

一种基于矢量拖曳阵的拖船干扰抵消算法

李 磊^{1,2}, 高 洁^{1,2}, 吴克桐^{1,2}, 涂 英¹, 蔡惠智¹

(1. 中国科学院声学研究所, 北京 100190; 2. 中国科学院研究生院, 北京 100039)

摘要: 拖曳阵中的拖船干扰常常是限制目标的观测范围和检测性能的重要因素之一。在浅海环境中, 由于拖船干扰存在严重的多途效应, 采用传统的自适应干扰抵消方法, 效果并不理想。为了抵消矢量拖曳阵的拖船干扰, 利用矢量拖曳阵中振速通道正交于阵面的分量对拖船干扰不敏感的特点, 提出一种基于矢量阵的拖船干扰抵消算法。该算法抗多途干扰效果好, 可以有效地抑制拖船干扰, 实验数据处理结果验证了该算法的有效性, 可望在实际的声纳工程中得到应用。

关键词: 拖船干扰; 频域波束形成; 频域自适应滤波

中图分类号: TB556

文献标识码: A

文章编号: 1000-3630(2009)-05-0582-04

DOI 编码: 10.3969/j.issn1000-3630.2009.05.004

A towed ship interference canceling algorithm for vector sensor line array

LI Lei^{1,2}, GAO Jie^{1,2}, WU Ke-tong^{1,2}, TU Ying¹, CAI Hui-zhi¹

(1. Institute of Acoustics, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100190; 2. Graduate University, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100039, China)

Abstract: To the towed sonar with a vector sensor line array, the interference of towed ship is an important factor that limits the sonar performance. Because of the severe multipath interference, the performance of the traditional adaptive interference canceling (AIC) is not satisfactory. For canceling the towed ship interference based vector sensor array, this paper provides an algorithm by taking the advantaged feature that the sound velocity vector component which is perpendicular to the forward bearing isn't sensitive to the towed ship interference. The trial data processing result indicates the availability of this algorithm.

Key words: towed ship interference; frequency-domain beamformer; frequency-domain adaptive filtering (FDAF)

1 引 言

由于拖曳式声纳的基阵被拖放在本舰尾部数百米的距离范围, 拖船本身的辐射噪声成为被拖声纳近场主要的干扰噪声^[1]。在浅海环境中, 对于拖曳线列阵声纳, 拖船辐射噪声是一个空间干扰, 具有多途大延时的特点。其干扰的角扩展非常严重, 相对于远方的目标辐射信号是一个非常强的干扰源, 它的存在不仅影响声纳在端射方向的有效观察范围, 而且是远程目标探测的重要制约因素^[2-4]。

在以往的声压拖曳阵的拖船干扰消除研究中, 国内外学者都倾向于将自适应噪声抵消技术应用到拖船干扰抵消, 针对在波束形成前还是波束形成后进行干扰抵消, 分为阵元域的干扰抵消(EIC)^[5]和波束形成后干扰抵消(PIC)^[6]两种方法。由于拖船的干扰是一个多途大延时的干扰, 把固定波束当作自

适应干扰抵消的参考输入的方法, 只能抵消掉一部分干扰, 效果并不理想。从阵列信号处理角度考虑, 希望通过阵列信号处理的方法将干扰抵消掉, 这类方法如自适应波束形成(Adaptive Beamforming, ABF), 其中最经典的算法要数 MVDR(Minimum Variance Distortionless Response)算法。国外学者曾经尝试将 ABF 方法引入拖船干扰抵消的研究中^[7], 从文献中海试试验结果可以看出 ABF 仅可以减小拖船噪声覆盖的范围, 但是拖船干扰并没有很好地得到抵消。

矢量水听器由声压和振速水听器复合而成, 可以共点测量声场中的声压与振速。单个矢量水听器就能够对目标进行定向, 但是为了进一步提高声纳的分辨力和作用距离, 矢量阵的应用是大势所趋。相对于拖曳声压阵, 拖曳矢量阵具有以下优点: (1) 由于声速通道的偶极子的指向性, 可以克服声压拖曳阵的左右舷模糊。(2) 增多的声道相当于声阵孔径的增加。所以矢量拖曳阵相比于声压拖曳阵具有显著的优越性。但是关于矢量拖曳阵的拖船干扰抵消的研究资料很少, 本文利用矢量阵中的声速通道

收稿日期: 2008-08-17; 修回日期: 2008-10-08

作者简介: 李磊(1981-), 男, 河南洛阳人, 博士研究生, 研究方向为水声信号处理、阵列信号处理。

通讯作者: 李磊, E-mail: lilei810614@126.com

正交于阵面的分量泄漏进的拖船干扰非常少的特点,提出了一种基于正交于阵面的声速分量对拖船干扰不敏感的特性的拖船干扰抵消算法。湖试数据处理验证了算法的有效性,可望工程上得到应用。

2 矢量拖曳线列阵对拖船干扰的响应

舰船辐射噪声是由诸多因素引起的一种随机信号,主要来源包括机械噪声、螺旋桨噪声和水动力噪声三大类^[8]。拖船辐射噪声经海水直达、海面反射和海底反射三种传播途径到达拖曳声纳接收基阵^[9],如图1所示。

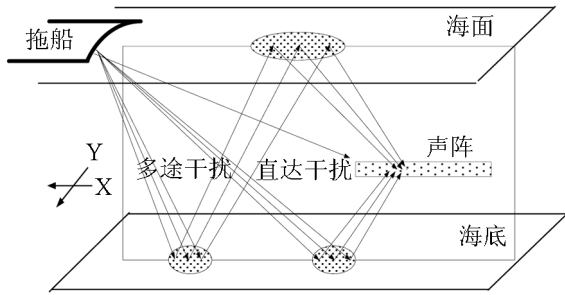


图1 拖船多途干扰的形成示意图

Fig.1 Illustration of towed ship multipath interference

在连续介质中任何一点附近的运动状态可用压强、密度及介质质点的运动速度来表示。理想连续介质中小振幅波振速 $\mathbf{v}$ 与声压 p 的关系由声波的基本定律决定,见式(1):

$$\mathbf{v} = -(1/\rho) \int \nabla p \cdot dt \quad (1)$$

式(1)中 t 为时间, ∇ 算符表示梯度运算, ρ 为介质密度。式(1)为理想连续介质中声场运动方程。

不失一般性,考察一个平面波的声压为 $p(r, t)$, 它可以表示为谐和平面波的叠加,见式(2):

$$p(r, t) = \int X(\omega) \cdot e^{j(\omega t - kr)} d\omega \quad (2)$$

$$X(\omega) = \int x(t) \cdot e^{-j\omega t} \cdot dt \quad (3)$$

其中 $x(t)$ 为声压波形, ω 为角频率, $X(\omega)$ 为 $x(t)$ 的频谱, $k = \omega/c = 2\pi/\lambda$ 为波数, r 为距离。

将式(2)代入式(1)中,可得声速 $\mathbf{v}(r, t)$, 如式(4)所示:

$$\mathbf{v}(r, t) = -\frac{1}{\rho} \iint \nabla \{X(\omega) \cdot e^{j(\omega t - kr)}\} d\omega dt \quad (4)$$

完成对时间的积分后,可得:

$$\begin{aligned} \mathbf{v}(r, t) = & -\frac{1}{\rho} \int \nabla \left\{ \frac{X(\omega)}{j\omega} \cdot e^{j(\omega t - kr)} \right\} d\omega = \\ & \frac{1}{\rho c} [\cos\theta \cos\alpha \cdot \boldsymbol{\xi} + \sin\theta \cos\alpha \cdot \boldsymbol{\eta} + \\ & \sin\alpha \cdot \boldsymbol{\zeta}] \int X(\omega) \cdot e^{j(\omega t - kr)} d\omega \end{aligned} \quad (5)$$

$$\mathbf{v}(r, t) = \frac{1}{\rho \cdot c} [\cos\theta \cos\alpha \cdot \boldsymbol{\xi} + \sin\theta \cos\alpha \cdot \boldsymbol{\eta} + \sin\alpha \cdot \boldsymbol{\zeta}] p(r, t) \quad (6)$$

其中, θ 为声波传播的水平方位角, α 为声线与水平面的夹角,称为声线掠角。 $\boldsymbol{\xi}$ 、 $\boldsymbol{\eta}$ 、 $\boldsymbol{\zeta}$ 是相互正交的单位坐标矢量。除了一个常数以外,三个振速分量与声压的波形相同。为叙述简单起见将该常数设为1,则三个振速分量为:

$$\begin{cases} v_x(t) = \cos\theta \cos\alpha \cdot p(t) \\ v_y(t) = \sin\theta \cos\alpha \cdot p(t) \\ v_z(t) = \sin\alpha \cdot p(t) \end{cases} \quad (7)$$

对于拖船干扰来说(这里只考虑声速通道的 x 和 y 方向分量),按照理想的多途干扰模型,矢量线列阵的时空采样数据中,声压通道是一系列与直达平面波干扰相干的、在时间上有一个大延时、在空间上有不同入射方位的平面波干扰。声速通道的 x 、 y 轴分量满足每个多途干扰分量的水平方位角(以拖船方向阵面端为 0° , 顺时针旋转)为 0° 。三个通道采集数据的形式如式(8)~(10)所示:

$$P_i(t) = \sum_{m=0}^M A_m I(t - \tau_m - \frac{id}{c} \cos\alpha_m) \quad (8)$$

$$\begin{aligned} V_{xi}(t) = & \sum_{m=0}^M \cos\theta_m \cos\alpha_m A_m I(t - \tau_m - \frac{id}{c} \cos\alpha_m) = \\ & \sum_{m=0}^M \cos\alpha_m A_m I(t - \tau_m - \frac{id}{c} \cos\alpha_m) \end{aligned} \quad (9)$$

$$V_{yi}(t) = \sum_{m=0}^M \sin\theta_m \cos\alpha_m A_m I(t - \tau_m - \frac{id}{c} \cos\alpha_m) = 0 \quad (10)$$

其中, A_m 为多途衰减, τ_m 为多途时延, θ_m 为多途声线入射的方位角, α_m 为多途声线入射的声线掠角, M 为多途径的个数, i 为阵元序列号, d 为阵元间隔, c 为声速, I 为干扰波形。

从公式(8)~(10)可以看出,声速的 y 通道分量泄漏进的拖船的干扰在理想情况下为0,可见声速的 y 通道分量对拖船干扰不敏感。

3 基于正交于阵面的声速分量对拖船干扰不敏感的拖船干扰抑制算法

分析声压通道和声速通道的 x 、 y 通道分量的信号成分,如公式(11)所示:

$$\begin{cases} P(n) = I_p(n) + S_p(n) + N_p(n) \\ V_x(n) = I_x(n) + S_x(n) + N_x(n) \\ V_y(n) = S_y(n) + N_y(n) \end{cases} \quad (11)$$

式(11)分别表示了声压 P 、声速 x 分量、声速 y 分量三个通道中的信号成分,其中 $I(n)$ 表示通道中的拖船干扰成分, $S(n)$ 表示通道中的信号成分,

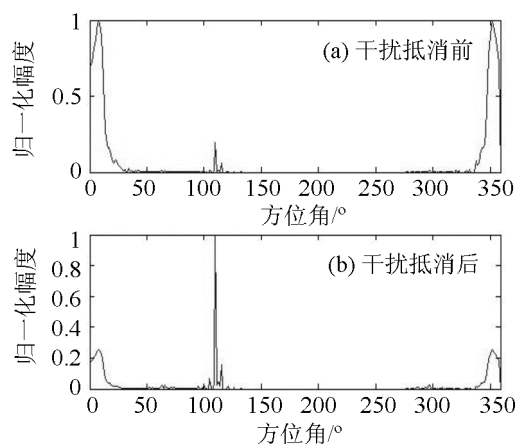


图4 仿真数据干扰抵消前后波束图

Fig.4 Beamforming outputs from the simulation data

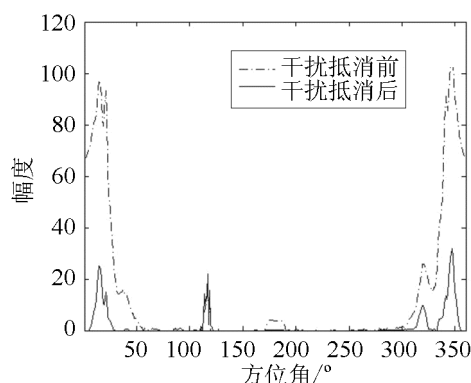


图5 湖试数据干扰抵消前后方位幅度谱

Fig.5 Comparison of beam bearing-amplitude spectrum between before and after interference canceling from lake trial data

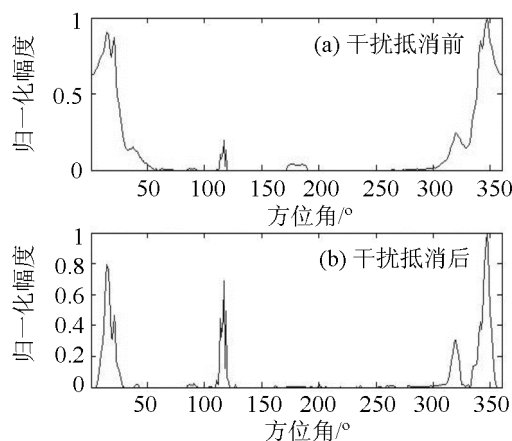


图6 湖试数据干扰抵消前后归一化波束方位幅度谱

Fig.6 Comparison of normalized bearing-amplitude spectrum between before and after interference canceling from lake trial data

到-3.5dB。而目标方位波束形成后的波束域时域信号信干比由-12dB 提高到 2dB。图6 是干扰抵消前后波束方位幅度谱归一化后的结果。从图6 可以看出经过干扰抵消算法处理后目标能量对比于拖船干扰得到了增强,拖船干扰得到了有效的抑制,同

时目标方位波束形成后的波束域时域信号的信干比也得到提高。

5 结 论

对于拖曳阵,拖船干扰是制约声纳检测性能的一个重要因素。矢量阵对声场的声压和振速进行时空采样,声压和振速通道中的拖船干扰成分在阵列作波束形成时,通过旁瓣泄露进波束形成后的时域信号中,严重制约了微弱目标信号的检测。同时也在阵艏方向制约了目标的观测范围。本文提出的拖船干扰抑制算法,利用了矢量阵中振速与阵艏正交的分量(振速 y 通道)中对拖船干扰不敏感的特性,各个通道先分别作频域波束形成,振速 y 通道的波束形成结果经过频域自适应滤波环节,使该通道中的信号成分逼近其他通道中的信号成分,干扰成分得到抑制,再做矢量阵的联合信号处理,从而达到拖船干扰抵消的目的。湖试结果验证了该算法的有效性,从试验结果可以看出拖船干扰得到明显抑制,此算法可望在声纳工程中得到进一步的应用。

参 考 文 献

- [1] Horst Zachow. System for noise measurements of towed arrays[A]. UDT Europe 98-23-25[C]. 1998.
- [2] 张宾,孙长瑜. 拖船辐射噪声的海试数据分析及特性仿真. 拖船辐射噪声的海试数据分析及特性仿真[J]. 声学技术, 2007, 26(5): 798-801.
- [3] ZHANG Bin, SUN Changyu. Sea trial processing and tow ship noise simulation[J]. Technical Acoustics, 2007, 26(5): 798-801.
- [4] LIU Mengnan, CONG Weihua. Tow ship noise analysis of towed line array sonar[A]. Proceedings UDT Korea[C]. 2001.
- [5] MA Yuanliang, LIU Mengnan, ZHANG Zhongbing, TONG Li. Receiving response of towed line array to the noise of the tow ship in shallow water[J]. Chinese Journal of Acoustics, 2003, 22(1): 2-10.
- [6] 从卫华. 自适应拖船噪声抵消技术研究[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工程大学, 1999.
- [7] CONG Weihua. Research on adaptive tow-vessel noise cancellation technique[D]. Harbin Engineering University, 1999.
- [8] Godara L C. Postbeamformer interference canceller with improved performance[J]. J. Acoust. Soc. Am., 1989, 85: 202-213.
- [9] Karine Mio, Yves Doisy, Yves chocheyras. Towship noise reduction with active adaptive beamforming on HFM transmissions[A]. UDT Korea[C]. 2002: 320-326.
- [10] 汪德昭, 尚尔昌. 水声学[M]. 北京: 科学出版社, 1984: 376-382.
- [11] WANG Dezhaoh, SHANG Erchang. ACOUSTICS[M]. Beijing: Science Press, 1984: 376-382.
- [12] 李启虎, 李淑秋. 主被动拖线阵声纳中拖曳平台噪声和拖鱼噪声在浅海使用时的干扰特性[J]. 声学学报, 2007, 32(1): 1-4.
- [13] LI Qihu, LI Shuqiu. The interference characteristics of platform and towed body noise in shallow water for active/passive towed array sonar[J]. ACTA ACUSTICA, 2007, 32(1): 1-4.
- [14] Shynk J J. Frequency-domain and multirate adaptive filtering[J]. IEEE Signal Processing Magazine, 1992, 9: 1437.