

声压传感器与振速传感器中心不一致带来的定向误差分析

任浩宇, 吴艳群, 胡正良

(国防科学技术大学海洋科学与工程研究院, 湖南长沙 410000)

摘要: 声矢量传感器由声压传感器和质点振速传感器组成, 可用在空间某点同步测量声场的声压和质点振速信息。但矢量传感器在实际制作时, 可能存在声压传感器和质点振速传感器中心不一致的情况, 即矢量声场的非共点测量。这会使得声压与振速通道之间的接收信号存在时延差, 从而影响矢量传感器的定向性能。从理论上分析了时延差对平均声强法定向的影响, 即降低了信号处理的信噪比及引入 π 相位的定向误差, 并提出采用互相关声能流法进行定向。通过仿真分析了中心不一致、入射角度和信噪比等因素对不同类型的目标定向结果的影响, 并验证和讨论了互相关声能流法定向算法的有效性和适用性。

关键词: 矢量水听器; 中心不一致; 互相关声能流法; 定向误差

中图分类号: TB556

文献标识码: A

文章编号: 1000-3630(2015)-06-0570-05

DOI 编码: 10.16300/j.cnki.1000-3630.2015.06.020

Analysis of orientation error due to inconsistent centers of pressure sensor and particle velocity sensor

REN Hao-yu, WU Yan-qun, HU Zheng-liang

(Academy of Ocean Science and Engineering, National University of Defense Technology, Changsha 410073, Hu'nan, China)

Abstract: An acoustic vector sensor is composed of a pressure sensor and a particle velocity sensor, and it can measure the pressure and particle velocity of a certain point in acoustic field synchronously. However, both the pressure sensor center and the particle velocity sensor center may not in the same position, which will lead to the time delay between the received pressure signal and particle velocity signal. In the paper, the effects of the time delay on the direction of arrival (DOA) are analyzed by using the average energy flow method, namely the signal-to-noise ratio will decrease and the π phase error will arise in bearing estimation. A correlated acoustic intensity method is also proposed here to solve this problem. Effects of central inconsistency, incident angle and signal-to-noise ratio on bearing estimation with different types of signals are analyzed through simulation. Also the effectiveness of the correlated acoustic intensity method is verified and its application is discussed.

Key words: acoustic vector sensor; inconsistent centers; correlated acoustic intensity method; bearing estimation error

0 引言

声矢量传感器在结构上由声压传感器和质点振速或加速度传感器复合而成, 可以同时共点测量声场空间某点的声压和质点振速信息^[1]。利用声矢量传感器输出的声压和振速信息, 仅需一个矢量传感器就能够抑制各向同性噪声, 实现目标全空间无模糊方位估计, 因此声矢量传感器在空气和水中目标测向定位等方面应用的理论和试验研究是目前热点之一^[2-4]。

影响声矢量传感器定向性能的因素有很多。研究表明, 除了接收信号的信噪比、入射目标角度等, 影响定向精度的系统因素主要为声矢量传感器各通道幅度不一致或相位不一致^[5-6]。矢量探测要求声压与质点振速或加速度传感器的中心尽可能地靠近, 以实现声压与振速信息的空间共点测量, 即两者相位一致。对于加速度型矢量传感器, 加速度传感器的灵敏度与体积成正比, 因此灵敏度高的声压传感器、振速或加速度传感器通常体积也较大, 这就使得安装时两者中心距离受限于两者的实际体积。而且在某些有限空间的安装载体上, 声压传感器与质点振速或加速度传感器的中心无法安装于共点。声压与加速度传感器中心不一致导致测量得到的声压与加速度(振速)通道之间存在相移, 从而

收稿日期: 2015-04-23; 修回日期: 2015-07-20

作者简介: 任浩宇(1990—), 男, 湖南邵阳人, 硕士研究生, 研究方向为水声信号处理。

通讯作者: 任浩宇, E-mail: renhaoyu1990@163.com

给声矢量传感器测向带来误差。

本文针对中心不一致造成的声矢量定向误差进行了理论分析,探讨了测向误差因素,并提出采用互相关声能流法^[7]解决这一问题。

1 平均声强法定向原理

研究表明,平均声强法有良好的抗各向同性噪声的能力,因此这里采用平均声强法分析声压传感器与振速传感器中心不一致带来的方位误差具有典型性和简易性。根据定义,平均声强写作

$$\mathbf{I} = \langle \mathbf{I}(T) \rangle = \frac{1}{T} \int_0^T p(t) \mathbf{v}(t) dt \quad (1)$$

其中: T 为平均时间, $\langle \cdot \rangle$ 表示时间平均。

应用平均声强 \mathbf{I} 在 x 、 y 、 z 轴上的投影分量 I_x 、 I_y 、 I_z , 可得到目标水平方位角 θ_s 和俯仰角 α_s 的估计值为

$$\begin{cases} \hat{\theta}_s = \arctan(I_y, I_x) \\ \hat{\alpha}_s = \arctan(I_z, \sqrt{I_x^2 + I_y^2}) \end{cases} \quad (2)$$

其中: $\arctan(y, x)$ 表示能够根据输入的 y 、 x 的符号获得四个象限的反正切结果。

为简化起见,下面主要对二维空间下声压与水平振速问题进行理论分析与仿真,其结果可以直接推广到三维空间。

2 中心不一致对声能流法方位估计的影响

2.1 中心不一致对目标定向的误差分析

通常在安装声压传感器和质点振速或加速度传感器时,两者几何中心应尽可能地靠近。当存在各种限制导致声压传感器与振速或加速度传感器的中心存在一定的距离 Δd 时(如图1所示),两传感器接收到的信号将存在一定的时延差 $\tau(\theta_s)$, 即

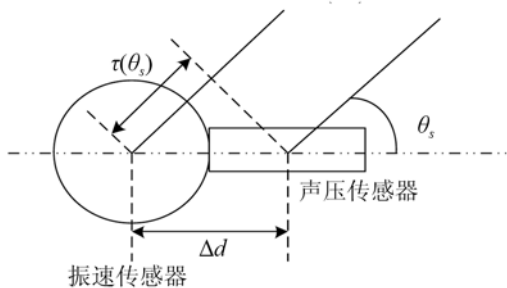


图1 声压、振速传感器接收信号时延差示意图

Fig.1 Time delay between the signals received respectively by a pressure sensor and a particle velocity sensor

$$\tau(\theta_s) = \frac{\Delta d}{c} \cos \theta_s \quad (3)$$

其中: θ_s 为入射目标的方位。

假设信号与噪声互不相关,那么有限快拍下的二维声能流可表示为

$$\hat{\mathbf{I}} = \frac{1}{T} \int_0^T \{ \mathbf{v}(\theta_s) \odot [s(t)s(t+\tau(\theta_s))] + [n_p(t)\mathbf{n}_v(t)] \} dt = \mathbf{v}(\theta_s, \alpha_s) \odot \hat{C}_s(\tau(\theta_s)) + \mathbf{N} \quad (4)$$

式中: $\mathbf{v}(\theta_s) = [\cos \theta_s, \sin \theta_s]^T$ 表示单个二维振速传感器的阵列流型;

$\hat{C}_s(\tau(\theta_s)) = \frac{1}{T} \int_0^T s(t)s(t+\tau(\theta_s)) dt$ 表示有限快拍情况下信号 $s(t)$ 的相关系数; $\mathbf{N} \triangleq [N_x, N_y]^T = \frac{1}{T} \int_0^T n_p(t)\mathbf{n}_v(t) dt$ 表示有限快拍情况下,声压通道接收到的噪声与振速通道接收到的噪声之间的相关系数,即声能流的噪声^[8]。 \mathbf{N} 的每个元素是一个有限值。

因此,目标水平方位角的估计值可表示为

$$\hat{\theta}_s = \arctan(\hat{C}_s(\tau(\theta_s)) \sin \theta_s + N_y, \hat{C}_s(\tau(\theta_s)) \cos \theta_s + N_x) \quad (5)$$

$\tau(\theta_s)$ 使得 $\hat{C}_s(\tau(\theta_s))$ 偏离目标信号自相关函数的峰值,降低了信噪比。若 $\tau(\theta_s)$ 使得 $\hat{C}_s(\tau(\theta_s)) < 0$, 由式(5)可知,此时 $\hat{\theta}_s = \theta_s + \pi$, 即水平方位角的定向结果会引入 $\pi(180^\circ)$ 的角度误差。

不同信号类型的自相关函数的峰值大小及主峰宽度不同。因此, $\hat{C}_s(\tau(\theta_s))$ 的大小由 $\tau(\theta_s)$ 和信号类型决定。

综上所述,声压传感器与振速传感器中心不一致对定向结果的影响与两者之间距离 Δd 、信号入射角度 θ_s 、不同的信号类型等因素密切相关。

2.2 互相关声能流算法

为解决时延差导致的平均声能流法定向误差,采用“互相关声能流法”进行测向。“互相关声能流”定义为:

$$\hat{\mathbf{I}}_c(\tau) = \frac{1}{T} \int_0^T p(t+\tau) \mathbf{v}(t) dt \quad (6)$$

其中: τ 为时延补偿。

由式(3)知,因声压与振速中心不一致带来的最大时延差 $\tau(\theta_s)_{\max} = \Delta d/c$ 。在 $[-\tau(\theta_s)_{\max}, \tau(\theta_s)_{\max}]$ 范围内进行时延补偿扫描。当 $\tau = -\tau(\theta_s)$ 时,声压、振速通道接收到的信号进行最佳相关即匹配,取得相关峰输出。其峰值大小的比值反映了目标真实方位,即

$$\hat{\theta}_s = \arctan(\max(\hat{I}_{c,y}(\tau)), \max(\hat{I}_{c,x}(\tau))) \quad (7)$$

假设声压通道移位后的噪声信号与振速通道的噪声互不相关,那么与真正的声能流法一样,“互相关声能流”也能够抑制不相关噪声。

在多目标情况下,若各个目标信号的时延差之差 $\Delta\tau(\theta)$ 大于信号相关函数主峰到第一个零点的时间,那么各个目标的相关峰可分离^[9]。此时可先提取 $\hat{I}_c(\tau)$ 各个峰的峰值,然后对每个目标分别进行方位估计。因此,此方法适用于声压传感器与振速传感器中心间距较大的场合。

3 仿真实验结果及分析

针对空气和水中两种矢量传感器的应用环境,考虑带限白噪声、线性调频信号两种类型声信号,仿真分析不同大小的 Δd 在不同入射角与不同信噪比条件下对矢量传感器定向结果的影响。为简化起见,下面从二维平面进行分析,即俯仰角 α_s 为 0。采用 200 次 Monte Carlo 仿真进行分析,定向性能由定向偏差与定向方差描述。

信号分别为:频带 200~2000 Hz 的带限白噪声(以下简称白噪声);频带 200~1200 Hz 的线性调频信号(以下简称调频信号)。噪声信号为与信号不相关的白噪声。

白噪声、线性调频信号的自相关函数分别对应图 2 中的虚线与实线。实际制作时 Δd 较小,因此随入射角度的改变,时延差变化范围不大。可以看出调频信号的主峰宽,零点少,时延差在相同大小范围内变化,调频信号的相关系数变化小于白噪声。

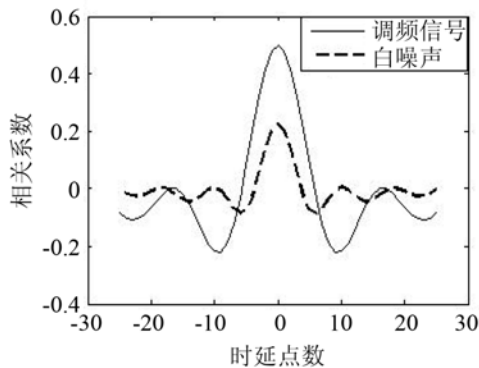


图 2 线性调频信号和带限白噪声的自相关函数示意图

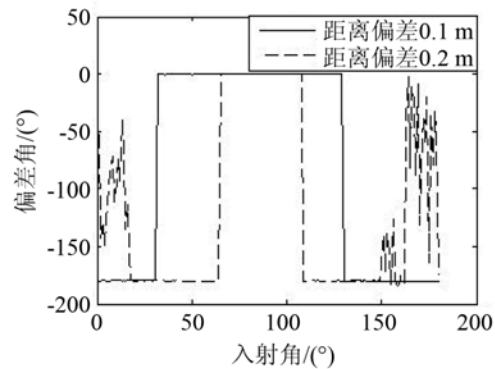
Fig.2 The self-correlation function diagrams of LMF signal (dashed line) and band limited white noise (solid line)

3.1 空气中

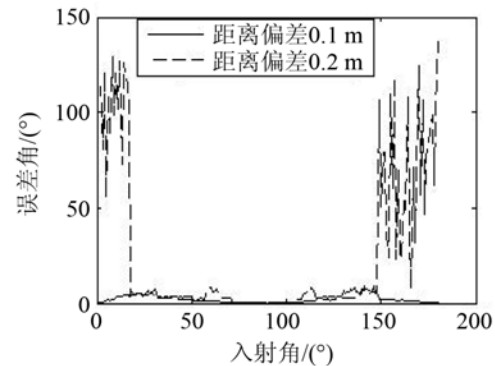
3.1.1 距离 Δd 、信号入射角度 θ_s 对定位的影响

图 3(a)、3(b)分别表示目标方位角依次从 $0^\circ \sim 180^\circ$ 入射时,中心距离偏差分别为 $\Delta d=0.1\text{ m}$ 、 $\Delta d=0.2\text{ m}$ 所引入的目标定向误差。仿真中信号为

白噪声,引入的噪声为不相关白噪声,信噪比为 -3 dB 。实线和虚线分别代表 $\Delta d=0.1\text{ m}$ 、 $\Delta d=0.2\text{ m}$ 的定向偏差和定向方差。



(a) 定向偏差(orientation deviation)



(b) 定向方差(Mean square error of orientation)

图 3 白噪声情况下两种中心距离偏差 Δd 和 $0^\circ \sim 180^\circ$ 入射角引起的定位误差($\Delta d=0.1\text{ m}$ -实线, 0.2 m -虚线)

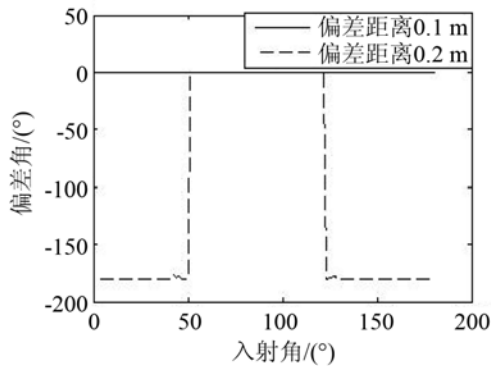
Fig.3 Orientation errors caused by the deviation of two central distances Δd and the incident angles of $0^\circ \sim 180^\circ$ for white noise ($\Delta d=0.1\text{ m}$ -solid line, 0.2 m -dashed line)

当 $\Delta d=0.1\text{ m}$ 时,入射角变化引起时延差变化范围较小。入射角在 $1^\circ \sim 180^\circ$ 变化,对应 $\hat{C}_s(\tau(\theta_s))$ 在自相关函数主峰内变化,且主峰零点的梯度较大,所以,当 $\hat{C}_s(\tau(\theta_s))$ 由正到负时,定向偏差角从 0° 跳跃到 -180° ,且杂乱的波动相对较小。

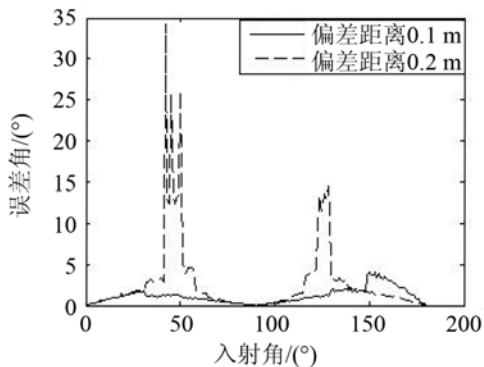
当 $\Delta d=0.2\text{ m}$ 时,入射角变化引起时延差变化范围相对较大。入射角在 $30^\circ \sim 150^\circ$ 变化,当 $\hat{C}_s(\tau(\theta_s))$ 在主峰内由正到负时,误差角从 0° 跳跃到 -180° ,定向方差较小;当入射角在 $0^\circ \sim 30^\circ$ 、 $150^\circ \sim 180^\circ$ 范围内, $\hat{C}_s(\tau(\theta_s))$ 在主峰外起伏,其绝对值很小,导致信噪比降低,从而定位偏差杂乱且大。

信号为线性调频信号,其他仿真条件不变。当目标方位角依次从 $0^\circ \sim 180^\circ$ 入射时,中心距离偏差为 $\Delta d=0.1\text{ m}$ 、 $\Delta d=0.2\text{ m}$ 引入的目标定向误差如图 4 所示。实线和虚线分别代表 $\Delta d=0.1\text{ m}$ 、 $\Delta d=0.2\text{ m}$ 的定向偏差(图 4(a))和定向方差(图 4(b))。

当 $\Delta d=0.1\text{ m}$ 时,定向偏差为 0,定向方差很小,说明整个过程时延差带来的定向误差很小。



(a) 定向偏差



(b) 定向方差

图 4 LMF 信号情况下两种中心距离偏差 Δd 和 $0^\circ\sim 180^\circ$ 入射角引起的定位误差

Fig.4 Orientation errors caused by the deviation of two central distances Δd and the incident angles of $0^\circ\sim 180^\circ$ for LMF signal ($\Delta d = 0.1$ m -solid line, 0.2 m -dashed line)

当 $\Delta d = 0.2$ m 时，定向偏差发生了 2 次跳变，定向方差在发生跳变的角附近变大。

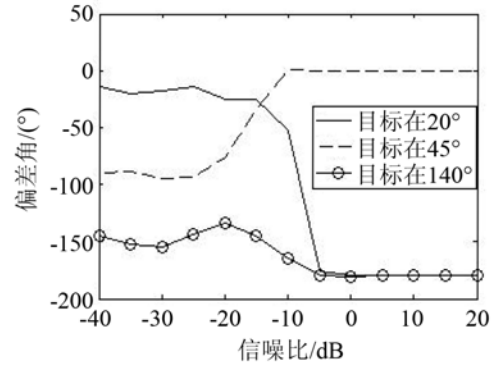
根据图 2，调频信号的自相关性比白噪声好，因此时延差在相同大小范围内变化， $\hat{C}_s(\tau(\theta_s))$ 的偏离峰值范围要小，对定向的影响较小。

综上所述， Δd 决定了时延差的变化范围，信号类型决定了相关函数主峰高度和宽度。上述仿真结果表明应用平均声能流法， Δd 取值对应的最大时延差应小于信号的相关函数主峰宽度，否则 $\hat{C}_s(\tau(\theta_s))$ 变化对定向影响较大。

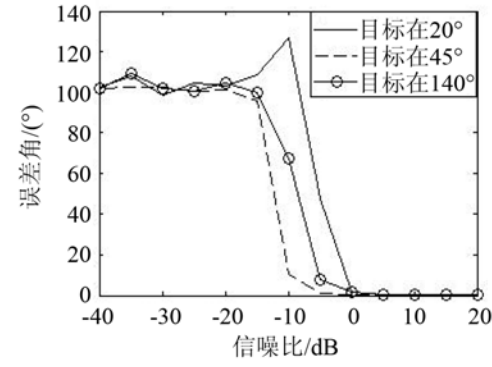
3.1.2 不同信噪比条件下， $\tau(\theta_s)$ 对定位的影响

图 5(a)、5(b) 分别表示中心距离 $\Delta d = 0.1$ m 时，白噪声目标信号依次从 20° 、 85° 和 140° 入射，分析信噪比为 $-40\sim 20$ dB 对定向结果的影响。

图 5(a)、5(b) 中实线、虚线、带圆圈实线，分别代表目标在 20° 、 85° 和 140° 入射，在不同信噪比条件下的定向偏差和定向方差。可以看出信号在 20° 入射，当信噪比小于 0 dB 时，定位偏差和方差明显变大；在 140° 入射，当信噪比小于 -5 dB 时，定位偏差和方差明显变大；在 85° 入射时，在信噪比小于 -10 dB 时出现定位不准的现象。 20° 、



(a) 定向偏差



(b) 定向方差

图 5 不同信噪比下声压和振速非共点测量的定向误差

Fig.5 Orientation errors caused by non-concurrent point measurement of pressure and particle velocity under different SNRs ($\Delta d = 0.1$ m, incident angle= 20° -solid line, 85° -dashed line, 140° -line with circles)

140° 和 85° 入射对应的 $\tau(\theta_s)$ 依次变小，对应的 $\hat{C}_s(\tau(\theta_s))$ 依次变大。验证了 $\tau(\theta_s)$ 使得 $\hat{C}_s(\tau(\theta_s))$ 偏离目标信号自相关函数的峰值，降低了信噪比。

3.1.3 “互相关声能流法”的定向性能

仿真条件不变，定向采用“互相关声能流算法”，得到不同信噪比条件下定向偏差和定向方差。如图 6(a)、图 6(b) 所示。

对比图 5 和图 6，可以看出采用互相关声能流算法后，信号在 20° 和 140° 入射时，偏差角没有 π 相位的偏差，且 20° 、 140° 入射的信号定向误差和 85° 入射的信号定向误差基本一致，均在信噪比大于 -10 dB 时定向精度较高。时延差对定向结果的影响基本可以忽略。验证了新算法抑制时延差导致的定向误差的能力。

3.2 水中

水中声速约为空气中的 4.4 倍， Δd 带来的两通道时延较小，对传统的声能流定向方法影响不明显。以白噪声为标准，时延点数为 2.26 时，相关系数降低了一半，对应空气中中心差 Δd 等于 0.05 m，对应水中 Δd 为 0.22 m。此时直接应用声能流法计算误差不大，若 Δd 超过这个数值，则使用声能流

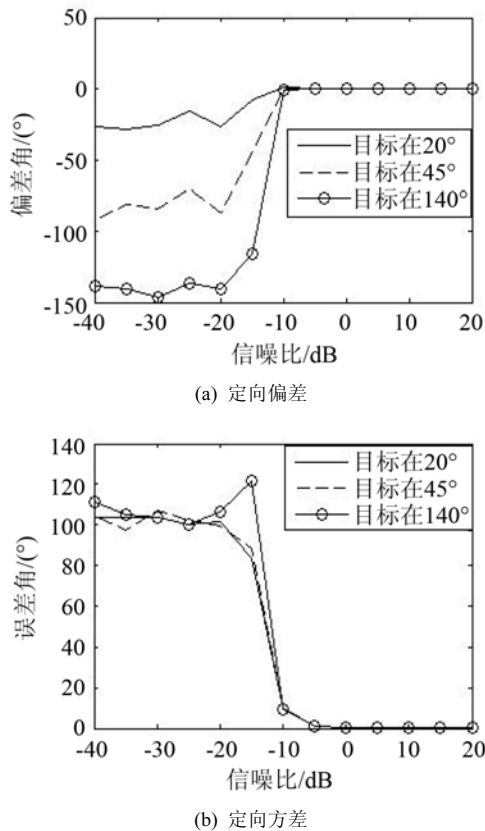


图6 不同信噪比下声压和振速“互相关声能流法”测量的定向误差
Fig.6 Orientation errors measured by the correlated acoustic intensity method for pressure and particle velocity under different SNRs ($\Delta d = 0.1$ m, incident angle = 20°-solid line, 85°-dashed line, 140°-line with circles)

法需要先时延补偿, 再进行计算。

4 结 语

本文研究了声压传感器与质点振速传感器中心不一致会导致声压和振速通道接收信号产生时延差, 从而导致同时刻声压和振速通道相关性下降。两中心间距增大、传播介质声速变小会导致时延变大, 时延差以及接收信号的自相关性差均会使得同时刻声压和振速通道相关性下降, 从而导致定向精度变差。水中声速约是空气中的声速的 4.4 倍,

因此这一问题对矢量传感器在水中应用的定向精度的影响比在空气中应用时要小。针对两中心不一致带来的定向性能变差的问题, 提出了采用互相关声能流定向算法, 仿真验证了算法的有效性。

参 考 文 献

- [1] 孙贵青, 李启虎. 声矢量传感器研究进展[J]. 声学学报, 2004, 29(6): 481-489.
SUN Guiqing, LI Qihu. Progress of study on acoustic vector sensor[J]. Acta Acustica, 2004, 29(6): 481-489.
- [2] WU Yanqun, HU Zhengliang, LUO Hong, et al. Source number detectability by an acoustic vector sensor linear array and performance analysis[J]. IEEE Journal of Oceanic Engineering, 2014, 39(4): 769-778.
- [3] Hawkes M, Nehorai A. Wideband source localization using a distributed acoustic vector-sensor array[J]. IEEE Transaction on Signal Processing, 2003, 51(6): 1479-1491.
- [4] 赵微, 李秀坤. 矢量线阵二维波达方位估计的方法[J]. 声学技术, 2008, 27(5): 658-661.
ZHAO Wei, LI Xiukun. A method of 2-D DOA estimation using a vector sensor line array[J]. Technical Acoustics, 2008, 27(5): 658-661.
- [5] 刘伯胜, 田宝晶. 矢量传感器估计目标方位的误差的仿真研究[J]. 哈尔滨工程大学学报, 2003, 24(5): 491-495.
LIU Bosheng, TIAN Baojing. Simulation study on errors for evaluation of target azimuth by single vector transducer[J]. Journal of Harbin Engineering University, 2003, 24(5): 491-495.
- [6] 时胜国, 杨德森. 矢量水听器的源定向理论及其定向误差分析[J]. 哈尔滨工程大学学报, 2003, 24(2): 132-135.
SHI Shengguo, YANG Desen. Acoustic source location by acoustic vector-sensor and its bearing error[J]. Journal of Harbin Engineering University, 2003, 24(2): 132-135.
- [7] 惠俊英, 惠娟. 矢量声信号处理基础[M]. 北京: 国防工业出版社, 2009: 9-14.
HUI Junying, HUI Juan. Vector acoustic signal processing basis[M]. Beijing: National Defense Industry Press, 2009: 9-14.
- [8] Malcolm Hawkes, Arye Nehorai. Acoustic Vector Sensor Correlations in Ambient Noise[J]. IEEE Journal of Oceanic Engineering, 2001, 26(3): 337-347.
- [9] 吴艳群, 胡永明. 基于单矢量水听器宽带多途信号的三维定位算法[J]. 兵工学报, 2010, 31(9): 1181-1187.
WU Yanqun, HU Yongming. Three-dimension location of broadband source using a single vector hydrophone in multipath environment[J]. Acta Armamentarii, 2010, 31(9): 1181-1187.