基于拖曳线列阵声纳的噪声监测仿真方法

程广涛，朱 军，曾广会
(海军工程大学，武汉 430033)

摘要：为便捷获取潜艇辐射噪声，设计了利用艇载拖曳线列阵声纳通过本艇回转机动进行测量的方案。利用潜艇拖曳阵模型，仿真生成了各水听器阵元与本艇的位置关系；根据噪声源理论模型产生了潜艇模拟噪声，利用深海传播模型模拟噪声在海洋环境中的传播衰减。对阵元信号分别利用 MVDR、空间平滑 MVDR 以及适应子带的 BMUSIC 算法进行处理，在一定频率范围内可以分辨出近距离的不同辐射声源，得到辐射噪声的声源强度、频谱结构和位置信息，进而获取艇上机械工况异常信息。

关键词：模拟；波束形成；噪声检测
中图分类号：O427.5 **文献识别码**：A **文章编号**：1000-3630(2009)-04-0472-04
DOI 编码：10.3969/j.issn1000-3630.2009.04.007

A simulation of radiated noise detecion based on towed array

CHENG Guang-tao, ZHU Jun, ZHENG Guang-hui
(*Navy University of Engineering*, *Wuhan* 430033, *China*)

Abstract: In order to get the submarine noise easily and expediently, a simulation of determining the feasibility of using submarine's towed hydrophone array is made for source localization measurements via a constant radius turn manoeuvre. Position parameters are got by the simulation based on the model of towed-array. Limited by the testing condition, based on the theory of radiated noise forming, the noise sources are simulated. And the noise is processed with a sound loss translation model in the sea. MVDR (Minimum Variance Distortionless Response), Spatially Smoothed MVDR and BMUSIC algorithms are adopted for beamforming. Different sources with a short distance can be separated in the range of special frequency band, and then the source level, the frequency spectrum and the location of the source can be obtained, which can be further used to detect machine malfunction.
Key words: simulation; beamforming; measurement of radiated noise

1 引 言

潜艇的优势在于隐蔽攻击，保持潜艇的安静性对潜艇至关重要。服役期间，周期性地监测舰艇辐射噪声可以及时发现舰艇声辐射特性的异常变化，从而找到引起变化的原因，并采取相应处理措施，确保舰艇处于设计状态的噪声水平；在作战和训练海区的海洋环境背景下，发现潜艇被声纳探测的弱点和临界条件，为战场指挥人员提供战术指导和技术支持。

通过专业测量试验对潜艇辐射噪声进行监测涉及很多复杂工作，成本较高；利用潜艇上布置的自噪声检测设备，可以对潜艇结构和机械的振动进行检测，获得自噪声的状况，但对方测量到的是潜艇辐射噪声，两者存在较大的差异。本文提出了通过本艇机动，利用潜艇自载拖曳线列阵声纳对潜艇中低频噪声进行监测的方法(检测频段为远距离探测所关注频段)，可以便捷地获取潜艇辐射噪声。

2 试验设计

为了利用艇载拖曳线列阵声纳对本艇噪声自监测，对潜艇进行回转机动，如图 1 所示。

为验证方案的可行性，仿真产生噪声源及阵位信息，通过对不同航速、操舵角、拖缆长度下艇体

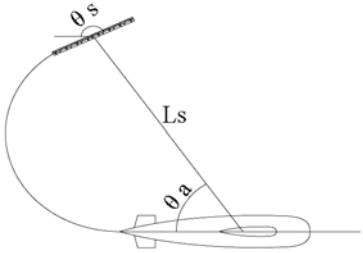

图 1 基于拖曳线列阵声纳的噪声监测原理示意图
Fig.1 The schematic diagram of submarine noise detection based on towed array

收稿日期: 2008-07-07; **修回日期**: 2008-10-24
作者简介: 程广涛(1980-)，男，山东兖州人，博士研究生，研究方向为信号处理及水中兵器发射技术。
通讯作者: 程广涛, E-mail: hechang1980@sohu.com

的空间阵位仿真，获取信号处理所需阵元的空间位置；噪声源的模拟考虑主辅机噪声、螺旋桨噪声及环境噪声。根据深海射线理论模拟传播损失。阵元信号处理采用MVDR,空间平滑MVDR及BMUSIC算法实现噪声源的高分辨，分离不同噪声源，获取声源强度和频谱结构，判断机械运行是否异常。

3　拖曳线列阵水听器阵位模拟

潜艇操纵性运动计算分别采用水平面操纵性方程和垂直面操纵性方程为[1]：

水平面：

$$\left.\begin{aligned} m(\dot{u}-vr)&=X(u)+X_{vv}v^2+X_{rr}r^2+\\ &\quad X_{vr}vr+X_{\delta\delta}\delta^2+X_T\\ m(\dot{v}+ur)&=Y_{\dot{v}}\dot{v}+Y_{\dot{r}}\dot{r}+Y_v v+Y_r r+Y_{v|v|}v|v|+\\ &\quad Y_{v|r|}v|r|+Y_{r|r|}r|r|+Y_\delta\delta+Y_{|r|\delta}|r|\delta\\ I_z\dot{r}&=N_{\dot{v}}\dot{v}+N_{\dot{r}}\dot{r}+N_v v+N_r r+N_{v|v|}v|v|+\\ &\quad N_{v|r|}v|r|+N_{r|r|}r|r|+N_\delta\delta+N_{|r|\delta}|r|\delta \end{aligned}\right\} \tag{1}$$

垂直面：

$$\left.\begin{aligned} m(\dot{u}+qw)&=X(u)+X_{ww}w^2+X_{qq}q^2+X_{wq}wq+\\ &\quad X_{\delta_s\delta_s}\delta_s^2+X_{\delta_b\delta_b}\delta_b^2+X_T+P\theta\\ m(\dot{w}-qu)&=Z_0+Z_{\dot{w}}\dot{w}+Z_{\dot{q}}\dot{q}+Z_w w+Z_{|w|}|w|+Z_q q+\\ &\quad Z_{w|w|}w|w|+Z_{ww}w^2+Z_{w|q|}w|q|+Z_{q|q|}q|q|+\\ &\quad Z_{\delta_s}\delta_s+Z_{\delta_b}\delta_b+Z_{|q|\delta_s}|q|\delta_s+P\\ I_y\dot{q}&=M_0+M_{\dot{w}}\dot{w}+M_{\dot{q}}\dot{q}+M_w w+M_{|w|}|w|+M_q q+\\ &\quad M_{w|w|}w|w|+M_{ww}w^2+M_{w|q|}w|q|+M_{q|q|}q|q|+\\ &\quad M_{\delta_s}\delta_s+M_{\delta_b}\delta_b+M_{|q|\delta_s}|q|\delta_s+M_P+M_\theta\theta \end{aligned}\right\} \tag{2}$$

式(1)、(2)中，m 为船舶质量，$X(u)$ 为艇体阻力，X_T 为螺旋桨推力；u、v、w 分别是动坐标系原点速度的 3 个投影分量，p、q、r 是绕动坐标原点转动角速度的 3 个投影分量，$X_{\dot{u}}$、$Y_{\dot{v}}$、$Y_{\dot{r}}$、$N_{\dot{v}}$、$N_{\dot{r}}$ 为加速度导数；Y_v、N_v 为漂角导数；Y_r、N_r 为旋转导数；X_{vr}、$Y_{v|v|}$、$Y_{|r|\delta}$、$N_{v|v|}$、$N_{|r|\delta}$ 为耦合导数。本文中的这些水动力导数根据模型试验资料确定。

分别建立关于艇体和拖曳阵的惯性坐标系与拖缆局部坐标系，单位矢量分别为($\boldsymbol{i},\boldsymbol{j},\boldsymbol{k}$)、($\boldsymbol{t},\boldsymbol{n},\boldsymbol{b}$)，转换关系为：

$$(\boldsymbol{t},\boldsymbol{n},\boldsymbol{b})=(\boldsymbol{i},\boldsymbol{j},\boldsymbol{k})\boldsymbol{ABC} \tag{3}$$

其中，$\boldsymbol{ABC}$ 为变换矩阵：

$$\begin{aligned} \boldsymbol{i}&=\cos\theta\cdot\cos\phi\cdot\boldsymbol{t}-\cos\theta\cdot\sin\phi\cdot\boldsymbol{n}-\sin\theta\cdot\boldsymbol{b}\\ \boldsymbol{j}&=\sin\theta\cdot\cos\phi\cdot\boldsymbol{t}-\sin\theta\cdot\sin\phi\cdot\boldsymbol{n}+\cos\theta\cdot\boldsymbol{b}\\ \boldsymbol{k}&=-\sin\phi\cdot\boldsymbol{t}-\cos\phi\cdot\boldsymbol{n} \end{aligned}$$

微元段缆的动力平衡方程矢量表达式为：

$$\frac{\partial\boldsymbol{T}}{\partial S}+\boldsymbol{W}+\boldsymbol{F}+\boldsymbol{B}=0 \tag{4}$$

式中 $\boldsymbol{T}$ 为单位缆长上的张力，$\boldsymbol{W}$ 为单位缆长在水中的重量，$\boldsymbol{F}$ 为单位缆长受到的流体水动力，$\boldsymbol{B}$ 为单位缆长惯性水动力，满足：

$$\begin{aligned} \boldsymbol{W}&=(m'-\rho S_A)g\boldsymbol{k}\Big/S'\\ S'\boldsymbol{B}&=-\{m_1\dot{\boldsymbol{r}}-\rho S_A[\boldsymbol{J}+(\boldsymbol{u}\cdot\boldsymbol{t})\boldsymbol{t}]\}^{\bullet}+\\ &\quad\frac{\{m_1\dot{\boldsymbol{r}}-\rho S_A[\boldsymbol{J}+(\boldsymbol{u}\cdot\boldsymbol{t})\boldsymbol{t}]\}e\dot{T}}{S'}\\ S'\boldsymbol{F}&=-\sqrt{1+eT}\{\pi C_t u_t\cdot|u_t|\cdot\boldsymbol{t}+\\ &\quad C_n u_n\cdot\sqrt{u_n^2+u_b^2}\cdot\boldsymbol{n}+C_n u_b\cdot\sqrt{u_n^2+u_b^2}\cdot\boldsymbol{b}\Big\}\cdot\boldsymbol{b}\\ \frac{\partial\boldsymbol{T}}{\partial s}&=T'\cdot\boldsymbol{t}+T\cdot\phi'\cdot\boldsymbol{n}+T\cdot\theta'\cdot\cos\phi\cdot\boldsymbol{b} \end{aligned} \tag{5}$$

其中 m' 为拖缆单位长度的质量；ρ 为海水密度；S_A 为拖缆截面面积；g 为重力加速度；S' 为拖缆拉伸率。上标符号“•”表示对时间的微分，其它各量为拖缆上点的位置矢量 $\boldsymbol{r}$，且 $\boldsymbol{r}=x\boldsymbol{i}+y\boldsymbol{j}+z\boldsymbol{k}$；海流的速度 $\boldsymbol{J}$；拖缆上点相对于流体的速度 $\boldsymbol{u}=\dot{\boldsymbol{r}}-\boldsymbol{J}$；$m_1=m'+\rho S_A$，$U$ 为拖缆速度。

对潜艇回转过程中拖缆及声阵相对潜艇的位置进行仿真，图 2 给出了战术机动的仿真结果，从开始回转到 320s 后拖阵阵形与潜艇相对位置达到稳定。

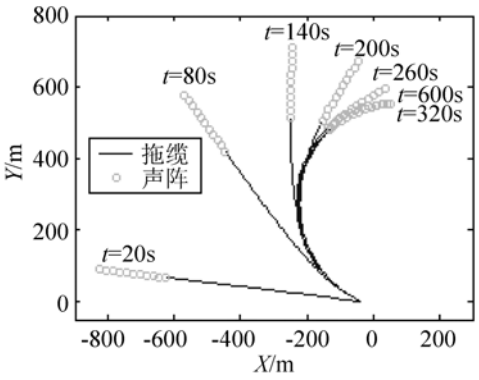

图 2　定常回转过程中拖曳线列阵的阵位

Fig.2　The array position in a constant radius turn manoeuvre

4　噪声源的模拟

噪声源模拟考虑潜艇的推进噪声(螺旋桨噪声)、艇体主辅机噪声以及环境噪声。

机械噪声的模拟是通过对不同相位、幅值的正弦谐波信号的叠加实现，存在随机相位差及其随机幅值差，数学模型为：

$$s=\sum_n\sum_{ii}a_{nii}\sin\left(2\pi\frac{f_{nii}}{T}t+\Phi_{nii}(t)+k_{nii}\cdot r_{nii}\right) \tag{6}$$

式(6)中 n 为标志线谱数量，ii 为谐波数量，a_{nii} 为幅值，Φ_{nii} 为控制相位差，k_{nii} 是引入的随机量，r_{nii} 为均匀随机量。

螺旋桨噪声模型基于 R.H.Mellen 的实验结果及 Ross 的噪声模型[2]，通过叠加宽带噪声和调制线谱噪声得到螺旋桨噪声，同时考虑海洋环境噪声及风生流噪声的影响[3]。依据 Ross 的噪声模型，峰值频率及 100Hz 以上的声压结构可以表示为：

$$f_m=3.91\times(p_0-p_v)^{1.65}\left(\frac{U_{ti}}{U_t}\right)^{0.7} \tag{7}$$

$$\left\langle p_{>100}^2\right\rangle=8.25\times10^{-9}\rho c_0 B\cdot K_{ti}U_{ti}^3\left[\left(\frac{U_t}{U_{ti}}\right)\left(\frac{U_t}{U_{ti}}-1\right)^2\right] \tag{8}$$

B 是产生空化的叶片数，K_t 为临界叶梢空化指数，K_{ti} 为实际空化指数，U_t 为临界空化流速，U_{ti} 为实际流速，c_0 为声速。

采用射线理论映射虚源的深海传播模型进行衰减，传播损失模型为[4]：

$$TL=-20\lg\left(\left|\frac{\mathrm{e}^{\mathrm{i}kr_s}}{r_s}-\frac{\mathrm{e}^{\mathrm{i}kr_i}}{r_i}\right|\right) \tag{9}$$

式中 r_s 为至声源处距离，r_i 为至虚源处距离。

5 阵列信号处理算法的应用

潜艇回转航速 V_n=10kn，回转舵角 δ=25°，仿真得中央阵元阵位角 θ_α=91.3°，方位角 θ_s=174.6°，阵距 Ls=525.8m。噪声源设定为机械噪声与螺旋桨噪声，并采用深海射线理论计算传播损失，得到阵元端数据。由于阵列处理算法的优劣关系到波束形成指向性效果，本文利用 CBF、MVDR、空间平滑 MVDR 算法及波束域子空间分解 BMUSIC 算法对阵元信号进行处理。

传统波束形成(CBF)对 N 路阵元信号简单地进行“延时-求和-平方”处理，抑制噪声，得到波束输出。

在 MVDR 算法[5]中引入了一个变换矩阵 T_k，将信号引入波束域处理：

$$y_{k_n}=T_{k_n}x_{k_n} \tag{10}$$

$$\prod=\frac{1}{a_1^H\hat{R}_y^{-1}a_1} \tag{11}$$

$$\hat{R}_y=\frac{1}{K}\sum_{k_n=1}^{K}y_k y_k^H+\varepsilon\mathrm{I} \tag{12}$$

式中 ε 是误差控制系数，k_n 是快拍数，K 是处理数据长度。将基阵分为几个子阵，每组有一定数量的重叠，各个子阵分别进行 MVDR 算法处理，然后再取平均就得到空间平滑的 MVDR 效果[6]。MUSIC 算法对相关矩阵进行信号空间与噪声空间的分离，对阵元协方差矩阵 R_{xx} 进行特征分解，将特征值按照从大到小排列为 λ_1，λ_2，…，λ_d，…，λ_M，其中

$\lambda_\zeta>\sigma^2$，ζ=l，2，…，d

$\lambda_\zeta=\sigma^2$，$\zeta=d$+1，…，M

设 λ_1，λ_2，…，λ_d，对应特征向量 S_1，S_2，…，S_d，它们组成信号子空间 S；设 λ_{d+1}，…，λ_M，对应特征向量 g_1，g_2，…，g_{M-d}，它们组成噪声子空间 G。MUSIC 谱函数为：

$$\prod_{MUSIC}=\frac{1}{a_1^H(w)GG^Ha_1(w)} \tag{13}$$

为了改善不同频带间的分辨效果，特别是在低频段的方位分辨效果，在低频段适当选取大的阵元间距而高频段可选取相对较小的阵元间距，并对处理结果进行空间平滑，这就得到了子带 MUSIC 算法的处理结果。实际计算中多采用波束域的 MUSIC 算法(BMUSIC)，该方法是先将阵元域信号通过转换矩阵变换到波束域，再对协方差矩阵进行特征空间分解，获取 MUSIC 估计谱。T_s 的构造可采用空间傅立叶变换(DSFT)：

$$\begin{aligned}&R_B=T_s^HR_{xx}T_s\\&\mu(h)=[1,\mathrm{e}^{\mathrm{j}\pi h},...,\mathrm{e}^{\mathrm{j}(N-1)\pi h}]\\&T_s=\frac{1}{\sqrt{N}}\left[\mu\left(h\frac{2}{N}\right),\mu\left((h+1)\frac{2}{N}\right),\right.\\&\left.\quad...,\mu\left((h+B_n-1)\frac{2}{N}\right)\right]\end{aligned} \tag{14}$$

式中，B_n 为波束个数。

图 3~6 是应用不同算法获取的方位谱图，横坐标为源位置坐标(m)，以船体中心为坐标原点，向尾部为正方向；左侧纵坐标为频率轴(Hz)，右纵坐标为强度(dB)，单独观察方位谱图的横切面，就是声源的频谱图，参考声压取 0dB=1μPa。由于仿真中机械噪声源与螺旋桨噪声源距离较近，传统处理(CBF)算法无法分辨两个目标，如图 3 所示。图 4 采用了平滑 MVDR 算法，优点是可以消除相干影响及消噪降噪，在 350Hz 以上可以分辨仿真设定的两个声源，38m 处为机械噪声源，58m 处为螺旋桨噪声。图 5 采用 Music 算法体现了子空间分解在高分辨方面的优势，是声纳 DOA 估计中较好的方法，在 250Hz 以上对两目标有较好的分辨效果，低频段分辨效果比图 4 有一定提高。图 6 采用了多子带 BMUSIC 算法，在较低频率处就可以对两个目标有较好的分辨率，充分利用多元水听器阵数据，根据不同子带的特点，获取最佳的信号输出。

通过信号处理，可以分离机械噪声源与螺旋桨噪声，得到了声源的频谱结构及强度信息，并可以监测推进系统及其主辅机系统的工作异常或故障。为了仿真验证其可行性，假定某机械故障(异常)增加

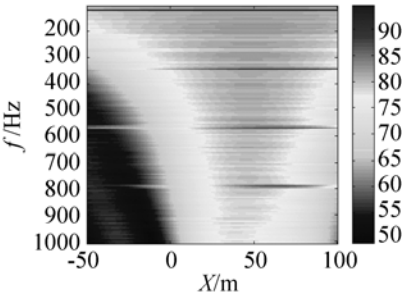

图 3　传统算法输出

Fig.3　The output of CBF

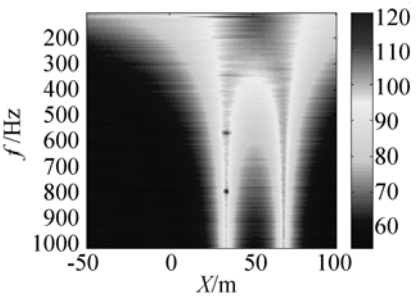

图 4　平滑 MVDR 算法输出

Fig 4　The output of smoothed MVDR

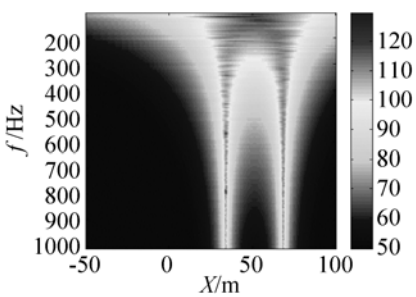

图 5　BMusic 算法输出

Fig.5　The output of BMusic

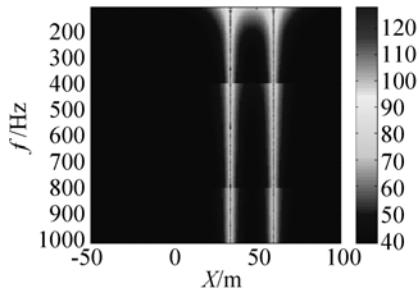

图 6　分子带 BMusic 算法输出

Fig.6　The output of subband BMusic

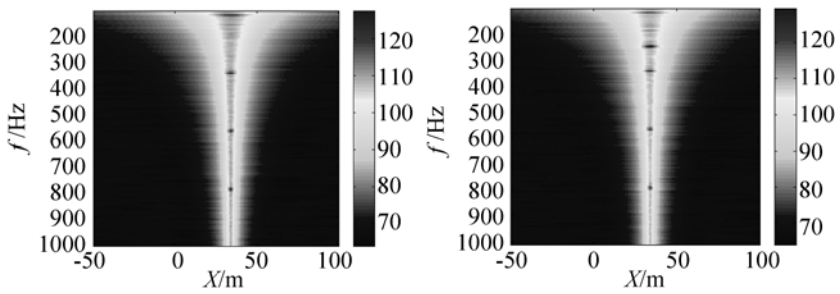

图 7　某噪声源故障前后平滑 MVDR 输出

Fig.7　The output of a conked noise source

了一个特定频率的单频线谱，例如螺旋桨桨叶发生损伤或主辅机某部件磨损故障，由于前面已经实现了噪声源的分离，模拟仅考虑单个声源。图 7 给出了某噪声源正常状态(图 7(a))与发生故障后(图 7(b))的平滑 MVDR 输出，观察图中 X=38m 处的纵切面，通过对比方位谱图频谱结构的变化，很容易发现因机械故障而产生的 225Hz 的单频线谱。仿真结果表明：设计方案可以将主辅机噪声源与潜艇推进噪声源分离，并且获取推进器及其主辅机工况的异常信息。

6　结 论

通过设计方案，对阵元信号分别利用 MVDR、空间平滑 MVDR 以及适应子带的 BMUSIC 算法对阵元信号进行处理，在一定频率范围内可以分辨出近距离的不同辐射声源,可以实现对主辅机机械噪声源与螺旋桨噪声源的分离，得到潜艇辐射噪声的声源强度及频谱结构，获取艇上机械运行工况异常信息。仿真验证了设计方案的可行性，为进一步进行海上试验提供了技术支持。在实际检测中，对潜艇操纵要求较高，潜艇姿态控制至关重要，这是后续工作的重点研究内容。

参　考　文　献

[1] 朱军, 刘军. 拖缆系统回转运动仿真计算[J]. 海军工程大学学报, 2001, **13**(4): 22-28.
ZHU Jun, LIU Jun. Towed cable-array system simulations on turning manoeuve[J]. Journal of naval university of engineering. 2001, **13**(4): 22-28.

[2] Ross D. Mechanics of underwater noise[M]. New York: Pergamon Press, 1976. 350-380.

[3] Etter P C. Underwater acoustic Modeling[M]. Elsevier Applied Science, New York: Spon Press. 1991. 110-155.

[4] Ducan A J. The measurement of underwater acoustic noise radiated by a vessel using the vessel's own towed array[D]. PhD, Curtin University of Technology, 2003, 55-58.

[5] Capon J. High resolution frequency-wavenumber spectrum analysis[J]. Proc.of the IEEE57, 1969, 1408-1418.

[6] Reddy V U, Paulraj A, Kailath T. Performance analysis of the optimum beamformer in the presence of correlated sources and its behavior under spatial smoothing[J]. IEEE transaction on Acoustic, Speech and signal Processing 1987, ASSP-**35**(7): 927-936.