

# 水下无人航行器自主检测方法研究

周 武, 张宏滔

(中国船舶重工集团第七一五研究所声呐技术重点实验室, 浙江杭州 310023)

**摘要:** 自主检测技术是实现水下无人航行器(Underwater Unmanned Vehicle, UUV)智能化的关键技术, 是无人航行器能够自主执行水下预警、目标跟踪等任务的前提。针对当前基于均值类和有序统计类恒虚惊(Constant False Alarm Rate, CFAR)技术的自主检测方法在背景起伏严重、多目标情况下, 背景噪声统计特性估计不准确、自主检测性能下降的问题, 文章提出了一种基于方位-时间二维参考窗联合有序截断平均算法的自主检测方法。首先, 该方法设计了一种方位-时间二维参考窗, 解决了一维参考窗检测参考样本过少、噪声统计量估计不准的问题; 其次, 采用有序截断平均算法估计背景噪声统计量, 对起伏背景进行均衡; 最后, 利用背景噪声均值和方差构造恒虚警检测器, 采用检测前跟踪技术, 实现起伏背景下、多目标自动检测与跟踪。湖上试验结果表明, 在水下无人航行器的自噪声干扰下, 该方法对多目标依然具有较好的自主检测效果。

**关键词:** 水下无人航行器(UUV); 自主检测; 有序截断平均算法; 方位-时间二维参考窗; 被动声呐

中图分类号: TN911.7

文献标识码: A

文章编号: 1000-3630(2020)-02-0146-05

DOI 编码: 10.16300/j.cnki.1000-3630.2020.02.004

## Research on UUV autonomous detection method

ZHOU Wu, ZHANG Hongtao

(Science and Technology on Sonar Laboratory, 715th Institute of CSIC, Hangzhou 310023, Zhejiang, China)

**Abstract:** Autonomous detection technology is the key technology to realize underwater intelligent unmanned vehicle, and it is the premise that the unmanned vehicle can independently perform underwater early alert and target tracking. Aiming at the problem that the performance of the existing autonomous detection method based on the mean level constant false alarm rate (CFAR) and the ordered statistics CFAR is degraded under the condition of background fluctuation and multi-target, which is due to the inaccurate estimation of background noise statistical characteristics, an autonomous detection method based on the azimuth-time two-dimensional reference window associating the ordered truncation average (OTA) algorithm is proposed. In this method, the azimuth-time two-dimensional reference window is designed to solve the problem of noise inaccurate estimation caused by less reference samples in one-dimensional reference window, and the ordered truncate average algorithm is used to estimate the background noise statistics and to normalize the fluctuating background. Then, a constant false alarm detector is constructed by using the mean value and variance, and a tracking-before-detection technique is adopted to achieve multi-target automatic detection and tracking in the fluctuating background. The lake-test results show that the autonomous detection method has a good effect on multi-target detection under the interference of UUV self-noise.

**Key words:** underwater unmanned vehicle (UUV); automatic detection; ordered truncation average (OTA) algorithm; azimuth-time two-dimensional reference window; passive sonar

## 0 引言

考虑到水声信道的复杂性, 以及通信速率的限制, 对于水下无人航行器(Underwater Unmanned Vehicle, UUV), 采取人工干预的方式实现目标检测、跟踪与目标特征分析等工作几乎是不可能的。这意味着航行器必须具有一定的智能程度, 能够自

主地执行目标检测与跟踪。

目前, 自主检测难点在于检测算法对复杂背景干扰的适应性差。有经验的声呐员可以根据个人经验, 抓住特征检测目标, 而自主检测器只能根据已设定好的程序对目标进行检测。为使自主检测器更加灵活, 适应背景噪声的变化, 科研人员一直寻求一种自适应门限的设置方法, 使背景噪声、干扰的随机性对系统检测性能的影响尽可能小<sup>[1-2]</sup>。恒虚警率处理(Constant False Alarm Rate, CFAR)技术就是一种在自主检测系统中给检测方案提供门限并且使背景噪声和干扰对系统虚警概率影响最小化的信号处理方法。

收稿日期: 2019-01-12; 修回日期: 2019-03-31

基金项目: 联合基金重点项目(6141B04040301)

作者简介: 周武(1990-), 男, 湖北荆州人, 硕士, 研究方向为水声信号被动检测。

通讯作者: 周武, E-mail: sklzhouw@163.com

长期以来，CFAR 技术广泛应用于雷达领域，在水声信号被动检测领域，对于目标信号的有无，一直都是采用人工检测的方式。但近年来，随着水下无人设备、智能设备的蓬勃发展，水下无人飞行器自主检测技术的需求日益强烈。目前，水声信号 CFAR 检测方法通常采用极值检测结合方向维处理器，采用一维参考窗，在单批次波束域数据上，通过估计输出信噪比，与给定的阈值门限比较，从而实现自主检测。该方法在背景噪声平稳、目标单一的情况下，检测效果较为理想。但是当背景噪声起伏不均、目标数量较多的情况下，背景噪声统计特性估计不准，检测效果急剧下降。为适应起伏背景、多目标情况下自主检测应用需求，本文提出了一种基于方位-时间二维参考窗联合有序截断平均(Order Truncate Average, OTA)算法的被动声呐自主检测方法，该方法利用 OTA 技术在方位-时间二维参考窗上估计背景噪声统计特性，利用均值、方差构造 CFAR 检测器，最后采用检测前跟踪技术进一步降低虚警。湖上试验结果验证了本文所提方法的性能。

### 1 恒虚警检测

信号检测是在大量干扰背景中发现目标的过程。在声呐系统中，这种干扰包括海面波浪、雨、海洋生物、海底运动等产生的环境噪声，以及平台的自噪声，各种各样的噪声造成了海洋环境的复杂性。噪声强度的变化直接影响了自主检测系统的目标的检测性能。因此，在声呐系统中，人们往往希望在噪声强度不稳定的情况下，自主检测系统具有稳定的检测性能，即实现 CFAR 检测。

CFAR 检测方法根据背景噪声的统计模型是否已知，分为参量检测和非参量检测。本文假设声呐的输入噪声和信号加噪声均为高斯过程，讨论背景噪声统计模型已知情况下的参量 CFAR 检测，其原理图如图 1 所示。图 1 中，参考单元是指用于噪声背景统计特性估计的波束域参考样本；考虑到基阵的空间分辨率，有可能出现同一目标占据多个波束单元的情形，因此需要在检测单元与参考单元之间设置一定的保护间隔，使得参考单元不包含任何目标。检测单元则是进行背景估计、目标自主检测的单元。参量检测适用于空间统计上平稳的背景，可以分为均值(Mean Level, ML)类 CFAR 和有序统计(Ordered Statistics, OS)类 CFAR 两大类。ML 类 CFAR 都是在单元平均虚警(Cell Averaging CFAR, CA-CFAR)基础上提出来的。参量 CFAR 能够保持恒虚警检测，基于以下两个假设<sup>[3]</sup>：(1) 参考

单元所含干扰的统计特性与待检测单元的统计特性一致；(2) 参考单元不包含任何目标。在上述条件下，待检测单元的干扰统计特性可从临近参考单元的数据得到。

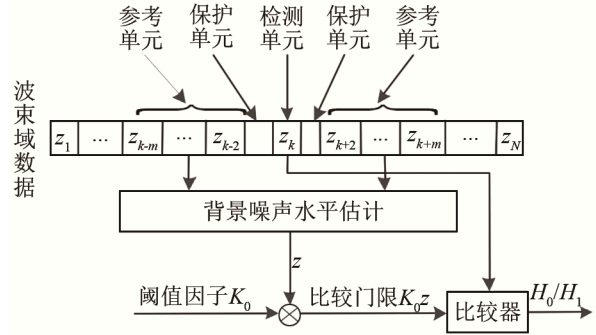


图 1 参量恒虚警检测原理图  
Fig.1 Principle diagram of parameter CFAR detection

高斯过程经被动声呐接收机平方积分，输出端信号仍是高斯过程<sup>[4]</sup>。被动声呐接收机输出  $z_i$  服从正态分布，则待检测单元  $z_k$  的概率密度函数为

$$p_z(z) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}\sigma_n} \exp\left(-\frac{(z-\mu)^2}{2\sigma_n^2}\right) \quad (1)$$

CA-CFAR 利用参考单元的数据来估计背景噪声平均水平  $\mu$  以及噪声方差  $\sigma_n$ ：

$$\mu = \frac{1}{2m-2} \sum_{i=k-m}^{k+m} z_i \quad (2)$$

$$\sigma_n = \frac{1}{2m-3} \sum_{i=k-m}^{i=k+m} (z_i - \mu)^2 \quad (3)$$

对于给定的虚警概率  $P_F$ ，则对应的自适应检测门限  $x$  可由下式求得：

$$P_F = \int_{-\infty}^x p_z(z) dz \quad (4)$$

在多目标情况下，一旦出现当前待检测单元的参考单元中存在其它目标的情况，如果 CA-CFAR 背景噪声水平估计过高，将会对小目标产生遮蔽效应<sup>[5]</sup>。为改善 ML 类方法在多目标环境中的性能，Rohling<sup>[6]</sup>提出了 OS 方法，其将参考单元中的数据进行升序排列，将第  $k$  个统计量作为噪声功率水平估计，由此派生的方法被称为 OS 类方法。OS-CFAR 能很好解决平稳背景中多目标的检测问题，但是在起伏背景下，由于其背景噪声统计量估计不准确，使得自主检测性能迅速降低。

## 2 基于 OTA-CFAR 算法的自主检测

### 2.1 方位-时间二维参考窗

在传统参量 CFAR 检测中，一维参考窗样本数量较少，也是导致 CFAR 检测器性能不稳定的重要原因。根据贝努利大数定理，为使虚警概率与虚警

频率之间的差别小于  $\varepsilon P_F$  ( $\varepsilon P_F$  为小于 1 的任意正数), 则满足这一要求的概率<sup>[7]</sup>:

$$P\left[\left|\frac{N_F}{N} - P_F\right| < \varepsilon P_F\right] \geq 1 - \frac{P_F(1-P_F)}{\varepsilon^2 P_F^2 N} \quad (5)$$

式中:  $N$  为样本数;  $N_F$  为虚警数。假设  $P > 0.9$ ,  $\varepsilon$  取 0.5, 则当  $P_F = 0.1$  时, 所需的样本数量  $N \geq 360$ , 即当样本数量大于 360 时, 虚警频率与虚警概率的差别小于 0.05 的概率大于 90%。在一维参考窗上, 要获得如此多的噪声样本是不现实的, 因此需要多个批次的波束域数据作为参考。海洋环境噪声虽然是一个时变的过程, 但其慢变特性使得我们可以认为其统计特性在短时间内是平稳的。本文设计了如图 2 所示的方位-时间二维参考窗, 在时间维上通过累积多批数据估计背景噪声统计特性, 使得参考样本数量大大增加, 对背景噪声统计量的估计更为精确。实际应用过程中, 应根据接收机采样频率、信号批处理长度, 选择合适数量的批次累积。

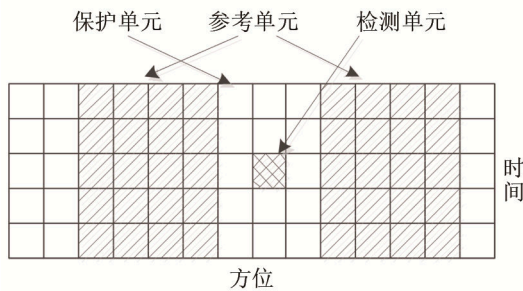


图 2 方位-时间参考窗示意图

Fig.2 Schematic diagram of azimuth-time two-dimensional reference window

## 2.2 OTA 背景均衡

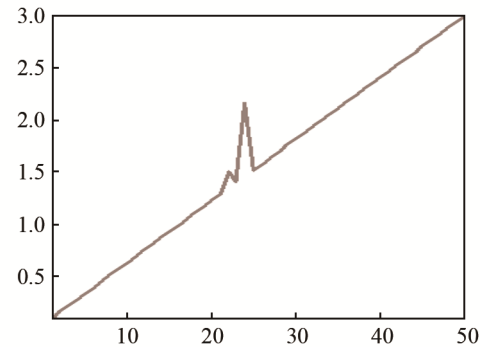
非各向同性噪声场中, 信号与噪声经过接收机后的输出作为 OTA 的输入如图 3(a)所示。OTA 算法在窄带和宽带信号的检测中均有应用。图 3 中为一段信号序列, 纵坐标均为信号幅度。对于窄带检测, 横坐标代表着频率, 舰船辐射噪声谱具有类似形状谱结构; 对于宽带检测, 横坐标代表着方位, 空间上不均匀噪声场即可产生图中的非均匀背景。在该不均匀背景下直接采用 ML 类或者 OS 类 CFAR 检测算法, 均会导致背景噪声统计特性估计不准, 强目标将会对弱目标产生遮蔽效应, 使得弱目标无法被检测到。

Wolcin<sup>[8]</sup>提出的 OTA 算法在多目标环境下, 背景均衡过程不会对弱目标产生遮蔽效应, 适合多目标环境下的目标检测。OTA 算法流程如下: 假设待均衡单元  $z(k)$  为第  $k$  个单元, 左右滑窗窗长  $M$ , 则一共有  $2M+1$  个数据:

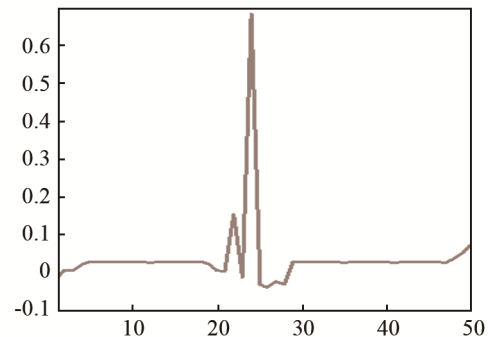
$$R_k = \{k-M, \dots, k-1, k, k+1, \dots, k+M\} \quad (6)$$

将其从小到大升序排列, 获得新序列:

$$\{y(1), y(2), \dots, y(2M+1)\} \quad (7)$$



(a) OTA 输入



(b) OTA 均衡输出

图 3 非均匀背景下的 OTA 输入及其均衡输出信号

Fig.3 The input and balanced output signals of OTA under non-uniform background

取其中间值  $y(M+1)$  记为  $Y_{sm}$ , 将所有  $y(i) > \alpha Y_{sm}$  ( $\alpha$  为一正常数) 的值去掉, 则背景噪声均值估计为

$$\hat{m}(k) = \frac{1}{I} \sum_{i=1}^I y(i) \quad (8)$$

其中,  $y(I) \leq \alpha Y_{sm}$ ,  $y(I+1) \geq \alpha Y_{sm}$ 。将噪声均值移除和归一化  $\frac{z(k) - \hat{m}(k)}{\hat{m}(k)}$ , 为便于视频输出, 最后的输出结果可以表示为

$$x(k) = K_A \frac{z(k) - \hat{m}(k)}{\hat{m}(k)} + K_B \quad (9)$$

其中:  $K_A$  为一正常数, 它控制动态范围;  $K_B$  用来保证所有的输出值为正值。对于图 3(a)所示的输入信号, 设置窗长  $M=4$ ,  $\alpha=2$ , 经过 OTA 算法, 其输出结果如图 3(b)所示, 背景噪声已经被移除, 弱目标明显。

## 2.3 检测前跟踪

检测前跟踪方法(Track Before Detection, TBD)是弱目标检测中常用的方法, 它利用目标在时间上的累积, 提高输出信噪比。在被动声呐目标检测中,

短时间内对于远场目标，其方位变化量较小，在方位历程图上，其航迹近似一条直线。在众多的直线检测方法中，霍夫(Hough)变换是最常用的方法之一，其优点在于算法稳定性高，抗噪性能好。本文采用 Hough 变换来进行目标检测前跟踪。

如图 4 所示，Hough 变换是从二维空间到 Hough 空间的一种映射。二维空间里的每一个点  $(x, y)$  都对应着 Hough 空间的一条正弦曲线，当这些点位于同一条直线上时，它们在 Hough 空间的曲线将会经过同一点。其映射关系为

$$\rho = x \cos \theta + y \sin \theta, \rho \geq 0, -\frac{\pi}{2} \leq \theta \leq \frac{\pi}{2} \quad (10)$$

式中： $\rho$  为原点到直线的距离； $\theta$  为  $\rho$  与  $x$  夹角。

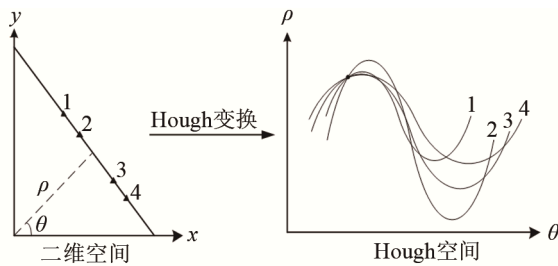


图 4 Hough 变换检测直线原理  
Fig.4 The principle of Hough transform for line detection

本文中，采用 OTA-CFAR 算法，以低阈值门限获取目标方位以及大量虚警，再采用 Hough 变换方法，利用目标在时间、空间上连续及虚警随机出现的特点，获取目标的真实方位。

### 3 试验数据处理

试验数据采集于 2016 年某次湖上试验。试验所用 UUV 如图 5 所示，试验航速 6 kn，采用 UUV 两侧舷侧阵接收目标声源数据，采样频率  $F_s = 30$  kHz。目标声源连续发射声压级为 125、115、105 dB 的宽带信号。设 UUV 船端方向为  $0^\circ$ ，目标声源位于 UUV 约  $100^\circ$  方向，距离 5 km。目标方位历程图如图 6 所示。



图 5 湖上试验使用的 UUV  
Fig.5 UUV used in lake test

图 6 中除目标声源外，还有部分船只及其它目

标。图 7(a)为某一时刻的波束域输出，图 7(b)为其对应的 OTA 算法进行背景均衡的输出结果。可以看出，UUV 平台的螺旋桨机械噪声对基阵的目标检测影响明显。

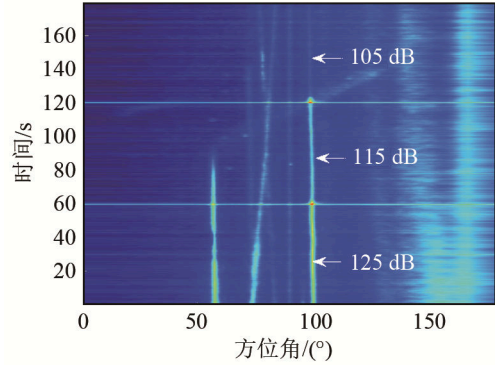
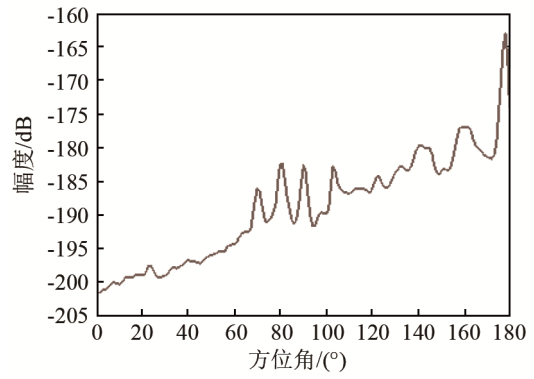
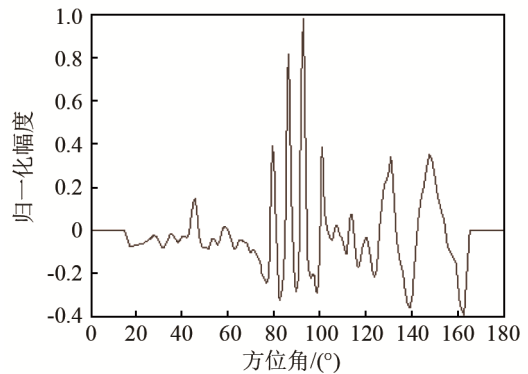


图 6 目标方位历程  
Fig.6 Target bearing-time map



(a) 波束域输出



(b) OTA 均衡后的输出

图 7 波束域输出及其 OTA 均衡结果

Fig.7 Beam domain output and its OTA equalization result

对背景均衡后的数据采用方位-时间二维参考窗估计噪声波束域输出均值和方差。本文中，每批阵元域数据处理长度  $L = 1024$ ，参考窗采用 30 批波束域数据，对应持续时间约 1 s，每批数据参考样本 12 个波束单元，保护间隔 2 个波束单元，对应图 2 中，则是左右各 6 个参考单元，中间保护间隔为 2 个单元，设定虚警概率  $P_f = 0.1$ ，恒虚警检测结果如

图 8 所示。

图 8 中虚警较多(150°方向), 采用检测前跟踪算法来降低虚警。以 30 个批次数据为一帧, 如图 9(a)所示, 在该时段内, 远场目标方位基本无变化, 其在 Hough 空间的映射如图 9(b)所示, 可以看见 5 个明显的亮点, 即对应图 9(a)中的 5 条直线。设置灰度图中亮点检测门限为 25(即在同一条直线上, 目标出现 25 次以上), 将该亮点对应的直线保留, 其余的直线删除, 最终的检测结果如图 10 所示。由图 10 可以看出, 与图 8 相比, 大部分虚警已经被排除。

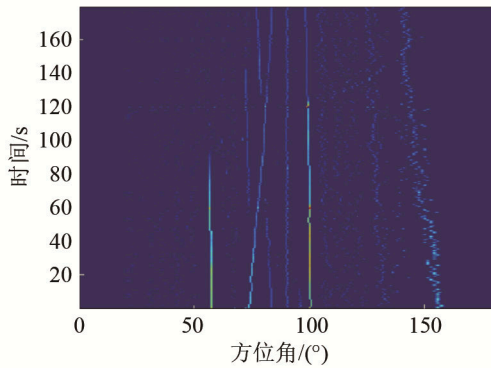
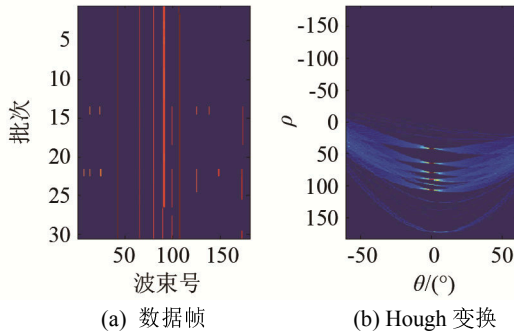


图 8 OTA-CFAR 检测结果  
Fig.8 The detection results of OTA-CFAR detection



(a) 数据帧 (b) Hough 变换  
图 9 Hough 变换后的检测结果  
Fig.9 The detection results by using Hough transform

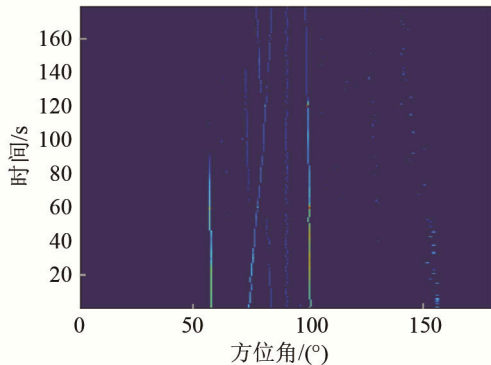


图 10 采用检测前跟踪消除虚警  
Fig.10 False alarm reduction with 'tracking before detection' algorithm

### 4 结 论

针对水下移动平台自噪声干扰较强, 常规恒虚警检测方法不满足应用条件的情况, 本文提出了一种基于 OTA-CFAR 算法的自主检测方法, 该方法利用 OTA 算法对背景噪声进行均衡, 采用方位-时间二维参考窗进行背景噪声统计量估计并构造恒虚警检测器, 最后采用检测前跟踪的方式消除虚警。湖上实验结果表明, 该方法能有效抑制平台的螺旋桨噪声干扰, 实现移动平台的多目标自主检测, 检测性能良好, 有一定的实用性。

### 参 考 文 献

- [1] 徐从安, 简涛, 何友. 方差均值平方比恒虚警检测器[J]. 电光与控制, 2012, 19(9): 59-62.  
XU Cong'an, JIAN Tao, HE You. Variance and mean square ratio CFAR detector[J]. Electronics Optics and Control, 2012, 19(9): 59-62.
- [2] 郝凯利, 易伟. 未知杂波背景下恒虚警检测门限获取方法[J]. 雷达科学与技术, 2015, 13(2): 183-189.  
HAO Kaili, YI Wei. CFAR detection based on kernel density estimation under background unknown[J]. Radar Science and Technology[J]. Radar Science and Technology, 2015, 13(2): 183-189.
- [3] RICHARDS M A(美). 雷达信号处理基础[M]. 那孟道译. 北京: 电子工业出版社, 2012: 260-287.  
RICHARDS M A(U.S.A.). Fundamentals of radar signal processing[M]. XING Mengdao, translate. Beijing: Publishing House of Electronics Industry, 2012: 260-287.
- [4] 田坦. 声呐技术[M]. 哈尔滨: 哈尔滨工程大学出版社, 2009.  
TIAN Tan. Sonar technology[M]. Harbin: Harbin Engineering University Press, 2009
- [5] ZAIBASHI, AMIR. An adaptive averaging-based CFAR detector for interfering targets and clutter-edge situations[J]. Digital Signal Processing, 2014, 31: 59-68.
- [6] ROHLING H. Radar CFAR thresholding in clutter and multiple target situation[J]. IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems, 1983, 19(4): 608-620.
- [7] 赵树杰, 赵建勋. 信号检测与估计理论[M]. 北京: 清华大学出版社, 2005: 452-458.  
ZHAO Shujie, ZHAO Jianxun. Signal detection and estimation theory[M]. Beijing: Tsinghua University Press, 2005: 452-458.
- [8] WOLCIN J J. On the statistical properties of noise background equalization schemes[J]. NUSC Technical Memo, 1978, 76: 1738-1742.