

时空域联合的水下未知线谱目标检测方法

王逸林 马世龙 邹 男* 梁国龙

(哈尔滨工程大学水声技术重点实验室 哈尔滨 150001)

(哈尔滨工程大学水声工程学院 哈尔滨 150001)

摘 要: 水下线谱目标被动检测中, 目标辐射线谱信号的方位、频率、个数等信息通常未知, 且线谱检测性能容易受到宽带干扰及背景噪声的影响。针对此问题, 该文提出一种时空域联合的未知线谱目标检测方法(STJD)。首先, 利用线谱信号的相干特性, 构建了一种能够自主匹配未知线谱信号的时空域联合滤波器, 用以滤除接收信号中的宽带背景干扰及噪声。之后, 对滤波信号进行常规频域波束形成得到空时2维波束输出, 其具有相对纯净的线谱谱峰。在此基础上提取线谱并利用线谱信息计算空间方位谱, 进而实现对线谱目标的检测。理论推导及仿真结果表明该文方法能够对未知线谱信号进行最小均方误差意义下的时空滤波, 并能充分地利用线谱信息进行线谱目标的被动检测。与已有基于线谱特征的线谱目标检测方法相比, 该文方法对信噪比(SNR)的要求较低, 在多目标、多线谱等复杂情况下具有较好的线谱目标检测性能。

关键词: 阵列信号处理; 线谱检测; 辐射噪声; 线谱增强器

中图分类号: TB566

文献标识码: A

文章编号: 1009-5896(2019)07-1682-08

DOI: 10.11999/JEIT180796

Detection of Unknown Line-spectrum Underwater Target Using Space-time Processing

WANG Yilin MA Shilong ZOU Nan LIANG Guolong

(Acoustic Science and Technology Laboratory, Harbin Engineering University, Harbin 150001, China)

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

Abstract: For the passive detection of underwater line-spectrum target, the information such as the azimuth, frequency and the number of the line-spectrum signals is usually unknown, and the line-spectrum detection performance is affected by broadband interferences and noise. For this issue, a Space-Time Joint Detection (STJD) method of detecting the unknown line-spectrum target by space-time domain processing is proposed. Firstly, a space-time filter that autonomously matches the unknown line-spectrum signals is constructed to filter out the broadband interferences and noise. Secondly, the conventional frequency domain beamforming is performed on the filtered signals, and then a space-time two-dimensional beam output with relatively pure line-spectrum spectral peaks is obtained. The line-spectrum signals are extracted from the space-time two-dimensional beam output, and the spatial spectrum is calculated using the extracted line-spectrum information. Then, the detection of the line-spectrum target is realized. Theoretical derivation and simulation results verify that the proposed method performs the spatiotemporal filtering on the unknown line-spectrum signals in the minimum mean square error sense, and fully utilizes the line-spectrum information for the passive detection of underwater line-spectrum target. Compared with the existing line-spectrum target detection methods utilizing the line-spectrum features, the proposed method requires lower Signal to Noise Ratio (SNR), and has better detection performance under the complex multi-target multi-spectrum-line conditions.

Key words: Array signal processing; Line spectrum detection; Radiation noise; Line spectrum enhancer

收稿日期: 2018-08-16; 改回日期: 2019-02-26; 网络出版: 2019-03-23

*通信作者: 邹男 zounan@hrbeu.edu.cn

基金项目: 国家重点研发计划(2016YFC1400101), 国家自然科学基金(11504064), 黑龙江省归国人员科学基金(JJ2016LX0051)

Foundation Items: The National Key R&D Plan(2016YFC1400101), The National Natural Science Foundation of China (11504064), Heilongjiang Province Scientific Research Foundation for Returned Scholars (JJ2016LX0051)

1 引言

随着减震降噪技术的发展, 舰船辐射噪声水平大幅度降低, 传统的基于宽带能量的目标检测方法性能受限。而舰船辐射噪声中的低频线谱信号, 因其强度高、稳定性好、传播损失低等特点日益得到人们的关注, 其对于探测低噪声、安静型水下目标具有重要的意义^[1-3]。实际中, 目标辐射噪声中的低频线谱信号的频率、方位、个数等信息通常未知, 同时, 环境中存在的宽带背景干扰及噪声会对线谱信号的检测产生较大影响。在上述复杂情况下, 研究如何利用线谱信号进行水下目标的被动检测, 具有重要的实际意义。

常规波束形成(Conventional Beam-Former, CBF)方法将各频率点上的窄带波束输出结果无差别相加融合即宽带能量检测, 没有充分地利用线谱信号的特点进行线谱目标检测, 容易导致线谱目标淹没于宽带背景干扰及噪声中^[4]。宽带多波束方法可以通过在时间、方位、频率多个维度内进行全扫描来实现对线谱信号的检测, 但其检测效率较低, 尤其在复杂多目标等环境下, 难以直观地跟踪线谱目标, 且存在多维显示困难等问题^[5]。文献^[5,6]中, 根据线谱的特性, 利用每个方位频率域的峰值频率方差对各方位的波束输出结果进行加权来对线谱目标进行检测, 称之为频率方差加权法(Frequency Variance Weighting Detection, FVWD)。当目标辐射噪声中存在多个线谱信号时, FVWD方法通过峰值挑选所估计的频率方差的误差较大, 严重影响线谱目标的检测性能。文献^[7,8]中利用线谱频率单元的波束输出最大值所对应的方位相对稳定, 而噪声所在频率单元波束输出最大值对应的方位较随机的特性来检测线谱目标, 称之为基于线谱方位稳定性的检测(Azimuth Stability Detection, ASD)方法。当存在多个目标辐射相同频率的线谱信号时, ASD方法通过峰值挑选所估计的方位方差的误差较大, 直接导致线谱目标检测性能下降。

针对上述问题, 本文提出基于时空域联合滤波的未知线谱目标检测方法(STJD)。本方法首先利用线谱信号的相干特性, 构建了一种能够自主匹配未知线谱信号的时空域联合滤波器, 用以滤除信号中的宽带背景干扰及噪声。在此基础上, 对滤波后信号进行频域波束形成并利用线谱信息计算空间方位谱, 从而实现对线谱目标的检测。本文方法理论上能够对未知线谱信号进行最小均方误差意义下的时空滤波, 充分地利用了线谱信息, 目标被动检测性能较高。

2 阵列接收信号模型

空间中来自不同目标的 H 个未知线谱信号以远场平面波的形式入射到 M 元均匀线阵列。图1所示为第 h 个线谱信号的阵列接收模型, 信号频率为 f_h , 信号功率为 σ_h^2 , 入射方位与阵列法线夹角为 θ_h , 初相位为 ϕ_h , 且服从均匀分布, $\phi_h \sim U(0, 2\pi)$, $h = 1, 2, \dots, H$ 。采样率为 f_s , 以阵元0为参考阵元, 则阵元 m 接收信号可表示为

$$x_m(n) = \sum_{h=1}^H A_h \cos(2\pi f_h n / f_s + m\varphi_h + \phi_h) \quad (1)$$

其中, 线谱信号幅度 $A_h = \sqrt{2}\sigma_h$, $g_m(n)$ 表示功率为 σ_0^2 的宽带干扰及噪声, n 为离散时间序号。相邻阵元接收的线谱信号相位差为 $\varphi_h = 2\pi f_h d \sin(\theta_h) / C$, d 为阵元间距, C 为水中声速。

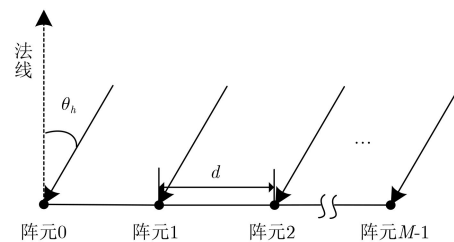


图1 阵列接收信号示意图

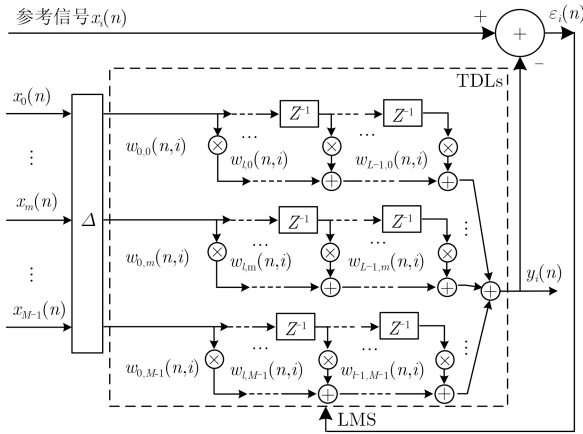
设 $f_h \in S_f$, S_f 为线谱信号频率集合, 其基数 $\text{card}(S_f) \geq 1$ 。 $\theta_h \in S_\theta$, S_θ 为线谱信号入射方位集合, 其基数 $\text{card}(S_\theta) \geq 1$ 。实际水下目标被动检测中, S_f 和 S_θ 通常未知。上述条件下, 如何从宽带干扰及噪声中检测未知线谱目标并获取其方位、频率信息是本文重点研究的问题。

3 时空域联合的水下未知线谱目标检测方法

线谱增强器能够对未知线谱进行自适应跟踪滤波, 根据这一特性, 本文首先构建了一种时空域联合滤波器, 该滤波器可看作是一种梳状谱结构的空域矩阵滤波器^[9,10], 能够在时空域上自适应地匹配未知线谱信号, 同时抑制宽带背景干扰及噪声。在此基础上, 对滤波输出信号进行频域波束形成, 并结合门限判决计算空间方位谱, 得到目标方位及线谱频率等信息, 从而实现对未知线谱目标的被动检测。

3.1 时空域联合滤波器

利用 M 路时空2维线谱增强器构建时空域联合滤波器, 其中, 第 i 路时空2维线谱增强器的结构如图2所示。图2中参考信号为阵元 i 接收的信号 $x_i(n)$,

图2 第*i*路时空2维线谱增强器结构图

Δ 为系统的解相关时间。先对各阵元接收信号进行 Δ 延迟，之后经过 M 路 L 抽头延迟线(Tapped Delay Line, TDL)，其中， n 时刻第 m 路TDL在 l 抽头处的权系数为 $w_{l,m}(n, i)$ 。则第 i 路时空2维线谱增强器的输出可表示为

$$y_i(n) = \sum_{l=0}^{L-1} \sum_{m=0}^{M-1} w_{l,m}(n, i) x_m(n - \Delta - l) \quad (2)$$

可得自适应误差输出 $\varepsilon_i(n)$ 为

$$\varepsilon_i(n) = x_i(n) - y_i(n) \quad (3)$$

采用自适应最小均方 (Least Mean Square, LMS) 算法更新权系数 $w_{l,m}(n, i)$ ，则权系数的迭代公式为

$$w_{l,m}(n+1, i) = w_{l,m}(n, i) + \mu \varepsilon_i(n) x_m(n - \Delta - l), \quad l = 0, 1, \dots, L-1, m = 0, 1, \dots, M-1 \quad (4)$$

其中， μ 为自适应步长^[11]。

当达到稳态时，依据自适应线谱增强器的原理^[12]，推导可得上述第 i 路时空2维线谱增强器的稳态最优权为

$$w^*(l, i-m) = \sum_{h=1}^H \frac{2\sigma_h^2}{2\sigma_0^2 + LM\sigma_h^2} \cos[2\pi f_h \tau_h(l, i-m)], \quad l = 0, 1, \dots, L-1, m = 0, 1, \dots, M-1 \quad (5)$$

其中， $\tau_h(l, i-m)$ 表示参考信号 $x_i(n)$ 与阵元 m 后的TDL中 l 抽头处信号的时延差

$$\tau_h(l, i-m) = (i-m) \sin(\theta_h) d / C + l / f_s + \Delta / f_s, \quad l = 0, 1, \dots, L-1, m = 0, 1, \dots, M-1 \quad (6)$$

那么，设 $\tilde{w}_{l,m}(n, i)$ 为自适应权噪声，则第 i 路时空2维线谱增强器的稳态权值表示为

$$w_{l,m}(n, i) = w^*(l, i-m) + \tilde{w}_{l,m}(n, i), \quad l = 0, 1, \dots, L-1, m = 0, 1, \dots, M-1 \quad (7)$$

其中， $\tilde{w}_{l,m}(n, i)$ 近似于均值为0、方差为 $\mu\xi_{\min}$ 的

白噪声， $\xi_{\min}$ 为均方差 $E\{\varepsilon_i^2(n)\}$ 所能达到的最小值^[13,14]。

3.2 线谱目标检测

将阵元接收数据经时空域联合滤波后得到的阵元域数据记为

$$\mathbf{Y}(n) = [y_0(n) \cdots y_i(n) \cdots y_{M-1}(n)]^T \quad (8)$$

从中取出 K 段时域快拍数据，每段 N 个快拍，并对每段时域快拍数据进行窄带频域波束形成

$$B_k(\varphi, \omega) = \sum_{i=0}^{M-1} \sum_{n=0}^{N-1} y_i(n - kN - N+1) e^{-j\omega n} e^{-j\varphi i}, \quad k = 0, 1, \dots, K-1 \quad (9)$$

其中，角频率 $\omega = 2\pi f / f_s$ ， $\varphi = 2\pi f d \sin(\theta) / C$ ，可见 φ 与方位 θ 相对应。因此， $B_k(\varphi, \omega)$ 表示第 k 段时域快拍数据在方位 θ 及角频率 ω 处的波束输出。将 K 个分段上的波束输出 $B_k(\varphi, \omega)$ 进行能量累积，得到方位频率2维波束输出 $B(\varphi, \omega)$

$$B(\varphi, \omega) = \sum_{k=0}^{K-1} |B_k(\varphi, \omega)|^2 \quad (10)$$

之后，在2维平面 (φ, ω) 内对 $B(\varphi, \omega)$ 进行门限判决，将过门限的 $B(\varphi, \omega)$ 在角频率 ω 上进行累积，从而得到线谱目标的空间方位谱估计结果 $P(\varphi)$

$$S = \{\omega | B(\varphi, \omega) > \text{Th}\} \quad (11)$$

$$P(\varphi) = \sum_{\omega \in S} B(\varphi, \omega), \quad \omega \in S \quad (12)$$

其中，Th表示判决门限，其可根据2维平面 (φ, ω) 内 $B(\varphi, \omega)$ 的均值进行设定。 S 表示过门限的 $B(\varphi, \omega)$ 对应的 ω 值构成的集合。据此，由 $P(\varphi)$ 可得到线谱目标的方位，由 $B(\varphi, \omega)$ 可获取线谱信号的频率及方位。综上，时空域联合的水下未知线谱目标检测方法的处理框图如图3所示。

4 方法的理论性能分析

下面对本文方法的线谱目标检测性能进行理论分析，将式(2)代入式(9)，整理得第 k 段时域快拍数据对应的方位频率2维波束输出表达式

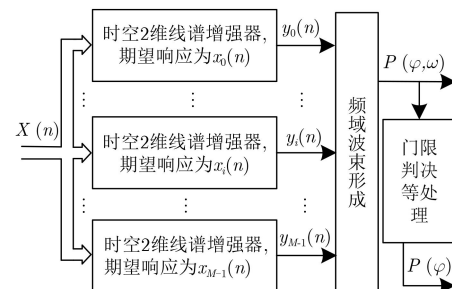


图3 时空域联合的水下未知线谱目标检测方法框图

$$B_k(\varphi, \omega) = \sum_{i=0}^{M-1} \sum_{n=0}^{N-1} \sum_{l=0}^{L-1} \sum_{m=0}^{M-1} w_{l,m}(n-kN-N+1, i) x_m \cdot (n-kN-N+1-\Delta-l) e^{-j\omega n} e^{-j\varphi i} \quad (13)$$

设自适应权噪声较小可忽略, 将式(5)稳态最优权 $w^*(l, i)$ 代入式(13)得

$$\begin{aligned} B_k(\varphi, \omega) &= \sum_{i=0}^{M-1} \sum_{n=0}^{N-1} \sum_{l=0}^{L-1} \sum_{m=0}^{M-1} w^*(l, i-m) x_m \\ &= \left(\sum_{i=0}^{M-1} \sum_{l=0}^{L-1} w^*(l, i) e^{-j\omega l} e^{-j\varphi i} \right) \cdot \left(\sum_{m=0}^{M-1} \sum_{n=0}^{N-1} x_m(n) e^{-j\omega n} e^{-j\varphi m} \right) e^{-j\omega(kN+N-1+\Delta)} \end{aligned} \quad (14)$$

式(14)清晰地体现了本文方法对阵列接收信号所进行的时域空域联合滤波及频域波束形成两部分处理, 其中第2个括号中为对接收信号进行频域波束形成, 而第1个括号中为时空域联合滤波器的响应函数, 其具体表达式如式(15)

$$\begin{aligned} H_{w_{m,l}^*}(\varphi, \omega) &= \sum_{i=0}^{M-1} \sum_{l=0}^{L-1} w^*(l, i) e^{-j\omega l} e^{-j\varphi i} \\ &= \sum_{h=1}^{2H} \frac{\sigma_h^2}{(2\sigma_0^2 + LM\sigma_h^2)} \frac{\sin((\varphi_h - \varphi)M/2)}{\sin((\varphi_h - \varphi)/2)} \cdot \frac{\sin((\omega_h - \omega)L/2)}{\sin((\omega_h - \omega)/2)} \cdot e^{j(\varphi_h - \varphi)(M-1)/2} \cdot e^{j(\omega_h - \omega)(L-1)/2} e^{j2\pi\omega_h\Delta} \end{aligned} \quad (15)$$

其中, $\varphi_h = 2\pi f_h \sin(\theta_h) d/C$, $\omega_h = 2\pi f_h/f_s$ 。由式(15)可以看出, $H_{w_{m,l}^*}(\varphi, \omega)$ 在远离线谱方位 θ_h 及频率 f_h 处的幅度逐渐趋于0, 而在线谱方位 θ_h 及频率 f_h 处的幅度较大, 记为

$$a_h^* = \frac{LM\sigma_h^2}{2\sigma_0^2 + LM\sigma_h^2} = \frac{LMSNR_h/2}{1 + LMSNR_h/2} \quad (16)$$

其中, $SNR_h = \sigma_h^2/\sigma_0^2$ 表示第 h 个线谱信号的输入信噪比。随着 LM 或 SNR_h 增大, 式(16)中 a_h^* 趋近于1。由式(14)~式(16)可见, 时空域联合滤波器对阵列接收信号进行时空2维联合滤波, 相当于预处理器, 能够自适应地匹配线谱信号, 同时减少了宽带背景干扰及噪声对后续线谱提取的影响。理论上时空域联合滤波器可对未知线谱信号进行最小均方误差意义下的最优时空滤波。但是 L , M 的增大会引起自适应权噪声增大使之不可忽略, 同时使收敛速度变慢。因此, 实际应用中阵元数 M 一定时, 可适

当增大抽头数 L , 同时需兼顾自适应权噪声及算法收敛速率, 具体的可采用文献[15-17]所述方法来降低自适应权噪声及提高算法收敛速率。

按式(10)对 $B_k(\varphi, \omega)$ 进行时域积分, 得到方位频率2维波束输出 $B(\varphi, \omega)$ 。空时2维滤波器将主要的宽带背景干扰及噪声滤除, 使 $B(\varphi, \omega)$ 中的线谱信号受污染较少, 谱峰结构较清晰, 有利于对 $B(\varphi, \omega)$ 进行幅度门限判决来提取线谱信息。根据判决得到的线谱频率信息进行频带选择, 并在相应频带上对 $B(\varphi, \omega)$ 进行累积得到线谱目标的空间方位谱 $P(\varphi)$ 。则 $P(\varphi)$ 主要由线谱所在频点的波束输出累积得到, 因此本文方法能够充分利用线谱强度较高的特性, 具有较强的线谱目标检测能力。

5 计算机仿真实验

本节通过计算机仿真实验对所提的时空域联合的线谱目标检测方法(Space-Time Joint Detection, STJD)的性能进行分析。考虑阵元数为 $M=30$ 的均匀线阵, 阵元间距为 $d=1.5$ m。水中声速 $C=1500$ m/s、采样率 $f_s=5$ kHz。系统处理带宽为100~500 Hz。下文所述信噪比(SNR)为系统处理带宽内的信号与噪声功率比。干噪比(INR)为系统处理带宽内的干扰信号与噪声功率比。宽带干扰为某一方位宽带干扰源所辐射的信号, 为便于仿真分析其信号形式设为高斯白噪声。

5.1 STJD算法的时空滤波性能

通过比较对阵列接收数据进行时空滤波与否所得到的方位频率2维波束输出 $B(\varphi, \omega)$, 对STJD算法中时空滤波性能进行分析。线谱信号方位 $\theta_1=100^\circ$, $\theta_2=115^\circ$, 对应的频率分别为 $f_1=450$ Hz, $f_2=350$ Hz, 噪声为宽带白噪声, SNR均为-30 dB。设两个宽带干扰的方位为 110° 和 140° , 干噪比INR均为5 dB。采样数据长度为25000。STJD方法中时空域联合滤波器的时域抽头个数为 $L=100$, 系统的解相关时间 $\Delta=0.1$ s。对时空滤波前后的数据分别进行窄带频域波束形成, 其中采样数据分为 $K=25$ 段, 每个分段的时域快拍数 $N=1000$, 得到方位频率2维波束输出如图4所示。

图4(a)为未对阵列接收数据时空滤波所得的方位频率2维波束输出, 可见受宽带干扰及噪声的影响, 难以从波束输出中提取出线谱信息。时空域联合滤波后所得到的方位频率2维波束输出如图4(b)所示, 与图4(a)对比, 明显可见宽带干扰及噪声被有效抑制, 线谱谱峰清晰, 有利于后续通过幅度门限判决进行线谱信号的检测。

5.2 不同信噪比下的线谱目标检测性能

本节对不同信噪比下STJD方法的线谱目标检

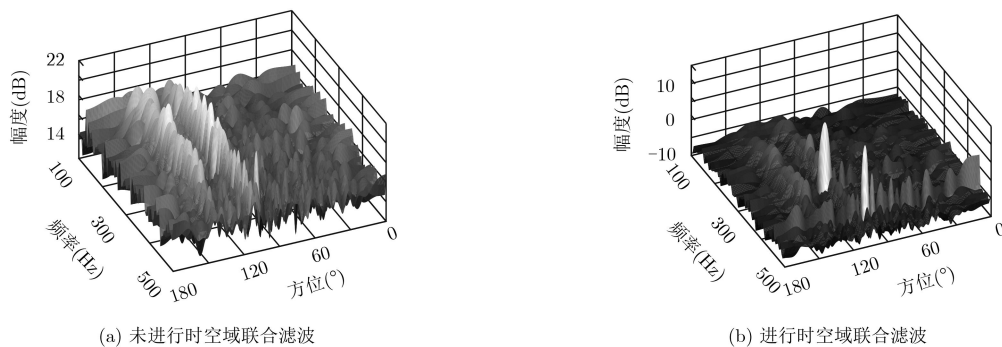
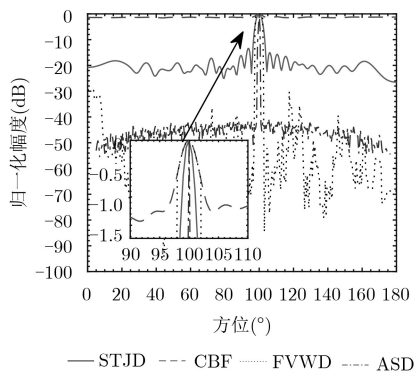


图4 时空滤波前后的方位频率2维波束输出

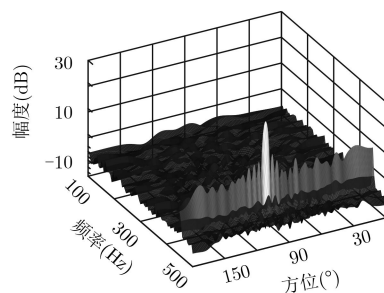
测性能进行分析, 并与CBF, FVWD和ASD方法进行对比。线谱目标方位 $\theta_1=100^\circ$, 频率 $f_1=450$ Hz, 噪声为宽带白噪声。STJD方法中2维波束输出的检测门限 Th 取为2维平面 (φ, ω) 内 $B(\varphi, \omega)$ 均值的10倍, CBF, FVWD和ASD方法中离散傅里叶变换的点数均为1000, 其它参数设置与5.1小节相同。SNR为-20 dB和-30 dB时各方法的方位谱及波束输出结果分别如图5和图6所示。

CBF方法将整个处理带宽内的各频点输出无差别相加融合。与STJD, FVWD和ASD等利用线谱特性进行目标检测的方法相比, CBF方法峰值旁瓣

比较低, 如图5(a)所示。进一步分析信噪比为-30 dB时各方法的方位谱输出, 如图6(a)所示。随着信噪比的降低, 宽带噪声的输出掩盖了窄带线谱的输出, CBF方法的峰值旁瓣比进一步降低, 从图6(a)中已不能有效地分辨出线谱目标方位。FVWD和ASD方法中频率或方位域峰值的选取受信噪比的影响较大, 低信噪比时所估计的峰值频率或方位方差出现较大的误差, 直接导致线谱目标检测能力下降, 如图6(a)所示。STJD方法通过对线谱信号进行最小均方差意义下的时空滤波处理, 并在方位频率域对滤波数据进行门限判决, 以选择线谱所在频点的

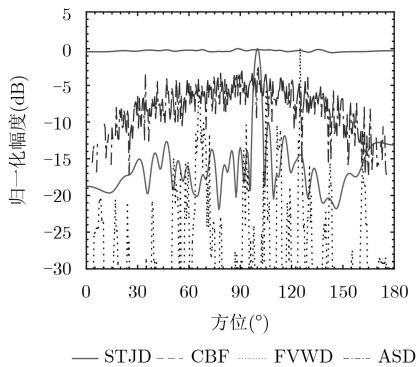


(a) 各方法方位谱输出对比

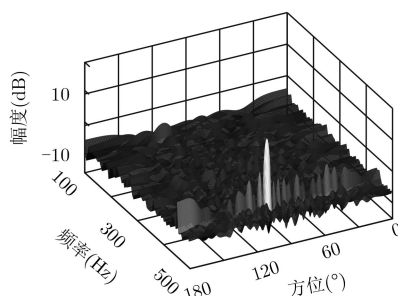


(b) STJD方法的方位频率域波束输出

图5 信噪比为-20 dB时各方法波束输出



(a) 各方法方位谱输出对比



(b) STJD方法的方位频率域波束输出

图6 信噪比为-30 dB时各方法波束输出

输出累积结果作为最终输出, 有效地减少宽带噪声对线谱目标检测的影响。如图5(b)和图6(b)中所示STJD方法对时空域联合滤波处理的数据进行频域波束形成的波束输出结果, 可见SNR为-20 dB或-30 dB时, 线谱信号所在的方位及频率处波束输出均较大。经门限判决等处理后所得的方位谱输出结果分别如图5(a)和图6(a)所示, 对比可见在低SNR下STJD方法在目标方位处依然具有明显的谱峰, 能够有效地检测到线谱目标。

5.3 多目标多线谱情况下的线谱目标检测性能

假定空间中存在3个线谱目标及1个宽带干扰源。目标1位于70°方位, 辐射频率为450 Hz, 350 Hz的两个线谱信号; 目标2位于95°方位, 辐射频率为350 Hz的线谱信号; 目标3位于120°方位, 辐射频率为450 Hz, 350 Hz, 250 Hz的3个线谱信号。噪声为宽带白噪声, 接收的3个目标中各线谱的SNR均为-20 dB。宽带干扰位于100°方位, 干噪比INR为0 dB。其它参数设置如5.1节相同。

STJD, CBF, FVWD和ASD方法的方位谱输出结果如图7(a)所示。由于目标1及3中分别辐射多个线谱信号, FVWD方法在其方位附近所统计的峰值频率方差出现较大偏差, 使目标1及目标3方位处的谱峰出现畸变。同样, 因宽带干扰方位的峰值频率并不唯一, 故其所在方位的谱峰也出现畸变。对于ASD方法由于只有目标3辐射频率为250 Hz的线谱信号, ASD方法在该频率点上所统计的峰值方位方差较小, 对于目标3方位处的峰值较高。而其它线谱频率点上存在至少两个目标, 所统计的峰值方位方差较大, 致使目标1和目标2方位上所累积的方差倒数数值较小, 相应的图7(a)中二者所在方位的谱峰值均较小。而宽带干扰所在的各非线谱频率点上不存在目标, 只有位于120°方位的宽带干扰, 所统计的峰值方位方差较小, 故ASD方法在干扰方位具有较高的谱峰。CBF方法对各频率点输出进行无差

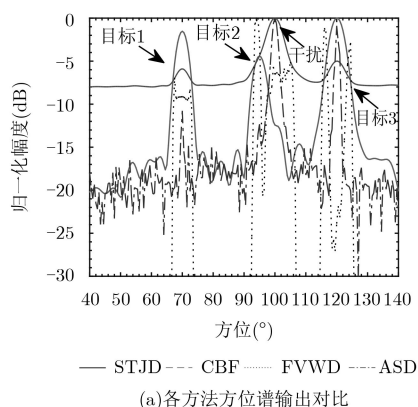
别能量相加, 而宽带干扰方位处的信号能量较大, 将临近的线谱目标2掩盖。

在上述同一目标辐射不同频率线谱信号, 同一频点处存在多个目标信号的复杂情况下, STJD方法仍能通过时空域联合滤波器自适应地匹配各线谱信号, 实现对各线谱信号的增强。图7(b)所示为STJD方法中滤波后数据的方位频率域波束输出, 图中各线谱信号对应的方位频率处均具有较大输出。如图7(a)中所示, 本文方法在3个线谱目标方位处均具有较大谱峰。同时, 宽带干扰方位的方位谱输出被有效抑制。可见STJD方法在多目标多线谱且存在宽带干扰的复杂情况下仍然具有较好的线谱目标检测性能。

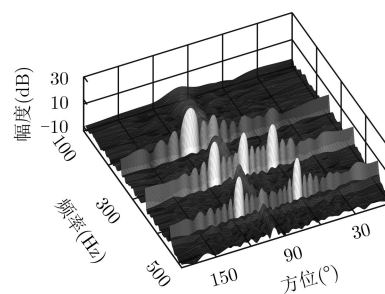
5.4 不同方法的接收机工作特性曲线对比分析

本节对STJD方法的接收机工作特性(Receiver Operating Characteristic, ROC)曲线进行仿真分析, 以从统计意义上对STJD方法的检测性能进行评估, 并与CBF, FVWD和ASD方法进行对比。线谱目标方位 $\theta_1=100^\circ$, 频率 $f_1=450$ Hz, 噪声为宽带白噪声。采样数据长度为75000。CBF, FVWD和ASD方法中离散傅里叶变换的点数为1000, 其它参数设置与5.1节相同。利用判决门限对各方法的方位谱输出结果进行检测判决, 经1000次蒙特卡洛试验统计得到各方法的ROC曲线。SNR为-27 dB和-30 dB时各方法的ROC曲线如图8所示。

图8(a)为线谱SNR=-27 dB时各方法的ROC曲线, CBF方法未充分利用线谱的特性进行目标检测, 故与其它方法相比其检测性能较差。FVWD及ASD方法分别利用线谱方位或频率的稳定性构建加权值, 对波束输出结果进行加权, 检测性能优于CBF方法, 略差于STJD方法。随着SNR进一步降低, 如图8(b)中SNR为-30 dB时各方法的ROC曲线所示, CBF, FVWD, ASD方法的检测性能均大幅度下降。FVWD及ASD方法因利用峰值参量方差作为加权值, 对SNR的要求较高。故FVWD及



(a) 各方法方位谱输出对比



(b) STJD方法的方位频率域波束输出

图7 多目标多线谱情况下各方法性能对比

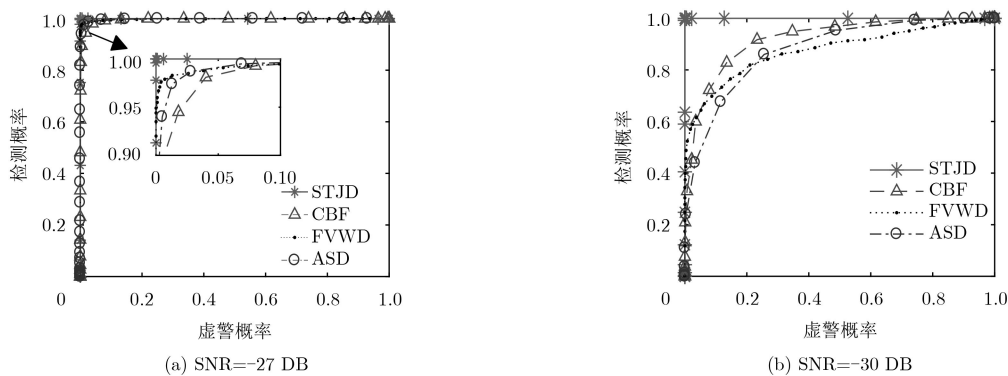


图8 不同SNR下的各方法ROC曲线

ASD算法检测性能的下降程度较CBF方法更为明显。而本文所提出的STJD方法通过对线谱信号进行最小均方误差意义下的时空滤波处理,在滤除宽带噪声的同时保留线谱信号,对SNR的要求较低。SNR=-30 dB条件下,STJD方法的检测性能仍明显优于其它方法。

6 结论

针对水下复杂环境下目标被动检测问题,本文构建了时空域联合滤波器,提出了一种时空域联合的水下未知线谱目标检测方法,并对其性能进行了理论分析及仿真验证。结果表明本文构建的时空域联合滤波器能够在时空域上自适应匹配多方位多频率的线谱信号,同时滤除主要的宽带干扰及背景噪声,理论上能够对未知线谱信号实现最小均方误差意义下的最优滤波。与CBF, FVWD, ASD方法相比,本文方法对信噪比的要求较低,在多目标多线谱宽带干扰等复杂情况下目标检测性能较高。本文研究成果对提高复杂水声环境下未知线谱目标被动检测能力具有理论价值及实际意义。

参考文献

- [1] WITTEKIND D K. A simple model for the underwater noise source level of ships[J]. *Journal of Ship Production and Design*, 2014, 30(1): 7-14. doi: [10.5957/JSPD.30.1.120052](https://doi.org/10.5957/JSPD.30.1.120052).
- [2] WANG Yilin, MA Shilong, FAN Zhan, *et al.* Robust DFT-based generalised likelihood ratio test for underwater tone detection[J]. *IET Radar, Sonar & Navigation*, 2017, 11(12): 1845-1853. doi: [10.1049/iet-rsn.2017.0135](https://doi.org/10.1049/iet-rsn.2017.0135).
- [3] 罗斌, 王茂法, 王世闻. 一种高效的弱目标线谱检测算法[J]. *声学技术*, 2017, 36(2): 171-176. doi: [10.16300/j.cnki.1000-3630.2017.02.013](https://doi.org/10.16300/j.cnki.1000-3630.2017.02.013).
LUO Bin, WANG Maofa, and WANG Shichuang. A highly efficient weak target line-spectrum detection algorithm[J]. *Technical Acoustics*, 2017, 36(2): 171-176. doi: [10.16300/j.cnki.1000-3630.2017.02.013](https://doi.org/10.16300/j.cnki.1000-3630.2017.02.013).
- [4] 陈志菲, 孙进才, 侯宏. 宽带DOA估计的类MUSIC波束形成算法[J]. *电子学报*, 2011, 39(6): 1257-1260.
CHEN Zhifei, SUN Jincai, and HOU Hong. MUSIC-like beamforming method for wideband DOA estimation[J]. *Acta Electronica Sinica*, 2011, 39(6): 1257-1260.
- [5] 陈阳, 王自娟, 朱代柱, 等. 一种基于频率方差加权的线谱目标检测方法[J]. *声学学报*, 2010, 35(1): 76-80. doi: [10.15949/j.cnki.0371-0025.2010.01.008](https://doi.org/10.15949/j.cnki.0371-0025.2010.01.008).
CHEN Yang, WANG Zijuan, ZHU Daizhu, *et al.* A detecting method for line-spectrum target based on variance-of-frequency weight[J]. *Acta Acustica*, 2010, 35(1): 76-80. doi: [10.15949/j.cnki.0371-0025.2010.01.008](https://doi.org/10.15949/j.cnki.0371-0025.2010.01.008).
- [6] 戴文舒, 陈新华, 孙长瑜, 等. 自适应Alpha-beta修正的线谱检测后置处理方法[J]. *电子与信息学报*, 2014, 36(10): 2419-2424.
DAI Wenshu, CHEN Xinhua, SUN Changyu, *et al.* A post-processing method for line spectrum detection corrected by adaptive alpha-beta filter[J]. *Journal of Electronics & Information Technology*, 2014, 36(10): 2419-2424.
- [7] 陈新华, 鲍习中, 李启虎, 等. 水下声信号未知频率的目标检测方法研究[J]. *兵工学报*, 2012, 33(4): 471-175.
CHEN Xinhua, BAO Xizhong, LI Qihu, *et al.* Research on detection of underwater acoustic signal with unknown frequency[J]. *Acta Armamentarii*, 2012, 33(4): 471-175.
- [8] 郑恩明, 陈新华, 孙长瑜. 基于幅值加权的未知线谱目标检测方法[J]. *振动与冲击*, 2014, 33(16): 160-164. doi: [10.13465/j.cnki.jvs.2014.16.029](https://doi.org/10.13465/j.cnki.jvs.2014.16.029).
ZHENG Enming, CHEN Xinhua, and SUN Changyu. Unknown target detection method based on weighted amplitude[J]. *Journal of Vibration and Shock*, 2014, 33(16): 160-164. doi: [10.13465/j.cnki.jvs.2014.16.029](https://doi.org/10.13465/j.cnki.jvs.2014.16.029).
- [9] 梁国龙, 赵文彬, 付进. 一种降维空域滤波矩阵的设计方法[J]. *电子学报*, 2017, 45(2): 417-423. doi: [10.3969/j.issn.0372-2112.2017.02.021](https://doi.org/10.3969/j.issn.0372-2112.2017.02.021).
LIANG Guolong, ZHAO Wenbin, and FU Jin. Spatial matrix filter with dimension reduction design[J]. *Acta Electronica Sinica*, 2017, 45(2): 417-423. doi: [10.3969/j.issn.0372-2112.2017.02.021](https://doi.org/10.3969/j.issn.0372-2112.2017.02.021).

- 0372-2112.2017.02.021.
- [10] 韩东, 章新华, 孙瑜. 宽带最优空域矩阵滤波器设计[J]. 声学学报, 2011, 36(4): 405–411. doi: [10.15949/j.cnki.0371-0025.2011.04.005](https://doi.org/10.15949/j.cnki.0371-0025.2011.04.005).
HAN Dong, ZHANG Xinhua, and SUN Yu. Design of optimal broad band spatial matrix filter[J]. *Acta Acustica*, 2011, 36(4): 405–411. doi: [10.15949/j.cnki.0371-0025.2011.04.005](https://doi.org/10.15949/j.cnki.0371-0025.2011.04.005).
- [11] WIDROW B, GLOVER J R, MCCOOL J M, *et al.* Adaptive noise cancelling: Principles and applications[J]. *Proceedings of the IEEE*, 1975, 63(12): 1692–1716. doi: [10.1109/PROC.1975.10036](https://doi.org/10.1109/PROC.1975.10036).
- [12] ZEIDLER J, SATORIUS E, CHABRIES D, *et al.* Adaptive enhancement of multiple sinusoids in uncorrelated noise[J]. *IEEE Transactions on Acoustics, Speech, and Signal Processing*, 1978, 26(3): 240–254. doi: [10.1109/TASSP.1978.1163074](https://doi.org/10.1109/TASSP.1978.1163074).
- [13] RICKARD J and ZEIDLER J. Second-order output statistics of the adaptive line enhancer[J]. *IEEE Transactions on Acoustics, Speech, and Signal Processing*, 1979, 27(1): 31–39. doi: [10.1109/TASSP.1979.1163203](https://doi.org/10.1109/TASSP.1979.1163203).
- [14] 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, 1983: 528–582.
ZHENG Zhaoning and XIANG Dawei. Underwater Acoustic Signal Passive Detection and Parameter Estimation Theory[M]. Beijing: Science Press, 1983: 528–582.
- [15] WEN Pengwei and ZHANG Jiashu. A novel variable step-size normalized subband adaptive filter based on mixed error cost function[J]. *Signal Processing*, 2017, 138: 48–52. doi: [10.1016/j.sigpro.2017.01.023](https://doi.org/10.1016/j.sigpro.2017.01.023).
- [16] SHEN Zijie, HUANG Tianmin, and ZHOU Kun. L_0 -norm constraint normalized logarithmic subband adaptive filter algorithm[J]. *Signal, Image and Video Processing*, 2018, 12(5): 861–868. doi: [10.1007/s11760-017-1230-4](https://doi.org/10.1007/s11760-017-1230-4).
- [17] YU Yi, ZHAO Haiquan, and CHEN Badong. Set-membership improved normalised subband adaptive filter algorithms for acoustic echo cancellation[J]. *IET Signal Processing*, 2018, 12(1): 42–50. doi: [10.1049/iet-spr.2017.0131](https://doi.org/10.1049/iet-spr.2017.0131).
- 王逸林: 男, 1979年生, 研究员, 博士生导师, 研究方向为水声信号处理、水下声信号被动探测等.
- 马世龙: 男, 1987年生, 博士生, 研究方向为阵列信号处理、水下目标被动探测.
- 邹 男: 男, 1986年生, 讲师, 硕士生导师, 研究方向为水声信号处理、水下目标被动探测等.
- 梁国龙: 男, 1964年生, 教授, 博士生导师, 研究方向为水声信号处理、水下目标被动探测等.