

基于最差性能优化的运动声源稳健聚焦定位识别方法研究*

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)

(2010年10月10日收到;2010年12月27日收到修改稿)

基于被动合成孔径原理,提出了一种具有高稳健性的运动声源高分辨聚焦定位识别方法.该方法采用综合优化手段,通过矢量最大似然聚焦定位算法生成虚拟阵列坐标及数据矩阵,进而利用基于最差性能优化的稀疏虚拟阵列聚焦算法,获取稳健的高分辨定位识别效果.理论及仿真研究表明,该方法对于非匀速运动以及与基阵存在运动倾角的复杂情况具有较强的适用性,聚焦空间谱表现出更大的动态范围、更为尖锐的聚焦峰尺度以及更强的背景噪声起伏压制能力.湖上试验进一步验证,在高分辨最小方差信号无畸变响应法(MVDR)聚焦算法动态范围仅为3.5 dB的相同试验条件下,该方法的动态范围可优于50 dB,具有更高的稳健性和更好的定位识别效果.

关键词: 稳健性, 运动噪声源定位识别, 矢量阵, 最差性能优化

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

1. 引言

与传统的声场分析和声源识别方法相比,声聚焦阵列信号处理方法物理意义清晰,可综合利用声波的强度和相位信息反演声场,并可通过设计高分辨聚焦处理器以获得较高的空间分辨能力.本文采用的最小方差信号无畸变响应法(MVDR)高分辨处理器^[1-3]可以明显降低聚焦空间谱图的旁瓣级,并可根据接收数据自行优化加权系数.同时,由于该处理器给出的谱估计结果使用了数据采样协方差矩阵的所有特征值,而其中起主导作用的信号特征值反映了声源的功率,可以反映声源贡献的相对大小,因此具有应用于噪声源近场定位识别的优势及前景.

利用被动合成孔径原理对运动声源进行处理,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.然而,理想条件下的匀速运动条件在实际应用中很难满足,实际遇到的大部分是非匀速运动以及与基阵存在运动倾角的复杂情况,由此得

到的虚拟阵列均属于非规则阵列,也可称为稀疏阵列.近场声全息^[4-6]及运动声全息^[7,8]等一类应用于规则阵列的定位识别方法均会出现严重的定位偏差甚至失效.针对以上问题,本文研究了一种综合优化的运动声源定位识别方法,该方法通过矢量最大似然聚焦定位算法生成虚拟阵列坐标及数据矩阵,进而提出了基于最差性能优化的稀疏虚拟阵列聚焦算法,获取稳健的高分辨定位识别效果.

2. 运动声源稳健高分辨聚焦定位识别方法

2.1. 运动声源矢量阵近场测量模型

以垂直阵测试系统为例,基于被动合成孔径原理的运动声源定位识别过程可简单描述为^[9]:各声源分布于声源面 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,垂直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直线运动.

* 国防基础科学研究计划(批准号:B0820060400)和国防预研究基金(批准号:51310080202)资助的课题.

[†] E-mail: shijie080428@yahoo.com.cn

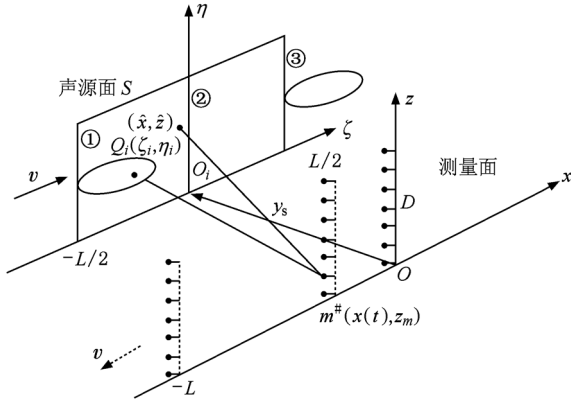


图 1 基于被动合成孔径原理的运动声源定位识别过程示意图

如图 1 所示,声源面上共分布有 Q 个相干声源,目标以速度 v 从位置①($\zeta = -L/2$)匀速运动到位置③($\zeta = L/2$),运动距离为 L .由 M_z 个水听器组成的均匀垂直阵竖立不动,基阵孔径为 D ,阵元

间距 $\Delta z = D/(M_z - 1)$,声源面与测量面之间的距离为 y_s ,垂直阵 1 号阵元(设为参考阵元)位于 xOz 坐标系原点.

对于观测时刻 t ,若声波是从声源面 S 上由第 i 号声源 $Q_i(\zeta_i, \eta_i)$ 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

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

其中, k_0 为波数, q_i 为第 i 号声源辐射强度.

利用运动的相对性,上述测量过程可假定声源面在图 1 所示位置①不动,而垂直阵则相对声源以匀速 v 从 $x = 0$ 反向运动到 $x = -L$ 处,此时第 m 号阵元接收到的信号仍可用(1)式表示.式中的 $R_i^{(m)}(t)$ 以及 $\cos \theta_i^{(m)}(t)$ 可以表示为

$$R_i^{(m)}(t) = \frac{M[x(t) - \zeta_i] + \sqrt{[x(t) - \zeta_i]^2 + (1 - M^2)[y_s^2 + (z_m - \eta_i)^2]}}{1 - M^2}, \quad (2)$$

$$\cos \theta_i^{(m)}(t) = \frac{[x(t) - \zeta_i]}{R_i^{(m)}(t)}, \quad (3)$$

其中, $(x(t), y_s, z_m)$ 为第 m 号阵元在 t 时刻的位置坐标, $x(t) = -vt$, $z_m = (m - 1) \cdot \Delta z$.

进一步得到振速信号为

$$\begin{aligned} v_{xi}^{(m)}(t) &= p_i^{(m)}(t) \cos \theta_{m,i}(t) \cos \varphi_{m,i}(t) e^{-j\phi(R_{m,i}(t))}, \\ v_{yi}^{(m)}(t) &= p_i^{(m)}(t) \cos \theta_{m,i}(t) \sin \varphi_{m,i}(t) e^{-j\phi(R_{m,i}(t))}, \\ v_{zi}^{(m)}(t) &= p_i^{(m)}(t) \sin \theta_{m,i}(t) e^{-j\phi(R_{m,i}(t))}, \end{aligned} \quad (4)$$

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, $e^{-j\phi(R_{m,i}(t))}$ 为瞬时复阻抗值.根据空间几何关系得到

$$\begin{aligned} \theta_{m,i}(t) &= \text{tg}^{-1} \left(\frac{\eta_i - z_m}{\sqrt{(x(t) - \zeta_i)^2 + y_s^2}} \right), \\ \varphi_{m,i}(t) &= \text{tg}^{-1} \left(\frac{y_s}{x(t) - \zeta_i} \right), \end{aligned} \quad (5)$$

$$R_{m,i}(t) = \sqrt{(x(t) - \zeta_i)^2 + y_s^2 + (\eta_i - z_m)^2}.$$

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

$$\begin{aligned} p^{(m)}(t) &= \sum_{i=1}^Q p_i^{(m)}(t) + n_p^{(m)}(t), \\ v_x^{(m)}(t) &= \sum_{i=1}^Q v_{xi}^{(m)}(t) + n_{v_x}^{(m)}(t), \\ v_y^{(m)}(t) &= \sum_{i=1}^Q v_{yi}^{(m)}(t) + n_{v_y}^{(m)}(t), \\ v_z^{(m)}(t) &= \sum_{i=1}^Q v_{zi}^{(m)}(t) + n_{v_z}^{(m)}(t). \end{aligned} \quad (6)$$

2.2. 基于矢量最大似然聚焦算法的运动参数估计

针对非匀速运动情况,在进行定位识别之前,需要对数据进行运动参数估计,包括获取各不同时间段下的声源位置、速度和倾角等信息.最大似然(maximum-likelihood, 简记为 ML)^[10,11]估计方法是在已知白噪声情况下的贝叶斯最优估计,该方法的估计性能优良,小快拍数条件下仍具有良好的稳健性.同时,该方法在相干源情况下仍能有效,无须辅助相应的解相干算法,适用于近场测试条件下由于波前曲率非线性变化而引起的阵型畸变问题.本文

结合矢量阵处理以及最大似然 (ML) 估计方法的优点,提出了基于矢量最大似然聚焦算法的运动参数估计方法.

设共将数据等时间间隔分为 M_x 段,每段数据长度为 T_x , 则第 $n(n = 1, 2, \dots, M_x)$ 段声压及三维振速数据可表示为

$$\begin{aligned} p^{(m,n)}(t') &= p^{(m)}((n-1)T_x + t'), \\ v_x^{(m,n)}(t') &= v_x^{(m)}((n-1)T_x + t'), \\ v_y^{(m,n)}(t') &= v_y^{(m)}((n-1)T_x + t'), \\ v_z^{(m,n)}(t') &= v_z^{(m)}((n-1)T_x + t'). \end{aligned} \quad (7)$$

理论上,对应于每个不同的瞬时时刻 t' , 各矢量水听器均存在不同的声压、振速相位差,且振速信号的大小不仅与距离有关,还与瞬时俯仰角、瞬时方位角以及瞬时复阻抗值有关. 仅当处理数据快拍 L_s 较小时,可近似认为运动带来的瞬时方位角、瞬时俯仰角以及瞬时距离变化不大.

令 $\mathbf{p}^{(n)}, \mathbf{V}_x^{(n)}, \mathbf{V}_y^{(n)}$ 和 $\mathbf{V}_z^{(n)}$ 分别为第 n 段矢量阵数据对应的 $M_x \times L_s$ 维声压矩阵和振速矩阵. 将 $4M_x \times L_s$ 维矢量阵数据矩阵表示为

$$\mathbf{S}_v^{(n)} = [(\mathbf{p}^{(n)})^T \quad (\mathbf{V}_x^{(n)})^T \quad (\mathbf{V}_y^{(n)})^T \quad (\mathbf{V}_z^{(n)})^T]^T. \quad (8)$$

$\hat{\mathbf{R}}^{(v)} = \frac{1}{L_s} \mathbf{S}_v^{(n)} (\mathbf{S}_v^{(n)})^H$ 即为 $4M_x \times 4M_x$ 维采样数据协方差矩阵.

根据第 n 段数据定位出该时刻对应的声源真实

位置. 为提高运算效率,产生较快的收敛速度,本文采用交替投影迭代 (alternating projection, 简记为 AP) 算法求解似然函数的最优解.

第 1 步获取第 1 号声源定位坐标初值.

设在声源平面上的任一扫描点为 (\hat{x}, \hat{z}) , 根据该点几何关系,可分别得到该扫描点至接收基阵的 $M_z \times 1$ 维聚焦距离矢量 $\hat{\mathbf{R}}$, 俯仰角矢量 $\hat{\boldsymbol{\theta}}$ 以及方位角矢量 $\hat{\boldsymbol{\varphi}}$. 其中,扫描点至 m 号阵元的俯仰角、方位角和距离可分别表示为

$$\begin{aligned} \hat{\theta}_m &= \text{tg}^{-1} \left(\frac{\hat{z} - z_m}{\sqrt{\hat{x}^2 + y_s^2}} \right), \\ \hat{\varphi}_m &= \text{tg}^{-1} \left(\frac{y_s}{\hat{x} - x_a} \right), \\ \hat{R}_m &= \sqrt{\hat{x}^2 + y_s^2 + (\hat{z} - z_m)^2}. \end{aligned} \quad (9)$$

该扫描点对应的复阻抗矢量为

$$\hat{\mathbf{D}}^{(v)}(\hat{\mathbf{R}}) = [e^{-j\hat{\theta}(\hat{R}_1)}, e^{-j\hat{\theta}(\hat{R}_2)}, \dots, e^{-j\hat{\theta}(\hat{R}_{M_z})}]^T. \quad (10)$$

扫描点对应 3 个方向的聚焦单位方向矢量分别为

$$\hat{\mathbf{a}}^{(x)}(\hat{\boldsymbol{\theta}}, \hat{\boldsymbol{\varphi}}) = [\cos\hat{\theta}_1 \cos\hat{\varphi}_1, \dots, \cos\hat{\theta}_m \cos\hat{\varphi}_m, \dots, \cos\hat{\theta}_M \cos\hat{\varphi}_M]^T,$$

$$\hat{\mathbf{a}}^{(y)}(\hat{\boldsymbol{\theta}}, \hat{\boldsymbol{\varphi}}) = [\cos\hat{\theta}_1 \sin\hat{\varphi}_1, \dots, \cos\hat{\theta}_m \sin\hat{\varphi}_m, \dots, \cos\hat{\theta}_M \sin\hat{\varphi}_M]^T,$$

$$\hat{\mathbf{a}}^{(z)}(\hat{\boldsymbol{\theta}}, \hat{\boldsymbol{\varphi}}) = [\sin\hat{\theta}_1, \dots, \sin\hat{\theta}_m, \dots, \sin\hat{\theta}_M]^T. \quad (11)$$

则该扫描点处的声压和振速聚焦方向矢量分别表示为

$$\hat{\mathbf{A}}^{(p)}(\hat{\mathbf{R}}) = [e^{-j\frac{2\pi}{\lambda}(\hat{R}_1 - \hat{R}_1)}, e^{-j\frac{2\pi}{\lambda}(\hat{R}_2 - \hat{R}_1)}, \dots, e^{-j\frac{2\pi}{\lambda}(\hat{R}_m - \hat{R}_1)}, \dots, e^{-j\frac{2\pi}{\lambda}(\hat{R}_{M_z} - \hat{R}_1)}]^T, \quad (12)$$

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

$$\hat{\mathbf{A}}^{(y)}(\hat{\mathbf{R}}, \hat{\boldsymbol{\theta}}, \hat{\boldsymbol{\varphi}}) = \hat{\mathbf{a}}^{(y)}(\hat{\boldsymbol{\theta}}, \hat{\boldsymbol{\varphi}}) \odot \hat{\mathbf{D}}^{(v)}(\hat{\mathbf{R}}) \odot \hat{\mathbf{A}}^{(p)}(\hat{\mathbf{R}}), \quad (13)$$

$$\hat{\mathbf{A}}^{(z)}(\hat{\mathbf{R}}, \hat{\boldsymbol{\theta}}, \hat{\boldsymbol{\varphi}}) = \hat{\mathbf{a}}^{(z)}(\hat{\boldsymbol{\theta}}, \hat{\boldsymbol{\varphi}}) \odot \hat{\mathbf{D}}^{(v)}(\hat{\mathbf{R}}) \odot \hat{\mathbf{A}}^{(p)}(\hat{\mathbf{R}}).$$

则该扫描点对应的 $4M_x \times 1$ 维矢量阵聚焦方向矢量为

$$\hat{\mathbf{A}}_1^{0(v)}(\hat{\mathbf{R}}, \hat{\boldsymbol{\theta}}, \hat{\boldsymbol{\varphi}}) = \begin{bmatrix} \hat{\mathbf{A}}^{(p)}(\hat{\mathbf{R}}) \\ \hat{\mathbf{A}}^{(x)}(\hat{\mathbf{R}}, \hat{\boldsymbol{\theta}}, \hat{\boldsymbol{\varphi}}) \\ \hat{\mathbf{A}}^{(y)}(\hat{\mathbf{R}}, \hat{\boldsymbol{\theta}}, \hat{\boldsymbol{\varphi}}) \\ \hat{\mathbf{A}}^{(z)}(\hat{\mathbf{R}}, \hat{\boldsymbol{\theta}}, \hat{\boldsymbol{\varphi}}) \end{bmatrix}. \quad (14)$$

求其正交投影矩阵为

$$\mathbf{P}_{\hat{\mathbf{A}}_1^{0(v)}} = \hat{\mathbf{A}}_1^{0(v)} ((\hat{\mathbf{A}}_1^{0(v)})^H \hat{\mathbf{A}}_1^{0(v)})^{-1} (\hat{\mathbf{A}}_1^{0(v)})^H. \quad (15)$$

则寻遍完整的扫描平面,可得到第 1 号声源的定位坐标

$$(\hat{x}_{1n}^0, \hat{z}_{1n}^0) = \max_{\hat{\mathbf{A}}_1^{0(v)}} \text{tr}(\mathbf{P}_{\hat{\mathbf{A}}_1^{0(v)}} \hat{\mathbf{R}}^{(v)}). \quad (16)$$

第 2 步依次根据已估计出的第 $i-1$ 个声源坐标初值,估计第 i 个声源的坐标初值.

仍根据 (14) 式获取矢量阵聚焦方向矢量的方法,可将 $i-1$ 个坐标初值以及扫描点 (\hat{x}, \hat{z}) 共同生成的 $4M_x \times i$ 维矢量阵聚焦方向矢量写为

$$\hat{\mathbf{A}}_i^{0(v)} = [\hat{\mathbf{A}}_1^{0(v)}(\hat{\mathbf{R}}_1, \hat{\boldsymbol{\theta}}_1, \hat{\boldsymbol{\varphi}}_1^0), \hat{\mathbf{A}}_2^{0(v)}(\hat{\mathbf{R}}_2, \hat{\boldsymbol{\theta}}_2, \hat{\boldsymbol{\varphi}}_2^0), \dots, \hat{\mathbf{A}}_{i-1}^{0(v)}(\hat{\mathbf{R}}_{i-1}, \hat{\boldsymbol{\theta}}_{i-1}, \hat{\boldsymbol{\varphi}}_{i-1}^0), \hat{\mathbf{A}}^{(v)}(\hat{\mathbf{R}}, \hat{\boldsymbol{\theta}}, \hat{\boldsymbol{\varphi}})]. \quad (17)$$

此时的正交投影矩阵写为

$$\mathbf{P}_{\hat{\mathbf{A}}_i^{0(v)}} = \hat{\mathbf{A}}_i^{0(v)} ((\hat{\mathbf{A}}_i^{0(v)})^H \hat{\mathbf{A}}_i^{0(v)})^{-1} (\hat{\mathbf{A}}_i^{0(v)})^H. \quad (18)$$

则寻遍完整的扫描平面,可得到第 i 号声源的定位初值

$$(\hat{x}_{in}^0, \hat{z}_{in}^0) = \max_{\hat{A}_i^{(v)}} \text{tr}(\mathbf{P}_{\hat{A}_i^{(v)}} \hat{\mathbf{R}}^{(v)}). \quad (19)$$

当获取全部 Q 个定位坐标初始后,则循环执行第 2 步进行 p 次迭代寻优操作,直到满足坐标收敛条件 $\sqrt{(\hat{x}_i^p - \hat{x}_i^{p-1})^2 + (\hat{z}_i^p - \hat{z}_i^{p-1})^2} < \varepsilon$ (ε 为任意小的整数),则迭代停止.

第 3 步将第 $p-1$ 次迭代得到的第 $i+1, \dots, Q$ 个声源以及第 p 迭代得到的第 $1, \dots, i-1$ 个声源的坐标保持不变,将该 $Q-1$ 个迭代坐标值以及扫描点 (\hat{x}, \hat{z}) 联合生成的 $4M_z \times Q$ 维矢量阵聚焦方向矢量写为

$$\begin{aligned} \hat{\mathbf{A}}_i^{p(v)} = & [\hat{\mathbf{A}}_1^{p(v)}(\hat{\mathbf{R}}_1^p, \hat{\theta}_1^p, \hat{\varphi}_1^p), \dots, \hat{\mathbf{A}}_{i-1}^{p(v)}(\hat{\mathbf{R}}_{i-1}^p, \hat{\theta}_{i-1}^p, \hat{\varphi}_{i-1}^p), \\ & \hat{\mathbf{A}}_{i+1}^{p-1(v)}(\hat{\mathbf{R}}_{i+1}^{p-1}, \hat{\theta}_{i+1}^{p-1}, \hat{\varphi}_{i+1}^{p-1}), \dots, \\ & \hat{\mathbf{A}}_Q^{p-1(v)}(\hat{\mathbf{R}}_Q^{p-1}, \hat{\theta}_Q^{p-1}, \hat{\varphi}_Q^{p-1}), \hat{\mathbf{A}}^{(v)}(\hat{\mathbf{R}}, \hat{\theta}, \hat{\varphi})]. \end{aligned} \quad (20)$$

此时的正交投影矩阵写为

$$\mathbf{P}_{\hat{A}_i^{p(v)}} = \hat{\mathbf{A}}_i^{p(v)} ((\hat{\mathbf{A}}_i^{p(v)})^H \hat{\mathbf{A}}_i^{p(v)})^{-1} (\hat{\mathbf{A}}_i^{p(v)})^H. \quad (21)$$

则寻遍完整的扫描平面,最终得到第 i 号声源的定位坐标

$$(\hat{x}_{in}, \hat{z}_{in}) = \max_{\hat{A}_i^{p(v)}} \text{tr}(\mathbf{P}_{\hat{A}_i^{p(v)}} \hat{\mathbf{R}}^{(v)}). \quad (22)$$

2.3. 稀疏虚拟阵列参数及信号的获取

下面将 2.2 节的分段数据以及定位结果用于产生稀疏虚拟阵列参数及信号.如图 2 所示,假设声源于初始位置 (ζ_i, η_i) 不动,垂直矢量阵以相同的速度 v 由 $x=0$ 处反向运动到 $x=-L$ 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 .

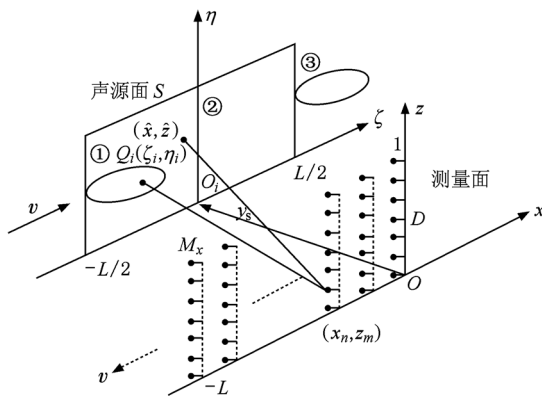


图 2 运动声源虚拟阵列示意图

对该连续面阵进行空间采样,根据 2.2 节中的数据分段方法来生成对应于虚拟垂直阵的接收信

号.即共将数据分为 M_x 段,每段数据长度为 L_s ,则虚拟面阵的 x 向的阵元个数即为 M_x ,理想条件下声源做水平匀速运动时, x 向阵元间距即为 $\Delta x = L/(M_x - 1)$.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 .然而在非匀速以及运动方向与基阵存在倾角的条件下,虚拟阵列坐标的获取则需要重新考虑,此时产生的虚拟阵列必然是稀疏的,本文利用 2.2 节的坐标估计结果,生成虚拟阵列坐标,以保证后续聚焦处理器能具有良好的匹配性能.

设 \mathbf{x}_a 和 \mathbf{z}_a 分别为 $M_z \times 1$ 维垂直阵 x 向和 z 向坐标向量, \mathbf{X}_a 和 \mathbf{Z}_a 分别为 $(M_x \cdot M_z) \times 1$ 维的虚拟阵列 x 向和 z 向坐标向量. \mathbf{X}_a 和 \mathbf{Z}_a 的第 1 至 M_z 行即为实际垂直阵的 x 向和 z 向坐标.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

$$\begin{aligned} \mathbf{X}_a |_{1:M_z} &= \mathbf{x}_a, \\ &\vdots \\ \mathbf{X}_a |_{(n-1)M_z+1:nM_z} &= \mathbf{x}_a - (\hat{x}_{in} - \hat{x}_{i1}), \end{aligned} \quad (23)$$

$$\begin{aligned} &\vdots \\ \mathbf{X}_a |_{(M_x-1)M_z+1:M_x M_z} &= \mathbf{x}_a - (\hat{x}_{in} - \hat{x}_{i1}); \\ \mathbf{Z}_a |_{1:M_z} &= \mathbf{z}_a, \\ &\vdots \\ \mathbf{Z}_a |_{(n-1)M_z+1:nM_z} &= \mathbf{z}_a - (\hat{z}_{in} - \hat{z}_{i1}), \end{aligned} \quad (24)$$

$$\begin{aligned} &\vdots \\ \mathbf{Z}_a |_{(M_x-1)M_z+1:M_x M_z} &= \mathbf{z}_a - (\hat{z}_{in} - \hat{z}_{i1}). \end{aligned}$$

令 \mathbf{P}' 为 $(M_x \cdot M_z) \times T_x$ 维虚拟阵列数据的矩阵形式,则有 $\mathbf{P}' |_{(n-1)M_z+1:nM_z} = \mathbf{p}^{(n)} \cdot \hat{\mathbf{R}} = \frac{1}{L_s} \mathbf{P}' (\mathbf{P}')^H$ 即为

$(M_x \cdot M_z) \times (M_x \cdot M_z)$ 维虚拟阵列采样数据协方差矩阵.至此,已生成全部的虚拟阵列参数及数据矩阵.

2.4. 基于最差性能优化的稀疏虚拟阵列聚焦算法

本节研究针对对 2.3 节中生成的虚拟阵列的高分辨聚焦算法.

仍在声源所在平面 S 上进行聚焦扫描,设某一扫描点坐标 (\hat{x}, \hat{z}) , $\hat{\mathbf{r}} = [\hat{\mathbf{r}}^{(1)}; \hat{\mathbf{r}}^{(2)}; \dots; \hat{\mathbf{r}}^{(n)}; \dots; \hat{\mathbf{r}}^{(M_x)}]$ 为该扫描点至接收基阵的 $(M_x \cdot M_z) \times 1$ 维聚焦距离矢量, $\hat{\mathbf{r}}^{(n)} = [\hat{\mathbf{r}}^{(1,n)}, \hat{\mathbf{r}}^{(2,n)}, \dots, \hat{\mathbf{r}}^{(m,n)}, \dots, \hat{\mathbf{r}}^{(M_z,n)}]^T$ 为扫描点至第 n 个虚拟垂直阵的 $M_z \times 1$ 维聚焦距离矢量, $\hat{r}^{(m,n)}$ 为扫描点至第 (m, n) 号阵元的距离为

$$\hat{r}^{(m,n)} = \sqrt{(\hat{x} - \mathbf{X}_a((n-1)M_z + m))^2 + y_s^2 + (\hat{z} - \mathbf{Z}_a((n-1)M_z + m))^2}. \quad (25)$$

则该扫描点处的 $(M_x \cdot M_z) \times 1$ 维虚拟聚焦导向矢量为

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

$$\hat{\mathbf{A}}(\hat{\mathbf{r}}^{(n)}) = [e^{-j\frac{2\pi}{\lambda}(\hat{r}^{(1,n)} - \hat{r}^{(1,1)})}, \dots, e^{-j\frac{2\pi}{\lambda}(\hat{r}^{(m,n)} - \hat{r}^{(1,1)})}, \dots, e^{-j\frac{2\pi}{\lambda}(\hat{r}^{(M_z,n)} - \hat{r}^{(1,1)})}]^T. \quad (27)$$

最终分别得到常规聚焦算法 (MCFB) 和 MVDR 聚焦算法 (MMVDRFB) 的空间谱

$$P_{\text{MCFB}}(\hat{\mathbf{r}}) = (\hat{\mathbf{A}}(\hat{\mathbf{r}}))^H \hat{\mathbf{R}} (\hat{\mathbf{A}}(\hat{\mathbf{r}})), \quad (28)$$

$$P_{\text{MMVDRFB}}(\hat{\mathbf{r}}) = \frac{1}{(\hat{\mathbf{A}}(\hat{\mathbf{r}}))^H (\hat{\mathbf{R}})^{-1} (\hat{\mathbf{A}}(\hat{\mathbf{r}}))}. \quad (29)$$

最差性能优化的稳健波束形成 (worst-case performance optimization)^[12-15] 是近几年提出的理论上比较严格的稳健波束形成算法. 主要思想是定义了所谓的不确定集并对目标函数进行优化, 可归类到对角加载类技术^[16]. 本文将该思想引入到聚焦处理器设计之中, 以提高高分辨 MVDR 聚焦算法的稳健性.

虚拟聚焦导向矢量误差 $\Delta \mathbf{A}$ 的范数可以由常数 $\varepsilon' > 0$ 进行约束

$$\|\Delta \mathbf{A}\| \leq \varepsilon'. \quad (30)$$

实际的虚拟聚焦导向矢量 \mathbf{A}_{true} 将属于集合

$$\mathbf{A}(\varepsilon') = \{\mathbf{A}_{\text{true}} \mid \mathbf{A}_{\text{true}} = \mathbf{A}_s + \Delta \mathbf{A}, \|\Delta \mathbf{A}\| \leq \varepsilon'\}, \quad (31)$$

其中 \mathbf{A}_s 表示假设的信号导向矢量. 对所有属于集合 $\mathbf{A}(\varepsilon')$ 的导向矢量进行约束, 即阵列响应的绝对值

不小于 1:

$$|\mathbf{w}^H \mathbf{A}_{\text{true}}| \geq 1, \mathbf{A}_{\text{true}} \in \mathbf{A}(\varepsilon'). \quad (32)$$

因此, 稳健聚焦算法可以表示成约束最优问题可等价于具有单一非线性约束的二次最小化问题

$$\begin{cases} \min_{\mathbf{w}} \mathbf{w}^H \hat{\mathbf{R}} \mathbf{w} \\ \text{均满足 } |\mathbf{w}^H \mathbf{A}_{\text{true}}| \geq 1, \mathbf{A}_{\text{true}} \in \mathbf{A}(\varepsilon') \end{cases} \Leftrightarrow \begin{cases} \min_{\mathbf{w}} \mathbf{w}^H \hat{\mathbf{R}} \mathbf{w} \\ \text{均满足 } \mathbf{w}^H \mathbf{A}_s \geq \varepsilon' \|\mathbf{w}\| + 1, \text{Im}\{\mathbf{w}^H \mathbf{A}_s\} = 0. \end{cases} \quad (33)$$

进而利用二阶锥规划 (second order cone programming, 简记为 SOCP)^[17,18] 进行求解. 对虚拟阵列采样数据协方差矩阵 $\hat{\mathbf{R}}$ 进行 Cholesky 分解

$$\hat{\mathbf{R}} = \mathbf{U}^H \mathbf{U}. \quad (34)$$

则目标函数可转化为

$$\begin{aligned} \min_{\mathbf{w}} \mathbf{w}^H \hat{\mathbf{R}} \mathbf{w} &= \min_{\mathbf{w}} (\mathbf{U} \mathbf{w})^H (\mathbf{U} \mathbf{w}) \\ &= \min_{\mathbf{w}} \|\mathbf{U} \mathbf{w}\|^2. \end{aligned} \quad (35)$$

引进一个非负标量 c , 并构造一个新的约束 $\|\mathbf{U} \mathbf{w}\| \leq c$, 则(33)式可转化成

$$\begin{cases} \min_{c, \mathbf{w}} \\ \text{满足 } \varepsilon' \|\mathbf{w}\| \leq \mathbf{w}^H \mathbf{A}_s - 1, \text{Im}\{\mathbf{w}^H \mathbf{A}_s\} = 0, \|\mathbf{U} \mathbf{w}\| \leq c. \end{cases} \quad (36)$$

令

$$\begin{aligned} \mathbf{w} &\triangleq [\text{Re}\{w\}^T, \text{Im}\{w\}^T]^T, \\ \mathbf{A}_s &\triangleq [\text{Re}\{A_s\}^T, \text{Im}\{A_s\}^T]^T, \\ \bar{\mathbf{A}}_s &\triangleq [\text{Im}\{A_s\}^T, -\text{Re}\{A_s\}^T]^T, \\ \mathbf{U} &\triangleq \begin{bmatrix} \text{Re}\{U\} & -\text{Im}\{U\} \\ \text{Im}\{U\} & \text{Re}\{U\} \end{bmatrix}. \end{aligned} \quad (37)$$

可将(36)式转化为实值形式

$$\begin{cases} \min_{c, \mathbf{w}} \\ \text{满足 } \varepsilon' \|\mathbf{w}\| \leq \mathbf{w}^T \mathbf{A}_s - 1, \mathbf{w}^T \bar{\mathbf{A}}_s = 0, \|\mathbf{U} \mathbf{w}\| \leq c. \end{cases} \quad (38)$$

令

$$\begin{aligned} \mathbf{d} &\triangleq [1, \mathbf{0}^T] \in R^{(2M_x \cdot M_z + 1) \times 1}, \\ \mathbf{y} &\triangleq [c, \mathbf{w}^T]^T \in R^{(2M_x \cdot M_z + 1) \times 1}, \\ \mathbf{f} &\triangleq [\mathbf{0}^T, -1, \mathbf{0}^T]^T \in R^{(4M_x \cdot M_z + 1) \times 1}, \end{aligned}$$

$$\mathbf{F}^T \triangleq \begin{bmatrix} 1 & \mathbf{0}^T \\ 0 & \mathbf{U} \\ 0 & \mathbf{A}_s^T \\ 0 & \varepsilon' \mathbf{I} \\ 0 & \mathbf{A}_s^{-T} \end{bmatrix} \in R^{(4M_x \cdot M_z + 3) \times (2M_x \cdot M_z + 1)}. \quad (39)$$

则(38)式可表达为

$$\begin{cases} \min_d \mathbf{y}^T \mathbf{y} \\ \text{满足 } \mathbf{f} + \mathbf{F}^T \mathbf{y} \in \text{SOC}_1^{2M_x \cdot M_z + 1} \times \text{SOC}_2^{2M_x \cdot M_z + 1} \times \{0\}. \end{cases} \quad (40)$$

最优化权矢量可表示为

$$\mathbf{w}_{\text{opt}} = [w_1, \dots, w_{M_x \cdot M_z}]^T + j[w_{M_x \cdot M_z + 1}, \dots, w_{2M_x \cdot M_z}]^T. \quad (41)$$

则基于最差性能优化的 MVDR 聚焦算法 (RMMVDRFB) 的空间谱为

$$P_{\text{RMMVDRFB}}^{(v)}(\hat{\mathbf{r}}, \hat{\boldsymbol{\theta}}, \hat{\boldsymbol{\varphi}}) = \mathbf{w}_{\text{opt}}^H \hat{\mathbf{R}} \mathbf{w}_{\text{opt}}. \quad (42)$$

图 3 所示为本节研究的运动声源定位识别方法的信号处理流程图.

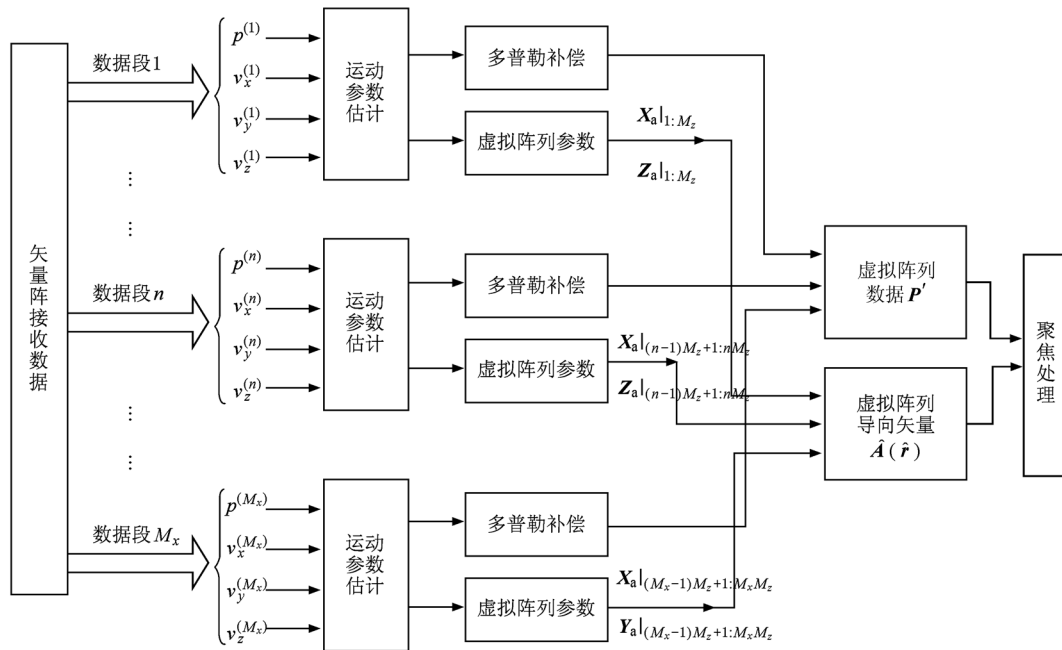


图 3 运动声源定位识别信号处理流程图

3. 聚焦空间谱仿真分析

考虑 $M_z = 7$ 的均匀垂直矢量阵, 阵元间距 $\Delta z = 0.75 \text{ m}$, 基阵垂直方向尺度 $D = 4.5 \text{ m}$, 中心阵元所在位置设为坐标原点. 单声源频率为 $f = 1 \text{ kHz}$, 采样率 $f_s = 32.768 \text{ kHz}$, 设水中声速 1500 m/s . 为验证本文研究方法对于声源非匀速运动条件下

的适应能力, 模拟声源在水平方向作非匀速直线运动的情况, 如图 4 所示在 $1.3\text{--}1.8 \text{ m/s}$ 之间产生随机数作为各个时间段声源的运动速度, 平均运动速度约为 1.57 m/s , 运动倾角为 11.3° . 粗略计算当虚拟阵元间距约为 $\Delta x = 2 \text{ m}$, 处理数据总长为 8 s 时, 虚拟孔径尺度即达到 15 m . 仿真中共处理 8 s 长数据, 每隔 1 s 对数据分段, 取各分段数据前 0.016 s (约 512 个快拍) 进行处理. 声源距离基阵的正横距

离为 $y_s = 8$ m, 预设声源坐标 $(-7.5, 8, -0.5)$ (单位:m). 信噪比为 10 dB.

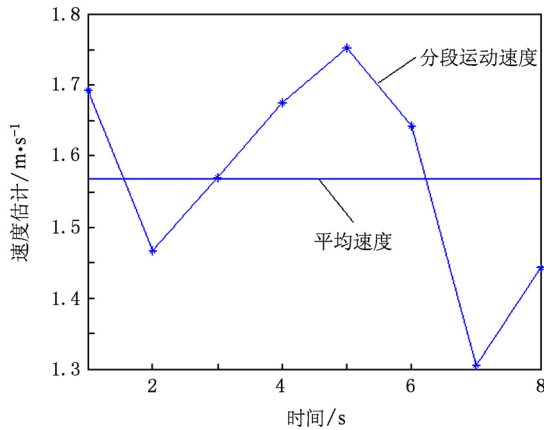


图4 各个时间段声源的运动速度

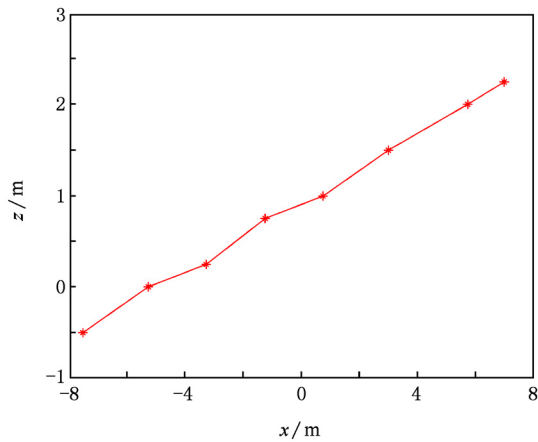


图5 分段数据定位结果

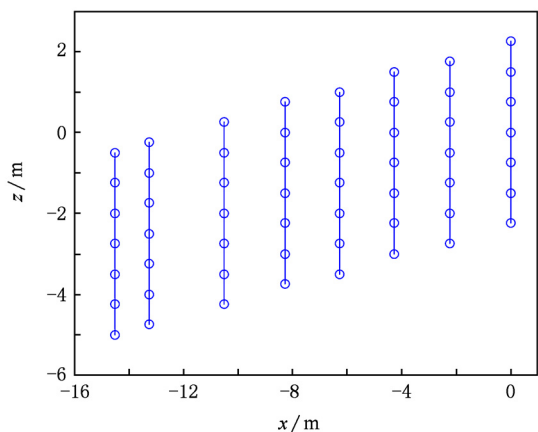


图6 虚拟阵列坐标

图5所示为基于矢量最大似然聚焦算法的分段

数据定位结果. 图6为根据该定位结果生成的虚拟阵列坐标. 可以看出, 在运动方向上, 基阵虚拟孔径得到了扩展, 同时由于声源在运动过程中并非匀速, 在对运动数据等时间间隔采样后生成的虚拟阵列形式不再规则, 而是有一定的稀疏度.

如图7所示, 以 0.1 m 为步长, 分别沿 x 向和 z 向在声源所在位置等步长间隔绘制聚焦空间谱切片. 可明显看出, RMMVDRFB 算法的聚焦峰更为尖锐, 且背景噪声级更低, 同时具有较大的动态范围.

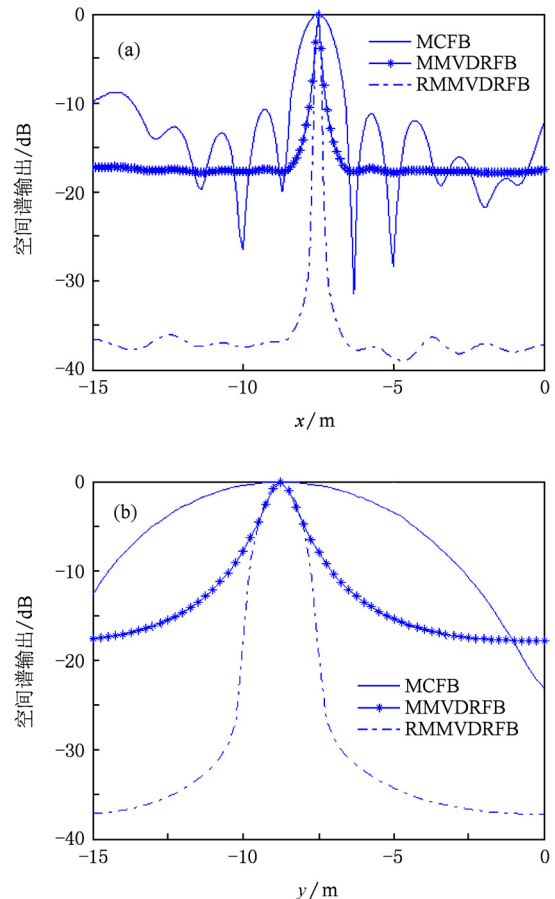


图7 稀疏虚拟阵列聚焦空间谱切片 (a)沿 x 向的聚焦空间谱切片; (b)沿 z 向的聚焦空间谱切片

对比图8所示的3种算法的聚焦空间谱结果可知, 3种算法的定位结果均正确, 但在空间谱中表现出不同的特性:

- 1) MCFB 采用常规聚焦波束形成处理器. 该方法的主要缺点为聚焦空间分辨率低, 旁瓣起伏较大, 容易在声源识别中与弱目标发生混淆.
- 2) MMVDRFB 采用高分辨 MVDR 聚焦处理器. 该方法在理想匹配条件下可获得尖锐的聚焦峰尺度, 较低的背景噪声级. 但该方法的主要缺点在于对环境

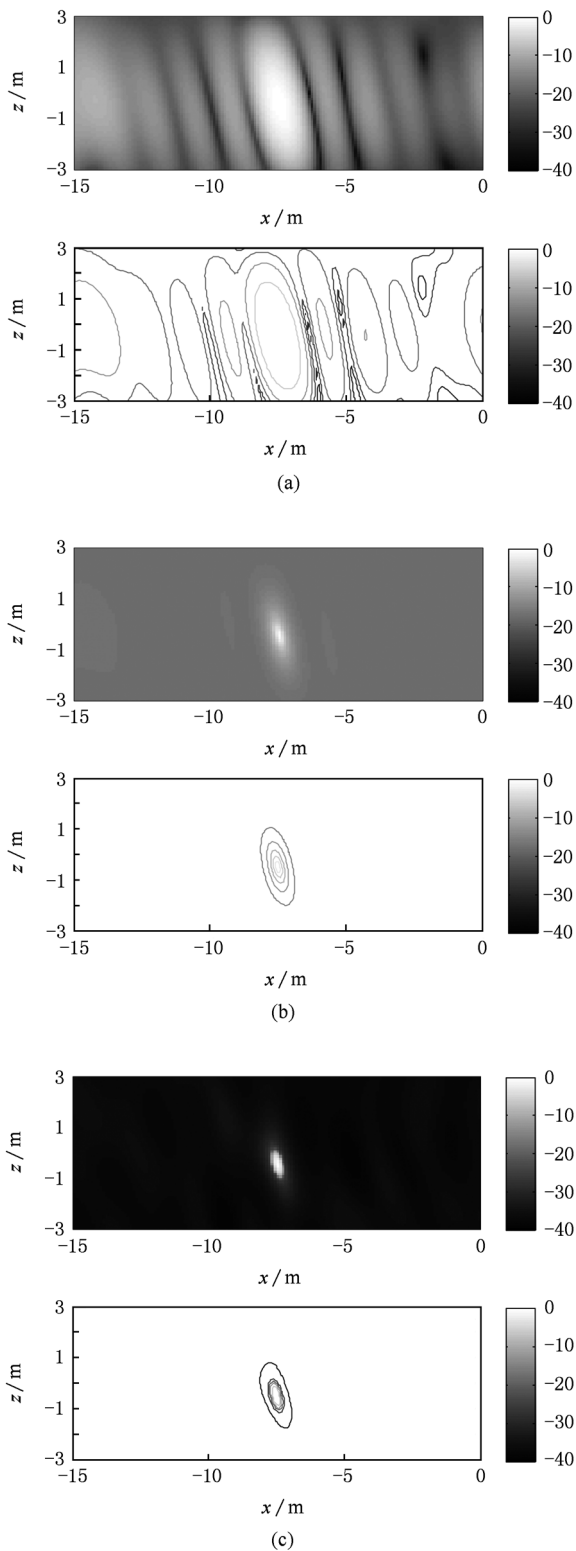


图8 稀疏虚拟阵列聚焦空间谱 (a) MCFB; (b) MMVDRFB; (c) RMMVDRFB

失配十分敏感. 3) RMMVDRFB 在 MMVDRFB 算法处理器的基础之上, 利用最差性能优化的稳健波束

形成约束优化思想, 并采用二阶锥规划求解最优权, 有效改善了高分辨 MVDR 聚焦算法的稳健性. 空间谱表现出更大的动态范围、更为尖锐的聚焦峰尺度以及更强的背景噪声起伏压制能力, 充分满足了噪声源定位识别的要求.

4. 湖试试验研究

在吉林松花湖构建一套矢量阵测试系统, 用于开展水下运动声源定位识别验证试验. 由于布放条件的限制, 采用水平阵测量模式. 该水平矢量阵由 7 只 3 维矢量水听器构成, 阵元间距 0.75 m, 基阵孔径为 4.5 m. 矢量阵水平吊放于测量船尾部, 基阵中心入水深度 11.3 m, 试验水域水深约为 30 m. 测量船船尾另外装置有刚性支架, 基阵入水前测量基阵中心至刚性支架间的距离为 0.85 m, 此距离即为声源面距离基阵之间的正横距离. 声源经由缆绳与刚性支架通过滑轮连接, 试验前在缆绳上标记刻度, 方便试验时了解声源的入水深度. 图 9(a) 为水平矢量阵测量系统侧视图. 图 9(b) 为水平矢量阵坐标系定义示意图, 基阵中心 4 号阵元位于坐标系原点.

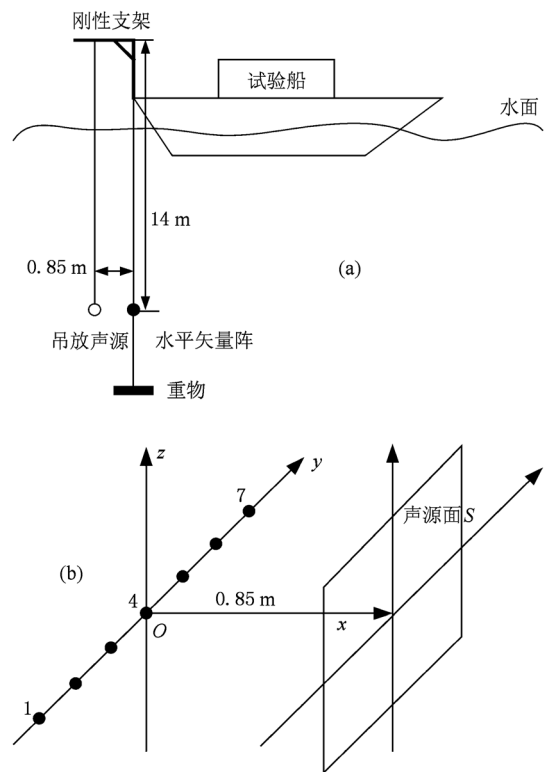


图9 试验布放情况示意图 (a) 水平矢量阵测量系统侧视图; (b) 水平矢量阵坐标系定义示意图

选取单声源实验条件, 标记声源入水深度为 13.6 m, 声源频率为 $f = 2$ kHz, 采样率 $f_s = 32.768$ kHz, 扫描区域 y 向坐标范围为 $-1 \sim 1$ m, z 向坐标范围为 $-5 \sim 5$ m 的平面. 声源由下向上运动, 取运动状态较为平稳的中间段长度为 70 s 的数据进行处理, 此时对应声源起始深度为 13.2 m. 每隔 1 s 对数据分段, 处理数据快拍为 512, 并利用矢量最大似然算法分别对各分段数据进行定位.

图 10 所示为基于矢量最大似然聚焦算法的分段数据定位结果. 由图 10(a) 可知运动倾角约为 2.4° , 由图 10(b) 可知声源运动的平均速度约为 0.07 m/s. 由于试验中声源运动速度较慢, 采取每隔 10 s 对数据分段, 进而生成虚拟阵列坐标, 由此得到的虚拟阵元数为 49 个.

图 11 为分别沿 x 向和 z 向, 在声源所在位置等步长间隔绘制的聚焦空间谱切片. 图 12 稀疏虚拟阵列聚焦空间谱. 定位结果为 $(-1.9, -0.5)$ m, 与声源布放情况符合. 对比可知, MCFB 算法的聚焦分辨率不足, 在空间谱中出现大片的“亮区”, 并存在严重的旁瓣起伏; 同时, 由于湖试试验容易受到基阵布放误差以及水流影响, 同时由于基阵本身各通道之间的幅相不一致性的存在, 使得 MMVDRFB 算法出现严重的性能退化, 动态范围减小至只有 3.5 dB, 无法满足噪声源定位识别的要求. RMMVDRFB 算法在试验数据处理中表现十分稳健, 具有尖锐的聚焦峰尺度, 并能有效压制背景级, 动态范围优于 50 dB.

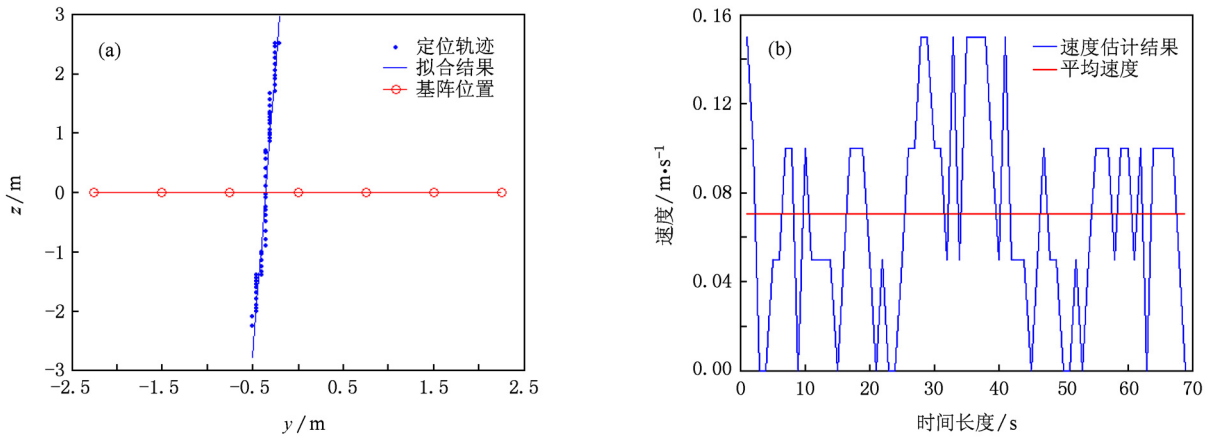


图 10 基于矢量最大似然聚焦算法的运动参数估计结果 (a) 分段数据定位结果; (b) 运动速度估计结果

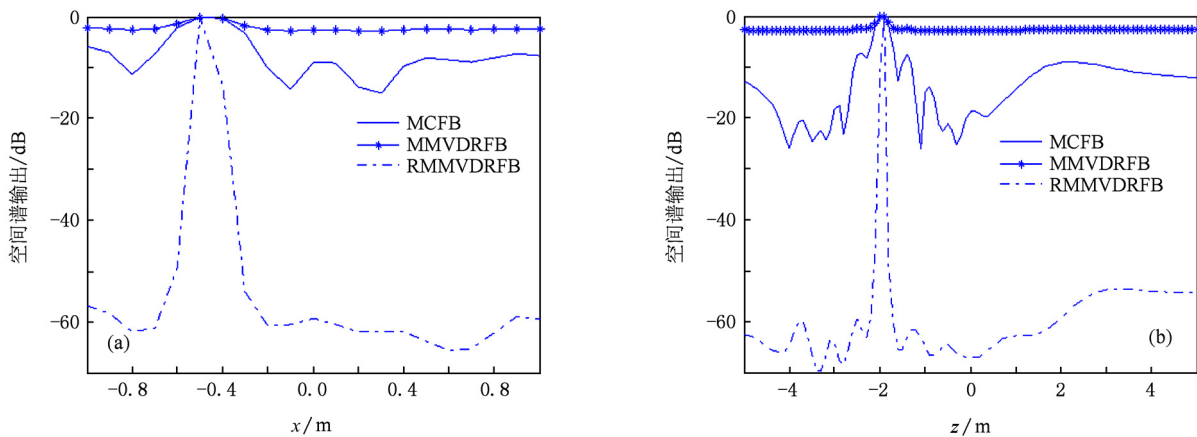


图 11 稀疏虚拟阵列聚焦空间谱切片 (a) 沿 x 向的聚焦空间谱切片; (b) 沿 z 向的聚焦空间谱切片

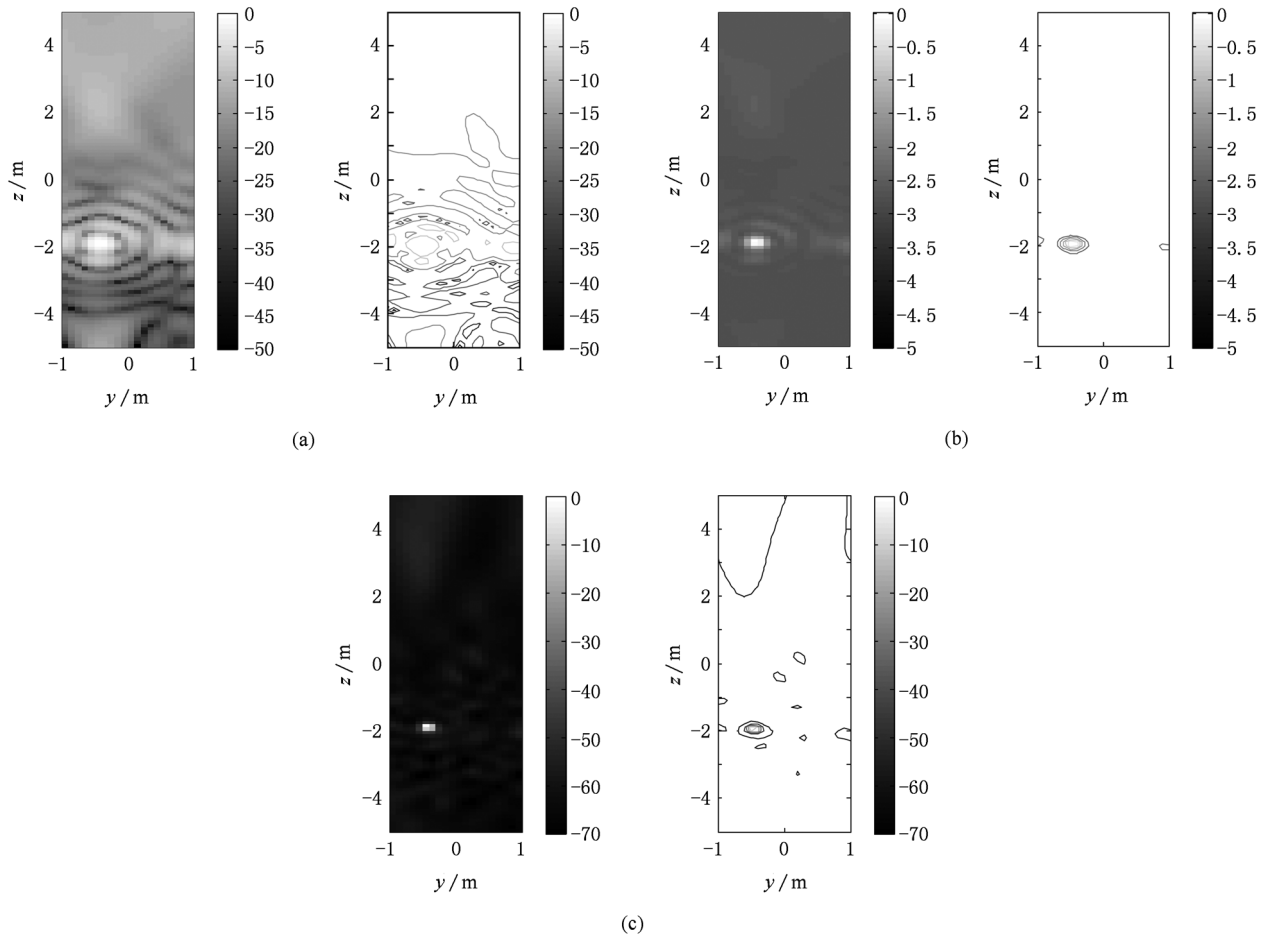


图 12 稀疏虚拟阵列聚焦空间谱 (a) MCFB;(b) MMVDRFB;(c) RMMVDRFB

5. 结 论

提出了一种基于最差性能优化的运动声源稳健聚焦定位识别方法. 该方法基于被动合成孔径原理,采用综合优化手段,通过矢量最大似然聚焦定位算法生成虚拟阵列坐标及数据矩阵,进而利用基于最差性能优化的稀疏虚拟阵列聚焦算法,获取稳健的高分辨定位识别效果. 本研究结果可为运动声源定位识别方法的工程应用提供理论及试验支持. 主要研究内容及结果包括:

1) 提出了基于矢量最大似然聚焦算法的运动参数估计方法. 针对非匀速运动情况,结合矢量阵处理以及最大似然估计方法的优点,在进行定位识别之前,获取各不同时间段下的声源位置、速度和倾角等信息,为虚拟阵列坐标以及数据矩阵的获取提供先验知识.

2) 根据虚拟阵列坐标生成虚拟聚焦导向矢量,将最差性能优化的稳健波束形成理论引入到聚焦处理器设计之中,进而利用二阶锥规划求解最优权,以提高高分辨 MVDR 聚焦算法的稳健性.

3) 理论及仿真研究结果表明,本文提出的 RMMVDRFB 在相同条件下可以获得更大的动态范围、更尖锐的聚焦峰尺度以及更强的背景噪声级压制能力,可以满足噪声源定位识别对于稳健性的指标要求.

4) 通过湖上试验,对 MCFB, MMVDRFB 和本文提出的 RMMVDRFB 共 3 种算法的空间谱效果及优缺点进行了对比分析,验证了 RMMVDRFB 算法在非匀速及存在运动倾角的复杂试验条件下仍具有令人满意的处理效果,在 MMVDRFB 动态范围仅为 3.5dB 的相同试验条件下,该方法的动态范围可优于 50 dB.

- [1] Ferguson B G 1998 *J. Acoust. Soc. Am.* **104** 947
- [2] Nuttall A H, Wilson J H 2000 *J. Acoust. Soc. Am.* **108** 2256
- [3] Cho Y T, Roan M J 2009 *J. Acoust. Soc. Am.* **125** 944
- [4] Bi C X, Chen J, Chen X Z, Li W B 2006 *Acta Phys. Sin.* **55** 1264 (in Chinese) [毕传兴、陈剑、陈心昭、李卫兵 2006 物理学报 **55** 1264]
- [5] Zhang H B, Jiang W K, Wan Q 2008 *Acta Phys. Sin.* **57** 313 (in Chinese) [张海滨、蒋伟康、万泉 2008 物理学报 **57** 313]
- [6] 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]
- [7] Park S H, Kim Y H 2000 *J. Acoust. Soc. Am.* **108** 2719
- [8] Park S H, Kim Y H 2001 *J. Acoust. Soc. Am.* **110** 2326
- [9] Yang D G, Zheng S F, Luo Y G, Lian X M, Jiang X Y 2002 *Acta Acust.* **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]
- [10] Pesavento M, Gershman A B 2001 *IEEE Trans. Sign. Process.* **49** 1310
- [11] Chen J C, Hudson R E, Yao K 2002 *IEEE Trans. Sign. Process.* **50** 1843
- [12] Liu C F, Liao G S 2008 *Acta Electron. Sin.* **36** 581 (in Chinese) [刘聪锋、廖桂生 2008 电子学报 **36** 581]
- [13] Liu C F, Liao G S 2010 *Acta Electron. Sin.* **38** 1249 (in Chinese) [刘聪锋、廖桂生 2010 电子学报 **38** 1249]
- [14] Liu C F, Liao G S 2010 *J. Xidian Univ. (Nat. Sci.)* **37** 1 (in Chinese) [刘聪锋、廖桂生 2010 西安电子科技大学学报(自然科学版) **37** 1]
- [15] Vorobyov S A, Gershman A B, Luo Z Q 2003 *IEEE Trans. Sign. Process.* **51** 313
- [16] Li J, Stoica P, Wang Z S 2003 *IEEE Trans. Sign. Process.* **51** 1702
- [17] Robert G L, Stephen P B 2005 *IEEE Trans. Sign. Process.* **53** 1684
- [18] Yan S F, Ma Y L, Sun C 2006 *Sci. Chin. Ser. E* **36** 153 (in Chinese) [鄢社锋、马远良 2006 中国科学 E 辑 **36** 153]

Robust localization and identification method of moving sound sources based on worst-case performance optimization *

Shi Jie[†] Yang De-Sen Shi Sheng-Guo

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

(Received 10 October 2010; revised manuscript received 27 December 2010)

Abstract

Based on the passive synthetic aperture principle, a new robust high-resolution focused array signal processing method of moving sound source localization and identification is proposed in this paper. By means of the integrated optimization, this method generates the coordinates of a virtual array and the data matrix through the vector maximum likelihood focused algorithm, then utilizes the sparse virtual array focused algorithm based on the worst-case performance optimization to obtain the robust high-resolution localization and recognition effects. The theory and the simulation analysis show that this method is applicable to the complex experimental situations such as non-uniform motion and tipsy array, and the focused spatial spectrum indicates the greater dynamic range, the sharper focused peak, and the stronger ability to suppress the fluctuations of the background noise. The higher robustness and better results of this proposed method are verified in the lake experiment. Under the same experimental condition, the dynamic range of high-resolution MVDR focused algorithm is only 3.5 dB, however, it can reach 50 dB by the proposed method.

Keywords: robustness, localization and identification of the moving noise sound source, vector sensor array, worst-case performance optimization

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

* Project supported by the National Defense Basic Scientific Research Program of China (Grant No. B0820060400) and the National Defense Pre-Research Foundation of China (Grant No. 51310080202).

[†] E-mail: shijie080428@yahoo.com.cn