

引用格式: 蒋西海, 王晓林, 严琪. 水下小孔径阵列远程目标检测方法研究[J]. 声学技术, 2021, 40(1): 39-43. [JIANG Xihai, WANG Xiaolin, YAN Qi. Research on remote target detection method of underwater small aperture array[J]. Technical Acoustics, 2021, 40(1): 39-43.] DOI: 10.16300/j.cnki.1000-3630.2021.01.006

水下小孔径阵列远程目标检测方法研究

蒋西海¹, 王晓林^{1,2}, 严琪¹

(1. 杭州应用声学研究所, 浙江杭州 310023; 2. 浙江大学, 浙江杭州 310058)

摘要: 匹配滤波器频域自适应线谱增强方法是一种基于递归算法的非线性滤波技术, 它大大提高了匹配滤波器的检测性能。针对当前该技术使用窄带信号作为发射信号存在可利用的带宽有限, 不能充分发挥自适应线谱增强器性能的问题, 文章提出将该技术与宽带信号相结合来检测远程目标。仿真显示, 该方法在低信噪比条件下获得了较高的信噪比增益和检测概率。海试数据处理结果表明, 该技术的处理增益较传统方法高 6.24 dB。该方法的高处理增益适合应用在水下无人平台上, 弥补了小孔径阵列空间增益不足的缺点, 可以实现远程目标的检测。

关键词: 水下无人飞行器; 匹配滤波器频域自适应线谱增强; 双曲调频信号; 宽带模糊度函数

中图分类号: TN911.7

文献标志码: A

文章编号: 1000-3630(2021)-01-0039-05

Research on remote target detection method of underwater small aperture array

JIANG Xihai¹, WANG Xiaolin^{1,2}, YAN Qi¹

(1. Hangzhou Applied Acoustics Research Institute, Hangzhou 310012, Zhejiang, China; 2. Zhejiang University, Hangzhou 310058, Zhejiang, China)

Abstract: The frequency-domain adaptive line enhancement based on matched filter (FDAMF) method is a nonlinear filter based on recursive algorithm, which greatly improves the detection performance of matched filter. Because the narrowband signal is usually used as the transmitting signal in this method, the limited available bandwidth of the signal affects the detection performance of adaptive line enhancer. A FDAMF method for wideband signal is proposed in this paper to detect remote targets. By simulation analysis, for lower input signal to noise ratio, this method can obtain higher signal to noise ratio gain and has better detection performance. Sea trials show that the processing gain of this method is about 6.24 dB higher than that of conventional method. Therefore, this method is suitable for underwater unmanned vehicle, which makes up for the shortage of spatial gain of small aperture array to achieve remote targets detection.

Key words: underwater unmanned vehicle; frequency domain adaptive line enhancement based on matched filter (FDAMF); hyperbolic frequency modulated (HFM) waveforms; wideband ambiguity function

0 引言

通常, 大孔径阵列可以获得更高的阵增益和测向精度。然而受平台安装空间的限制, 特别是在水下无人平台上, 只能采用小孔径阵列布阵, 大大减弱了声呐探测目标的能力。由于复杂的海洋环境以及小阵列孔径声呐低空间增益的限制, 常规匹配滤波器的低处理增益几乎不可能满足对远程目标检测的要求。这就意味着水下无人飞行器(Underwater Unmanned Vehicle, UUV)的信号处理算法, 必须跳出线性运算的范畴。匹配滤波器频域自适应线谱增强(Frequency Domain Adaptive Line Enhancement

Based on Matched Filter, FDAMF)是一种非线性滤波技术^[1], 它是从匹配滤波器的自身特性和海洋信道两个方面改善其检测能力, 设计思路是将匹配滤波器频域输出周期分量转换成线谱检测问题。该方法使用自适应线谱增强器, 只能分离淹没在随机噪声中的线谱信号, 因此需要发射信号对机动目标具有适应性。窄带信号受多普勒影响, 仍能维持匹配滤波器频域输出为单频信号, 同时使用窄带信号检测机动目标, 目标回波的多普勒频移能从混响所在的频带上分离出来, 起到抗混响的作用。故近年来 FDAMF 技术中使用窄带信号作为发射信号^[2]。

FDAMF 技术应用在窄带系统时, 通常能够完成远程目标检测的使命, 但是在实际应用中存在如下局限性: 一是窄带信号的小时间带宽积不利于携带更多的目标特征, 会增加漏报概率; 二是窄带信号可利用的带宽有限, 自适应学习的样本不足, 会

收稿日期: 2020-05-19; 修回日期: 2020-06-26

作者简介: 蒋西海(1995—), 男, 湖南永州人, 硕士研究生, 研究方向为信号处理。

通信作者: 王晓林, E-mail: wxldream001@sina.com

影响线谱的检测结果。针对这一现象,采用宽带信号可以增加学习样本的数量时,同时发射宽带信号能够激发更多的目标特征和提高匹配滤波器频域输出信噪比^[3]。因此,FDAMF技术与宽带信号相结合的方法值得深入研究和利用。针对FDAMF需要发射信号对机动目标具有适应性,本文选择具有多普勒不变性的宽带双曲调频信号作为发射信号。并推导了宽带双曲调频信号在检测运动目标时,仍能维持匹配滤波器频域输出为单频信号,符合FDAMF的工作条件。仿真结果显示,宽带双曲调频信号与FDAMF相结合的方法可以获得较高的信噪比增益和检测概率,性能提升显著。海试数据进一步验证了FDAMF应用在宽带信号的可行性。

1 匹配滤波器频域自适应线谱增强方法

1.1 算法原理及步骤

图1为匹配滤波器频域自适应线谱增强方法的原理框图。由图1可知,该技术主要由匹配滤波器(Matched Filter, MF)、时反卷积干扰抑制算法(Time Reversal Convolution and Interference Suppression, TRCIS)和自适应线谱增强器(Adaptive Line Enhancer, ALE)三部分^[4]组成。故FDAMF具有三者的优点,即具有抑制随机噪声,抗多途干扰和能够分离出掩埋在随机噪声中的单频信号的功能。

从图1可以看出,接收信号 $X(\omega)$ 通过匹配滤波器 $H(\omega)$ 得到了频域输出 $Y(\omega)$ 。 $Y(\omega)$ 是由周期分量和频域随机噪声组成。FDAMF先对 $Y(\omega)$ 进行TRCIS处理,提高处理增益;再分别对实部、虚部信号进行ALE处理,抑制频域噪声,增强目标回波;最后再利用快速傅里叶逆变换(Inverse Fast Fourier Transform, IFFT)转换到时域,得到最终的输出 $y_T(\tau)$ 。

文献[5]指出自适应线谱增强器存在一个信噪比临界值,如果输入信号的信噪比低于此值,ALE就无法分离出掩埋在噪声中的单频信号。FDAMF为了避免匹配滤波器频域输出信噪比过低导致ALE工作在无效区域,对ALE的输入信号进行TRCIS

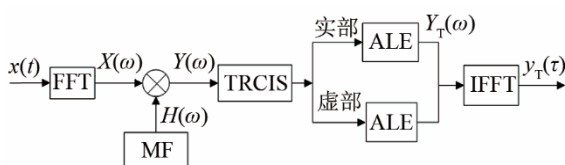


图1 FDAMF系统的原理框图
Fig.1 Block diagram of the FDAMF system

预处理获得处理增益,提高输入信号的信噪比,增强系统的稳健性。TRCIS主要通过抑制多途干扰和频域噪声来获得信噪比增益,增益公式为

$$G_{\text{TRCIS}} = \frac{N-3}{3} \cdot (R_{\text{SN-in}}) \quad (1)$$

式中, $R_{\text{SN-in}}$ 为输入信噪比, N 为窗长的点数。由此可知,ALE输入信号的信噪比越高,它的处理效果越好。

1.2 FDAMF 面临的问题

1.2.1 时间带宽积对 FDAMF 的影响

从信息论的角度,信号的信息容量与信号的时间带宽积成正比,信号的带宽越大,它所包含的信息越多,可以激发更多的目标特征,减少漏报概率。其次,大时间带宽积信号获得的匹配滤波器信噪比增益也高。增益公式^[6]为

$$G_{\text{MF}} = 10 \lg(B \cdot T) \quad (2)$$

式中, $B \cdot T$ 为时间带宽积。在相同的信号持续时间 T 内,增加带宽 B 能够提高匹配滤波器的输出增益。由1.1节可知,提高匹配滤波器频域输出信噪比可以避免匹配滤波器落入无效区域。因此,发射一个复杂的大时间带宽积信号,可以提高FDAMF的稳健性。

1.2.2 信号带宽对 FDAMF 的影响

通常,声呐信号处理为了提高运算速度和减少计算量,需对信号进行降基带和抽样处理。理想条件下降采样后的采样频率为 $f_{\text{ds}} = B$,信号持续时间 T ,则采样点数 N 为

$$N = f_{\text{ds}} \cdot T = B \cdot T \quad (3)$$

由式(3)可知,窄带信号可利用的频带有限,导致自适应学习的样本不足,影响自适应线谱增强器的处理结果。下面从收敛速度分析频带对FDAMF的影响,图2给出了不同步长下自适应线谱增强器系数的均方偏差值。

由图2可知,大步长具有快的收敛速度,滤波器的权向量快速趋于稳定,但是均方偏差值较大。

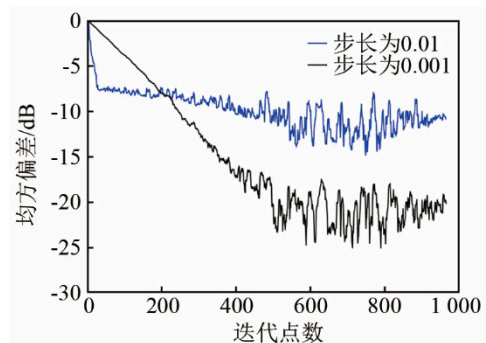


图2 不同步长下自适应线谱增强器系数的均方偏差值
Fig.2 Mean square deviation of coefficients of adaptive line enhancement with different steps

小步长的滤波效果明显优于大步长，但收敛速度变慢。快收敛速度与低均方偏差不可兼得。实际中用 FDAMF 算法处理窄带信号回波，学习样本点数不超过 200，ALE 只能选择大步长来加快收敛速度，但是权噪声太大，致使处理增益降低。随着发射信号朝着低频大功率发展，窄带信号的可用频带范围更窄，学习样本数严重不足，导致当 ALE 的迭代滤波已经完成时，滤波器权向量仍没有收敛到最优解。

2 FDAMF 在宽带系统中的应用

为了克服小时间带宽积和学习样本不足等问题，本文提出 FDAMF 与宽带信号相结合的方法，实现远程目标检测。由于宽带信号受多普勒影响造成时间尺度伸缩不能用多普勒频移来代替，多数宽带信号的匹配滤波器频域输出不符合 FDAMF 的工作条件。因此，本文选择具有多普勒不变性的宽带双曲调频信号 (Hyperbolic Frequency Modulated Waveforms, HFM) 作为发射信号，始终保持匹配滤波器的频域输出为单频信号。

2.1 匹配滤波器频域输出信号分析

由文献[6]可知，HFM 信号的频率随时间呈指数增长或下降。正向 HFM 信号和反向 HFM 信号 $s(t)$ 可以描述为

$$s(t) = \exp \left[-j \left(2\pi \frac{f_0^2}{m} \right) \ln \left(1 - \frac{m}{f_0} t \right) \right], t \in \left[\frac{-T}{2}, \frac{T}{2} \right] \quad (4)$$

式中， f_0 为中心频率， m 为信号的调频斜率。 $m > 0$ 记为正向 HFM 信号，反之为负向 HFM 信号。发射信号的瞬时频率 $f_s(t)$ 为

$$f_s(t) = \frac{\partial}{\partial t} \left[-\frac{f_0^2}{m} \ln \left(1 - \frac{m}{f_0} t \right) \right] = \frac{f_0}{1 - (m/f_0)t} \quad (5)$$

假设目标以径向速度 v 向声呐运动，声速为 c ，则压缩参数 η 为

$$\frac{1}{\eta} = 1 - \frac{2v}{c} \quad (6)$$

假设目标与接收点间的距离为 d_0 ，则目标回波 r_{rec} 为

$$r_{\text{rec}} = \frac{1}{\sqrt{\eta}} \cdot s \left[\eta \left(t - \frac{2d_0}{c} \right) \right] = \frac{1}{\sqrt{\eta}} \exp \left\{ -j \left(2\pi \frac{f_0^2}{m} \right) \ln \left[1 - \frac{m}{f_0} \eta \left(t - \frac{2d_0}{c} \right) \right] \right\} \quad (7)$$

令 $\tau_0 = \frac{2d_0}{c}$ ，则回波信号的瞬时频率 $f_r(t, v)$ 为

$$f_r(t, v) = \frac{\partial}{\partial t} \left\{ -\frac{f_0^2}{m} \ln \left[1 - \frac{m}{f_0} \eta (t - \tau_0) \right] \right\} = \frac{\eta f_0}{1 - \frac{m}{f_0} \eta (t - \tau_0)} \quad (8)$$

令频率调制函数在时间上的平移 $\tau_1 = \frac{1-\eta}{f_0 \eta}$ ，则

$$f_r(t, v) = \frac{f_0}{1 - (m/f_0)(t - \tau_0 - \tau_1)} \quad (9)$$

此时，

$$f_r(t, v) = f_s(t - \tau_0 - \tau_1) \quad (10)$$

则匹配滤波器的输入信号 $x(t)$ 为

$$x(t) = k_1 \cdot s(t - \tau_0 - \tau_1) + n(t) \quad (11)$$

式中： k_1 为回波信号的传播衰减系数， $n(t)$ 为输入噪声，对式(11)做傅里叶变换，得到输入信号的频域信号 $X(\omega)$ 为

$$X(\omega) = k_1 \cdot S(\omega) e^{-j\omega(\tau_0 + \tau_1)} + N(\omega) \quad (12)$$

式中： $N(\omega)$ 为 $n(t)$ 的傅里叶变换，定义匹配滤波器的传递函数为 $S^*(\omega) e^{-j\omega t_0}$ ， t_0 时刻表示匹配滤波器输出最大值点，则匹配滤波器的输出 $Y(\omega)$ 为

$$Y(\omega) = k_1 \cdot |S(\omega)|^2 e^{-j\omega(\tau_0 + t_0)} + N_0(\omega) \quad (13)$$

式中：第一项为单频脉冲 (Continuous Wave, CW) 信号，幅值为 $A = k_1 \cdot |S(\omega)|^2$ ， $N_0(\omega) = N(\omega) S^*(\omega) e^{-j\omega t_0}$ ，为匹配滤波器频域输出噪声谱。定义 $Y_0(\Omega)$ 为匹配滤波器频域信号 $k_1 \cdot |S(\omega)|^2 e^{-j\omega(\tau_0 + t_0)}$ 的傅里叶变换，则 $Y_0(\Omega)$ 为

$$Y_0(\Omega) = \int_{-\infty}^{\infty} A e^{-j\omega(\tau_0 + t_0)} e^{-j\omega \Omega} d\omega \quad (14)$$

由式(14)可知， $\Omega = -(\tau_0 + t_0)$ 为目标回波对应的线谱所在的时刻。

式(10)表明了双曲调频信号的信号伸缩与时间平移的互换效应。

多普勒效应引起的时间伸缩反映在信号的超前和延迟，几乎不影响信号的相关性。式(13)表明匹配滤波器频域输出为单频信号和频域随机噪声谱，因此宽带双曲调频信号符合 FDAMF 的工作条件。

2.2 匹配滤波器频域输出信号仿真

信号的模糊度函数对于主动声呐波形设计、信号参数的正确选择和系统的性能分析至关重要。匹配滤波器对接收回波的作用可以看作是用速度平面对信号模糊度图进行切割。因此可以通过模糊度函数分析发射信号对机动目标是否具有适应能力。

由于宽带信号的多普勒效应不能再多用多普勒频移来等价，必须是用信号的压缩或拉伸来代替目标速度的变化。1965 年，Wishner 等^[7]提出了宽带信号的时间频率自相关函数的定义为

$$\chi(\tau, v) = \frac{1}{\sqrt{\eta}} \int s(t) s^*[\eta(t - \tau)] dt \quad (15)$$

式中： τ 为时延， η 与 v 的关系如式(6)所示。

常用 $|\chi(\tau, v)|^2$ 作为模糊度函数的定义，以

$\psi(\tau, \nu)$ 表示, 即

$$\psi(\tau, \nu) = |\chi(\tau, \nu)|^2 \quad (16)$$

图 3 为宽带 HFM 信号的模糊度函数, 图 4 是宽带 HFM 信号在不同速度下匹配滤波器的输出波形图。

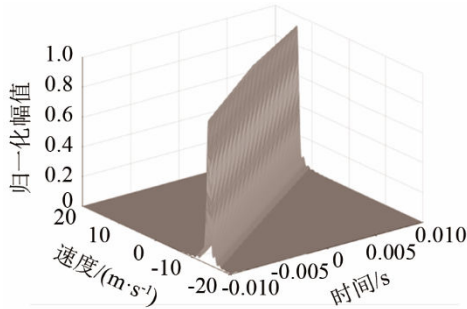


图 3 宽带 HFM 信号的模糊度函数
Fig.3 Ambiguity diagram of wideband HFM signal

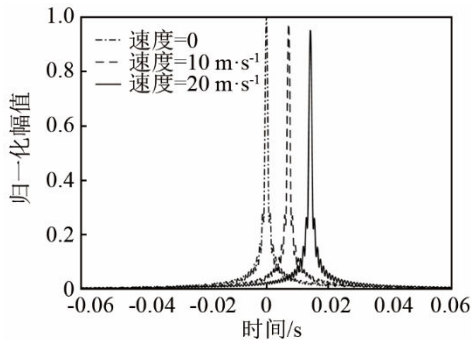


图 4 宽带 HFM 信号的匹配滤波器输出
Fig.4 Matched filter outputs of wideband HFM signal

从图 3 看出, 宽带 HFM 信号的模糊度函数主脊几乎没有衰减, 并且与时延和速度轴有一定的倾角, 说明宽带 HFM 信号的多普勒不变性是以牺牲距离测量精度为代价的。从图 4 可知, 宽带 HFM 信号的匹配滤波器输出的主瓣狭窄而高耸。随着速度增大, 时间域的主瓣与旁瓣成比例下降, 主瓣没有出现扩展或分裂现象。因此, 匹配滤波器频域输出仍保持着单频信号的特征, 符合 FDAMF 的工作条件。

2.3 基于宽带 HFM 信号的 FDAMF 仿真分析

本节仿真基于宽带 HFM 信号的 FDAMF 的信噪比增益和检测概率的变化曲线, 输出信噪比采用最大输出信噪比准则。系统输出峰值功率与噪声平均功率之比为

$$R_{SN-out} = \frac{s_{max}^2(t)}{\langle n^2(t) \rangle} \quad (17)$$

式中: $\langle n^2(t) \rangle$ 和 $s_{max}^2(t)$ 分别为噪声的平均功率和信号输出的峰值功率。

仿真实验 1: 选取起始频率为 1 500 Hz、终止频率为 2 500 Hz、时间宽度 $T=0.4$ s 的宽带 HFM 信号 $s(t)$ 。噪声背景 $n(t)$ 为平稳高斯白噪声。系统的

输入信号 $x(t)=As(t)+n(t)$, 输入信噪比为 -30 dB \sim 0 dB。ALE 的抽头数为 32、步长为 0.001。图 5 给出了在宽带 HFM 信号下 MF 及 FDAMF 的信噪比增益曲线。其中, MF 的信噪比增益始终维持在 25.5 dB 附近, 理论增益值为 26 dB。图 5 中 FDAMF 的信噪比增益快速上升并收敛于 36 dB。由此可见, FDAMF 信噪比增益突破了线性运算的最大值。

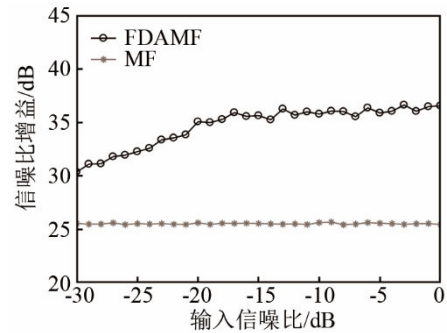


图 5 匹配滤波器(MF)和 FDAMF 系统的信噪比增益曲线
Fig.5 The SNR gain curves of the matched filter (MF) and FDAMF system

仿真实验 2: 信号参数与实验 1 相同, 信噪比范围为 -30 dB \sim -15 dB。MF 和 FDAMF 均按照虚警概率 P_{fa} 为 10^{-3} 选取门限, 通过 1 000 次的蒙特卡罗仿真实验得到了检测概率 P_d 的变化曲线, 如图 6 所示。由图 6 可知, 随着信噪比的升高, MF 和 FDAMF 的检测概率升高。而一旦输入信噪比低于 -17 dB 时, MF 不能准确检测目标。但 FDAMF 即使在信噪比为 -22 dB 的条件下也能从噪声中检测到目标。由此可见, 在低信噪比条件下 FDAMF 的检测概率有着显著提高, 能更好地适应远程低信噪比条件下的目标检测。

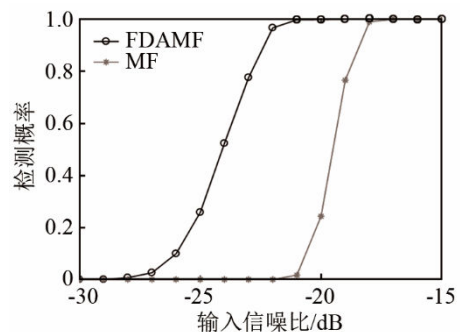
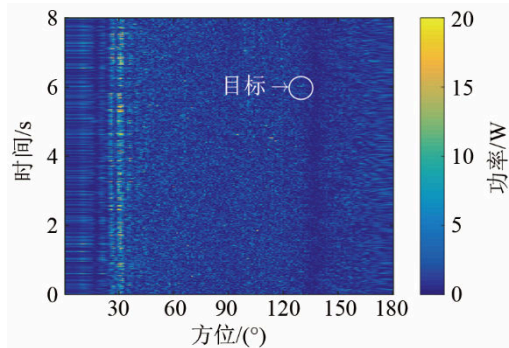


图 6 匹配滤波器(MF)和 FDAMF 系统的检测概率曲线
Fig.6 The detection probability curves of the matched filter (MF) and FDAMF system

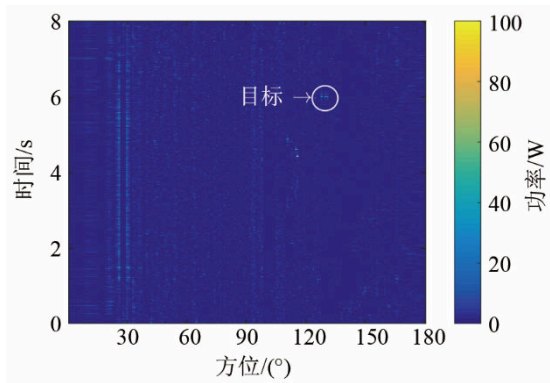
3 试验验证

实际海试数据为宽带 HFM 信号, 噪声背景包含混响回波和海洋噪声。图 7 为背景归一化 MF 和 FDAMF 的方位历程图, 背景归一化算法采用二维

排序截断平均(Order Truncate Average, OTA)算法。图 8 为 MF 和 FDAMF 在 130°波束方向上的输出结果。从图 7(a)中可以发现，归一化 MF 的方位历程图中噪声背景很强，致使方位历程图中分布着杂乱的背景噪声亮点，几乎无法从噪声背景中检测到目标。由图 7(b)可知，背景归一化 FDAMF 的背景干净，无雪花点，还能清晰地分辨目标。另外，根据图 8(a)、8(b)计算 MF 和 FDAMF 的输出信噪比，可得 FDAMF 比 MF 在信噪比上高 6.24 dB。由此可见，时反卷积干扰抑制的自适应线谱增强技术抑制了噪声，获得了处理增益，提高了常规匹配滤波器的检测性能。试验结果说明 FDAMF 与宽带 HFM 信号相结合的方法，获得了信噪比增益。

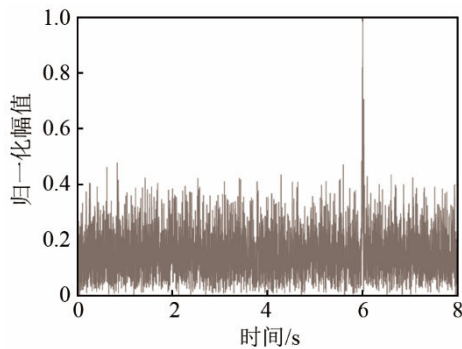


(a) 匹配滤波器(MF)的方位历程图

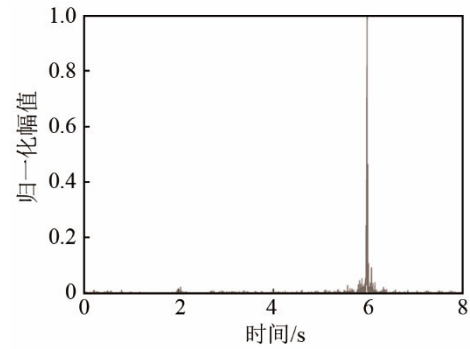


(b) FDAMF 系统的方位历程图

图 7 匹配滤波器(MF)和 FDAMF 系统的方位历程图
Fig.7 The bearing-time records of the matched filter (MF) and FDAMF system



(a) 130°波束方向上匹配滤波器(MF)的输出结果



(b) 130°波束方向上 FDAMF 系统的输出结果

图 8 130°波束方向上匹配滤波器(MF)和 FDAMF 系统的输出结果

Fig.8 The outcome of the matched filter (MF) and FDAMF system in the 130° direction

4 结论

本文通过仿真，分析了小时间带宽积和有限的可用频带对 FDAMF 的检测性能的影响，提出了将 FDAMF 技术应用在宽带系统中。理论推导了宽带 HFM 信号在检测运动目标时，仍能维持匹配滤波器频域输出为单频信号，符合 FDAMF 的工作条件。仿真结果表明，FDAMF 应用在宽带系统可以获得较高的信噪比增益。海试数据处理结果验证了该技术的处理增益较之传统方法提高了 6.24 dB。该技术可在低信噪比条件下获得更高的处理增益，因此适合应用在水下无人平台上，弥补小阵列孔径声呐空间增益不足的缺点，实现远程目标探测。

参 考 文 献

- [1] ZHAO Z S, ZHAO A B, HUI J, et al. A frequency-domain adaptive matched filter for active sonar detection[J]. Sensors, 2017, 17(7): 1565.
- [2] 赵智珊. 基于匹配滤波器的频域自适应线谱增强技术研究[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工程大学, 2018.
ZHAO Zhishan. Research on frequency-domain adaptive line enhancement based on matched filter[D]. Harbin: Harbin Engineering University, 2018.
- [3] 刘朝晖, 杨长生, 赵申东. 水下声信号处理技术[M]. 北京: 国防工业出版社, 2010: 18-58.
- [4] 郭武. 水声脉冲信号时间反转镜被动定位技术研究[D]. 南京: 东南大学, 2012.
- [5] 李启虎. 用于拖曳式线列阵的一种新的线谱增强系统[J]. 声学学报, 1988, 13(3): 167-173.
LI Qihu. A new architecture of adaptive line enhancer for towed line array[J]. Acta Acustica, 1988, 13(3): 167-173.
- [6] 田坦. 声呐技术[M]. 2 版. 哈尔滨: 哈尔滨工程大学出版社, 2010: 30-40.
- [7] WISHNER R P, KELLY E J. Matched-filter theory for high-velocity, accelerating targets[J]. IEEE Transactions on Military Electronics, 1965, MIL-9: 56-65.