

基于多普勒-随机共振技术的高精度阵形估计系统研究

王世闯, 王晓林, 庞玉红

(杭州应用声学研究所, 浙江杭州 310012)

摘要: 潜用拖曳线列阵声呐在拖曳过程中, 随着潜艇的运动状态变化, 其线阵阵形会产生一定的畸变。速度越慢, 其畸变幅度越大。阵形畸变, 将影响声呐的探测性能。为有效提高拖曳声呐的探测能力, 需对阵段不同拖曳状态进行阵形变化研究。基于以上研究需求的基础上, 使用随机共振技术和阵元多普勒频移特性, 在实验室或湖上构建了阵形估计系统, 该系统可对不同拖曳状态的测试阵段实时地精确估计阵形, 满足拖曳线列阵声呐阵形估计技术研究的需求。

关键词: 随机共振; 拖曳声呐; 阵形估计; 多普勒

中图分类号: TB566

文献标识码: A

文章编号: 1000-3630(2018)-03-0222-05

DOI 编码: 10.16300/j.cnki.1000-3630.2018.03.005

Research on precise array shape estimation system based on Doppler shift and stochastic resonance technique

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

(Hangzhou Applied Acoustics Research Institute, Hangzhou 310012, Zhejiang, China)

Abstract: The array shape towed under water will generate a certain distortion if the movement of towing device changes. And, the slower the towing speed, the greater the distortion magnitude, obviously the distortion affects the detection performance. To improve the detection performance of the towed array, how the array shape changes in different towing states needs to be researched. This paper introduces the research results based on these demands, and proposes using the stochastic resonance (SR) technique and Doppler shift character to build a shape estimation system of towed array. This system can provide precise estimates of the array shape in real time to meet the needs of shape estimation technique for towed array sonar.

Key words: stochastic resonance (SR); towed array sonar; array shape estimation; Doppler shift

0 引言

国际上潜用技术发展迅速, 潜艇辐射噪声级正以每年平均 1 dB 量级下降, 出现了一系列和海洋背景噪声水平相当的安静型潜艇。为使己方潜艇可在理想范围先敌发现目标, 多国为已方潜艇装备了拖曳线列阵声呐。该型声呐具有声学孔径大、工作频率低、平台干扰小、工作深度可调等众多其他艇载声呐无法超越的特点, 具备远程被动探测安静型潜艇能力。

目前, 拖曳线列阵声呐探测目标时, 以阵形保持直线为前提, 为保证声呐探测性能, 潜艇需尽可

能保持稳定航行状态, 这在一定程度上限制了潜艇的机动性。同时, 为保证本艇自身隐蔽性, 潜艇巡弋速度较低, 而拖曳线列阵声呐在较低拖速下, 容易呈蛇形运动, 故为保证拖曳线列阵声呐在低速下的探测性能, 需对不同拖曳状态下的线阵运动状态进行研究, 以作为后续信号处理的补充。

目前, 国际上对阵形研究的方法较多, 但各种方法的估计效果无法直接得到验证。因此, 需构建一套高精度的阵形估计系统作为衡量标准, 为各种阵形估计技术的验证和发展做铺垫。

1 随机共振技术原理

随机共振(Stochastic Resonance, SR)为非线性双稳态系统, 其势函数^[1-2]表示为

$$U(x) = -\frac{1}{2}ax^2 + \frac{1}{4\mu^2}bx^4 - [s(t) + \tau(t)]x \quad (1)$$

收稿日期: 2017-06-15; 修稿日期: 2017-08-26

作者简介: 王世闯(1987-), 男, 辽宁丹东人, 满族, 工程师, 研究方向为水声工程。

通讯作者: 王世闯, E-mail: wsc_715@163.com

其中： μ 为势阱的参数； a 、 b 均为系统的参数； $[s(t)+\tau(t)]$ 为驱动力，在单频信号 $s(t)=A\sin(2\pi f_0 t)$ 和高斯噪声 $\tau(t)$ 的共同作用下，可用朗之万方程^[3-4]表示该双稳态系统的动力方程：

$$\frac{dx}{dt}=ax-\frac{b}{\mu^2}x^3+s(t)+\tau(t) \quad (2)$$

在无输入时，该系统的势阱底为 $x=\pm\mu\sqrt{a/b}$ ，势垒高度则为 $\Delta U(x)=(\mu a)^2/4b$ 。在系统仅输入信号时，系统变为非对称双稳态，若信号幅度为 $|A|\geq\sqrt{4/27}\mu=0.38\mu$ 时，系统则丧失双稳性质。若信号幅度 $|A|<0.38\mu$ 时，则无法引起质子在不同稳态之间有规律性的转换。

在系统输入中加入噪声时，质子可在双势阱之间规律性转换。若 $A=0$ ，则可用 Kramers 公式表示转换概率^[5]：

$$r_k=\frac{\sqrt{2}}{2\pi}e^{\left(-\frac{2\Delta U}{D}\right)}=\frac{\sqrt{2}}{2\pi}e^{\left(-\frac{\mu^2}{2D}\right)} \quad (3)$$

式中， D 为噪声能量。随着噪声能量的增加，其跃迁概率也相应提高，则质点可在两个势阱间相互跃迁，此时该系统则产生 SR。

与其他技术相比，随机共振技术在检测微小频率弱信号方面，具有突出的优势。

2 运动阵元的多普勒频偏转换

当声源与接收阵元之间存在相对运动时，接收信号产生多普勒频移。若阵元运动速度为 v ，当阵元接近声源时， v 为正，脉宽压缩系数为^[6]

$$\alpha=1-\frac{v}{c} \quad (4)$$

其中， c 为声速。若目标的初始距离为 d_0 ，则接收信号为

$$r_w(t,v)=\sqrt{\frac{1}{\alpha}}s\left[\frac{1}{\alpha}(t-\tau_0)\right]=\sqrt{\frac{1}{\alpha}}A\cdot\cos\left[2\pi f_0\frac{1}{\alpha}(t-\tau_0)+\varphi\right] \quad (5)$$

不考虑噪声和传播损失， $\tau_0=d_0/c$ ，则接收信号的瞬时频率为^[2,6]

$$f(t,v)=f(t_0,v)\cdot\left(1-\frac{v}{c}\right) \quad (6)$$

多普勒频偏量为

$$\Delta f(t,v)=f(t,v)\cdot\frac{v}{c} \quad (7)$$

假设声源发射频率为 150 Hz 的单频信号，被测拖线阵在该声源声轴方向运动速度为 $2\text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ ，则多普勒频偏量为 $\Delta f=150\cdot\frac{2}{1500}=0.2\text{ Hz}$ 。

3 SR 频偏信号检测

SR 理论适用于频率很低(0~1 Hz)的信号的检测。对于高频率信号，由于两个势阱之间的转换频率低于信号高低电平变换的频率，无法产生 SR 现象。通过第 1 节的分析可知，频偏信号正在该范围内，可使用 SR 技术进行检测。

为了使 SR 方法可以检测频偏量，需将阵元接收信号进行调制，转变为频偏信号。

通过固定位置的换能器发射信号，拖线阵上的水听器在拖曳过程中对发射信号进行接收。

水听器阵元在 t 时刻接收到的信号(含噪声)为

$$x(t)=A\cos[2\pi(f-f_0)t+\varphi]+n(t) \quad (8)$$

式中， A 为信号幅度， f 为接收时的信号频率， f_0 为声源发出信号的频率， φ 为接收信号的相位， $n(t)$ 为噪声。

固定位置的换能器发射的原始信号为

$$y(t)=\cos(2\pi ft) \quad (9)$$

将水听器接收到的信号与换能器发射的原始信号进行调制，则两者的调制信号为

$$\begin{aligned} x_v(t)&=x(t)y(t)= \\ & \{A\cos[2\pi(f-f_0)t+\varphi]+n(t)\}\cos(2\pi ft)= \\ & \frac{1}{2}A\cos(2\pi f_0t+\varphi)+\frac{1}{2}A\cos[2\pi(2f-f_0)t+\varphi]+ \\ & n(t)\cos(2\pi ft) \end{aligned} \quad (10)$$

式(10)分为两部分，一部分为信号部分 $x_1(t)$ ，另一部分为调制后的噪声 $x_2(t)$ ：

$$\begin{aligned} x_1(t)&=\frac{1}{2}A\cos(2\pi f_0t+\varphi)+ \\ & \frac{1}{2}A\cos[2\pi(2f-f_0)t+\varphi] \end{aligned} \quad (11)$$

式(11)中， $\frac{1}{2}A\cos(2\pi f_0t+\varphi)$ 为调制后的低频率信号，频率为 f_0 ， $\frac{1}{2}A\cos[2\pi(2f-f_0)t+\varphi]$ 为调制后的高频率信号，频率为 $(2f-f_0)$ 。

$$x_2(t)=n(t)\cos(2\pi ft) \quad (12)$$

$x_2(t)$ 的自相关函数为

$$\begin{aligned} \langle x_2(t)x_2(t+\tau) \rangle &= \frac{1}{2}\langle n(t)n(t+\tau) \rangle \cdot \cos(2\pi ft)= \\ & D\delta(\tau)\cos(2\pi ft) \end{aligned} \quad (13)$$

式(13)中， D 为高斯白噪声的方差， $x_2(t)$ 的功率谱为其自相关函数的傅里叶变换(Fast Fourier Transform, FFT)，即：

$$S_2(\omega)=\int_{-\infty}^{+\infty} D\delta(\tau)\cos(2\pi ft)e^{-j\omega\tau}d\tau=D \quad (14)$$

由式(14)可知,调制后的噪声仍是高斯白噪声。

由式(10)可知,经过调制后的信号的频率成分变为两个,一个为原始信号的频率与扫频载波信号的差值,另一个为其和值。如果扫频载波信号的频率与原始信号频率差值非常小,就可以得到小参数的输入信号,然后经过滤波器,将其大频率信号滤除,获得频偏信号。将该信号通过非线性双稳态系统,输出便产生 SR。具体实现过程如图 1 所示。

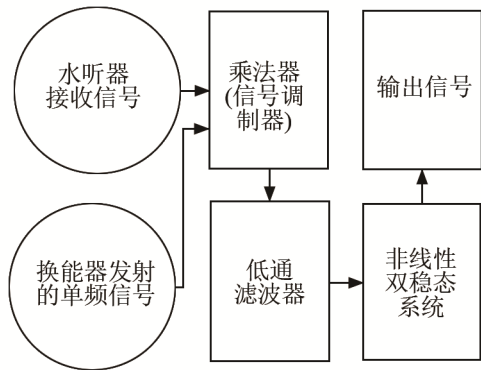


图 1 SR 检测频偏流程图

Fig.1 The flow chart of SR frequency offset detection

由图 1 可知,将拖线阵水听器接收的信号与固定位置的换能器发射的单频信号通过信号调制器进行调制;调制后的信号包含了调制后的低频信号、高频信号和调制噪声;其后通过低通滤波器进行滤波,滤掉高频信号后,仅剩低频信号和调制噪声;将低频信号和调制噪声通过非线性双稳态系统,则可形成 SR 现象,该系统的输出可精确地检测出频偏信号。

4 系统构建

根据 SR 的信号检测理论和多普勒频移理论,可构建阵形估计系统。

在有效测试空间内构建笛卡尔坐标系,如图 2 所示。

yz 两轴构成平面 B, xz 两轴构成平面 C, xy 两轴构成平面 A, 三平面内各安装一个水声换能器,分别称为换能器 A、B、C。如图 3 所示。

换能器 A、B、C 分别向 z 、 x 、 y 轴方向发射单频信号,发射频率分别为 $f_A=150$ Hz、 $f_B=300$ Hz、 $f_C=450$ Hz (该发射频率根据测试阵段的速度变化率以及接收水听器的工作频带确定)。

在实验室构建该系统时,拖曳平台运动状态通过机械自身测量系统获得;在湖上构建该系统时,拖曳平台运动状态通过差分 GPS 获得。设定待试验

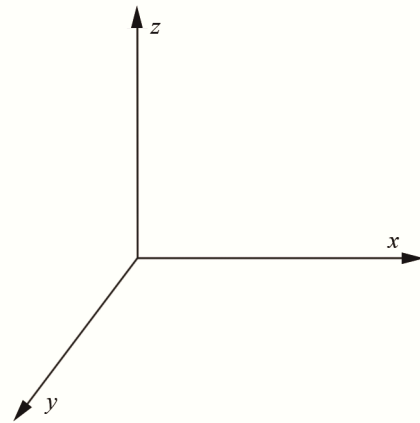


图 2 测试空间笛卡尔坐标系

Fig.2 Cartesian coordinate system of test space

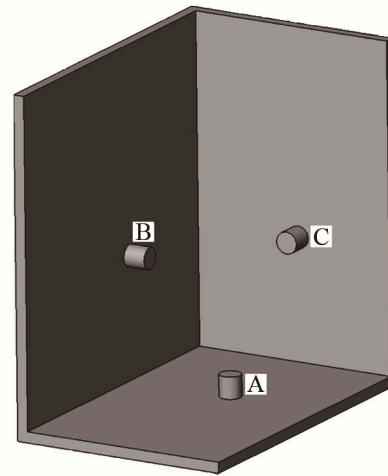


图 3 测试空间换能器安装示意图

Fig.3 Hydrophone layout diagram

阵段长为 50 m,共 50 个阵元,阵元间距为 1 m,单阵元有效工作频段为 0~1 kHz。 t_0 时刻拖曳点坐标为 $(x_{t_0}, y_{t_0}, z_{t_0})$,首阵元坐标为 $(x_{t_0}^1, y_{t_0}^1, z_{t_0}^1)$,第 i 个阵元坐标为 $(x_{t_0}^i, y_{t_0}^i, z_{t_0}^i)$ 。测试开始,三个换能器以低功耗连续发射单频信号,经过 Δt 时间后, t_1 时刻的拖曳点坐标为 $(x_{t_1}, y_{t_1}, z_{t_1})$,测试阵段第 i 个阵元在 t_1 时刻接收的水声信号为 $s_{t_1}^i$,该信号包含三个分量,分别为 $s_A^i(t_1)$ 、 $s_B^i(t_1)$ 、 $s_C^i(t_1)$ 。根据第 i 个阵元在 t_1 时刻的运动状态, $s_A^i(t_1)$ 、 $s_B^i(t_1)$ 、 $s_C^i(t_1)$ 势必产生一定的多普勒频移。对于测试阵段的工作频段,产生的多普勒频偏量较小;若直接通过傅里叶变换进行测量,则误差较大(假设采样率为 2 kHz,通过 2048 点 FFT,则频率分辨率为 0.98 Hz,而若 t_1 时刻第 i 个阵元对换能器 A 的速度为 $2 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$,则多普勒频偏量为 0.2 Hz,约为频率分辨率的 0.2 倍,难以直接通过时频变换获得准确值)。因此,为获得精确的频偏量,则需进行 SR 变换。

将每个阵元 t_1 时刻接收的数据分别与三个换能

器发射信号调制，则原信号变为

$$s_{AS}^i(t_1) = s_A s^i(t_1) = s_A (s_A^i(t_1) + s_B^i(t_1) + s_C^i(t_1))$$

$$s_{BS}^i(t_1) = s_B s^i(t_1) = s_B (s_A^i(t_1) + s_B^i(t_1) + s_C^i(t_1))$$

$$s_{CS}^i(t_1) = s_C s^i(t_1) = s_C (s_A^i(t_1) + s_B^i(t_1) + s_C^i(t_1))$$

调制后的信号，频率将产生偏移，通过低通滤波，滤掉频率调高的信号，则只剩下频偏信号。设为 $s_{ASS}^i(t_1)$ 、 $s_{BSS}^i(t_1)$ 、 $s_{CSS}^i(t_1)$ ，将该信号与定量高斯噪声通过 SR 系统，则输出结果可高精度地检测到频偏量。

对频偏量进行逆运算，获得 t_1 时刻第 i 号阵元相对直角坐标系各方向的速度，具体实现步骤如图 4 所示。

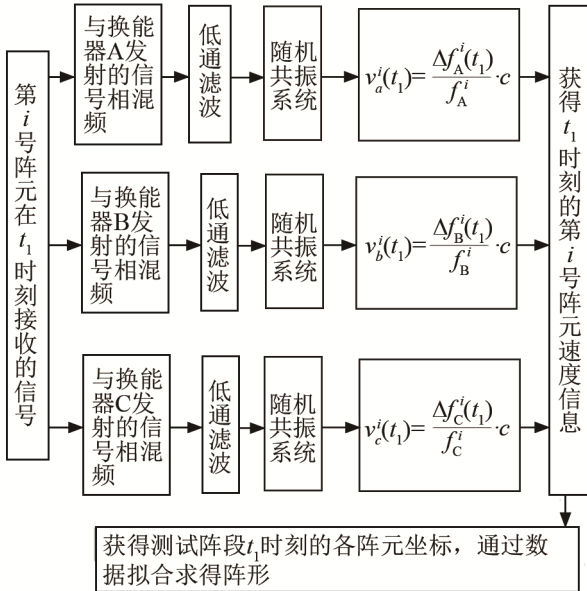


图 4 SR 阵形估计系统
Fig.4 SR array shape estimation system

5 仿真实验分析

根据以上理论，进行仿真实验分析。考虑对比效果，采用二维建模。换能器 A、B 分别向 x 、 y 轴方向发射单频信号，发射频率分别为 $f_A=150\text{ Hz}$ ， $f_B=300\text{ Hz}$ 。线阵长为 50 m ，阵元间距为 1 m ，随拖曳平台运动，拖曳平台运动轨迹如图 5 所示。

根据拖曳平台运动状态，构建测试阵段各阵元在各时刻的接收数据，同时在各阵元单频信号基础上，增加噪声能量。通过调制，获得了多普勒频偏信号，如图 6 所示。

将调制后信号通过 SR 系统，该系统参数设定为 $a=1$ 、 $b=1$ 、 $\mu=1$ ，初值设为 $y_0=1$ ，则经过该非线性双稳态 SR 系统后的信号如图 7 所示。

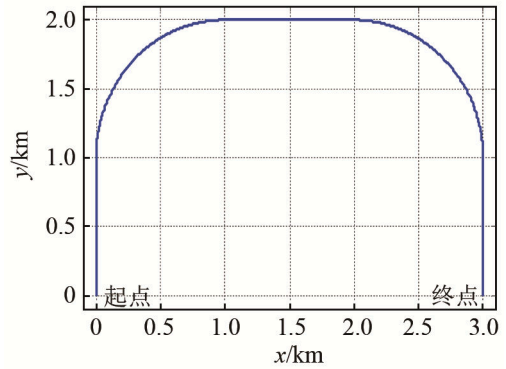


图 5 拖曳平台运动轨迹
Fig.5 Movement trace of towed device

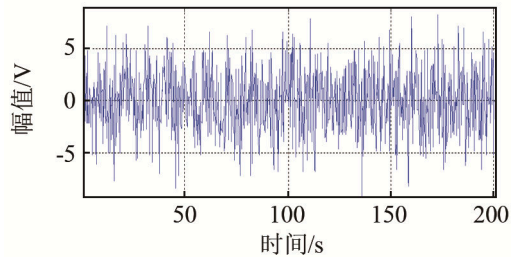


图 6 经过 150 Hz 发射频率调制后的单阵元输入信号
Fig.6 The input signal of a single transducer after 150 Hz modulation

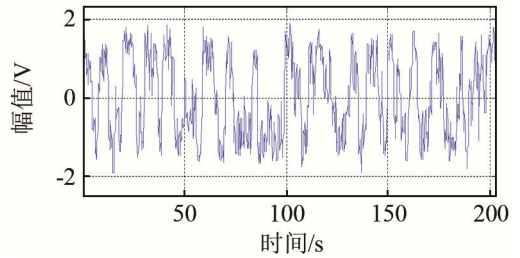


图 7 经过 SR 后的输出信号
Fig.7 Output signal via SR processing

由图 6 和图 7 可知，经过 SR 系统后，调制信号由杂乱无章状态变为有序上下的跃变状态。

对所得到的输入信号和输出信号进行频谱分析，结果分别如图 8、9 所示。

由图 8、9 可知，经过 SR 后的信号，可以精确检测到 0.1 Hz 的频偏量。通过转化，可获得该阵元在该时刻的速度，即 $v_x(t_1) = \frac{\Delta f}{f} \cdot c = \frac{0.1}{150} \times 1500 = 1\text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ ，将各时刻的速度进行曲线拟合后，即可获得各时刻的阵形。

将构建的阵形与经过上述方法检测的阵形进行对比分析，求得不同时刻估计的各阵元位置与构建的阵形中对应阵元位置之间的距离，并计算该距离与阵长比值，将所有阵元计算的距离比值求平均，则获得估计阵形误差值，如图 10 所示。

经分析图 10 可得，估计的阵形与构建阵形的偏差值在 6% 以内，满足阵形估计的精度要求。

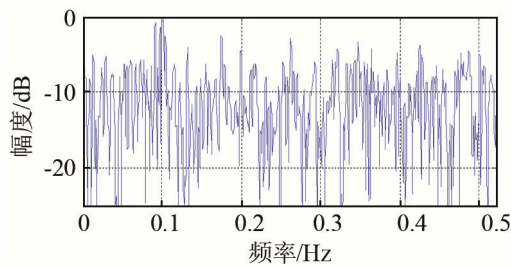


图8 调制信号频谱

Fig.8 Input signal spectrum after modulation

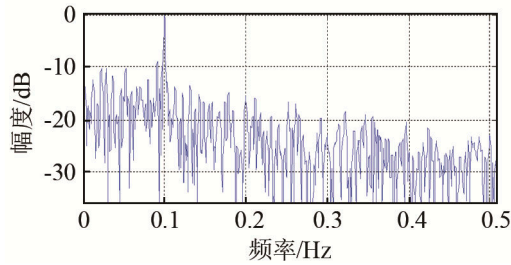


图9 经过SR后的信号频谱

Fig.9 Output signal spectrum via SR processing

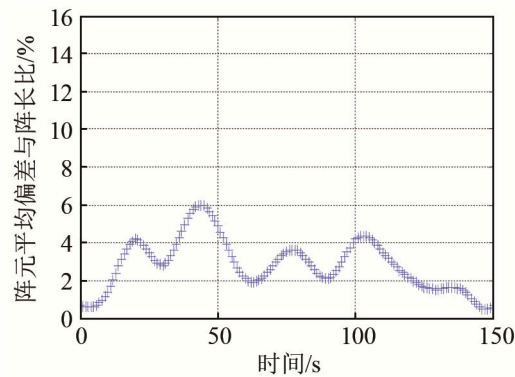


图10 阵形估计误差

Fig.10 Error analysis of shape estimation

6 结 论

本文论述了SR信号检测理论、阵元运动多普勒频偏理论和多普勒频偏信号提取理论,并且根据以上理论,构造了SR高精度多普勒阵形估计系统。

根据阵形运动特性,进行了理论分析与实验仿真,得出了该系统可以实时精确估计阵形的结论。因系统工程尚未构建,湖试或实验室试验不具备条件,尚未进行实际数据分析,后续将根据基础建设需求,对实际数据进行分析,以验证该系统的实用性和可靠性。

参 考 文 献

- [1] 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.
- [2] 卢志恒,林建恒,胡岗. 随机共振问题 Fokker-Planck 方程的数值研究[J]. 物理学报, 1993, 42(10): 1556-1566.
LU Zhiheng, LIN Jianheng, HU Gang. The Fokker-Planck equation's numerical research about stochastic resonance[J]. Chinese Journal of Physics, 1993, 42(10): 1556-1566.
- [3] 王茂法,王世闯,王晓林. 拖曳线列阵机动时的SRBF算法研究[C]//中国声学学会水声学会2013年全国水声学学术会议论文集, 2013.
WANG Maofa, WANG Shichuang, WANG Xiaolin. The SRBF algorithm research during towed line array maneuvering[C]// Underwater acoustics branch of china acoustics institute 2013 national hydroacoustics academic conference proceedings, 2013.
- [4] 冷永刚. 基于Kramers逃逸速率的调参随机共振机理[J]. 物理学报, 2009, 58(8): 5196-5200.
LENG Yonggang. The theory of stochastic resonance based on Kramers's escape velocity[J]. Chinese Journal of Physics, 2009, 58(8): 5196-5200.
- [5] 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(4): 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(4): 5-9.
- [6] 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.