

基于改进横向中值滤波的南极磷虾声学数据去噪技术研究

杨浩东^{1*}, 郑汉丰^{2#}, 王永进², 伍玉梅², 崔学森², 戴阳^{2#}

¹大连海洋大学, 航海与船舶工程学院, 辽宁 大连

²中国水产科学研究院东海水产研究所, 农业农村部渔业遥感重点实验室, 上海

收稿日期: 2026年3月24日; 录用日期: 2026年5月21日; 发布日期: 2026年5月29日

摘要

南极磷虾作为全球渔业中资源量最大的生物, 关系着极地渔业的捕捞效率和经济效益。南极磷虾的捕捞正逐步成为极地渔业发展中的热点问题。目前南极磷虾资源量的科学评估高度依赖于EK80获取的声学数据。然而在极地环境中, 声波传播面临几何扩散衰减与海水吸收损失。若直接对未经校准的原始回波信号进行定量分析, 深水区的微弱生物量信号极易被背景噪声掩盖, 导致目标 S_v 被严重低估, 进而引发资源量积分的量级偏差。针对上述衰减机理, 本文提出基于现场水文特征的动态声学补偿与校准框架以及改进横向中值滤波与阈值保护去噪算法。定量分析表明, 该动态校准模型有效消除了由于使用默认常数参数所引入的系统性偏差。相比于未经补偿的原始数据, 本方法在200米典型磷虾栖息水深处减少了约4.8 dB的吸收衰减误差; 在大于300米的深水区可排除20~30 dB的累积传输损失, 使全局有效 S_v 值平均提升5~15 dB。

关键词

南极磷虾, 去噪算法, 横向中值滤波, 声学探测, 阈值保护, 极地海域

Research on Denoising Technology for Antarctic Krill Acoustic Data Based on Improved Lateral Median Filtering

Haodong Yang^{1*}, Hanfeng Zheng^{2#}, Yongjin Wang², Yumei Wu², Xuesen Cui², Yang Dai^{2#}

¹College of Navigation and Naval Architecture, Dalian Ocean University, Dalian Liaoning

²Key Laboratory of Fisheries Remote Sensing, Ministry of Agriculture and Rural Affairs, East China Sea Fisheries Research Institute, Chinese Academy of Fishery Sciences, Shanghai

*第一作者。

#通讯作者。

文章引用: 杨浩东, 郑汉丰, 王永进, 伍玉梅, 崔学森, 戴阳. 基于改进横向中值滤波的南极磷虾声学数据去噪技术研究[J]. 应用物理, 2026, 16(5): 578-591. DOI: 10.12677/app.2026.165053

Abstract

Antarctic krill, as the largest biological fishery resource globally, is crucial to the harvesting efficiency and economic viability of polar fisheries. The harvesting of Antarctic krill is increasingly becoming a key issue in the development of polar fisheries. Currently, the scientific assessment of Antarctic krill biomass relies heavily on acoustic data acquired by Simrad EK80 systems. However, in polar environments, acoustic propagation suffers from significant geometric spreading loss and seawater absorption. Quantitative analysis performed directly on uncalibrated raw echo signals often leads to weak biological signals in deep water being masked by background noise, resulting in a severe underestimation of the target S_v and subsequent magnitude deviations in biomass integration. To address these attenuation mechanisms, this paper proposes a dynamic acoustic compensation and calibration framework based on *on-site* hydrological characteristics, integrated with an improved lateral median filtering and threshold protection denoising algorithm. Quantitative analysis demonstrates that the dynamic calibration model effectively eliminates systematic biases introduced by default constant parameters. Compared to uncompensated raw data, this method reduces absorption attenuation error by approximately 4.8 dB at a typical krill habitat depth of 200 m. In deep-water regions exceeding 300 m, it eliminates 20~30 dB of cumulative transmission loss, leading to an average increase of 5~15 dB in global effective S_v values.

Keywords

Antarctic Krill, Denoising Algorithm, Lateral Median Filtering, Acoustic Detection, Threshold Protection, Polar Water

Copyright © 2026 by author(s) and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY 4.0).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

1. 引言

南极磷虾富含蛋白质及多种人体必需的矿物质元素以及活性酶、虾青素等多种活性成分，具有极高的经济价值，已成为极地地区重要的渔业资源[1]。高效、精准地对南极磷虾进行捕捞对极地渔业资源开发具有重要意义[2]-[4]。目前声学探测已成为最常用且高效的海洋生物监测手段，依托声学设备可通过对声学图像进行解析实现对南极磷虾的种群分布进行广域的实时观测[5] [6]，通过分析声呐回声信号的强度、频率响应等特征，可推断磷虾群体的密度与垂直空间分布以获得最佳捕捞深度，但此类数据通常受到干扰，从中精准提取关键信息的技术难度较高[7]。

本文针对“深蓝”号远洋渔船在实际作业中采集的数据，首先依托开源框架 Echopype 实现了从专有二进制格式向标准化 NetCDF 格式的高效转换，确保了数据处理的透明度与可追溯性。在此基础上，本文引入现场温盐深(Conductivity, Temperature, Depth, CTD)实测数据，并基于 Francois-Garrison 公式构建了动态声学补偿与校准模型，减少由于使用默认声速参数在深水区引入的 20~30 dB 累积传输损失误差。针对极地作业特有的瞬态脉冲与背景干扰，本文独创性地提出了改进横向中值滤波与阈值保护算法，通过构建 3×9 非对称二维滑动窗口，在强效抑制横向条带噪声的同时，精准保留了磷虾集群的垂直边界梯度。实验定量分析证实，该算法将原始回声数据的信噪比由 8.2 dB 提升至 26.7 dB，使平均 S_v 值增益达到 5~15 dB。

2. 声呐数据预处理

2.1. 声学数据预处理意义

在复杂的海洋声学环境中，声呐系统不可避免地受到多源背景噪声的干扰，这类杂波往往会掩盖或扭曲目标回声的原始特征，给鱼类检测或水下地形测绘等识别任务带来巨大挑战。通过应用针对性的去噪算法，不仅能有效提升信号的信噪比(Signal-to-Noise Ratio, SNR)，还能使目标的声学表征更具辨识度，从而夯实识别准确率的基础。作为后续定量分析的源头，声学数据的质量直接决定了科研产出的可信度。去噪预处理通过剔除冗余信号与系统误差，确保了数据的高精度与逻辑一致性。反之，若预处理环节缺失，分析结果将面临严重的虚警(噪声误判)与漏检(信号掩盖)风险。综上所述，去噪技术的迭代不仅优化了声学成像质量，更是保障声呐探测系统在实际应用中稳健性与可靠性的关键支柱。

2.2. 声呐数据来源

本文采用的 EK80 科学回声仪数据均源于“深蓝”号南极磷虾捕捞船，工作频率为 38 kHz。在实际作业过程中采集的现场资料，该研究结论对南极磷虾智能化捕捞作业具有一定的指导价值。数据采集时段为 2023 年 1 月 23 日至 2023 年 6 月 16 日，采集区域位于南极磷虾 48 渔区。该系统探测深度范围为 0~1100 m，不仅涵盖了南极磷虾的典型垂直分布，还可捕获部分海底地形信息；探测数据除磷虾回波信号外，还包含海底深度数据，为后续的海底目标识别与深度估计算法研究提供了坚实支撑。本文采用的 EK80 数据单 ping 声学回波由 75,765 个采样点构成，深度分辨率达 1.5×10^{-2} m，充分满足南极磷虾群垂直分布深度与厚度的识别精度要求。此外，该 EK80 设备集成 GPS 模块，可实时记录地理位置与航行轨迹，便于后续与渔场分布等实现空间关联分析[8]。除实验中运用的回波强度(dB)数据外，EK80 还支持回波强度与体积后向散射强度(S_v)及目标强度(TS)之间的转换，后续可根据这些可便于对水下磷虾群的形态、密度等特征进行深入量化分析[9]。

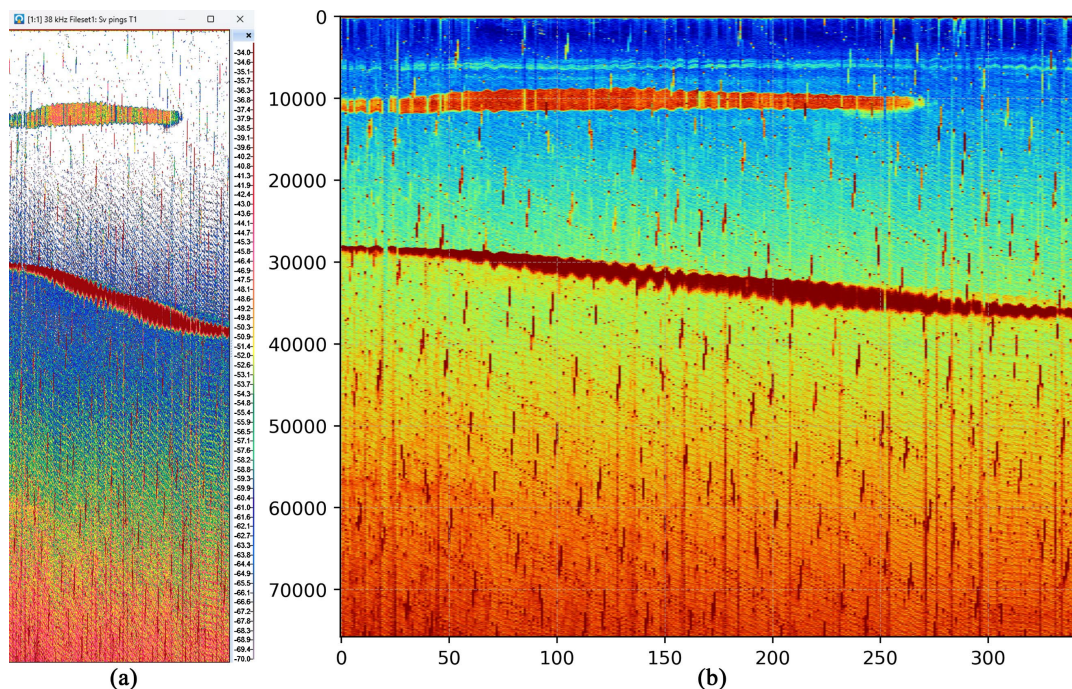
2.3. 声呐数据解析

在南极磷虾声学数据处理中，本研究优先采用开源工具包 Echopype，其作为专为海洋声学设计的 Python 开源框架，已在水声信号标准化处理领域展现出突出效能。它能够将 Simrad EK80、Simrad EK60 等科学回声仪产生的专有二进制.raw 格式文件高效转换为国际通用的 NetCDF (.nc)格式文件，nc 格式文件完整保留了全部原始元数据。

相较于 Echoview 等商业软件，Echopype 在处理流程的透明度与实验可扩展性方面具有显著优势。Echoview 采用封闭的专有数据格式和图形化操作界面，难以支持大规模自动化批处理，且处理步骤难以完整记录和复现，难以满足现代科研对方法可验证与结果可追溯的基本需求。而 Echopype 以 NetCDF (.nc)格式为核心存储规范，兼容 xarray 和 Dask 等高效科学计算库，可实现声学数据的并行加载、动态子集提取与分布式计算，有效降低内存消耗并提升处理效率[10]。

在实际应用中，Echopype 展现出良好的跨平台适应性与模块化设计。其核心功能包括将 EK60、EK80、ES80 及 Kongsberg EA640 等设备的 raw 文件转换为 NetCDF 或 Zarr 格式，支持 Dask 动态合并连续采集数据集，并通过标准化数据模型解决不同厂商格式不兼容的问题。转换后的数据可直接调用 Xarray、Pandas 或 SciPy 等库，实现噪声抑制、阈值分割、积分计算及可视化等操作，仅需少量代码即可生成高质量回声图。

核心格式转换、数据重构及预处理工作全部依托 Echopype 完成。但为确保解析结果的科学性和可靠性，本研究依然将 Echopype 输出的各项变量与行业标准软件 Echoview 的处理结果进行了逐项对比验证。验证结果见图 1。



注：图(a)中纵坐标为 Echoview 软件识别深度数据，图(b)中纵坐标显示为 EK80 设备的 75765 个采样点的计数方式，对应实际探测深度的 1100 m。

Figure 1. Comparison chart of consistency of analytical results between Echoview and Echopype: (a) Analysis result of Echoview; (b) Analysis result of Echopype

图 1. Echoview 与 Echopype 解析结果一致性对比图：(a) Echoview 解析结果；(b) Echopype 解析结果

验证结果显示，两者在回波强度分布、空间结构及关键统计特征上高度一致，充分证实了 Echopype 解析流程的准确性与可靠性。

3. 声学数据补偿与校准

在南极磷虾资源声学评估中，原始回声强度数据(Raw Power 或未校准的 S_v)须经过补偿与校准处理，才能转化为可用于定量分析的体积后向散射强度(S_v)和目标强度(TS)。补偿与校准是声学数据由定性图像转变为定量生物量图的核心环节，直接决定了磷虾集群密度估算、垂直分布特征提取以及假底剔除的准确性[11]-[13]。其生物量估算误差过大将直接影响 CCAMLR 渔业配额制定和生态保护政策的科学性[14]。本文采用的深蓝号 EK80 的 38 kHz 数据，在南极极端环境(强风浪、海冰、低温、高盐度)下，声波传播损失更为复杂，未经补偿的原始数据中传输损失正负误差可达 20~30 dB，导致低密度磷虾层($S_v < -85$ dB)被噪声淹没或生物量高估[15]。因此，系统开展声学数据补偿与校准研究，不仅是本章预处理流程的必要步骤，更是连接数据解析、去噪与后续目标识别的桥梁，具有理论意义和工程应用价值。

声学信号在海水中传播时，会同时受到几何扩散损失(Geometric Spreading Loss)和吸收损失(Absorption Loss)的影响，二者共同构成双向传输损失(Two-way Transmission Loss, TL)。根据经典声学方程(3-1)，体积后向散射强度 S_v 的计算公式为：

$$S_v = EL - SL + 2TL + 10 \log(\psi r^2) + 10 \log \frac{c\tau}{2} - 2\alpha r \quad (3-1)$$

其中， EL 为接收电平(dB)， SL 为源级， ψ 为等效束宽因子， r 为目标距离(m)， c 为声速(m/s)， τ 为脉冲宽度(s)， α 为吸收系数(dB/m)。式中 $2TL$ 项即为补偿的核心：

$$2TL = 20 \log r + 2\alpha r \quad (3-2)$$

$20 \log r$ 项用于补偿球面扩散损失, $2\alpha r$ 用于项补偿吸收损失。南极海域海水温度 $-1.8^{\circ}\text{C}\sim 2^{\circ}\text{C}$ 、盐度 $34.0\sim 34.8$ psu、深度 $0\sim 1100$ m时, 吸收系数 α 受频率、温度、盐度、pH和硼酸/硫酸镁弛豫影响显著[16]。本文采用 Francois-Garrison 经验公式计算 α [17]:

$$\alpha = \frac{A_1 P_1 f_1 f^2}{f^2 + f_1^2} + \frac{A_2 P_2 f_2 f^2}{f^2 + f_2^2} + A_3 P_3 f^2 \quad (3-3)$$

其中, f 为频率(kHz), A_1 、 A_2 、 A_3 为弛豫系数, P_1 、 P_2 、 P_3 为压力因子, f_1 、 f_2 为弛豫频率。本文 38 kHz 数据在南极表层($0\sim 200$ m)计算的 α 约为 $0.008\sim 0.012$ dB/m, 远高于温带海域[18], 若不补偿将导致 200 m 深度处信号衰减误差超过 4.8 dB, 直接影响磷虾生物量积分计算。

为补偿距离衰减, EK80 系统内置时间变化增益(Time Varied Gain, TVG)。TVG 分为两种形式[19]:

$$20 \log r + 2\alpha r \quad (3-4)$$

(用于 S_v 计算, 补偿体积散射)

$$40 \log r + 2\alpha r \quad (3-5)$$

(用于 TS 计算, 补偿点目标)

在实际应用中, 本文利用 Echopype 工具包的 `compute_Sv` 函数, 输入现场 CTD 估算的声速 c ($1450\sim 1460$ m/s), 避免了默认参数($c = 1500$ m/s)带来的 $0.5\sim 1.0$ dB 系统误差[20]。并采用 Francois-Garrison 公式计算的吸收系数, 对深蓝号船载 EK80 数据进行了补偿与校准。

在进行补偿与校准流程后, 与未经补偿的默认参数相比, 在 200 m 深度处减少约 4.8 dB 的吸收衰减误差。在水深 > 300 m 的深水区, 可降低 $20\sim 30$ dB 的累积误差。这些累计误差将导致低密度磷虾层被噪声淹没; 在进行补偿与校准后, S_v 值平均提升 $5\sim 15$ dB。

补偿校准后的 S_v 数据信噪比显著提高, 为后续自适应背景噪声减法、去噪处理以及 RG-EA-YOLOv8n-seg 实例分割提供了高保真输入, 支撑磷虾集群垂直分布深度与厚度计算的精度, 降低生物量估算偏差。

4. 南极磷虾声学图像噪声特性分析

为了构建高鲁棒性的自适应去噪算法, 须对多源噪声的物理成因、频域特性及其在声学图像上的形态学表现进行深入剖析[21]。

依据声学信号的产生机制、传播途径以及仪器自身的电子响应特性, 南极磷虾声学数据中的噪声源可系统性地划分为背景噪音、瞬态噪音、脉冲噪音以及散斑噪音[22]。这四类共同作用的噪声耦合将对南极磷虾声学数据造成极大干扰。

4.1. 背景噪声

背景噪声是所有主动式声学探测仪器均无法避免的固有干扰, 其核心来源包括换能器内部的热噪声、接收机电路的本底噪声, 以及环境水体中微小散射体产生的均匀背景混响[23]。在渔业声学探测中, 为了补偿声波在海水中传播时因球面扩散和水体吸收造成的能量衰减, 须引入时变增益函数(Time Varied Gain, TVG)函数进行物理补偿[24]。补偿函数通常表示为下式:

$$20 \log_{10} R + 2\alpha R \quad (4-1)$$

其中, R 为探测距离, α 为吸收系数。随着探测深度的增加, TVG 的补偿增益呈指数级放大, 这不可避免地导致深水区的微弱系统本底噪声被同步非线性放大。在二维声学回声图上, 背景噪声常表现为随深

度递增而逐渐变亮的均匀低强度条带。

4.2. 瞬时噪声

瞬态噪声通常由突发性的外部物理撞击或剧烈的机械振动激发，具有能量极高、持续时间较短且频带极宽的声学特征[25]。船艏与大块海冰的物理碰撞、螺旋桨在冰水混合物中的空化效应，以及恶劣海况下波浪拍击船底产生的剧烈振动，将会通过船体结构耦合至固定在船底的换能器阵面[26]。

这种高强度的机械振动转化为瞬态电信号后，在声学图像上会呈现为贯穿整个水体深度的短时强回声脉冲。其表观形态多为垂直于 ping 方向(航向)的高亮色块或粗壮的垂直条纹[27]。由于其瞬时声学强度(S_v 值)极高，瞬时峰值 S_v 可达-30 dB 以上，易被后文的深度学习算法误认为高密度的生物集群，从而导致该区域的磷虾生物量积分相对丰度出现严重的高估偏差。

4.3. 脉冲噪音

脉冲噪声的成因相对复杂，主要源于多设备电磁串扰和复杂水声环境中的多径反射[28]。现代大型南极磷虾捕捞加工船通常配备了高度密集的声学探测矩阵，包括多普勒海流剖面仪(ADCP)、多波束测深仪、网位仪以及探鱼声呐等。当这些仪器的工作频段存在重叠或谐波干扰，且系统间未实现严格的发射同步时，其他设备发射的声学脉冲会被 EK80 换能器意外接收，导致脉冲噪音形成。

此外，在冰盖下方或复杂海底地形区域，声波经过多次非规则反射后延迟到达接收机，也会形成相位错乱的脉冲信号。在声呐回声图像中，脉冲噪声表现为孤立高点或斜向虚线干扰。这些离群的噪点虽然总体能量占比不如瞬态噪声大，但其空间分布极度离散，严重破坏了图像的局部平滑性和生物集群边缘的几何连续性。

4.4. 散斑噪声

散斑噪声属于随机噪声，其本质是水声信道物理特性时空变异性的直接体现。南极海域水文条件极端复杂，存在强烈的温盐锋面、局部涌升流以及微尺度湍流等[29]。水体密度的不均匀性导致声学折射率发生随机波动；同时，海水中大量存在的浮游植物(如硅藻)、非目标微小浮游动物以及微气泡，会产生复杂的相干散射。

当这些无数微小散射体产生的子回声在换能器表面叠加时，因相位差异会导致信号强度的随机干涉，从而在声学图像上形成随机波动纹理。这种水体不均匀性导致的散斑噪声使得原本应呈现平滑过渡的磷虾集群内部出现了颗粒状的强度起伏，不仅降低了图像的视觉质量，也增加了后续基于纹理特征的深度学习目标检测模型的收敛难度[30]。

4.5. 耦合噪声

根据生物学与渔业声学的长期观测，南极磷虾典型集群的体积回声散射强度(S_v)主要集中在约为-80至-60 dB 的相对中低强度区间内。这一信号强度区间恰好与上述多源复合噪声的能量分布区间产生了严重的重叠。这种信号与噪声在强度域的深度混叠，带来了一系列的数据处理难题。

在形态学识别上，重叠噪声极易导致深度学习系统误判，将深水区的噪声条带或瞬态强脉冲误识别为假底或磷虾群，进而导致真实的声学关键数据提取失败。原始实验数据的定量统计证实了这一严峻现状：在未经严格去噪的原始观测数据中，存在混合噪声干扰无法用于深度学习的声学图像占比高达 15%。且低数据信噪比直接向后续处理模块传导误差，导致基于 YOLOv8 等先进深度神经网络的目标识别 F1 分数出现下降。因此，针对单频声学数据设计高效、高保真的去噪处理算法，是整个南极磷虾声学数据处理链条中不可或缺的前提工作。

5. 声学图像去噪处理研究

5.1. 去噪算法

5.1.1. 现有去噪算法在极地应用中的局限性

针对上述渔业声学噪声抑制的问题,国内外学者与商业软件开发商已进行了大量探索。例如,行业主流声学处理软件 Echoview 通常内置了时间变化阈值法(Time-Varied Threshold, TVT)以及经典的 7×7 中值滤波来应对背景噪声[31]。然而,TVT 算法虽然能在一定程度上压制随深度增加连续噪声,但其本质上是一种静态的全局能量阈值切除策略,对船体破冰等引发的瞬时噪声处理较为困难,无法有效抑制突发的高能干扰。并且单纯的 7×7 大窗口中值滤波虽然计算简便,但在处理具有高度垂直聚集特性的磷虾回声时,表现出过度平滑倾向,导致磷虾层的精细垂直连续性被破坏,在声呐图像中的生物集群边缘发生模糊现象。

现有主流声学去噪算法在处理极地海量数据时往往面临诸多局限。例如,传统的空域或统计学滤波算法(如自适应 Wiener 滤波)虽然能在一定程度上抑制噪声,但其局部方差的迭代计算较为复杂[32],且易导致微弱生物群的边缘特征被过度平滑,难以满足极地渔船船载系统对海量数据实时在线处理的时效性与高保真要求。此外,目前许多去噪与干扰剔除模型(如基于 ΔS_v 的多频差值分类法)高度依赖多频段数据的交叉验证与支撑[33]。然而,在极地渔业捕捞中,中小型渔船往往仅配备单频(如 38 kHz)的 EK80 系统,这使得上述依赖多频支撑的模型难以在实际生产中得到广泛推广。至于专门针对单频声学数据开发的常规噪声方法[34],虽在抑制瞬态或脉冲干扰方面效果卓著,但在面对南大洋复杂多变的强背景杂波时,若单独使用仍易出现去噪不彻底的问题。

基于综上所述,本文提出一种既能紧密结合 EK80 单频数据空间分布特点,又能兼顾计算效率与边缘保留精度的改进横向中值滤波与阈值保护算法。该算法对校准后的 S_v 矩阵采用 $(3, 9)$ 非对称窗口进行中值滤波,并设置 10 dB 残差阈值,仅替换明显噪声像素,在有效抑制脉冲干扰的同时保留磷虾垂直结构。

5.1.2. 改进横向中值滤波与阈值保护算法

本去噪算法基于本文第 3 章的系统补偿与校准处理获得的 S_v 矩阵进行处理,即使经过校准,南极磷虾声学数据中仍残留明显的瞬态脉冲噪声与散斑干扰。这些噪声主要来源于船体与海冰碰撞、螺旋桨空化以及仪器电磁串扰等,在回声图上表现为垂直贯穿水深的短时高亮条纹。若不进行针对性去噪,将对后续声学关键信息的提取、数据推导以及 RG-EA-YOLOv8n-seg 的目标识别造成严重干扰。

传统一维滑窗法因计算简单而广泛应用于去噪,但对孤立高值脉冲可能会导致噪声扩散[35]。同时,常用的均值滤波方法会不可避免地平滑磷虾集群的垂直边界,使后续目标识别中磷虾层厚度出现偏差。本文算法则采用非线性中值运算替代均值,并引入残差阈值保护机制,仅对确认为噪声的像素进行替换,从而在有效去除脉冲噪声的同时,最大限度保留磷虾集群的垂直连续性和海底回声的边界锐利度。

为此,本文在传统一维滑窗均值滤波理论上,提出了一种改进型横向中值滤波与阈值去噪算法。该算法主要包含二维中值运算和简单残差阈值判断两步,计算简洁高效,适合极地船载单频(38 kHz) EK80 数据的实时处理。去噪算法流程见图 2。

5.1.3. 二维非对称窗口构建

在 EK80 科学回声仪的走航探测过程中,声学图像的空间分辨率呈现出显著的各向异性特征,这为去噪窗口的设计提供了重要的物理依据。纵向分辨率由换能器采样间隔决定,本文采用的 38 kHz 数据深度分辨率为 1.5×10^{-2} m,能够清晰分辨磷虾集群的垂直分布结构;而横向分辨率则取决于船舶航速与脉冲发射间隔的乘积,通常在数米至十余米之间,二者存在明显的非对称性。这种空间分辨率的差异,

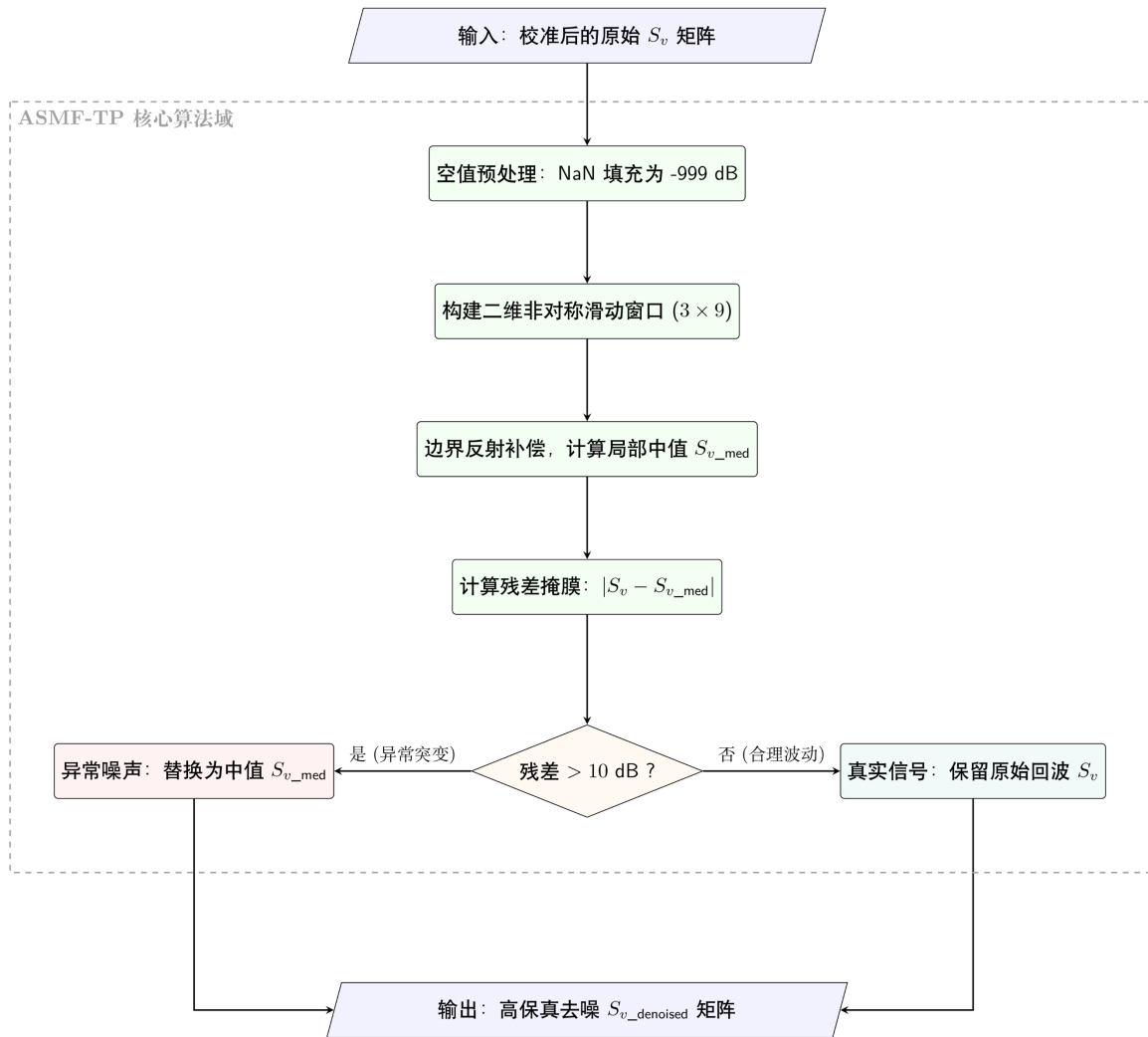


Figure 2. Denoising algorithm flowchart
图 2. 去噪算法流程图

直接反映了声学数据在垂直和水平方向上的不同物理约束：磷虾群体多表现为垂直连续的层状聚集，而船体振动、海冰碰撞及螺旋桨空化等噪声则主要沿航向形成贯穿性的条带状干扰。

传统对称方形窗口(如 7×7 或 9×9)在处理此类非对称数据时存在明显不足：若窗口过大，深度方向的平滑会破坏磷虾层的垂直梯度信息；若窗口过小，又无法有效覆盖横向噪声条带，导致去噪不彻底。针对南极磷虾声学数据的这一独特空间分布特性，本文构建了二维非对称矩形滑动窗口，旨在同时兼顾垂直结构保护与横向噪声抑制。

设经过 TVG 补偿与校准后的回声强度矩阵为

$$S_v \in R^{M \times N} \tag{5-1}$$

其中, M 为深度采样点数, N 为航向总 ping 数。对于矩阵中任意位置的中心像素 (i, j) ($1 \leq i \leq M, 1 \leq j \leq N$), 窗口 $W_{i,j}$ 表示为:

$$W_{i,j} = \left\{ S_v(i+m, j+n) \mid \begin{matrix} -1 \leq m \leq 1 \\ -4 \leq n \leq 4 \end{matrix} \right\} \tag{5-2}$$

即深度方向采用 3 像素窗口(对应约 4.5 cm 水深), ping 方向采用 9 像素窗口(对应每秒拖网航行距离)。这一非对称设计具有明确的物理意义: 深度方向仅跨 3 个采样点, 可最大限度地保留磷虾集群的垂直连续性和边界梯度, 避免低通平滑导致的层厚偏差; 而 ping 方向的 9 像素宽度则足以覆盖极地作业中常见的横向噪声条带, 实现对船体振动和瞬态脉冲的有效抑制。

5.1.4. 中值滤波与阈值保护机制

在构建二维非对称滑动窗口后, 算法的核心任务转向对窗口内像素的统计聚合与选择性替换。传统滑窗均值滤波存在虽能实现平滑, 但其线性特性对孤立高值极为敏感的问题。在南极磷虾声学数据中, 船体与海冰碰撞或螺旋桨空化产生的瞬态脉冲噪声强度常达-30 dB 以上, 单个离群点即可显著拉高整个窗口的均值, 导致噪声向周边扩散。为规避这一缺陷, 本文引入次序统计学中的中值估计方法, 以非线性方式实现去噪算法的鲁棒聚合。

该机制的核心思路是对于任意中心像素 (i, j) 对应的局部窗口 $W_{i,j}$ 内所有回声强度值按升序排列, 得到次序统计量序列 $S_v(1) \leq S_v(2) \leq \dots \leq S_v(K)$, 其中 $K = w_d \times w_p = 27$ 。窗口中值定义为该有序序列的中间位置元素:

$$S_{v_{med}}(i, j) = median(W_{i,j}) = S_v \left\lfloor \frac{k+1}{2} \right\rfloor \tag{5-3}$$

中值运算对孤立高值具有天然鲁棒性, 可有效抑制噪声扩散。与均值滤波相比, 中值滤波在磷虾数据上的边缘保持能力更强。同时为避免对真实磷虾信号的过度平滑, 本去噪算法增加阈值保护判断: 仅当中心像素与窗口中值差异超过设定阈值 T 时, 才用中值替换; 否则保留原始值。最终输出表达式为:

$$S_{v_{denoised}}(i, j) = \begin{cases} S_{v_{med}}(i, j), & \text{if } |S_v(i, j) - S_{v_{med}}(i, j)| > T \\ S_v(i, j), & \text{otherwise} \end{cases} \tag{5-4}$$

阈值 T 的选取直接决定了算法在去噪与特征保真度之间的平衡。若 T 过小, 算法退化为全局中值滤波, 磷虾垂直结构易被过度平滑; 若 T 过大, 则大量亚强度噪声将依旧存在。本文通过对校准后 484 ping 实测数据的残差分布进行统计分析, 发现真实磷虾起伏与背景缓慢变化的残差值高度集中在 0~6 dB, 而由破冰振动、空化气泡等引起的脉冲噪声残差则显著分布在 12 dB 以外。本文最终将保护阈值标定为 $T=10$ dB。

5.2. 实验验证及结果分析

为验证本文改进型横向中值滤波与阈值保护算法的实际效能, 本节采用 2 个声学数据补偿与校准后的声学文件进行测试。去噪效果定量评价采用平均信噪比、峰值信噪比、脉冲噪声占比、噪声替换比例和 YOLOv8n 磷虾识别 F1 分数五项指标评价。指标评价对照见表 1。

Table 1. Evaluation of the effect of before-and-after denoising on indicators

表 1. 去噪前后指标评价对照效果

性能指标	原始数据	处理后数据	提升度
平均信噪比 SNR (dB)	8.2	26.7	+18.5
峰值信噪比 PSNR (dB)	22.3	33.7	+11.4
脉冲噪声占比(%)	18.7%	9.1%	-9.6%
噪声替换比例(%)	0%	9.8%	+9.8%
YOLOv8n 磷虾识别 F1 分数	0.89	0.91	+0.2

原始数据平均信噪比约为 8.2 dB，脉冲噪声占比约 18.7%；经处理后，SNR 提升至 26.7 dB，峰值信噪比提高 11.4 dB，噪声替换比例稳定在 9.8%。输入目前常用的深度学习算法 YOLOv8n 进行目标识别模型后，磷虾识别 F1 分数从 0.89 提升至 0.91。对比效果见图 3、图 4。

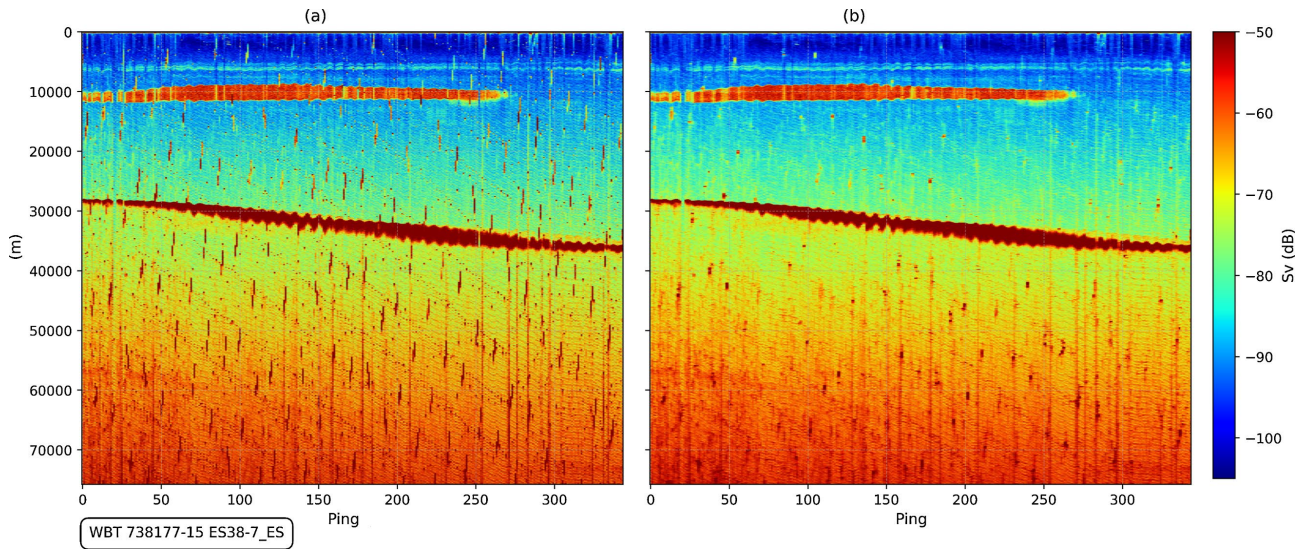


Figure 3. Comparison chart before and after denoising at low seabed depth

图 3. 低海底深度去噪处理前后对比图

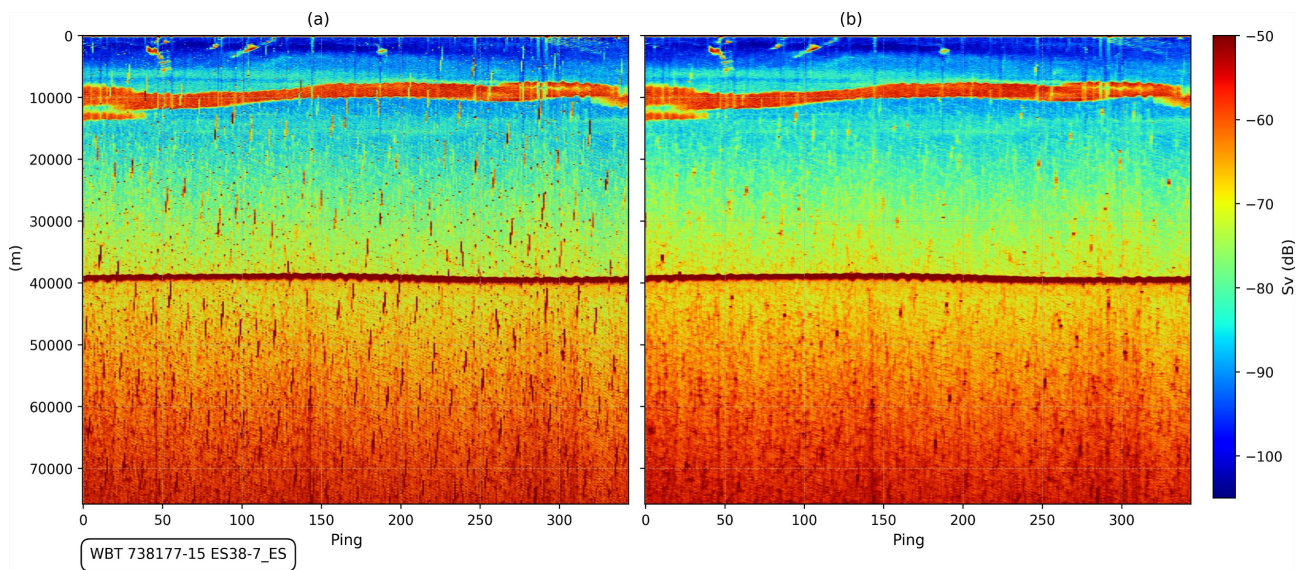


Figure 4. Comparison chart before and after denoising at deep seabed depth

图 4. 深海底深度去噪处理前后对比图

图 3 为低海底深度处理前后的对比效果图。左侧(a)为原始校准前图像，可见大量垂直贯穿水深的短时高亮条纹(即瞬态脉冲噪声)，主要由船体与海冰碰撞及螺旋桨空化引起。这些噪声与磷虾集群重叠，严重干扰视觉判读与自动积分。右侧(b)为本章校准补偿以及去噪算法处理后图像，垂直条纹基本消失，背景趋于均匀干净，磷虾层连续性明显改善，海底强反射界面边界更为锐利清晰。

图 4 为深海底深度处理前后的对比效果图。左侧(a)为原始校准前图像，在深水下层，噪声特征与低

海底深度场景存在细微但重要的差异：垂直脉冲噪声条纹密度明显降低，但单条噪声的持续长度更长、强度更高，常表现为贯穿数百米甚至上千米的细长高亮线，这主要源于深水传播过程中较弱的几何扩散衰减和较低的吸收系数，导致瞬态干扰在远场累积形成更持久的条纹。这些长程噪声虽数量较少，却更容易与深层稀疏磷虾群或零星浮游生物层产生混叠，造成垂直结构断裂或伪目标放大，对后续实例分割的边界精度影响更为显著。右侧(b)为本章校准补偿以及去噪算法处理后图像，垂直条纹基本消失或减轻为点状，背景趋于均匀清晰。

本文提出的改进型横向中值滤波与阈值保护算法，在保持低计算复杂度的同时，实现了噪声抑制，为后续磷虾、假底等的目标检测提供了高质量输入数据。

6. 总结与展望

6.1. 总结

南极磷虾作为极地渔业的核心资源，其生物量的科学评估高度依赖于科学回声仪(如 EK80)获取的声学数据。然而，在南大洋极端复杂的海洋环境中，声学信号面临着严重的几何扩散衰减、海水吸收损失以及多源高强度复合噪声(如背景噪声、瞬态脉冲噪声、散斑噪声等)的严重干扰。这些衰减与噪声极易掩盖深水区的微弱磷虾信号，导致目标 S_v 被严重低估，进而引发资源量积分的量级偏差。针对上述现实困境，本文以“深蓝”号远洋渔船实际作业采集的单频 EK80 数据为研究对象，开展声学数据的补偿校准与高保真去噪技术研究。首先，构建了基于现场水文特征的动态声学补偿与校准框架。针对原始未经校准回波信号存在的传输损失误差，本文利用 Echopype 开源框架实现了原始数据的标准化解析，并引入了现场温盐深(CTD)预估数据。通过应用 Francois-Garrison 公式动态计算声速与吸收系数，消除由于使用默认常数参数所引入的系统性偏差。定量分析表明，该模型在 200 米典型磷虾栖息水深处减少了约 4.8 dB 的吸收衰减误差；在大于 300 米的深水区可排除 20~30 dB 的累积传输损失，使全局有效 S_v 值平均提升 5~15 dB，为后续的去噪处理及目标识别奠定了精准的数据基础。其次，提出了一种改进横向中值滤波与阈值保护去噪算法。现有的传统滤波或依赖多频段支撑的去噪模型，难以在仅配备单频 EK80 系统的极地中小型渔船上广泛推广，且容易陷入去噪不彻底或过度平滑的困境。本文通过单频声学数据空间分布的非对称物理特性，构建了 3×9 非对称二维滑动窗口。该设计在深度方向保留了磷虾集群的垂直边界梯度，在水平方向覆盖并抑制了由船体振动、海冰碰撞及螺旋桨空化产生的横向条带噪声。同时，引入 10 dB 残差的阈值保护机制，对确认为异常突变的瞬态脉冲噪声进行局部中值替换。最后，通过实验对比验证算法的效能与应用价值。在视觉形态上，处理后的声学图像中干扰判读的垂直高亮条纹基本消失，背景趋于均匀干净，磷虾层的空间连续性明显改善，海底强反射界面的边界清晰。在客观评价指标上，该去噪算法将原始回声数据的信噪比由 8.2 dB 大幅提升至 26.7 dB，峰值信噪比提高 11.4 dB，且噪声替换比例稳定在 9.8%。此外，这种高保真的高质量去噪输入，显著降低了深度学习系统的误判率，使后续 YOLOv8n 目标识别模型的磷虾识别 F1 分数从 0.89 成功提升至 0.91。综上所述，本文提出的动态补偿校准与自适应去噪技术，为南极磷虾的智能化精准识别与高精度资源量评估提供了技术支撑。

6.2. 讨论

本研究基于“深蓝”号 EK80 38 kHz 单频声学数据，构建了动态声学补偿校准框架与改进横向中值滤波阈值保护去噪算法，实现了信噪比从 8.2 dB 提升至 26.7 dB、 S_v 值平均增益 5~15 dB 的显著效果，为南极磷虾资源声学评估提供了高效、实用的预处理技术。

首先，本研究仅采用单频 EK80 (38 kHz)数据。单频系统是日前极地中小型渔船的主流配置，但与多频(18/38/120/200 kHz)数据相比，缺乏 ΔS_v 等多频差异特征，无法有效区分磷虾与其他浮游生物或气泡散

射体,可能在混合鱼群或高密度浮游层区域引入分类误差。此外,现场CTD数据虽已用于动态计算声速与吸收系数,但实际作业中CTD剖面通常为离散站点测量,需通过线性或样条插值获得全水深参数。

其次,验证手段仍有提升空间。本研究主要通过视觉对比、SNR/PSNR指标及YOLOv8n F1分数提升进行评价,虽与Echoview结果高度一致,但缺乏与拖网实捕生物量或多频验证数据的定量比对,同时实验数据仅来自2023年1~6月南极48渔区单一航次,时空覆盖范围有限,模型泛化能力需进一步在不同季节、海冰浓度和渔区进行检验。

6.3. 展望

受限于海上实测环境的极端复杂性与数据体量的庞大,极地渔业声学技术的应用仍有广阔的探索空间。基于现有的研究基础,未来的工作可重点围绕以下三个维度展开:

(1) 融合轻量化深度学习的声学图像智能检测:未来的研究可将处理后的高保真声学图谱作为输入源,引入轻量化且带有注意力机制的卷积神经网络(如YOLO系列架构等)。通过构建南极磷虾的声学特征图像数据集,可以在复杂背景下实现磷虾集群目标的实时、高精度实例分割与智能检测,从而打破传统南极磷虾声学处理对人工经验的高度依赖。

(2) 水面探测无人艇(Unmanned Surface Vessel, USV)等新型观测平台的移植与扩展:目前南极磷虾的声学探测高度依赖于大型商业远洋渔船(如“深蓝”号)搭载的EK80等设备,这种走航式观测在空间覆盖面与探测灵活性上存在局限。随着海洋无人装备技术的发展,未来可考虑将本文提出的计算开销低、适配性强的去噪算法,部署于搭载微型单频声呐的南极磷虾水面探测无人艇(USV)的边缘计算端。利用无人艇的集群化优势,构建南大洋区域性无人探虾网络,以更低的作业成本实现高时空分辨率的资源勘探。

(3) 驱动捕捞装备的自动化与智能化联动作业:声学资源的评估最终将应用于商业捕捞实践。在获取精准去噪并剔除背景干扰的体积后向散射强度(S_v)数据后,可实时反演磷虾的垂直分布深度与集群密度。未来的工程实践可尝试将这一高维声学特征与拖网控制系统深度绑定,例如引入动力智能桁杆等自动化调节技术。由声呐系统实时计算的高密度虾群位姿数据,直接驱动曳纲卷扬机与提升板,实现拖网网口深度的无人化自动调节,取代传统滞后的人工干预,推动极地远洋捕捞向智能化、精准化作业迈进。

基金项目

国家重点研发计划“极地渔业资源高效开发利用技术与装备研发”(2023YFD2401202)。

参考文献

- [1] 李琳, 孙慧慧, 曹荣, 等. 基于近红外光谱技术的南极磷虾品质快速评定[J]. 食品工业科技, 2026, 47(1): 318-325.
- [2] Cox, M.J., Smith, A.J.R., Brierley, A.S., Potts, J.M., Wotherspoon, S. and Terauds, A. (2023) Scientific Echosounder Data Provide a Predator's View of Antarctic Krill (*Euphausia superba*). *Scientific Data*, **10**, Article No 284. <https://doi.org/10.1038/s41597-023-02187-y>
- [3] Bairstow, F., Gastauer, S., Wotherspoon, S., Brown, C.T.A., Kawaguchi, S., Edwards, T., et al. (2022) Krill Biomass Estimation: Sampling and Measurement Variability. *Frontiers in Marine Science*, **9**, Article 903035. <https://doi.org/10.3389/fmars.2022.903035>
- [4] 屈泰春, 陈帅, 黄洪亮, 等. 南极大磷虾声学调查数据噪声处理与资源密度评估[J]. 极地研究, 2014, 26(4): 451-459.
- [5] 姚宇青, 戴阳, 王鲁民, 等. 基于层次分析法的南极磷虾瞄准捕捞网口路径规划[J]. 海洋渔业, 2022, 44(5): 598-609.
- [6] Zhao, Y., Wang, X., Zhao, X. and Ying, Y. (2022) A Statistical Assessment of the Density of Antarctic Krill Based on "Chaotic" Acoustic Data Collected by a Commercial Fishing Vessel. *Frontiers in Marine Science*, **9**, Article 934504. <https://doi.org/10.3389/fmars.2022.934504>
- [7] 刘彪, 赖小龙, 刘光宇, 等. 基于ATV与联合双边滤波的NSCT声呐图像去噪[J/OL]. 海南热带海洋学院学报:

- 1-11. <https://link.cnki.net/urlid/46.1085.G4.20260109.1629.002>, 2026-01-12.
- [8] https://www.kongsbergdiscovery.online/ek80/ref/ek80_ref_en_us.pdf
- [9] 艾秋明. 宽带分裂波束探鱼仪目标强度测量研究[D]: [硕士学位论文]. 哈尔滨: 哈尔滨工程大学, 2024.
- [10] Echopype. <https://github.com/OSOceanAcoustics/echopype>
- [11] Gonzalez-Pola, C., Larsen, K.M.H., Fratantoni, P. and Beszczynska-Möller, A. (2019) ICES Report on Ocean Climate 2018. ICES Cooperative Research Reports (CRR).
- [12] De Robertis, A. and Higginbottom, I. (2007) A Post-Processing Technique to Estimate the Signal-To-Noise Ratio and Remove Echosounder Background Noise. *ICES Journal of Marine Science*, **64**, 1282-1291. <https://doi.org/10.1093/icesjms/fsm112>
- [13] Andersen, L.N., Chu, D., Handegard, N.O., Heimvoll, H., Korneliussen, R., Macaulay, G.J., *et al.* (2023) Quantitative Processing of Broadband Data as Implemented in a Scientific Split-Beam Echosounder. *Methods in Ecology and Evolution*, **15**, 317-328. <https://doi.org/10.1111/2041-210x.14261>
- [14] 林冰. 南极磷虾渔业科学观察制度与我国实践[D]: [硕士学位论文]. 舟山: 浙江海洋大学, 2024.
- [15] Wang, X., Zhang, J. and Zhao, X. (2016) A Post-Processing Method to Remove Interference Noise from Acoustic Data Collected from Antarctic Krill Fishing Vessels. *CCAMLR Science*, **23**, 17-30. https://www.ccamlr.org/ru/system/files/science_journal_papers/Wang%20et%20al.pdf
- [16] Francois, R.E. and Garrison, G.R. (1982) Sound Absorption Based on Ocean Measurements. Part II: Boric Acid Contribution and Equation for Total Absorption. *The Journal of the Acoustical Society of America*, **72**, 1879-1890. <https://doi.org/10.1121/1.388673>
- [17] Ainslie, M.A. and McColm, J.G. (1998) A Simplified Formula for Viscous and Chemical Absorption in Sea Water. *The Journal of the Acoustical Society of America*, **103**, 1671-1672. <https://doi.org/10.1121/1.421258>
- [18] Bassett, C., De Robertis, A. and Wilson, C.D. (2017) Broadband Echosounder Measurements of the Frequency Response of Fishes and Euphausiids in the Gulf of Alaska. *ICES Journal of Marine Science*, **75**, 1131-1142. <https://doi.org/10.1093/icesjms/fsx204>
- [19] Simrad (2023) EK80 Reference Manual. Kongsberg Maritime, 145-168.
- [20] Cutter, G.R., Reiss, C.S., Nylund, S. and Watters, G.M. (2022) Antarctic Krill Biomass and Flux Measured Using Wideband Echosounders and Acoustic Doppler Current Profilers on Submerged Moorings. *Frontiers in Marine Science*, **9**, Article 784469. <https://doi.org/10.3389/fmars.2022.784469>
- [21] Haris, K., Kloser, R.J., Ryan, T.E. and Malan, J. (2017) Deep-Water Calibration of Echosounders Used for Biomass Surveys and Species Identification. *ICES Journal of Marine Science*, **75**, 1117-1130. <https://doi.org/10.1093/icesjms/fsx206>
- [22] 汤勇. 中国渔业资源声学评估研究与进展[J]. 大连海洋大学学报, 2023, 38(2): 185-195.
- [23] Simmonds, J. and MacLennan, D.N. (2008) Fisheries Acoustics: Theory and Practice. John Wiley & Sons.
- [24] Chu, D. and Hufnagle, L. (2006) Time Varying Gain (TVG) Measurements of a Multibeam Echo Sounder for Applications to Quantitative Acoustics. *OCEANS 2006*, Boston, 18-21 September 2006, 1-5. <https://doi.org/10.1109/oceans.2006.306818>
- [25] Ryan, T.E., Downie, R.A., Kloser, R.J. and Keith, G. (2015) Reducing Bias Due to Noise and Attenuation in Open-Ocean Echo Integration Data. *ICES Journal of Marine Science*, **72**, 2482-2493. <https://doi.org/10.1093/icesjms/fsv121>
- [26] Mo, X., Wen, H., Yang, Y., Zhou, H. and Ruan, H. (2023) Statistical Characteristics of Under-Ice Noise on the Arctic Chukchi Plateau. *The Journal of the Acoustical Society of America*, **154**, 2489-2498. <https://doi.org/10.1121/10.0021871>
- [27] Jech, J.M., Schaber, M., Cox, M., *et al.* (2021) Collecting Quality Echosounder Data in Inclement Weather. *ICES Cooperative Research Report*, **352**, 1-100.
- [28] Oh, W.S., Park, G.C., Choi, J., Lee, H.B. and Lee, K. (2023) Density Estimation of Euphausiids and Copepods by Using a Multi-Frequency Method. *Fisheries and Aquatic Sciences*, **26**, 689-697. <https://doi.org/10.47853/fas.2023.e61>
- [29] Elad, M., Kowar, B. and Vaksman, G. (2023) Image Denoising: The Deep Learning Revolution and Beyond—A Survey Paper. *SIAM Journal on Imaging Sciences*, **16**, 1594-1654. <https://doi.org/10.1137/23m1545859>
- [30] 李英荣, 龙佳乐, 黄昊铭, 等. 基于改进 U-Net 网络抑制散斑噪声算法[J]. 计算机科学与应用, 2025, 15(4): 1-8.
- [31] Harrison, L.K., Cox, M.J., Skaret, G. and Harcourt, R. (2015) The R Package *EchoviewR* for Automated Processing of Active Acoustic Data Using Echoview. *Frontiers in Marine Science*, **2**, Article 15. <https://doi.org/10.3389/fmars.2015.00015>
- [32] 赵双萍, 邢敬宏. 一种图像自适应 Wiener 组合滤波方法[J]. 计算机工程与应用, 2010, 46(31): 169-171.
- [33] Korneliussen, R.J., Heggelund, Y., Macaulay, G.J., Patel, D., Johnsen, E. and Eliassen, I.K. (2016) Acoustic Identification of Marine Species Using a Feature Library. *Methods in Oceanography*, **17**, 187-205.

<https://doi.org/10.1016/j.mio.2016.09.002>

- [34] 王振雨. 一维声学系统中拓扑界面态的宽频调节和多个单频选择的吸收峰[D]: [硕士学位论文]. 昆明: 云南大学, 2020.
- [35] 何石, 潘晓璐, 李一民. 一种均值滤波的优化算法[J]. 信息技术, 2012, 36(3): 133-134, 137.