

传感器网络中基于节点数据相关的 DOA 估计

赵 闪, 陈新华, 于 倍, 孙长瑜

中国科学院声学研究所, 北京 100190

摘要 波达方向(DOA)估计是水声阵列信号处理的重要研究方向。由多个矢量水听器组成的传感器网络利用各节点所在位置的声压、质点振速可以实现 DOA 估计,节点的协同合作能够确定目标声源的位置。本文根据矢量水听器的特点、相关性及 DOA 算法等理论,仿真分析相关性对 DOA 算法的影响,并结合实际湖试对节点数据的相关性进行分析处理。由于各节点数据包含严重的噪声,导致其频谱情况很差,处理后节点数据的频谱及节点间的互相关性明显改善,并能有效抑制宽带噪声干扰。结果表明,处理后节点线谱信号突显出来,各节点的互相关性得到了提高,且满足 DOA 算法对数据相关性的要求,具有一定的工程实用性。

关键词 波达方向;矢量水听器;互相关;频谱

中图分类号 TB56

文献标志码 A

doi 10.3981/j.issn.1000-7857.2013.02.007

DOA Estimation Based on Node Data Correlation for Sensor Network

ZHAO Shan, CHEN Xinhua, YU Bei, SUN Changyu

Institute of Acoustics, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100190, China

Abstract The estimation of Direction of Arrival (DOA) is an important area in the signal processing of hydroacoustical array. A sensor network consisting of multiple vector hydrophones is able to make DOA estimation by using the sound pressure and particle velocity of the location for each node, and the coordination cooperation from every node could determine the location of the target sound source. Based on vector hydrophone characteristics, correlation, and DOA algorithm theory, the influence of correlation on the DOA algorithm is analyzed through the simulation. It is able to improve the frequency spectrum of the nodes data and the cross correlation by analyzing and processing the data of actual lake trial. Since each node data contains the serious noise, as a result, it causes the frequency spectrum situation to become very bad. After data signal processing, the requirements of DOA algorithm on data correlation are met, and the broadband noise interference is able to be effectively inhibited. It is indicated that after the actual data processing, the line spectrum signal of node stands out and the cross correlation of various nodes has been improved. The practicality of the study is proved.

Keywords direction of arrival; vector hydrophone; cross correlation; frequency spectrum

0 引言

海洋开发和反潜战的需求成为推动水声技术发展的巨大动力^[1],阵列信号处理作为一门新兴的空域信号处理技术被广泛应用。由于水下声信道的带宽窄、背景噪声大、多径效应严重等问题^[2],通过对多个传感器组成阵列接收到的信号进行相关处理能够获取信号的参数,如频率、波达方向(Direction of Arrival, DOA)等。较早的 DOA 估计算法是常规波束形成算法^[3],但由于阵列物理孔径的限制,空间目标在同

一个波束内不可分辨。1967年, Burg^[4]提出最大熵法以后,形成了基于非线性方法的现代谱估计技术,如 MEM、MVDR、ARMA、谐波分析法等,单算法假定空间中连续分布的信号为平稳随机过程,具有一定的局限性;20世纪70年代末形成的比较成熟的 DOA 算法在假设为高斯噪声模型条件下产生,如 MUSIC、最大似然算法等,而实际应用时噪声或信号可能是高斯分布,也可能是其他分布。

基于矢量水听器的声压振速联合处理技术不断丰富^[5],以

收稿日期:2012-08-24;修回日期:2012-12-13

基金项目:国家海洋公益性行业科研专项经费项目(20100500106);中国科学院国防科技创新基金项目

作者简介:赵闪,博士研究生,研究方向为阵列信号处理等,电子信箱:zhaoshan09@mails.gucas.ac.cn;孙长瑜(通信作者),研究员,研究方向为水声信号处理,电子信箱:scy@mails.ioa.ac.cn

其组合传感器代替声压传感器组成的阵列,与常规声压传感器阵列相比,可获得4倍数量的输出信号,进而能够精确估计阵元间的相位延迟,减小波阵面方向估计误差^[6]。由多个矢量水听器组成的传感器网络利用各点所在位置的声压、振速可以实现DOA估计,各节点的协同合作可以确定目标声源的位置。由于各节点的四路数据两两之间的互相关,其分布形式与两组随机变量之间的互协方差矩阵类似,如果节点间的互相关性不好,将会影响后续DOA算法的效果。

本文简要介绍了矢量水听器的特点、节点相关性和DOA算法等理论,然后仿真分析了信号相关性对DOA算法的影响,最后结合实际海试数据对节点数据相关性进行了分析与处理。由于各节点数据包含严重的噪声,其频谱情况很差,经数据处理后改善了节点数据频谱及节点间的互相关性,从而满足DOA算法对数据相关性的要求,达到了预期效果。

1 矢量传感器特点和DOA算法

1.1 矢量水听器接收信号模型

声场兼有声压和振速,由声压和振速组合的矢量水听器接收信号模型如图1所示,其各点输出为声压及正交的三维振速分量。接收信号复包络^[7]表示为

$$x(t) = a(\beta_0)s_0(t) + \sum_{i=1}^J a(\beta_i)s_i(t) + n(t) \quad (1)$$

式中, $s_0(t)$ 为期望信号, $s_i(t)$ 为干扰信号,包括声压信号及振速信号在 x, y, z 轴上的分量; $n(t)$ 为接收的零均值、空间不相关高斯噪声; $\beta_k = [\varphi_k \ \theta_k]^T$ 为第 k 个源的DOA, J 为干扰源数, φ_k 为水平方向方位角, θ_k 为俯仰角;对应方向矢量 u_k 为

$$u_k = [\cos\varphi_k \ \cos\theta_k \ \sin\varphi_k \ \cos\theta_k \ \sin\theta_k]^T \quad (2)$$

由多个矢量水听器组成的传感器网络,各节点所在位置的声压和质点振速都体现了目标声源的相对位置信息,相应的DOA算法将这一信息明确提取出来,即获得水平方位角和俯仰角;而对于节点位置已知的传感器网络,通过几何解算能够确定目标声源位置。

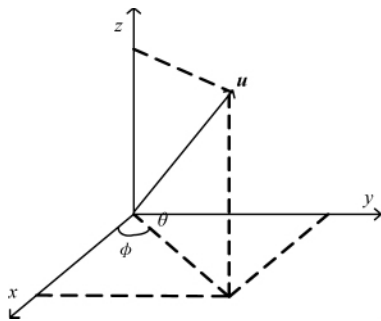


图1 矢量水听器接收信号模型

Fig. 1 Signal model of vector hydrophone receiver

1.2 信号的相关特性

声传播过程中的波导效应与随机不均匀性所引起的时空变化,可以通过信号的时空相关特性描述,空间相关性对

分布式探测系统^[8]的性能有较大的影响。

信号 $x(t)$ 和 $y(t)$ 的相关函数定义为

$$r_{xy}(\tau) = E[x(t+\tau)y^*(t)] = E[x(t)y^*(t-\tau)] \quad (3)$$

对于处理的实值信号,经过采样成为能量有限的离散形式;对于数字相关或相关序列而言,数字相关是对两个序列相似程度的一种度量:

$$r_{xy}(m) = E[x(n+m)y(n)] = E[x(n)y(n-m)] \quad (4)$$

传感器网络中接收的背景噪声包括相关噪声和非相关噪声^[9],其中海洋环境噪声为相关噪声,其空间相关函数是辛克函数形式,相关性较高,而流噪声空间相关函数为高阶指数函数形式,相关性较低。

1.3 DOA算法

DOA估计方法有波束形成法、线性预测法、子空间法、参数法等。考虑高斯白噪声下,节点对应4路信号的协方差矩阵 R 为

$$R = \sigma_s^2 uu^H + \begin{bmatrix} \sigma_p^2 & 0 \\ 0 & \sigma_v^2 I_3 \end{bmatrix} \quad (5)$$

其中, u 为声压振速对应单位方向矢量, σ_s^2 为声压信号的功率, σ_p^2 与 σ_v^2 分别为声压和振速通道噪声功率。

常规波束形成法对最大增益的方向进行机械扫描,通过测量其功率来估计达到方向,声压线阵的导引矢量用声压振速对应的单位矢量代替

$$P_{\text{dir},v} = u^H R u \quad (6)$$

最小方差无畸变响应 (Minimum Variance Distortionless Response, MVDR)能够在干扰方向自适应形成零陷,利用多源信号到达角的估计。将声压线阵的导引矢量用声压振速对应的单位矢量做MVDR,有

$$P_{\text{mvdr},v} = \frac{1}{u^H R^{-1} u} \quad (7)$$

子空间法是将空间谱分析采用类似时域谱估计的非线性处理,利用接收信号的协方差矩阵的特征结构,突破瑞利约束来提高角度分辨率;参数法针对由于多径而产生的相关强信号,进行多源搜索,充分利用数据模型估计相关信号。

2 DOA算法相关性分析

依据空间阵元之间确定的波程差即可估计出入射信号的方位角和俯仰角。考虑两个平稳信号 $s_i(t)$ 和 $s_k(t)$,其相关系数^[10]为

$$\rho_{ik} = \frac{E[(s_i - E[s_i])(s_k - E[s_k])^*]}{\sqrt{E[|s_i - E[s_i]|^2] E[|s_k - E[s_k]|^2]}} \quad (8)$$

定义信号之间的相关性为

$$\begin{cases} \rho_{ik} = 0 & s_i(t) \text{与} s_k(t) \text{不相关} \\ 0 < |\rho_{ik}| < 1 & s_i(t) \text{与} s_k(t) \text{相关} \\ |\rho_{ik}| = 1 & s_i(t) \text{与} s_k(t) \text{相干} \end{cases} \quad (9)$$

对于窄带信号,阵列信号常采用其复数形式

$$s(t) = a(t)e^{i\varphi(t)}e^{i\omega_0 t} = g(t)e^{i\omega_0 t} \quad (10)$$

其中, $g(t)$ 为信号的复包络。考虑窄带信号为缓慢变化的, 对于信号传输中的多径传播产生时延信号

$$s(t-\tau) = g(t-\tau)e^{i\omega_0(t-\tau)} \approx g(t)e^{i\omega_0 t} e^{-i\omega_0 \tau} \quad (11)$$

由于多径效应而产生的时延信号对应相关系数为 1, 即对于只有固定相差的同频信号, 其信号之间是相干的, 与信号相位差无关。

如图 2 所示, 传感器网络中各节点数据经过协方差矩阵变换后, 当相关系数为 1 时, 协方差矩阵出现秩亏损, DOA 子空间算法不能处理; 对于相关系数不为 1 的信号, DOA 算法的测向性能在节点数据相关性较高的情况下更佳。

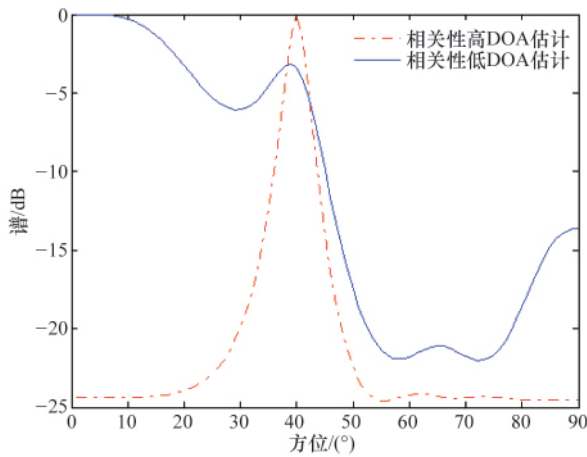


图 2 相关性对 DOA 估计影响
Fig. 2 Impact of correlation on DOA estimation

3 湖试节点数据相关性研究

水下声传播速度随着水深变化形成声速剖面, 声速剖面随着天气、气候变化。图 3 为 2009 年 12 月浙江千岛湖试验声速剖面图, 水深 70m。

由折射定律得知, 水深变化导致声线轨迹不规则, 会给俯仰角的估计带来很大的误差。

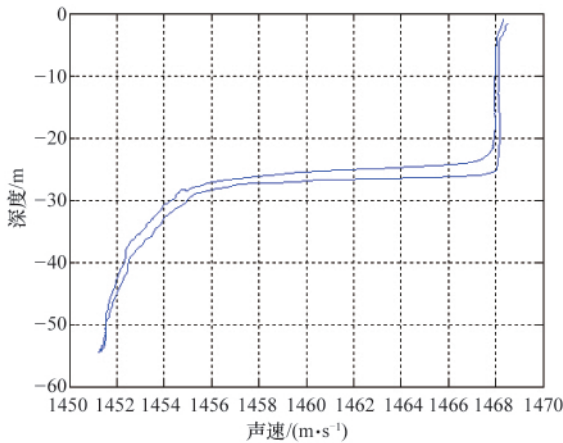


图 3 声速剖面
Fig. 3 Profiles of sound velocity

3.1 节点数据相关性分析

湖试时各节点矢量水听器的位置和姿态不是固定不变的, 其位置由 GPS 确定, 姿态由罗经测量。矢量水听器的姿态变化对节点所在位置的质点振速影响较大, 需要进行后置姿态校正, 即按照一定的转换规则将原始罗经数据转换为航向角 α 、俯仰角 β 、翻滚角 γ 3 个角度, 进而构造变换矩阵, 对质点振速数据进行校正

$$T = \begin{bmatrix} \cos\gamma\cos\alpha - \sin\gamma\sin\beta\sin\alpha & -\cos\beta\sin\alpha & \sin\gamma\cos\alpha + \cos\gamma\sin\beta\sin\alpha \\ \cos\gamma\sin\alpha + \sin\gamma\sin\beta\cos\alpha & \cos\beta\cos\alpha & \sin\gamma\sin\alpha - \cos\gamma\sin\beta\cos\alpha \\ -\sin\gamma\cos\beta & \sin\beta & \cos\gamma\cos\beta \end{bmatrix} \quad (12)$$

考查各节点数据及其幅度谱, 并利用 2、3 号节点矢量水听器数据进行相关性分析, 结果如图 4、图 5 所示。

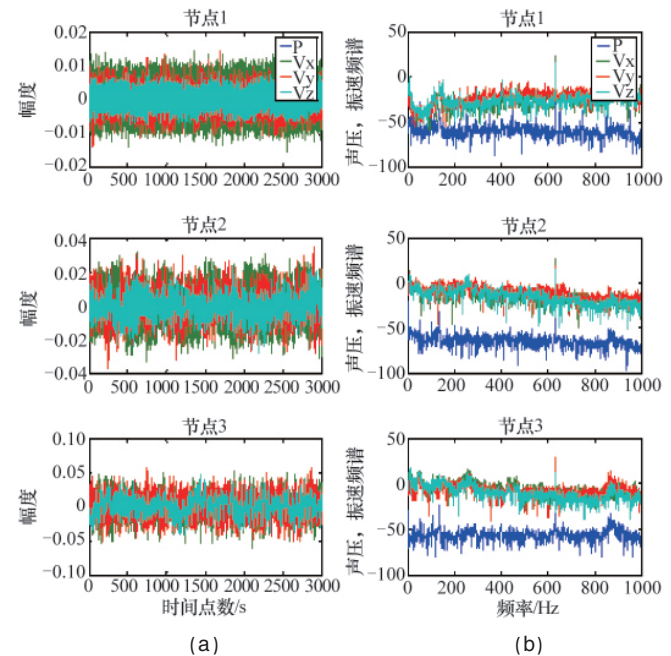


图 4 节点数据 (a) 及其幅度谱 (b)
Fig. 4 Node data (a) and its amplitude spectrum (b)

图 4 给出了各节点接收数据, 以及各节点接收数据对应幅度谱。图 5 分析了节点 2、3 水听器数据的相关性。可以看出, 矢量水听器节点数据由 620Hz 左右的单频信号和宽带噪声组成, 节点 2 和节点 3 的 4 路数据两两之间互相关, 其分布形式与两组多为随机变量之间的互协方差矩阵类似, 但其互相关性不能令人满意, 会影响 DOA 估计的效果。

3.2 节点数据相关性处理

依据节点数据组成形式, 设计中心频率为 620Hz 左右的窄带滤波器(图 6), 经过处理改善信号的相关性。

经带通滤波器处理后, 各节点数据及其幅度谱如图 7 所示, 节点 2 和节点 3 数据互相关性分析如图 8 所示。图 7 给出了各节点接收数据, 以及各节点接收数据对应幅度谱, 横坐标表示频率, 纵坐标为声压及振速的频谱。图 8 分析了节

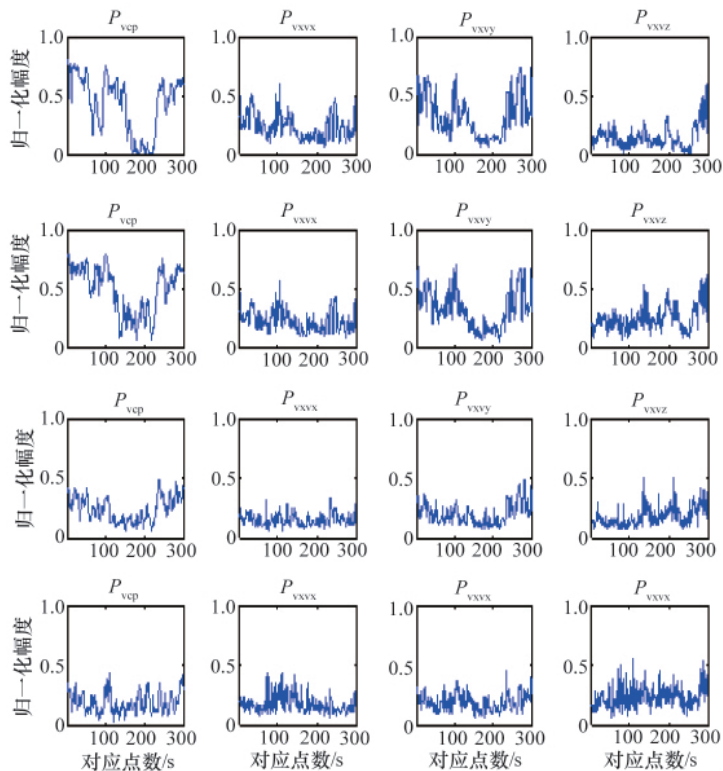


图 5 节点 2 与节点 3 的互相关

Fig. 5 Cross correlation between node 2 and node 3

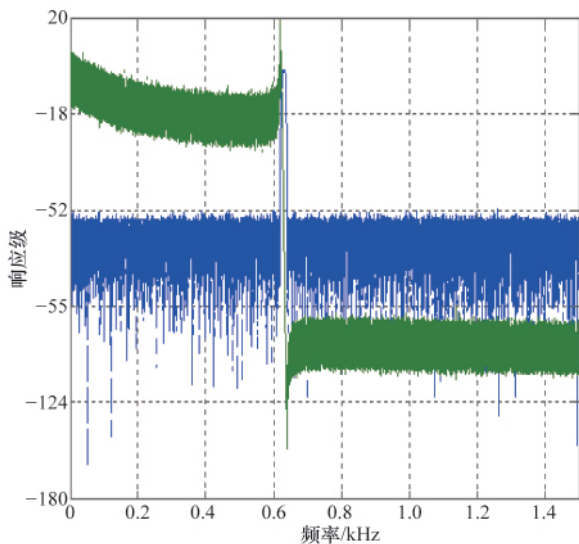


图 6 1024 阶 FIR 滤波器的频率响应

Fig. 6 Frequency response of 1024 bands FIR filter

点 2、3 水听器处理后数据相关性。各节点数据的频谱及节点间的互相关也明显得到改善,由于各节点数据包含严重的噪声,导致其频谱情况很差,进而影响了相关性,处理后节点线谱信号突显出来,各节点的互相关性得到了提高。

该湖试中,水声发射机发射 620Hz 的单频信号,在某些

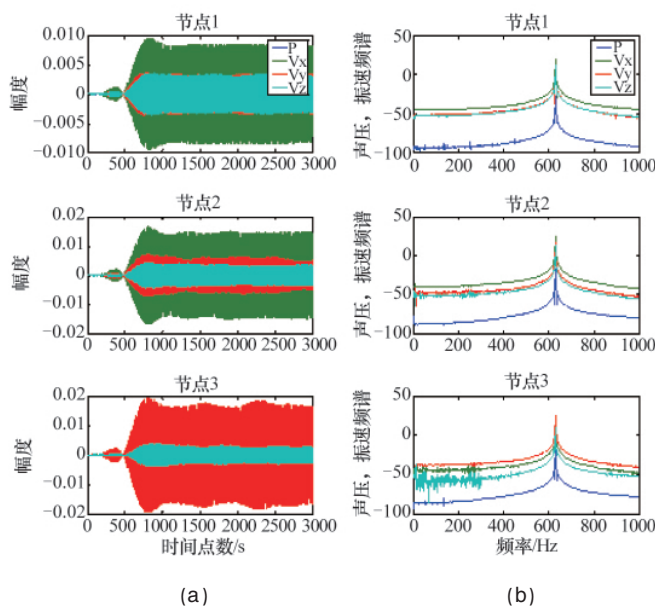


图 7 滤波处理后节点数据 (a) 及其幅度谱 (b)

Fig. 7 Node data (a) and its amplitude spectrum (b) after processing

时段,噪声干扰严重,节点数据无法反映单频信号的特征,继而影响 DOA 算法的性能,经过滤波处理后,节点数据中包含较少的频率成分,使得节点间的数据相关性较好,部分可以

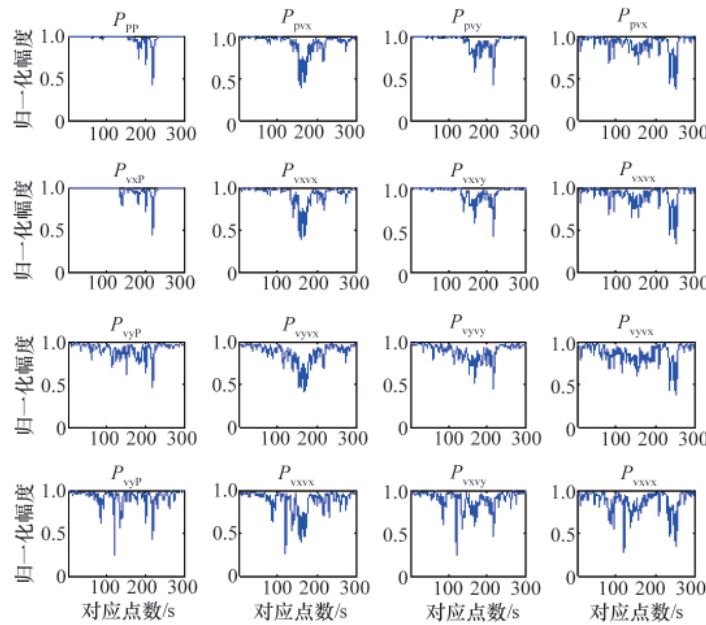


图 8 滤波处理后节点 2 和节点 3 的互相关

Fig. 8 Correlation between node 2 and node 3 after processing

达到 0.9 以上,符合 DOA 算法对数据相关性的要求。

4 结语

本文从分析矢量水听器接收信号模型开始,介绍了由其组成的传感器网络声压和振速特点及信号的相关特性,并简要分析了 DOA 算法及其相关性,结合湖试数据对传感器中各节点的数据相关性进行分析与处理,使各节点的频谱及节点间的互相关得到明显改善,同时有效抑制了宽带噪声干扰,满足 DOA 估计对节点数据相关性的要求,在实际工程项目中有一定的有效性和可行性。由于本文采用的处理方法对信号源的频谱范围有明确的要求,而且具有窄带特性,所以对于宽带信号和无法预知信号频谱范围的场合难以应用,后续研究将着手解决其适应性受限制等问题,以期为实际 DOA 估计研究提供指导方向。

参考文献 (References)

[1] 李启虎. 进入 21 世纪的声纳技术[J]. 信号处理, 2012, 28(1): 1-6.
Li Qihu. Signal Processing, 2012, 28(1): 1-6.

[2] 袁兆凯, 隋天宇, 李宇, 等. 水声扩频通信中多普勒估计与补偿算法研究[J]. 电子与信息学报, 2012, 34(1): 51.
Yuan Zhaokai, Sui Tianyu, Li Yu, et al. Journal of Electronics & Information Technology, 2012, 34(1): 51.

[3] Krim H, Viberg M. Two decades of array signal processing research[J]. IEEE Signal Processing Magazine, 1996, 13(4): 67-94.

[4] 张威, 张路刚. Brug 算法最大熵谱估计的 VC++ 仿真分析[J]. 北京石油化工学院学报, 2002, 10(3): 16-17.
Zhang Wei, Zhang Lugang. Journal of Beijing Institute of Petro-chemical Technology, 2002, 10(3): 16-17.

[5] 曾雄飞, 孙贵青, 李宇, 等. 单矢量水听器的几种 DOA 估计方法[J]. 仪器与仪表学报, 2012, 33(3): 499-502.

Zeng Xiongfei, Sun Guiqing, Li Yu, et al. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2012, 33(3): 499-502.

[6] 白云. 噪声测量中矢量水听器被动合成孔径声纳方法研究 [D]. 哈尔滨: 哈尔滨工程大学, 2010.
Bai Yun. The research of vector hydrophone passive synthetic aperture technique in the measurement radiated noise [D]. Harbin: Harbin Engineering University, 2010.

[7] 曾雄飞, 孙贵青, 黄海宁. 矢量阵的快速宽带频域波束形成方法[J]. 海军工程大学学报, 2012, 24(1): 5-7.
Zeng Xiongfei, Sun Guiqing, Huang Haining. Journal of Naval University of Engineering, 2012, 24(1): 5-7.

[8] Sozer E M, Stojanovic M, Proakis J G. Underwater acoustic networks[J]. IEEE Journal of Oceanic Engineering, 2000, 25(1): 72-83.

[9] 何心怡, 蒋兴舟, 张春华. 基于噪声相关模型的二元水听器组左右舷分辨技术研究[J]. 兵工学报, 2004, 25(1): 90-92.
He Xinyi, Jiang Xingzhou, Zhang Chunhua. Acta Armentarii, 2004, 25(1): 90-92.

[10] 刘康, 习友宝, 李智. 信号相关性修正 MUSIC 算法二维波达方向估计[J]. 计算机应用, 2012, 32(2): 592-594.
Liu Kang, Xi Youbao, Li Zhi. Journal of Computer Applications, 2012, 32(2): 592-594.

(责任编辑 马宇红, 朱宇)

《科技导报》“研究论文”栏目征稿

“研究论文”栏目专门发表自然科学、工程技术领域具有创新性的研究论文,要求学术价值显著、实验数据完整、具有原始性和创造性,同时应重点突出、文字精炼、引证及数据准确、图表清晰,并附中、英文摘要以及作者姓名、所在单位、通信地址、关键词等信息。在线投稿: www.kjdb.org。