

基于长序列 FFT 和 LMS 原理的调制线谱分析

程广涛, 戴卫国, 柯斌, 程玉胜

(海军潜艇学院水声中心, 青岛 266071)

摘要: 从数学上证明了长序列 FFT 分析可实现噪声抑制, 从而提高信噪比, 其实质相当于时间积累。利用变步长的自适应线谱增强器进行线谱增强, 可以提高信噪比。用两种方法分析了实际舰船信号的调制谱, 讨论了合理选取参数的方法。实验证明, 合理运用这两种方法, 可以达到较好的分析效果。

关键词: FFT; 自适应线谱增强; 舰船辐射噪声; 调制谱

中图分类号: O427.5 文献标识码: A 文章编号: 1000-3630(2005)02-0101-04

Modulation spectral analysis based on long sequence FFT and LMS theory

CHENG Guang-tao, DAI Wei-guo, KE Bin, CHENG Yu-sheng

(Underwater Acoustics Center, Navy Submarine Academy, Qingdao 266071, China)

Abstract: It is proved that long sequence FFT analysis can suppress noise therefore improve SNR, which is equivalent to time accumulation. A variable step-size algorithm is used in adaptive line spectrum enhancement (ALE) to enhance the line spectrum so that SNR is enhanced. Both methods are used to analyze ship-radiated noise. The results show that that method is effective in extracting spectrum lines.

Key words: FFT; adaptive line spectrum enhancement; ship-radiated noise; modulation line spectrum

1 引言

水下目标辐射噪声除在低频处有线谱外, 主要为宽带分量, 且受到螺旋桨叶片频率和轴频的振幅调制, 因此舰船辐射噪声具有鲜明的节奏感^[1-2]。有经验的声纳员, 正是通过听测噪声节奏的轻重缓急变化, 来获取目标的转速、叶片数信息, 结合经验, 进行目标判型识别。舰船噪声解调谱分析是舰船噪声自动目标识别的重要分析手段之一, 通过分析可以获得对舰船目标识别具有特别意义的螺旋桨转速、螺旋桨叶片数甚至舰车的车数等舰船固有物理特征。相对来讲, 舰船工况稳定的情况下, 调制线谱也具有稳定性。从工程应用的角度来说, 调制谱特征仍然是目前最稳健的谱分类判据。当信噪比较低时, 如何从

信号中提取调制的低频线谱是一个极有意义的课题。本文从数学上证明了长序列 FFT 分析可实现噪声抑制, 提高信噪比, 其实质相当于时间积累。可利用变步长的自适应线谱增强器进行线谱增强, 提高信噪比, 并利用以上两种方法分析了实际舰船信号的调制谱。

2 长序列 FFT 抑噪

舰船在工况不变的情况下, 其轴频及其叶片频率具有稳定性。因而从这个意义上讲, 可以把舰船噪声视为平稳信号。对于平稳信号, 长时间序列的 FFT 可以提高信噪比。

2.1 长序列 FFT 抑噪原理

序列的长 FFT 变换对信号中噪声的抑制, 其本质与信号的时间积累是等效的。

设 $x(t)=\sin(\omega t)$, $n(t)$ 为高斯白噪声, 待分析信号为 $s(t)=x(t)+n(t)$, $x(t)$ 离散时可表示为时间序列: $x[l]=\sin$

$(2\pi f_u l/f_s); n(t)$ 的离散表示为: $n[l], l=1,2,3,\dots,M$ 。 f_u 为信号频率, f_s 为采样频率。根据帕什瓦尔定理^[3]:

$$|X_N[f]|^2 = N \sum_{l \in \langle N \rangle} |x[l]|^2 \quad (1)$$

长度为 KN 的单频信号的 FFT 为:

$$|X_{KN}[f]|^2 = KN \sum_{l \in \langle KN \rangle} |x[l]|^2 = K^2 N^2 \sum_{l \in \langle N \rangle} |x[l]|^2 \quad (2)$$

所以 $|X_{KN}[f]| = K |X_N[f]| \quad (3)$

而白噪声为一常数,

$$|N_{KM}[f]| = \sqrt{K} |N_M[f]| \quad (4)$$

所以,当序列增加为 K 倍长度时,单频信号的增益为 K ,而噪声的增益仅为 \sqrt{K} ,归一化信噪比可提高 \sqrt{K} 倍。

长序列的 FFT 与时间积累是等效的。由于单频信号的能量集中在某一频率,而噪声的能量被平分到所有频率处,因而当能量增加时,信号的频谱要比噪声的频谱增益大。时间积累可以抑制噪声。而且对于平稳信号来说,长序列的 FFT 抑制噪声、增强线谱的效果比较理想。这对于微弱信号的检测很重要。

2.2 长序列分析

根据文献[4],螺旋桨噪声可简化为下式:

$$y(t) = [1 + m(\alpha) \sum \sin(2\pi f_i t)] \cdot n(t) \quad (5)$$

式中 $m(\alpha)$ 表示调制深度, $n(t)$ 为高斯白噪声。仿真信号根据式(5)产生,分别采用 512 点 FFT 累积和 8192 点 FFT 变换,得到 Demon 谱图。

图 1(a) 给出了仿真信号的 512 点 FFT 的 Demon 谱图,图 1(b) 为 2048 点 FFT 的 Demon 谱图,图 1(c) 为 2048 点时间积累(每帧 512 点数据)的 Demon 谱图。仿真信号采样频率为 25kHz,调制信号为 4Hz 与 10Hz,调制度为 0.007。Demon 谱做法可参见文献[4]。

数据增为 8192 点时的处理结果如图 2 所示。图 2(a) 表示 512 点 FFT 谱图,图 2(b) 为长序列 FFT 谱图,图 2(c) 为时间积累效果图。由图可知,长序列数据的 FFT 可以提高低频调制线谱的检测能力。这对平稳信号来讲,效果是非常理想的。为了降低噪声阈值,可以将长序列 FFT 与时间积累并用。只要数据足够长,平稳信号的长 FFT 序列分析就可以达到理想效果。

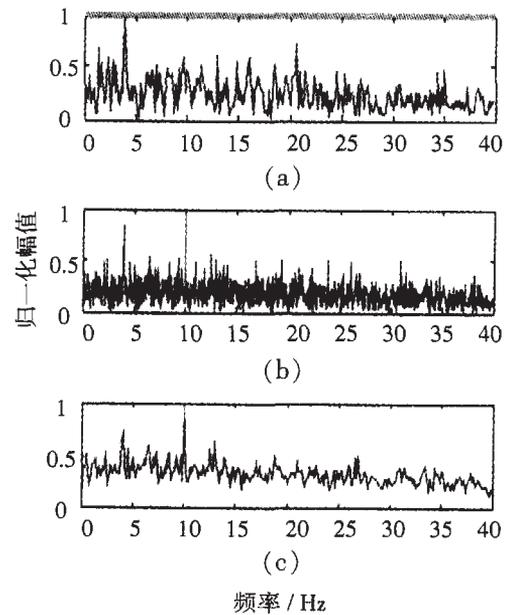


图 1 模拟数据 2048 点 FFT 及时间积累效果 Demon 谱图
Fig.1 Demon spectrum of simulated data obtained by 2048 point FFT and time accumulation

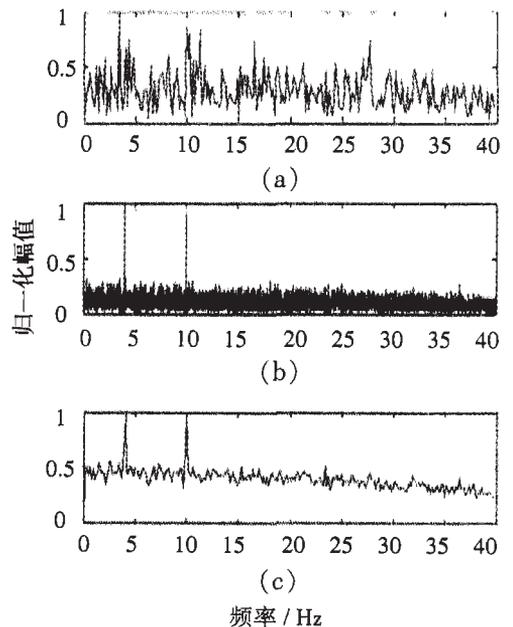


图 2 模拟数据 8192 点 FFT 及时间积累效果 Demon 谱图
Fig.2 Demon spectrum of simulated data obtained by 8129 point FFT and time accumulation

3 自适应线谱增强器

当舰船辐射噪声信号的平稳性不好时,我们可以使用自适应线谱增强器进行处理。利用环境噪声与信号的不相关,以及舰船辐射噪声信号的相关性,线谱增强器可以较好地实现线谱捕捉功能,从而抑制噪声影响。

3.1 自适应线谱增强原理

1967年,Widrow 提出了自适应线谱增强(ALE)的经典的算法——最小均方 LMS 算法,成为自适应算法的奠基性工作^[5-6]。首先将混合信号进行去相关延迟,延迟时间应大于噪声的相关半径,由于信号不去相关,ALE 就自适应的与相关的单频线谱信号进行匹配,从而将信号检测出来。时域 FIR 自适应线谱增强器由 L 个权系数的线性预测滤波器所组成,其中权系数 $W_l(k)$ 以输入采样速率 f_s 被自适应地更新。自适应谱线增强器的输出 $r(k)$ 由下式定义

$$r(k) = \sum_{l=0}^{L-1} W_l(k)x(k-l-\Delta) \quad (6)$$

LMS 算法为:

$$\overline{W(k+1)} = \overline{W(k)} + 2\mu\varepsilon(k)\overline{x(k-\Delta)} \quad (7)$$

式中

$$\overline{x(k-\Delta)} = [x(k-\Delta), x(k-\Delta-1), \dots, x(k-\Delta-L+1)]^T$$

$\varepsilon(k) = x(k) - r(k)$, Δ 是滤波器的预测距离, W 是滤波器权系数, x 为输入, ε 为误差信号, μ 为步长因子。以上即为自适应线谱增强过程。

3.2 LMS 分析

由于主输入端不可避免地存在干扰噪声,LMS 算法将产生参数失调噪声,干扰噪声越大,引起的失调噪声就越大,减少步长因子 μ 可减少自适应滤波算法的稳态失调噪声,提高算法的收敛精度。然而 μ 的减少将降低算法的收敛速度和跟踪速度。因此,固定步长的自适应滤波算法在收敛速度、时变系统跟踪速度与收敛精度方面对算法调整步长因子的要求是相互矛盾的。

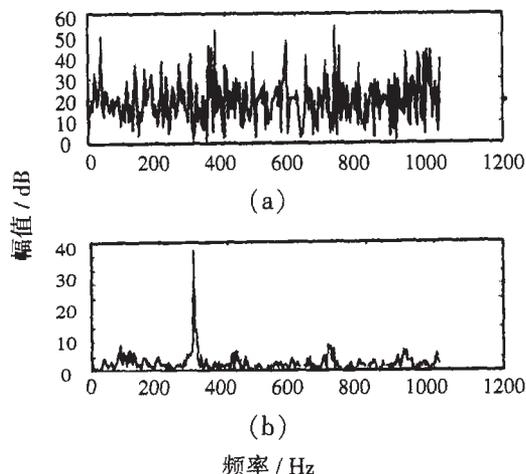


图 3 模拟数据自适应线谱增强效果 Demon 谱图
Fig.3 Demon spectrum of simulated data obtained with adaptive line spectrum enhancement

本文采用变步长自适应线谱增强算法, $\mu(n) = 1.8 * (1/(1+\exp(-1.2|\varepsilon(k)|-0.4)))$ 。对仿真信号(300Hz 的单频受噪声污染信号,信噪比为-17dB)的处理结果如图 3。迭代过程利用相关信号作为目标信号,自动调整迭代步长。图 3(a)为原始信号,图 3(b)为线谱增强后的谱图。从图中可以看出 LMS 对于模拟信号的线谱增强效果是很好的,而且算法收敛时间明显缩短。

4 实际舰船信号低频调制线谱分析

对实录舰船噪声信号分别进行长 FFT 序列分析和 LMS 线谱增强处理,信号采样频率 51.2kHz。

通过对大量实际舰船噪声信号的分析发现,由于实测数据并非严格平稳信号,过分追求 FFT 序列的长度可能会有不可预知的干扰,因而对待分析信号可结合长序列与时间积累,选取适当长度的序列 FFT 分析,并对序列进行 50% 重叠积累。图 4 给出了该方法的谱图,图 4(a)为 512 点序列的 FFT 分析,图 4(b)为 2048 点序列 FFT 分析。图 4(c)为 1024 点的积累谱图。由图可知,结合时间积累的长 FFT 分析效果很好,即抑制了干扰噪声,又使得叶频与轴频的各次谐波非常明显。结合工程实践经验,在进行解调谱分析时序列长度选在 1024 或 2048 点比较合适。

图 5 给出了利用变步长的 LMS 算法得到的谱图,由于信噪比很低,在原始谱图上低频线谱不明

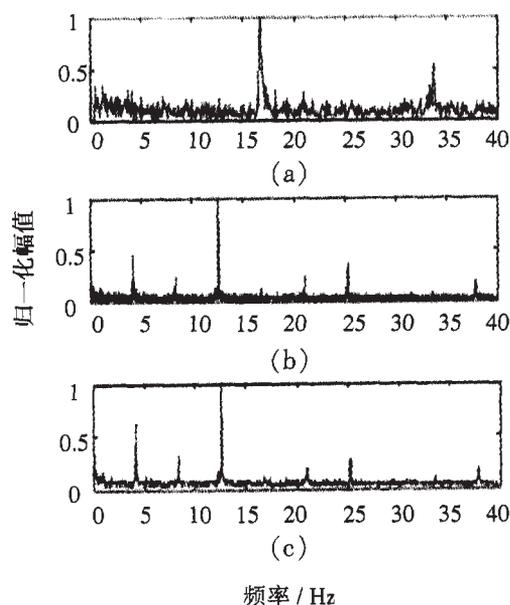


图 4 实际舰船噪声长 FFT 及结合时间积累 Demon 谱图
Fig.4 Demon spectrum of ship radiated noise obtained by long FFT and time accumulation

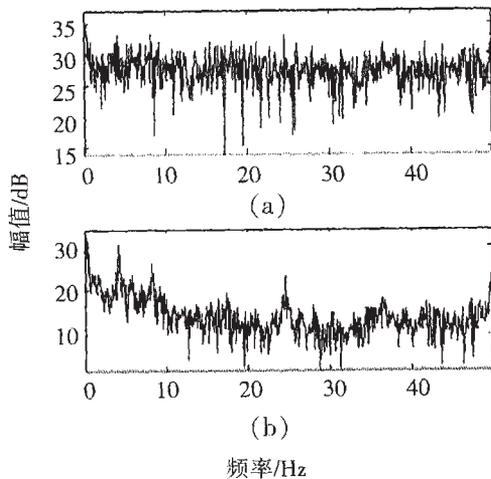


图 5 实际舰船噪声线谱增强器前后的 Demon 谱图
Fig.5 Demon spectrum of ship radiated noise obtained by adaptive line spectrum enhancement

显,基本上读不到舰船的轴频与叶频信息;而经过 LMS 算法处理后的谱图线谱得到明显增强,很容易得到轴频信息,从而得到速度信息。

5 结 论

本文基于工程实践经验,证明了长序列 FFT 对噪声的抑制原理。在工程应用中必须合理选取序列的长度,并与时间积累相结合,才能达到较好的效果。经验表明,在进行解调谱分析时序列长度一般选择 1024 或 2048 点比较合适,当信号平稳性较好、信噪比较高时,可选择 2048 或 4096 点,同时要与采样频率相匹配。

大量分析数据表明,对于稳定信号,长序列 FFT 分析可以明显提高信噪比,但由于实际附加噪声并不是完全不相干的,频谱也不完全平坦,实际舰船信号的抑噪效果低于理论计算值。

使用变步长的 LMS 自适应线谱增强器计算低频调制线谱的效果良好,可以动态地调整迭代步长,

在工程应用中既可以避免过迭代问题,又明显缩短收敛时间,自适应地捕捉线谱。步长因子 μ 可以根据实验选取。本文选择的最优参数是 1.8、1.2、0.4。

长序列 FFT 和 LMS 算法的计算量较大,高速计算的 DSP 器件的出现使这些算法在工程中得以实现,可以满足工程需要。

参 考 文 献

- [1] 蒋国健.舰船噪声不同窄带包络间相关[J].声学学报, 2002, **27**(5): 425-428.
JIANG Guojian. Envelopes correlation between different narrow-band filtered ship noise [J]. ACTA ACUSTICA, 2002, **27**(5): 425-428.
- [2] 吴国清.提取螺旋桨识别特征的新途径[J].声学学报, 1993, **18**(3): 210-216.
WU Guoqing. New method of extracting screw recognition features. [J]. ACTA ACUSTICA, 1993, **18**(3): 210-216.
- [3] 徐守时.信号与系统[M].合肥:中国科技大学出版社, 1999.290-293.
XU Shoushi. Signal and system [M]. Hefei: Science and technology university Press, 1999. 290-293.
- [4] 程玉胜,戴卫国.舰船噪声目标识别 DEMON 分析中的几个问题[J].潜艇学术研究,2002, **20**(6): 622-26.
CHENG Yusheng, DAI Weigu. Some points concerned in the Demon analysis of ship noise radiated noise target recognition[J]. Submarine Academic Research, 2002, **20**(6): 622-26.
- [5] 何振亚.自适应信号处理[M].北京:科学出版社,2002. 198-204
HE Zhenya. Adaptive signal processing [M]. Beijing: Science Press, 2002. 198-204.
- [6] 李启虎.声纳信号处理引论[M].北京:海洋出版社,2000. 280-295.
LI Qihu. Inductive discussion of sonar signal processing [M]. Beijing: Ocean Press, 2000. 280-295.