

# 低频线谱检测 ALE 算法应用

赵 闪,陈新华,孙长瑜,余华兵

中国科学院声学研究所,北京 100190

**摘要** 舰船辐射噪声在低频段具有稳定的特征信息丰富的线谱成分,此线谱成分的检测对水下目标的定位和识别具有重要意义。为了有效地将舰船辐射噪声特征线谱从宽带背景噪声中分离出来,应用 ALE 算法理论对舰船噪声信号进行研究。ALE 算法作为自适应 FIRDF 算法的一种变形,是自适应噪声抵消器的典型应用。低频线谱检测中采用 ALE 算法无需参考信号,自适应地将线谱成分信号进行匹配,可以从宽带噪声中将线谱成分分离出来,且线谱成分明显增强。理论分析仿真结合实际海试数据对 LOFAR 谱图进行研究,结果表明,ALE 算法在低频线谱信号检测中能够达到期望的效果。与常规方法相比,检测性能得到有效提高,有利于辐射噪声线谱的提取。

**关键词** 辐射噪声;线谱;ALE 算法;宽带噪声

**中图分类号** TB565

**文献标志码** A

**doi** 10.3981/j.issn.1000-7857.2013.11.007

## Applications of Adaptive Line-spectrum Enhancement Algorithm to the Detection of Low Frequency Line-spectrum Signal

ZHAO Shan, CHEN Xinhua, SUN Changyu, YU Huabing

Institute of Acoustic, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100190, China

**Abstract** The ship-radiated noise possesses a stable part of the line-spectrum at low frequency range, containing rich information, and it is meaningful for positioning and distinguishing underwater targets. In order to separate the ship-radiated noise line-spectra from the broadband background noise effectively, the method for analyzing the ship-radiated noise signals by using Adaptive Line-spectrum Enhancement (ALE) algorithm is put forward. As a variant of adaptive Finite Impulse Response (FIR) Digital Filter (DF), ALE is a typical application of adaptive noise canceller. The algorithm is able to find and match the line-spectrum signals and separate them from wide band additive noise without reference signals. Then, the line-spectrum signals could be enhanced. By theoretical analysis simulation and actual ocean-trial, the research on the Low Frequency Acquisition and Ranging (LOFAR) spectrum shows that ALE algorithm is able to meet the expectation competently. Comparing with conventional methods, the detection performance enhances observably, and radiated noise line-spectra are able to be effectively extracted.

**Keywords** radiated noise; line-spectrum; ALE algorithm; broadband noise

### 0 引言

被动声呐<sup>[1]</sup>是通过在水中目标辐射噪声的接收和处理完成对目标的发现、定位、识别和跟踪。利用舰船辐射噪声对目标进行检测、提取<sup>[2]</sup>是水声理论重要的内容。根据谱特性<sup>[3]</sup>划分,舰船噪声包括稳连续谱、线谱和时变调制谱等<sup>[4]</sup>。研究表明,由于螺旋桨桨叶切割水体时会产生单频分量等原因,水下目标的辐射噪声具有丰富的线谱成分,特别是在低频段,提取该线谱成分对水下低噪声、安静型目标的识别和研究<sup>[5]</sup>具有十分重要的意义。

线谱的检测有经典功率谱估计与现代谱估计等方法,在宽带干扰背景下检测出线谱信号<sup>[6]</sup>是经典声呐检测问题之一。一些研究者在水中目标辐射噪声线谱检测方面做了不少工作,常规声呐窄带线谱检测多数采用 Zoom 快速傅里叶变换 (Fast Fourier Transforms, FFT) 进行处理,该方法在低信噪比条件下提取线谱的效果较差<sup>[7]</sup>。但是,通常情况下,由于舰船辐射噪声线谱具有频率低和宽带背景噪声相对强等特点,检测该线谱效果并不理想。自适应线谱增强 (Adaptive Line-spectrum Enhancement, ALE) 算法应用于低频线谱信号检测

收稿日期:2012-08-24;修回日期:2012-11-28

基金项目:国家海洋公益性行业科研专项经费项目(20100500106);中国科学院国防科技创新基金项目

作者简介:赵闪,博士研究生,研究方向为水声阵列信号处理,电子邮箱:zhaoshan09@mailsucas.ac.cn

中,具有在低信噪比条件下较好地提取线谱的能力,且无需噪声参考信号就能自适应地将线谱信号从宽带噪声干扰中分离出来。实际处理低频段线谱部分可对 ALE 算法应用加权,其收敛较快,较少的迭代次数即可获得较高的信噪比。

### 1 低频线谱检测及 LMS 算法

对水下目标检测,一般要求能够检测到远距离或安静型目标的微弱辐射噪声信号<sup>[8]</sup>,信噪比通常为-10dB 以下,甚至更低。理论和试验均已证明,水下目标辐射噪声中具有丰富的单频分量。自适应技术已经被广泛应用于数字通信、雷达、水声通信和工业控制等领域,最小均方误差(Least Mean Square, LMS)算法<sup>[9]</sup>作为常用的自适应算法,常被应用于自适应滤波等信号处理方面。

#### 1.1 低频线谱信号检测

舰船自噪声的 3 个主要来源是机械噪声、螺旋桨噪声和水动力噪声,其中机械噪声和螺旋桨噪声是自噪声的主要来源。舰船机械产生的自噪声基本上为整个噪声低频段的单频分量部分,因为机械噪声多数是舰船的恒速辅机产生的,和其他噪声不同,与航速几乎无关;螺旋桨噪声是由螺旋桨转动产生的,它通过船体、水层、海底、岸边反射到声呐接收基阵上。水动力噪声是水流流过水听器、水听器支座和船体外部结构形成的噪声源。

水声低频线谱信号的有效检测是在认知水下目标辐射噪声低频信号特性的基础上,进一步完成对线谱信号的检测。从时间相关特性看,要求窄带信号(线谱成分)的自相关半径比宽带噪声的时间相关半径要长,实际检测时目标辐射噪声中含有的特定线谱成分(具体频率未知),需要对每一点进行波束形成,由此获得空间增益,从而实现目标检测。

低频线谱信号检测将阵元信号接收到的目标辐射噪声,采用分频率波束形成,分别计算采集得到信号每帧各频率波束输出对应的方位最大值,统计得到各频率  $N$  帧信号方位方差,最终加权统计计算波束输出。

#### 1.2 LMS 算法原理

自适应滤波<sup>[10]</sup>应用于联合参数估计的结构,如图 1 所示。图 1 中,

$$\mathbf{X}_k = (x_{1k}, x_{2k}, \dots, x_{Mk})^T \quad \mathbf{W} = (w_1, w_2, \dots, w_M)^T \quad y_k = \mathbf{X}_k^T \cdot \mathbf{W} = \mathbf{W}^T \cdot \mathbf{X}_k \quad (1)$$

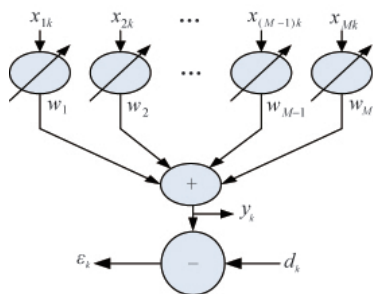


图 1 自适应滤波器结构  
Fig. 1 Structure of self-adaptive filter

其中,  $\mathbf{X}_k$  为输入信号向量;  $\mathbf{W}$  为滤波器权向量;  $y_k$  为滤波器输出信号。

为使输出  $y_k$  与期望的信号  $d_k$  逼近,需要调整滤波器权向量,使  $d_k$  与  $y_k$  之间均方误差  $E(\varepsilon_k^2)$  最小。定义

$$E(\varepsilon_k^2) = E[(d_k - y_k)^2] = E[(d_k - \mathbf{W}^T \cdot \mathbf{X}_k)^2] = E(d_k^2) - 2\mathbf{P}^T \cdot \mathbf{W} + \mathbf{W}^T \cdot \mathbf{R} \cdot \mathbf{W} \quad (2)$$

其中,

$$\mathbf{P} = E[d_k \cdot \mathbf{X}_k] \quad \mathbf{R} = E[\mathbf{X}_k^T \cdot \mathbf{X}_k] \quad (3)$$

最小均方误差(LMS)算法是一种逐次近似法,采用最陡下降法,取单个误差样本的平方  $\varepsilon_k^2$  的梯度作为均方误差梯度估计,即

$$\nabla_k = \frac{\partial \varepsilon_k^2}{\partial \mathbf{W}_k} = -2\varepsilon_k \cdot \mathbf{X}_k \quad (4)$$

从而  $\mathbf{W}_{k+1}$  可由  $\mathbf{W}_k$ 、 $\varepsilon_k$  及  $\mathbf{X}_k$  求得,即

$$\mathbf{W}_{k+1} = \mathbf{W}_k + \mu(-\nabla_k) = \mathbf{W}_k + 2\mu \cdot \varepsilon_k \cdot \mathbf{X}_k \quad (5)$$

LMS 算法计算量小、算法简单、易于工程实现且性能稳定,因而获得了广泛的应用。

### 2 ALE 算法原理

ALE 是自适应信号处理技术的重要应用,作为自适应 FIR 数字滤波器(Digital Filter, DF),它在 LMS 的基础上将稳态的自适应滤波结构等效为两个不相关通道的并联结构,因此自适应滤波器收敛后输出的是两个不相关分量之和<sup>[7]</sup>,一个来自于线谱成分输入分量经有限时延的 Winener 滤波后的输出,另一个来自于自适应过程中有关失调误差滤波器的输出。

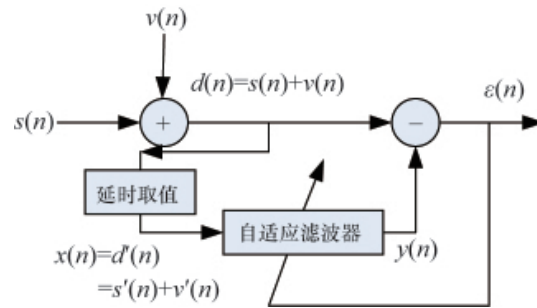


图 2 自适应线谱增强结构  
Fig. 2 Enhanced structure of self-adaptive line spectrum

如图 2 所示,输入端信号  $d(n)$  是线谱信号(窄带信号)  $s(n)$  和宽带噪声  $v(n)$  的混合,由于窄带信号的自相关半径比宽带噪声的时间相关半径大,因此当延时时间选为大于宽带噪声的时间相关半径而小于窄带信号的相关半径时,宽带噪声  $v(n)$  与  $v'(n)$  变得不相关,而窄带信号  $s(n)$  与  $s'(n)$  仍然相关,则自适应滤波器的输出将是线谱信号  $s(n)$  的最佳估计,且信号和噪声自适应滤波器及线性叠加器得到  $y(n)$ 、 $\varepsilon(n)$  满足条件

$$y(n) = s''(n) + v''(n) \quad (6)$$

$$\varepsilon(n) = s(n) + v(n) - s''(n) - v''(n) \quad (7)$$

$s''(n)$ 、 $v''(n)$  是  $s'(n)$ 、 $v'(n)$  经过自适应滤波器后的信号和噪声，

$$E[\varepsilon^2(n)] = E[(s(n) - s''(n))^2 + (v(n) - v''(n))^2] \\ = E[(s(n) - s''(n))^2] + E[v^2(n)] + E[v''^2(n)] \quad (8)$$

要使  $E[\varepsilon^2(n)]$  最小，只需  $E[(s(n) - s''(n))^2]$  和  $E[v''^2(n)]$  最小，即  $s$  趋近于  $s''$  且  $E[v''^2(n)]$  趋近于 0。

细化考虑将辐射噪声的低频线谱部分有效且快速从噪声背景中提取出来，将  $d(n)$  与  $d'(n)$  分别乘以系数  $\alpha$  和  $\beta$  加权处理，其中  $\beta = \alpha(1 - \alpha)$ ， $0 < \alpha < 1$ ，则

$$\varepsilon'(n) = \alpha[s(n) + v(n)] - \beta[s''(n) + v''(n)] \quad (9)$$

选取合适的  $\alpha$  值，在低频线谱检测中应用 ALE 算法，则  $\varepsilon'(n)$  较之  $\varepsilon(n)$  收敛更快，以较少的迭代次数处理即可获得较高的信噪比。此外，考虑窄带线谱信号具有多普勒频偏及频率调制特性，处理时可采用双端输入的 ALE 技术，以避免该算法检测性能下降。

### 3 验证分析

对低频段线谱信号检测目标辐射噪声，仿真输入信号取两个不同频率(20Hz, 90Hz)、不同幅度的单频信号叠加宽带噪声，信号时域如图 3 所示。

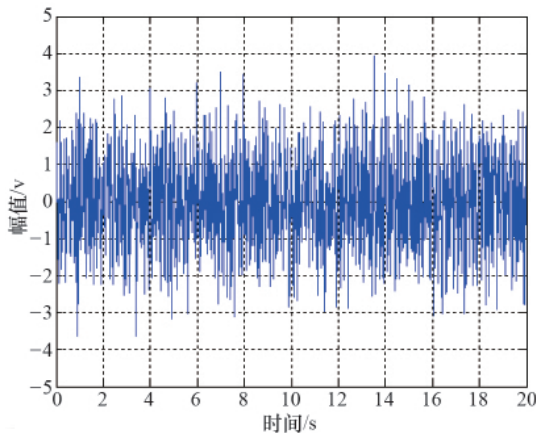


图 3 输入信号(线谱信号叠加宽带噪声)  
Fig. 3 Input signals (line spectrum signal superposed on broadband noise signal)

对输入信号进行分频率波束形成，进行常规线谱检测，采用 LOFAR 谱图分析。LOFAR 谱图通过对连续的采样数据进行短时傅里叶变换而形成，从时频分析角度对信号进行描述，得到 LOFAR 谱图的具体步骤如下：

- (1) 将原始信号的采样序列分为 100 帧，每帧 2000 个点，帧间相互重叠 50%。
- (2) 分别对每帧信号  $L_k(n)$  作归一化和中心化处理 ( $N=2000$ )。

归一化处理

$$S_k(n) = \frac{L_k(n)}{\max_{1 \leq i \leq N} [L_k(i)]} \quad (9)$$

中心化处理

$$S'_k(n) = S_k(n) - \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N S_k(i) \quad (10)$$

(3) 对信号  $S'_k(n)$  作短时傅里叶变换，得到第  $k$  帧信号的 LOFAR 谱图。

将自适应增强应用于低频线谱检测，选取  $\alpha=0.35$ 、 $\beta=0.2275$ ，原始信号的 LOFAR 谱图及应用 ALE 算法后的 LOFAR 谱图分别见图 4、图 5。

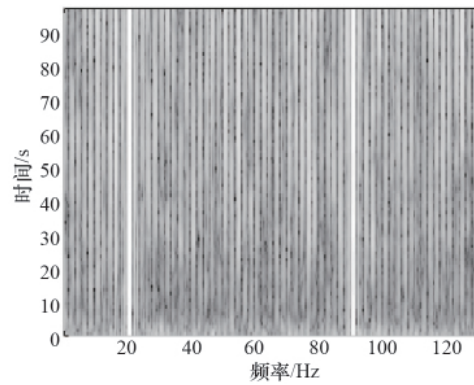


图 4 原始信号线谱检测 LOFAR 谱图  
Fig. 4 LOFAR spectrogram of line spectrum detection for primary signal

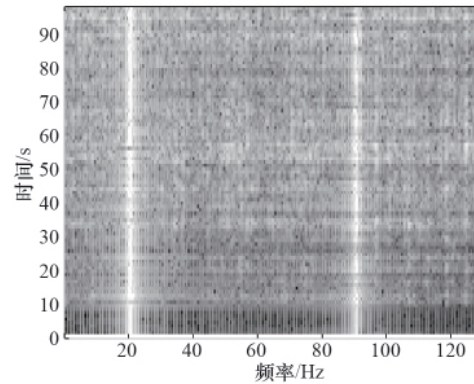


图 5 应用 ALE 后线谱检测 LOFAR 谱图  
Fig. 5 LOFAR spectrogram of signal line spectrum detection after applying ALE algorithm

在 LOFAR 谱图中，亮度表示功率大小，黑色为 0，白色为最大。可以清楚看到，在低频段 20Hz、90Hz 有线谱存在，20Hz 处亮度更强，应用 ALE 后线谱检测 LOFAR 图对比度更大，线谱信号明显增强，达到预期设想。

结合海试数据，进一步将 ALE 算法应用低频线谱检测中。图 6 为某舰船辐射噪声的频谱分析结果，可以看出，该舰

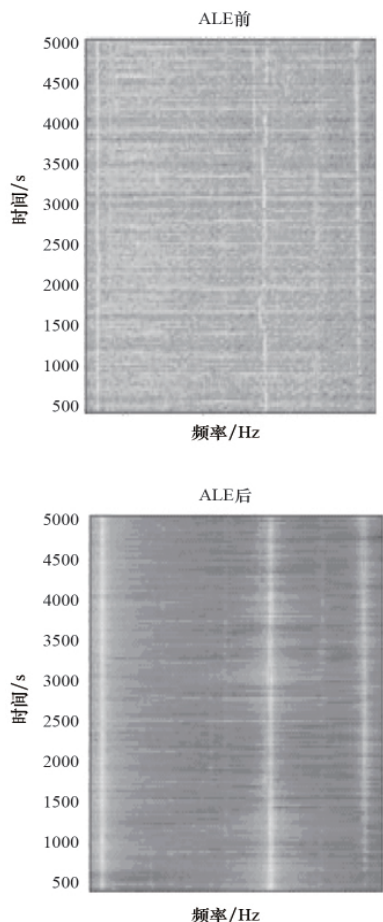


图6 某舰船应用 ALE 前后低频线谱 LOFAR 谱  
Fig. 6 LOFAR spectrograms of line spectrum at low frequency range before and after applying ALE by certain ship

船辐射噪声中存在低频线谱,且利用 ALE 算法后线谱增强显著,与常规方法相比,检测性能得到明显提高,这对于低噪声弱目标的探测具有十分重要的意义。

#### 4 结论

由于舰船辐射噪声线谱具有频率低和相对于强宽带背景噪声弱信号的特点,在复杂海洋环境下从舰船辐射噪声信

号中有效提出线谱成分一直比较困难。本文从舰船自噪声特性入手,分别对低频线谱检测、LMS 算法原理、ALE 算法原理等理论作了介绍,进一步结合 LOFAR 谱图分析对 ALE 算法应用于低频信号线谱检测进行仿真和实际验证,结果表明:ALE 对于线谱信号有增强作用,且对背景噪声有一定的抑制作用,有利于辐射噪声特征线谱的提取。

#### 参考文献 (References)

- [1] 李启虎. 声呐信号处理引论[M]. 北京: 海洋出版社, 2000: 90-93.  
Li Qihu. Sonar signal processing[M]. Beijing: Ocean Press, 2000: 90-93.
- [2] 李启虎. 水声信号处理领域新进展[J]. 应用声学, 2012, 31(1): 3-5.  
Li Qihu. Applied Acoustics, 2012, 31(1): 3-5.
- [3] Miasnkov E. Can Russian submarines survive at sea? The fundamental limits of passive acoustics [J]. Science & Global Security, 1994, 4(2): 213-251.
- [4] 李启虎, 李敏, 杨秀庭. 水下目标辐射噪声中单频信号分量的检测: 理论分析[J]. 声学学报, 2008, 33(3): 193-194.  
Li Qihu, Li Min, Yang Xiuting. Acta Acoustics, 2008, 33(3): 193-194.
- [5] 杨跃轮, 朱辉庆. 潜艇声呐技术发展研究 [J]. 声学及电子工程, 2012, 27(2): 40-43.  
Yang Yuelun, Zhu Huiqing. Acoustics and Electronics Engineering, 2012, 27(2): 40-43.
- [6] 王露, 雷波, 杨坤德. 基于谐波小波变换的舰船辐射噪声线谱提取方法[J]. 探测与控制学报, 2012, 34(3): 52.  
Wang Lu, Lei Bo, Yang Kunde. Journal of Detection & Control, 2012, 34(3): 52.
- [7] Abutaleb A S. Adaptive line enhancement using a random AR model[J]. IEEE Transactions on Acoustics, Speech and Signal Processing, 1990, 38(7): 1211-1215.
- [8] 韦涛. 水下弱目标被动探测技术研究[D]. 南京: 南京理工大学, 2012.  
Wei Tao. The research of weak goal passive detection engineering research [D]. Nanjing: Nanjing University of Science and Technology, 2012.
- [9] 石敏, 徐袭, 岳剑平. 基于两级自适应线谱增器的舰船辐射噪声线谱检测[J]. 舰船科学技术, 2012, 34(8): 79-81.  
Shi Min, Xu Xi, Yue Jianping. Ship Science and Technology, 2012, 34(8): 79-81.
- [10] Widrow B, Glover J R, Mecoool J. Adaptive noise canceling principles and application[J]. Proceedings of IEEE, 1975, 63(12): 1692-1716.

(责任编辑 朱宇, 马宇红)

#### 《科技导报》“卷首语”栏目征稿

“卷首语”栏目每期邀请一位中国科学院院士和中国工程院院士就重大科技现象、事件,以及学科发展趋势、科学研究热点和前沿问题等,撰文发表个人的见解、意见和评论。本栏目欢迎院士投稿,每篇文章约 2000 字,同时请提供作者学术简历、工作照和签名电子文档。投稿信箱:kjdbbjb@cast.org.cn。