

DOI:10.19650/j.cnki.cjsi.J2412993

# 深海海底反射拖船噪声伪目标判别

陈新华<sup>1,3</sup>, 张龙恩<sup>1,2,3</sup>, 郑恩明<sup>1,3</sup>, 宋春楠<sup>1,3</sup>, 彭一哲<sup>4</sup>

(1. 中国科学院声学研究所 北京 100190; 2. 中国科学院大学 北京 100049; 3. 中国科学院先进水下信息技术重点实验室 北京 100190; 4. 中国人民解放军92038部队 青岛 266108)

**摘要:** 被动拖曳线列阵声纳深海环境应用中, 针对拖船噪声在非端射方向形成伪目标判别问题, 提出了一种深海拖船噪声海底反射伪目标判别方法。首先基于射线理论模型, 给出了深海拖船噪声经海底反射形成伪目标的过程机理; 然后提取各目标在不同频率波束输出功率的干涉特征; 最后依据干涉特征, 分析各目标干涉结构的频率间隔, 实现伪目标判别。仿真数据和海试数据分析结果表明, 该方法在干涉结构稳定, 波束域海底反射声能量与背景噪声能量比8 dB以上, 对伪目标判决准确性达到95%以上, 有效解决了拖船噪声在非端射方向形成的伪目标判别问题, 为后续判情提供参考。

**关键词:** 拖线阵; 深海; 拖船噪声; 干涉结构; 目标判决

中图分类号: TB566 TH89 文献标识码: A 国家标准学科分类代码: 510.40

## False target discrimination of tugboat noise reflected by deep seabed

Chen Xinhua<sup>1,3</sup>, Zhang Long'en<sup>1,2,3</sup>, Zheng Enming<sup>1,3</sup>, Song Chunnan<sup>1,3</sup>, Peng Yizhe<sup>4</sup>

(1. Institute of Acoustics, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100190, China; 2. University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China; 3. Key Laboratory of Science and Technology on Advanced Underwater Acoustic Signal Processing, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100190, China; 4. Unit 92038 of PLA, Qingdao 266108, China)

**Abstract:** In the application of passive towed linear array sonar in deep sea environment, aiming at the problem of false target discrimination in the non-end-fire direction of tugboat noise, a method for identifying the false target of seabed reflection of deep-sea tugboat noise is proposed. Firstly, based on the ray theory model, the process mechanism of the deep-sea tug noise reflected by the seabed to form a false target is given. Then, the interference characteristics of beam output power of each target at different frequencies are extracted. Finally, according to the interference characteristics, the frequency intervals of each target interference structure are analyzed to realize the false target discrimination. The analysis results of simulation data and sea trial data show that the accuracy of the false target decision is more than 95% when the interference structure is stable and the energy ratio of the reflected sound energy to the background noise energy in the beam domain is more than 8 dB. It effectively solves the problem of false target discrimination formed by tugboat noise in non-end-fire direction, providing a reference for subsequent target judgment.

**Keywords:** towed linear array; deep sea; tugboat noise; interference structure; target judgment

## 0 引言

探测声纳在海洋测绘、目标定位及科学实验等多个领域都有广泛的应用<sup>[1-4]</sup>。被动拖曳线列阵声纳具有阵增益大、工作频率低、深度可变等优点<sup>[5-6]</sup>, 是水面及水下目标探测的重要手段。在利用被动拖曳线列阵声纳进行

目标探测时, 拖船噪声会端射产生强干扰, 影响被动拖曳线列阵声纳的探测性能<sup>[7]</sup>。目前, 对于端射方向附近的强干扰消除技术的研究较多, 逆波束形成 (inverse beamforming, IBF) 通过常规波束形成获得干扰噪声方位, 利用相位补偿重构干扰信号, 在阵元信号中抵消拖船噪声<sup>[8]</sup>。后置波束形成干扰抵消 (postbeamformer interference cancelling, PIC) 在拖船噪声及方位已知的情

况下,在波束输出中将干扰波束消除,实现拖船噪声抑制<sup>[9]</sup>。自适应滤波器(adaptive beamforming, ABF)通过调整波束形成中各通道信号的权值,在强干扰方位形成空间滤波的凹口,从而抑制拖船噪声<sup>[10]</sup>。文献[11]将矩阵滤波器与匹配场技术相结合,设计了零响应约束空域矩阵滤波器,对拖船噪声实现了抑制。文献[12]将长线阵分解为多个高重叠子阵,在各子阵干扰方位设置零陷,去除近场强干扰对目标探测的影响,提高输出信噪比。

然而在深海环境下,拖船噪声不仅会在端射方向附近产生强干扰,同时由于拖船噪声信号经过一次海底反射还会在远离端射方向产生干扰<sup>[13]</sup>,形成远离端射方向的伪目标<sup>[14]</sup>,严重影响该方向区域内目标探测与判情。文献[15]在拖船噪声端射方向附近波束输出功率已知的情况下,通过声场信息匹配的方法对经过一次海底反射的拖船噪声的方位进行估计,为后续判情提供参考,但当声场信息未知或变化时,该方法无法有效估计海底反射拖船噪声出现的方位。文献[16]提出了一种将归一化最小均方误差(normalized least mean square, NLMS)噪声抵消器和经验模态分解(empirical mode decomposition, EMD)相结合的拖船干扰抑制方法,通过匹配滤波,重构拖船噪声的本征模态并在阵元域抵消,实现对海底反射拖船噪声的干扰抑制,但是该方法需要对拖船噪声有准确的先验知识。由于现有对于拖船噪声近端射方向干扰的判别及消除技术比较完善,本文重点关注远离端射方向拖船噪声干扰的判别技术,为后续该方向干扰的消除提供判断准则。首先对深海环境下拖船噪声海底反射伪目标形成的原因进行分析,通过提取经过海底反射后波束输出功率的干涉特征,对拖船噪声海底反射形成的伪目标进行判别。

## 1 拖船噪声传播模型

拖船噪声在深海中有多种声线传播模式,例如直达声模式、海面反射模式、海底反射模式等。在深海海底反射模式下,由于经过多次海底反射的声线能量衰减大,所以一般仅考虑一次海底反射的情况<sup>[17]</sup>,因此深海环境中多径情况少,干涉结构更为简单。拖船噪声的声信号一般通过 6 条声线路径被拖曳线列阵(后续称之为拖线阵)接收。分别为直达声线(direct sound ray, D)、海面反射声线(sound ray reflected by sea surface, SR)、海底反射声线(sound ray reflected by sea bottom, BR)、海面-海底反射声线(sound ray reflected by sea surface-sea bottom, SBR)、海底-海面反射声线(sound ray reflected by sea bottom-sea surface, BSR)、海面-海底-海面反射声线(sound ray reflected by sea surface-sea bottom-sea surface, SBSR)传播路径,6 条声线依次用声线 1、2、3、4、5、6 表

示。声线传播路径如图 1 所示,  $h_s$  为声源深度,  $h_z$  为阵元深度,  $H$  为海底的深度。

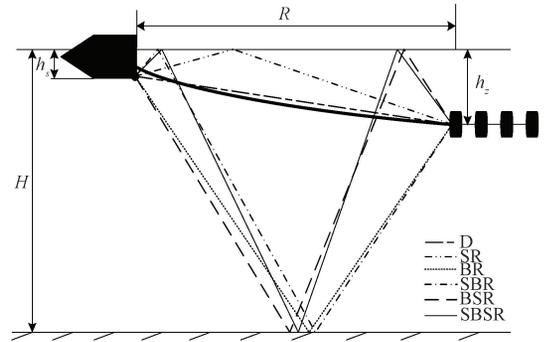


图 1 拖船噪声声线传播路径

Fig. 1 Sound ray propagation path of towed ship noise

根据射线理论,点声源在  $(x, z)$  处激发的声场可表示为:

$$p(x, z; f) = \sum_{l=1}^L A_l(x, z; f) V_b^{n_l} V_s^{m_l} e^{-j2\pi f t_l} \quad (1)$$

式中:  $L$  表示本征声线的条数;  $f$  表示声源频率;  $A_l(x, z; f)$  表示第  $l$  条声线的声压振幅;  $V_b^{n_l}$  和  $V_s^{m_l}$  分别表示第  $l$  条声线海底和海面的反射系数。其中  $n_l$  和  $m_l$  分别表示第  $l$  条声线经过海底和海面反射的次数,  $t_l$  表示第  $l$  条声线的时延。

将声线到达拖线阵与阵首端射方向的夹角定义为声线到达角,第  $l$  条声线的到达角为  $\theta_l$ 。在深海拖船噪声传播模型下,由于拖船噪声的声源位置较浅<sup>[18]</sup>,根据声线传播路径,不考虑正负号,声线 1、2 的声线到达角  $\theta_1$ 、 $\theta_2$  近似相等<sup>[19]</sup>,定义为  $\theta_d$ ; 声线 3、4、5、6 的声线到达角  $\theta_3$ 、 $\theta_4$ 、 $\theta_5$ 、 $\theta_6$  近似相等,定义为  $\theta_r$ 。

## 2 拖船噪声伪目标判别原理

### 2.1 拖船噪声波束输出模型

在深海环境中,为保证足够的阵增益,多采用较大孔径拖线阵声纳进行探测,基于平面波假设的常规波束形成器<sup>[20]</sup>具有算法简单、鲁棒性强的特点,通过对各阵元接收信号进行相位补偿后求和实现目标检测和方位估计,常被运用于拖线阵声纳的探测。假设拖线阵阵元数为  $N$ ,阵元间距  $d$ ,参考声速  $c$ ,以阵首为参考阵元,端射方向为  $0^\circ$ 。利用平面波远场近似,则第  $n$  个阵元接收到的声压为:

$$p_n(x, z; f) = \sum_{l=1}^L A_l(x, z; f) V_b^{n_l} V_s^{m_l} e^{-j2\pi f t_l} e^{-j2\pi f (n-1) d \cos \theta_l / c} \quad (2)$$

对其进行常规波束形成,波束输出  $B(\theta, f)$  为:

$$B(\theta, f) = \left| \sum_{n=1}^N p_n(x, z; f) e^{j2\pi f(n-1)d \cos\theta/c} \right|^2 = \left| \sum_{n=1}^N \sum_{l=1}^L A_l(x, z; f) V_b^{n_l} V_s^{m_l} e^{-j2\pi f t_l} e^{j2\pi f(n-1)d(\cos\theta - \cos\theta_l)/c} \right|^2 = \left| \sum_{l=1}^L A_l(x, z; f) V_b^{n_l} V_s^{m_l} e^{-j2\pi f t_l} \sum_{n=1}^N e^{j2\pi f(n-1)d(\cos\theta - \cos\theta_l)/c} \right|^2 \quad (3)$$

令  $\Psi_l = \cos\theta - \cos\theta_l$ , 则

$$B(\theta, f) = \left| \sum_{l=1}^L A_l(x, z; f) V_b^{n_l} V_s^{m_l} e^{-j2\pi f t_l} \frac{\sin\left(\frac{Nd\pi f \Psi_l}{c}\right)}{N \sin\left(\frac{d\pi f \Psi_l}{c}\right)} \right|^2 \quad (4)$$

当  $\Psi_l = 0$  时, 会在  $\theta = \theta_l$ , ( $l = 1, 2, \dots, L$ ) 方向产生较高能量波束输出, 而在其他方向产生低能量波束输出, 以此实现对目标方位的探测。当不同路径声线到达角差异较小时, 拖线阵声纳探测目标方位会出现波束展宽的现象; 当不同路径声线到达角差异较大时, 拖线阵声纳探测目标方位会出现方位分裂现象。在深海环境中, 拖船噪声经过海底反射的声路径与直达声路径的声线到达角差异较大, 常会出现方位分裂的现象, 在非端射方向形成拖船噪声伪目标。

## 2.2 拖船噪声波束输出干涉结构

根据深海拖船噪声传播模型, 式(4)可改写为:

$$B(\theta, f) = \left| \sum_{l=1}^2 A_l(x, z; f) V_b^{n_l} V_s^{m_l} e^{-j2\pi f t_l} \frac{\sin\left(\frac{Nd\pi f \Psi_d}{c}\right)}{N \sin\left(\frac{d\pi f \Psi_d}{c}\right)} + \sum_{l=3}^6 A_l(x, z; f) V_b^{n_l} V_s^{m_l} e^{-j2\pi f t_l} \frac{\sin\left(\frac{Nd\pi f \Psi_r}{c}\right)}{N \sin\left(\frac{d\pi f \Psi_r}{c}\right)} \right|^2 \quad (5)$$

其中,  $\Psi_d = \cos\theta - \cos\theta_d$ ,  $\Psi_r = \cos\theta - \cos\theta_r$ 。假定声线1、2振幅近似相等, 声线3、4、5、6振幅及海底反射系数近似相等, 海面反射系数模为1, 一次反射相位移动  $\pi^{[21]}$ 。则:

$$\sum_{l=1}^2 A_l(x, z; f) V_b^{n_l} V_s^{m_l} e^{-j2\pi f t_l} = A_d e^{-j2\pi f t_1} (1 - e^{-j2\pi f \Delta t_{12}}) \quad (6)$$

$$A_r [e^{-j2\pi f t_3} - e^{-j2\pi f t_4} - e^{-j2\pi f t_5} + e^{-j2\pi f t_6}] = A_r [e^{-j2\pi f t_3} (1 - e^{-j2\pi f \Delta t_{34}}) - e^{-j2\pi f t_5} (1 - e^{-j2\pi f \Delta t_{56}})] \quad (7)$$

由于声线3和声线5轨迹接近, 掠射角近似相等, 所以  $\Delta t_{34} \approx \Delta t_{56}$ , 则式(7)可进一步化简为:

$$A_r e^{-j2\pi f t_3} (1 - e^{-j2\pi f \Delta t_{34}}) (1 - e^{-j2\pi f \Delta t_{35}}) \quad (8)$$

其中,  $A_d$  为声线1、2的幅值,  $A_r$  为声线3、4、5、6的幅值。根据文献[22]可知  $\Delta t_{12}$ 、 $\Delta t_{34}$ 、 $\Delta t_{35}$  的近似表达式, 本文不做进一步推导。

$$\Delta t_{12} = t_2 - t_1 \approx \frac{2 \int_0^{h_s} \sqrt{n^2(z) - \cos^2 \phi_2} dz}{c} \quad (9)$$

$$\Delta t_{34} = t_4 - t_3 \approx \frac{2 \int_0^{h_s} \sqrt{n^2(z) - \cos^2 \phi_4} dz}{c} \quad (10)$$

$$\Delta t_{35} = t_5 - t_3 \approx \frac{2 \int_0^{h_s} \sqrt{n^2(z) - \cos^2 \phi_5} dz}{c} \quad (11)$$

其中,  $n(z) = c/c(z)$  为海水的折射率,  $\phi_2$ 、 $\phi_4$ 、 $\phi_5$  分别为声线2、4、5的掠射角, 则式(5)可改写为:

$$B(\theta, f) \approx N^2 |A_d|^2 (1 - \cos 2\pi f \Delta t_{12}) \left| \frac{\sin\left(\frac{Nd\pi f \Psi_d}{c}\right)}{\sin\left(\frac{d\pi f \Psi_d}{c}\right)} \right|^2 + N^2 |A_r|^2 (1 - \cos 2\pi f \Delta t_{34}) (1 - \cos 2\pi f \Delta t_{35}) \left| \frac{\sin\left(\frac{Nd\pi f \Psi_r}{c}\right)}{\sin\left(\frac{d\pi f \Psi_r}{c}\right)} \right|^2 \quad (12)$$

当  $\theta = \theta_d$  时, 在拖船噪声宽带信号频率  $f = k/\Delta t_{12}$  ( $k = 1, 2, 3, \dots, N$ ), 波束输出功率会出现极小值, 各频率在  $\theta_d$  方向的波束输出功率表现为明暗相间的条纹, 而条纹的间隔为时延差  $\Delta t_{12}$  的倒数。此时, 式(12)可化简为:

$$B(\theta_d, f) \approx N^2 |A_d|^2 (1 - \cos 2\pi f \Delta t_{12}) \quad (13)$$

当  $\theta = \theta_r$  时, 在拖船噪声宽带信号频率  $f = k/\Delta t_{34}$  ( $k = 1, 2, 3, \dots, N$ ) 或  $f = k/\Delta t_{35}$  ( $k = 1, 2, 3, \dots, N$ ), 波束输出功率同样会出现极小值, 各频率在  $\theta_r$  方向的波束输出功率表现为明暗相间的条纹, 条纹的间隔为时延差  $\Delta t_{34}$ 、 $\Delta t_{35}$  的倒数。此时, 式(12)可化简为:

$$B(\theta_r, f) \approx N^2 |A_r|^2 (1 - \cos 2\pi f \Delta t_{34}) (1 - \cos 2\pi f \Delta t_{35}) \quad (14)$$

## 2.3 拖船噪声海底反射伪目标判别

根据式(9)、(10),  $\Delta t_{12}$ 、 $\Delta t_{34}$  与声源深度  $h_s$  有关, 由于拖船噪声为近水面目标,  $\Delta t_{12}$ 、 $\Delta t_{34}$  较小, 在带宽有限的情况下, 较难在各频率波束输出的  $\theta_d$  和  $\theta_r$  方向观察到  $\Delta t_{12}$ 、 $\Delta t_{34}$  导致的条纹。根据式(11),  $\Delta t_{35}$  与阵元深度  $h_z$  有关, 在阵深一定的情况下, 各频率波束输出会在  $\theta_r$  方向出现与  $\Delta t_{35}$  有关的明暗相间条纹, 通过提取条纹间隔, 可以有效判别拖船噪声经过海底反射造成的伪目标。

利用式(15)对  $\theta_r$  方向各频率的波束输出功率进行傅里叶逆变换, 提取条纹间隔, 得到声线3、5的时延差  $\Delta t_{35}$ 。

$$P(\theta_r, \tau) = \int_{-\infty}^{+\infty} B(\theta_r, f) e^{j2\pi f\tau} df \quad (15)$$

通过时延差  $\Delta t_{35}$  的提取情况,对拖船噪声经过海底反射形成的伪目标进行判别。根据几何关系,空间角  $\theta$ 、方位角  $\alpha$ 、俯仰角  $\beta$ ,满足  $\cos \theta = \cos \alpha \cos \beta$  的关系,如图 2 所示。

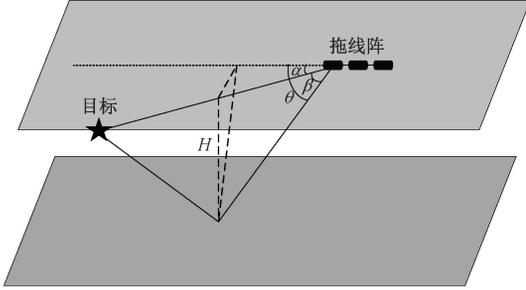


图 2 角度关系

Fig. 2 Angle relationship diagram

根据 Snell 定律,到达俯仰角  $\beta$  与掠射角  $\varphi$  的关系可表示为:

$$n(z) \sin \beta = \sqrt{n^2(z) - \cos^2 \varphi} \quad (16)$$

在海面至阵深处声速变化不剧烈时,式(10)可近似为:

$$\Delta t_{35} \approx \frac{2 \int_0^{h_z} n(z) \sin \beta dz}{c} \quad (17)$$

根据式(17)可推导出时延差与到达俯仰角的关系,

$$\beta \approx \arcsin \frac{\Delta t_{35}}{2 \int_0^{h_z} \frac{1}{c(z)} dz} \quad (18)$$

将  $\theta_d$  看作拖船噪声通过直达声路径传播的方位角,  $\theta_r$  看作拖船噪声通过海底反射声路径传播的空间角,则可建立  $\theta_d$  与  $\theta_r$  的关系为:

$$\theta_r \approx \arccos \left( \cos \theta_d \cdot \sqrt{1 - \left( \frac{\Delta t_{35}}{2 \int_0^{h_z} 1/c(z) dz} \right)^2} \right) \quad (19)$$

目标-背景对比度常被用于综合评价算法对目标信号的检测性能,参考 Michelson 对比度<sup>[23]</sup>,将时延差  $\Delta t_{35}$  幅值与背景区域幅值的对比度作为提取时延差  $\Delta t_{35}$  的目标-背景对比度(target-background contrast, TBC),以式(15)傅里叶逆变换结果为例,如图 3 所示具体定义如下:

$$TBC = \frac{y_{\text{target}} - E(y_{\text{noise}})}{y_{\text{target}} + E(y_{\text{noise}})} \times 100\% \quad (20)$$

其中,  $y_{\text{target}}$  表示时延差  $\Delta t_{35}$  对应的幅值(图 3 实线框区域中最大值),  $E(y_{\text{noise}})$  为背景区域(图 3 虚线框中区域)对应幅值的均值。通过设置目标-背景对比度 TBC 的阈值,判决时延差  $\Delta t_{35}$  的提取结果。

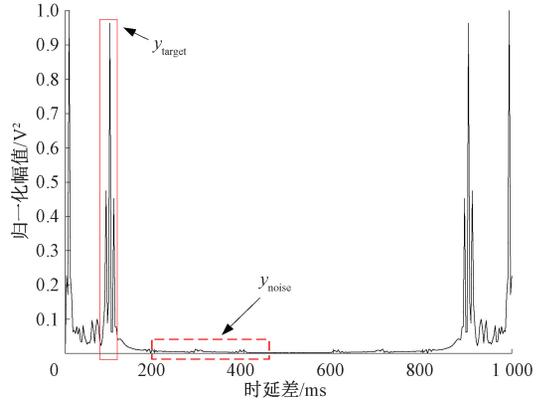


图 3 目标-背景对比度

Fig. 3 Target-background contrast diagram

### 2.4 实现过程

首先将拖线阵阵列信号各频率单元进行频域波束形成,得到宽带信号方位谱,判断并储存方位谱中目标方位。依次对不同目标方位各频率波束输出进行傅里叶逆变换,选取拖船海底反射噪声时延差范围(如图 3 实线框区域),提取时延差  $\Delta t_{35}$  并计算目标-背景对比度,当时延差  $\Delta t_{35}$  在傅里叶逆变换谱中的目标-背景对比度高于阈值,则判断该目标为海底反射拖船噪声造成的伪目标。根据不同阵深选择合适的时延差  $\Delta t_{35}$  范围,在实验所用拖线阵工况下,阵深与时延差的关系如图 4 所示。

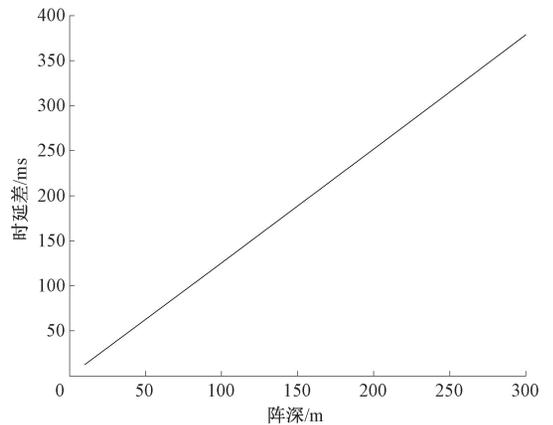


图 4 阵深与时延差关系

Fig. 4 Relationship between array depth and time delay difference

下面对算法复杂度进行分析,相较于宽带频域波束形成,该算法主要增加对目标方位各频率波束输出功率进行傅里叶逆变化的过程,假设方位谱中目标数量为  $M$ ,处理带宽为  $B$ ,频谱间隔 1 Hz,则算法需要增加  $M \cdot B / 2 \log_2 B$  次复数乘法,  $M \cdot B \log_2 B$  次复数加法,计算量较小,增加时间较短。

### 3 数值仿真分析

#### 3.1 伪目标判别

假定拖船产生的噪声源位于水下 7 m, 拖线阵位于水下 80 m, 阵元数为 100, 阵元间距 1 m, 处理频带为 400~750 Hz, 拖线阵首阵元距离拖船噪声源 500 m。声速剖面为 Munk 典型深海声速剖面, 深度为 1 km, 参考声速  $c = 1500$  m/s, 该条件下时延差  $\Delta t_{35}$  范围 95~105 ms。拖船噪声各频率波束输出功率如图 5(a) 所示, 方位谱如图 5(b) 所示。

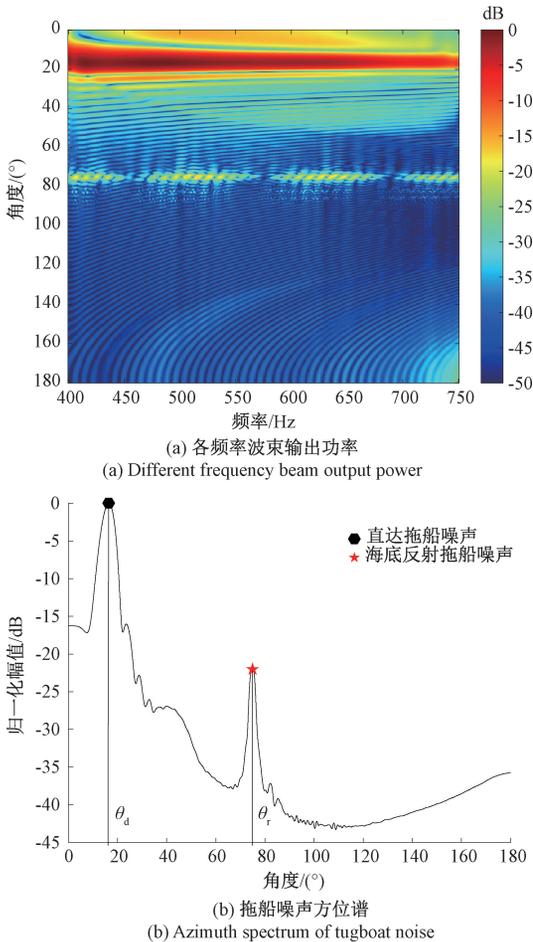
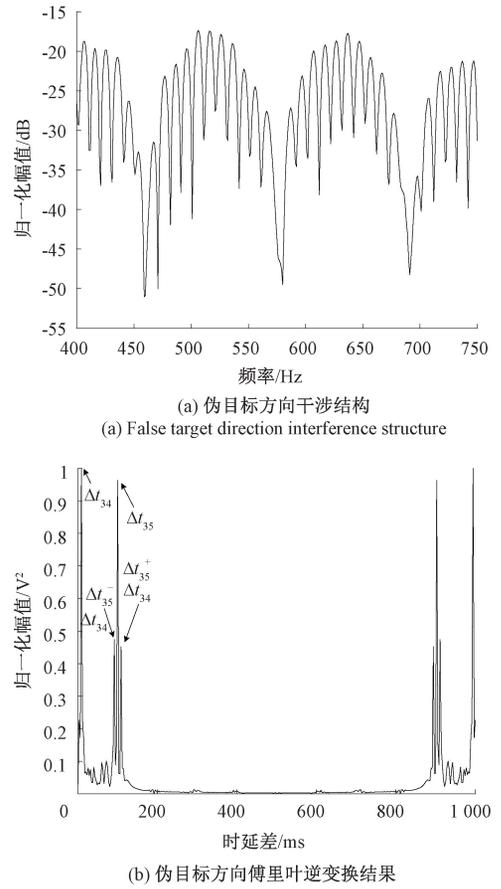


图5 深海拖船噪声波束输出功率

Fig. 5 Deep-sea tugboat noise beam output power

在处理频带内, 各频率波束输出功率在  $\theta_d = 16.6^\circ$  方向衰减, 不同路径的声线在有限带宽内未出现干涉现象, 在图 5(a) 表现为连续明亮的直线; 在  $\theta_r = 75.2^\circ$  方向声线经过海底反射后, 各频率波束输出功率衰减大, 根据式 (14), 一次海底反射声线在带宽内出现两种不同周期的干涉现象, 在图 5(a) 中表现为明暗相间的直线。根据图 5(b) 拖船噪声方位谱, 在该仿真条件下, 拖船噪声

在  $\theta_d = 16.6^\circ$  和  $\theta_r = 75.2^\circ$  方向上均产生干涉, 波束输出功率大约相差 20 dB, 功率差值受海底深度影响。在实际利用拖线阵进行探测的过程中, 拖船噪声产生的  $\theta_r = 75.2^\circ$  的伪目标易被判别为其他舰船目标, 严重影响判情。 $\theta_r = 75.2^\circ$  方向波束输出功率干涉结构如图 6(a) 所示, 对其进行式 (15) 傅里叶逆变换, 横坐标为时延差, 纵坐标为该方位波束域信号功率归一化幅值, 得到时延差  $\Delta t_{34}$ 、 $\Delta t_{35}$ , 如图 6(b) 所示。



(b) 伪目标方向傅里叶逆变换结果  
(b) Inverse Fourier transform results of false target direction

图6 伪目标方向波束输出功率干涉结构

Fig. 6 False target direction beam output power interference structure

根据图 6(b), 在上述仿真条件下提取的时延差  $\Delta t_{35} = 100$  ms, 满足式 (19) 的近似关系。在图 6(a) 中,  $\theta_r = 75.2^\circ$  方向波束输出功率可以明显观察到 2 个干涉周期。根据式 (14),  $\theta_r = 75.2^\circ$  方向的波束输出功率进行傅里叶逆变换时, 如图 6(b) 所示, 会分别在  $\Delta t_{34}$ 、 $\Delta t_{35}$ 、 $\Delta t_{34} + \Delta t_{35}$ 、 $\Delta t_{35} - \Delta t_{34}$  出现 4 个峰值,  $\Delta t_{35} - \Delta t_{34}$  与  $\Delta t_{34} + \Delta t_{35}$  的幅度约为  $\Delta t_{34}$ 、 $\Delta t_{35}$  幅度的一半<sup>[24]</sup>。在实际应用中, 由于拖船噪声声源较浅且处理频带有限, 时延差  $\Delta t_{34}$  较难提取。根据式 (11),  $\Delta t_{35}$  与阵深有关, 在其他条件相同的情况下, 阵深越深,  $\Delta t_{35}$  越大。根据各目标方向波束

输出功率傅里叶变换结果,对拖船噪声经过海底反射产生的伪目标进行判别,可为后续伪目标消除提供判断依据。下面假设目标舰船位于水下 10 m,运动轨迹如图 7 所示。

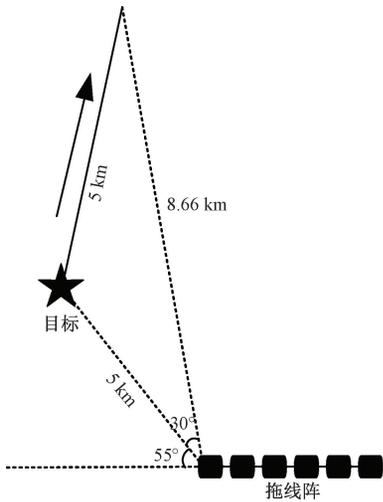
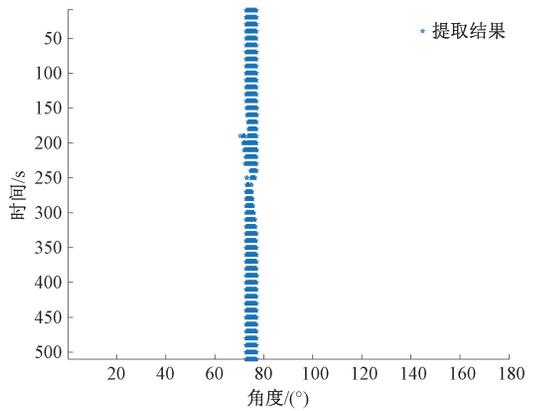


图 7 目标运动轨迹  
Fig. 7 Target motion trajectory diagram

假定目标舰船辐射噪声谱级与拖船噪声谱级相同,其他条件同上,得到无背景噪声下,拖船及目标舰船方位历程图如 8(a) 所示,选取  $TBC = 85\%$  作为目标-背景对比度阈值,不同目标方位时延差  $\Delta t_{35}$  提取结果如图 8(b) 所示,图中五角星为检测到伪目标的方位。

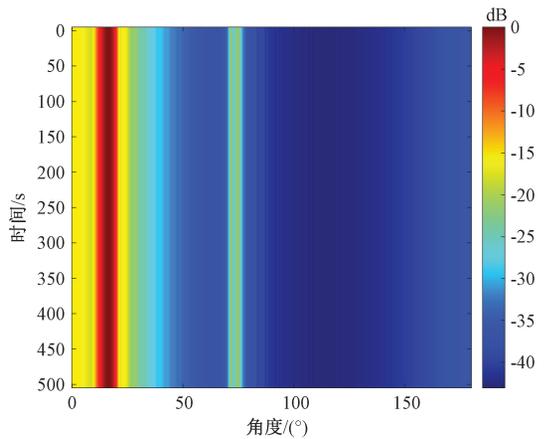
当目标舰船出现在拖船海底反射噪声方向附近时,两者方位相差  $3^\circ$ ,如图 9(a) 所示,伪目标判决结果如图 9(b) 所示。

根据实验结果可知,当目标舰船出现在拖船海底反射噪声方向附近时,该方法可以成功判别拖船海底反射噪声伪目标,同时不对舰船目标造成误判。

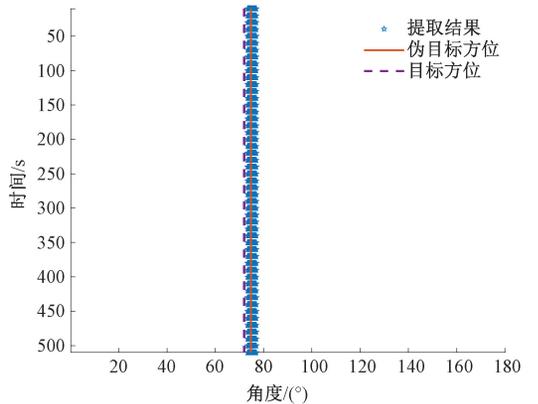


(b) 时延差提取结果  
(b) Time delay difference extraction results

图 8 方位历程图及时延差提取结果  
Fig. 8 Azimuth history diagram and time delay extraction results

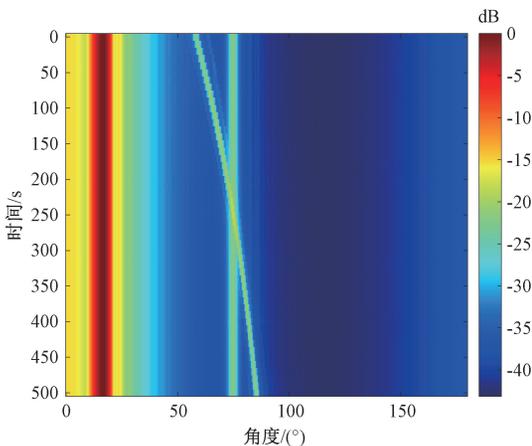


(a) 方位历程图  
(a) Azimuth history diagram



(b) 时延差提取结果  
(b) Time delay difference extraction results

图 9 附近目标方位历程图及时延差提取结果  
Fig. 9 Azimuth history diagram of nearby target and time delay extraction results



(a) 方位历程图  
(a) Azimuth history diagram

### 3.2 不同海洋深度分析

下面研究不同海洋深度,对所提方法判别拖船噪声海底反射伪目标的影响。在相同底质下,海深1、2、3、4 km的Munk声速剖面下,冲激响应如图10所示,方位谱如图11所示,对海底反射的拖船噪声时延差 $\Delta t_{35}$ 进行提取,结果如图12所示。

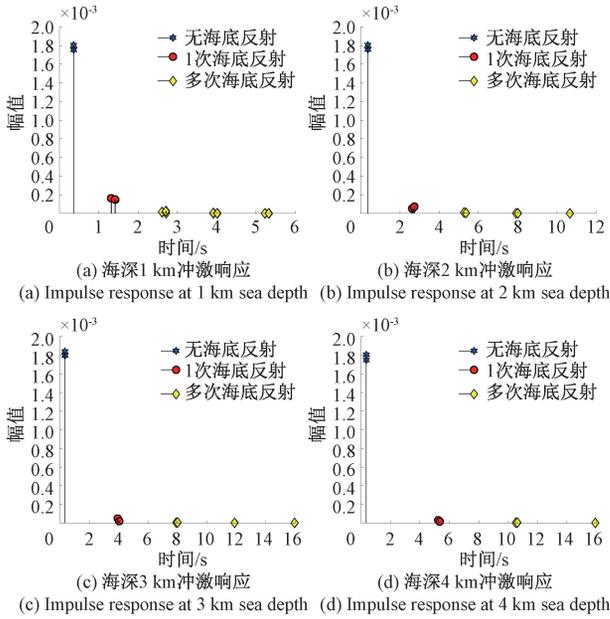


图10 不同海深冲激响应

Fig. 10 Impulse response of different sea depths

图10中不同海深冲激响应图表明,随着深度的增加,不经过海底反射的声线能量及到达时间没有明显变化,经过1次海底反射的声线能量降低,到达时间增加。由于海深增加,海底反射声线传播距离增大,按球面波扩展损失计算声线能量衰减增大,同时传播时间增加。当海深 $H=1$  km时,1次海底反射声线能量明显高于多次海底反射声线能量;当海深 $H=2$  km时,1次海底反射声线能量略高于多次海底反射声线能量;当海深 $H=3$  km、4 km时,1次海底反射声线能量接近多次海底反射声线能量。

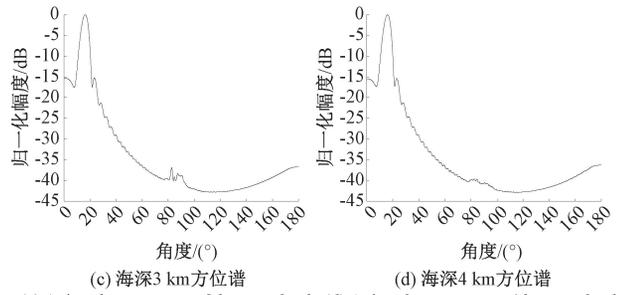
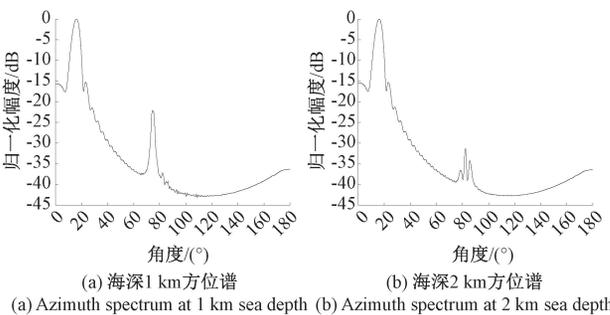


图11 不同海深方位谱

Fig. 11 Azimuth spectrum of different sea depths

图11中不同海深方位谱表明,各海深直达声线 $\theta_d$ 的方位稳定,能量基本相同,与不同海深冲激响应图不经过海底反射声线的特征相符;随着深度的增加,1次海底反射声线 $\theta_r$ 的方位逐渐接近 $90^\circ$ ,能量逐渐减少,这是由于海深的增加,1次海底反射的声线能量降低。在 $H=2$  km时,由于1次海底反射声线的能量接近多次海底反射声线的能量,海底反射声线的方位附近会出现方位分裂现象,在空间谱中同时出现1次海底反射和多次海底反射声线的方位。在 $H=4$  km处,1次海底反射声线的能量过低,方位谱已经很难观察到由拖船噪声海底反射造成的伪目标 $\theta_r$ 方位。

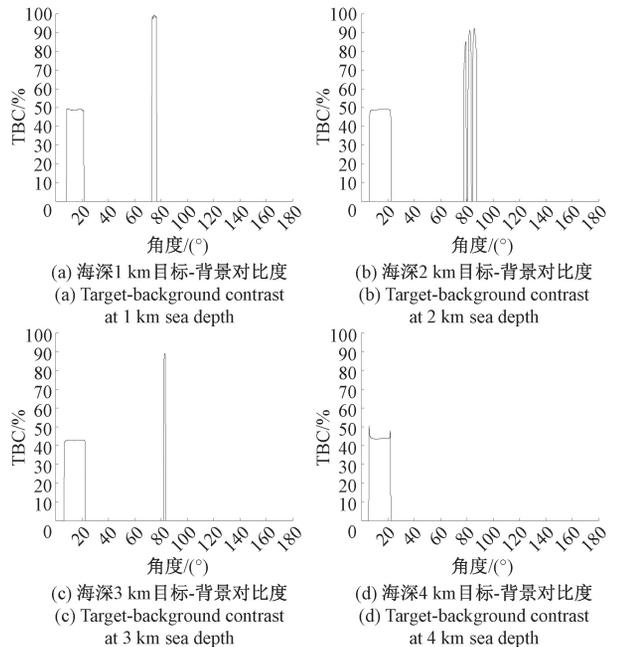


图12 不同海深目标-背景对比度

Fig. 12 Target-background contrast of different sea depths

在图12中,利用所提方法对时延差进行提取,在 $\theta_d$ 方位的目标-背景对比度低于50%, $\theta_r$ 方位的目标-背景对比度高于80%,因此选取合适的目标-背景对比度阈

值可以较好的分辨拖船噪声造成的伪目标。由于拖船噪声经过 1 次海底反射和多次海底反射波束输出功率的干涉结构中频率间隔相似,在  $H=2\text{ km}$  处,所提方法在拖船噪声经海底反射后方位分裂的情况下,仍然可以对各分裂方位进行提取。在实际探测任务中,能量较低的海底反射声线会淹没在海洋噪声中,无需进行拖船噪声伪目标判别。

### 3.3 不同声速剖面分析

下面分析深度 1 km 时 Munk 声速剖面、冬季声速剖面、夏季声速剖面对所提方法的影响,只考虑海底反射拖船噪声出现干扰的情况下,不同声速剖面拖船噪声方位谱如图 13(a) 所示,伪目标方向波束输出功率干涉结构如图 13(b) 所示。

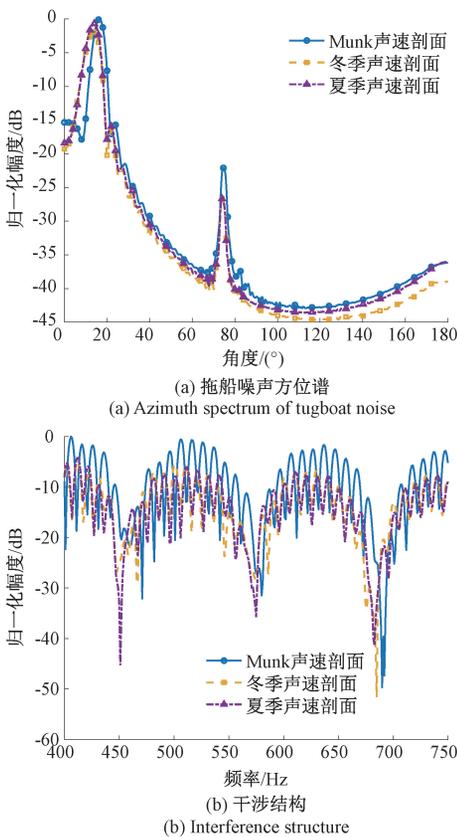


图 13 不同声速剖面拖船噪声方位谱及伪目标方向干涉结构  
Fig. 13 The noise azimuth spectrum of tugboat with different sound velocity profiles and the interference structure of false target direction

相同海洋深度下,声速剖面对拖船噪声直达路径的方位  $\theta_d$  有一定影响,对海底反射伪目标的方位  $\theta_r$  影响较小。不同声速剖面对伪目标方向波束输出功率的频率选择性不同,但是对干涉结构的频率间隔影响不大,即对时延差  $\Delta t_{35}$  影响较小。利用图 7 目标舰船的运动轨迹,选

取合适目标 - 背景对比度,对不同声速剖面下时延差  $\Delta t_{35}$  的提取结果如图 14 所示。

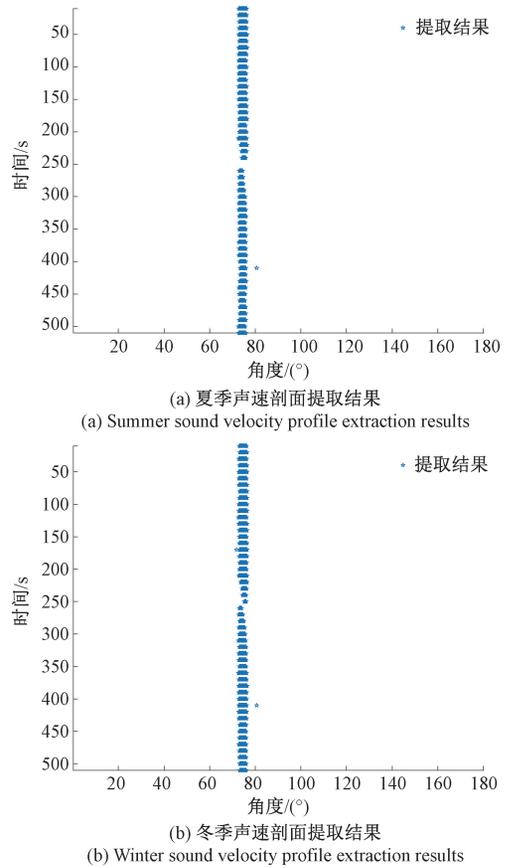


图 14 不同声速剖面下提取结果

Fig. 14 Extraction results under different sound velocity profiles

在不同声速剖面下,拖船噪声经过海底反射的干涉结构稳定,对时延差  $\Delta t_{35}$  的提取影响较小,所提方法对不同声速剖面海底反射拖船噪声伪目标的判别宽容度较好。

### 3.4 不同信噪比判别结果

假定真实目标距离拖线阵 10 km,方位角  $55^\circ$ ,采用 Munk 声速剖面,海深 1 km,目标辐射噪声与拖船辐射噪声谱级相同,加入高斯白噪声,其他条件同上。利用所提方法在不同接收信噪比(拖船噪声海底反射信号功率与背景噪声功率之比)下,对拖船噪声直达方向,拖船噪声海底反射方向,真实目标方向的目标-背景对比度进行 300 次蒙特卡洛实验,实验结果如图 15 所示。

图 15(a) 表明,随着接收信噪比(signal to noise ratio, SNR)的增加,直达拖船噪声方位、真实目标方位、海底反射拖船噪声方位的目标-背景对比度都得到提高。当  $SNR=-9\text{ dB}$  时,直达拖船噪声方位对比度达到无背景噪声下的理想对比度;当  $SNR=18\text{ dB}$  时,真实目标噪声方位对比度达到无背景噪声下的理想对比度;当  $SNR=11\text{ dB}$  时,海底反射拖船噪声方位对比度达到无背景噪

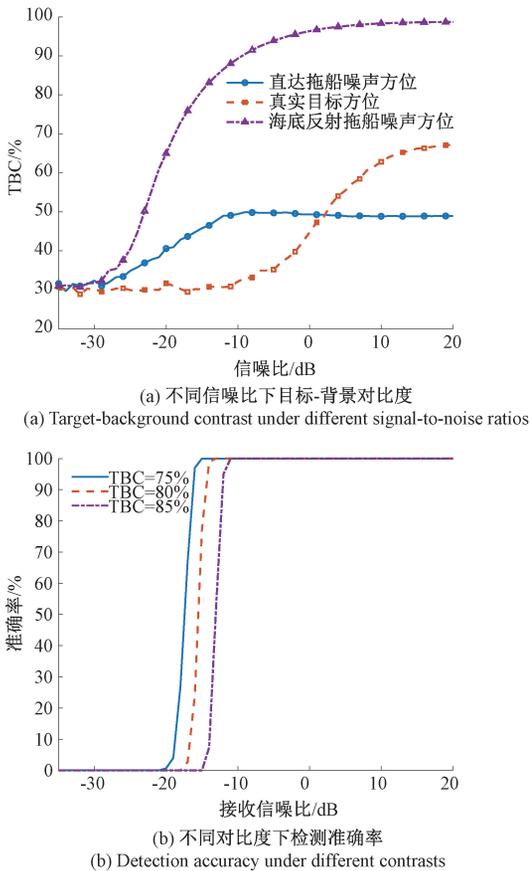


图15 不同信噪比检查性能

Fig. 15 Performance inspection under different signal-to-noise ratios

声下的理想对比度。当信噪比  $SNR = -17$  dB 时,海底反射拖船噪声方位对比度显著高于真实目标方位和直达拖船噪声方位对比度。根据图 15 (b),在该仿真条件下,选取  $TBC = 85\%$ ,在接收信噪比达到  $-12$  dB (对应波束域海底反射声能量与背景噪声能量比  $8$  dB) 以上时,对伪目标判决准确性达到  $95\%$  以上。下面利用图 7 目标舰船的运动轨迹,选取对比度  $TBC = 85\%$ ,在信噪比为  $-5$ 、 $-10$  dB 时对时延差进行提取,提取结果如图 16 所示。

图 16 表明,在相同目标-背景对比度下,随着接收信噪比的减少,  $\Delta t_{35}$  提取的宽度变窄,适当降低的目标-背景对比度可以增加  $\Delta t_{35}$  提取的宽度。在接收信噪比  $-5$  和  $-10$  dB 所提方法通过对时延差的提取,可以实现海底反射拖船噪声伪目标的判别。

#### 4 海试数据分析

该段海试数据来自某深海实验拖线阵接收到拖船噪声及过往船只辐射噪声的数据,拖线阵阵深标称为

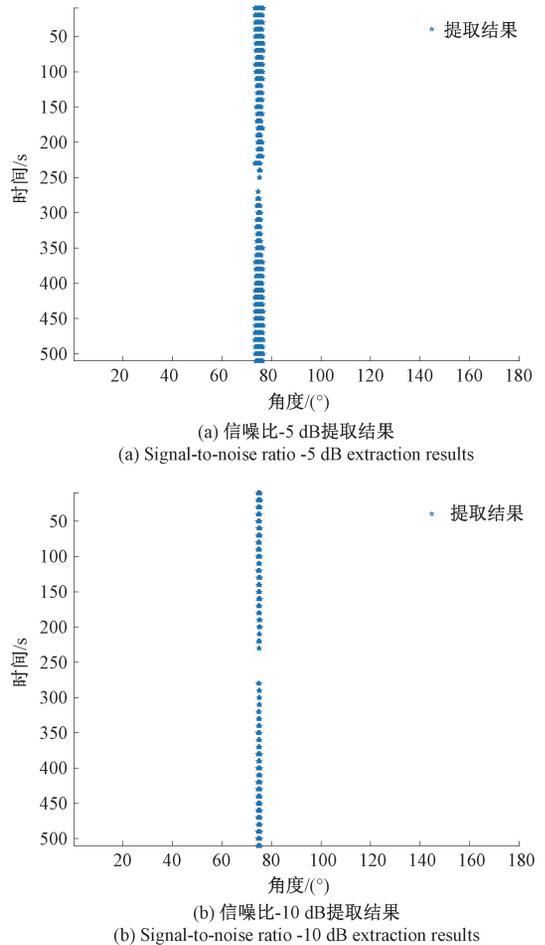
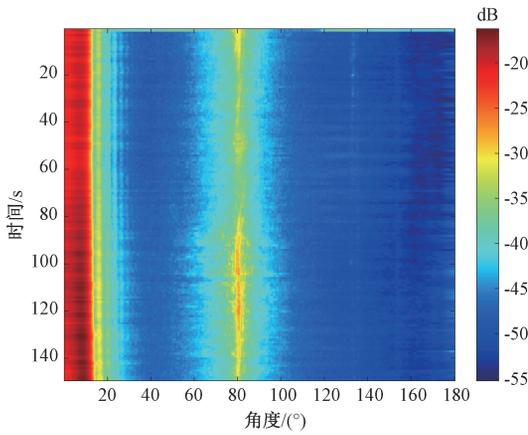


图16 信噪比-5、-10 dB方位历程图提取结果

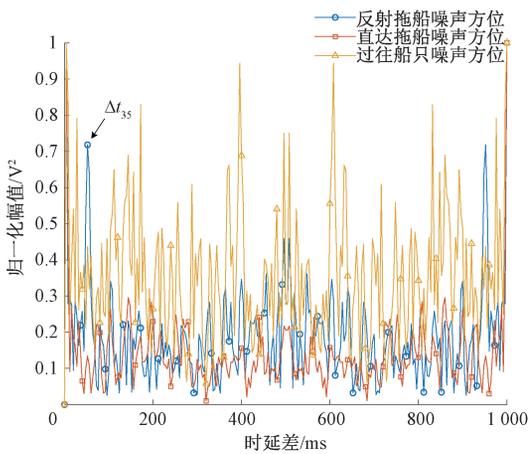
Fig. 16 Signal to noise ratio -5, -10 dB azimuth history map extraction results

40 m。利用所提方法分别对拖线阵的接收数据进行处理分析,提取海底反射拖船噪声的时延差,图 17 (a) 为时间方位历程图 (依据当时态势:图中方位  $6^\circ$  为直达拖船噪声,方位  $80^\circ$  为拖船噪声反射声,方位  $135^\circ$  为过往船只噪声);图 17 (b) 为某时刻直达拖船噪声方位、反射拖船噪声方位、过往船只噪声方位傅里叶逆变化结果;图 17 (c) 为时延差的提取结果及文献 [15] 所提方法估计的海底反射拖船噪声方位,采用该海域往年声速剖面数据及海底底质,海区地形平坦。

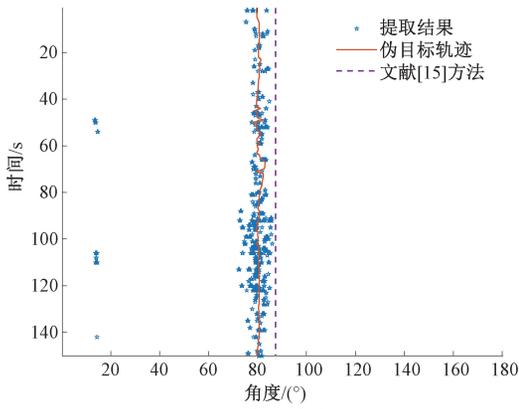
图 17 (b) 表明,仅海底反射拖船噪声方位的波束输出功率傅里叶逆变化后会在时延差范围内形成稳定的高于背景级的峰值,从而被检测为拖船海底反射噪声伪目标。根据图 17 (b) 提取结果,拖船海底反射噪声峰值处时延差  $\Delta t_{35} = 52$  ms,根据图 4 时延差与阵深的对应关系,阵深 40 m 时延差参考值为  $50.2$  ms,误差为  $3.59\%$ ,该误差受实际阵深和海洋环境影响。观察图 17 (a)、(c),经过海底反射的拖船噪声能量的大小影响时延差的提取结



(a) 时间方位历程图  
(a) Time azimuth history diagram



(b) 傅里叶逆变换结果  
(b) Results of inverse Fourier transform



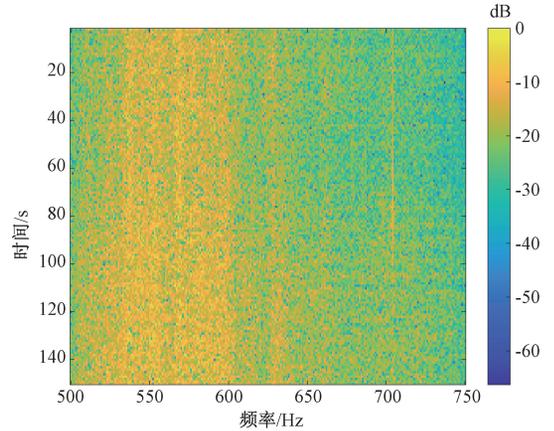
(c) 提取结果  
(c) Extraction results

图 17 拖船直线航行及提取结果

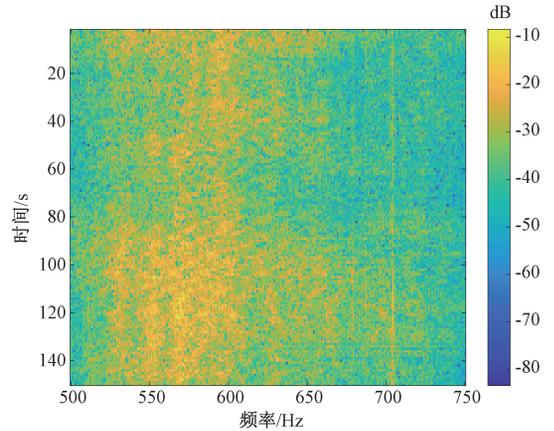
Fig. 17 Tugboat straight line navigation and extraction results

果,在能量较高时,提取结果较好;在能量较低时,提取结果较差。在无法获得声速剖面准确数据的情况下,文献[15]所提的拖船噪声海底反射方位估计方法,估计结果与实际方位相差 7°左右。根据图 17(c)时延差提取结果,将时间方位历程图中 80°方向的目标判别为由拖船噪

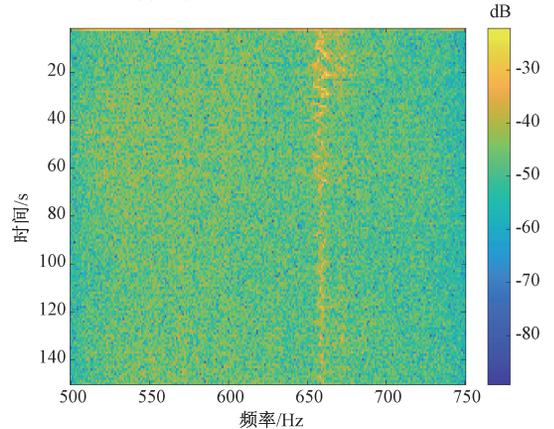
声经过海底反射产生的伪目标。分别选取拖线阵波束形成后拖船噪声直达对应方位(6°)、拖船噪声伪目标对应方位(80°)和过往船只辐射噪声对应方位(135°)的波束域信号,构成该方位的 LOFAR 图,以拖船噪声直达方位 LOFAR 谱图的最大值作为归一化标准,结果如图 18 所示。



(a) 拖船噪声直达方位  
(a) The direct direction of tug noise



(b) 拖船噪声反射方位  
(b) Tugboat noise reflection azimuth



(c) 过往船只噪声方位  
(c) Noise azimuth of passing ships

图 18 各方位 LOFAR 图

Fig. 18 LOFAR diagram of each azimuth

由图 18(a)、(b)结果可知,在拖船噪声直达方位以及判别为拖船噪声伪目标方位都存在 704 Hz 的强线谱,同时在 527~605 Hz 处谱级较高,是由同一声源的辐射噪声通过不同海洋信道传播被拖线阵接收;图 18(c)中,该方位目标的辐射噪声在 659 Hz 处存在强线谱,与图 18(a)、(b)中目标频谱的特征差别较大,为过往船只辐射噪声,与所提方法判别结果一致。下面选取该段实验数据 62 s 时刻,拖船噪声直达方位、判别为拖船噪声伪目标方位和过往船只辐射噪声方位归一化后的频谱,如图 19 所示。

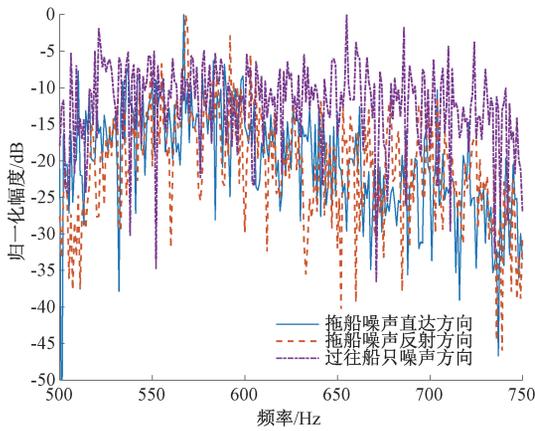


图 19 62 s 时刻各方向频谱

Fig. 19 Spectrum in all directions at the 62nd second

由图 19 结果可知,62 s 时刻拖船噪声直达方位与拖船噪声伪目标方位对应频谱结构一致,其中 704 Hz 处谱线高出附近谱线平均强度 8 dB;过往船只辐射噪声方位则与拖船噪声直达方位频谱结构差异较大。通过拖船噪声直达方位、判别为拖船噪声伪目标方位和过往船只辐射噪声方位 LOFAR 谱图以及某时刻频谱的对比,进一步验证了所提方法对拖船噪声伪目标判别的准确性。

## 5 结 论

在深海环境下,拖船噪声经过海底反射会在远离拖船端射方向形成干扰,干扰的能量和方位受海洋深度的影响。相较于端射方向附近的拖船噪声干扰,该干扰的波束输出功率在不同频率处呈现干涉结构,通过对干涉频率间隔的提取,可以实现拖船噪声海底反射伪目标的判别。仿真数据和海试数据分析结果表明,该方法在干涉结构稳定,波束域海底反射声能量与背景噪声能量比 8 dB 以上时,对伪目标判决准确性达到 95% 以上,可实现对深海拖船噪声海底反射造成的伪目标进行判别,为后续判情提供参考。

## 参考文献

- [1] 董聚兵,刘晓东. 基于四阶累积量的测深侧扫声纳波达方向估计方法研究[J]. 仪器仪表学报, 2022, 43(8): 235-244.  
DONG J B, LIU X D. Research on the DOA estimation method of bathymetric side scan sonar based on fourth-order cumulant [J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2022, 43(8): 235-244.
- [2] 左震,黄泓赫,孙备,等. 基于无人艇载侧扫声呐的水下目标定位方法研究[J]. 仪器仪表学报, 2023, 44(11): 310-319.  
ZUO ZH, HUANG H H, SUN B, et al. Research on underwater target location based on side-scan sonar carried by unmanned surface vehicle [J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2023, 44(11): 310-319.
- [3] 高家伟,周天,杜伟东,等. 基于相位特征的多波束测深声呐多回波检测方法研究[J]. 仪器仪表学报, 2022, 43(8): 193-203.  
GAO J W, ZHOU T, DU W D, et al. Research on the multi echo detection method of multi beam sounding sonar based on phase characteristics [J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2022, 43(8): 193-203.
- [4] 马深. 依赖多波束合成孔径侧扫声纳图像的海底障碍物研究[J]. 电子测量技术, 2020, 43(5): 102-106.  
MA SH. Submarine obstacles relying on multi-beam synthetic aperture side scan sonar images [J]. Electronic Measurement Technology, 2020, 43(5): 102-106.
- [5] GROEN J, BEERENS S P, BEEN R, et al. Adaptive port-starboard beamforming of triplet sonar arrays [J]. IEEE Journal of Oceanic Engineering, 2005, 30(2): 348-359.
- [6] 陈敬军,孙纯. 一种基于近场传播特性的拖线阵声呐平台噪声抑制方法[J]. 舰船电子工程, 2022, 42(10): 184-188, 212.  
CHEN J J, SUN CH. A platform noise suppressing method for towed line array sonar based on near-field sound propagation characteristics [J]. Ship Electronic Engineering, 2022, 42(10): 184-188, 212.
- [7] 赵闪,孙长瑜,陈新华,等. 拖船辐射噪声特性分析及实用抵消[J]. 声学技术, 2013, 32(2): 92-95.  
ZHAO SH, SUN CH Y, CHEN X H, et al. The analysis of tow ship radiated noise characteristics and the cancellation of the noise [J]. Technical Acoustics, 2013, 32(2): 92-95.
- [8] 王乐宁,喻敏,姚直象,等. Hermite 分数时延滤波器在声纳信号源仿真逆波束形成中的应用[J]. 兵工学报, 2019, 40(7): 1460-1467.  
WANG L N, YU M, YAO ZH X, et al. Application of Hermite fractional time delay filter in simulation of

- inverse beamforming of sonar signal source [J]. *Acta Armamentarii*, 2019, 40(7):1460-1467.
- [9] CANTONI A, GODARA L C. Performance of a post-beamformer interference canceller in the presence of broadband directional signals [J]. *Journal of the Acoustical Society of America*, 1984, 76(1):128-138.
- [10] CANDY J V, SULLIVAN E J. Cancelling tow ship noise using an adaptive model-based approach [C]. *Proceedings of the IEEE/OES Eighth Working Conference on Current Measurement Technology*, 2005:14-18.
- [11] 韩东,李建,康春宇,等. 拖曳线列阵声纳平台噪声的空域矩阵滤波抑制技术[J]. *声学学报*, 2014, 39(1):27-34.  
HAN D, LI J, KANG CH Y, et al. Towed line array sonar platform noise suppression based on spatial matrix filtering technique [J]. *Acta Acustica*, 2014, 39(1):27-34.
- [12] 生雪莉,刘婷,杨超然,等. 基于子阵近场零陷权的联合波达方向估计方法[J]. *电子与信息学报*, 2021, 43(3):727-734.  
SHENG X L, LIU T, YANG CH R, et al. Joint direction of arrival estimation of subarrays based on near-field nulling weight [J]. *Journal of Electronics & Information Technology*, 2021, 43(3):727-734.
- [13] 周健,宋雪晶,刘福臣. 拖船噪声对拖线阵声纳的干扰特性分析[J]. *声学技术*, 2023, 42(5):609-615.  
ZHOU J, SONG X J, LIU F CH. Analysis of interference characteristics of tow-ship noise to towed line array sonar [J]. *Technical Acoustics*, 2023, 42(5):609-615.
- [14] WU Y Q, ZHANG W, HU ZH L, et al. Directional response of a horizontal linear array to an acoustic source at close range in deep water [J]. *Acoustics Australia*, 2022, 50(1):91-103.
- [15] HAN ZH B, PENG ZH H, SONG J, et al. Acoustic multipath structure in direct zone of deep water and bearing estimation of tow ship noise of towed line array [J]. *Chinese Physics B*, 2022, 31(5):487-495.
- [16] 周健,宋雪晶,刘福臣,等. 深海环境下利用噪声抵消器和经验模态分解的拖船干扰抑制方法[J]. *兵工学报*, 2024, 45(2):443-453.  
ZHOU J, SONG X J, LIU F CH, et al. Tow ship interference suppression method using noise canceller and empirical mode decomposition in deep-sea environment [J]. *Acta Armamentarii*, 2024, 45(2):443-453.
- [17] 刘与涵,郭良浩,章伟裕,等. 深海声影区时频谱干涉结构与声源定位[J]. *应用声学*, 2024, 43(1):12-23.  
LIU Y H, GUO L H, ZHANG W Y, et al. Interference patterns and source localization in the shadow zone of deep water [J]. *Journal of Applied Acoustics*, 2024, 43(1):12-23.
- [18] LIU Y H, GUO L H, ZHANG W Y, et al. Range estimation of a moving source using interference patterns in deep water [J]. *JASA Express Letters*, 2022, 2(12):0016402.
- [19] QI Y B, ZHOU SH H, LIU CH P. Sources depth estimation for a tonal source by matching the interference structure in the arrival angle domain [J]. *The Journal of the Acoustical Society of America*, 2023, 154(5):2800-2811.
- [20] KRIM H, VIBERG M. Two decades of array signal processing research: The parametric approach [J]. *IEEE Signal Processing Magazine*, 1996, 13(4):67-94.
- [21] 朱启轩,孙超,刘雄厚. 利用海底弹射区角度-距离干涉结构特征实现声源深度估计[J]. *物理学报*, 2022, 71(18):154-163.  
ZHU Q X, SUN CH, LIU X H. Source depth estimation using angle-range interference pattern in deep ocean bottom bounce area [J]. *Acta Physica Sinica*, 2022, 71(18):154-163.
- [22] 翁晋宝,李风华,郭永刚. 典型深海声场频率-距离干涉结构分析及实验研究[J]. *声学学报*, 2016, 41(3):330-342.  
WENG J B, LI F H, GUO Y G. The sound field frequency-range interference patterns in deep water: Theory and experiment [J]. *Acta Acustica*, 2016, 41(3):330-342.
- [23] MOULDEN B, KINGDOM F, GATLEY L F. The standard deviation of luminance as a metric for contrast in random-dot images [J]. *Perception*, 1990, 19(1):79-101.
- [24] 吴俊楠,周士弘,张岩. 利用深海海底反射声场特征的水面声源被动测距[J]. *中国科学:物理学 力学 天文学*, 2016, 46(9):82-88.  
WU J N, ZHOU SH H, ZHANG Y. Passive ranging of surface source using bottom bounced sound in deep water [J]. *Scientia Sinica Physica, Mechanica & Astronomica*, 2016, 46(9):82-88.

## 作者简介



陈新华(通信作者),1999年于哈尔滨工程大学获得学士学位,2004年于哈尔滨工程大学获得博士学位,现为中国科学院声学研究所研究员,主要研究方向为水声信号与信息处理。

E-mail:chenxinhua@mail.ioa.ac.cn

**Chen Xinhua** (Corresponding author) received his B. Sc. degree in 1999 from Harbin Engineering University, received his Ph. D. degree in 2004 from Harbin Engineering University. Now he is a researcher in Institute of Acoustics, Chinese Academy of Sciences. His main research interest includes underwater acoustic signal and information processing.