◇ 研究报告 ◇

# 声学回波统计的鱼群密度评估方法\*

梁 镜<sup>1,2</sup> 许 枫<sup>1†</sup> 张 纯<sup>1</sup> 马龙双<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** 与渔业声学中传统的回波积分法相比,基于回波统计的鱼群密度评估方法具有无需回声信号绝对量和 鱼群中个体鱼的平均目标强度先验知识的优点。该文对该方法在鱼群密度评估上的应用问题进行了实验研 究,并针对鱼群密度分布的不均匀性和统计样本量偏少导致该方法评估结果偏差的问题,提出了一种基于能 量阈值的鱼群回波数据预处理方法和统计样本的改进抽样方法。研究结果表明,在鱼群密度较小、统计样本充 足的条件下,回波统计方法能有效地实现鱼群密度的评估;而在鱼群密度较大或样本量偏少情况下,利用改进 后的样本抽样法能有效提高回波统计法的鱼群密度评估精度。

关键词 鱼群密度,回波统计,声学评估,回波积分 中图法分类号:TB566 文献标识码:A 文章编号:1000-310X(2019)02-0279-08

DOI: 10.11684/j.issn.1000-310X.2019.02.019

## An acoustic approach of fish number density estimation with echoes statistic

LIANG Jing<sup>1,2</sup> XU Feng<sup>1</sup> ZHANG Chun<sup>1</sup> MA Longshuang<sup>1,2</sup>

Institute of Acoustics, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100190, China)
 University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China)

**Abstract** Fish number density can be determined from echoes statistic approach. Compared with the conventional echo-integration method of fisheries acoustics, the two main advantages of the echoes statistic approach are that no absolute amount of the sonar echo signal and no priority knowledge of fish target strength is required. This paper presents an experiment study on the fish number density estimation application of this method. For questions that the estimation result will be bias as the inhomogeneity of the fish distribution and the lack of statistic samples in cruise survey, a method of data choosing based on energy threshold and an improvement of the sampling method is proposed. The result indicates that this echoes statistic method is more precise under low fish density condition, and with the modified sampling method the error will be decreased in the denser fish density and lack of statistic samples situation.

Key words Fish number density, Echoes statistics, Acoustic estimation, Echo integration

<sup>2018-06-06</sup> 收稿; 2018-12-06 定稿

<sup>\*</sup>国家自然科学基金项目 (11774376), 国家海洋公益性专项资助项目 (201505025), 山东省科技发展计划资助项目 (2013GHT11517, 2014GGF01078)

作者简介:梁镜(1990-),男,湖北赤壁人,博士研究生,研究方向:水声信号处理。

<sup>&</sup>lt;sup>†</sup>通讯作者 E-mail: xf@mail.ioa.ac.cn

## 0 引言

渔业资源声学评估由于具有快捷方便、可持 续观测且不危害生物资源等优点,受到了广泛关 注<sup>[1-5]</sup>。近几十年,除传统的回波积分、回波计 数<sup>[6-7]</sup>评估方法外,学者们提出了诸如多频评估 法<sup>[8]</sup>、基于回波峰值分布反演的方法<sup>[9-12]</sup>及回波 统计评估法[13-17]等。其中,回波积分法是目前应 用最为广泛的方法,该方法原理简单,但应用中需 要准确计算鱼群回波的声能量,且需要鱼群中个 体鱼的平均目标强度先验知识或拖网渔获数据辅 助<sup>[6,18-19]</sup>。由于鱼类活动的随机性,同一尾鱼,在 不同测量时刻,其目标强度测量值波动范围可达 20 dB以上。而根据经典的回波积分方程,当鱼群回 波目标强度测量误差为3 dB时,回波积分法鱼群密 度评估结果相对误差就可达到100%<sup>[6]</sup>。因此,受声 呐系统参数误差和鱼群中个体鱼的平均目标强度 先验知识误差的影响,回波积分法的鱼群密度评估 结果误差往往较大。与回波积分法相比,回波统计 评估方法具有无需声呐回波信号绝对量(因而可避 免声呐系统参数误差的干扰)与鱼群中个体鱼的平 均目标强度先验知识的优点[15-16],因而具有很好 的发展前景。

在回波统计方法进行鱼群密度评估应用的有 效性问题上,Weintroub<sup>[15]</sup>将该方法获得的5组鱼 群密度评估结果与传统的回波积分法评估结果进 行了对比分析,发现两种方法下评估结果的线性相 关系数高达0.98,但受鱼群密度分布不均匀导致的 回波统计方法评估误差和回波积分法评估误差影 响,回波统计方法的评估结果整体偏小。Denbigh 等[16] 提出根据回波信号强度的分布进行分区测量 的方法,有效降低了鱼群密度分布不均匀性对回波 统计方法评估结果的干扰,但由于可用于对比的不 同鱼群密度分组数据较少和回波积分法评估误差 大, Denbigh 等认为其处理结果不足以证明该评估 方法的有效性。两者的研究中,评估方法模型参数 均为经验假设估计值,无实测结果;采用的是走航调 查数据,而由于实际水域鱼群分布的复杂性和走航 调查对测量区域"一扫而过"的特点,可用于对比分 析的不同鱼群密度分组和可用于统计计算的样本 数据比较少。

针对以上情况,本文通过控制发射信号脉冲宽 度和个体鱼回波检测程序设计,完成了对该统计方 法模型参数的实际测量;在实验数据预处理上,提出 了一种基于能量阈值的数据筛选方法,以减小鱼群 分布的非均匀性导致的统计评估结果误差;在评估 方法上,用"线性原则"模型代替常规的回波积分方 程,避免了声呐系统误差带来的评估结果偏差。另 外,针对走航调查中可能存在的统计样本数据偏少 导致回波统计方法评估结果偏差的问题,对回波统 计评估方法中样本数据的抽样方法进行了改进,有 效提高了样本量偏少情况下该方法鱼群密度评估 的精确度。本文利用仿真与实验结合的方式对该评 估方法的有效性和样本数据抽样改进方法的性能 进行了分析。

## 1 理论与方法

#### 1.1 回波统计鱼群密度评估方法

对于声呐波束覆盖的某一观测微元(如图1所示),假设t时刻微元内有N尾鱼对回波有贡献,忽略二次及以上散射,则该微元t时刻鱼群回波幅度 A<sub>N</sub>可表示为

$$A_N = \sum_{i=1}^{N} e_i \exp(\mathbf{j}\theta_i),\tag{1}$$

其中, $e_i$ 为第i尾鱼的回波幅度, $\theta_i$ 为由第i尾鱼的 位置和散射决定的等效相位。有 $e_i = a_i b_i c_i$ ,其中  $a_i$ 是由该个体鱼本身的散射强度及姿态决定的后 向散射幅度, $b_i$ 是由声呐系统波束响应函数及抽样 时刻该个体鱼在波束中的位置决定的波束响应值,  $c_i$ 与回波脉冲包络的波形有关<sup>[16]</sup>,三者之间是相互



## 图1 微元与抽样示意图

Fig. 1 Diagram of resolution cell and data sampling

$$I_N = A_N \cdot A_N^*. \tag{2}$$

可以推导得到[16]

$$\langle I_N \rangle = N \langle e^2 \rangle, \tag{3}$$

$$\langle I_N^2 \rangle = N \langle e^4 \rangle + 2 \langle e^2 \rangle^2 N(N-1).$$
 (4)

一般可以假设鱼群在测量区间随机游动过程中,在某点出现的概率服从Poisson分布<sup>[14–17]</sup>,则 微元中鱼的数量N服从Poisson分布,其均值 $\langle N \rangle$ 满足

$$\langle N^2 \rangle = \langle N \rangle^2 + \langle N \rangle. \tag{5}$$

联立公式(3)~(5),可以推导得到微元回波信 号强度统计特征量 $\langle I^2 \rangle / \langle I \rangle^2$ 与微元中鱼的平均数 量 $\langle N \rangle$ 满足

$$\langle N \rangle = \frac{\langle e^4 \rangle / \langle e^2 \rangle^2}{\langle I^2 \rangle / \langle I \rangle^2 - 2}.$$
 (6)

由于 $e_i = a_i b_i c_i$ , 且 $a_i$ 、 $b_i$ 、 $c_i$ 相互独立, 因此  $\langle e^4 \rangle / \langle e^2 \rangle^2$ 满足

$$\frac{\langle e^4 \rangle}{\langle e^2 \rangle^2} = \frac{\langle a^4 \rangle}{\langle a^2 \rangle^2} \frac{\langle b^4 \rangle}{\langle b^2 \rangle^2} \frac{\langle c^4 \rangle}{\langle c^2 \rangle^2},\tag{7}$$

其中, $\langle a^4 \rangle / \langle a^2 \rangle^2 \langle b^4 \rangle / \langle b^2 \rangle^2$ 可以分别通过经验假设 和理论方法进行求解<sup>[16]</sup>,也可以通过对鱼群中个体 鱼回波进行统计求解。 $\langle c^4 \rangle / \langle c^2 \rangle^2$ 可以通过对个体 鱼的回波包络波形取平均得到,有

$$\frac{\langle c^4 \rangle}{\langle c^2 \rangle^2} = \frac{\frac{1}{T} \int_{-\infty}^{\infty} c^4(t) dt}{\left[\frac{1}{T} \int_{-\infty}^{\infty} c^2(t) dt, \right]^2}.$$
 (8)

从公式(6)可以看出,该回波统计评估方法的 参数与个体鱼回波幅度的归一化分布有关,而与 个体鱼的目标强度无关。由于鱼类活动的随机性, 个体鱼回波幅度的变化很大,但其归一化分布比 较稳定,一般可以用 Rayleigh 分布或 Rician 分布进 行拟合<sup>[15–16,20]</sup>。另外,由于最终统计量为归一化 量 〈*I*<sup>2</sup>〉/〈*I*〉<sup>2</sup>,因此,*I*可以是信号的相对强度,即公 式(1)中回声信号的幅度可以为换能器输出的原始 电压信号的幅度,而不必是真实的声压幅度,从而可 以避免声源级、换能器接收灵敏度等参数误差对评 估结果的影响。因此,与回波积分法相比,该方法既 可以避免声呐工作参数误差对鱼群密度评估的影 响,又具有无需鱼群中个体鱼的平均目标强度先验 知识的优点。而利用公式(6),联立声呐参数计算微 元的体积,便能实现对鱼群密度的计算。

### 1.2 统计样本数据抽样方法改进

文献 [14-16] 的研究指出,该评估方法相对误差 与微元 (N) 值及统计的样本量 M 满足

$$\left|\frac{\Delta\langle N\rangle}{\langle N\rangle}\right| = \frac{2\langle N\rangle}{\sqrt{M}},\tag{9}$$

可见 〈N〉 值越大、样本量越少,统计模型的评估误 差就越大。在 〈N〉 值一定的条件下,当样本量偏少 时,模型评估结果可能出现比实际 〈N〉 值大百倍或 者负值这样不稳定的情况。

以往研究中一般以微元中间时刻回波信号的 包络幅度作为该微元的唯一抽样值<sup>[14–16]</sup>,如图1 所示。为方便表达,本文将该方法记为"单微元单 样值 (Single cell single sample, SCSS)"抽样方法。 注意到由于微元中鱼的位置的随机性,以微元回波 包络任意时刻 $t_1$ 或 $t_2$ 的幅度作为微元的抽样值是 等效的,因此我们提出在微元中间部位等间隔抽取 多个样本的抽样方法,即单微元多样值 (Single cell multiple sample, SCMS)的方法。与 SCSS 方法相 比,微元数量相同条件下, SCMS 等效于增加了统计 样本量。

## 2 实验数据与处理方法

#### 2.1 实验概况

网箱鱼群测量实验于2017年11月在黄海日照 海域的海上平台完成,图2为实验安装简图。为便于 控制鱼群活动范围和鱼群密度,实验选用的网箱体 积较小,长、宽、高分别为2m、2m和5m。网箱底部 由直径30 mm的PVC管作支撑骨架,网衣为直径 1 mm 左右、网孔2 cm 左右的尼龙线编织网片。网 箱通过底部配重,从平台空隙处悬挂入海。换能器 固定安装在网箱中央,距离水面0.5 m,照射方向朝 下,其主瓣-3 dB开角约10°,发射信号为120 kHz 的 CW 脉冲信号, 脉宽为 $\tau = 0.1$  ms。实验对象为 长度15 cm~20 cm的黑鲷鱼。实验过程中首先对空 网箱进行了测量,发现除网箱底部外,其他部位几 乎无回波,而网箱底部实际距离声呐约4m,海底 距离声呐约8m,与网箱内鱼群的回波在时域上是 可分的。实验测量了多组不同鱼群数量条件下的鱼 群回波数据,其中网箱中鱼的数量最少为6尾,最多

为48尾。考虑到测量过程中鱼群的集群分布特性, 这些数据对应的网箱中鱼群的密度变化范围从不 足1尾每立方米,到最高约十尾每立方米,能较好地 反映自然水域条件下鱼群的密度。



图2 网箱鱼群测量实验示意图



#### 2.2 个体鱼回波提取与模型参数计算

鱼群在网箱中自由游动,当某个体鱼远离其他 鱼时,其回波在时域波形上与其他鱼的回波不重叠, 此时便能从鱼群回波中提取出该个体鱼的回波。根 据 MacLennan 的经典文献 [21], 可以利用以下准则 对个体鱼回波进行判断:(1)目标波形长度T与发射 信号脉冲宽度 τ 相近; (2) 目标包络波形光滑。考虑 目标回波脉冲展宽的特点,个体鱼回波波形宽度T 要大于 $\tau$ ,但由于鱼体散射结构的复杂性以及鱼群 活动的随机性,鱼群中不同大小或游动姿态的个体 鱼回波的脉冲展宽略有不同。由于是从自由游动状 态的鱼群回波中提取个体鱼回波,程序设计中,当 目标波形长度T设置得太大时,容易把鱼群回波中 脉冲展宽较小的重叠的回波错选为个体鱼回波;而 当T设置得太小时,则容易漏选脉冲展宽较大的个 体鱼回波。数据处理中,根据实测回波的特点和程 序提取个体鱼回波的效果,在"错选"与"漏选"之间 折中,最终选择了 $\tau \leq T \leq 1.5\tau$ 作为本实验条件下 个体鱼波形的有效长度,并以包络波形有且仅有一 个极值点作为包络波形光滑的依据。图3为个体鱼 回波的提取示例,可以看出该算法能较好地实现个 体鱼回波的提取。利用该算法从鱼群实验回波数据 中,共提取了2367例个体鱼回波样本。

对于波束中自由游动状态下的个体鱼,其回 波的峰值  $A_i$  由鱼的散射幅度及其在波束中的位置 决定,即  $A_i = a_i b_i$ 。图4给出了提取到的2367例个 体鱼样本的回波峰值  $A_i$ 的分布,可以看出其近似 Rician 分布,这与Clay等<sup>[2]</sup>的测量结果一致。通过 对这些个体鱼的回波幅值统计计算得 $\langle A^4 \rangle / \langle A^2 \rangle^2$ 为1.55。另外,由于自身结构的复杂性,个体鱼回波包络呈不规则形状,利用公式(8)对提取的个体鱼回波计算得到 $\langle c^4 \rangle / \langle c^2 \rangle^2$ 为1.41,利用公式(7)可得 $\langle e^4 \rangle / \langle e^2 \rangle^2 \approx 2.18$ ,利用该计算结果,可以确立本实验条件下回波统计评估方法的表达式为



图3 个体鱼回波提取效果示图





Fig. 4 Individual fish echo peak PDF

#### 2.3 数据筛选方法

鱼群在各微元分布的不均匀性会导致回波统 计方法鱼群数量评估结果偏小<sup>[15]</sup>,例如有两个微 元,对应的 〈N〉值分别为〈N<sub>1</sub>〉、〈N<sub>2</sub>〉,在鱼群均匀 分布假设下,将两个微元回波抽样值作为等效的抽 样值,对其进行统计平均,则可计算两微元特征量 平均值

$$\begin{split} \overline{\langle I^2 \rangle \over \langle I \rangle^2} &= \frac{1}{2} \Biggl( \frac{\langle I^2 \rangle}{\langle I \rangle^2}_1 + \frac{\langle I^2 \rangle}{\langle I \rangle^2}_2 \Biggr) \\ &= \frac{2.18}{2} \Bigl( \frac{1}{N_1} + \frac{1}{N_2} \Bigr) + 2, \end{split}$$

此时通过公式(10)计算得 $\overline{\langle N \rangle} = \frac{2N_1N_2}{N_1 + N_2}$ ,该值与两微元的算术平方值 $\langle N \rangle$ 的差值

$$\Delta = \overline{\langle N \rangle} - \langle N \rangle' = \frac{-(N_1 - N_2)^2}{2(N_1 + N_2)} \leqslant 0.$$

由此可见鱼群在各微元中分布的不均匀性会导致 回波统计方法评估结果偏小。

实验每组数据约需半小时测量时间,测量过程 中受网箱和外界环境干扰等因素的影响,鱼群虽然 整体上集群分布于网箱中下层,但鱼群的活动比较 活跃,而声呐波束照射范围仅为网箱中心的部分区 域,因此测量过程中对回波有贡献的鱼的数量波动 较大。为了减小鱼群分布的不均匀性带来的回波统 计法评估误差,提出了一种基于能量阈值的鱼群回 波数据筛选的方法:第一步,选择鱼群集中分布的水 层作为目标区间;第二步,剔除目标区间内回波能量 偏离平均回波能量比较大的数据。具体处理过程如 下:(1)绘出每组鱼群回波数据的声图,根据回波声 图中鱼群的分布情况,选择声图中鱼群分布集中的 区间作为目标区间(如图5所示)。(2)计算目标区间 内的回波信号的平均能量*ε*,并通过能量阈值设置 选择信号能量在2/3ē~4/3ē的回波数据帧作为模 型计算的有效数据。需要指出的是,该能量阈值的 选取不是绝对的,主要是考虑样本量大小与鱼群分 布均匀性的一个折中结果。阈值范围越窄,筛洗出 的样本数据就越少,但对应目标区间内鱼数量的波 动程度就越小:阈值范围越宽,则相反。通过以上筛 选方法,本实验获得的8组鱼群回波数据的样本量 均在5000以上。



Fig. 5 Fish echogram and sample interval

#### 2.4 回波积分方法

由于本文实验条件比较理想,从鱼群回波数据 中提取到了大量鱼群中个体鱼的回波数据,获得了 比较准确的鱼群中个体鱼的平均回波能量先验知 识。结合该优势,直接采用鱼类资源评估中的"线 性原则"作为回波积分法鱼群密度评估的表达式<sup>[6]</sup>, 可表示为

$$\varepsilon = n_0 \bar{\varepsilon}_0 = \int_{t_1}^{t_2} s^2(t) \,\mathrm{d}t,\tag{11}$$

其中, $\varepsilon$ 为测量区间内鱼群回波总能量, $n_0$ 为鱼的数 量, $\varepsilon_0$ 为鱼群中个体鱼的平均回波能量, $t_1 = t_2$ 分 别为目标区间上下边界位置在时域回波信号上对 应的时间点,s(t)为鱼群时域回波信号。该方法在以 往的研究中得到了理论证明与实验验证<sup>[21-23]</sup>。实 验过程中声呐参数始终保持不变,因此公式(11)中  $\varepsilon = \varepsilon_0$ 可以是相对量,从而避免了声呐参数校准误 差带来的回波积分法测量误差。另外,通过求2.2节 中个体鱼回波的平均回波能量,可得到本实验鱼群 个体鱼的平均回波能量 $\varepsilon_0$ ,从而确保了数据处理中 回波积分法评估结果的准确性。

## 3 结果与分析

#### 3.1 SCMS 抽样方法效果验证

以2.2节中提取的个体鱼的回波波形作为鱼群 回波中个体鱼的波形样本,对两种抽样方法下回波 统计方法评估效果进行仿真分析。方法如下:给定 观测微元理论 (N) 值后, 首先利用目标区间内鱼群 的数量服从Poisson分布的假设,确定目标区间内 各微元中个体鱼的数量  $M_i$  ( $i = 1, 2, \dots, k$ ); 然后 从实测个体鱼波形样本中依次随机抽取 M<sub>i</sub> 数量的 个体鱼波形,并通过假设个体鱼在微元内均匀随机 分布,实现鱼群回波波形的仿真;最后通过1000次 独立仿真实验取平均的方法,计算不同样本量(样 本量=回波数据帧数乘以每帧微元个数)、不同微元 (N) 值条件下, SCSS 与 SCMS(每个微元取3个抽样 值)两种抽样方式下回波统计评估方法的平均相对 误差 $|\Delta\langle N\rangle/\langle N\rangle|$ 。仿真结果见表1,表中空白表示 由于 (N) 值太大而样本量偏少,导致计算结果中出 现比理论〈N〉值大百倍或者负值这样无效的结果。 图6给出了该仿真方法下评估结果分布的一组示 例,该图中微元理论 (N) 值为3.5,采用的样本量为 300.

表1	两种抽样方法T	「回波统计方	与法评估结	果相对误差对比	Ł
			27 M 1 1 M - H		-

Table 1 Mean relative error of the statistic model with the two sampling methods

$\langle N \rangle$ 值	1			4		7		11	
样本量	SCSS	SCMS	SCSS	SCMS	_	SCSS	SCMS	 SCSS	SCMS
350	0.26	0.14	0.68	0.25			0.51		
700	0.18	0.11	0.33	0.17			0.26		0.44
1400	0.11	0.11	0.2	0.13		0.29	0.16	0.51	0.22
2800	0.08	0.12	0.13	0.12		0.18	0.14	0.26	0.16
5600	0.06	0.13	0.09	0.12		0.13	0.12	0.17	0.14

利用实验实测数据,对两种抽样方式下回波统 计方法评估效果进行进一步验证。方法是以2.3节 中筛选的8组鱼群回波数据中总样本数最大的一组 作为对象组(网箱中鱼总数为23尾,测量样本数为 7794),然后通过随机抽样的方法,每次从对象组中 抽取100帧回波数据(每帧数据包含3个微元,即总 样本量为300)用于统计计算。利用该方法1000次 独立评估结果分布如图7所示。



Fig. 6 Simulation result



Fig. 7 Experiment result

从表1可以看出,两种抽样方式下回波统计方 法评估结果相对误差基本符合随(N)值的增大而 增大,随样本量的增大而减小的规律。而从两种抽 样方式下评估结果误差对比来看,对于一定的(N) 值,当统计样本量偏少时,SCMS抽样方式下评估结 果较SCSS具有更高的精确度,这一点在图6与图7 中也有所反映。从图6和图7可以看出,样本量为 300时, SCSS 抽样方式下评估结果发散程度更大, 而SCMS方式下评估结果能更好地收敛于理论 (N) 值附近。并且, (N) 值越大, SCMS 相较于 SCSS 的优 势就越明显。但也注意到表1中 $\langle N \rangle$ =1时,在样本 量充足的条件下,随着样本量的增加,出现了SCMS 评估误差反而增大的情况,这可能是因为SCMS在 等效于增加样本的同时,也等效于增加了鱼群在各 微元分布的不均匀性,从而导致评估结果偏小。因 此,SCMS抽样方式更适用于微元 (N) 值大而样本 量偏少的情况,此时由于样本量偏少导致的评估结 果的不稳定性和偏差要大于由于SCMS 增加的不 均匀性带来的偏差。

#### 3.2 鱼群密度评估结果与分析

实验测量了8组鱼总数量不同条件下的网箱鱼 群回波数据,每组数据经能量阈值方法筛选后的样 本量均在5000以上。分别利用回波统计鱼群数量评 估方法(公式(10))和回波积分法(公式(11))对这8 组鱼群回波数据进行评估,结果如图8所示。由于 网箱中鱼总数为48时,样本量约为5400,此时测量 区间回波积分法评估结果 $\langle N \rangle$ 值约为11,该鱼群密 度条件已超出本实验条件下该统计评估方法的测 量上限,其计算结果出现了无效值,因此图8中未给 出该组测量结果。图8中最后一组数据,回波积分 法 $\langle N \rangle$ 值为9.3,统计模型评估结果明显偏大。对回 波积分评估结果中 $\langle N \rangle \leqslant 6$ 的几组数据的线性相关 系数进行了计算,发现两种方法计算结果线性相关 系数高达0.99。利用最小二乘法对两种方法计算结 果直线拟合,结果如图9所示。拟合直线表达式为  $\langle N \rangle_{sta} = 1.08 \langle N \rangle_{inte} - 0.23,其中 \langle N \rangle_{sta}$ 为统计方 法  $\langle N \rangle$  值评估结果, $\langle N \rangle_{inte}$ 为回波积分法  $\langle N \rangle$  值评 估结果。可见对于多组不同鱼群密度条件下的鱼群 回波数据,两种评估方法计算结果曲线具有很好的 一致性,特别是微元  $\langle N \rangle$  值  $\leq$  6时,两种评估方法计 算结果基本相同,说明在该微元  $\langle N \rangle$  值条件下,回波 统计方法能够有效地实现鱼群密度的评估。



图 8 两种方法评估结果对比

Fig. 8 Estimation result of the two methods



图 9 两种方法评估结果线性拟合



#### 4 讨论与结论

本文对基于回波统计的鱼群密度评估方法进行了实验研究,并针对应用中该方法鱼群密度评估的误差问题,提出了一种基于能量阈值的数据筛选 方法与SCMS改进抽样方法。与以往研究相比,本 文利用实验设计提取了大量个体鱼的回波数据,实 现了回波统计鱼群密度评估法参数的实际测量计 算;通过能量阈值数据筛选方法,获取了不同鱼群密 度条件下分布比较均匀的鱼群回波数据。通过仿真 和实验结果分析,可以得出以下结论:

(1)在统计样本充足的条件下,微元 ⟨N⟩ 值越小,回波统计方法评估结果的精确度越高。本文实验条件下,当微元 ⟨N⟩ ≤ 6时,回波统计方法与回波积分法评估结果基本一致。

(2) 当微元 〈N〉 值较大,或者统计样本量偏少, 导致回波统计方法鱼群密度评估结果误差大时,利 用本文提出的 SCMS 抽样改进方法,能有效地提高 回波数据的利用率,减小评估结果误差。



- 谭细畅, 史建全, 张宏, 等. EY60 回声探测仪在青海湖鱼类资源量评估中的应用 [J]. 湖泊科学, 2009, 21(6): 865–872.
   Tan Xichang, Shi Jianquan, Zhang Hong, et al. Hydroacoustic assessment of fish resources in the Lake Qinghai with EY60 echosounder[J]. Journal of Lake Science, 2009, 21(6): 865–872.
- [2] 张俊, 王新良, 赵宪勇. 渔业声学数据后处理中积分阈值的选择与优化 I: 目标离散分布状态下积分阈值的确定 [J]. 渔业科学进展, 2011, 32(4): 41-47.

Zhang Jun, Wang Xinliang, Zhao Xianyong. Definition and optimization of integration threshold in postprocessing of fisheries acoustic data I: determination of integration threshold for scattered distribution[J]. Progress in Fishery Sciences, 2011, 32(4): 41–47.

- [3] 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.
- [4] 张立,李渊,林龙山,等. 南海中南部主要经济种类渔业资源 声学评估 [J]. 海洋渔业, 2016, 38(6): 577-586.
  Zhang Li, Li Yuan, Lin Longshan, et al. Fishery resources acoustic assessment of major economic species in southcentral of the South China Sea[J]. Marine Fisheries, 2016, 38(6): 577-586.
- [5] 李路, 黄汉英, 涂群资, 等. 单品种淡水活鱼数量的被动声学估计 [J]. 农业机械学报, 2018, 49(3): 328-333.
  Li Lu, Huang Hanying, Tu Qunzi, et al. Numbers estimating of single species freshwater fish using passive acoustic signals[J]. Transactions of Chinese Society for Agricultural Machinery, 2018, 49(3): 328-333.
- [6] Simmonds J, MacLennan D. Fisheries acoustics theory and practice[M]. Second Edition Oxford: Blackwell Science, 2005: 177–203.
- [7] Clay C S, Medwin H. Acoustical oceanography: principles and applications[M]. New York: Wiley, 1977: 235–284.
- [8] Horne J K, Jech J M. Multi-frequency estimates of fish abundance: constraints of rather high frequencies[J]. ICES Journal of Marine Science, 1999, (56): 184–199.

- [9] Peterson M L, Clay C S, Brandt S B. Acoustic estimates of fish density and scattering function[J]. Journal of the Acoustical Society of America, 1976, 60(3): 618–622.
- [10] Chu D Z, Stanton T K. Statistics of echoes from a directional sonar beam insonifying finite numbers of single scatterers and patches of scatterers[J]. IEEE Journal of Oceanic Engineering, 2010, 35(2): 267–277.
- [11] Jones B A, Colosi J A, Stanton T K. Echo statistics of individual and aggregations of scatterers in the water column of a random, oceanic waveguide[J]. Journal of the Acoustical Society of America, 2014, 136(1): 90–108.
- [12] Lee W J, Stanton T K. Statistics of broadband echoes: application to acoustic estimates of numerical density of fish[J]. IEEE Journal of Oceanic Engineering, 2016, 41(3): 709–723.
- [13] Pusey P N, Schaefer D W, Koppel D E. Single-interval statistics of light scattered by identical independent scatterers[J]. Journal of Physics A: Mathematical and General, 1974, 7(4): 530–540.
- [14] Wilhelm P, Denbigh P. A statistical approach to determining the number density of random scatterers from backscattered pulses[J]. Journal of the Acoustical Society of America, 1984, 76(6): 1810–1818.
- [15] Weintroub J. Fish stock assessment by a statistical analysis of echo sounder signals[D]. Cape Town: University of Cape Town, 1986.
- [16] Denbigh P, Smit Q. Determination of fish number den-

sity by a statistical analysis of backscattered sound[J]. Journal of the Acoustical Society of America, 1991, 90(1): 457–469.

- [17] Schorth-Miller M L. A statistical analysis for estimating fish number density with the use of a multi beam echo sounder[D]. California: California Polytechnic State University, 2009.
- [18] Ryan T E, Downie R A, Kloser R J, et al. Reducing bias due to noise and attenuation in open-ocean echo integration data[J]. ICES Journal of Marine Science, 2015, 72(8): 2482–2493.
- [19] Scoulding B, Gastauer S, MacLennan D N. Effects of variable mean target strength on estimates of abundance: the case of Atlantic mackerel (Scomber scombrus)[J]. ICES Journal of Marine Science, 2017, 74(3): 822831.
- [20] Clay C S, Heist B G. Acoustic scattering by fish—Acoustic models and a two-parameter fit[J]. Journal of the Acoustical Society of America, 1980, 75(4): 1077–1083.
- [21] MacLennan D N. Acoustical measurement of fish abundance[J]. Journal of the Acoustical Society of America, 1990, 87(1): 1–15.
- [22] Foote K G. Linearity of fisheries acoustics, with addition theorems[J]. Journal of the Acoustical Society of America, 1983, 73(6): 1932–1940.
- [23] Foote K G. Energy in acoustic echoes from fish aggregations[J]. Fisheries Research, 1981, 1: 129–140.