

基于多参数约束的海豚回声定位信号自动检测方法

赵萍^{1,2,3,4}, 刘宗伟^{2,3,4,5*}, 姜莹^{2,3,4,5}, 吕连港^{2,3,4,5}, 杨春梅^{2,3,4,5}, 吕志超¹

(1. 山东科技大学, 山东 青岛 266590;

2. 自然资源部第一海洋研究所, 山东 青岛 266061;

3. 自然资源部海洋环境科学与数值模拟重点实验室, 山东 青岛 266061;

4. 山东省海洋环境科学与数值模拟重点实验室, 山东 青岛 266061;

5. 青岛海洋科技中心区域海洋动力学与数值模拟功能实验室, 山东 青岛 266237)

摘要: 为了从噪声复杂的海洋环境中准确检测出海豚的回声定位信号, 本文提出了一种基于多参数约束的海豚回声定位信号自动检测方法。该方法首先对原始数据进行分帧, 使用 FFT 将信号从时域转换到频域并进行能量计算, 设置能量门限, 提取出疑似目标的脉冲信号; 然后根据海豚回声定位信号成串出现以及串内部脉冲间隔规律性强的特点, 通过约束串内部脉冲数量、脉冲间隔等多个参数的大小, 从疑似目标信号中筛选出回声定位信号串; 最后输出自动检测结果, 获取回声定位信号串的位置以及串内回声定位信号的数量等信息。利用野外实测数据对此方法进行测试, 结果表明, 在无需人工干预的情况下, 对海豚回声定位信号的自动检测平均召回率可以达到 91.3%, 平均误检率为 3.8%。本文提出的方法可以有力支撑海洋哺乳动物声学监测的实现, 同时可以为海洋哺乳动物生物学行为的研究提供一定的技术支持。

关键词: 海豚; 回声定位信号; 自动检测; 多参数约束

中图分类号: Q62; P733.2

文献标志码: A

文章编号: 1671-6647(2026)01-0198-09

doi: 10.12362/j.issn.1671-6647.20240715001

引用格式: 赵萍, 刘宗伟, 姜莹, 等, 2026. 基于多参数约束的海豚回声定位信号自动检测方法[J]. 海洋科学进展, 44(1): 198-206. ZHAO P, LIU Z W, JIANG Y, et al, 2026. Dolphin click signal detection method based on multi-parameter constraints[J]. Advances in Marine Science, 44(1): 198-206.

海豚的发声信号主要分为 3 类: 回声定位信号(click)、通信信号(whistle)及脉冲突发信号(burst-pulse)。回声定位信号是一种宽频的脉冲信号, 主要用于觅食、躲避、定位、通信等生理活动(Lilly, 1966); 通信信号为一种窄带高能量信号, 呈现形式多样, 通常成对出现, 符合通信交流的特征; 脉冲突发信号为一种宽频高能量信号, 相对回声定位信号, 脉冲突发信号脉冲间隔较小(小于约 3 ms)(AU et al, 2008)。其中, 回声定位信号的使用频率较高(Niu et al, 2019), 通过检测分析海豚的回声定位信号可以更好地实现对海豚的监测和保护(王丕烈等, 2007)。

在野外环境下, 长时间的被动声学监测会记录大量的声学数据, 人工处理起来十分困难。长期被动声学监测记录的数据文件可能会存在大批量仅含有噪声的数据, 将会对检测结果造成很大干扰。如果需要通过人工干预, 预先挑选出其中明确含有回声定位信号的数据文件, 再对其进行回声定位信号的自动检测, 将会产生非常大的工作量(薛睿超等, 2023)。因此, 回声定位信号自动检测技术尤为重要。

回声定位信号检测技术对于了解海洋哺乳动物的生物声呐系统、生活习性等也具有十分重要的作用(AU, 1993; 胡晓明, 2006; Kyhn et al, 2017), 国内外有大量学者在研究回声定位信号检测技术。目前常用的回声定位信号检测方法主要有: TK 能量算法、基于时频分析的检测算法和基于人工智

收稿日期: 2024-07-15 网络首发日期: 2025-06-20

资助项目: 国家自然科学基金项目(42276196 和 42206195)

作者简介: 赵萍(2000—), 女, 硕士研究生, 主要从事海洋声学方面研究。E-mail: zp20002024@163.com

*通信作者: 刘宗伟(1986—), 男, 高级工程师, 博士, 主要从事海洋声学方面研究。E-mail: liuzongwei@fio.org.cn

(责任编辑 李燕)

能的检测算法。TK 能量算法是基于时域的算法, 利用 3 个连续采样点进行瞬时能量计算来获取回声定位信号的位置(Kaiser, 1990; Kandia et al, 2006; Yang et al, 2017; 黄龙飞等, 2019; 李显阳等, 2023)。TK 能量算法计算速度较快, 但是这种方法的检测结果容易受到检测环境中脉冲噪声的影响, 在低信噪比时效果较差(段德鑫等, 2022)。基于时频分析的检测算法主要是利用回声定位信号的时频特征进行时频分析(Morrissey et al, 2006; 杨武夷等, 2017; 杨昱峰等, 2023), 在快速傅里叶变换后将高于预设分贝值门限的脉冲信号检测为回声定位信号, 但是在噪声复杂的情况下抗干扰能力仍然较弱。近年来, 人工智能在回声定位信号检测中的应用也越来越广泛(Luo et al, 2019; 王宸等, 2020; Frasier et al, 2021), 深度学习在图像识别、语音识别和自然信号处理等方面都有优异的表现(孙志军等, 2012), 但是该方法往往需要制作大量数据集进行神经网络的训练和测试, 而且随着数据量的增多以及数据复杂程度的增加, 网络参数及网络结构也需要随之改变(高德洋等, 2019)。综合分析目前常用的回声定位信号检测方法, 可以在某些特定条件下实现较高准确率的回声定位信号识别, 但是对于野外长期被动声学监测数据, 数据量大且噪声情况较为复杂, 回声定位信号识别准确率还有待考究。受海洋背景噪声等因素的影响, 野外长期被动声学监测数据中存在大量的脉冲噪声, 其特征与海豚回声定位信号特征非常相似, 很难区分, 以往通过检测单个脉冲信号来确定回声定位信号的方法应用在这种检测环境下将会产生非常高的误报率。因此, 提供一种无需人工预处理、抗干扰能力强的回声定位信号自动检测方法对于处理野外长期被动声学监测数据至关重要。

海洋环境噪声中的脉冲噪声与回声定位信号均以脉冲形式出现, 因此会对检测造成一定干扰。但是脉冲噪声或以孤立脉冲形式出现, 或以非规律脉冲串形式出现。海豚的回声定位信号具有一些较为明显的特征: 首先, 回声定位信号一般是成串出现的, 可以通过设置脉冲信号连续出现的最小数量筛选出符合要求的脉冲串, 减少孤立脉冲噪声对检测结果的影响; 其次, 回声定位串内部脉冲间隔的变化一般具有一定的规律性(黄龙飞等, 2019), 根据这种信号特征可以进行串内检测, 减少非规律性出现的脉冲噪声的干扰, 进一步筛选出真正的回声定位信号串。

本文提出了一种基于多参数约束的海豚回声定位信号自动检测方法。该方法结合海豚回声定位信号的时频特征及野外环境下实际海洋背景噪声, 使用多参数约束来检测回声定位信号串, 进而确定回声定位信号。该方法抗干扰能力较强, 无需人工干预原始被动声学监测数据, 可以直接进行回声定位信号检测, 提高了野外环境下长期被动声学监测中回声定位信号自动检测的效率和准确率。

1 方 法

1.1 信号检测整体流程

首先对连续信号进行分帧处理, 然后使用 FFT 方法对每一帧的信号进行分析, 计算目标信号频段和背景噪声频段的能量值并设置相应的门限值, 提取疑似目标信号并计算其脉冲数量及脉冲间隔。由于提取的疑似目标信号中掺杂着大量瞬态噪声信号, 为了提高检测的正确率, 需要在疑似目标信号中筛选出真实的回声定位信号。利用回声定位信号成串规律性出现的特征, 利用 5 个参数进行联合约束提取回声定位信号串, 进而准确得到回声定位信号。具体检测流程图如图 1 所示, 其中, 疑似目标信号代表疑似回声定位信号的脉冲信号。

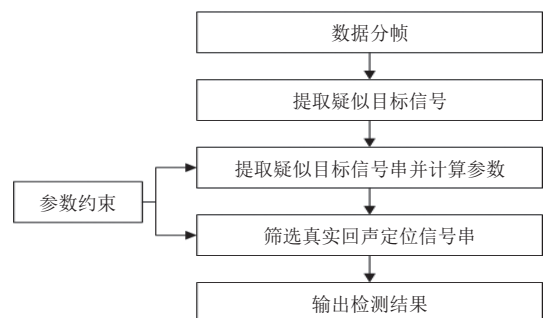


图 1 检测方法流程

Fig. 1 Flow chart of the detection method

1.2 信号检测具体实现步骤

信号检测的具体实现步骤主要分为以下5步。

1) 读取数据并分帧, 每帧的长度为512, 相邻两帧之间存在50%的时间重叠以保证信号的连续性和完整性, 对每帧的数据使用汉宁窗函数进行加窗处理(魏永星等, 2016)。设信号为 $x(n)$, 将其分为 I 段, 每段的长度为 N , 加窗后的傅里叶变换公式为:

$$X_i(k) = \sum_{n=0}^{N-1} x_i(n)w(n)e^{-\frac{j2\pi kn}{N}}, \quad (1)$$

式中: $x_i(n)$ 为第 i 段信号序列; $w(n)$ 为窗函数, $i = 1, 2, \dots, I$; $k = 0, 1, 2, \dots, N-1$ 。使用FFT将信号从时域转换到频域, 计算得到数据的时频图。

2) 提取疑似目标信号: ①分析得到的时频图(图2), 设置目标频段(频段1)的上限频率 f_{up1} 和下限频率 f_{low1} , 设置背景噪声频段(频段2)的上限频率 f_{up2} 和下限频率 f_{low2} 。针对频段1和频段2每一帧进行能量求和, 分别得到频段1和频段2的能量值数组 E_1 和 E_2 。 E_1 和 E_2 分别包含频段1和频段2中每一帧能量的累加值, $E_1 = \{e_{11}, e_{12}, \dots, e_{1i}, \dots, e_{1n}\}$, $E_2 = \{e_{21}, e_{22}, \dots, e_{2i}, \dots, e_{2n}\}$, 其中 n 为帧数。②设置门限值 t_1 , 比较频段1的能量 e_{1i} 与 t_1 的大小。③设置门限值 t_2 , 比较频段1与频段2的能量比值 e_{1i}/e_{2i} 与 t_2 的大小。当 $e_{1i} > t_1$ 且 $e_{1i}/e_{2i} > t_2$ 的时候, 则判定第 i 帧存在疑似目标信号(图3)。

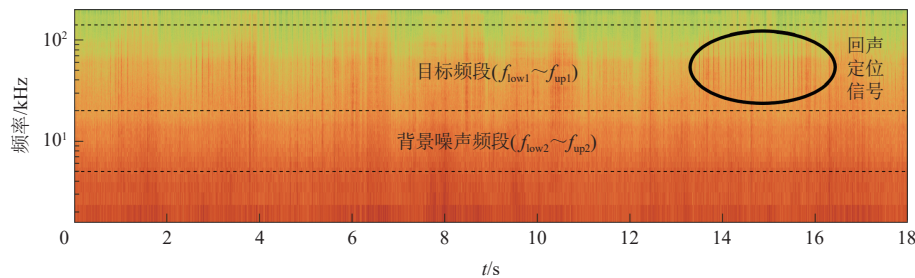


图2 目标及噪声频段设置示意图

Fig. 2 Target and noise band setting diagram

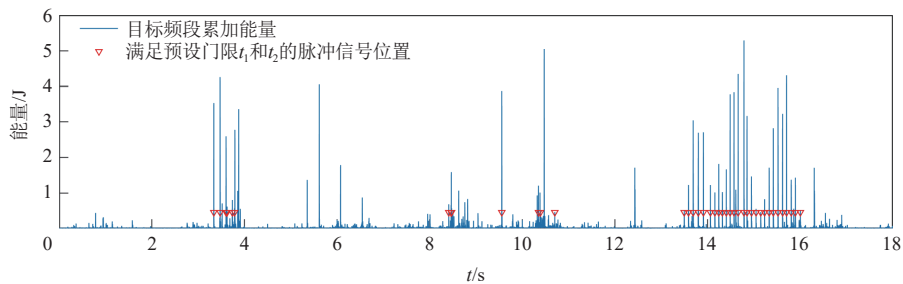


图3 疑似目标提取示意图

Fig. 3 Schematic diagram of suspected target extraction

3) 提取疑似目标信号串并进行参数计算: ①根据上一步检测到的疑似目标信号的位置计算得到每两个相邻疑似目标信号之间的脉冲间隔(ICI)(表1)。②设置脉冲间隔(ICI)的门限值 $Threshold_ICI_max$, 提取出疑似目标信号串。具体条件为:

$$ICI \leq Threshold_ICI_max. \quad (2)$$

当两个相邻信号之间的脉冲间隔满足式(2)给出的条件时, 则认为这两个相邻信号属于同一个信号串。③计算疑似目标信号串脉冲间隔均值(ICI_mean)、脉冲间隔中位数(ICI_median)、脉冲间隔标准差(ICI_std)(表1)。

表 1 疑似目标信号串参数
Table 1 Parameters of suspected target signal train

参数名称	定义	计算公式或符号
脉冲数目	脉冲串内部的脉冲数量	C_num
脉冲间隔	脉冲串内部任意两个连续脉冲之间的时间间隔	ICI_i
脉冲间隔均值	脉冲串内所有脉冲间隔的算术平均值	$ICI_mean = \frac{\sum_{i=1}^{C_num-1} ICI_i}{C_num-1}$
脉冲间隔中位数	将脉冲串内所有脉冲间隔的数值排序后位于中间的数值	ICI_median
脉冲间隔标准差	脉冲串内所有脉冲间隔的数值的标准差	$ICI_std = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^{C_num-1} (ICI_i - ICI_mean)^2}{C_num-1}}$

4) 筛选真实回声定位信号串: ①根据回声定位信号成串出现的特点, 设置单个疑似目标信号串内部连续出现的脉冲信号的最小数量门限值 $Threshold_C_num_min$, 滤除孤立脉冲噪声的干扰。②通过对回声定位信号脉冲间隔特征的前期分析, 设置疑似目标信号串脉冲间隔均值(ICI_mean)的门限值 $Threshold_ICI_mean_min$ 和 $Threshold_ICI_mean_max$ 、脉冲间隔中位数(ICI_median)的门限值 $Threshold_ICI_median_min$ 和 $Threshold_ICI_median_max$ 、脉冲间隔标准差(ICI_std)的门限值 $Threshold_ICI_std_min$ 和 $Threshold_ICI_std_max$, 减少非规律性出现的脉冲噪声的干扰。③通过考察每个疑似目标信号串的参数是否满足预设的条件来判断该信号串是否属于真实的回声定位信号串, 具体条件包括:

$$C_num \geq Threshold_C_num_min, \quad (3)$$

$$Threshold_ICI_mean_min \leq ICI_mean \leq Threshold_ICI_mean_max, \quad (4)$$

$$Threshold_ICI_median_min \leq ICI_median \leq Threshold_ICI_median_max, \quad (5)$$

$$Threshold_ICI_std_min \leq ICI_std \leq Threshold_ICI_std_max. \quad (6)$$

5) 输出检测结果。图 4 为最终检测出的脉冲串的部分参数信息, 包含脉冲串内部脉冲间隔、干扰脉冲和真实回声定位信号串的位置、回声定位信号数量等。

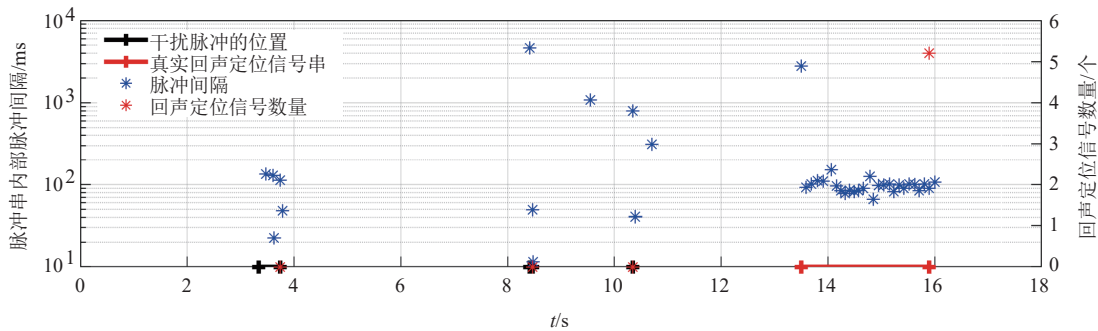


图 4 检测结果示意图

Fig. 4 Diagram of detection result

2 实验数据与实验设计

2.1 实验数据

实验所用数据为在广西北部湾海域连续观测获得的声学数据, 观测位置($109^{\circ}40'12.11''E$,

21°25′33.41″N)如图 5a 所示。该数据是在北部湾海域长期被动声学监测直接获取的未经任何人工预处理的原始数据, 分别在同一站位连续观测 3 d(2022 年 12 月 21 日至 23 日), 从每天获取的数据中各选取 500 min 数据进行实验, 共计 25 h 数据。数据采集所用的设备为西安凌度电子科技有限公司研发的实时声学采集设备(图 5b), 采样率为 400 kHz, 水听器灵敏度为-196 dB。

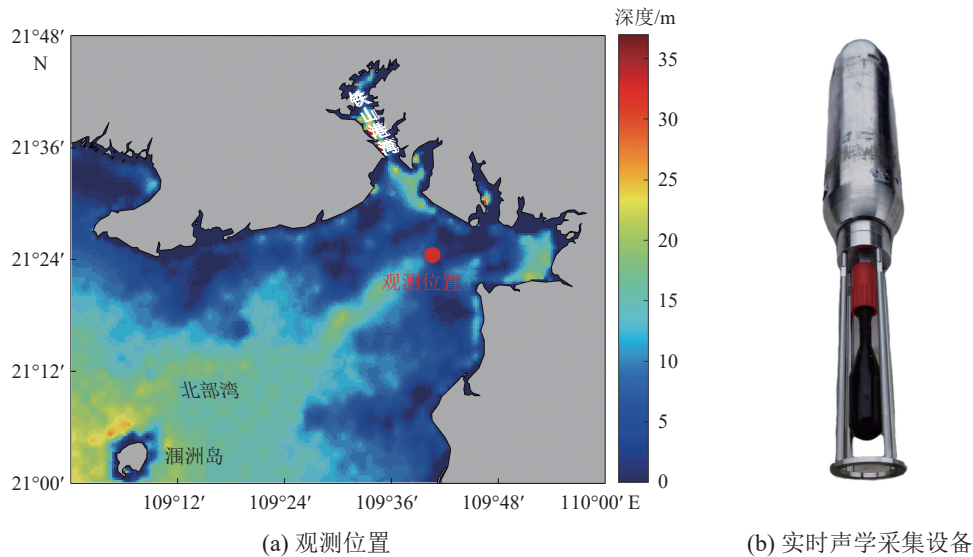


图 5 观测位置及设备

Fig. 5 Observation location and equipment deployed

2.2 实验设计

设置对比实验, 将上述 3 组数据分别进行回声定位信号的自动检测和人工检测。基于本文提出的回声定位信号自动检测方法, 根据北部湾海豚回声定位信号特征以及海洋背景噪声情况, 设置一组合适的参数用于回声定位信号的自动检测(表 2)。为了屏蔽低频的海洋环境噪声和干扰, 获得相对更加稳定的背景噪声频谱值, 本文将背景噪声频段的下限频率 f_{low2} 设置为 5 kHz。同时, 选择 3 名有实操经验的工作人员, 使用 Adobe Audition 软件对实验数据的频谱进行目视分析, 人工检测出其中符合特征的回声定位信号, 对 3 人的检测结果取平均。将自动检测结果和人工检测结果进行对比, 分析自动检测方法的检测性能。

表 2 实验参数设置

Table 2 Configuration of experimental parameters

相关参数	参数值	相关参数	参数值	相关参数	参数值
f_{up1} /kHz	140	$t2$ /dB	6	ICI_mean_max/ms	180
f_{low1} /kHz	20	C_num_min/个	5	ICI_median_min/ms	6
f_{up2} /kHz	20	ICI_min/ms	3	ICI_median_max/ms	180
f_{low2} /kHz	5	ICI_max/ms	300	ICI_std_min/ms	2
$t1$	2×10^{-9}	ICI_mean_min/ms	6	ICI_std_max/ms	40

3 实验结果分析

图 6 为所检测到的回声定位信号串时域图示例, 3 组数据的自动检测与人工检测结果汇总如表 3 所示。

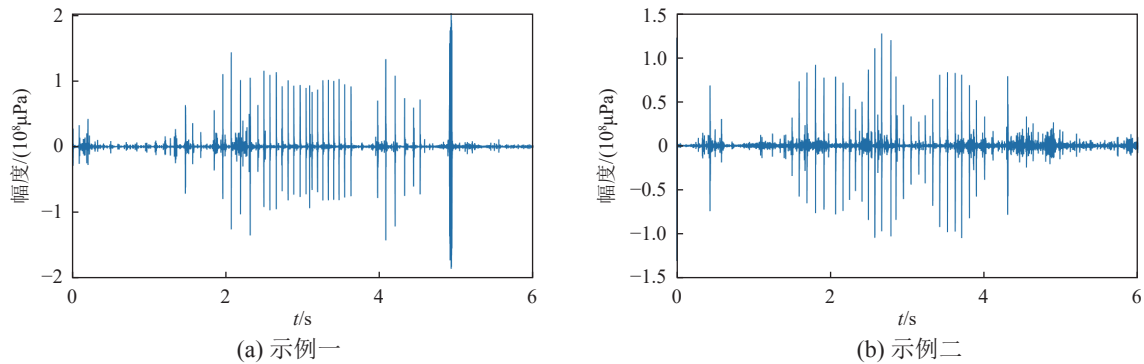


图 6 检测出的回声定位信号串时域图示例

Fig. 6 Examples of the time domain diagram of detected click train

表 3 实验检测结果

Table 3 Detection results of the experiments

序号	人工检测回声定位信号数量/个	自动检测回声定位信号数量/个	正确检测信号数量/个	误检率/%	召回率/%
1	1 373	1 324	1 245	5.8	90.7
2	1 206	1 108	1 082	2.2	89.7
3	1 837	1 776	1 715	3.3	93.4

将自动检测到而人工未检测到的信号视为自动检测的误检信号, 自动检测到并且人工检测到的信号认为是自动检测的准确检测信号。将误检率定义为回声定位信号自动检测的误检数量与人工检测总数量的百分比, 召回率定义为回声定位信号自动检测中准确检测的数量与人工检测总数量的百分比。

在第一组数据中, 人工检测到 1 373 个回声定位信号, 自动检测到 1 324 个回声定位信号, 其中自动检测的误检率为 5.8%, 召回率为 90.7%。在第二组数据中, 人工检测到 1 206 个回声定位信号, 自动检测到 1 108 个回声定位信号, 其中自动检测的误检率为 2.2%, 召回率为 89.7%。在第三组数据中, 人工检测到 1 837 个回声定位信号, 自动检测到 1 776 个回声定位信号, 其中自动检测的误检率为 3.3%, 召回率为 93.4%。

上述结果表明, 本文提出的回声定位信号检测方法在野外环境下海豚的检测平均召回率可以达到 91.3%, 平均误检率为 3.8%。经分析, 误检信号多数是与回声定位信号串特征相似的脉冲噪声串。图 7a 给出的声音片段自动检测出 5 个回声定位信号, 但实际上该声音片段并不存在回声定位信号, 所检测出的信号为与回声定位信号串特征相似的脉冲噪声串。图 7b 为单个误检信号的频谱图, 由此可以看出该误检信号并不符合回声定位信号的频谱特征(牛富强等, 2011)。漏检信号基本上是低于预设阈值门限的信号。提高目标频段能量的阈值门限可以有效降低误检率, 但是漏检信号也会随之增多。

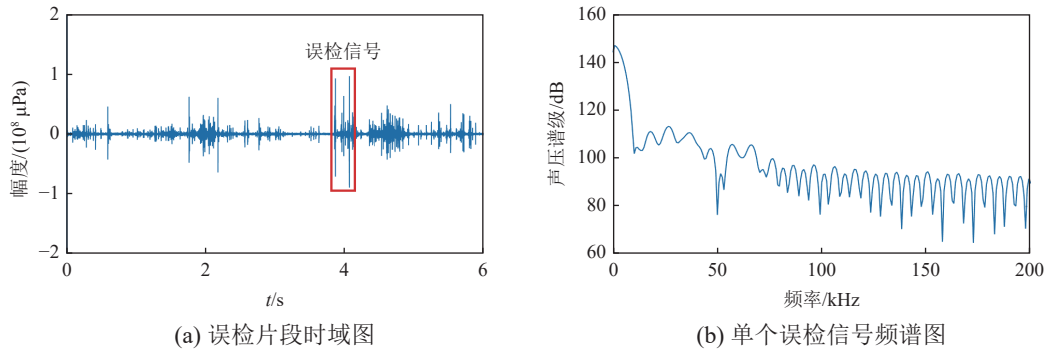


图 7 误检示例

Fig. 7 Examples of false detection

4 结 语

本文提出了一种基于多参数约束的海豚回声定位信号自动检测方法，该方法可以应用于野外环境下长期被动声学监测，并以北部湾海豚为例，验证了该方法的有效性。本文方法的优势和创新性主要体现在两个方面：一方面，对于野外环境下长时间观测获得的大量的声音数据，在无需进行人工干预的情况下，可以直接进行海豚回声定位信号检测；另一方面，通过对串内部的脉冲数目、脉冲间隔及其均值、标准差和中位数等多个参数进行约束，检测回声定位信号串，大大降低了背景噪声里孤立或者非规律性出现的脉冲噪声的干扰，提升了海豚回声定位信号检测准确率。本文方法所用的计算参数需要根据实际的监测环境进行修正，目前该检测方法只能检测出目标频段内的回声定位信号，但是无法区分回声定位信号属于哪种动物。

利用本文的检测方法可以直接处理野外环境下长期被动声学监测数据，节省人工、耗时短，是一种全自动的回声定位信号检测方法。利用本文方法进行检测，一方面可以通过分析长期监测数据中的回声定位信号数量变化规律得到海豚的活动规律，对海洋哺乳动物的观测具有指导意义；另一方面可以获取回声定位信号的相关参数，如回声定位信号串内部脉冲间隔、回声定位信号串的起始时间和结束时间等，能够为海洋哺乳动物生物学行为的研究提供一定的技术支持。另外，本方法中使用的FFT可以在嵌入式计算CPU进行硬件加速计算，其余的运算为一般的统计运算。经过实测，本方法可以在ARM-M4嵌入式CPU中实时运行，为本方法的本地实时部署提供了支撑。

参考文献 (References):

- 段德鑫, 姜莹, 刘宗伟, 等, 2022. 基于图像处理的回声定位信号检测方法[J]. *海洋科学进展*, 40(1): 145-153. DUAN D X, JIANG Y, LIU Z W, et al, 2022. Detection method for echolocation clicks based on image processing[J]. *Advances in Marine Science*, 40(1): 145-153.
- 高德洋, 高大治, 李小雷, 2019. 基于深度学习的典型海洋哺乳动物click信号识别方法[J]. *陕西师范大学学报(自然科学版)*, 47(6): 37-43. GAO D Y, GAO D Z, LI X L, 2019. Marine mammals' click signals classification based on deep learning[J]. *Journal of Shaanxi Normal University (Natural Science Edition)*, 47(6): 37-43.
- 胡晓明, 2006. 基于海豚治疗机理的脑瘫超声治疗仪研究[D]. 秦皇岛: 燕山大学. HU X M, 2006. Study of brain paralysis ultrasonic therapy instruments based on dolphin therapy theory[D]. Qinhuangdao: Yanshan University.
- 黄龙飞, 吕连港, 姜莹, 等, 2019. 普里兹湾虎鲸回声定位信号脉冲间隔特征分析[J]. *海洋科学进展*, 37(2): 255-264. HUANG L F, LÜ L G, JIANG Y, et al, 2019. Analysis of the regularity of echolocation signals of killer whales in the Prydz

- Bay, Antarctica[J]. *Advances in Marine Science*, 37(2): 255-264.
- 李显阳, 2023. 南海中南暗沙海域环境噪声时间变化特征及分析[D]. 青岛: 自然资源部第一海洋研究所. LI X Y, 2023. Temporal variation characteristics and analysis of environmental noise of the Middle South Shoal of the South China Sea[D]. Qingdao: First Institute of Oceanography, MNR.
- 牛富强, 杨燕明, 文洪涛, 等, 2011. 瓶鼻海豚的click声信号特性[J]. 声学技术, 30(2): 148-152. NIU F Q, YANG Y M, WEN H T, et al, 2011. Vocalization and signal characteristic of bottlenose dolphin[J]. *Technical Acoustics*, 148-152.
- 孙志军, 薛磊, 许阳明, 等, 2012. 深度学习研究综述[J]. 计算机应用研究, 29(8): 2806-2810. SUN Z J, XUE L, XU Y M, et al, 2012. Overview of deep learning[J]. *Application Research of Computers*, 29(8): 2806-2810.
- 王宸, 陶毅, 吴剑明, 2020. 中华白海豚回声定位信号自动识别[J]. 声学技术, 39(4): 425-429. WANG C, TAO Y, WU J M, 2020. Automatic recognition of *sousachinensis* echolocation signal[J]. *Technical Acoustics*, 39(4): 425-429.
- 王丕烈, 韩家波, 2007. 中国水域中华白海豚种群分布现状与保护[J]. *海洋环境科学*, 26(5): 484-487. WANG P L, HAN J B, 2007. Present status of distribution and protection of Chinese white dolphins population in Chinese waters[J]. *Marine Environmental Science*, 26(5): 484-487.
- 魏永星, 于金花, 李琦, 等, 2016. 实测海洋环境噪声数据谱级特性研究[J]. 海洋技术学报, 35(3): 36-39. WEI Y X, YU J H, LI Q, et al, 2016. Research on wind speed retrieval using measured ocean ambient noise spectrum level[J]. *Ocean Technology*, 35(3): 36-39.
- 薛睿超, 牛富强, 2023. 一种适用于被动声学检测系统的海豚回声定位信号快速检测方法[J]. 声学技术, 42(6): 733-740. XUE R C, NIU F Q, 2023. A fast detection method of dolphin echolocation signal for passive acoustic monitoring system[J]. *Technical Acoustics*, 42(6): 733-740.
- 杨武夷, 孙馨喆, 宋忠长, 等, 2017. 宽吻海豚Click信号的时频滤波检测方法[J]. 声学学报, 42(4): 445-449. YANG W Y, SUN X Z, SONG Z Z, et al, 2017. Time-frequency filtering method for detecting clicks of bottlenose dolphin[J]. *Acta Acustica*, 42(4): 445-449.
- 杨昱峰, 何瑞麟, 戴阳, 等, 2023. 时频特征的海豚发声端点检测方法研究[J]. 应用声学, 42(5): 1042-1051. YANG Y H, HE R L, DAI Y, et al, 2023. The detection method of dolphin vocal endpoint based on time-frequency characteristics[J]. *Journal of Applied Acoustics*, 42(5): 1042-1051.
- AU W W, 1993. The sonar of dolphins[M]. New York: Springer-Verlag.
- AU W W, HASTINGS M C, 2008. Principles of marine bioacoustics[M]. New York: Springer US: 425.
- FRASIER K E, 2021. A machine learning pipeline for classification of cetacean echolocation clicks in large underwater acoustic datasets[J]. *PLoS Computational Biology*, 17(12): e1009613.
- KAISER J F, 1990. On a simple algorithm to calculate the 'energy' of a signal[J]. *Bell Communications Research*, 7(3): 381-384.
- KANDIA V, STYLIANOU Y, 2006. Detection of sperm whale clicks based on the Teager-Kaiser energy operator[J]. *Applied Acoustics*, 67(11/12): 1144-1163.
- KYHN L A, TOUGAARD J, BEEDHOLM K, et al, 2017. Clicking in a killer whale habitat: narrow-band, high-frequency biosonar clicks of harbour porpoise (*Phocoena phocoena*) and Dall's porpoise (*Phocoenoides dalli*)[J]. *PLoS One*, 8(5): e63763.
- LILLY J C, 1966. Sonic-ultrasonic emissions of the bottlenose dolphin[J]. *Whales, Dolphins and Porpoises*, 165: 503-507.
- LUO W, YANG W, ZHANG Y, 2019. Convolutional neural network for detecting odontocete echolocation clicks[J]. *The Journal of the Acoustical Society of America*, 145(1): 7-12.
- MORRISSEY R P, WARD J, DIMARZIO N, et al, 2006. Passive acoustic detection and localization of sperm whales (*Physeter macrocephalus*) in the tongue of the ocean[J]. *Applied Acoustics*, 67(11/12): 1091-1105.
- NIU F Q, YANG Y M, ZHOU Z M, et al, 2019. Echolocation clicks of free-ranging Irrawaddy dolphins (*Orcaella brevirostris*) in Trat Bay, the eastern Gulf of Thailand[J]. *The Journal of the Acoustical Society of America*, 145(5): 3031-3037.
- YANG W Y, LUO W Y, ZHANG Y, 2017. Automatic detection method for monitoring odontocete echolocation clicks[J]. *Electronics Letters*, 53(6): 367-368.

Dolphin Click Signal Detection Method Based on Multi-parameter Constraints

ZHAO Ping^{1,2,3,4}, LIU Zongwei^{2,3,4,5}, JIANG Ying^{2,3,4,5}, LÜ Liangang^{2,3,4,5},
YANG Chunmei^{2,3,4,5}, LÜ Zhichao¹

(1. *Shandong University of Science and Technology*, Qingdao 266590, China;

2. *First Institute of Oceanography, MNR*, Qingdao 266061, China;

3. *Key Laboratory of Marine Science and Numerical Modeling, MNR*, Qingdao 266061, China;

4. *Shandong Key Laboratory of Marine Science and Numerical Modeling*, Qingdao 266061, China;

5. *Laboratory for Regional Oceanography and Numerical Modeling, Qingdao Marine Science and Technology Center*, Qingdao 266237, China)

Abstract: In order to accurately detect the click signal of dolphins in marine environment with complex noise, an automatic detection method based on multi-parameter constraints is proposed. Firstly, the original data are divided into frames, then further converted from time domain to frequency domain with FFT. After that, energy calculation is performed, and an energy threshold is set to extract the pulse signal of suspected targets. Secondly, basing on characteristics of the click signals appearing in time series and the regularity of pulse interval inside the click train, the click signal pulse train is selected from the suspected target signals by constraining the number of pulses in the click train, pulse interval and other parameters. Finally, the automatic detection result is output, so the position of the click train and the number of click in the click train are obtained. The method is verified with in situ measurements, and the results show that the average recall rate of the dolphin click signal can reach 90% and the average false detection rate is 3.6% without manual intervention. The automatic detection method proposed in this paper can support the realization of acoustic monitoring of marine mammals and provide technical support for the study of biological behavior of marine mammals.

Keywords: dolphin; click signal; automatic detection; multi-parameter constraint

Received: July 15, 2024 **Online:** June 20, 2025