

多波束测深声纳技术研究新进展

李海森^{1,2}, 周天^{1,2}, 徐超^{1,2}

(1. 哈尔滨工程大学水声技术重点实验室, 哈尔滨 150001; 2. 哈尔滨工程大学水声工程学院, 哈尔滨 150001)

摘要: 多波束测深声纳已成为国内外海洋科学研究、海底资源开发、海洋工程建设等海洋活动中最主要的海洋调查勘测仪器之一。以多波束测深声纳为对象, 详细介绍了国内外多波束测深声纳产品的发展情况, 重点阐述了代表当前多波束测深声纳发展趋势的超宽覆盖、高分辨、高精度、多功能一体化探测等核心技术的最新研究进展, 最后结合实际的海底地形地貌探测需求, 给出了多波束测深声纳技术未来发展的展望。

关键词: 多波束测深声纳; 海底地形; 一体化探测

中图分类号: P715.5

文献标识码: A

文章编号: 1000-3630(2013)-02-0073-08

DOI 编码: 10.3969/j.issn1000-3630.2013.02.001

New developments on the technology of multi-beam bathymetric sonar

LI Hai-sen^{1,2}, ZHOU Tian^{1,2}, XU Chao^{1,2}

(1. Science and Technology on Underwater Acoustic Laboratory, Harbin Engineering University, Harbin 150001, China;

2. College of Underwater Acoustic Engineering, Harbin Engineering University, Harbin 150001, China)

Abstract: Multi-beam bathymetric sonar has become one of major oceanographic surveying tools in the ocean activities, such as marine scientific research, resource development, engineering construction and so on. This paper focuses on the technology of multi-beam bathymetric sonar. Firstly, it introduces the development of advanced multi-beam bathymetric sonar products, and illustrates research progress on four core technologies, including super-wide coverage, high-resolution, high-precision and multi-functional integration of detection, which indicates the current developing trend of multi-beam bathymetric sonar. Finally, combined with the actual needs of seafloor topographic survey, the developing outlook of multi-beam bathymetric sonar technology has been proposed.

Key words: multi-beam bathymetry sonar; seafloor terrain; integration detection

0 引言

占地球总面积约 71% 的海洋是全球生命支持系统的一个基本组成部分, 拥有丰富的生物、石油、矿藏等资源。随着世界人口急剧增加、陆地资源日趋匮乏, 海洋已成为人类生存与实现可持续发展的重要空间。而在围绕海洋的科学研究、资源开发、工程建设以及军事等活动中, 通常都需要准确地获取所关注区域内的海底地形地貌信息作为基础资料与支撑依据。因此, 海底地形地貌探测设备及其技术成为科学家和学者兴趣所在, 其先进技术和功能

实现成为了高效、准确获取海底信息的关键之一。

从沿用了千年的竹竿、铅垂到第一次世界大战后 20 年代出现的单波束回声测深仪, 再到上世纪 60 年代出现的多波束测深声纳, 海底深度测量设备与技术在现代水声、电子、计算机、信号处理技术蓬勃发展的背景下产生了质的飞跃, 促进了海洋科学研究活动的飞速发展。多波束测深声纳概念的提出, 实现了海底地形地貌的宽覆盖、高分辨探测。与铅垂或单波束回声测深仪等每次测量只能获得测量船正垂下方一个测点的深度数据相比, 多波束探测每发一次声波就能获得多达数百个海底测点的深度数据, 把测深技术从“点-线”测量变成“线-面”测量, 促进了海底三维地形的测量效率和海底遥测质量的大幅度提高^[1]。

几十年来, 多波束测深声纳产品不断推陈出新, 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, 现已成为海洋勘测不可或缺的首选科学设备之一^[2]。而如此重要地位的

收稿日期: 2013-01-04; 修回日期: 2013-03-15

基金项目: 国家 863 计划资助项目(2007AA09Z124, 2008AA092701), 国家科技部国际合作计划资助项目(2008DFR70320), 国家自然科学基金项目(41006057, 41076056, 60872107), 中国高等学校博士点基金项目(20102304120028, 20112304130003, 20122304120012), 水声技术重点实验室基金项目(9140C2003021003, 9140C200403110C20)

作者简介: 李海森(1962—), 男, 黑龙江哈尔滨人, 教授, 博士研究生导师, 研究方向为海底特性声学探测。

通讯作者: 李海森, E-mail: hsenli@126.com

建立取决于其相关技术的长期不断创新与发展。为此,本文针对目前多波束测深声纳产品及其核心技术的研究进展进行归纳与总结,以供有兴趣的学者研讨交流。

1 多波束测深声纳进展概述

1.1 多波束测深原理

多波束测深声纳(multi-beam bathymetric sonar),又称为条带测深声纳(Swath bathymetric sonar)或多波束回声测深仪(multi-beam echo sounder)等,其原理^[3,4]是利用发射换能器基阵向海底发射宽覆盖扇区的声波,并由接收换能器基阵对海底回波进行窄波束接收,如图1所示。通过发射、接收波束相交在海底与船行方向垂直的条带区域形成数以百计的照射脚印(footprint),对这些脚印内的反向散射信号同时进行到达时间和到达角度的估计,再进一步通过获得的声速剖面数据由公式计算就能得到该点的水深值。当多波束测深声纳沿指定测线连续测量并将多条测线测量结果合理拼接后,便可得到该区域的海底地形图。

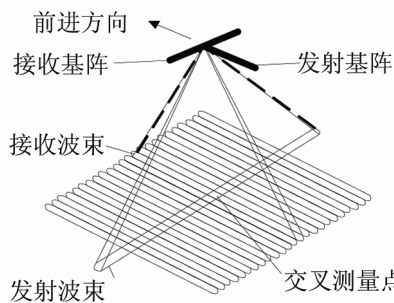


图1 多波束测深原理图

Fig.1 Multi-beam bathymetric principle diagram

1.2 多波束测深声纳产品发展趋势

自从1956年在美国 Woods Hole 海洋研究所召开的一次学术会议上首次提出了多波束测深的构想以来,多波束测深声纳系统及相关技术的研究已经经历了半个多世纪的发展。从2012年第18届国际海道测量会议新产品展示看,目前国际上知名的多波束测深声纳产品主要包括:美国 L-3 ELAC Nautik 公司的 SeaBeam 系列,德国 ATLAS 公司的 FANSWEEP 系列,挪威 Kongsberg 公司的 EM 系列,丹麦 Reson 公司的 Seabat 系列以及美国 R2SONIC 公司的 SONIC 系列等(各系列产品性能指标详见有关产品网站)。通过产品的系列化,使得多波束测深声纳实现了全海深、全覆盖、高分辨测量;其典型发展趋势是:(1)高精度、高分辨;(2)超宽覆盖;

(3)多功能一体化;(4)小型化、便携式。

1.2.1 高精度、高分辨

由于边缘波束海底散射信号的信噪比降低、“隧道效应”^[4]和声线的“折射效应”^[5]等测深假象以及海底地形复杂性的影响,早期的多波束测深声纳难以实现高精度(特别是内部与边缘波束同时高精度),同时由于声照射海底脚印偏离垂向后不断展宽增大,导致海底采样不均匀,因此小目标探测或微地形探测效果不佳。为此,围绕高精度和高分辨,国内外学者和厂商开展了大量深入细致的研究工作。新颖的高分辨^[6,7]、宽带信号处理^[8]以及测深假象消除^[9,10]、联合不确定度多波束测深估计(Combined Uncertainty Multi-beam Bathymetry Estimation, CUMBE)等技术的采用大幅度提高了多波束测深声纳的精度、分辨率和可信性。

1.2.2 超宽覆盖

覆盖范围是指水平探测距离与垂直深度之比,决定了多波束测深声纳的实际测量效率,尤其是在浅水区域,宽覆盖和超宽覆盖是多波束测深优越性的集中体现,也是多波束测深声纳最引人关注的性能。因此业内也经常通过这个技术指标来衡量其产品的先进性或作为选型参考。一般3~5倍以下是常规覆盖能力,目前技术已趋于成熟;6~8倍属宽覆盖且达到国际先进水平,国内外主流产品大多达到这个能力,而8倍以上则达到超宽覆盖,是国际领先水平,只有少数商家可以达到。目前国内也已经实现了8倍以上超宽覆盖的原理样机^[4]。

1.2.3 多功能一体化

自多波束测深声纳问世,学者们就一直努力拓展其获取更多海底特性信息的能力,比如多波束海底地形探测的同时兼顾海底地貌探测。其基本思想是采用同一套硬件设备或者基于同一组海底采样数据,运行不同的软件进而获取更丰富的海底特性信息,这既能减少测量船勘测设备购置成本、数量和种类,节省能源和空间,更突出的优势是可以实现海底多种特性共点同步探测。目前,国际上已实现了多波束海底地形和地貌探测的产品有 seabat7125、EM3000 等^[11],而 QTC 公司通过进一步提供软件数据分析,可以实现多波束海底底质分类和识别^[12]。国内多波束海底地形地貌探测技术也已经取得显著进展^[13,14],但多波束分类尚处于基础阶段^[15]。总之,基于多波束测深声纳平台实现海底地形、地貌、底质分类与识别等多功能一体化探测是未来的发展方向之一。

1.2.4 小型化、便携式

国内外各个多波束测深设备厂商, 在努力实现高精度、高分辨测量的同时, 为了测量人员使用测量设备时的舒适度以及安装方便等要求, 努力提高设备的集成度、小型化。特别是在内陆湖泊, 水浅船小的情况下, 一两个人即可完成测绘任务, 大大降低了测绘成本。这种轻便设备的基阵安装方式多样, 既可以安装在船上, 也可以安装在水下潜器上, 表现出很强的适应性和灵活性^[16]。

1.3 多波束测深声纳产品分类

在各多波束生产厂商的竞争以及需求方不断提出的高新要求下, 各种系列化的货架产品应运而生, 而且针对性更强。目前多波束测深声纳按照载体不同分为船载式和潜用式; 按照测量水深可以分为浅水、中水、深水型; 按照发射频率可以分为单频和多频(宽带); 按覆盖宽度可分为宽覆盖和超宽覆盖; 按照完成功能可分为单功能和多功能探测型; 按照技术交叉可以分为测深型和测深辅助型(基于测深延伸为独立仪器, 比如海底管线仪、海底桩基形位仪、前视避碰声纳)等。以 Kongsberg 公司多波束测深声纳产品为例^[17], 其收购公司旗下产品 GeoSwath Plus 型专用于 ROV/AUV 等水下潜器的多波束测深声纳; 将两个 EM2040 呈“V”型安装的超宽覆盖、浅水多波束测深声纳, 并且该声纳系统可发射宽带信号; 探测深度 3~1000m 的 EM710S 中水型多波束测深声纳; 最大探测深度可达到 11000 m 的 EM122 型深水多波束测深声纳等。可见, 随着技术的不断发展, 多波束测深声纳产品呈系列化趋势, 更加适应对海底特性的不同探测需求。

1.4 国产化产品新进展

在国内, 多波束测深声纳的研究始于上个世纪 80 年代中期, 但直到 1998 年才由哈尔滨工程大学和天津海军测绘研究所等单位联合研制成功我国首台多波束条带测深仪, 成为国产第一台中等水深(最大可达 1200 m)实用型多波束测深声纳产品, 并获得 1999 年原中船总部级科技进步一等奖。2006 年, 哈尔滨工程大学又成功研制了我国首台便携式高分辨浅水多波束测深声纳^[18]。其测深范围 1~200 m, 最大覆盖扇面是水深的 6~8 倍, 测深波束 256 个, 波束宽度为 $1.5^{\circ} \times 1.5^{\circ}$, 测量结果满足 IHO 国际标准要求, 并且该产品先后获得了中国国家发明专利优秀奖、中国上海国际工业博览会优秀产品奖、中国海洋工程科学技术奖发明二等奖、黑龙江省科技进步二等奖、浙江省科学技术二等奖等。从 2008

年至今, 哈尔滨工程大学又在国家“863”计划项目的支持下, 完成了超宽覆盖浅水多波束测深声纳系统的研制, 其测深范围为 1~500 m, 波束宽度为 $1.3^{\circ} \times 1.3^{\circ}$, 覆盖扇面达到了 12 倍水深, 并且该系统可实时进行横摇、纵摇补偿与声速修正, 已通过国家科技部组织的专家验收。目前, 具有我国自主知识产权的国产化产品或技术已经得到中国石油集团工程技术研究院、海洋石油工程有限责任公司、黑龙江省航务局和航道局、内蒙古海事局、中国船舶重工集团公司第 710 研究所、第 726 研究所、大连松岩诚城公司、哈尔滨海声天达公司等多家专业单位选购或推广应用。2010 年, 基于哈尔滨工程大学专利技术, 广州南方测绘公司在全国海测会议上推出一款性价比优势明显的超轻便型多波束测深系统, 其自身重量仅 15kg(不含电缆), 只需外置笔记本电脑和必要辅助测量设备即可工作, 这引起国内同行高度关注。2012 年哈尔滨工程大学对该产品实现了软件和硬件升级, 其测深范围 1~150m, 最大覆盖扇面是水深的 4~5 倍, 测深波束 127 个, 波束宽度为 $3.0^{\circ} \times 1.5^{\circ}$ 。此外, 国内中国船舶重工集团公司第 715 研究所也于 2010 年完成一套基于 U 型基阵^[19]的多波束测深声纳系统工程样机, 但尚未实现产品化。同期, 在国家“863”计划支持下, 中科院声学研究所、中国船舶重工集团公司第 715 研究所、国家海洋局第二海洋研究所与浙江大学等多家单位联合开展了我国第一套深水多波束测深侧扫声纳系统研究, 其测深范围为 150~11000m^[20]。

2 多波束测深声纳技术研究新进展

针对多波束测深声纳技术的发展, 国内外不断寻求新的突破, 突出研究多波束测深声纳覆盖宽度、探测精度以及分辨率实现技术, 更加注重追求测量质量; 另一方面, 在研究测深技术的同时, 又进一步挖掘多波束测深系统在地貌成像与海底底质分类方面的能力, 从而进一步努力实现海底地形、地貌与底质分类多功能一体化探测。

2.1 超宽覆盖多波束测深技术

只有具备宽覆盖或超宽覆盖探测能力的多波束测深声纳才能发挥出更高的测量效率, 进而减少海底地形调查的人力、物力以及时间上的投入。因此, 如何提高多波束测深声纳的覆盖范围是其技术研究的前沿热点问题之一^[4]。

换能器基阵的辐射扇面开角是多波束测深声纳保证其覆盖能力的重要前提, 因此国内外首先通

过设计特殊的基阵形式以取代传统多波束测深系统采用的 Mill's 交叉阵在超宽覆盖能力上的欠缺。例如, 2004 年德国 Atlas 公司推出的 Fansweep Coastal 是一种 U 型基阵多波束测深声纳^[21], 充分利用其物理形状自然补偿边缘波束方向的声源级, 据厂商公开的理论测试曲线可以补偿 12 dB, 较好弥补了边缘波束区域信号弱的问题, 但是该产品几年前首次引进我国时, 没有通过用户验收, 经多方权威测试属产品自身质量问题不得不退货赔偿处理, 可见该型产品尚存在某方面技术缺陷, 至今未能在国内实用; 文献[22]提出多条多元发射线阵组成弧形发射阵, 且使用“V”型阵进一步实现了多波束测深声纳的超宽覆盖探测, 这是目前国内外更为普遍的一种超宽覆盖技术^[4]。利用两套都能独立进行收发基阵构成“V”型安装, 使每套基阵水平夹角合理设置后发射波束主轴偏离基阵正下方, 增强了边缘波束方向的能量, 利于接收边缘波束的海底回波信号。另一方面, 多波束测深声纳超宽覆盖条件下的边缘波束测深精度估计问题也相应地得到广泛关注。文献[23,24]利用分裂子阵相位差检测法对边缘波束回波进行方位估计; 而 Luren Yang^[25]通过综合运用海底回波的幅度与相位信息, 研究出一种更为稳健的海底检测技术——多子阵检测法, 文献[26]对该方法进行了改进, 并在国产多波束产品中实现工程应用, 效果十分令人满意。

2.2 多波束高分辨测深技术

分辨率是衡量多波束测深声纳技术水平的另外一个重要指标, 它决定了水下小目标以及复杂地形的精细探测能力。近年来, 由于相干机理^[7,27,28]的引入解决了多波束测深系统分辨率受波束数目限制问题, 且因算法结构简单使多波束测深声纳在不增加波束形成数目和基本硬件成本的情况下, 就能获得非常高的分辨率, 因此为愈来愈多的科研单位及多波束测深声纳生产厂商所重视。多波束相干算法从最初原理的提出到最终算法的完善都经过了大量的理论与试验验证研究。如, Gerard Llorc 等人^[29]提出利用波束范围内相位差序列的全部数据点估计海底深度的方法, 并利用实测数据验证了该算法的有效性和可行性。在国内, 哈尔滨工程大学在国家自然科学基金的支持下, 对该算法展开了深入系统地研究。李海森等在借鉴国外基本思想的基础上详细分析了多波束相干法高分辨测深机理^[7], 研究了三种噪声源(即外部加性噪声、基线解相关引起的噪声和移动声脚印引起的噪声)对多波束相干测深算法性能的不利影响^[30]; 根据不同波束内相位差序列的带

宽不断变化的情况, 文献[31-33]依据可变带宽滤波器的思想, 改进了相位差序列估计精度。并在其基础上进一步完善了该方法的 FPGA 实现结构, 为该滤波算法的工程实现提供可行性。为保证测量精度, 文献[34]提出基于多元信息融合的相位差解模糊方法; 而文献[35]还提出了一种基于多子阵对的解相位模糊方法, 通过合理的子阵结构划分来避免出现子阵相位模糊问题, 不仅高效解决了多波束相干测深算法中的相位解模糊难点, 而且有效地提高了海底地形估计的分辨率和覆盖能力。经过上述的针对性研究, 解决了多波束相干测深方法中多波束相干相位差序列的获取, 相位差序列的可变带宽滤波处理以及相位解模糊方法三个关键技术, 完善了多波束相干法高精度估计方法与硬件实现结构设计, 为该方法的工程实现提供了较完备的理论与实践基础。

此外, 周天等将多子阵波束域算法的稳健性与 MUSIC 算法的高分辨特性相结合, 提出一种基于多子阵波束域 MUSIC 算法^[6](MSB-MUSIC); 又结合 FT 波束形成技术和相位检测法的优势, 提出 MSB-RMU 算法^[36]。该两种算法的提出丰富并完善了多波束高分辨测深的技术手段。

2.3 多波束高精度测深技术

多波束测深声纳技术的研究重点已经由传统常规技术向稳健性好、精度高升级, 更加注重追求测量结果的有效性和真实性。比如测深算法从单一“能量中心”算法发展到加权时间平均(Weight Mean Time, WMT)结合相位差检测算法, 即镜像区域采用 WMT, 而在非镜像区域采用相位差检测法。目前, 进一步降低各种噪声对声纳接收信号的影响进而提高新测深算法的估计精度是实现高精度测量的本质和关键。但是由于海底真实深度的未知性和不可视性, 无论采用哪种测深算法, 都只能获得某种条件(准则)下对海底“真实”深度的估计, 因此, 对测量设备测深精度或者测量可信性的评估是不可回避的问题, 近年来人们开始尝试从不确定度(Uncertainty)的角度间接地评估测深结果的“可信性”, 并将诸多不确定度因素导致的联合不确定度(Combined Uncertainty)概念引入到多波束测深结果的评估中。此外, 在实际的多波束测深声纳的使用中, 还会遇到一些异常测深误差是上述各种高精度海底回波检测算法所无法解决的, 并且会在海底等深线图或三维地形图产生一定的测深假象, 从而带给海底成图质量许多不利的影响, 严重者能出现错误的海底地形与目标特征。其中, 最典型的测深假

象就是“隧道效应”和声线的“折射效应”。为此国内外学者倾力研究上述测深假象的产生机理与消除技术。

2.3.1 联合不确定度多波束测深估计

测深结果的精度直接影响到水深测量成果图的质量,为保证测量结果的安全使用,必须对测深结果进行评估。传统办法采用交叉测线法或对比法来评估多波束测深数据的有效性和精度,但交叉测线法是相对一致性评价,只能验证自吻合程度,无法确切证明真值的可信性,而对比法则仅仅是取其他设备获得的测量结果为参考值,其自身也存在真实性评价问题,因此,对比法依然无法获知真值而受到很大局限。另外,多波束测深质量受很多不确定因素影响,比如海底反射信号强度、测深算法的适应性、运动姿态与动态位置、声线折射效应等等,难以直接评估多波束测深声纳的测深精度。2008年国际海道测量组织(International Hydrography Organization, IHO)在最新出版的海道测量标准(S-44)第5版中首次将不确定度的概念引入海道测量数据处理,要求在水深测量数据质量评估中以不确定度来代替精度和误差,国内陆丹等采用联合不确定度多波束测深估计(CUMBE)来定量表示测量结果可信程度^[37]。目前,测深值不确定度的相关研究成为近年来多波束测深数据后处理的研究热点之一^[38,39]。

2.3.2 “隧道效应”分析与消除

多波束测深声纳普遍使用常规波束形成技术,因该方法存在能量泄露的缺点,使得镜像区域的海底回波能量泄露进入其它所有波束的主瓣方向,这对测深结果的直接影响就是真实的平坦海底地形会被测量成虚假的两边上翘的弧形海底地形,即所谓的“隧道效应”(Tunnel effect)。从2008年开始,在国家自然科学基金的资助下,针对多波束测深声纳试验数据中存在的旁瓣干扰,国内进行了一系列消除测深假象方法的研究。李海森、魏玉阔等^[40,41]从自适应旁瓣抵消的角度出发,利用误差反馈RLS-Laguerre格型算法和基于Givens旋转的后验格型-梯型算法抑制旁瓣干扰,并获得了较好的处理效果。魏玉阔^[9]为了获得更加理想的抑制旁瓣效果,又尝试利用GSC(Generalized Sidelobe Canceller)自适应旁瓣抵消结构对“隧道效应”进行消除,并利用与其等效的MVDR算法对试验数据进行处理,验证了该算法的正确性与有效性;文献[42]从信号处理角度出发,寻找波束输出幅度特性有更好抗谱泄露特性的波束形成方法,提出了基于apFFT波束形成算法的隧道效应抵消方法,具有运算量低的突

出优点。

2.3.3 声线“折射效应”引起的误差分析与改正

海洋环境的复杂性强烈地影响着海水中的声传播,使声速变化也体现出随着空间和时间变化。为此,斜入射到海水里的声波在不均匀的介质中产生了折射现象,从而对发射波束的起始入射角(受表层声速影响)和传播过程(受声速剖面影响)产生严重影响,导致测量精度下降甚至是产生与实际地形背离的假象,这种假象通常称为声线的“折射效应”。针对声速表层及剖面误差在声波传播中造成的影响,文献[43-45]进行细致研究与分析。对于表层声速的误差影响,阳凡林等^[46]研究了基于测区分块内插的表层声速误差改正方法;赵君毅等^[47]研究了在未知准确表层声速的情况下,水深数据后处理的改正方法。而对于声速剖面的影响,加拿大Brunswick大学的J.E.Hughes Clarke与Edouard Kammerer^[48,49]系统地分析了声线折射对多波束测量的影响,先后提出了几种声线修正方法,并建立了一个修正软件包用于后处理中的声线修正问题。

2.4 多波束海底地貌探测与底质分类技术

在获得高质量的海底地形数据的同时,多波束测深声纳还可以利用来自海底的反向散射声信号,通过声成像或底质分类对海底生境(如,海草、珊瑚礁、岩石、砂砾、沙、泥沙、淤泥以及它们之间的混合物等)、沉底目标等进行更详细、更准确的认识,使多波束测深声纳成为一种集地形、地貌、底质分类探测为一体的多功能海洋勘测工具。

2.4.1 多波束测深声纳海底地貌探测

国外多波束测深声纳产品一般采用如下三种海底地貌获取方法^[50-52]:(1)由每个波束主轴方向得到一个声强值;(2)对接收波束(横向宽角度覆盖扇面)进行幅度时间序列采样。由于该方法类似于侧扫成像方法,所以称为伪侧扫声纳成像;(3)对每个接收窄波束都进行幅度时间序列采样,称为“snippet”方法或者脚印时间序列,与前两种方法相比,“snippet”方法具有高分辨率以及地形地貌数据融合相对较好的两方面优势。但由于该方法中每个波束内除主轴方向的其他强度样本的空间位置是通过假设波束内为平海底情况得到的,而这种不精确的假设使得在地形复杂变化下强度数据与其空间位置数据并不能准确融合^[53]。为此,文献[13,14]对其进行了改进,分别提出了基于多子阵检测法和多波束相干法的海底地貌探测算法,使测量的海底地形与地貌图像数据实现了同步测量和准

确融合。

2.4.2 多波束测深声纳底质分类

随着海底特性探测需求的提高,多波束测深声纳的底质分类技术同样受到了国内外的重点关注,近年来研究进展明显,而且已形成了多款商用海底分类软件。例如,挪威 Simrad 公司的 TRITON 分类软件,加拿大 QTC 公司的 MULTIVIEW 软件等。

利用多波束测深系统的海底底质分类技术主要围绕两个方面展开。第一,声学特征量的提取与分析,这一点是底质分类技术的前提与重要保障。一般来说,可用于分类的声学特征量主要包括海底反向散射强度数据的均值、分位数、标准差、对比度、频谱以及直方图等^[54];第二,分类方法的选择与实现。常用的方法主要包括贝叶斯统计方法^[55]、神经网络分类法^[56,57]、纹理分析方法^[12]等。其中,声学特征量的有效获取是核心关键,但目前尚不够缜密,有关海底分类软件必须结合现场取样等其他辅助方法才能更有效、稳健地应用。

3 展望与结论

海底多种声学特性的一体化探测无疑是当前多波束测深声纳技术的研究热点以及长期的发展趋势。其优势体现在:(1)避免了由于多个单一功能声学设备异步异地测量造成的数据融合困难,且节约成本;(2)多种信息的联合获得可为海洋勘测提供更为可靠的数据支撑。而在海底资源调查、海洋工程以及数字海洋构建等科学活动中,不仅仅需要水下地形地貌、海底浅表底质类型等海底表面特征数据。当遇到掩埋目标的探测与识别、海底沉积层成因与演化等实际海洋工程应用或科学研究问题时,精细浅地层剖面特性及其沉积物类型信息也是必须要充分获知的。为此,未来兼具海底地形、地貌、表层底质分类功能为一身的多波束测深声纳再具备浅地层剖面探测能力,这将是其在一体化探测能力上的重大技术进步。该问题的关键核心是如何解决多波束测深声纳具有发射超高频声波(用于浅表层信息的探测)与低频声波(用于浅地层信息的探测)信号的能力,参量声基阵是目前兼具这一潜能的唯一有效途径,且已经取得长足进步,为上述多波束海底特性一体化探测实现提供了可能性。

综上所述,虽然目前国外多波束测深声纳产品和技术日趋成熟,但新技术仍在不断发掘和推出。国内自主知识产权技术近年也取得十分显著的进步,相对完整的系列化国产产品正在逐步推出,

其品牌正在逐渐建立,知名度正在扩大,其高性价比不仅促进了国外产品降价,也进一步促进了国内市场容量的扩大,新兴用户的快速增加。但目前从总体上看国内仍落后国外,尤其是超宽覆盖基阵技术、海底散射信号精细信号处理技术、声学海底分类技术、多波束测深声纳现场校准与实验室精密评估技术等仍充满了巨大的挑战。

参 考 文 献

- [1] 李海森. 多波束条带海底地形测绘系统研究[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工程大学, 1999. 1-10.
LI Haisen. Study of multi-beam swath bathymetry survey system[D]. Harbin: Harbin Engineering University, 1999. 1-10.
- [2] 杨鲲, 吴永亨, 赵铁虎, 等. 海洋调查技术及应用[M]. 武汉: 武汉大学出版社, 2009. 40-48.
YANG Kun, WU Yongting, ZHAO Tiehu, et al. Technology and application of marine investigation[M]. Wuhan: Wuhan University Press, 2009. 40-48.
- [3] 周天. 超宽覆盖海底地形地貌高分辨探测技术研究[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工程大学, 2005. 2-9.
ZHOU Tian. Research on super wide coverage and high resolution seafloor bathymetry and physiognomy detection[D]. Harbin: Harbin Engineering University, 2005. 2-9.
- [4] 陈宝伟. 超宽覆盖多波束测深技术研究与实现[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工程大学, 2012. 1-12.
CHEN Baowei. Research and implementation of the technology for super-Wide coverage multibeam bathymetry[D]. Harbin: Harbin Engineering University, 2012. 1-12.
- [5] 魏玉阔. 多波束测深假象消除与动态空间归位技术[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工程大学, 2011. 4-14.
WEI Yukuo. Technique of bathymetric artifact elimination and seafloor footprint positioning for multibeam bathymetry[D]. Harbin, Harbin Engineering University, 2011. 4-14.
- [6] 李海森, 陈宝伟, 么彬, 等. 多子阵高分辨海底地形探测算法及其 FPGA 和 DSP 阵列实现[J]. 仪器仪表学报, 2010, 31(2): 281-286.
LI Haisen, CHEN Baowei, YAO Bin, et al. Implementation of high resolution sea bottom terrain detection method based on FPGA and DSP array[J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2010, 31(2): 281-286.
- [7] 张毅乐, 李海森, 么彬, 等. 基于相干原理的多波束测深新算法[J]. 海洋测绘, 2010, 30(6): 8-11.
ZHANG Yile, LI Haisen, YAO Bin, et al. A new approach for multibeam echo sounding based on interferometric principle[J]. Hydrographic Surveying and Charting, 2010, 30(6): 8-11.
- [8] HORVEI B, NILSEN K E. A new high resolution wideband multibeam echo sounder for inspection work and hydrographic mapping[C]// Seattle: IEEE Computer Society, OCEANS 2010, 2010. 1-7.
- [9] 魏玉阔, 陈宝伟, 李海森. 利用 MVDR 算法削弱多波束测深声纳的隧道效应[J]. 海洋测绘, 2011, 31(1): 28-31.
WEI Yukuo, CHEN Baowei, LI Haisen. Tunnel effect elimination in multibeam bathymetry sonar based on MVDR algorithm[J]. Hydrographic Surveying and Charting, 2011, 31(1): 28-31.
- [10] 丁继胜, 周兴华, 唐秋华, 等. 基于等效声速剖面法的多波束测深系统声线折射改正技术[J]. 海洋测绘, 2004, 24(6): 27-29.
DING Jisheng, ZHOU Xing-hua, TANG Qiu-hua, et al. Ray-tracking of multibeam echosounder system based on equivalent sound velocity profile method[J]. Hydrographic Surveying and Charting, 2004, 24(6): 27-29.

- [11] 孙文川, 肖付民, 金绍华, 等. 多波束回波强度数据记录方式比较[J]. 海洋测绘, 2011, 31(6): 35-38.
SUN Wenchuan, XIAO Fumin, JIN Shaohua, et al. Comparison of the methods of multibeam echo intensity data recording[J]. Hydrographic Surveying and Charting, 2011, 31(6): 35-38.
- [12] ANDERSON J T. Acoustic seabed classification of marine physical and biological landscapes[R]. Denmark: International Council for the Exploration of the Sea (ICES) (1017-6195), 2007.94-113.
- [13] 刘晓, 李海森, 周天, 等. 基于多子阵检测法的多波束海底成像技术[J]. 哈尔滨工程大学学报, 2012, 33(2): 1-6.
LIU Xiao, LI Haisen, ZHOU Tian, et al. Multibeam seafloor imaging technology based on the multiple sub-array detection method[J]. Journal of Harbin Engineering University, 2012, 33(2): 1-6.
- [14] LI Haisen, XU Chao, ZHOU Tian. High-resolution integrated detection of underwater topography and geomorphology based on multibeam interferometric echo sounder[C]// Germany: Advances in Hydrology and Hydraulic Engineering, Trans Tech Publications, 2012, 212-213: 345-350.
- [15] 陶春辉, 金翔龙, 许枫, 等. 海底声学底质分类技术的研究现状与前景[J]. 东海海洋, 2004(3): 28-33.
TAO Chunhui, JIN Xianglong, XU Feng, et al. The prospect of seabed classification technology[J]. Donghai Marine Science, 2004(3): 28-33.
- [16] ROBERTS H H, SHEDD W, HUNT J. Dive sitegeology: DSV ALVIN (2006) and ROV JASON II (2007) dives to the middle-lower continental slope, northern Gulf of Mexico[J]. Deep-Sea Research II: Topical Studies in Oceanography (0967-0645), 2010, 57: 1837-1858.
- [17] Norway Kongsberg Company. Kongsberg Company official network[EB/OL]. 2012/2013. www.Kongsberg.com.
- [18] LI Haisen, YAO Bin, ZHOU Tian, et al. Shallow Water High Resolution Multi-Beam Echo Sounder[C]// KOBE: MTS/IEEE OCEANS 2008, 2008. 1051-1055.
- [19] 胡青, 郑震宇, 裘洪儿. 一种浅水多波束声纳 U 型发射阵实现方法[P]. 中国: CN102176007A, 2011.
HU Qing, ZHENG Zhenyu, QIU Hong'er. A method of shallow water multibeam sonar U-emission array[P]. China: CN102176007A, 2011.
- [20] 苏程. 深水多波束测深侧扫声纳显控系统研究[D]. 杭州: 浙江大学, 2012. 5-10.
SU Cheng. Research on display and control system for deep water multi-beam bathymetric sidescan sonar[D]. Hangzhou: Zhe Jiang University, 2012. 5-10.
- [21] STEFAN K. The new Atlas Fansweep 30 Coastal: a tool for efficient and reliable hydrographic survey[C]// Germany: OMAE2006(0-7918-4746-2), 2006, 1-5.
- [22] 周天, 李海森, 么彬, 等. 具有超宽覆盖指向性的多线阵组合声基阵[P]. 中国: CN101149434A, 2008.
ZHOU Tian, LI Haisen, YAO Bin, et al. A multi-linear array associated acoustic array with superwider-coverage directivity[P]. China: CN101149434A, 2008.
- [23] LURTON X. Precision analysis of bathymetry measurements using phase difference[C]// United States: Oceans Conference(IEEE), 1998. 1131-1134.
- [24] LURTON X. Swath bathymetry using phase difference: theoretical analysis of acoustical measurement precision[J]. IEEE Journal of Ocean Engineering (0364-9059), 2000, 25(3): 351-363.
- [25] YANG L, TAXT T, TORFINN T. Multibeam Sonar Bottom Detection Using Multiple Subarrays[C]// United States: Oceans Conference (IEEE), 1997. 932-938.
- [26] 周天, 朱志德, 李海森, 等. 多子阵幅度一相位联合检测法在多波束测深系统中的应用[J]. 海洋测绘, 2004, 24(4): 7-10.
ZHOU Tian, ZHU Zhide, LI Haisen, et al. The application of multi-subarray amplitude-phase united detection method in multi-beam bathymetry system[J]. Hydrographic Surveying and Charting, 2004, 24(4): 7-10.
- [27] LLORT-PUJOL G, SINTES C, LURTON X. Improving spatial resolution of interferometric bathymetry in multibeam echosounders[J]. J. Acoust. Soc. Am., 2008, 123(5): 3952-3952.
- [28] LLORT-PUJOL G, SINTES C, CHONAVEL T, et al. Advanced interferometric techniques for high-Resolution bathymetry[J]. Marine Technology Society Journal, 2012, 46(2): 9-31.
- [29] LLORT-PUJOL G, SINTES C, LURTON X. High-resolution interferometry for multibeam echosounders[C]// Europe: Oceans 2005 (IEEE), 2005. 345-349.
- [30] 张毅乐. 多波束相干测深技术研究及其算法 DSP 实现[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工程大学, 2010. 18-39.
ZHANG Yile. Research of Multibeam Interferometric Bathymetry Technology and Its Algorithm Implementation on DSP[D]. Harbin: Harbin Engineering University, 2010. 18-39.
- [31] YAO Bin, ZHANG Yile, LI Haisen, et al. Estimation of multibeam phase difference using variable bandwidth filter[C]// China: 2010 IEEE International Conference on Information and Automation, 2010. 1177-1181.
- [32] 李海森, 魏玉阔, 周天, 等. 一种基于可变带宽滤波器的多波束测深数据处理方法[P]. 中国: CN102353957A, 2012.
LI Haisen, WEI Yukuo, ZHOU Tian, et al. A kind processing method of multibeam bathymetric data based on variable bandwidth filter[P]. China: CN102353957A, 2012.
- [33] 李海森, 李珊, 周天, 等. 多波束回波信号可变带宽滤波算法及其 FPGA 实现[J]. 电子与信息学报, 2011, 33(10): 2396-2401.
LI Haisen, LI Shan, ZHOU Tian, et al. Variable bandwidth filtering algorithm for multi-beam seafloor echo and its implementation on FPGA[J]. Journal of Electronics & Information Technology, 2011, 33(10): 2396-2401.
- [34] ZHANG Yile, LI Haisen, ZHOU Tian, et al. An Improved Method for Unwrapping Phase Difference in Bathymetry[C]// China: 2010 IEEE International Conference on Information and Automation, 2010. 1071-1075.
- [35] 周天, 李珊, 李海森, 等. 多子阵对相干算法在高分辨率多波束测深系统中的应用研究[J]. 通信学报, 2010, 31(8): 39-44.
ZHOU Tian, LI Shan, LI Hai-sen, et al. Research on the multiple subarray-pairs interferometric algorithm used in high resolution multibeam bathymetric system[J]. Journal on Communications, 2010, 31(8): 39-44.
- [36] 周天, 李海森, 么彬, 等. 高分辨多波束海底地形探测的 MSB-RMU 算法研究[J]. 电子与信息学报, 2010, 32(7): 1644-1648.
ZHOU Tian, LI Haisen, YAO Bin, et al. Research on MSB-RMU Algorithm on High Resolution Multibeam Detection of Seafloor Bathymetry[J]. Journal of Electronics & Information Technology, 2010, 32(7): 1644-1648.
- [37] 陆丹. 基于联合不确定度的多波束测深估计及海底地形成图技术[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工程大学, 2012. 34-68.
LU Dan. Combined uncertainty multibeam bathymetry estimation and seafloor terrain mapping technique[D]. Harbin: Harbin Engineering University, 2012. 34-68.
- [38] BEAUDOIN J, CALDER B, HIEBERT J, et al. Estimation of sounding uncertainty from measurements of water mass variability[J]. International Hydrographic Review, 2009: 20-38.
- [39] CALDER B. On the uncertainty of archive hydrographic data sets[J]. IEEE Journal of Oceanic Engineering, 2006, 31(2): 249-265.
- [40] LI Haisen, YAO Bin, WENG Ningning, et al. Performance Analysis and Application of Posteriori Lattice-Ladder Algorithm Based On Givens Rotation[C]// Chian: ICSP 2008, 2008. 2563-2566.

- [41] 魏玉阔, 翁宁宁, 李海森, 等. 利用 RLS-Laguerre 格型算法消除多波束测深声呐的隧道效应[J]. 哈尔滨工程大学学报, 2010, 31(5): 547-552.
WEI Yukuo, WENG Ningning, LI Haisen, et al. Eliminating the tunnel effect in multi-beam bathymetry sonar by using the recursive least square-Laguerre lattice algorithm[J]. Journal of Harbin Engineering University, 2010, 31(5): 547-552.
- [42] CHEN Baowei, LI Haisen, WEI Yukuo, et al. Tunnel effect elimination in multi-beam bathymetry sonar based on apFFT algorithm[C]// China: ICSP2010, 2010. 2391-2394.
- [43] BEAUDOIN J. D, CLARKE J. E. H, BARTLETT J. E. Application of surface sound speed measurements in post-processing for multi-sector multibeam echosounders[J]. International Hydrographic Review(0020-6946), 2004, 5(3): 17-32.
- [44] 丁继胜. 多波束声纳测深系统的声线弯曲及其校正技术[D]. 青岛: 国家海洋局第一海洋研究所, 2004. 1-20.
DING Jisheng. Ray bending and recalculation of multibeam echosounder system[D]. Qingdao: First Institute of Oceanography, SOA, 2004. 1-20.
- [45] 朱小辰, 肖付民, 刘雁春, 等. 表层声速对多波束测深影响的研究[J]. 海洋测绘, 2007, 27(2): 23-25.
ZHU Xiaochen, XIAO Fumin, LIU Yanchun, et al. Research on the influence of surface sound velocity in multibeam echosounding[J]. Hydrographic Surveying and Charting, 2007, 27(2): 23-25.
- [46] YANG Fanlin, LI Jiabiao, WU Ziyin, et al. A Post-processing method for the removal of refraction artifacts in multibeam bathymetry data[J]. Marine Geodesy(0149-0419), 2007, 30(3): 235-247.
- [47] 赵君毅, 阳凡林, 刘智敏, 等. 多波束测深表层声速误差的动态影响及改正方法[J]. 测绘科学, 2010, 35(6): 23-25.
ZHAO Junyi, YANG Fanlin, LIU Zhimin. Dynamic influence and correction of inaccurate surface sound speed on multibeam bathymetry data[J]. Science of Surveying and Mapping, 2010, 35(6): 23-25.
- [48] CLARKE H J E, MAYER L A, WELLS D E. A New Tool for Investigating Seafloor Processes in the Coastal Zone and On the Continental Shelf[J]. Marine Geophysical Research, 1996(18): 607-629.
- [49] KAMMERER E. A New Method for the Removal of Refraction Artifacts in Multibeam Echosounder Systems[D]. Canada: University of New Brunswick, 2000. 35-60.
- [50] PARNUM I M. Benthic habitat mapping using multibeam sonar system[D]. Australia: Curtin University of Technology, 2007. 32-46.
- [51] DEKEYZER R T, BYRNE J S, CASE J D, et al. A comparison of acoustic imagery of sea floor features using a towed side scan sonar and a multibeam echosounder[C]// United States: MTS/IEEE OCEANS 2002. 1203-1211.
- [52] LOCKHART D, SAADE E, WILSON J, et al. New developments in multi-beam backscatter data collection and processing[J]. Marine Technology Society Journal, 2001, 35(4): 46-50.
- [53] LE BAS T P, HUVENNE V A I. Acquisition and processing of backscatter data for habitat mapping -comparison of multibeam and sidescan systems[J]. Applied Acoustics, 2009, 70: 1248-1257.
- [54] 吕海龙, 杜德文, 刘焱光, 等. 多波束回声数据的统计与底质分类应用[J]. 海洋科学进展, 2006, 24(4): 463-470.
LÚ Hailong, DU Dewen, LIU Yanguang, et al. Statistics of multibeam echo sounder data and their application to bottom sediment classification[J]. Advances in Marine Science, 2006, 24(4): 463-470.
- [55] SIMONS D G, SNELLEN M. A bayesian approach to seafloor classification using multi-Beam echo-sounder backscatter data[J]. Applied Acoustics, 2009, 70: 1258-1268.
- [56] ZHOU Xinghua. An approach to seafloor classification using fuzzy neural networks combined with a genetic algorithm[D]. Hong Kong: The Hong Kong Polytechnic University, SOA, 2005. 22-45.
- [57] 唐秋华. 多波束海底底质分类研究[D]. 青岛: 国家海洋局第一海洋研究所, 2003. 35-54.
TANG Qiuhua. Seafloor classification using multibeam sonar data[D]. Qingdao: First Institute of Oceanography, SOA, 2003. 35-54.

• 简 讯 •

《声学技术》网站正式开通运行

《声学技术》网站已经正式开通运行, 网址为: <http://sxjs.cnjournals.cn/ch/index.aspx>, 网站运行环境推荐使用 Internet Explorer 8.0 浏览器, 欢迎广大作者、读者在线投稿、阅读。

《声学技术》编辑部