

拖船噪声抵消与左右舷分辨联合处理方法的研究

张 宾^{1,2} 孙贵青^{2†} 李启虎²

(1 青岛科技大学 青岛 266061)

(2 中国科学院声学研究所 北京 100190)

摘要 利用拖曳双线阵声纳基阵结构的左右舷分辨能力,并结合拖船相对于拖曳线列阵的空间位置关系,本文提出一种拖船噪声抵消与左右舷分辨联合处理的方法,在波束域分别形成左右波束并将映像波束相减,在检测目标并进行左右分辨的同时,可以显著抵消拖船噪声。海试结果验证了该方法的有效性,拖船噪声被抑制掉约 14dB,同时正确分辨出目标的左右舷方位。

关键词 拖曳双线阵,左右舷分辨,噪声抵消

Tow ship noise canceling combined with left/right discrimination

ZHANG Bin^{1,2} SUN Gui-Qing² LI Qi-Hu²

(1 Qingdao University of Science and Technology, Qingdao 266061)

(2 Institute of Acoustics, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100190)

Abstract Based on the left/right discrimination ability of towed twin-line array and the orientation of tow ship relative to the array, a method for tow ship noise canceling combined with left/right discrimination is proposed, which forms left and right beams respectively, and performs subtraction for each pair of image beams. This method achieves target detection, left/right discrimination and tow ship noise canceling at the same time. The results of some sea trial data processing are promising, where the tow ship noise is cancelled by about 14dB, and left/right positions of the targets are discriminated correctly.

Key words Towed twin-line array, Left-right discrimination, Noise canceling

2007-09-24 收稿; 2008-05-05 定稿

作者简介:张宾(1979 -),女,青岛人,副教授,博士,研究方向:阵列信号处理。

孙贵青(1971 -),男,副研究员,博士。

李启虎(1938 -),中国科学院院士,研究员。

† 通信联系人 E-mail:gui_qing_sun@yahoo.com.cn

1 引言

拖船辐射噪声是拖曳线列阵声纳难以避免的强干扰,如何抑制或抵消拖船干扰一直以来都是拖线阵声纳信号处理领域的一个重点和难点问题。之所以困难主要是由于拖船辐射噪声自身特有的一些性质造成的,如多途传播路径丰富、噪声功率谱起伏大等等,并且相对于几公里甚至几十公里以外的目标而言,拖船噪声是一个近程强干扰,其强度往往比目标强度高出许多,严重影响真实目标的检测,使声纳丧失了端射方向附近约 60 度的警戒扇面。因此,虽然国内外学者尝试利用多种方法抵消拖船噪声,如自适应噪声抵消、自适应波束形成、后置波束形成干扰抵消,以及匹配场处理等方法,但是实际效果仍不能令人满意^[1-3]。

20 世纪 90 年代以来,为了解决常规拖曳单线阵声纳左右舷模糊问题,相继诞生了三元水听器、双线列阵以及矢量水听器阵等基阵结构的拖曳式声纳。特别地,拖曳双线阵声纳具有工作频带低、算法简易、工程可靠性高等优点,自诞生以来受到了越来越多的关注,海上试验也显示了它的潜在优势^[4,5]。本文基于双线阵声纳的结构特点,利用双线阵声纳自身具有左右舷分辨的性能,提出一种与常规方法不

同的拖船噪声抵消方法,即映像波束相减法。首先将对双线阵左右舷分辨性能进行分析,而后给出映像波束相减法的具体实现,最后利用海试数据对该算法进行验证。

2 双线阵左右舷分辨性能分析

假设由两条互相平行的线列阵构成的双线阵如图 1 所示分布,分别称两条线列阵为 A 阵和 B 阵,二者的间距为 l ,每条线列阵分别由 N 个等间隔分布的阵元组成,阵元间距为 d ,以坐标原点 O 为参考点。令 y 轴的原点 O 端靠近拖曳平台,将 y 轴正半轴一侧, $\theta \in (0^\circ, 180^\circ)$,定义为右舷;将 y 轴负半轴一侧, $\theta \in (0^\circ, 180^\circ)$,定义为左舷。

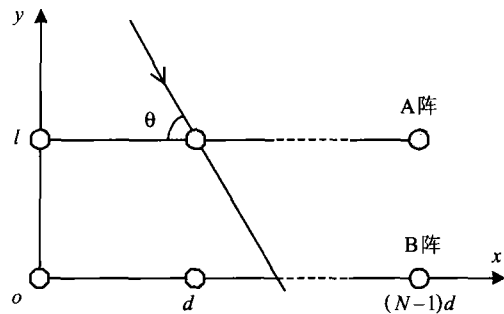


图 1 双线阵平面坐标

如图 1 所示分布的双线阵指向性函数为^[6]

$$D_{twin}(\theta, \theta_0) = \left\{ \frac{1 + \cos[2\pi l(\sin\theta - \sin\theta_0)/\lambda]}{2} \right\}^{1/2} \cdot \left| \frac{\sin[N\pi d(\cos\theta - \cos\theta_0)/\lambda]}{N\sin[\pi d(\cos\theta - \cos\theta_0)/\lambda]} \right| \quad (1)$$

式中 θ 为声纳波束扫描角, θ_0 为目标方位角, λ 为与入射信号中心频率对应的波长。注意到式(1)中乘式的第二个因子恰是单线列阵的指向性函数,而第一个因子实际上是心形指向性函数,说明了双线列阵指向性函数是由单线列阵指向性函数与一个心形指向性函数 $F(\theta, \theta_0)$ 相乘得来

$$D_{twin}(\theta, \theta_0) = F(\theta, \theta_0) D_{single}(\theta, \theta_0) \quad (2)$$

这里

$$F(\theta, \theta_0) = \left\{ \frac{1 + \cos[2\pi l(\sin\theta - \sin\theta_0)/\lambda]}{2} \right\}^{1/2} \quad (3)$$

$$D_{single}(\theta, \theta_0) = \left| \frac{\sin[N\pi d(\cos\theta - \cos\theta_0)/\lambda]}{N\sin[\pi d(\cos\theta - \cos\theta_0)/\lambda]} \right| \quad (4)$$

从式(3)看出,对于一对映像方位 θ 和 $-\theta$ 有

$$F(\theta, \theta_0) \neq F(-\theta, \theta_0) \quad (5)$$

说明由于因子 $F(\theta, \theta_0)$ 的存在, 双线列阵在一对映像方位具有不同的响应值, 从而双线列阵的基阵结构具有了左右舷分辨的能力。

图2给出了目标方位 θ_0 分别为 90° 、 60° 和 30° 时的双线阵和单线阵指向性图, 左侧为双线阵结果, 右侧为单线阵结果。这里取 $d = \lambda/2$,

$l = \lambda/4$, $N = 40$ 。从几幅图可以看出单线阵在一对映像方位具有完全相同的响应值, 无法辨别目标的真实方位, 从而产生左右舷模糊问题; 而双线阵则在目标真实方位形成最大响应, 在其映像方位无响应(正横方位)或仅有较小的响应(非正横方位), 可以实现目标的左右舷分辨, 证明了双线阵具有解决左右舷模糊问题的能力。

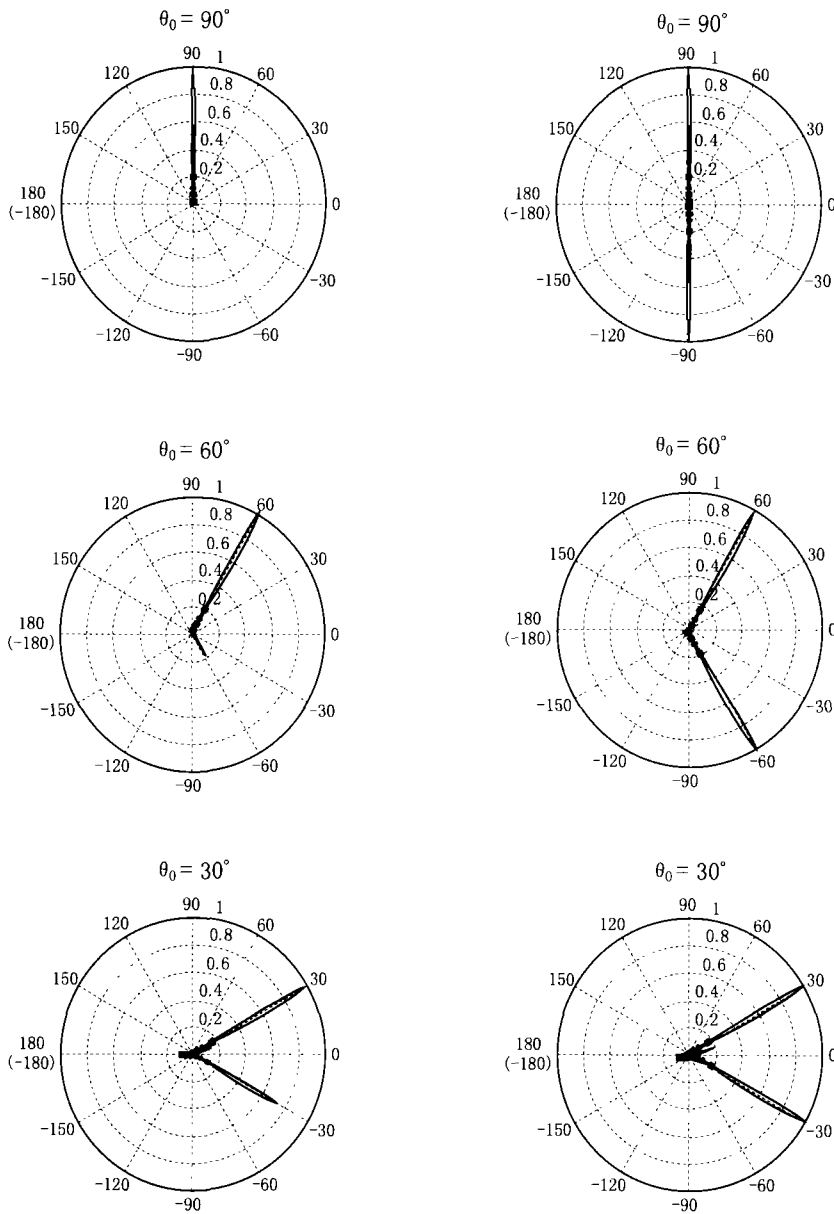


图2 双线列阵与单线列阵的指向性比较
(左侧为双线阵结果; 右侧为单线阵结果)

左右舷抑制增益 (Gain of Left/Right Suppression) 是衡量声纳左右舷分辨能力的定量参数,可定义为一对映像方位的响应之比^[7],即

$$G(\theta, \theta_0) = 101 \log \left| \frac{D(\theta, \theta_0)}{D(-\theta, \theta_0)} \right|^2 \quad (6)$$

根据式(4.13)的定义,可以分别得到单线列阵和双线列阵的左右舷抑制增益,

$$G_{single}(\theta, \theta_0) = 101 \log \left| \frac{D_{single}(\theta, \theta_0)}{D_{single}(-\theta, \theta_0)} \right|^2 = 0 \text{dB} \quad (7)$$

$$\begin{aligned} G_{twin}(\theta, \theta_0) &= 101 \log \left| \frac{D_{twin}(\theta, \theta_0)}{D_{twin}(-\theta, \theta_0)} \right|^2 \\ &= 101 \log \left| \frac{F(\theta, \theta_0)}{F(-\theta, \theta_0)} \right|^2 \quad (8) \end{aligned}$$

容易看出,单线阵的左右舷抑制增益为 0dB,无法判别目标来自于左舷还是右舷,存在左右舷模糊问题。而双线阵的左右舷抑制增益由于因子 $F(\theta, \theta_0)$ 而不等于零分贝,从而使得双线阵声纳具备左右舷分辨的能力。

图3给出了双阵间距 $l = \lambda/4$ 时各扫描方位的左右舷抑制增益,每条线列阵的阵元间距 $d = \lambda/2$ 。可以看出,对于波长为 λ 的入射信号而言,在正横方位具有最大的左右舷抑制增益,理论上可达到无穷大。虽然随着入射角逐渐向端射靠近,增益会逐渐减小,但是在 20° (160°),也有近 2dB 的增益,这充分说明了双线阵结构具有左右舷分辨的能力。

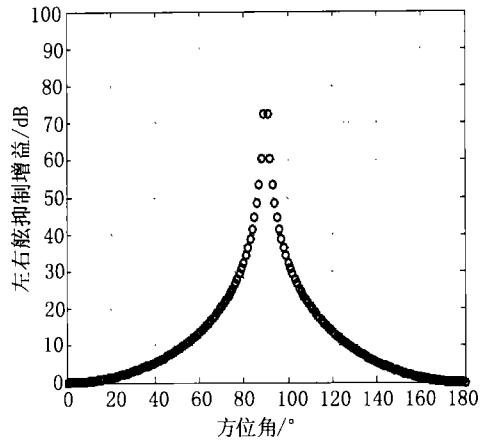


图3 双线阵左右舷抑制增益随角度的变化关系(增益截取至 100dB)

3 映像波束相减法

根据上一节的分析,对于非端射方位入射的目标而言,双线阵声纳具有左右舷分辨的能力,并且当目标在 $52^\circ \sim 128^\circ$ 之间时,左右舷抑制增益可达到 10dB 以上。而由图4所示,拖船噪声经多途传播从端射方向的垂直面内入射到接收阵,并非在舷侧入射,即无左右舷之分。换言之,对于目标而言,双线阵在左舷和右舷形成的波束会有不同的输出,而拖船辐射噪声的左右舷波束输出应是相同的。基于这样的考虑,本文提出映像波束相减的方法,抵消拖船干扰的同时,检测到目标信号。下面给出该方法的具体实现过程。

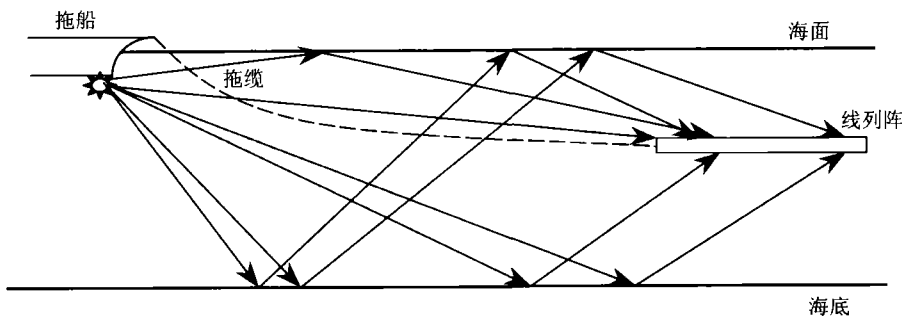


图4 拖船辐射噪声传播示意图

假设一远场平面波入射到如图1所示的双线阵,在 $\theta \in (-180^\circ, 180^\circ)$ 空间范围内扫描,对 $2N$ 个阵元进行波束形成,得到

$$y(t, \theta) = W_1^H(\theta)X_1(t) + W_2^H(\theta)X_2(t) \quad (9)$$

式中 $X_1(t)$ 、 $X_2(t)$ 分别为A阵和B阵的接收信号向量, $W_1(\theta)$ 、 $W_2(\theta)$ 分别为A阵和B阵的权向量,

$$W_1(\theta) = [\exp(-jkl\sin\theta), \exp(jkdcos\theta - jkl\sin\theta), \dots, \exp(jk(N-1)dcos\theta - jkl\sin\theta)]^T \quad (10)$$

$$W_2(\theta) = [1, \exp(jkd\sin\theta), \exp(jk2dcos\theta), \dots, \exp(jk(N-1)dcos\theta)]^T \quad (11)$$

双线阵波束形成器的功率输出为:

$$P(\theta) = E[y^*(t, \theta) \cdot y(t, \theta)] \\ = |y(t, \theta)|^2 \quad (12)$$

其中, $E[\cdot]$ 表示数学期望, $|\cdot|^*$ 表示共轭。当声纳波束扫描到目标所在方位时,即 $\theta = \theta_0$,

$P(\theta_0)$ 有极大值。称 θ_0 和 $-\theta_0$ 为一对映像角度,并称 $P(\theta_0)$ 与 $P(-\theta_0)$ 为一组映像波束,对映像波束执行相减操作,理论上可将拖船干扰完全抵消掉,这里视 $\theta_0 \in (0^\circ, 180^\circ)$ 为右舷。

4 海试数据处理结果

本节利用映像波束相减的方法处理拖曳双线阵声纳某次海上试验获取的数据,该段数据中三个目标分别位于 106° 、 121° 和 136° ,如图5所示。(a)图给出了全方位的波束输出图,可见双线阵确实具有左右舷分辨性能,能够分辨出三个目标都来自于右舷。而 19° 的拖船干扰在两舷的输出则较为接近。利用本节的映像波束相减方法,得到(b)图所示结果,端射方位的干扰几乎都被抵消,与理论分析相符,同时三个目标的信息凸现。

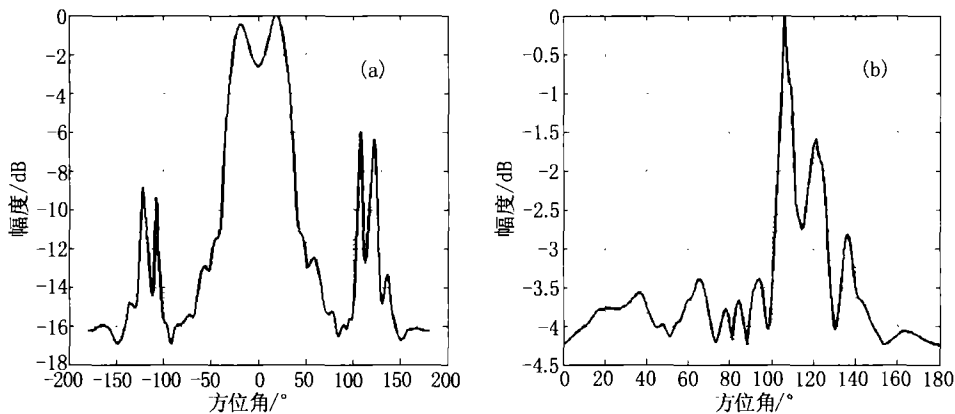


图5 双线阵映像波束相减法抵消拖船干扰

(a) 双线阵波束输出 (b) 干扰抵消后的输出

5 小结

拖曳双线阵声纳自身的结构特点决定了它能够克服传统拖曳单线阵声纳左右舷模糊的固有缺陷,具备左右舷分辨的能力。基于此,本节给出了映像波束相减的拖船干扰抵消方法,海试数据处理结果显示,该方法不仅

将干扰较彻底地抵消掉,背景噪声也得到了均衡处理,使得目标信息更能够凸现出来。映像波束相减的干扰抵消方法,其性能取决于双线阵声纳左右舷分辨的效果,因此寻求更好的双线阵声纳左右舷分辨方法是关键。但是,对于来自端射方向的目标信号仍无法与拖船噪声分离,这是本文方法的一个局限

性。映像波束相减法将双线阵的左右舷分辨与拖船噪声抵消二者结合,是一种值得关注的研究方向。

参 考 文 献

- [1] M. K. Robert and S. P. Beerens. Adaptive beamforming algorithms for tow ship noise canceling. Proc. of European Undersea Defense Technology, La Spezia, 2002.
- [2] MA Yuanliang, YAN Shefeng, and YANG Kunde. Matched field noise suppression; Principle with application to towed hydrophone line array. Chinese Science Bulletin, 2003, 48 (12): 1207 - 1211.
- [3] James V. Candy and Edmund J. Sullivan. Canceling tow ship noise using an adaptive model-based approach. Proc. of the IEEE/OES Eighth Working Conference on Current Measurement Technology, 2005: 14 - 18.
- [4] T. Warhonowicz, H. Schmidt-Schierhorn, and H. Hostermann, Port/starboard discrimination performance by a twin line array for a LFAS sonar system. Proc. of European Underwater Defense Technology, 1999: 398.
- [5] R. M. Zeskind et al. Acoustic performance of a multi-line system towed in several ocean environments. IEEE J. of Ocean Eng. , 1998, 23(1): 124 - 128.
- [6] 李启虎. 双线列阵左右舷目标分辨性能的初步分析. 声学学报. 2006,31(5):385 - 388.
- [7] D. T. Hughes. Aspects of cardioid processing, SACLANT-CEN REPORT, SR - 329, 2001.

X 型簧片哨超声乳化强化器简介

X 型簧片哨超声乳化强化器是根据对簧片哨工作特性的研究并结合工业应用的实际要求而定型设计的,它除具有结构简单、工作牢靠、成本低等簧片哨一般优点外,其最大特点在于采用适当低弯曲刚度的簧片,因而能在宽喷口厚度(可达 2mm)、宽工作压力范围(4 - 8kg/cm²)下稳定工作并获取高声强和强空化场,后者是超声乳化强化等超声处理工艺所需要的重要声学条件。另外在结构上采用可更换的活动喷咀和进、出口管两端均加工有连结管螺纹,因而易于满足处理不同介质、流量和实现管道化连续生产的要求。

X 型簧片哨超声乳化强化器有四种规格,即

$X - \frac{1}{2}$ ", $X - 1$ ", $X - 1 \frac{1}{2}$ ", $X - 2$ ", 其进、出口连接管螺纹分别为 $\frac{1}{2}$ ", 1", $1 \frac{1}{2}$ ", 2", 喷口厚度为 0.5 - 2.0mm, 工作压力为 2 - 10kg/cm², 处理最大流量分别为 0.4, 1.0, 4.0, 8.0M³/H, 若需处理更大流量,可多个并联使用。乳化细度一般可达 2 - 3μ 以下。

本乳化强化器由不锈钢或普通钢制成,与工业泵配套使用。

(中国科学院声学研究所 罗曾义)