

doi:10.3969/j.issn.1006-7043.2010.07.006

声矢量传感器线阵的左右舷分辨

孙贵青, 张春华, 黄海宁, 李启虎

(中国科学院声学研究所, 北京 100190)

摘要: 声矢量传感器由声压传感器和惯性传感器复合而成, 可同时测量声场一点处的声压标量和质点振速矢量的各正交分量, 为解决传统声压水听器线阵固有的左右舷模糊难题提供了新的方法和手段. 利用声矢量传感器线阵指向性函数研究了3种常规波束形成器的左右舷抑制比, 然后简要分析了MVDR波束形成器的左右舷抑制比. 理论分析和海试结果均表明: 1) 左右舷抑制比除了都不可避免地与信噪比有关之外, 相比于具有一定左右舷分辨能力的声压水听器多线阵和三元组声压水听器线阵, 声矢量传感器线阵的左右舷分辨性能主要取决于与频率无关的矢量传感器阵元指向性; 2) 声矢量传感器线阵MVDR波束形成器的左右舷分辨性能大大优于常规波束形成器.

关键词: 声矢量传感器线阵; 左右舷分辨; 波束形成

中图分类号: TN911.7 **文献标志码:** A **文章编号:** 1006-7043(2010)07-0848-08

Left-right resolution of acoustic vector sensor line arrays

SUN Gui-qing, ZHANG Chun-hua, HUANG Hai-ning, LI Qi-hu

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

Abstract: An acoustic vector sensor (AVS) combines a pressure hydrophone with inertial sensors. It can simultaneously measure pressure scalar and orthogonal components of a particle velocity vector at a given point in a sound field. This provides new methods and means for solving left/right ambiguities intrinsic in pressure hydrophone linear arrays. In this paper, we first studied the left-to-right suppression ratio (LRSR) of the three conventional beamformers using an AVS line array's directivity functions. The LRSR was then briefly analyzed for a minimum variance distortionless response (MVDR) beamformer. Both theoretical analysis and results from sea trials showed that the LRSR significantly relates to the signal-to-noise ratio (SNR), but mostly rests with directivity of the AVS array element. This contrasts with multi-line and triplet arrays, which possess more or less certain left-right resolution. In addition, the LRSR of an MVDR beamformer for an AVS line array significantly excels those of conventional beamformers.

Keywords: acoustic vector sensor line array; left-right resolution; adaptive beamforming

自1917年出现拖线阵雏形以来, 历经约一个世纪的发展, 其在声呐中的地位已被普遍认可^[1-2]. 拖线阵是将水听器和相关配套的放大滤波甚至连同数据采集和传输等电子设备封装在塑料软管中, 由拖

缆在水中拖曳的声阵. 随着技术的不断更新发展, 拖线阵软管直径由早先的粗缆变成现今的细缆(缆径约30 mm)和超细缆(缆径约8 mm); 由早期模拟器件构成的模拟缆发展成更为先进的数字缆和光纤缆; 水听器阵元由最初的常规压电陶瓷声压水听器衍生出声矢量传感器和光纤水听器. 拖线阵声呐设计是一个综合权衡的过程, 根据声呐技术指标要求需要对声呐参数指标进行优化组合, 如噪声或干扰背景下的检测增益、定向/定距/定深三维定位性能

收稿日期: 2010-05-16.

基金项目: 国家安全重大基础研究基金资助项目(613110010201, 613660201).

作者简介: 孙贵青(1971-), 男, 副研究员, 博士, E-mail: gui_qing_sun@yahoo.com.cn;

李启虎(1937-), 男, 博士生导师, 中国科学院院士.

通信作者: 孙贵青.

以及左右舷分辨能力等. 在传统的被动拖线阵声呐设计中对左右舷分辨性能要求并不高,一般通过本舰机动改变舷角来分辨目标是来自左舷还是右舷,通常需要几分钟到十几分钟的时间. 随着现代潜艇隐身技术的进步,潜艇辐射噪声已经与海洋环境噪声相当甚至更低,主/被动拖线阵声呐应运而生,它的一个基本要求是在单次声脉冲发射之后需要立即知晓目标的左右舷信息以提高反潜效率. 由于存在固有的左右舷模糊,由传统声压水听器构成的拖曳单线阵不能胜任这样的任务. 目前已有的具有实时左右舷分辨能力的3类主要拖线阵声呐分别是美国的以拖曳双线阵(twinline)^[3]和拖曳三线阵(triline)等代表的拖曳多线阵 multiline,即在船后平行拖曳多条声压水听器细线阵,利用目标到达每条线阵上的时延差进行左右舷分辨;法国、德国和荷兰发展的三元组水听器拖曳单线阵(triplet array)^[4],即由在软管圆周上均匀分布的3个水听器构成的三元组水听器阵元(triplet)替换单个水听器阵元,使得单个阵元具有指向性,可以分别形成左舷波束和右舷波束,缆径较粗,外径一般可达90~100mm,工作频率下移缆径随之增大;声矢量传感器拖曳单线阵^[5]不但汇集了上述2类声呐的优点,如单线阵、有指向性的阵元,较细的缆径(外径一般为40~60mm),而且具有更强的检测性能,已被列入未来拖线阵声呐发展的重点之一. 因此将其作为文章的主要对象,从理论分析和海试结果2方面研究声矢量传感器线阵的左右舷分辨能力.

拖线阵声呐信号处理一般可分为本舰噪声和拖曳噪声抵消、阵形估计和补偿、左右舷分辨等. 本舰噪声是拖曳平台本身的辐射噪声,对端射附近扇面的警戒有较大影响;拖曳噪声包含湍流边界层激励的流噪声和缆的抖动噪声,对水听器测量微弱信号有较大影响. 拖线阵作为柔性阵,拖曳过程阵形不可能保持理想的直线状态,如何估计阵形并在后置处理中进行补偿在一些要求连续稳定跟踪的机动过程中显得尤为重要. 然而,上述这些问题均不是本文所要研究的内容,感兴趣的读者可参见相关文献[6-7]. 文中所关注的问题主要涉及到拖线阵左右舷分辨能力. 双线阵和三元组单线阵是最早提出并付诸实施的2种方案^[3,4],国内随后开展的一些研究工作进一步深入剖析了这些方案. 文献[8]分析了三元

组单线阵的左右舷分辨原理和性能,并给出了相应算法和试验结果. 文献[9-10]研究了双线阵左右舷分辨原理和性能,并给出了多种实现算法. 在此基础上,文献[6]通过双线阵指向性函数和左右舷抑制比研究给出了拖曳双线阵左右舷分辨的2个关键参量——特征频率和特征方位,并分析了双线阵对应阵元存在错位时的阵形畸变对左右舷分辨性能的影响. 文献[11]重点综述了双线阵和三元组单线阵的左右舷分辨,对矢量传感器线阵左右舷分辨的潜力有所期待. 文献[12]通过对MVDR波束形成器的研究,指出了矢量传感器线阵左右舷分辨潜力. 文献[13]在试验中验证了矢量传感器线阵各种常规波束形成器和自适应波束形成器对左右舷分辨性能的影响. 文献[14]随后进一步理论推导了矢量传感器线阵波束形成器和左右舷抑制比之间的解析关系,并得到了试验验证. 在此尝试对矢量传感器线阵左右舷分辨原理和性能进行全面的总结和归纳,作为下一阶段研究的基础.

1 理论基础

有关矢量传感器线阵的研究成果散见于诸多文献之中,为便于叙述和保持文章结构的合理性,本节首先总结性地给出声矢量传感器线阵的3种常规波束形成器和MVDR波束形成器,然后再根据左右舷抑制比的定义进行左右舷分辨的性能推导和分析,并给出了一些常用公式和图表以方便读者参考引用和进一步的深入研究.

1.1 波束形成器

根据似然比准则不难推导出矢量传感器线阵的Cardioid常规波束形成器^[13]:

$$\mathbf{D} = \mathbf{g}^H \mathbf{R} \mathbf{g}. \quad (1)$$

式中: $\mathbf{R}$ 为线阵接收数据的协方差矩阵,方向扫描向量 $\mathbf{g} = \mathbf{e} \otimes \mathbf{u}$,符号 $\otimes$ 表示Kronecker积, $\mathbf{e}^T = [1 \ e^{-i\omega\tau_0} \ \dots \ e^{-i\omega\tau_{M-1}}]$ 为单频平面波的方向扫描向量,时延 $\tau = \tau(\phi, \theta)$,与 x 轴的夹角 $\phi \in [0, 2\pi]$,与 z 轴的夹角 $\theta \in [0, \pi]$, $\mathbf{u}^T = [1 \ \cos\phi \sin\theta \ \sin\phi \sin\theta \ \cos\theta]$ 为声矢量传感器阵元4个通道的指向性函数或方向扫描向量. 忽略质点振速垂直分量,可得Cardioid常规波束形成器的指向性函数:

$$B_{\text{Cardioid}}(\phi) = \left| \frac{\sin[N\pi \frac{d}{\lambda}(\cos\phi - \cos\phi_0)]}{N \cdot \sin[\pi \frac{d}{\lambda}(\cos\phi - \cos\phi_0)]} \right|.$$

$$\left[\frac{1 + \cos(\phi - \phi_0)}{2} \right]^2. \quad (2)$$

式中: N 为阵元数, d 为阵元间距, ϕ 为波束扫描角度, ϕ_0 为信号方位角. 为方便推导左右舷抑制比, 一般假设端射为 0° . 因其单阵元具有心形指向性 $\left[\frac{1 + \cos(\phi - \phi_0)}{2} \right]^2$, 故将式(2)称为 Cardioid 常规波束形成器.

矢量传感器一般由声压水听器和质点振速传感器构成^[15-16], 因此根据矢量传感器内部各传感器所测物理量可将式(1)展开为声压、质点振速和声能流3项^[17]:

$$D = \frac{1}{4} \mathbf{e}^H \mathbf{R}_{pp} \mathbf{e} + \frac{1}{4} \mathbf{g}_v^H \mathbf{R}_{vv} \mathbf{g}_v + \frac{1}{2} \mathbf{e}^H \text{Re}[\mathbf{R}_{pv}] \mathbf{g}_v. \quad (3)$$

式中: $\mathbf{R}_{pp}$ 、 $\mathbf{R}_{vv}$ 和 $\text{Re}[\mathbf{R}_{pv}]$ 分别为声压、振速和声能流的协方差矩阵; $\mathbf{g}_v = \mathbf{e} \otimes \mathbf{u}_v$, $\mathbf{u}_v^T = [1 \quad \cos \phi \sin \theta \quad \sin \phi \sin \theta \quad \cos \theta]$. 式(3)表明, 声矢量传感器线阵 Cardioid 常规波束形成器既包含了传统的声压常规波束形成器以及振速常规波束形成器, 又含有前两者合成所得的声能流波束形成器. Cardioid 常规波束形成器的展开式第1项就是常见的声压线阵常规波束形成器, 简称声压常规波束形成器:

$$D_p = \mathbf{e}^H \mathbf{R}_{pp} \mathbf{e}; \quad (4)$$

第2项是质点振速常规波束形成器:

$$D_v = \mathbf{g}_v^H \mathbf{R}_{vv} \mathbf{g}_v; \quad (5)$$

第3项是声能流常规波束形成器:

$$D_l = \mathbf{e}^H \text{Re}[\mathbf{R}_{pv}] \mathbf{g}_v. \quad (6)$$

前2项均属于能量检测器的范畴, 只是后者阵元有偶极子指向性而已, 而声能流检测器可以视为互相关检测器, 但细节上有所区别. 由上述分析可知, Cardioid 常规波束形成器本质上由这3种基本的常规波束形成器线性组合而得; 当然, 由它们还可以衍生出其他形式的波束形成器^[18-19], 如

$$d = \frac{1}{2} \mathbf{g}_v^H \mathbf{R}_{vv} \mathbf{g}_v + \frac{1}{2} \mathbf{e}^H \text{Re}[\mathbf{R}_{pv}] \mathbf{g}_v. \quad (7)$$

式(7)的空间增益、波束图等性能主要由质点振速常规波束形成器和声能流常规波束形成器所控制. 限于篇幅, 文中重点研究 Cardioid 及其3种基本常规波束形成器的左右舷分辨能力.

在多目标或多干扰环境下, 常规波束形成器的表现难尽人意. 为了最大限度地抑制干扰, 依据最大信干比准则可得矢量传感器线阵的 Cardioid 自适应波束形成器^[12]:

$$D = \mathbf{w}^H \mathbf{R} \mathbf{w}. \quad (8)$$

式中: $\mathbf{w} = \frac{\mathbf{R}^{-1} \mathbf{g}}{\mathbf{g}^H \mathbf{R}^{-1} \mathbf{g}}$ 为自适应波束形成器的权向量. 实际使用较多的自适应波束形成器是 MVDR 波束形成器的一些变种, 文中使用对角加载 MVDR 波束形成器进行数据处理以增加矩阵求逆运算的稳定性.

自 Capon^[20] 首次提出以来, 历经四十几年的发展, 随着宽容性和稳健性的显著提高, 自适应波束形成器逐渐加入到声呐信号处理主流中, 尤其是针对近岸浅海等复杂环境下的一些处理, 从传统的平面波抵消到匹配场干扰抑制, 无不体现出自适应波束形成器的优势. 尽管还存在一些失配问题, 但瑕不掩瑜. 即便如此, 适当兼顾稳健性, 也会获得优于常规波束形成器的处理效果, 况且自适应处理技术本身也处于不断发展完善的过程中; 因此, 只要根据实际情况适时合理地采用自适应波束形成器, 就可以达到事半功倍之效. 文中矢量传感器线阵的海试结果在一定程度上验证了这一点. 此外, 三元组水听器拖线阵的海试结果也表明自适应波束形成器确实有效地提高了左右舷分辨的性能^[21]. 这在某种程度上体现了一种技术发展的趋势.

1.2 左右舷抑制比

利用声矢量传感器线阵不同波束形成器表达式, 根据左右舷抑制比的定义^[9]可以得到不同波束形成器的左右舷抑制比表达式. 一般将指向性函数直接表示的左右舷抑制比称为无噪声的左右舷抑制比:

$$\eta(\phi_0) = \left| \frac{B(\phi)}{B(-\phi)} \right|_{\phi=\phi_0}^2 = \frac{|\mathbf{w}_+^H \mathbf{R}_s \mathbf{w}_+|_{\phi=\phi_0}}{|\mathbf{w}_-^H \mathbf{R}_s \mathbf{w}_-|_{\phi=-\phi_0}}. \quad (9)$$

式中: $\mathbf{R}_s$ 表示信号协方差矩阵, 下标“+”表示水平方位角真值, “-”表示水平方位角的镜像值(相对 0° 端射对称的水平方位角). 由此定义式可得一些常用的左右舷抑制比表达式, 如表1所示.

表 1 典型线阵指向性函数和左右舷抑制比汇总表
Table 1 Directional functions and LRSRs of typical line arrays

波束形成器	指向性函数	左右舷抑制比
声压单线阵	$B(\phi, \phi_0)$	1
声压双线阵	$B(\phi, \phi_0) \cdot \cos\left[\pi \frac{D}{\lambda}(\sin \phi - \sin \phi_0)\right]$	$\left[\cos\left(2\pi \frac{D}{\lambda} \sin \phi_0\right)\right]^{-2}$
声压三线阵	$B(\phi, \phi_0) \cdot \left\{1 - \frac{4}{3} \sin^2\left[\pi \frac{D}{\lambda}(\sin \phi - \sin \phi_0)\right]\right\}$	$\left[1 - \frac{4}{3} \sin^2\left(2\pi \frac{D}{\lambda} \sin \phi_0\right)\right]^{-1}$
CBF 声压多线阵	$B(\phi, \phi_0) \cdot \frac{\sin\left[M\pi \frac{r}{\lambda}(\sin \phi - \sin \phi_0)\right]}{M \cdot \sin\left[\pi \frac{r}{\lambda}(\sin \phi - \sin \phi_0)\right]}$	$\left[\frac{\sin\left(2M\pi \frac{D}{\lambda} \sin \phi_0\right)}{M \cdot \sin\left(2\pi \frac{D}{\lambda} \sin \phi_0\right)}\right]^2$
声矢量线阵振速	$B(\phi, \phi_0) \cdot \cos^2(\phi - \phi_0)$	$[\cos(2\phi_0)]^{-2}$
声矢量线阵 Cardioid	$B(\phi, \phi_0) \cdot \left[\frac{1 + \cos(\phi - \phi_0)}{2}\right]^2$	$\left[\frac{1 + \cos(2\phi_0)}{2}\right]^{-2}$
声矢量线阵声能流	$B(\phi, \phi_0) \cdot \cos^2(\phi - \phi_0) $	$ \cos(2\phi_0) ^{-1}$
ABF 声压双线阵	-	$1 + 2N \cdot \text{SNR} \cdot \left[1 - \cos^2\left(2\pi \frac{D}{\lambda} \sin \phi_0\right)\right]$
ABF 声矢量线阵 Cardioid	-	$1 + 2N \cdot \text{SNR} \cdot \left[1 - \left(\frac{1 + \cos 2\phi_0}{2}\right)^2\right]$

注: $\frac{\sin\left[N\pi \frac{d}{\lambda}(\cos \phi - \cos \phi_0)\right]}{N \cdot \sin\left[\pi \frac{d}{\lambda}(\cos \phi - \cos \phi_0)\right]}$ 为声压水听器单线阵的指向性函数, d 表示阵元间距, D 表示 2 条水平线阵之间的间距。

1.2.1 左右舷抑制比估计与信噪比之间的关系

实际上,声呐进行左右舷抑制比计算不可避免地会受到噪声的影响,左右舷抑制比估计 $\hat{\eta}$ 一般由式(10)完成:

$$\hat{\eta}(\phi_0) = \frac{|\mathbf{w}_+^H \mathbf{R} \mathbf{w}_+|_{\phi=\phi_0}}{|\mathbf{w}_-^H \mathbf{R} \mathbf{w}_-|_{\phi=-\phi_0}} \quad (10)$$

式中: $\mathbf{R} = \mathbf{R}_s + \mathbf{R}_n$ 为数据协方差矩阵, $\mathbf{R}_n$ 为噪声协方差矩阵. 因此,式(10)在估计左右舷抑制比时考虑到信噪比的影响.

令 $\mathbf{w} = \mathbf{g}$, 则可得 Cardioid 常规波束形成器的左右舷抑制比估计 $\hat{\eta}$:

$$\hat{\eta}^{-1} = \frac{N \cdot \text{SNR}}{N \cdot \text{SNR} + 1} \cdot \eta^{-1} + \frac{1}{N \cdot \text{SNR} + 1} \quad (11)$$

式中: $\text{SNR} = \frac{\sigma_s^2}{\sigma_n^2}$ 为信噪比, σ_s^2 为信号功率, σ_n^2 为噪声功率, η 为无噪声的左右舷抑制比. 由式(11)可得,在高信噪比($\text{SNR} \gg 1$)情况下, $\hat{\eta} \approx \eta$; 低信噪比($\text{SNR} \ll 1$)时, $\hat{\eta} \approx 1$, 即无法区分左右舷目标. 此结论对任何常规波束形成器的左右舷抑制比都成立.

1.2.2 自适应波束形成器的左右舷抑制比

为简便计算,重点推导单源情况下 MVDR 波束形成器的左右舷抑制比通用表达式. 单源情况下所推导的公式和图具有一定的典型性. 多源情况和对角加载对自适应波束形成器左右舷抑制比的影响详细推导可参见文献[14]. 单源和多源情况、对角加载与否除了极个别的细节稍有出入之外,其左右舷抑制比基本相同. 单源情况下, N 元声压水听器线阵 MVDR 波束形成器的左右舷抑制比为

$$\hat{\eta} = 1 + N \cdot \text{SNR} \cdot (1 - \eta^{-1}). \quad (12)$$

式中: η 为常规波束形成器的无噪声左右舷抑制比,具体形式可参见表 1. 注意到,式(12)始终为正数且最小值为 1. 对照式(13)、(14),式(12)的表示形式具有一定的普遍性,细微区别在于一些参量数值的选取上. 举 2 个常用的例子.

例 1 N 元声矢量传感器线阵 Cardioid 的无对角加载 MVDR 波束形成器的左右舷抑制比为

$$\hat{\eta} = 1 + 4N \cdot \text{SNR} \cdot \left[1 - \left(\frac{1 + 3\cos 2\phi_0}{4}\right)^2\right]. \quad (13)$$

式(13)表明,矢量传感器线阵左右舷抑制比与频率无关,这是缘于矢量传感器阵元指向性与频率无关的特性。

例2 声压水听器双线阵(2条 N 元声压水听器线阵)的无对角加载MVDR波束形成器的组左右舷抑制比为

$$\hat{\eta} = 1 + 2N \cdot \text{SNR} \cdot \left[1 - \cos^2 \left(2\pi \frac{D}{\lambda} \sin \phi_0 \right) \right]. \quad (14)$$

式(14)表明,声压水听器线阵左右舷抑制比与频率有关.当 $D = \frac{\lambda}{4}$ (λ 为线阵工作中心频率所对应的波长)时,即最优阵间距情况下,声压水听器双线阵在正横方向上($\phi_0 = 0^\circ$)具有最佳的左右舷分辨性能(如图1所示);当 $D = \frac{\lambda}{2}$ 时,声压水听器双线阵在 $\phi_0 = \pm 30^\circ$ 和 $\phi_0 = \pm 150^\circ$ 处得到最佳的左右舷分辨效果,而在 $\phi_0 = 0^\circ$ 和 $\phi_0 = \pm 90^\circ$ 处无法分辨左右舷。

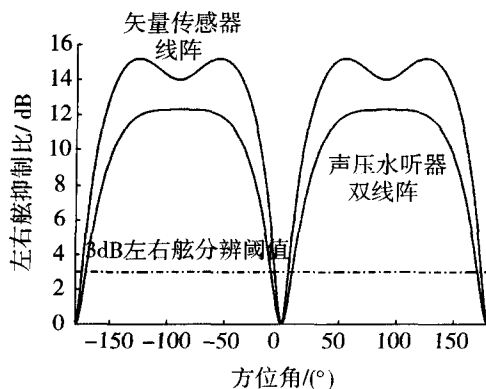


图1 声矢量传感器线阵和声压水听器双线阵MVDR波束形成器左右舷抑制比

Fig. 1 LRSR comparison between MVDR beamformers for AVS line array and hydrophone twin-line array

由式(13)、(14)可分别计算得声矢量传感器线阵和声压水听器双线阵MVDR波束形成器左右舷抑制比.已知单位带宽内信噪比0 dB,8元声矢量传感器线阵和2条8元线阵构成的声压水听器双线阵,结果如图1所示.声压水听器双线阵仅计算了两阵间距 $D = \frac{\lambda}{4}$ 的情况.由图1可知,矢量传感器线阵左右舷分辨效果稍优于声压水听器双线阵至少2 dB,若按照3 dB左右舷分辨阈值,则矢量传感器

左右舷可分辨的方位扇面应大于声压水听器双线阵.但必须注意到,当 $D \neq \frac{\lambda}{4}$ 或频率降低时声压水听器双线阵左右舷分辨能力都或多或少地退化,尽管也存在能使左右舷抑制比最大化的特征频率和特征方位^[6],但总体而言,矢量传感器线阵的左右舷分辨性能优于声压水听器双线阵,除了2个端射方位(0° 和 180°)之外(端射处的左右舷分辨问题转化为前后艏艉分辨,即使是声压水听器单线阵也能够很好地解决此问题).因此,矢量传感器线阵具有水平 360° 全景方位无模糊分辨能力,且与频率无关(见公式(13)).

2 海上试验数据分析

2003年3~4月在三亚海域进行了8元声矢量传感器线阵海上试验,阵元间距1 m.试验使用一艘水面船和一艘水下航行器2个合作目标进行方位交汇,图2给出了整个试验过程矢量传感器线阵自适应波束形成器的方位历程显示.根据图2和理论结果选取3个典型方位,端射附近 28° 、 45° 和正横附近 87° 的数据重点研究矢量传感器线阵常规波束形成器左右舷分辨效果,即Cardioid、质点振速和声能流3种常规波束形成器.

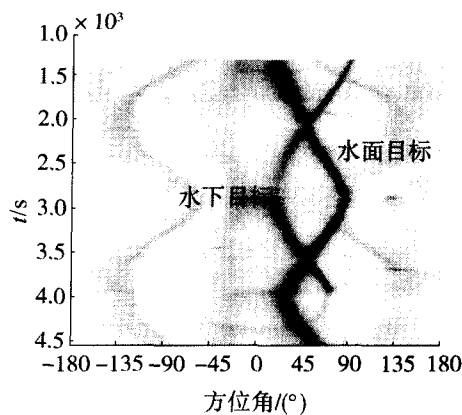
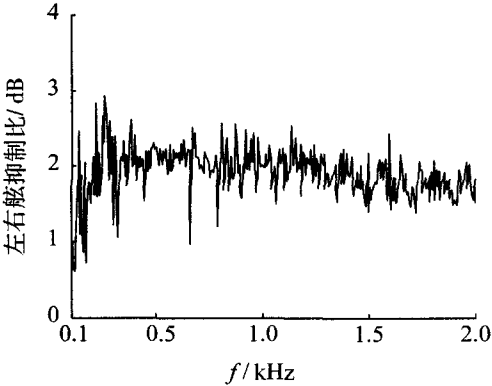


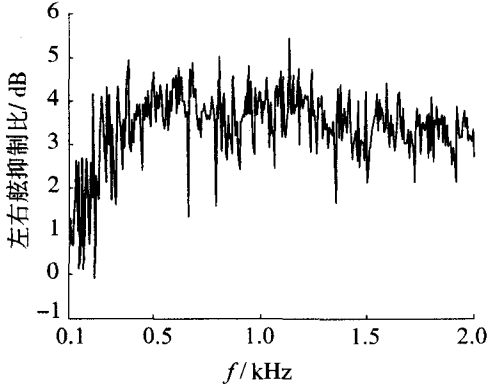
图2 方位交叉分辨的BTR显示

Fig. 2 BTR display for bearing crossing

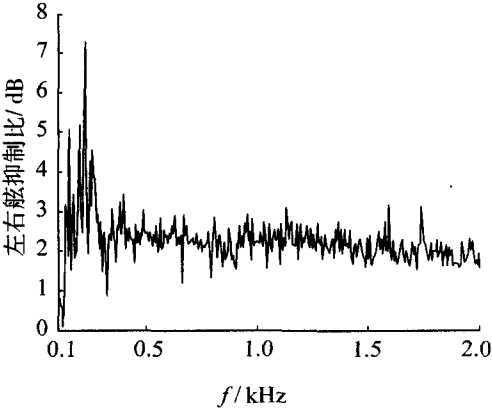
图3分别给出端射附近 28° 时Cardioid(a)、质点振速(b)和声能流(c)3种常规波束形成器的左右舷抑制比与频率的关系.此时,这3种常规波束形成器的左右舷抑制比一般在2~4 dB,质点振速相对好一些,其他2个基本相当.这主要因为质点振速的波束相对其他2个较窄一些。



(a) Cardioid的左右舷抑制比



(b) 质点振速的左右舷抑制比



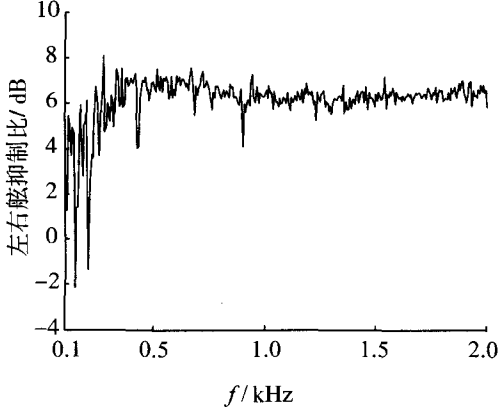
(c) 声能流的左右舷抑制比

图 3 水平方位角 28°时左右舷抑制比与频率的关系

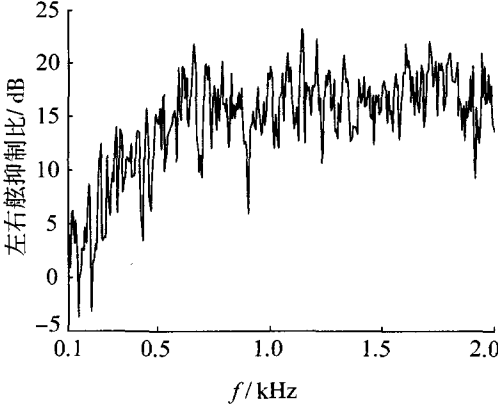
Fig. 3 LRSR vs frequency when azimuth 28°

图 4 分别给出 45°时 Cardioid(a)、质点振速(b)和声能流(c)3 种常规波束形成器的左右舷抑制比与频率的关系. 质点振速的左右舷抑制比最大,一般分布在 15 dB 附近,因为理论上在 45°时质点振速常规波束形成器左右舷抑制比最佳. 声能流较 Cardioid 好一些,约高 3 dB,主要原因在于声能流的单边偶极子波束比 Cardioid 的心形波束要窄. 在 45°时理论上声能流左右舷抑制比处于临界点,因此数值起伏较大. 图 5 分别给出正横附近 87°时 Cardioid(a)、质点振速(b)和声能流(c)3 种常规波束形成器的

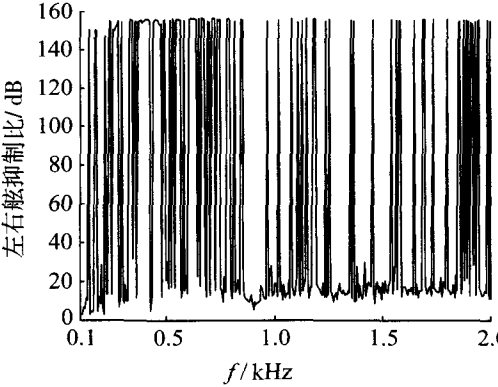
左右舷抑制比与频率的关系. 此时,声能流的效果最佳,150 dB 多的数值主要是计算机误差小量造成的,而非实际数值,因为在理论上,声能流常规波束形成器通过相位分辨可在正横附近 90°扇面内达到理想的左右舷分辨效果. Cardioid 一般在 15 dB 附近,Cardioid 波束是背向为零点的单边波束,理论上在正横能达到最优的左右舷分辨. 而质点振速基本不能分辨左右舷,因为理论上具有双边偶极子波束的质点振速在正横附近左右舷分辨效果最差.



(a) Cardioid的左右舷抑制比



(b) 质点振速的左右舷抑制比



(c) 声能流的左右舷抑制比

图 4 水平方位角 45°时左右舷抑制比与频率的关系

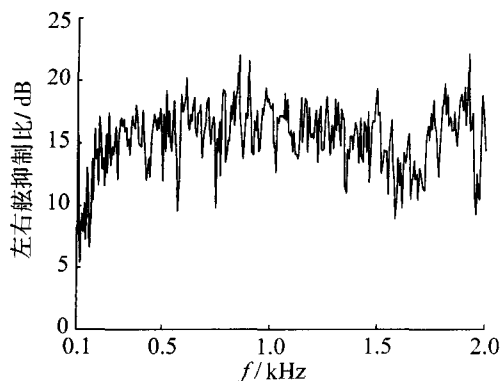
Fig. 4 LRSR vs frequency when azimuth 45°

由图3~5的分析可知:在相当宽的频带内,左右舷抑制比都接近或达到理论值.表2中的实验值是从100 Hz~2 kHz频带上的平均结果.单纯考虑常规波束形成器的左右舷抑制比,显然声能流最优,在正横附近90°扇面内无任何模糊,实际左右舷抑制比可达20 dB以上;Cardioid在正横附近90°扇面内左右舷抑制比均超过6 dB;质点振速则在45°和135°附近有最佳的左右舷分辨能力;在端射附近这3种常规波束形成器的左右舷分辨性能均严重下降,但可用自适应波束形成器加以改善,图2已经充分地验证了这一点,与理论完全相符,式(13)可清楚、彻底地解释任何疑问.

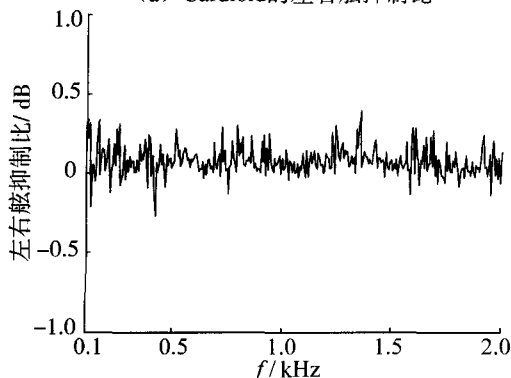
表 2 矢量传感器线阵 CBF 的左右舷抑制比海试结果汇总表

Table 2 LRSR sea-trial results of AVS line array's CBF

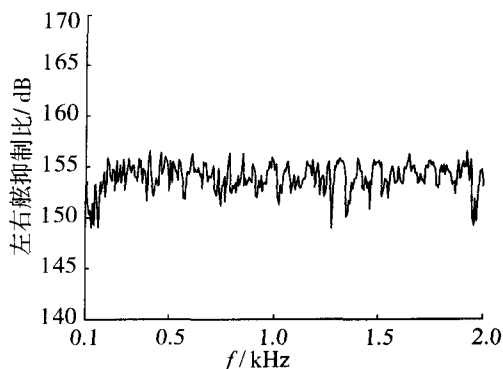
参数		左右舷抑制比		
		28°	45°	87°
Cardioid	理论值	2.2	6.0	40.0
	实验值	1.9	5.9	14.5
质点振速	理论值	5.1	40.0	0.1
	实验值	3.5	13.9	0.1
声能流	理论值	2.5	40.0	40.0
	实验值	2.2	14.8	40.0



(a) Cardioid的左右舷抑制比



(b) 质点振速的左右舷抑制比



(c) 声能流的左右舷抑制比

图 5 水平方位角 87°时左右舷抑制比与频率的关系

Fig. 5 LRSR vs frequency when azimuth 87°

3 结 论

通过对矢量传感器线阵3种常规波束形成器和MVDR波束形成器左右舷抑制比的理论研究和海上试验数据分析,可得如下结论:

1) 无论是常规波束形成器还是MVDR波束形成器,矢量传感器线阵左右舷抑制比均与频率无关,除了与信噪比有关之外,仅取决于阵元的指向性函数.

2) 矢量传感器线阵的MVDR波束形成器左右舷分辨性能远优于3种常规波束形成器的结果.

基本结论1)可拓展成解决左右舷分辨问题的一般性原理,即左右舷分辨能力主要取决于阵元指向性函数.因为无论是声压水听器双线阵还是三元组水听器单线阵,均可视为阵元具有一定左右舷分辨能力指向性函数的单线阵,指向性函数已清楚表明该假设的合理性.

基本结论2)也具有相当的普适性.MVDR波束形成器的左右舷分辨能力一般都优于常规波束形成器,矢量传感器线阵、声压水听器双线阵和三元组水听器单线阵都已验证了这一点.而且MVDR为代表的自适应波束形成器在左右舷抑制、检测能力和干扰抑制等综合指标上占据绝对优势,在某种程度上应该是不二之选.

参考文献:

- [1] LEMON S G. Towed-array history: 1917-2003[J]. IEEE J of Oceanic Eng, 2004, 29(2): 365-373.
- [2] LASKY M. Recent progress in towed hydrophone array re-

- search[J]. IEEE J of Oceanic Eng, 2004, 29(2): 374-387.
- [3] ALLENSWORTH W S, KENNEDY W C Y, NEWHALL B K, et al. Twinline array development and performance in a shallow-water littoral environment[J]. Johns Hopkins APL Tech Dig, 1995, 16(3): 222-232.
- [4] DOISY Y. Port-starboard discrimination performance on activated towed arrays systems[C]// UDT95. Nice, France, 1995: 125-129.
- [5] BERLINER M J, LINDBERG J F. Acoustic particle velocity sensor: design, performance and applications[C] // AIP Conference Proceedings 368 (American Institute of Physics). Woodbury, NY: AIP Press, 1996.
- [6] 张宾,孙贵青,李启虎. 阵形畸变对拖曳双线阵左右舷分辨性能的影响[J]. 声学学报,2008, 33(4):294-299.
ZHANG Bin, SUN Guiqing, LI Qihu. Effects of shape distortion upon left/right discrimination of towed twin-line array[J]. Acta Acoustics, 2008, 33(4): 294-299.
- [7] 张宾,孙贵青,李启虎. 拖船噪声抵消与左右舷分辨联合处理方法的研究[J]. 应用声学,2008, 27(5):380-385.
ZHANG Bin, SUN Guiqing, LI Qihu. Towship noise canceling combined with left/right discrimination[J]. Applied Acoustics, 2008, 27(5): 380-385.
- [8] 杜选民,朱代柱,赵荣荣,等. 拖线阵左右舷分辨技术的理论分析与实验研究[J]. 声学学报,2000, 25(5):395-402.
DU Xuanmin, ZHU Daizhu, ZHAO Rongrong, et al. Theoretical analysis and experimental research on port/starboard discrimination in towed line array[J]. Acta Acoustics, 2000, 25(5): 395-402.
- [9] 李启虎. 双线列阵左右舷目标分辨性能的初步分析[J]. 声学学报,2006, 31(5): 385-388.
LI Qihu. Preliminary analysis of left-right ambiguity resolution performance for twin-line array[J]. Acta Acoustics, 2006, 31(5): 385-388.
- [10] 李启虎. 用双线列阵区分左右舷目标的时延估计方法及其实现[J]. 声学学报, 2006, 31(6): 485-487.
LI Qihu. The time-delay estimation method of resolving left-right target ambiguity for twin-line array and its realization[J]. Acta Acoustics, 2006, 31(6): 485-487.
- [11] 何心怡,张春华,李启虎. 拖曳线列阵声呐及其左右舷分辨方法概述[J]. 舰船科学技术,2006, 28(5):9-14.
HE Xinyi, ZHANG Chunhua, LI Qihu. Rough introduction of towed linear array sonar and port/starboard discrimination methods[J]. Journal of Ship Science and Technology, 2006, 28(5): 9-14.
- [12] HAWKES M, NEHORAI A. Acoustic vector-sensor beamforming and Capon direction estimation[J]. IEEE Trans on Signal Processing, 1998, 46(9): 2291-2304.
- [13] 孙贵青. 声矢量传感器及其在线列阵声呐中的应用[R]. 北京:中国科学院声学研究所博士后工作报告, 2003:105-111.
- [14] 杨秀庭. 矢量水听器及其在声呐系统中的应用研究[D]. 北京:中国科学院声学研究所,2006:41-50.
YANG Xiuting. Acoustic vector sensor and its application in sonar system[D]. Beijing: Institute of Acoustics, Chinese Academy of Sciences, 2006:41-50.
- [15] SKREBNEV G K. Combined underwater acoustic receiver[M]. St. Petersburg: Elmor Press, 1997:24-36.
- [16] 孙贵青,李启虎. 声矢量传感器研究进展[J]. 声学学报,2004, 29(6):481-490.
SUN Guiqing, LI Qihu. Progress of study on acoustic vector sensor[J]. Acta Acoustics, 2004, 29(6): 481-490.
- [17] 孙贵青,李启虎. 声矢量传感器信号处理[J]. 声学学报,2004, 29(6):491-498.
SUN Guiqing, LI Qihu. Acoustic vector sensor signal processing[J]. Acta Acoustics, 2004, 29(6): 491-498.
- [18] 惠俊英,惠娟. 矢量声信号处理基础[M]. 北京:国防工业出版社,2009:24-25.
- [19] 杨德森,洪连进. 矢量水听器原理及应用引论[M]. 北京:科学出版社,2009:129-136.
- [20] CAPON J. High-resolution frequency-wave number spectrum analysis[C]// Proc IEEE Aug. 1969, 57(8): 1408-1418.
- [21] GROEN J, BEERENS S P, BEEN R. Adaptive port-starboard beamforming of triplet sonar arrays[J]. IEEE J of Oceanic Eng, 2005, 30(2): 348-359.

[责任编辑:刘 畅]