

文章编号: 1674-5566(2013)03-0404-06

C3D 测深侧扫声呐系统在人工鱼礁建设中的应用

沈蔚^{1,2}, 章守宇¹, 李勇攀^{1,2}, 张进^{1,2}, 沈天跃^{1,2}, 沈赞^{1,2}, 张翔¹

(1. 上海海洋大学 海洋科学学院, 上海 201306; 2. 上海海洋大学 水下信息中心, 上海 201306)

摘要: 长期以来将多波束测深数据和侧扫声呐图像进行融合叠加, 一直是水下测绘领域的研究难题, 而美国 Benthos 公司近年推出的 C3D 测深侧扫声呐系统, 采用了多阵列换能器, CAATI 专利算法, 可同步获得高分辨率的侧扫图像和高质量的测深数据。本文着重研究: (1) 在鱼礁区的设计阶段, C3D 系统提供三维的水下地形、等深线等数据, 进行三维可视化的鱼礁礁址的选择和布设方案设计; 提供高分辨率的水下地貌图像, 进行海底地质的分类, 也可直观判断水下的各种地貌和障碍物等。(2) 在鱼礁施工阶段, 利用 C3D 水下图像对鱼礁的位置和状态进行评估, 改进投放方法和工艺, 确保设计方案的实施到位。(3) 在鱼礁竣工后的监测阶段, 利用不同时期的 C3D 高分辨率图像及水深数据进行对比, 以判断鱼礁区的地形地貌变化, 鱼礁的稳定性、掩埋损坏等情况。实验表明, C3D 是一款性能优越的水下声呐探测系统, 可为人工鱼礁方案设计提供详细的海底地形和底质信息, 可对人工鱼礁建设的过程和结果进行科学的评估, 将为各地人工鱼礁工程的顺利实施和效果保障发挥重要作用。

研究亮点: 首次在国内将先进的 C3D 测深侧扫声呐系统应用于人工鱼礁的建设, 并以东海区多个人工鱼礁项目为例, 分析了 C3D 在鱼礁建设的设计阶段、施工阶段和监测阶段中发挥的重要作用, 为人工鱼礁建设的过程保障和效果评估提供了很好的技术方案。

关键词: 测深侧扫声呐; 人工鱼礁; 多波束; 探测

中图分类号: S 953.1

文献标志码: A

1 C3D 测深侧扫声呐系统介绍

1.1 C3D 系统原理

水下探测所使用的多波束声呐系统, 从波束形成原理上可分为两种类型, 一种采用束控法, 称之为传统多波束, 另一种采用相干法, 可称之为相干多波束系统。本文所讨论的 C3D 测深侧扫声呐系统即为后者, 其换能器在进行一次短脉冲发射后, 海底反射的回波信号被换能器的接收器按照一定的相位差接收, 根据相干原理, 换能器阵中两个固定间距的换能器之间的相位差和波束的到达角存在固定的关系, 从而计算出到达角的大小, 再结合记录的波束传播时间即可进行

水下目标位置的解算^[1]。

C3D 三维侧扫测深系统由美国水下声学 and 侧扫声呐设备制造商 Benthos 公司开发, 它采用了多阵列换能器, 并采用了加拿大 Simon Fraser 大学独家授权计算到达角度瞬时成像 (CAATI, computed angle of arrival transient imaging) 专利算法。普通的相干声呐受限于对于每一个距离步进只能估计一个散射到达角度, C3D 基于 CAATI 专利技术, 左右换能器各使用了 6 单元换能器阵列 (具有更好的信噪比和解析度, 如图 1 所示), 最大可以分离出 5 个并发的角度, 极大地提高了探测空间探测分辨率, 测深精度可达 5 cm, 侧扫精度可达 4.5 cm。实验证明 CAATI 技术更适应

收稿日期: 2012-08-06 修回日期: 2013-03-05

基金项目: 农业公益科研专项(201003068); 上海市教育委员会科研创新项目(12ZZ159); 海岛(礁)测绘技术国家测绘局重点实验室基金(2011B06); 上海高校优青专项(ssc10007)

作者简介: 沈蔚(1977—), 男, 博士, 副教授, 研究方向为海洋测绘、遥感、虚拟仿真。E-mail: wshen@shou.edu.cn

通信作者: 李勇攀, E-mail: ypli@shou.edu.cn

复杂的散射几何条件,即使在分离的多路径条件下,C3D 仍能提供高质量的 3D 旁扫声呐图像。

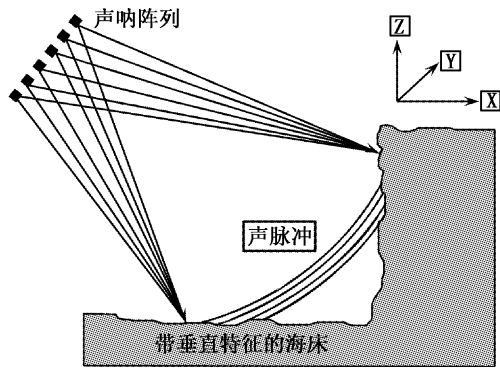


图 1 CAATI 原理示意
Fig.1 The CAATI principle

C3D 系统利用声波的干涉原理,对一组声脉冲同时进行测深解算和侧扫成像,同时具备了侧扫声呐和多波束测深的优点,且图像和深度数据精确匹配,解决了多波束系统和侧扫声呐系统测量信息叠加融合这一业内长期关注和研究的难点^[2]。

1.2 C3D 系统组成及性能指标

C3D 三维侧扫测深系统主要分为拖鱼(C3D-TOW)拖曳安装系统和轻型支架安装(C3D-LPM)系统,此外还可以与浅地层剖面仪集成(C3D-SBP)或集成在 AOV(C3D-AUV)上进行测量。C3D-LPM(Lightweight Pole Mount)轻型支架安装系统专为小型测量船在浅水区域测量设计,造价低,重量轻,便于运输和操作,是本文研究和讨论的具体对象。

一套 C3D-LPM 系统包括:运行 C3D Server 和 C3D Display 及第三方数据采集和处理软件处理器(个人电脑),收发器(甲板单元),工作频率 200 kHz 的换能器(吊舱),15 m 电缆及安装支架等。此外,一个完整的 C3D 测量系统一般还包括测量船,高度计、表面声速仪、姿态传感器、电源和 DGPS 等辅助设备,其连接设置如图 2 所示。

C3D 系统(换能器)主要性能指标如下^[3]: 20.4 kg,水中 11.79 kg,适用船速 1~10 节;工作频率:200 kHz(可选 100 kHz);测深扫宽:10~12 倍水深;地形探测脚点密度大,可达每 50 m 1 000 个测深点;测深垂直分辨率:5 cm;脉冲宽度:0.125~3 ms;重复率:最大 30 Ping/s;换能器波束角:水平 1°,垂直 100°;俯视角:20°, 30°, 40° 可调。

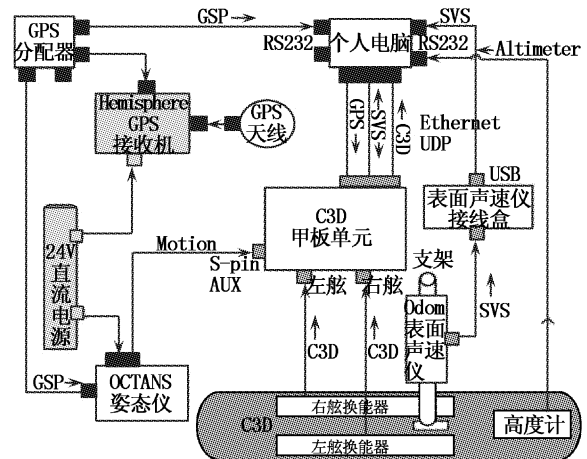


图 2 C3D 系统构成示意图

Fig.2 The configuration of C3D system

1.3 C3D 系统的应用推广

C3D 系统推出至今不到 10 年,据 Benthos 公司提供的数据,C3D 系统(截止 2011 年)在北美和中南美洲销售了 24 套,欧洲非洲和中西亚销售了 10 套,澳洲和南亚销售了 15 套,其应用超过 25 项,主要集中在海道测量、栖息地制图、河道港湾水底制图、挖泥疏浚监测、管线管道路由和制图、石油天然气探测、环境研究、码头、水闸、大坝、桥梁和港口的安全检查^[4-6]。

C3D 系统于 2007 年左右在国内上市,至今已有多家单位装备了该设备:海事局海测大队应用 C3D 进行水下地形测绘、港口和海港扫测和水下目标探测;水上公安局应用 C3D 进行重大活动的水下安全保卫;海洋局第一海洋研究所应用 C3D 进行海底石油管线路由调查^[7];上海海洋大学应用 C3D 进行海岸研究、海底栖息地成图、人工鱼礁等水下建筑物探测等;海洋工程单位用于水下管道测量;海军应用 C3D 进行航行保障方面的数据采集。

2 人工鱼礁建设中的 C3D 应用

人工鱼礁是人为在海中设置的构造物,其目的是改善海域生态环境、营造海洋生物栖息的良好环境,为鱼类等提供繁殖、生长、索饵和庇敌的场所,达到保护、增殖和提高渔获量的目的。目前国内外已经广泛地开展人工鱼礁建设,进行近海海洋生物栖息地和渔场的修复,而且取得了较好的效果。人工鱼礁建设在方案设计阶段,需要

在建设海域的海底地形及地质类型等基本数据的基础上,进行礁址的筛选,以往大都是根据海图来获取的,存在信息不足、精度不高等缺陷。此外,在鱼礁建设过程和完成后的评价中,尽管可以通过潜水调查等手段获得鱼礁的掩埋、移位、倾覆、损毁等安全性指标,但往往受到水下能见度低、潮流急速、潜水时间短(一般小于 1 h)和人工探摸范围小(单人单次探摸小于 20 m × 20 m)等因素的限制效果很不理想^[8-11]。

通过 C3D 系统快速获得大范围水深和水下图像信息,能够有效地克服传统手段的不足,为人工鱼礁建设的 3 个阶段提供必要的技术支持。本文以东海区多个人工鱼礁项目建设为例,论述了 C3D 在其建设中发挥的重要作用。

2.1 设计阶段的水下地形地貌数据获取

人工鱼礁的布设必须考虑海域的水下地形、水文条件、底质等环境参数,而 C3D 系统所能提供的高精度水下地形数据和高清晰度水下地貌图像正是鱼礁区设计必需的核心数据。

2.1.1 C3D 获取高精度水下地形数据

C3D 测深侧扫系统需经过室内连接测试,野外安装调试,多波束校准,测量,室内数据处理等一系列步骤(具体过程和方法本文不做探讨),可获得垂直精度 15 cm(各种安装和测量误差的存在)的三维水下地形数据。图 3(a)所示为 C3D 系统所采集的某规划鱼礁区三维水下地形图,由于采用声波相干原理,C3D 系统可提供非常密集的点数据,网格尺寸可达 0.1 m,可实现微地形精细测量,进而可实现三维可视化的鱼礁礁址的选择和布设方案设计,并可将设计思想以三维虚拟现实的方式进行表达,结果直观形象便于理解。此外,基于三维水下地形数据还可以提供准确的等深线、坡度、坡向、有效规划区面积等信息,图 3(b)是基于图 3(a)数据生成的鱼礁规划区等深线图,为鱼礁区规划基本数据之一。

2.1.2 C3D 获取高清晰度水下地貌图像

利用 Triton Isis、CARIS SIPS、HYPACK、Eiva、SonarWiz 等第三方软件,对 C3D 的侧扫数据进行斜距、姿态、船速的改正,设置图像分辨率和坐标系,对图像进行镶嵌处理并平滑和填充,最终获得规划鱼礁区域整体的高分辨率的水下地貌图像,图像平面位置精度最高可高达 10 cm(取决于 DGPS 定位误差和仪器安装测量误差等)。

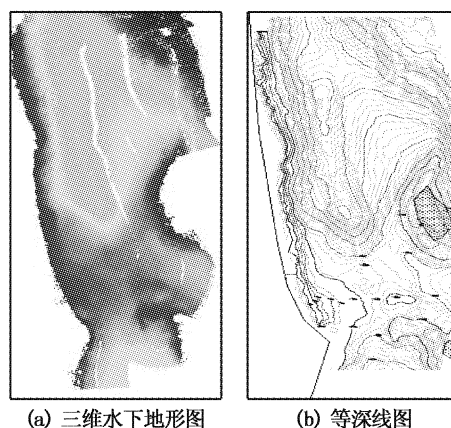


图 3 C3D 获取三维水下地形图及等深线图
Fig. 3 The seabed 3D topographic map & 2D depth contour

如图 4 所示,基于高清晰的水下声呐图像,可进行海底地质的分类,一般可以准确区分沙地、泥地、碎石、礁石等不同的海底地貌类型,也可直观判断水下的渔网、养殖绳、桩、人工构筑物及各种障碍物等,为鱼礁规划设计提供了必要的保障。

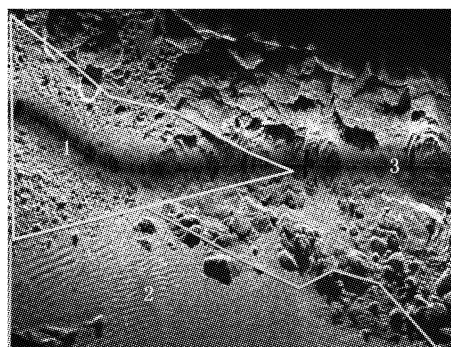


图 4 C3D 高清晰水下地貌图
Fig. 4 The seabed high definition image

1. 为碎石;2. 为沙地;3. 为礁石。

2.2 施工阶段的工程保障

以往人工鱼礁投放位置的准确性无法进行有效的监测,而利用 C3D 提供的水下声呐图像(高达 10 cm 平面精度,15 cm 垂直精度)对施工中投放水下的鱼礁进行现场测量,快速获取水下每个鱼礁的三维位置和状态,迅速判断鱼礁投放的位置是否准确,鱼礁是否有倾倒、重叠等现象。将现场结果与设计方案进行比对,可以评价鱼礁投放的准确性和合理性,并改进鱼礁投放的技术和方法,以确保设计方案的准确实施,保障鱼礁

建设的效果。

如图 5 所示,某海域人工鱼礁工程初期鱼礁投放实测结果(b)与设计方案(a)有着一定的偏差,需及时调整投放方法和施工工艺,确保实际鱼礁(群)位置与设计方案的偏差在可控的范围内,如礁群中心位误差不应超过 10 m,礁群整体变形不应超过 25%。

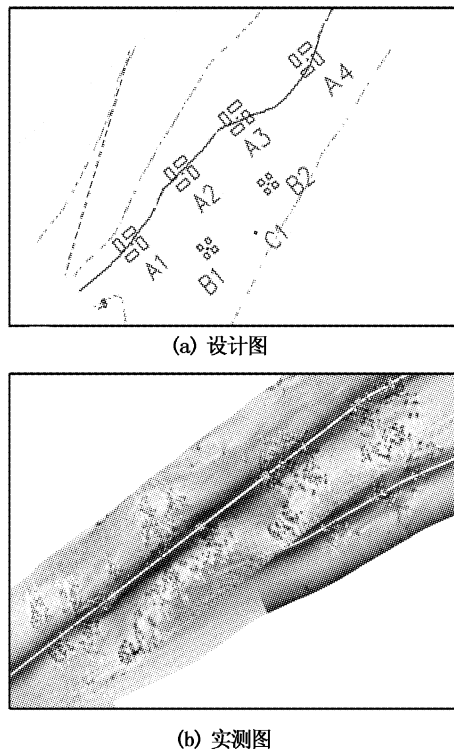


图 5 人工鱼礁设计与投放实测图对比

Fig.5 The artificial reef plan & measured image

2.3 竣工后的稳定性监测

很久以来,人工鱼礁工程的验收、稳定性、效果评估都很难实施,而当前基于 C3D 等所提供的高清晰水下声呐图像,可以有效地对人工鱼礁的建设效果进行评估,目前这项工作在我国还刚刚起步,处于探索阶段,据了解目前仅有上海海洋大学在从事该领域研究。

2.3.1 鱼礁投放情况评估

在鱼礁全部投放后,须进行投放区域的全覆盖扫测(方法同施工阶段的扫测),搞清鱼礁区的整体布局情况和每座鱼礁的三维位置和状态,分析其投放的效果,并作为竣工验收的基本资料和后续比对资料(图 6)。

2.3.2 鱼礁稳定性评估

鱼礁投放后的一定周期(初期 1 年,后期 2

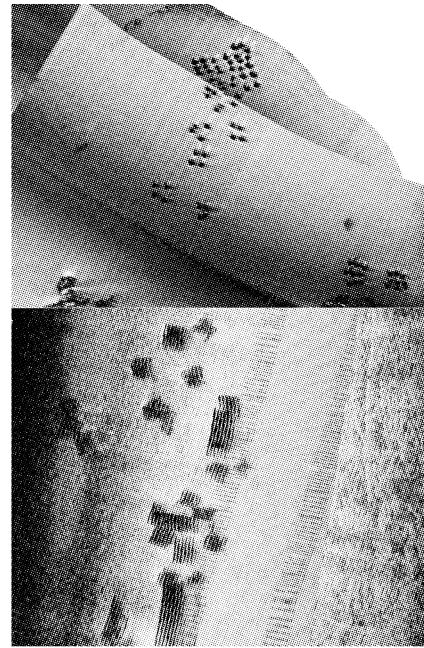


图 6 不同类型人工鱼礁投放后竣工验收图

Fig.6 The completion acceptance image of different artificial reef

年),须再次对投放区域进行全覆盖扫测,掌握当前的鱼礁分布和状况,以确认前期投放的鱼礁是否丢失,位移是否移动,是否被掩埋及鱼礁区的地形有无变化。该阶段通常还会进行藻类生长情况和渔业资源的调查评估,以进一步评估鱼礁建设的生态效果(图 7)。

3 总结与展望

C3D 测深侧扫声呐系统,由于采用了独特的相干原理和 CAATI 技术,使其具备同时获取地貌图像和水深的的能力,高覆盖、高分辨率、高精度、高效率等一系列优点。同样由于采用了相干原理,其对复杂地形(礁石、碎石、陡坡)的测量和解算能力较差,这类地区会因无法进行干涉测量,导致部分水深数据的缺失。

由于采用相干原理,C3D 数据条带中心噪音非常大,导致仪器正下方数据误差较大,一般需过滤掉并配置额外的高度计辅助测量水深。如图 3(a)所示,该图部分航线中心的水深数据噪音过大,被过滤后成空白状。此外,C3D 条带边缘数据变形较大,易导致测深数据拼接处处理困难。

C3D 系统使用中辅助设备较多,各部分的偏

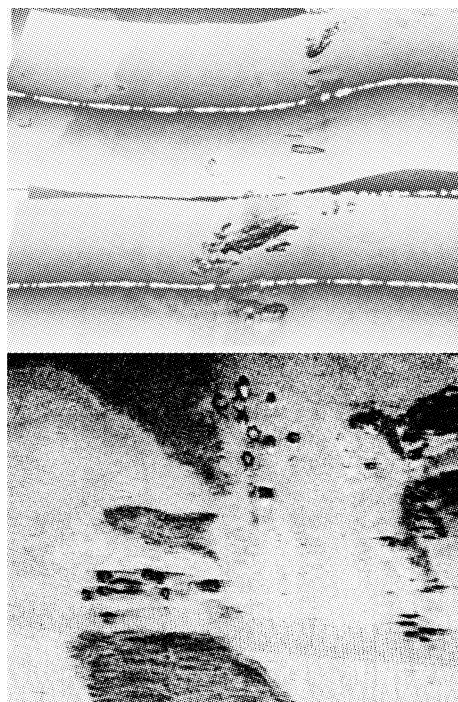


图7 不同类型人工鱼礁后期监测水下探测图
Fig.7 The C3D measured image
for artificial reef monitor

移量、安装误差(横滚、纵摇、偏航)、数据同步误差(时延)、潮汐改正、声速剖面等,任意环节的误差都会对最终的数据精度造成影响,故必须保证校准测量和仪器安装的精度。

C3D 测深侧扫声呐系统,具备同时获取清晰地貌图像和高精度水深的的能力,非常适合在浅水中进行地形地貌测量。C3D 的特点和优势决定了其在水下工程、环境栖息地调查、海底地形地貌测量、水中目标探测等领域具有巨大应用潜力,如人工鱼礁、水库大坝、跨海大桥桥墩、海底油气管道等水下建筑物的探测与诊断,长江黄河的险工段探测,中华鲟栖息地调查,失事船只和危险品水下搜寻。此外,近期有关单位利用 C3D 侧扫图像的白柱部分对喀纳斯湖中鱼类进行了探测。

综上所述,C3D 测深侧扫声呐系统是一种优越的水下成像声呐系统,大量的实践证明其在人工鱼礁建设的3个阶段都大有作为。C3D 系统的应用,可为人工鱼礁方案设计提供详细的海底地形和地貌信息,可对人工鱼礁建设的过程和结果进行科学的评估,将为各地人工鱼礁工程的顺利实施和效益保障发挥重要作用。

参考文献:

- [1] 李成钢,王伟伟,阎军. 传统多波束系统与具有相干特点的多波束系统的研究[J]. 海洋测绘, 2007, 27(2): 77-80.
- [2] 赵建虎. 多波束测深及图像数据处理[M]. 武汉: 武汉大学出版, 2008.
- [3] RAMIREZ M T. Benthos C3D Acquisition Guide: Hardware & Software Setup[R]. Triton Imaging Inc., 2011.
- [4] HEGG A F. Determining the Functional Shallow Water Limitation for an Arrival Based Sonar[C]. U. S. Hydro, 2007.
- [5] HEINECK K. Teledyne Benthos' C3D-LPM Maps River Bed in VA [N]. WSLS News, 2011.
- [6] MOSS D, ARMSTRONG S, MARTIN P, et al. Using C3D Co-Located side-scan imagery, bathymetry, and acoustic backscatter for mapping benthic habitat in a shallow tidally-dominated saltmarsh environment, eagle river flats, Alaska [EB/OL]. [http://www. estuaries. org/ pdf/2010posters/ armstrong. pdf](http://www.estuaries.org/pdf/2010posters/armstrong.pdf).
- [7] 李平, 杜军, 吴桑云. 基于 CAATI 技术的条带测深侧扫声呐系统 C3D_LPM[J]. 海岸工程, 2010, 29(4): 50-56.
- [8] 焦金菊, 潘永玺, 孙利元, 等. 人工鱼礁区的增殖鱼类资源效果初步研究[J]. 水产科学, 2011, 30(2): 79-82.
- [9] 尹增强, 章守宇, 汪振华. 浙江嵊泗人工鱼礁区小黄鱼生长特征与资源合理利用的初步研究[J]. 中国生态农业学报, 2010, 18(3): 588-594.
- [10] 汪振华, 章守宇, 王凯, 等. 三横山人工鱼礁区鱼类和大型无脊椎动物诱集效果初探[J]. 水产学报, 2010, 34(5): 751-759.
- [11] 张硕. 人工鱼礁生态效应研究[D]. 上海: 上海水产大学, 2006.

The application of C3D bathymetry side scan sonar system in artificial reef construction

SHEN Wei^{1,2}, ZHANG Shou-yu¹, LI Yong-pan^{1,2}, ZHANG Jin^{1,2}, SHEN Tian-yue^{1,2}, SHEN Yun^{1,2}, ZHANG Xiang¹

(1. *College of Marine Sciences, Shanghai Ocean University, Shanghai 201306, China*; 2. *Research Center of Underwater Information Engineering, Shanghai Ocean University, Shanghai 201306, China*)

Abstract: The teledyne benthos C3D bathymetry side scan sonar system is a pioneer and innovator designed to serve marine surveys. C3D is a fully integrated sonar system that acquires high resolution side scan sonar imagery plus high resolution wide swath bathymetry to produce an accurate 3D map of the ocean floor in shallow water surveys. The C3D is a phase – differencing bathymetric sonar that uses the CAATI (Computed Angle of Arrival Transient Imaging) Algorithm to solve for multiple angles of arrival to achieve a 10 times water depth swath (for bathymetry) of high resolution (vertical 5 cm) bathymetry and imagery (horizontal 10 cm). Firstly, the basic principle, composition, performance, advantages and application of C3D System were introduced in this paper. Then, the C3D surveying system was designed and applied in artificial reef construction for the first time in China. In design, construction and monitoring phases of artificial reef, the C3D surveying system could provide high accuracy bathymetry data, high resolution submarine geomorphology imagery, depth contour, seabed grade, location and conditions of artificial reef, etc. . These information were the necessary data for artificial reef construction successfully. The tests proved the C3D is a superior performance underwater survey system which could be successfully used in various phases of artificial reef construction and guarantee the construction effect.

Key words: bathymetry side scan sonar; artificial reef; multibeam survey; surveying