

【引用格式】梁川, 贾帅东, 刘一帆. 多波束系统搜救水下目标的探测深度计算[J]. 数字海洋与水下攻防, 2024, 7(2): 207-214.

## 多波束系统搜救水下目标的探测深度计算

梁川<sup>1,2</sup>, 贾帅东<sup>1,4</sup>, 刘一帆<sup>3</sup>

1. 海军大连舰艇学院 军事海洋与测绘系, 辽宁 大连 116018;
2. 中国人民解放军 92150 部队, 浙江 舟山 316107;
3. 中国人民解放军 91001 部队, 北京 100036;
4. 海军大连舰艇学院 海洋测绘工程军队重点实验室, 辽宁 大连 116018)

**摘要** 针对多波束测深系统种类、探测模式等因素影响水下目标搜索效能的问题, 提出了一种面向水下目标搜索的多波束系统探测深度计算方法。分别对多波束系统等角与等距模式进行探讨, 考虑波束间重叠角的影响, 由多波束横向分辨率计算公式推导了 2 种模式的探测深度公式, 并将不同波束角度的探测深度进行计算。经过结果比对, 总结出等角模式搜索水下目标的探测能力要优于等距模式。最后结合算例, 得出多波束探测能力与目标尺寸、海水深度、波束开角有关。

**关键词** 水下目标搜救; 多波束测深系统; 探测深度; 等角模式; 等距模式

**中图分类号** P229 **文献标识码** A **文章编号** 2096-5753(2024)02-0207-08

**DOI** 10.19838/j.issn.2096-5753.2024.02.010

## Underwater Sounding Calculation of Multibeam Echosounder System for Underwater Target Search and Rescue

LIANG Chuan<sup>1,2</sup>, JIA Shuaidong<sup>1,4</sup>, LIU Yifan<sup>3</sup>

1. Department of Military Oceanography and Hydrography & Cartography, Dalian Naval Academy, Dalian 116018, China;
2. No.92150 Unit of PLA, Zhoushan 316017, China;
3. No.91001 Unit of PLA, Beijing 100036, China;
4. Key Laboratory of Hydrographic Surveying and Mapping of PLA, Dalian Naval Academy, Dalian116018, China)

**Abstract** A method for calculating the depth of a Multibeam Echosounder System (MBES) for underwater target search is proposed based on factors such as the types and detection modes of MBES. The equiangular and equidistant modes of MBES are discussed separately, taking into account the influence of beam overlapping angles. Two formulas for calculating the depth of each mode are derived from multibeam transverse resolution formula, and the depths of different beam angles are calculated. After comparing the results, it is concluded that the detection capability of the equiangular mode for searching underwater targets is superior to that of the equidistant mode. Finally, a case study is conducted to show that the detection capabilities of MBES are related to target size, water depth, and beam opening angle.

**Key words** underwater target search and rescue; multibeam echosounder system; underwater sounding; equiangular mode; equidistant mode

收稿日期: 2023-10-19

作者简介: 梁川 (1986-), 男, 硕士生, 工程师, 主要从事海洋调查数据处理研究。

## 0 引言

随着海洋活动日益增多,海洋事故的发生越发频繁。如何在短时间内快速搜索到水下失联目标,已成为提高海上搜救能力的重要问题<sup>[1]</sup>。当前,围绕水下失联目标的搜索救援,主要依托侧扫声呐与多波束测深系统 2 种技术手段<sup>[2-4]</sup>。其中,多波束测深系统在探测水下目标的形态特征和空间分布情况上具有一定的独特优势。但当前市场上多波束产品众多,性能相差较大,且对作业环境要求也不尽相同,在进行搜救作业时,如果没有选择正确的多波束型号,将无法充分发挥出多波束测深系统的效能,进而影响水下目标搜救效率。因此,为了提高工作效率,降低操作风险和搜救准确性,需要对待用的各型号多波束测深系统的技术指标进行分析评估,尤其应掌握多波束面向不同大小、不同海水深度时的水下目标最大被探测深度,对超出测深范围的目标,应及时调整搜救策略<sup>[5-8]</sup>。

目前,许多学者围绕探测技术尤其是多波束横向分辨率开展了一些卓有成效的研究。赵建虎等多波束探测距离分辨率与波束角度分辨率进行研究并给出计算公式,但是未对探测能力进行详细分析和建模<sup>[9]</sup>;吴利红基于 GeoSwath 多波束对空间分辨率模型进行了推导,但对横向分辨率的阐述不够详尽,导致理解上存在一定的模糊性<sup>[10]</sup>;张永厚等推导了考虑波束重叠的多波束横向分辨率估计模型,但并未计算探测深度<sup>[11]</sup>。通过以上研究,可以对被探测目标的最小尺寸有较为直观的认识,但对确定水深的水域,指定大小的目标是否能被探测到还需进一步换算才能得出结论。

为此,本文在研究波束重叠对多波束测深空间影响的基础上,结合目标探测条件,分别提出了等角与等距作业模式下考虑波束重叠的探测深度计算方法,分析目标可测的前提下所能达到的最深深度的计算问题。

### 1 多波束测深系统搜索能力评估

多波束测深系统的工作原理是利用阵列式发射换能器向海底发射宽扇区覆盖的声波,获取声波

在海水里的传播速度及发出与接收的时间差便能计算出换能器到声波反射点的距离,结合船罗经与姿态仪数据,便能换算出扫测辐射区域海底深度<sup>[12-16]</sup>。多波束系统的最大探测深度便是其搜索能力最直观的体现。对于确定大小的海底目标,多波束测深系统各项参数已知的前提下,最大探测深度能够通过公式计算得出。

#### 1.1 基本假设

在本文中,假定作业船只航行在理想的情况下,即假设在探测范围内声速恒定,水文环境稳定,作业船不受强烈水流、风浪等自然现象干扰,船姿态无变化,海底地形无起伏。按照多波束目标判别惯例,至少需 3 个回波信号才能识别 1 个水下目标<sup>[17]</sup>,即目标被照射范围内至少包含 2 个完整的波束,才能够确保多波束测深系统接收到足够的回波信号,如图 1 所示。

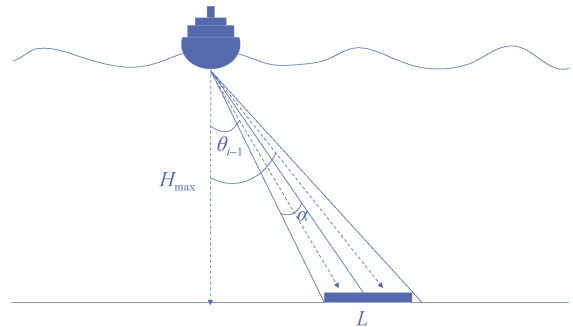


图 1 多波束测深系统扫测目标原理示意图  
Fig. 1 Principle diagram of a multibeam bathymetric system scanning targets

图 1 中  $L$  为沉没目标宽度,  $\theta_i$  ( $i=1, 2, 3, \dots, k$ ) 为多波束换能器发射的第  $i$  个波束的中轴与垂直方向的夹角,  $k$  为单侧发射的波束数,  $\alpha$  为每个波束的波束角大小。假设第  $i-1$  个与第  $i$  个波束正好将该目标完全覆盖,即多波束测深系统刚好能够接收到 3 个目标回波,则该目标物的被探测最大深度为

$$H_{\max} = \frac{L}{\tan\left(\theta_i + \frac{\alpha}{2}\right) - \tan\left(\theta_{i-1} - \frac{\alpha}{2}\right)} \quad (1)$$

式中:  $H_{\max}$  表示水下目标物最大被探测深度,即型宽  $L$  的目标物沉没深度低于  $H_{\max}$  时,多波束测

深系统便能够获取该目标物有效回波,并最终确定其位置与深度;当目标物沉没深度大于 $H_{\max}$ 时,多波束测深系统接收到目标有效回波不足3个,此时便无法判断接收到的信号为杂波还是回波信号,因此无法确定待扫测目标的位置和深度。

由式(1)可知,波束中轴与垂直方向的夹角 $\theta_i$ 越小,最大探测深度 $H_{\max}$ 越大。由此可知,中央垂直向下发射的波束探测深度最大;相应地,边缘波束 $\theta_i$ 最大,其探测深度最小。

## 1.2 等角模式下的多波束探测能力评估

减小波束角角度与增加波束数量都能够有效提高多波束探测能力,随着多波束技术的不断发展,波束角能够做得越来越小,但波束总开角已经达到极致无法继续增大,而添加波束数量显然更加容易,自然而然地会出现各个波束覆盖范围的叠加。波束的叠加使得对同等宽度的目标,有叠加的2个完整波束能够探测得更深,所以在探讨多波束测深系统时,必须将波束叠加的值计算在内。根据声波束发射角度和分布方式,多波束测深系统的工作模式可分为等角模式和等距模式<sup>[18]</sup>。在考虑波束叠加的情况下,多波束等角模式与等距模式的探测能力会有所不同。

### 1.2.1 等角模式下多波束搜索目标的探测能力建模

在等角模式下,多波束测深系统发射的声波束的方向近似于等角分布,声波束之间的间距不相等,中间波束的间距小,越往边缘波束间距越大。相较于等距模式,等角模式的覆盖范围和探测精度更高,并且能够获取更加详细的水下目标信息<sup>[19-26]</sup>。但是,等角模式下声波束的间距不均匀,使得数据处理相对困难。

在多波束测深系统使用等角模式时,其波束角固定不变,均为同一值且均匀分布,故而波束间重叠部分的角度也是固定不变的,可由公式(2)计算:

$$\theta_c = \alpha - \frac{\alpha_k}{k} \quad (2)$$

式中, $\theta_c$ 为波束间重叠部分角度; $\alpha$ 为波束角; $\alpha_k$ 为换能器单侧波束总开角; $k$ 为单侧波束数量。此时目标被照射范围包含2个完整的波束,如图2所示。

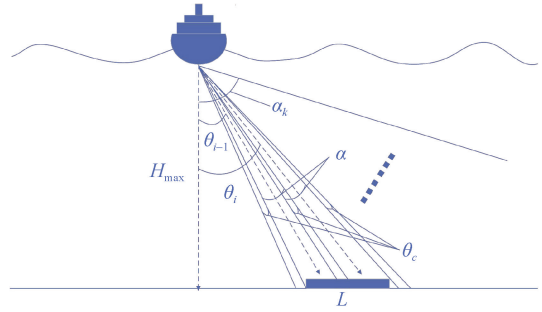


图2 多波束测深系统等角模式扫测重叠角示意图  
Fig. 2 Schematic diagram of overlapping angles between each scan in equiangular mode of a multibeam bathymetric system

此时目标物的最大被探测深度为

$$H_{\max} = \frac{L}{\tan\left(\theta_i + \frac{\alpha}{2} - \theta_c\right) - \tan\left(\theta_{i-1} - \frac{\alpha}{2} + \theta_c\right)} \quad (3)$$

式中,前后2个波束分别去除相邻2个波束的重叠角影响,使得获取的最大探测深度 $H_{\max}$ 更加精确,相较于公式(1),能够获得更大的 $H_{\max}$ 值。

### 1.2.2 等角模式下多波束系统中央波束探测深度计算

由式(3)可知,当 $L$ 、 $\theta_c$ 与 $\alpha$ 一定时,波束中轴与垂直方向的夹角 $\theta_i$ 越小,最大探测深度 $H_{\max}$ 越大,即中央波束的 $H_{\max}$ 即为 $H_{\max}$ 的最大值,为第一、二波束探测深度,此时第一波束中轴与垂直方向的夹角 $\theta_1$ 为波束角的一半,即 $\theta_1 = \frac{\alpha}{2}$ ,第二波束中轴与垂直方向的夹角 $\theta_2 = \frac{3\alpha}{2} - \theta_c$ ,中央波束探测深度可表示为

$$H_{\max} = \frac{L}{\tan\left(\theta_2 + \frac{\alpha}{2} - \theta_c\right) - \tan\left(\theta_1 - \frac{\alpha}{2} + \theta_c\right)} = \frac{L}{\tan(2\alpha - 2\theta_c) - \tan(\theta_c)} \quad (4)$$

由式(4)可知,等角模式下中央波束探测深度 $H_{\max}$ 仅与目标物型宽 $L$ 、波束间重叠部分角度 $\theta_c$ 与波束角 $\alpha$ 有关。

### 1.2.3 等角模式下多波束系统边缘有效波束探测深度计算

由式(3)可知,等角模式下 $L$ 、 $\theta_c$ 与 $\alpha$ 一定时,波束中轴与垂直方向的夹角 $\theta_i$ 越大,最大探测深度 $H_{\max}$ 越小,即边缘波束的 $H_{\max}$ 即为 $H_{\max}$ 的最

小值。计算边缘波束，即计算开角最大时的波束探测深度时，边缘 2 个波束中轴线与竖直方向的夹角分别为  $\theta_{k-1} = \alpha_k - \frac{3\alpha}{2} + \theta_c$ ， $\theta_k = \alpha_k - \frac{\alpha}{2}$ ，边缘波束探测深度可表示为

$$H_{\max} = \frac{L}{\tan\left(\theta_k + \frac{\alpha}{2} - \theta_c\right) - \tan\left(\theta_{k-1} - \frac{\alpha}{2} + \theta_c\right)} = \frac{L}{\tan(\alpha_k - \theta_c) - \tan(\alpha_k - 2\alpha + 2\theta_c)} \quad (5)$$

由式 (5) 可知，等角模式下边缘波束探测深度  $H_{\max}$  不仅与目标物型宽  $L$ 、波束间重叠部分角度  $\theta_c$  与波束角  $\alpha$  有关，还与换能器单侧波束总开角  $\alpha_k$  有关。

### 1.3 等距模式下的多波束探测能力评估

#### 1.3.1 等距模式下多波束搜索目标的探测能力建模

在等距模式下，多波束测深系统发射的声波束在同一深度平面上的测深点间距相等。这意味着无论声波束在水下的传播距离如何，每个声波束都会在大致相同的距离间隔上产生一个测深点。这种模式的一个显著优点是：由于声波束间距相等，能够提供更均匀的分辨率和更少的杂波干扰，更清晰、更准确地描绘出水下地形或目标物的特征。但等距模式的覆盖范围较窄，目标区域较大时，需进行更多次扫描才能获取完整的水下地形数据，作业效率较低。

在多波束测深系统使用等距模式时，各波束在同一深度平面上的中轴线间距相同，均为同一值且均匀分布，但相邻波束中轴线夹角的大小会随着其偏离中垂线的大小而变化，如图 (3) 所示， $a$ 、 $b$ 、 $c$ 、 $d$  分别为 4 个波束在同一平面上覆盖的距离，在等距模式下有  $a=b=c=d$ ，重叠角度  $x$ 、 $y$ 、 $z$  不断变化，越靠近中央的重叠角度越小，越接近边缘重叠角度越大。

计算时取覆盖目标物的 2 个波束的前一波束终点与后一波束起点，如图 3 所示，此时目标物的最大被探测深度为

$$H_{\max} = \frac{L}{\tan\left(\theta_{i+1} - \frac{\alpha}{2}\right) - \tan\left(\theta_{i-2} + \frac{\alpha}{2}\right)} \quad (6)$$

根据等距模式特性有：

$$\frac{\tan\theta_{i-2}}{\tan\theta_{i+1}} = \frac{\frac{\tan\theta_{i+1}}{\tan\alpha_k} \cdot k}{\frac{\tan\theta_{i+1}}{\tan\alpha_k} \cdot k - 3}$$

$$\tan\theta_{i-2} = \left(1 - \frac{3\tan\alpha_k}{k \cdot \tan\theta_{i+1}}\right) \tan\theta_{i+1} \quad (7)$$

确定了某波束的角度，便可由式 (7) 计算出其相邻波束对应的中轴线角度，将其代入公式 (6) 中便能计算出等距模式下的最大探测深度值，此时波束探测深度  $H_{\max}$  还受到多波束换能器单侧发射的波束总数  $k$  的影响。

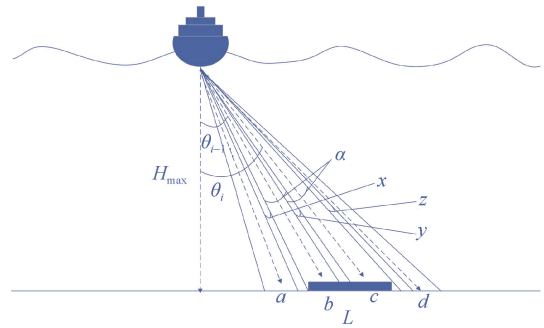


图 3 多波束测深系统等距模式扫描重叠角示意图  
Fig. 3 Schematic diagram of overlapping angles between each scan in equidistant mode of a multibeam bathymetric system

#### 1.3.2 等距模式下多波束系统中央波束探测深度计算

为与等角模式进行比较，可利用公式 (6) 计算等距模式下中央波束最大探测深度，即计算第一、二波束探测深度，根据等距模式特性，结合公式 (7) 可得： $\tan\theta_1 = \frac{\tan\alpha_k}{k}$ ； $\tan\theta_4 = \frac{4\tan\alpha_k}{k}$ ，即  $\theta_1 = \arctan\frac{\tan\alpha_k}{k}$ ； $\theta_4 = \arctan\frac{4\tan\alpha_k}{k}$  此时等距模式下中央波束探测深度可表示为

$$H_{\max} = \frac{L}{\tan\left(\theta_4 - \frac{\alpha}{2}\right) - \tan\left(\theta_1 + \frac{\alpha}{2}\right)} = \frac{L}{\tan\left(\arctan\frac{4\tan\alpha_k}{k} - \frac{\alpha}{2}\right) - \tan\left(\arctan\frac{\tan\alpha_k}{k} + \frac{\alpha}{2}\right)} \quad (8)$$

由式 (8) 可知，等距模式下中央波束探测深

度  $H_{\max}$  与目标物型宽  $L$ , 换能器单侧波束总开角  $\alpha_k$ , 波束角  $\alpha$  及单侧发射的波束总数  $k$  有关。

### 1.3.3 等距模式下多波束系统边缘有效波束探测深度计算

利用式 (6) 计算等距模式下边缘波束最大探测深度, 根据等距模式特性, 结合式 (7) 可得:

$$\theta_k = \alpha_k - \frac{\alpha}{2}; \quad \tan \theta_{k-3} = \frac{(k-3)\tan \alpha_k}{k}$$

即

$$\theta_{k-3} = \arctan \frac{(k-3)\tan \alpha_k}{k}, \text{ 此时探测深度可表示为}$$

示为

$$H_{\max} = \frac{L}{\tan\left(\theta_k - \frac{\alpha}{2}\right) - \tan\left(\theta_{k-3} + \frac{\alpha}{2}\right)} = \frac{L}{\tan\left(\alpha_k - \alpha\right) - \tan\left(\arctan\left(\frac{(k-3)\tan \alpha_k}{k}\right) + \frac{\alpha}{2}\right)} \quad (9)$$

由式 (9) 可知, 等距模式下边缘波束探测深度  $H_{\max}$  与目标物型宽  $L$ 、换能器单侧波束总开角  $\alpha_k$ 、波束角  $\alpha$  及单侧发射的波束总数  $k$  有关。

## 2 仿真试验与分析

为进一步比较多波束测深系统等角模式与等距模式的探测能力, 为海上搜救决策提供可靠的预

测和支持, 对这 2 种模式进行仿真实验, 获得探测能力比较和评估结果。

### 2.1 等角与等距模式搜救水下目标的能力比较

为比较多波束测深系统在不同模式下对于水下目标的探测能力, 本文模拟 3 类典型水下目标沉于海底, 采用多波束测深系统进行搜索的情形进行比对分析。3 类典型目标分别为好望角型散货船、内河货船和集装箱, 具体参数如表 1 所示。

选用丹麦 Teledyne Reson 公司的 SeaBat 7150 作为搜救水下目标的多波束测深系统, 该系统波束数为 256 个, 波束总开角  $150^\circ$ , 波束角  $1^\circ \times 1^\circ$ , 分别使用等角模式和等距模式对表 1 中的 3 类目标进行扫海探测, 采用公式 (3) - (9) 计算多波束测深系统在不同模式下的探测深度。需要说明的是, 为便于结果比较, 减少非必要的环境参数影响, 本文假定扫海探测过程在声速、环境、船姿态无变化、海底无明显地形起伏的条件下进行。试验计算结果如表 2 所示。

表 1 典型水下目标基本情况

Table 1 Basic situation of typical underwater targets

目标名称	长度/m	型宽/m	型深/m
好望角型散货船	290	45	24
内河货船	52.8	8.2	3.5
集装箱	9.125	2.438	2.591

表 2 多波束测深系统探测深度计算结果

Table 2 Calculated underwater soundings for a multibeam bathymetric system

目标	模式	探测深度/m							边缘波束
		中央波束	10°角	20°角	30°角	40°角	50°角	60°角	
好望角型散货船	等角	1 814.19	1 756.60	1 596.27	1 352.82	1 055.64	740.55	445.56	134.33
	等距	343.36	344.41	351.89	369.08	407.05	510.54	1 183.34	-83.94
内河货船	等角	264.56	256.17	232.78	197.28	153.94	107.99	64.97	19.59
	等距	50.07	50.22	51.31	53.82	59.36	74.45	172.57	-12.24
集装箱	等角	184.29	178.44	162.15	137.42	107.23	75.22	45.26	13.64
	等距	34.87	34.98	35.74	37.49	41.35	51.86	120.20	-8.52

由表 2 可知, 从中央波束到 50°角波束以及边缘波束时等角模式的探测能力均优于等距模式, 仅在 60°波束附近等距模式探测能力大幅增加。这是因为在等距模式中, 要保持脚印等距, 则越靠近边缘, 相邻波束中轴线夹角越小, 使得重叠部分越来越大, 最终在一个很小的区间内使探测深度迅速增大达到无穷大值。虽然此时多波束测深系统探测能

力最强, 但探测目标在等距模式下的放大效应也达到极致, 得到的影像将会严重失真, 并不能判读出目标有效信息, 所以该部分数据通常应舍弃, 不作为性能比对数据。

以 SeaBat 7150 多波束为例, 利用等角模式和等距模式的探测深度公式 (3) - (9), 计算不同角度波束的探测深度, 结果如图 4 所示。

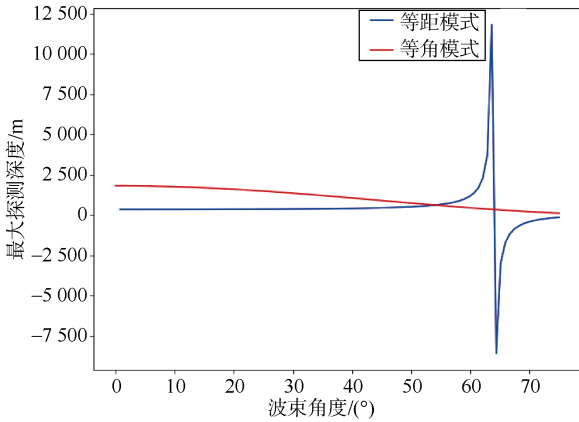


图 4 多波束测深系统 2 种模式探测深度曲线  
Fig. 4 Underwater sounding curves in two modes of a multibeam bathymetric system

图 4 中，横坐标为波束入射角，纵坐标为探测深度，红色曲线为等角模式探测深度，蓝色曲线为等距模式探测曲线。由曲线结果与表 2 计算结果均可得出结论：多波束测深系统在等角模式下搜索水下目标的探测能力要优于等距模式。

### 2.2 等角模式下的多波束探测能力评估

为进一步了解多波束系统等角模式下的探测能力，以 SeaBat 7150 多波束为例，对不同尺度水下目标在不同波束角度下对应的探测深度进行仿真试验推算，结果如图 5 所示。图 5 中，横坐标为波束入射角，纵坐标为探测深度，蓝色曲线为使用等角模式对望角型散货船的探测深度，红色曲线为使用等角模式对内河货船的探测深度，红色曲线为使用等角模式对集装箱的探测深度。

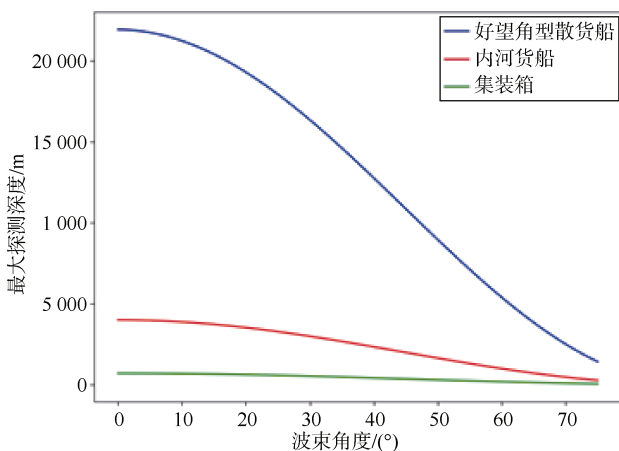


图 5 多波束测深系统等角模式探测深度曲线  
Fig. 5 Underwater sounding curves in equiangular mode of a multibeam bathymetric system

由图 5 中可知，在多波束测深系统等角模式下，目标越大探测能力越强，中央波束的探测深度最大，边缘波束的探测深度最小，探测深度在 30°~50°间随波束角度变化较快。这说明扫测目标越靠近作业船航线，越容易被探测到。在布设测线时，并不能将换能器总开角覆盖范围内的区域都按最深探测能力估算，而是充分考虑越靠近边缘探测能力越弱，甚至舍弃掉部分超过一定角度的数据，从而在保证覆盖率的同时得到最深探测数据。

### 2.3 给定海域的多波束探测能力评估

在利用多波束测深系统进行水下目标搜救作业时，对于确定尺寸的水下目标，可根据作业海域水深情况，提前评估所使用的多波束测深系统在等角模式下是否具备搜索探测的能力。以 SeaBat 7150 多波束为例，采用公式 (3) 计算搜寻不同尺寸目标时多波束测深系统等角模式的最大探测深度，结果如图 6 所示。

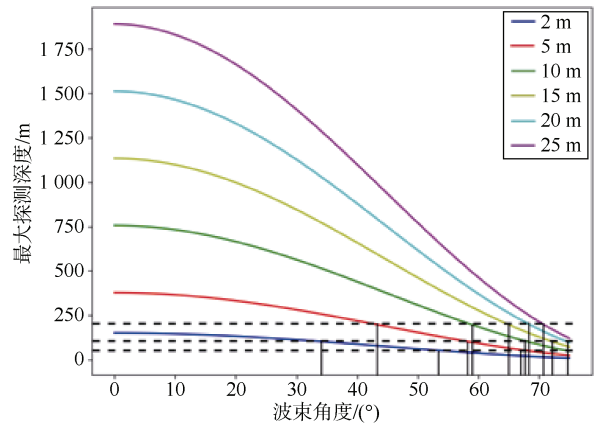


图 6 多波束测深系统等角模式对不同尺度目标探测深度曲线  
Fig. 6 Underwater sounding curves of targets with different scales in equiangular mode of a multibeam bathymetric system

图 6 中，横坐标为波束入射角，纵坐标为最大探测深度。曲线簇为不同尺寸目标时等角模式的探测深度，右侧注释为目标尺寸，由上至下分别为 2 m、5 m、10 m、15 m、20 m 及 25 m 大小目标的被探测深度曲线。由图 6 可知：等角模式下，水深 50 m 时，2~25 m 大小的目标均能被入射角小于 53° 的波束探测到；水深 100 m 时，2~25 m 大小的目标均能被入射角小于 33° 的波束探测到；水深

200 m时, 2 m大小的目标无法被探测到, 5 m大小的目标也无法被入射角大于 $42^\circ$ 的波束探测到。

多波束测深系统探测能力与目标尺寸、海水深度、波束开角有关, 在目标尺寸、海水深度一定的条件下, 我们应该保留相对应波束入射角内的数据。对于入射角更大的波束即使有回波数据, 也应是深度未达到的假回波、假目标, 在进行数据判读时, 我们应当快速、准确地识别出这些数据并直接舍弃, 避免在无关的、冗余的数据上浪费时间, 以此来节省宝贵的时间, 提高搜救的成功率。

### 3 结束语

本文通过对多波束测深系统探测深度进行推导计算, 并基于模拟数据进行了一系列的验证和分析, 我们进一步确认了这种系统在实际搜救作业中应用的可行性和准确性。通过对比计算结果表明: 多波束测深系统在不同作业模式下的最大探测深度有所差异, 对不同大小不同入射角度的目标探测能力也有所不同, 得结论如下:

1) 研究评估多波束测深系统的探测能力, 推导探测深度与目标物型宽、海水深度、波束开角、波束角及波束总数的确定关系, 在水深、目标尺寸、波束角相同的情况下等角模式的探测深度都要大于等距模式。在进行水下目标的搜救扫测时, 建议优先使用等角模式, 以提高对目标的识别准确性。

2) 在等角模式下, 多波束探测深度与目标物型宽、波束间重叠部分角度、波束角及换能器单侧波束总开角有关。波束中轴线与垂直方向的夹角越小, 最大探测深度越大。所以水下目标越靠近作业船航线, 越容易被探测到。测线布设时, 要保证足够的覆盖范围和较高的扫测精度, 因此应根据目标尺寸与现场水深来合理设置测线间距, 以保证扫测的精度和效率最大化。

3) 多波束系统在不同大小水下目标的探测中表现出差异性。通过对不同大小的水下目标进行模拟和分析, 结果显示: 多波束系统对于大型目标的探测能力更强, 而对于小型目标的探测则有一定限制。水深超过计划使用的多波束测深系统对目标尺

寸的最大探测深度时, 应避免继续照原有的搜救策略进行扫测, 这样可能无法成功地探测到目标, 应当及时改变搜救策略, 如更换多波束设备, 或者调整多波束扫测模式等。

4) 本文所讨论的多波束测深系统最大探测深度的计算是在理想情况下进行的, 在实际操作中, 可能会出现数据假回波和目标误判的问题。这些问题可能由多种因素引起, 如环境噪声、设备误差、数据处理错误或者操作人员的误判断等, 会干扰对真实目标的探测, 进而影响整个搜救任务的进行。对于数据回波的判读, 需要较丰富的经验, 如查看长度方向的连续性、对比回波强度的变化等, 这需要对操作人员进行较系统的专业培训。另外, 可使用机器学习或深度学习等技术训练模型来识别和分类目标。

以上结论为搜救水下目标时如何选择多波束测深系统提供了有益参考。同时, 对于多波束测深系统的研究可以进一步探索系统的性能与探测深度之间的关系, 并拓展到更多实际应用场景中。本文的研究主要集中在理想情况下的多波束测深系统探测深度, 对其他复杂情形, 对于探测深度的影响, 我们在本文中并未深入探讨。在实际的水下环境中如何准确地进行多波束探测深度的测量和分析, 仍然需要我们在未来的研究中进一步探索 and 解决。

### 参考文献

- [1] 马杰, 余逸飞, 朱小东, 等. 面向水下目标搜寻与探摸的多装备协同作业系统[J]. 中国航海, 2023, 46(1): 136-142.
- [2] 李海东, 胡毅, 许江. 浅地层剖面系统在福建沿海海底沉船调查中的应用[J]. 海洋技术学报, 2019, 38(1): 79-84.
- [3] 鄢泓哲. 多波束测深系统关键技术研究[D]. 舟山: 浙江海洋大学, 2019.
- [4] 蔺爱军. 综合海洋地球物理方法在探测水下文化遗产中的应用研究[D]. 厦门: 国家海洋局第三海洋研究所, 2017.
- [5] 赵建虎, 李娟娟, 李萌. 海洋测量的进展及发展趋势[J]. 测绘信息与工程, 2009, 34(4): 25-27.
- [6] 翟国君, 黄谟涛. 海洋测量技术研究进展与展望[J].

- 测绘学报, 2017, 46 ( 10 ): 1753-1759.
- [7] 周天, 欧阳永忠, 李海森. 浅水多波束测深声呐关键技术剖析[J]. 海洋测绘, 2016, 36 ( 3 ): 1-6.
- [8] GALWAY R S. Comparison of target detection capabilities of the Reson Seabat 8101 and Reson Seabat 9001 multibeam sonars[EB/OL]. [2000-5-13]. [http://www.omg.unb.ca/omg/papers/MBSS\\_TermPaper.pdf](http://www.omg.unb.ca/omg/papers/MBSS_TermPaper.pdf).
- [9] 赵建虎, 刘经南. 多波束测深及图像数据处理[M]. 武汉: 武汉大学出版社, 2008.
- [10] 吴利红. 基于目标识别的多波束系统探测参数设计[J]. 中南大学学报: 自然科学版, 2011, 42 ( S1 ): 677-683.
- [11] 张永厚, 肖付民, 金绍华, 等. 顾及波束重叠的多波束横向分辨率估计模型[J]. 海洋测绘, 2020, 40 ( 3 ): 15-18.
- [12] 丁继胜, 周兴华, 刘忠臣, 等. 多波束测深声呐系统的工作原理[J]. 海洋测绘, 1999, 19 ( 3 ): 15-22.
- [13] 王晓琳. 浅谈多波束系统在海洋工程勘察中的应用[J]. 科技资讯, 2014, 12 ( 15 ): 45-46.
- [14] 李海森, 周天, 徐超. 多波束测深声呐技术研究新进展[J]. 声学技术, 2013, 32 ( 2 ): 73-80.
- [15] 黄承义, 肖春桥, 田丰, 等. 基于 EM 系列多波束水深测量的声速剖面校正方法及技巧[J]. 测绘通报, 2012 ( S1 ): 98-102.
- [16] 阳凡林, 李家彪, 吴白银, 等. 浅水多波束勘测数据精细处理方法[J]. 测绘学报, 2008, 37 ( 4 ): 444-450.
- [17] 赵建虎. 多波束深度及图像数据处理方法研究[D]. 武汉: 武汉大学, 2002.
- [18] 刘忠臣, 周兴华, 陈义兰, 等. 浅水多波束系统及其最新技术发展[J]. 海洋测绘, 2005, 25 ( 6 ): 67-70.
- [19] 黄泽鹏. 侧扫声呐和多波束声呐在平潭海域水下文物探测的应用研究[D]. 厦门: 厦门大学, 2021.
- [20] 周青, 蒋其伟, 边刚, 等. 顾及横向分辨率的目标探测极限深度计算[J]. 海洋测绘, 2021, 41 ( 5 ): 57-60.
- [21] 张兴伟, 潘国富, 张济博. 基于中值滤波加权修正的多波束声呐测深数据趋势面滤波方法[J]. 海洋科学, 2018, 42 ( 7 ): 32-39.
- [22] 陈爽, 肖付民, 金绍华, 等. 多波束探测分辨率估计模型研究[J]. 海洋测绘, 2016, 36 ( 4 ): 12-15.
- [23] 林晓彬, 杨志敏. 多传感器信息融合的防波堤结构检测技术研究[J]. 人民珠江, 2022, 43 ( 5 ): 114-120.
- [24] 刘毅, 周兴华, 史永忠, 等. 姿态测量误差对多波束测深数据影响分析[J]. 测绘工程, 2015, 24 ( 9 ): 31-33.
- [25] 刘顺杰, 史晓平. 提高落水集装箱应急扫测效率若干方法探析[J]. 中国航海, 2022, 45 ( 3 ): 33-38, 46.
- [26] 来向华, 马建林, 潘国富, 等. 多波束测深技术在海底管道检测中的应用[J]. 海洋工程, 2006 ( 3 ): 68-73.

(责任编辑: 肖楚楚)