

# 基于时空域恒虚警处理的舰船尾流检测技术

王泽欣<sup>1,2</sup>, 郝程鹏<sup>1,2</sup>, 刘瑾妍<sup>1,2</sup>, 吴敏<sup>1,2</sup>, 刘佳<sup>1,2</sup>

(1. 中国科学院声学研究所, 北京 100190; 2. 中国科学院大学, 北京 100049)

**摘要:**针对舰船尾流检测中存在的水下环境复杂、探测目标形态未知等问题,本文提出一种基于时空域恒虚警处理的尾流检测算法。利用在多波束声呐输出的多帧二维声呐图像,结合舰船尾流气泡的空间连续和缓慢时变的特点,通过时空联合恒虚警检测算法检测舰船尾流;利用背景杂波强度上随机的特点,设计交并检测,融合多帧检测结果以抑制虚警概率。外场试验表明:所提出的时空联合恒虚警检测算法相较于现有恒虚警检测算法,可以在更低的虚警概率下,有效提高舰船尾流的检测概率。本文结论可以为舰船尾流检测提供一种思路。

**关键词:**舰船尾流; 多波束声呐; 声呐图像; 声学模型; 几何特性; 目标检测; 恒虚警检测; 二维恒虚警检测

**DOI:** 10. 11990/jheu. 202506017

**网络出版地址:** <https://link.cnki.net/urlid/23.1390.u.20250623.1633.016>

**中图分类号:** P754 **文献标志码:** A **文章编号:** 1006-7043(2025)08-1593-08

## Ship wake detection technique based on constant false alarm processing in spatiotemporal domain

WANG Zexin<sup>1,2</sup>, HAO Chengpeng<sup>1,2</sup>, LIU Jinyan<sup>1,2</sup>, WU Min<sup>1,2</sup>, LIU Jia<sup>1,2</sup>

(1. Institute of Acoustics, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100190, China; 2. University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China)

**Abstract:** The present study proposes a spatiotemporal joint constant false alarm rate (STJ-CFAR) algorithm for wake detection as a solution to the challenges of ship wake detection under complex underwater conditions and unknown target morphologies. Multiframe 2D sonar images output from multibeam sonar, in conjunction with the spatial continuity and slow time-varying properties of ship wake bubbles, permit the detection of ship wakes by the STJ-CFAR detection algorithm. The probability of false alarms is minimized by leveraging the properties of background clutter random intensity, the configuration of intersecting and merging detection, and the combination of multiframe detection results. Field experiments demonstrate that, in comparison with the existing constant false alarm detection algorithms, the proposed STJ-CFAR detection algorithm can effectively enhance the detection probability of ship wake currents with a concomitant reduction in false alarm probability. This approach offers a novel methodology for the detection of ship wake currents.

**Keywords:** ship wake; multi-beam sonar; sonar image; acoustic model; geometry characteristics; target detection; constant false alarm rate detection; two-dimensional constant false alarm rate detection

尾流是舰船在航行过程中在船艉形成的一条含有大量气泡的气幕带。舰船尾流的参数能够反映舰船的尺寸、吃水、船体结构等特征。舰船尾流检测是进行舰船探测、跟踪、识别的重要基础。

舰船尾流具有声学、光学、热力学以及电磁学特性。光学方法主要利用舰船尾流气泡群的前向散射回波信号特性和后向散射回波信号散射特性展开研

究<sup>[1-2]</sup>。由于舰船螺旋桨搅动和船身形成的涡流,其会导致的尾流区域的温度变化,热力学方法便是对舰船尾流区域的温度变化进行研究<sup>[3]</sup>。电磁学方法通过探测舰船尾流引起的电磁场变化<sup>[4]</sup>。而声学方法则是利用舰船尾流不同于海洋背景的声散射、声吸收特性进行研究。针对水下探测,利用声学特性的声探测方法具有探测距离远、获取信息全面等优势。

尾流气泡在产生后,随着时间发生合并、破裂、消散、扩张、上浮等变化,具有时空分布特性。20世纪90年代,加拿大海洋科学院<sup>[5]</sup>研发了SUSY系统,采用单波束声呐和侧扫声呐对舰船尾流进行测量,对尾流声散射开展研究,并给出了尾流宽度的拟

收稿日期: 2025-06-08.

网络出版日期: 2025-06-24.

基金项目: 国家自然科学基金项目(62371446).

作者简介: 王泽欣, 男, 博士研究生;

刘佳, 女, 研究员, 博士.

通信作者: 刘佳, E-mail: liujia@mail.ioa.ac.cn.

合公式;Weber 等<sup>[6]</sup>利用多波束声呐对双螺旋桨结构的试验船的尾流进行研究,发现气泡尾流存在时间可以达到 10 min;石晟玮等<sup>[7]</sup>开展了尾流气泡运动特性的研究,建立了舰船尾流中气泡浮升运动和径向运动的理论模型;杜敬林等<sup>[8]</sup>开展了对舰船尾流的声散射特性和几何特征的研究,给出了舰船尾流气泡的截面形状和立体图。马青山等<sup>[9]</sup>对气泡运动方程开展了研究,发现舰船尾流气泡中较大尺寸的气泡短时间内便会消融,微小气泡能存活较长时间。李珊<sup>[10]</sup>基于多波束声呐对舰船尾流成像开展了研究,针对舰船尾流的空间分布和时变性测量的难点,通过多波束声呐持续测量,将尾流截面等效为尾流的空间三维分布。

尾流声散射特性主要受气泡体积和密度的影响。在声散射特性方面,Medwin 等<sup>[5]</sup>开展了气泡共振频率的研究,并给出了气泡固有共振频率的计算公式;Herman<sup>[11]</sup>开展了气泡密度的研究,确立了气泡密度的计算公式;张群等<sup>[12]</sup>开展了舰船尾流的主动散射模型的研究,指出入射声波接近气泡的共振频率时可以穿透气泡壁,远离共振频率时则可以把气泡看成弹性球壳;高可心等<sup>[13]</sup>构建了以螺旋桨转速为变量的舰船尾流气泡密度衰减模型,结果表明螺旋桨转速越高,则气泡数密度衰减至背景值的速度越快。范雨喆<sup>[14]</sup>对舰船气泡尾流的相干声场特性开展研究,建立了海面混响背景下的舰船尾流回波信号模型。

在回波检测方面,恒虚警(constant false alarm rate, CFAR)检测器是通过背景杂波统计特性进行的自适应门限检测方法,主要解决复杂杂波环境下的目标检测问题<sup>[15]</sup>。近年来 CFAR 检测也被使用在多波束声呐图像<sup>[16]</sup>,单元平均恒虚警(cell average constant false alarm rate, CA-CFAR)已经用于多波束声呐图像水体目标检测<sup>[17]</sup>;二维双选择性指数恒虚警检测算法(2 dimensional double selectivity index constant false alarm rate, 2D-DSI-CFAR)检测器,通过对不同维度使用不同的背景功率估计方法提高了目标检测性能<sup>[18]</sup>。面向尾流检测的恒虚警检测器具有无需知道目标先验信息和可以自适应计算检测门限的优势。

针对尾流检测中,气泡团目标缓慢时变、非均匀连续分布的目标特点,本文提出基于时空域 CFAR 的尾流回波检测方法,同时利用时间尺度和空间尺度信息在对舰船尾流进行时空联合恒虚警(spatio temporal joint constant false alarm rate, STJ-CFAR)检测;利用背景杂波随机的特点,进行交并(intersection union, IU)检测进一步降低虚警概率。在湖试试验中验证了所提方法的有效性。

## 1 尾流回波信号模型

尾流探测实质上是对于尾流气泡导致的体积散射强度进行探测,给出声呐方程<sup>[6]</sup>:

$$S_v = E_L - S_L + 2T_L - 10\lg V \quad (1)$$

式中:  $S_v$  为体积散射强度;  $E_L$  为接收回声级;  $S_L$  为声源级;  $T_L$  为传播损失;  $V$  为单元体积。

尾流回波信号的声压可表示为<sup>[19]</sup>:

$$p_c = \frac{p_0}{r} 10^{-0.1\beta r} \left[ \frac{m_{kc} H c \tau}{2r} \int_0^{2\pi} b(\theta, \varphi) b'(\theta, \varphi) d\varphi \right]^{1/2} \quad (2)$$

式中:  $p_0$  为距发射阵 1 m 处的沿阵轴的声压;  $r$  为散射点到接收阵的距离;  $\beta$  为衰减系数;  $m_{kc}$  为尾流散射系数;  $H$  为尾流厚度;  $c$  为声速;  $\tau$  为发射信号脉宽;  $b(\theta, \varphi)$ ,  $b'(\theta, \varphi)$  为发射阵和接收阵的指向性。 $m_{kc}$  可以表达为:

$$m_{kc} = \int_{R_{\min}}^{R_{\max}} \frac{n(R) R^2}{(f_r^2 / f_0^2 - 1)^2 + \delta^2} dR \quad (3)$$

式中:  $R$  为气泡半径;  $n(R)$  为单位体积中的半径为  $R$  的气泡数量;  $f_r$  为半径为  $r$  的气泡的共振频率;  $f_0$  为发射信号频率;  $\delta$  为气泡振动的阻尼系数。

式(3)需要满足以下假设:1) 阻尼系数  $\delta$  为常数;2) 气泡密度分布均匀;3) 不考虑海水粘滞阻力和气泡表面张力的影响。

尾流气泡是舰船航行时由螺旋桨空化等原因产生的现象。由舰船产生的尾流气泡密度通常比海洋背景中的气泡密度高 1~2 个数量级。尾流厚度在初始时会迅速增加,直到尾流气泡向下的速度与气泡的浮力平衡,尾流厚度将在一段时间内几乎不变。由于不再受到螺旋桨搅动和船体行驶后形成的湍流的影响,小气泡由于自身的浮力上升及大气泡的破裂,尾流厚度将缓慢减小。尾流宽度在初始阶段,以 30°~60°向两侧扩散,当尾流开始衰减后,尾流宽度便转为以约 1°向两侧扩散<sup>[20]</sup>。

一般认为由于螺旋桨的搅拌,舰船尾流气泡在同一深度处的气泡密度是基本均匀的,即同一深度的舰船尾流的回波信号的强度是基本一致的。对于纵深处的尾流气泡分布的规律的尚未总结出有价值的规律。

综上,可认为尾流是一个空间尺度上连续、时间尺度上缓慢时变的大尺度目标。

## 2 时空联合尾流回波信号检测方法

本文提出的多波束声呐舰船尾流检测流程如图 1 所示。首先使用多波束声呐的阵元数据进行波束形成,获得多波束声呐图像后,再使用 STJ-CFAR。

针对稳定尾流是缓慢时变的目标的特性,可以认为尾流在短时内的几何形状基本不变<sup>[21]</sup>。若还有下 1 帧数据,继续获取下 1 帧数据,否则利用多帧 STJ-CFAR 检测结果,进行交并检测,提升检测概率并降低虚警概率。

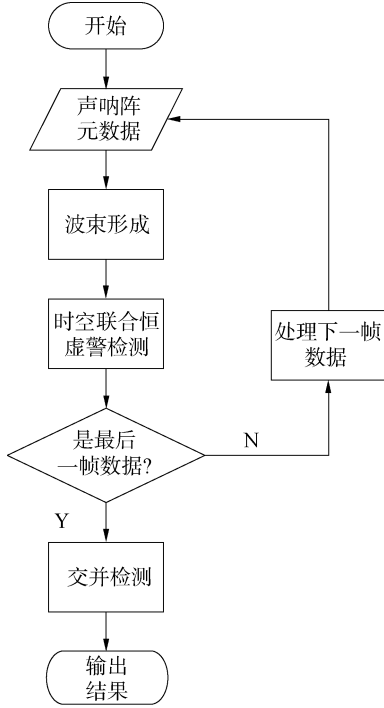


图 1 时空联合尾流回波检测流程

Fig. 1 Flow of joint detection of spatio-temporal wake echo signals

### 2.1 时空联合恒虚警检测技术

#### 2.1.1 二维恒虚警检测技术

由于尾流具有空间连续的特点,选择使用二维恒虚警检测算法,充分利用尾流的空间尺度信息。

图 2 为 2D-DSI-CFAR 恒虚警检测算法的示意图。由于尾流目标在声呐图像中横向和纵向的干扰类型不同,对横向和纵向使用不同的检测策略。

选小恒虚警 (smallest of constant false alarm rate, SO-CFAR) 检测器对于多目标分辨能力较强;选大恒虚警 (greatest of constant false alarm rate, GO-CFAR) 检测器则对杂波边缘有更好的虚警控制性能<sup>[21]</sup>。因此对于纵向目标使用 SO-CFAR 算法,对于横向目标使用 GO-CFAR 算法。分别计算得到 2 个门限值,只有当检测单元强度大于 2 个门限时判定为有目标,否则无目标。在多波束数据中,纵向的干扰类型为多目标遮蔽,产生原因主要是尾流是由多散射点构成的大尺度目标;横向干扰主要是杂波边缘,因此纵向使用 SO-CFAR,横向使用 GO-CFAR。

4 个参考单元的功率水平的估计为:

$$R_{C_1} = \frac{1}{n_R} \sum_{i=1}^{n_R} x_i \quad (4)$$

$$R_{C_2} = \frac{1}{n_{Ri=n_R+1}} \sum_{i=1}^{2n_R} x_i \quad (5)$$

$$R_{C_3} = \frac{1}{n_C} \sum_{i=1}^{n_C} y_i \quad (6)$$

$$R_{C_4} = \frac{1}{n_{Ci=n_C+1}} \sum_{i=1}^{2n_C} y_i \quad (7)$$

式中:  $n_R$  为纵向的参考单元滑窗长度;  $n_C$  为横向的参考单元滑窗长度;  $x_i$  为纵向的参考单元强度;  $y_i$  为横向的参考单元强度。对于纵向和横向的参考滑窗长度和保护滑窗长度可以分别进行选择,以更适配数据特点。

SO-CFAR 的背景功率水平为:

$$Z_1 = \min\left(\frac{1}{n_R} \sum_{i=1}^{n_R} x_i, \frac{1}{n_{Ri=n_R+1}} \sum_{i=1}^{2n_R} x_i\right) \quad (8)$$

GO-CFAR 的背景功率水平为:

$$Z_2 = \max\left(\frac{1}{n_C} \sum_{i=1}^{n_C} y_i, \frac{1}{n_{Ci=n_C+1}} \sum_{i=1}^{2n_C} y_i\right) \quad (9)$$

假设背景杂波服从指数分布,则可以得到 SO-CFAR 的虚警概率  $P_{fa,SO}$  和标称因子  $\alpha_1$  关系式为:

$$P_{fa,SO} = 2 \sum_{i=0}^{n_R-1} \binom{n_R+i-1}{i} (2+\alpha_1)^{-(n_R+i)} \quad (10)$$

GO-CFAR 的虚警概率  $P_{fa,GO}$  和标称因子  $\alpha_2$  关系式为:

$$P_{fa,GO} = 2(1+\alpha_2)^{-n_C} - 2 \sum_{i=0}^{n_C-1} \binom{n_C+i-1}{i} (2+\alpha_2)^{-(n_C+i)} \quad (11)$$

当已知预设虚警概率  $P_{fa}$  以及参考单元个数  $n_R$  和  $n_C$  的时候,可以通过简便计算即得到每个检测单元 (cell under test, CUT) 相对的自适应门限  $T$ ,且保证实现恒虚警检测,算法最终根据式 (12) 判定为:

$$S_{CUT} \underset{H_0}{\overset{H_1}{\geq}} \alpha_1 \cdot Z_1 \& \alpha_2 \cdot Z_2 \quad (12)$$

式中:  $S_{CUT}$  是检测单元强度;  $H_1$  表示检测到目标;  $H_0$  表示检测单元只包含背景杂波。

若多波束数据是一个  $A \in \mathbf{R}^{M \times N}$  的矩阵,  $M$  为波束数,  $N$  为单帧数据采样点数,对矩阵  $A$  进行逐点检测,并构造检测矩阵  $D \in \mathbf{R}^{M \times N}$ :

$$D_{ij} = \begin{cases} 1, & A_{ij} \text{ 检测为 } H_1 \\ 0, & A_{ij} \text{ 检测为 } H_0 \end{cases} \quad (13)$$

式中:  $A_{ij}$  是矩阵  $A$  中第  $i$  行第  $j$  列的元素;  $D_{ij}$  为矩阵  $D$  中第  $i$  行第  $j$  列的元素。

最后将数据矩阵  $A$  和检测矩阵  $D$  通过哈达玛积,获得检测输出结果  $F$  为:

$$F = A \odot D \quad (14)$$

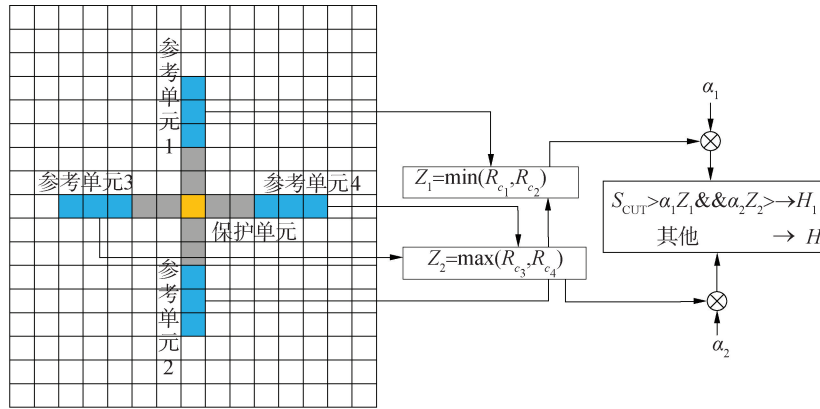


图 2 2D-DSI-CFAR 检测流程

Fig. 2 Flow of 2D-DSI-CFAR detection

2.1.2 时空联合恒虚警检测技术

由于尾流的缓慢时变,尺度连续的特点,在短时间内可以认为舰船尾流具有稳定结构。提出 STJ-CFAR 检测算法,检测流程如图 3 所示。在 2D-DSI-CFAR 的基础上对检测单元加上检测样本窗,在检测单元周围添加矩形窗,检测统计量计算公式为:

$$S_k = \left( \sum_{i=1}^{n_D} f(x_i) x_i \right) / \left( \sum_{i=1}^{n_D} f(x_i) \right) \quad (15)$$

式中:  $S_k$  表示第  $k$  帧的检测统计量;  $x_i$  是检测样本窗中检测样本单元的强度;  $n_D$  为检测样本窗长度;  $f(x_i)$  为背景杂波的概率密度函数,需要通过对背景杂波强度进行概率分布拟合获得。

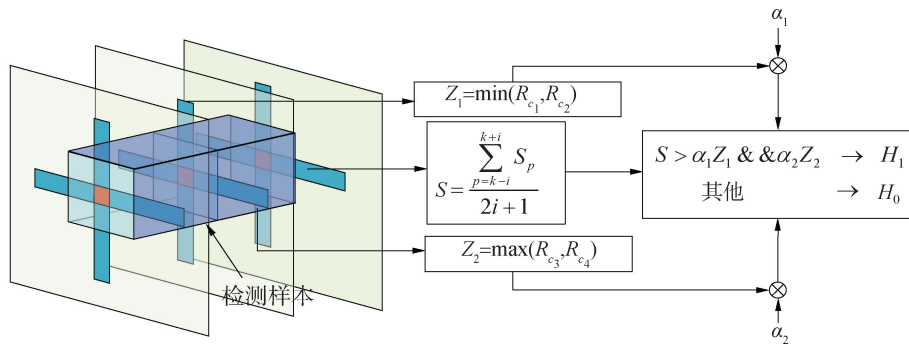


图 3 STJ-CFAR 检测流程

Fig. 3 Flow of STJ-CFAR detection

由于在多波束声图中的杂波会出现幅值较大导致虚警检测的情况,而尾流为大尺度目标,在较大范围内的幅值均较大,因此加上检测样本窗并不会影响对尾流的检测,反而因为尾流体积连续的特点,当尾流中的某处幅值较小时,也不会产生漏检,还可以减小杂波导致的虚警检测。但是若直接对检测样本窗内的检测单元取平均,某些幅值较大的杂波依然使检测统计量保持在一个较高数值,会影响对尾流的检测。因此通过背景杂波的概率密度函数  $f(x_i)$  对其进行加权处理,可以使较小的权值作用于较高幅度的杂波,从而起到抑制杂波的作用。

再进一步计算前后帧声呐图像中的同一位置的检测统计量  $S_{k+i}$ ,最后的检测统计量  $S$  为:

$$S = \left( \sum_{p=k-i}^{k+i} S_p \right) / (2i + 1) \quad (16)$$

由于可以认为尾流在短时间内的具有稳定结构,则在短时间内的不同位置的尾流回波信号强度

也基本一致。可以将式(16)的处理理解为对尾流出现概率较大的位置加上 1 个较大的权值,而对尾流出现概率较小的位置加上 1 个较小的权值。

2.2 交并检测

受计算机视觉中使用的交并比(intersection over union, IOU)的启发,利用多帧检测结果,将经过交并检测的第  $k$  帧的检测矩阵  $\tilde{D}^{(k)}$  表示为:

$$\tilde{D}^{(k)} = D_U \cap D^{(k)} \cup D_I \quad (17)$$

式中:  $D^{(k)}$  为第  $k$  帧的检测矩阵;  $D_U$  和  $D_I$  分别表示为:

$$\begin{cases} D_U = D^{(k-p)} \cup D^{(k-p+1)} \dots D^{(k-1)} \cup \\ D^{(k+1)} \dots D^{(k+p-1)} \cup D^{(k+p)} \\ D_I = D^{(k-p)} \cap D^{(k-p+1)} \dots D^{(k-1)} \cap \\ D^{(k+1)} \dots D^{(k+p-1)} \cap D^{(k+p)} \end{cases} \quad (18)$$

式中  $p$  的选择需要结合实际采集数据时的帧率决定。使用多帧检测信息进行交并检测的方法,利用

了尾流气泡的慢时变和背景杂波随机的特点。通过对  $D_U$  与  $D^{(k)}$  取交集,获得当前帧与前后帧相同的检测点,且能去除部分杂波导致的虚警检测,由于当前帧声图中的尾流的位置与前后帧声图中的尾流的位置可以认为基本不变,因此并不影响检测率。再对  $D_I$  求并集,由于背景杂波的随机性, $D_I$  已经去除大部分虚警检测,且前后帧均检测到的尾流位置,可以认为此处有尾流存在,因此加上这些检测点之后,可以降低第  $k$  帧尾流检测的漏检概率。

### 3 检测性能仿真分析

首先对背景杂波的概率分布类型进行讨论。一般认为声呐图像的背景更符合 K 分布,但由于 K 分布本身计算的复杂性,在实际中的应用较为困难<sup>[23]</sup>。因此使用对数正态分布、瑞利分布、指数分布和伽马分布对试验获得的多波束声呐数据中的背景杂波进行拟合并比较。

从图 4 中可以看出对数正态分布和瑞利分布的概率密度函数拟合与试验数据相差较大;指数分布和伽马分布的概率密度函数拟合与试验数据拥有更好的拟合度。为了衡量不同概率分布之间的差异,使用 kullback-Leibler (KL) 散度和 Kolmogorov-Smirnov (KS) 检验对上述 4 种概率分布进行计算。KL 散度公式为:

$$K_L(p(x) || q(x)) = \int p(x) \lg \frac{p(x)}{q(x)} dx \quad (19)$$

式中: $p(x)$  为试验数据的概率密度函数; $q(x)$  为拟合的概率密度函数。KL 散度越小,说明拟合的概率密度函数越接近试验数据的概率密度函数,拟合度更好,反之说明拟合度较差。

KS 检验表达式为:

$$D_{KS} = \sup_x |F_n(x) - F(x)| \quad (20)$$

式中: $F_n(x)$  为试验数据的经验分布函数; $F(x)$  为指定分布的理论经验分布函数。

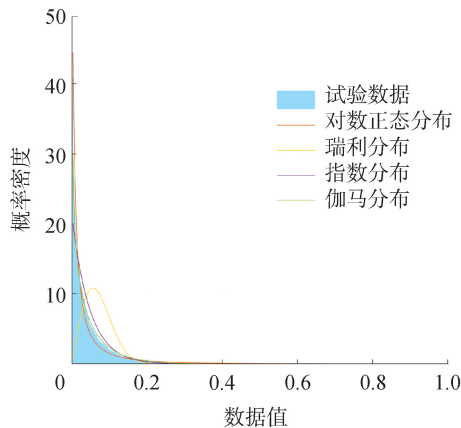


图 4 试验数据的概率密度函数拟合

Fig. 4 Probability density function fitting of experimental data

表 1 分布拟合误差评价分析

Table 1 The evaluation and analysis of distribution fitting error

概率分布	$D_{KS}$ 值	$K_L$ 值
对数正态分布	0.071 0	0.055 6
瑞利分布	0.405 7	0.710 5
指数分布	0.089 6	-0.020 2
伽马分布	0.018 3	0.018 0

通过表 1 可以看出, $K_L$  散度验证背景杂波分布的结果是指数分布拟合程度最高;而使用 KS 检验验证背景杂波分布的结果则显示伽马分布的拟合程度最高。但是由于指数分布其具有参数求解简单,计算效率高的优势,且在文献[24]中对于声呐图像背景杂波分布也假设指数分布,选用指数分布对背景杂波进行建模是合理选择。

由于尾流气泡形成机理较为复杂,将实测数据中的尾流人工筛选出来,并对其加入指数分布噪声,进行 100 次蒙特卡罗仿真,仿真中设置虚警概率  $P_{fa} = 0.001$ , 获得检测概率随信噪比 (signal to noise rate, SNR) 的变化,结果如图 5 所示。此处对检测概率  $P_d$  和虚警概率  $P_{fa}$  进行定义为:

$$P_d = N_d / N_t \quad (21)$$

$$P_{fa} = N_{fa} / (N_a - N_t) \quad (22)$$

式中: $N_d$  为实际是尾流且判定为尾流的像素数量; $N_t$  为总的实际尾流的像素数量; $N_a$  为声呐图像的总像素数。

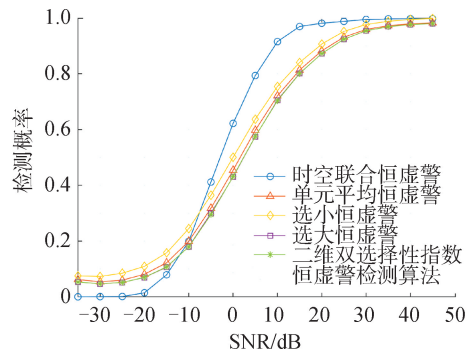


图 5 检测性能曲线

Fig. 5 Detection performance curve

由图 5 可以发现提出的检测算法在 SNR > -5 dB 时,检测概率大于其他几种经典算法。一般认为尾流存在是指尾流声散射高于背景噪声的情况,即 SNR > 0 dB。针对 SNR < 0 dB 的情况,提出的检测算法明显拥有更高的检测概率。SNR < -5 dB 时,STJ-CFAR 的检测性能较差,这是因为在尾流目标处通过式(15)、(16)获得的检测统计量会导致其趋向于尾流目标的平均强度,低信噪比时,由于尾流目标的平均强度小于背景噪声的平均强度,STJ-

CFAR 的检测概率会较低。而其他几种 CFAR 检测算法均使用单个检测单元作为检测统计量,低信噪比时,尾流目标中存在的强度较大的像素点依然能够被检测。

### 4 湖试试验

为了验证提出的检测算法对舰船尾流回波信号检测性能的可靠性,在湖上使用多波束声呐进行舰船尾流的检测试验。试验船只如图 6 所示。试验船舶吨位 117 t,测量了 10 kn 航速下产生的尾流。



图 6 试验船只  
Fig. 6 The vessel

图 6 中试验船产生的舰船尾流经过波束形成后得到的声呐图像如图 7 所示,其中框标注的即为尾流。

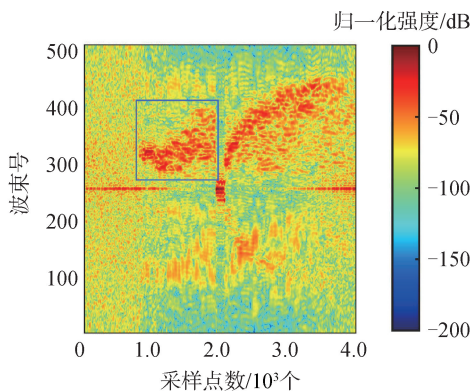
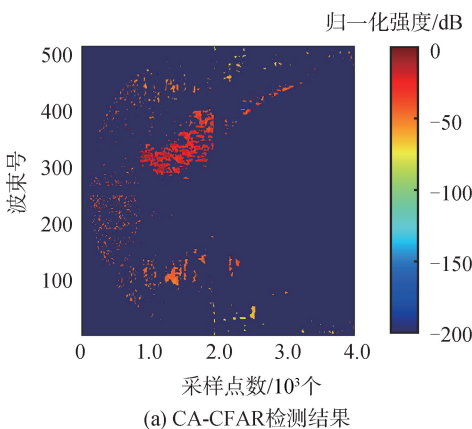
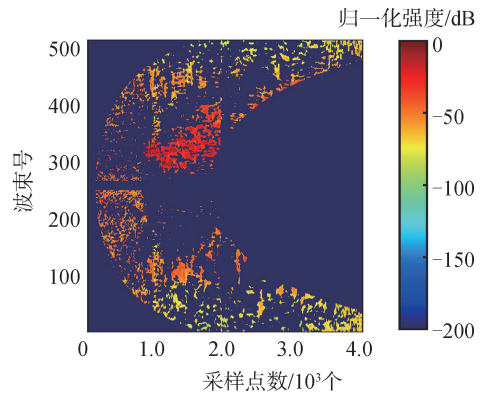


图 7 试验船尾流声呐图像  
Fig. 7 Test vessel wake sonar image

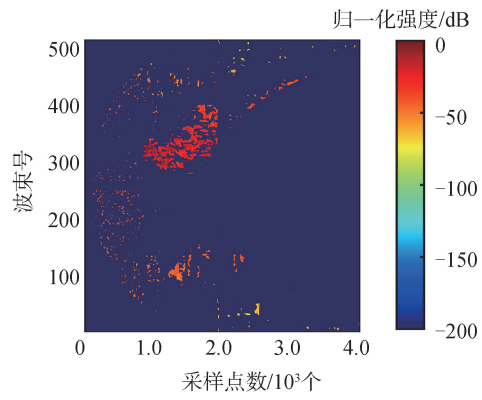
对图 7 进行尾流检测,对比不同方法的检测性能,如图 8 所示。



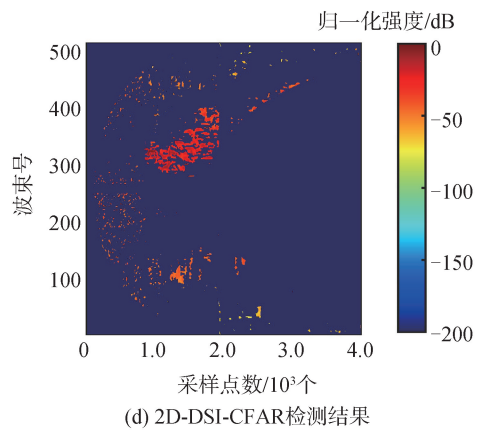
(a) CA-CFAR检测结果



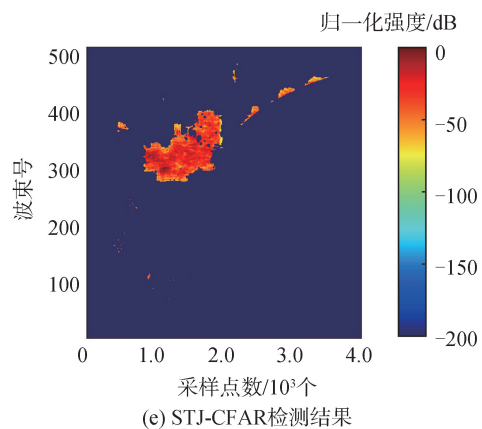
(b) SO-CFAR检测结果



(c) GO-CFAR检测结果



(d) 2D-DSI-CFAR检测结果



(e) STJ-CFAR检测结果

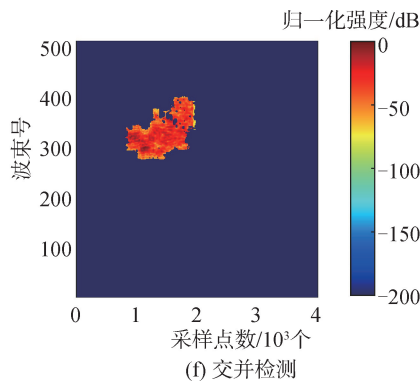


图 8 不同检测算法处理结果对比

Fig. 8 Comparison of results of different detection algorithms

由于 SO-CFAR 针对多目标的分辨能力更强,对比 CA-CFAR 和 GO-CFAR 对与尾流目标的检测概率更高,但同样导致了门限较低,虚警概率提升的问题;GO-CFAR 对杂波边缘有更好的虚警概率控制能力,相较于 CA-CFAR 和 SO-CFAR 有更小的虚警概率,但也导致了门限过高,对于尾流目标的检测概率的下降。本文提出的尾流检测算法结果如图 8(e) 所示,对舰船尾流进行恒虚警检测后的结果做交并检测,此时获得的尾流整体形态更加完整,可以取得更高的检测概率,对于尾流整体形态的检测性能具有提升。

表 2 将图 8 所示的结果定量分析。通过表 2 可以看出,本文提出的 STJ-CFAR 算法的虚警概率为 0.014 9,相较于其他检测算法的虚警概率更低,检测概率为 0.912 0,相较其他检测算法,检测概率具有明显提升。在使用 STJ-CFAR 后,进行交并检测,虚警概率降低为 0.003 8。

表 2 不同检测算法的检测性能比较

Table 2 Comparison of detection performance of different detection algorithms

检测算法	检测概率	虚警概率
CA-CFAR	0.463 9	0.055 1
SO-CFAR	0.565 7	0.240 4
GO-CFAR	0.430 1	0.040 8
2D-DSI-CFAR	0.430 1	0.040 8
STJ-CFAR	0.912 0	0.014 9
交并检测	0.912 0	0.003 8

通过数据比较可以看出,本文提出的时空联合尾流回波信号检测算法,可以有效增加对尾流检测的检测概率并降低虚警概率。

采用本文提出的方法对空间的一段尾流回波进行检测处理,并进行三维可视化显示,如图 9 所示。可以看出较为完整的三维尾流分布形态,对后续开展尾流参数估计提供了有效的检测结果。

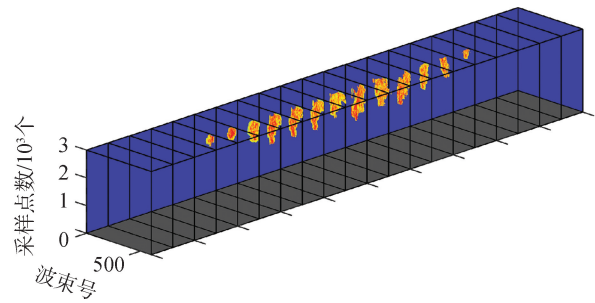


图 9 不同帧 STJ-CFAR 检测结果

Fig. 9 STJ-CFAR detection results for different frames

## 5 结论

1) 本文提出的一种时空联合尾流回波信号检测算法,可以针对舰船尾流空间尺度上连续、时间尺度上缓慢时变的特点,实现舰船尾流目标检测。

2) 针对尾流在多波束数据中,纵向的干扰主要是由于尾流是由多散射点构成的大尺度目标导致的多目标遮蔽;横向干扰主要是杂波边缘的特点和时空域上连续的特点,提出 STJ-CFAR 检测算法,可以有效提升检测概率。

3) 基于舰船尾流慢时变的特点,提出交并检测,可以利用尾流缓慢时变的特点,可以有效降低尾流检测的虚警概率。

4) 本文方法能有效提高检测性能,但同时带来了更大的计算量。未来将对加速处理速度进行优化,并研究检测性能和实时运算间的折衷问题,以保证算法的可实施性。在复杂海况下背景干扰更多,由于湍流和浑浊水体的影响,尾流回波信号的信噪比更低。后续将针对实际海况下低信噪比的问题,对算法进行迭代。

## 参考文献:

- [1] 宗思光, 张鑫, 杨劭鹏, 等. 舰船尾流气泡目标激光后向散射特性研究[J]. 中国光学, 2023, 16(6): 1333-1342. ZONG Siguang, ZHANG Xin, YANG Shaopeng, et al. Laser backscattering characteristics of ship wake bubble target [J]. Chinese optics, 2023, 16(6): 1333-1342.
- [2] 孙春生, 张晓晖, 朱东华. 舰船尾流的前向光散射对光束衰减测量的影响[J]. 激光与红外, 2008, 38(3): 200-203. SUN Chunsheng, ZHANG Xiaohui, ZHU Donghua. Influence of forward light scattered by ship wakes on the measurement of beam attenuation [J]. Laser & infrared, 2008, 38(3): 200-203.
- [3] 顾建农, 郑学龄, 杨立. 舰船热尾流温度测量系统的研制与应用[J]. 仪表技术, 2000(1): 16-17, 23. GU Jiannong, ZHENG Xueling, YANG Li. Developing and applying for the measuring system of ships thermal wake [J]. Instrumentation technology, 2000(1): 16-17, 23.
- [4] 黄成功, 罗深荣, 吴文福. 基于检测潜艇尾流引起的电磁场特征的磁力仪设计方案[C]//第二十一屆海洋测

- 绘综合性学术研讨会. 成都, 2009: 38-40.
- [5] TREVORROW M V, VAGLE S, FARMER D M. Acoustical measurements of microbubbles within ship wakes[J]. The journal of the acoustical society of America, 1994, 95(4): 1922-1930.
- [6] WEBER T C, LYONS A P, BRADLEY D L. An estimate of the gas transfer rate from oceanic bubbles derived from multibeam sonar observations of a ship wake[J]. Journal of geophysical research (oceans), 2005, 110(C4): C04005.
- [7] 石晟玮, 蒋兴舟, 石敏, 等. 舰船尾流气泡运动特性研究[J]. 武汉理工大学学报(交通科学与工程版), 2007, 31(5): 764-767.  
SHI Shengwei, JIANG Xingzhou, SHI Min, et al. Movement characteristic of bubbles in ship wakes[J]. Journal of Wuhan University of Technology (transportation science & engineering), 2007, 31(5): 764-767.
- [8] 杜敬林, 马忠成, 陈建辉, 等. 舰船尾流声散射和几何特征试验[J]. 哈尔滨工程大学学报, 2010, 31(7): 909-914.  
DU Jinglin, MA Zhongcheng, CHEN Jianhui, et al. Sound scattering and geometric characteristics of ship wakes[J]. Journal of Harbin Engineering University, 2010, 31(7): 909-914.
- [9] 马青山, 陈亚林, 郝保安, 等. 舰船远尾流场气泡特性研究[J]. 鱼雷技术, 2014, 22(4): 311-315.  
MA Qingshan, CHEN Yalin, HAO Baoan, et al. Study on bubble characteristics of ship far wake field[J]. Torpedo technology, 2014, 22(4): 311-315.
- [10] 李珊. 舰船尾流多波束声纳成像技术研究[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工程大学, 2015:13-19.  
LI Shan. Research on multi-beam sonar imaging technology of ship wake[D]. Harbin: Harbin Engineering University, 2015:13-19.
- [11] MEDWIN H. In situ acoustic measurements of bubble populations in coastal ocean waters[J]. Journal of geophysical research, 1970, 75(3): 599-611.
- [12] 张群, 王英民. 舰船尾流中气泡的主动声反射/散射模型[J]. 电声技术, 2011, 35(8): 48-50.  
ZHANG Qun, WANG Yingmin. Active acoustic reflection/scattering model of the bubble in the ship wake[J]. Audio engineering, 2011, 35(8): 48-50.
- [13] 高可心, 金良安, 苑志江, 等. 舰船气泡尾流场气泡数密度衰减模型研究[J]. 中国测试, 2019, 45(8): 61-66.  
GAO Kexin, JIN Liang'an, YUAN Zhijiang, et al. Research on bubble number density attenuation model of ship's bubble wake field[J]. China measurement & test, 2019, 45(8): 61-66.
- [14] 范雨喆. 舰船气泡尾流的相干声场特性及其多波束声纳探测研究[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工程大学, 2022.  
FAN Yuzhe. Study on coherent sound field characteristics of ship bubble wake and its multi-beam sonar detection[D]. Harbin: Harbin Engineering University, 2022.
- [15] ZEBIRI K, MEZACHE A. Radar CFAR detection for multiple-targets situations for Weibull and log-normal distributed clutter[J]. Signal, image and video processing, 2021, 15(8): 1671-1678.
- [16] ABU A, DIAMANT R. CFAR detection algorithm for objects in sonar images[J]. IET radar, sonar & navigation, 2020, 14(11): 1757-1766.
- [17] WEBER T C. A CFAR detection approach for identifying gas bubble seeps with multibeam echo sounders[J]. IEEE journal of oceanic engineering, 46(4): 1346-1355.
- [18] WANG J, LI H, MA J, et al. Fast double selectivity Index-CFAR detection method for the multi-beam echo sounder[J]. Marine geodesy, 43(1), 44-62.
- [19] 赵威. 基于鱼雷自导的舰船尾流回波模型建立方法[J]. 舰船电子工程, 2013, 33(4): 81-83.  
ZHAO Wei. Acoustic model establishment of ship wake echo waveform for self-guided torpedo[J]. Ship electronic engineering, 2013, 33(4): 81-83.
- [20] 杨长生, 苟文博, 梁红. 一种舰船声尾流回波信号建模方法[J]. 水下无人系统学报, 2023, 31(5): 703-709.  
YANG Changsheng, GOU Wenbo, LIANG Hong. A modeling method of ship acoustic wake echo signal[J]. Journal of unmanned undersea systems, 2023, 31(5): 703-709.
- [21] 张庆国, 刘竹青, 黄其培, 等. 舰船尾流气泡声学测试系统研究[J]. 声学技术, 39(6), 660-668.  
ZHANG Qingguo, LIU Zhuqing, HUANG Qipei, et al. Research on acoustic testing system for ship tail flow bubbles[J]. Acoustic technology, 39(6), 660-668.
- [22] 郝程鹏, 侯朝焕, 王维建. 基于改进的 VI-CFAR 算法的分布式 CFAR 检测[J]. 系统仿真学报, 2007, 19(4): 830-832, 908.  
HAO Chengpeng, HOU Chaohuan, WANG Weijian. Distributed CFAR detection based on modified VI-CFAR algorithm[J]. Journal of system simulation, 2007, 19(4): 830-832, 908.
- [23] MAUSSANG F, CHANUSSOT J, HETET A, et al. Mean-standard deviation representation of sonar images for echo detection: application to SAS images[J]. IEEE journal of oceanic engineering, 2007, 32(4): 956-970.
- [24] 王家齐. 基于无人平台的多波束测深声纳系统关键技术研究[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工程大学, 2022:1-9.  
WANG Jiaqi. Research on key technologies of multi beam sounding sonar system based on unmanned platform[D]. Harbin: Harbin Engineering University, 2022:1-9.

### 本文引用格式:

王泽欣, 郝程鹏, 刘瑾妍, 等. 基于时空域恒虚警处理的舰船尾流检测技术[J]. 哈尔滨工程大学学报, 2025, 46(8): 1593-1600.  
WANG Zexin, HAO Chengpeng, LIU Jinyan, et al. Ship wake detection technique based on constant false alarm processing in spatiotemporal domain[J]. Journal of Harbin Engineering University, 2025, 46(8): 1593-1600.