

【引用格式】李继洋, 陈云飞, 王振山, 等. 体目标垂直尺度估计试验研究[J]. 数字海洋与水下攻防, 2024, 7(4): 450-455.

体目标垂直尺度估计试验研究

李继洋, 陈云飞, 王振山, 雍锦涛
(大连测控技术研究所, 辽宁 大连 116000)

摘要 垂直尺度特征是水下航行体目标区别于常规尺度模拟目标的重要特征。针对小孔径基阵目标尺度估计需求, 提出了一种体目标垂直尺度估计方法, 通过实测的水下航行体缩比模型高频回波测试数据进行垂直尺度估计。结果表明: 能够通过小孔径基阵实现对水中航行体的尺度特征进行有效估计, 并且发射信号的形式变化会有不同的特征表征结果。实验初步验证了方法的有效性。

关键词 垂直尺度估计; 分裂波束形成; 回波亮点; 视在张角

中图分类号 U666.7

文献标识码 A

文章编号 2096-5753(2024)04-0450-06

DOI 10.19838/j.issn.2096-5753.2024.04.013

Experimental Research on Vertical Scale Estimation of Real Targets

LI Jiyang, CHEN Yunfei, WANG Zhenshan, YONG Jintao
(Dalian Scientific Test and Control Technology Institute, Dalian 116000, China)

Abstract Vertical scale is an important feature to distinguish underwater real target from conventional scale simulation target. Aiming at the requirements of target scale estimation for small aperture array, a vertical scale estimation method for real targets is proposed. Vertical scale estimation is carried through the measured high frequency echo test data of the underwater vehicle scale model. The results show that the scale feature of the underwater real target can be estimated effectively through small aperture array, and different transmitted signals have different feature results. The experimental results show that the method is effective.

Key words vertical scale estimation; split-beam forming; echo highlight; extension angle

0 引言

水中多亮点模拟目标能够较好地模拟水下航行体目标的水平尺度特征, 但是难以对真实体目标在水平、垂直二维方向上的特征进行同步模拟, 目标的垂直尺度是模拟目标和实际目标的重要差异性特征之一。

目前基于声散射信号的目标尺度估计方法主要有几种方式。其中, 基于方位走向原理的目标识别

技术是将具有一定尺度的目标求其方位走向, 进一步求得与目标大小有关的目标方位变化量^[1]; 基于回波时延估算目标尺度的方法是通过多个接收波束相结合, 获得多个具有差别的亮点回波进行目标尺度的计算; 基于相关法方位分析目标尺度识别技术通过研究舷角与空间视在目标张角变化规律, 得出了目标尺度与舷角、视在张角和观测距离的关系。

上述方法主要应用于目标的水平尺度估计。对于垂直方向具有一定延展性的水下航行器, 其垂直

亮点是由具有垂直距离差异的艏部、围壳和艉部螺旋桨的固定亮点和移动亮点共同构成, 并且根据姿态的不同而产生能量变化。垂直尺度相较于水平尺度小, 受到声呐波束的限制, 对目标垂直尺度特征信息进行表征较为困难。本文提出了一种由双通道短时互谱法和能量积分目标亮点位置精确定距技术相结合的体目标垂直尺度估计方法, 可以实现对水下航行体目标垂直尺度的估计。双通道短时互谱法是一种基于分裂波束系统的精度较高的目标方位估计技术^[2], 对目标回波亮点进行计算, 完成对目标的视在张角提取^[3-4]; 基于能量积分亮点位置定距技术可以精确确定目标亮点的空间位置, 利用几何关系估算目标在空间上的尺度。本文针对目标垂直尺度, 采用体目标垂直尺度估计方法, 通过湖上缩比模型测试试验, 对方法的实际性能进行验证。

本文首先研究了垂直尺度的表征方法, 然后针对孔径基阵条件下的目标尺度估计需求, 采用小孔径基阵的垂直阵元接收到的目标回波进行双通道短时互谱法测向^[5], 对目标垂直亮点的位置进行粗估计, 并获得目标的视在张角特征, 随后利用能量积分对亮点的位置进行精确估计。研究方法通过水下航行体小尺度缩比模型的外场湖上试验进行了验证。

1 体目标垂直尺度估计方法

对具有一定尺度的目标, 其产生的反射信号源于一个在距离和方位上具有一定分布的延展体, 这个延展体可以等效为空间上有一定分布的多“点”之和^[2]。这个“点”可称为回波亮点, 目标尺度估计常采用亮点的空间位置进行等效估算, 所谓目标尺度即是亮点的空间距离, 因此对水下航行体的垂直尺度估计即是对垂直方向上回波的首尾亮点间隔进行估计。

在对亮点进行判定和距离估计时, 需要将目标的回波分割为 N 个子回波, 对 N 个子回波进行能量积分处理, 精确求得目标亮点的空间分布^[6-7]。基于此, 本文首先通过对阵元回波信号进行数字滤波的预处理, 对具有垂直距离的 2 个子阵进行垂直分裂波束形成, 然后采用基于能量积分的目标亮点位置精确估计方法和双通道短时互谱法的方位估计对水下体目标的垂向尺度进行估计。垂向尺度估计流程如图 1 所示。

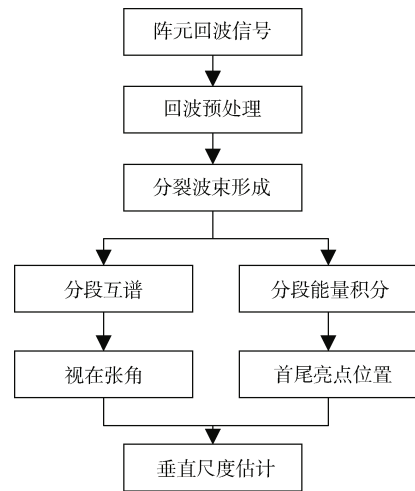


图 1 水下目标垂向尺度估计流程
Fig. 1 Vertical scale estimation process of underwater target

由于体目标垂直回波在时域上相对较短, 在计算目标视在张角的时候易受到影响, 优先确定亮点精确位置可以提高方位估计和尺度估计的准确度。在进行亮点位置估计时, 基于能量积分的目标亮点位置精确估计技术可以通过计算积分峰值的方式, 将亮点位置精确到采样点, 精确得出首尾亮点与接收换能器的距离。用能量积分判定亮点的位置时, 由于判定阈值的存在, 亮点所在的回波宽度会小于目标的整体回波宽度, 首个亮点的位置到末尾亮点位置之间的回波才是进行信号分段处理、提取视在张角特征的回波区间。在进行视在张角估计时, 基于双通道短时互谱法的方位估计技术对目标视在张角特征提取精度更高。2 种精确估计方法相结合, 有利于在后续的尺度估计中提高精确度。

1.1 基于双通道短时互谱法的视在张角估计

双通道短时互谱法是基于分裂波束测向技术和尺度目标的距离——方位延展特性提出的一种尺度估计方法^[5]。对子阵接收的散射声信号分别进行波束形成的预处理, 将信号分割为 N 段子回波信号, 对子回波信号进行傅里叶变换后, 对每一段子回波分别进行对应的互功率谱计算。2 子阵的时延差 τ 的信息包含在互功率谱的相角 ϕ 之中, 而视在张角 θ 可以通过相角和时延求得^[8]。

设 2 分裂波束子阵的输出信号分别为 $p(t)$ 和 $q(t)$, 对 2 子阵的输出信号分别做傅里叶变换, 可以得到各自的频谱 $P(f)$ 和 $Q(f)$, 则 2 子阵输出信

号的互谱

$$Z(f) = P(f) * Q(f) = |P(f)|^2 \cdot e^{-2\pi f \tau} \quad (1)$$

可以看出, τ 的信息包含在互谱 $Z(f)$ 的相角 ϕ 之中:

$$\phi = 2\pi f \tau = \arctan \left\{ \frac{\text{Im}[Z(f)]}{\text{Re}[Z(f)]} \right\} \quad (2)$$

$$\tau = \frac{d \sin \theta}{c} \quad (3)$$

式中: ϕ 为互谱信号 $Z(f)$ 的相角; d 为 2 子阵等效声中心之间的间距; θ 为视在张角; c 为水中的声速。

通过式 (2) 和式 (3) 可以得出视在张角

$$\theta = \arcsin \left\{ \frac{c}{2\pi f d} \arctan \left[\frac{\text{Im}[Z(f)]}{\text{Re}[Z(f)]} \right] \right\} \quad (4)$$

得到目标的方位信息, 即可通过相角是否具有分布规律及线性拟合后的视在张角大小判断目标是否为具有一定空间分布的尺度目标。在进行尺度估计时, 不仅需要目标的视在张角特征, 同时还需要得知尺度目标首尾亮点与接收换能器的相对距离^[9], 基于能量积分的目标亮点位置精确确定距技术, 可以在回波信号里将亮点位置精确到采样点。通过这一方法对目标亮点的空间位置进行估计, 可以提高尺度估计的精确度。

1.2 基于能量积分的目标亮点位置精确估计

能量积分一般采用滑动平均的方法, 目的是为了平滑信号能量, 防止起伏, 以便于进行检测^[10-11]。将波束形成后的回波信号按时间平均分为 N 个子回波, 设进行能量积分的子回波信号为 $s(k)$, 其中 $k=1, 2, 3, \dots, N$, 积分长度为 L , 积分过程如下:

$$s(k) = \frac{1}{L} \sum_{i=k}^{k-L+1} s(i)^2 \quad (5)$$

N 的取值 (子回波数量) 会直接影响下一步互谱的相角计算数量。 N 取过小则相角计算数量较少, 视在张角数值受到的影响较大; N 取过大积分曲线会出现较多突变, 对亮点判定的影响较大。 N 的取值应保证积分曲线变化相对平滑, 同时尽可能大以保证有足够多的相角进行线性拟合。通过能量积分可以获得积分曲线的峰值, 当某一段子回波的积分峰值远远大于相邻子回波的峰值, 并且大于门限时, 就认为发现了一个亮点^[12]。设发现的第 1

个亮点和最后一个亮点分别为 n_1 和 n_2 , 亮点 n 与换能器的距离

$$L_n = (T_b + T_p \cdot N_p \cdot (k_i - 1) + T_p \cdot N_i) \cdot \frac{c}{2} \quad (6)$$

式中: L_n 为亮点与换能器的位置; T_b 为信号从发射到接收的时间; T_p 为信号两点间的时间间隔; N_p 为子回波的数据长度; k_i 为亮点所在的子回波段数; N_i 为亮点在该段子回波中的位置。

可以看出, 亮点距离由 3 个部分组成^[13]: 1) 起始回波到接收的距离; 2) 分段处理时亮点所在子回波的前一段回波到起始回波的距离; 3) 亮点所在的子回波的开始到积分峰值的距离。3 个距离相加可以得出亮点与接收之间的精确距离 L_n ^[14]。对于垂直方向的尺度估计示意图如图 2 所示。

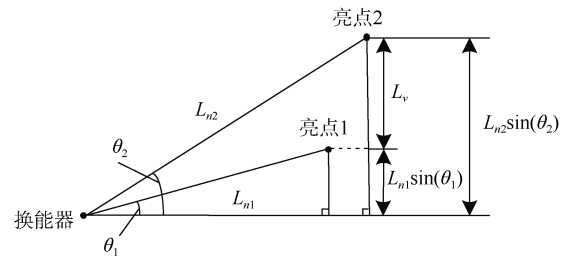


图 2 尺度估计示意图

Fig. 2 Schematic diagram of scale estimation

图中亮点 1 和亮点 2 为尺度目标在垂直方向上相对距离最远的 2 个亮点^[15-16], θ_1 和 θ_2 分别为亮点 1、亮点 2 的垂直视在张角, 由几何关系可以得出两亮点之间的垂直距离 L_v , L_v 即为目标的垂直尺度^[17-18]。

目标垂直尺度的数值

$$L_v = |L_{n1} \sin(\theta_1) - L_{n2} \sin(\theta_2)| \quad (7)$$

式中: L_v 为目标垂直尺度; L_{n1} 和 L_{n2} 分别为亮点 n_1 、 n_2 到接收换能器的距离; θ_1 和 θ_2 分别为亮点 n_1 、 n_2 的垂直视在张角。

2 体目标垂直尺度估计方法实验验证

通过湖上实验对 Benchmark 标准模型散射声特性进行测试, 采用体目标垂直尺度估计方法对测试数据数据进行处理分析, 获得了水下航行体模型在垂直方向上、不同舷角下尺度的估计值, 并分析了在舷角不同的情况下对垂直方向上尺度估计数

值变化的原因。

2.1 实验设置

实验采用 Benchmark 缩比模型目标, 按照 1 : 10 的缩比尺寸制作, 材料为不锈钢, 模型实际长度 6.8 m, 高度 1.1 m。布放示意图如图 3 所示, 实验中模型与收发合置换能器保持同一水平深度, 发射波束开角中心对准模型位置固定不动, 模型的等效声中心距离接收换能器 23 m, 满足远场要求。被测目标模型从艇艏开始旋转 1 周, 目标艏部朝向接收时的舷角为 0°, 正横为 90°和 270°, 艉部朝向接收时为 180°, 数据采集采用连续记录的方式。

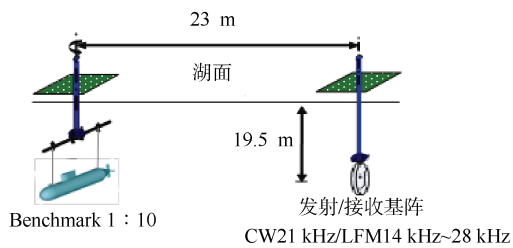


图 3 实验设备布放示意图

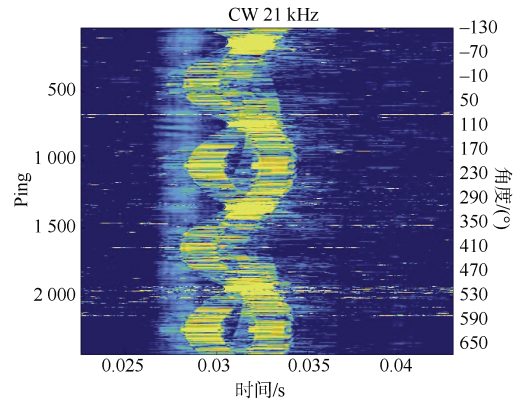
Fig. 3 Configuration of experimental equipment

2.2 水下航行体目标垂直尺度估计

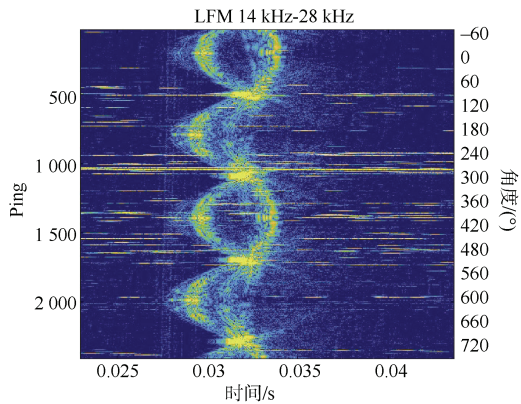
接收阵为 37 元面阵, 2 个子阵重叠阵元为 21 个, 阵间距为 0.038 m, 发射信号为 CW21 kHz 和 LFM14 kHz~28 kHz 这 2 种信号形式, 脉冲宽度为 2 ms, 采样率为 250 kHz。回波信号的二维历程图如图 4 所示。

图中横坐标为信号经过散射后到达接收换能器所需的时间, 即目标亮点到接收换能器的距离, 包含了目标亮点的距离特征信息; 左纵坐标为 ping 值, 代表了在模型不断旋转过程所经历的时间, 不同的 ping 值代表了目标的各种姿态; 右纵坐标为根据 ping 值换算的目标舷角, 纵坐标包含了目标的方位特征信息。在不断的旋转过程中, 亮点的空间分布和强度会根据目标的姿态改变而呈现周期性的变化, 进而体现在目标声学垂直尺度的规律性变化。本文在后续的处理中将选取几个特定角度对不同舷角下目标的垂直尺度进行估计。

将收到的回波信号进行分裂波束形成处理, 选取特定舷角得出目标的瞬态二维声图像, 接下来将通过体目标垂直尺度估计方法对目标的视在张角特征和首尾亮点空间位置特征进行提取。



(a) 单频信号历程图



(b) 线性调频信号历程图

图 4 2 种信号的历程图

Fig. 4 Course chart for 2 signals

将选定的回波部分分为 N 段, 利用式 (5) 进行分段能量积分处理。当某段子回波的积分峰值远远大于相邻子回波积分峰值, 并且相邻亮点的方位差大于阈值, 则认为该段子回波发现 1 个亮点。图 5 为能量积分的积分过程曲线, 可以看出在这个舷角下的回波, 经过能量积分阈值判定后检测出了 2 个亮点。

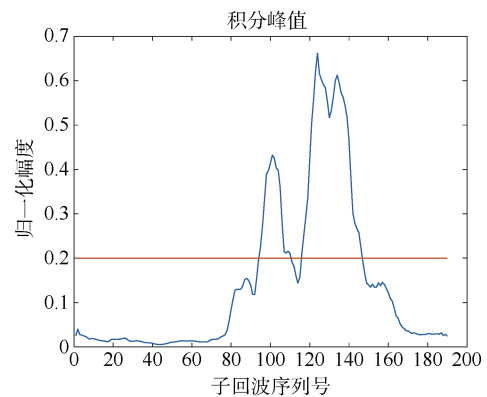


图 5 积分过程曲线

Fig. 5 Integral process curve

确定垂直方向上的首个和末尾亮点位置后,对范围内的回波利用式(1)进行分段互谱,通过相角求得时延 τ 的信息,经过最小二乘线性拟合后进一步提取出视在张角 θ 。图6(a)为某舷角下单频信号的视在张角,图6(b)为某舷角下线性调频信号的视在张角。

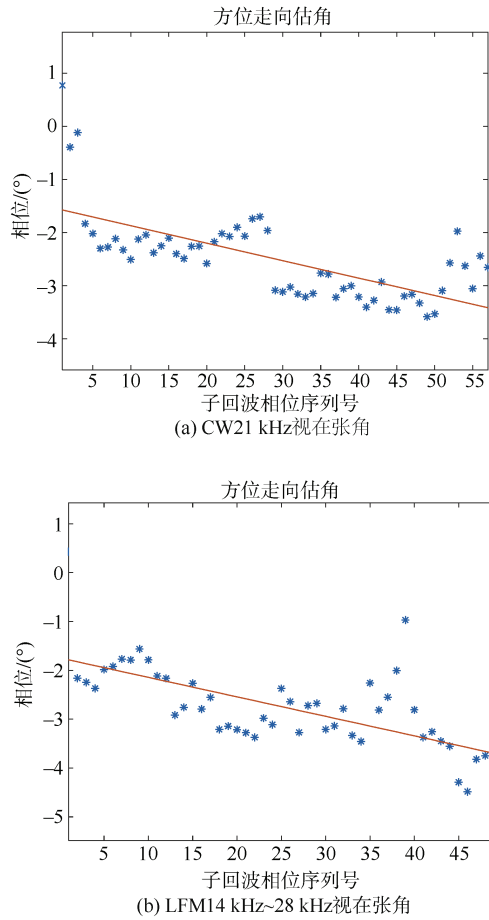


图 6 不同信号提取的方位特征

Fig. 6 Azimuth features of different extraction

其中“*”代表每一段子回波求得的相角数值,可以看出具有一定的线性分布规律,通过拟合后得到红线,对2端点的相位数值做差即可得到估计尺度所需的视在张角 θ 。对不同舷角下目标的回波进行特征提取,通过式(6)得到亮点距离特征,通过式(4)得到视在张角特征,将2个特征带入式(7)得出了目标垂直尺度的估计值。

表1给出了在不同舷角下,对缩放比为1/10的单层Benchmark水下航行体缩比模型的垂直尺度估计值。

表 1 不同舷角下的垂直尺度估计值 (CW21 kHz)
Table 1 Vertical scale estimates for different side angles (CW21 kHz)

信号形式	舷角/(°)	尺度估计/m
CW21 kHz	0	0.817
	15	0.345
	30	0.303
	45	0.955
	60	0.280
	75	0.314
	90	1.020
	105	0.160
	120	0.410
	135	0.903
	150	0.330
	165	0.312
180	0.727	
LFM14 kHz~28 kHz	0	0.700
	15	0.640
	30	0.759
	45	0.682
	60	0.923
	75	0.989
	90	1.061
	105	1.005
	120	0.984
	135	0.692
	150	0.798
	165	0.594
180	0.540	

对于缩放比为1/10的单层Benchmark水下航行体缩比模型来说,实际的垂直尺度为1.1m,而底端亮点与顶端亮点的垂直距离通常情况下是小于实际尺度的。单频信号具有相干性强的特点,能量相对分散,在本次实验的估计结果中,在15°、30°、60°、75°、105°、120°、150°、165°舷角下会由于回波的相干叠加导致能量较低,影响估计结果,在0°、45°、90°、135°、180°舷角下的估计值在0.8~1.0m之间,处于正常的估值范围。线性调频信号相干性差,亮点相对分散,由于移动亮点的存在,在45°和135°舷角下以及艏艉角度范围附近对于垂直尺度的估计值会较低;在舷角为30°和150°时,移动亮点的影响较小,尺度估计值相对较

大; 在 90° 角度范围附近受到水下航行体模型外形结构的影响, 顶端的亮点会在强反射部位聚集并连成一条垂直的线, 此时尺度估计值更加接近于实际目标垂直尺度, 底端与顶端的亮点间距在 $0.9\sim 1.1\text{ m}$ 之间浮动, 估计值接近于目标真实垂直尺度。

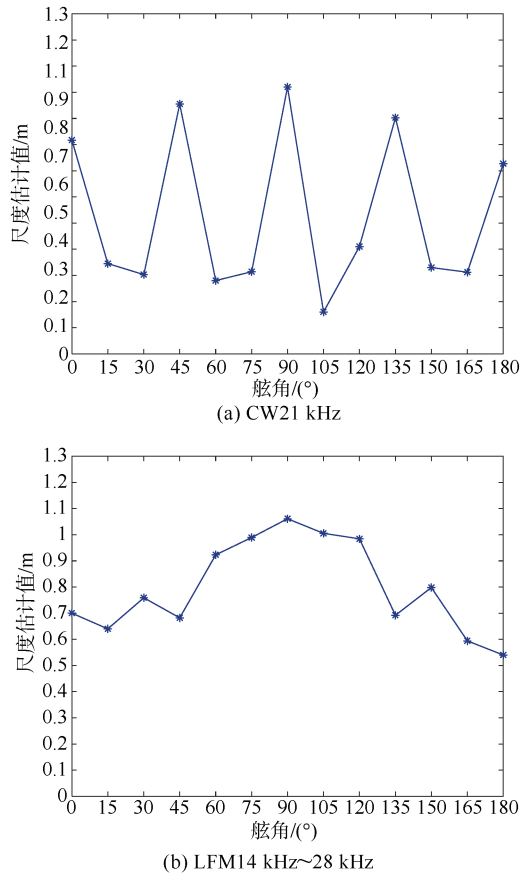


图7 垂直尺度估计折线图

Fig. 7 Line chart of vertical scale estimation

3 结束语

本文采用双通道短时互谱法的视在张角估计方法和基于能量积分的目标亮点位置的精确估计方法对测试数据进行处理分析, 获得了水下航行体模型在垂直方向上、不同舷角下尺度的估计值, 并分析了在舷角不同的情况下对垂直方向上尺度估计数值变化的原因。实验结果表明: 水下体目标垂直尺度随舷角呈规律性变化, 船艏角度下的垂向估计值小于正横方向下的垂向估计值。

参考文献

- [1] 何心怡, 高贺, 陈菁, 等. 鱼雷真假目标识别技术现状与展望[J]. 鱼雷技术, 2016, 24(1): 23-27.
- [2] 马国强, 徐德民, 王新晓. 基于目标方位走向的水下目标尺度识别技术仿真研究[J]. 舰船科学技术, 2004(3): 39-42.
- [3] 李智忠, 王森, 许忠良, 等. 互谱相关的舷侧双线阵空间谱估计方法[J]. 系统仿真学报, 2019, 31(5): 978-983.
- [4] 杜娟. 基于声阵列的波束形成技术研究[D]. 太原: 中北大学, 2011.
- [5] 刘朝晖, 李志舜, 马国强, 等. 双通道短时互谱法的潜艇目标尺度识别[J]. 火力与指挥控制, 2005(1): 103-106.
- [6] 陈云飞, 李桂娟, 王振山, 等. 水中目标回波亮点统计特征研究[J]. 物理学报, 2013, 62(8): 284-294.
- [7] 刘晓春, 董春凯. 基于目标空间尺度特征末程识别潜艇和诱饵的方法研究[J]. 鱼雷技术, 2008, 16(5): 46-50.
- [8] 王华奎, 李启虎, 黄海宁, 等. 失配状态下的双线阵波束形成研究[J]. 声学学报, 2007, 32(2): 158-164.
- [9] 石敏, 陈立纲, 蒋兴舟, 等. 具有亮点和方位延展特征的线列阵声诱饵研究[J]. 海军工程大学学报, 2005(1): 58-62.
- [10] 徐瑜, 赵军, 苑秉成. 基于方位走向的潜艇亮点分布特征提取与仿真[J]. 鱼雷技术, 2012, 20(6): 419-423.
- [11] 刘进伟, 彭子龙, 范军, 等. 水下航行体分片参数化多亮点声散射预报方法研究[J]. 兵工学报, 2023, 44(2): 517-525.
- [12] 廖志宇. 水下目标的几何亮点特征提取及识别方法研究[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工程大学, 2022.
- [13] 刘进伟, 刘妍, 彭子龙, 等. 水下凸体结构声散射修正亮点模型研究[C]// 第18届船舶水下噪声学术讨论会论文集. 无锡: 中国造船工程学会船舶力学学术委员会振动与噪声学组, 2021.
- [14] 姜姝. 水下目标回波几何亮点结构的形态学研究[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工程大学, 2014.
- [15] 徐瑜, 唐波, 苑秉成. 水下目标回波亮点高分辨方位估计与仿真[J]. 鱼雷技术, 2012, 20(3): 190-194.
- [16] 刘鹏仲. 多亮点目标模拟及其水下试验视景仿真的研究[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工程大学, 2011.
- [17] 白峻, 申晓红, 王海燕, 等. 水下体积目标宽带阵列尺度估计[J]. 应用声学, 2009, 28(5): 356-361.
- [18] 徐天杨. 水下典型壳体目标声散射回波特性及分类识别[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工程大学, 2021.

(责任编辑: 曹晓霖)