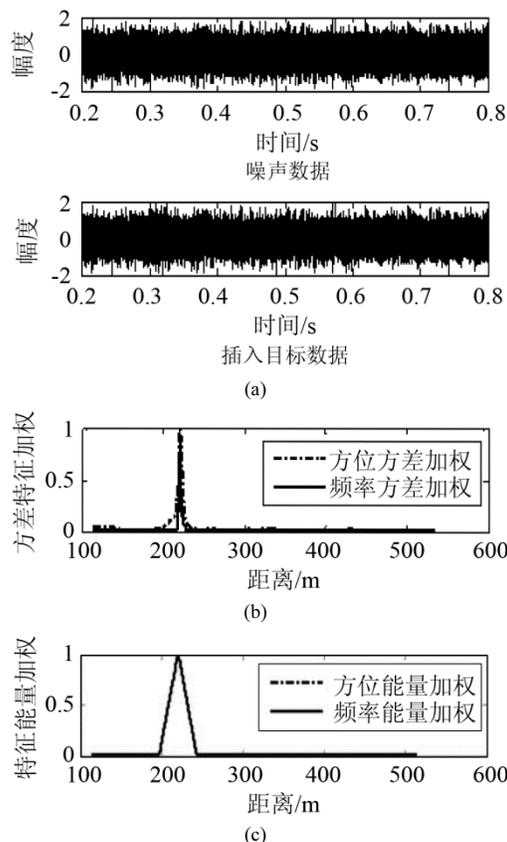


图 3 仿真数据处理结果  
Fig.3 Processing results of simulation

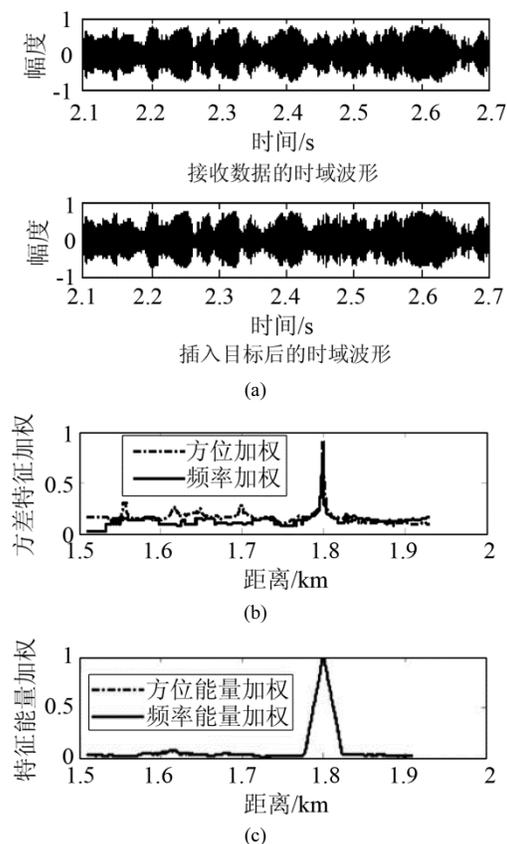


图 4 试验数据处理结果  
Fig.4 Processing results of experimental data

目标的检测性能, 获得最为平坦的输出背景。四种相互独立的信息的利用, 消除了依赖单种算法造成的虚警。同时利用方差特征检测技术, 解决了主动声呐探测中长 CW 信号距离分辨力低的问题, 可同时获得较好的速度分辨力和距离分辨力。

### 3 结 论

如何提高对目标的探测性能一直是主动声呐信号处理的难题。本文利用回波信号与混响和环境噪声分布变化规律的不同, 采用了空间、时间特征检测器, 并将两种特征检测器输出进行融合处理, 结果表明:

(1) 特征检测算法不受信道起伏影响, 无需再做 CFAR 处理;

(2) 对多普勒目标具有宽容性, 无需多通道匹配, 大大减少了运算的复杂度;

(3) 方差特征检测技术解决了长 CW 信号距离分辨力低的问题, 可同时获得较好的速度分辨力和距离分辨力;

(4) 联合检测器有效提高了对机动小目标在环境噪声中的检测性能, 并消除了只有单种算法时造

成的虚警。

### 参 考 文 献

- [1] Waite A D 著, 王德石译. 实用声呐工程[M]. 3 版. 北京: 电子工业出版社, 2004.  
Waite A D, WANG Deshi (translator). Sonar for practicing engineers[M]. 3rd Edition. Beijing: Electronic Industry Press, 2004.
- [2] 惠俊英, 生雪莉. 水下声信道[M]. 北京: 国防工业出版社, 2007.
- [3] 梁国龙. 回波信号的瞬时参数序列分析及其应用研究[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工程大学, 1997.  
LIANG Guolong. Analysis on instantaneous parameters sequence of echoes and study on its applications[D]. Harbin: Harbin Engineering University, 1997.
- [4] 梁国龙, 惠俊英. 瞬时频率方差检测器(VIFD)及其性能评价[J]. 声学学报, 1999, 24(2): 183-190.  
LIANG Guolong, HUI Junying. Instantaneous frequency detector and it's performance evaluation[J]. Chinese Journal of Acoustics. 1999, 24(2): 183-190.
- [5] 梁国龙, 惠俊英, 蔡平. 视在方位序列分析[J]. 声学学报, 2000, 25(2): 134-141.
- [6] LIANG Guolong, HUI Junying, CAI Ping. Pseudo bearing sequence analysis[J]. Chinese Journal of Acoustics, 2000(1): 22-34.
- [7] 王亚男. 低频主动声呐波形融合与背景归一化[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工程大学, 2007.  
WANG Yanan. Waveform fusion and background normalization for low frequency active sonar[D]. Harbin: Harbin Engineering University, 2007.
- [8] 杨万海. 多传感器数据融合及其应用[M]. 西安: 西安电子科技大学出版社, 2004.