

三维合成孔径技术在水下浅埋目标物探测的应用

贺惠忠^{1,2}, 章仲怡³, 谢安远^{1,2*}, 陈栋^{1,2}, 李正元^{1,2}, 何西^{1,2}

1. 自然资源部南海调查中心, 广州 510300
2. 自然资源部海洋环境探测技术与应用重点实验室, 广州 510300
3. 渤海石油航务建筑工程有限责任公司, 天津 300450

摘要 水下浅埋目标物的探测是水下考古和海洋探测的难点。梳理了现有水下浅埋目标物探测技术, 认为传统水下掩埋物探测技术尚存不足, 三维合成孔径声呐技术更具优势。通过对海底古沉船的实测, 认为三维合成孔径声呐能够有效获得浅掩埋目标物三维结构状态、埋深情况和高分辨率图像等信息, 可以更有效地实现对水下浅埋目标物的探测与精确识别。

关键词 海洋测绘; 水下浅埋物探测; 三维合成孔径声呐

海洋探测是认识海洋最基础、最先行和最关键的一步, 是获取海底(水底)地形、地貌、底质状况、地质状况等数据的主要手段^[1]。中国海洋资源利用与开发历史悠久, 海底沉没了大量古代文物。由于这些珍贵的文物大部分掩埋在海床之下, 难以被发现, 急需开展相关海洋探测关键技术的研发, 从而破解这一难题。

目前, 针对海底目标的探测技术较多, 且相对比较成熟^[2-5], 但是, 如何有效探测海底掩埋物还具有较大的挑战。本文对现有水下掩埋物探测技术

进行了梳理, 认为传统水下掩埋物探测技术存在缺点和不足, 即由于当前水下考古行业所运用的探测仪器、技术虽然可以感知埋藏的物体, 但对水下浅埋文物遗存的准确位置、形态、埋深等信息缺乏更加有效、直观、智能和主动的探测技术手段。而三维合成孔径技术采用面阵换能器, 综合运用多波束和合成孔径技术, 在距离、航迹和垂直航迹等多个方向同时实现三维高分辨率成像, 可以显著提高成像分辨率, 从而能够更加精准地探测和识别掩埋的细小目标。因此, 本文拟利用三维合成孔径声呐进

收稿日期: 2023-07-01; 修回日期: 2024-03-07

基金项目: 国家重点研发计划项目(2020YFC1521700)

作者简介: 贺惠忠, 正高级工程师, 研究方向为海底精细勘察与测绘, 电子信箱: hehuizhong_smsc@163.com; 谢安远(通信作者), 工程师, 研究方向为海底工程勘察, 电子信箱: xay_smst@163.com

引用格式: 贺惠忠, 章仲怡, 谢安远, 等. 三维合成孔径技术在水下浅埋目标物探测的应用[J]. 科技导报, 2024, 42(14): 99-107;

doi: 10.3981/j.issn.1000-7857.2023.07.01102

行水下浅埋文物遗存探测应用试验,通过试验,拟对水下浅埋文物遗存三维立体结构复现,提高水下浅埋文物遗存探测的精度和效率。

1 传统水下掩埋物探测技术介绍

1.1 磁探仪

磁探仪是一种利用磁性物质在地球磁场作用下产生的磁场变化来探测地下物体的仪器^[6]。在海底探测中,磁探仪可以用来探测海底掩埋物体,如沉船、遗址、管线等。其基本原理是海底铁质沉物或掩埋物在地球磁场中被磁化,产生磁异常^[7]。通过检测该磁异常来确定这些铁磁性水下小目标的位置和性质(图1)。

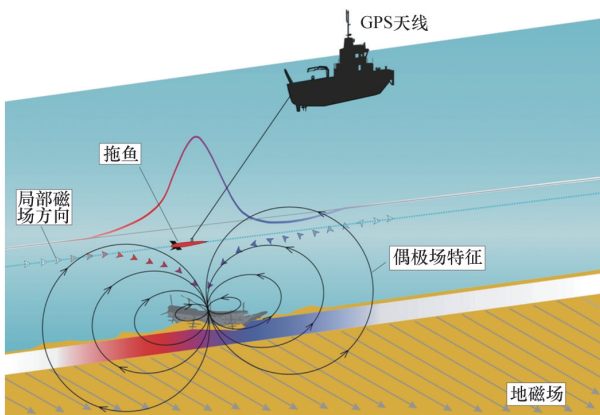


图1 磁探仪工作原理示意

磁探仪探测海底掩埋物体的方法主要包括以下4个步骤。

1) 磁场基线测量:在探测前需进行磁场基线测量,即在没有掩埋物体的情况下,测量海底磁场强度和方向,以便后续探测时准确计算磁场变化。

2) 磁场探测:将磁探仪放置在船上,通过电缆将磁探仪与船体连接,将磁探仪下放到海底,进行磁场探测。在探测过程中,磁探仪会记录下海底磁场的强度和方向。

3) 数据处理:将磁场探测得到的数据进行处理,计算出海底磁场的变化。掩埋物会对地球磁场产生扰动,形成磁异常区,通过对磁异常区进行分析,确定掩埋物体的位置、形状和大小等信息。

4) 确认掩埋物体:通过对磁异常区的分析,初步确定掩埋物体的位置和形状,但需要进一步确认掩埋物体的具体情况。可以通过声呐、水下摄像等技术进行确认。

总的来说,磁探仪探测海底掩埋物体的方法是通过测量海底磁场的变化来确定掩埋物体的位置和形状,是一种有效的海底掩埋物探测方法。但是,磁探技术作用距离近、分辨率低、探测能力有限(如不能探测非金属目标等)、虚警率高,且对载体有苛刻的要求(如消磁等),应用范围相对有限。

1.2 浅地层剖面仪

浅地层剖面仪是在测深仪基础上发展而来,其发射频率更低,声波信号通过水体穿透海底后继续向更深层穿透,结合地质解译,可以探测到海底以下浅部地层的结构和构造情况^[8]。浅地层剖面仪探测在地层分辨率(一般为数十厘米)和地层穿透深度(一般为近百米)方面有较高的性能,并可以任意选择扫频信号组合,现场实时设计调整工作参量,既可以探测海底淤泥厚度,也可以探测海底基岩深度^[9-10]。

按技术分类,浅地层剖面仪可以分为压电陶瓷式、声参量阵式、电火花式和电磁式4种。其中,压电陶瓷式又分为固定频率和线性调频(Chirp)2种;电火花式主要是利用高电压在海水中的放电产生声音原理;声参量阵式主要是利用差频原理进行水深测量和浅地层剖面勘探;电磁式通常多为各种不同类型的Boomer,相对来说,该类设备穿透深度及分辨率适中(图2)。

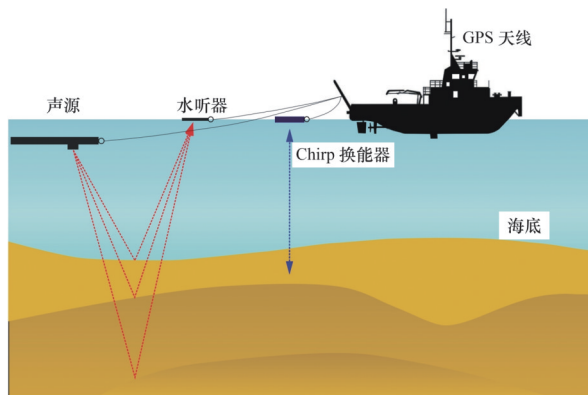


图2 浅地层剖面仪工作原理示意

浅地层剖面仪原理是通过发射换能器垂直向海底发射声波信号,声波穿透水层、海底地层,下行过程中经各层介质的滤波,遇声阻抗界面返回,最终携带有界面层信息的反射声波被接收单元接收,也就是说浅地层剖面仪是利用界面层间的声阻抗差异来反映各层结构,浅剖图像反映的是声信号的旅行时间和反射强度,即声波到达反射界面所需的时间和反射信号能量的强弱。

浅地层剖面仪生成的图像可用于认识浅部地层产状、内部结构以及各种灾害地质因素(浅层气、埋藏河道、断层等),而且还能够判断某些埋藏物与海床的空间位置关系,如海底管道、沉船、坐底构筑物等,确定其埋藏深度或悬空高度。但是,浅地层剖面仪探测效率低、分辨率低,一般只能用于探测较粗的管线目标或较大范围的地质剖面,不适合用

来探测较小的掩埋目标。此外,浅地层为二维成像,只能获得设备下方的剖面图像。

1.3 二维低频合成孔径声呐

合成孔径声呐是一种利用声波在水中传播的特性来探测水下物体的仪器。在水下探测中,合成孔径声呐可以用来探测水下掩埋物,如沉船、遗址、管线等。

传统的侧视声呐为实孔径声呐,其沿航迹分辨率(或称方位分辨率)的角分辨率为恒定值,线分辨率与目标距离成正比,目标距离越远,分辨率数值越大,即分辨率越差。为解决该问题,提出了合成孔径技术,其基本原理是利用小孔径基阵沿航迹方向移动形成虚拟大孔径,目标距离越远,孔径越长,经过信号处理后可以获得不随目标距离变化的恒定的沿航迹分辨率^[11-17](图3)。

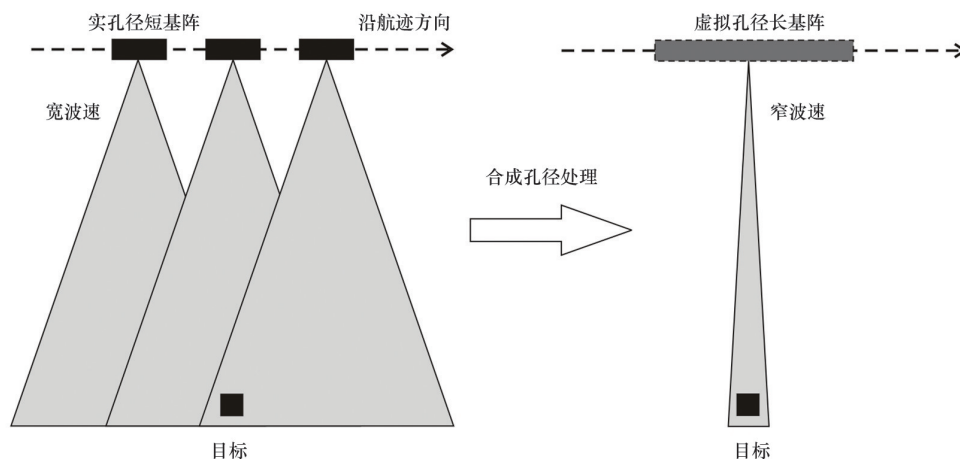


图3 合成孔径声呐工作原理示意

合成孔径声呐为低频,典型如 20 kHz 以下,利用声波的穿透性,可获得浅掩埋目标的声学影像。

合成孔径声呐探测水下掩埋物的方法主要包括以下 4 个步骤。

1) 发射声波:将合成孔径声呐安置在船上,通过电缆将合成孔径声呐与船体连接,将声波发射器下放到水下,发射声波。

2) 接收声波:在声波发射器附近放置接收器,接收声波的反射信号。

3) 数据处理:将接收到的声波信号进行处理,计算出水下物体的位置、形状和大小等信息。掩埋物体会对声波产生反射和散射,形成声波反射区,通过对声波反射区的分析,可以确定掩埋物体的位置、形状和大小等信息。

4) 确认掩埋物体:通过对声波反射区的分析,初步确定掩埋物体的位置和形状,但需要进一步确认掩埋物体的具体情况,可以通过摄像等技术进行确认。总的来说,合成孔径声呐探测水下掩埋物的

方法是通过发射声波、接收反射信号,计算得出水下物体的位置、形状和大小等信息,从而确定掩埋物体的位置和形状。

侧视低频合成孔径声呐,是利用低频声波穿透性获得海底掩埋目标的成像,但主要有2点不足:一是其掠射角较大,可探测到掩埋目标物的埋深较浅,一般不超过3 m;二是为二维成像,沉底和掩埋目标叠加在二维强度图上,需要利用高低频影像区分沉底和掩埋状态,且不能获得掩埋深度指标。

2 三维合成孔径声呐技术

2.1 工作原理

为解决传统掩埋技术的不足,声呐专家提出三维合成孔径成像技术^[18-20]。该技术综合运用多波束和合成孔径2类声呐技术,在沿航迹方向上采用合成孔径技术,在垂直航迹方向的垂直面上使用多波束技术(实孔径多波束)。2种技术经有机结合,克服多通道接收机一致性设计、大规模数据并行处理等难题,实现全景三维实时成像。

在三维合成孔径成像声呐中,发射阵列一般在沿航迹方向较长,在垂直航迹方向较短,这样构成了沿航迹方向较窄、垂直航迹方向较宽的波束覆盖范围。接收阵列采用 M 行 N 列的平面阵列,在沿航迹方向上共 M 行,在垂直航迹方向上共 N 列。垂直航迹方向上通过采用多阵元,使得在垂直航迹方向上具有分辨能力。在沿航迹方向上通过采用多阵元,可以提高沿航迹方向的空间采样率和工作航速,进而提高探测成像效率(图4)。

三维合成孔径技术的核心是三维成像算法。目前主要有时域和频域2类成像算法。时域算法具有原理简单、容易实现等优点,但缺点是运算量较大;频域算法具有原理较为复杂,但运算效率较高的特点。

频域三维合成孔径处理主要步骤包括:3D-FFT、脉冲压缩、方位FFT、波数域融合、Stolt变换、3D-IFFT等步骤。上述核心步骤均在频域完成,由于充分利用了FFT运算效率高的特点,因此与时域算法相比,频域算法可以极大提高运算效率。

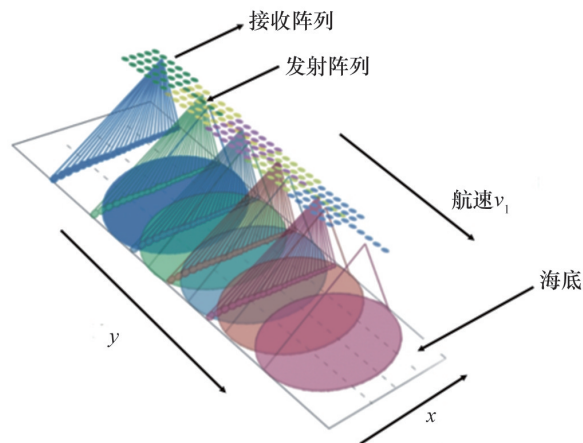


图4 三维合成孔径声呐成像示意

经过三维合成孔径处理后,实际上获得了声呐下方照射范围三维空间内每一个三维像素的强度值,这些强度值构成了三维声图。通过对这些强度值进行分析,例如对点目标、线目标进行检测,进而进行补偿、定位等,即可获得目标的清晰影像和三维位置信息(图5)。

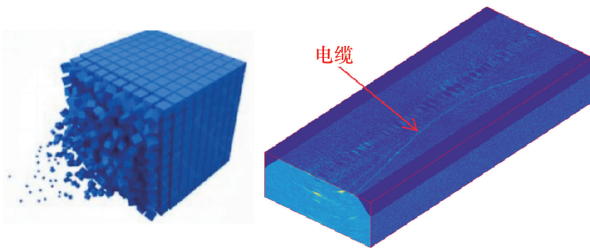


图5 三维图像展现方式

2.2 国外典型产品

加拿大Pangeo公司下视SBI系统是一款可以实时进行海底三维成像的掩埋物探测声呐^[21],主要用于海底掩埋管线探测、海底地质测量、海底巨砾探测等。研发始于2008年,2010年完成了对海底掩埋的HVDC(高压直流输电)电缆的验证,2011年正式进入商用领域,并已完成大量的实际应用。该产品主要用于搭载自航式拖体或ROV(有缆水下机器人)平台。缺点是工作航速低,一般要求2 kn以下的工作航速,并且工作时要求声呐位于海底以

上(3.5±0.5) m,因此该设备对搭载平台要求比较高,工作效率偏低(表1)。

表1 SBI主要指标

指标名称	指标值
像素精度	10 cm
阵元数目	40
探管道埋深	5 m
工作航速	2 kn以下
探测范围	5 m扫宽
最大作业水深	1000 m

2.3 国内典型产品

中科探海(苏州)海洋科技有限责任公司在2016年开始了下视三维合成孔径声呐研制工作,并于2018年推出可商用产品“海底龙”(图6)^[22]。与加拿大SBI系统相比,“海底龙”的优点是同时集成了下视三维合成孔径声呐、高清下视多波束声呐、高清侧视自适应孔径声呐等3部声呐分机,并采用了模块设计,可根据不同要求灵活组合,以满足不同任务场景以及安装需求^[23]。该成果已获得海洋工程科学技术奖、江苏省科学技术奖^[24-25]。

其中下视三维可获得水体、海底、海底以下掩埋层等全景的三维声呐数据,下视多波束声呐可获得海底高精度地形数据,高清侧视自适应孔径声呐



图6 B型“海底龙”三维合成孔径声呐系统

可获得海底高精度的地貌数据。

利用不同声呐的成像特性,可获得目标的多维度特征信息,例如水下悬浮、沉底和掩埋目标的高清影像、目标位置、目标埋藏深度,以及水下高精度三维地层等多种信息,从而实现对目标进行埋深的精确测定、形态结构判断以及周边海底环境信息的评估。

中科探海“海底龙”系统的主要技术参数如表2所示。通过与加拿大Pangeo公司产品的技术参数对比可以看出其在分辨率、探掩埋深度、工作航速等指标上具有优势。

表2 中科探海“海底龙”系统主要技术参数

指标名称	指标值
像素精度	2 cm×2 cm×2 cm
最高工作航速	6 kn
最大工作水深	300 m
埋深测量精度	10 cm
最大可探测掩埋目标埋深(泥底)	直径5 cm电缆目标:5 m;掩埋沉船:10 m;三维浅地层剖面深度:30 m
最大探测范围	掩埋目标:正下方90°;沉底目标和悬浮目标:正下方140°(下视)/双侧各50°(侧视)
下视多波束最大波束数	物理波束:192个;数字波束:1400个
最大量程	150 m
质量	≤400 kg@A型;≤250 kg@B型;≤100 kg@C型
尺寸	1.8 m×1.4 m×0.2 m@A型;1.5 m×1.2 m×0.2 m@B型;1.2 m×0.7 m×0.2 m@C型

3 三维合成孔径技术在掩埋物探测中的应用

2022年6月和10月,笔者团队利用“海底龙”

三维合成孔径声呐系统分别对长江口二号沉船以及福建漳州圣杯屿元代沉船开展探测实验工作,并结合水下考古调查,对三维合成孔径技术在浅埋目标物探测应用中的实际能力进行验证。

3.1 测线布设

根据沉船位置现场布绘测线,水深为24~30 m,测线间隔10 m,覆盖范围50 m,共5条平行测线,平行于古沉船轴向位置进行绘制,同时在沉船上方绘制垂直于古沉船轴向测线若干。

3.2 扫测结果

利用“海底龙”对长江口二号沉船进行探测,通过侧视自适应孔径声图(图7)可以看到清晰的沉船影像,并据此对沉船的长度、宽度、位置等进行了确认。在三维右视图上(图8)可明显看到沉船的反射影像,其上边缘距底高度约5 m,下边缘距底高度约11 m。将局部放大后,可以看出,探测到的

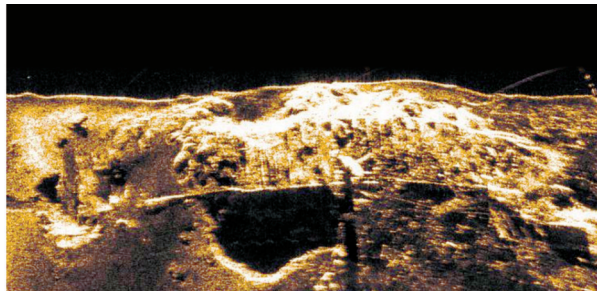


图7 长江口古沉船俯视自适应孔径声图

沉船掩埋最大深度约4.8 m。此外,在埋深约15 m的深度,仍然有疑似掩埋沉船的影像(图9),但并未进一步确认。

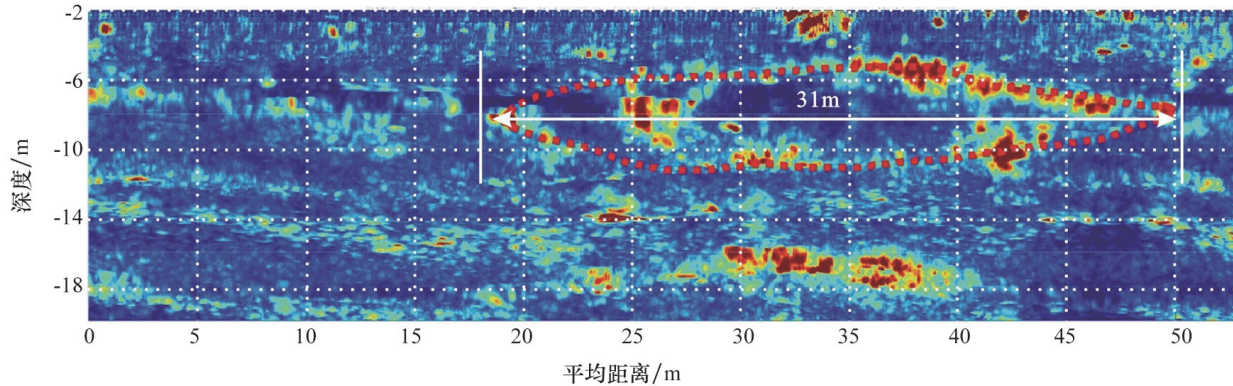


图8 长江口二号沉船三维右视图

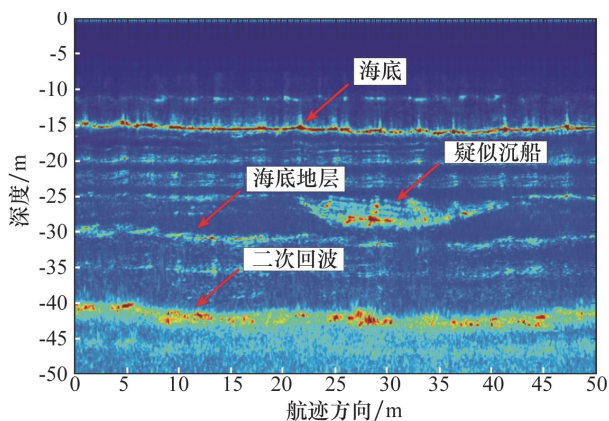


图9 长江口古沉船右视图

在福建漳州圣杯屿海域获取的水下浅埋藏沉船探测实验中,作者团队对获取的声呐信息进行三

维切片分析,即在航迹右侧7.5~13.5 m这段位置以1 m的间隔进行连续切片地层图像显示,从中可看出水下浅埋藏沉船在不同位置的埋设情况变化。

从三维声呐图像前视图及右视图并叠加多波束海底线(图10)分析可以看出,在深度方向,船舶底部主体落在27~28 m层上。最深处在海底以下约1 m,船舶最高处在海底以上约0.5 m,综合埋深在0~1 m。从三维声呐图像俯视(图11)和三维图像斜距图可看出,船舶侧舷船木长度约8 m。

此次利用三维合成孔径技术对海底沉船进行探测测试,不仅获取了较明显的海底表面侧扫声呐影像,还获取了海底浅埋目标物三维影像,并通过平面和剖面的切片分析,实现了对浅埋目标物探测的三维分析。

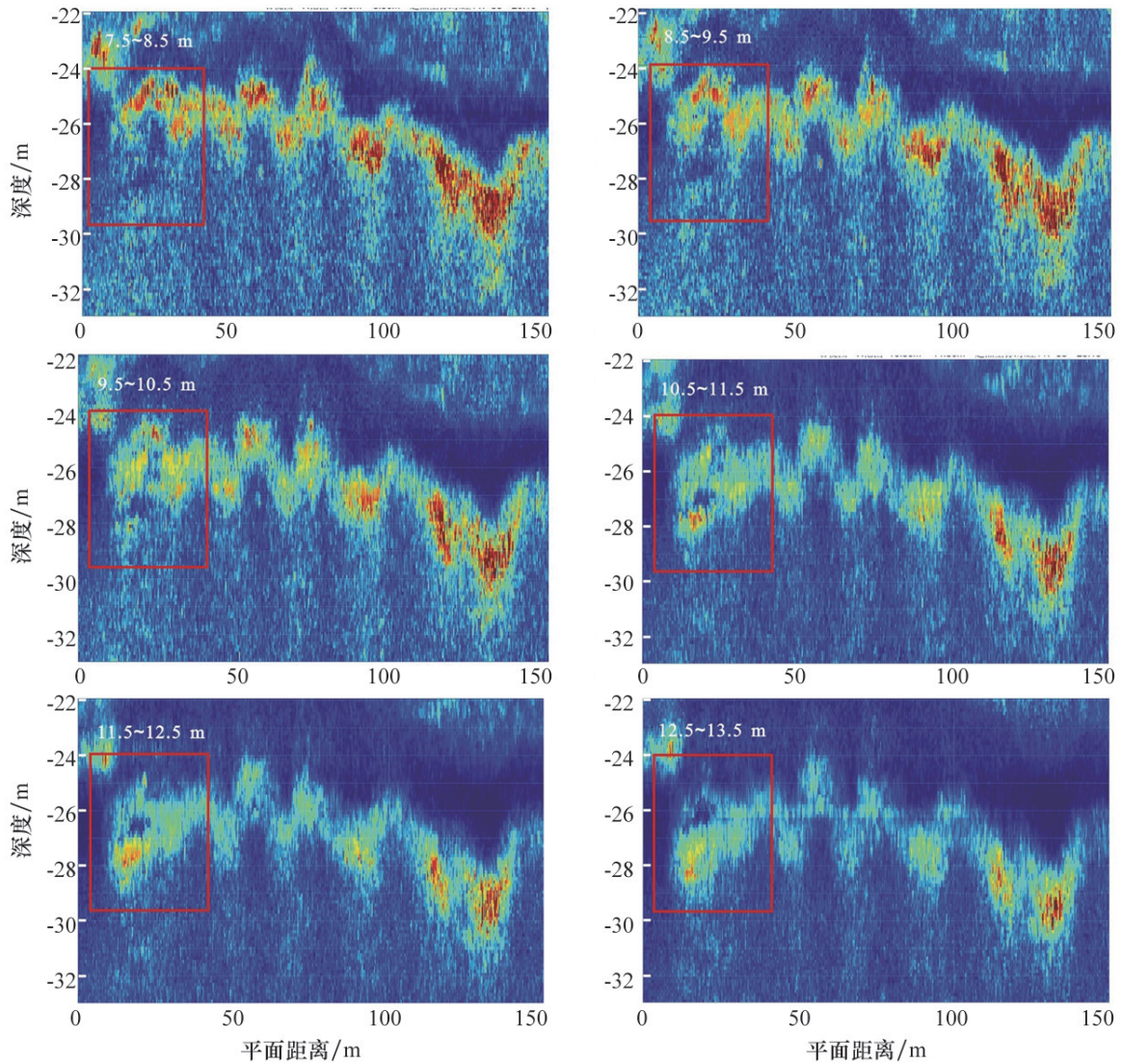


图10 漳州圣杯屿沉船连续切片图

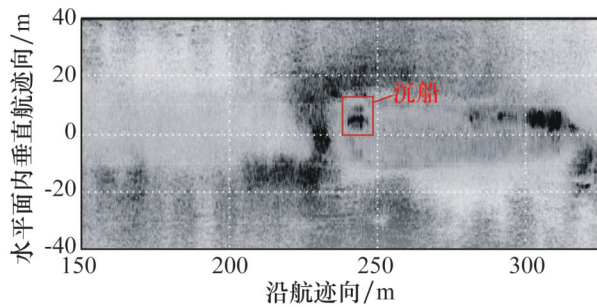


图11 漳州圣杯屿元代沉船三维声呐俯视图

4 结论

传统的海底掩埋物探测设备包括磁探仪、浅地

层剖面仪、二维低频合成孔径声呐等,在探测掩埋目标时各自有一定的局限性。三维合成孔径技术综合采用三维合成孔径成像算法,可以获得海底附近悬浮、沉底、掩埋全景三维图像,为浅埋目标物探测开辟了一种新的技术途径,可以较大提高探测效率和目标特性识别。

1) 有别于磁探仪仅能探测铁磁性物体,且仅能给出位置,无法给出埋深信息;浅地层剖面仪仅提供侧视图,且需要横穿目标,探测效率低;二维低频合成孔径声呐探测埋深较浅,且仅提供俯视图,无法给出目标埋深信息。三维合成孔径技术突破了传

统探测掩埋物技术的局限,得到更加精细的海底浅埋目标物的三维影像,通过后期的处理和建模,可以获取水下目标更加精确的位置、埋深、尺寸等信息,实现了对浅埋目标物的三维探测与分析,为水下考古工作提供了强有力的支持和技术保障。

2) 可通过多通道面阵提供的阵列增益,增大三维合成孔径技术探测掩埋物的埋深。三维合成孔径声呐探测微细电缆(典型直径 10 cm 左右)的埋深可达 5 m,探测大型沉船、沉锚等目标的埋深可达 10 m,探测地层的埋深可达 30 m。

3) 多频三维合成孔径声学成像系统同时具备对悬浮、沉底和掩埋目标的探测能力,一次扫测可同时获取海底浅地层剖面、海底掩埋物三维图像、海底地貌和沉底目标高清图像、海底悬浮目标高清图像、高精度海底地形等多类成果。

参考文献(References)

- [1] 中国工程科技 2035 发展战略研究海洋领域课题组. 中国海洋工程科技 2035 发展战略研究[J]. 中国工程科学, 2017, 19(1): 108-117.
- [2] 宋帅, 周勇, 张坤鹏, 等. 高精度和高分辨率水下地形地貌探测技术综述[J]. 海洋开发与管理, 2019, 36(6): 74-79.
- [3] 王伟平, 张志强, 秦宇博, 等. 亚洲快线海底光缆香港段路由条件及评价[J]. 海洋测绘, 2017, 37(4): 71-75.
- [4] 孟宪阔, 严天赦. 常用海底管道探测技术比较分析[J]. 港工技术, 2017, 54(2): 109-112.
- [5] 张志强, 刘强, 贺惠忠, 等. 汕头海域海底光缆路由条件及评价[J]. 海洋测绘, 2012, 32(6): 44-47.
- [6] 柯泽贤, 赵俊生, 任来平, 等. 水下物体磁探测线间距的影响因素[J]. 物探与化探, 2010, 34(1): 71-73, 102.
- [7] Xiang X B, Yu C Y, Niu Z M, et al. Subsea cable tracking by autonomous underwater vehicle with magnetic sensing guidance[J]. Sensors, 2016, 16(8): 1335.
- [8] 孙鹏. 浅地层剖面仪在海底管线探测中的应用[J]. 珠江水运, 2015(13): 76-77.
- [9] 周兴华, 姜小俊, 史永忠. 侧扫声纳和浅地层剖面仪在杭州湾海底管线检测中的应用[J]. 海洋测绘, 2007, 27(4): 64-67.
- [10] 张体强. 近岸海域浅地层剖面数据处理技术及应用[J]. 工程地球物理学报, 2023, 20(1): 18-23.
- [11] Li B L, Liu W, Liu J Y, et al. Real-time implementation of synthetic aperture sonar imaging on high performance clusters[C]//Proceedings of 11th ACIS International Conference on Software Engineering, Artificial Intelligence, Networking and Parallel/Distributed Computing. Piscataway, NJ: IEEE, 2010: 89-92.
- [12] Liu W, Li B L, Liu J Y, et al. An automatic ellipse and line targets detection method from synthetic aperture sonar images[C]//Proceedings of SPIE Proceedings, MIPPR 2009: Automatic Target Recognition and Image Analysis. Washington: SPIE, 2009: 851-858.
- [13] Liu W, Zhang C H, Liu J Y. Improved synthetic aperture sonar motion compensation combined DPCA with Sub-Aperture Image Correlation[J]. Journal of Electronics (China), 2009, 26(2): 191-197.
- [14] Lopera O, Liu W. An introductory study for applying single-pass interferometry to hull mounted sonar data for target height estimation[C]//EUSAR 2014; 10th European Conference on Synthetic Aperture Radar. Offenbach am Main: VDE, 2014: 1-4.
- [15] Liu W, Liu J Y, Zhang C H. Research on non-uniform sampling problem when adapting wavenumber algorithm to multiple-receiver synthetic aperture sonar[J]. Chinese Journal of Acoustics, 2010, 29(3): 285-297.
- [16] Hayes M P, Gough P T. Synthetic aperture sonar: A review of current status[J]. IEEE Journal of Oceanic Engineering, 2009, 34(3): 207-224.
- [17] Groen J, Coiras E, Williams D. Detection rate statistics in synthetic aperture sonar images[C]//Proceedings of the 3rd International Conference and Exhibition on Underwater Acoustic Measurements. Nafplion, Greece: Technologies and Results, 2009: 21-26.
- [18] Li H S, Xu J, Zhou T. Study of Multibeam Synthetic Aperture Sonar line-by-line imaging algorithm[C]//Proceedings of 2012 International Conference on Measurement, Information and Control. Piscataway, NJ: IEEE, 2012: 273-277.
- [19] Sun W, Zhou T, Wang X J, et al. Study of multibeam synthetic aperture interferometric imaging algorithm[C]//Proceedings of the 2015 International Industrial Informatics and Computer Engineering Conference, Advances in Computer Science Research. Paris, France: Atlantis Press, 2015: 1543-1546.
- [20] Hamilton M. Synthetic aperture sonar applied to a multi-beam volume imaging sonar[J]. The Journal of the Acoustical Society of America, 2004, 116(4): 2650.
- [21] Dinn G. Field experience with a new sub-bottom investi-

- gation tool: Acoustic 3-D imaging of the sub-seabed[C]// Proceedings of Oceans. Piscataway, NJ: IEEE, 2012: 1-9.
- [22] 刘维, 张作琼, 江泽林, 等. 海洋全景实时三维声学成像系统[J]. 中国科技成果, 2021, 13(3): 68-70.
- [23] 郎诚, 茅克勤, 向芸芸. 三维合成孔径声呐在海底掩埋目标探查中的应用现状与展望[J]. 海洋开发与管理, 2021, 38(1): 49-52.
- [24] 2020 年度海洋工程科学技术奖奖励公告[EB/OL]. (2021-06-18) [2023-05-06]. <http://www.caoe.org.cn/nr/cont.aspx?itemid=209&id=3224>.
- [25] 2022 年度江苏省科学技术奖获奖名单出炉[EB/OL]. (2023-03-03) [2023-05-06]. <https://www.maigoo.com/news/658623.html>.

Application of 3D synthetic aperture technology in underwater shallow buried target detection

HE Huizhong^{1,2}, ZHANG Zhongyi³, XIE Anyuan^{1,2*}, CHEN Dong^{1,2}, LI Zhenyuan^{1,2}, HE Xi^{1,2}

1. South China Sea Survey Center, Ministry of Natural Resources, Guangzhou 510300, China
2. Key Laboratory of Marine Environmental Detection Technology and Application, Ministry of Natural Resources, Guangzhou 510300, China
3. Bohai Oil Shipping Construction Engineering Co., LTD., Tianjin 300450, China

Abstract The detection of shallow buried objects is a difficult problem in underwater archaeology and marine survey. In this paper, the existing detection techniques of shallow buried objects under water are sorted out, and it is considered that the traditional detection techniques of buried objects under water have disadvantages, and three-dimensional synthetic aperture sonar technology is more advantageous. Through the measurement of ancient shipwrecks on the seabed, this paper believes that 3D synthetic aperture sonar can effectively obtain the information of three-dimensional structure, buried depth and high-resolution image of shallow buried objects, which can realize the detection and accurate identification of shallow buried objects more effectively.

Keywords marine survey; detection of shallow buried objects under water; 3D synthetic aperture sonar ●



(责任编辑 傅雪)