

【引用格式】吕曜辉, 胡明阳, 唐胜雨, 等. 基于恒虚警检测的图像声呐目标跟踪[J]. 数字海洋与水下攻防, 2023, 6(4): 472-477.

# 基于恒虚警检测的图像声呐目标跟踪

吕曜辉, 胡明阳, 唐胜雨\*, 徐媛, 李兴顺

(中国海洋大学 信息科学与工程学部, 山东 青岛 266404)

**摘要** 无人化、智能化的目标探测与跟踪是未来水下探测的必然趋势。针对水下移动小目标, 通过固定位置的声呐接收的角度与距离二维信息, 提出了一套自动跟踪方法。首先, 对图像声呐进行恒虚警处理, 同时引入时域参量, 通过在门限计算中增加之前时间的权重, 抑制位置恒定的静态强背景干扰。之后, 基于空间上目标的连续运动, 提出了小目标的自动跟踪算法。湖试数据实验处理表明: 该方法能有效抑制干扰, 实现水下小目标的自动探测跟踪。

**关键词** 水下小目标; 固定声呐; 恒虚警处理; 目标跟踪

中图分类号 TP391

文献标识码 A

文章编号 2096-5753(2023)04-0472-06

DOI 10.19838/j.issn.2096-5753.2023.04.010

## Image Sonar Target Tracking Based on Constant False Alarm Detection

LYU Yaohui, HU Mingyang, TANG Shengyu\*, XU Yuan, LI Xingshun

(College of Information Science and Engineering, Ocean University of China, Qingdao 266404, China)

**Abstract** Unmanned and intelligent target detection and tracking is the inevitable trend of underwater exploration in the future. An automatic tracking method for small moving underwater targets is proposed based on angle and distance information received by fixed sonar. Firstly, the image sonar is processed with constant false alarm, the time-domain parameters are introduced, and the weight of previous time is added to the threshold calculation to suppress the static strong background interference with constant position. And then, based on the continuous motion of the target in space, the automatic tracking algorithm of small target is proposed. Experimental processing of lake test data shows that this method can effectively suppress interference and realize automatic detection and tracking of small underwater targets.

**Key words** small underwater target; fixed sonar; constant false alarm treatment; target tracking

## 0 引言

声呐是利用声波对水下目标进行探测并获取目标相关信息的重要设备。由于声波是目前已知唯一能在海洋环境中远距离传播的能量形式, 人们常用声呐对海面及海面下的目标进行检测, 这在民用和军用方面都起着关键的作用。最初的声呐起源于对冰山的探测, 能够避免航行的船只触碰前方海面及海面下隐藏的冰山和礁石, 后续被用到军事方面, 如侦测潜藏在水底的潜艇, 对海面的监控或对

鱼雷的检测。此外, 声呐技术还广泛应用于鱼群探测、资源勘探、船舶导航、水下作业等各方面。其中, 在海杂波背景下对各种目标的探测, 可以说是水下信号处理的重要领域<sup>[1]</sup>。

受制于海洋特殊的环境, 其传播空间通常较为狭窄, 且海水成分具有较强的不均匀性, 和声呐载具通常应用在海洋边界等特点, 使声呐发出的声波在海洋中传播时易发生散射, 散射后声波相互叠加会形成强烈的混响。非平稳的混响是主动声呐的主要干扰之一<sup>[2-3]</sup>, 因此对混响干扰的抑制具有重要

收稿日期: 2023-05-31

作者简介: 吕曜辉(1982-), 男, 博士, 副教授, 主要从事海洋通信和声学信号处理研究。

\*通信作者: 唐胜雨(1992-), 男, 博士, 讲师, 主要从事水声信号处理、水声探测、水声数据深度挖掘研究。

意义。

对于声呐信号或雷达信号, 目标检测的根本任务就是判断所关注的目标是否存在。目标的信息全部体现在声呐的接收信号中, 但接收信号同时还混杂着杂波和接收机、发射机等噪声干扰, 因此声呐信号处理中的核心任务就是要对声呐接收到的回波数据进行处理, 判断背景环境中目标是否存在, 进而计算出目标的运动参数等更多信息。

水下目标跟踪通常是指利用不同种类的传感器取得探测范围内距离、方位等的量测信息, 通过滤波算法对目标的速度、位置等状态在时间上进行连续地估计与预测<sup>[4]</sup>。传统的水下目标跟踪技术主要有基于声呐图像的目标跟踪和基于声呐阵列的目标跟踪。主要应用在滤波方面, 即纠正海洋目标轨迹。且随着无人化、智能化探测成为水下目标探测的趋势<sup>[5-6]</sup>, 针对水下移动小目标的跟踪问题, 本文设计了一套时域联系的处理方法, 在传统恒虚警处理的基础上<sup>[7]</sup>, 为门限的判决引入过去时间的参数, 减少静态干扰影响。并在恒虚警处理的基础上, 通过声呐图像的目标运动位置预测与保持, 实现水下移动目标的探测跟踪。

## 1 恒虚警检测

信号检测的基本问题可以看成在有噪声存在的目标信号中, 确定研究目标是否存在, 或者对目标在何种希望的约束条件下进行最优判决的问题。比如典型的二元信号检测理论模型, 将接收到的回波数据按最小分辨单元构成检测序列, 利用某种门限对其判决, 如果序列的值达到设定的门限, 则认为对应单元存在目标; 若小于设定的门限, 则认为其单元不存在目标。

如用  $H_0$  表示接收到的回波信号中只有杂波, 没有目标存在;  $H_1$  表示接收到的回波中目标和杂波同时存在, 则将  $P_{fa} = P(H_1 | H_0)$  称为虚警概率。所谓恒虚警技术就是一种保持恒定虚警率的滤波手段<sup>[8]</sup>, 在实际声呐信号的处理中, 虚警问题是目标检测要解决的首要问题。在声呐接收的回波数据中, 由于回波信号会受到时间、空间、信号频率、环境参数等多重因素的改变而产生较大的变化, 其

接收的信号强度也会不断变化, 因此, 想要控制较低且相对恒定的虚警率, 通常需要根据具体的回波数据来对接收回波的背景特性进行估计, 随之产生动态的判决门限, 以适应复杂多变的海洋环境。

为了解决上述问题, 降低混响等干扰的影响, 在信号处理方面, 人们通常利用恒虚警检测技术<sup>[9]</sup>。由于混响是一个复杂的非平稳随机过程, 在回波检测过程中需要使用动态的门限对目标的存在与否进行判决。恒虚警检测方法通过估计回波信号的局部噪声功率, 动态设定检测门限, 来提高声呐对信号在各种噪声和混响背景情况下的检测能力。

其检测原理如图 1 所示, 若假定海杂波的干扰幅度服从瑞利分布, 即

$$f(x) = \frac{x}{\sigma^2} \exp\left(-\frac{x^2}{\sigma^2}\right) \quad (1)$$

其中, 统计特性  $E(x) = \sqrt{\frac{\pi}{2}}\sigma$ ; 平均功率为  $2\sigma^2$ ; 分布参数  $\sigma$  与海杂波的后向散射截面积  $\sigma_c$  有关, 通常为  $\sigma = \sqrt{\frac{\pi}{2}\sigma_c}$  <sup>[10]</sup>。

虚警率的表达式为

$$P_{fa} = \int_T^\infty f_1(x) dx = \int_T^\infty \frac{x}{\sigma^2} \exp\left(-\frac{x^2}{\sigma^2}\right) dx = \exp\left(-\frac{T^2}{2\sigma^2}\right) \quad (2)$$

可得动态门限与功率的关系:

$$T = \sigma \sqrt{2 \ln\left(\frac{1}{P_{fa}}\right)} = 2 \sqrt{\frac{1}{\pi} \ln\left(\frac{1}{P_{fa}}\right)} E(x) \quad (3)$$

以上述假设为例, 要保持恒定的虚警率, 也就是预设相同的  $P_{fa}$ , 此时动态门限  $T$  仅取决于功率估计  $E(x)$ 。由于通常声呐接收到的回波信号存在时空相关性, 因此, 可以考虑使用其周围相邻的杂波样本来估计背景杂波功率。传统的恒虚警处理就是利用回波数据单元周围的局部功率来代替  $E(x)$  <sup>[11]</sup>, 从而得到动态的检测门限  $T$ , 能够有效抑制混响干扰。

如图 1 所示, 在待检测单元周围选取一个参考窗, 将其中参考单元取均值作为该点的  $E(x)$ , 同时为了避免高分辨率下一个目标占据多个分辨单元, 自己屏蔽自己的情况, 通常设计一定保护单元。将整个窗口在信号中滑动, 或直接卷积或频域处理可以得到所有单元的动态门限, 完成目标检测。

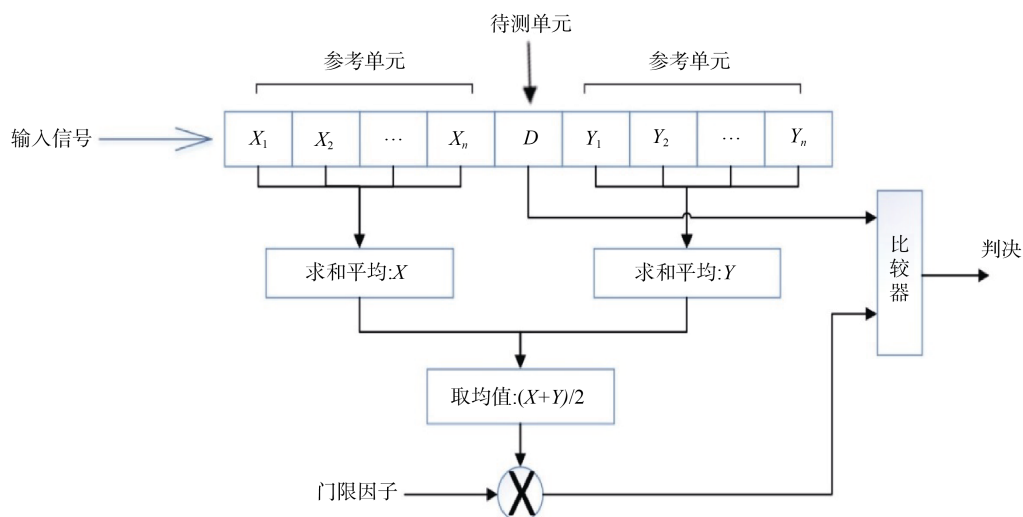


图1 单元平均恒虚警检测器原理图

Fig. 1 Principle diagram of CA-CFAR detector

然而，不管如何假定背景杂波模型与处理方式，传统恒虚警处理只能一定程度上抑制背景杂波，对于相对恒定的强干扰，如地形山脉、沉船等非目标的干扰并无直接去除能力。

基于目标的移动特点，即为了消除相对静态的干扰，本文将单元平均恒虚警算法与时域处理相结合，在恒虚警处理的门限选择时，引入过去时间的相同空间位置处的权重，即

$$T'(n) = T(n) + \omega_1 f(n-1) + \omega_2 f(n-2) \quad (4)$$

式中： $T(n)$ 是第 $n$ 时刻的某位置门限，例如式(3)，由恒虚警处理得到； $f(n-1)$ 是第 $n-1$ 时刻某位置的强度值； $\omega_n$ 为前 $n$ 时刻的权重。在动态门限的计算时，通过引入过去时间强度的积累，使静态干扰的门限变高，进而抑制在时间上始终存在的恒定干扰。

## 2 自动目标跟踪

为了进一步验证恒虚警处理效果，并从抑制噪声后的声呐图中得到移动目标，本文配套提出了一套基于目标移动的自动跟踪方法，不同于传统目标跟踪方法，如卡尔曼滤波、粒子滤波等。该方法并没有涉及过多目标参数，也无需大量的迭代滤波，更偏向于从较为干净的连续声呐图像中自动提取移动目标。

图2为跟踪方法的大体流程，方法的核心是建

立一个二维矩阵，称之为目标的跟踪矩阵。利用该矩阵，可以将每一帧图像中可能的目标点进行比较与联系。在跟踪处理之前可以对输入矩阵进行适当压缩，如距离维度分辨率过高的情况下，可以将多个数据看为一个单元来提高运算效率。

首先是对声呐图像所有单元的扫描，根据能量大小保留出前 $N$ 个可能的单元，将单元的距离、角度和能量信息一并保存，此时可以认为其中包含了移动的目标单元。将每一帧 $N$ 点信息保存为跟踪矩阵的一行，每一列则代表着一组连续的观察点，只有被判定为和上行该列的点为连续运动的点才会被存储到其中。

通过存储每一帧声呐图像中强度较大的点的位置信息，逐帧之间进行比较，通过信号强度、距离、方位的关系判决是否能与之前帧的点联系起来，构成连续运动的目标。若下一帧的点未能与前帧的点联系起来，则在跟踪矩阵的后面新增一列来对其引入跟踪观察。同时允许目标暂时的丢失，给每一组点线性的位置预测，若丢失目标后续能与预测点重新联系即视为预测正确，清除记录状态；若一定时间容限后仍未联系成功的点，则进行删除；一定时间后仍联系成功的点，将之前的位置信息一并框出，形成轨迹，以达到目标的自动跟踪。

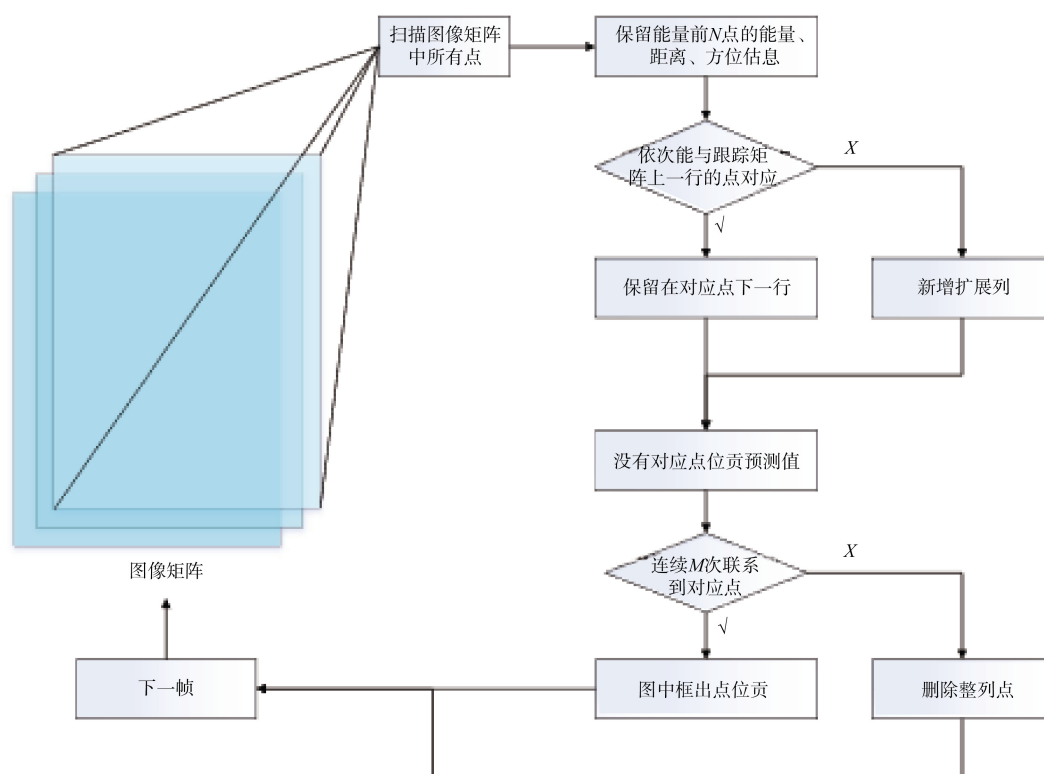


图2 目标跟踪算法流程

Fig. 2 Target tracking algorithm flow

### 3 实验数据处理

湖试实验选自新安江水域, 选用直径 40 cm 的目标小球, 布放深度 9 m, 以最慢航速航行, 基阵布放深度 6.8 m, 主动发出并接收一定时间的声呐信号。经过信号的补偿、解调等处理后的某帧声呐图像如图 3 所示。

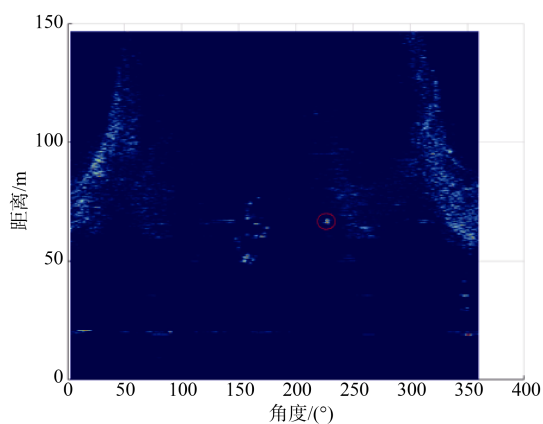


图3 原始声呐图像

Fig. 3 Original sonar image

如图 3 所示为解调后某帧的声呐图像, 表明了探测范围  $360^\circ$  和 150 m 内回波信号, 其中存在大量杂波干扰, 移动的目标小球在图中用红框圈出。为了抑制混响干扰、减少噪声, 对二维的声呐图像进行恒虚警处理, 从角度维和距离维上滑动处理窗, 得到门限对声呐数据进行判决, 能够有效减少背景干扰。恒虚警处理结果如图 4 所示。

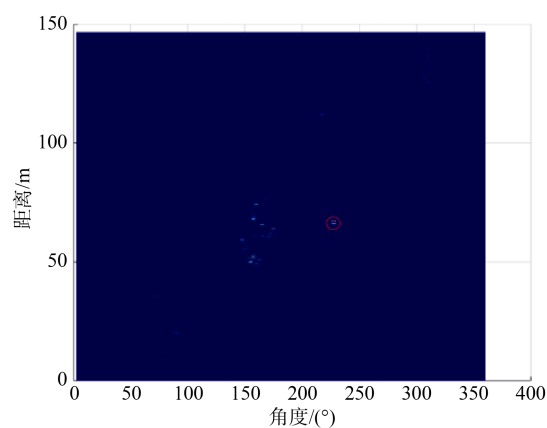


图4 恒虚警处理后图像

Fig. 4 Image processed with constant false alarm

时域联合恒虚警处理结果如图 5 所示。

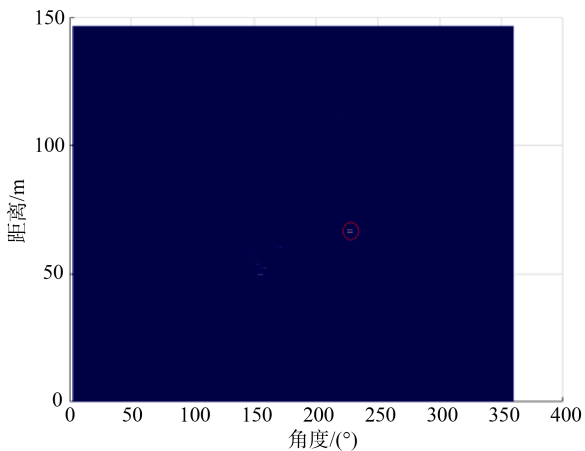


图 5 联合时域处理后图像

Fig. 5 Image processed with joint time-domain

如图 5 所示, 目标左侧的一片随时间相对恒定的非目标干扰基本消失。同时在目标框外进行扫描, 以  $10 \times 1$  大小为一个单位, 超出一定阈值的单元被认为是噪声。统计噪声数量如图 6 所示, 能够看出恒虚警处理对去除噪声的效果, 时域联合的恒虚警方法可以进一步去除静态噪声。

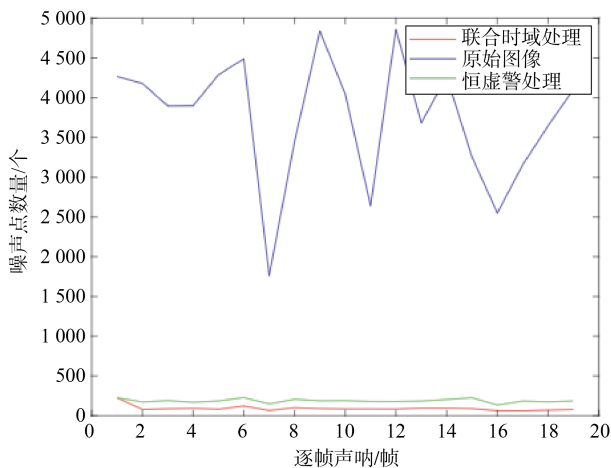


图 6 各处理噪声对比

Fig. 6 Comparison of noise of each processing method

图 7 是其中某一帧时展现的跟踪效果, 红框自动圈出的是目标移动的历史轨迹。可见, 时域联合的恒虚警处理过后能够有效减少干扰, 并能通过自动检测方法跟踪到移动目标。

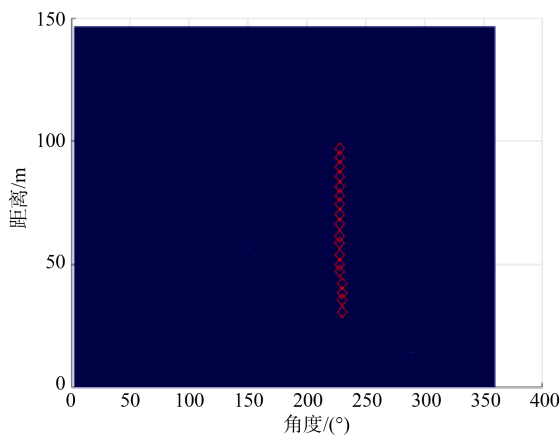


图 7 目标跟踪效果 (单帧)

Fig. 7 Single frame target tracking effect

为了从单张图片中获得更好的效果展示, 图 8 和图 9 将时间上数十帧叠加到一起得到历史轨迹,

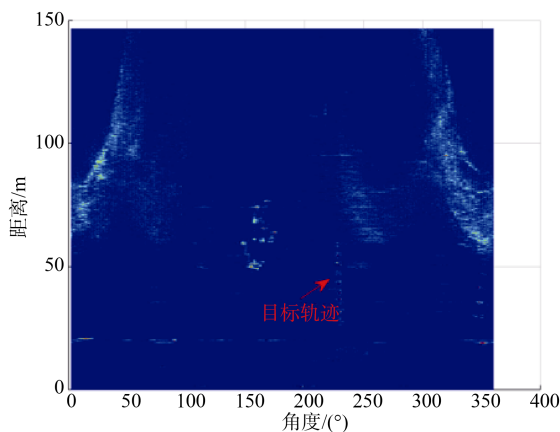


图 8 保持叠加的原始图像

Fig. 8 Superimposed original image

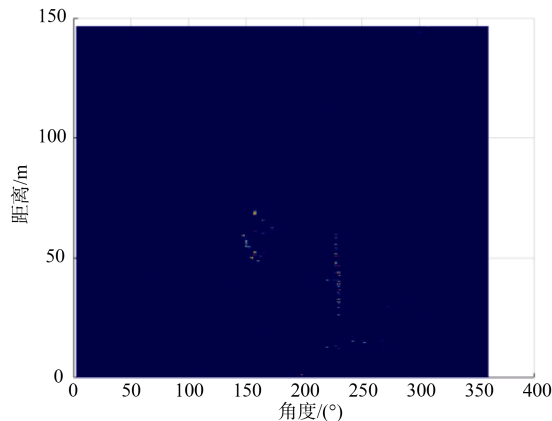


图 9 保持叠加的处理后原始图像

Fig. 9 Superimposed processed image

表现出处理前后的差距。由于叠加了过多张图像,分辨率有所下降,且单张图片中的少量干扰叠加后表现出一些数值强烈的点,但在实时单帧图像中无需担心。

#### 4 结束语

针对水文条件不特别恶劣的声呐图像水下移动小目标的探测问题,本文设计了一套处理方法。首先,利用恒虚警处理去除混响干扰,在门限判决时引入时间上的历史强度,使位置固定的静态干扰的门限比正常恒虚警空域处理得到的门限更高,一定程度上抑制静态干扰。之后,在处理基础上进行目标的位置跟踪,湖试数据的实验证明该方法能够有效去除干扰,自动探测跟踪目标。

#### 参考文献

- [1] MARAGE J P, MORI Y. Sonar and underwater acoustics[M]. London: Wiley-ISTE, 2010.
- [2] 黄江平. 混响干扰对主动声呐信号的影响分析及应对措施[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.
- [3] 殷超然, 闫林杰, 郝程鹏, 等. 均匀混响背景下抗多目标干扰恒虚警检测器设计[J]. 水下无人系统学报, 2019, 27(4): 434-441.
- [4] 刘妹琴, 韩学艳, 张森林, 等. 基于水下传感器网络的目标跟踪技术研究现状与展望[J]. 自动化学报, 2021, 47(2): 235-251.
- [5] 杨益新, 韩一娜, 赵瑞琴, 等. 海洋声学目标探测技术研究现状和发展趋势[J]. 水下无人系统学报, 2018, 26(5): 369-386, 367.
- [6] 金林. 智能化认知雷达综述[J]. 现代雷达, 2013, 35(11): 6-11.
- [7] 邢阳阳. 水下目标探测与跟踪关键技术研究[J]. 科学技术创新, 2019(14): 44-45.
- [8] 何友, 关键, 彭应宁, 等. 雷达自动监测与CFAR处理方法综述[M]. 北京: 清华大学出版社, 1999.
- [9] 赵国. 雷达对抗原理[M]. 西安: 西安电子科技大学出版社, 1999.
- [10] 常博皓. 海杂波的建模以及其背景下的目标识别 [D]. 西安: 西安电子科技大学, 2014.
- [11] FINN H. Adaptive detection mode with threshold control as a function of spatially sampled clutter-level estimates[J]. Environmental Science, 1968, 29: 414-465.

(责任编辑: 曹晓霖)