

长线阵联合阵形估计系统研究

王晓林, 王世闯, 庞玉红, 罗 斌

(杭州应用声学研究所, 浙江杭州 310023)

摘要: 针对长线阵易发生阵形畸变问题, 提出一种基于非声传感器和水动力模型求解的联合阵形估计系统。该系统在充分利用非声传感器信息的基础上, 进一步根据拖线阵水动力模型, 求解实时阵形, 实现阵形估计。仿真实验及数据分析表明, 与传统的阵形估计算法相比, 该系统的估计精度提高 10% 以上, 对工程实践具有较高的指导意义。

关键词: 拖线阵; 潜艇; 阵形估计; 非声传感; 信息处理

中图分类号: TB566

文献标识码: A

文章编号: 1000-3630(2018)-02-0117-05

DOI 编码: 10.16300/j.cnki.1000-3630.2018.02.004

Research on the combined shape estimation system of the long linear array

WANG Xiao-lin, WANG Shi-chuang, PANG Yu-hong, LUO Bin

(Hangzhou Applied Acoustics Research Institute, Hangzhou 310023, Zhejiang, China)

Abstract: This article proposes a combined shape estimation system of long linear array based on non-acoustic sensor method and hydrodynamic model solving method. The system makes full use of the non-acoustic sensor information to further solve real-time array shape of the tactical towed array according to the hydrodynamic model. Through the data analysis, this system's estimate accuracy can be increased by more than 10% compared with traditional array shape estimation algorithm, which has a higher guiding significance to practical engineering applications.

Key words: towed line array; submarine; array shape estimation; non-acoustic sensor; signal processing

0 引言

随着现代潜艇减震降噪技术的迅猛发展, 舰壳声呐对潜艇的探测能力正呈指数下降。拖曳线列阵声呐具有基阵孔径不受平台空间尺度限制、工作深度可根据水文环境变换、受本艇噪声干扰小等特点, 使得该型声呐与其他类型声呐相比, 探测能力大幅度提高; 又因为舰(艇)降噪技术对 1 kHz 以下频率辐射噪声的降噪能力有限, 更凸显了拖线阵声呐在低频段的性能优势。因此, 拖线阵声呐已成为潜艇的主要声呐装备之一。

随着国际上低噪声、安静型潜艇的出现, 为使拖线阵对该类潜艇具有较远的作用距离, 其声学孔径正在逐渐增长。

目前, 拖线阵信号处理算法的前提为假定拖线阵阵形保持直线不变。该前提的优点是计算量小, 可保证拖曳平台直航时的性能指标。但缺点是当潜

艇在低速巡弋时, 拖线阵易发生阵形畸变, 此时阵形与算法失配, 导致装备探测能力变差甚至无法探测到目标。

随着数字信号处理器的快速发展, 现有处理器的处理能力大幅度提高, 计算量的大小对拖线阵的限制正在降底。为了使拖线阵声呐能够在更多苛刻的条件下可用, 长线阵的阵形估计显得越发重要。

针对拖线阵声呐的阵形估计问题, 美、英等国均使用航向传感器和压力传感器等非声传感器^[1-5], 通过对测量数据的曲线拟合估计阵形。该方法的精度取决于航向传感器和深度传感器的测量精度。除了非声传感器方法外还有两种解决方法。一种是基于声场信号的声学方法, 另一种是非声学方法。

声学方法利用了拖线阵接收到的声场数据来估计阵形, 计算量很大, 而且估计精度主要取决于输入的信噪比, 当没有远场信号源时, 这类方法一般会失效。该类算法主要包括梯度法, 特征向量法、时延估计法和频率-波数法。

非声学方法目前主要是建立水动力数学模型。将拖船的运动速度和水流速度作为变量, 通过数值方法对拖线阵各离散点的微分方程组求解, 将得到拖线阵任意时刻的阵元位置。这类方法的前提是知

收稿日期: 2017-04-21; 修回日期: 2017-06-29

作者简介: 王晓林(1980—), 男, 广东揭阳人, 硕士, 高级工程师, 研究方向为声呐总体技术。

通讯作者: 王世闯, E-mail: wsc_715@163.com

道拖曳平台和海流的速度,精度主要取决于对水下流场的速度估计精度和拖船运动速度的精度。在工程上,上述两种信息无法精准地实时提供给信息处理系统,故限制了其应用。

本文提出非声传感器法和水动力模型求解法的联合方法进行阵形估计。

1 非声传感器法估计阵形

非声传感器法估计阵形时,通常使用压力传感器和航向传感器。压力传感器通过水压作用于传感器外壳,将晶体形变转化为电流输出,电流输出的大小取决于压力的大小。通过压力传感器,可测量该点的水压大小,进而可转化为水深,通常压力传感器的精度随量程变化,在百米量程内,压力传感器的测量精度可达分米级。航向传感器可测量该传感器方向与正北方向的夹角,该夹角代表了线阵在该处与正北方向的夹角,航向传感器的精度随其横滚的幅度变化较明显,在理想情况下,航向传感器精度可达 $\pm 1.5^\circ$ 。

为有效估计阵形,在每个阵元处分别安装一个压力传感器和一个航向传感器。假定声阵长为 L 、阵元数为 N 、阵元间距为 M 、以首阵元为坐标原点 $(0,0,0)$ 。首阵元处压力传感器显示的深度值为 Y_{a0} (m);航向传感器值为 H_{a0} ($^\circ$)。第 i 号阵元处压力传感器值为 Y_{ai} ;航向传感器值为 H_{ai} 。通过坐标转化,可得第 i 号阵元的坐标 (x_i, y_i, z_i) 为

$$(T \cdot \sin(\frac{H_{ai}-H_{ai-1}}{180} \cdot \pi), T \cdot \cos(\frac{H_{ai}-H_{ai-1}}{180} \cdot \pi), Y_{ai}-Y_{ai-1}),$$

其中, $T=M \cdot \cos(\arcsin(\frac{Y_{ai}-Y_{ai-1}}{M}))$, $i=1,2,\dots,N-1$ 。

航向传感器和压力传感器的测量误差呈正态分布,则其阵形估计精度为

$$\eta_i = \frac{\sqrt{(x_{ic}-x_{iz})^2+(y_{ic}-y_{iz})^2+(z_{ic}-z_{iz})^2}}{\sqrt{x_{iz}^2+y_{iz}^2+z_{iz}^2}} \cdot 100\% \quad (1)$$

其中, x_{ic} 、 y_{ic} 、 z_{ic} 为第 i 号阵元坐标的测量值, x_{iz} 、 y_{iz} 、 z_{iz} 为第 i 号阵元坐标的真值,则平均估计精度为

$$\eta = \frac{1}{N-1} \sum_{i=1}^{N-1} \eta_i \quad (2)$$

以现有航向传感器的精度,可以计算出阵元平均估计精度可达80%(因航向传感器受阵横滚的影响,平均精度假定为 $\pm 5^\circ$)。

2 利用水动力模型求解法计算阵形

水动力学理论的拖线阵水中各点受力的表达式^[6]为

$$\frac{\partial \mathbf{T}}{\partial s} + \mathbf{W} + \mathbf{F} + \mathbf{B} = 0 \quad (3)$$

其中: \mathbf{T} 为拉力; s 为线阵扩展方向长度; \mathbf{W} 为单位长度线阵减去浮力后的净重力, \mathbf{F} 为单位长度线阵沿着 s 方向的流体阻力, \mathbf{B} 为单位长度线阵由运动引起的达朗贝尔力。

定义坐标系:缆阵上的一点,以其延长线的切线方向为 t 轴;其延长线的法线方向为 n 轴; t 方向矢量和 n 方向矢量的差乘的矢量方向为 b 轴方向。

根据该坐标系,将式(3)分解为 t 、 n 、 b 三个方向不同的标量式:

$$\begin{cases} T' = -\frac{meV_t}{1+eT} \cdot \dot{T} + m\dot{V}_t + (m_1V_b - \rho AJ_b) \cos \phi \dot{\theta} - \\ (m_1V_n - \rho AJ_n) \dot{\phi} + w \sin \phi - \frac{1}{2} \rho d (1+eT)^{\frac{1}{2}} \pi C_t U_t |U_t| \end{cases} \quad (4a)$$

$$\begin{cases} T\phi' = -\frac{(m_1V_n - \rho AJ_n)e}{1+eT} \cdot \dot{T} + m_1\dot{V}_n - \\ (m_1V_b - \rho AJ_b) \sin \phi \dot{\theta} + mV_t \dot{\phi} - \rho AJ_n + \\ w \cos \phi + \frac{1}{2} \rho d (1+eT)^{\frac{1}{2}} C_n U_n (U_n^2 + U_b^2)^{\frac{1}{2}} \end{cases} \quad (4b)$$

$$\begin{cases} -T \cos \phi \theta' = [(m_1V_n - \rho AJ_n) \sin \phi - mV_t \cos \phi] \dot{\theta} - \\ \rho AJ_b - \frac{(m_1V_b - \rho AJ_b)e}{1+eT} \cdot \dot{T} + m_1\dot{V}_b + \\ \frac{1}{2} \rho d (1+eT)^{\frac{1}{2}} C_n U_b (U_n^2 + U_b^2)^{\frac{1}{2}} \end{cases} \quad (4c)$$

其中: θ 为偏航角; V 为拖线阵速度; ϕ 为俯仰角; \cdot 为对时间 t 的偏导数,即 $\partial/\partial t$; $'$ 为对阵长 s 的偏导数,即 $\partial/\partial s$; m 为单位阵长质量; A 为阵的横截面积; m_1 为阵质量与流体附加质量之和; g 为重力加速度; ρ 为海水的密度; e 为杨氏模量; w 为单位阵在水中的重量; C_n 为法向阻力系数; C_t 为切向阻力系数; J 为海流的速度; d 为阵的直径; U 为阵相对水流的速度。

同时,缆阵的运动方程为^[6]

$$\mathbf{r}' = x'\mathbf{i} + y'\mathbf{j} + z'\mathbf{k} = (1+\varepsilon)\mathbf{t} \quad (5)$$

把式(6)展开为 t 、 n 、 b 三个方向不同的标量式:

$$V_t' + V_b \cos \phi \theta' - V_n \phi' = e\dot{T} \quad (6a)$$

$$V_n' - V_b \sin \phi \theta' + V_t \phi' = (1+eT)\dot{\phi} \quad (6b)$$

$$V_b' + (V_n \sin \phi - V_t \cos \phi) \theta' = -(1+eT) \cos \phi \dot{\theta} \quad (6c)$$

式(4)和式(6)中的六个方程组成了拖线阵上任一点所满足的平衡方程组。

将该方程组改写为矩阵^[7]形式

$$HX' = K\dot{X} + L \quad (7)$$

式(7)中, H 、 K 是 6×6 的矩阵, L 为 6×1 的矩阵, $X = [T, V_p, V_n, V_b, \theta, \phi]^T$ 。

拖曳线列阵的边界^[8]包含两部分, 即首端拖点边界和尾端自由边界。首端和拖曳平台连接, 所以首端的边界条件为拖线阵首端速度与拖曳平台速度相同, 即 $V(t, 0) = v(t)$, 用 X 表示为

$$P \cdot X(t, 0) = \begin{bmatrix} 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} T(t, 0) \\ V_t(t, 0) \\ V_n(t, 0) \\ V_b(t, 0) \\ \theta(t, 0) \\ \phi(t, 0) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} v_t(t) \\ v_n(t) \\ v_b(t) \end{bmatrix} \quad (8)$$

尾端是自由端, 不受张力, 即 $T(t, S) = 0$, 偏航角和俯仰角在尾端对空间未知数 s 的偏导数为零, $\theta'(t, S) = \phi'(t, S) = 0$, 所以根据式(9), 可得

$$E \cdot X(t, S) + F(t, S) \cdot \dot{X}(t, S) + G(t, S) = 0 \quad (9)$$

式中, E 、 F 是 3×6 的矩阵, G 为 3×1 的矩阵。

式(8)和式(9)就组成了拖曳线列阵的完整的边界条件, 由六个方程组成。

初始条件即为起始时刻, 所有以 s 作为变量的函数值 $T(t_0, s)$ 、 $V_t(t_0, s)$ 、 $V_n(t_0, s)$ 、 $V_b(t_0, s)$ 、 $\theta(t_0, s)$ 、 $\phi(t_0, s)$ 都已知。通常, 因无法得知起始时刻的函数值, 故选线阵在海流稳定的海域中直线航行时为起始时刻。此时整个系统则处于一种相对静止的状态, 拖曳线列阵的 X 值的时间导数 $\frac{\partial X}{\partial t} = 0$, 式(8)就可简化为 $HX' = L$ 。该种算法存在两个弊端: 一是无法知道某海域中海流是否稳定, 二是稳定航行的条件难以做到。这两个原因极易导致因初始状态不稳定而使后续的计算发生畸变, 进而导致利用该方法估计阵形失败。

本文通过数据分析, 将非声传感器法估计的阵形数据代入水动力模型初始条件, 大幅度提高了该模型计算结果的准确性。

根据平衡方程和初始条件、边界条件, 将偏微分方程离散化, 以各阵元为离散点, 则有:

$$\begin{aligned} & \frac{1}{2} [H_{j+1/2}^i (\frac{X_{j+1}^i - X_j^i}{\Delta s_j}) + H_{j+1/2}^{i+1} (\frac{X_{j+1}^{i+1} - X_j^{i+1}}{\Delta s_j})] - \\ & \frac{1}{2} [K_j^{i+1/2} (\frac{X_j^{i+1} - X_j^i}{\Delta t}) + K_{j+1}^{i+1/2} (\frac{X_{j+1}^{i+1} - X_{j+1}^i}{\Delta t})] - \\ & \frac{1}{2} [L_{j+1/2}^i + L_{j+1/2}^{i+1}] - \alpha((\Delta s_j)^2) - \alpha((\Delta t)^2) = \\ & HX' - K\dot{X} - L = 0 \end{aligned} \quad (10)$$

式中, Δs_j 为两离散点间的距离; Δt 为两计算时刻

间的时间差; X_j^i 表示第 i 时刻拖线阵上第 j 个点的 X 值, 即 $X_j^i = X(s_j, t_i)$; $H_{j+1/2}^i = \frac{1}{2} (H_j^i + H_{j+1}^i)$;

$$K_j^{i+1/2} = \frac{1}{2} (K_j^i + K_{j+1}^{i+1}); L_{j+1/2}^i = \frac{1}{2} (L_j^i + L_{j+1}^i) a。$$

同理, 对边界条件进行离散, 有:

$$P \cdot X_0^{i+1} - v(t_{i+1}) = 0 \quad (11)$$

$$E \cdot X_N^{i+1/2} + F(X_N^{i+1/2}, t_{i+1/2}, s_{N_1+N_2}) \cdot (\frac{X_N^{i+1} - X_N^i}{\Delta t_i}) + G(X_N^{i+1/2}, t_{i+1/2}, s_{N_1+N_2}) = 0 \quad (12)$$

式(10)、(11)、(12)组成的方程组中任意时刻、任意位置 ($t = t_{i+1/2}, s = s_{j+1/2}$) 上都包含了六个方程, 如果拖线阵选取 N 个离散点, 则加上边界条件就有 $6 \times (N+1)$ 个方程, 同时也包含了 $6 \times (N+1)$ 个变量, 方程数和变量数相同, 可以通过求解该方程组, 获得各阵元的位置坐标。

3 联合阵形估计系统设计

本文前两节中的两种阵形估计方法均可行, 但精度均不高, 不足以作为信号处理的参数使用。为了有效提高阵形估计的精度, 将阵形信息运用到信号处理中, 需要提出一种精度更高的阵形估计方法。本文在充分掌握两种方法的基础上, 进行冗余复用, 提出联合阵形估计系统。

系统工作原理图如图 1 所示。工作原理如下:

- (1) 将非声传感器数据载入非声传感阵形估计子系统中, 经过初次计算, 可计算出各阵元相对首阵元的位置信息;

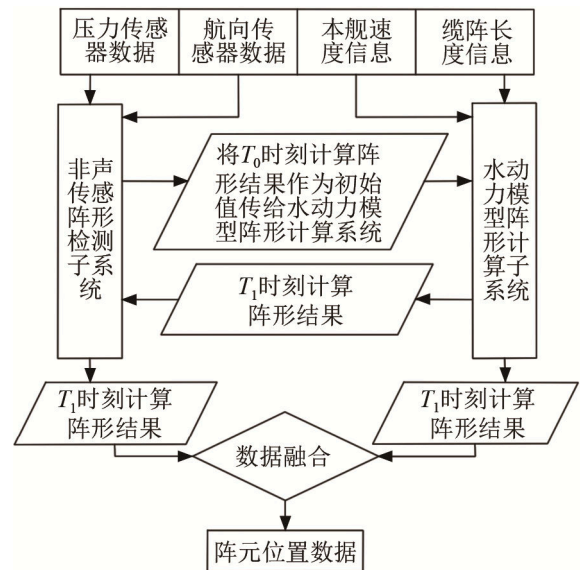


图 1 系统原理图

Fig.1 The principle diagram of the system

(2) 通过卡尔曼滤波器，对各阵元位置信息进行递增估计。稳定后将估计的 T_0 时刻的阵元位置信息传递给水动力模型阵形计算子系统；

(3) 水动力模型阵形计算子系统根据输入的本舰速度信息、缆阵长度信息、以及 T_0 时刻阵元位置信息，计算 T_0 时刻的初始条件和边界条件；

(4) 通过初始条件、边界条件和微分方程组，利用数值近似方法估计 T_1 时刻的阵元位置信息；

(5) 将计算的 T_1 时刻的阵元位置信息反馈给非声传感阵形估计子系统，对其卡尔曼滤波结果进行修正；

(6) 将非声传感阵形估计子系统修正后的 T_1 时刻阵元的位置信息和水动力模型阵形计算子系统计算的 T_1 时刻阵元的位置信息进行加权融合；

(7) 输出系统阵元位置信息。

该系统包含两部分的信息修正，一是非声传感阵形估计子系统中卡尔曼滤波器对测量数据的修正，二是水动力模型阵形计算子系统的计算结果对卡尔曼滤波器估计结果的修正。还包含一部分的数据融合。经过该系统后，阵形估计结果的精度提高明显。

4 仿真试验分析

根据以上理论，进行仿真试验分析。假设压力传感器的系统误差为 0.2 m，呈 χ^2 分布；测量误差为 0.1 m，呈正态分布。航向传感器系统误差为 2° ，呈 χ^2 分布；测量误差为 5° ，呈正态分布。阵元间距为 2 m，线阵长 400 m，阵元数为 200。本舰航速为 6 kn，速度测量误差为 $\pm 10\%$ ，缆长真实值为 590 m，输入值为 600 m。则真实阵形、非声传感器法测量的阵形、水动力模型求解法计算的阵形与联合阵形估计系统计算的阵形结果如图 2、3、4 所示。

由图 2、3、4 可得，非声传感器法估计的阵形和水动力模型求解法计算的阵形与实际阵形相比，

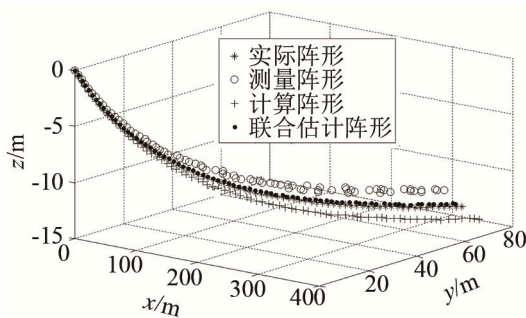


图2 阵形估计结果三维图

Fig.2 The top view of array shape estimation result

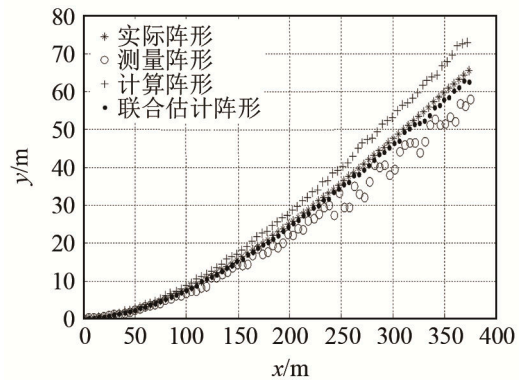


图3 阵形估计结果俯视图

Fig.3 The planform of array shape estimation result

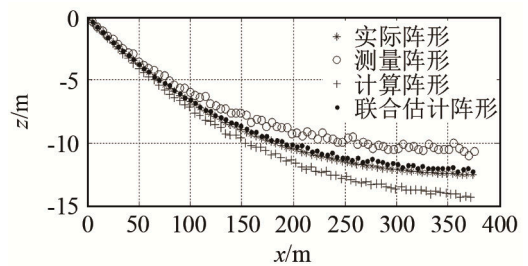


图4 阵形估计结果侧视图

Fig.4 The side view of array shape estimation result

均有较大的误差。如上仿真条件下，非声传感器法估计的阵形精度仅为 78%；水动力模型求解法计算的阵形精度为 84%；而联合阵形估计系统所估计的阵形精度可达 96%；可以作为信息处理的参数使用。

经过统计分析，在以上仿真条件不变的前提下，该联合阵形估计系统的精度与阵元间距(或非声传感器间距)的关系如表 1 所示(阵长为 400 m)。

表 1 阵元间距、阵形估计精度、计算量之间的关系

Table 1 Relationship between element spacing, shape estimation accuracy and computational amount

阵元间距/m	8.0	4.0	2.0	1.0	0.5
精度/%	86	90	93	95	96
计算量(倍)	1	64	4.096	2.62	1.678
			$\times 10^3$	$\times 10^5$	$\times 10^7$

由表 1 可知，随着阵元间距的减小，联合估计阵形的精度呈线性增加，但计算量却呈指数增加。阵元间距 0.5 m 所消耗的计算量是阵元间距 8 m 的 1.678×10^7 倍，已经远远超过了实时计算所需要的时间。但阵元间距 8 m 估计的阵形精度仅有 86%，无法作为信息处理的参数使用。

在阵元间隔 2 m，其他仿真条件不变的前提下，该联合阵形估计系统的精度与时间间隔的关系如表 2 所示。

表 2 时间间隔、阵形估计精度、计算量之间的关系

Table 2 Relationship between time interval, shape estimation accuracy and computational amount

时间间隔/s	8	4	2	1	0.5
精度/%	90	92	94	95	96
计算量(倍)	1	2	4	8	16

由表 2 可知，随着时间间隔的减小，联合估计阵形的精度逐渐增加，计算量呈 2 的倍数增加。时间间隔 8 s 所消耗的计算量是时间间隔 0.5 s 的 16 倍。阵形估计精度由 90% 提高到 96%。

综上所述，该系统应用参数的选择，需要根据实际需求进行分析，既要满足使用要求，又要确保计算成本底。

5 结论

本文论述了非声传感器法和水动力模型求解法对拖曳线列阵阵形的估计理论。根据两种方法的特点，提出了联合阵形估计系统的构建方法。并通过仿真试验，验证了该系统的有效性。通过统计分析，获得阵元间距和时间间隔对系统计算精度的影响，得出系统参数的选取方案，具有重要的实际工程意义。

参 考 文 献

[1] BURGESS J J. Equations of motion of a submerged cable with

bending stiffness[C]//Proceedings of the 11th International Offshore Mechanics and Arctic Engineering Conference Canada, 1992, 283-289.

- [2] GOBAT J I, GROSENBAUGH M A. Time-domain numerical simulation of ocean cable structures[J]. Ocean Engineering 2006, 33: 1373-1400.
- [3] PARK H I, JUNG D H. Nonlinear dynamic analysis on low tension towed cable by finite difference method[J]. J Soc Navel Architects Korea, 2002, 39(1): 28-37.
- [4] PAO H P, LING S C, KAO T W. Measurement of axial hydrodynamic force on a yawed cylinder in a uniform stream[C]// Proceedings of the 10th Offshore and Polar Engineering Conference (ISOPE). Seattle, USA, 2000, 356-361.
- [5] PARK HI, JUNG DH. Nonlinear dynamic analysis on low tension towed cable by finite difference method[J]. J Soc Navel Architects Korea, 2002, 39(1): 28-37.
- [6] 王世闯, 王茂法, 肖翔, 等. 拖曳线列阵机动时的一种目标检测算法研究[J]. 声学学报, 2014, 39(4): 441-451.
WANG Shichuang, WANG Maofa, XIAO Xiang, et al. A target detection algorithm research during towed line array maneuvering[J]. Acta Acustica, 2014, 39(4): 441-451.
- [7] 王世闯, 王茂法, 肖翔, 等. 被动拖曳线列阵机动过程中的频域宽带波束形成[J]. 声学与电子工程, 2012(108): 5-9.
WANG Shichuang, WANG Maofa, XIAO Xiang, et al. The broadband beamforming in frequency domain of passive towed line array maneuvering[J]. Acoustic and Electronic Engineering, 2012(108): 5-9.
- [8] 王世闯. 被动拖曳线列阵机动时的信号处理研究[D]. 北京: 中国舰船研究院, 2013.
WANG Shichuang, The research of signal processing during passive towed line array maneuvering[D]. Beijing: China Ship Research and Development Academy, 2013.