

引用格式: 陈敬军, 范威. 阵列信号维纳滤波用于主动声呐图像增强处理[J]. 声学技术, 2021, 40(6): 858-863. [CHEN Jingjun, FAN Wei. Active sonar image enhancement using Wiener filtering on array signals[J]. Technical Acoustics, 2021, 40(6): 858-863.] DOI: 10.16300/j.cnki.1000-3630.2021.06.018

阵列信号维纳滤波用于主动声呐图像增强处理

陈敬军¹, 范 威²

(1. 海军驻上海地区第七军事代表室, 上海 201108; 2. 水声对抗技术重点实验室, 上海 201108)

摘要: 声呐图像的噪声背景抑制是提高水下目标检测能力的重要问题。针对声呐图像背景斑点噪声强、目标轮廓模糊、目标回波对比度低等问题, 利用确定性目标回波信号与随机分布的干扰噪声之间的相关统计特性差异, 采用基于最小均方差准则的阵列信号维纳滤波器, 通过主动最小方差无畸变响应(MVDR)波束形成和后置维纳滤波的两级处理, 去除声呐随机噪声背景。试验数据的处理结果表明: 在噪声干扰条件下, 相比于常规波束形成(Common Beamforming, CBF), 主动 MVDR 处理提高了目标回波的局部信噪比, 后置维纳滤波处理降低了随机分布的斑点噪声, 使声呐图像的清晰度得到增强。

关键词: 主动声呐; 增强处理; 维纳滤波; 最小方差无畸变响应(MVDR); 常规波束形成(CBF)

中图分类号: TB556

文献标识码: A

文章编号: 1000-3630(2021)-06-0858-06

Active sonar image enhancement using Wiener filtering on array signals

CHEN Jingjun¹, FAN Wei²

(1. The Seventh Military Representative Office of the navy in Shanghai, Shanghai 201108, China;
2. Science and Technology on Underwater Antagonizing Laboratory, Shanghai 201108, China)

Abstract: The noise background suppression of sonar image is crucial to improve the ability of underwater target detection. Some problems often presenting in sonar images, such as strong background speckle noise, blurred edge of target image and low contrast of target echo, need to be well solved. In this paper, the differences between deterministic features of target echo signals and the statistical characteristics of the interference noise are considered, and the Wiener filtering of array signals based on the minimum mean square error (MMSE) criterion is used to remove random noise background through the two-stage processing of active minimum variance distortionless response (MVDR) beamforming and post Wiener filtering. The experimental data processing results show that under the conditions of noise interferences, compared with common beamforming (CBF), the active MVDR processing increases the local signal-to-noise ratio of target echo, and the post-Wiener filter processing reduces the randomly distributed speckle noise, so that the clarity of sonar image is improved.

Key words: active sonar; enhancement processing; wiener filtering; minimum variance distortionless response (MVDR); common beamforming (CBF)

0 引 言

高频主动声呐是探测和识别蛙人等水下小目标的主要手段^[1-2]。在近岸浅海环境下, 声呐接收到的信号中既包含水中目标、水下设施、鱼群及水底地形的回波信号, 也包括水体介质起伏变化、声呐平台晃动、航船噪声等产生的随机干扰噪声信号。根据声呐检测准则, 提高目标回波的信噪比(Signal to Noise Ratio, SNR)或声呐图像对比度可以在给定

检测概率下减小虚警, 所以, 要提高水下小目标的探测和识别性能, 就需要采取有效措施解决高频主动声呐图像处理中面临的背景噪声强、目标轮廓模糊、回波对比度低等问题^[3]。

在图像处理、语音处理、矢量水听器处理领域, 维纳滤波是图像和信号降噪处理的重要手段^[4-7]。本文利用目标回波信号和干扰噪声在空间和时间相关统计特性上的差异, 使用维纳滤波来提高水下小目标的探测和识别性能。针对高频主动声呐图像增强问题, 本文提出的基于最小均方差准则的声呐阵列信号维纳滤波器不是直接对基元接收到的信号进行维纳滤波, 而是将其通过两个步骤实现: 首先对阵列信号进行主动最小方差无畸变响应(Minimum Variance Distortionless Response, MVDR)

收稿日期: 2021-11-08; 修回日期: 2021-12-10

作者简介: 陈敬军(1971—), 男, 山东费县人, 博士, 高级工程师, 研究方向为信号处理、人工智能。

通信作者: 陈敬军, E-mail: cjj_81@sina.com

波束形成处理,进而对各个方位的波束信号进行单通道维纳滤波处理。本文给出了推导过程,并用实际湖上试验数据进行了验证,对阵列信号进行维纳滤波能够达到降低噪声影响、增强声呐图像对比度的目的,有利于提高声呐的目标检测识别性能。

1 维纳滤波原理

1.1 单通道信号维纳滤波

包含噪声的主动声呐接收信号模型为

$$x(k)=s(k)+n(k), \quad k=1,2,\dots,K \quad (1)$$

其中: $s(k)$ 为水下目标回波信号; $n(k)$ 为干扰噪声信号。设 $s(k)$ 与 $n(k)$ 不相关, 维纳滤波是根据最小均方差准则进行设计的线性贝叶斯滤波器, 其输出为

$$\hat{s}(k)=\sum_j w(j)x(k-j)=w(k)*x(k) \quad (2)$$

其中: 符号 $*$ 代表卷积; $w(j)$ 是滤波器系数, 满足 Wiener-Hopf 线性方程组^[8]:

$$\sum_j w(j)r_x(k-j)=r_{sx}(k) \quad (3)$$

其中: r_x 是自相关函数、 r_{sx} 信号和噪声的互相关函数, 对式(3)两边进行傅里叶变换, 可以得到:

$$W_{\text{wiener}}(\omega)=R_{sx}(\omega)/R_x(\omega) \quad (4)$$

$R_{sx}(\omega)$ 是期望信号与接收信号的互谱密度, $R_x(\omega)$ 是接收信号自谱密度。假设噪声 $n(k)$ 为方差 σ_n^2 的白噪声, 根据信号与噪声之间不相关的特性, 由式(1)可得到:

$$\begin{cases} R_x(\omega)=|S(\omega)|^2+\sigma_n^2 \\ R_{sx}(\omega)=|S(\omega)|^2 \end{cases} \quad (5)$$

把式(5)代入最优权估计式(4), 可以得到:

$$W_{\text{wiener}}(\omega)=\frac{|S(\omega)|^2}{|S(\omega)|^2+\sigma_n^2} \quad (6)$$

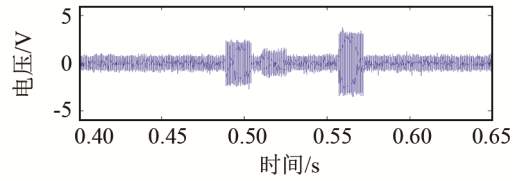
从式(6)可以看出, 维纳滤波仅用到了信号和噪声的功率谱, 根据卷积定理, 含噪信号维纳滤波后的时域信号可以通过傅里叶逆变换计算:

$$\hat{s}=\mathcal{F}^{-1}\{W_{\text{wiener}}(\omega)\cdot X(\omega)\} \quad (7)$$

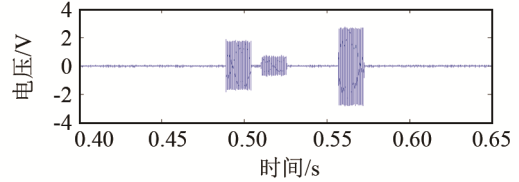
图1和图2分别是高信噪比条件和低信噪比条件下单通道含噪信号的维纳滤波处理仿真结果。可以看出, 随着信噪比的增加, 利用维纳滤波从含噪信号中估计信号与原始信号越接近。

1.2 主动声呐阵列信号维纳滤波

设主动声呐接收阵阵元数为 M 、阵元间隔为 d , 阵列各个阵元接收信号的频谱向量为 $\mathbf{x}(\omega)=[x_1(\omega) \cdots x_M(\omega)]^T$ 。对于给定角频率 ω 、方位 θ 的平面入射信号, 各阵元的接收信号模型为



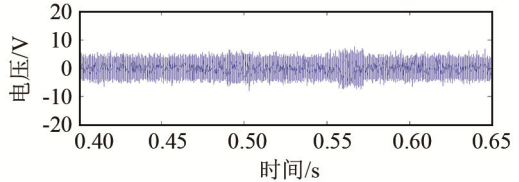
(a) 含噪信号



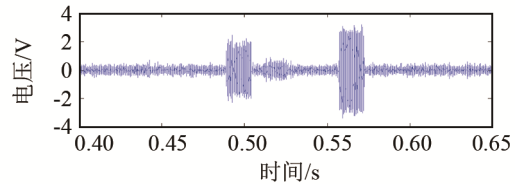
(b) 信号降噪结果

图1 高信噪比条件下维纳滤波仿真

Fig.1 Simulation of Wiener filter at high SNR



(a) 含噪信号



(b) 信号降噪结果

图2 低信噪比条件下维纳滤波仿真

Fig.2 Simulation of Wiener filter at low SNR

$$\mathbf{x}(\omega)=\mathbf{v}(\omega,\theta)\cdot s(\omega,\theta)+\mathbf{n}(\omega) \quad (9)$$

其中: $s(\omega,\theta)$ 代表声源信号的频谱; $\mathbf{n}(\omega)$ 代表各个阵元噪声信号的频谱矢量; 阵列流形矢量 $\mathbf{v}$ 为

$$\mathbf{v}=[1 \quad e^{-j\omega d \sin \theta/c} \quad \dots \quad e^{-j\omega M d \sin \theta/c}] \quad (10)$$

对于标量声源信号 $s(\omega,\theta)$ 的估计问题, 同样可以采用线性最小均方差准则估计器, 即:

$$\hat{s}_{\text{wiener}}(\omega,\theta)=\sum_{m=1}^M w_m(\omega,\theta)x_m(\omega) \quad (11)$$

通过使最小均方差最小, 求解权系数 w_m :

$$\mathbf{w}_{\text{wiener}}=\arg \min_w \mathbb{E}[\|s-\mathbf{w}^T \mathbf{x}\|^2] \quad (12)$$

其中, $\mathbf{w}=[w_1 \quad w_2 \quad \dots \quad w_M]^T$ 。根据矢量贝叶斯线性估计模型^[9], 声源信号 $s(\omega,\theta)$ 的最优估计为

$$\hat{s}(\omega,\theta)=\mathbf{w}_{\text{wiener}}^T \mathbf{x}(\omega)=\mathbf{R}_{sx} \mathbf{R}_x^{-1} \mathbf{x}(\omega) \quad (13)$$

其中, 互协方差矩阵 $\mathbf{R}_{sx}$ 是 $1 \times M$ 矩阵, 协方差矩阵 $\mathbf{R}_x$ 是 $M \times M$ 矩阵。假设声源信号与噪声不相关, 则有 $\mathbf{R}_{sx}=|s|^2 \mathbf{v}$, 进而, 最优权向量为^[9]

$$\mathbf{w}_{\text{wiener}}=|s|^2 \mathbf{R}_x^{-1} \mathbf{v} \quad (14)$$

1.3 阵列信号维纳滤波的两级串联处理实现

对阵列信号的维纳滤波可以利用式(14)计算出的权值对阵元信号进行滤波处理。考虑到主动声呐目标检测和识别都是基于多波束数据,现在探讨将维纳滤波和常用波束形成方法等处理进行结合的方法。

最小方差无畸变(MVDR)波束形成器常用于抑制空域干扰,它通过阵列信号协方差矩阵估计,构造随时间快拍变化的自适应权矢量,使目标方位信号无失真输出、波束输出功率最小,实现高分辨测向。MVDR 波束形成器的权向量为^[10]

$$\mathbf{w}_{\text{mvdr}} = \frac{\mathbf{R}_x^{-1} \mathbf{v}}{\mathbf{v}^H \mathbf{R}_x^{-1} \mathbf{v}} \quad (15)$$

通过比较式(14)和式(15),并利用约束条件 $\mathbf{w}_{\text{mvdr}}^H \cdot \mathbf{v} = 1$ 和 $\mathbf{R}_x = |\mathbf{s}|^2 \mathbf{v} \cdot \mathbf{v}^H + \mathbf{R}_n$, 可推导出两者关系:

$$\mathbf{w}_{\text{wiener}} = \frac{|\mathbf{s}|^2}{|\mathbf{s}|^2 + \mathbf{w}_{\text{mvdr}}^H \mathbf{R}_n \mathbf{w}_{\text{mvdr}}} \mathbf{w}_{\text{mvdr}} \quad (16)$$

比较式(6)和式(16)可以得出,阵列信号维纳滤波器可以等效为 MVDR 波束形成器级联一个后置的标量维纳滤波器,即对于阵列信号,首先进行 MVDR 波束形成处理,然后,对各个波束分别进行时域信号维纳滤波。其中,后置维纳滤波按照 1.1 节的方法进行处理,采用 MVDR 波束输出估计信号功率。同时考虑到声呐图像是稀疏的,采用 MVDR 波束输出在时域上的平均估计噪声功率。

在主动 MVDR 波束形成处理中,为了克服主动发射产生的信号相消问题,本节采用空间子阵平滑方法^[10]。设子阵的长度为 L ,子阵接收的信号矢量为 $\mathbf{x}_l(\omega) = [x_l(\omega) \ x_{l+1}(\omega) \ \cdots \ x_{l+L-1}(\omega)]^T$,子阵协方差矩阵为

$$\mathbf{R}_{x_l} = \frac{1}{N_L} \sum_{i=0}^{M-L} \mathbf{x}_l(\omega) \mathbf{x}_l^H(\omega) \quad (17)$$

其中, $N_L = M - L + 1$ 为参与空间平滑的子阵数,进而, MVDR 的输出为

$$\hat{s}_{\text{MVDR}}(\omega, \theta) = \sum_{l=0}^{M-L} \mathbf{w}_l^H \cdot \mathbf{x}_l(\omega) \quad (18)$$

其中, $\mathbf{w}_l^H$ 通过把 $\mathbf{R}_{x_l}$ 代入式(15)计算得到。

2 主动声呐数据处理与分析

2.1 主动声呐阵列数据 MVDR 波束形成处理

本节采用主动声呐阵列接收的多通道复包络实测数据进行处理。其中,接收阵是阵元数为 128 的直线阵,湖上试验环境有大量的水下干扰和较强的水底混响。

根据 1.3 节的推导分析,主动声呐阵列信号的维纳滤波处理可以分解为主动 MVDR 波束形成和后置维纳滤波。下面首先通过数据处理分析主动 MVDR 波束形成在声呐图像增强方面的作用。本文通过湖上试验获取了不同信噪比条件时的刚性球体目标多通道阵列回波信号,图 3 是高信噪比条件下刚性球体目标的常规波束形成(Common Beam-Forming, CBF)声呐图像。

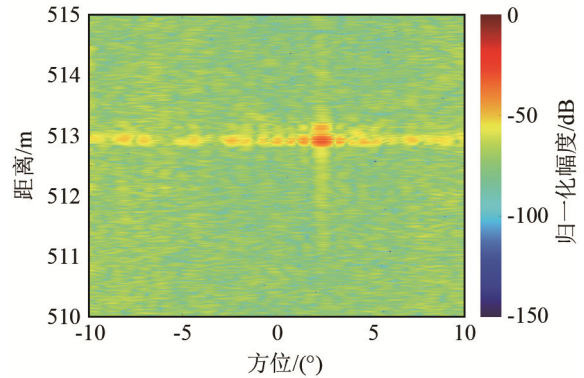


图3 高信噪比条件球体目标 CBF 声呐图像
Fig.3 Typical CBF sonar image of sphere at high SNR

图 4 为高信噪比条件下刚性球体目标的 MVDR 波束形成声呐图像,从图中可以看出主动 MVDR 处理提高了目标回波的方位向分辨率,球体目标图像的局部对比度也得到提高。

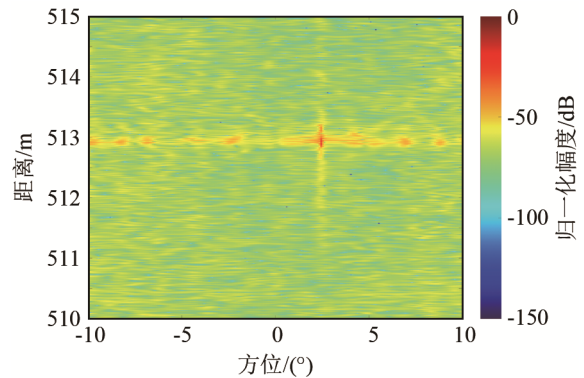


图4 高信噪比条件球体目标 MVDR 声呐图像
Fig.4 Typical MVDR sonar image of sphere at high SNR

为了进一步比较高信噪比条件下 CBF 与 MVDR 波束形成处理的性能,图 5 为目标所在距离下的波束输出比较,其中,红色虚线是 MVDR 波束形成处理的结果,蓝色实线是 CBF 波束形成的结果,可以看出 MVDR 处理降低了目标信号的方位上的旁瓣,比 CBF 处理降低约 5 dB。

当球体目标处于水底混响区时,目标回波的信噪比有所下降。图 6 和图 7 分别是低信噪比时球体目标的 CBF 与 MVDR 波束形成声呐图像,从图中可以看出,在低信噪比情况下两种方法得到目标的旁瓣均不明显。图 8 是低信噪比条件下目标所在距

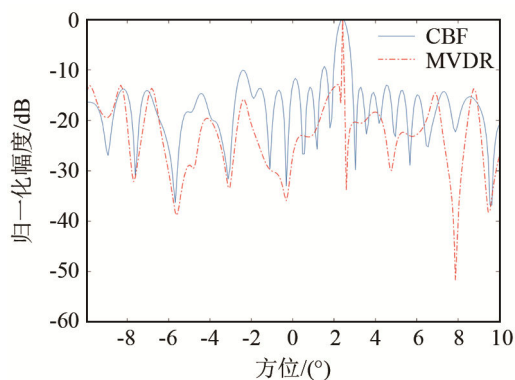


图 5 高信噪比条件目标 CBF 和 MVDR 图像旁瓣比较
Fig.5 Sidelobe comparison of CBF and MVDR results at high SNR

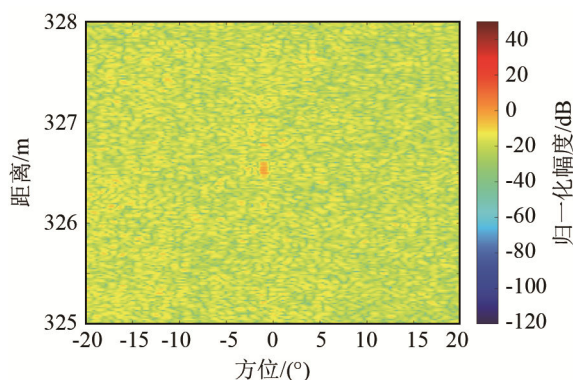


图 6 低信噪比条件球体目标 CBF 声呐图像
Fig.6 Typical CBF sonar image of sphere at low SNR

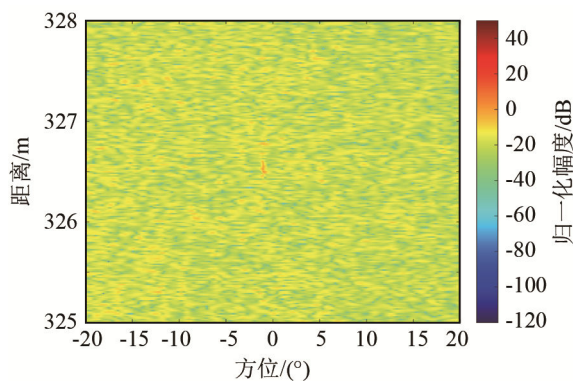


图 7 低信噪比条件球体目标 MVDR 声呐图像
Fig.7 Typical MVDR sonar image of sphere at low SNR

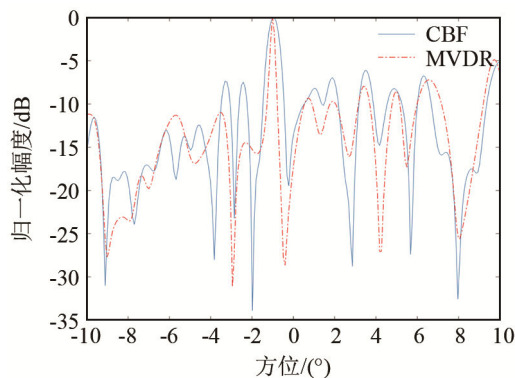


图 8 低信噪比条件目标 CBF 和 MVDR 图像旁瓣比较
Fig.8 Sidelobe comparison of CBF and MVDR results at low SNR

离 CBF 和 MVDR 的波束输出比较, 可以看出, 球体目标信号附近的旁瓣比 CBF 处理降低约 2~3 dB, CBF 主瓣宽度为 0.6° 、MVDR 波束形成处理的主瓣宽度为 0.3° 。

2.2 主动声呐图像后置维纳滤波处理

2.2.1 水下目标主动声呐图像增强

从上述阵列数据的主动 MVDR 波束形成处理结果可以看出, 虽然目标局部信噪比得到了提高, 但是, 声呐图像仍然具有斑点噪声强、目标轮廓模糊、图像对比度低等特点。根据阵列维纳滤波处理过程, 下面分析后置维纳滤波在水下目标回波检测方面的性能, 以图 9 所示的泡沫球立方框目标进行分析。



图 9 泡沫球立体框目标
Fig.9 Picture of square box target of foam spheres

图 10 是远距离条件下泡沫球立方框目标的典型声呐图像, 从图中可以看出目标的基本形状, 但由于声呐图像的背景噪声较高, 目标图像的对比度较低。

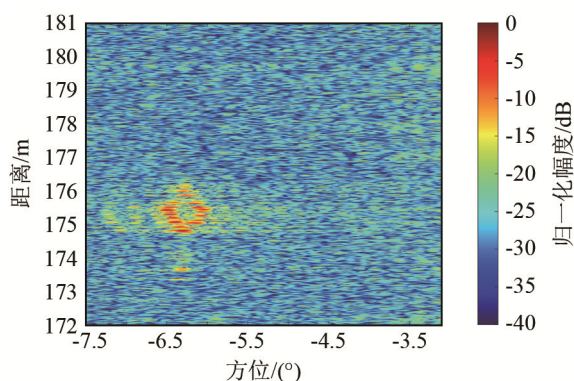


图 10 水下正方框体目标的原始声呐图像
Fig.10 Raw sonar image of the square box target

采用后置维纳滤波对图 10 中各个方位的距离向信号进行分段处理, 在各距离段内, 确定性信号功率由主动 MVDR 波束形成输出估计、随机噪声功率由该距离窗口内信号的平均功率进行估计。后置维纳滤波处理结果如图 11 所示, 其中, 维纳滤

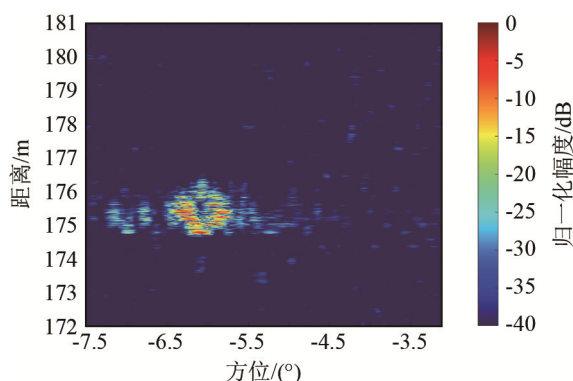


图 11 水下正方框体目标的声呐图像维纳滤波处理结果
Fig.11 Wiener filtering result of sonar image of the square box target

波前后的信号幅度都按照最大值进行了归一化,并且维纳滤波前后的声呐图像动态范围一样。从图 11 中可以看出,维纳滤波处理提高了目标图像的对比度、减小了图像的背景噪声。

2.2.2 声呐图像噪声的影响分析

为了分析声呐图像噪声强弱对后置维纳滤波处理结果的影响,本文选取图像噪声背景弱和图像噪声背景强条件下的声呐图像数据进行比较分析。

图 12 和图 13 分别是低噪声背景条件下后置维

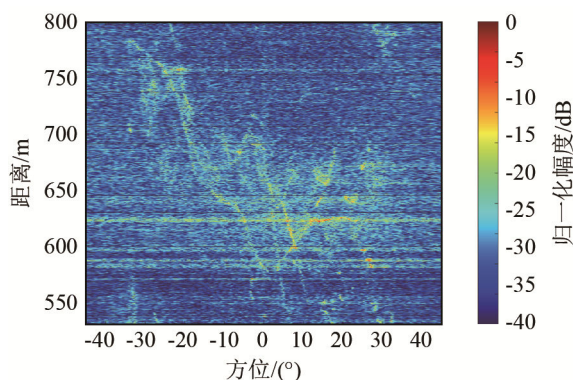


图 12 低噪声背景水下环境声呐图像
Fig.12 Sonar image of underwater environment with low noise background

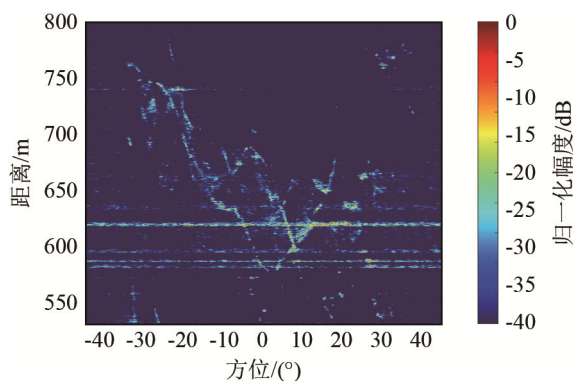


图 13 低噪声背景水下环境声呐图像维纳滤波处理
Fig.13 Wiener filtering output of sonar image of underwater environment with low noise background

纳滤波处理前后的声呐图像,按照幅度最大值进行了归一化,且动态范围相同,从图中可以看出,后置维纳滤波大幅度地减小了斑点噪声的影响,增强了声呐图像的对比度。

图 14 和图 15 分别是高噪声背景条件下,后置维纳滤波前后的声呐图像。通过比较可以看出,声呐图像中大片的随机性斑点噪声得到抑制,散射较强的回波特征得到保留。

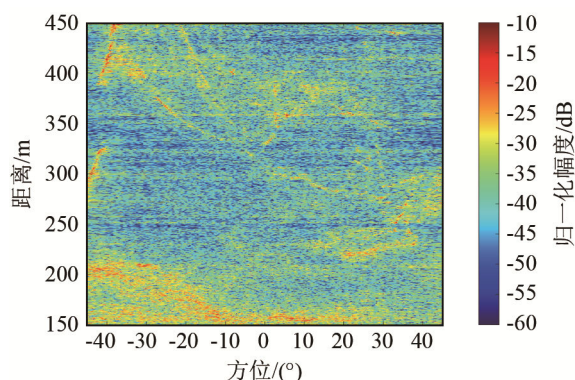


图 14 高噪声背景水下环境声呐图像
Fig.14 Sonar image of underwater environment with high noise background

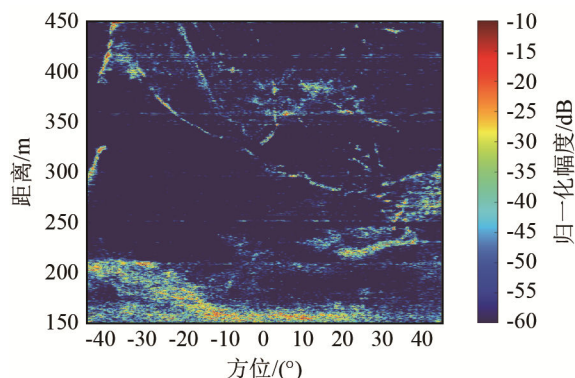


图 15 高噪声背景水下环境声呐图像维纳滤波处理
Fig.15 Wiener filtering result of sonar image of underwater environment with high noise background

3 结 论

根据本文的推导,基于最小均方差准则的声呐阵列信号维纳滤波器可以通过两个步骤实现,即首先对阵列信号进行主动 MVDR 波束形成处理,然后对各个方位的波束信号进行单通道维纳滤波处理。这两个步骤的作用是不同的,其中,主动 MVDR 处理提高了目标回波信号的局部信噪比,而单通道维纳滤波器则降低了随机噪声,上述两个步骤级联在一起共同实现了增强声呐图像对比度的目的。

声呐阵列信号维纳滤波的关键问题是从数据中准确估计确定性信号的功率和随机噪声的功率等先验参数信息,这些参数的估计精度影响着维纳

滤波器的效果。对于本文的试验数据, 水下目标和水下场景的回波信号在声呐图像中是稀疏的, 声呐图像以随机噪声信号为主, 所以, 以一定距离窗口内的平均功率估计噪声功率的方法具有合理性, 从声呐图像增强数据处理结果可以得到验证。然而, 如果声呐图像中确定性信号占主要成份, 则需要采用更为准确的噪声功率估计方法。

参 考 文 献

- [1] 孙玉臣, 王德石, 李宗吉, 等. 蛙人探测声呐系统发展综述[J]. 水下无人系统学报, 2021, **29**(5): 509-523.
SUN Yuchen, WANG Deshi, LI Zongji, et al. Review of diver detection sonar system[J]. Journal of Unmanned Undersea Systems, 2021, **29**(5): 509-523.
- [2] 蒋立军, 杨娟, 许枫. 蛙人探测声呐技术研究进展[J]. 科学通报, 2009, **54**(3): 269-272.
JIANG Lijun, YANG Juan, XU Feng. Technological progress of diver detection sonar[J]. Chinese Science Bulletin, 2009, **54**(3): 269-272.
- [3] 李庆武, 霍冠英, 周妍, 等. 声呐图像处理. 科学出版社[M]. 北京: 2019.
- [4] NILSEN C I C, HOLM S. Wiener beamforming and the coherence factor in ultrasound imaging. IEEE Transactions on Ultrasonics, 2010, **57**(6): 1329-1346.
- [5] 赵益. 基于声矢量传感器的方位谱估计技术研究[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工程大学, 2019.
- [6] 惠娟, 郭嘉宾, 宋明翰, 等. 矢量水听器改进高分辨 Eigenspace 算法[J]. 哈尔滨工程大学学报, 2020, **41**(10): 1471-1552.
HUI Juan, GUO Jiabin, SONG Minghan, et al. Improved Eigenspace algorithm based on vector hydrophone[J]. Journal of Harbin Engineering University, 2020, **41**(10): 1471-1552.
- [7] 王立东, 肖熙. 传感器阵列空间维纳滤波语音增强方法的研究[J]. 电声技术, 2013, **37**(8): 52-56.
WANG Lidong, XIAO Xi. Research on voice microphone array speech enhancement method based on spatial wiener filtering[J]. Audio Engineering, 2013, **37**(8): 52-56.
- [8] 宋知用. MATLAB 语音信号分析与合成[M]. 北京: 北京航空航天大学出版社, 2018.
- [9] KAY S M. Fundamentals of statistical signal processing Volume I: Estimation theory[J]. Detection Theory, 1993, **37**(4): 465-466.
- [10] BUSKENES J I, ÅSEN J P, NILSEN C I C, et al. An optimized GPU implementation of the MVDR beamformer for active sonar imaging[J]. IEEE Journal of Oceanic Engineering, 2015, **40**(2): 441-451.