

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

郎诚¹, 茅克勤¹, 向芸芸²

(1. 浙江省海洋科学院 杭州 310000; 2. 自然资源部第二海洋研究所 杭州 310012)

摘要:为提高我国海底掩埋目标的探查技术,以适应不断发展的探测需求,文章综述了现有三维合成孔径声呐在海底掩埋目标探查中的应用现状,并对关键技术的发展方向进行了展望。结果表明:尽管三维合成孔径声呐在海底掩埋目标探查中具有较大的技术优势,但是由于技术难度大、复杂程度高,可提供成熟商用设备的单位仅有两家,中科探海研发的三维合成孔径声呐系统多项核心技术指标领先。运动误差估计和补偿技术,掩埋目标特征提取和识别分类算法,多通道大规模数据并行处理算法等关键技术将成为三维合成孔径声呐系统未来的发展方向。

关键词:掩埋目标;合成孔径声呐;三维 SAS;海底探测装备;声学成像

中图分类号:TH766;TB565.2

文献标志码:A

文章编号:1005-9857(2021)01-0049-04

The Applications and Prospect of 3D Synthetic Aperture Sonar System in Buried Targets Detection

LANG Cheng¹, MAO Keqin¹, XIANG Yunyun²

(1. Zhejiang Academy of Marine Science, Hangzhou 310000, China;

2. Second Institute of Oceanography, MNR, Hangzhou 310012, China)

Abstract: For the purpose of improving the domestic technology on buried targets detection, and matching increasing demands of submarine detection, this paper reviewed the applications of 3D synthetic aperture sonar system on buried targets detection, and prospected the future direction of the core technologies. It was found that: there are only two corporations providing developed 3D SAS due to the high complexity and difficulty in designing and implementation, despite of its great advantages in buried targets detection; many parameters of the 3D SAS produced by T-SEA Marine Technology Co., Ltd. are ahead of the competitor; motion error estimation and compensation, buried targets feature extraction and classification algorithm, and multi-channel parallel processing algorithm for large-scale data would be the future direction of 3D SAS.

Keywords: Buried targets, Synthetic aperture sonar, 3D SAS, Submarine detection, Acoustical imaging

收稿日期:2020-07-20;修订日期:2020-08-18

基金项目:国家自然科学基金青年科学基金项目“土地资源约束下海岛系统的适应性管理研究”(41506140);自然资源部第二海洋研究所及中央级公益性科研院所基本科研业务费专项资金资助项目(JG1719)。

作者简介:郎诚,助理工程师,硕士,研究方向为声学成像和海洋装备研发

通信作者:茅克勤,高级工程师,硕士,研究方向为海洋测绘和地理信息系统

0 引言

随着海洋科技和海洋经济的深入发展,对海洋的认知和开发已遍布海洋的各个区域,对探查装备的能力需求越来越高,要求探查装备的探测能力从近海延展到中远海,从水中悬浮、沉底目标扩展到海底以下地质层或掩埋物体。与此同时,随着海洋经济的快速发展,海底通信光缆、海底供电电缆、海岛之间的输水和输气等水下管道等铺设量也越来越大,而且这些基础工程都是关乎国计民生的重大事项。现在海底管道和线缆均采用掩埋的方式铺设,所以在后期的管缆路由探查和维护工作中,被掩埋的管缆目标的精确探测需求越来越迫切。

目前,可用于掩埋目标探查的技术主要包括浅地层剖面仪、二维合成孔径声呐和三维合成孔径声呐等^[1-2]。浅地层剖面仪目前在传统的作业方式中应用最为广泛^[3-7],但其主要问题在于开角非常窄,只能横穿掩埋目标作业。另外浅地层剖面仪对小的掩埋目标(比如直径 20 cm 以内的管缆、光缆、普通的掩埋目标等)均无法探测。

合成孔径声呐的概念最早由美国的 Raytheon 公司在 20 世纪 60 年代提出^[8],其基本思想是对小孔径基阵沿直线运动过程中记录的接收信号进行孔径合成处理,从而达到虚拟大孔径基阵的方位分辨力效果,在高分辨海底成像领域有着潜在的应用前景。

1 合成孔径声呐

1.1 二维合成孔径声呐

早期二维合成孔径声呐的研究主要集中于侧扫式合成孔径声呐,只能形成目标的二维图像,无法给出深度信息^[9]。而在海底掩埋目标的位置探测时,掩埋目标埋深这一判断管缆目标安全状态的关键信息至关重要^[10]。因此,二维合成孔径声呐在实际应用中无法完全满足工程需求。三维合成孔径声呐技术在此背景下应运而生。

1.2 三维合成孔径声呐

三维合成孔径声呐技术最早由 Griffith^[11]通过干涉法在水池中试验成功,并逐步获得研究学者的关注^[12-14]。但是干涉式合成孔径声呐的三维图像

是通过多幅二维图像重建获得,并非目标的真实三维成像,因此无法完成对目标的高精度测深^[15]。

21 世纪初,为克服干涉式合成孔径声呐的这一缺点,日本学者 Asada 等^[16]基于多波束测深声呐技术,提出了多波束合成孔径声呐,并在试验中获得了良好效果。国内,哈尔滨工程大学和中国科学院也对三维合成孔径声呐技术开展了早期研究^[17-18],并奠定了一定的理论基础。由于在三维成像上所具有的显著优势,多波束合成孔径声呐使得海底掩埋目标探查技术装备的研究与开发重点聚焦于多波束合成孔径声呐。

2 三维合成孔径声呐在海底掩埋目标探查中的应用现状

由于多波束合成孔径声呐在三维成像上的显著优势,应用于掩埋目标探查的设备多基于多波束原理设计开发。目前成熟商用的三维合成孔径声呐仅有加拿大的 Pangeo 公司的 SBI(Sub Bottom Imager)型三维合成孔径声呐和我国中科探海海洋科技有限责任公司(以下简称中科探海)设计生产的下视三维合成孔径声呐。

2.1 SBI 型三维合成孔径声呐

加拿大 Pangeo 公司生产的 SBI 型三维合成孔径声呐,研发始于 2008 年,2010 年完成了对海底掩埋的高压直流输电(HVDC)电缆的验证,主要技术参数如表 1 所示,2011 年正式进入商用领域,完成了大量的实际应用。

表 1 加拿大 Pangeo 公司 SBI 系统主要技术参数 ^[19]	
参数名称	参数数值
阵元数目	40 个
最大埋深	7 m
航数	<2 kn
探测距底高度数	距海床垂直高度 3.5 m±0.5 m
作业深度	3~1 000 m
尺寸	1.8 m×1.85 m(可展开至 3.4 m×1.85 m)

SBI 型三维合成孔径系统采用 5×8 的水听器阵列,可 4~14 kHz 多个频段扫描探测,可安装于水下机器人上作业。该系统在线性探测时,探测宽度可以到 5 m,并在长度方向上连续探测数千米。

而在进行区域探测时,可以在探测结束后对探测结果进行组合,形成整个区域的完整探测成像。

2.2 中科探海三维合成孔径声呐

2.2.1 产品概述

 中科探海在 2016 年开始了下视三维合成孔径声呐的研制工作,并于 2018 年推出可商用的产品。与加拿大产品相比,该公司研制的三维合成孔径声呐系统,突出优点是同时集成了下视三维合成孔径声呐、下视多波束声呐、侧视声呐等三部声呐分机,采用模块设计,可根据不同要求灵活组合,满足不同任务场景以及安装需求。

 其中下视三维合成孔径声呐可获得水体、海底、海底以下掩埋层等全海深的三维声呐数据,下视多波束声呐可获得海底高精度地形数据,侧视声呐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,可提供水下悬浮、沉底和掩埋目标的高清影像、目标位置、目标埋设深度以及水下高精度三维地层等多种信息,对目标的辨别、埋深的精确测定、路由走向、海底环境信息等均可获得高质量成果,极大地促进海底电缆和管线的成像和信息提取。

 该系统可满足用户水下环境探查、水下目标搜索、航道整治复勘、护堤结构复勘、桥墩监测、救捞、应急、油气管线路由勘察、光缆电缆勘察(路由+埋深+地层等功能)、三维精细地层结构、水下其他各类成像等多种使命任务的需求。

2.2.2 产品性能

 中科探海三维合成孔径声呐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绝对优势。

表 2 中科探海三维合成孔径声呐系统主要技术参数^[20]

参数名称	参数数值
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 电缆埋深 5 m;沉船埋深 10 m;浅地层剖面深度 30 m

续表

参数名称	参数数值
最大探测范围	掩埋目标:正下方 90 度;沉底目标和悬浮目标:正下方 140 度(下视)/双侧各 45 度(侧视)
下视三维阵元数量	A 型 432 个;B 型 288 个;C 型 96 个
下视多波束最大波束数	物理波束 192 个;数字波束 1 400 个
最大量程	150 m
质量	A 型≤400 kg;B 型≤250 kg;C 型≤100 kg
尺寸	A 型:1.8 m×1.4 m×0.2 m B 型:1.5 m×1.2 m×0.2 m C 型:1.2 m×0.7 m×0.2 m

2.2.3 产品系列

 中科探海三维合成孔径声呐系统目前有 A、B、C 3 个系列^[20—21]。

 A 系列产品为拖曳式产品。适用于深水水域,工作时通过调整拖缆长度的方式,来调整拖体在水中的深度,使声呐距底高度处于良好工作状态,满足较深水域水下悬浮、沉底和掩埋目标探测的需求。接收阵列采用 3 行 6 列模块配置,共 432 个阵元。

 B 系列产品为大型框架式安装,适用于测量船船底安装或船侧挂载、水面大型无人船船底安装等,其接收阵列采用 3 行 4 列模块配置,共 288 个阵元。

 C 系列产品为小型框架安装,体积小、搭载方便,适用于小型测量船船侧挂载,作业方便、迅捷。可对浅海海底掩埋目标进行高清晰三维成像。接收阵列采用 1 行 4 列的模块配置,共 96 个阵元。

3 结语

 本研究主要对三维合成孔径声呐在海底掩埋目标探查中的应用现状及现有成熟设备的应用情况进行综述。尽管三维合成孔径声呐系统在海底掩埋探查中具有良好的成像性能,但由于该系统的开发难度大、复杂程度高,市面众多研究单位中,仅有两家可提供成熟的商用产品。目前,三维合成孔径声呐系统已能基本满足当下的作业需求,然而海

洋科技、海洋经济的深入发展对三维合成孔径声呐系统提出了新的技术需求:

(1)运动误差估计和补偿技术:与无人平台合作进行高度自动化作业是三维合成孔径声呐系统未来的发展方向,而无人平台姿态变化对其成像精度和目标定位精度影响较大,因此必须发展基于GPS、超短基线、惯导等多数据源的运动误差估计和补偿技术。

(2)掩埋目标特征提取和识别分类技术:实现掩埋目标物目标特征提取和识别分类是一体化探测无人平台智能探测的基础。对水下目标的正确分类与识别建立在有效的特征提取技术上,特征提取是目标识别过程中的关键,它直接影响到目标识别的效果。

(3)多通道、大规模数据并行处理算法:随着对探测深度和探测分辨率的要求越来越高,阵列也变得越发庞大,未来阵列的通道数量可达到数百路,这就对数据采集和处理提出了较高要求,尤其在处理实时成像时,对电子系统和成像算法的要求更高。

参考文献

- [1] 路晓磊,张丽婷,王芳,等.海底声学探测技术装备综述[J].海洋开发与管理,2018,35(6):91—94.
- [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] 张兆富.SES-96 参量阵测深/浅地层剖面仪的特点及其应用[J].中国港湾建设,2001(3):41—44.
- [4] 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(4):64—67.
- [5] 李平,杜军.浅地层剖面探测综述[J].海洋通报,2011,30(3):344—350.
- [6] 石谦,张金城,蔡爱智,等.浅地层剖面仪在海岸工程上的应用[J].海洋工程,1995(2):71—74.
- [7] 李一保,张玉芬,刘玉兰,等.浅地层剖面仪在海洋工程中的应用[J].工程地球物理学报,2007(1):4—8.
- [8] WALSH G M.synthetic aperture array techniques for high resolution ocean bottom mapping[R].1967.
- [9] 王晓静.多波束 SAS 三维仿真模型与成像算法研究[D].哈尔滨:哈尔滨工程大学,2015.
- [10] 于福建,王斌,张培珍.起伏海底掩埋目标声散射特性数值仿真[J].水下无人系统学报,2018,26(6):533—536.
- [11] GRIFFITH H D.Mine detection using interferometric synthetic aperture sonar[Z].1995.
- [12] SERAFIN P,OKONFAFARA M,SZUGAJEW M,et al.3-D inverse synthetic aperture sonar imaging[C]// IEEE.18th International Radar Symposium(IRS),2017,18:1—7.
- [13] HANSEN R E.Synthetic aperture sonar technology review[J].Marine Technology Society Journal,2013,47(5):117—127.
- [14] HAYES M,GOUGH P T.Synthetic Aperture Sonar: A Review of Current Status[J].IEEE Journal of Oceanic Engineering,2009,34(3):207—224.
- [15] 朱宇涛,栗毅,陆珉,等.基于宽带二维合成孔径的三维成像算法[J].系统工程与电子技术,2012,34(4):673—680.
- [16] ASADA A,YABUKI T.Synthetic aperture technique applied to a multi-beam echo sounder[J].Earth,Planets and Space,2001,53(4):321—326.
- [17] 李海森,魏波,杜伟东.多波束合成孔径声呐技术研究进展[J].测绘学报,2017,46(10):1760—1769.
- [18] 徐江,唐劲松,张春华,等.运动补偿的多子阵合成孔径声纳波束形成算法[C]//中国声学学会.中国声学学会 2002 年全国声学学术会议论文集,2002:104—105.
- [19] Pangeo 公司.Sub-Bottom Imager 产品简介[EB/OL].[2020—07—24].<https://www.pangeosubsea.com/sub-bottom-imager>.
- [20] 中科探海(苏州)海洋科技有限责任公司.三维掩埋物成像声纳产品简介[EB/OL].(2016—09—18)[2020—07—24]http://www.t-sea.cn/html/cpzx/tyshytcsb/tyssxkscxsn_sw_/2016/0917/151.html.
- [21] 中科探海(苏州)海洋科技有限责任公司.中科探海某海域 LNG 管线探测项目内部报告[R].2019.