

DOI: 10.3969/j.issn.1007-9580.2020.01.008

## 多波束渔用声呐作用距离预报建模及性能分析

李国栋<sup>1,2</sup>, 谌志新<sup>1,2</sup>, 汤涛林<sup>1,2</sup>, 陈军<sup>1,2</sup>, 许明昌<sup>1,2</sup>, 吴陈波<sup>1,2</sup>

(1 中国水产科学研究院渔业机械仪器研究所, 农业农村部渔业装备与工程技术重点实验室, 上海 200092;  
2 青岛海洋科学与技术国家实验室, 深蓝渔业工程装备技术联合实验室, 山东 青岛 266000)

**摘要:**多波束渔用声呐是海洋渔业实现高效、精准和选择性捕捞的重要工具。为了系统分析多波束渔用声呐探测性能及主要制约因素对作用距离的影响, 针对圆柱形阵多波束渔用声呐, 采用水声学系统仿真的方法, 分别对主要为噪声和混响环境下的渔用声呐探测性能进行分析, 对不同海况下噪声不同目标强度鱼群的探测性能进行比较, 分析窄带系统和宽带系统降低混响的能力, 并对噪声和混响混叠环境下的渔用声呐探测性能进行仿真分析; 最终, 从系统设计、发射方式、接收方式等多个角度提出提高渔用声呐探测性能的方法, 为远距离、高分辨率多波束渔用声呐的研制提供改进的方向。

**关键词:**多波束渔用声呐; 探测性能分析; 作用距离; 宽带渔用声呐

**中图分类号:**S972.61 **文献标志码:**A **文章编号:**1007-9580(2020)01-056-07

渔业声学探测设备作为典型的海洋渔业捕捞仪器是获取海洋鱼类资源数量和空间分布信息的重要助渔工具<sup>[1-3]</sup>。为了获得更高的空间探测距离和分辨率能力, 海洋渔业探测正向宽带<sup>[4-7]</sup>、多波束<sup>[8-9]</sup>等技术方向迅猛发展。多波束渔用声呐作为复杂度高、技术含量高的助渔仪器在海洋渔业捕捞高效、精准和选择性捕捞方面具有重要作用<sup>[10]</sup>。这种仪器中国目前全部依靠进口, 可商用的多波束渔用探测仪器几乎没有, 极大地制约了我国海洋渔业捕捞和科研工作的快速发展<sup>[11-12]</sup>。随着近几年微电子技术和人工智能技术的发展, 为多波束渔用声呐的研制带来了新的技术发展方向, 大规模信号处理器不断出现, 为更复杂、更高性能的探测信号处理技术在鱼类探测中使用提供了硬件条件, 从而为实现更高性能的渔用声呐研制带来了契机<sup>[10-12]</sup>。

作用距离是反映多波束渔用声呐探测性能的最重要指标之一。垂直波束探鱼仪的作用距离主要受海洋噪声的影响<sup>[13-15]</sup>, 分析和预测过程相对简单。而水平渔用声呐的作用距离受多种因素影响, 其中海洋环境因素最为主要, 包括海洋环境噪声、海水体积混响、界面混响及鱼群目标强度等环

境参数, 这些参数的变化都会对水平渔用声呐作用距离造成不同程度的影响。非渔用水平主动声呐的性能分析和预测已有报道<sup>[14-18]</sup>, 但水平多波束渔用声呐在使用频段及带宽、换能器尺寸、使用环境、使用方式等方面均有其独特之处, 需要根据水平多波束探鱼仪的使用环境和特点以及探测目标特性, 对其探测性能进行独立的分析, 以便在渔用声呐的研制过程中提出有针对性的提升方法。

本研究从主动声呐方程出发建立多波束渔用声呐作用距离的预报模型, 实现对窄带和宽带不同系统下, 体积混响、界面混响、海洋环境噪声级和目标回波级的仿真分析, 并研究海洋环境参数对渔用声呐作用距离的影响。

### 1 多波束渔用声呐的基本原理及工作过程

渔用声呐实质上是一种主动声呐系统, 利用水声回波信号探测鱼群信息, 并通过对回波信息特征进行分析来获取鱼群密度、大小及种类等信息。多波束渔用声呐是利用相控阵技术进行远距离、高分辨率鱼群探测的渔业仪器, 通过对发射信号的定向发射实现能量集中, 提升作用距离; 通过

收稿日期: 2019-08-09

基金项目: 蓝色粮仓科技创新国家重点研发计划项目“深远距离与高分辨率鱼群探测及装备研制(2019YFD0901403)”; 山东省重大科技创新工程专项(2018SDKJ0103-1); 中国水产科学研究院科研基本业务费项目(2019XT03); 中国水产科学研究院渔业机械仪器研究所科研基本业务费项目(2019LKYJK006)

作者简介: 李国栋(1978—), 男, 研究员, 博士, 研究方向: 海洋生物声学探测、渔业信息化及智能化。E-mail: liguodong@fmiri.ac.cn

对鱼群回波进行多波束接收来探测和定位鱼群位置,提高鱼群探测的分辨率<sup>[8,9,20]</sup>。

多波束渔用声呐通常采用平面换能器阵和圆柱形换能器阵<sup>[20]</sup>。前者只能实现对渔船航向一定开角(一般小于90°)海域进行扫描;后者可以实现对以渔船为中心的水平360°扫描及垂直60°扫描。多波束渔用声呐的工作过程首先根据作业环境设定一定倾角,再进行周期重复的水平扫描,当发现鱼群时,在发现鱼群水平方向进行垂直扫描,从而达到对鱼群的多角度立体探测(图1)。

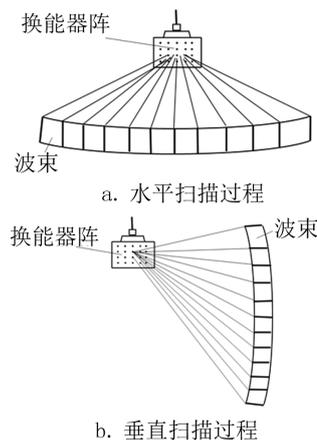


图1 多波束渔用声呐工作过程

Fig. 1 Working process of multi-beam fishery sonar

多波束渔用声呐的发射方式是旋转定向发射,即在一定的时间内,轮流发出很多个不同方位的窄波束去覆盖一个扇形区域(图2)。

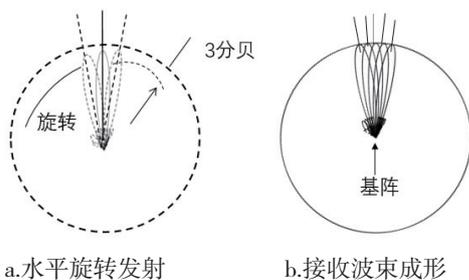


图2 多波束渔用声呐发射、接收过程示意图

Fig. 2 Schematic diagram of transmitting and receiving process of multi-beam fishery sonar

因此,多波束发射覆盖一个扇区需要一定的时间,波束愈多,发射信号的时间越长,盲区越大。多波束渔用声呐的接收方式是多阵元在时间同步下进行接收,再通过相控方式进行空间信号处理

形成多个接收波束,达到对不同方向探测的目的。

## 2 多波束渔用声呐作用距离预报模型及主要制约因素

水平多波束渔用声呐作为利用水声回波进行鱼群探测的一种主动声呐,其探测性能依据噪声或混响限制条件的不同,可表述为以下声呐方程<sup>[21]</sup>:

工作在主要为噪声干扰区的情况:

$$SE = SL - 2TL + TS - NL - DT \quad (1)$$

工作在主要为混响干扰区的情况:

$$SE = SL - 2TL + TS - RL - DT \quad (2)$$

式中:SE—信号余量;SL—声源级;TL—传播损失;TS—目标强度;NL—环境噪声;RL—混响级;DT—检测域。

### 2.1 声波在海水中的传播损失

声波信号在海洋声信道中传播由于波阵面的扩展,随着传播距离的增加会带来扩展损失。多波束渔用声呐通常使用在较深海域,因此以球面扩展的法则来计算这一损失<sup>[22]</sup>:

$$TL_{\text{球}} = 20 \lg r \quad (3)$$

式中:r—信号传播距离,m; $TL_{\text{球}}$ —球面扩展。

海水质点通过振动而依次传递能量的过程中,由于振动时阻尼的作用,部分能量转化为热能消耗在海水中带来吸收损失,可以表示为<sup>[22]</sup>:

$$TL_{\text{吸}} = \alpha(f) \times r \quad (4)$$

式中: $\alpha$ —海水吸收系数,dB/km。 $\alpha$ 与信号频率f有关<sup>[22]</sup>。

$$\alpha(f) = \frac{0.1f^2}{1+f^2} + \frac{40f^2}{4100+f^2} + 2.75 \times 10^{-4}f^2 +$$

$$0.003 \quad (5)$$

式中:f—信号频率,kHz。

声波在海水中的传播损失主要来源于上述两方面,传播损失之和为<sup>[22]</sup>:

$$TL = 20 \lg(r) + \alpha(f) \times r \quad (6)$$

### 2.2 环境噪声

渔用声呐工作过程中噪声是主要的干扰因素之一,其来源主要包括热噪声、环境噪声和自噪声等。由于风浪、湍流及海水分子的热运动等产生海洋环境噪声是干扰渔用声呐作用距离的主要因素。深海噪声谱级 $SpL$ 的强弱与海况和频率直接相关,6级海况时的噪声谱级比1级海况下高出

20 dB,在渔用声呐常用频段(20~200 kHz)6级海况时的深海噪声谱级的经验公式为<sup>[23]</sup>:

$$SpL = 52 - 20 \times \lg(f/10^3) \quad (7)$$

有指向性系统下宽带噪声级为<sup>[24]</sup>:

$$NL = SpL + 10 \times \lg B - DI \quad (8)$$

式中: $B$ —系统带宽,Hz; $DI$ —指向性指数。

### 2.3 换能器基阵指向性

水平多波束渔用声呐一般采用平面阵或圆柱阵,其中圆柱阵可以实现水平 360°电子扫描,探测效率高,使用灵活,成为大多数多波束渔用声呐所采用的阵列形式。圆柱阵的指向性指数约等于<sup>[24]</sup>:

$$DI = 10\lg(5 \times h \times D \times f^2) \quad (9)$$

式中: $h$ 、 $D$ —分别是圆柱阵的高度(m)和直径(m)。

如果单扇区水平方向采用 1/3 周长上的阵元发射和接收,水平和垂直波束半功率波束宽度分别为<sup>[24]</sup>:

$$\theta_h = 88 \times 2\pi/360 \times D \times f \quad (10)$$

$$\theta_v = 76 \times 2\pi/360 \times h \times f \quad (11)$$

### 2.4 混响级

声波在水下传播时,由于海面和海底的反射会产生界面混响,界面混响级( $RL_s$ )为<sup>[24]</sup>:

$$RL_s = SL - 2TL_R + S_b + 10\lg A \quad (12)$$

式中: $S_b$ —界面散射强度; $A = \frac{cT}{2} r \theta_h$ —散射边界的面积; $TL_R$ —混响传播损失,如果混响传播路径与信传播号路径相同。则  $TL_R = TL$ 。

同时,海洋生物、分布在海洋中的无生命物质和海洋自身的不均匀性也会产生体积混响,体积混响级( $RL_v$ )为<sup>[24]</sup>:

$$RL_v = SL - 2TL_R + S_v + 10\lg v \quad (13)$$

式中: $S_v$ —体积散射强度; $v = \frac{cT\pi}{8} r^2 \theta_h \theta_v$  为形成混响的总体积。

### 2.5 发射声源级

在恒定发声功率  $P$  下的渔用声呐声源级为<sup>[24]</sup>:

$$SL = 10\lg P + 170.8 + DI \quad (14)$$

式中: $P$ —声功率,W。

### 2.6 单体鱼和鱼群目标强度

单体鱼的目标强度( $TS_{\text{单}}$ )定义为<sup>[25-27]</sup>:

$$TS_{\text{单}} = 20\lg(\sigma_{bs}/4\pi) \quad (15)$$

式中: $\sigma_{bs}$ —鱼体的声学截面(也可理解为鱼体对入射声波产生散射), $m^2$ 。由于入射声波产生散射的等效面积无法直接测量,所以通过建立目标强度-体长经验公式表示<sup>[25-27]</sup>:

$$TS_{\text{单}} = a\lg L + b \quad (16)$$

式中: $L$ —目标鱼体体长,cm; $a$ 、 $b$  为回归系数,根据目标强度测定试验确定。

然而,多波束渔用声呐探测的主要目标是鱼群,当平面波射向鱼群时,并且鱼群处在声波投射的指向范围内,其回波可视为各条单体鱼反射子波的按相位叠加总和。如果简单考虑同相位叠加的情况,二条鱼的回波声强要比单体鱼强一倍,即反射损失少 3 dB,4 条鱼的回波声强增大到单体鱼的 4 倍。由此可以推论, $n$  条相距较大的鱼构成的平面散射鱼群处在投射声场范围内,其总的目标强度为<sup>[14,20,25]</sup>:

$$TS = TS_{\text{单}} + 10\lg n \quad (17)$$

如果是一定容积的密集鱼群,情况就变得复杂很多。随着鱼数量的增加,必然引起鱼群反射性质上的改变,这时鱼群反射强度大致与每立方米中的鱼数成正比<sup>[20,25]</sup>。

### 2.7 检测门限

渔用声呐检测门限是在接收机给定检测概率和虚警概率下平均信号功率和平均噪声功率之比,可以表征在波束成形后能分辨最小目标鱼群的信噪比,其值计算可以表示为<sup>[24]</sup>:

$$DT = 5\lg d - 10\lg(BT) \quad (18)$$

式中: $d$ —检测指数; $T$ —脉宽,s; $B$ —带宽,Hz。

## 3 多波束渔用声呐探测性能仿真分析

多波束渔用声呐的探测性能受到使用频点、带宽、换能器基阵尺寸及阵元数量等因素的制约,其换能器尺寸和发射功率受限于海洋捕捞船的部署条件,不同参数选取下的探测性能存在一定的差异。结合中国远洋渔船的特点及典型多波束渔用声呐,采用的仿真参数如下:工作频点 25 kHz;目标强度  $TS$  分别为 -10 dB、0 dB、10 dB;脉冲宽度 0.004 s;窄带和宽带时信号带宽分别为 0.25 kHz 和 10 kHz;换能器高 356 mm,直径 374 mm,有效阵元数 256 个,阵元排列方式为 32 列×8 行;功率 2 000 W;5  $\lg d$  为 10 dB。

### 3.1 工作在主要噪声干扰区的情况

将式(1)展开

$$SE = SL - 2TL + TS - (SpL + 10lgB - DI) - (5lgd - 10lg(BT)) \quad (19)$$

令  $SE=0$  可得:

$$2TL = SL + TS - SpL + DI - 5lgd + 10lgT \quad (20)$$

可见作用距离与采用宽带信号还是窄带信号无关。通过目标回波信号级  $S=SL-2TL+TS$  与噪声掩蔽级  $NL+DT$  的关系,对不同海况下和同目标强度鱼群的工作距离仿真分析,结果如图 3 所示。

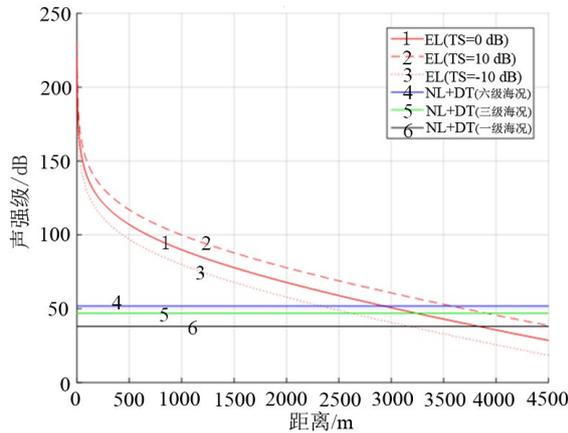


图 3 主要噪声干扰区多波束渔用声呐探测性能

Fig. 3 Detection performance of multi-beam fishery sonar in noise interference area

对目标强度为  $-10$  dB、 $0$  dB 和  $10$  dB 鱼群的有效作用距离:在 1 级海况条件下为  $3\ 200$  m、 $3\ 800$  m、 $4\ 500$  m;在 3 级海况条件下为  $2\ 700$  m、 $3\ 250$  m、 $4\ 500$  m;在 6 级海况条件下,为  $2\ 350$  m、 $2\ 900$  m、 $3\ 600$  m。综上,不同海况下的噪声对多

波束渔用声呐作用距离的影响较大,6 级海况相较于 1 级海况,探测性能下降约 25%。

在降低噪声影响方面,可以尽量增加发射信号功率来提高声源级,但这往往受到硬件条件和成本的限制,在整体付出的代价约增加一倍的情况下,声源级提高仅有 3 dB 左右,对于 0 dB 目标强度鱼群的作用距离提升不到 100 m。也可以提高换能器指向性来提高声源级和减少噪声级,其对作用距离的提升更为明显,同样也有其硬件和成本的控制问题,并且随着指向性的增加,垂直波束主瓣变窄,随着渔船的摇摆,更容易丢失目标鱼群。水平波束主瓣变窄,需要发射波束数量增多。

### 3.2 工作在主要混响干扰区的情况

在界面混响下,将式(2)展开

$$SE = SL - 2TL + TS - (SL - 2TL + TS_R) - (5lgd - 10lg(BTT)) \quad (21)$$

令  $SE=0$  可得:

$$10lgr = 10lg(B/\theta_h) - S_b - 41 + TS - 51lgd \quad (22)$$

同理可得在体积混响下的声呐方程:

$$20lgr = 10lg(B/\theta_h\theta_v) - S_v - 23 + TS - 51lgd \quad (23)$$

可见工作距离与采用信号宽带、波束开角、散射强度直接相关。可以通过目标回波信号级  $S=SL-2TL+TS$  与界面混响掩蔽级  $RL_b+DT$  和体积混响  $RL_v+DT$  的关系,对不同海况下、不同目标强度鱼群的工作距离仿真分析,结果如图 4 所示。

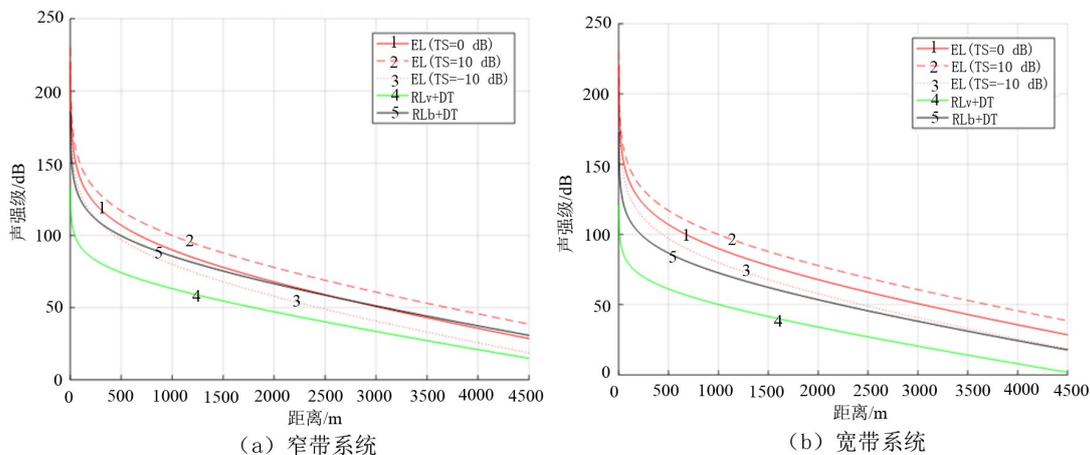


图 4 主要混响干扰区多波束渔用声呐探测性能

Fig. 4 Detection performance of multi-beam fishery sonar in reverberation interference area

多波束渔用声呐船的作业条件主要是深海区域,以沙底为主,小于 $10^\circ$ 掠射角的情况,根据相关参考文献<sup>[22,28-30]</sup>进行测量,得到海水体积散射强度 $S_v$ 为 $-80$  dB,海底散射强度为 $-40$  dB。

由图4可见,在发射窄带信号系统下,对目标强度为 $-10$  dB、 $0$  dB和 $10$  dB鱼群的有效作用距离分别为 $300$  m、 $2500$  m和大于 $4500$  m,混响对于小目标鱼群有效作用距离的影响极为显著。

由图4可见,在发射宽带信号系统下,对目标强度为 $-10$  dB、 $0$  dB和 $10$  dB鱼群的有效作用距离均大于 $4500$  m,由于对宽带信号处理检测门限的降低,因此可以大大提升多波束渔用声呐的探测性能。

在主要混响干扰区,影响渔用声呐的主要是界面混响,体积混响影响较少,这时可以采取降低

界面混响回波级、提高信号带宽的方式来提升系统探测能力,降低混响回波级可以采用减少信号发射脉宽 $T$ 和信号波束水平 $\theta_h$ 等方法。其中,减少信号发射脉宽将引起窄带系统带宽的增加,但会提高噪声强度;信号波束水平 $\theta_h$ 的变小是以增加换能器阵尺寸和阵元数量为条件的。同样,信号带宽的增加也直接影响整个渔用声呐系统的设计和器件的选型,软硬件实现难度明显增加。

### 3.3 工作在混响与噪声混叠区域的情况

由上述仿真可见在噪声和混响混叠工作区域主要以海底混响为主,这里取混响级 $RL \approx RL_s$ ,则总干扰可以表示为:

$$IL = RL + 10 \lg(1 + \alpha) \quad (24)$$

式中: $10 \lg \alpha = NL - RL$ 。

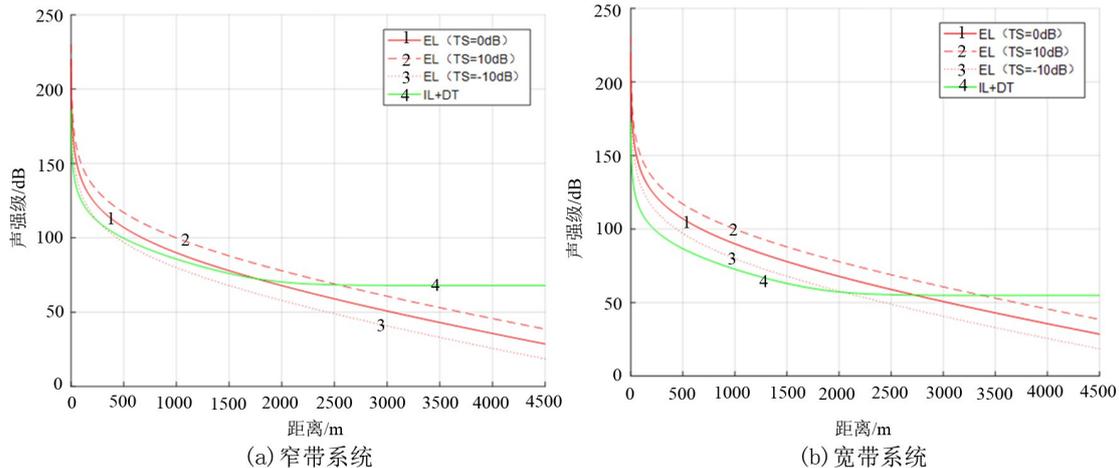


图5 主要噪声和混响混叠干扰区多波束渔用声呐探测性能

Fig. 6 Detection performance of multi-beam fishery sonar in noise and reverberation interference area

由图5可见,在6级海况下,采用窄带信号探测,对目标强度为 $-10$  dB、 $0$  dB和 $10$  dB鱼群的有效作用距离分别为 $250$  m、 $1800$  m和 $2550$  m,对于小目标鱼群有效作用距离的影响主要是界面混响,而对于大目标有效作用距离的影响主要是噪声。由图7可见,在6级海况下,采用宽带信号探测,对目标强度为 $-10$  dB、 $0$  dB和 $10$  dB鱼群的有效作用距离分别为 $2000$  m、 $2750$  m和 $3350$  m,这时对于目标鱼群有效作用距离的影响主要是噪声。

综上所述,多波束探鱼仪的探测性能受噪声和混响综合影响,在深海区域,体积混响影响相对较小。采用窄带信号系统,探测性能受界面混响影响较大,当目标强度较低时探测性能急剧恶化;采用

宽带信号系统可以有效抑制混响的影响,大幅提高系统作用距离,其探测性能主要取决于不同海况下的噪声影响。

表2 主要参数对探测性能的影响

Tab. 2 Influence of main parameters on detection performance

| 影响因素     | 优点                   | 缺点  |
|----------|----------------------|---|
| 增大发射功率   | 提高噪声限制距离             | 不改变混响限制距离<br>增加系统硬件成本                     |
| 增大换能器尺寸  | 提高噪声限制距离<br>提高混响限制距离 | 增加硬件成本<br>严苛船舶条件<br>加大声呐安装难度<br>不利于对抗姿态摇摆 |
| 增加发射脉冲宽度 | 增加噪声限制距离             | 降低目标分辨率<br>不改变混响限制距离                      |
| 增加信号带宽   | 提高混响限制距离             | 不改变噪声限制距离<br>增加系统复杂度                      |

## 4 结论

通过对不同影响条件下多波束渔用声呐探测性能比较分析,尤其是作用距离的分析和仿真,可见其探测性能受到使用环境中的噪声、混响、目标强度等多方面因素综合影响。在不同环境下,不同的声呐工作参数设置对探测性能的影响也不尽相同,因此提升多波束渔用声呐探测性能应从其使用环境条件的差异性出发,根据不同使用环境条件有针对性地选取声呐工作参数,以提升渔用声呐的系统探测性能。 □

### 参考文献

- [1] SIMMONDS E J, MACLENNAN D N. Fisheries acoustics; theory and practice [M]. Oxford: Wiley-Blackwell Publishing, 2005: 60-65.
- [2] CHU D Z. Technology evolution and advances in fisheries acoustics [J]. Journal of Marine science and technology, 2011 (3): 245-252.
- [3] GERLOTTO F F, SORIA P, COTTAIS M P H, et al. Exhaustive observation of 3D school structure using multibeam side scan sonar; Potential use for school classification, biomass and behavior studies [C]. ICES Council Meeting Papers, ICES, Denmark; Copenhagen, 1994: 12.
- [4] STANTON T K, CHU D, JECH J, et al. New broadband methods for resonance classification and high-resolution imagery of fish with swimbladders using a modified commercial broadband echosounder [J]. ICES Journal of Marine Science 2010, 67 (2): 365-378.
- [5] CHU D, STANTON T K. Application of pulse compression techniques to broadband acoustic scattering by live individual zooplankton [J]. Journal of the Acoustical Society of America, 1998, 104 (1): 39-55.
- [6] STANTON T K, REEDER D B, JECH J M. Inferring fish orientation from broadband-acoustic echoes [J]. ICES Journal of Marine Science, 2003, 60 (3): 524-531.
- [7] LAVERY A C, CHU D, MOUM J. Discrimination of scattering from zooplankton and oceanic microstructure using a broadband echosounder [J]. ICES Journal of Marine Science, 2010, 67 (2): 379-394.
- [8] KORNELIUSSEN R J, HEGGELUND Y, ELIASSEN I K, et al. Combining multibeam-sonar and multi-frequency echo sounder data: examples of the analysis and imaging of large euphausiid schools [J]. ICES Journal of Marine Science, 2009, 66: 991-997.
- [9] TRYGONIS V, GEORGAKARAKOS S, SIMMONDS E J. An operational system for automatic school identification on multibeam sonar echoes [J]. ICES Journal of Marine Science, 2009, 66: 935-949.
- [10] 徐皓, 张建华, 丁建乐, 等. 国内外渔业装备与工程技术研究进展综述(续) [J]. 渔业现代化, 2010, 37 (3): 1-8.
- [11] 徐皓. 渔业装备研究的发展与展望 [J]. 渔业现代化, 2003, 29 (3): 3-7.
- [12] 岳冬冬, 王鲁民, 张勋, 等. 我国海洋捕捞装备与技术发展趋势研究 [J]. 中国农业科技导报, 2013, 15 (6): 20-26.
- [13] 于雪南. 垂直探鱼仪的探测能力 [J]. 渔业机械仪器, 1974, 6 (2): 26-36.
- [14] 孙琪田, 赵日昌. 北黄海区声速垂直结构模式与鱼探仪的作用距离 [J]. 海洋通报, 1987, 6 (1): 58-62.
- [15] 石晓天. 关于探鱼仪设计中抗噪声问题的探讨 [J]. 渔业机械仪器, 1978, 6 (2): 31-33.
- [16] 何心怡, 蔡志明, 林建域, 等. 主动声呐探测距离预报仿真研究 [J]. 系统仿真学报, 2003, 15 (9): 1304-1306.
- [17] 于源, 鄢社锋, 侯朝焕. 混响背景下主动探测声呐性能预报 [J]. 鱼雷技术, 2011, 19 (3): 192-194.
- [18] 费志刚, 肖军, 王红萍. 海洋环境对探雷声呐探测性能的影响研究 [J]. 声学技术, 2012, 31 (4): 154-157.
- [19] 杨秀庭, 赵晓哲. 远程鱼雷目标主动声呐探测性能分析 [J]. 兵工学报, 2012, 33 (4): 503-507.
- [20] 于雪南. 回波探鱼仪 [M]. 北京: 农业出版社, 1980: 211-216.
- [21] 刘伯胜, 雷家煜. 水声学原理 [M]. 哈尔滨: 哈尔滨工程大学出版社, 2006: 10-12.
- [22] URICK R J. Principles of Underwater Sound [M]. 3rd ed. LOS Altos: Peninsula. 1983: 1-3.
- [23] PAUL C, ETTER. 水声建模与仿真 [M]. 3 版, 蔡志明, 译. 北京: 电子工业出版社, 2005: 225, 232, 112 -113.
- [24] WAITE A D, 著. 实用声呐工程 [M]. 王德石, 译. 北京: 电子工业出版社, 2004: 10, 32, 35, 101, 104.
- [25] FRANCIS D T I, FOOTE K G, KNUITSEN T, et al. Modeling the target strength of calanus finmarchicus [J]. The Journal of the Acoustical Society of America, 1999, 105 (2): 1050-1056.
- [26] FSSLER S M, GORSKA N. On the target strength of baltic clupeids [J]. ICES Journal of Marine Science: Journal du Conseil, 2009, 66 (6): 1184-1190.
- [27] FRANCIS D T I. Modeling the target strength of meganyctiphanes norvegica [J]. Journal of the Acoustical Society of America, 1999, 105 (2): 1111-1119.
- [28] VICTOR C. Anderson. frequency dependence of reverberation in the ocean [J]. The Journal of the Acoustical Society of America. 1967 (41): 1467-1474.
- [29] MCKINNEY C D. Anderson. Measurements of backscattering of sound from the ocean bottom [J]. The Journal of the Acoustical Society of America 1964 (36): 1596-1597.
- [30] JACKSON D R, ANDREW M, JOHN J. High frequency bottom backscatter measurements in shallow water [J]. The Journal of the Acoustical society of America. 1986, 80 (4): 1188-1199.

## Operating range prediction modeling and performance analysis of multi-beam fishery sonar

LI Guodong<sup>1,2</sup>, CHEN Zhixin<sup>1,2</sup>, TANG Taolin<sup>1,2</sup>, CHEN Jun<sup>1,2</sup>, XU Mingchang<sup>1,2</sup>, WU Chenbo<sup>1,2</sup>

(1 *Fishery Machinery and Instrument Research Institute, Chinese Academy of Fishery Sciences,*

*Key Laboratory of Fishery Equipment and Engineering,*

*Ministry of Agriculture and Rural Affairs, Shanghai 200092, China;*

2 *Joint Laboratory for Deep Blue Fishery Engineering, Qingdao National Laboratory for*

*Marine Science and Technology, Qingdao 266000, China)*

**Abstract:** Multi-beam fishery sonar is an important tool for efficient, accurate and selective fishing in marine fisheries. In this paper, in order to systematically analyze the detection performance of multi-beam fishery sonar and the influence of main constraints on the operating range, for the multi-beam fishery sonar based on cylindrical array, the detection performance of the fishery sonar in noise and reverberation environments is analyzed with the method of underwater acoustic system simulation, the detection performance of fish school with different noise intensity under different sea conditions is compared, the abilities of narrowband system and broadband system to reduce reverberation are analyzed, and the detection performance of the fishery sonar in the mixed environment of noise and reverberation is simulated and analyzed. Finally, from the aspects of system design, transmitting mode, receiving mode and so on, the methods to improve the detection performance of the fishery sonar are put forward, which provides an improvement direction for the development of long-distance, high-resolution multi-beam fishery sonar.

**Key words:** Multi-beam fishery sonar; detection performance analysis; operating range; broadband fishery sonar