

# 四分之一波长间距阵抗拖船干扰研究

冯 文<sup>1,2</sup>, 毕雪洁<sup>1,2</sup>, 曾财高<sup>1,2</sup>, 赵安邦<sup>1,2</sup>

(1. 哈尔滨工程大学水声技术重点实验室, 黑龙江哈尔滨 150001; 2. 哈尔滨工程大学水声工程学院, 黑龙江哈尔滨, 150001)

**摘要:** 为改善拖曳线列阵声呐的尾向探测能力, 降低拖船噪声对半波长间距阵尾向探测性能的制约, 本文关注四分之一波长间距阵对连续波信号和带限噪声的响应。研究表明, 四分之一波长间距阵具有非对称的端向指向性, 与半波长间距阵相比有约 20 dB 的空间抑制能力, 能有效抑制拖船辐射噪声干扰。本文还提出用零陷权组合传感器构成四分之一波长间距阵, 理论上其抗拖船噪声干扰的效果比四分之一波长间距阵更好。

**关键词:** 拖船干扰; 四分之一波长间距阵; 零陷权组合传感器; 零陷权波束形成

中图分类号: TB556

文献标识码: A

文章编号: 1000-3630(2015)-03-0228-05

DOI 编码: 10.3969/j.issn1000-3630.2015.03.008

## Research on anti towing ship interference with quarter wavelength interval array

FENG Wen<sup>1,2</sup>, BI Xue-jie<sup>1,2</sup>, ZENG Cai-gao<sup>1,2</sup>, ZHAO An-bang<sup>1,2</sup>

(1. Acoustic Science and Technology Laboratory, Harbin Engineering University, Harbin 150001, Heilongjiang, China;

2. College of Underwater Acoustic Engineering, Harbin Engineering University, Harbin 150001, Heilongjiang, China)

**Abstract:** There are a lot of published studies which discuss the anti-interference problem in the noise background radiated by a towing ship based on the array with an interval of 1/2 wavelength between elements. Not the 1/2 wavelength interval one but the 1/4 wavelength interval one is to be concerned because of the obvious benefit to detecting signal in the noise background radiated by towing ship. Research shows that the end fire directivity of the array with an interval of 1/4 wavelength between elements is not symmetric, which can suppress tow-ship interference effectively. And, the combined sensors with null beam pattern are proposed as elements to form the 1/4 wavelength interval array, with which the detection ability in the tail direction can be improved more significantly.

**Key words:** towing ship interference; 1/4 wavelength interval array; combined sensor with null beam pattern; null beam forming

## 0 引言

拖船高速巡航时辐射噪声很强, 是拖曳线列阵声呐的重要干扰之一。由于多途到达效应, 拖曳阵在拖船方向 $\pm 25^\circ$ 的扇面内受到拖船辐射噪声的强干扰, 该扇面称为“强干扰扇面”。拖线阵不单单在拖船噪声直达声到达方向, 而是在一个扇面内受到干扰, 称为“多途角扩展”。在拖曳阵的尾向(与拖船相反的方向)存在着“弱可探测区”, 在该扇面内拖船辐射噪声干扰也是严重的。因而, 改善拖曳线列阵声呐“尾向探测”性能的关键仍是抗拖船辐射噪声干扰。

对于拖线阵鱼雷报警声呐, 改善尾向探测性能是重要的, 因为像尾流自导鱼雷就是从尾向来袭的。

本文关注用 $\lambda/4$ (四分之一波长)间距阵改善拖曳阵的尾向探测性能。

讨论抗拖船噪声干扰的文献很多<sup>[1-14]</sup>。早期研究多数采用各种不同结构的自适应抵消技术来抗拖船噪声干扰<sup>[1-6,12]</sup>。稍后, 不再基于拖船噪声干扰的平面波假设, 考虑到多途模型, 一些研究者采用匹配场方法<sup>[6,9]</sup>或声屏蔽技术<sup>[7,11,14]</sup>抗拖船噪声干扰。

上述所有文献均仅讨论半波间距阵抗拖船噪声干扰问题, 其效果虽各有千秋, 但在“强干扰扇面”内效果均不理想。因而, 本文并不仔细研究“强干扰扇面”内抗拖船干扰问题。本文采用的 $\lambda/4$ 间距阵可显著改善尾向探测性能; 若采用 $\lambda/4$ 间距阵时, 文献中的各种方法将有更好的抗拖船噪声干扰的效果(与半波间距阵相较)。这是因为在各向同性干扰背景场(也称非相干噪声场)中, 半波间距空间采样被证明是最佳的(常称之为空间采样定理), 然而拖船噪声干扰场是相干的, 因而可不受空间采样定理约束, 阵元间距不必是 $\lambda/2$ , 本文指出 $\lambda/4$ 间距阵最好。

收稿日期: 2014-05-12; 修回日期: 2014-08-20

作者简介: 冯文(1990—), 女, 四川射洪人, 硕士, 研究方向为水声信号处理。

通讯作者: 赵安邦, E-mail: zhaoanbang@hrbeu.edu.cn

### 1 基本原理

一个半波间距阵，为什么在阵的尾向有“弱可探测扇面”呢？当波束指向拖船相反方向时为什么仍接收到强的拖船噪声干扰呢？其原因是半波间距阵的端向波束指向性是对称的，波束主极大指向尾向时，其波束图在拖船方向也是最大值，请见图2(a)，从而该波束接收到强的拖船噪声干扰。 $\lambda/4$ 间距阵的波束指向性是不对称的，当端射波束在尾向为最大值时，在拖船方向是指向性的零点，所以能有效抑制拖船噪声。下文将加以详述 $\lambda/4$ 间距阵对连续波单频矩形脉冲<sup>[15]</sup>(Continuous Wave, CW)信号或带限噪声的响应。

#### 1.1 $\lambda/4$ 间距阵的指向性

一个 $N$ 元均匀直线阵置于 $x$ 轴上，见图1，阵元间距为 $d$ 。一个频率为 $f$ 的CW平面波入射到基阵上，入射角为 $\theta$ 。 $\theta$ 以基阵法线为 $0^\circ$ 。 $\theta=-\pi/2$ 为拖船方向， $\theta=\pi/2$ 为“尾方向”。

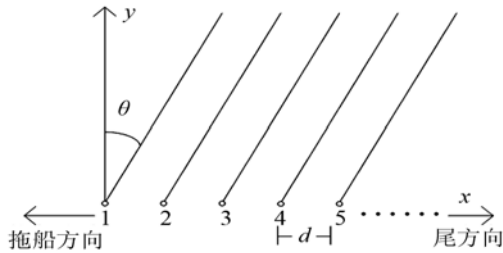


图1 水平均匀直线阵几何关系图  
Fig.1 Sketch map of a horizontal uniform linear array

由文献[16]得到的均匀直线阵常规波束的功率指向性 $D(\theta, \theta_0)$ 为

$$D(\theta, \theta_0) = \frac{\left[ \sin \left[ \frac{N\pi d}{\lambda} (\sin \theta - \sin \theta_0) \right] \right]^2}{N \sin \left[ \frac{\pi d}{\lambda} (\sin \theta - \sin \theta_0) \right]} \quad (1)$$

式中： $c$ 为声速；波长 $\lambda=c/f$ ； $\theta_0$ 为引导方位角，它即波束极大值方向，或简称波束指向； $\theta$ 为方位角； $d$ 为阵元间距； $N$ 为阵元总数；阵长 $L=(N-1)d$ 。对于 $d=\lambda/2$ ，由式(1)得到：

$$D(\theta, \theta_0) = \frac{\left[ \sin \left[ \frac{N\pi}{2} (\sin \theta - \sin \theta_0) \right] \right]^2}{N \sin \left[ \frac{\pi}{2} (\sin \theta - \sin \theta_0) \right]} \quad (2)$$

对于 $d=\lambda/4$ ，

$$D(\theta, \theta_0) = \frac{\left[ \sin \left[ \frac{M\pi}{4} (\sin \theta - \sin \theta_0) \right] \right]^2}{M \sin \left[ \frac{\pi}{4} (\sin \theta - \sin \theta_0) \right]} \quad (3)$$

式中， $N$ 或 $M$ 为阵元总数。当两种间距阵阵长相同时，有 $M=2N-1$ 。

由式(2)和式(3)得到：

$$D(-\pi/2, \pi/2)=1, \quad d=\lambda/2 \quad (4)$$

$$D(-\pi/2, \pi/2)=0, \quad d=\lambda/4, M \text{ 为偶数} \quad (5)$$

$$D(-\pi/2, \pi/2)=1/N^2, \quad d=\lambda/4, M \text{ 为奇数} \quad (6)$$

式中： $\theta_0=\pi/2$ 表示引导方位为阵尾向； $\theta=-\pi/2$ 表示拖船方向； $D(-\pi/2, \pi/2)$ 表示波束指向尾向时对拖船方向的指向性响应。式(4)表明，对于半波间距阵端向指向性是对称的，受拖船噪声干扰很严重；式(5)和式(6)表明对于 $\lambda/4$ 间距阵拖船方向的波束响应极小，可有效抑制拖船噪声干扰。

阵长相同的 $d=\lambda/2$ 及 $d=\lambda/4$ 两种阵指向性示于图2，CW信号的频率为1 kHz，给出的是7元 $\lambda/2$ 间距阵与13元 $\lambda/4$ 间距阵的指向性对比。 $\lambda/2$ 表示半波长间距，阵元数 $N=7$ ； $\lambda/4$ 表示四分之一波长间距，阵元数 $M=13$ 。由图2可见，在拖船方向，即在 $\theta=-90^\circ \pm 25^\circ$ 的扇面内， $\lambda/4$ 间距阵的指向性响应均显著低于 $d=\lambda/2$ 阵的。这表明，即使有多途角扩展， $\lambda/4$ 间距阵的抗拖船噪声干扰效果也很好，对拖船噪声干扰的抑制效果超过20 dB。

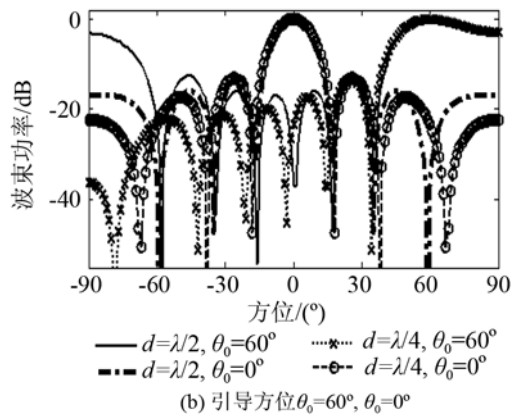
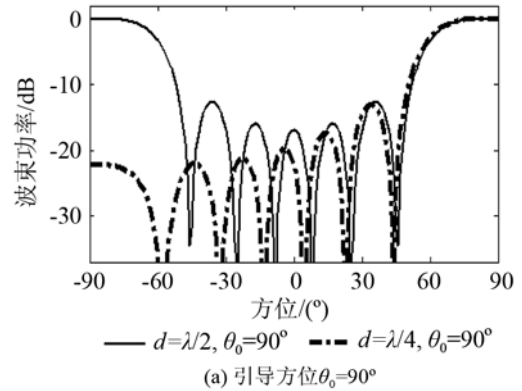


图2 波束图对比(1kHz CW信号)  
Fig.2 Comparison of beam patterns between the arrays with  $\lambda/2$  and  $\lambda/4$  intervals (1 kHz, CW signal)

可用指向性在拖船方向的响应的差值表示抗拖船噪声干扰的性能。定义：

$$\eta = 10 \lg D_{\lambda/2}(-\pi/2, \theta_0) - 10 \lg D_{\lambda/4}(-\pi/2, \theta_0) \quad (7)$$

式中， $\eta$  可以表示引导方位为  $\theta_0$  时  $\lambda/4$  间距阵的抗拖船干扰的能力。计算结果列于表 1。 $\eta$  值为正，并且其绝对值越大，说明  $\lambda/4$  间距阵的抗拖船噪声干扰的能力越强。以波束指向尾向即  $\theta_0=90^\circ$  为例， $\eta$  值是 22.3，说明  $\lambda/4$  间距阵在拖船方向即  $\theta=-\pi/2$  方向的响应比  $\lambda/2$  间距阵低 22.3 dB。 $\theta_0=-45^\circ$  时  $\eta$  值为负，这是因为在阵长相同的情况下，与  $\lambda/2$  间距阵相比， $\lambda/4$  间距阵的主波束变宽了，无抗拖船噪声能力。

表 1 波束指向不同方向时抗拖船噪声能力的  $\eta$  值表(1 kHz CW 信号)  
Table 1 Anti-interference performance ( $\eta$ ) of the array with  $\lambda/4$  intervals in different directions (1 kHz, CW signal)

| $\theta_0/^\circ$ | 90   | 60   | 30   | 0   | -45  |
|-------------------|------|------|------|-----|------|
| $\eta/\text{dB}$  | 22.3 | 32.8 | 13.0 | 5.4 | -6.0 |

注：波束指向  $\theta_0$  方向，比较 7 元  $\lambda/2$  间距阵和 13 元  $\lambda/4$  间距阵，抗拖船噪声能力  $\eta$  是两者在拖船方向  $\theta=-\pi/2$  的波束响应差值，详见式(7)。

### 1.2 $\lambda/4$ 间距阵对带限噪声的响应

拖船噪声是连续谱随机噪声，所以须在声呐工作频段内比较相同阵长、不同间距阵的响应，也就是须讨论基阵对入射带限随机噪声的响应。

一个带限随机噪声平面波投射到均匀线阵上，可以合理地假定各频率分量是相互独立的。所以波束输出的总功率是各频率分量的功率之和。式(1)为波束输出的频率为  $f$  的功率分量，据上述的功率迭加定理有：

$$D_B(\theta, \theta_0) = \int_{f_0-B}^{f_0+B} |S(f)|^2 D(\theta, \theta_0, f) df \quad (8)$$

式中： $D_B$  为基阵对带限噪声的功率指向性响应； $f_0$  为频带中心频率， $2B$  为带宽； $|S(f)|^2$  为噪声的功率谱； $D(\theta, \theta_0, f)$  是基阵的功率指向性。

假定连续谱随机噪声是带限白色的，即设：

$$|S(f)|^2 = \begin{cases} 1/2B, & f \in [-B, B] \\ 0, & \text{其余} \end{cases} \quad (9)$$

代入式(8)，得到

$$D_B(\theta, \theta_0) = \frac{1}{2B} \int_{f_0-B}^{f_0+B} D(\theta, \theta_0, f) df = \frac{1}{2B} \int_{f_0-B}^{f_0+B} \left| \frac{\sin \left[ \frac{N\pi d}{\lambda} (\sin \theta - \sin \theta_0) \right]}{N \sin \left[ \frac{\pi d}{\lambda} (\sin \theta - \sin \theta_0) \right]} \right|^2 df \quad (10)$$

可用数值积分方法计算式(10)，从而得到基阵对带限连续谱噪声的响应，也可以用蒙特卡罗的思想仿真得到基阵对带限噪声的响应，示于图 3。可以看到，理论结果与蒙特卡罗仿真结果吻合较好。

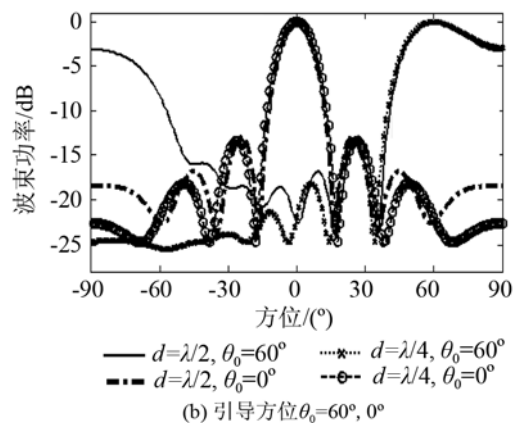
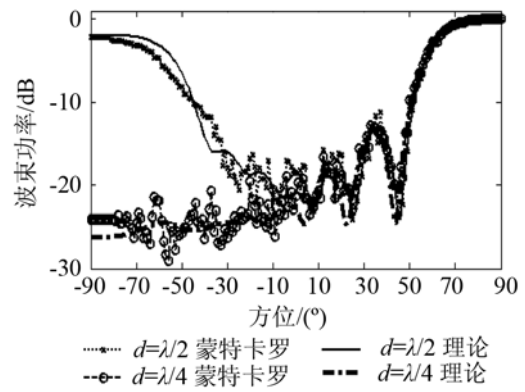


图 3 基阵对带限噪声响应对比  
Fig.3 Comparison of array's responses to band limited noise

注：带限噪声中心频率 1 kHz，带宽 200 Hz。 $\lambda/2$  表示半波长间距，阵元数  $N=7$ ； $\lambda/4$  表示四分之一波长间距，阵元数  $M=13$ 。蒙特卡罗仿真参数是：采样率 16kHz，高斯白噪声经过 128 阶 900~1100 Hz 的 FIR 带通滤波器得到带限噪声。

引导方位  $\theta_0$  不同时的抗拖船干扰的能力  $\eta$  的计算结果列于表 2。表 2 中，波束指向  $\theta_0$  方向，比较 7 元半波长间距阵和 13 元四分之一波长间距阵，抗拖船噪声能力  $\eta$  是两者在拖船方向  $\theta=-\pi/2$  的波束响应差值，详见式(7)。带限噪声中心频率 1 kHz，带宽 200 Hz。表中体现了  $\lambda/4$  间距阵抗拖船噪声干扰能力随引导方位变化的规律，与表 1 大致相符。

表 2 波束指向不同方向时抗拖船噪声能力的  $\eta$  值表(带限噪声)  
Table 2 Anti-interference performance ( $\eta$ ) of the array with  $\lambda/4$  intervals in different directions (band limited noise)

| $\theta_0/^\circ$ | 90   | 60   | 30  | 0   | -45  |
|-------------------|------|------|-----|-----|------|
| $\eta/\text{dB}$  | 24.2 | 21.4 | 8.5 | 4.0 | -2.3 |

## 2 $\lambda/4$ 间距阵结合零陷权波束形成

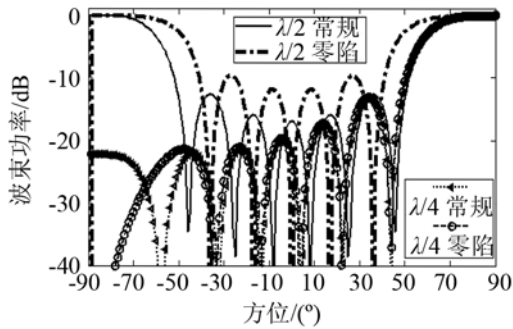
文献[11]中用零陷权波束形成方法抗拖船噪声干扰。由文献[14]得到零陷权矢量为

$$W(\theta) = \frac{Ca(\theta)}{\sqrt{a^H(\theta)Ca(\theta)}} \quad (11)$$

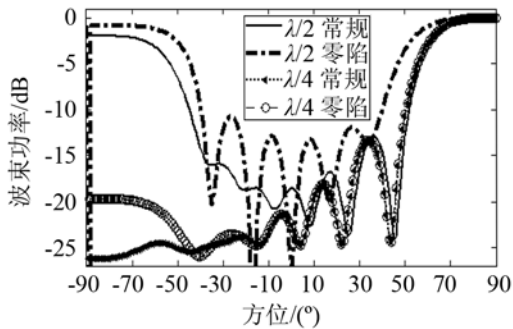
式中,  $C=I-H(H^H H)^{-1} H^H$ , 在  $C$  中  $I$  为单位矩阵,  $H=[a(\theta_1) a(\theta_2) \dots a(\theta_m)]$ ,  $\theta_i$  为第  $i$  个零陷方向,  $a(\theta)$  是阵列对  $\theta$  方向的方向矢量,  $a(\theta)=[1 e^{-j2\pi d \sin \theta/\lambda} \dots e^{-j2\pi(N-1)d \sin \theta/\lambda}]^T$ 。

阵长相同的两种不同间距阵零陷权波束形成处理前后的响应对比示于图4, 引导方向为尾方向, 零陷方向为拖船方向。图中,  $\lambda/2$  表示半波长间距, 阵元数  $N=7$ ;  $\lambda/4$  表示四分之一波长间距, 阵元数  $M=13$ 。选取  $\lambda/4$  间距阵的零陷方向为  $-90^\circ$ , 选取  $\lambda/2$  间距阵的零陷方向为  $-89^\circ$ , 这是由于  $\lambda/2$  间距阵的端向波束指向性是对称的, 在对  $-90^\circ$  方向零陷的同时也会对  $+90^\circ$  方向零陷。

可见, 与  $\lambda/2$  间距阵相比, 对于 CW 信号, 波束零陷的  $\lambda/4$  间距阵在  $\theta=-90^\circ \pm 25^\circ$  的扇面具有更低的波束响应; 对于带限噪声, 未零陷加权的  $\lambda/4$  间距阵在该扇面内具有更低的波束响应, 这是带内各频点对应波束输出功率叠加的结果, 改换零陷方向到  $-70^\circ$  的波束输出结果见图5(b), 可以看出零陷权波束形成仅能抑制零陷方向入射的噪声干扰, 并且以牺牲其他方向的噪声抑制能力为代价。而  $\lambda/2$  间距阵始终具有对称端向指向性轮廓, 无法有效抑制  $\theta=-90^\circ \pm 25^\circ$  的扇面内的拖船噪声干扰, 仅能抑制  $-89^\circ$  即零陷方向入射的噪声干扰。



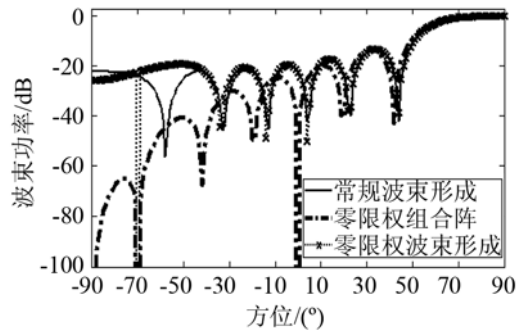
(a) 1 kHz CW信号



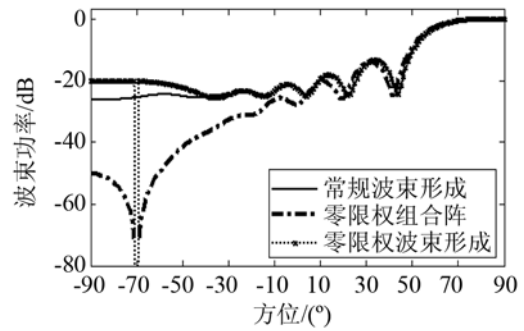
(b) 中心频率为1 kHz、带宽为200 Hz的带限噪声

图4 零陷权波束形成基阵响应对比

Fig.4 Comparison of array's responses between regular beam-forming and null beam-forming



(a) 1 kHz CW信号



(b) 中心频率为1 kHz、带宽为200 Hz的带限噪声

图5 零陷权组合阵波束响应对比( $\lambda/4$ 间距阵)

Fig.5 Beam patterns' comparison of regular beam-forming with the array consisting of combined sensors with null beam pattern (for  $1/4$  wavelength interval array)

### 3 $\lambda/4$ 间距零陷权组合阵

图6给出了  $\lambda/4$  间距零陷权组合阵的框图, 零点方位为  $\theta_z$ , 即当信号从  $\theta=\theta_z$  方向入射, 由于相邻阵元间插入了时延  $\tau_z$ , 使得两路信号的相位差为  $\pi$ , 反相叠加, 输出为零。插入时延  $\tau_z$ , 等价于插入相移  $2\pi f \tau_z$ , 考虑引导方位  $\theta_0$ , 则:

$$\frac{2\pi f d \sin \theta}{c} \Big|_{\theta=\theta_z} - \frac{2\pi f d \sin \theta_0}{c} + 2\pi f \tau_z = \pi \quad (12)$$

$$\tau_z = 1/(2f) - d \sin \theta_z / c + d \sin \theta_0 / c \quad (13)$$

相邻阵元形成的的心形指向性为

$$D(\theta, \theta_0) = \sin^2 \left[ \frac{\pi d}{\lambda} (\sin \theta - \sin \theta_z) \right] \quad (14)$$

$M$  元均匀阵列阵功率指向性示于式(1)和式(3)。

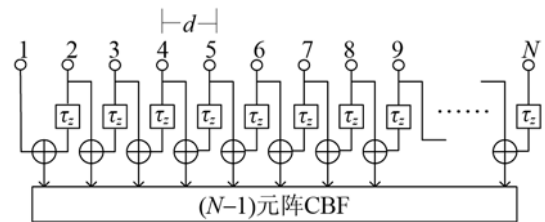


图6 零陷权组合阵框图

Fig.6 Block diagram of the combined sensors with null beam pattern

由指向性乘积定理得组合阵的功率指向性为:

$$D(\theta, \theta_0) = \frac{\left| \sin \left[ \frac{(N-1)\pi d}{\lambda} (\sin \theta - \sin \theta_0) \right] \right|^2}{(N-1) \sin \left[ \frac{\pi d}{\lambda} (\sin \theta - \sin \theta_0) \right]} \times \sin^2 \left[ \frac{\pi d}{\lambda} (\sin \theta - \sin \theta_z) \right] \quad (15)$$

阵元数  $N$  较小时, 取  $N$  为奇数较好, 此时  $(N-1)$  为偶数。由于  $\lambda/4$  间距阵在  $\theta = -90^\circ$  方向已有零点, 所以心形零点  $\theta_z$  应设置在角扩展扇面内的另外位置, 如  $\theta_z = -70^\circ$ 。

$\lambda/4$  间距零陷权组合阵对 CW 信号和带限噪声的响应示于图 5。图中, 引导方位  $90^\circ$ , 零陷方位  $-70^\circ$ , 阵元数  $M=13$ 。可见, 在相同阵元数目的情况下,  $\lambda/4$  间距零陷权组合阵不仅在角扩展扇面内对拖船辐射噪声的抑制优于常规  $\lambda/4$  间距阵和零陷权波束形成的  $\lambda/4$  间距阵, 而且在其他方位也具有更低的波束旁瓣。

## 4 结 论

本文关注的是改善拖线阵声呐的尾向探测性能, 本文方法不能改善“强干扰扇面”内的探测能力。理论分析与仿真研究均表明, 四分之一波长间距阵具有非对称端向指向性, 与半波长间距阵相比有约 20 dB 的空间抑制能力, 能有效抑制拖船噪声干扰。用零陷权组合传感器构成四分之一波长间距阵, 理论上其抗拖船辐射噪声干扰效果比四分之一波长间距阵更好, 改善了除强干扰扇面以外的所有方位的探测能力。不过, 在固定孔径的前提下, 采用四分之一波长间距阵来提高声呐的尾向探测性能是以增加硬件规模和成本为代价的。

## 参 考 文 献

- [1] 姜达. 基于矢量水听器自适应本舰噪声抵消技术研究[D]. 西安: 西北工业大学, 2006, 44-59.  
JIANG Da. Adaptive vessel noise canceling based on towed vector sensors[D]. Xi'an: Northwestern Polytechnical University, 2006, 44-48.
- [2] Widrow B, Glover Jr J R, McCool J M, et al. Adaptive noise canceling: Principles and applications[J]. Proceedings of the IEEE, 1975, 63(12): 1692-1716.
- [3] Godara L C. Postbeamformer interference canceller with improved performance[J]. J. Acoust Soc Am., 1989, 85(1): 202-213.
- [4] 刘本奇, 杜选民. 逆波束形成拖船噪声抵消[C]// 中国声学学会, 2007 年全国水声学学术会议论文集. 郑州: 中国声学学会, 2007, 154-156.  
LIU Benqi, DU Xuanmin. Tow ship noise cancellation based on the IBF method[C]// Acoustical Society of China, Conference proceedings on underwater acoustics 2007. Zhengzhou: Acoustical Society of China, 2007, 154-156.
- [5] 童立, 马远良, 鄢社峰, 等. 拖曳双阵线阵相减处理对本舰噪声的抑制作用[C]// 中国声学学会, 2001 年全国水声学学术会议论文集. 大同: 中国声学学会, 2001, 88-90.  
TONG Li, MA Yuanliang, YAN Shefeng, et al. Suppression of tow-ship radiated noise by subtract processing for a towed twin-line array[C]// Acoustical Society of China, Conference proceedings on underwater acoustics 2001. Datong: Acoustical Society of China, 2001, 88-90.
- [6] 杨坤德, 马远良. 匹配场噪声抑制的稳健方法[J]. 兵工学报, 2005, 26(6): 746-750.  
YANG Kunde, MA Yuanliang. Robust matched field noise suppression[J]. Acta Armamentarii, 2005, 26(6): 746-750.
- [7] 马敬广, 余赟, 滕超, 等. 声屏蔽技术抗拖船干扰[J]. 应用声学, 2010, 29(6): 449-457.  
MA Jingguang, YU Yun, TENG Chao, et al. Tow-vessel noise suppression using acoustic covering[J]. Applied Acoustics, 2010, 29(6): 449-457.
- [8] Zhang B. A novel algorithm for the canceling of broadband multi-path interference[C]// Computer Science and Engineering, 2009. WCSE'09. Second International Workshop on. IEEE, 2009, 2: 285-288.
- [9] 杨坤德, 马远良, 邹士新, 等. 拖线阵声呐的匹配场后置波束形成干扰抵消方法[J]. 西北工业大学学报, 2004, 22(5): 576-580.  
YANG Kunde, MA Yuanliang, ZOU Shixin, et al. Matched field postbeamformer interferences canceling method for towed array[J]. Journal of Northwestern Polytechnical University, 2004, 22(5): 576-580.
- [10] 张宾, 孙长瑜, 孙贵青. 基于经验模式分解的拖曳式声呐拖船噪声抵消研究[J]. 应用声学, 2007, 26(2): 68-73.  
ZHANG Bin, SUN Changyu, SUN Guiqing. Tow ship noise cancellation using empirical mode decomposition[J]. Applied Acoustics, 2007, 26(2): 68-73.
- [11] 曹涛, 康春玉. 零陷波束形成器抑制拖船噪声研究[C]// 中国声学学会, 中国声学学会第九届青年学术会议论文集. 广州: 中国声学学会, 2011, 217-218.  
CAO Tao, KANG Chunyu. Research on null steering beamformer for tow ship noise canceling[C]// Chinese acoustic association. Papers of national conference on acoustics in 2011. Guangzhou: Acoustical Society of China, 2011, 217-218.
- [12] 李磊, 高洁, 吴克桐, 等. 一种基于矢量拖曳阵的拖船干扰抵消算法[J]. 声学技术, 2009, 28(5): 582-585.  
LI Lei, GAO Jie, WU Ketong, et al. A towed ship interference canceling algorithm for vector sensor line array[J]. Technical Acoustics, 2009, 28(5): 582-585.
- [13] Tuladhar S R, Buck J R. Optimum array design to maximize Fisher information for bearing estimation[J]. J. Acoust. Soc. Am., 2011, 130(5): 2797-2806.
- [14] 梅继丹, 惠俊英, 王逸林, 等. Bartlett 波束形成的波束零陷权设计[J]. 哈尔滨工程大学学报, 2008, 29(12): 1315-1318.  
MEI Jidan, HUI Junying, WANG Yilin, et al. Designing null-forming weights based on Bartlett beam forming[J]. Journal of Harbin Engineering University, 2008, 29(12): 1315-1318.
- [15] 田坦. 声呐技术[M]. 2 版. 哈尔滨: 哈尔滨船舶工程学院出版社, 2009: 31.  
TIAN Tan. Sonar Technology[M]. Second Edition. Harbin: Harbin Engineering University Press, 2009: 31.
- [16] 尤立克 R J. 水声原理[M]. 洪申译, 哈尔滨: 哈尔滨船舶工程学院出版社, 1990: 41-43.  
Urick R J. Principles of underwater sound[M]. New York: McGraw-Hill Book Company, 1975: 49-52.