

孔径扩展的一种改进算法

李 博, 孙 超

(西北工业大学声学工程研究所, 西安 710072)

摘要: 针对扩展拖曳阵尺寸算法进行阵列扩展中存在的重叠阵元位置约束问题, 提出了一种基于扩展拖曳阵尺寸算法的改进阵列扩展算法。该算法通过在测量间隔内增加快拍获取时域信息, 再将重叠相关器提供的孔径域相位信息平均化处理, 获得相位修正因子补偿拖曳阵连续测量的相位差, 实现孔径扩展。该方法能够在未知源的先验信息和连续测量中阵元的空间位置不重叠情况下实现孔径扩展。仿真和实验结果表明, 该方法能有效扩展阵列孔径, 准确估计信号到达角。针对较低信噪比信号, 该方法能够获得比扩展拖曳阵尺寸算法更好的相位估计和方位分辨性能。

关键词: 合成孔径; 被动拖曳线列阵声纳; 方位估计

中图分类号: TN911

文献标识码: A

文章编号: 1000-3630(2010)-06-0637-05

DOI 编码: 10.3969/j.issn1000-3630.2010.06.017

A modified method of extended towed array algorithm

LI Bo, SUN Chao

(Institute of Acoustics Engineering, Northwestern Polytechnical University, Xi'an 710072, China)

Abstract: A modified array extension method based on extended towed array measurements method is proposed to overcome restriction on the positions of the overlapped hydrophones. In this paper, towed array is extended by using more snapshots and compensating phase differences obtained by aperture domain averaging of phase differences from an overlap correlator. So phase correction factors in the proposed method can be estimated without restriction on the positions of the overlapped hydrophones and information of the target. Results of simulation and experiment show that the proposed method can improve ability of estimation. This method achieved better angular resolution than extended towed array measurements method in signal with low signal-noise-ratio condition.

Key words: synthetic aperture; towed line array sonar; DOA estimation

1 引言

目前, 线阵广泛应用于水下目标特性测量。通过拖曳运动, 将小孔径阵列合成虚拟大孔径阵列, 为解决低频信号探测中大孔径声纳系统实现困难提供了有效途径^[1,2]。合成孔径技术已经成功地应用于航空器和卫星雷达领域^[3], 在主动侧视声纳上也得到广泛的应用^[4,5], 但是在被动声纳系统中的应用却受到限制。这是因为它需要接收信号有较好的相关性能, 要很好地补偿由拖曳带来的起伏, 这些和主动雷达或声纳中的合成孔径原理有差别, 因而不能直接应用其成熟理论。被动合成孔径声纳通过拖曳声纳平台产生运动, 将一段时间内的接收信号, 对其时延和空间位置进行补偿虚拟成大孔径阵列某一时刻的接收信号, 从而获得方位向的高分辨能力。研究表明, 一般情况下声信号在水下传播可以

满足被动合成孔径对接收信号相关性的要求^[6], 各类被动合成孔径方法^[7-10]从时、频、空域各角度入手最终实现孔径扩展。近年来引入矢量水听器、光纤水听器等结合被动合成孔径等其它信号处理方法^[11,12], 解决左右舷模糊, 水下目标检测, 目标方位距离联合估计等问题。

本文就被动合成孔径算法本身着手, 从时域角度出发, 基于扩展拖曳阵尺寸算法(ETAM, Extended Towed Array Measurement)思路, 证明平面波模型下阵列运动在不受空间位置重叠的约束下亦能获得相位修正因子, 并通过增加快拍数获得更多可用的时域信息, 进而对孔径域信号做补偿获得优于 ETAM 的性能。该方法在保证方位谱主瓣宽度不变的情况下, 能够降低旁瓣, 而且无需目标和阵列的精确相对速度以及多普勒频移的先验信息, 易于实现。

2 算法描述

ETAM 方法^[7]的基本思想是, 通过拖曳 N 元阵列来扩展拖曳阵尺寸。具体实现方法为: 在阵列相

收稿日期: 2009-11-06; 修回日期: 2010-03-02

作者简介: 李博(1983-), 女, 山西人, 博士研究生, 研究方向为被动声纳信号处理、阵列信号处理。

通讯作者: 李博, E-mail: nwpulibo@mail.nwpu.edu.cn

继两次运动时,对空间位置上重叠部分的水听器接收信号做互相关平均,作为后次未重叠水听器上接收信号的相位修正因子,合成前次虚拟阵元上的接收信号,重复上述过程,最终达到扩展孔径的目的。

均匀海洋环境中,对于一个 N 元各向同性水听器组成均匀等间距为 d 的拖曳阵,存在从 θ 方向入射的远场窄带信号源 $s(t_i) = A \cdot \exp(j\omega_0 t_i)$ (定义基阵法线方向为 90°)。则第 n 号水听器接收到的信号为:

$$x_n(t_i) = s\left(t_i - \frac{(n-1)d}{c} \cos\theta\right) + n_n(t_i) \quad (1)$$

其中, c 为水中声速, $n=1, 2, \dots, N$ 为阵元数, $t_i = i \cdot \Delta t, i=0, 1, 2, \dots, L-1$, L 为采样点数。 $n_n(t_i)$ 表示均值为零、方差为 σ_n^2 的独立高斯噪声。

窄带信号源静止。由于阵列运动,则阵列接收到的信号频率为 $\omega_d = \omega_0(1 \pm v \cos\theta/c)$, v 为阵速度。这里取 $\omega_d = \omega_0(1 - v \cos\theta/c)$, $((n-1)vd \cos^2\theta)/c^2 \ll 1$, 则式(1)可以近似为:

$$x_n(t_i) = A \cdot \exp\left\{j\omega_0\left(t_i - \frac{vt_i + (n-1)d}{c} \cos\theta\right)\right\} + n_n(t_i) \quad (2)$$

第 $(n+q)$ 号水听器接收到的信号为:

$$x_{n+q}(t_i) = n_{n+q}(t_i) + A \cdot \exp\left\{j\omega_0\left(t_i - \frac{vt_i + (n+q-1)d}{c} \cos\theta\right)\right\} \quad (3)$$

经过 τ 秒,第 n 号水听器接收到的信号为:

$$x_n(t_i + \tau) = n_n(t_i + \tau) + A \cdot \exp\left\{j\omega_0\left(t_i + \tau - \frac{vt_i + v\tau + (n-1)d}{c} \cos\theta\right)\right\} \quad (4)$$

考虑理想条件下,两次连续测量时各个水听器接收到的噪声近似相等,取合适的 v 、 τ ,使得 $v\tau = qd$ 时,式(3)和式(4)的关系为:

$$x_{n+q}(t_i) = \exp(-j\omega_0 \tau) \cdot x_n(t_i + \tau) \quad (5)$$

利用连续两次测量数据,计算空间位置重叠水听器的相位修正因子为:

$$\Psi_n = \arg\{x_{n+q}(t_i) \cdot x_n^*(t_i + \tau)\} = -\omega_0 \tau \quad (6)$$

$n=1, 2, \dots, N-q$

其中, $N-q$ 为两次测量时空间位置重叠水听器个数, $*$ 表示共轭转置。相位修正因子的最小平方估计为:

$$\hat{\Psi} = \frac{1}{N-q} \sum_{n=1}^{N-q} \Psi_n + \hat{\varepsilon}_\Psi \quad (7)$$

其中, $\hat{\varepsilon}_\Psi$ 表示系统或者随机误差。在信号持续较平稳情况下,随着重叠水听器个数的增多,相位误差 $\hat{\varepsilon}_\Psi$ 能够收敛到零。

从这里可以看出,该方法无需准确地知道目标和阵列的相对速度以及目标的多普勒频移,但是它假定拖曳阵维持恒定速度以保证连续测量时重叠

水听器的空间位置相同。

针对上述方法的不足之处,本文基于 ETAM 方法的思路,从时域角度出发,推导出平面波模型下不受重叠水听器空间位置完全相同约束的情况时,能够通过增加快拍数获得更多可用时域信息,再利用相关器得到相位修正因子,补偿测量间隔内所有接收数据再做平均,最终实现孔径扩展。

当 $v\tau' \neq qd$ 时,假定存在一个任意值 δ ,使得 $v\tau' = q(d + \delta)$,若有 $\tau' = \tau + \Delta\tau$,且 $v\tau = qd$ 。经过 τ' 秒,第 n 号水听器接收到的信号为:

$$\begin{aligned} x_n(t_i + \tau') = & A \cdot \exp\left\{j\omega_0\left(t_i + \tau' - \frac{vt_i + v\tau' + (n-1)d}{c} \cos\theta\right)\right\} + n_n(t_i + \tau') = \\ & n_n(t_i + \tau') + \exp\left\{j\omega_0\left(\tau' - \frac{qd}{c} \cos\theta\right)\right\} \cdot \\ & A \cdot \exp\left\{j\omega_0\left(t_i - \frac{vt_i + (n+q-1)d}{c} \cos\theta\right)\right\} \end{aligned} \quad (8)$$

根据前面讨论结果,式(5)可以改写为:

$$x_n(t_i + \tau') = \exp\left\{j\omega_0\left(\tau' - \frac{qd}{c} \cos\theta\right)\right\} x_{n+q}(t_i) \quad (9)$$

在这种情况下,连续两次测量中水听器的空间位置不再重叠,其相位修正因子为:

$$\Psi'_n = \arg\{x_{n+q}(t_i) \cdot x_n^*(t_i + \tau')\} = -\omega_0\left(\tau' - \frac{qd}{c} \cos\theta\right) \quad (10)$$

其中, $n=1, 2, \dots, N-q$

其最小平方估计为:

$$\hat{\Psi}' = \frac{1}{N-q} \sum_{n=1}^{N-q} \Psi'_n + \hat{\varepsilon}_{\Psi'} \quad (11)$$

可见,该方法无需知道信号源的频率、方位角和准确的拖曳阵速度,且无需确保阵元位置必须重叠,就能计算获得相位修正因子。通过相位补偿合成的 q 个水听器接收数据为:

$$x_{n+q}(t_i) = \exp(j\hat{\Psi}') x_n(t_i + \tau') \quad (12)$$

其中, $n=N-q+1, N-q+2, \dots, N$ 。

由此可见,连续两次测量时做相位相关的水听器的空间位置不再受到约束,可以得到相位修正因子,并不影响最终的合成结果。基于上述分析,为了更好地利用时间域信息,本文提出在两次测量间隔内增加快拍数获得时间域信息,利用相关器提供的相位修正因子补偿拖曳线阵因运动产生的相位差,最终实现孔径扩展。其示意图如图 1 所示。

为方便表述,将上述表达式统一写为如下形式:

$$x_{n,m}^k(t_i) = x_n(t_i + k\bar{\tau} + m\tau) \quad (13)$$

其中, $m=1, 2, \dots, M; k=0, 1, \dots, K-1$ 。 n 表示阵元个数, k 表示快拍数, $\bar{\tau}$ 表示快拍间隔时间, m 表示测量次数, τ 表示测量间隔时间。根据式(5),

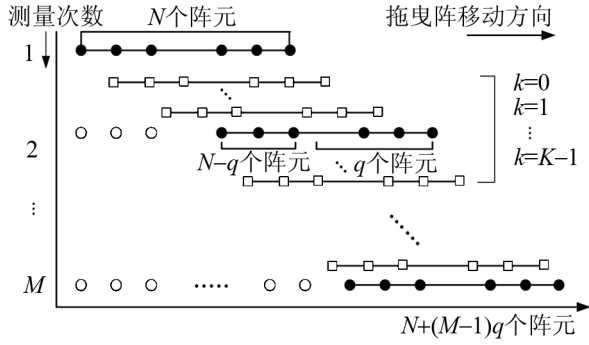


图1 本文方法的示意图

Fig.1 The sketch map of the proposed method

连续两次测量之间的关系可以写为:

$$x_{n,m+1}^k(t_i) = \exp\{-j\psi_{n,m}^k\} \cdot x_{n+q,m}^0(t_i) \quad (14)$$

其中, $n=1, 2, \dots, N-q$ 。 $\psi_{n,m}^k$ 表示第 m 次和第 $(m+1)$ 次中第 k 次快拍测量的重叠水听器的相位修正因子。其表达式具体为:

$$\psi_{n,m}^k = \arg\{x_{n+q,m}^0(t_i) [x_{n,m+1}^k(t_i)]^*\} \quad (15)$$

将空间位置重叠水听器的相位修正因子做平均, 有:

$$\hat{\psi}_m^k = \frac{1}{N-q} \sum_{n=1}^{N-q} \psi_{n,m}^k + \hat{\varepsilon}_\psi \quad (16)$$

则第 m 次测量中第 $(n+q)$ 号阵元的第 k 次快拍相位补偿的结果为:

$$x_{n+q,m}^0(t_i) \Big|_k = \exp\{j\hat{\psi}_m^k\} \cdot x_{n,m+1}^k(t_i) \quad (17)$$

其中, $n=N-q+1, \dots, N$ 。

再对 k 次快拍修正结果做平均, 得到第 m 次测量中合成的 q 个水听器接收数据为:

$$x_{n+q,m}^0(t_i) = \frac{1}{K} \sum_{k=0}^{K-1} x_{n+q,m}^k(t_i) \Big|_k \quad (18)$$

其中, $n=N-q+1, \dots, N$ 。

$$\psi_n^{m,m+1} = \arg\{x_{n+q,m}^0(t_i) [x_{n,m+1}^0(t_i)]^*\} \quad (19)$$

其中, $n=1, 2, \dots, N$ 。

$$C^m = \frac{1}{N} \sum_{n=1}^N \psi_n^{m,m+1},$$

$$\hat{\psi}_1 = C^1, \dots, \hat{\psi}_{M-1} = C^{M-1} + \dots + C^1 \quad (20)$$

根据上述分析, 能够将每次测量的 N 元阵扩展成 $(N+q)$ 元阵。利用式(20)计算得到 $(M-1)$ 次测量的修正因子补偿每次合成的测量结果, 将 N 元阵扩展成 $N+(M-1)q$ 元阵。本文方法实现孔径扩展的具体过程如图2所示。

3 仿真实验

取 $N=24$ 个各向同性水听器组成的均匀拖线阵, 阵元间距为 6m, 定义基阵法线方向为 90° , 本

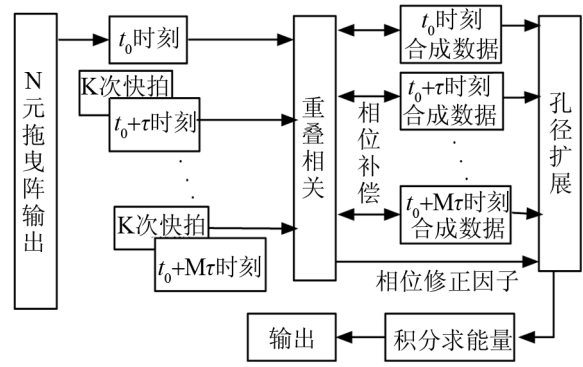


图2 本文方法原理框图

Fig.2 Principle diagram frame of the proposed method

文考虑远场平面波, 设单频静止声源辐射声频率为 125 Hz, 采样频率为 1 kHz, 水中声速为 1500 m/s, 拖曳阵速度为 2.5 m/s, 取每次移动中重叠阵元个数为 12, 测量次数为 11 次, 增加测量快拍数为 20。合成阵列长度为原物理阵的 5 倍。这里采用蒙特卡罗方法进行实验, 均方根误差由式(21)计算得到:

$$\varepsilon = \sqrt{\frac{1}{L} \sum_{i=1}^L (\theta - \hat{\theta}_i)^2}$$

其中, θ 、 $\hat{\theta}_i$ 分别表示声源到达方位角和第 i 次处理估计得到的方位角, $L=100$ 为蒙特卡罗次数。

假定声源静止位于 90° 方位, 环境噪声为非相关高斯白噪声, 均值为零, 方差为 5。图3为 ETAM 方法(实线)和本文方法(双划线)在信噪比(SNR)变化情况下方位角估计的均方根误差。从图3可以看出, 在信噪比较高时, 两种方法均能准确估计出方位角, 但随着信噪比降低, ETAM 方法的性能会迅速恶化, 而本文方法恶化缓慢。应用本文方法得到的方位角能量图主瓣不变且旁瓣更低, 另外在阵列运动中阵元位置不重叠情况下仍能实现孔径扩展。需要注意的是, 本文方法采用增加快拍数实现, 故会引起运算量的增大。

图4给出了随信噪比变化时本文方法应用不同

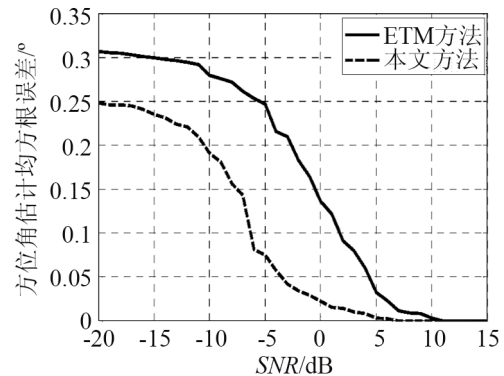


图3 两种方法的方位角估计均方根误差

Fig.3 Root mean squared errors of bearing estimation of the ETAM method and the proposed method

快拍数得到的方位角估计的均方根误差。从图 4 可以看出,随着快拍数的增加,方位估计误差减小,当快拍数达到一定数目后,误差不会无限减小。

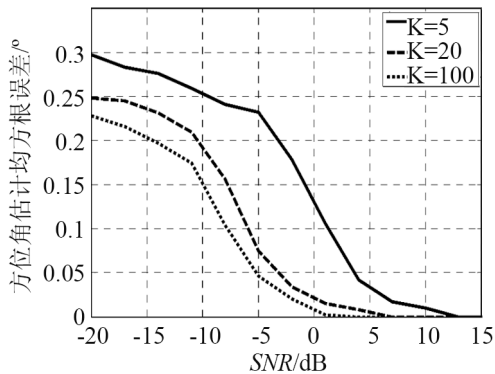


图 4 不同快拍下方位角估计均方根误差
Fig.4 Root mean squared errors of bearing estimation with different snapshots

信号在传播过程中幅度变化会影响合成孔径的效果,这里给出接收信号幅度随时间呈指数衰减 $\exp(-m\tau/T_c)$ 情况下的算法结果。表 1 给出了信号稳定时间 T_c 与阵合成处理时间 T_s 比率变化情况下(初始信噪比为 -5dB),两种方法的方位估计误差结果和估计误差在 0.3° 以内的概率值。从表 1 中可以看出,本文方法在较低信噪比情形下方位角估计性能优于 ETAM 方法且有更好的稳健性。

表 1 初始信噪比 -5dB 时估计误差结果

Table 1 Root mean squared errors and error probability of bearing estimation beginning with -5dB SNR

(T_c/T_s)	方位估计均方根误差/ $^\circ$		正确估计概率/%	
	ETAM	本文方法	ETAM	本文方法
0.3	0.29	0.21	76	98
1	0.27	0.11	95	99
2	0.26	0.07	100	100

单频静止声源辐射声频率为 6kHz , 采样频率为 100kHz , 水中声速为 1500m/s , 拖曳阵速度为 0.03m/s , 接收阵为 5 元等间距为 0.125m 的水平线阵(定义法线方向为 90°), 每次移动阵元数为 2, 测量次数为 6 次。合成阵列长度为原物理阵的 3 倍。图 5 给出了目标在端射方向时应用两种方法的估计结果, 其中虚线表示未对准情况下(即每次移动阵元数为 1.6)本文方法的估计结果。

4 水池实验

实验在某大学消声水池进行。图 6 给出实验系统布局示意图, 图 7 给出实验工作时的俯视图。信号源产生的信号经过功率放大器驱动发射换能器发射信号, 发射信号为连续正弦波。为便于对比, 选

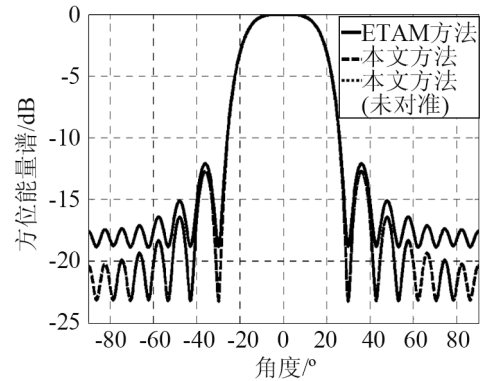


图 5 方位角能量图
Fig.5 The azimuthal power pattern from beamforming output of the ETAM method and the proposed method with simulation data

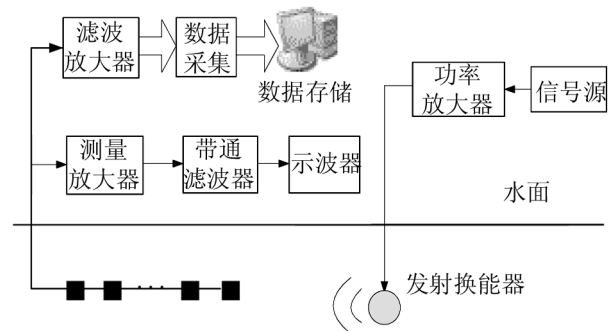


图 6 水池实验系统布局示意图
Fig.6 The configuration of experiment

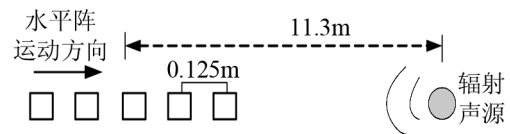


图 7 水池实验时工作俯视图
Fig.7 Experiment setup

取与上节仿真参数一致, 其中接收阵和发射换能器深度均为 3m , 两者初始水平相距 11.3m , 基阵朝向声源匀速运动, 速度为 0.03m/s , 共采集 2min 数据。

实验模拟目标为 1 个, 该目标从基阵的端射方向入射。取 $\tau=8.4\text{s}$ 为间隔处理时间。对于阵元未对准情况, 取 7s 为间隔处理时间。另外在离线处理数据时, 选取其中较为平稳的一段数据加入 5dB 的高斯白噪声进行处理。

图 8 给出了 5 元线阵分别应用两种方法合成 15 元阵得到的方位角能量图, 其中虚线表示测量时阵元未重叠情况下本文方法的结果。从图 8 可以看出, 应用本文方法能明显降低旁瓣, 而对于阵元未重叠情况, 仍能有效实现孔径合成。通过和图 5 进行对比, 证明本文方法是可行有效的。

5 结 论

本文基于 ETAM 方法的思路, 提出了一种利用

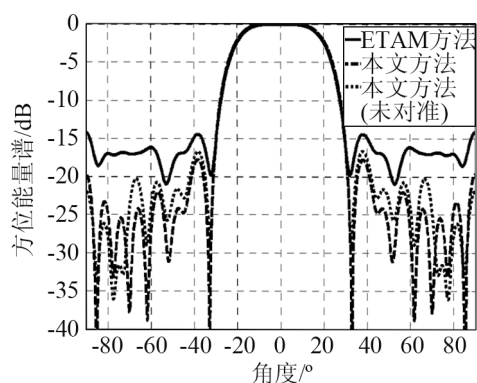


图8 方位角能量图

Fig.8 The azimuthal power pattern from beamforming output of the ETAM method and the proposed method with real data

时域信息进行孔径扩展的方法。通过增加快拍数得到更多时域信息,获得相位修正因子补偿相位差实现孔径扩展。仿真和实验结果表明,在未知信号源先验知识情况下,无需精确知道拖曳阵速度,且对连续测量时阵元空间位置重叠的精度要求不高,本文方法能准确地估计出方位角。本文方法利用时域信息结合孔径域处理,容易实现,特别针对较低信噪比信号,展示出优于 ETAM 方法的估计性能。

参 考 文 献

- [1] Hayes M P, Gough P T. Synthetic aperture sonar: a review of current status [J]. IEEE J Ocean Eng., 2009, 34(3): 207-224.
- [2] Stergiopoulos S. Advanced signal processing handbook [M]. CRC Press LCC, 2001.
- [3] Curlander J C. Synthetic aperture radar-Systems and signal processing[M]. New York: John Wiley & Sons, 1991.
- [4] 孙大军, 田坦. 合成孔径声呐技术研究(综述)[J]. 哈尔滨工程大学学报, 2000, 21(1): 51-56.
SUN Dajun, TIAN Tan. The study of synthetic aperture sonar (SAS) technique (review)[J]. Journal of Harbin Engineering University, 2000, 21(1): 51-56.
- [5] Sabel J C, Beerens S P, Groen J. Literature survey on synthetic aperture sonar[R]. TNO-FEL report TNO-DV1 2004 A253, 2005.
- [6] Sazontov A G, Matveyev A L. Acoustic coherence in shallow water: theory and observation[J]. IEEE J Ocean Eng., 2002, 27(3): 653-664.
- [7] Seungil Kim, Dae Hee Youn, Lee C Y. Temporal domain processing for a synthetic aperture array[J]. IEEE J. Ocean Eng., 2002, 27(2), 322-327.
- [8] Sullivan E J, Jason D H. Broadband passive synthetic aperture: experimental results[J]. J. Acoust. Soc. Am., 2006, 120(4): EL49-EL54.
- [9] Holmes D, Carey W M. An autonomous underwater vehicle towed array for ocean acoustic measurements and inversions[C]. Europe: IEEE Oceans, 2005, 1061-1068.
- [10] 刘辉涛. 线阵信号检测的被动合成孔径技术研究[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工程大学, 2005: 6-19.
LIU Huitao, Research on passive synthetic aperture in the signal detection of the line array[D]. Harbin: Harbin Engineering University, 2005: 6-19.
- [11] 黄勇, 李宇, 黄海宁. 主、被动拖曳线列阵远程目标定位[J]. 电子与信息学报, 2007, 29(3): 643-647.
HUANG Yong, LI Yu, HUANG Haining. Long distance source localization with active and passive towed line array[J]. Journal of Electronics & Information Technology, 2007, 29(3): 643-647.
- [12] 魏建新. 被动合成孔径声呐辐射噪声测量方法研究[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工程大学, 2009: 25-45.
WEI Jianxin. The research of measurement of radiated noise by passive synthetic aperture technique[D]. Harbin: Harbin Engineering University, 2009: 25-45.