

基于组合阵列的水下特征线谱近场定位方法

时 洁,杨德森,时胜国

(哈尔滨工程大学水声技术重点实验室,黑龙江哈尔滨 150001)

摘 要: 本文提出了一种基于组合阵列的特征线谱定位方法,该方法仅采用均匀声压阵中心配置单只三维矢量水听器的基阵形式,即可完成近场源方位角、俯仰角和距离的三维参数估计,可为近场聚焦以及近场声全息等噪声源定位识别方法提供可靠的先验知识.该方法利用声源的二阶统计量信息,将三维参数估计问题转化为多个一维搜索问题,从而减少了算法的计算量,且算法无需额外的参数配对算法.

关键词: 矢量水听器;指向性锐化;近场源参数估计;广义 ESPRIT

中图分类号: TB556 **文献标识码:** A **文章编号:** 0372-2112 (2011) 06-1231-07

Near-Field Source Localization Algorithm Based on the Combination Array

SHI Jie, YANG De-sen, SHI Sheng-guo

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

Abstract: A new near-field source parameter estimation method based on the combination array is proposed, which can provide the reliable prior information for the noise sources localization and identification. The form of the array is a uniform pressure sensor array, in whose center there is one three-dimensional vector hydrophone. By utilizing this combination array, the three-dimensional parameters of the near-field sources including the azimuth angle, the elevation angle and the distance can be achieved. This method only uses the second-order statistics information, and transforms the three-dimensional parameter estimation problem into several one-dimensional search problems, so it reduces the computational complexity and does not need additional parameter pairing algorithm.

Key words: vector hydrophone; directivity sharpening; near-field source parameter estimation; generalized ESPRIT

1 引言

对水下目标辐射噪声中的低频线谱成分实施定位,可为近场聚焦以及近场声全息等噪声源定位识别方法提供可靠的先验知识.将该问题转化为近场源参数估计问题,即利用基阵接收数据,同时估计声源的三维空间位置参数,即俯仰角、方位角和距离.从应用目的出发,本文旨在准确而快速的得到辐射噪声中特征线谱的三维参数估计结果,以获得关于声源所在空间位置的先验知识,为重建声源平面的选取提供依据.

根据利用的统计量信息的不同,主要近场源参数估计方法可分为二阶统计量及高阶统计量方法^[1~8].高阶累积量的近场源定位方法作为对传统二阶统计量方法的扩展和完善,可获得高斯噪声抑制、虚拟孔径、完整幅相信息等优点,但由于需要构造高阶累积量矩阵并进行多维参数匹配,计算量较大.因此目前基于二阶统计量的近场源参数估计方法的研究仍然十分活跃.如何在参

数估计性能与计算复杂度之间进行折中,寻求计算简单、更为有效的近场源参数估计方法对于实际工程应用具有重要意义.文献[4]中利用广义 ESPRIT 算法对近场源距离和方位角二维信息进行估计,该方法仅利用声源的二阶统计量信息,运算效率高,但由于仅采用行列阵形式,无法得到声源俯仰角估计结果;文献[5]利用文献[4]的结果,结合十字阵阵型特点,得到了一种近场源的方位角、俯仰角和距离的三维参数估计方法,然而采用十字阵阵型,将会大大增加系统负担.

矢量水听器是由传统的声压水听器和质点振速水听器复合而成,可以同步、共点测量声场空间一点处的声压和质点振速的三个正交分量,这不仅有助于改善水声系统的性能,而且也拓宽了信号处理空间^[9].

本文提出了一种基于组合阵列的特征线谱定位方法,该方法仅采用均匀声压阵中心配置单只三维矢量水听器的基阵形式,即可完成近场源方位角、俯仰角和距离三维参数估计.该方法利用声源的二阶统计量信息,

将三维参数估计问题转化为多个一维搜索问题,从而减少算法的计算量,且算法无需额外的参数配对算法.通过仿真和湖试试验验证了该方法的正确性和有效性.

2 组合阵近场信号模型

如图 1 所示,组合阵由分布于 z 轴的均匀声压线列阵,和在基阵中心位置共用的一只三维矢量水听器组成.设阵元个数为 $2M+1$,阵元间距为 d .存在 N 个位于基阵近场区域的非相干声源.

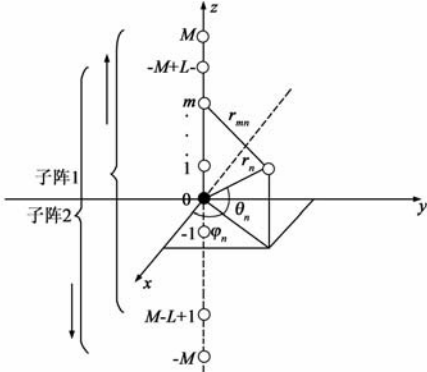


图1 组合阵近场信号模型

设中心阵元为参考阵元,则 m 号阵元接收到的声压信号可表示为:

$$x_m(t) = \sum_{n=1}^N s_n(t) e^{j\tau_{nm} + n_m(t)}, -M \leq m \leq M; 1 \leq n \leq N \quad (1)$$

其中, $s_n(t)$ 为参考阵元接收到的 n 号声源的信号, $n_m(t)$ 为 m 号阵元接收到的噪声信号, τ_{nm} 为 n 号声源在参考阵元和 m 号阵元之间的相位差.设 r_n 为 n 号声源至参考阵元的距离, θ_n 为 n 号声源的入射俯仰角,经 Fresnel 近似后,声压阵接收信号的矩阵形式可表示为:

$$\mathbf{X} = \mathbf{A}\mathbf{S} + \mathbf{N} \quad (2)$$

其中, $\mathbf{A} = [\mathbf{a}(\theta_1, r_1), \mathbf{a}(\theta_2, r_2), \dots, \mathbf{a}(\theta_N, r_N)]$,

$$\mathbf{a}(\theta_n, r_n) = \begin{bmatrix} a_{n, -M} \\ \vdots \\ a_{n, M} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} e^{j\left(\frac{2\pi d}{\lambda} \sin\theta_n\right)M + \left(\frac{\pi d^2}{\lambda r_n} \cos^2\theta_n\right)M^2} \\ \vdots \\ e^{-j\left(\frac{2\pi d}{\lambda} \sin\theta_n\right)M + \left(\frac{\pi d^2}{\lambda r_n} \cos^2\theta_n\right)M^2} \end{bmatrix}$$

布置于组合阵中心的阵元为单只三维矢量水听器,其接收信号可表示为:

$$\begin{cases} p(t) = \sum_{n=1}^N s_n(t) + n_0(t) \\ v_x(t) = \sum_{n=1}^N s_n(t) \cos\theta_n \cos\varphi_n e^{-j\phi(r_n)} + n_{v_x}(t) \\ v_y(t) = \sum_{n=1}^N s_n(t) \cos\theta_n \sin\varphi_n e^{-j\phi(r_n)} + n_{v_y}(t) \\ v_z(t) = \sum_{n=1}^N s_n(t) \sin\theta_n e^{-j\phi(r_n)} + n_{v_z}(t) \end{cases} \quad (3)$$

其中 $\phi(r_n) = \arg\left[\rho c \frac{(1 - jkr_n)jkr_n}{1 + (kr_n)^2}\right]$ 为声场中由复阻抗引起的声压和振速之间的相位差.

矢量水听器接收信号的矩阵形式为:

$$\mathbf{S}_v = [\mathbf{p} \ v_x \ v_y \ v_z]^T \quad (4)$$

3 基于组合阵的近场源参数估计方法

3.1 基于广义 ESPRIT 算法的俯仰角估计

3.1.1 谱峰搜索广义 ESPRIT 算法 (Spectral Search-Based Generalized ESPRIT: SSBGE)

将线列阵划分为两个子阵.子阵 1 由自下而上的 L 个阵元组成,序号由 $M-L+1$ 至 M 依次增大.子阵 2 由自上而下的 L 个阵元组成,序号倒序排列由 $-M+L-1$ 至 $-M$ 依次减小.则有:

$$\begin{cases} \mathbf{X}_1 = \mathbf{A}_1 \mathbf{S} + \mathbf{N}_1 \\ \mathbf{X}_2 = \mathbf{A}_2 \mathbf{S} + \mathbf{N}_2 \end{cases} \quad (5)$$

$$\begin{cases} \mathbf{A}_1 = [\mathbf{a}_1(\theta_1, r_1), \mathbf{a}_1(\theta_2, r_2), \dots, \mathbf{a}_1(\theta_N, r_N)] \\ \mathbf{A}_2 = [\mathbf{a}_2(\theta_1, r_1), \mathbf{a}_2(\theta_2, r_2), \dots, \mathbf{a}_2(\theta_N, r_N)] \end{cases} \quad (6)$$

$$\begin{cases} \mathbf{a}_1(\theta_n, r_n) = \begin{bmatrix} a_{n, M-L+1}^{(1)} \\ \vdots \\ a_{n, M}^{(1)} \end{bmatrix} \\ \mathbf{a}_2(\theta_n, r_n) = \begin{bmatrix} a_{n, -M+L-1}^{(2)} \\ \vdots \\ a_{n, -M}^{(2)} \end{bmatrix} \end{cases} = \begin{cases} \begin{bmatrix} e^{-j\left(\frac{2\pi d}{\lambda} \sin\theta_n\right)(M-L+1) + \left(\frac{\pi d^2}{\lambda r_n} \cos^2\theta_n\right)(M-L+1)^2} \\ \vdots \\ e^{-j\left(\frac{2\pi d}{\lambda} \sin\theta_n\right)M + \left(\frac{\pi d^2}{\lambda r_n} \cos^2\theta_n\right)M^2} \end{bmatrix} \\ \begin{bmatrix} e^{j\left(\frac{2\pi d}{\lambda} \sin\theta_n\right)(M-L+1) + \left(\frac{\pi d^2}{\lambda r_n} \cos^2\theta_n\right)(M-L+1)^2} \\ \vdots \\ e^{j\left(\frac{2\pi d}{\lambda} \sin\theta_n\right)M + \left(\frac{\pi d^2}{\lambda r_n} \cos^2\theta_n\right)M^2} \end{bmatrix} \end{cases} \quad (7)$$

其中, \mathbf{X}_1 、 \mathbf{X}_2 分别为子阵接收信号矩阵. \mathbf{A}_1 、 \mathbf{A}_2 分别为子阵方向矢量矩阵.

令 \mathbf{U}_S 为采样协方差矩阵 \mathbf{R} 的信号子空间.必存在一个 $N \times N$ 维的满秩矩阵 \mathbf{G} 满足 $\mathbf{U}_S = \mathbf{A}\mathbf{G}$:

$$\mathbf{U}_S = \begin{bmatrix} \text{last}(2M+1-L) \text{ rows} \\ \mathbf{U}_{S1} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \mathbf{U}_{S2} \\ \text{first}(2M+1-L) \text{ rows} \end{bmatrix} \quad (8)$$

其中 $\mathbf{U}_{S1} = \mathbf{A}_1 \mathbf{G}$, $\mathbf{U}_{S2} = \mathbf{J} \mathbf{A}_2 \mathbf{G}$, \mathbf{J} 为反对角阵.

对俯仰角实施扫描,在扫描角 θ 上定义对角矩阵 $\Psi(\theta)$ 以及谱峰搜索函数分别为:

$$\Psi(\theta) = \text{diag}[e^{j\left(\frac{4\pi d}{\lambda} \sin\theta\right)(M-L+1)}, \dots, e^{j\left(\frac{4\pi d}{\lambda} \sin\theta\right)M}] \quad (9)$$

$$P_{\text{SSBGE}}(\theta) = \frac{1}{\det\{\mathbf{U}_{S1}^H \mathbf{J} \mathbf{U}_{S2} - \mathbf{U}_{S1}^H \Psi(\theta) \mathbf{U}_{S1}\}} \quad (10)$$

进行谱峰搜索即可得到俯仰角估计 $\hat{\theta}_n$.

3.1.2 求根广义 ESPRIT 算法 (Search-Free Generalized ESPRIT: SFGE)

如果令子阵阵元个数 $L = M$, 即可得到一种计算更加高效的基于多项式求根的无需谱峰搜索的广义 ESPRIT 算法. 在子阵 1 中, 阵元坐标 $z_1 \leq z_2 \leq \dots \leq z_M$. 此时的 $\Psi(\theta)$ 可写为:

$$\begin{aligned} \Psi_{S-F}(\theta) &= \text{diag}[e^{j\Psi_1}, e^{j\Psi_2}, \dots, e^{j\Psi_M}] \\ &= \text{diag}[e^{j(\frac{4\pi}{\lambda}\sin\theta)z_1}, e^{j(\frac{4\pi}{\lambda}\sin\theta)z_2}, \dots, e^{j(\frac{4\pi}{\lambda}\sin\theta)z_M}] \end{aligned} \quad (11)$$

令 $z = e^{j\Psi_1}$, 则有:

$$\Psi_{S-F}(z) = \text{diag}[z^{z_1/z_1}, z^{z_2/z_1}, \dots, z^{z_M/z_1}] \quad (12)$$

则式(10)中的谱峰搜索函数可用多项式表示:

$$P_{S-F}(z) = \det\{U_{S1}^H J U_{S2} - U_{S1}^H \Psi_{S-F}(z) U_{S1}\} \quad (13)$$

选取 N 个分布在单位圆上的多项式 $P_{S-F}(z)$ 的根 $\hat{z}_n (n = 1, 2, \dots, N)$ 来估计各声源俯仰角.

$$\hat{\theta}_n = \sin^{-1}\left(\frac{\lambda}{4\pi d} \arg\{\hat{z}_n\}\right) \quad (14)$$

3.2 基于一维 MVDR 谱峰搜索的距离估计

由近场信号模型可知, 方向矢量为俯仰角和距离的联合函数, 在得到俯仰角估计结果 $\hat{\theta}_n$ 的基础上, 可分别对应 N 个俯仰角估值构造方向矢量, 并进行 N 次一维距离搜索来获得声源距离信息. 设在 $\hat{\theta}_n$ 上对距离 r 进行搜索的方向矢量写作:

$$\mathbf{a}_r(r|\hat{\theta}_n) = \begin{bmatrix} a_{n,-M}^{(r)} \\ \vdots \\ a_{n,M}^{(r)} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} e^{j\left(\frac{2\pi d}{\lambda}\sin\hat{\theta}_n\right)M + \left(\frac{\pi d^2}{\lambda r}\cos^2\hat{\theta}_n\right)M^2} \\ \vdots \\ e^{-j\left(\frac{2\pi d}{\lambda}\sin\hat{\theta}_n\right)M + \left(\frac{\pi d^2}{\lambda r}\cos^2\hat{\theta}_n\right)M^2} \end{bmatrix} \quad (15)$$

利用 MVDR 处理器进行距离谱峰搜索获得各声源距离估计 \hat{r}_n .

$$P(r|\hat{\theta}_n) = \frac{1}{\mathbf{a}_r^H(r|\hat{\theta}_n)\mathbf{R}^{-1}\mathbf{a}_r(r|\hat{\theta}_n)} \quad (16)$$

3.3 基于单矢量水听器指向性锐化的方位角估计

将组合阵中心配置的单只矢量水听器等效为集合

的微体积阵, 并利用 MVDR 方法实现矢量水听器指向性的锐化^[10,11]. 在得到声源俯仰角和距离信息之后, 利用单只矢量水听器获得方位角估计结果.

在任意扫描方位角 φ 上, 与俯仰角及距离估计结果 $(\hat{\theta}_n, \hat{r}_n)$ 对应的单位矢量 $\mathbf{a}_v(\hat{\theta}_n)$ 及复阻抗补偿矢量 $\mathbf{D}(\hat{r}_n)$ 可分别写为:

$$\mathbf{a}_v(\hat{\theta}_n) = [1 \quad \cos\hat{\theta}_n \cos\varphi \quad \cos\hat{\theta}_n \sin\varphi \quad \sin\hat{\theta}_n]^T \quad (17)$$

$$\mathbf{D}(\hat{r}_n) = [1 \quad e^{j\phi(\hat{r}_n)} \quad e^{j\phi(\hat{r}_n)} \quad e^{j\phi(\hat{r}_n)}]^T \quad (18)$$

则在该扫描方位角 φ 的矢量水听器 MVDR 输出功率为 $P(\varphi|(\hat{\theta}_n, \hat{r}_n))$, 进行谱峰搜索即可获得方位角估计结果 $\hat{\varphi}_n$.

$$\begin{aligned} P(\varphi|(\hat{\theta}_n, \hat{r}_n)) &= \frac{1}{(\mathbf{D}(\hat{r}_n) \odot \mathbf{a}_v(\hat{\theta}_n))^H \mathbf{R}_v^{-1} (\mathbf{D}(\hat{r}_n) \odot \mathbf{a}_v(\hat{\theta}_n))} \end{aligned} \quad (19)$$

其中, $\mathbf{R}_v = E[\mathbf{S}_v \mathbf{S}_v^H]$ 为单只矢量水听器的数据协方差矩阵.

4 近场源参数估计性能分析

4.1 空间谱分析

考虑 11 元组合阵, 此时 $M = 5$, 设子阵阵元个数 $L = M = 5$, 阵元间距 $d = \lambda/4$, 小于 12.5λ 可认为声源位于基阵近场. 双声源为非相干单频线谱信号, 频率分别为 $f_1 = 125\text{Hz}$ 和 $f_2 = 150\text{Hz}$, 俯仰角分别为 $\theta_1 = -5^\circ$ 和 $\theta_2 = 5^\circ$, 方位角分别为 $\varphi_1 = 0^\circ$ 和 $\varphi_2 = 60^\circ$, 距离分别为 $r_1 = 6\lambda = 60\text{m}$ 和 $r_2 = 4\lambda = 40\text{m}$. 设水中声速 1500m/s , 采样率 $f_s = 1\text{kHz}$, 数据快拍数为 1024, 信噪比为 15dB.

图 2(a) 为基于广义 ESPRIT 的俯仰角估计谱图, 图中曲线表示 SSBGE 俯仰角估计谱图, * 号表示采用 SFGE 算法得到的俯仰角估计值. 图 2(b) 为基于一维 MVDR 谱峰搜索的距离估计谱图. 图 2(c) 为基于单矢量水听器指向性锐化的方位角估计谱图. 以上的三幅谱图依次显示了该研究方法各个步骤的处理结果, 且估计结果与预设参数吻合, 证明了该方法的正确性.

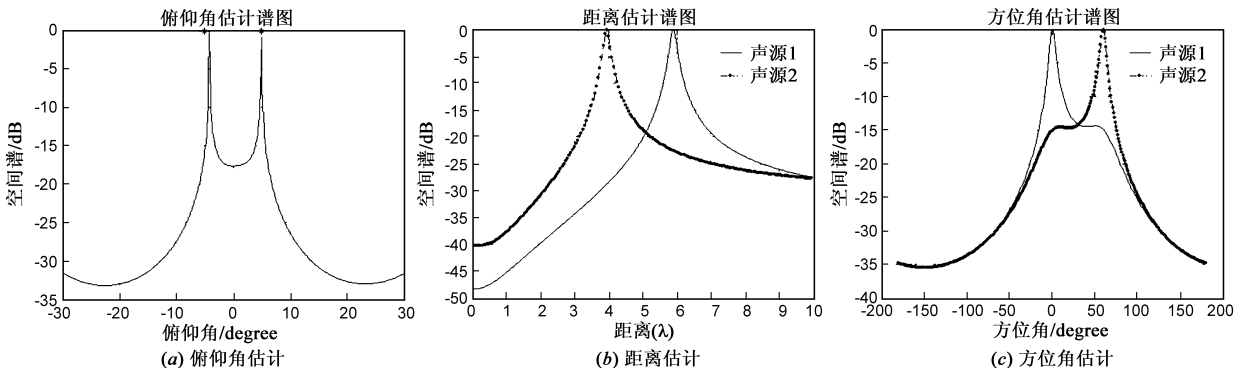


图2 基于组合阵的近场参数估计空间谱图

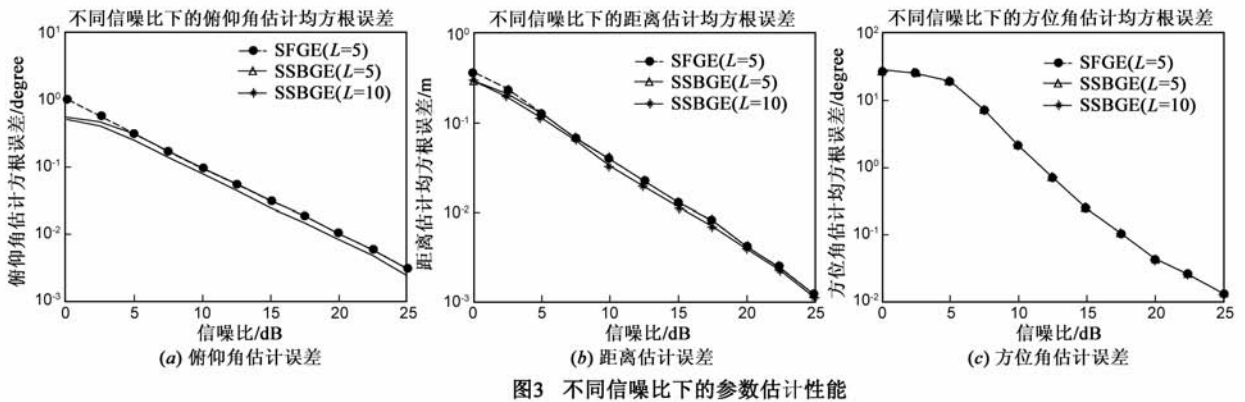


图3 不同信噪比下的参数估计性能

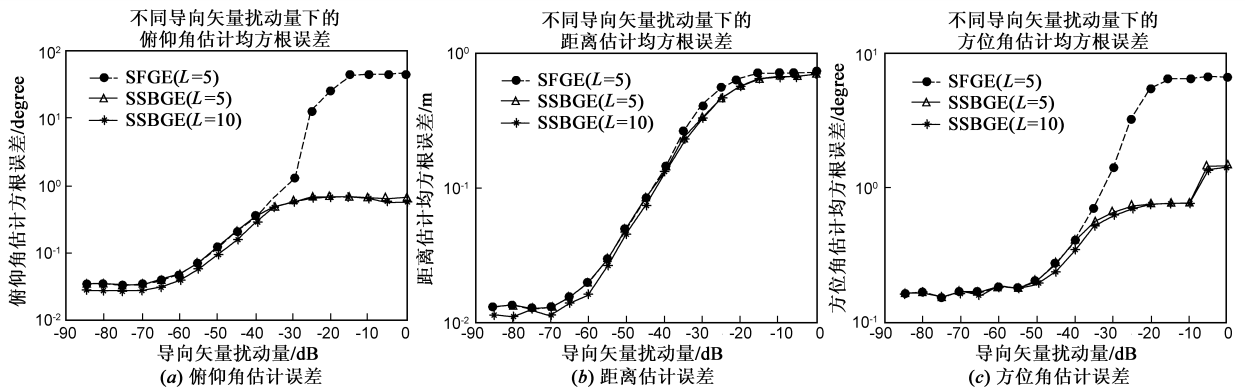


图4 不同导向矢量扰动量下的参数估计性能

4.2 参数估计性能分析

4.2.1 不同信噪比条件下的估计性能分析

仿真参数与空间谱分析中使用的参数相同,固定快拍数为 1024,共进行 200 次 Monte-carlo 试验,讨论非相干双声源在不同信噪比下的估计性能.该仿真对子阵阵元个数 $L=5$ 的求根广义 ESPRIT 算法(以下简称 SFGE ($L=5$))、子阵阵元个数 $L=5$ 的谱峰搜索广义 ESPRIT 算法(以下简称 SSBGE ($L=5$))以及子阵阵元个数 $L=10$ 的谱峰搜索广义 ESPRIT 算法(简称 SSBGE ($L=10$))这三种配置方案下的三维参数估计性能进行分析,可知:

(1)SFGE 算法虽然具有无须谱峰搜索,计算效率更高的优点,但是由于实际利用的阵元个数为基阵总阵元数的一半,基阵利用率降低,因此估计精度较基阵利用率高的 SSBGE 算法要低.并且 SFGE 算法在低信噪比条件下也表现出性能退化的缺点.

(2)除了在俯仰角估计这一步骤存在计算量的不同,在之后的距离和方位角估计中,SFGE 和 SSBGE 均使用一维搜索的方式获得参数估计结果,因此计算量完全取决于声源个数的多少.

(3)俯仰角估计对距离估计具有误差传递性,而方位角估计是利用矢量水听器声压及振速共同得到,因此来自声压计算结果传递的误差被弱化,但方位角估计的信噪比门限较高.

4.2.2 不同导向矢量扰动量条件下的估计性能分析

定义导向矢量扰动量如下:

$$\text{Disturb} = 10 \log_{10} \left(\frac{\| \delta_A \|^2_F}{\| A^{[\text{true}]} \|^2_F} \right) \quad (20)$$

导向矢量扰动量可看作是失配问题,可以包括导向矢量在频率-波数空间的失配,即声速误差、信号频率误差、基阵坐标误差及声源入射方向存在误差等.利用该扰动量,可以简单而又全面的描述算法在失配条件下的综合性能.基本参数不变,固定信噪比为 15dB,快拍数为 1024,共进行 200 次 Monte-carlo 试验,讨论非相干双声源在不同导向矢量扰动条件下的参数估计性能.将图 4 所示的参数估计性能进行对比分析,主要结果有:

(1)存在小扰动量时,SSBGE ($L=10$)的性能优于 SFGE ($L=5$)和 SSBGE ($L=10$).但是,随着扰动量的加大,SFGE ($L=5$)的俯仰角估计精度严重恶化,而 SSBGE ($L=5$)及 SSBGE ($L=10$)的性能则相对较为稳健,这说明 SSBGE 算法较 SFGE 算法具有更强的抗扰动能力.

(2)尽管 SSBGE 的俯仰角估计结果优于 SFGE,但由于基于一维 MVDR 谱峰搜索的距离估计方法在扰动存在的情况下出现性能退化,因此 SFGE ($L=5$)、SSBGE ($L=5$)以及 SSBGE ($L=10$)三种方案的距离估计性能相当.

(3)与不同信噪比下的方位角估计结果不同,扰动

量对方位角估计结果的影响较大,需要对单只矢量水听器指向性锐化方法的性能作进一步分析.

4.3 矢量水听器指向性锐化性能分析

4.3.1 信噪比对估计性能的影响

设声源频率 $f = 75\text{Hz}$, 采样率 $f_s = 1\text{kHz}$. 设声源距离矢量水听器的距离为 $r = 1.5\lambda = 30\text{m}$, 快拍数为 1024. 在获知俯仰角、方位角及距离三者之二时, 就可以利用单只矢量水听器指向性锐化方法估计第三参数. 首先讨论方位角及俯仰角估计结果与信噪比及声源入射方位角和俯仰角之间的关系.

图 5 为不同信噪比条件下的估计误差曲面. 在信噪比相同的条件下, 俯仰角估计精度高于方位角估计精度. 俯仰角估计误差与入射俯仰角和方位角无关; 方位角估计误差则与入射方位角无关, 而与入射俯仰角有关, 相同信噪比条件下, 声源入射俯仰角越接近 90° , 方位角估计误差越大.

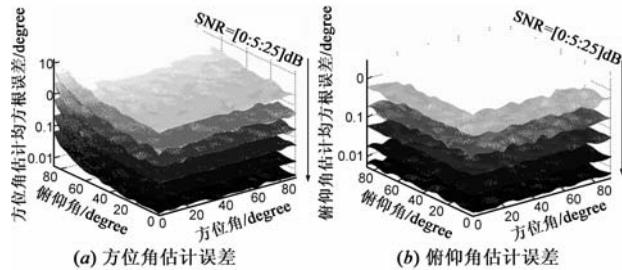


图 5 不同信噪比条件下的估计误差曲面

4.3.2 相位误差对估计性能的影响

讨论声压及振速通道较其他通道分别存在 10° 和 30° 相位误差时, 方位角估计的均方根误差与声源入射方位角和俯仰角之间的关系.

图 6(a) 和 (d) 分别为声压通道和 z 向振速通道较其他通道存在相位误差时的方位角估计均方根误差. 两者的规律表明: 方位角估计误差与入射俯仰角有关, 存在相同程度误差时, 声源入射俯仰角越接近 90° , 则方位角估计误差越大.

图 6(b) 为 x 向振速通道较其他通道存在相位误差时的方位角估计均方根误差. 方位角估计误差主要与入射方位角有关: 存在相同程度误差时, 入射方位角在 45° 左右时的方位角估计误差最大, 入射方位角越接近 0° 和 90° , 则方位角估计误差越小, 且 90° 附近的估计误差小于 0° 附近的估计误差.

图 6(c) 为 y 向振速通道较其他通道存在相位误差时的方位角估计均方根误差. 方位角估计误差同时与入射俯仰角和方位角有关: 存在相同程度误差时, 随着俯仰角的增大, 方位角估计误差逐渐增大; 入射方位角在 30° 到 60° 之间时的方位角估计误差大于其他入射方位角时的估计误差, 且随着俯仰角的增大, 方位角估计

误差最大处所对应的入射方位角由 30° 逐渐向 60° 移动.

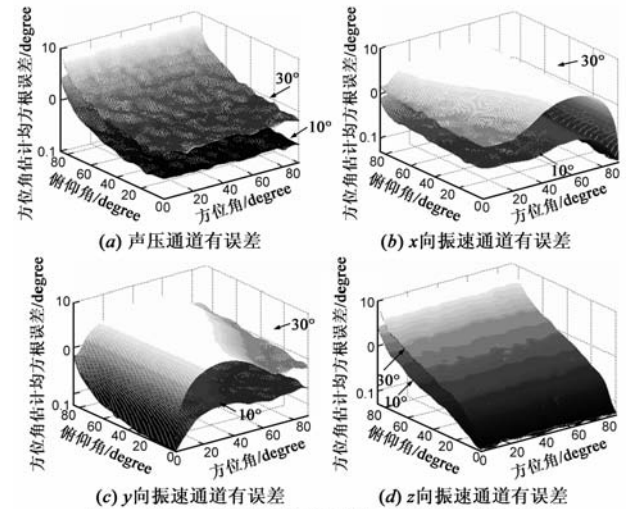


图 6 方位角估计均方根误差与声源入射方位角和俯仰角之间的关系

5 湖试试验研究

在松花湖 2008 年 10 月组织的湖试试验中, 构建水平矢量阵测试系统进行声源定位识别试验. 组合阵列由其中 7 只矢量水听器中的声压通道及中心配置的三维矢量水听器构成, 各阵元由 -3 至 3 依次编号, 0 号阵元位于参考坐标系原点. 基阵阵元间距 0.75m , 基阵孔径为 4.5m . 该基阵水平吊放于测量船尾部, 基阵中心入水深度 11.3m , 试验水域水深约为 30m . 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 0.85m , 此距离即为声源面距离基阵之间的距离. 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 7(a) 为试验布放侧视图, 图 7(b) 为组合阵坐标系定义示意图, 其中定义与 xoy 平面的夹角为俯仰角, 与 x 正向的夹角为方位角.

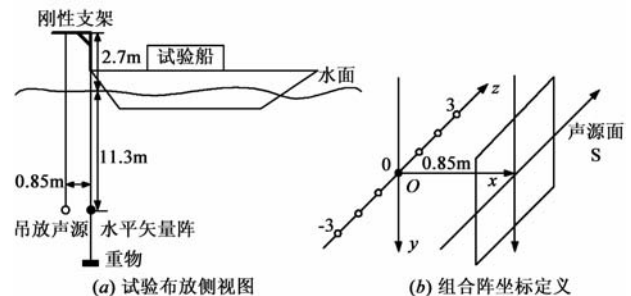


图 7 试验情况示意图

对一静止试验工况进行分析, 信号频率 500Hz . 静止声源布放时与矢量阵之间的水平距离为 0.85m , 声源入水深度在基阵中心入水深度的下方 1.5m , 则可知该声源坐标为 $(0.85, 1.5, -0.25)$ (单位: m). 图 8 分别为利用组合阵列近场源参数估计方法得到的俯仰角、距

离以及方位角估计结果.

俯仰角估计结果为 -8.3° , 距离估计结果为 1.73m, 方位角估计结果为 59° . 则声源位置坐标估计结果为 (0.88, 1.46, -0.25) (单位:m). 可知 x 向估计精度优于

4%, y 向估计精度优于 3%. 试验结果表明基于组合阵列的近场源参数估计方法具有较高的估计精度, 可用于特征线谱的近场定位.

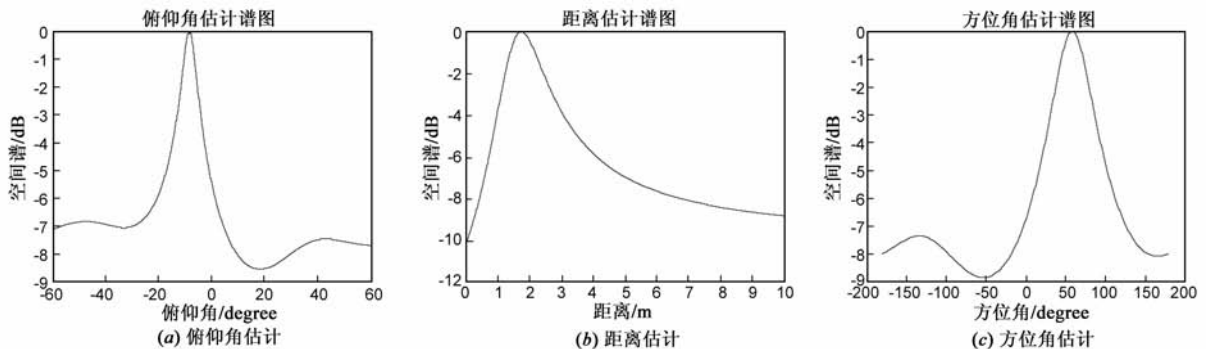


图8 组合阵列近场源参数估计结果

6 结论

本文研究了基于组合线列阵的近场源参数估计方法, 可用于对特征线谱的近场定位, 并为近场聚焦以及近场声全息等噪声源定位识别方法提供可靠的先验知识. 该方法仅采用均匀声压阵中心配置单只三维矢量水听器的基阵形式, 即可完成对近场源方位角、俯仰角和距离的三维参数估计, 可在不损失估计精度的基础上, 减少系统的复杂程度. 通过仿真及湖试试验研究, 证明了该方法的正确性和有效性. 主要结论有:

(1) 该近场源参数估计方法的核心计算环节是将近场源参数联合估计问题中的三维搜索转化为多次一维搜索, 且搜索次数与声源个数有关. 该方法仅利用了信号的二阶统计量信息, 且估计参数间能实现自动配对, 因此新算法具有计算量较小、实现简单的优点.

(2) 该算法的性能分析表明, 俯仰角估计对距离估计具有误差传递性, 而方位角估计是利用矢量水听器声压及振速共同得到, 因此来自声压计算结果传递的误差被弱化, 但方位角估计的信噪比门限较高.

(3) 单只矢量水听器可视为一等效微体阵, 利用指向性锐化技术, 可在已知俯仰角、距离和方位角三者之二的条件下, 对第三个参数进行估计. 对矢量水听器指向性锐化性能进行分析可知, 该方法的估计性能与信噪比、声波入射角度以及通道间的相位误差存在重要关系.

参考文献

- [1] Grosicki E, Meraim K A, Hua Y. A weighted linear prediction method for near-field source localization[J]. IEEE Trans Signal Processing, 2005, 53(10): 3651 - 3660.
- [2] J C Chen, R E Hudson, K Yao. Maximum likelihood source localization and unknown sensor location estimation for wideband

signals in the near field[J]. IEEE Trans Signal Processing, 2002, 50(8): 1843 - 1854.

- [3] H S Hung, S H Chang, C H Wu. Nearfield source localization using MUSIC with polynomial rooting[J]. Journal of Marine Science and Technology, 1998, 6(1): 1 - 7.
- [4] Wanjun Zhi, Michael Yan-Wah Chia. Near-field source localization via symmetric subarrays[J]. IEEE Signal Processing Letters, 2007, 14(6): 409 - 412.
- [5] 王波, 赵彦平, 侯承舜. 基于二阶统计量的近场源三维参数估计方法[J]. 吉林大学学报(信息科学版), 2008, 26(4): 333 - 337.
WANG Bo, ZHAO Yan-ping, HOU Cheng-shun. Method for three dimensional parameters estimation of near field sources based on second statistics[J]. Journal of Jilin University (Information Science Edition), 2008, 26(4): 333 - 337. (in Chinese)
- [6] 陈建峰, 张贤达, 吴云韬. 近场源距离、频率及到达角联合估计算法[J]. 电子学报, 2004, 32(5): 803 - 806.
CHEN Jian-feng, ZHANG Xian-da, WU Yun-tao. An algorithm for jointly estimation range, DOA and frequency of near field source[J]. Acta Electronica Sinica, 2004, 32(5): 803 - 806. (in Chinese)
- [7] Yuen N, Friedlander B. Performance analysis of high order ESPRIT for localization of near-field sources[J]. IEEE Trans Signal Processing, 1998, 46(3): 709 - 719.
- [8] 吴云韬, 侯朝焕, 王荣, 孙小东. 一种基于高阶累积量的近场源距离、频率和方位联合估计算法[J]. 电子学报, 2005, 33(10): 1893 - 1896.
WU Yun-tao, HOU Chao-huan, WANG Rong, SUN Xiao-dong. Joint range DOA's and frequencies estimation of multiple near-field sources using cumulant[J]. Acta Electronica Sinica, 2005, 33(10): 1893 - 1896. (in Chinese)
- [9] 陈新华, 蔡平, 惠俊英. 声矢量阵指向性[J]. 声学学报, 2004, 28(2): 141 - 144.
CHEN Xinhua, CAI Ping, HUI Junying. Directivity of acoustic

vector array[J]. Acta Acoustic, 2004, 28(2): 141 - 144. (in Chinese)

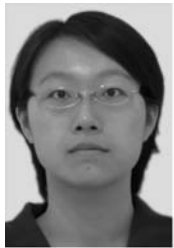
- [10] 余华兵,刘宏,等.小尺度声传感器的指向性锐化技术研究[J].声学学报,2000,25(4):319 - 322.

YU Huang, LIU Hong, et al. Study on directivity sharpening of small sensor[J]. Acta Acoustic, 2000, 25(4): 319 - 322. (in Chinese)

- [11] 周江涛,倪明,孟洲.光纤矢量水听器指向性锐化技术研究[J].声学技术,2007,26(5):1001 - 1004.

ZHOU Jiang-tao, NI Ming, MENG Zhou. Study on directivity sharpening of optical fiber acoustic-vector sensor[J]. Technical Acoustics, 2007, 26(5): 1001 - 1004. (in Chinese)

作者简介



时 洁 女,1982 年出生,博士学位,讲师.
研究方向为减振降噪及声矢量信号处理.
E-mail: shijie080428@yahoo.com.cn



杨德森 男,1957 年出生,博士学位,教授,
博士生导师.研究方向为水声信号处理、减
振降噪和矢量声学.



时胜国 男,1973 年出生,博士学位,教授,
博士生导师.研究方向为水下噪声与减振降
噪.