

基于噪声抑制门的两级自适应线谱增强算法

马凯^{*①} 蔡昱明^② 王易川^① 程玉胜^①

^①(海军潜艇学院 青岛 266000)

^②(91001部队 北京 100036)

摘要: 针对低信噪比下, 自适应线谱增强(ALE)算法在低信噪比时性能急剧下降的问题, 该文提出2级ALE算法, 该算法在普通的ALE算法的基础上, 将输出信号和误差信号的傅里叶变换作为第2级ALE的输入, 对线谱作进一步增强。并利用噪声抑制门对信号进行降噪预处理, 然后结合提出的2级ALE算法, 提出一种基于噪声抑制门的2级ALE算法, 进一步提高信噪比, 增强线谱。仿真和海试数据表明, 算法性能较普通ALE算法有较大提升。
关键词: 线谱增强; 噪声抑制门; 2级ALE算法

中图分类号: TN911.7

文献标识码: A

文章编号: 1009-5896(2021)03-0773-08

DOI: 10.11999/JEIT200540

An Algorithm of Two-level Adaptive Line-spectrum Enhancement Based on Noise Suppression Gate

MA Kai^① CAI Yuming^② WANG Yichuan^① CHENG Yusheng^①

^①(Naval Submarine Academy, Qingdao 266000, China)

^②(Unit 91001, Beijing 100036, China)

Abstract: In view of the problem that the performance of the Adaptive Line-spectrum Enhancement (ALE) algorithm drops sharply under low signal-to-noise ratio, a two-level ALE algorithm is proposed. Based on the ordinary ALE algorithm, the Fourier transform of the output signal and the error signal is used as the input of the second-level ALE to enhance further the line-spectrum. The noise suppression gate is used to perform noise suppression preprocessing on the signal, and then combining with the proposed two-level ALE algorithm, an algorithm of two-level ALE based on noise suppression gate is proposed to improve further the signal-to-noise ratio and enhance the line-spectrum. Simulation and sea trial data show that the performance of the algorithm is greatly improved compared with the ordinary ALE algorithm.

Key words: Line-spectrum enhancement; Noise suppression gate; Two-stage Adaptive Line-spectrum Enhancement (ALE) algorithm

1 引言

随着舰船辐射噪声^[1]的降低, 从强海洋背景噪声中检测出弱的线谱^[2]信号, 是近年来水声信号处理^[3]领域的一个重要研究内容。常用的声呐线谱检测^[4-8]方法大都采用傅里叶变换处理方法, 但该方法在低信噪比下线谱检测能力较差。1960年, Widrow和Hoff提出了最小均方误差(LMS)算法, 因其计算量小且容易实现而得到广泛关注^[9-14], 并用于自适应滤波^[15,16]、自适应线谱增强等各个方面。自适应线谱增强^[17-23](ALE)算法, 可以有效抑制噪声, 增强线谱, 适合于强噪声背景下的信号检

测。但其性能随着信噪比的降低急剧下降, 针对此问题本文提出基于噪声抑制门的2级ALE算法, 可有效地提高其在低信噪比下的性能。

2 基于噪声抑制门的降噪预处理

假设淹没在随机噪声中的CW(Continuous Wave)信号可表示为

$$\begin{aligned} x(t) &= s(t) + n(t) \\ &= A \cos(2\pi f_0 t + \varphi) + n(t), \quad 0 \leq t \leq T \end{aligned} \quad (1)$$

其中, A 为CW信号的幅度, f_0 为CW信号的频率, T 为CW信号的持续时间, φ 为CW信号的随机相位, 满足均匀分布 $\varphi \sim U(0, 2\pi)$, $n(t)$ 为高斯噪声, $n(t) \sim N(0, \sigma^2)$, 假设 $s(t)$ 与 $n(t)$ 相互独立。

则信号的自相关函数为

收稿日期: 2020-07-02; 改回日期: 2020-10-29; 网络出版: 2020-12-14

*通信作者: 马凯 makainue@163.com

$$\begin{aligned}
 R(t) &= \int_{-\infty}^{\infty} R(\tau) R(\tau - t) dt \\
 &= R(-t) * R(t) \\
 &= x(-t) * x(t) \\
 &= [s(-t) + n(-t)] * [s(t) + n(t)] \\
 &= s(-t) * s(t) + s(-t) * n(t) \\
 &\quad + n(-t) * s(t) + n(-t) * n(t) \\
 &= R_s(t) + R_{sn}(t) + R_{ns}(t) + R_n(t) \\
 &\approx R_s(t) + R_n(t) \quad (2)
 \end{aligned}$$

其中, *表示卷积运算。由于信号和噪声相互独立, 所以 $R_{sn}(t)$ 和 $R_{ns}(t)$ 为小量, 可忽略不计, 则将 $s(t)$ 代入 $R_s(t)$ 得

$$R_s(t) = \begin{cases} \frac{A^2}{2} (T+t) \cos(2\pi f_0 t), & -T \leq t \leq 0 \\ \frac{A^2}{2} (T-t) \cos(2\pi f_0 t), & 0 \leq t \leq T \end{cases} \quad (3)$$

由上式可见, CW信号的自相关函数是一个同频填充的三角形包络信号。

假设白噪声的功率谱密度为 N_0 , 则噪声分量的自相关函数为

$$R_n(t) = N_0 \delta(t) \quad (4)$$

可以看出, 噪声信号的自相关函数为一冲击函数, 能量全部集中于 $t=0$ 处。所以, CW信号的自相关函数为一同频的三角形包络信号, 而噪声的自相关函数 $R_n(t)$ 的能量主要集中在 $t=0$ 处。因此, 令 $R_n(0)=0$ 可将 $R(t)$ 中的大部分噪声能量剔除, 而对信号的能量损失较小, 并且不改变原有信号的频率。

下面通过仿真加以验证, 接收信号由高斯白噪声和单频信号组成, 单频信号频率为100 Hz, 200 Hz, 300 Hz。信号长度为10 s, 采样频率为1000 Hz。

图1为噪声的自相关函数 $R_n(t)$, 从图中可以看出 $R_n(t)$ 的能量主要集中于 $t=0$ 处。图2为100 Hz CW信号的自相关函数 $R_s(t)$, 从图中可以看出 $R_s(t)$ 为一三角形包络。

从上述仿真和理论分析可知, 噪声自相关函数的能量主要集中在零点附近, 则可以通过设计一个

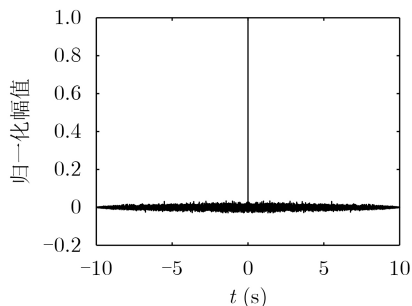


图1 $R_n(t)$

噪声抑制门来抑制其能量, 如图3所示。当噪声的自相关函数通过噪声抑制门时, 其集中在零点附近的能量得到抑制, 而信号的能量得到较为完整的保留, 从而达到抑制噪声的目的。令噪声抑制门为 $\omega(t)$, 则 $\omega(t)$ 可设置为一加权窗函数

$$\omega(t) = \begin{cases} 0, & T - \alpha \leq t \leq T + \alpha \\ 1, & \text{其他} \end{cases} \quad (5)$$

其中, T 为信号时长, 2α 为置零时间宽度, 通常选为信号带宽倒数的2倍。则信号经过噪声抑制门后的输出为

$$R_1(t) = R(t) \cdot \omega(t) \quad (6)$$

图4为常规FFT方法得到的频谱图与经过噪声抑制门处理后的频谱图的对比, 信号经过FFT处理后信噪比为2.6 dB, 经过噪声抑制门处理后信噪比为12.2 dB, 噪声能量得到明显抑制, 信噪比提高了大约9.6 dB。

3 2级ALE算法

3.1 ALE算法原理

ALE算法是宽带噪声背景下检测单频信号或窄带信号的自适应谱估计技术, 它不需要独立的参考信号, 广泛应用于线谱检测、窄带检测等领域。

图5为自适应线谱增强器的原理框图, 图中 $x(k)$ 为输入信号, $s(k)$ 为单频或窄带信号, $n(k)$ 为高斯白噪声, 则ALE的计算公式为

$$y(k) = \sum_i x(k - \Delta - i) \omega_i(k) \quad (7)$$

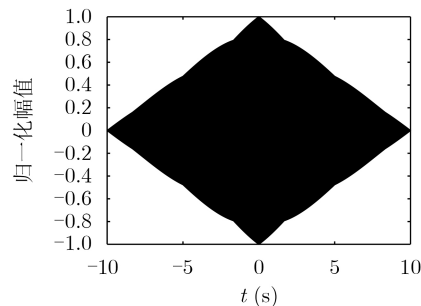


图2 $R_s(t)$

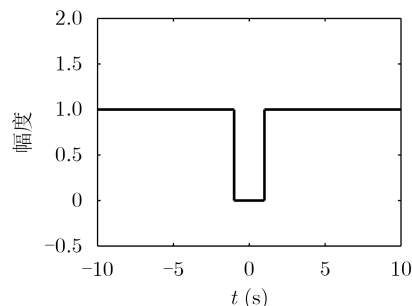


图3 噪声抑制门示意图

$$d(k) = x(k) \tag{8}$$

$$e(k) = d(k) - y(k) \tag{9}$$

$$\omega_i(k) = \omega_i(k-1) + \mu e(k) x(k-\Delta-i) \tag{10}$$

式(10)中， μ 为自适应迭代过程中的步长因子，并且 $0 < \mu < 1/\lambda_{\max}$ ， λ_{\max} 为输入信号自相关矩阵的最大特征值； ω_i 为自适应滤波器权系数； $y(k)$ 为信号经过自适应滤波器的输出； $d(k)$ 为期望响应； $e(k)$ 为误差。

ALE算法在信噪比较高时效果较好，但当信号的信噪比较低时，算法性能下降较为严重，基于此，本文提出2级自适应线谱增强算法。

3.2 2级自适应线谱增强器原理

2级自适应线谱增强器是在1级自适应线谱增强器的基础上，结合频域自适应LMS算法，将输出信号 $y(k)$ 与误差信号 $e(k)$ 的频谱作为第2级自适应LMS算法的输入，原理如图6所示。输入信号 $x(k)$ 经过1级ALE后得到线谱增强后的信号 $y(k)$ 和误差信号 $e(k)$ ，此时误差信号 $e(k)$ 中基本为噪声分量，不含

有信号分量。将误差信号 $e(k)$ 的傅里叶变换作为参考信号，信号 $y(k)$ 的傅里叶变换作为期望信号，输入到第2级自适应LMS算法中，则最后得到的输出信号即为经过2级自适应LMS算法增强线谱后的信号。

则第2级自适应LMS算法的计算公式为

$$d(k) = Y(k) \tag{11}$$

$$Y_2(k) = E^T(k)\omega(k) \tag{12}$$

$$Y_1(k) = d(k) - Y_2(k) \tag{13}$$

$$\omega(k+1) = \omega(k) + 2\mu Y_1(k)d(k) \tag{14}$$

其中， $Y(k)$ 为输入信号； $\omega(k)$ 为自适应滤波器的权值； $d(k)$ 为参考信号； $Y_1(k)$ 为误差信号， μ 为算法的步长因子，决定算法的收敛速度和稳态误差； $E(k)$ 为误差的傅里叶变换。

3.3 计算机仿真及海试数据处理

3.3.1 计算机仿真

输入信号为单频信号加高斯白噪声信号，信号频率为300 Hz，采样频率为1000 Hz，信号长度为10 s，信噪比为-19 dB。现定义局部信噪比： $SNR = S/N$ ， S 为线谱的能量， N 为背景干扰的平均能量，以此来作为评价算法性能的一个标准。

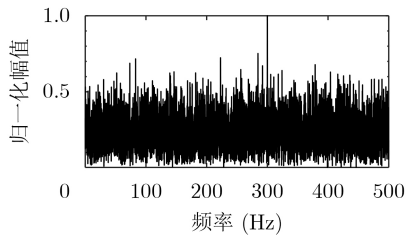
图7为3种算法的频谱图，其中图7(a)为原始信号频谱图，从图中可以看出此时线谱能量较弱，背景干扰较强，信噪比为2.3 dB；图7(b)为经过1级ALE算法处理后的结果，从图中可看出，此时线谱能量相对加强，但由于信噪比较低，算法性能不是很好，信噪比为7.5 dB；图7(c)为经过2级自适应LMS算法处理后的结果，从图中可以看出线谱能量较强，背景较为干净，效果较好，信噪比为18.5 dB，相较于1级ALE算法，信噪比提高了11 dB。

下面验证算法在更低信噪比下的性能，将上述仿真条件中的信噪比改为-22 dB，其余不变。图8为更低信噪比下3种算法的频谱图，从图中可以看出，信号基本淹没在噪声背景中，经过1级ALE算法和2级ALE算法处理后，背景噪声能量都有所降低，信噪比分别为0.4 dB，3.8 dB和6.5 dB，但两者性能都不是很好。

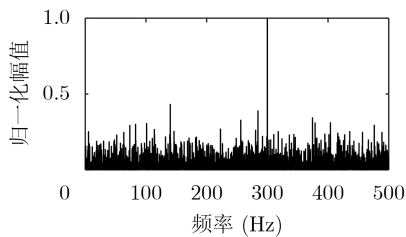
3.3.2 海试数据处理

图9(a)为原始信号的频谱图，线谱的频率分别为98 Hz，124 Hz和257 Hz，除98 Hz线谱能量较强外，其他线谱信号能量较弱。图9(b)为经过1级ALE算法处理后的信号的频谱图，信号能量有所加强，线谱较为明显。图9(c)为经过2级ALE算法处理后的频谱图，此时背景较为干净，线谱能量较强。

为更直观地比较算法的性能，现对3种算法的



(a) 原始信号频谱图



(b) 基于噪声抑制门处理的频谱图

图4 2种方法频谱图对比

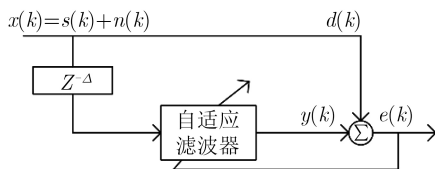


图5 ALE原理框图

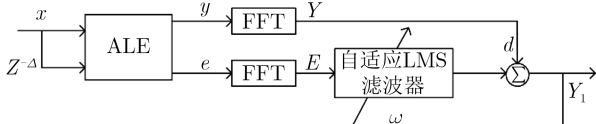


图6 2级ALE原理框图

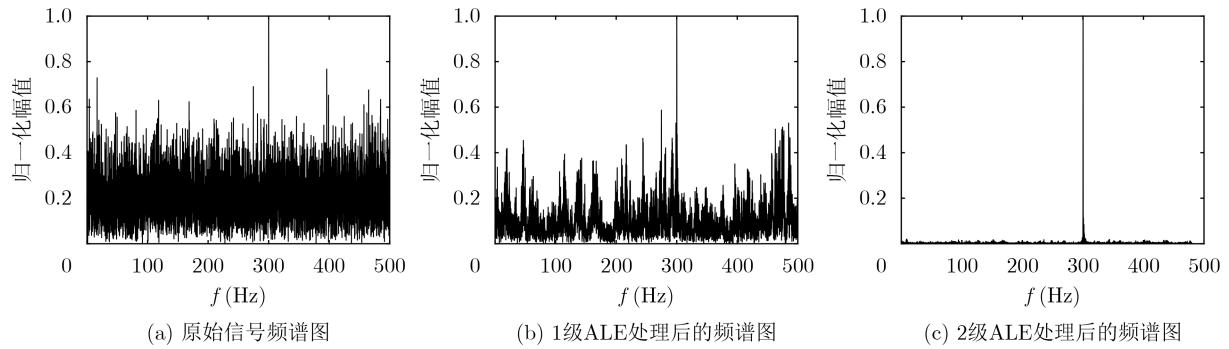


图7 3种算法的频谱图

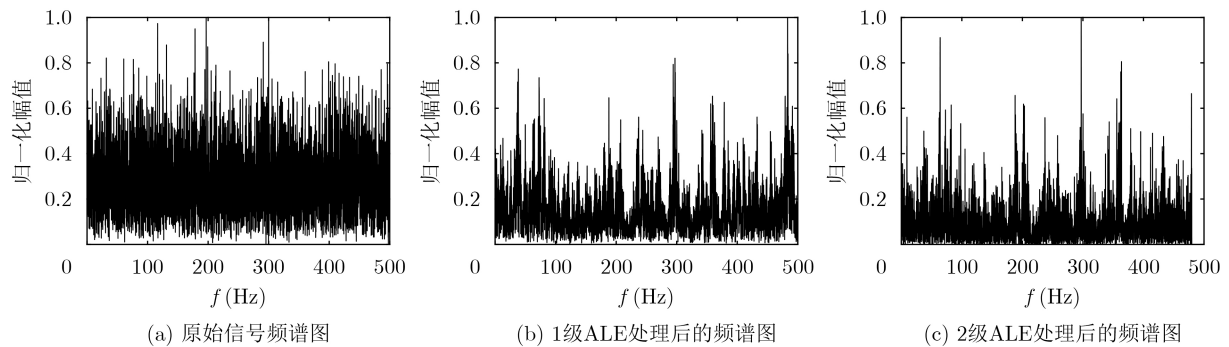


图8 更低信噪比下3种算法的频谱图

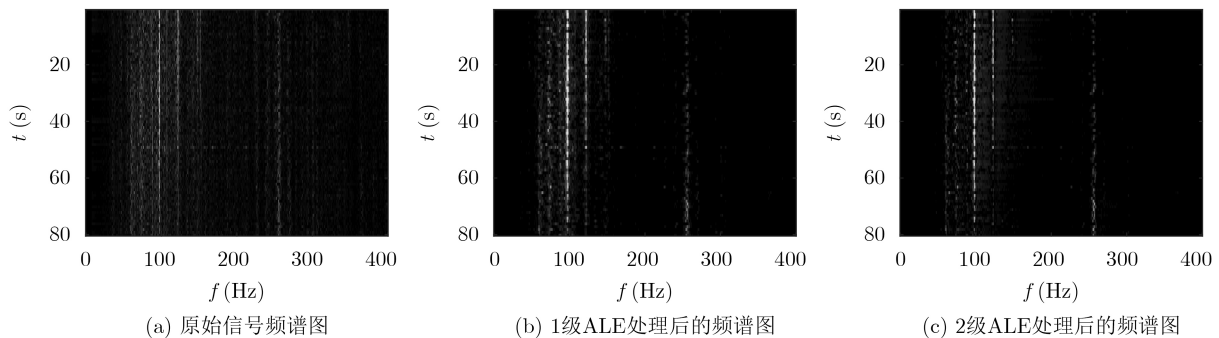


图9 3种算法处理后的频谱图对比

频谱图沿时间轴做切片,提取某个时刻的频谱图作比较,并重新定义局部信噪比为: $SNR_i = S_i/N_i$, 其中, S_i 为某根线谱能量, N_i 为以此线谱为中心的40个频点的能量的均值。

图10为某一时刻3种算法的频谱图比较。从图中看出,经过1级ALE算法和2级ALE算法处理后,线谱能量得到增强,噪声能量得到抑制,其中2级ALE算法优于1级ALE算法。

表1是3种算法的各线谱的信噪比的比较,可以看出,2级ALE算法相较于1级ALE算法,3根线谱的信噪比分别提高了0.8 dB, 1.4 dB, 0.4 dB。

通过仿真和海试数据处理可以看出,本文提出的2级ALE算法相较于1级ALE算法性能有较大提升,但当线谱能量较弱时,提升不明显,针对此问题,本文提出基于噪声抑制门的2级ALE算法。

4 基于噪声抑制门的2级ALE算法

考虑将噪声抑制门和2级ALE算法结合起来,提出一种基于噪声抑制门的2级ALE算法以提升算法的性能。下面通过仿真和海试数据处理加以验证。

4.1 算法处理流程

图11为本文提出的基于噪声抑制门的2级ALE算法处理流程,过程如下:

- (1) 对接收信号 s 进行相关处理,并将其通过噪声抑制门,得到处理后的信号 X ;
- (2) 将处理后的信号 X 及其延时信号输入到1级ALE算法中,得到输出信号 y 及误差信号 e ;
- (3) 对信号 y 及误差信号 e 进行傅里叶变换得到信号 Y 及误差信号 E ;
- (4) 将信号 Y 及误差信号 E 输入到2级ALE算法中,得到最终所需的信号频谱 Y_1 。

4.2 计算机仿真

仿真条件同上，输入信号为单频信号加高斯白噪声信号，信号频率为300 Hz，采样频率为1000 Hz，信号长度为10 s，为验证算法在低信噪比下的性能，将信噪比设为-22 dB。

图12为3种算法的对比图，从图中可以看出，在原始频谱图中，300 Hz的线谱被淹没在噪声背景中，此时的信噪比为0.9 dB。经2级ALE处理后，300 Hz处的线谱虽有所加强，旁边杂乱的线谱较多，总体性能较差，此时信噪比为4.6 dB。而经过本文提出的基于噪声抑制门的两级ALE算法处理后，线谱能量得到较大增强，总体背景较为干净，此时信噪比为20.2 dB，相较于2级ALE算法，信噪比提高了15.6 dB。

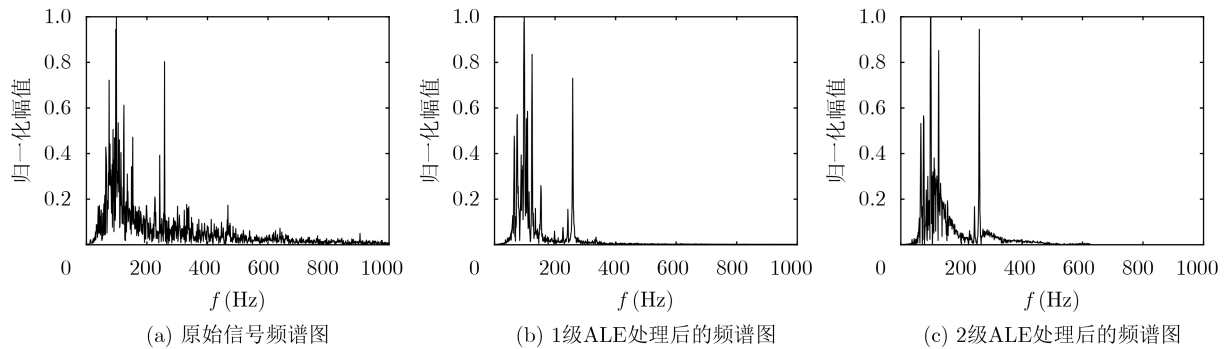


图 10 同一时刻3种算法处理后的频谱图对比

表 1 3种算法处理后的线谱信噪比较(dB)

线谱(Hz)	原始频谱信噪比	1级ALE处理后的信噪比	2级ALE处理后的信噪比
98	5.2	10.2	11.0
124	1.6	4.6	6.0
257	3.8	9.7	10.1

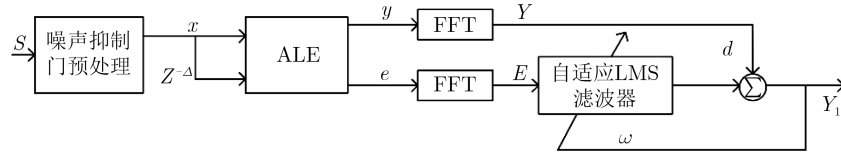


图 11 基于噪声抑制门的两级ALE算法处理流程

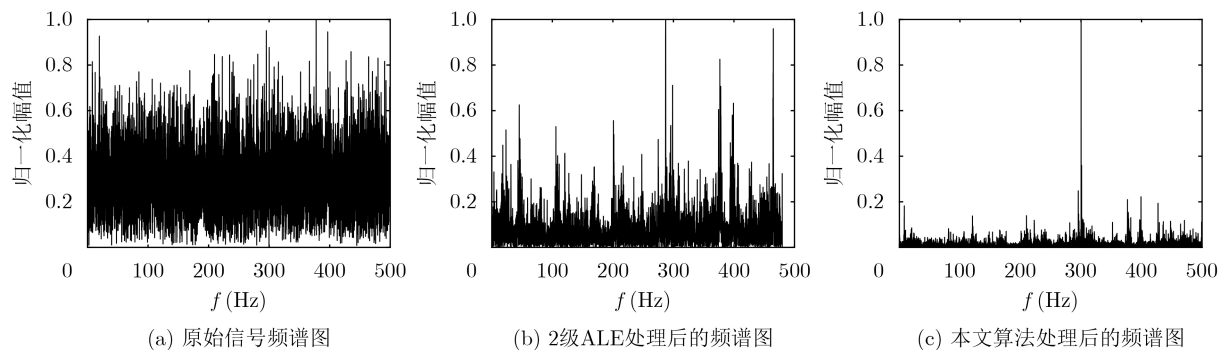


图 12 3种算法处理后的频谱图对比

4.3 海试数据处理

海试数据同上，采样频率为2048 Hz。图13(a)为原始信号频谱图，噪声背景较强。图13(b)为2级ALE算法处理后的频谱图，此时噪声背景有所减弱，线谱有所增强。图13(c)为经过本文提出的基于噪声抑制门的两级ALE算法处理后的频谱图，噪声背景较为干净，效果最好。

为更直观地比较3种算法的性能，按照3.2.2节中的处理方法，对频谱图的某一时刻数据进行切片，如图14所示。经过2级ALE算法处理后，噪声背景有所降低，线谱能量有所增强。而经过本文提出的基于噪声抑制门的两级ALE算法处理后，背景最干净，性能最好。

表2是3种算法的各线谱的信噪比的比较，可以

看出, 基于噪声抑制门的2级ALE算法相较于2级ALE算法, 信噪比分别提高了6.9 dB, 10.0 dB, 10.7 dB。

图15为另一段海试数据的处理结果, 从图15(b)中可以看出, 经2级ALE算法处理后, 噪声背景有所降低, 但能量较弱的线谱增强不明显, 效果一般。图15(c)为本文算法处理后的结果, 可以看出噪声背景得到较好的抑制, 线谱能量得到一定增强, 效果较好。

综上所述可得, 信噪比较低时, 基于噪声抑制

门的2级ALE算法性能最好, 但同时也存在一个问题, 即当频谱中存在多条线谱时, 弱线谱的增强幅度相对于强线谱的增强幅度较小, 导致弱线谱在频谱图中不是很明显, 下一步将针对此问题进行研究。

5 结束语

针对低信噪比下普通ALE算法对线谱增强效果有限的问题, 提出了2级ALE算法, 此算法性能较好, 但当信噪比更低时, 受限于自适应LMS算法的

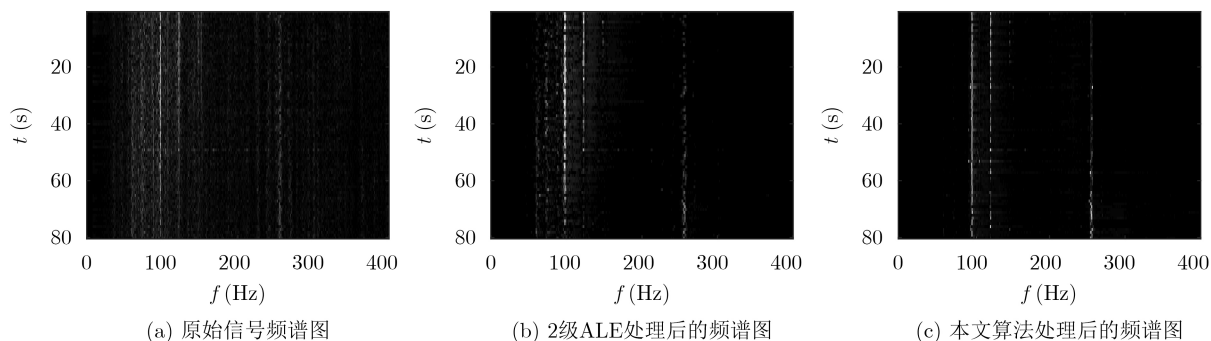


图13 3种算法处理后的频谱图对比

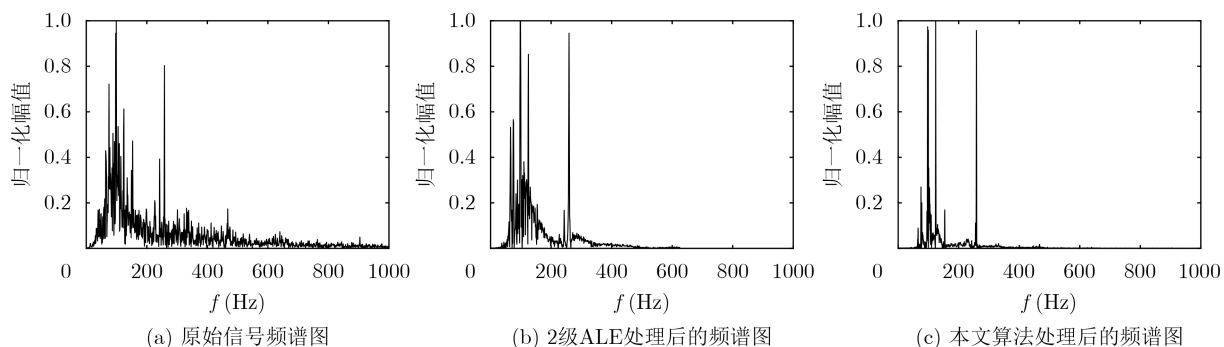


图14 同一时刻3种算法处理后的频谱图对比

表2 3种算法处理后的线谱信噪比较(dB)

线谱(Hz)	原始频谱信噪比	2级ALE处理后的信噪比	基于噪声抑制门的2级ALE处理后的信噪比
98	5.2	11.0	17.9
124	1.6	6.0	16.0
257	3.8	10.1	20.8

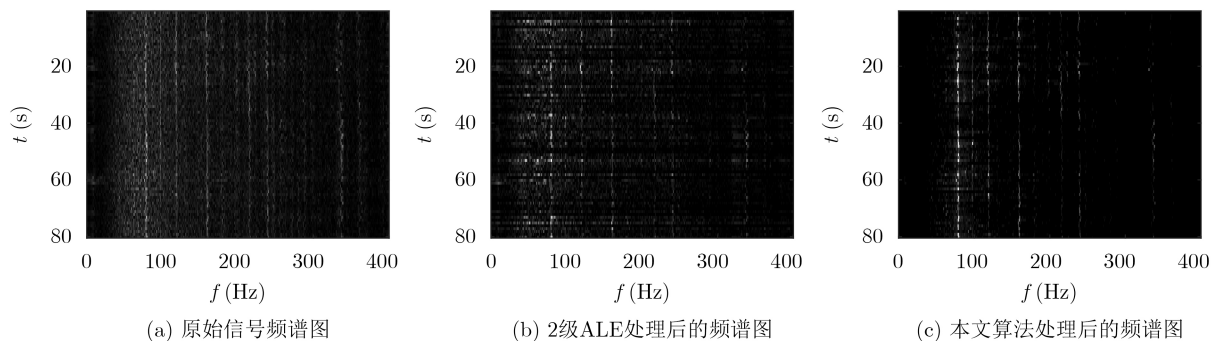


图15 3种算法处理后的频谱图对比

特性, 2级ALE算法性能下降较为严重。基于此, 本文利用噪声相关的特性, 提出一种基于噪声抑制门的2级ALE算法, 经过计算机仿真和海试数据验证, 算法在低信噪比下有较好的性能表现。

参考文献

- [1] 樊养余, 陶宝祺, 熊克, 等. 四阶累积量对角切片法提取舰船辐射噪声特征[J]. 声学学报, 2002, 27(5): 435–442. doi: [10.15949/j.cnki.0371-0025.2002.05.011](https://doi.org/10.15949/j.cnki.0371-0025.2002.05.011).
FAN Yangyu, TAO Baoqi, XIONG Ke, et al. Features extraction of ship radiated noise by fourth order cumulant diagonal slice[J]. *Acta Acustica*, 2002, 27(5): 435–442. doi: [10.15949/j.cnki.0371-0025.2002.05.011](https://doi.org/10.15949/j.cnki.0371-0025.2002.05.011).
- [2] 丛超, 李秀坤, 宋扬. 一种基于新型间歇混沌振子的舰船线谱检测方法[J]. 物理学报, 2014, 63(6): 064301. doi: [10.7498/aps.63.064301](https://doi.org/10.7498/aps.63.064301).
CONG Chao, LI Xiukun, and SONG Yang. A method of detecting line spectrum of ship-radiated noise using a new intermittent chaotic oscillator[J]. *Acta Physica Sinica*, 2014, 63(6): 064301. doi: [10.7498/aps.63.064301](https://doi.org/10.7498/aps.63.064301).
- [3] 李启虎. 水声信号处理领域若干专题研究进展[J]. 应用声学, 2001, 20(1): 1–5. doi: [10.3969/j.issn.1000-310X.2001.01.001](https://doi.org/10.3969/j.issn.1000-310X.2001.01.001).
LI Qihu. Advances of research work in some areas of underwater acoustics signal processing[J]. *Applied Acoustics*, 2001, 20(1): 1–5. doi: [10.3969/j.issn.1000-310X.2001.01.001](https://doi.org/10.3969/j.issn.1000-310X.2001.01.001).
- [4] 王逸林, 马世龙, 王晋晋, 等. 基于稀疏重构的色噪声背景下未知线谱信号估计[J]. 电子与信息学报, 2018, 40(11): 2570–2577. doi: [10.11999/JEIT171040](https://doi.org/10.11999/JEIT171040).
WANG Yilin, MA Shilong, WANG Jinjin, et al. Estimation of unknown line spectrum under colored noise via sparse reconstruction[J]. *Journal of Electronics & Information Technology*, 2018, 40(11): 2570–2577. doi: [10.11999/JEIT171040](https://doi.org/10.11999/JEIT171040).
- [5] 郭政, 胡长青. 基于变分模态分解和对称相关的目标舰船线谱检测[J]. 应用声学, 2019, 38(4): 734–741. doi: [10.11684/j.issn.1000-310X.2019.04.034](https://doi.org/10.11684/j.issn.1000-310X.2019.04.034).
GUO Zheng and HU Changqing. Target ship line-spectrum detection based on variational mode decomposition and symmetrical correlation[J]. *Journal of Applied Acoustics*, 2019, 38(4): 734–741. doi: [10.11684/j.issn.1000-310X.2019.04.034](https://doi.org/10.11684/j.issn.1000-310X.2019.04.034).
- [6] 李裕杰, 赵庆生, 王旭平, 等. 基于线性约束最小均方的谐波检测算法[J]. 电力系统保护与控制, 2019, 47(11): 16–21. doi: [10.19783/j.cnki.pspc.180863](https://doi.org/10.19783/j.cnki.pspc.180863).
LI Yujie, ZHAO Qingsheng, WANG Xuping, et al. A harmonic detection algorithm based on linearly constrained least mean square[J]. *Power System Protection and Control*, 2019, 47(11): 16–21. doi: [10.19783/j.cnki.pspc.180863](https://doi.org/10.19783/j.cnki.pspc.180863).
- [7] 王逸林, 马世龙, 邹男, 等. 时空域联合的水下未知线谱目标检测方法[J]. 电子与信息学报, 2019, 41(7): 1682–1689. doi: [10.11999/JEIT180796](https://doi.org/10.11999/JEIT180796).
WANG Yilin, MA Shilong, ZOU Nan, et al. Detection of unknown line-spectrum underwater target using space-time processing[J]. *Journal of Electronics & Information Technology*, 2019, 41(7): 1682–1689. doi: [10.11999/JEIT180796](https://doi.org/10.11999/JEIT180796).
- [8] ZHENG Enming, YU Huabing, CHEN Xinhua, et al. Line spectrum detection algorithm based on the phase feature of target radiated noise[J]. *Journal of Systems Engineering and Electronics*, 2016, 27(1): 72–80. doi: [10.1109/JSEE.2016.00008](https://doi.org/10.1109/JSEE.2016.00008).
- [9] 徐华鹏, 高丽. S函数变步长LMS算法的一种 L_2 范数修正[J]. 兰州交通大学学报, 2019, 38(2): 51–57. doi: [10.3969/j.issn.1001-4373.2019.02.001](https://doi.org/10.3969/j.issn.1001-4373.2019.02.001).
XU Huapeng and GAO Li. L_2 norm correction of variable step size LMS algorithm based on S function[J]. *Journal of Lanzhou Jiaotong University*, 2019, 38(2): 51–57. doi: [10.3969/j.issn.1001-4373.2019.02.001](https://doi.org/10.3969/j.issn.1001-4373.2019.02.001).
- [10] 周胜文, 石俊, 周云生, 等. 一种基于多项式函数的VSSNLMS算法[J]. 遥测遥控, 2019, 40(1): 28–32, 60. doi: [10.3969/j.issn.2095-1000.2019.01.005](https://doi.org/10.3969/j.issn.2095-1000.2019.01.005).
ZHOU Shengwen, SHI Jun, ZHOU Yunsheng, et al. A variable step size normalized LMS algorithm based on polynomial function[J]. *Journal of Telemetry, Tracking and Command*, 2019, 40(1): 28–32, 60. doi: [10.3969/j.issn.2095-1000.2019.01.005](https://doi.org/10.3969/j.issn.2095-1000.2019.01.005).
- [11] 王蕾, 雷国赐, 李珂, 等. 一种改进的基于正弦函数变步长LMS算法的谐波检测方法[J]. 西南科技大学学报, 2019, 34(2): 77–82. doi: [10.3969/j.issn.1671-8755.2019.02.014](https://doi.org/10.3969/j.issn.1671-8755.2019.02.014).
WANG Lei, LEI Guoci, LI Ke, et al. An improved harmonic detection method based on sinusoidal variable LMS algorithm[J]. *Journal of Southwest University of Science and Technology*, 2019, 34(2): 77–82. doi: [10.3969/j.issn.1671-8755.2019.02.014](https://doi.org/10.3969/j.issn.1671-8755.2019.02.014).
- [12] KWONG R H and JOHNSTON E W. A variable step size LMS algorithm[J]. *IEEE Transactions on Signal Processing*, 1992, 40(7): 1633–1642. doi: [10.1109/78.143435](https://doi.org/10.1109/78.143435).
- [13] EVANS J B, XUE P, and LIU B. Analysis and implementation of variable step size adaptive algorithms[J]. *IEEE Transactions on Signal Processing*, 1993, 41(8): 2517–2535. doi: [10.1109/78.229885](https://doi.org/10.1109/78.229885).
- [14] MAYYAS M. A variable step-size selective partial update LMS algorithm[J]. *Digital Signal Processing*, 2013, 23(1): 75–85. doi: [10.1016/j.dsp.2012.09.004](https://doi.org/10.1016/j.dsp.2012.09.004).
- [15] 全喜峰, 陈卫松, 钱隆彦, 等. 一种非线性变步长LMS自适应滤波算法[J]. 无线电通信技术, 2019, 45(4): 391–396. doi: [10.3969/j.issn.1003-3114.2019.04.011](https://doi.org/10.3969/j.issn.1003-3114.2019.04.011).
TONG Xifeng, CHEN Weisong, QIAN Longyan, et al. A nonlinear variable step size LMS adaptive filtering algorithm[J]. *Radio Communications Technology*, 2019,

- 45(4): 391–396. doi: [10.3969/j.issn.1003-3114.2019.04.011](https://doi.org/10.3969/j.issn.1003-3114.2019.04.011).
- [16] 韩君, 郑晓. 改进变步长自适应分布式滤波算法[J]. 机械设计与制造, 2019(1): 162–165. doi: [10.19356/j.cnki.1001-3997.2019.01.042](https://doi.org/10.19356/j.cnki.1001-3997.2019.01.042).
- HAN Jun and ZHENG Xiao. Estimation improvement variable step size adaptive distributed filtering algorithm[J]. *Machinery Design & Manufacture*, 2019(1): 162–165. doi: [10.19356/j.cnki.1001-3997.2019.01.042](https://doi.org/10.19356/j.cnki.1001-3997.2019.01.042).
- [17] 何希盈, 李成新, 张磊, 等. 矢量水听器自适应线谱增强应用研究[J]. 海洋技术, 2011, 30(3): 68–71. doi: [10.3969/j.issn.1003-2029.2011.03.018](https://doi.org/10.3969/j.issn.1003-2029.2011.03.018).
- HE Xiyong, LI Chengxin, ZHANG Lei, et al. Application of adaptive line enhancement in vector hydrophone[J]. *Ocean Technology*, 2011, 30(3): 68–71. doi: [10.3969/j.issn.1003-2029.2011.03.018](https://doi.org/10.3969/j.issn.1003-2029.2011.03.018).
- [18] 路晓磊, 兰丽茜, 尹聪. 自适应线谱增强器在舰船噪声提取中的应用[J]. 电声技术, 2015, 39(9): 58–61. doi: [10.16311/j.audioe.2015.09.11](https://doi.org/10.16311/j.audioe.2015.09.11).
- LU Xiaolei, LAN Liqian, and YIN Cong. Application of ALE on extraction of line spectrum of ship radiated noise[J]. *Audio Engineering*, 2015, 39(9): 58–61. doi: [10.16311/j.audioe.2015.09.11](https://doi.org/10.16311/j.audioe.2015.09.11).
- [19] 石敏, 徐裘, 岳剑平. 基于两级自适应线谱增强器的舰船辐射噪声线谱检测[J]. 舰船科学技术, 2012, 34(8): 79–82. doi: [10.3404/j.issn.1672-7649.2012.08.019](https://doi.org/10.3404/j.issn.1672-7649.2012.08.019).
- SHI Min, XU Xi, and YUE Jianping. Detection of ship radiated noise line spectra based on two-level adaptive line enhancement[J]. *Ship Science and Technology*, 2012, 34(8): 79–82. doi: [10.3404/j.issn.1672-7649.2012.08.019](https://doi.org/10.3404/j.issn.1672-7649.2012.08.019).
- [20] 张炜, 程锦房, 许杰. 基于矢量相干积累的舰船特征线谱增强算法[J]. 探测与控制学报, 2013, 35(1): 71–75.
- ZHANG Wei, CHENG Jinfang, and XU Jie. Ship characteristic line-spectrum enhanced based on vectorial coherent-integrator[J]. *Journal of Detection & Control*, 2013, 35(1): 71–75.
- [21] 王天辉, 马立元, 李永军, 等. 一种改进的变步长自适应谱线增强算法[J]. 自动化仪表, 2011, 32(3): 26–28. doi: [10.3969/j.issn.1000-0380.2011.03.008](https://doi.org/10.3969/j.issn.1000-0380.2011.03.008).
- WANG Tianhui, MA Liyuan, LI Yongjun, et al. An improved variable step-size adaptive spectral-line enhancement algorithm[J]. *Process Automation Instrumentation*, 2011, 32(3): 26–28. doi: [10.3969/j.issn.1000-0380.2011.03.008](https://doi.org/10.3969/j.issn.1000-0380.2011.03.008).
- [22] 罗斌, 王茂法, 王世闯. 一种高效的弱目标线谱检测算法[J]. 声学技术, 2017, 36(2): 171–176. doi: [10.16300/j.cnki.1000-3630.2017.02.013](https://doi.org/10.16300/j.cnki.1000-3630.2017.02.013).
- LUO Bin, WANG Maofa, and WANG Shichuang. A highly efficient weak target line-spectrum detection algorithm[J]. *Technical Acoustics*, 2017, 36(2): 171–176. doi: [10.16300/j.cnki.1000-3630.2017.02.013](https://doi.org/10.16300/j.cnki.1000-3630.2017.02.013).
- [23] 薛山花, 黄勇, 尹力. 基于动态规划的微弱信号线谱增强研究[J]. 应用声学, 2011, 30(3): 193–201. doi: [10.3969/j.issn.1000-310X.2011.03.005](https://doi.org/10.3969/j.issn.1000-310X.2011.03.005).
- XUE Shanhua, HUANG Yong, and YIN Li. Line spectrum enhancements using dynamical programming process for weak signals[J]. *Applied Acoustics*, 2011, 30(3): 193–201. doi: [10.3969/j.issn.1000-310X.2011.03.005](https://doi.org/10.3969/j.issn.1000-310X.2011.03.005).
- 马 凯: 男, 1993年生, 博士, 研究方向为水声目标识别.
 蔡昱明: 男, 1982年生, 工程师, 研究方向为水声探测.
 王易川: 男, 1976年生, 副教授, 研究方向为水声目标识别.
 程玉胜: 男, 1963年生, 教授, 研究方向为水声目标识别.

责任编辑: 陈 倩