

◇ 李启虎院士八十华诞学术论文 ◇

基于变分模态分解和对称相关的 目标舰船线谱检测

郭 政^{1,2} 胡长青^{1†}

(1 中国科学院声学研究所东海研究站 上海 201815)

(2 中国科学院大学 北京 100049)

摘要 线谱检测是水下目标识别中的一个重要研究方向。针对舰船辐射噪声线谱信号检测与提取的需求,该文改进提出了一种基于变分模态分解和对称相关的降噪处理方法,研究了与目标线谱信号不相关的加性高斯噪声消除办法。假设舰船辐射噪声除线谱成分外均为高斯噪声,对舰船辐射噪声中线谱成分进行检测。理论推导、仿真计算与实验数据处理结果均表明,该文提出的方法能较好地检测加性高斯噪声背景下的线谱成分,较传统的相关方法更为有效。

关键词 舰船辐射噪声,变分模态分解,对称相关,线谱检测

中图分类号: TN911.7 文献标识码: A 文章编号: 1000-310X(2019)04-0734-08

DOI: 10.11684/j.issn.1000-310X.2019.04.034

Target ship line-spectrum detection based on variational mode decomposition and symmetrical correlation

GUO Zheng^{1,2} HU Changqing¹

(1 *Shanghai Acoustics Laboratory, Chinese Academy of Sciences, Shanghai 201815, China*)

(2 *University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China*)

Abstract Line-spectrum detection is one of the important research directions of underwater target recognition. In view of the demand of the ship radiated noise signal's detection and extraction, a kind of noise reduction processing method based on variational mode decomposition (VMD) and symmetrical correlation is put forward in this paper, and the de-noising method of additive Gaussian noise unrelated to target line-spectrum signal is also studied. Suppose that ship radiated noise except line-spectrum composition is Gaussian noise, the line-spectrum composition of the ship radiated noise has been detected. It is showed that the method proposed in this paper is able to better detect line-spectrum composition in additive Gaussian noise background based on theoretical derivation, simulation results and experimental data processing results, which is more effective than traditional correlation method.

Key words Ship radiated noise, Variational mode decomposition, Symmetrical correlation, Line-spectrum detection

2019-02-14 收稿; 2019-05-30 定稿

作者简介: 郭政 (1994-), 男, 山东嘉祥人, 博士研究生, 研究方向: 信号与信息处理。

† 通讯作者 E-mail: hchq@mail.ioa.ac.cn

0 引言

舰船辐射噪声的检测与识别是对目标舰船进行识别与分类的重要手段,也是被动声呐系统领域常见且重要的研究问题。

理论与实验研究均表明,舰船辐射噪声中包含丰富且有规律的线谱成分,主要由周期性规律转动的舰船螺旋桨与水体相互作用造成,这些有规律的线谱成分常以加性噪声形式出现于低频段。通过舰船辐射噪声线谱检测提取目标舰船区别于其他目标的特征,可作为目标检测与识别的一种手段。相对高频声信号来说,低频声信号在水中衰减更小,传播距离更远,有利于在远距离条件下进行目标检测与识别。此外,舰船辐射噪声线谱控制对保持舰船声隐蔽性有重要意义,对舰船减振降噪研究也有重要参考价值。另一方面,随着国内外近年来减振降噪技术水平不断提高,水声目标的辐射噪声强度较环境噪声不断下降,被动声呐探测难度也随之上升。这对目标舰船的线谱检测也提出了更高要求。

国内外对目标线谱检测的相关研究开展已久,并取得了较为瞩目的成果。吴国清等^[1]对线谱的稳定性和唯一性进行了研究,在统计意义上研究了利用线谱模板记忆特定舰船的线谱特征。李启虎等^[2-3]讨论了几种不同的小信噪比条件下单频信号分量的检测方法,并通过理论分析和数值仿真进行研究,指出分段快速傅里叶变换检测对可能存在的频率漂移具有较好的宽容性。单广超等^[4]结合周期图谱法和DEMON谱分析,通过线谱与连续谱分离、虚警去除及线谱并归,对舰船辐射噪声线谱进行了检测分析。Venugopal等^[5]和Wagstaff^[6]利用目标线谱的相位起伏特性,抑制了背景噪声能量干扰,改善了对目标的监测性能。从超等^[7]提出了一种基于新型间歇混沌振子的舰船线谱检测方法,对未知频率微弱舰船线谱信号进行了有效检测。张士忠等^[8]将对称相关函数法应用于线谱信号检测,仿真表明该方法线谱检测能力优于经典功率谱方法。

本文视舰船辐射噪声为线谱成分与加性高斯噪声构成,给出目标舰船辐射噪声信号的模型,提出一种基于变分模态分解(Variational mode decomposition, VMD)和对称相关的处理方法,用于检测目标舰船辐射噪声线谱成分。文章通过仿真计算对比了不同信噪比下改进方法和传统方法目标线谱检测的准确率,并进行湖上实验验证了仿真结果。

1 舰船辐射噪声信号模型

将船辐射噪声表示为线谱成分与高斯噪声叠加^[3]:

$$s(t) = \sum_{n=1}^N A_n \cos(2\pi f_n t + \varphi_n) + n(t), \quad (1)$$

其中, A_n 表示线谱信号的幅度, φ_n 表示相位, f_n 表示频率, $n(t)$ 表示除线谱信号外的高斯噪声。

取噪声 $n(t)$ 均值为0, 方差为 σ^2 , 每阶线谱功率为 $A_n^2/2$, 于是原始信号信噪比可表示为

$$\text{SNR}_{\text{in}} = 10 \lg \left(\frac{1}{\sigma^2} \sum_{n=1}^N \frac{A_n^2}{2} \right). \quad (2)$$

2 基于VMD和对称相关的线谱检测方法

2.1 VMD基本原理

VMD算法是一种自适应的模态分解信号处理方法^[9]。传统的经验模态分解(Empirical mode decomposition, EMD)算法存在模态混叠、易受到采样频率影响、难以分辨频率距离相近的模态分量等局限性^[9], 而VMD算法是非递归的, 且各阶模态分量均紧密围绕在其对应的中心频率附近, 通过构造约束变分模型来进行求解, 因而可以克服EMD算法的局限性。

VMD算法定义模态为

$$u_k(t) = A_k(t) \cos(\varphi_k(t)), \quad (3)$$

其中, $A_k(t)$ 表示模态的瞬时幅值, $\varphi_k(t)$ 表示模态的相位, 模态 $u_k(t)$ 为调幅-调频信号形式。

首先预置模态的阶数, 将原始信号分解为预置阶数的带限本征模态函数(Band-limited intrinsic mode function, BIMF), 进而把问题转移到变分问题的框架中, 通过构造并求解变分约束模型进行线谱检测。该变分约束模型可描述为求出 K 个特定的围绕在各自中心频率周围的BIMF分量 $u_k(t)$, 使得各阶BIMF分量估计带宽之和最小。根据上述步骤, 构造如下约束变分模型^[10]:

$$\begin{cases} \min_{\{u_k\}, \{\omega_k\}} \left\| \partial_t \left[\left(\delta(t) + \frac{j}{\pi t} \right) * u_k(t) \right] e^{-j\omega_k t} \right\|_2^2, \\ \text{s.t.} \sum_{k=1}^K u_k(t) = f(t), \end{cases} \quad (4)$$

式(4)中, $\delta(t)$ 为单位脉冲函数, ∂_t 为函数求偏导符号, $\{u_k\}$ 表示 K 阶BIMF模态分量, $\{\omega_k\}$ 表示各阶分量的中心频率。

接下来求解约束变分问题。引入惩罚因子 α 和 Lagrange 乘子 λ , 将式(4)转化为非约束变分问题, 得到式(5)^[10]:

$$\begin{aligned} & L(\{u_k\}, \{\omega_k\}, \lambda) \\ &= \alpha \sum_{k=1}^K \left\| \partial_t \left[\left(\delta(t) + \frac{j}{\pi t} \right) * u_k(t) \right] e^{-j\omega_k t} \right\|_2^2 \\ &+ \left\| f(t) - \sum_{k=1}^K u_k(t) \right\|_2^2 \\ &+ \left\langle \lambda(t), f(t) - \sum_{k=1}^K u_k(t) \right\rangle, \end{aligned} \quad (5)$$

而后对式(5)进行迭代计算。迭代过程中更新变量的表达式如下:

$$\hat{u}_k^{n+1}(\omega) = \frac{\hat{f}(\omega) - \sum_{i=1}^{K-1} \hat{u}_i^{n+1}(\omega) - \sum_{i=k+1}^K \hat{u}_i^n(\omega) + \frac{\hat{\lambda}^n(\omega)}{2}}{1 + 2\alpha(\omega - \omega_k^n)^2}, \quad (6)$$

$$\hat{\omega}_k^{n+1} = \frac{\int_0^\infty \omega |\hat{u}_k^{n+1}(\omega)|^2 d\omega}{\int_0^\infty |\hat{u}_k^{n+1}(\omega)|^2 d\omega}, \quad (7)$$

其中, “ $\hat{\cdot}$ ”符号表示傅里叶变换, n 表示迭代的次数。如式(8)所示, 当迭代相对误差小于预先设定的门限值 ε 时, 停止迭代, 得到迭代结果。

$$\sum_{k=1}^K \frac{\|\hat{u}_k^{n+1}(\omega) - \hat{u}_k^n(\omega)\|_2^2}{\|\hat{u}_k^n(\omega)\|_2^2} < \varepsilon. \quad (8)$$

2.2 对称相关基本原理

与传统相关方法计算自相关函数^[11]不同, 对称相关^[12]方法可通过抵消随机平稳过程中与信号不相关的加性高斯噪声, 提高线谱检测性能。下文以公式推导方式进行简要说明。

定义 $s(t)$ 对称相关函数为^[12]

$$W_s(t) = \frac{1}{T} \int_{-T/2}^{T/2} s(t+\tau)s(t-\tau)d\tau. \quad (9)$$

已知信号 $s(t)$ 由线谱及加性高斯噪声组成, 即 $s(t) = x(t) + n(t)$ 。其中,

$$x(t) = \sum_{n=1}^N A_n \cos(2\pi f_n t + \varphi_n). \quad (10)$$

根据对称相关函数的定义可得

$$\begin{aligned} W_s(t) &= \frac{1}{T} \int_{-T/2}^{T/2} s(t+\tau)s(t-\tau)d\tau \\ &= W_x(t) + \frac{1}{T} n^2(t), \end{aligned} \quad (11)$$

可以看出, 经过对称相关处理后除线谱外的噪声受到了抑制, 抑制程度与信号长度的倒数成正比。

2.3 线谱检测方法及其处理增益

VMD算法作为一种模态分解方法, 本质上来说是一种维纳滤波, 具有很好的噪声稳健性。此外, 其各阶BIMF均紧密围绕于中心频率的特性也使其能起到对特定频率进行窄带滤波的效果, 同时考虑对称相关方法可以抑制非周期性谐波信号的特点, 结合应用VMD算法和对称相关方法能够对含高斯噪声线谱信号进行有效的降噪处理, 从而对舰船辐射噪声中的线谱成分进行有效检测。

改进方法流程图如图1所示。

其中, 判断某阶BIMF分量是否为干扰模态, 可以通过计算该分量与原信号相关系数实现^[13]。如图2所示, 模态阶数为8, 对信号做VMD, 计算1~8阶BIMF与原信号相关系数, 并判断各阶BIMF与原信号相关系数是否大于预设值(取 $r=0.3$), 判定3~8阶BIMF为干扰模态并剔除, 保留1~2阶BIMF进行信号重构。

本文研究内容为高斯噪声背景下的线谱检测问题, 而不同信号处理方法检测性能的对比需要统一的定量标准, 因此以信噪比作为表示线谱可辨识度的衡量标准, 通过计算处理前后信噪比的变化来衡量线谱检测方法的性能。同时将改进方法分为两步考察, 第一步为进行VMD并去除无关分量, 第二步为对称相关处理。

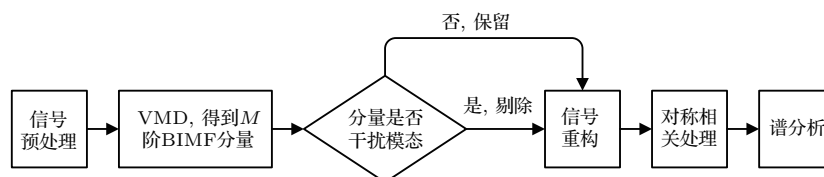


图1 改进线谱检测方法的流程图

Fig. 1 Flow chart of improved line-spectrum detection method

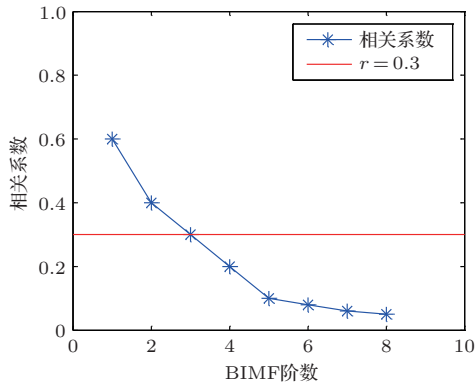


图2 各阶BIMF分量与原信号相关系数

Fig. 2 Correlation coefficient between each BIMF and original signal

首先进行VMD并去除干扰模态。假设原信号共分解为 M_1 阶模态，其中共有 M_2 阶为包含线谱成分的模态。由于VMD结果依赖于多项参数的选择且会经过多次迭代，因而难以直接计算出信噪比的增量，这里给出信噪比增量的估算方法：将进行VMD并去除无关分量的过程视为对线谱信号进行的窄带滤波，信号分析的频谱带宽设为 W ，则等效滤波带宽为 WM_2/M_1 ，则等效滤波^[3]前后高斯噪声的功率谱密度可写为式(12)、式(13)：

$$K_1(f) = \begin{cases} \sigma_n^2/W, & f \in [0, W], \\ 0, & \text{其他}, \end{cases} \quad (12)$$

$$K_2(f) = \frac{\sigma_n^2}{W} \cdot \left(W \frac{M_2}{M_1} \right) = \sigma_n^2 \frac{M_2}{M_1}, \quad (13)$$

其中，噪声功率为 σ_n^2 。处理后的输出信噪比 SNR_{out1} 可表示为式(14)：

$$\text{SNR}_{\text{out1}} = 10 \lg \left(\frac{\sum_{n=1}^N A_n^2/2}{W \frac{M_2}{M_1} \cdot \sigma_n^2/W} \right), \quad (14)$$

因此，第一步处理增益可以写为

$$G_1 = \text{SNR}_{\text{out1}} - \text{SNR}_{\text{in}} = 10 \lg (M_1/M_2), \quad (15)$$

此时信号依然可以近似视为除线谱成分外仅存在高斯噪声。假设此时的高斯噪声平均功率为 $\sigma_n'^2$ ，则可用式(2)的形式将经过第一步VMD处理后的信号信噪比表示为

$$\text{SNR}_{\text{out1}} = 10 \lg \left(\frac{1}{\sigma_n'^2} \sum_{n=1}^N \frac{A_n^2}{2} \right). \quad (16)$$

对称相关处理后，线谱信号的平均功率为 $\sum_{n=1}^N A_n^4/8$ 。

考查处理前后线谱成分之外的部分，定义 $y^2 = n^2/T$ ，给出 y 的概率密度：

$$K(y) = \frac{1}{\sqrt{2\pi y} \sigma_n'/T} e^{yT/2\sigma_n'^2}, \quad (17)$$

于是 y 的平均功率为 $2\sigma_n'^4/T^2$ 。则第二步处理后的信噪比为

$$\text{SNR}_{\text{out2}} = 10 \lg \left(\frac{1}{2\sigma_n'^4/T^2} \sum_{n=1}^N \frac{A_n^4}{8} \right), \quad (18)$$

因此，第二步的处理增益可以写为

$$\begin{aligned} G_2 &= \text{SNR}_{\text{out2}} - \text{SNR}_{\text{out1}} \\ &= 10 \left(\lg \sum_{n=1}^N A_n^4 - \lg \sum_{n=1}^N A_n^2 - 3 \lg 2 \right. \\ &\quad \left. + 2 \lg T - 2 \lg \sigma_n' \right). \end{aligned} \quad (19)$$

为简化表示，将计算过程中出现的噪声方差统一用 σ 近似替代，可得出改进方法的处理增益为

$$\begin{aligned} G &= G_1 + G_2 \\ &= 10 \left(\lg \sum_{n=1}^N A_n^4 - \lg \sum_{n=1}^N A_n^2 - 3 \lg 2 + 2 \lg T \right. \\ &\quad \left. - 2 \lg \sigma + \lg \frac{M_1}{M_2} \right). \end{aligned} \quad (20)$$

将信号表示为含噪单频线谱，取采样频率为 $f_s = 1024$ Hz，信号时长为 $T = 4$ s， $M_1/M_2 = 0.2$ 。改变输入信噪比，处理增益随输入信噪比的变化如图3所示。

取采样频率为 $f_s = 1024$ Hz，改变信号时长 T ，处理增益随输入信号时长的变化如图4所示。

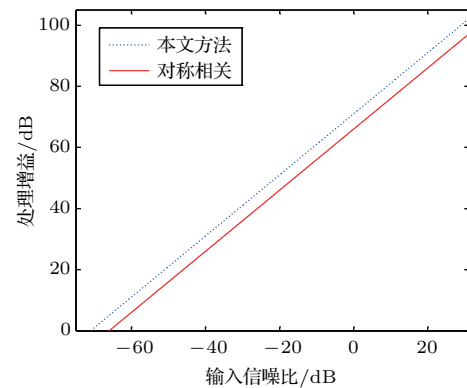


图3 不同方法处理增益随输入信噪比的变化

Fig. 3 The processing gain's evolution with the input signal-to-noise ratio

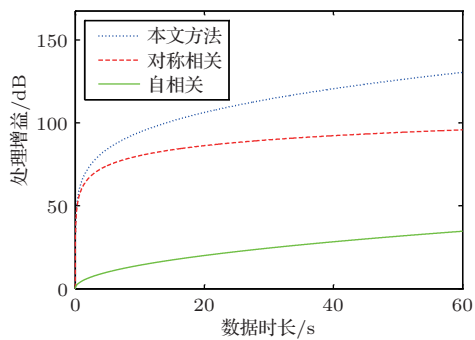


图4 不同方法处理增益随数据时长的变化

Fig. 4 The processing gain's evolution with the length of data

由图3~4可以看出,本文提出的改进方法处理增益与输入信噪比及信号时长有关。适当增加取样信号的时长可增大处理增益,进而提高线谱检测的性能。传统的相关方法进行线谱检测处理增益可表示为 $G_T = \sqrt{2TW}^{[3]}$,可见相比于传统相关方法

检测线谱的处理增益与输入信噪比无关,本文方法既能在较低信噪比条件下进行线谱检测,又能在较高信噪比条件下有更好的检测性能。同时,改进方法的检测性能也有所提升。

另一方面,本文提出的改进方法亦有应用限制。要实现线谱检测目的,输入信号的信噪比存在理论最小值,如图3所示,当输入信噪比低于 -70 dB时,处理增益为0。此外,在理论推导过程中为简化计算进行了近似替代,因此改进方法的处理增益计算结果为近似值而非准确值。

3 仿真计算

目标舰船辐射噪声以式(1)形式简化表示。其中,高斯噪声 $n(t)$ 均值为0,方差为1。取 $N = 3$, $f_1 = 50$ Hz, $f_2 = 100$ Hz, $f_3 = 150$ Hz, φ_n 取随机相位,同时通过改变 A_n 值调节信噪比。

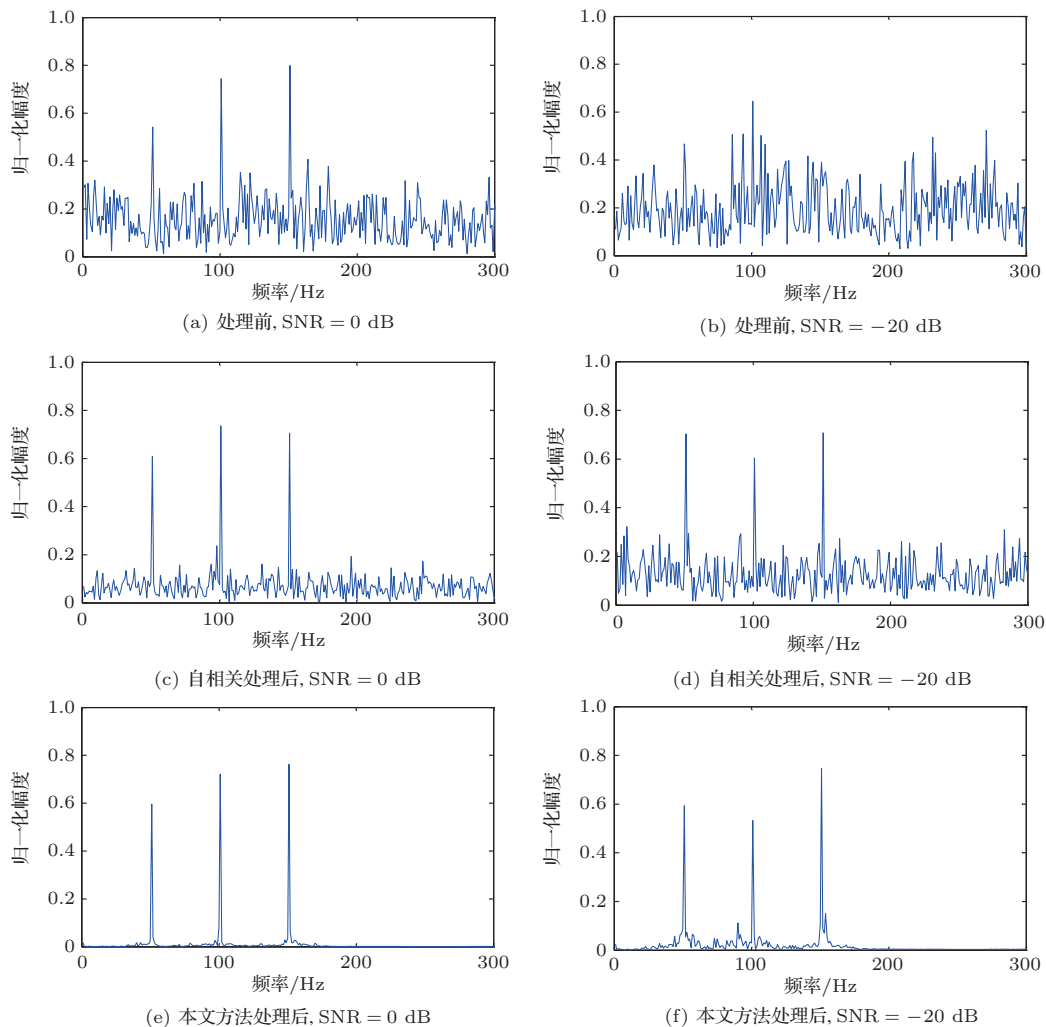


图5 仿真信号DEMON谱

Fig. 5 DEMON spectrum of simulated signal

取信号长度为5 s, 采样频率为1024 Hz, 对信号进行离散化, 分别令信噪比 $SNR = 0$ dB以及 $SNR = -20$ dB, 应用本文方法及传统自相关方法进行处理, 处理前后的DEMON谱如图5所示。

由图5仿真结果可以看出, $SNR = 0$ dB条件下, 自相关方法处理后线谱明显可见, 但仍有噪声存在; 本文方法处理后噪声基本得到消除, 线谱检测性能显著。 $SNR = -20$ dB条件下, 原信号DEMON谱图难以观察到目标线谱; 自相关处理后噪声得到消除, 可观察到线谱存在; 本文方法处理后噪声消除效果更显著, 可清楚观察到线谱存在。对比不同信噪比条件下的处理过程, 可知本文方法能在低信噪比条件下进行线谱检测, 性能优于自相关方法。

同时对多组数据仿真计算结果进行统计分析, 以对比本文方法与传统自相关方法的检测性能。生成 $SNR = 0$ dB及 $SNR = -20$ dB含噪线谱信号各30组, 分别应用本文方法及传统自相关方法进行处理, 处理后线谱位置与预设一致且幅度均为其余旁瓣幅值2倍以上视为满足有效检测要求。结果如表1所示。

表1 不同信噪比下两种方法的检测准确率

Table 1 Detection accuracy rate of two methods with different signal-noise ratio

	$SNR = 0$ dB	$SNR = -20$ dB
本文方法	96.7%	86.7%
自相关	93.3%	63.3%

对比表1中两种方法处理结果可见, $SNR = 0$ dB条件下, 本文方法与自相关方法的检测准确率差别并不大, 但在 $SNR = -20$ dB条件下, 本文方法检测准确率明显高于自相关方法。

4 实测舰船辐射噪声信号处理

为进一步验证本文提出的改进方法的可行性和实际应用效果, 对实测舰船辐射噪声信号进行处理。实验地点位于淳安县千岛湖, 实验水域较为开阔, 水深65 m。湖区背景噪声近似于Knudson谱曲线。目标船只为“实验贰号”, 如图6所示, 螺旋桨转速为30 rad/s。

实验采用自容式水听器接收目标辐射噪声信号, 水听器以浮标形式布放于水面以下9.3 m处, 采样频率为36000 Hz。

实验过程中声速剖面如图7所示。

由图7可见实验水域声速剖面具有负跃层特点。类比浅海声速剖面^[14]对声传播的影响, 同时考虑实验水域环境特点可知近距离条件下舰船辐射噪声衰减较小, 不影响实验准确性。



图6 目标船“实验贰号”

Fig. 6 Target ship "Experiment 2"

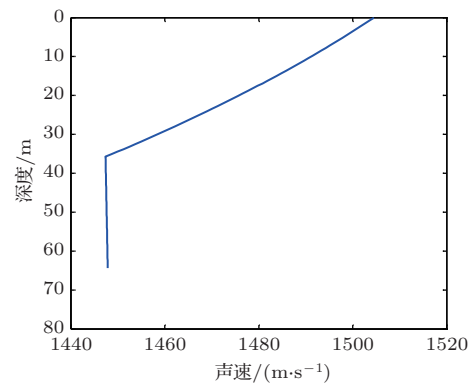


图7 实时声速剖面

Fig. 7 Real time sound speed profile

信号截取时段对应的水听器与目标距离约500 m。取时长为4 s的舰船辐射噪声数据进行分析, 结果如图8所示。

舰船辐射噪声线谱信号包括螺旋桨轴频与其倍频线谱, 以及其他部位周期性振动产生的线谱。观察原信号DEMON谱图, 可辨识出轴频与2阶倍频线谱, 而3阶倍频线谱不明显, 同时在135 Hz处有非螺旋桨源较强线谱存在。自相关方法处理后噪声得到了一定抑制, 可观察到轴频与2、3、4阶倍频线谱及135 Hz处强线谱, 但其他位置仍有一些较小峰值存在, 容易干扰检测结果判断。而本文方法处理后的DEMON谱图, 可清晰的观察到轴频与2、3、4阶倍频线谱, 同时135 Hz处亦有非螺旋桨源强线谱存在。对比可知, 本文方法有较好的目标舰船线谱检测效果。

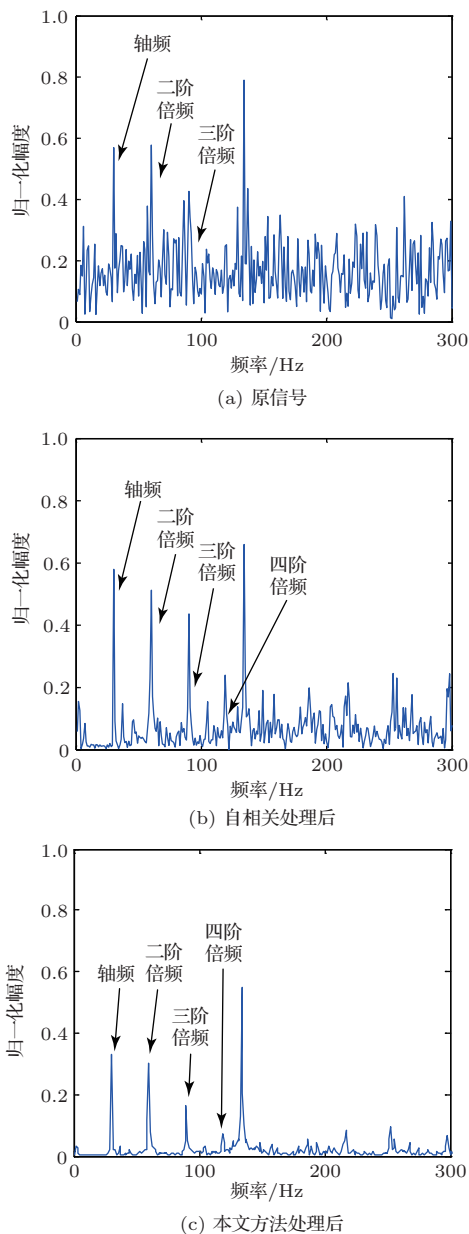


图8 舰船辐射噪声 DEMON 谱

Fig. 8 DEMON spectrum of ship radiated noise

通常情况下基于线谱特征的目标舰船识别需要结合螺旋桨轴、叶频相关信息进行判断,因此,应用最大公约数算法、余数门限法^[15]等可在本文工作基础上对线谱包含的信息进一步提取,以期实现最终的目标舰船识别。

5 结论

本文将舰船辐射噪声视为含高斯噪声的线谱信号,改进提出了基于VMD和对称相关的方法进行降噪,以实现线谱信号检测的目的。对比仿真结果及实测舰船辐射噪声信号处理结果来看,本文提

出的方法提高了信号处理增益,有较好的目标舰船线谱检测效果。

参 考 文 献

- [1] 吴国清, 李靖, 陈耀明, 等. 舰船噪声识别(II)——线谱稳定性和唯一性[J]. 声学学报, 1999, 24(1): 7-11.
Wu Guoqing, Li Jing, Chen Yaoming, et al. Ship radiated-noise recognition(II)—Stability and uniqueness of line spectrum[J]. Acta Acustica, 1999, 24(1): 7-11.
- [2] 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): 193-196.
Li Qihu, Li Min, Yang Xiuting. The detection of single frequency component of underwater radiated noise of target: theoretical analysis[J]. Acta Acustica, 2008, 33(3): 193-196.
- [3] 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: 数值仿真[J]. 声学学报, 2008, 33(4): 289-293.
Li Qihu, Li Min, Yang Xiuting. The detection of single frequency component of underwater radiated noise of target: digital simulation[J]. Acta Acustica, 2008, 33(4): 289-293.
- [4] 单广超, 赵汉波. 舰船辐射噪声线谱检测与分析[J]. 舰船电子工程, 2014, 34(10): 119-122.
Shan Guangchao, Zhao Hanbo. Detection and analysis of ship radiated-noise line spectrum[J]. Ship Electronic Engineering, 2014, 34(10): 119-122.
- [5] Venugopal S, Wagstaff R A, Sharma J P. Exploiting phase fluctuations to improve machine performance monitoring[J]. IEEE Transactions on Automation Science and Engineering, 2007, 4(2): 153-166.
- [6] Wagstaff R A. Exploiting phase fluctuations to improve temporal coherence[J]. IEEE Journal of Oceanic Engineering, 2004, 29(2): 498-510.
- [7] 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.
Cong Chao, Li Xiukun, 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): 164-175.
- [8] 张士忠, 陈绍华, 相敬林. 基于对称相关函数法的线谱检测[J]. 科学技术与工程, 2007, 7(7): 1394-1396, 1401.
Zhang Shizhong, Chen Shaohua, Xiang Jinglin. Detection of line-spectrum based on symmetrical correlation function[J]. Science Technology and Engineering, 2007, 7(7): 1394-1396, 1401.
- [9] 朱永利, 贾亚飞, 王刘旺, 等. 基于改进变分模态分解和 Hilbert 变换的变压器局部放电信号特征提取及分类[J]. 电工技术学报, 2017, 32(9): 221-235.
Zu Yongli, Jia Yafei, Wang Liuwang, et al. Feature extraction and classification on partial discharge signals of power transformer based on improved variational mode decomposition and Hilbert transform[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2017, 32(9): 221-235.

- [10] Dragomiretskiy K, Zosso D. Variational mode decomposition[J]. *IEEE Transactions on Signal Processing*, 2014, 62(3): 531–544.
- [11] 陶笃纯. 舰船噪声节奏的研究(II)——自相关函数及节奏信息的提取[J]. *声学学报*, 1983, 8(5): 280–289.
Tao Duchun. A study on ship-radiated noise rhythms(II)—Autocorrelation function and extraction of rhythm information[J]. *Acta Acustica*, 1983, 8(5): 280–289.
- [12] 樊养余, 陶宝祺, 熊克, 等. 基于对称相关函数法的谐波信号重构[J]. *信号处理*, 2001, 17(5): 400–405.
Fan Yangyu, Tao Baoqi, Xiong Ke, et al. Harmonic signal reconstruction by the symmetrical correlation function[J]. *Journal of Signal Processing*, 2001, 17(5): 400–405.
- [13] 李江乔. CEEMD与蚁群算法在舰船目标识别中的应用研究[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工程大学, 2015.
- [14] 孙杰, 董楠. 浅海声速剖面类型对水下声传播的影响研究[J]. *环境工程*, 2013, 31(S1): 736–738.
Sun Jie, Dong Nan. Research on impact of types of sound section on sound propagation under water[J]. *Environmental Engineering*, 2013, 31(S1): 736–738.
- [15] 白敬贤, 高天德, 夏润鹏. 基于DEMON谱信息提取算法的目标识别方法研究[J]. *声学技术*, 2017, 36(1): 88–92.
Bai Jingxian, Gao Tiande, Xia Runpeng. Target recognition based on the information extraction algorithm of DEMON spectrum[J]. *Technical Acoustics*, 2017, 36(1): 88–92.