



## 基于超声多重散射理论的水产养殖池鱼群计数方法

李志坚<sup>1,2</sup>, 李俊康<sup>1</sup>, 陈雷雷<sup>1</sup>, 李俊<sup>1</sup>, 胡庆松<sup>1\*</sup>

(1. 上海海洋大学工程学院, 上海 201306;

2. 上海海洋大学, 上海深渊科学工程技术研究中心, 上海 201306)

**摘要:** 对养殖池中生物数量进行实时准确评估是水产养殖作业的重要需求, 利用超声波探测技术对生物数量进行计量是一种快速高效的手段。为解决超声波探测应用在深度低的养殖池中结果误差较大的问题, 提出了一种基于变异系数的时域区间选取方法, 采用发射频率 40 kHz 的超声换能器, 在体积为 0.115 m<sup>3</sup> 的圆筒中, 进行了养殖池鱼类计数实验。结果显示, 通过选取合适时域区间和增加测量次数可以有效提高计数结果的准确性。利用该方法分别在无增氧和有增氧 2 种情况下, 对圆筒内 10~40 尾草金鱼数量进行估算, 结果的平均绝对误差分别为 0.924 和 1.769 尾。研究表明, 该基于超声多重散射理论的计数方法在增氧机持续开启时依然适用, 并且增大样本数量后, 能够进一步提高计数的精度。本研究为低深度、小面积的水产养殖池中鱼的数量评估提供了新路径。

**关键词:** 水产养殖; 渔业声学; 鱼群计数; 多重散射

**中图分类号:** S 965; TB 566

**文献标志码:** A

近年来, 工厂化养殖发展迅速, 其机械化和智能化水平远高于其他养殖方式。特别是感知装备、自动控制等核心装置的应用使得工厂化养殖能给养殖对象提供适宜且稳定的生长环境, 可有效提高生产效率和养殖效益<sup>[1-4]</sup>。对养殖池内生物量的准确估算是工厂化养殖最重要的需求之一<sup>[5-8]</sup>。传统的人工抽样方法不仅费时费力, 还会对养殖对象产生刺激和物理性的伤害, 不利于其健康生长<sup>[9-11]</sup>。通过自动感知装备对养殖对象进行非侵入式计数成为了首要选择, Hernández-Ontiveros 等<sup>[12]</sup>设计了一种嵌入式系统, 通过数字图像处理来对不同种类和大小的鱼进行计数, 但该方法受限于相机数量、鱼的重叠、光线差、水体浑浊等实际生产环境, 准确度不高。Lopes 等<sup>[13]</sup>设计了一个基于摄像机和 2 个配备线束的红线激光器的自动

系统, 实现了室内养殖生物量的估计, 相对误差约为 5%~17%, 该方法的局限性是受光线的均匀性和气泡影响较大。Saberioon 等<sup>[14]</sup>使用近红外反射系统对容器内鱼群质量进行估计, 从图像中也可分析鱼的数量, 但由于近红外光的吸收、折射和散射, 该方法在垂直维度上的精度较低<sup>[15]</sup>。为解决鱼类重叠的问题, Yu 等<sup>[16]</sup>提出了一种基于多模块和注意力机制的养殖鱼计数模型, 提高了计数精度。基于光学检测方法受环境光照的影响较大, 特别是在池水浊度较高或鱼类密度较大时, 难以保证测量的准确性。非侵入式的声学估算方法应用也非常广泛, 回声测深仪通过回波计数法和回波积分法来估算鱼类生物量<sup>[17-19]</sup>, 受环境条件变化的影响较小。沈蔚等<sup>[20]</sup>利用双频识别声呐 (DIDSON) 实现了较高精度的鱼类目标识别与计数,

收稿日期: 2024-07-29 修回日期: 2024-11-04

资助项目: 上海市水产动物良种创制与绿色养殖协同创新中心项目 (2021 科技 02-12)

第一作者: 李志坚 (照片), 从事机器视觉、图像处理和信号分析研究, E-mail: zj-li@shou.edu.cn

通信作者: 胡庆松, 从事渔业工程装备研究, E-mail: qshu@shou.edu.cn



但这类探测仪大多应用在海洋和湖泊等有较大水深的区域。国内外典型回声探测仪的最小工作水深在 50 m 以上<sup>[11]</sup>, 声呐相机的最小工作水深也在 0.7 m 以上<sup>[10]</sup>。在水深较浅时, 超声波存在多重散射, 普通的回声探测仪并不适用<sup>[9]</sup>。

工厂化养殖中的养殖池水深普遍低于 1.5 m, 直径小于 6.0 m, 在养殖池深度和面积较小时, 超声波会产生多重散射效应, 不满足上述回声测深仪或者声呐相机的使用条件。De Rosny 等<sup>[21]</sup>提出了一种基于多重散射的互相关技术, 在 1.8 L 的烧杯和 30 m<sup>3</sup> 的水箱 2 种空间尺度下对含有散射体的圆筒形腔体进行多次测量来计算散射体对腔体界面声学回波的平均影响, 进而计算腔体内的鱼群密度, 证明了方法的可行性, 同时证明了只要能在腔体内激发强烈的混响, 腔体体积对估算结果没有影响。该方法不需要鱼类目标强度等先验知识, 也不需要回波声强的绝对测量, 便可准确估计出养殖池中鱼的数量, 但需要大量样本来证明平均影响和鱼数量之间的关系, 同时也没有证实有气泡影响下的有效性。

本团队在相关研究基础上, 针对养殖池中生物量计数的需求, 采用了收发合置的超声换能器, 通过基于变异系数的时域区间选取, 提出了基于超声多重散射理论的水产养殖池鱼类计数方法, 利用此方法在打开和关闭增氧机 2 种场景下进行了鱼类数量计数实验, 均得到了较好的效果。

## 1 材料与方 法

### 1.1 实验装置

实验装置见图 1, 为防止样本鱼的长度变化对实验结果的影响, 实验的测量对象为全长 (包含尾鳍) 8~10 cm 和 13~15 cm 的草金鱼 (*Carassius auratus*)。所有实验动物均按照上海海洋大学动物实验伦理审查委员会制定的实验动物福利伦理原则进行养殖管理及实验操作。实验装置的腔体材料为透明亚克力圆筒, 外径 350 mm、壁厚 5 mm、内径 340 mm、高 1 200 mm。其顶部安装有收发合置的超声换能器, 该换能器固定在直径 400 mm 的亚克力圆板上, 亚克力圆板同心放置在圆筒上。该换能器为宇征公司生产的 DYW-40/200-NA, 在 40 kHz 的工作频率时的半功率角为 (35.0±3.5)°, 最小阻抗为 (200±40) Ω。实验时, 换能器

<https://www.china-fishery.cn>



图 1 实验场景 (a) 及实验装置结构 (b)

Fig. 1 Experimental scene (a) and experimental setup structure (b)

的照射方向垂直向下, 距离腔体底部为 1 120 mm, 能够满足在腔体内激发强烈混响的要求。

### 1.2 弹性平均自由程估计方法

多重散射理论中的不相干近似理论 (ISA, Independent Scattering Approximation) 证明<sup>[22]</sup>, 波与多个散射体发生相互作用时, 在某些情况下, 可以将相干散射和不相干散射分开处理<sup>[23]</sup>。不相干近似理论中重要的结论是弹性平均自由程和总散射截面成反比, 可以表示为:

$$l_s = \frac{1}{n\sigma_T} \quad (1)$$

式中,  $l_s$  表示弹性平均自由程,  $n$  表示散射体密度,  $\sigma_T$  表示散射体的总散射截面。向具有固定形状和体积的腔体发射大量的超声脉冲, 如果腔体内具有可移动的散射体, 则某次发射的超声脉冲产生的回波信号由一个静止的腔体和多个运动的散射体产生的回声组成。对于一次发射与接收的过程来说, 这一叠加结果不可区分, 但是在长时间的多次测量过程中, 由于腔体的形状与体积固定, 由腔体产生的回声在多次测量中具有相关性, 而由于散射体的移动, 散射体产生的回声是不具有相关性的<sup>[24-26]</sup>。故对多次测量得到的多个回波信号进行平均, 来自腔体边界的回声信号得到增强, 而由散射体产生的回声会衰减。

设  $I_c(t)$  为平均相干强度,  $I_i(t)$  为平均强度,  $N$  表示总测量次数,  $h_k(t)$  表示第  $k$  次测量的  $t$  时刻回波信号强度:

$$I_c(t) = \frac{1}{N} \sum_{k=1}^N h_k(t) h_{k+1}(t) \quad (2)$$

$$I_i(t) = \frac{1}{N} \sum_{k=1}^N h_k^2(t) \quad (3)$$

在  $t$  远小于  $l_s/c$  时, 满足如下关系:

$$I(t) = \frac{I_c(t)}{I_i(t)} \approx \exp(-ct/l_s) \quad (4)$$

式中,  $c$  为介质中的声速, 取 1450 m/s。则弹性平均自由程可通过平均相干强度和平均强度的比值估计:

$$l_s = -\frac{c}{\frac{d \ln(I(t))}{dt}} \quad (5)$$

### 1.3 鱼群密度估计方法

当养殖池中鱼的特征比较一致时, 公式 (1) 中总散射截面  $\sigma_T$  是一个较稳定的值。在已知鱼群密度的情况下, 利用弹性平均自由程估计方法计算出多种不同鱼群密度对应的  $l_s$  的值, 取  $1/l_s$  进行直线拟合, 可得:

$$\frac{1}{l_s} = aN \quad (6)$$

$$a = \frac{\sigma_T}{V} \quad (7)$$

公式 (6) 所示为  $1/l_s$  与鱼数量  $N$  的关系, 式中  $a$  表示通过直线拟合得到的直线斜率,  $l_s$  表示由公式 (2)~(5) 通过回波信号估算出的弹性平均自由程。斜率  $a$  与总散射界面的关系如公式 (7) 所示, 式中  $V$  表示腔体体积。在腔体体积固定, 鱼的特征一致的情况下,  $1/l_s$  与鱼的数量  $N$  成正比。

在对未知鱼数量的测量过程中, 从回波信号中可以估算出弹性平均自由程, 已知直线斜率, 就可以估算出鱼数量。

$$N_{\text{估}} = \frac{1}{al_s} \quad (8)$$

### 1.4 基于变异系数的时域区间选取方法

首先, 将第  $n$  次收发得到的回波幅度与第  $n+1$  次收发得到的回波幅度相乘求和并平均可得到平均相干强度, 将第  $n$  次收发得到的回波幅度的平方求和并平均可得到平均强度, 然后对平均相干强度和平均强度的比值  $I(t)$  进行有效时域区间的选取。收发合置的换能器存在盲区,  $I(t)$  最开始为 0, 迅速攀升为 1。基于样本需要普适性的考虑, 起始时间选取方法为找出样本组  $I(t)$  分别开始下降到 0.85、0.90、0.95 共 3 种程度下的数据点

位置并计算平均值。经过一段时间的传播之后, 声波能量会不断衰减, 低于换能器接收灵敏度之后的数据便没有使用价值, 故需要对有效数据的结束时间进行选取。弹性平均自由程的倒数与散射体数量呈正比例函数关系,  $\sigma_T$  决定正比例函数的斜率, 因此, 鱼群密度估算方法的准确性对  $\sigma_T$  的离散程度有要求, 故可以通过比较选取不同结束时间时多组  $\sigma_T$  的变异系数大小来确定结束时间点。对于样本中  $n$  组已知鱼群密度情况下计算得到的  $I(t)$ , 具体处理步骤如下:

①通过求  $I(t)$  下降到 0.85、0.90、0.95 时的平均时间, 即为起始时间。

②起始时间之后, 计算  $n$  组  $I(t)$  首次为 0 的平均时刻, 记为  $T$ 。

③ $T$  时刻之前一段时间内, 通过一定步长选取  $m$  个结束时间点。

④计算  $m$  个结束时间点对应的  $n$  个  $\sigma_T$  值。

⑤计算每个结束时间点对应的  $n$  个  $\sigma_T$  值的变异系数进行比较。

其中对应变异系数最小的时间点即可确定为结束时间。

### 1.5 实验方案

考虑在实际养殖场景中, 鱼在腔体中的分布并不总是均匀的, 聚集、靠近腔体边界、沉底休息等情况相对更为频繁, 例如当鱼靠近腔体边界且静止时, 边界和鱼体并不能很好地区分。为了保证多种鱼群密度下方法的鲁棒性, 实验时, 样本组一共采集圆筒内 10~30 尾草金鱼、空腔、空腔且水面有轻微扰动等情况下共 23 组数据。采集空腔情况下的回波数据是为了验证弹性平均自由程估计方法的准确性, 而测量空腔且水面具有轻微扰动情况下的回波数据是考虑到鱼在游动时会浮到水面, 对水面有轻微扰动, 这一扰动会对结果产生影响。实验组分别在无增氧和有增氧 2 种场景下采集了 12 组 10~40 尾草金鱼的回波数据。为了验证估算方法的实用性和预测性, 实验组鱼的数量增加了 31~40 尾的情况。实验过程中, 鱼的数量由 10 依次增至 40 然后由 40 依次减至 10, 每次进行鱼数量改变之后, 都要将固定有换能器的亚克力圆板同心放置在圆筒上, 以保证换能器的位置不变。

每组数据由 100 次收发得到的回波序列组成。实验采用的收发合置换能器的发射频率为 40 kHz, 采集板卡采样频率为 80 kHz, 每 80 个数据点代



表 1 ms, 一次测量采集点数为 10 000 个, 每组数据的获得时间约为 3 min 47 s。

### 1.6 评价指标

实验采集到的数据使用 Matlab 进行处理, 12 组数据的估算结果取平均值作为最终的估算结果。采用平均绝对误差 (MAE, mean absolute error)、均方根误差 (RMSE, root mean square error)、相关系数 (CV, correlation coefficient) 对基于超声多重散射理论的水产养殖池鱼群计数方法进行评价。MAE 是衡量预测值与真实值之间差异的指标, 越小代表估算结果越准确, 可以很好地体现结果的准确性。RMSE 同样可以用来衡量观测值与真实值之间的偏差, 但是相较于 MAE 更能体现出结果中异常值的存在。CV 表示估算值与真实值的相关系数, 可以判断估算数量与实际数量的相关程度, 相关系数越接近于 1, 说明估算结果越准确。评价指标计算公式:

$$MAE = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n |y_i - \hat{y}_i| \quad (9)$$

$$RMSE = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (y_i - \hat{y}_i)^2} \quad (10)$$

$$r = \frac{n \sum_{i=1}^n y_i \hat{y}_i - \sum_{i=1}^n y_i \sum_{i=1}^n \hat{y}_i}{\sqrt{n \sum_{i=1}^n y_i^2 - \left(\sum_{i=1}^n y_i\right)^2} \sqrt{n \sum_{i=1}^n \hat{y}_i^2 - \left(\sum_{i=1}^n \hat{y}_i\right)^2}} \quad (11)$$

式中,  $n$  为实验组草金鱼的数量种类,  $y_i$  为鱼数的真实值,  $\hat{y}_i$  为鱼数的最终估算值,  $r$  为估算值与真实值的相关系数。

## 2 结果

### 2.1 有效时域区间选取

图 2-a 为样本组 30 尾草金鱼对应的超声换能器 100 次收发的回波数据, 只有中间时段的回波幅度是出现变化的, 表明前后收发回波幅度不一致。图 2-b 为这些回波数据经过处理后得到的  $I(t)$  随时间变化的情况, 起始为 1, 然后不断衰减, 直至为 0, 红框标出的即为需要选取的目标区间。

**起始时间选取** 起始时间选取方法为找出样本共 21 组  $I(t)$  分别开始下降到 0.85、0.90、0.95 共 3 种程度下的数据点位置并计算平均值, 结果如表 1 所示, 3 种情况下的平均值为 1 135, 即第 14 毫秒为起始时间。

**结束时间选取** 利用基于变异系数的时域区间选取方法, 以 14 ms 为起点, 从 21 ms 到 28 ms, 步长 1 ms, 分别计算样本组 10~30 尾的数据对这 8 个时间点的  $\sigma_T$  值, 计算这 21 种鱼数量情况下对应  $\sigma_T$  的变异系数。图 3 为变异系数结果, 22 ms 时变异系数为 0.124 最小, 说明该时刻  $\sigma_T$  值是 8 种情况中最稳定的。故数据处理区间确定为 14~22 ms, 即时域数据点第 1 120 到 1 760 个。

在此区间内对  $I(t)$  取对数并进行平滑滤波, 然后用最小二乘法进行直线拟合。图 4 所示为该

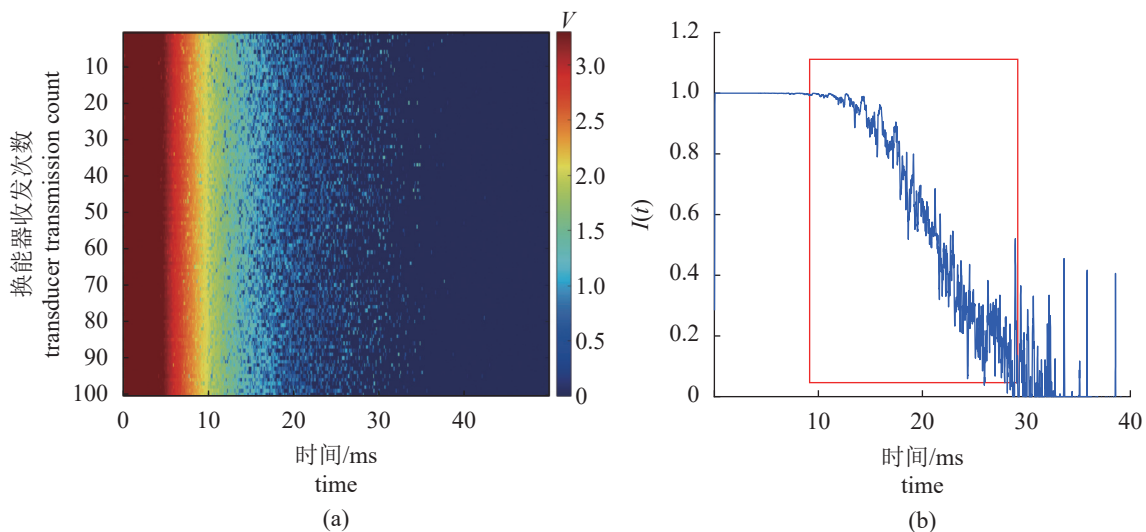


图 2 30 尾鱼对应换能器 100 次收发的数据 (a) 以及  $I(t)$  随时间的变化情况 (b)

Fig. 2 Data from 100 transceiver cycles of the transducer for 30 fishes (a) and the variation of  $I(t)$  over time (b)

表 1  $I(t)$  不同下降程度下 21 种鱼数量的数据点序号  
 Tab. 1 Data point index for 21 types of fish numbers under different degrees of  $I(t)$  decline

鱼的数量/尾 number of fishes	下降程度 degree of decline		
	0.85	0.90	0.95
10	1 235	1 191	1 072
11	1 364	1 245	1 001
12	1 445	1 232	1 083
13	1 345	1 211	1 121
14	1 372	1 195	1 106
15	1 247	1 223	1 064
16	1 241	1 123	961
17	1 355	1 120	1 073
18	1 248	1 194	1 105
19	1 241	1 108	1 072
20	1 207	1 205	969
21	1 206	1 099	962
22	1 220	1 113	1 058
23	1 188	1 096	954
24	1 199	1 110	956
25	1 236	1 089	962
26	1 182	1 084	963
27	1 221	1 003	956
28	1 199	1 080	955
29	1 189	1 079	953
30	1 208	1 077	941

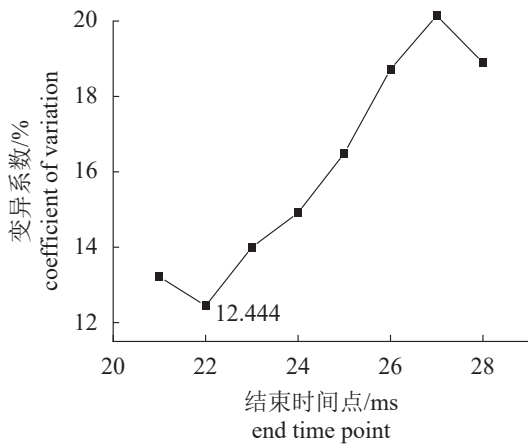


图 3 起始点 14 ms 时不同结束时间点  
 对应  $\sigma_T$  的变异系数

Fig. 3 Coefficient of variation of  $\sigma_T$  at different end time points with a starting point of 14 ms

情况下  $\ln(I(t))$  的拟合结果, 取拟合直线的斜率, 代入公式 (6) 即可估算出  $l_s$  的值。

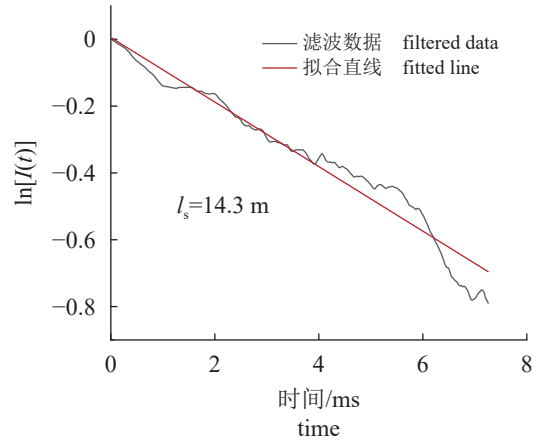


图 4 30 尾鱼时  $\ln[I(t)]$  的拟合结果

Fig. 4 The fitting results of  $\ln(I(t))$  for 30 fishes

在 14~22 ms 的区间内对样本组 10~30 尾鱼的数据进行处理, 得到 21 个  $1/l_s$  的值并用最小二乘法进行直线拟合, 拟合结果如图 5 所示。拟合得到的直线斜率为  $a=2.036 \times 10^{-3}$ , 截距为 0.006, 符合  $1/l_s$  与  $N$  成正比例函数的理论。

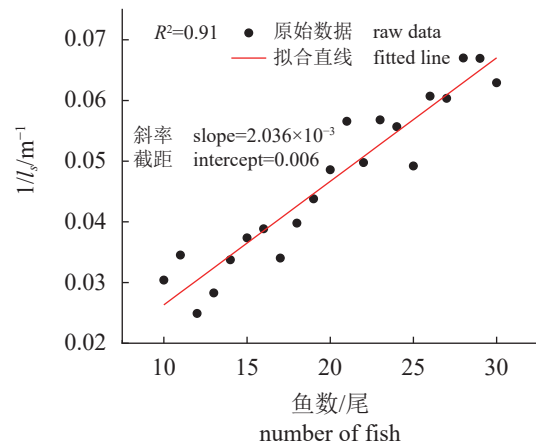


图 5 用最小二乘法对 21 个  $1/l_s$  的值进行直线拟合的结果

Fig. 5 The results of linear fitting using the least squares method for 21 values of  $1/l_s$

## 2.2 空腔情况下的实验

样本组测量的空腔情况下的  $I(t)$  的结果如图 6-a 所示, 当圆筒空无一物且水面无扰动时,  $I(t)$  的值基本维持在 1 的位置, 只有在 5.31 ms 附近, 出现了约 0.03 幅度的变动, 说明弹性平均自由程估计方法是可靠的, 此时用参数  $a=2.036 \times 10^{-3}$  计算鱼群数量, 结果为 0.03。而在水面施加了轻微扰动之后, 实验结果如图 6-b 所示, 此时计算结果为 0.13, 可见水面的扰动会给测量结果带来一定的误差, 但误差较小。

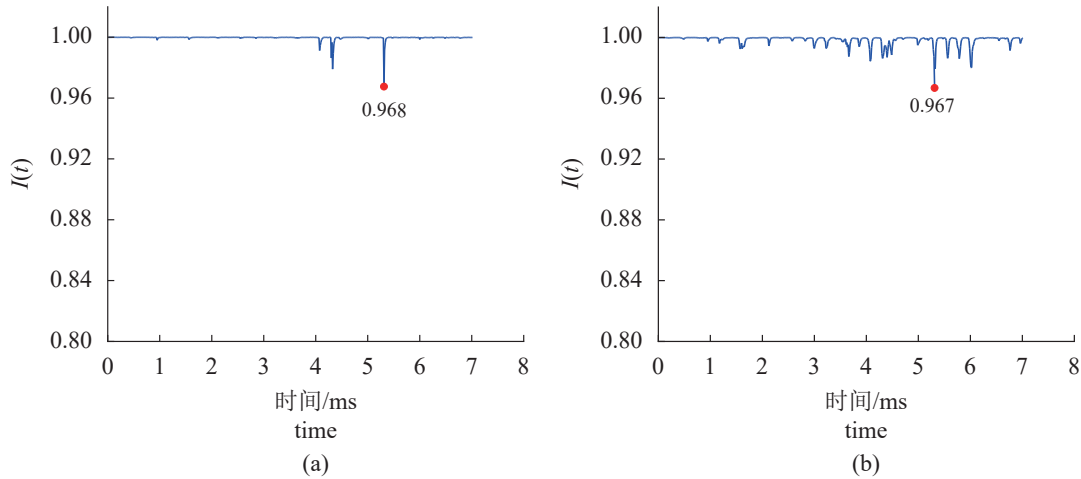


图 6 无鱼时水面静止 (a) 和水面施加轻微扰动 (b) 对应  $I(t)$  随时间的变化

Fig. 6 The variation of  $I(t)$  over time for still water surface (a) and slightly disturbed water surface (b) without fish

### 2.3 无气泡环境下的实验

实验组的 12 次计数结果如图 7-a 所示, 分别在实际鱼数为 15、16、22、24、26、31 尾时出现了误差较大的情况。对 12 次估算结果取平均值, 最终 10~40 尾草金鱼的估算结果与实际尾数进行比较, 如图 7-b 所示, 最大误差出现在实际鱼数为 19 尾, 估算结果为 21.429, 最小误差出现在 10 尾, 估算结果为 9.979 尾。

依次增加测量次数, 计算平均的结果, 并统计估计值与真值的平均绝对误差、均方根误差和相关系数, 12 次结果如表 2 所示, 3 种评价指标随着测量次数的增加均有所改善。

评价指标随测量次数增加的变化趋势如图 8 所示, 随着测量次数的增加, 平均绝对误差和均方根误差有下降的趋势, 而相关系数有所增加,

测量次数高于一定数量后, 3 种评价指标趋于稳定, 说明随着测量次数的增加, 估算准确性会增加, 但增加到一定程度后, 再增大测量次数将失去意义。

为了验证基于变异系数的时域区间选取方法的有效性, 分别对 21~28 ms 的 8 种情况进行了计算, 得到实验组 12 组数据 10~40 尾的最终估算结果, 并计算了 3 种评价指标。图 9-a 所示为平均绝对误差和均方根误差与不同结束时间点的关系, 可以看出二者都在 22 ms 时得到最小值, 且变化趋势与变异系数保持了高度的一致性。图 9-b 所示为选取不同结束时间点时估算值与真值的相关系数, 相关系数同样在结束时间点为 22 ms 时取得最优值。同时其变化趋势也与变异系数的变化趋势有较高的一致性。据此说明基于变异系数的

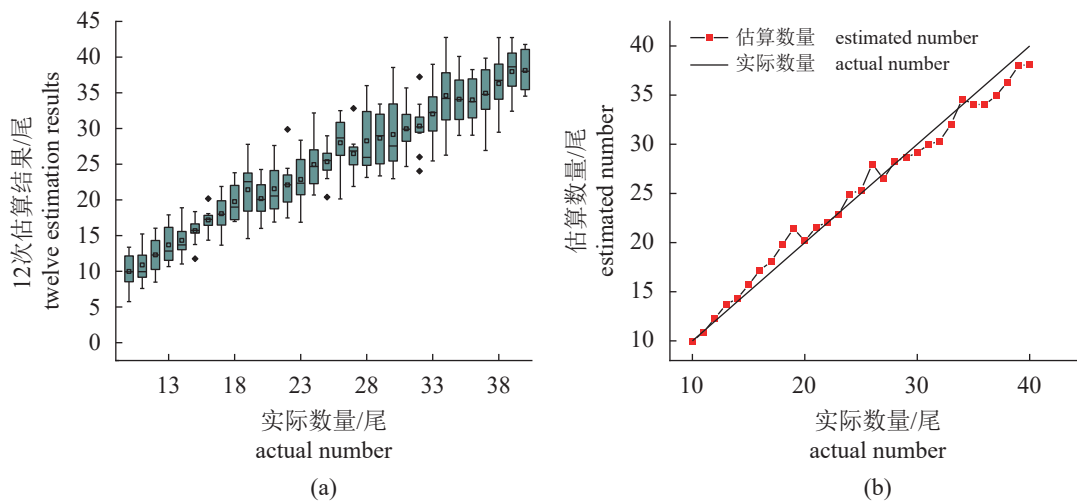


图 7 10~40 尾鱼的 12 次估算结果 (a) 和取平均值的结果 (b)

Fig. 7 Twelve estimation results (a) and the average (b) for 10-40 fishes

表 2 不同测量次数下的估计值与真值之间的误差和相关系数

Tab. 2 Errors and the correlation coefficient between estimated values and true values at different measurement counts

测量次数 number of measurements	平均绝对误差 MAE	均方根误差 RMSE	相关系数 CV
1	2.615	3.353	0.928
2	2.222	2.896	0.948
3	1.787	2.452	0.971
4	1.498	1.985	0.981
5	1.660	2.096	0.988
6	1.448	1.746	0.990
7	1.413	1.683	0.992
8	1.225	1.440	0.994
9	1.103	1.294	0.995
10	0.946	1.215	0.995
11	0.977	1.248	0.994
12	0.924	1.148	0.995

时域区间选取方法是可行的。

### 2.4 气泡环境下的实验

实际养殖时需要不间断使用增氧机, 在使用增氧机产生了大量小气泡的环境下进行了方法可行性的验证实验。增氧机最大功率为 1 W, 最大出气量 0.8 L/min, 工作电压可在 3~5 V 调节, 出气口位于水面下方 0.4 m 处。

表 3 所示为增氧机不同出气量时对 20 尾鱼的估算, 各工作电压下增氧机的出气量由型号为

LZT-08A002M-V 的浮子流量计测量得出。在  $a=2.036 \times 10^{-3}$  和 14~22 ms 区间内进行处理, 出气量为 0 L/min 时, 结果准确, 说明气管和气泡石的存在对结果的影响可忽略。随着出气量增大, 估算的结果偏差变大且不可接受。查阅相关文献可知, 气泡层的存在会引起声波的衰减<sup>[27-29]</sup>, 同时微小气泡对超声传播的影响也不可忽略<sup>[30]</sup>。

增氧机工作电压 5.0 V 时,  $I(t)$  首次为 0 的时间为 14.788 ms (图 10)。可见气泡的存在让  $I(t)$  衰减的速率变快, 故区间 14~22 ms 和拟合得到的  $a=2.036 \times 10^{-3}$  不再适用。为了验证鱼群计数方法在增氧机工作时仍然有效, 在增氧机工作电压为 5.0 V、出气量为 0.80 L/min 的情况下进行了 1 组 10~30 尾的样本组和 12 组 10~40 尾的实验组共 13 组测量工作, 实验对象为全长 (包含尾鳍) 13~15 cm 的草金鱼。按照基于变异系数的时域区间选取方法确定处理区间为 6~12 ms, 对应最小变异系数为 0.238, 由样本组拟合得到的直线斜率  $a=3.044 \times 10^{-3}$ , 计算 12 组 10~40 尾的结果并取平均值, 得到的结果如图 11 所示。估算值与真实值的平均绝对误差为 1.769, 均方根误差为 2.054, 相关系数为 0.983, 误差相对于无增氧机时有所增加, 相关系数有所下降, 但是在可接受范围之内。

估算结果的误差分布情况如图 12 所示, 在实际鱼数为 15~38 尾的区间内, 计数结果相较于实际数量偏小。根据实际情况分析, 大量小气泡的存在让  $\sigma_T$  的最小变异系数从 0.124 增大至 0.238, 即影响了总散射截面  $\sigma_T$  的离散程度, 导致在样本

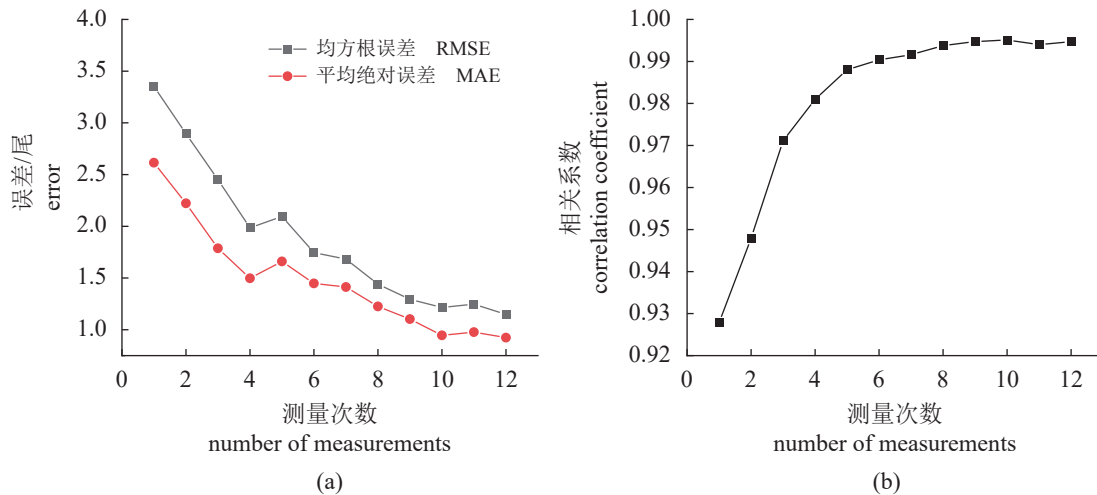


图 8 RMSE、MAE (a) 和相关系数 (b) 与测量次数的关系  
Fig. 8 Relationships between RMSE, MAE (a), and the correlation coefficient (b) with the number of measurements

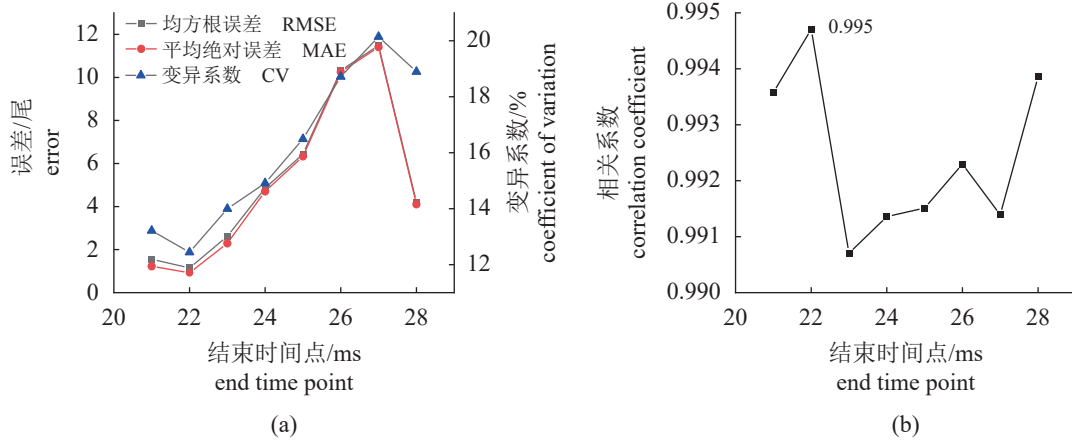


图 9 RMSE、MAE (a) 和相关系数 (b) 与结束时间点的关系

Fig. 9 Relationships between RMSE, MAE (a), and the correlation coefficient (b) with end time points

表 3 增氧机不同出气量下对 20 尾鱼的估算结果

Tab. 3 Estimated results for 20 fishes under different air output of the aerator

工作电压/V working voltage	出气量/(L/min) outgas	估算数量/尾 estimated quantity
0	0	19.88
3	0.28	53.56
3.5	0.35	100.71
4.0	0.50	131.95
4.5	0.72	164.18
5.0	0.80	229.60

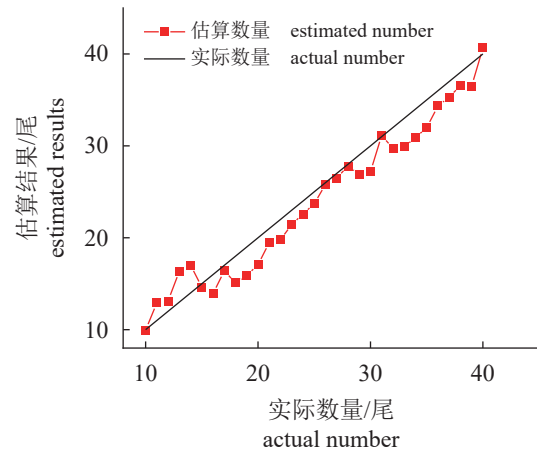


图 11 气泡环境下 10~40 尾鱼群数量估算结果

Fig. 11 Estimated results of fish group numbers from 1 to 40 in a bubble environment

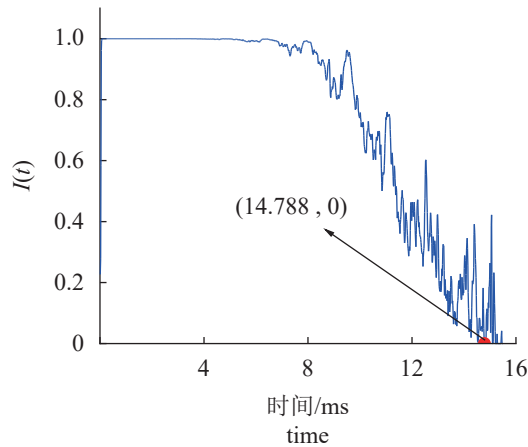


图 10 鱼数量为 20 尾且增氧机工作在 5.0 V 时  $I(t)$  值与时间的关系

Fig. 10 The relationship between  $I(t)$  value and time when the number of fish is 20 and the aerator works at 5.0 V

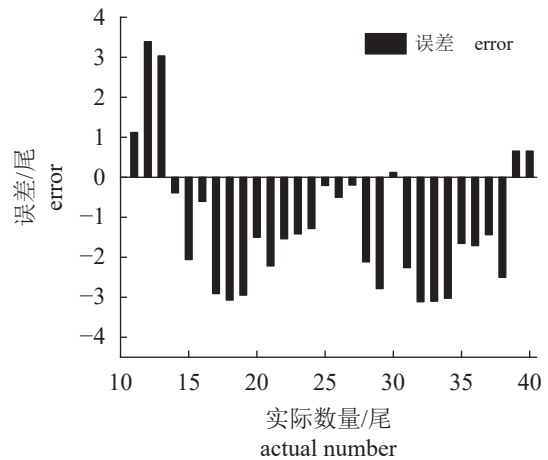


图 12 估算结果的误差分布情况

Fig. 12 Distribution of errors in the estimated results sample group, at this time the sample group has 10~30 fish in total 2 groups of data, according to formula (7) calculate these 2 groups of data corresponding  $a$  are  $3.044 \times 10^{-3}$

组每尾鱼只有 1 次测量的情况下拟合得到的直线斜率  $a$  不具有代表性。增大样本量可提高拟合精度和样本组的代表性。将实验组的 1 组数据加入



和  $2.910 \times 10^{-3}$ , 二者平均结果为  $2.977 \times 10^{-3}$ 。

增大样本数量后, 进行了草金鱼数量分别为 15、20、25、30、35 和 40 尾的 12 次重复测量, 样本量增加前后对应的估算结果如表 4 所示, 样本量增加前后估算结果的平均绝对误差分别为 1.587 和 1.059, 由此可知, 增加样本量可以有效提高在增氧条件下计数结果的准确性。

表 4 样本量增加前后的估算结果对比

Tab. 4 Comparison of estimated results before and after increasing the sample size

实际值/尾 actual values	原样本量对应估算 结果/尾 estimated results corresponding to the original sample sizes	样本量增加后对应 估算结果/尾 estimated results corresponding to the increased sample sizes
15	14.036	14.322
20	15.964	16.289
25	24.098	24.589
30	29.060	29.652
35	33.480	34.162
40	38.834	39.630

### 3 讨论

基于超声多重散射理论来评估低深度、小面积的水产养殖池内的养殖鱼数量, 分别选取了 10~30 尾作为样本组, 10~40 尾作为实验组进行实验, 另外针对养殖时需要增氧的需求, 进行了在增氧环境下的对照实验。通过估算值和真实值的平均绝对误差、均方根误差以及相关系数这 3 种评价指标对估算结果进行了分析, 从这 3 种评价指标与变异系数存在高度相关性可以得知, 提出的基于变异系数的时域区间选取方法可有效提高鱼群密度的评估精度。实验证明, 增氧时鱼缸内存在大量小气泡, 此时, 利用基于变异系数的时域区间选取方法截取有效的区间来进行处理, 该估算方法依旧适用, 只是大量气泡的影响会导致总散射截面  $\sigma_T$  的离散程度变大, 从而使该估算方法的评估精度下降, 此时, 可通过提高样本量来有效解决该问题。

基于机器视觉和近红外光的鱼群计数方法可以在光线较好的环境条件下快速且准确地对水产养殖池生物量进行估计, 但是其受到鱼类重叠、水浑浊度、光线、气泡等因素的影响。基于声呐相机和基于回声测深仪的鱼群计数方法可以有效地对海洋或湖泊内的生物资源量进行调查, 但是受限于工厂化养殖中养殖池的面积和水深, 应用

效果不佳。本研究提出的基于多重散射理论鱼群计数方法可应用于工厂化养殖池中对养殖对象进行计数, 同时实验证明了该方法在有增氧需求的场景下仍然适用, 可为超声技术在低深度、小面积的水产养殖池中的应用提供参考。

感谢上海高水平地方高校创新团队——渔业工程与装备团队的支持。

(作者声明本文无实际或潜在的利益冲突)

### 参考文献 (References):

- [1] 王建军, 徐思雨, 赵文武, 等. 大食物观背景下中国淡水养殖业高质量发展的挑战与对策 [J]. 水产学报, 2023, 47(11): 119605.  
Wang J J, Xu S Y, Zhao W W, *et al.* Challenges and countermeasures for the high quality development of China's freshwater aquaculture industry under the background of the integrated food security thought[J]. *Journal of Fisheries of China*, 2023, 47(11): 119605 (in Chinese).
- [2] 莽琦, 徐钢春, 朱健, 等. 中国水产养殖发展现状与前景展望 [J]. 渔业现代化, 2022, 49(2): 1-9.  
Mang Q, Xu G C, Zhu J, *et al.* Developmental status and prospective vision for China's aquaculture[J]. *Fishery Modernization*, 2022, 49(2): 1-9 (in Chinese).
- [3] 董双林, 董云伟, 黄六一, 等. 迈向远海的中国水产养殖: 机遇、挑战和发展策略 [J]. 水产学报, 2023, 47(3): 039601.  
Dong S L, Dong Y W, Huang L Y, *et al.* Toward offshore aquaculture in China: opportunities, challenges and development strategies[J]. *Journal of Fisheries of China*, 2023, 47(3): 039601 (in Chinese).
- [4] 刘世晶, 李国栋, 刘晃, 等. 中国水产养殖装备发展现状 [J]. 水产学报, 2023, 47(11): 119615.  
Liu S J, Li G D, Liu H, *et al.* Current development status of aquaculture equipment in China[J]. *Journal of Fisheries of China*, 2023, 47(11): 119615 (in Chinese).
- [5] Almansa C, Reig L, Oca J. The laser scanner is a reliable method to estimate the biomass of a Senegalese sole (*Solea senegalensis*) population in a tank[J]. *Aquacultural Engineering*, 2015, 69: 78-83.
- [6] 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.  
Tang Y. Research advance in fisheries resources assessment by using the acoustic technology in China: a

- review[J]. Journal of Dalian Ocean University, 2023, 38(2): 185-195 (in Chinese).
- [ 7 ] Hassan S G, Ahmed S, Iqbal S, *et al.* Fish as a source of acoustic signal measurement in an aquaculture tank: acoustic sensor based time frequency analysis[J]. *International Journal of Agricultural and Biological Engineering*, 2019, 12(3): 110-117.
- [ 8 ] 万树杰, 陈新军, 童剑锋. 声散射模型在鱼类目标强度和种类识别研究中的应用及其进展 [J]. 上海海洋大学学报, 2023, 32(1): 171-180.  
Wan S J, Chen X J, Tong J F. Review on acoustic scattering models and its applications used in fish body target strength and fish species classification[J]. Journal of Shanghai Ocean University, 2023, 32(1): 171-180 (in Chinese).
- [ 9 ] Li D L, Hao Y F, Duan Y Q. Noninvasive methods for biomass estimation in aquaculture with emphasis on fish: a review[J]. *Reviews in Aquaculture*, 2020, 12(3): 1390-1411.
- [10] Li D L, Du Z Z, Wang Q, *et al.* Recent advances in acoustic technology for aquaculture: a review[J]. *Reviews in Aquaculture*, 2024, 16(1): 357-381.
- [11] 宗艳梅, 魏珂, 李国栋, 等. 海洋渔业声学装备关键技术研究进展 [J]. *渔业现代化*, 2021, 48(3): 28-35.  
Zong Y M, Wei K, Li G D, *et al.* Research progress on key technologies of marine fishery acoustic equipment[J]. *Fishery Modernization*, 2021, 48(3): 28-35 (in Chinese).
- [12] Hernández-Ontiveros J M, Inzunza-González E, García-Guerrero E E, *et al.* Development and implementation of a fish counter by using an embedded system[J]. *Computers and Electronics in Agriculture*, 2018, 145: 53-62.
- [13] Lopes F, Silva H, Almeida J M, *et al.* Fish farming autonomous calibration system[C]//IEEE.OCEANS2017-Aberdeen. Aberdeen: IEEE, 2017: 1-6.
- [14] Saberioon M, Cisař P. Automated within tank fish mass estimation using infrared reflection system[J]. *Computers and Electronics in Agriculture*, 2018, 150: 484-492.
- [15] Lin K, Zhou C, Xu D M, *et al.* Three-dimensional location of target fish by monocular infrared imaging sensor based on a L-z correlation model[J]. *Infrared Physics & Technology*, 2018, 88: 106-113.
- [16] Yu X N, Wang Y Q, An D, *et al.* Counting method for cultured fishes based on multi-modules and attention mechanism[J]. *Aquacultural Engineering*, 2022, 96: 102215.
- [17] 张俊, 王新良, 赵宪勇, 等. 渔业声学数据后处理中积分阈的选择与优化 I: 目标离散分布状态下积分阈的确定 [J]. *渔业科学进展*, 2011, 32(4): 41-47.  
Zhang J, Wang X L, Zhao X Y, *et al.* Definition and optimization of integration threshold in the post-processing of fisheries acoustic data I: determination of integration threshold for scattered distribution[J]. *Progress in Fishery Sciences*, 2011, 32(4): 41-47 (in Chinese).
- [18] 张慧杰, 危起伟, 杨德国. 回声探测仪的发展趋势及渔业应用 [J]. *水利渔业*, 2008, 28(1): 9-13.  
Zhang H J, Wei Q W, Yang D G. Development trend of echosounders and their application in fisheries[J]. *Reservoir Fisheries*, 2008, 28(1): 9-13 (in Chinese).
- [19] 杜伟东. 多波束探鱼声纳关键技术研究 [D]. 哈尔滨: 哈尔滨工程大学, 2015.  
Du W D. Research on key techniques of multibeam fish-finding sonar[D]. Harbin: Harbin Engineering University, 2015 (in Chinese).
- [20] 沈蔚, 朱振宏, 张进, 等. 基于双频识别声呐的鱼类目标识别与计数 [J]. *渔业现代化*, 2020, 47(6): 81-87.  
Shen W, Zhu Z H, Zhang J, *et al.* Fish target recognition and counting based on Dual-frequency Identification Sonar[J]. *Fishery Modernization*, 2020, 47(6): 81-87 (in Chinese).
- [21] De Rosny J, Roux P. Multiple scattering in a reflecting cavity: application to fish counting in a tank[J]. *The Journal of the Acoustical Society of America*, 2001, 109(6): 2587-2597.
- [22] Lagendijk A, Van Tiggelen B A. Resonant multiple scattering of light[J]. *Physics Reports*, 1996, 270(3): 143-215.
- [23] 马晴晴. 水中二维圆柱体群的超声多重散射 [D]. 南京: 南京大学, 2021.  
Ma Q Q. Ultrasonic multiple scattering parameters of two-dimensional cylinders immersed in water[D]. Nanjing: Nanjing University, 2021 (in Chinese).
- [24] Conti S G, de Rosny J, Roux P, *et al.* Characterization of scatterer motion in a reverberant medium[J]. *The Journal of the Acoustical Society of America*, 2006, 119(2): 769-776.
- [25] Demer D A, Conti S G, De Rosny J, *et al.* Absolute measurements of total target strength from reverberation in a cavity[J]. *The Journal of the Acoustical Society of America*, 2003, 113(3): 1387-1394.
- [26] Conti S G, Demer D A. Wide-bandwidth acoustical characterization of anchovy and sardine from reverberation

- measurements in an echoic tank[J]. *ICES Journal of Marine Science*, 2003, 60(3): 617-624.
- [27] 姚美娟, 鹿力成, 孙炳文, 等. 浅海起伏海面下气泡层对声传播的影响 [J]. *物理学报*, 2020, 69(2): 024303.
- Yao M J, Lu L C, Sun B W, *et al.* Effects of wind-generated bubbles layer on sound propagation underneath rough sea surface in shallow water[J]. *Acta Physica Sinica*, 2020, 69(2): 024303 (in Chinese).
- [28] 范雨喆, 陈宝伟, 李海森, 等. 丛聚的含气泡水对线性声传播的影响 [J]. *物理学报*, 2018, 67(17): 174301.
- Fan Y Z, Chen B W, Li H S, *et al.* Linear-wave propagation in liquids containing bubbly clusters[J]. *Acta Physica Sinica*, 2018, 67(17): 174301 (in Chinese).
- [29] 武智, 李新辉, 谭细畅, 等. 淡水水体气泡的声学信号特征与识别研究——以乐昌峡水库为例 [J]. *水生态学杂志*, 2021, 42(4): 32-39.
- Wu Z, Li X H, Tan X C, *et al.* Acoustic signal features and recognition of bubbles in fresh water: a case study in Lechangxia reservoir[J]. *Journal of Hydroecology*, 2021, 42(4): 32-39 (in Chinese).
- [30] Chen J S, Zhu Z M. Ultrasound attenuation in encapsulated microbubble suspensions: the multiple scattering effects[J]. *Ultrasound in Medicine & Biology*, 2006, 32(6): 961-969.

## Fish counting method in aquaculture ponds based on ultrasonic multiple scattering theory

LI Zhijian<sup>1,2</sup>, LI Junkang<sup>1</sup>, CHEN Leilei<sup>1</sup>, LI Jun<sup>1</sup>, HU Qingsong<sup>1\*</sup>

(1. College of Engineering Science and Technology, Shanghai Ocean University, Shanghai 201306, China;

2. Shanghai Engineering Research Center of Hadal Science and Technology, Shanghai Ocean University, Shanghai 201306, China)

**Abstract:** Accurate assessment of the number of organisms in aquaculture ponds is an important requirement in aquaculture. Fish counting methods based on machine vision and near-infrared light can quickly and accurately estimate the biomass in the culture pond under better light environmental conditions, but it is affected by fish overlap, water turbidity, light, bubbles, and other factors. Fish counting method based on sonar camera and echo sounder can effectively investigate the amount of biological resources in the ocean or lake, but it is limited by the area and water depth of the aquaculture pond in the industrial aquaculture. A time domain interval selection method based on coefficient of variation was proposed to solve the problem of error in the application of ultrasonic detection in aquaculture ponds with low depth. The ultrasonic transducer with an emission frequency of 40 kHz was used to count the fish in aquaculture ponds in a cylinder with a volume of 0.115 m<sup>3</sup>. Aiming at the problem of error in the estimation results of ordinary multiple scattering theory, a time-domain interval selection method based on coefficient of variation was proposed. The method was used to estimate the number of 10-40 fishes in the cylinder without and with aeration. The results showed that the MAE was 0.924 and 1.769 fish, RMSE was 1.148 and 2.054, and the CV between estimated and actual values were 0.995 and 0.983, respectively. The results showed that the error was highly correlated with the selection of the time domain interval, and the variation coefficient and the three evaluation indexes kept consistent with the change trend of the time domain interval. By selecting the appropriate time domain interval and increasing the number of measurements, the accuracy of the counting results could be effectively improved. The research showed that the accuracy of aquatic organism counting could be effectively improved after increasing the number of samples although there were bubbles in the environment after oxygenation, which leads to a decrease in the accuracy of estimation. The experiment proved that the method was still applicable in the scene with oxygenation demand. This study provides a new path for assessing fish density in low-depth and small-area aquaculture ponds by ultrasonic technology.

**Key words:** aquaculture; fisheries acoustics; fish counting; multiple scattering

**Corresponding author:** HU Qingsong. E-mail: [qshu@shou.edu.cn](mailto:qshu@shou.edu.cn)

**Funding projects:** Shanghai Collaborative Innovation Center for Cultivating Elite Breeds and Green-culture of Aquaculture animals (2021-KJ-02-12)