

基于模型匹配的舰船螺旋桨噪声特征精细分析*

史广智 胡均川 笮良龙

(海军潜艇学院 青岛 266071)

2008 年 7 月 22 日收到

2008 年 11 月 28 日定稿

摘要 在双螺旋桨舰船噪声包络建模的基础上,研究了双桨目标调制谱谐波族特征的结构问题,并对海试中发现的“伪桨”现象进行了分析,从理论上解释了谐波族结构发生畸变的原因。进一步采用模型基特征提取技术,研究了基于模型匹配的舰船螺旋桨噪声特征精细分析方法,提取了舰船噪声包络波形精细结构特征。海试信号分析表明,舰船螺旋桨噪声特征精细分析有助于提取更多的螺旋桨物理特征及周期性调制信息,进而提高舰船目标的识别率。

PACS 数: 43.30, 43.60

Feature fine analysis of noise radiated from ship propeller based on model matching

SHI Guangzhi HU Junchuan DA Lianglong

(Navy Submarine Academy Qingdao 266071)

Received Jul. 22, 2008

Revised Nov. 28, 2008

Abstract The structure question about feature of harmonic clan for demodulation-spectrum was studied by using the envelope model of noise radiated from double propeller. The pseudo-propeller phenomenon discovered in a sea test was analysed, and structural aberration of harmonic clan was explained theoretically. Moreover, the fine analysis method of propeller noise feature was investigated by using the model-based technology, and the fine structural feature of envelope waveform was obtained by using the method. The analysis results of ship noise show that the fine analysis of propeller noise feature redound to obtain more physics feature and periodic modulation information of the propeller, and to improve recognition rate of the ship target.

引言

“舰船辐射噪声主要包括螺旋桨噪声、机械噪声和水动力噪声,它的识别一直是被动声呐面临的主要课题之一,具有重要意义^[1,2]”。螺旋桨空化噪声是舰船辐射噪声中、高频端的主要组成部分。螺旋桨节拍对其辐射的空化噪声有明显的振幅调制作用,这种螺旋桨周期性调制信息是被动声纳目标识别的主要信息之一。调制谱谐波族特征是其频域反映,对它的研究较为丰富^[3-7]。文献 6 研究的螺旋桨空化噪声模型采用了周期性局部平稳过程;文献 7 研究了具有成组结构、随机幅度、同样形状、相同周期的脉冲性噪声包络模型。文献 3 在文献 6 和文献 7 基

础上,研究了螺旋桨空化噪声模型及谐波族特征的理论问题,给出了谐波族特征蕴含的结构特性,确定了螺旋桨叶片数识别的理论分类面。其对常年积累的大量海上实测目标噪声样本统计得出,超过 75% 的样本基本符合结构特性。文献 3 认为舰船噪声的信噪比和平稳性等因素会使样本谱偏离结构特性,但仍不能解释部分样本谐波族结构发生的严重畸变现象。那么,是什么原因导致了这种不利于识别的结构畸变呢?

本文在双桨舰船噪声包络建模的基础上,分析了双桨舰船谐波族特征的结构问题,以双桨舰船噪声中常会出现的“伪桨”现象的理论分析为例,解释了双桨舰船谐波族结构发生畸变对于识别的影响。

* 国家“十一五”预研基金资助项目

分析表明, 仅采用谐波族特征并不能较好地解决双桨舰船的识别问题, 甚至会出现类似“伪桨”的识别错误, 另一方面, 舰船噪声包络波形中却蕴含着更为丰富的识别信息, 可从中提取新的目标特征以弥补谐波族特征的不足。但是, 以往的识别研究通常仅采用调制谱特征, 而较少考虑包络波形中蕴含的信息, 这就需要研究新的特征提取方法。而已应用于美军国防先进研究计划署开发的 MSTAR(Moving and Stationary Target Acquisition and Recognition) 计划的模型基特征提取技术 (Model-based technology)^[8-10], 采用离线驱动的目标模型, 进行在线的假设试验, 重复比较预测目标的统计特征, 这种方法为目标特征的提取开辟了一条新途径。因此, 本文还将模型基特征提取技术应用于舰船噪声特征提取研究中, 提出了一种将调制谱谐波族特征和包络波形特征相结合的匹配模型, 研究了基于模型匹配的螺旋桨噪声特征精细分析方法, 提取了舰船噪声包络波形精细结

构特征。该特征反映了螺旋桨不同叶片辐射噪声的相对空化强度, 叶片辐射噪声包络波形, 叶片数, 桨数及双桨时间差等信息, 有助于提高舰船噪声目标的识别能力。

1 “伪桨”现象

在对海试中获取的目标样本的深入分析中发现了一种与传统认识相悖的现象, 我们称为“伪桨”现象。“伪桨”现象是一种双桨调制引起的调制谱谐波族结构发生畸变而导致其更接近某支不存在的“桨”的现象。“伪桨”是螺旋桨低转速时经常发生的现象, 在采用传统方法设计的分类器中, 会发生由于叶片数混淆而引起的类型识别错误。下面对比典型三、四叶桨舰船谐波族结构特性 (见图 1), 以图 2 所示海试样本为例进行说明。三叶和四叶桨舰船的谐波族结构特性表达式^[3]为:

$$\text{三叶桨类: } P(3) \geq P(l), \quad l \in [4, 8], \quad P(1) \geq P(2) \geq P(4) \geq P(5) \geq P(7) \geq P(8). \quad (1)$$

$$\text{四叶桨类: } P(4) \geq P(l), \quad l \in [5, 8], \quad P(2) \geq P(6), \quad P(1) \geq P(3) \geq P(5) \geq P(7). \quad (2)$$

式中, $P(l)$ 表示第 l 阶谐波幅值。式 (1) 和式 (2) 反映了三叶桨和四叶桨舰船谐波族蕴含的内在结构, 具有统计意义, 对于个别样本可能因舰船噪声的信噪比和平稳性等因素影响而不符合上式。

图 2(a) 为某双四叶桨舰船噪声信号包络波形图, T 为螺旋桨转动周期。1#0 叶片 (文中采用 $j\#r$ 表示第 j 号桨的第 r 片叶片) 和 2#1 叶片空化占优势, 双桨时间差接近 $0.09T$ 。图 2(b) 给出了图 2(a) 信号的调制谱。观察图 2(b), 可看出第三阶谐波幅值最大, 从谱结构看图 2(b) 更接近图 1(a), 容易判别

为三叶桨目标, 也就是说其谱结构更接近某支不存在的“三叶伪桨”; 但其中 $P(1) < P(2)$, 又不符合式 (1), 这是由两支桨共同调制导致的, 蕴含着双桨识别信息。下面将在双桨舰船噪声包络建模的基础上, 分析双桨舰船谐波族结构问题。

2 双桨舰船噪声谐波族特征分析

2.1 双螺旋桨舰船空化噪声包络模型

双桨模型在文献 3 的五个基本假设基础上, 增

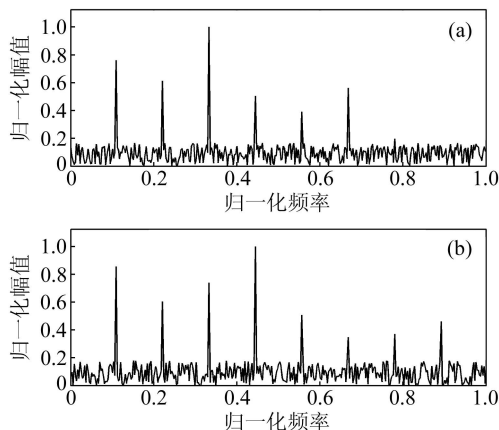


图 1 典型三叶和四叶桨舰船调制谱谐波族结构示意图

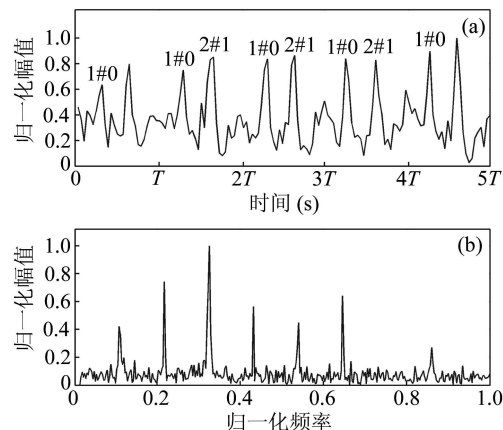


图 2 某双四叶桨舰船“伪桨”现象示意图

加了假设 6 和假设 7。单桨模型简要叙述如下:

假设 1 和 2 认为 R 叶螺旋桨空化噪声功率 $p^{(j)}(t)$ 为各叶片空化噪声功率 $p_r^{(j)}(t)$ 的总和, 即

$$p^{(j)}(t) = \sum_{r=0}^{R-1} p_r^{(j)}(t) = \sum_{r=0}^{R-1} \sigma_{r+R\lfloor \frac{t}{T_j} \rfloor}^{(j)} w_{r+R\lfloor \frac{t}{T_j} \rfloor}^{(j)}(t)$$

($\lfloor \cdot \rfloor$ 表示向下取整数, T_j 为螺旋桨转动周期, $\sigma_{r+R\lfloor \frac{t}{T_j} \rfloor}^{(j)}$ 和 $w_{r+R\lfloor \frac{t}{T_j} \rfloor}^{(j)}(t)$ 为脉冲幅值和形状函数)。

假设 3 给出了第 r 片叶片在不同的螺旋桨转动周期中激发的声脉冲幅值和形状函数表达式, 即为式 (4) 和式 (5) 中 $j=1$ 的情况。假设 4 认为单支桨的连续转动过程中, 不同周期激发声脉冲的幅值 $\sigma_{nR+r}^{(j)}$ 和形状函数 $w_{nR+r}^{(j)}(t)$ 间相互独立。假设 5 认为 $|W(l)|^2$ 具有单调下降性。下面给出假设 6 和假

设 7。

假设 6 双螺旋桨舰船噪声功率为两支螺旋桨空化噪声功率的总和, 且两支桨间相互独立。

由假设 1 和假设 6 得到双桨舰船噪声功率为:

$$p_R^D(t) = p^{(1)}(t) + p^{(2)}(t) = \sum_{r=0}^{R-1} p_r^{(1)}(t) + \sum_{r=0}^{R-1} p_r^{(2)}(t), \quad (3)$$

式中, $p_R^D(t)$ 的上标 D 表示双桨, 下标 R 表示叶片数, r 表示第 r 片叶片。上标 (1) 和 (2) 分别代表一号和二号螺旋桨。

“假设 7 两支螺旋桨辐射脉冲的时间差为 $T_\theta \in [0, T/2R]$, 且第 j 号螺旋桨的第 r 片叶片 ($j \neq r$ 叶片) 在不同的螺旋桨转动周期中激发的声脉冲幅值和形状函数满足:”

$$EW_{r+R\lfloor \frac{t}{T_j} \rfloor}^{(j)}(l) = \begin{cases} W_r^{(j)}(l) \exp \left[-i2l\pi \left(\left\lfloor \frac{t}{T_j} \right\rfloor + \frac{1}{2R} + \frac{r}{R} \right) \right], & j=1, \\ W_r^{(j)}(l) \exp \left[-i2l\pi \left(\left\lfloor \frac{t}{T_j} \right\rfloor + \frac{1}{2R} + \frac{r}{R} \right) - i\frac{2l\pi}{T_j} T_\theta \right], & j=2, \end{cases} \quad (4)$$

式中, E 表示对其后变量取数学期望, $2l\pi/T_j$, $l=1, 2, \dots$ 为螺旋桨轴及各阶谐波的角频率。 $W_{\lfloor \cdot \rfloor}^{(j)}(\omega)$ 为 $w_{\lfloor \cdot \rfloor}^{(j)}(t)$ 的傅氏变换, $W_{\lfloor \cdot \rfloor}^{(j)}(2l\pi/T_j)$ 简记为 $W_{\lfloor \cdot \rfloor}^{(j)}(l)$ 。 $\exp\{\}$ 表示螺旋桨叶片辐射声脉冲在不同周期中的时间延迟对相位谱的附加变化。

$$E\sigma_{r+R\lfloor \frac{t}{T_j} \rfloor}^{(j)} = \sigma_r^{(j)}, \quad j \in [1, 2], \quad (5)$$

式中, $\sigma_r^{(j)}$ 为 $j \neq r$ 叶片脉冲幅值的数学期望, 因此 j 号桨 R 片叶片的脉冲幅值均值序列为:

$$\left\{ \sigma_0^{(j)}, \dots, \sigma_r^{(j)}, \dots, \sigma_{R-1}^{(j)} \right\}, \quad j \in [1, 2]. \quad (6)$$

由假设 1—假设 7 建立双 R 叶螺旋桨空化噪声功率模型 (即包络模型):

$$p_R^D(t) = p_R^{(1)}(t) + p_R^{(2)}(t) = \sum_{r=0}^{R-1} \sigma_{r+R\lfloor \frac{t}{T_1} \rfloor}^{(1)} w_{r+R\lfloor \frac{t}{T_1} \rfloor}^{(1)}(t) + \sum_{r=0}^{R-1} \sigma_{r+R\lfloor \frac{t}{T_2} \rfloor}^{(2)} w_{r+R\lfloor \frac{t}{T_2} \rfloor}^{(2)}(t). \quad (7)$$

可以此建立双桨舰船噪声模型 (采用文献 3 方法), 进一步对噪声模型进行平方检波、低通滤波过程可推

导出调制包络信号模型, 形式上与式 (7) 一致。

2.2 双桨舰船调制谱谐波族结构分析

当双桨转速相差较大时, 即式 (7) 中 $T_1 \neq T_2$, 则调制谱中存在两组周期不同的谐波族。其中, 每一族谐波族都符合单桨舰船结构特性^[3], 此时可直接识别为双桨目标。

当双桨等速或转速相差较小时 ($T_1 \approx T_2$), 短时间调制谱中将只有一族结构发生畸变的谐波族特征, 情况较为复杂。

将 $T_1 \approx T_2 \approx T$ 代入式 (7) 后, 等价变换为:

$$Z_D(t) = \sum_{k=0}^K \sum_{r=0}^{R-1} \sigma_{k,r}^{(1)} w_{k,r}^{(1)}(t) + \sum_{k=0}^K \sum_{r=0}^{R-1} \sigma_{k,r}^{(2)} w_{k,r}^{(2)}(t), \quad (8)$$

式中, $k = \lfloor t/T \rfloor$, 下标 k, r 与式 (7) 下标 $r+R\lfloor t/T \rfloor$ 对应。 $\sigma_{k,r}^{(j)}$ 和 $w_{k,r}^{(j)}(t)$ 分别表示从 0 时刻开始, 第 j 支螺旋桨转过第 k 个周期时第 r 片叶片辐射脉冲的幅值和形状函数。

双 R 叶螺旋桨的谐波族幅值表达式为 (推导请参见附录):

$$P_R^D(l) = P_R^{(1)}(l) + P_R^{(2)}(l) + P_{12}(l), \quad (9)$$

式中,

$$P_R^{(j)}(l) = (K+1)^2 |W(l)|^2 \left| \text{D}\tilde{\text{F}}\text{T}_R[\sigma_r^{(j)}, l] \right|^2, \quad j \in [1, 2], \quad (10)$$

$$P_{12}(l) = 2(K+1)^2 |W(l)|^2 \text{Re} \left\{ \exp \left\{ i \frac{2l\pi}{T} T_\theta \right\} \text{D}\tilde{\text{F}}\text{T}_R[\sigma_r^{(1)}, l] \text{D}\tilde{\text{F}}\text{T}_R[\sigma_r^{(2)}, l]^* \right\}. \quad (11)$$

式中:

$$\text{D}\tilde{\text{F}}\text{T}_R[\sigma_r^{(j)}, l] = \sum_{r=0}^{R-1} \sigma_r^{(j)} \exp \left\{ -i2l\pi \frac{r}{R} \right\}.$$

在式(9)中, $P_R^{(1)}(l) + P_R^{(2)}(l)$ 项代表单桨结构, 符合单桨结构特性^[3], $P_{12}(l)$ 项与 $P_R^{(1)}(l) + P_R^{(2)}(l)$ 项具有相同的数量级, 代表了双桨间的相互作用, $P_{12}(l)$ 的出现已经改变了单支螺旋桨的结构特性^[3], 引起谐波族结构的变化, 使谐波族呈现出明显的双桨结构, 我们在不少样本中观测到了这种现象。采用双桨谐波族幅值表达式(9)一式(11), 可对双桨识别的理论问题进行详细地研究, 下面以“伪桨”现象为例进

行分析。

2.3 “伪桨”现象的理论解释

下面以一个特例来定性地解释“伪桨”现象。

设双 R 叶桨的脉冲幅值均值序列为:

$$1\# \text{ 桨}: \left\{ \sigma_0^{(1)}, 0, \dots, 0 \right\}, \quad (12)$$

$$2\# \text{ 桨}: \left\{ 0, \sigma_1^{(2)}, \dots, 0 \right\}, \quad (13)$$

并设两支桨辐射脉冲的时间差为:

$$T_\theta = \frac{1}{R-1} \frac{T}{R}. \quad (14)$$

则将式(12)一式(14)代入式(9), 得到:

$$\begin{aligned} \frac{P_R^D(l)}{2(K+1)^2 |W(l)|^2} &= \left(\sigma_0^{(1)} \right)^2 + \left(\sigma_1^{(2)} \right)^2 + \text{Re} \left\{ \exp \left\{ i2l\pi \frac{1}{R(R-1)} \right\} \sigma_0^{(1)} \left(\sigma_1^{(2)} \exp \left\{ -i2l\pi \frac{1}{R} \right\} \right)^* \right\} = \\ & \left(\sigma_0^{(1)} \right)^2 + \left(\sigma_1^{(2)} \right)^2 + 2\text{Re} \left\{ \sigma_0^{(1)} \sigma_1^{(2)} \left(\exp \left\{ -i2l\pi \left(\frac{1}{R} + \frac{1}{R(R-1)} \right) \right\} \right)^* \right\} = \\ & \left(\sigma_0^{(1)} \right)^2 + \left(\sigma_1^{(2)} \right)^2 + 2\text{Re} \left\{ \sigma_0^{(1)} \sigma_1^{(2)} \left(\exp \left\{ -i2l\pi \frac{1}{R-1} \right\} \right)^* \right\} = \frac{P_{R-1}(l)}{2(K+1)^2 |W(l)|^2}. \end{aligned} \quad (15)$$

上式中 $P_{R-1}(l)$ 是脉冲幅值均值序列为 $\{\sigma_0^{(1)}, \sigma_1^{(2)}, \dots, 0\}$ 的单 $R-1$ 叶桨的谐波族幅值表达式。在这种情况下, 双 R 叶桨的谐波族特征 $P_R^D(l)$ 混淆为单 $R-1$ 叶桨。对于一般的“伪桨”而言, 情况更为复杂, 其谐波族结构不一定符合单桨结构特性, 而会呈现类似图 2(b) 所示的情况, 即谐波族中同时蕴含着桨数和叶片数识别信息。

3 基于模型匹配的舰船螺旋桨噪声特征精细分析

以往研究通常仅采用调制谱特征, 而较少考虑包络波形中蕴含的时域信息。随着研究的深入, 发现一些仅采用谐波族特征不能识别的问题(例如“伪桨”现象), 而在噪声包络波形中, 可提取出能够更细致逼真地表述螺旋桨调制特性所呈现的状态和变化规律的波形特征, 我们称为舰船噪声包络波形精细结构特征。利用精细结构特征能够有效提高舰船目

标的识别率, 特别是跟踪状态下的识别率。本节在模型基础上, 研究了调制谐波族特征和包络波形精细结构特征相结合的舰船螺旋桨噪声特征精细分析方法。

3.1 舰船噪声包络波形精细结构特征的表述

舰船噪声时域包络波形中蕴涵着桨数、叶片数、叶片相对空化强度、叶片波形、螺旋桨转动周期等大量识别信息, 将提取的包络波形精细结构特征表述如下:

目标螺旋桨桨数, 记为 P_{num} 。

目标螺旋桨叶片数, 记为 R 。

目标螺旋桨转动周期, 记为 T_1 和 T_2 。

与模型中式(6)的脉冲幅值均值序列相对应, 螺旋桨叶片相对空化强度序列特征, 表示为:

$$\sigma^{(j)} = [\sigma_0^{(j)}, \sigma_1^{(j)}, \dots, \sigma_n^{(j)}, \dots, \sigma_{R-1}^{(j)}]^T, \quad (16)$$

式中, j 表示螺旋桨序号, $j \in [1, 2]$ 。

例如，从图 3 信号段中提取 1# 桨和 2# 桨辐射包络波形的 8 个脉冲幅值分别为：

$$\begin{aligned}
 1\# \text{桨} : & \underbrace{0.93, \sigma_{1,1}^{(1)}, \sigma_{1,2}^{(1)}, 0.73, 0.8, \sigma_{2,1}^{(1)}, \sigma_{2,2}^{(1)}}_{\text{第一周期}}, \underbrace{0.66}_{\text{第二周期}} \\
 2\# \text{桨} : & \underbrace{\sigma_{1,0}^{(2)}, 0.98, \sigma_{1,2}^{(2)}, 0.79, \sigma_{2,0}^{(2)}, 1, \sigma_{2,2}^{(2)}}_{\text{第三周期}}, \underbrace{0.69}_{\text{第四周期}}
 \end{aligned}$$

式中， $\sigma_{1,1}^{(1)}, \sigma_{1,2}^{(1)}, \sigma_{2,1}^{(1)}, \sigma_{2,2}^{(1)}, \sigma_{1,0}^{(2)}, \sigma_{1,2}^{(2)}, \sigma_{2,0}^{(2)}, \sigma_{2,2}^{(2)}$ 较小，可不考虑。对多个周期取平均并进行归一化处理，得到叶片相对空化强度序列。

双桨时间差为两支桨辐射脉冲的时间差，记为 T_θ 。例如，图 3 信号的双桨时间差 $T_\theta \approx 0.1 T$ 。

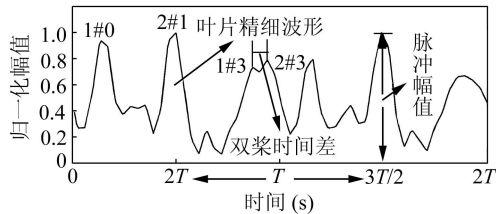


图 3 舰船噪声包络波形精细结构特征示意图

叶片统计波形谱，表示为：

$$|W(\omega)| = |F[w(t)]|, \quad (17)$$

式中， $w(t)$ 为单片叶片辐射脉冲的统计波形，是对多个叶片脉冲波形的统计值。

谐波族处的统计波形谱为：

$$|W(l)| = |W(2l\pi/T)|. \quad (18)$$

3.2 基于模型匹配的螺旋桨噪声特征精细分析方法

思路是：将舰船噪声包络波形精细结构特征（叶片相对空化强度、叶片数、桨数、双桨时间差及叶片统计波形谱等）作为匹配模型的搜索参数，采用最优化理论建立非线性规划模型，寻求样本谐波族与仿真模型谱的最佳匹配，获得样本特征的最优估计值。

非线性规划模型为：

$$\min \sum_{l=1}^L |P(l)_{\text{nom}} - A(l)_{\text{nom}}|. \quad (19)$$

式中，单桨调制谱谐波族幅值 $P(l)$ 采用文献 3 的式 (11) 仿真，双桨谐波族幅值 $P_R^D(l)$ 采用式 (9) — (11) 仿真， $P_{\text{nom}}(l)$ 为 $P(l)$ 或 $P_R^D(l)$ 的归一化值，即： $P(l)_{\text{nom}} = P_R^D(l) / [\max_{l \in [1, L]} (P_R^D(l))]$ 。 $A(l)_{\text{nom}} \in [0, 1]$, $l \in [1, L]$ 为从样本中提取的谐波族幅值的归一化值。

式 (19) 是一个无约束问题，为提高搜索效率和精度，可将目标噪声包络波形中得到的信息作为

约束条件：

$$\text{s.t.} \begin{cases} R \leq d, & d \in [3, 7], \\ P_{\text{num}} = J, & J = 1, 2 \\ \sigma_r^{(1)} \leq (\text{or } >) d_r^{(1)}, & r \in [0, R - 1], \\ \sigma_r^{(2)} \leq (\text{or } >) d_r^{(2)}, & r \in [0, R - 1], \\ |W(l)| \leq (\text{or } >) W_l, \end{cases} \quad (20)$$

式中，不等式右边各参数可从包络波形分析和调制谱分析中进行预估计。例如，参数 $d_r^{(1)}$ 和 $d_r^{(2)}$ 表示了脉冲幅值的上限（及下限）。

下面结合图 4 所示目标噪声信号，给出一次目标螺旋桨特征的精细分析实例。图 4(a) 为经过消噪预处理的某舰船噪声包络波形图，可看出在六个螺旋桨转动周期中，信号保持了稳定的成组结构。

(1) 噪声样本的调制谱谐波族特征提取

图 4(c) 中实线描绘了图 4(a) 所示噪声样本的调制谱，提取图 4(c) 所示的前八阶谐波族特征的归一化幅值：

$$A_{\text{nom}}(l) = [0.42, 0.78, 1, 0.57, 0.5, 0.43, 0.07, 0.31]. \quad (21)$$

并可提取螺旋桨转动周期 T 。

(2) 噪声包络波形精细结构特征匹配

(a) 匹配参数选择

本例中，对优化问题进行了简化，桨数（双桨）、叶片数（四叶）和 $|W(l)|$ 作为已知量处理，通过模型匹配，对两支螺旋桨的叶片相对空化强度序列和双桨时间差进行估计。

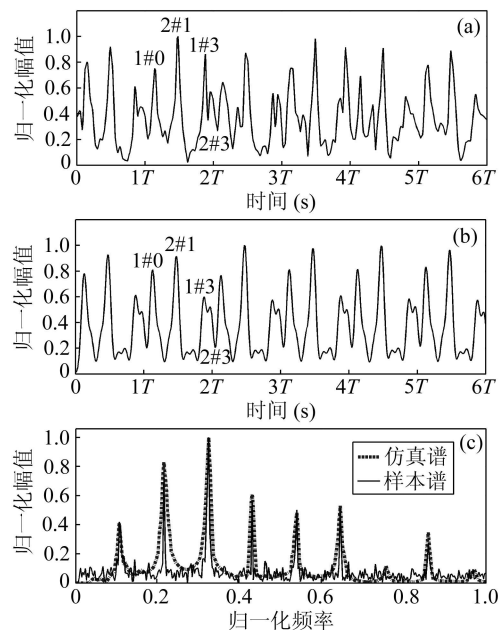


图 4 某舰船螺旋桨噪声特征匹配效果图

(b) 叶片相对空化强度序列取值范围

从图 4(a) 中可获取 1# 桨和 2# 桨各叶片相对空化强度的取值范围为:

$$\begin{cases} 0.6 < \sigma_0^{(1)} \leq 1, \\ \sigma_1^{(1)} < 0.3, \\ \sigma_2^{(1)} < 0.4, \\ \sigma_3^{(1)} < 0.7, \end{cases} \quad \text{和} \quad \begin{cases} \sigma_0^{(2)} < 0.4, \\ 0.6 < \sigma_1^{(2)} \leq 1, \\ \sigma_2^{(2)} < 0.3, \\ \sigma_3^{(2)} < 0.6, \end{cases} \quad (22)$$

(c) 双桨时间差取值范围:

$$0 < \theta < 0.12 T. \quad (23)$$

(d) 将式 (21) — 式 (23) 代入优化问题式 (19)、式 (20) 中, 得到匹配值如下:

两支四叶螺旋桨的叶片相对空化强度序列为:

1# 桨: $\{0.85, 0.08, 0.18, 0.52\}$,

2# 桨: $\{0.23, 0.95, 0.12, 0.38\}$.

双桨时间差为:

$$T_\theta \approx 0.095 T.$$

前八阶谐波族特征幅值 $P_{\text{nom}}(l)$ 为:

$$P_{\text{nom}}(l) = [0.41, 0.80, 1, 0.59, 0.51, 0.42, 0.11, 0.35].$$

图 4(b) 为根据匹配值采用式 (7) 仿真的包络波形。比较图 4(a) 和图 4(b), 可看出仿真包络波形基本反映了信号波形的性质。图 4(c) 中虚线为根据匹配值采用式 (9) — 式 (11) 仿真的调制谱, 两者基本吻合。

4 结论

(1) 舰船噪声包络波形精细结构特征是螺旋桨空化噪声调制特性所呈现的状态和变化规律的时域表述, 而调制谱谐波族特征是调制特性的频域反映, 两种特征通过模型式 (11) 联系起来, 是同一种目标特性在时、频的不同体现。而包络波形精细结构特征反映了螺旋桨不同叶片辐射噪声的相对空化强度, 叶片辐射噪声包络波形, 叶片数, 桨数及双桨时间差等信息, 是调制特性的更为逼真的表述。

(2) 在双桨转速相差较小的情况下, 调制谱谐波族结构会发生畸变, 呈现出很多不符合单桨谐波族结构的性质, 降低了谐波族特征的识别能力, 此时采用时域包络波形结构分析方法效果更好。但在这些发

生畸变的谐波族结构中, 也蕴含着桨数识别信息, 可进一步用于目标桨数识别。

(3) 基于模型匹配的螺旋桨噪声特征精细分析方法将舰船噪声包络波形精细结构特征和调制谱特征有机地联系起来, 提高了舰船目标螺旋桨调制信息的识别能力。但需要更深入地研究包络波形结构特征的时域提取方法, 也需要进一步研究更优的匹配方法, 以提高匹配的精确度和效率。

参 考 文 献

- 1 李启虎, 李敏杨, 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. 声学学报, 2008; **33**(3): 193—196
- 2 熊紫英, 朱锡清等. 船尾伴流场—导管—螺旋桨互作用噪声预报研究. 声学学报, 2009; **34**(2): 117—123
- 3 史广智, 胡均川. 舰船噪声调制谱谐波族结构特性理论分析. 声学学报, 2007; **32**(1): 19—25
- 4 李雪耀, 彭圆, 林良骥. 基于小波与三次样条插值的包迹谱的水下目标分类研究. 声学学报, 2004; **29**(1): 63—67
- 5 陈敬军, 陆估人. 影响宽带幅度调制信号检测的因素分析. 声学学报, 2005; **30**(4): 373—378
- 6 吴国清, 魏学环, 周钢. 提取螺旋桨识别特征的二种途径. 声学学报, 1993; **18**(3): 211—216
- 7 陶笃纯. 舰船噪声节奏的研究 (I)——数学模型及功率谱密度. 声学学报, 1983; **8**(2): 65—69
- 8 Miller R J, Sarno G C, Shephard D J. Progress in radar recognition of aircraft without using radar-derived databases. 1st EMRS DTC Technical Conference - Dinburgh 2004
- 9 Ehrman L, Lanterman A. Automated target recognition using passive radar and coordinated flight models. Automatic Target Recognition XIII, Orlando, FL, April 2003, vol. SPIE roc. 5094
- 10 Hummel R. Model-based ATR using synthetic aperture radar. Proceedings of the 2000 IEEE International Conference on Radar, Radar Conference, Alexandria, USA, 2000: 856—861

附录

双 R 叶螺旋桨的谐波族处的能谱密度为:

$$P_R^D(l) = E |p_R^D(t)|^2 = E |F [p^{(1)}(t) + p^{(2)}(t)]|^2 = P_R^{(1)}(l) + P_R^{(2)}(l) + P_{12}(l),$$

式中, 上标 D 表示双桨。

$P_R^{(j)}(l)$ 表示第 j 支螺旋桨的谐波族幅值的数学期望 (推导过程参见 [3]):

$$P_R^{(j)}(l) = (K + 1)^2 |W(l)|^2 \left| \widetilde{\text{DFT}}_R[\sigma_r^{(j)}, l] \right|^2.$$

$P_{12}(l)$ 体现了两支螺旋桨间的相互作用, 推导过程如下所示:

$$P_{12}(l) = E \left(2\text{Re} \left\{ \sum_{k=-0}^K \sum_{r=0}^{R-1} \sum_{k'=0}^K \sum_{r'=0}^{R-1} W_{k,r}^{(1)}(l) W_{k',r'}^{(2)}(l)^* \sigma_{k,r}^{(1)} \sigma_{k',r'}^{(2)} \right\} \right).$$

将式 (4) 和式 (5) 代入上式, 且对于同一支桨, 可设 $W_r^{(j)}(l) \approx W^{(j)}(l)$, 则推出:

$$\begin{aligned} P_{12}(l) &= 2\text{Re} \left\{ \exp \left\{ i \frac{2l\pi}{T} \cdot T_\theta \right\} \sum_{k=0}^K \sum_{k'=0}^K \exp \{-i2l\pi(k-k')\} \sum_{r=0}^{R-1} \sum_{r'=0}^{R-1} W^{(1)}(l) W^{(2)}(l)^* \sigma_r^{(1)} \sigma_{r'}^{(2)} \exp \left\{ -i2l\pi \frac{r-r'}{R} \right\} \right\} = \\ &2(K+1)^2 \text{Re} \left\{ \exp \left\{ i \frac{2l\pi}{T} \cdot T_\theta \right\} W^{(1)}(l) [W^{(2)}(l)]^* \left(\sum_{r=0}^{R-1} \sigma_r^{(1)} \exp \left\{ -i2l\pi \frac{r}{R} \right\} \right) \left(\sum_{r=0}^{R-1} \sigma_r^{(2)} \exp \left\{ -i2l\pi \frac{r}{R} \right\} \right)^* \right\} = \\ &2(K+1)^2 \text{Re} \left\{ \exp \left\{ i \frac{2l\pi}{T} \cdot T_\theta \right\} W^{(1)}(l) [W^{(2)}(l)]^* \text{D}\tilde{\text{F}}\text{T}_R[\sigma_r^{(1)}, l] \text{D}\tilde{\text{F}}\text{T}_R[\sigma_r^{(2)}, l]^* \right\} \end{aligned}$$

对于同一艘舰船的两支桨, 可设 $W^{(1)}(l) \approx W^{(2)}(l)$, 因此记为 $W(l) = W^{(1)}(l) = W^{(2)}(l)$, 则上式变为:

$$P_{12}(l) = 2(K+1)^2 |W(l)|^2 \text{Re} \left\{ \exp \left\{ i \frac{2l\pi}{T} T_\theta \right\} \text{D}\tilde{\text{F}}\text{T}_R[\sigma_r^{(1)}, l] \text{D}\tilde{\text{F}}\text{T}_R[\sigma_r^{(2)}, l]^* \right\}.$$