

引用格式: 陈敬军, 曾赛. 水下小目标合成孔径声呐层析成像技术研究[J]. 声学技术, 2023, 42(4): 440-445. [CHEN Jingjun, ZENG Sai. Research on synthetic aperture sonar tomographic imaging for small underwater targets[J]. Technical Acoustics, 2023, 42(4): 440-445.] DOI: 10.16300/j.cnki.1000-3630.2023.04.005

# 水下小目标合成孔径声呐层析成像技术研究

陈敬军<sup>1</sup>, 曾赛<sup>2</sup>

(1. 海军装备部驻上海地区第七军事代表室, 上海 201108; 2. 上海船舶电子设备研究所, 上海 201108)

**摘要:** 水下小目标精细成像对于正确识别水下目标具有重要意义。目前, 多波束成像声呐和条带合成孔径声呐是获取水下小目标图像的主要手段。水下目标的判别主要利用了目标图像的亮点特征, 即使是同一目标从不同方位观测时得到的结果也可能差异较大, 这给快速识别确认目标带来了困难。为解决该问题, 提出了利用圆周合成孔径声呐对水下小目标进行水声层析成像信号处理方法, 提高了声呐的多角度融合观测能力。仿真及试验数据处理结果表明, 合成孔径声呐层析成像方法能够获得目标外形轮廓精细特征, 有利于水下小目标的正确识别。

**关键词:** 层析成像; 合成孔径; 目标识别

中图分类号: TB566

文献标志码: A

文章编号: 1000-3630(2023)-04-0440-06

## Research on synthetic aperture sonar tomographic imaging for small underwater targets

CHEN Jingjun<sup>1</sup>, ZENG Sai<sup>2</sup>

(1. The Seventh Military Representative Office of Naval Equipment Department in Shanghai, Shanghai 201108, China;  
2. Shanghai Marine electronic equipment research institute, Shanghai 201108, China)

**Abstract:** Fine imaging of target is significant for the identification of underwater targets. At present, the multi-beam imaging sonar and strip synthetic aperture sonar are the main methods to obtain images of small underwater targets. The target images are mainly characterized by highlight spots, and the results of observing the target from different directions are different, which brings difficulties to the identification and confirmation of targets. In order to solve this problem, a signal processing method using circular synthetic aperture sonar for underwater acoustic tomography of small underwater targets is proposed for improving the multi-angle fusion observation ability of sonar. The simulation and experimental data processing results show that the tomographic synthetic aperture sonar (SAR) imaging method can obtain the fine contour features of the target, which is conducive to the accurate identification of underwater small targets.

**Key words:** tomography; synthetic aperture; object identification

## 0 引言

水雷是现代海战中舰艇面临的主要水下威胁之一, 主要包括锚雷、沉底雷、掩埋雷等类型。提高对水雷的探测识别能力一直是浅海或浅水环境下舰艇反水雷作战的重要需求之一。由于水介质对于电磁信号的吸收较强, 使得声信号成为水雷目标探测的首选手段。目前, 水雷探测识别依然面临许多挑战, 存在许多技术难点。一方面, 水雷具有目标尺度小、目标强度弱、目标散射声场空间指向不均匀性等特性, 远距离小目标检测困难, 需要解决在远距离上提高目标检测概率的

问题。另一方面, 水雷所处的水下环境干扰小目标多, 即使同一目标从不同方位观测时得到的结果也可能差异较大, 水雷容易与自然目标或民用目标混淆, 提高水雷识别性能需要解决可疑威胁小目标的识别确认问题。

提供更加精确的目标回波图像是显著提高图像探测声呐识别性能的重要手段。图像声呐的分辨率是衡量图像声呐性能优劣的重要技术指标, 一般分为距离分辨率和方位分辨率。距离分辨率是指声波传播方向的分辨率, 方位分辨率是指垂直于声传播方向的分辨率。距离分辨率由信号的脉冲宽度或者带宽决定, 可以通过增加信号的带宽来提高距离分辨率。方位分辨率与声呐基阵的大小有关, 在实际工程应用中, 利用增加基阵的大小来提高方位分辨率的方法受到了成本、安装空间等现实条件的制约。采用合成孔径的方法是提高声呐方位分辨率的一种可行方案, 并已经在工程应用中得到检验。与

收稿日期: 2023-05-31; 修回日期: 2023-07-25

作者简介: 陈敬军(1971—), 男, 山东费县人, 博士、高级工程师, 研究方向为信号与信息处理、人工智能。

通信作者: 陈敬军, E-mail: cjj\_81@sina.com

单波束声呐、多波束声呐和侧扫声呐相比，合成孔径声呐在水下目标探测成像和识别方面具有显著的优势<sup>[1]</sup>。

根据成像的原理，可以将合成孔径声呐分为条带合成孔径声呐和干涉合成孔径声呐，其中干涉合成声呐比条带合成孔径声呐多一条接收阵，其结构更为复杂。与多波束声呐和侧扫声呐类似，无论是条带合成孔径声呐还是干涉合成孔径声呐，其运动轨迹均为直线，对于水中观测场景中的待观察目标而言，直线轨迹决定了声呐波束只能在有限角度内观测到目标。从目标特性的角度分析，对于各向异性目标，不同方位的散射特性是不同的，有限的观测角带来了目标信息缺失的问题<sup>[2]</sup>，最终会影响图像声呐的探测识别性能的提高。

层析(Tomography)成像技术是一种波数谱分析方法，其本质是通过圆形测量孔径获得关于目标的全方位散射信息，然后基于全方位散射信息反演重建得到目标的外形轮廓(声学层析)或内部精细结构(医学层析)<sup>[3]</sup>，层析成像技术已经成功应用于多个领域<sup>[4-7]</sup>。利用层析手段获得的目标回波信号波数结构呈现“圆台”结构。圆台中空结构的大小与发射信号的带宽相关，当发射信号带宽较大时，圆台中空结构小，波数谱包含的信息量大<sup>[8]</sup>。“圆台”形的三维波数谱结构使得层析成像技术可以获得目标图像的高度向分辨率，有利于提高目标成像质量，提高目标识别概率<sup>[9]</sup>。

将合成孔径体制与层析手段相结合，通过构造观测场景的全方位观察态势，能够克服各向异性目标不同方位散射特性各异的困难，获得全方位散射信息，使得成像矩阵的可解性更强。从傅里叶成像的角度而言，层析合成孔径扩展了波束谱域的有效带宽，从而能够达到或者接近图像理论分辨率的极限，而且具备了三维成像能力<sup>[9]</sup>。本文研究了水下目标层析成像技术，首先系统分析了现有成像技术手段的技术特征，并与层析合成孔径技术手段进行了比较。其次，介绍了层析反演的基本原理，进行了层析成像的仿真，并通过水池试验和湖上试验验证了层析成像技术的可行性。

## 1 层析合成孔径声呐系统理论模型

### 1.1 层析合成孔径声呐分辨率模型

本节通过与多波束声呐、条带合成孔径声呐比较，分析层析合成孔径声呐成像分辨率特性。多波束声呐采用实孔径成像，慢时间维(方位向)分辨率 $\delta_x$ 和快时间维(距离向)分辨率 $\delta_y$ 分别为<sup>[10]</sup>

$$\begin{cases} \delta_x = R_0 \frac{\lambda}{D_a} \\ \delta_y = \frac{c}{2B} \end{cases} \quad (1)$$

式中： $D_a$ 为声呐沿方位向的孔径， $\lambda$ 为发射信号中心频率对应的波长， $R_0$ 为径向距离， $c$ 为水中声速， $B$ 为发射信号带宽。式(1)表明多波束声呐的快时间维分辨率 $\delta_y$ 取决于主动发射信号的频率带宽，多波束声呐的慢时间维成像分辨率 $\delta_x$ 随着距离的增大而变差。

条带合成孔径声呐慢时间维分辨率 $\delta_x$ 和快时间维分辨率 $\delta_y$ 分别为

$$\begin{cases} \delta_x = R_0 \frac{\lambda}{2L_{sa}} \\ \delta_y = \frac{c}{2B} \end{cases} \quad (2)$$

式中：方位向分辨率公式分母中的2倍是由双程传播产生的。波束指向角可以近似为 $\theta_0 \approx \lambda/D_a$ (3 dB角为 $0.886\lambda/D_a$ )，条带合成孔径的长度为 $L_{sa} = R_0\theta_0 = R_0\lambda/D_a$ ，将合成孔径长度代入式(2)，则有 $\delta_x = D_a/2$ 。这说明条带合成孔径声呐的快时间维分辨率取决于主动发射信号的频率带宽，慢时间维分辨率与发射阵物理孔径相关。若把合成孔径角 $\theta_{sa} \approx 2\text{asin}(\frac{1}{2}L_{sa}/R_0)$ 代入式(2)，则有 $\delta_x = \lambda[4\text{sin}(\frac{1}{2}\theta_{sa})]$ ，这说明条带合成孔径声呐慢时间维分辨率由中心频率波长和视角确定。

层析合成孔径声呐的几何模型如图1所示。以目标中心为圆心建立直角坐标系，图1中的 $O$ 为观测目标， $S$ 为围绕目标做圆周运动的阵元，当垂直阵做圆周运动时， $S$ 阵元形成的观测平面 $z=H$ ， $R_s$ 为观测平面的半径，参考点与 $S$ 阵元之间的距离为 $R_0$ 。实际声呐系统需要考虑工作频率带宽的影响，现以位于中心点 $O$ 的点目标为例分析给定带宽条件

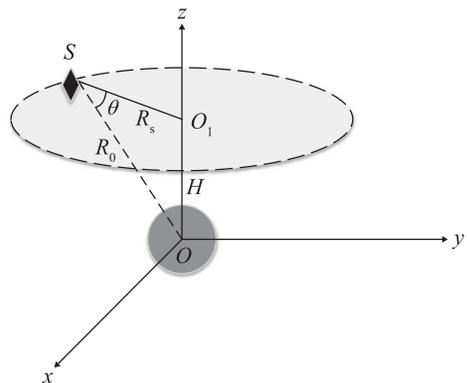


图1 层析合成孔径声呐系统成像几何模型  
Fig.1 Imaging geometry model of the tomography-synthetic aperture sonar system

下水声层析成像的分辨率。设主动发射采用宽带信号,中心频率为 $f_0$ 、带宽为 $B$ ,则点目标的空间频率波数谱为

$$\begin{cases} Q(k_x, k_y) = 1, & k_{\min} \leq \sqrt{k_x^2 + k_y^2} \leq k_{\max} \\ Q(k_x, k_y) = 0, & \sqrt{k_x^2 + k_y^2} > k_{\max} \text{ 或 } \sqrt{k_x^2 + k_y^2} < k_{\min} \end{cases} \quad (3)$$

对式(3)所示波数谱进行二维傅里叶变换并引入极坐标变换,即可以得到点目标的成像结果。由此可以得到层析合成孔径声呐成像系统点扩散函数:

$$h(r) = \frac{1}{2\pi} \left[ 2k_{\max} \frac{J_1(2k_{\max}r)}{r} - 2k_{\min} \frac{J_1(2k_{\min}r)}{r} \right] \quad (4)$$

式中:最小波数 $k_{\min} = 2\pi(f_0 - \frac{1}{2}B)/c$ ,最大波数 $k_{\max} = 2\pi(f_0 + \frac{1}{2}B)/c$ ;  $J_1(x)$ 是第一阶贝塞尔特殊函数;  $r = (x^2 + y^2)^{-1/2}$ 。由式(4)可知,  $h(r)$ 仅是 $r$ 的函数,与 $\varphi$ 无关,这说明对于场景中心的点目标,其(Point Spread Function, PSF)是关于坐标轴圆周对称的,因此其慢时间维分辨率 $\delta_x$ 和快时间维分辨率 $\delta_y$ 相等。对式(4)进行简化可以得到:

$$\delta_x = \delta_y \approx \frac{\pi}{k_{\max} - k_{\min}} = \frac{c}{2B} \quad (5)$$

式(5)为发射信号为宽带信号时层析合成孔径声呐的分辨率表达式。式(5)表明,水声层析成像系统的慢时间维分辨率与快时间维分辨率基本相当,慢时间维和快时间维分辨率由工作带宽决定,与距离无关。当发射信号为单频窄带时,分辨率为 $\delta_y = \pi/(2K_{\max} \sin\beta)$ ,其中 $\beta$ 为波数圆锥角的一半,  $K_{\max}$ 为单频信号波数。由此可以看出,发射信号为单频信号时,分辨率由频率决定,频率越大分辨率越高。条带合成孔径的慢时间维成像分辨率仅取决于声呐实孔径长度 $D_a$ ,还不能达到宽带发射条件下的快时间维成像分辨能力,因此层析合成孔径声呐的分辨率优于多波束声呐和条带合成孔径声呐。

## 1.2 层析成像理论

层析合成孔径声呐成像是通过测量空间目标图像的波数谱或空间频率谱(与目标图像互为傅里叶变换对)数据实现成像的,其理论基础是空域傅里叶变换<sup>[11-15]</sup>。图2给出了水声层析成像原理的示意图。假设被测目标分布在两维平面内,以被测成像空间区域的中心 $O$ 为原点建立平面直角坐标系 $xOy$ ,声呐围绕中心 $O$ 做圆周运动,声呐到中心 $O$ 的距离为 $R_0$ ,声波入射方向与 $x$ 轴的夹角为 $\theta$ 。

当声呐与被测目标之间的距离和工作频率波长之间满足远场条件时,可以将发射和接收信号用平

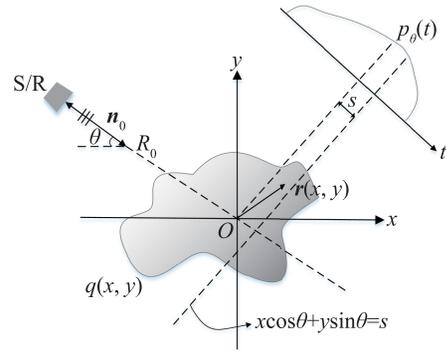


图2 层析成像原理示意图

Fig.2 Schematic diagram of the tomography imaging principle

面波近似。声呐在 $\theta$ 方位角采集的回波信号可以表述为

$$p_\theta(t) = \int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} q(x, y) p_0 \left[ t - 2 \frac{R_0 + s}{c} \right] dx dy \quad (6)$$

式中:  $q(x, y)$ 为待重建目标外形及其内部结构特征反射系数分布,  $p_0(t)$ 是声呐主动发射信号,  $c$ 是水中声速,  $s$ 表示相对延迟距离,是散射点矢量 $r(x, y)$ 沿 $\theta$ 方向的投影距离,计算公式为:  $s = x \cos \theta + y \sin \theta$ 。对 $p_\theta(t)$ 做关于时间变量 $t$ 的一维傅里叶变换,可以得到一维时域回波信号频率谱:

$$Q_\theta(\omega) = Q_0(\omega) e^{-i2kR_0} \int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} q(x, y) e^{-i2k(x \cos \theta + y \sin \theta)} dx dy \quad (7)$$

其中:  $Q_0(\omega)$ 为主动发射信号频率谱,波数定义为 $k = \omega/c$ 。对 $q(x, y)$ 关于空间变量 $x$ 和 $y$ 做二维傅里叶变换,可以得到空间波数谱:

$$Q(k_x, k_y) = \int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} q(x, y) e^{-i(k_x x + k_y y)} dx dy \quad (8)$$

令 $k_x = 2k \cos \theta$ 、 $k_y = 2k \sin \theta$ ,代入式(8),并与式(7)比较,可以得到:

$$Q(k_x, k_y) = e^{i2kR_0} Q_\theta(\omega) / Q_0(\omega) \quad (9)$$

式(9)建立了测量的一维时域回波信号频率谱与被测目标或被测区域反射系数 $q(x, y)$ 的二维空间波数谱的数学关系,从而可以获得全方位角的空间波数谱。对空间波数谱进行二维傅里叶逆变换可以得到被测目标或被测区域反射系数的成像结果,即:

$$q(x, y) = \mathcal{F}^{-1} [ Q(k_x, k_y) ] = \frac{1}{4\pi^2} \int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} Q(k_x, k_y) e^{i(k_x x + k_y y)} dk_x dk_y \quad (10)$$

## 2 仿真试验

待测目标由40个亮点组成,这些亮点组成了大小为 $1 \text{ m} \times 1 \text{ m}$ 的正方形,待测目标的几何态势如图3所示。目标反射系数设为1,发射信号

为线性调频信号，中心频率为 100 kHz，带宽为 30 kHz，发射脉宽为 10 ms，层析成像的测量半径为 30 m。

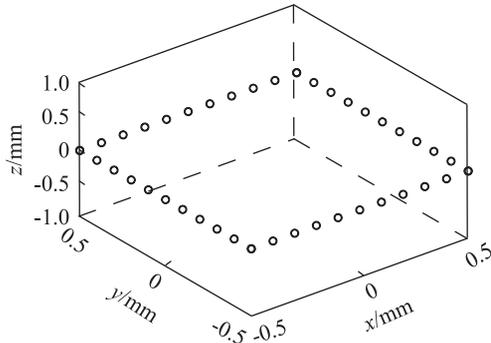


图3 待成像目标示意图  
Fig.3 Diagram of the object to be imaged

图4为阵元回波信号的角度-时间谱，其中横轴为角度，纵轴为距离向采样点。从图4中可以看出，层析合成孔径声呐获得的目标回波的时间-角度图呈现正弦曲线的样式。图5为基于 1.2 小节成像理论对平面点目标的重建效果图。从图5中的重建效果可以看出，层析合成孔径声呐能够对物体进行精确成像。

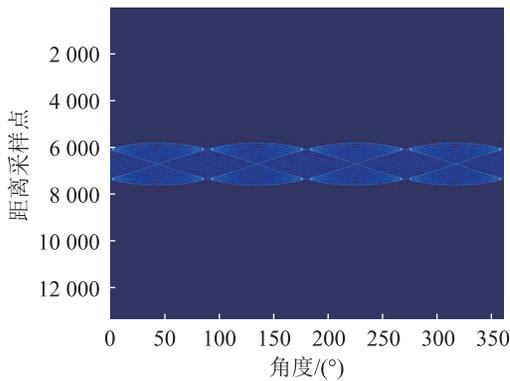


图4 目标回波角度-时间谱  
Fig.4 Target echo signal structure

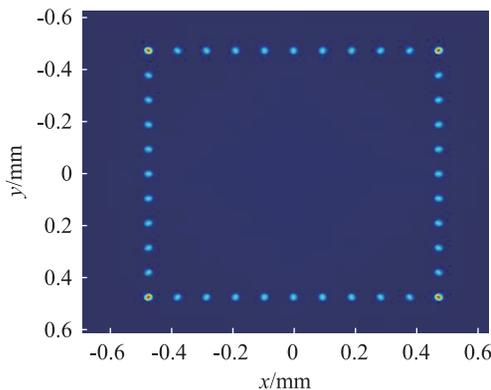


图5 目标二维成像示意图  
Fig.5 A schematic representation of the target in two-dimensional imaging

### 3 试验验证

#### 3.1 水池试验验证

在某消声水池进行了层析合成孔径声呐成像技术的验证试验。试验测试态势示意图如图6所示。待测目标为 Benchmark 潜艇模型，按照 1：20 比例缩比制作，高度小于 35 cm，长度约为 2 m，为双层加肋结构。试验用 Benchmark 目标，如图7所示。待测目标放置在一个转台上进行周向旋转，发射接收阵在另一个转台上，发射阵与目标之间的距离为 10 m，发射阵在水下的深度为 3 m。发射阵发射 160 kHz 的单频信号，接收阵为“L”形。

试验中接收阵元回波结构如图8所示，横坐标为角度，纵坐标为距离采样点。从图8中可以看

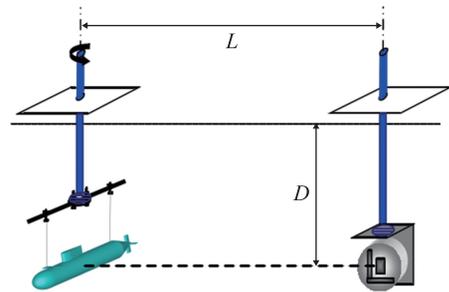


图6 消声水池试验测试态势示意图  
Fig.6 Test situation diagram in anechoic pool



图7 试验用 Benchmark 目标  
Fig.7 Benchmark target used for the experiment

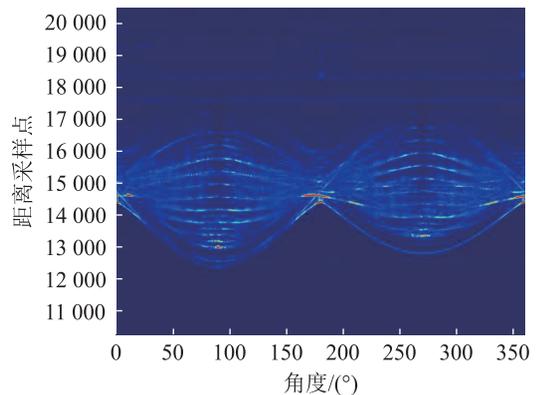


图8 Benchmark 目标回波角度-时间谱  
Fig.8 Benchmark target echo structure

出,随着目标的转动,目标回波呈现正弦曲线结构。图9为待测目标的水声层析成像结果。从图9中可以看出缩比模型的上层结构、内部肋板以及外形轮廓结构均得到清晰地重建,与真实的结构吻合较好,验证了本文所提层析重建方法的有效性。

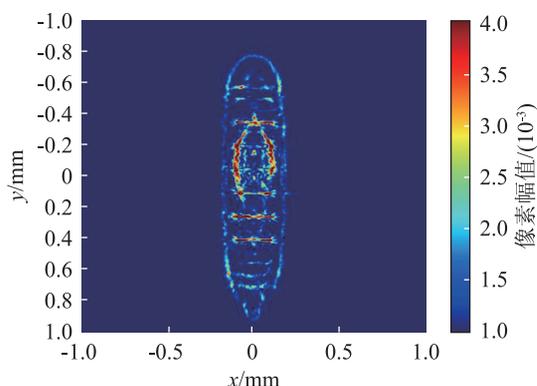


图9 Benchmark 目标图像重建结果

Fig.9 Reconstruction result of the Benchmark target image

### 3.2 湖上试验验证

本文对人工布放的目标进行了层析合成孔径成像的湖上验证试验,试验目标如图10所示。试验区域的水深为12 m。发射阵发射线性调频信号,中心频率为100 kHz,带宽为30 kHz,信号重复周期为150 ms。采用多子阵接收目标回波,其中发射阵和接收阵通过固定机构与运动平台刚性连接运动。发射接收阵的运动载体为水面双体船。试验中,水面双体船搭载发射接收换能器绕目标做圆周运动,利用GPS定位双体船的轨迹。

图11为待测目标回波的角度-时间谱。图12为利用本文所述方法对试验目标进行层析成像的结



图10 湖上试验待测目标

Fig.10 The target to be tested in lake

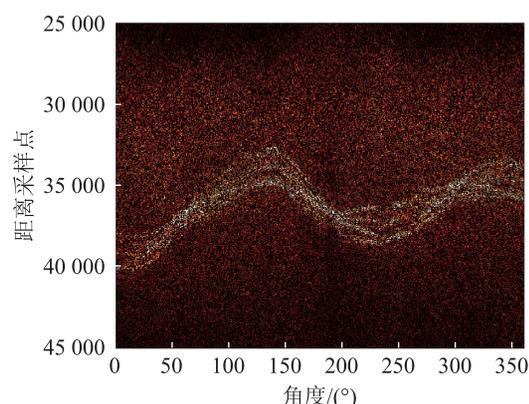


图11 试验目标回波角度-时间谱  
Fig.11 Echo structure of the test target

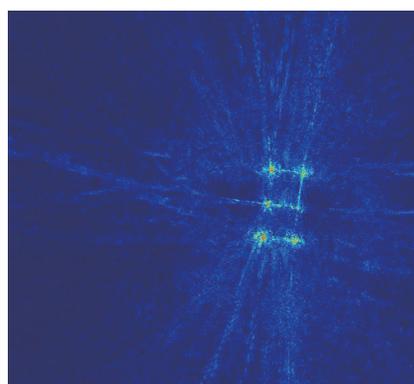


图12 试验目标层析成像结果  
Fig.12 Tomography imaging result of the test target

果。从图12中可以看出,利用获得的目标回波信号能够重建目标的二维外形轮廓,且目标的形状轮廓无畸变、无阴影,有利于目标的正确识别。

## 4 结论

水下目标或场景的声成像对于目标的探测与识别具有重要的意义。本文研究了基于层析合成孔径的水下目标成像方法,理论分析了层析合成孔径声呐的分辨率以及层析成像的机制,并通过仿真试验、水池试验和湖上试验验证了层析合成孔径声呐对水下目标的层析成像效果。结果表明,本文所提方法能够在一定距离上对水下目标图像进行精确重建,有利于正确识别水下目标。本文所提方法可以显著提高水下小目标的识别正确率,对于水下目标的探测与识别研究具有重要应用价值,后续将结合具体工程应用继续深入研究。

### 参考文献

- [1] 杜选民,曾赛. 圆周合成孔径声呐技术综述[J]. 声学技术, 2022, 41(3): 323-333.  
DU Xuanmin, ZENG Sai. Progress on techniques of circular synthetic aperture sonar[J]. Technical Acoustics, 2022, 41(3):

- 323-333.
- [2] LIN H, MA P F, CHEN M, et al. Basic principles, key technique and applications of tomographic SAR imaging[J]. Journal of geomatics, 2015, **40**(3): 1-5.
- [3] FERGUSON B G, WYBER R J. Application of acoustic reflection tomography[J]. J. Acoust. Soc. Am, 2005: **117**(5): 2915-2928
- [4] ALESSANDRA C, PATRIZIA C, RAFFAELE M. Joint interpretation of seismic refraction tomography and electrical resistivity tomography by cluster analysis to detect buried cavities [J]. Journal of Applied Geophysics, 2020, **178**: 1-8.
- [5] PAN Y L, SHI D J, WANG H Q. et al. Automatic opportunistic osteoporosis screening using low-dose chest computed tomography scans obtained for lung cancer screening[J]. European Radiology, 2020, **30**: 4107-4116.
- [6] JAVIER D, FRANCISCO J, RODRÍGUEZ T. Exploring computed tomography in ichnological analysis of cores from modern marine sediments[J]. Scientific Reports, 2020, **10**(1): 47-69.
- [7] YU Y, D'ALESSANDRO M M, TEBALDINI S, et al. Signal processing options for high resolution SAR tomography of natural scenarios[J]. Remote Sensing, 2020, **12**(10): 1638-1645.
- [8] 曾赛, 范威, 杜选民. 圆合成孔径声呐多点定位运动补偿[J]. 声学学报, 2021, **46**(6): 1071-1081.  
ZENG Sai, FAN Wei, DU Xuanmin. Multilateration motion compensation for circular synthetic aperture sonar imaging[J]. Acta Acustica, 2021, **46**(6): 1071-1081.
- [9] MARSTON T M, KENNEDY J L. Volumetric acoustic imaging via circular multi-pass aperture synthesis[J]. IEEE J. Ocean. Eng, 2016, **41**(4): 852-867.
- [10] FERGUSON B G, WYBER R J. Generalized framework for real aperture, synthetic aperture, and tomographic sonar imaging[J]. IEEE J. Ocean. Eng., 2009, **34**(3): 225-238.
- [11] FRIEDMAN A D, MITCHELL S K, KOIJ T L, et al. Circular synthetic aperture sonar design[J]. IEEE Oceans, Proceedings, 2005, **6**: 1038-1045.
- [12] FAN W, KONG H, ZHANG X B. Simulation of circular synthetic aperture sonar imaging using TriKirch scattering model and experimental validation[C]// OCEANS 2017. Aberdeen, UK. IEEE, 2017: 1-5.
- [13] PINHEIRO M, PRATS P, SCHEIBER R, et al. Tomographic 3D reconstruction from airborne circular SAR[C]//2009 IEEE International Geoscience and Remote Sensing Symposium. Cape Town, South Africa. IEEE, 2010: III-21.
- [14] ZENG S, FAN W, DU X. Three-Dimensional Imaging of Circular Array Synthetic Aperture Sonar for Unmanned Surface Vehicle. Sensors 2022, **22**, 3797.
- [15] 曾赛, 杜选民, 范威. 采用垂直短阵的水下小目标三维层析成像方法[J]. 哈尔滨工程大学学报, 2020, **10**(41): 1584-1602.  
ZENG Sai, DU Xuanmin, FAN Wei. Three-dimensional tomography method of underwater small target using vertical array[J]. Journal of Harbin Engineering University, 2020, **10** (41): 1584-1602.