

七元非典型声强向量阵对舰船的被动定向和尺度估计

石 杰 相敬林 陈韶华 梁 峰

(西北工业大学航海学院 西安 710072)

摘 要: 该文提出了利用七元非典型声强向量阵对舰船体积目标 3 亮点部位定向和定位的方法。基阵的 7 个阵元都可以布放在水下探测平台表面, 并且阵元间的间距可以根据平台尺寸进行调整, 便于工程应用。舰船体积目标中部、中后部辐射的低频声源用声强向量法定向, 舰船尾部辐射的高频声源用传统的时延估计法定向, 两种方法可以在同一基阵上实现。利用实测舰船辐射噪声数据进行了计算机仿真。仿真结果表明: 该方法能够实现舰船目标 3 亮点部位的高精度定向, 在信噪比 10dB 时, 定向误差在 2° 以内。并且在探测平台深度已知的情况下, 利用定向的结果能够对舰船目标进行尺度估计, 估计精度小于船长的 10%。

关键词: 声强向量; 时延估计; 体积目标; 定向; 尺度估计

中图分类号: U666.72

文献标识码: A

文章编号: 1009-5896(2007)06-1483-04

The Bearing and Size Estimation of Volume Target Based on a Vector Sound Intensity Array

Shi Jie Xiang Jing-lin Chen Shao-hua Liang Feng

(College of Marine, Northwestern Polytechnical University, Xi'an 710072, China)

Abstract: In this paper a new method to determine the bearings and ranges of the three highlight sections of a ship is given. This method is based on a non-typical vector sound intensity array with seven sensors. The seven sensors can all be fixing in some underwater detection platform and the distances between them are adjustable. So the array is more convenient for engineering implementation than the traditional array proposed by Liu Xun(2002), *et al.*. The bearings of the low frequency noise radiated by the midship and the section between the midship and stern is determined by sound intensity vector. And the bearing of the stern which radiates high frequency noise is determined by time delay estimation. The two methods can be carried out based on the same array. The computer simulation for the ship's real measured data proved that this method can find the bearings of the three sections of the ship in high precision. And the size of the ship can be estimated if the depth of the platform is already known.

Key words: Sound intensity vector; Time delay estimation; Volume target; Bearing estimation; Size estimation

1 引言

在近距离上对舰船目标进行定向和跟踪时, 舰船不应被看作一个点源, 而应视为体积目标。如果能够实现舰船不同部位的定向, 进而实现尺度估计, 将对水下被动声探测设备辨别舰船要害部位, 进行目标识别有很大的帮助。研究表明^[1], 舰船的中部和中后部辐射的低、次声频噪声中含有丰富的线谱信息, 而尾部主要辐射高频连续谱。舰船的中部、中后部和尾部具有明显不同的谱特征, 这样就使得使用同一套系统同时辨别 3 个部位有一定的困难。文献[2]提出利用声强向量法能够在小尺度平台上实现低频声源的高精度定向的优势^[3-5], 利用 3 对间距不同的菱形声强向量阵实现舰船体积目标 3 个部位的定向, 这在理论上是成功的, 但是菱形阵本身的缺陷就是有一个负向基元要安装在平台内部, 而且两套尺寸小的阵也要放置在平台内部, 这在工程实现上非常困

难。

本文提出一种共有 7 个水听器阵元的声强向量阵, 采用基阵共用技术实现舰船目标 3 个部位的定向, 即用声强向量法实现中部、中后部的低频声源的定向, 使用时延估计法实现尾部的高频声源定向, 共用同一基阵。基阵的 7 个阵元可以布放在平台表面上, 而且相对于 3 对菱形阵阵元数目大大减少了, 带来了工程应用中软件和硬件上的精简。

2 菱形阵对舰船 3 部位定向原理

图 1 所示就是文献[2]提到的 3 对间距不同的菱形声强向

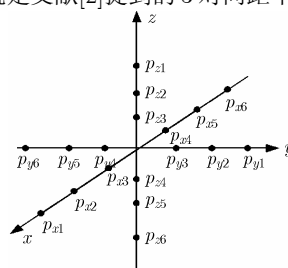


图 1 菱形向量阵结构图

量阵结构图，它用来分辨舰船体积目标 3 亮点部位的原理如下：对于舰船中后部辐射的 10-100Hz 的高强度线谱用尺寸最大的菱形阵($p_{x1}, p_{x6}, p_{y1}, p_{y6}, p_{z1}, p_{z6}$)来定向；对于舰船中部辐射的 100-1000Hz 的线谱用尺寸中等的菱形阵($p_{x2}, p_{x5}, p_{y2}, p_{y5}, p_{z2}, p_{z5}$)来定向；而舰船尾部辐射的 1000-5000Hz 的高频连续谱用尺寸最小的菱形阵($p_{x3}, p_{x4}, p_{y3}, p_{y4}, p_{z3}, p_{z4}$)来定向。这样做是为了避免互谱法测声强的相位失配误差和有限差分误差过大，对不同的频段选取合适的 kd 值(k 为波数, d 为阵元间距), 才能使定向结果达到我们要求的精度。但是从图中可以看出, 尽管 3 对菱形声强阵各自对应舰船目标 3 部位进行定向, 原理直观, 运算简单, 但是声基元多达 18 个, 并且要有 12-13 个基元安装在平台内部, 工程实现上非常困难。因此本文提出了一种七元声强向量阵分辨舰船体积目标 3 部位的方法, 这 7 个基元都可以安装在平台表面, 间距还可以根据平台形状进行调整, 便于工程应用。

3 七元声强向量阵对舰船 3 部位定向原理

如图 2 所示, 组成基阵的 7 个水听器基元都可以布放在水下探测平台表面上, 用 O, A_0, B_0, C_0 4 个水听器组成小尺寸的四元声强向量阵, 用来针对舰船体积目标中部辐射的 100-1000Hz 频域内的线谱分量进行定向; O, A_1, B_1, C_1 4 个水听器组成尺寸较大的四元声强向量阵, 用来针对舰船体积目标中后部辐射的 10-100Hz 频域内的线谱分量进行定向, 从下面的任意四元声强阵的分析中可以得出阵元间的间距可以是任意不等的。但是为了安装直观方便, 选择 $|OA_0| = |OB_0| = |OC_0| = d_0, |OA_1| = |OB_1| = |OC_1| = d_1$ 。舰船尾部高频连续谱的定向可以使用其中任意一套四元声强向量阵用时延估计法来实现。由于互谱法测声强的有限差分误差和相位失配误差的存在, 声强向量阵的尺寸需要合理地选择, 10-1000Hz 的频率范围是不可能用一套固定间距的阵形来测量的。 kd (k 为波数, d 为阵元间距) 过小, 通道相位失配的影响突出会导致出现大的定向误差; kd 过大, 有限差分误差的影响突出同样会导致出现大的定向误差, 这也是文献[2]选择使用 3 对间距不同的菱形阵的原因。

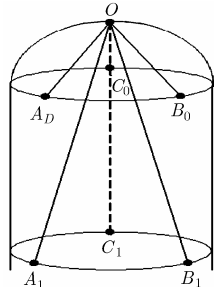


图 2 声强向量阵安装示意图

3.1 任意四元声强向量阵定向原理

假设在实际应用中, 满足远场条件。如图 2 所示, 4 个声基元的布放是任意的, 但是不同平面的, 首先根据 4 个声

基元的布放位置建立一个参考的直角坐标系, 如图 3 所示。选取其中一个参考阵元的位置作为坐标原点 O , 考虑到互谱法测声强的有限差分误差, 它与点 A, B, C 之间的距离应遵循 $kd < 1$ 的条件, k 为波数, d 为距离。选取 OA 连线方向为 x 轴, 以 O, A, B 3 点确定的平面为 xoy 平面, 过 O 点的法线方向为 z 轴。 O, A, B, C 在此坐标系中的坐标分别表示为 $O(0,0,0), A(x_a,0,0), B(x_b,y_b,0), C(x_c,y_c,z_c)$, 为已知量。 d_{OA}, d_{OB}, d_{OC} 分别为 OA, OB, OC 的长度。声源的入射声线方位角为 φ , 俯仰角为 θ , 与 OC 的夹角为 η 。已知 OA 和 OB 夹角即 $\angle AOB$ 为 γ ; 应用互谱法^[6]求得声强在 OA, OB 和 OC 方向的投影分别为

$$\left. \begin{aligned} I_{OA}(f) &= -\frac{1}{2\pi f \rho d_{OA}} \text{Im}[S_{OA}(f)] \\ I_{OB}(f) &= -\frac{1}{2\pi f \rho d_{OB}} \text{Im}[S_{OB}(f)] \\ I_{OC}(f) &= -\frac{1}{2\pi f \rho d_{OC}} \text{Im}[S_{OC}(f)] \end{aligned} \right\} \quad (1)$$

其中 $S_{OA}(f)$ 为 O 点和 A 点声基元接收信号的互功率谱; $S_{OB}(f)$ 为 O 点和 B 点声基元接收信号的互功率谱; $S_{OC}(f)$ 为 O 点和 C 点声基元接收信号的互功率谱。

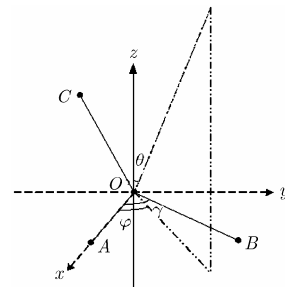


图 3 任意四元声强向量阵定向原理图

参考图 3 中的几何关系, 有

$$I_{OA} = I_{xoy} \cos \varphi, \quad I_{OB} = I_{xoy} \cos(\gamma - \varphi) \quad (2)$$

其中 I_{xoy} 为声强在 xoy 平面上的投影值。

根据式(2)可以求出声强在 y 轴上的分量为

$$I_y = I_{xoy} \sin \varphi = \frac{I_{OB} - I_{OA} \cos \gamma}{\sin \gamma} \quad (3)$$

其中 I_{OA}, I_{OB} 和 γ 为已知项, 而且分子 $\sin \gamma \neq 0$ 。

由此声强 x 和 y 轴上的分量已知, 那么可以求出方位角

$$\varphi = \arctan\left(\frac{I_y}{I_x}\right) = \arctan\left(\frac{I_y}{I_{OA}}\right) = \arctan\left(\frac{I_{OB} - I_{OA} \cos \gamma}{\sin \gamma I_{OA}}\right) \quad (4)$$

声强向量可表示为 $\mathbf{I} = (I_x, I_y, I_z)$, 那么声强在 OC 方向上的投影值为

$$\mathbf{I} \cdot \overline{OC} = (x_c I_x + y_c I_y + z_c I_z) \quad (5)$$

将上式进行分解并参考式(2)得到声强在 z 轴方向上的分量为

$$I_z = \frac{d_{OC} I_{OC} - x_c \times I_{OA} - y_c \times (I_{OB} - I_{OA} \cos \gamma)}{z_c} / \sin \gamma \quad (6)$$

联立式(3)和式(6)得到俯仰角

$$\theta = \arccos \left[\frac{I_z}{\sqrt{I_{OA}^2 + I_y^2 + I_z^2}} \right] \quad (7)$$

通过式(4)和式(6)的计算, 可以看出任意布放的四元声强向量阵可以对声源进行全空间定向, 打破了形式上的束缚, 声强向量阵的工程应用价值将更加广泛。

3.2 声强向量阵对舰船中部、中后部的定向

根据上面的分析, 用四元声强向量阵 O, A_0, B_0, C_0 针对舰船体积目标中部辐射的 100-1000Hz 频域内的线谱分量进行定向; O, A_1, B_1, C_1 用来针对舰船体积目标中后部辐射的 10-100Hz 频域内的线谱分量进行定向。定向原理是相同的, 见图 4。由于互谱法测声强的有限差分误差和各通道的相位不一致性造成的相位失配误差的存在, 在实际应用中, 声强向量阵的尺寸应慎重选择。根据文献[6]可以详细地推导出任意四元声强向量阵的有限差分定向误差和相位失配定向误差, 由此确定如图 2 所示的声强向量阵的间距, 可以得到与文献[2]类似的结果, kd 的大小在 0.4-0.8 之间为最佳。

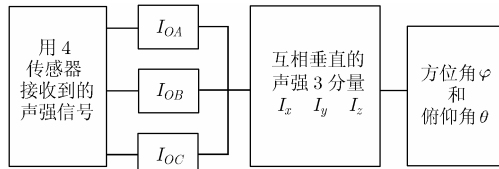


图 4 声强向量阵定向流程图

3.3 时延估计法对舰船尾部的定向

对舰船尾部辐射的高频连续谱进行定向, 本文提出利用传统的时延估计法实现, 图 2 中任意一组四元声强向量阵此时可以作为声压传感器阵列, 分别计算入射线到 O 点与到 A 点, B 点和 C 点的传播时延差, 从而求得声源的方向。文献[2]仍然利用声强向量法对舰船尾部进行定向, 在理论上可行, 但在实际应用中存在困难, 由于尾部辐射源的频率高, 为了减小有限差分误差, 间距 d 一定要足够小, 工艺上难以实现且难以保证其精度, 比如对于 2500Hz 频率, 要求 $kd < 1$, 则 $d < 9\text{cm}$ 。而时延估计法对高频连续谱定向精度高, 声强向量阵的尺寸也符合该方法的要求 $d < \lambda/2$ (其中 λ 为波长)。

如图 5 所示, 在远场平面波的情况下, 间距为 d 的两基元 1 和 2 接收的声信号仅存在一个时延 τ , 它与入射角 α 的关系为 $d \cos \alpha = c\tau$, c 为声速, 故由时延估计可确定声源的方向。为了对声源进行全空间定向, 可使用图 1 中的 O, A_0, B_0, C_0 组成四元声强向量阵。若基元 O 与基元 A_0, B_0, C_0 之间的时延分别为 τ_x, τ_y, τ_z , 则声源对于由 O, A_0, B_0 3 点确定的平面及其法线方向确定的参考直角坐

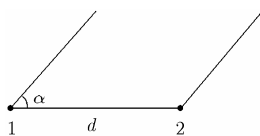


图 5 时延估计法定向原理

标系的俯仰角和方位角分别为

$$\begin{aligned} \varphi &= \arctan(m_y / m_x) \\ \theta &= \arccos \left(\frac{m_z}{\sqrt{m_x^2 + m_y^2 + m_z^2}} \right) \end{aligned} \quad (8)$$

其中

$$\begin{aligned} m_x &= c\tau_x / d_0 \\ m_y &= (c\tau_y - c\tau_x \cos \gamma) / (\sin \gamma d_0) \\ m_z &= \frac{c\tau_z d_0 \sin \gamma - (x_c \sin \gamma - y_c \cos \gamma) c\tau_x - y_c c\tau_y}{d_0 z_c \sin \gamma} \end{aligned} \quad (9)$$

其中 c 为声速; γ 为 OA 和 OB 的夹角; (x_c, y_c, z_c) 为点 C_0 的坐标。声源的方位角 φ 和俯仰角 θ 可以根据式(8)和式(9)求出, 因此, 可以对四元声强向量阵接收的声信号进行时延估计, 实现对高频声源的全空间定向。其精度取决于时延估计的精度。本文采用改进的相位谱时延估计方法^[7]对舰船尾部的高频噪声进行定向。

4 仿真实验分析

为了更为直观地了解图 2 所示的声探测系统对舰船体积目标 3 亮点的定向, 在仿真实验中, 假设舰船从水声探测设备正上方沿半径方向移动, 舰船纵向长度 $L=160\text{m}$, 船速为 15 节; 观测点处水深 $H=300\text{m}$, 在这种运动模式下, 舰船中部、中后部和尾部的方位角是相同且不变的, 在这里假定方位角为 60° , 变化的是俯仰角, 通过对俯仰角的计算可以得到 3 个不同部位的方向, 在布深已知的情况下, 也就得知了它们的方位, 从而能够对舰船体积目标进行跟踪和尺度估计。

用某船舶的实测辐射噪声进行仿真, 如图 6 所示为该船舶的辐射噪声的归一化频谱, 与理论分析相一致, 在 1000Hz 以下有能量较高的线谱, 声强向量阵的参数选择为: $d_0 = 0.3\text{m}$; $d_1 = 1.5\text{m}$; 在实际应用中, 可以根据设备的具体形状进行合理的选择和设计。各通道相位失配都为 0.5° ; 噪声背景采用各向同性噪声, 信噪比 10dB。

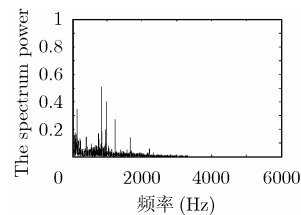


图 6 该船辐射噪声的归一化频谱

由图 7, 图 8, 图 9 可以看出, 分别用声强向量法和时延估计法测得的 3 个部位的俯仰角定向误差不超过 2° , 跟踪轨迹十分清晰, 符合工程应用的要求。对于图 10 得到的尺度估计图, 中间的平滑曲线是多项式拟合结果, 可以看出, 在舰船与水声设备距离较近处(约两倍船长以内), 由于 3 个部位可分辨, 因此尺度估计结果接近真实值, 误差小于船长的 10%; 而在距离较远处, 舰船体积目标 3 个部位逐渐重合成点源, 尺度估计越来越不准确。

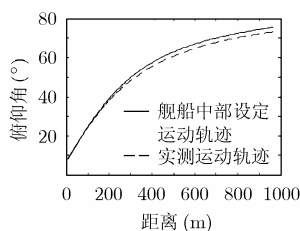


图7 舰船中部的运动轨迹

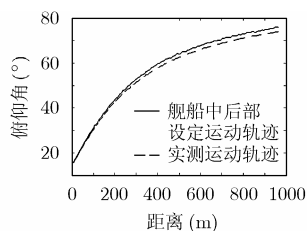


图8 舰船中后部的运动轨迹

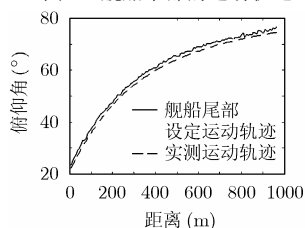


图9 舰船尾部的运动轨迹

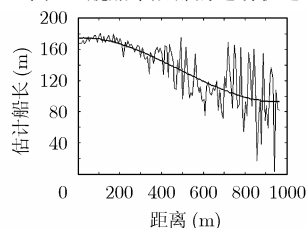


图10 舰船的尺度估计图

5 结束语

通过理论分析和实验结果证明,利用声强向量法和时延估计法在同一个七元基阵上能够实现舰船体积目标3部位的分别定向和目标的尺度估计,为体积目标定向提供了一种基阵共用技术;并且该基阵阵元除了具有都可以布放在装载平台表面的优点外,还可以根据实际设备的几何形状进行随意调整,为声强向量阵适应实际系统需要,突破固定结构模式提供了一种有效的手段。

参考文献

- [1] 刘勋,相敬林等. 作为体积目标的舰船声辐射纵向分布特性的研究. 西北工业大学学报, 2000, 18(3): 409-412.

LiuXun and XiangJinglin, *et al.* Research on longitudinal distribution characteristics of the radiated noise of a ship as a volume object. *Journal of northwestern polytechnical university*, 2000, 18(3): 409-412.

- [2] 刘勋,相敬林. 基于声强向量法的体积目标定向和缩比实验研究. 电子与信息学报, 2002, 24(3): 347-353.
- LiuXun and XiangJinglin, *et al.* Study on bearing and scaledown experiment of volume target based on acoustic intensity vector. *Journal of Electronics and Information Technology*, 2002, 24(3): 347-353.
- [3] Hickling R and Wei W. Finding the direction of a sound source using a vector sound-intensity probe. *J. Acoustic. Soc. Am.*, 1993, 94 (5): 2408-2412.
- [4] Hutt D L, Hines P C, and Hamilton A A J. Measurement of underwater sound intensity vector. *OCEANS '99 MTS/IEEE*. Seattle, WA, USA. 1999, (2): 717-722.
- [5] 陈华伟,赵俊渭,郭业才. 基于矢量传感器的低空目标声测向算法及实验研究. 声学学报, 2004, 29(1): 75-79.
- [6] 刘勋. 体积目标的被动声定位方法和尺度估计研究. [博士论文], 西安: 西北工业大学, 2000.
- [7] 马晓红,陆晓燕等. 改进的互功率谱相位时延估计方法. 电子与信息学报, 2004, 26(1): 53-59.

石杰: 女, 1980年生, 博士生, 研究方向为水声信号处理.

相敬林: 男, 1936年生, 教授, 博士生导师, 主要研究方向为信号检测与处理.

陈韶华: 男, 1978年生, 博士生, 研究方向为通信信号处理.

梁峰: 男, 1977年生, 博士生, 研究方向为水声混沌通信技术.