

基于声压振速联合处理的矢量阵旋转 不变子空间方位估计方法

姚直象, 姜可宇, 郭瑞, 陈亦刚

(海军工程大学 电子工程学院, 湖北·武汉 430033)

摘要: 为提高声矢量阵旋转不变子空间法方位估计性能, 提出一种基于声压振速联合处理的算法。该算法构造了声矢量阵声压和组合振速的互协方差矩阵, 将均匀间隔引导角下的系列互协方差矩阵取均值, 作为引导角未知的互协方差矩阵, 然后进行旋转不变子空间(ESPRIT)方位估计。仿真和试验结果表明, 在低信噪比时该算法比现有常规算法有更好的性能。该算法基于矢量传感器声压和振速的相干性原理, 充分利用声压振速组合指向性抗干扰能力, 可以更好地抑制各向同性干扰, 提高阵列的处理增益, 从而有更好的方位估计性能。

关键词: 旋转不变子空间; 声矢量阵; 方位估计; 联合处理

中图分类号: TB 56 **文献标志码:** A **文章编号:** 1001-0645(2012)05-0513-05

An Improved Bearing Estimation Algorithm Using Acoustic Vector Sensor Array Based on Rotational Invariance Technique

YAO Zhi-xiang, JIANG Ke-yu, GUO Rui, CHEN Yi-gang

(College of Electronic Engineering, Naval University of Engineering, Wuhan, Hubei 430033, China)

Abstract: To improve the performance of general bearing estimation algorithm using acoustic vector sensor array (AVSA) with rotational invariance technique (ESPRIT), an improved algorithm is proposed and carried out in this paper, which is based on the combination processing of pressure and particle velocity. The cross-covariance matrix of pressure and particle velocity was constructed by taking the mean value of cross-covariance matrixes under even-spacing driving angles and using ESPRIT. Simulation and test result on the lake environment show that the proposed algorithm is more effective than existing algorithms in resolution and accuracy under the case of low signal-to-noise ratio. The foundation of improved algorithm is the principle of coherency between pressure and particle velocity, which could suppress interference strongly in isotropic noise field. Moreover, with the use of ESPRIT algorithm, the AVSA could obtain much more gain and have advanced performance in azimuth angle estimation.

Key words: rotational invariance technique (ESPRIT); acoustic vector sensor array; bearing estimation; combined processing

在雷达、声纳、通信、地震等领域广泛地使用传感器阵列来估计波达方向(DOA), 发展了常规波束形成算法和具有高方位分辨能力的空间谱估计技术, 在空间谱估计领域有两类经典的子空间类算法,

即多重信号分类(MUSIC)算法和旋转不变子空间(ESPRIT)算法^[1]。声矢量传感器可同步、共点拾取声场的声压和质点振速信息, 提供较传统声压传感器更多的信息量, 由矢量传感器组成的声矢量阵在

收稿日期: 2010-11-18

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(50909096)

作者简介: 姚直象(1976—), 男, 博士, 副教授, E-mail: whyaozx@163.com.

通信作者: 姜可宇(1974—), 男, 博士, 副教授, E-mail: jiangky828@163.com.

信号检测和方向估计方面更有优势. 近年来, 包括声矢量阵高分辨方位估计算法在内的声矢量信号处理成为研究热点^[2-10].

二维声矢量传感器由一个声压传感器和两个正交的振速传感器组成, 由其组成的声矢量阵可提供声压输出 $\mathbf{P}(t)$ 、两轴振速输出 $\mathbf{v}_x(t)$ 和 $\mathbf{v}_y(t)$, 通过引入参考方位后可得组合振速 $\mathbf{v}_c(t)$, 声压与组合振速联合处理可提高抗干扰能力^[10]. 文献[10]中提出了声矢量阵 $[\mathbf{P}(t) + \mathbf{v}_c(t)] \mathbf{v}_c(t)$ 组合的 MUSIC 方位估计算法, 在低信噪比时具有较好的性能. 与 MUSIC 算法不同的是, ESPRIT 算法不需要进行空间方位搜索, 而组合振速 $\mathbf{v}_c(t)$ 是与引导方位角对应的, 因此现有矢量阵 ESPRIT 算法无法利用 $[\mathbf{P}(t) + \mathbf{v}_c(t)] \mathbf{v}_c(t)$ 组合的高增益性能.

作者提出基于 $[\mathbf{P}(t) + \mathbf{v}_c(t)] \mathbf{v}_c(t)$ 组合的 ESPRIT 算法, 可将矢量传感器声压振速联合处理抑制各向同性噪声的能力与 ESPRIT 算法的高方位分辨能力有机结合起来, 降低检测或方位估计的信噪比门限, 提高矢量阵远程弱目标高分辨方位估计性能.

1 声矢量阵常规 ESPRIT 算法

考虑到水声的实际情况, 只讨论水平面内的测向问题, 不涉及目标俯仰角. M 个声矢量传感器按半波间隔均匀分布构成声矢量阵, 如图 1 所示. 图中右下角坐标方向对应矢量传感器 x 和 y 轴方向, 假定阵列的所有阵元沿 x 轴等间距排列, 1 号阵元和坐标原点重合, θ 为平面波的入射方位, 是与 x 轴正向的夹角, 矢量阵的法线方向为 90° .

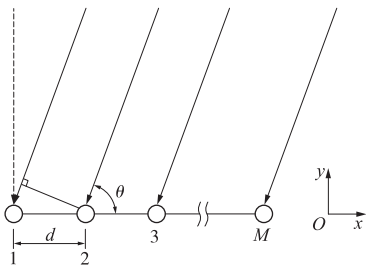


图 1 等间距直线矢量阵示意图

Fig. 1 Uniform linear acoustic-vector-sensor array

二维声矢量传感器线列阵接收数据可写为

$$\mathbf{Z}(t) = [\mathbf{Z}_1(t) \quad \mathbf{Z}_2(t) \quad \cdots \quad \mathbf{Z}_M(t)]^T = \begin{bmatrix} \mathbf{P}(t) & \mathbf{v}_x(t) & \mathbf{v}_y(t) \\ \mathbf{N}_{p1}(t) & \mathbf{N}_{v_{x1}}(t) & \mathbf{N}_{v_{y1}}(t) \end{bmatrix}^T. \quad (1)$$

式中: $\mathbf{P}(t)$, $\mathbf{v}_x(t)$ 和 $\mathbf{v}_y(t)$ 分别为信号的声压、 x 轴振

速和 y 轴振速分量; $\mathbf{N}_{p_i}(t)$, $\mathbf{N}_{v_{x_i}}(t)$ 和 $\mathbf{N}_{v_{y_i}}(t)$ 分别为各向同性噪声的声压、 x 轴振速和 y 轴振速分量. 根据声压阵 ESPRIT 方位估计算法原理, 可以构造类似的两个声矢量阵子阵, 取矢量阵前 $M-1$ 个阵元的接收数据为 $\mathbf{Z}_1(t)$, 后 $M-1$ 个阵元的接收数据为 $\mathbf{Z}_2(t)$, 则

$$\begin{cases} \mathbf{Z}_1(t) = [\mathbf{P}_1(t) & \mathbf{v}_{x1}(t) & \mathbf{v}_{y1}(t)]^T + \\ & [\mathbf{N}_{p1}(t) & \mathbf{N}_{v_{x1}}(t) & \mathbf{N}_{v_{y1}}(t)]^T, \\ \mathbf{Z}_2(t) = [\mathbf{P}_2(t) & \mathbf{v}_{x2}(t) & \mathbf{v}_{y2}(t)]^T + \\ & [\mathbf{N}_{p2}(t) & \mathbf{N}_{v_{x2}}(t) & \mathbf{N}_{v_{y2}}(t)]^T. \end{cases} \quad (2)$$

式中: 符号 T 表示转置运算. 记 $\mathbf{Z}_1(t)$ 和 $\mathbf{Z}_2(t)$ 矩阵束为 $\mathbf{Y}(t)$, 则

$$\mathbf{Y}(t) = \begin{bmatrix} \mathbf{Z}_1(t) \\ \mathbf{Z}_2(t) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \mathbf{A}_v(\Phi) \\ \mathbf{A}_v(\Phi)\Phi \end{bmatrix} \mathbf{S}(t) + \begin{bmatrix} \mathbf{N}_{v1}(t) \\ \mathbf{N}_{v2}(t) \end{bmatrix} = \bar{\mathbf{A}}\mathbf{S}(t) + \mathbf{N}_v(t). \quad (3)$$

式中:

$$\begin{aligned} \mathbf{A}_v(\Phi) &= [\mathbf{a}(\Phi_1) \otimes \mathbf{u}_1 \quad \mathbf{a}(\Phi_2) \otimes \mathbf{u}_2 \quad \cdots \quad \mathbf{a}(\Phi_K) \otimes \mathbf{u}_K], \\ \text{符号} \otimes &\text{表示克罗内克积, } K \text{ 是信号源个数,} \\ \mathbf{a}(\Phi_k) &= [1 \quad e^{-j\beta_k} \quad \cdots \quad e^{-j(M-1)\beta_k}]^T, \end{aligned}$$

$$\beta_k = \frac{2\pi}{\lambda} d \sin \theta_k,$$

$$\mathbf{u}_k = [1 \quad \cos \theta_k \quad \sin \theta_k]^T$$

是与信号传播方向有关的列向量, 其中 θ_k 为第 k 个信号源方位;

$$\bar{\mathbf{A}} = \begin{bmatrix} \mathbf{A}_v(\Phi) \\ \mathbf{A}_v(\Phi)\Phi \end{bmatrix};$$

$$\Phi = \text{diag} [e^{j\Phi_1} \quad e^{j\Phi_2} \quad \cdots \quad e^{j\Phi_K}]$$

为两个子阵对信号响应的相位差矢量;

$$\mathbf{S}(t) = [s_1(t) \quad s_2(t) \quad \cdots \quad s_K(t)]^T$$

为信号源矢量;

$$\mathbf{N}_v(t) = [\mathbf{n}_{v1}(t) \quad \mathbf{n}_{v2}(t) \quad \cdots \quad \mathbf{n}_{vM}(t)]^T$$

为噪声矢量.

$\mathbf{Y}(t)$ 的自协方差矩阵为

$$\mathbf{R}_{yy} = \mathbf{E}[\mathbf{Y}(t)\mathbf{Y}^H(t)] = \bar{\mathbf{A}}\mathbf{R}_s\bar{\mathbf{A}}^H + \mathbf{\Sigma}_n. \quad (4)$$

式中: $\mathbf{R}_s$ 为信号的协方差矩阵; $\mathbf{\Sigma}_n$ 为一个与噪声相关的对角阵.

由式(4)得到的协方差矩阵, 根据文献[1]中的步骤可进行 ESPRIT 方位估计. 必须注意, 与声压阵情况不一样的是, 此处 $\mathbf{R}_{yy}$ 为 $(6M-6) \times (6M-6)$ 维矩阵, 矩阵特征分解得到的信号子空间 $\mathbf{U}_s$ 是一个

$(6M-6) \times K$ 维的矩阵。

2 声压和组合振速联合处理 ESPRIT 算法

矢量阵两轴向的振速输出可以进行组合,通过电子旋转得到振速在某个参考方向 θ 上的组合输出为

$$\begin{aligned} \mathbf{v}_c(t) &= \mathbf{v}_x(t) \cos \theta + \mathbf{v}_y(t) \sin \theta = \mathbf{P}(t) \cos \theta_s \cos \theta + \\ &\quad \mathbf{N}_{v_x}(t) \cos \theta + \mathbf{P}(t) \sin \theta_s \sin \theta + \mathbf{N}_{v_y}(t) \sin \theta = \\ &\quad \mathbf{AS}(t) \cos \theta_s \cos \theta + \mathbf{N}_{v_x}(t) \cos \theta + \mathbf{AS}(t) \sin \theta_s \sin \theta + \\ &\quad \mathbf{N}_{v_y}(t) \sin \theta = \mathbf{AS}(t) \cos(\theta - \theta_s) + \mathbf{N}_{v_x}(t) \cos \theta + \\ &\quad \mathbf{N}_{v_y}(t) \sin \theta. \end{aligned} \quad (5)$$

式中 θ_s 为信号源方位. $[\mathbf{P}(t) + \mathbf{v}_c(t)] \mathbf{v}_c(t)$ 的互协方差矩阵为

$$\begin{aligned} \mathbf{R}_{(\mathbf{P}+\mathbf{v}_c)\mathbf{v}_c} &= \mathbf{E}\{[\mathbf{P}(t) + \mathbf{v}_c(t)] \mathbf{v}_c^H(t)\} = \mathbf{E}\{[\mathbf{AS}(t) + \\ &\quad \mathbf{N}_p(t) + \mathbf{AS}(t) \cos(\theta - \theta_s) + \mathbf{N}_{v_x}(t) \cos \theta + \\ &\quad \mathbf{N}_{v_y}(t) \sin \theta][\mathbf{AS}(t) \cos(\theta - \theta_s) + \mathbf{N}_{v_x}(t) \cos \theta + \\ &\quad \mathbf{N}_{v_y}(t) \sin \theta]^H\} = \mathbf{AR}_s \mathbf{A}^H \cos(\theta - \theta_s) + \\ &\quad \mathbf{AR}_s \mathbf{A}^H \cos^2(\theta - \theta_s) + \mathbf{R}_{N_{v_x}} \cos^2 \theta + \mathbf{R}_{N_{v_y}} \sin^2 \theta = \\ &\quad \mathbf{AR}_s \mathbf{A}^H [\cos(\theta - \theta_s) + \cos^2(\theta - \theta_s)] + \frac{1}{2} \sigma_n^2 \mathbf{I} \cos^2 \theta + \\ &\quad \frac{1}{2} \sigma_n^2 \mathbf{I} \sin^2 \theta = \mathbf{AR}_s \mathbf{A}^H \left\{ \cos(\theta - \theta_s) + \frac{1}{2} [1 + \right. \\ &\quad \left. \cos(2\theta - 2\theta_s)] \right\} + \frac{1}{2} \sigma_n^2 \mathbf{I}. \end{aligned} \quad (6)$$

式中: σ_n^2 为两轴振速分量中所含噪声的功率; $\mathbf{I}$ 为单位矩阵. 当引导角 θ 在 $[0, \pi]$ 内取均值时, 得到新的互协方差矩阵为

$$\mathbf{R} = \mathbf{E}[\mathbf{R}_{(\mathbf{P}+\mathbf{v}_c)\mathbf{v}_c}] = \mathbf{AR}_s \mathbf{A}^H \left\{ \mathbf{E}[\cos(\theta - \theta_s)] + \frac{1}{2} \right\} + \frac{1}{2} \sigma_n^2 \mathbf{I}. \quad (7)$$

显然, 与常规矢量阵协方差矩阵一样, 式(7)表示的协方差矩阵的前一项为信号项, 后一项为噪声项, 同样可以根据文献[1]中的步骤进行 ESPRIT 方位估计。

3 仿真分析

3.1 单目标的情况

1 个窄带信号从 80° 方向入射到基阵上, 中心频率为 2 kHz, 带宽为 200 Hz, 基阵阵元数为 5, 阵元间距为半波, 采样频率为 10 kHz, 快拍数为 5 000, 信噪比从 -18 dB 间隔 1 dB 变化到 -8 dB, 每种信噪比条件下进行 100 次独立试验, 结果如图 2 和图 3 所示。

由图 2 可知, 在一定信噪比条件下, 文中算法和常规算法估计的目标方位均在目标方位真值附近. 由图 3 可知, 文中算法在低信噪比时(图中条件下小于 -15 dB)比常规算法估计精度高得多, 这是因为文中算法充分利用了声压振速联合处理的增益。

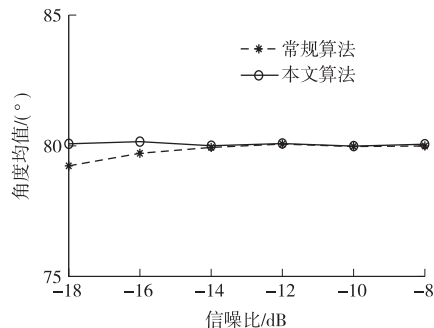


图 2 单目标方位估计角度均值

Fig. 2 Estimated mean angle for single target

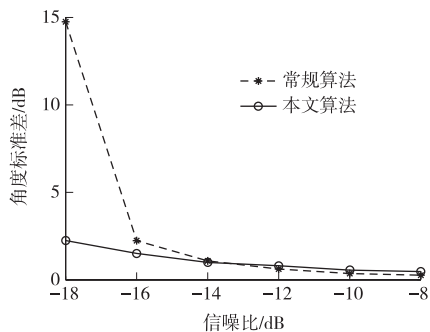


图 3 单目标方位估计角度标准差

Fig. 3 Estimated standard variance of angle for single target

3.2 双目标的情况

两个不相关的窄带信号分别从 80° 和 90° 方向入射到基阵上, 信噪比从 -14 dB 间隔 2 dB 变化到 0 dB, 其它参数同图 1, 结果示于图 4 和图 5。

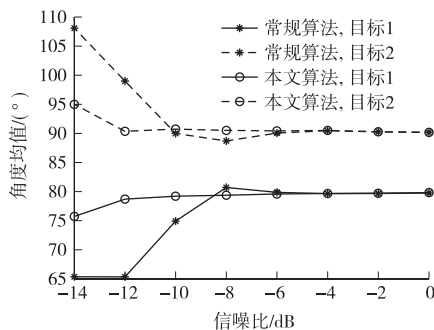


图 4 双目标方位估计角度均值

Fig. 4 Estimated mean angles for two targets

由图 4 可知在低信噪比条件时(小于 -8 dB), 文中算法比常规算法的估计均值更接近目标方位真值. 由图 5 可知, 与常规算法相比, 文中算法在低信

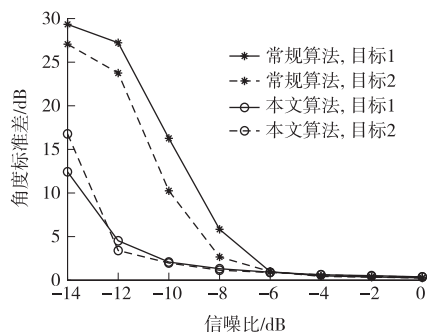


图 5 双目标方位估计角度方差

Fig. 5 Estimated standard variance of angles for two targets

噪比时(图中条件下小于-6 dB)两个目标的估计精度都要高得多,这是因为文中算法充分利用了声压振速联合处理的增益。

不同信噪比情况下两种算法的双目标方位分辨概率结果见图 6,除信噪比变化步距外,其它仿真条件同图 4,可见在低信噪比条件下,文中算法比常规算法有更高的成功分辨概率,并且以更低的信噪比达到 100% 的方位成功分辨概率。

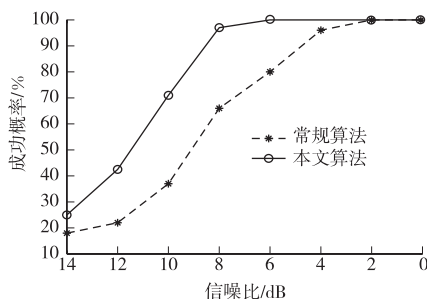


图 6 双目标方位方位分辨成功概率

Fig. 6 Ratio of successful angle identification for two targets

4 试验结果

某次湖试矢量阵试验,所用矢量阵为均匀分布的 5 元同振型矢量传感器直线阵,阵元间距 0.5 m,系统带宽 315~3 150 Hz,采样频率 96 kHz. 试验船在试验水域停机抛双锚,用缆绳将矢量阵悬挂于试验船舷侧,入水深度 10 m,一交通艇绕试验船航行之后远离,方位从 150°变化到 30°左右。

交通艇方位-时间历程结果如图 7 所示,总时间为 2 min. 由图 7 可见,前 80 s 常规算法在个别时间点的估计方位偏离目标方位变化趋势较大,而文中算法则没有明显偏离目标方位变化趋势的点。第 80 s 以后,由于目标逐渐远离,信噪比降低,2 种算法结果曲线均不是很平滑,但文中算法比常规算法的平滑程度要好。总的来说文中算法估计性能好于

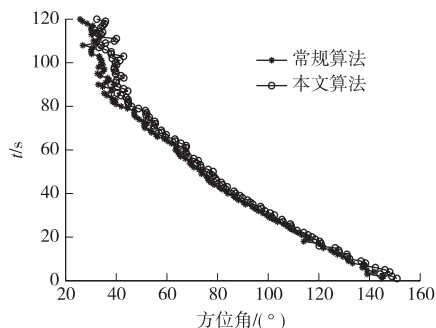


图 7 湖试单目标方位估计结果

Fig. 7 Estimation result of azimuth angle from lake trail for single target

常规算法,这是因为文中算法充分利用矢量阵声压振速组合指向性,比传统算法增益更高,测向分辨力更高,这与前文理论推导和计算机仿真结果一致。

5 结论

常规声矢量阵 ESPRIT 方位估计算法虽然结合了矢量阵的声压、振速输出信息,比传统声压阵效果要好,但只对声压、振速进行了简单的联合处理,矢量传感器性能未能得到充分发挥。 $[\mathbf{P}(t) + \mathbf{v}_c(t)] \mathbf{v}_c(t)$ 由于充分进行声压、组合振速联合信息处理,组合指向性增益更高,能够更好地抑制噪声。要想将 $[\mathbf{P}(t) + \mathbf{v}_c(t)] \mathbf{v}_c(t)$ 组合应用到 ESPRIT 算法,需要解决组合振速 $\mathbf{v}_c(t)$ 对引导角的依赖问题,本文构造矢量阵声压、组合振速分量的互协方差矩阵,无需知道具体引导角,而是通过多个引导角下的声压、组合振速互协方差矩阵求平均来解决这个问题,然后利用该矩阵进行 ESPRIT 方位估计,文中算法比常规声矢量阵 ESPRIT 算法在多目标方位估计精度、分辨信噪比门限、分辨成功概率等方面都具有更好的性能,有利于远程弱信号方位估计和角度间隔较近信号的方位分辨。

参考文献:

- [1] Harry L, Van Trees. Optimum array processing[M]. New York: John Wiley & Sons Inc, 2002:17-37.
 - [2] 龚晓峰,徐友根,刘志文. 四元数域低秩逼近及其在矢量阵列波达方向估计中的应用[J]. 北京理工大学学报, 2008,28(11):1013-1017.
- Gong Xiaofeng, Xu Yougen, Liu Zhiwen. Quaternion low rank approximation with applications to vector-sensor array direction of arrival estimation[J]. Transactions of Beijing Institute of Technology, 2008, 28 (11):1013-1017. (in Chinese)

(下转第 521 页)

- network reliability analysis [D]. Nanjing: Southeast University, 2007. (in Chinese)
- [4] Kennedy M. Distributed generation: harder than it looks [J]. Power Engineer, 2003, 17(1): 16-18.
- [5] 刘殿海. 电源优化规划理论研究及应用[D]. 北京: 华北电力大学, 2006.
Liu Dianhai. Power optimization of planning theory and application [D]. Beijing: North China Electric Power University, 2006. (in Chinese)
- [6] Wang Caisheng, Hashem N M. Analytical approaches for optimal placement of distributed generation sources in power systems [J]. IEEE Trans on Power System, 2004, 19(4): 2068-2076.
- [7] Kumar A, Gao W. Optimal distributed generation location using mixed integer non-linear programming in hybrid electricity markets [J]. IET Gener Transm Distrib, 2010, 4(2): 281-298.
- [8] Narayan S R, Yihheui M. Optimum location of resource in distributed planning [J]. IEEE Trans on Power System, 1994, 9(4): 2014-2020.
- [9] Celli G, Ghiani E, Mocci S. A multiobjective evolutionary algorithm for the sizing and siting of distributed generation [J]. IEEE Trans on Power System, 2005, 20(2): 750-757.
- [10] Elnashar M, Shatshat R, Salama M. Optimum siting and sizing of a large distributed generator in a mesh connected system [J]. Electric Power Systems Research, 2010, 80: 690-697.
- [11] AlHajri M F, AlRashidi M R, El-Hawary M E. Hybrid particle swarm optimization approach for optimal distribution generation sizing and allocation in distribution systems [C] // Proceedings of Canadian Conf Electrical and Computer Engineering. [S. l.]: CCECE, 2007: 1290-1293.
- [12] Kennedy J, Eberhart R. Particle swarm optimization [C] // Proceedings of IEEE Int Conf on Neural Networks. Perth, Australia: IEEE, 1995: 1942-1948.

(责任编辑: 孙竹凤)

(上接第 516 页)

- [3] 梅继丹, 王逸林, 惠俊英. 垂直矢量阵声图被动定位技术研究 [J]. 兵工学报, 2010, 31(3): 369-374.
Mei Jidan, Wang Yilin, Hui Junying. Research on the underwater acoustic image passive locating using vertical linear array [J]. Acta Armamentarii, 2010, 31(3): 369-374. (in Chinese)
- [4] Chen S, Chen C, Zheng W. Multi-sources distinguishing by exploring line spectra with single acoustic vector sensor [J]. Journal of Electronics and Information Technology, 2010, 32(5): 1253-1256.
- [5] Wong K T. Acoustic vector-sensor FFH blind beamforming geolocation [J]. IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems, 2010, 46(1): 444-449.
- [6] Wu Y I, Wong K T, Lau S. The acoustic vector-sensor's near-field array-manifold [J]. IEEE Transactions on Signal Processing, 2010, 58(7): 3946-3951.
- [7] 李敏, 孙贵青, 李启虎. 分布式浮标阵水下高速运动声源三维被动定位 [J]. 声学学报, 2009(4): 289-295.
Li Min, Sun Guiqing, Li Qihu. Three dimensional passive localization based on distributed buoy array for underwater moving sound source with high speed [J]. Acta Acustica, 2009(4): 289-295. (in Chinese)
- [8] 顾晓东, 邱志明, 袁志勇. 单矢量水听器 ESPRIT 波达方向估计算法 [J]. 哈尔滨工程大学学报, 2009(8): 867-871.
Gu Xiaodong, Qiu Zhiming, Yuan Zhiyong. ESPRIT algorithm for DOA estimation using a single vector hydrophone [J]. Journal of Harbin Engineering University, 2009(8): 867-871. (in Chinese)
- [9] Abdi A, Guo H H. Signal correlation modeling in acoustic vector sensor arrays [J]. IEEE Transactions on Signal Processing, 2009, 57(3): 892-903.
- [10] 姚直象, 胡金华, 姚东明. 基于多重信号分类法的一种声矢量阵方位估计算法 [J]. 声学学报, 2008(4): 305-309.
Yao Zhixiang, Hu Jinhua, Yao Dongming. A MUSIC algorithm for bearing estimation using an acoustic vector sensor array [J]. Acta Acustica, 2008(4): 305-309. (in Chinese)

(责任编辑: 刘芳)