

船舶螺旋桨空化噪声解调包络形状仿真研究

丁 超, 邱家兴, 程 健, 程玉胜

(海军潜艇学院, 山东青岛 266000)

摘要: 船舶螺旋桨空化噪声解调包络是一系列形状基本一致、间隔基本相等、高度有一定随机性、成组结构的波包。而波包形状会直接影响到解调谱的结构形状。通过分析比较实测信号、解调包络形状, 将波包形状分为两大类: 圆滑型和尖锐型, 并分别设置了对应的两种仿真模型: 半正弦模型和高斯模型。仿真信号和实测信号的检验结果表明, 半正弦模型能够更好地模拟圆滑型包络的特点, 高斯模型能够更好地模拟尖锐型包络的特点。

关键词: 解调包络; 波包形状; 包络模型

中图分类号: TN911.7

文献标识码: A

文章编号: 1000-3630(2019)-06-0611-06

DOI 编码: 10.16300/j.cnki.1000-3630.2019.06.002

Simulation research on the demodulation envelope shapes of vessel propeller cavitation noise

DING Chao, QIU Jia-xing, CHENG Jian, CHENG Yu-sheng

(Navy Submarine Academy, Qingdao 266000, Shandong, China)

Abstract: The demodulation envelopes of vessel propeller cavitation noise is a series of wave packets with basically similar shapes, almost equal intervals and a certain randomness in amplitude, moreover, these wave packets are in groups. The shapes of wave packets can directly affect the structures and shapes of the demodulation spectrums. By analyzing and comparing the demodulation envelope shapes of measured signals, it is shown that the shapes of wave packets can be divided into two types: smooth type and sharp type, and correspondingly, two simulation models can be set up: semi-sine wave model and Gaussian model. The test results of simulated and measured signals show that the semi-sine wave model can better simulate the characteristics of smooth envelope, and the Gaussian model can better simulate the characteristics of sharp envelope.

Key words: demodulation envelope; the shape of wave packet; envelope model

0 引言

当船舶螺旋桨发生空化时, 船舶辐射噪声的主要成分就成为螺旋桨空化噪声。在时域上, 螺旋桨空化噪声呈现出明显的振幅调制。通过检波处理, 可以从时域中提取出振幅的起伏趋势, 即解调包络。解调包络受到船尾形状、桨叶形状、桨叶间差异等因素的影响会呈现出不同的形状^[1], 从而对解调谱的结构形状产生很大的影响。

本文观察分析了大量实测船舶辐射噪声的解调包络, 将波包形状划分为圆滑型和尖锐型两类, 并给出了与之对应的半正弦模型和高斯模型两种仿真模型。最后, 通过仿真信号和实测信号验证了两种

包络模型的适用性。

1 解调方法对解调包络形状的影响

从螺旋桨空化噪声中提取调制包络, 需要经过检波, 流程如图 1 所示。

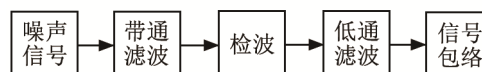


图 1 检波流程图

Fig.1 Demodulation flow chart

该流程中, 带通滤波用来选择合适的检波频段, 低通滤波用来提取低频包络信号。常用的检波方法有平方检波、绝对值检波和希尔伯特检波。绝对值检波和希尔伯特检波效果基本一致, 因此本文仅比较平方检波与绝对值检波的处理效果。此外, 考虑到带通滤波频段可能对解调包络形状造成影响, 本文在进行实测信号解调处理时, 均采用 1~5 kHz 的带通滤波频段。

收稿日期: 2018-09-18; 修回日期: 2018-10-20

作者简介: 丁超(1990—), 男, 山东青岛人, 博士研究生, 研究方向为水声目标识别。

通讯作者: 丁超, E-mail: 15964918058@163.com

1.1 空化噪声仿真

使用图 2 所示的脉冲序列对标准的高斯噪声(均值为 0、方差为 1)进行调制。其中, 每个波包都是相位 $\theta \in [0, \pi]$ 的半个正弦波, 脉冲重复周期为 0.05 s。每 4 个波包一组, 共 5 组, 每组 4 个脉冲幅值分别为 1、2、3、4。

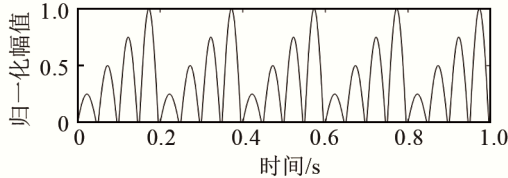


图 2 调制信号
Fig.2 Modulating signal

获得的仿真信号如图 3 所示。

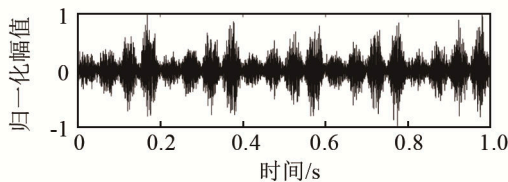
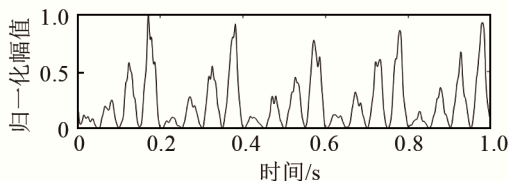
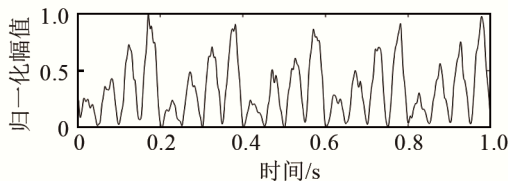


图 3 仿真信号
Fig.3 Simulated signal

分别用平方解调方法和绝对值解调方法对图 3 中的信号进行解调, 得到的结果如图 4(a)、4(b)所示。



(a) 归一化平方解调包络



(b) 归一化绝对值解调包络

图 4 不同检波方法处理效果比较

Fig.4 Effect comparison of different demodulation methods

对比图 2 与图 4 可以发现, 绝对值解调包络与原始调制信号更为接近; 平方解调方法不但使解调包络形变更大, 而且同组 4 个波包的幅值也由 1:2:3:4 变为约 1:4:9:16。

1.2 蒙特卡洛实验

为比较两种检波方法对解调包络造成的影响, 进行蒙特卡洛实验。

首先定义平均欧氏距离 D :

$$D = \frac{\sum_{n=1}^N \sqrt{(x_n - y_n)^2}}{N} \tag{1}$$

式中, x_n 、 y_n 分别为归一化调制信号和归一化解调包络第 n 点处的值, N 为总点数。

分别计算平方解调和绝对值解调方法的平均欧氏距离。进行 10 000 次蒙特卡洛实验, 求 10 000 次平均欧氏距离的均值, 结果如表 1 所示。

表 1 蒙特卡洛实验结果
Table1 Monte-Carlo experiment results

解调方法	平均欧氏距离
平方解调	0.157 1
绝对值解调	0.094 8

由表 1 可知, 绝对值解调方法得到的包络形变更小, 因此, 本文在后续的信号解调过程中均采用绝对值解调方法。

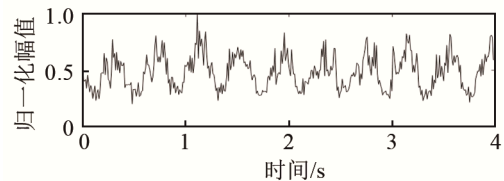
2 解调包络形状分类

2.1 波包形状分类

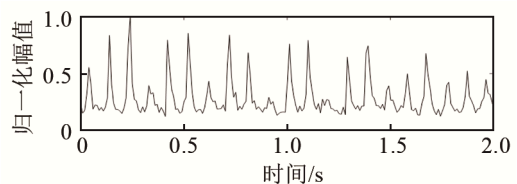
对船舶辐射噪声进行绝对值解调, 可以获得该信号的解调包络。本文对大量的商船辐射噪声进行了绝对值解调处理, 并根据解调包络质量进行了信号筛选, 筛选标准如下:

- (1) 解调包络清晰可见、周期明显;
- (2) 允许存在毛刺, 但毛刺不能掩盖包络的基本形状。

通过比较筛选之后的船舶辐射噪声解调包络可以发现, 包络形状大致可以分为两类: 一类如图 5(a) 所示, 包络总体形状趋势起伏较平缓, 称其为“圆滑型包络”; 另一类如图 5(b) 所示, 包络总体形状趋势起伏较剧烈, 称其为“尖锐型包络”。



(a) 圆滑型包络



(b) 尖锐型包络

图 5 不同类型的螺旋桨空化噪声解调包络
Fig.5 Demodulation envelope of different types of propeller cavitation noise

筛选之后的船舶辐射噪声共 42 组，其解调包络形状统计结果如表 2 所示。

表 2 不同类型解调包络的占比

Table 2 Proportion of different types of demodulation envelope

包络形状	样本数量	样本比例/%
圆滑型	32	76.2
尖锐型	10	23.8

基于统计结果，在信噪比较高、解调包络形状较规则的信号中，解调包络是圆滑型的噪声信号占比 76.2%。

2.2 波包形状模型

文献[1]认为，船舶辐射噪声解调包络形状符合高斯型，如图 6(a)所示，即：

$$u(t) = \frac{\xi}{2\pi} e^{-\frac{t^2}{2\sigma^2}} \quad (2)$$

其中： ξ 是幅值相关系数， σ 是形状相关系数。需要指出的是， σ 对包络形状影响很大，在仿真中需要根据需要选择不同的 σ 值。

通过观察实测船舶辐射噪声解调包络可以发现，高斯模型与尖锐型包络形状较为吻合；大多数情况下，包络波形为圆滑型，形状类似于半个正弦波，如图 6(b)所示，即：

$$u(t) = \xi \sin(2\pi ft), \quad t \in \left[0, \frac{1}{2f}\right] \quad (3)$$

其中， ξ 是幅值相关系数， f 是信号频率。

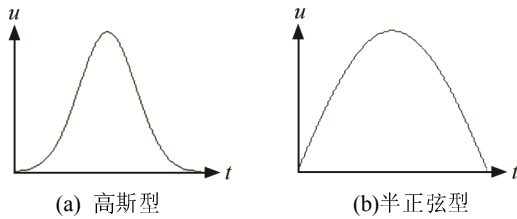


图 6 两种包络模型
Fig.6 Two types of envelope models

3 调制包络功率谱

调制包络对载波信号进行调制，通过信号解调可以获得解调包络。经过解调之后，解调包络与原始的调制包络相比存在一定的失真，但信噪比较高时仍能保持较高的相似性。因此，对形状规则的原始调制包络进行理论推导，其结果仍然适用于解调包络。

3.1 理论模型

根据文献[1]的模型，假定目标螺旋桨为较为常见的四叶桨，螺旋桨轴频周期为 T ，则每 4 个脉冲

构成一组，脉冲重复周期 $T/4$ 。

在时域信号中任选 4 个相连脉冲，编为第 0 组，脉冲标号分别定为 0、1、2、3。在第 0 组前后各取 N 组，共 $2N+1$ 组脉冲，组成一个脉冲序列。将该选取过程重复 K 次。

第 k 次选取的脉冲序列 $U^{(k)}(t)$ 可以表示为

$$U^{(k)}(t) = \sum_{n=-N}^N [a_{n0}^{(k)}u(t-nT) + a_{n1}^{(k)}u(t-\frac{T}{4}-nT) + a_{n2}^{(k)}u(t-\frac{T}{2}-nT) + a_{n3}^{(k)}u(t-\frac{3T}{4}-nT)] \quad (4)$$

式中， $u(t)$ 为脉冲波形表达式， $a_{ni}^{(k)}$ 表示第 k 次所取的脉冲序列中第 n 组第 i 号脉冲的随机幅度，假设服从高斯分布。

将 $u(t)$ 的傅里叶谱记作 $g(\omega)$ ，则第 k 次脉冲序列的傅里叶谱为

$$F_N^{(k)}(\omega) = g(\omega) \sum_{n=-N}^N \left[\left(a_{n0}^{(k)} + a_{n1}^{(k)} e^{-i\omega\frac{T}{4}} + a_{n2}^{(k)} e^{-i\omega\frac{T}{2}} + a_{n3}^{(k)} e^{-i\omega\frac{3T}{4}} \right) e^{-i\omega nT} \right] \quad (5)$$

为简化表示，令：

$$A_n^{(k)} = a_{n0}^{(k)} + a_{n1}^{(k)} e^{-i\omega\frac{T}{4}} + a_{n2}^{(k)} e^{-i\omega\frac{T}{2}} + a_{n3}^{(k)} e^{-i\omega\frac{3T}{4}} \quad (6)$$

则：

$$\begin{aligned} |F_N^{(k)}(\omega)|^2 &= |g(\omega)|^2 \left\{ \sum_{n=-N}^N A_n^{(k)} e^{-i\omega nT} \cdot \left[\sum_{n=-N}^N A_n^{(k)} e^{-i\omega nT} \right]^* \right\} \\ &= |g(\omega)|^2 \sum_{n=-N}^N \{ A_n^{(k)} \cdot [A_n^{(k)}]^* \} + \\ &= |g(\omega)|^2 \sum_{n=-N}^N \sum_{\substack{m=-N \\ n \neq m}}^N \{ A_n^{(k)} \cdot [A_m^{(k)}]^* \cdot e^{-i\omega(n-m)T} \} \quad (7) \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} E \left\{ |F_N^{(k)}(\omega)|^2 \right\} &= |g(\omega)|^2 (2N+1) \times [(\bar{a}_0^2 + \bar{a}_1^2 + \bar{a}_2^2 + \bar{a}_3^2) + \\ &+ (\bar{a}_0 \cdot \bar{a}_2 + \bar{a}_1 \cdot \bar{a}_3) \cdot 2e^{i\omega(T/2)} + \\ &+ (\bar{a}_0 \cdot \bar{a}_1 + \bar{a}_1 \cdot \bar{a}_2 + \bar{a}_2 \cdot \bar{a}_3 + \bar{a}_3 \cdot \bar{a}_0) \cdot (e^{i\omega(T/4)} + e^{i\omega(3T/4)})] + \\ &+ |g(\omega)|^2 2 \sum_{p=1}^{2N} (2N+1-p) \cos(p\omega T) \times \\ &+ [(\bar{a}_0^2 + \bar{a}_1^2 + \bar{a}_2^2 + \bar{a}_3^2) + (\bar{a}_0 \cdot \bar{a}_2 + \bar{a}_1 \cdot \bar{a}_3) \cdot 2e^{i\omega(T/2)} + \\ &+ (\bar{a}_0 \cdot \bar{a}_1 + \bar{a}_1 \cdot \bar{a}_2 + \bar{a}_2 \cdot \bar{a}_3 + \bar{a}_3 \cdot \bar{a}_0) \cdot (e^{i\omega(T/4)} + e^{i\omega(3T/4)})] \quad (8) \end{aligned}$$

其中： \bar{a}_i 表示 $a_{ni}^{(k)}$ 的均值； \bar{a}_i^2 表示 $a_{ni}^{(k)2}$ 的均值。[\cdot]* 表示取共轭。

令：

$$\begin{cases} U_1 = \bar{a}_0^2 + \bar{a}_1^2 + \bar{a}_2^2 + \bar{a}_3^2 \\ U_2 = \bar{a}_0 \cdot \bar{a}_2 + \bar{a}_1 \cdot \bar{a}_3 \\ U_3 = \bar{a}_0 \cdot \bar{a}_1 + \bar{a}_1 \cdot \bar{a}_2 + \bar{a}_2 \cdot \bar{a}_3 + \bar{a}_3 \cdot \bar{a}_0 \\ U_4 = \bar{a}_0 \cdot \bar{a}_1 + \bar{a}_1 \cdot \bar{a}_2 + \bar{a}_2 \cdot \bar{a}_3 + \bar{a}_3 \cdot \bar{a}_0 \end{cases} \quad (9)$$

则式(8)可以简化为

$$\begin{aligned} E \left\{ \left| F_N^{(k)}(\omega) \right|^2 \right\} = & |g(\omega)|^2 \{ (2N+1) \cdot (U_1 - U_2) + \\ & \sum_{q=-2N}^{2N} (2N+1-|q|) \cos(\omega p T) \times \\ & [U_2 + U_3 \cdot 2e^{i\omega(T/2)} + U_4 \cdot (e^{i\omega(T/4)} + e^{i\omega(3T/4)})] \} \end{aligned} \quad (10)$$

根据随机过程功率谱密度的基本定义, 该随机过程的功率谱密度为

$$\begin{aligned} S(\omega) = E \{ S_k(\omega) \} = & E \left\{ \lim_{N \rightarrow \infty} \frac{1}{(2N+1)T} \left| F_N^{(k)}(\omega) \right|^2 \right\} = \\ & \frac{|g(\omega)|^2}{T} (U_1 - U_2) + \\ & \frac{|g(\omega)|^2}{T} \frac{4\pi}{T} \sum_{n=-\infty}^{\infty} \delta(\omega - \frac{2n\pi}{T}) \times \\ & [U_2 + U_3 \cdot 2e^{i\omega(T/2)} + U_4 \cdot (e^{i\omega(T/4)} + e^{i\omega(3T/4)})] \end{aligned} \quad (11)$$

其中, $S_k(\omega)$ 为第 k 次选取的脉冲序列的功率谱, E 表示平均。

式(11)中, 第一项代表连续谱, 第二项代表一系列线谱, 且第二项只在 $\omega=2n\pi/T$ 时不为零, 此时有:

$$\begin{cases} 2e^{i\omega(T/2)} = 2 \cos \omega(T/2) \\ e^{i\omega(T/4)} + e^{i\omega(3T/4)} = 2 \cos \omega(T/4) \end{cases} \quad (12)$$

将式(12)代入式(11)可得:

$$\begin{aligned} S(\omega) = E \left\{ \lim_{N \rightarrow \infty} \frac{1}{(2N+1)T} \left| F_N^{(k)}(\omega) \right|^2 \right\} = & \frac{|g(\omega)|^2}{T} (U_1 - U_2) + \\ & \frac{|g(\omega)|^2}{T} \frac{4\pi}{T} \sum_{n=-\infty}^{\infty} \delta(\omega - \frac{2n\pi}{T}) \times \\ & [U_2 + U_3 \cdot 2 \cos \omega(T/2) + U_4 \cdot \cos \omega(T/4)] \end{aligned} \quad (13)$$

由式(13)可知, 脉冲形状将会影响到调制包络功率谱的整体形状。只有使用更符合真实情况的脉冲模型, 才能得到更好的仿真结果。

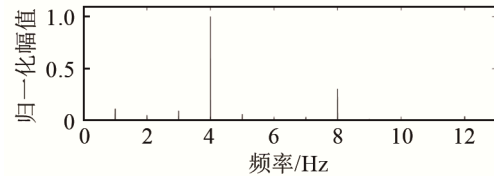
3.2 理论模型仿真

对于四叶桨目标, $u(t)$ 分别采用高斯模型和半正弦模型, 高斯模型的参数 σ 取为 0.025, 脉冲重复周期为 0.25 s。将一组内四个脉冲的幅值 a_0 、 a_1 、 a_2 、 a_3 分别设置为 1、2、3、4, 根据式(13)可得图 7 所示的结果。

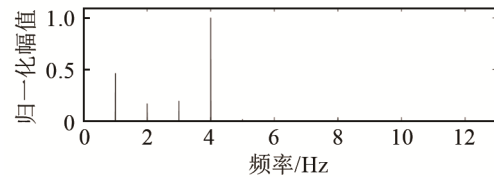
如图 7 所示, 高斯模型包络得到的功率谱轴频高频谐波强度较高; 半正弦模型包络得到的功率谱轴频高阶谐波强度微弱。

通过对大量实测船舶辐射噪声的分析观察可以发现: 具有尖锐型包络的噪声信号, 解调谱出现轴频高阶谐波的概率较高; 具有圆滑型包络的噪声信

号, 解调谱出现轴频高阶谐波的概率较低。证明高斯模型更适用于尖锐型包络, 半正弦模型更适用于圆滑型包络。



(a) 高斯型调制信号功率谱



(b) 半正弦型调制信号功率谱

图 7 不同包络模型调制信号的功率谱对比

Fig.7 Power spectrum comparison of the signal modulated by different envelop models

4 仿真信号验证

4.1 仿真模型建立

关于螺旋桨空化噪声已经有许多研究, 目前有两类典型的空化模型^[2]:

第一类模型假定低频调制信号对高频载波进行调制, 得到最终的空化噪声 x 为:

$$x = (1+s) \times n \quad (14)$$

其中, s 为低频调制信号, n 为高频载波。

第二类模型将螺旋桨空化所形成的空泡看作是一个空泡集, 每一叶片旋转一次都是对这个空泡集的一次扰动, 使得这个空泡集有一次辐射声脉冲^[3]。文献[4]-[6]中所使用的方法也属这一模型。

第一类模型中, 通常将低频调制信号 s 假设为几个成倍频关系的正弦波, 这种假设便于公式的推导并能获得较为理想的解调谱, 但其解调包络与实际情况不符。本文将两种模型结合, 将低频调制信号 s 假设为图 2 形式的成组结构的脉冲, 单个波包分别设置为高斯型和半正弦型。

4.2 仿真结果对比

使用图 8(a)和图 9(a)所示的两种脉冲对标准的高斯噪声(均值为 0、方差为 1)进行调制。其中, 脉冲周期为 0.05 s, 每 4 个一组, 高斯模型参数 σ 取 0.005。为充分体现解调方法对解调包络形状的影响, 将每组 4 个波包幅值分别设置为 1、2、3、4。

图 8 所示的高斯型仿真信号的解调谱中, 轴频高阶谐波较为明显; 图 9 所示的半正弦型仿真信号

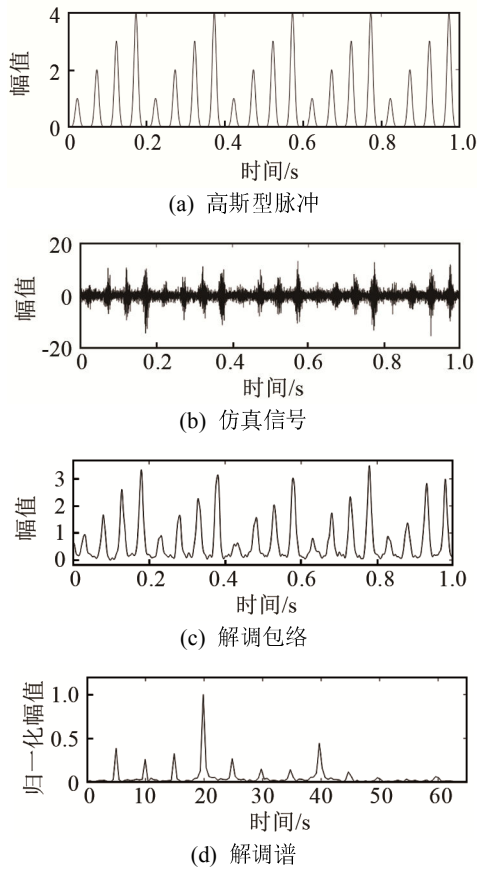


图 8 高斯型包络调制信号的仿真

Fig.8 Simulation of Gaussian envelope modulated signal

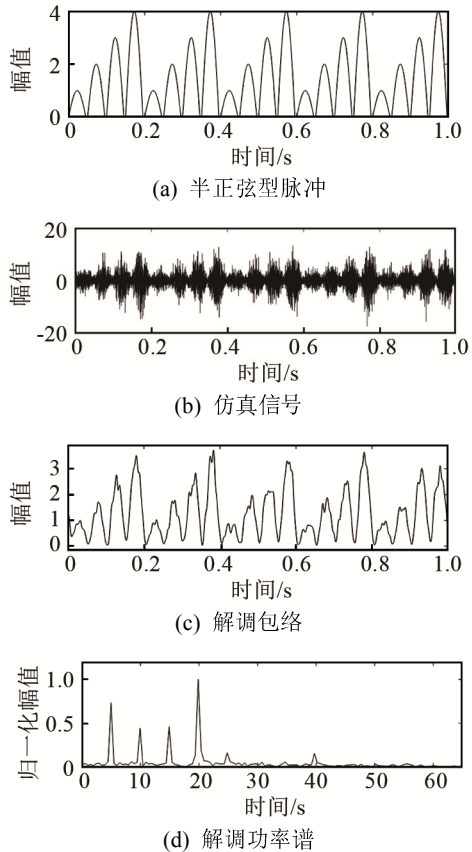


图 9 半正弦型包络调制信号的仿真

Fig.9 Simulation of semi-sine envelope modulated signal

的解调谱中，轴频高阶谐波较为微弱。该结果与图 7 结果基本一致，也与实际情况基本一致。

可以证明，高斯脉冲模型更符合具有尖锐型解调包络的噪声信号的特征规律；半正弦脉冲模型更符合具有圆滑型解调包络的噪声信号的特征规律。

5 实测信号验证

5.1 信号处理流程

在船舶辐射噪声解调包络与两个模型的比对过程中，为保证比对结果有效，需要信噪比足够高，解调包络毛刺较少。基于以上考虑，从前文筛选出的 42 组商船辐射噪声信号中选取解调包络形状规则、毛刺较少的圆滑型包络信号和尖锐型包络信号各 10 个进行处理，解调包络与包络模型比对流程如图 10 所示。

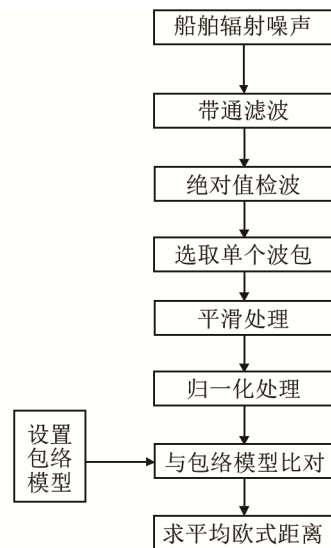


图 10 解调包络与设置的包络模型比对流程

Fig.10 The comparison process between the demodulation envelopes and the pre-set envelope models

其中，选取单个波包是选取信号包络中形状规则、干扰较少的信号。

5.2 处理结果分析

对每个信号各取 10 个形状较规则的包络，分别与高斯模型和半正弦模型对比，求出 10 个平均欧氏距离，并取均值，计算结果如图 11 所示。

从图 11 中可以发现，圆滑型包络信号与半正弦模型的平均欧氏距离更小，尖锐型包络信号与高斯模型的平均欧氏距离更小，说明半正弦模型更符合圆滑型包络，高斯模型更符合尖锐型包络。并且由表 2 可知，在统计中 76.2% 的信号具有圆滑型包络。因此，半正弦模型更具有代表性。

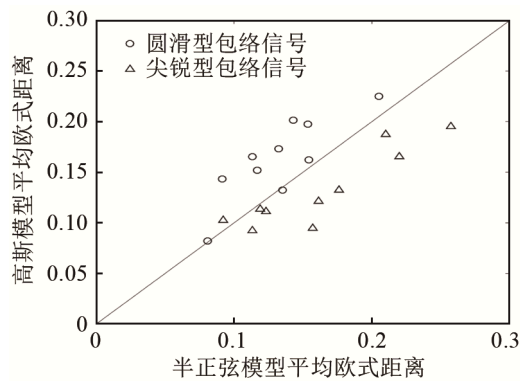


图 11 两种不同包络调制信号的平均欧氏距离分布图
Fig.11 Mean Euclidean distance distribution diagram of the two different envelope modulated signals

6 结 论

(1) 通过蒙特卡洛实验发现, 绝对值解调方法对调制信号的形变较小;

(2) 船舶辐射噪声解调包络可以分为圆滑型和尖锐型两种, 通过统计发现, 大多数信号的解调包络是圆滑型;

(3) 通过仿真包络信号、实测信号包络与半正弦模型、高斯模型平均欧氏距离分析发现, 圆滑型包络与半正弦模型更为吻合, 尖锐型包络与高斯模

型更为吻合, 且半正弦模型具有更广泛的适用性。

参 考 文 献

- [1] 陶笃纯. 舰船噪声节奏的研究(I)—数学模型及功率谱密度[J]. 声学学报, 1983, 8(2): 65-69.
TAO Duchun. A study on ship radiated noise rhythms (I)— mathematical model and power spectrum density[J]. Acta Acust, 1983, 8(2): 65-69.
- [2] 车永刚, 程玉胜. 螺旋桨空化噪声谱模型及结构特征[J]. 哈尔滨工程大学学报, 2010, 31(7): 837-841.
CHE Yonggang, CHENG Yusheng. Interpreting features of a propeller's cavitation spectrum[J]. Journal of Harbin Engineering University, 2010, 31(7): 837-841.
- [3] D. 罗斯. 水下噪声原理[M]. 关定华, 译. 北京: 海洋出版社, 1983: 371-373.
- [4] 蒋国健, 林建恒, 马杰, 等. 舰船螺旋桨空泡噪声的数理模型[J]. 声学学报, 1998, 23(5): 401-403.
JIANG Guojian, LIN Jianheng, MA Jie, et al. Theoretical model of noise caused by ship propeller cavitation[J]. Acta Acustica, 1998, 23(5): 401-408.
- [5] 汤渭霖. 水下噪声学[M]. 哈尔滨: 哈尔滨船舶工程学院, 1984: 100-113.
TANG Weilin. Underwater noise[M]. Harbin: Harbin Shipbuilding Engineering Institute, 1984: 100-113.
- [6] 陶笃纯. 螺旋桨空化噪声谱[J]. 声学学报, 1982, 7(6): 344-351.
TAO Duchun. Spectrum of propeller cavitation noise[J]. Acta Acustica, 1982, 7(6): 344-351.