

基于矢量阵的运动声源柱面聚焦定位方法试验研究*

时洁[†] 杨德森 时胜国

(哈尔滨工程大学水声技术重点实验室, 哈尔滨 150001)

(2011年9月22日收到; 2011年10月24日收到修改稿)

本文基于被动合成孔径原理, 在建立运动声源矢量阵近场柱面聚焦测量模型的基础上, 分别研究了适用于单频线谱信号和宽带连续谱信号的矢量阵柱面聚焦定位方法, 通过数值仿真计算了该方法在多种误差条件下的定位精度, 并进一步通过舱段模型试验对该方法的工程实用性和正确性进行了详细的分析和论证. 舱段模型试验结果表明, 柱面聚焦定位结果与壳体振动能量分布规律符合较好, 该方法不仅能真实反映声源位置信息, 而且能反映不同频带内声源能量分布的相对大小, 具有良好的定位效果.

关键词: 运动噪声源, 矢量阵, 柱面聚焦波束形成

PACS: 43.50.+y, 43.60.+d, 43.58.+z

1 引言

综合利用被动合成孔径原理^[1]以及聚焦波束形成方法对运动声源进行定位, 在提高测试效率的同时, 由于沿运动方向上的虚拟阵列孔径得到扩展, 在该方向上的聚焦分辨率可得到明显提高. 聚焦波束形成方法较近场声全息^[2]和运动声全息^[3,4]具有物理机理明确、信息处理灵活性强以及工程实用性强等优点. 根据声源辐射面的不同, 可选择柱面聚焦或平面聚焦的方式, 真实反映噪声源的空间分布情况. 本文在建立运动声源矢量阵近场柱面聚焦测量模型的基础上, 分别研究了适用于单频线谱信号和宽带连续谱信号的矢量阵柱面聚焦定位方法, 通过数值仿真计算了该方法在多种误差条件下的定位精度, 并进一步通过舱段模型试验对该方法的工程实用性和正确性进行了详细的分析和论证.

2 运动声源柱面聚焦定位方法

2.1 运动声源矢量阵近场柱面聚焦测量模型

建立水平矢量阵测试系统如图1所示, 各声源

分布于柱面 S 上, 并随该声源面一起以相同的速度运动. 根据运动的相对性, 可假设该声源面静止, 水平阵距离声源面一定距离, 以相同速度向相反方向, 由远及近接近声源并由近及远通过声源做匀速直线运动. 柱面半径为 r_0 , 声源面上共分布有 Q 个相干声源, 第 i 号点声源的空间位置为 $s_i(y_i, \theta_i)$; 水平阵由 M_z 个水听器组成, 阵元间距 Δz , 令中心阵元位于坐标系原点 O , 柱面中轴线与基阵之间的距离为 $\overline{OO'} = x_s$, 水平阵在整个测量过程中保持静止.

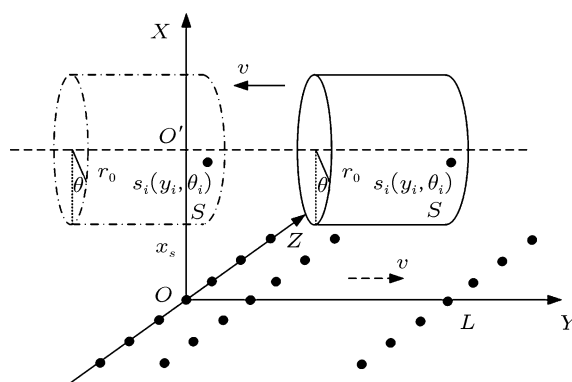


图1 基于被动合成孔径原理的运动声源定位识别过程示意图

参考文献 [5] 中的矢量阵接收信号模型,

* 国防基础研究基金 (批准号: B0820060400), 国家科学技术研究重点项目 (批准号: 51310080202) 和中央高校基础科研业务费专项基金 (批准号: HEUCFR1119) 资助的课题.

[†] E-mail: shijie080428@yahoo.com.cn

整个运动测量过程如图 1 所示, 声源以速度 v 从 $y = L/2$ 处匀速运动到位置 $y = -L/2$ 处, 运动距离为 L ; 相对的, 可认为声源不动, 矢量阵以相同的速度 v 由 $y = 0$ 处反向运动到 $y = L$ 处, 即在空间上形成了一个快拍数为 1 的连续面阵, 虚拟阵

列孔径在运动方向扩展为 L .

对于观测时刻 t , 若声波是从声源面 S 上由第 i 号声源 $s_i(y_i, \theta_i)$ 发出的, 参考莫尔斯运动声源理论及点声源假设条件, 则基阵中第 m 个水听器测量到的第 i 号声源的声压信号 $p_i^{(m)}(t)$ 可表示为

$$\begin{aligned} p_i^{(m)}(t) &= \frac{1}{4\pi} \frac{q'_i \left[t - R_i^{(m)}(t)/c \right]}{R_i^{(m)}(t) \left(1 - M \cos \theta_i^{(m)}(t) \right)^2} \\ &= \frac{1}{4\pi} \frac{J\omega_0 q_i e^{j \left[\omega_0 t - k_0 R_i^{(m)}(t) \right]}}{R_i^{(m)}(t) \left[1 - M \cos \theta_i^{(m)}(t) \right]^2}, \end{aligned} \quad (1)$$

其中, k_0 为波数, q_i 为第 i 号声源辐射强度. 式中的 $R_i^{(m)}(t)$ 以及 $\cos \theta_i^{(m)}(t)$ 可以表示为

$$R_i^{(m)}(t) = \frac{M \left[y(t) - y_i \right] + \sqrt{\left[y(t) - y_i \right]^2 + (1 - M^2) \left[(x_s - r_0 \cos \theta_i)^2 + (z_m - r_0 \sin \theta_i)^2 \right]}}{1 - M^2}, \quad (2)$$

$$\cos \theta_i^{(m)}(t) = \left[y(t) - y_i \right] / R_i^{(m)}(t), \quad (3)$$

式中, $(x_i, y_i, z_i) = (x_s - r_0 \cos \theta_i, y_i, r_0 \sin \theta_i)$ 为声源位置坐标, $(0, y(t), z_m)$ 为第 m 号阵元在 t 时刻的位置坐标, $y(t) = vt$, $z_m = \left(-\frac{M_z - 1}{2} + m - 1 \right) \cdot \Delta z$.

进一步得到振速信号为

$$\begin{aligned} v_{x_i}^{(m)}(t) &= p_i^{(m)}(t) \cos \theta_{m,i}(t) \cos \phi_{m,i}(t) e^{-j\varphi(R_{m,i}(t))}, \\ v_{y_i}^{(m)}(t) &= p_i^{(m)}(t) \cos \theta_{m,i}(t) \sin \phi_{m,i}(t) e^{-j\varphi(R_{m,i}(t))}, \\ v_{z_i}^{(m)}(t) &= p_i^{(m)}(t) \sin \theta_{m,i}(t) e^{-j\varphi(R_{m,i}(t))}, \end{aligned} \quad (4)$$

其中, $\theta_{m,i}(t)$, $\varphi_{m,i}(t)$ 和 $R_{m,i}(t)$ 分别为对应于时刻 t 的瞬时俯仰角、瞬时方位角和瞬时距离, $e^{-j\varphi(R_{m,i}(t))}$ 为瞬时复阻抗值. 根据空间几何关系得到

$$\begin{aligned} \theta_{m,i}(t) &= \text{tg}^{-1} \left(\frac{r_0 \sin \theta_i - z_m}{\sqrt{(x_s - r_0 \cos \theta_i)^2 + (y(t) - y_i)^2}} \right), \\ \phi_{m,i}(t) &= \text{tg}^{-1} \left(\frac{y(t) - y_i}{x_s - r_0 \cos \theta_i} \right), \\ R_{m,i}(t) &= \sqrt{(x_s - r_0 \cos \theta_i)^2 + (y(t) - y_i)^2 + (r_0 \sin \theta_i - z_m)^2}. \end{aligned} \quad (5)$$

令 $n_p^{(m)}(t)$, $n_{v_x}^{(m)}(t)$, $n_{v_y}^{(m)}(t)$ 以及 $n_{v_z}^{(m)}(t)$ 分别为声压及振速通道的噪声. 第 m 个阵元接收到的 Q 个声源的总声压及振速可表示为

$$\begin{aligned} p^{(m)}(t) &= \sum_{i=1}^Q p_i^{(m)}(t) + n_p^{(m)}(t), \\ v_x^{(m)}(t) &= \sum_{i=1}^Q v_{x_i}^{(m)}(t) + n_{v_x}^{(m)}(t), \\ v_y^{(m)}(t) &= \sum_{i=1}^Q v_{y_i}^{(m)}(t) + n_{v_y}^{(m)}(t), \end{aligned}$$

$$v_z^{(m)}(t) = \sum_{i=1}^Q v_{z_i}^{(m)}(t) + n_{v_z}^{(m)}(t). \quad (6)$$

2.2 虚拟阵列数据矩阵的获取

由相对运动可在空间上形成了一个快拍数为 1 的连续面阵, 虚拟阵列孔径在运动方向扩展为 L . 对该连续面阵进行空间采样, 设共将数据分为 M_y 段, 每段数据长度为 L_s , 则虚拟面阵的 y 向的阵元个数即为 M_y , 理想条件下声源做水平匀速直线运

动时, y 向阵元间距即为 $\Delta y = L/(M_y - 1)$. 虚拟面阵在 z 向保持原有垂直阵参数, z 向阵元个数仍为 M_z , 阵元间距为 Δz .

设 \mathbf{y}_a 和 \mathbf{z}_a 分别为水平阵 $M_y \times 1$ 维 y 向和 $M_z \times 1$ 维 z 向坐标向量, \mathbf{Y}_a 和 \mathbf{Z}_a 分别为 $(M_y \cdot M_z) \times 1$ 维的虚拟阵列 y 向和 z 向坐标向量. \mathbf{Y}_a 和 \mathbf{Z}_a 的第 1 至 M_z 行即为实际垂直阵的 y 向和 z 向坐标. 对于匀速直线运动情况, 第 $(n-1)M_z + 1$ 至 nM_z 行即为第 n 个虚拟垂直阵的坐标, 表示为

$$\begin{aligned}
 & \mathbf{X}_a|_{1:M_z} = \mathbf{0}_{M_z}, \\
 & \quad \vdots \\
 & \mathbf{X}_a|_{(n-1)M_z+1:nM_z} = \mathbf{0}_{M_z}, \\
 & \quad \vdots \\
 & \mathbf{X}_a|_{(M_y-1)M_z+1:M_y M_z} = \mathbf{0}_{M_z}; \\
 & \mathbf{Y}_a|_{1:M_z} = \mathbf{y}_a, \\
 & \quad \vdots \\
 & \mathbf{Y}_a|_{(n-1)M_z+1:nM_z} = \mathbf{y}_a - (n-1) \cdot \Delta y, \\
 & \quad \vdots \\
 & \mathbf{Y}_a|_{(M_y-1)M_z+1:M_y M_z} = \mathbf{y}_a - (M_y - 1) \cdot \Delta y; \\
 & \mathbf{Z}_a|_{1:M_z} = \mathbf{z}_a, \\
 & \quad \vdots \\
 & \mathbf{Z}_a|_{(n-1)M_z+1:nM_z} = \mathbf{z}_a, \\
 & \quad \vdots \\
 & \mathbf{Z}_a|_{(M_y-1)M_z+1:M_y M_z} = \mathbf{z}_a.
 \end{aligned} \tag{7}$$

令 \mathbf{P}' , $\mathbf{V}'^{(x)}$, $\mathbf{V}'^{(y)}$ 和 $\mathbf{V}'^{(z)}$ 分别为 $(M_y M_z) \times$

L_s 维虚拟矢量阵声压及振速数据矩阵,

$$\mathbf{V}' = \begin{bmatrix} \mathbf{P}' \\ \mathbf{V}'^{(x)} \\ \mathbf{V}'^{(y)} \\ \mathbf{V}'^{(z)} \end{bmatrix}$$

为 $(4M_y M_z) \times L_s$ 维虚拟矢量阵数据矩阵. $\hat{\mathbf{R}}_v = \frac{1}{L_s} \mathbf{V}'(\mathbf{V}')^H$ 即为 $(4M_y M_z) \times (4M_y M_z)$ 维虚拟阵列采样数据协方差矩阵.

2.3 单频信号虚拟阵列柱面聚焦算法

仍在声源所在柱面 S 上进行聚焦扫描, 设某一扫描点坐标 $(\hat{y}, \hat{\theta})$, 则转化至直角坐标系下的坐标为 $(x_s - \cos \hat{\theta}, \hat{y}, \sin \hat{\theta})$,

$$\begin{aligned}
 \hat{\mathbf{r}} &= [\hat{r}^{(1)}; \hat{r}^{(2)}; \dots; \hat{r}^{(n)}; \dots; \hat{r}^{(M_y)}], \\
 \hat{\boldsymbol{\theta}} &= [\hat{\theta}^{(1)}; \hat{\theta}^{(2)}; \dots; \hat{\theta}^{(n)}; \dots; \hat{\theta}^{(M_y)}], \\
 \hat{\boldsymbol{\varphi}} &= [\hat{\varphi}^{(1)}; \hat{\varphi}^{(2)}; \dots; \hat{\varphi}^{(n)}; \dots; \hat{\varphi}^{(M_y)}]
 \end{aligned}$$

分别为该扫描点至接收基阵的 $(M_y M_z) \times 1$ 维聚焦距离、方位角和俯仰角矢量,

$$\begin{aligned}
 \hat{\mathbf{r}}^{(n)} &= [\hat{r}^{(1,n)}, \hat{r}^{(2,n)}, \dots, \hat{r}^{(m,n)}, \dots, \hat{r}^{(M_z,n)}]^T, \\
 \hat{\boldsymbol{\theta}}^{(n)} &= [\hat{\theta}^{(1,n)}, \hat{\theta}^{(2,n)}, \dots, \hat{\theta}^{(m,n)}, \dots, \hat{\theta}^{(M_z,n)}]^T, \\
 \hat{\boldsymbol{\varphi}}^{(n)} &= [\hat{\varphi}^{(1,n)}, \hat{\varphi}^{(2,n)}, \dots, \hat{\varphi}^{(m,n)}, \dots, \hat{\varphi}^{(M_z,n)}]^T
 \end{aligned}$$

分别为扫描点至第 n 个虚拟垂直阵的 $M_z \times 1$ 维聚焦距离、方位角和俯仰角矢量. 其中, $\hat{r}^{(m,n)}$, $\hat{\theta}^{(m,n)}$ 和 $\hat{\varphi}^{(m,n)}$ 分别为扫描点至第 (m, n) 号虚拟阵元 $(X_a|_{(m,n)}, Y_a|_{(m,n)}, Z_a|_{(m,n)})$ 的距离、方位角和俯仰角, 可表示为

$$\hat{r}^{(m,n)} = \sqrt{(x_s - \cos \hat{\theta} - X_a|_{(m,n)})^2 + (\hat{y} - Y_a|_{(m,n)})^2 + (\sin \hat{\theta} - Z_a|_{(m,n)})^2}, \tag{8}$$

$$\hat{\theta}^{(m,n)} = \text{tg}^{-1} \left(\frac{\sin \hat{\theta} - Z_a|_{(m,n)}}{\sqrt{(x_s - \cos \hat{\theta} - X_a|_{(m,n)})^2 + (\hat{y} - Y_a|_{(m,n)})^2}} \right), \tag{9}$$

$$\hat{\varphi}^{(m,n)} = \text{tg}^{-1} \left(\frac{\hat{y} - Y_a|_{(m,n)}}{x_s - \cos \hat{\theta} - X_a|_{(m,n)}} \right). \tag{10}$$

扫描点与频率无关的聚焦单位矢量 $\hat{\mathbf{a}}^{(x)}(\hat{\boldsymbol{\theta}}, \hat{\boldsymbol{\varphi}})$, $\hat{\mathbf{a}}^{(y)}(\hat{\boldsymbol{\theta}}, \hat{\boldsymbol{\varphi}})$ 和 $\hat{\mathbf{a}}^{(z)}(\hat{\boldsymbol{\theta}}, \hat{\boldsymbol{\varphi}})$ 可表示为

$$\hat{\mathbf{a}}^{(x)}(\hat{\boldsymbol{\theta}}, \hat{\boldsymbol{\varphi}}) = \cos \hat{\theta} \odot \cos \hat{\varphi}, \tag{11}$$

$$\hat{\mathbf{a}}^{(y)}(\hat{\boldsymbol{\theta}}, \hat{\boldsymbol{\varphi}}) = \cos \hat{\theta} \odot \sin \hat{\varphi}, \tag{12}$$

$$\hat{\mathbf{a}}^{(z)}(\hat{\boldsymbol{\theta}}, \hat{\boldsymbol{\varphi}}) = \sin \hat{\theta}. \tag{13}$$

则该扫描点处的 $(M_y \cdot M_z) \times 1$ 维虚拟声压及振速聚焦导向矢量 $\hat{\mathbf{A}}^{(p)}(\hat{\mathbf{r}})$, $\hat{\mathbf{A}}^{(x)}(\hat{\mathbf{r}}, \hat{\boldsymbol{\theta}}, \hat{\boldsymbol{\varphi}})$, $\hat{\mathbf{A}}^{(y)}(\hat{\mathbf{r}}, \hat{\boldsymbol{\theta}}, \hat{\boldsymbol{\varphi}})$

和 $\hat{\mathbf{A}}^{(z)}(\hat{\mathbf{r}}, \hat{\boldsymbol{\theta}}, \hat{\boldsymbol{\varphi}})$ 分别写为

$$\hat{\mathbf{A}}^{(p)}(\hat{\mathbf{r}}) = \left[\hat{\mathbf{A}}^{(p)}(\hat{\mathbf{r}}^{(1)}); \hat{\mathbf{A}}^{(p)}(\hat{\mathbf{r}}^{(2)}); \dots; \hat{\mathbf{A}}^{(p)}(\hat{\mathbf{r}}^{(n)}); \dots; \hat{\mathbf{A}}^{(p)}(\hat{\mathbf{r}}^{(M_x)}) \right], \quad (14)$$

$$\hat{\mathbf{A}}^{(p)}(\hat{\mathbf{r}}^{(n)}) = \left[e^{-j\frac{2\pi}{\lambda}(\hat{r}^{(1,n)} - \hat{r}^{(1,1)})}, \dots, e^{-j\frac{2\pi}{\lambda}(\hat{r}^{(m,n)} - \hat{r}^{(1,1)})}, \dots, e^{-j\frac{2\pi}{\lambda}(\hat{r}^{(M_z,n)} - \hat{r}^{(1,1)})} \right]^T, \quad (15)$$

$$\hat{\mathbf{D}}^{(v)}(\hat{\mathbf{r}}) = \left[\hat{\mathbf{D}}^{(v)}(\hat{\mathbf{r}}^{(1)}); \hat{\mathbf{D}}^{(v)}(\hat{\mathbf{r}}^{(2)}); \dots; \hat{\mathbf{D}}^{(v)}(\hat{\mathbf{r}}^{(n)}); \dots; \hat{\mathbf{D}}^{(v)}(\hat{\mathbf{r}}^{(M_y)}) \right], \quad (16)$$

$$\hat{\mathbf{D}}^{(v)}(\hat{\mathbf{r}}^{(n)}) = \left[e^{-j\varphi(\hat{r}^{(1,n)})}, \dots, e^{-j\varphi(\hat{r}^{(m,n)})}, \dots, e^{-j\varphi(\hat{r}^{(M_z,n)})} \right]^T, \quad (17)$$

$$\hat{\mathbf{A}}^{(x)}(\hat{\mathbf{r}}, \hat{\boldsymbol{\theta}}, \hat{\boldsymbol{\varphi}}) = \hat{\mathbf{a}}^{(x)}(\hat{\boldsymbol{\theta}}, \hat{\boldsymbol{\varphi}}) \odot \hat{\mathbf{D}}^{(v)}(\hat{\mathbf{r}}) \odot \hat{\mathbf{A}}(\hat{\mathbf{r}}), \quad (18)$$

$$\hat{\mathbf{A}}^{(y)}(\hat{\mathbf{r}}, \hat{\boldsymbol{\theta}}, \hat{\boldsymbol{\varphi}}) = \hat{\mathbf{a}}^{(y)}(\hat{\boldsymbol{\theta}}, \hat{\boldsymbol{\varphi}}) \odot \hat{\mathbf{D}}^{(v)}(\hat{\mathbf{r}}) \odot \hat{\mathbf{A}}(\hat{\mathbf{r}}), \quad (19)$$

$$\hat{\mathbf{A}}^{(z)}(\hat{\mathbf{r}}, \hat{\boldsymbol{\theta}}, \hat{\boldsymbol{\varphi}}) = \hat{\mathbf{a}}^{(z)}(\hat{\boldsymbol{\theta}}, \hat{\boldsymbol{\varphi}}) \odot \hat{\mathbf{D}}^{(v)}(\hat{\mathbf{r}}) \odot \hat{\mathbf{A}}(\hat{\mathbf{r}}), \quad (20)$$

其中, $\hat{\mathbf{D}}^{(v)}(\hat{\mathbf{r}})$ 为 $(M_y M_z) \times 1$ 维虚拟阵列复阻抗矢量. 进而得到 $(4M_y M_z) \times 1$ 维虚拟矢量阵聚焦导向矢量

$$\hat{\mathbf{A}}(\hat{\mathbf{r}}, \hat{\boldsymbol{\theta}}, \hat{\boldsymbol{\varphi}}) = \begin{bmatrix} \hat{\mathbf{A}}^{(p)}(\hat{\mathbf{r}}) \\ \hat{\mathbf{A}}^{(x)}(\hat{\mathbf{r}}, \hat{\boldsymbol{\theta}}, \hat{\boldsymbol{\varphi}}) \\ \hat{\mathbf{A}}^{(y)}(\hat{\mathbf{r}}, \hat{\boldsymbol{\theta}}, \hat{\boldsymbol{\varphi}}) \\ \hat{\mathbf{A}}^{(z)}(\hat{\mathbf{r}}, \hat{\boldsymbol{\theta}}, \hat{\boldsymbol{\varphi}}) \end{bmatrix}. \quad (21)$$

则基于 Bartlett 处理器的柱面聚焦算法 (MCBFB) 空间谱可写为

$$P_{\text{MCBFB}}(\hat{\mathbf{r}}, \hat{\boldsymbol{\theta}}, \hat{\boldsymbol{\varphi}}) = (\hat{\mathbf{A}}(\hat{\mathbf{r}}, \hat{\boldsymbol{\theta}}, \hat{\boldsymbol{\varphi}}))^H \hat{\mathbf{R}}_v(\hat{\mathbf{A}}(\hat{\mathbf{r}}, \hat{\boldsymbol{\theta}}, \hat{\boldsymbol{\varphi}})). \quad (22)$$

2.4 宽带信号虚拟阵列柱面聚焦算法

水下目标的辐射噪声由单频线谱信号与宽带连续谱信号组成, 对于单频线谱信号可直接利用 2.3 节中的聚焦公式进行定位, 而对于宽带连续谱信号, 如果仍利用单一频率进行聚焦则会产生明显的聚焦损失及干扰, 严重影响定位效果.

令 $\mathbf{P}'_{\text{band}}, \mathbf{V}'_{\text{band}}^{(x)}, \mathbf{V}'_{\text{band}}^{(y)}$ 和 $\mathbf{V}'_{\text{band}}^{(z)}$ 分别为利用虚拟阵列数据获取方法得到的 $(M_y M_z) \times T_0$ 维虚拟矢量阵声压及振速数据矩阵. 可知每个虚拟通道接收信号的序列长度为 T_0 , 将其分为 U 段, 每一段序列长度为 ΔT , 对每一段接收信号经 FFT 变换后, 在信号频带范围 $f_l - f_h$ 内可划分 K 个互不重叠的子带, 即频点数为 K , 同时每个频点上有 U 个频域快拍.

则频域分解后在 f_k 上的 $(M_y M_z) \times U$ 维声压及三维振速数据矩阵可写为

$$\mathbf{P}'(f_k | \mathbf{r}), \quad \mathbf{V}'^{(x)}(f_k | \mathbf{r}, \boldsymbol{\theta}, \boldsymbol{\varphi}), \\ \mathbf{V}'^{(y)}(f_k | \mathbf{r}, \boldsymbol{\theta}, \boldsymbol{\varphi}) \text{ 和 } \mathbf{V}'^{(z)}(f_k | \mathbf{r}, \boldsymbol{\theta}, \boldsymbol{\varphi}).$$

最终得到 f_k 上的 $(4M_y M_z) \times U$ 矢量阵数据矩阵

$$\mathbf{X}_v(f_k | \mathbf{r}, \boldsymbol{\theta}, \boldsymbol{\varphi}) = \begin{bmatrix} \mathbf{P}'(f_k | \mathbf{r}) \\ \mathbf{V}'^{(x)}(f_k | \mathbf{r}, \boldsymbol{\theta}, \boldsymbol{\varphi}) \\ \mathbf{V}'^{(y)}(f_k | \mathbf{r}, \boldsymbol{\theta}, \boldsymbol{\varphi}) \\ \mathbf{V}'^{(z)}(f_k | \mathbf{r}, \boldsymbol{\theta}, \boldsymbol{\varphi}) \end{bmatrix}. \quad (23)$$

第 k 个子带的矢量互谱密度矩阵分别为

$$\mathbf{R}^{(v)}(f_k) = \mathbb{E}[\mathbf{X}_v(f_k)(\mathbf{X}_v(f_k))^H] \\ = \mathbf{A}'^{(v)}(f_k | \mathbf{r}, \boldsymbol{\theta}, \boldsymbol{\varphi}) \mathbf{R}_S(f_k) (\mathbf{A}'^{(v)}(f_k | \mathbf{r}, \boldsymbol{\theta}, \boldsymbol{\varphi}))^H + \mathbf{R}_N^{(v)}(f_k), \quad (24)$$

$$\mathbf{R}_N^{(v)}(f_k) = \begin{bmatrix} \sigma_p^2(f_k) \mathbf{I}_{M_y M_z} & & & \\ & \sigma_x^2(f_k) \mathbf{I}_{M_y M_z} & & \\ & & \sigma_y^2(f_k) \mathbf{I}_{M_y M_z} & \\ & & & \sigma_z^2(f_k) \mathbf{I}_{M_y M_z} \end{bmatrix}. \quad (25)$$

仍在声源所在柱面 S 上进行聚焦扫描, 仍设某一扫描点坐标 $(\hat{y}, \hat{\theta})$, 并转化至直角坐标系下的坐标为 $(x_s - \cos \hat{\theta}, \hat{y}, \sin \hat{\theta})$, 则该扫描点至接收基阵的 $(M_y M_z) \times 1$ 维聚焦距离、方位角和俯仰角矢量以及与频

率无关的聚焦单位矢量由 (8)—(13) 式得到.

在 f_k 上, 可分别得到该扫描点对应的声压和振速聚焦方向矢量, 表示为

$$\hat{\mathbf{A}}^{(p)}(f_k|\hat{\mathbf{r}}) = [\hat{\mathbf{A}}^{(p)}(f_k|\hat{\mathbf{r}}^{(1)}); \hat{\mathbf{A}}^{(p)}(f_k|\hat{\mathbf{r}}^{(2)}); \dots; \hat{\mathbf{A}}^{(p)}(f_k|\hat{\mathbf{r}}^{(n)}); \dots; \hat{\mathbf{A}}^{(p)}(f_k|\hat{\mathbf{r}}^{(M_x)})], \quad (26)$$

$$\hat{\mathbf{A}}^{(p)}(f_k|\hat{\mathbf{r}}^{(n)}) = \left[e^{-j\frac{2\pi f_k}{c}(\hat{r}^{(1,n)} - \hat{r}^{(1,1)})}, \dots, e^{-j\frac{2\pi f_k}{c}(\hat{r}^{(m,n)} - \hat{r}^{(1,1)})}, \dots, e^{-j\frac{2\pi f_k}{c}(\hat{r}^{(M_z,n)} - \hat{r}^{(1,1)})} \right]^T, \quad (27)$$

$$\hat{\mathbf{D}}^{(v)}(f_k|\hat{\mathbf{r}}) = [\hat{\mathbf{D}}^{(v)}(f_k|\hat{\mathbf{r}}^{(1)}); \hat{\mathbf{D}}^{(v)}(f_k|\hat{\mathbf{r}}^{(2)}); \dots; \hat{\mathbf{D}}^{(v)}(f_k|\hat{\mathbf{r}}^{(n)}); \dots; \hat{\mathbf{D}}^{(v)}(f_k|\hat{\mathbf{r}}^{(M_y)})], \quad (28)$$

$$\hat{\mathbf{D}}^{(v)}(f_k|\hat{\mathbf{r}}^{(n)}) = \left[e^{-j\varphi(f_k|\hat{r}^{(1,n)})}, \dots, e^{-j\varphi(f_k|\hat{r}^{(m,n)})}, \dots, e^{-j\varphi(f_k|\hat{r}^{(M_z,n)})} \right]^T, \quad (29)$$

$$\hat{\mathbf{A}}^{(x)}(f_k|\hat{\mathbf{r}}, \hat{\boldsymbol{\theta}}, \hat{\boldsymbol{\varphi}}) = \hat{a}^{(x)}(\hat{\boldsymbol{\theta}}, \hat{\boldsymbol{\varphi}}) \odot \hat{\mathbf{D}}^{(v)}(f_k|\hat{\mathbf{r}}) \odot \hat{\mathbf{A}}^{(p)}(f_k|\hat{\mathbf{r}}), \quad (30)$$

$$\hat{\mathbf{A}}^{(y)}(f_k|\hat{\mathbf{r}}, \hat{\boldsymbol{\theta}}, \hat{\boldsymbol{\varphi}}) = \hat{a}^{(y)}(\hat{\boldsymbol{\theta}}, \hat{\boldsymbol{\varphi}}) \odot \hat{\mathbf{D}}^{(v)}(f_k|\hat{\mathbf{r}}) \odot \hat{\mathbf{A}}^{(p)}(f_k|\hat{\mathbf{r}}), \quad (31)$$

$$\hat{\mathbf{A}}^{(z)}(f_k|\hat{\mathbf{r}}, \hat{\boldsymbol{\theta}}, \hat{\boldsymbol{\varphi}}) = \hat{a}^{(z)}(\hat{\boldsymbol{\theta}}, \hat{\boldsymbol{\varphi}}) \odot \hat{\mathbf{D}}^{(v)}(f_k|\hat{\mathbf{r}}) \odot \hat{\mathbf{A}}^{(p)}(f_k|\hat{\mathbf{r}}). \quad (32)$$

则该扫描点对应的 $(4M_y M_z) \times 1$ 维矢量阵聚焦方向矢量为

$$\hat{\mathbf{A}}^{(v)}(f_k|\hat{\mathbf{r}}, \hat{\boldsymbol{\theta}}, \hat{\boldsymbol{\varphi}}) = \begin{bmatrix} \hat{\mathbf{A}}^{(p)}(f_k|\hat{\mathbf{r}}) \\ \hat{\mathbf{A}}^{(x)}(f_k|\hat{\mathbf{r}}, \hat{\boldsymbol{\theta}}, \hat{\boldsymbol{\varphi}}) \\ \hat{\mathbf{A}}^{(y)}(f_k|\hat{\mathbf{r}}, \hat{\boldsymbol{\theta}}, \hat{\boldsymbol{\varphi}}) \\ \hat{\mathbf{A}}^{(z)}(f_k|\hat{\mathbf{r}}, \hat{\boldsymbol{\theta}}, \hat{\boldsymbol{\varphi}}) \end{bmatrix}. \quad (33)$$

下面利用 CSS 相干宽带算法思想 [6-9], 将频带内不重叠的频点上的信号空间聚焦到参考频率点, 聚焦后得到单一频率点的数据协方差矩阵, 再应用窄带信号处理的方法进行所需参数的估计, 推广得到可应用于运动声源柱面聚焦定位的 CSS-MCBFB 方法.

选取 f_0 为聚焦参考频率点, 则在扫描位置 $(\hat{y}, \hat{\theta})$ 的处的声压聚焦方向矢量 $\hat{\mathbf{A}}_{\text{CSS}}^{(p)}(f_0|\hat{\mathbf{r}})$ 和三个方向的振速聚焦方向矢量 $\hat{\mathbf{A}}_{\text{CSS}}^{(x)}(f_0|\hat{\mathbf{r}}, \hat{\boldsymbol{\theta}}, \hat{\boldsymbol{\varphi}})$, $\hat{\mathbf{A}}_{\text{CSS}}^{(y)}(f_0|\hat{\mathbf{r}}, \hat{\boldsymbol{\theta}}, \hat{\boldsymbol{\varphi}})$ 和 $\hat{\mathbf{A}}_{\text{CSS}}^{(z)}(f_0|\hat{\mathbf{r}}, \hat{\boldsymbol{\theta}}, \hat{\boldsymbol{\varphi}})$ 可表示为

$$\hat{\mathbf{A}}_{\text{CSS}}^{(p)}(f_0|\hat{\mathbf{r}}) = [\hat{\mathbf{A}}_{\text{CSS}}^{(p)}(f_0|\hat{\mathbf{r}}^{(1)}); \hat{\mathbf{A}}_{\text{CSS}}^{(p)}(f_0|\hat{\mathbf{r}}^{(2)}); \dots; \hat{\mathbf{A}}_{\text{CSS}}^{(p)}(f_0|\hat{\mathbf{r}}^{(n)}); \dots; \hat{\mathbf{A}}_{\text{CSS}}^{(p)}(f_0|\hat{\mathbf{r}}^{(M_y)})], \quad (34)$$

$$\hat{\mathbf{A}}_{\text{CSS}}^{(p)}(f_0|\hat{\mathbf{r}}^{(n)}) = \left[e^{-j\frac{2\pi f_0}{c}(\hat{r}^{(1,n)} - \hat{r}^{(1,1)})}, \dots, e^{-j\frac{2\pi f_0}{c}(\hat{r}^{(m,n)} - \hat{r}^{(1,1)})}, \dots, e^{-j\frac{2\pi f_0}{c}(\hat{r}^{(M_z,n)} - \hat{r}^{(1,1)})} \right]^T, \quad (35)$$

$$\hat{\mathbf{D}}^{(v)}(f_0|\hat{\mathbf{r}}) = [\hat{\mathbf{D}}^{(v)}(f_0|\hat{\mathbf{r}}^{(1)}); \hat{\mathbf{D}}^{(v)}(f_0|\hat{\mathbf{r}}^{(2)}); \dots; \hat{\mathbf{D}}^{(v)}(f_0|\hat{\mathbf{r}}^{(n)}); \dots; \hat{\mathbf{D}}^{(v)}(f_0|\hat{\mathbf{r}}^{(M_y)})], \quad (36)$$

$$\hat{\mathbf{D}}^{(v)}(f_0|\hat{\mathbf{r}}^{(n)}) = \left[e^{-j\varphi(f_0|\hat{r}^{(1,n)})}, \dots, e^{-j\varphi(f_0|\hat{r}^{(m,n)})}, \dots, e^{-j\varphi(f_0|\hat{r}^{(M_z,n)})} \right]^T, \quad (37)$$

$$\hat{\mathbf{A}}_{\text{CSS}}^{(x)}(f_0|\hat{\mathbf{r}}, \hat{\boldsymbol{\theta}}, \hat{\boldsymbol{\varphi}}) = \hat{a}^{(x)}(\hat{\boldsymbol{\theta}}, \hat{\boldsymbol{\varphi}}) \odot \hat{\mathbf{D}}^{(v)}(f_0|\hat{\mathbf{r}}) \odot \hat{\mathbf{A}}_{\text{CSS}}^{(p)}(f_0|\hat{\mathbf{r}}), \quad (38)$$

$$\hat{\mathbf{A}}_{\text{CSS}}^{(y)}(f_0|\hat{\mathbf{r}}, \hat{\boldsymbol{\theta}}, \hat{\boldsymbol{\varphi}}) = \hat{a}^{(y)}(\hat{\boldsymbol{\theta}}, \hat{\boldsymbol{\varphi}}) \odot \hat{\mathbf{D}}^{(v)}(f_0|\hat{\mathbf{r}}) \odot \hat{\mathbf{A}}_{\text{CSS}}^{(p)}(f_0|\hat{\mathbf{r}}), \quad (39)$$

$$\hat{\mathbf{A}}_{\text{CSS}}^{(z)}(f_0|\hat{\mathbf{r}}, \hat{\boldsymbol{\theta}}, \hat{\boldsymbol{\varphi}}) = \hat{a}^{(z)}(\hat{\boldsymbol{\theta}}, \hat{\boldsymbol{\varphi}}) \odot \hat{\mathbf{D}}^{(v)}(f_0|\hat{\mathbf{r}}) \odot \hat{\mathbf{A}}_{\text{CSS}}^{(p)}(f_0|\hat{\mathbf{r}}). \quad (40)$$

则聚焦参考频率 f_0 上的矢量阵聚焦方向矢量可写为

$$\hat{\mathbf{A}}_{\text{CSS}}^{(v)}(f_0|\hat{\mathbf{r}}, \hat{\boldsymbol{\theta}}, \hat{\boldsymbol{\varphi}}) = \begin{bmatrix} \hat{\mathbf{A}}_{\text{CSS}}^{(p)}(f_0|\hat{\mathbf{r}}) \\ \hat{\mathbf{A}}_{\text{CSS}}^{(x)}(f_0|\hat{\mathbf{r}}, \hat{\boldsymbol{\theta}}, \hat{\boldsymbol{\varphi}}) \\ \hat{\mathbf{A}}_{\text{CSS}}^{(y)}(f_0|\hat{\mathbf{r}}, \hat{\boldsymbol{\theta}}, \hat{\boldsymbol{\varphi}}) \\ \hat{\mathbf{A}}_{\text{CSS}}^{(z)}(f_0|\hat{\mathbf{r}}, \hat{\boldsymbol{\theta}}, \hat{\boldsymbol{\varphi}}) \end{bmatrix}. \quad (41)$$

利用 (33) 式得到 f_k 上的声压及矢量阵聚焦方向矢量. 利用 CSS 聚焦变换方法, 分别得到 f_k 上的声压和振速聚焦变换矩阵为

$$\begin{aligned} & \mathbf{T}^{(p)}(f_k|\hat{\mathbf{r}}) \\ &= \text{diag} \left[\frac{\hat{\mathbf{A}}_{\text{CSS}}^{(p)}(f_0, \hat{\mathbf{r}}^{(1)})}{\hat{\mathbf{A}}^{(p)}(f_k, \hat{\mathbf{r}}^{(1)})} \dots \frac{\hat{\mathbf{A}}_{\text{CSS}}^{(p)}(f_0, \hat{\mathbf{r}}^{(n)})}{\hat{\mathbf{A}}^{(p)}(f_k, \hat{\mathbf{r}}^{(n)})} \dots \frac{\hat{\mathbf{A}}_{\text{CSS}}^{(p)}(f_0, \hat{\mathbf{r}}^{(M_y)})}{\hat{\mathbf{A}}^{(p)}(f_k, \hat{\mathbf{r}}^{(M_y)})} \right], \end{aligned} \quad (42)$$

$$\begin{aligned} & \mathbf{T}^{(x)}(f_k|\hat{\mathbf{r}}, \hat{\boldsymbol{\theta}}, \hat{\boldsymbol{\varphi}}) \\ &= \text{diag} \left[\frac{\hat{\mathbf{A}}'_{\text{CSS}}(f_0|\hat{\mathbf{r}}^{(1)}, \hat{\boldsymbol{\theta}}^{(1)}, \hat{\boldsymbol{\varphi}}^{(1)})}{\hat{\mathbf{A}}'(x)(f_k|\hat{\mathbf{r}}^{(1)}, \hat{\boldsymbol{\theta}}^{(1)}, \hat{\boldsymbol{\varphi}}^{(1)})} \dots \frac{\hat{\mathbf{A}}'_{\text{CSS}}(f_0|\hat{\mathbf{r}}^{(n)}, \hat{\boldsymbol{\theta}}^{(n)}, \hat{\boldsymbol{\varphi}}^{(n)})}{\hat{\mathbf{A}}'(x)(f_k|\hat{\mathbf{r}}^{(n)}, \hat{\boldsymbol{\theta}}^{(n)}, \hat{\boldsymbol{\varphi}}^{(n)})} \dots \frac{\hat{\mathbf{A}}'_{\text{CSS}}(f_0|\hat{\mathbf{r}}^{(M_y)}, \hat{\boldsymbol{\theta}}^{(M_y)}, \hat{\boldsymbol{\varphi}}^{(M_y)})}{\hat{\mathbf{A}}'(x)(f_k|\hat{\mathbf{r}}^{(M_y)}, \hat{\boldsymbol{\theta}}^{(M_y)}, \hat{\boldsymbol{\varphi}}^{(M_y)})} \right], \quad (43) \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} & \mathbf{T}^{(y)}(f_k|\hat{\mathbf{r}}, \hat{\boldsymbol{\theta}}, \hat{\boldsymbol{\varphi}}) \\ &= \text{diag} \left[\frac{\hat{\mathbf{A}}'_{\text{CSS}}(f_0|\hat{\mathbf{r}}^{(1)}, \hat{\boldsymbol{\theta}}^{(1)}, \hat{\boldsymbol{\varphi}}^{(1)})}{\hat{\mathbf{A}}'(y)(f_k|\hat{\mathbf{r}}^{(1)}, \hat{\boldsymbol{\theta}}^{(1)}, \hat{\boldsymbol{\varphi}}^{(1)})} \dots \frac{\hat{\mathbf{A}}'_{\text{CSS}}(f_0|\hat{\mathbf{r}}^{(n)}, \hat{\boldsymbol{\theta}}^{(n)}, \hat{\boldsymbol{\varphi}}^{(n)})}{\hat{\mathbf{A}}'(y)(f_k|\hat{\mathbf{r}}^{(n)}, \hat{\boldsymbol{\theta}}^{(n)}, \hat{\boldsymbol{\varphi}}^{(n)})} \dots \frac{\hat{\mathbf{A}}'_{\text{CSS}}(f_0|\hat{\mathbf{r}}^{(M_y)}, \hat{\boldsymbol{\theta}}^{(M_y)}, \hat{\boldsymbol{\varphi}}^{(M_y)})}{\hat{\mathbf{A}}'(y)(f_k|\hat{\mathbf{r}}^{(M_y)}, \hat{\boldsymbol{\theta}}^{(M_y)}, \hat{\boldsymbol{\varphi}}^{(M_y)})} \right], \quad (44) \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} & \mathbf{T}^{(z)}(f_k|\hat{\mathbf{r}}, \hat{\boldsymbol{\theta}}, \hat{\boldsymbol{\varphi}}) \\ &= \text{diag} \left[\frac{\hat{\mathbf{A}}'_{\text{CSS}}(f_0|\hat{\mathbf{r}}^{(1)}, \hat{\boldsymbol{\theta}}^{(1)}, \hat{\boldsymbol{\varphi}}^{(1)})}{\hat{\mathbf{A}}'(z)(f_k|\hat{\mathbf{r}}^{(1)}, \hat{\boldsymbol{\theta}}^{(1)}, \hat{\boldsymbol{\varphi}}^{(1)})} \dots \frac{\hat{\mathbf{A}}'_{\text{CSS}}(f_0|\hat{\mathbf{r}}^{(n)}, \hat{\boldsymbol{\theta}}^{(n)}, \hat{\boldsymbol{\varphi}}^{(n)})}{\hat{\mathbf{A}}'(z)(f_k|\hat{\mathbf{r}}^{(n)}, \hat{\boldsymbol{\theta}}^{(n)}, \hat{\boldsymbol{\varphi}}^{(n)})} \dots \frac{\hat{\mathbf{A}}'_{\text{CSS}}(f_0|\hat{\mathbf{r}}^{(M_y)}, \hat{\boldsymbol{\theta}}^{(M_y)}, \hat{\boldsymbol{\varphi}}^{(M_y)})}{\hat{\mathbf{A}}'(z)(f_k|\hat{\mathbf{r}}^{(M_y)}, \hat{\boldsymbol{\theta}}^{(M_y)}, \hat{\boldsymbol{\varphi}}^{(M_y)})} \right]. \quad (45) \end{aligned}$$

由于 $\hat{a}^{(x)}(\hat{\boldsymbol{\theta}}, \hat{\boldsymbol{\varphi}})$, $\hat{a}^{(y)}(\hat{\boldsymbol{\theta}}, \hat{\boldsymbol{\varphi}})$ 和 $\hat{a}^{(z)}(\hat{\boldsymbol{\theta}}, \hat{\boldsymbol{\varphi}})$ 为扫描点对应的与频率无关的聚焦单位矢量, 则 $\mathbf{T}^{(x)}$, $\mathbf{T}^{(y)}$ 和 $\mathbf{T}^{(z)}$ 与 $(\hat{\boldsymbol{\theta}}, \hat{\boldsymbol{\varphi}})$ 无关, 在频率 f_k 上的矢量阵聚焦变换矩阵可写为如下分块矩阵的形式:

$$\mathbf{T}^{(v)}(f_k|\hat{\mathbf{r}}) = \begin{bmatrix} \mathbf{T}^{(p)}(f_k|\hat{\mathbf{r}}) & & & \\ & \mathbf{T}^{(x)}(f_k|\hat{\mathbf{r}}) & & \\ & & \mathbf{T}^{(y)}(f_k|\hat{\mathbf{r}}) & \\ & & & \mathbf{T}^{(z)}(f_k|\hat{\mathbf{r}}) \end{bmatrix}. \quad (46)$$

$\mathbf{R}^{(v)}(f_k)$ 分别为第 k 个子带的声压互谱密度矩阵及矢量互谱密度矩阵, 利用以上得到的频率 f_k 上的聚焦变换矩阵, 可得到扫描位置 $\hat{\mathbf{r}}$ 处频率 f_k 上聚焦变换后的协方差矩阵 $\mathbf{R}_{\text{focus}}^{(v)}(f_k|\hat{\mathbf{r}}, \hat{\boldsymbol{\theta}}, \hat{\boldsymbol{\varphi}})$.

$$\begin{aligned} \mathbf{R}_{\text{focus}}^{(v)}(f_k|\hat{\mathbf{r}}, \hat{\boldsymbol{\theta}}, \hat{\boldsymbol{\varphi}}) &= \mathbf{T}^{(v)}(f_k|\hat{\mathbf{r}}, \hat{\boldsymbol{\theta}}, \hat{\boldsymbol{\varphi}}) \mathbf{R}^{(v)}(f_k) \\ &\quad \times (\mathbf{T}^{(v)}(f_k|\hat{\mathbf{r}}, \hat{\boldsymbol{\theta}}, \hat{\boldsymbol{\varphi}}))^{\text{H}}. \quad (47) \end{aligned}$$

上式宽带聚焦的意义可理解为, 对由扫描位置 $\hat{\mathbf{r}}$ 决定的宽带信号中的各个窄带进行相位修正, 并统一至聚焦频点上, 因此基于这种相位修正的聚焦之后的协方差矩阵是可以累加的.

将总共 K 个频带的 $\mathbf{R}_{\text{focus}}^{(v)}(f_k|\hat{\mathbf{r}}, \hat{\boldsymbol{\theta}}, \hat{\boldsymbol{\varphi}})$ 进行累加后得到宽带聚焦协方差矩阵 $\mathbf{R}_{\text{focus}}^{(v)}(\hat{\mathbf{r}}, \hat{\boldsymbol{\theta}}, \hat{\boldsymbol{\varphi}})$, 可得

$$\mathbf{R}_{\text{focus}}^{(v)}(\hat{\mathbf{r}}, \hat{\boldsymbol{\theta}}, \hat{\boldsymbol{\varphi}}) = \frac{1}{K} \sum_{k=1}^h \mathbf{R}_{\text{focus}}^{(v)}(f_k|\hat{\mathbf{r}}, \hat{\boldsymbol{\theta}}, \hat{\boldsymbol{\varphi}}). \quad (48)$$

在扫描点 $(\hat{y}, \hat{\theta})$ 处, 可得到 CSS-MCBFB 空间谱

$$\begin{aligned} & P_{\text{CSS-MCBFB}}^{(v)}(\hat{\mathbf{r}}, \hat{\boldsymbol{\theta}}, \hat{\boldsymbol{\varphi}}) \\ &= (\hat{\mathbf{A}}'_{\text{CSS}}(f_0|\hat{\mathbf{r}}, \hat{\boldsymbol{\theta}}, \hat{\boldsymbol{\varphi}}))^{\text{H}} \mathbf{R}_{\text{focus}}^{(v)}(\hat{\mathbf{r}}, \hat{\boldsymbol{\theta}}, \hat{\boldsymbol{\varphi}}) \\ &\quad \times (\hat{\mathbf{A}}'_{\text{CSS}}(f_0|\hat{\mathbf{r}}, \hat{\boldsymbol{\theta}}, \hat{\boldsymbol{\varphi}})). \quad (49) \end{aligned}$$

3 柱面聚焦定位精度分析

考虑 $M_z = 9$ 的均匀垂直矢量阵, 阵元间距 $\Delta z = 0.75$ m, 基阵尺度 $D = 6$ m, 中心阵元所在位置设为坐标原点. 单声源频率为 $f = 250$ Hz, 采样率 $f_s = 32.768$ kHz, 设水中声速 1500 m/s. 以下通过数值仿真对本文研究算法的定位精度进行分析.

仿真 1 讨论匀速直线运动条件下, 信噪比对定位精度的影响.

仿真中预设虚拟阵元间距为 $\Delta y = 1.5$ m, 运动速度为 0.35 m/s, 处理数据总长约为 38.6 s 时, 虚拟孔径尺度可达到 12m. 仿真中对分段数据前 0.016 s(约 512 个快拍) 进行处理. 模型圆柱直径为 6 m, 基阵距离柱面中心的距离为 $x_s = 8$ m, 预设声源坐标 $(y, \theta) = (-5.5 \text{ m}, 30^\circ)$. 信噪比由 0 dB 至 20 dB 变化, 共进行 100 次 Monte-Carlo 试验, 讨论不同信噪比下的定位精度(表 1).

仿真 2 讨论运动速度对定位精度的影响.

信噪比为 15 dB, 其余信号处理参数不变. 共进行 100 次 Monte-Carlo 试验, 分析不同运动速度条件下的定位精度(表 2).

仿真 3 讨论非匀速运动对定位精度的影响.

信噪比为 15 dB, 运动速度为 0.35 m/s, 其余信

号处理参数不变. 共进行 100 次 Monte-Carlo 试验, 分析存在 1%, 5% 和 10% 运动速度误差下的定位精度 (表 3).

仿真 4 讨论存在运动倾角对定位精度的影响.

信噪比为 15 dB, 运动速度为 0.35 m/s, 其余信号处理参数不变. 共进行 100 次 Monte-Carlo 试验,

分析存在运动倾角对定位精度的影响 (表 4).

仿真 5 讨论幅度不一致性对定位精度的影响.

信噪比为 15 dB, 运动速度为 0.35 m/s, 其余信号处理参数不变. 共进行 100 次 Monte-Carlo 试验, 分析存在运动倾角对定位精度的表 5 影响.

表 1 信噪比对定位精度的影响分析

信噪比 /dB		偏差	方差	均方根误差
0	y/m	0.0136	1.7328×10^{-4}	0.0189
	$\theta/(\circ)$	0.5017	0.2559	0.7125
5	y/m	0.0050	1.8113×10^{-5}	0.0065
	$\theta/(\circ)$	0.1540	0.0240	0.2185
10	y/m	0.0033	1.4674×10^{-6}	0.0035
	$\theta/(\circ)$	0.0470	0.0023	0.0669
15	y/m	0.0032	1.3796×10^{-7}	0.0032
	$\theta/(\circ)$	0.0116	1.3608×10^{-4}	0.0164
20	y/m	0.0031	1.5679×10^{-8}	0.0031
	$\theta/(\circ)$	0.0047	1.7959×10^{-8}	0.0063

表 2 运动速度对定位精度的影响分析

运动速度 $V/(m/s)$		偏差	方差	均方根误差
0.35	y/m	0.0032	1.3796×10^{-7}	0.0032
	$\theta/(\circ)$	0.0116	1.3608×10^{-4}	0.0164
0.5	y/m	0.0045	1.5440×10^{-7}	0.0045
	$\theta/(\circ)$	0.0118	1.2114×10^{-4}	0.0162
1	y/m	0.0090	1.7236×10^{-7}	0.0090
	$\theta/(\circ)$	0.0117	1.2927×10^{-4}	0.0163
1.5	y/m	0.0135	1.9347×10^{-7}	0.0135
	$\theta/(\circ)$	0.0163	1.8333×10^{-4}	0.0212
2	y/m	0.0181	2.7235×10^{-7}	0.0181
	$\theta/(\circ)$	0.0154	1.6446×10^{-4}	0.0200
3	y/m	0.0270	1.2204×10^{-7}	0.0270
	$\theta/(\circ)$	0.0223	1.6095×10^{-4}	0.0257

表3 非匀速运动对定位精度的影响分析

运动速度误差 /%		偏差	方差	均方根误差
1	y/m	0.0138	1.7551×10^{-4}	0.0191
	$\theta/(\circ)$	0.1773	0.0321	0.2521
5	y/m	0.0678	0.0047	0.0962
	$\theta/(\circ)$	0.7316	0.5458	1.0397
10	y/m	0.1208	0.0148	0.1714
	$\theta/(\circ)$	2.2218	4.9084	3.1376

表4 存在运动倾角对定位精度的影响分析

倾角 /(\circ)		偏差	方差	均方根误差
0.5	y/m	0.025	2.0245×10^{-7}	0.025
	$\theta/(\circ)$	0.4429	2.4004×10^{-4}	0.4431
1	y/m	0.0476	2.8122×10^{-7}	0.0476
	$\theta/(\circ)$	0.8787	2.6535×10^{-4}	0.8789
2	y/m	0.0955	3.3673×10^{-7}	0.0955
	$\theta/(\circ)$	1.7073	2.0016×10^{-4}	1.7073
5	y/m	0.2583	2.6286×10^{-7}	0.2583
	$\theta/(\circ)$	3.8938	1.7506×10^{-4}	3.8938

表5 幅度不一致性对定位精度的影响分析

倾角 /%		偏差	方差	均方根误差
1	y/m	0.0037	6.0245×10^{-7}	0.0038
	$\theta/(\circ)$	0.0416	0.0017	0.0590
2	y/m	0.0035	8.5714×10^{-7}	0.0036
	$\theta/(\circ)$	0.0584	0.0034	0.0825
5	y/m	0.0037	2.3265×10^{-6}	0.0040
	$\theta/(\circ)$	0.1538	0.0241	0.2185
10	y/m	0.0047	8.1649×10^{-6}	0.0055
	$\theta/(\circ)$	0.2775	0.0786	0.3944
20	y/m	0.0065	3.3504×10^{-5}	0.0087
	$\theta/(\circ)$	0.5615	0.3213	0.7979

对以上影响定位精度的因素进行综合分析可知:

1) 以上综合讨论了多种误差因素对周向开角 θ 以及沿母线方向 y 两个尺度上的定位精度. 周向开角 θ 的定位精度由基阵真实尺度决定, 沿母线方向 y 的定位精度由虚拟基阵尺度决定, 该仿真参数下 y 的定位精度优于周向开角 θ 的定位精度, 这主要是由运动引起虚拟尺度扩展所致, 说明采用运动测试模式不仅能提高测试效率, 同时也可以提高沿母线方向 y 的定位精度.

2) 由信噪比对定位精度的影响分析可知, 在 15 dB 信噪比条件下, y 和 θ 的定位精度分别可达 0.0032 m 和 0.0164°, 由于一般测试条件基阵均较为接近声源表面, 因此可满足较高的信噪比条件, 从而可达到较高的定位精度.

3) 由运动速度对定位精度的影响分析可知, 运动速度越高, 定位误差越大, 这主要是由于运动引起的多普勒效应影响, 使聚焦方法产生频率失配所致. 但在低速条件下, 聚焦方法仍可获得较高的定位精度, 但当运动速度对定位精度产生严重影响时, 需采取多普勒补偿手段 [2], 抑制频率失配的影响.

4) 非匀速运动、存在运动倾角以及存在幅度不一致性误差是三类普遍存在的误差形式, 以运动速度 0.35 m/s 为例, 在存在 5% 速度误差 (0.35 ± 0.0175 m/s) 条件下, y 和 θ 的定位误差分别为 0.0962 m 和 1.0397°; 在与基阵存在 2° 运动倾角的条件下, y 和 θ 的定位误差分别为 0.0955 m 和 1.7073°; 存在 5% 幅度不一致性误差的条件下, y 和 θ 的定位误差分别为 0.0040 m 和 0.2185°. 前两种误差对定位精度的影响远大于第三种, 分析前两种误差对定位精度的影响源于聚焦导向矢量失配, 需要采取手段进行补偿和修正, 方法可参见文献 [5].

4 舱段模型水池试验研究

为了验证本文提出算法的可行性, 于水池中开展了舱段模型试验. 完整硬件系统包括激振机及隔振装置、舱段结构振动测量系统以及水下矢量阵声辐射测量系统. 其中, 振动测量系统包括加速度计、电荷放大器、数据采集器等 (置于舱段内部). 声辐射测量系统包括矢量阵、前置放大器、信号传输电缆、信号调理器、滤波放大器、数据采集器和计算机数据存储与分析处理系统 (置于岸上). 振动测量系统与声辐射测量系统同时基工作.

舱段模型由水池岸边的卷扬机牵引在水池中进行往复运动, 并控制舱段模型的做匀速直线运动, 试验中运动速度约为 0.35 m/s. 为了便于对噪声源的定位精度进行分析, 在模型外表面中心底部加装标准声源, 发射 4kHz 频率的单频信号, 将其定位结果作为参考, 即可获得舱段上的噪声源相对于该标准声源的位置.

矢量阵放置于水池中心, 阵元个数为 10 个, 阵元间距为 0.75 m, 基阵孔径为 6.75 m, 基阵中心入水深度约为 9 m. 水平矢量阵和舱段位置关系如图 2 所示.

截取过正横对称两侧共 40 s 的辐射噪声数据进行分析. 每隔 0.5 s 利用聚焦算法对标准声源发出的 4kHz 单频信号进行定位, 得到运动声源定位轨迹如图 3 所示, 由运动轨迹可以估算舱段的运动速度约为 0.35 m/s, 与试验设置相符合.

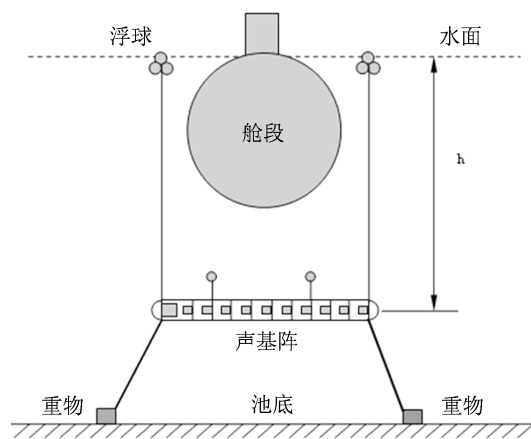


图 2 水平矢量阵和舱段位置关系示意图

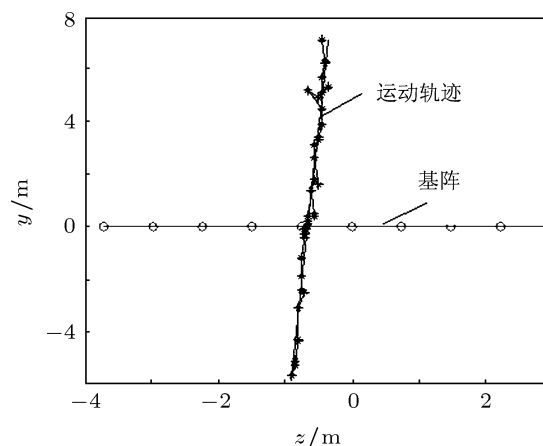
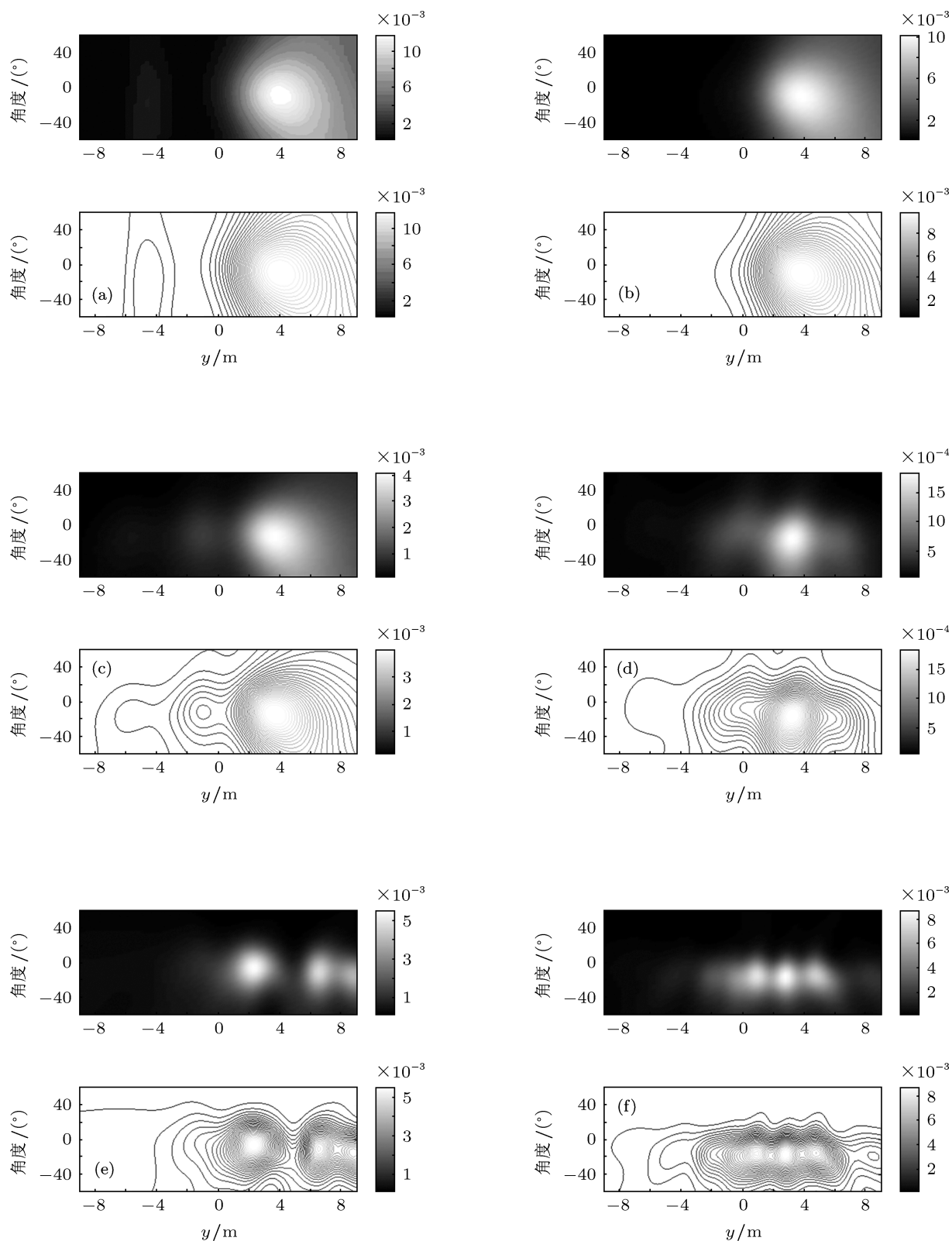
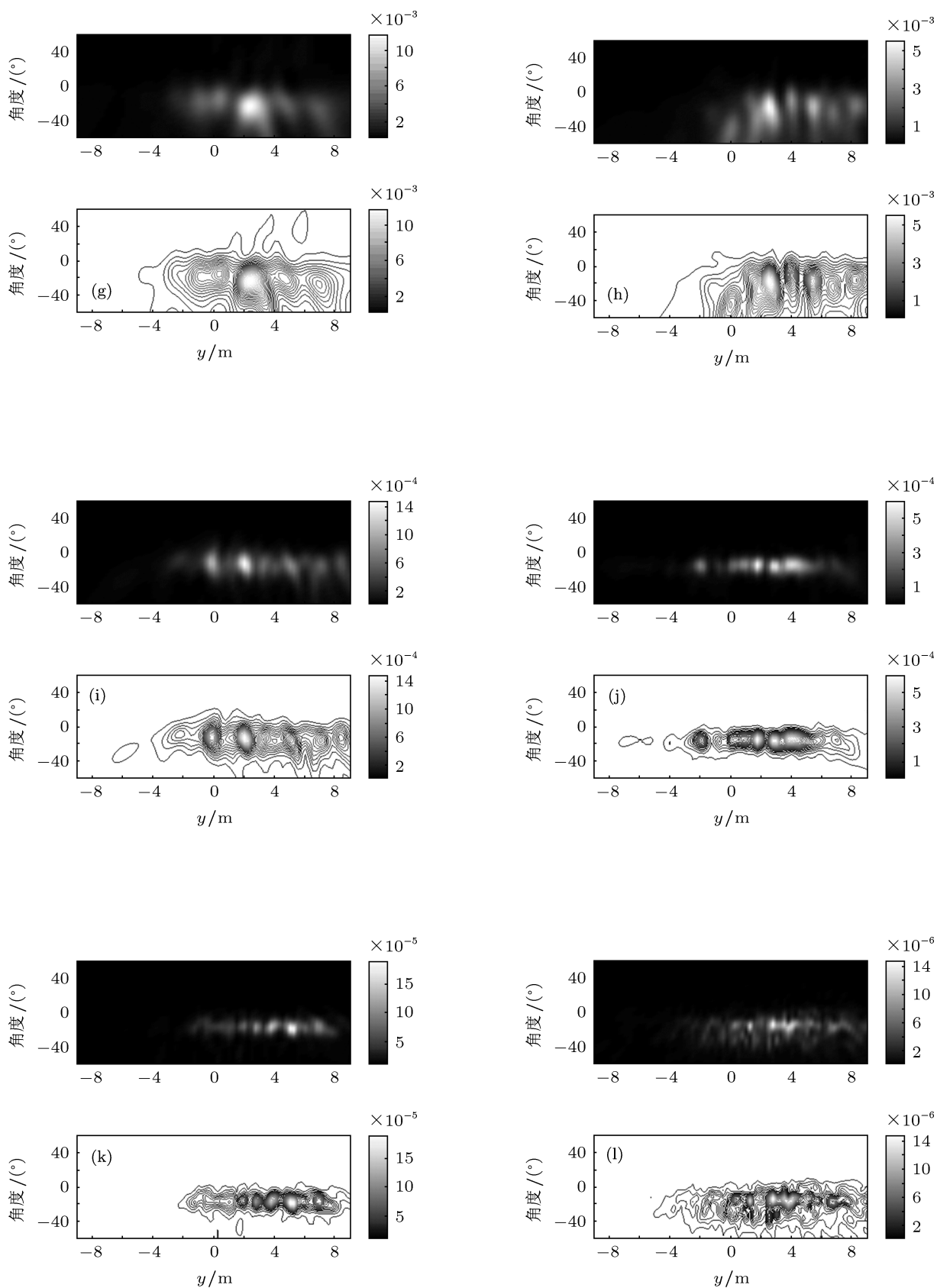


图 3 运动轨迹

利用舱段模型外表面正下方安装的 4 kHz 标准声源, 得到舱段通过矢量阵的真实时刻, 并选取标准声源的位置为原点建立坐标系并选取适当的

扫描范围. 由于艇体振动数据以及外部辐射噪声均为宽带信号, 因此从 200 Hz 至 5 kHz 每隔 1/3oct 给出聚焦定位处理结果, 如图 4 所示.





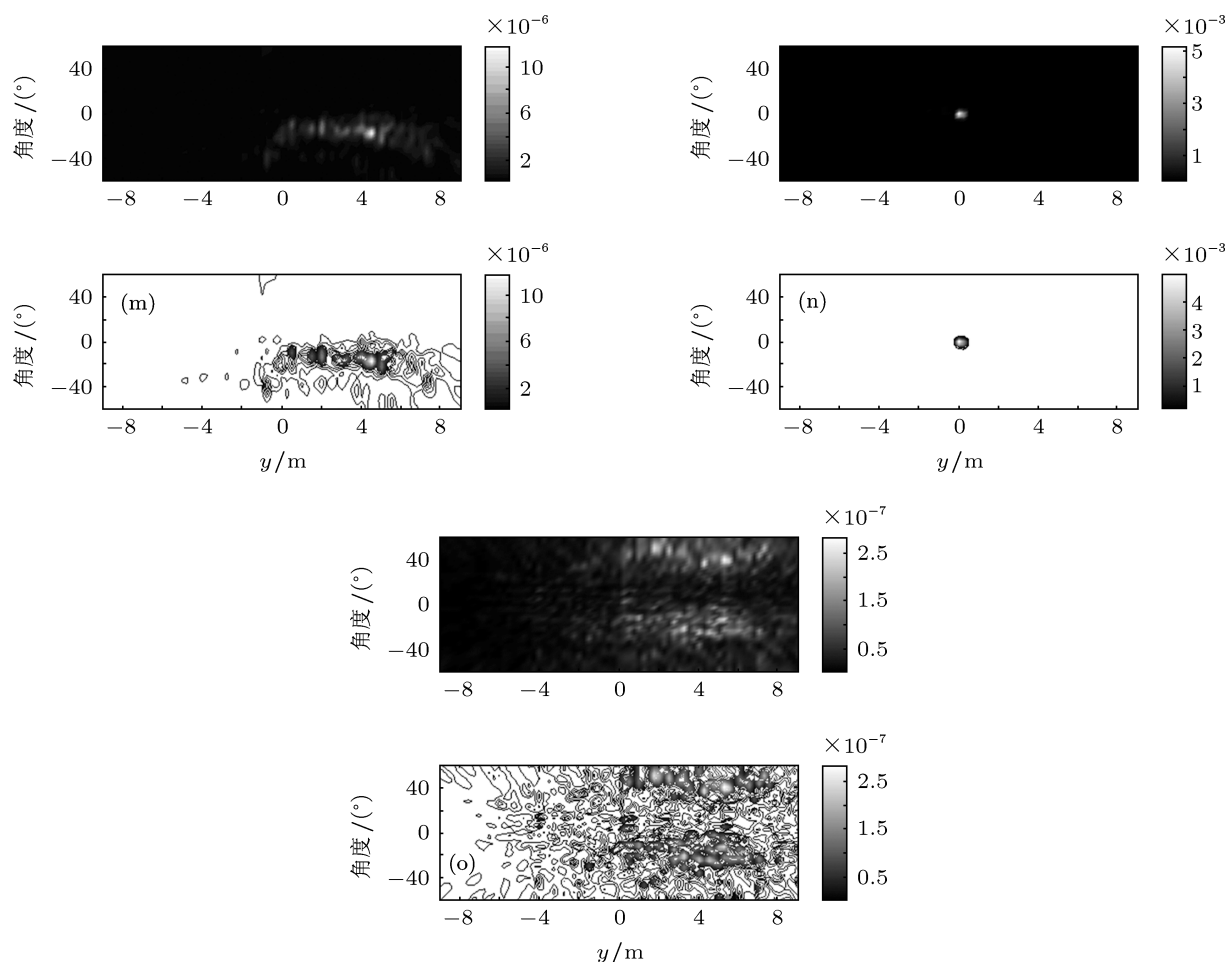


图4 运动声源柱面聚焦定位结果 (a) 200 Hz; (b) 250 Hz; (c) 315 Hz; (d) 400 Hz; (e) 500 Hz; (f) 630 Hz; (g) 800 Hz; (h) 1 kHz; (i) 1.25 kHz; (j) 1.6 kHz; (k) 2 kHz; (l) 2.5 kHz; (m) 3.15 kHz; (n) 4 kHz; (o) 5 kHz

对舱段模型内部不同位置布放的振动测点采集的加速度信号进行功率谱分析, 给出不同测点在相同时间段内, 不同分析频率下的功率谱估计结果,

用于与噪声源定位识别结果进行相互验证. 表6中建立与运动声源定位系统相同的坐标系, 并指示出各测点位置处的功率谱计算结果.

表6 振动测点功率谱计算结果 (单位: dB)

(a) 250 Hz 中心频率 1/3 oct 频带能量

$\theta/(\circ)$ \ y/m	-5.2	-4.7	-4.7	-4.2	-4.2	-3.7	-3.7	-3.2	-3.2	-2.7	-1.2	-0.6	-0.6	0	3	3.6	6	6.6
90	79.35				81.91		76.38					77.96		86.29		95.49		
45	82.01		85.58		86.46									88.47		94.56		
0	78.51				79.58				81.66					89.53				72.70
-45	78.59		86.51		86.63									89.29				107.07
-90	79.56				81.11							82.88		91.04				103.48

(b) 500 Hz 中心频率 1/3 oct 频带能量

$\theta/(\circ)$ \ y/m	-5.2	-4.7	-4.7	-4.2	-4.2	-3.7	-3.7	-3.2	-3.2	-2.7	-1.2	-0.6	-0.6	0	3	3.6	6	6.6
90	89.22				91.43		85.01					91.35		94.85		100.20		
45	88.20		86.70		88.74									93.10		102.30		
0	85.18				89.72				82.04					95.86				83.36
-45	86.39		86.30		90.02									94.44		111.73		
-90	88.02				87.60							88.93		94.70		104.72		

(c) 1 kHz 中心频率 1/3 oct 频带能量

$\theta/(\circ)$ \ y/m	-5.2	-4.7	-4.7	-4.2	-4.2	-3.7	-3.7	-3.2	-3.2	-2.7	-1.2	-0.6	-0.6	0	3	3.6	6	6.6
90	86.57			85.44			90.02			91.03			90.58			102.18		
45	88.36		87.39		86.49								94.54		103.03			
0	86.28			85.92						85.76			94.03			86.96		
-45	88.30		86.54		90.80								96.77		115.68			
-90	89.37			87.54						96.89			98.72			108.04		

(d) 2 kHz 中心频率 1/3 oct 频带能量

$\theta/(\circ)$ \ y/m	-5.2	-4.7	-4.7	-4.2	-4.2	-3.7	-3.7	-3.2	-3.2	-2.7	-1.2	-0.6	-0.6	0	3	3.6	6	6.6
90	81.27			81.54			82.54			84.89			86.00			97.34		
45	81.36		82.84		82.37								89.34		99.71			
0	80.53			80.64						81.70			87.80			80.53		
-45	81.93		81.63		85.03								94.96		108.61			
-90	80.50			79.68						91.78			90.14			103.88		

(e) 20 Hz—5 kHz 频带总能量

$\theta/(\circ)$ \ y/m	-5.2	-4.7	-4.7	-4.2	-4.2	-3.7	-3.7	-3.2	-3.2	-2.7	-1.2	-0.6	-0.6	0	3	3.6	6	6.6
90	102.44			99.91			102.79			102.35			103.46			115.25		
45	101.11		99.52		99.67								104.70		116.44			
0	99.83			102.50						101.41			105.08			106.40		
-45	98.71		99.50		101.56								105.55		126.95			
-90	101.83			100.77						105.15			106.04			119.55		

综合噪声源柱面聚焦定位结果以及振动测点能量统计结果可知:

1) 由表 6 不同频段内的振动测点功率谱计算结果可知, 激振机工作的主要能量集中在沿母线方向 3—3.6 m, 周向角度 -45° 左右, 由于测点布放较为稀疏, 无法细致反应能量分布情况, 但基本可指示出主要能量的分布区域.

2) 对柱面聚焦定位结果进行分析可知, 不同 1/3 oct 频带内的定位结果均分布在 2 m 至 4 m 之间, 能量分布较为集中, 且与壳体振动能量分布

规律及设备布置位置先验信息符合较好.

3) 随着频率的增加, 舱段被激发的模态更多, 能量分布范围沿舱体方向向两端扩大, 能量分布范围有一定的扩大, 空间分布特征更为复杂.

4) 综合以上分析可知, 在小于 500 Hz 的低频段, 定位识别结果主要反映最强声源位置; 当分析频率大于 500 Hz 时, 由于聚焦分辨力的提高, 能够较为细致的反映出主要声源的能量分布情况. 测试数据分析结果说明本文研究方法不仅能真实反映声源位置信息, 而且能通过不同频带聚焦空间谱输

出的相对大小反映声源能量分布的相对大小,具有良好的定位效果.

5 结论

本文提出了一种基于矢量阵的运动声源柱面聚焦定位方法. 该方法基于被动合成孔径原理, 采用矢量阵测试手段, 在提高测试效率的同时, 提高噪声源定位精度. 文中分别针对单频线谱信号和宽带连续谱信号, 研究了适用于两种信号形式的聚焦定位方法, 并通过仿真及舱段模型试验研究对该方法的工程实用性提供了支撑. 主要研究内容及结果包括:

1. 充分考虑噪声源的空间分布特点, 建立运动声源矢量阵近场柱面聚焦测量模型, 分别研究了适用于单频线谱信号和宽带连续谱信号的矢量阵柱面聚焦定位方法.

2. 提出了融合 CSS 相干宽带算法思想及柱

面聚焦定位方法的宽带运动声源柱面聚焦定位方法 (CSS-MCBFB), 该方法将频带内不重叠的频点上的信号空间通过聚焦变换聚焦到参考频率点, 聚焦后得到单一频率点的数据协方差矩阵, 再应用窄带信号处理的方法进行所需参数的估计, 该方法较一般非相干宽带处理方法具有运算量小、计算精度高, 可直接处理相干宽带信号等优点.

3. 在仿真研究中, 综合考虑了信噪比、运动速度、运动速度误差、运动倾角以及幅度不一致性等因素对定位精度的影响, 并给出了与舱段模型试验参数较为接近条件下的定位精度, 为试验结果的分析提供有力的支持和参考.

4. 通过舱段模型试验, 综合利用标准声源定位结果、壳体表面振动测点功率谱分析结果以及激振机激励下的噪声源柱面聚焦定位结果, 对 200 Hz—5 kHz 范围内的辐射噪声空间分布特征进行了分析, 归纳了噪声源分布的特征规律.

-
- [1] Yang D G, Zheng S F, Lian X M, Jiang X Y 2002 *Acta Acustica* **27** 357 (in Chinese) [杨殿阁, 郑四发, 罗禹贡, 连小珉, 蒋孝煜 2002 声学学报 **27** 357]
- [2] Yang D G, Luo Y G, Li B, Li K Q, Lian X M 2010 *Acta Phys. Sin.* **59** 4738 (in Chinese) [杨殿阁, 罗禹贡, 李兵, 李克强, 连小珉 2010 物理学报 **59** 4738]
- [3] Park S H, Kim Y H 2000 *J. Acoust. Soc. Am.* **108** 2719
- [4] Park S H, Kim Y H 2001 *J. Acoust. Soc. Am.* **110** 2326
- [5] Shi J, Yang D S, Shi S G 2011 *Acta Phys. Sin.* **60** 064301 (in Chinese) [时洁, 杨德森, 时胜国 2011 物理学报 **60** 064301]
- [6] Shi J, Yang D S 2010 *Journal of System Simulation* (in Chinese) [时洁, 杨德森 2010 系统仿真学报 **22** 473]
- [7] Jiang B, Zhu Y, Sun C Y 2005 *Systems Engineering and Electronics* **27** 1186 (in Chinese) [蒋飏, 朱楚, 孙长瑜 2005 系统工程与电子技术 **27** 1186]
- [8] Kim B C, Liu I T 2000 *Proc. MTS/IEEE Oceans* **3** 1673
- [9] Zhang D M, Guo L H, Zhang R H 2005 *Acta Acustica* **30** 303 (in Chinese) [张德明, 郭良浩, 张仁和 2005 声学学报 **30** 303]

Experimental research on cylindrical focused beamforming localization method of moving sound sources based on vector sensor array*

Shi Jie[†] Yang De-Sen Shi Sheng-Guo

(*Science and Technology on Underwater Acoustic Laboratory, Harbin Engineering University, Harbin 150001, China*)

(Received 22 September 2011; revised manuscript received 24 October 2011)

Abstract

Based on the passive synthetic aperture principle, a new cylindrical focused beamforming localization method of moving sound sources based on vector sensor array suited for both narrowband and broadband signal is proposed in this paper. By establishing the measurement model of moving sound sources, calculating the localization accuracy versus error, and analyzing the experimental results of cabin model, the performance of this new method can be verified. A comparison between the focused beamforming localization results and the shell vibration measurement results proves that the proposed method not only can obtain the localization results, but also can reflect the relative contribution of each coherent source.

Keywords: moving noise sound source, vector sensor array, cylindrical focused beamforming

PACS: 43.50.+y, 43.60.+d, 43.58.+z

* Project supported by the National Defense Basic Scientific Research of China (Grant No. B0820060400), the National Defense Pre- Research of China (Grant No. 51310080202), and the Fundamental Research Funds for the Central Universities (Grant No. HEUCFR1119).

[†] E-mail: shijie080428@yahoo.com.cn