

基于线谱特征的三元组拖线阵左右舷分辨

朱代柱^{1,2} 杜选民²

(1 上海交通大学船舶海洋与建筑工程学院 上海 200240)

(2 上海船舶电子设备研究所 上海 201108)

2008 年 11 月 12 日收到

2009 年 3 月 18 日定稿

摘要 传统的三元组拖线阵在分辨目标左右舷时利用左、右两侧的宽带能量之比, 该技术在通常情况下能够较好地完成任务, 但在实际应用中可能会遇到一些困难。本文针对两种影响其左右舷分辨结果的情况做了分析: 一种是弱信噪比情况, 另一种是另一舷侧存在强干扰目标的情况。针对这两种情况, 通过对左、右舷频谱特征的分析, 提出了利用线谱特征提取结果分辨目标左、右舷的新技术, 显著降低了左右舷分辨功能对输入信噪比的要求。仿真和对海上实验数据的处理结果验证了该方法的稳健性和有效性, 可望应用于工程实践中。为了使该技术能够适用于更低的信噪比条件, 本文还提出了一种简单实用的线谱增强技术。

PACS 数: 43.30, 43.60

The port/starboard discrimination based on line-spectrum character in towed line array with hydrophone triplets

ZHU Daizhu^{1,2} DU Xuanmin²

(1 School of Naval Architecture, Ocean and Civil Engineering, Shanghai Jiaotong University Shanghai 200240)

(2 Shanghai Marine Electronic Equipment Research Institute Shanghai 201108)

Received Nov. 12, 2008

Revised Mar. 18, 2009

Abstract The energy's ratio of broadband is utilized for port/starboard discrimination in towed line array with hydrophone triplets in tradition. It can satisfy the need in most conditions except for two cases: One is low signal to noise ratio(SNR), and the other is that there is a stronger interfering target lied on the other side of the line array with approximate bearing. A new method called line-spectrum character extracting is proposed to discriminate port/starboard for these two cases in this paper, and the SNR needed for port/starboard discrimination is reduced sharply. Simulation and the sea-trial data are analyzed to show that the method is stable and valid, and it's expected to have application in practical towed line array sonar. A line-spectrum enhancing technology with lower calculation complexity and stable validity is proposed to ensure its application in lower SNR.

引言

拖线阵声呐由于声阵的孔径可以大幅增长以及远离拖船干扰两大优势而倍受关注, 但常规的拖线阵有一个目标左右舷模糊的问题。为解决此问题, 本舰必须作一次机动, 但这种机动所需的时间往往较长, 而且也容易造成目标丢失。对目标进行左右舷分辨是被动拖线阵声呐必须具备的一项功能, 特别是

对于水下威胁目标尤为重要, 因此, 人们又发展了双线阵和三元组集束的拖线阵来实现对目标的左右舷分辨^[1-11]。双线阵利用目标信号到达两线阵之间的时延差来实现对目标的左右舷分辨, 而三元组线列阵则利用三基元水听器在垂直面上的心形指向性来实现对目标的左右舷分辨, 并且, 通过安装在拖线阵中的横摇传感器采集到的数据对算法进行实时地补偿, 以满足实际应用的需要。

然而,在实际应用的过程中,三元组水听器的拖线阵左右舷分辨技术也常常会遇到一些困难:一是当目标的信噪比很低时,用于左右舷分辨的宽带能量抑制比(分贝表示)接近于0,难以分辨左右舷;二是当拖线阵的两个舷侧同时存在目标,两个目标的舷角值又非常接近时,两者可能都会被判断为同一舷侧。在这两种情况下,基于抑制比的三元组线列阵的左右舷分辨技术就难以给出准确的分辨结果了。

本文在三元组线列阵的基础上,利用三基元水听器在垂直面上的心形指向性,分别得到了目标舷角值左、右两侧的频谱,提出了利用线谱特征提取结果分辨目标左右舷的新技术,从而保证分辨结果的正确性,并可以显著降低对输入信噪比的要求。仿真和对海上实验数据的处理结果验证了该方法的有效性,可望应用于工程实践中。

为了使该技术能够适用于更低的信噪比条件,本文还提出了一种简单实用的线谱增强技术。

通过适应性的改进,该技术也可以应用于双线阵的目标左右舷分辨。

1 三元组线列阵左右舷分辨技术

常规的线列阵由于其水听器是无指向性的,所以存在左右舷模糊的问题,三元组线列阵是在常规线列阵的基础上将单基元的水听器改装成垂直面上均匀分布的三基元水听器组。在最大似然比准则下,该三基元水听器组对左、右两侧形成的指向性函数 F_+ 和 F_- 分别为^[2,3,5]:

$$\begin{cases} F_+(\sigma^2, f, \phi, \theta) = \mathbf{w}_+^H(\sigma^2) \mathbf{e}(\phi, \theta) \\ F_-(\sigma^2, f, \phi, \theta) = \mathbf{w}_-^H(\sigma^2) \mathbf{e}(\phi, \theta) \end{cases} \quad (1)$$

其中, σ^2 为三基元水听器组内非相关噪声方差与相关噪声方差的比值, $\mathbf{e}$ 为波束形成的旋转向量, f 为频率, ϕ 和 θ 分别对应目标相对于声阵中心的垂直仰角和水平方位角。 $\mathbf{w}$ 为三元组的最优滤波器权系数,由式(2)得到。

$$\mathbf{w}(\sigma^2, \mathbf{e}) = \frac{\mathbf{\Gamma}_n^{-1} \mathbf{e}}{\mathbf{e}^H \mathbf{\Gamma}_n^{-1} \mathbf{e}}, \quad (2)$$

其中, $\mathbf{e}^H$ 左上角的“H”表示共轭转置, $\mathbf{\Gamma}_n$ 为三元组水听器之间的噪声相关矩阵。

定义宽带信号的左右舷抑制比:

$$\gamma = \frac{\sum_f F_+}{\sum_f F_-} = \frac{\sum_f |\mathbf{w}_+^H \mathbf{e}_+|}{\sum_f |\mathbf{w}_+^H \mathbf{e}_-|} = \frac{\sum_f |\mathbf{e}_+^H \mathbf{\Gamma}_n^{-1} \mathbf{e}_+|}{\sum_f |\mathbf{e}_+^H \mathbf{\Gamma}_n^{-1} \mathbf{e}_-|}, \quad (3)$$

要使 γ 达到无穷大,就要使每一个频率点都满足 $\mathbf{e}_+^H \mathbf{\Gamma}_n^{-1} \mathbf{e}_- = 0$, 代入各分量,求得最佳的 σ^2 为:

$$\sigma_\infty^2 = \alpha \left(\frac{\mathbf{e}_+^H \mathbf{u} \mathbf{u}^T \mathbf{e}_-}{\mathbf{e}_+^H \mathbf{e}_-} - 2 \right) - 1, \quad (4)$$

其中 $\mathbf{u} = [1, 1, 1]^T$, α 为空间相关函数^[12], $\alpha = \sin(kr)/(kr)$ ($k = 2\pi/\lambda$, λ 为信号波长, r 为三基元之间的间距)。

根据式(4),可以计算不同频率 f 、不同间距 r 时的最佳 σ^2 , 然后根据式(2)得到最优滤波器的权系数,再根据式(1)计算不同频率、不同 σ^2 时的指向性图。设定 ϕ 和 θ , 通过改变 f , 计算相应的 σ^2 , 得到不同频率的指向性响应,累加之后就可以得到处理频带内的总能量输出。传统的左右舷分辨方法利用式(3)将处理频带内的总能量之比(即左右舷抑制比)作为分辨目标左右舷的依据。

在实际应用中,惟一未知的参数是 σ^2 , 即非相关噪声方差与相关噪声方差的比值,采用式(4)计算的 σ_∞^2 与真实值之间存在一定的偏差,设真实值 $\sigma^2 = \sigma_\infty^2 + \Delta$, 省略系数,可推导出:

$$\begin{aligned} \mathbf{\Gamma}_n^{-1} &= \begin{pmatrix} 1 + \sigma^2 + \alpha & -\alpha & -\alpha \\ -\alpha & 1 + \sigma^2 + \alpha & -\alpha \\ -\alpha & -\alpha & 1 + \sigma^2 + \alpha \end{pmatrix} = \\ &\mathbf{\Gamma}_{n_\infty}^{-1} + \Delta \begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{pmatrix}, \end{aligned} \quad (5)$$

代入式(3)得:

$$\gamma = \frac{\sum_f F_+}{\sum_f F_-} = \frac{\sum_f |\mathbf{e}_+^H \mathbf{\Gamma}_{n_\infty}^{-1} \mathbf{e}_+ + \Delta \mathbf{e}_+^H \mathbf{e}_+|}{\sum_f |\Delta \mathbf{e}_+^H \mathbf{e}_-|}. \quad (6)$$

因此,由于实际信号 σ^2 值与理论 σ_∞^2 值的失配,在实际应用中难以获得无穷大的左右舷抑制比。

2 面临的新问题与解决途径

2.1 传统左右舷分辨方法面临的新问题

利用式(3)计算出来的左右舷抑制比,在通常情况下都可以很好地分辨出目标的左右舷,基本能够满足实际工程应用的需要。但当目标的信噪比(或信干比)很低时,左右舷抑制比接近于0,如图1所示。

图1给出了对海上左舷一弱目标跟踪后的左右舷抑制比,其比值始终在0附近起伏(抑制比大于0

表示左舷, 小于 0 表示右舷, 绝对值越大表示判断的准确度越高, 在 0 附近表示不能分辨, 下同), 由此难以给出稳定、准确的分辨结果。即使综合考虑其正负号出现的概率, 在 0~80 s 时间段内也无法给出令人满意的结果, 并且, 该方法在低信噪比条件下很容易受浅海多途信道起伏的影响^[12]。

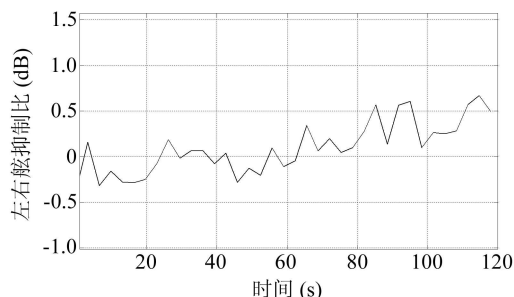


图 1 对海上左舷一弱目标跟踪后的左右舷抑制比

2.2 图像处理线谱增强技术

针对以上情况, 本文提出从频谱特征的角度, 利用不同舷侧同一舷角值处目标信号与背景 (或干扰) 频谱特征的差异来分辨目标左右舷的方法。

一般认为, 频谱中的“线谱”应具备三要素, 即强度、窄度和稳定度。所谓强度, 是指线谱的能量应高出周围连续谱背景一定的量值; 所谓窄度, 是指线谱的频带应足够窄, 排除“山包形”峰值; 所谓稳定性, 是指在连续时间段内在同一频率点附近符合强度和窄度条件的峰值应满足的出现概率。对三要素的具体量化标准, 视不同应用环境而定。

为了使频谱特征的分析方法能够适用于更低的信噪比条件, 本文提出了一种线谱增强处理技术, 称之为“图像处理线谱增强技术”。该技术计算量很小, 并且效果稳定, 非常实用。

首先, 对时频图做背景归一化处理, 以消除连续谱背景的影响。接着, 将线谱视为时频图中图像的轮廓线, 采用图像处理技术对线谱进行边缘锐化^[13], 考虑线谱与孤立点的不同之处在于前者在时间轴上具有一定的连续性, 所以本文对基于拉普拉斯算子的锐化模板稍做了改进, 如式 (7) 所示。改进后的锐化模块在保证对线谱锐化效果的同时, 可适当削弱对孤立点的锐化作用。

$$\mathbf{R} = \begin{bmatrix} -1 & +1 & -1 \\ -1 & 5 & -1 \\ -1 & +1 & -1 \end{bmatrix} \text{ 或 } \begin{bmatrix} -2 & +2 & -2 \\ -2 & 9 & -2 \\ -2 & +2 & -2 \end{bmatrix}. \quad (7)$$

然后, 对线谱进行加权。考虑到线谱的强度起伏和对孤立点的抑制作用, 同时兼顾目标声源的稳定

性和多卜勒效应, 本文提出以下加权公式:

$$A_{f,N} = \frac{1}{M} \sum_{i=N-M}^{N-1} A_{f,i}^n A_{f,N}, \quad (8)$$

其中, $A_{f,N}$ 表示频率为 f 的频点第 N 时刻的功率谱幅值; $(1/M) \sum_{i=N-M}^{N-1} A_{f,i}^n$ 为加权系数, 一般取 $n = 1$; M 表示得到加权系数所取的时间段, 这一时间段一般取 10 s 左右。

设某根线谱与周围连续谱背景的能量之比为 A_{LCR} , 采用上述方法加权后的线谱背景比接近于 A_{LCR}^{n+1} , 线谱得到了明显的增强。而对于连续谱背景中的随机峰值, 因为在时频图的时间轴上不具备连续性而得不到增强, 因此被抑制。

2.3 左右舷谱特征分析

根据式 (3) 计算左右舷抑制比时, 所关心的是处理频带内的总能量。根据式 (1), 可以得到不同舷侧同一舷角值处的目标信号和背景 (或干扰) 在每一个频率点的谱值, 即, 可以利用频谱特征的差异来分辨低信噪比条件下的目标左右舷。

设基元级的输入信噪比为 SNR_{in} , 在处理频带内单条拖线阵总的阵增益为 DI_{line} , 三元组的心形指向性增益为 DI_{triple} , 左右舷分辨所需要的分辨门限为 DT , 则传统左右舷分辨方法应满足的方程为:

$$SNR_{in} + DI_{line} + DI_{triple} \geq DT. \quad (9)$$

设线谱与周围连续谱背景的能量之比为 LCR , 则本文提出的线谱特征左右舷分辨方法的方程为:

$$SNR_{in} + DI_{line} + DI_{triple} + LCR \geq DT. \quad (10)$$

比较式 (9) 和式 (10) 容易看出, 二者相差了 LCR 。这说明, 在同等条件下新方法比传统方法可以显著降低适用的信噪比条件, 降低量可达最强线谱与周围背景的比值 LCR_{max} dB。

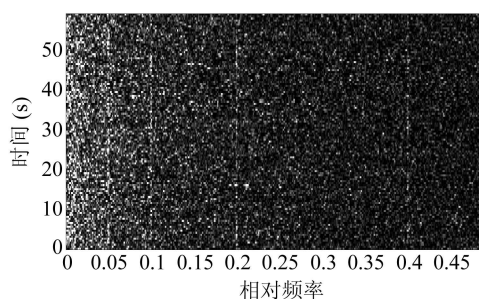
3 仿真分析

3.1 图像处理线谱增强技术仿真

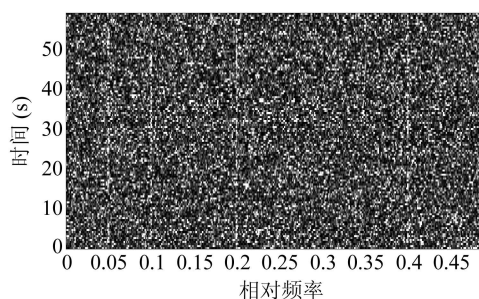
首先通过仿真分析, 说明上述线谱增强方法的效果。

设目标辐射的连续谱背景为高斯噪声, 以 -6 dB/oct 的规律衰减, 辐射噪声中还包含有四根线谱, 相对频率分别为 0.05, 0.1, 0.2 和 0.4, 其谱级与噪声背景相等, 即单位频带内的信噪比为 0, 如图 2(a) 和图 2(b) 所示。此时, 线谱的强度很低, 常

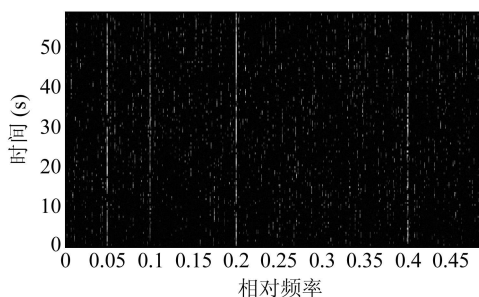
规方法已很难将其稳定地提取出来。而采用本文提出的图像处理线谱增强技术后, 如图 2(c) 所示, 线谱得到了明显的增强。在此基础上可以得到较好的线谱提取结果, 如图 2(d) 所示。



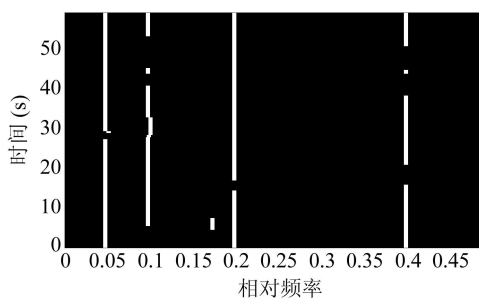
(a) 原始信号的时频图



(b) 归一化之后的时频图



(c) 线谱增强处理后的时频图



(d) 线谱提取后的结果

图 2 图像处理线谱增强技术仿真

3.2 左右舷谱分析仿真

为了分析问题的方便, 本文基于单个三基元水听器进行仿真分析。

设三基元所在圆的半径 $d = 25 \text{ mm}$, 处理的带宽为 $1 \sim 2.5 \text{ kHz}$, 采样频率 $f_s = 10 \text{ kHz}$ 。背景噪

声设为高斯噪声, 服从 $N(0, 1)$ 分布; 目标位于三基元的左舷 90° , 由同样服从 $N(0, 1)$ 分布的高斯信号和两根线谱组成, 两根线谱的频率分别为 1.5 kHz 和 1.8 kHz , 与处理带宽内输入信号的连续谱总能量之比均为 -10 dB , 以保证其对总能量的贡献影响不大。

图 3 给出了宽带信噪比为 -10 dB 时 (此时两线谱为 -20 dB) 在三基元所在垂直面上的指向性图, 从图中可以看出, 虽然右舷 (0°) 也有小量的衰减, 但数值表明其仅仅衰减了 0.18 dB 。考虑到实际信号的起伏和随机干扰的影响, 传统方法难以给出稳定、准确的左右舷分辨结果。

通过式 (1), 可以得到在同一舷角值上左舷目标和右舷背景的频谱图, 如图 4 所示。

比较两图容易发现, 图 4(a) 比图 4(b) 多出 1.5 kHz

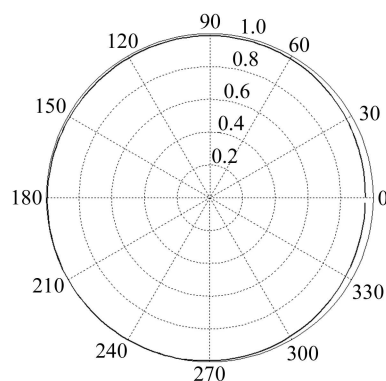
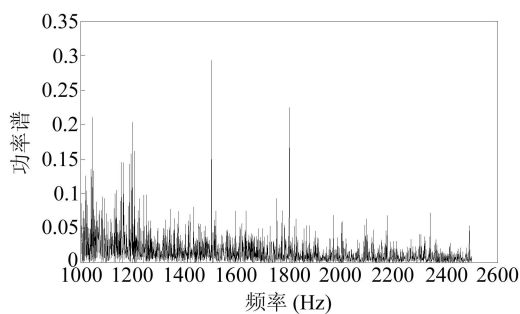
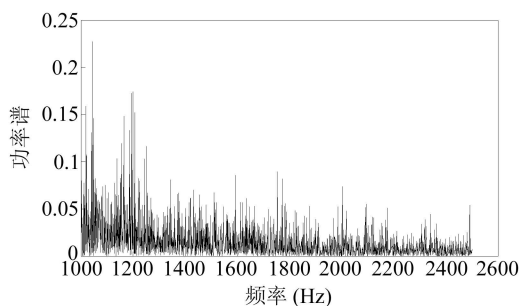


图 3 单个三基元在垂直面上的指向性图
(目标位于左舷, $\text{SNR} = -10 \text{ dB}$)



(a) 左舷谱



(b) 右舷谱

图 4 单个三基元的左舷谱和右舷谱
(目标位于左舷, $\text{SNR} = -10 \text{ dB}$)

和 1.8 kHz 两根线谱, 从频谱特征的差异可以很容易地分辨出目标位于三基元的左舷。

4 试验数据分析

4.1 当目标的信噪比很低时

针对以上图 1 所示的情况, 分别计算同一舷角值左、右两侧的时频谱图, 如图 5 和图 6 所示。图中, 横轴表示频率点序号, 纵轴表示时间, 单位为 s, 上面为最新时刻, 下同。比较两图可以看出, 左舷目标谱图在某些频率点上比右舷背景谱图要多出一些线谱。下面讨论如何提取出左右舷侧时频谱的差别。方法一是对图 5 和图 6 先分别做背景归一化处理, 然后进行线谱增强和提取, 结果如图 7 和图 8 所示。通过比较保留其中只存在于一侧的线谱, 并兼顾线谱的稳定性做出判断。方法二是对两舷侧的时频谱先做求差运算得到“差谱”, 然后对“差谱”进行背景归一化处理、线谱增强和提取, 结果如图 9 所示, 同样兼顾线谱的稳定性做出判断。这两种方法得到的左右舷

分辨结果是一致的, 如图 10 所示。图中, 正值表示目标在左舷, 负值表示目标在右舷, 0 表示不能分辨, 前面的 16s 为做出分辨结果所需的积累时间。

对比图 1 和图 10 可以看出, 当信噪比很低时, 基于左右舷抑制比的传统方法已不能准确地分辨目标的舷侧, 而采用本文提出的线谱特征分辨方法, 可以显著降低三元组拖线阵左右舷分辨功能对输入信噪比的要求, 扩展使用的条件, 对于对抗日益隐声的水下威胁目标具有十分重要的意义。

4.2 当另一舷侧存在强干扰时

当拖线阵两侧同时存在目标和干扰且舷角值相近时, 该技术同样适用。如图 11 所示, 左舷 75° 附近有一目标, 而右舷有一强干扰由 45° 运动到 110° 。对目标进行跟踪, 由式 (3) 得到的左右舷抑制比示于图 12, 其中在 50~105 s 时间段内左右舷抑制比的值明显受到了强干扰的影响, 部分时段还直接影响了左右舷的分辨结果, 这种情况在实际工程应用中常常会遇到。

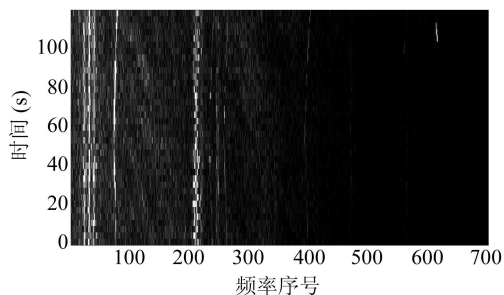


图 5 左舷目标的时频谱图

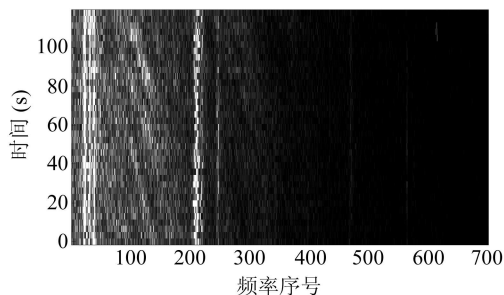


图 6 右舷背景的时频谱图

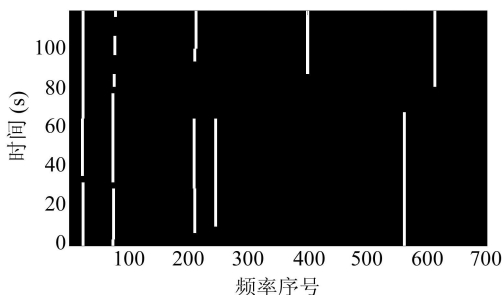


图 7 左舷目标的线谱提取结果

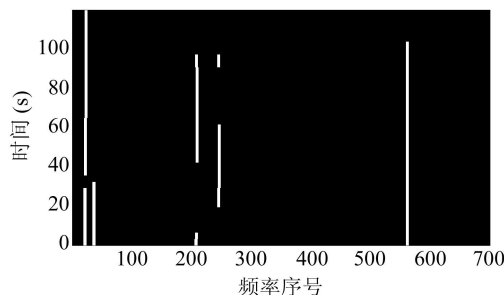


图 8 右舷背景的线谱提取结果

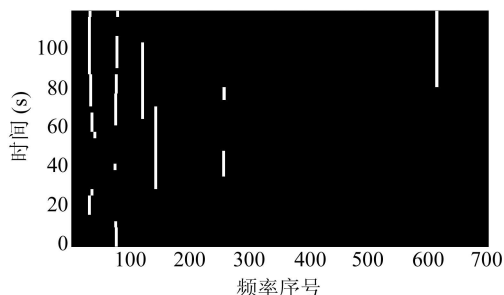


图 9 对“差谱”的线谱提取结果

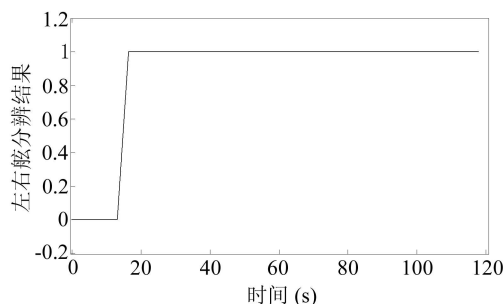


图 10 两种方法得到的左右舷分辨结果

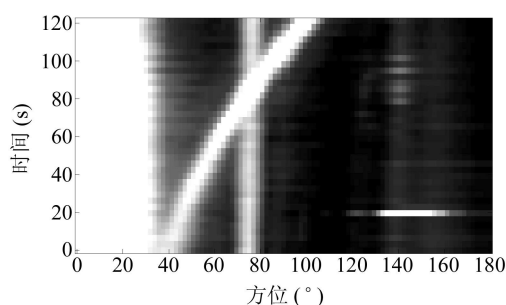


图 11 宽带检测的时间——方位历程图

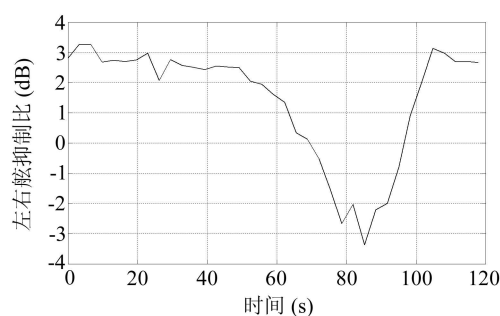


图 12 左右舷抑制比

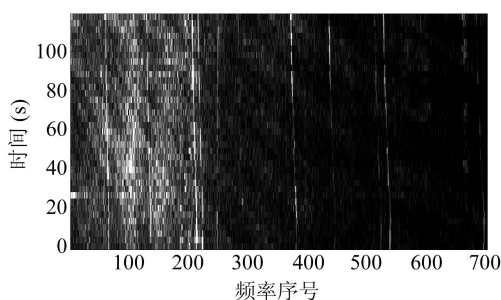


图 13 左舷目标的时频谱图

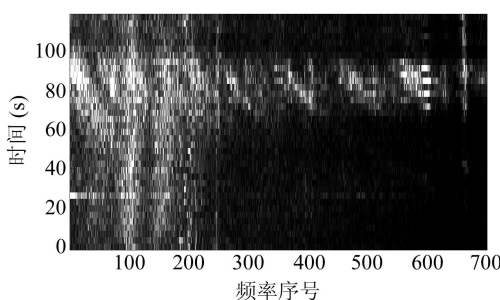


图 14 右舷干扰的时频谱图

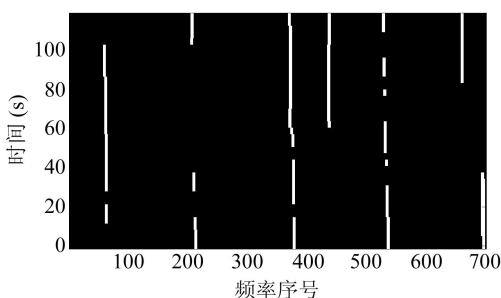


图 15 左舷目标的线谱提取结果

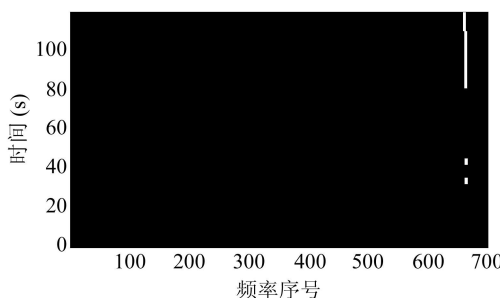


图 16 右舷干扰的线谱提取结果

本文提出的方法可以解决这一问题,进一步满足实际工程应用的需要。下面是目标和干扰的时频谱图以及分别提取出来的线谱,示于图 13—图 16,得到的分辨结果与图 10 相同。

试验数据的处理结果表明,采用本文提出的频谱特征差异的分辨方法,可以有效地解决拖线阵两侧同时存在目标和干扰且舷角值相近的情况,提高左右舷分辨功能抗干扰的能力。

以上对两组试验数据的分析结果表明,在对目标进行左右舷分辨的过程中,当目标的信噪比(或信干比)很低时,只要目标存在线谱分量,就可以有效地分辨出目标所在的舷侧。

5 结论和讨论

三基元拖线阵传统的左右舷分辨技术是利用三基元水听器组在垂直面上的心形指向性,根据目标舷角值上的左右舷抑制比进行分辨。本文在对该技

术进行简要描述的基础上,重点讨论了该技术在工程应用中可能遇到的两种情况:一种是目标的信噪比很低时,左右舷抑制比的比值在 0 附近起伏,不足以分辨出目标的左右舷;另一种是当目标舷角值附近的另一舷侧出现强干扰时,影响了该舷角值处的左右舷抑制比。在这两种情况下,传统的单纯依赖左右舷抑制比的分辨技术难以给出稳定、准确的分辨结果。

本文在三基元线列阵的基础上,利用分别得到的目标舷角值两侧的频谱,提出通过目标与背景或干扰的线谱特征差异来分辨目标左右舷的新技术。仿真和对实际海上试验数据的分析结果表明,该技术具有较好的稳健性,可望应用于工程实践中。

同时,本文也提出了一种实用的线谱增强处理方法,在低信噪比条件下可取得良好的效果。

本文提出的利用左右舷线谱特征差异来分辨目标左右舷的技术,是建立在目标辐射噪声中含有线谱分量的基础之上,只要目标存在线谱并且没有被

完全淹没,就可以在很低的信噪比条件下分辨出目标的舷侧。该技术比传统方法可显著降低适用的信噪比(或信干比)条件,在同等条件下相差的量级为线谱高出周围连续谱背景的量级,并且分辨结果稳定,在对水下威胁目标进行左右舷分辨时尤为重要。

对该技术做适当调整后,即使目标与干扰的线谱数量相当,通过对线谱特征的识别,同样可以准确地分辨出各自所在的舷侧。

参 考 文 献

- 1 David Foxwell. Torpedo defences on the alert. *Jane's Navy International*, 1998; **5**: 19—25
- 2 Van Mierlo G W M, Beerens S P, Been R *et al.* Port/starboard discrimination by hydrophone triplets in active and passive towed arrays. UDT97, Germany, 176—181
- 3 Doisy Y. Port-starboard discrimination performances on actived towed array systems. UDT95, France, 125—129
- 4 Becker K M, Preston J R. The ONR five octave research array (FORA) at penn state. *Oceans 2003 MTS/IEEE Proceedings*, 2003; **v5**: 2607—2610
- 5 杜选民, 朱代柱等. 拖线阵左右舷分辨技术的理论分析与实验研究. *声学学报*, 2000; **25**(5): 395—402
- 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 李启虎. 用双线列阵区分左右舷目标的延时估计方法及其实现. *声学学报*, 2006; **31**(6): 485—487
- 8 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. *声学学报*, 2008; **33**(4): 294—299
- 9 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. *舰船科学技术*, 2006; **28**(5): 9—14
- 10 王 斌, 汤渭霖, 范 军. 水听器非轴线布放时的拖线阵流噪声响应. *声学学报*, 2008; **33**(5): 402—408
- 11 王平波, 张明敏, 沈德刚. 三元组拖线阵声呐宽带最佳阵处理左右舷判别性能的仿真研究. *信号处理*, 2006; **22**(4): 554—558
- 12 R. J. 尤立克著, 洪申译. *水声原理*. 哈尔滨: 哈尔滨船舶工程学院出版社, 1990
- 13 Gonzalez R C, Woods R E 著. *数字图像处理 (第二版)*. 电子工业出版社, 1993