

水下沉船的高精度三维地形探测技术 ——以老牛礁沉船为例

刘伯然^{1,2}, 许江^{1,2*}, 房旭东^{1,2}, 胡毅^{1,2}, 王立明^{1,2}

1. 自然资源部第三海洋研究所, 厦门 361005

2. 福建省海洋物理与地质过程重点实验室, 厦门 361005

摘要 水下沉船是水下考古的重要组成部分。多波束声学遥测是实现水下沉船安全高效探测的有效手段。通过对老牛礁沉船开展的多方位角、不同参数的多波束声呐测量, 获取了老牛礁沉船这一微小地形异常沉船遗址的地形和赋存情况。多波束探测显示老牛礁沉船遗址长约 10.5 m、宽约 3.6 m, 沉船隔舱板 5 条, 长度约 1.8~3 m, 高出海床仅约 10~20 cm, 与水下探摸结果相符。通过数据分析比对, 给出实测中探头距离、船速、遮挡等因素对沉船分辨效果的影响。结合理论分析和海上调查实践经验, 得出提高水下沉船探测精度的途径, 具体为聚焦扫测开角, 作业时减慢船速, 设计多方位往复测线等。

关键词 水下沉船; 老牛礁沉船; 海洋考古; 多波束测深; 探测技术

多波束测深声呐是一种海底地形地貌探测手段, 目前广泛应用于海洋工程测量、海底资源与环境调查以及海底目标勘测等领域。其原理是利用换能器阵列向海底发射扇形声波, 对回波进行处理, 可精确、快速地测出沿航线一定宽度内水下目标的三维特征。

沉船遗址的水下赋存状况遥测是水下考古中的一大难题, 传统通常依靠潜水员探摸, 但这种方法一方面耗时长、危险系数高、不确定性因素多, 另

一方面难以全面准确地探测出沉船的水下姿态。多波束测量则可以安全、高效地获取水下沉船遗址的地形地貌状况, 而且工作过程不会对沉船遗址造成扰动和破坏, 更加符合联合国教科文组织 2001 年发布的《保护水下文化遗产公约》所提倡的非破坏调查和原址保护沉船残骸^[1]。

国际上, 多波束测深系统在水下沉船探测和水下遗址调查中已经有所应用^[2-5]。国内对多波束测深系统在水下沉船探测方面的研究也开始起步^[6]。

收稿日期: 2023-10-01; 修回日期: 2024-03-10

基金项目: 国家重点研发计划项目(2020YFC1521702); 自然资源部第三海洋研究所基本科研业务费项目(海三科 2016033)

作者简介: 刘伯然, 工程师, 研究方向为海洋地球物理, 电子信箱: liuboran@tio.org.cn; 许江(通信作者), 正高级工程师, 研究方向为海洋地球物理, 电子信箱: xujiang@tio.org.cn

引用格式: 刘伯然, 许江, 房旭东, 等. 水下沉船的高精度三维地形探测技术——以老牛礁沉船为例[J]. 科技导报, 2024, 42(14): 91-98;

doi: 10.3981/j.issn.1000-7857.2023.11.01649

现有利用多波束测深系统进行沉船遗址的探测研究^[7-10]主要集中于水下沉船的搜索与发现领域,对如何利用多波束测深声呐实现沉船遗址高分辨率测量的方法讨论较少。

本研究基于在海坛海峡老牛礁沉船区开展的多波束测量和探测方法试验,获取老牛礁沉船遗址及周边海底区域的高精度地形、地貌和沉船赋存状况,探讨针对水下沉船高精度探测的工作方式。

1 研究区域

研究区位于福建最大的岛屿海坛海峡内,大练岛西南侧,距离平潭县海坛岛约6 km,距离大练岛约2 km。海坛海峡位于福建省的陆地与海坛岛之间,海峡内的岛屿可有效抵御冬季的东北季风。海峡南北长约29 km,南口宽约5 km,北口宽约10 km,主航道深度可达20 m左右。海坛海峡在台湾海峡的向陆一侧,进入台湾海峡的潮流一部分汇聚在海坛海峡内^[11],加上该区礁石和浅滩的广泛分布,潮流复杂多变,对船只航行构成很大危险。经过水下考古研究发现,海坛海峡自古以来就是海上丝绸之路贸易路线的重要通道,沉船资源众多,是中国重要的水下文化遗产分布区,该区域内出水的大量陶瓷器、铜钱、漆器等,是研究、论证中国古代海上丝绸之路贸易航线、港口及商贸交流的重要实证。

2 数据来源

本研究数据采集于2016年4月,使用 Reson SeaBat 7125 型多波束测深系统,配备 OCTANS 4.0 光纤罗经和运动传感器,采集作业中使用扫测开角聚焦的工作方式,多方位对目标体展开扫测,获得较好的成像效果。采集作业中使用潮位计全程记录水位变化,每天测量声速剖面,潮位计型号为 DX25,声速剖面仪型号为 AML Svp Base X2。

数据采用 PDS2000 软件进行后期处理,首先对水深数据设定滤波参数滤除假信号,然后依次进行数据检查、声速改正、潮位改正和船姿(roll、pitch、yaw)校正,获得成果数据。

3 测量结果

3.1 老牛礁沉船概况

老牛礁沉船位于海坛海峡北部,以往的覆盖式多波束扫测,未揭示其赋存状态,本次通过针对性的测线布设以及对工作方式进行调整,取得了较好的扫测结果。

测量结果显示,老牛礁沉船遗址低平潮水深约21 m,沉船西侧礁石出露,最高突出海床约1.2 m。根据多波束测量结果划定的沉船出露范围(图1白色虚线圈定范围)长约10.5 m、宽约3.6 m。水下探摸调查验证的沉船出露部分长约12 m、宽约5 m,多波束测量与水下探摸结果较为符合。

本次测量在沉船范围内可清晰地分辨出多条隔舱板(图1沉船范围内浅蓝色线状条带)。测量发现隔舱板仅略高出海床面,大体呈直线状,有一定的断续、强弱变化,需仔细甄别才能发现。

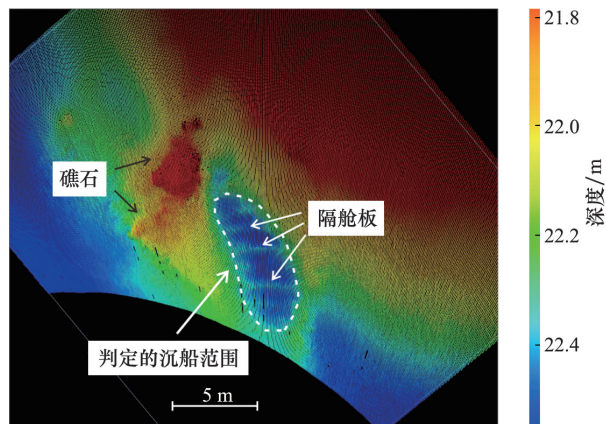


图1 老牛礁沉船遗址多波束测量结果

3.2 沉船的隔舱板

多波束测量识别出5条隔舱板(图2),其中3条较为明显,长度由北向南依次为2.55、2.83、2.51 m。除中部3条隔舱板外,北、南边缘处分别可识别1条较短隔舱板,与同航次侧扫声呐结果相符,北、南边缘2条隔舱板长度依次为1.88、1.84 m。测量相邻隔舱板之间的距离,获得其间隔由北向南依次为1.02、1.20、1.93、1.08 m;测量隔舱板高出海床的高度,获得其出露高度由北向南依次为8~10、9~11、17~20、10~12、8~10 cm。

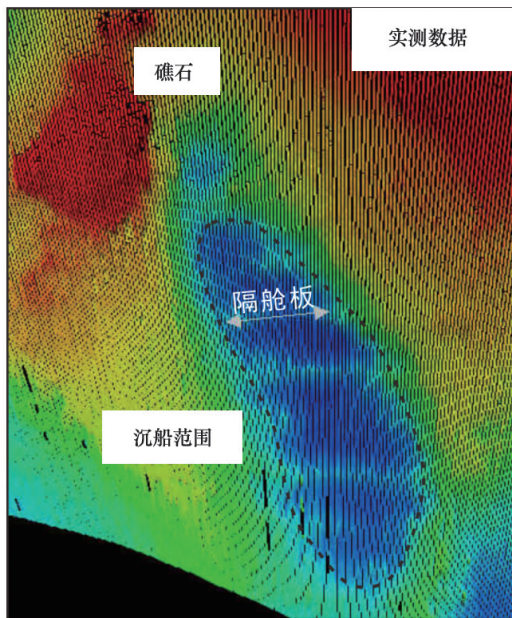


图2 多波束数据识别出的沉船范围和隔舱板

潜水探摸获取了该区沉船残骸、隔舱板、瓷器等文物的赋存状态。图3展示了水下探摸得到的隔舱板照片,可见一木质线状物出露于淤泥质海床之上,确定为沉船的隔舱板,隔舱板表面有灰色絮状附着物。多波束判定的隔舱板长度、间隔和出露高度等特征都与水下探摸结果符合较好。

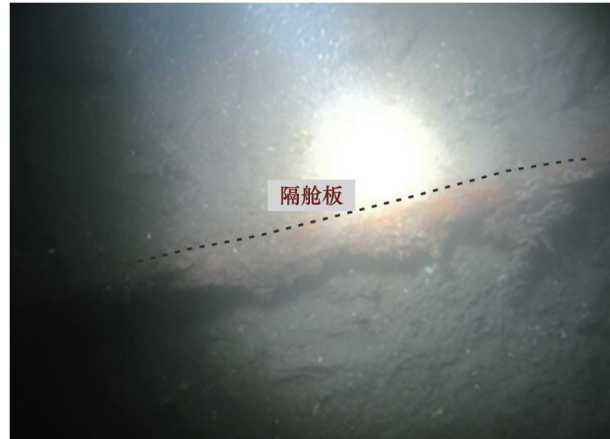


图3 水下探摸获得的隔舱板照片

3.3 多工作方式对比

本次测量针对性地设计了扫测测线,工作中选择不同的扫测方向、距离等开展测线采集,扫测开角设定为 90° ,其代表性测线的测量结果及工作方式如图4所示。从测量结果可见,多波束探头与目标体的距离、船速快慢、是否受遮挡等因素,都明显地影响目标体的分辨效果。

隔舱板分辨效果最好的测线(图4(a))采集时探头距目标体水平距离约5 m,船速慢(约2节),航向为西北向,探测波束避开了西北方礁石的遮挡干扰,很好地分辨出了5条隔舱板。图4(b)、(c)两测线能模糊地分辨出2~3条隔舱板,北部的2条隔舱板均无反映。此2条测线采集时,与目标体水平距离约15 m,船只航行速度正常(约4节),航向分别为北北西、南南东,探测波束受到礁石的部分遮挡。图4(d)测线探头距目标体较远,船只航行速度正常,航向北北西,无法分辨出任何隔舱板。通过上述对比可知,探头与目标体的距离越近,分辨效果越好;减慢船速同样可以提升探测效果;障碍物的遮挡对识别局部地形的影响很大,在工作中应设法规避。

观察实测结果可知,图4(a)测线的点云数据密度明显高于其他测线,含有更多的沉船遗址细节。此段数据点云密度的优势主要得益于缓慢的船速,结合无遮挡的探测方向和聚焦的扫测开角,最终获得了较理想的探测效果。

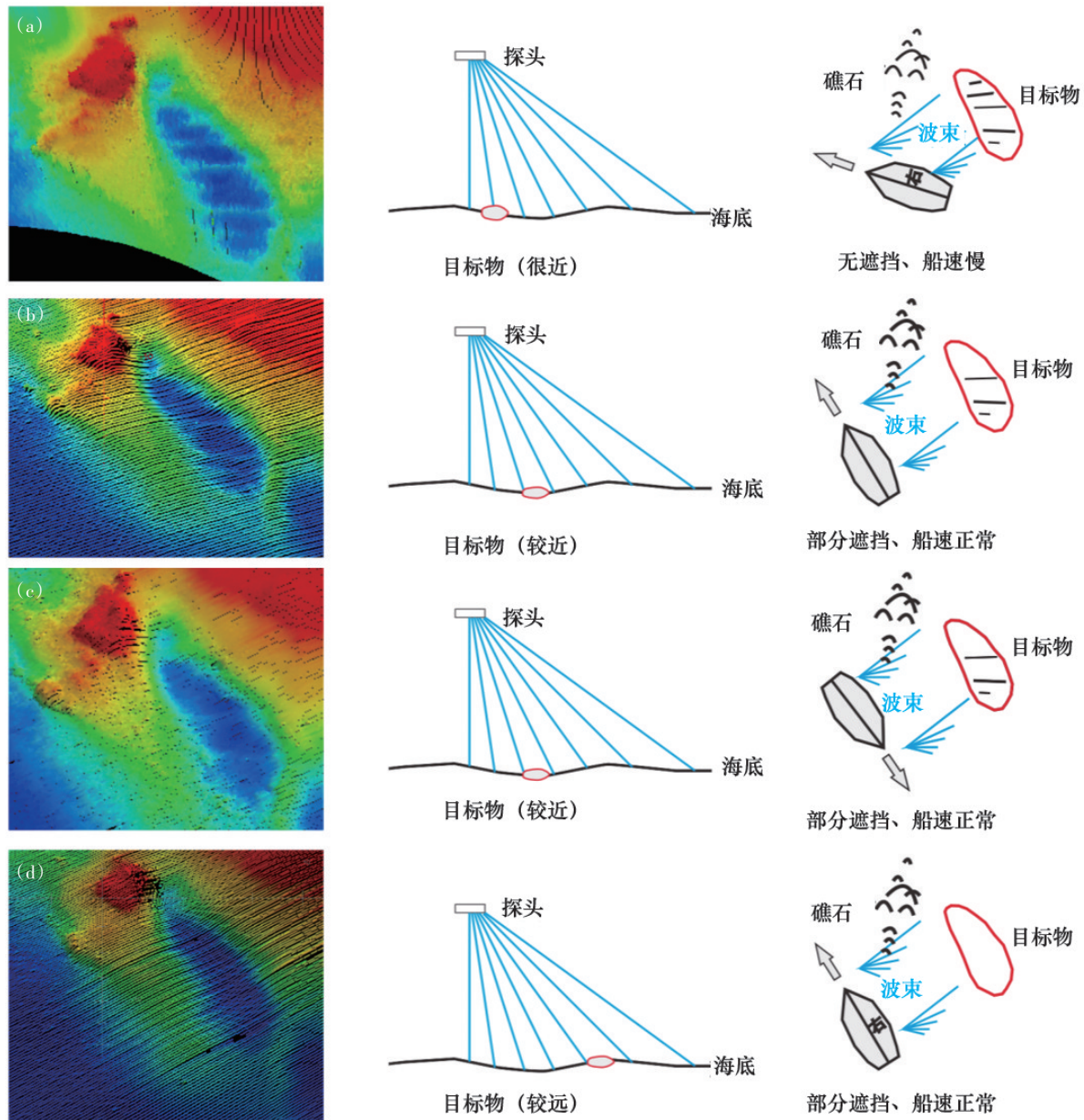


图4 不同工作方式下沉船实测结果及效果示意

4 分析与讨论

多波束声呐是当前进行水下地形测量最先进的技术之一,除了记录测深数据外,还记录了水体数据和反射强度-背散射数据,其中水体成像数据在海水浊度与悬浮体浓度^[12]、海洋哺乳动物监测^[13]等方面发挥了一定的作用,背散射数据通常结合人工智能方法在海底底质分类^[14]以及海底生境方面^[15]得到较广泛的应用,但对水下文物调查的有效性尚需要探讨。

老牛礁沉船遗址在以往常规覆盖扫测下探测结果并不理想,只能分辨出遗址西北部的礁石,无法有效分辨沉船范围及隔舱板等细节特征。本次测量通过更具针对性的探测方法,在沉船范围划定和隔舱板识别方面取得了较好的效果。

理论上,多波束声呐对水深地形的分辨能力与目标体的物理性质有关,也与发射信号的传输和声波的某些特征有关(例如入射角和脉冲长度)^[16-23]。因此可利用高声波发射频率、缩短距离、窄扫描开

角、短脉冲长度、降低测量船速等方法来提升数据的分辨率和点密度^[24-25]。理论上提升探测精度的最佳方式是减小多波束探头与目标体间的垂向距离。但从实践角度,缩短垂向距离只能通过加大探头沉放深度,或低平潮时段工作来实现,且各自存在局限性。例如,加大探头沉放深度面临固定困难、姿态稳定性变差的问题,而仅低潮位时段作业会极大拖慢工作进度。

本研究的多波束测量采用了扫测开角聚焦的工作方式,针对性地设计了扫测测线,试验了不同船速、方位角等工作方式,最终实现了对目标体更好地成像。以下分别针对扫测开角聚焦、测线设计、提高数据点密度3方面问题进行分析讨论。

常规的多波束覆盖测量出于效率考虑,常采用大开角的扫测模式,有利于快速获取整个区域的地形地貌。开角聚焦的工作方式则是集中所有波束对窄带内的目标聚焦成像,并根据目标区域大小灵活地调整开角角度,以达到最好的成像效果。例如单侧聚焦模式下(图5),扫测范围会变窄,能获得更好的数据点密度(图5(d))。在实际工作中,大开角模式下边缘处回波质量往往变差,噪点增多;聚焦采集时,边缘的发射角度较小,可以显著提升边缘区域的数据质量。

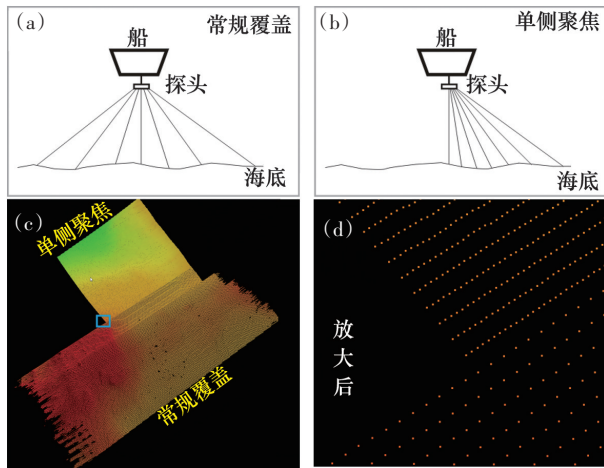


图5 常规覆盖和单侧聚焦工作方式和数据点密度

测线设计方面,除了考虑开角聚焦后扫宽变窄的问题,还要解决遮蔽问题。水下沉船的表面通常

由垂直、水平和倾斜等多角度的面组成,每处表面的朝向都可能不同,当一个方向的声波束照射在沉船表面时,总会因为遮挡而产生无法照射到的阴影区。阴影区的产生,取决于沉船表面朝向和声波束入射角度,无法通过调节扫测参数来避免。这种情况下,最有效的解决方法是增加与沉船中心线平行的测线,同时增加更多斜角度的测线(图6)。高精度沉船探测的测线布置,应以短间距的、多条平行和垂直沉船中心线的测线为主,并辅以多角度的斜交测线。

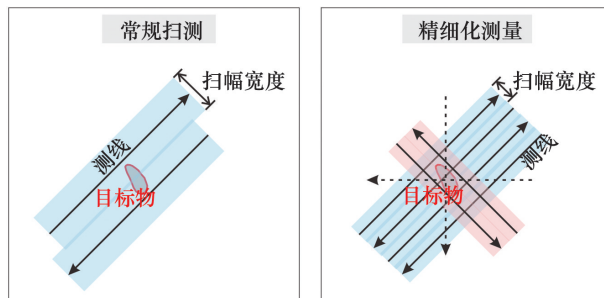


图6 针对水下目标体的精细化测量测线设计

提高数据点密度,主要通过调节扫测扇区开角、减慢船速、加密测线来实现。图7递进展示了常规覆盖、开角聚焦、慢速、多测线叠合模式下,可获得的数据点密度的情况。对单条测线而言,在常规覆盖扫测模式的基础上,通过收窄扫测扇区开角能够有效地缩短垂直测线方向的数据点间隔,通过减慢船速可缩短沿测线方向的数据点间隔。同时,通过设计往复测线,令多条测线的数据点相互叠合,可进一步提升数据点密度。

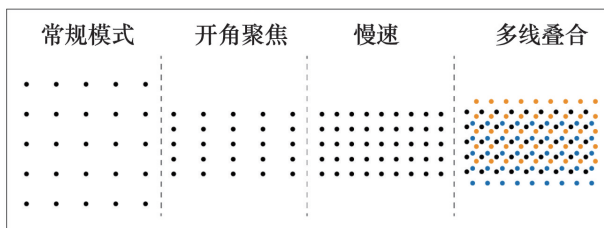


图7 不同工作模式下多波束点密度示意

在实际野外调查中,采用往复测线的设计来提升数据点密度,其前提是定位准确及单点测量精度高。要满足上述前提,一是要保证导航定位的精度,

在 DGPS(差分全球定位系统)定位基础上配合实时动态测量(RTK 实时动态定位技术)设备更佳;二是要选择海况良好的天气开展作业,以获取高质量的船姿(roll、pitch、yaw)、潮位数据;三是数据处理中要有准确的船姿校正和潮位、声速改正。

综上所述,实现高精度的水下沉船探测,主要措施是采用聚焦的扫测开角、作业时减慢船速、设计多方位的往复测线。此外,在可调节范围内缩短与目标体的水平、垂向距离,也能提升测量精度。

老牛礁沉船这类微小地形异常的文物遗址,在中国近岸浅水海域具有代表意义。国际上,如希腊沿岸水下文物遗址广布,浅海海床底质以砂质为主,沉没 2000 年的水下文物依然可见于海床表面,且保持沉没时的堆积形态(图 8)^[5,26],易于探测发现。中国浅海底质沉积多以粉砂质、淤泥质为主,质地较软,承载力差,易受波浪、潮流、海流作用影响。沉船落底后在海床表面经历底流对船周地形的改造,并受到沉陷、表层沉积覆盖作用影响,会逐步被掩埋于海床下。时至今日,中国沿海可识别出完整船形的多是近现代沉船,古代沉船即便未完全埋没的也仅剩微小的地形异常,因此发展高精度的水下沉船探测技术具有重要科学意义和应用价值。



图 8 希腊沿海约 2000 年前的双耳细颈瓶堆遗址
(水深约 50 m)

在水下沉船探测实践中,除多波束声呐方法外,侧扫声呐、浅地层剖面、海洋磁力也是常用的探测方法。以侧扫声呐方法为例,其扫测开角大、扫幅宽,适合区域性大面积的扫测筛查;同时由于其记录回波强度的特性,突出海床的高物在其图谱中呈现紧

邻的亮斑和阴影带,易于识别,对微小地形异常也有很好的分辨能力。同时,侧扫声呐换能器的发射频率范围很广,100~1000 kHz 均有成熟的产品面世,相较于浅水多波束 150~400 kHz 的常用频率,具有极限分辨率上的优势,在希腊沿海双耳细颈瓶堆水下遗址的探测研究中,900 kHz 的高频侧扫声呐取得了理想的结果^[26]。老牛礁沉船遗址采集的侧扫声呐影像(图 9),识别到的礁石和沉船位置、沉船隔舱板的尺寸、形态和展布,均与前文的多波束探测结果符合很好,对于沉船轮廓和隔舱板边缘的揭示也更具优势。浅地层剖面方法常用于调查区域浅部地层结构,在沉船调查中可用于探测浅埋沉船,也可辅助区分疑似文物点和基岩出露/浅埋等天然特征。海洋磁力探测对于大型的铁质沉船具备良好的分辨能力,在甲午海战沉船“致远舰”考古调查中也有所应用。基于不同探测方法的特点,结合各自的独有优势,交叉验证、互相补充,形成多方法的综合探测技术体系是水下沉船探测的重要发展方向。

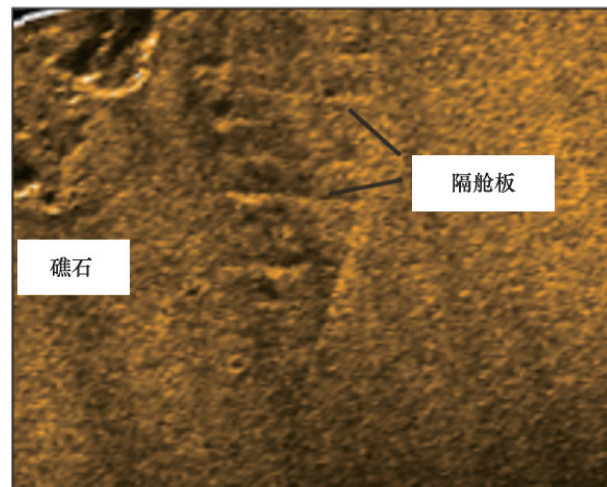


图 9 老牛礁沉船遗址的侧扫声呐影像

5 结论

通过理论分析和海上调查实践经验,探讨了使用多波束测深系统针对水下沉船高精度探测的工作方式,并提出野外调查中的实操方法。

1) 通过合适的参数选择和测线设计,多波束测深系统能够实现对微小地形异常沉船遗址的揭示。

本研究中老牛礁沉船遗址的隔舱板长度仅约 1.8~3 m,高出海床仅约 10~20 cm,通过针对性地探测能够很好地揭示其隔舱板的长度、间隔、出露高度等信息,与水下探摸结果相符。

2) 提高水下沉船探测精度,提升测量效果的实操方法,一是采用聚焦的扫测开角,二是有效减慢扫测时的船速,三是要合理设计往复测线并规避海底突出地形的遮蔽。另外,在仪器安装和作业潮位选择等方面应尽力缩短探头与目标体的距离。

参考文献(References)

- [1] UNESCO. Convention on the protection of the underwater cultural heritage. In UNESCO (Ed.) [C]//Records of the General Conference. Paris: Resolutions (31st session), 2002: 50-61.
- [2] Bates C R, Lawrence M, Dean M, et al. Geophysical methods for Wreck-Site monitoring: The rapid archaeological site surveying and evaluation (rasse) programme[J]. International Journal of Nautical Archaeology, 2011, 40(2): 404-416.
- [3] Brennan M L, Davis D, Roman C, et al. Ocean dynamics and anthropogenic impacts along the southern Black Sea shelf examined through the preservation of pre-modern shipwrecks[J]. Continental Shelf Research, 2013, 53: 89-101.
- [4] Palomer A, Ridaio P, Ribas D, et al. Multi-beam terrain/object classification for underwater navigation correction [C]//Proceedings of OCEANS 2015-Genova. Piscataway, NJ: IEEE, 2015.
- [5] Delaporta K, Jasinski M E, Soreide F. The greek-norwegian deep-water archaeological survey[J]. International Journal of Nautical Archaeology, 2006, 35(1): 79-87.
- [6] 隋海琛. 三维声呐在水下沉船姿态探测中的应用[J]. 水道港口, 2016, 37(5): 569-572.
- [7] Masetti G, Calder B. Remote identification of a shipwreck site from MBES backscatter[J]. Journal of Environmental Management, 2012, 111: 44-52.
- [8] Quinn R, Boland D. The role of time-lapse bathymetric surveys in assessing morphological change at shipwreck sites[J]. Journal of Archaeological Science, 2010, 37(11): 2938-2946.
- [9] Plets R, Quinn R, Forsythe W, et al. Using multibeam echo-sounder data to identify shipwreck sites: Archaeological assessment of the joint irish bathymetric survey data [J]. International Journal of Nautical Archaeology, 2011, 40(1): 87-98.
- [10] Sacchetti F, Benetti S, Georgiopolou A, et al. Geomorphology of the Irish Rockall Trough, North Atlantic Ocean, mapped from multibeam bathymetric and backscatter data[J]. Journal of Maps, 2011, 7(1): 60-81.
- [11] Pan A J, Wan X F, Guo X G, et al. Responses of the Zhe-Min coastal current adjacent to Pingtan Island to the wintertime monsoon relaxation in 2006 and its mechanism[J]. Science China Earth Sciences, 2013, 56(3): 386-396.
- [12] Francisco F, Sundberg J. Detection of visual signatures of marine mammals and fish within marine renewable energy farms using multibeam imaging sonar[J]. Journal of Marine Science and Engineering, 2019, 7(2): 22.
- [13] Petzinna N, Nikora V, Onoufriou J, et al. Evaluating the performance of a dual-frequency multibeam echosounder for small target detection[J]. Journal of Marine Science and Engineering, 2023, 11(11): 2084.
- [14] Solikin S, Dwinovantyo A, Manik H M, et al. Combining two classification methods for predicting jakarta bay seabed type using multibeam echosounder data[J]. Journal of Applied Geospatial Information, 2023, 7(2): 898-903.
- [15] Menandro P S, Misiuk B, Brown C J, et al. Multispectral multibeam backscatter response of heterogeneous rhodolith beds[J]. Scientific Reports, 2023, 13: 20220.
- [16] Lurton X. An introduction to underwater acoustics, Principles and applications[M]. Heidelberg: Springer, 2010.
- [17] de Moustier C. Beyond bathymetry: Mapping acoustic backscattering from the deep seafloor with Sea Beam[J]. The Journal of the Acoustical Society of America, 1986, 79(2): 316-331.
- [18] Jackson D R, Winebrenner D P, Ishimaru A. Application of the composite roughness model to high-frequency bottom backscattering[J]. The Journal of the Acoustical Society of America, 1986, 79(5): 1410-1422.
- [19] Matsumoto H, Dziak R P, Fox C G. Estimation of seafloor microtopographic roughness through modeling of acoustic backscatter data recorded by multibeam sonar systems[J]. The Journal of the Acoustical Society of America, 1993, 94(5): 2776-2787.
- [20] Kinsler L E, Frey A R, Coppens A B, et al. Fundamentals of Acoustics[M]. Fourth ed. New York: Wiley, 2000.
- [21] Brekhovskikh L M, Lysanov I P. Fundamentals of ocean acoustics[M]. 3rd ed. New York: Springer, 2003.

- [22] de Moustier C, Alexandrou D. Angular dependence of 12-kHz seafloor acoustic backscatter[J]. *The Journal of the Acoustical Society of America*, 1991, 90(1): 522–531.
- [23] Lurton X, Dugelay S, Augustin J M. Analysis of multi-beam echo-sounder signals from the deep seafloor[C]// *Proceedings of OCEANS'94*. Piscataway, NJ: IEEE, 1994: 213–218.
- [24] Hughes Clarke J E. *Multibeam echosounders*[M]// Miccallef A, Krastel S, Savini A, eds. *Submarine Geomorphology*. Cham: Springer International Publishing, 2017: 25–41.
- [25] Calder B, Forbes D, Mallace D. Marine heritage monitoring with high-resolution survey tools: Scapa flow 2001–2006[C]// *U.S. Hydrographic Conference*. Norfolk, USA: ELSEVIER, 2007: 409.
- [26] Geraga M, Papatheodorou G, Ferentinos G, et al. The study of an ancient shipwreck using marine remote sensing techniques, in Kefalonia Island (Ionian Sea), Greece [J]. *Corporación Editora Nacional Grijalbo Ecuatoriana*, 2015, doi: 10.1400/233600.

High-precision 3D terrain detection technology of underwater shipwreck: A case study of Laoniufree shipwreck

LIU Boran^{1,2}, XU Jiang^{1,2*}, FANG Xudong^{1,2}, HU Yi^{1,2}, WANG Liming^{1,2}

1. Third Institute of Oceanography, Ministry of Natural Resources, PRC, Xiamen 361005, China

2. Fujian Provincial Key Laboratory of Marine Physical and Geological Processes, Xiamen 361005, China

Abstract Underwater wrecks are an integral part of marine archaeology. Multi-beam acoustic telemetry is an effective means to achieve safe and efficient detection of underwater shipwrecks. Based on the multi-angle and multi-method topography survey of the Laoniufree shipwreck, the topography and occurrence status of the small topographic anomalous shipwreck site were obtained, which was about 10.5 m long and 3.6 m wide, and the length of the shipwreck compartment plate was about 1.8–3 m, and it was only about 10–20 cm above the seabed, these are consistent with the results of diving exploration. Through data analysis and comparison, the impact of factors such as probe distance, ship speed, and occlusion on the resolution of underwater wrecks is given. Based on theoretical principles and practical maritime investigation work, the main ways to improve the accuracy of underwater shipwrecks detection are to focus on scanning angle, to slow down speed during operation, and to design multi-directional reciprocating survey lines etc.

Keywords underwater shipwreck; Laoniufree shipwreck; marine archaeology; multi-beam sonar; detection method ●



(责任编辑 傅雪)