

纪念《声学技术》创刊 30 周年特邀文章——

掩埋小目标声探测技术研究

陈晓鹏, 周利生

(杭州应用声学研究所声纳技术国家级重点实验室, 杭州 310012)

摘要: 探测和识别沉底、掩埋水雷等小目标在军事上显得愈来愈迫切。在介绍掩埋小目标探测声纳现状的基础上, 剖析了掩埋小目标声探测的技术难点, 总结了小目标声探测技术的发展趋势, 主要包括探测频率向低频发展, 重点发展合成孔径探测技术, 积极探索时反探测和 MIMO 探测方法, 小目标识别技术向联合利用图像特征和散射特征的方向发展等, 对沉底/掩埋小目标声探测技术研究及其声纳设计有借鉴指导意义。

关键字: 掩埋目标; 声探测; 合成孔径; 时反处理

中图分类号: TB556

文献标识码: A

文章编号: 1000-3630(2012)-01-0030-06

DOI 编码: 10.3969/j.issn1000-3630.2012.01.004

Review of current status of buried-object detection techniques

CHEN Xiao-peng, ZHOU Li-sheng

(Hangzhou Applied Acoustics Research Institute, National Key Laboratory of Science and Technology on Sonar, Hangzhou 310012, China)

Abstract: Detection and recognition of small objects, such as bottom-mine and buried-mine etc., becomes imminently and imminently in military application. Following an introduction of state-of-the-arts of small buried-objects detection, the paper intensively analyzes the technical difficulties of small buried-object detection and summarizes the developing trends of buried object detection by using acoustic techniques, which included: lowering the operation frequency, developing detection techniques of SAS (Synthesized Aperture Sonar), exploring time-reversal and MIMO detection methods, recognizing small-object jointly using image and scattering signatures, and so on. These are significant guiding technical research and relevant sonar design on small-object detection.

Key words: buried objects; sound detection; Synthesized Aperture Sonar(SAS); time-reversal processing

0 引言

近年来, 高新技术在水雷武器中的应用, 使得现代水雷隐蔽性更强、智能化程度更高、威胁更大。如, 1991 年的伊拉克海湾战争中, 美舰“普林斯顿”号导弹巡洋舰被水雷重创, 被引爆的水雷为意大利生产的 MN103 曼塔水雷, 该雷体具有隐形和低剖面特性, 布放后易被泥沙或海生物覆盖, 使得现有传统的高频声纳和旁扫声纳难以发现。

多年来, 各国积极探索对中小目标探测识别的新技术途径, 如美国诺·格公司研发的机载激光探雷系统, 通过蓝绿激光可探测、识别和定位漂雷或接近水面的锚雷, 但对超过一定深度的水下小目标, 却因其固有机理限制而难以实现。由于声波在水中的传播性能明显优于光波和无线电波, 到目前为止, 对中小目标探测基本上都是以声学手段为主。尽管世界各国历来都高度重视沉底和掩埋小目

标的探测和识别技术研究, 已装备的小目标探测声纳也有很多, 但仍十分缺乏能够有效探测和辨别掩埋小目标的声纳。对水中掩埋小目标的探测、识别一直是水声界的难题。现役的小目标探测声纳多数采用了高频窄带信号以得到高分辨力的目标成像, 用阴影法实现对沉底目标的探测, 但在几百米的距离上基本不具有对沉底/掩埋小目标的探测和识别能力。

可见, 掩埋小目标的探测和识别至今仍然是一个世界性的难题。面对这一难题, 各国投入了大量的人力物力进行理论和实验研究, 并取得了丰富成果。本文主要剖析了掩埋小目标声探测的技术难点, 总结了小目标声探测技术的发展趋势, 对掩埋小目标声探测技术研究及其声纳设计希望有借鉴和指导意义。

1 掩埋目标声探测面临的技术难点

掩埋小目标声探测面临的技术难点主要包括目标的有效照射和有效接收问题、海底界面的强混响背景和混响背景非高斯问题、小目标散射特性的

收稿日期: 2011-09-15; 修回日期: 2011-11-16

作者简介: 陈晓鹏(1963—), 男, 江苏宜兴人, 博士研究生, 研究方向为水声工程。

通讯作者: 周利生, E-mail: lszhou@163.com

空间不均匀性问题等。

1.1 目标的有效照射和有效接收问题

掩埋小目标是静止的,没有运动信息和辐射声信息可以利用,必须要发射声信号进行有效照射,才能激励它产生目标回波。众所周知,对于平坦海底,当声波掠射角小于临界角时就会产生全反射,声波无法穿透到海底沉积层中,也就照射不到目标,无法产生目标回波。即便声波以高于临界掠射角照射,由于入射声波穿透海底界面导致的能量损失、声波在沉积层中传播引起的强衰减、沉积层与弹性目标体相互间的声波耦合效应、目标散射声波由沉积层中的地声向水声传递存在较大能量损失等诸多因素的制约,使得在水中接收到的掩埋目标散射回波强度会大幅度衰减,目标回波信号微弱,衰减达几十分贝,导致掩埋小目标的检测与识别十分困难。

对掩埋小目标的有效照射和有效接收是实现探测的首要问题。目前,针对这一问题,重点利用低频声波穿透海底能力强的特性,提出了低频小目标探测的概念,并大力开展沉积层附近的低频声透射和声散射理论和建模研究;为了有效照射目标,提出了时反声纳概念;为了能够有效接收小目标回波信号,提出了沉积层声纳概念等等。

1.2 海底界面的强混响和非高斯混响问题

沉底和掩埋小目标通常位于海底界面附近,对沉底/掩埋小目标的探测面临着复杂的界面和传播介质环境:起伏不平整的海底界面,组成成分十分复杂的松散沉积物,空间非均匀的海底浅层。因此,声纳系统始终接收到由海底界面和沉积物非均匀声波散射形成的强混响干扰,成为制约小目标探测性能提高的重要问题。

为了抑制混响,通常采用窄波束发射及提高空间分辨力的处理方法。随着声纳分辨力的提高,探测的分辨单元会随之减小,接收的混响强度会降低,但这往往又导致了混响概率密度函数偏离高斯分布,呈现出较强的非高斯性,使得常规探测方法的性能严重下降。

为解决这一问题,水声专家进行了大量的理论仿真和海上实验研究,正在重点发展基于主动合成孔径成像声纳的小目标探测技术研究及其产品开发,以同时提高对小目标的空间分辨力和对界面混响的抑制性能,提高信混比和检测概率。

1.3 目标散射的空间不均匀性问题

水雷等小目标的外形结构往往是不对称的,例如意大利的曼塔水雷为平台形状、美国的 MK46 水

雷为圆柱形、瑞典的 Rockan 水雷为类似长方体形等,这就使得这些小目标的散射强度随入射方位角的变化而变化,表现出较强的空间不均匀性。BOSS 掩埋物探测实验系统是由美国大西洋大学与 Orincon 等公司联合开发的,具有 4~8 cm 的空间分辨力,可穿透 2m 海底。该声纳于 2001 年 4 月进行了实验研究,实验区域水深为 2.4~4 m,共对 11 个球或圆柱形的沉底/掩埋目标进行了探测实验,实验结果表明:入射方位角的小范围变化也会导致掩埋圆柱形目标回波强度的较大起伏,组合采用不同入射方位角的多个成像结果才能有效地检测目标;较好地验证了掩埋目标散射特性是空间不均匀的,具有强的空间方向性。

目标散射特性的这种空间不均匀性,会降低对小目标探测概率和探测连续性,增大了探测难度。针对这一问题,正在探索基于多发多收(MIMO)的声纳探测技术。

2 掩埋小目标声探测技术的发展趋势

2.1 掩埋小目标声探测技术的发展日益重视沉积层声学研究

沉底/掩埋目标的声探测技术一方面是以沉积声学(Sediment acoustics)理论为基础,另一方面也推动了沉积层声学的基础理论研究和模型验证工作。随着探测频段的降低,可使入射声波更好地穿透沉积层和弹性掩埋目标,为检测和识别提供有效的目标散射特征信息。但要利用好目标的低频散射特性,就必须更好地理解 and 掌握低频信号透射到海底沉积层的机理,以及目标(沉底、半掩埋、掩埋)的反向或前向散射特征与规律。

2.1.1 低频声透射机理研究

当声波以低于临界掠射角(简称次临界角)照射到平海底界面时,声波应当以相同的掠射角产生前向全反射,不再有能量透射进入沉积层。但是多次实验研究发现,在次临界角照射情况下仍有较大能量的声波透射进入沉积层^[1,2]。

为此,水声专家提出了海底粗糙度理论^[3]、Biot 慢纵波理论^[4]等多种理论来解释次临界角下的声透射机理。目前的研究结果主要包括:(1)在孔隙介质中不仅存在快纵波和横波,还存在慢纵波,由于慢纵波声速小于快纵波声速,由此可以解释次临界角入射时声波透射硬海底的能量异常现象;(2)次临界角入射时低频(5~7 kHz)声透射主要由侧面波(Lateral wave)引起,而高频声透射主要由界面粗糙

引起。(3) 粗糙界面以及沉积物的体积非均匀形成的声波散射也是解释次临界角入射时声波透射机理的物理基础之一。可见, 由慢纵波、侧面波、粗糙界面以及沉积物非均匀引起的声透射或散射机理还没有定论, 未来还将需要深入研究海底界面的低频声透射机理, 为沉底/掩埋目标探测提供理论和模型支持。

2.1.2 沉积层低频声散射机理研究

海底通常覆盖着由水饱和填充的未固结的沙、泥等固体颗粒组成的沉积物, 在这种复杂的孔隙弹性介质中声波的传播性质与流体或固体中的传播性质有很大不同。大量实验研究以直接或间接的方式证实了海底沉积物的一个显著特点是声速频散特性, 也就是声速及其衰减与频率有关。这种声速频散特性可由 Biot 孔隙介质理论^[5-7]及其改进模型(如 Biot-Stoll 模型、BICSQS 模型、Buckingham 模型和等效密度流体模型等)给以部分解释。沉积层声传播机理的理论和实验研究表明, 孔隙弹性介质沉积物模型基本符合实验测量结果, 这些模型都可以预测出频率约在两个数量级范围内(例如, 对中粒度沙质沉积物约在 100 Hz~10 kHz)的声速频散规律, 从低频经过某一过渡频率到高频声速逐渐增加, 变化幅度可以达到 10%; 宽带声速具有明显的频散特性, 而衰减随频率的变化不满足通常所用的线性关系假设。

2.1.3 沉积层声学的实验研究

为进一步验证低频次临界角声透射机理、沉积层声传播机理以及探测海底掩埋目标的可行性, 美国和欧盟在墨西哥湾东北海域组织了两次大型沉积层声学实验(SAX): SAX99 和 SAX04, 集中研究成果发表在 IEEE Journal of Oceanic Engineering 的 2001 年 Vol.26(1)、2002 年 Vol.27(3)、2008 年 Vol.33(4)和 2009 年 Vol.34(4)等专集中。这些研究表明: (1) 海底剖面仪和侧扫声纳等常规声纳只能在大掠射角(乃至垂直入射)时通过高频成像的方法实现掩埋目标的探测。(2) 面对浅海及近岸海域海底掩埋目标, 要在安全距离进行探测, 这些传统声纳和探测方法已不能满足实际需求, 需要发展次临界角下工作的低频宽带探测技术, 以提高探测距离和分辨力。(3) 与高频入射声波相比, 低频声波能够透射海底更深, 并且受海底小尺度起伏的影响较小, 从而可增加信混比, 提高探测性能。

2.2 掩埋小目标声探测的工作频率向低频发展

常规的小目标探测声纳往往工作在数百千赫范

围, 例如直升机吊放式小目标探测声纳(AN/AQS-14、AN/AQS-20c 和 AN/AQS-20X 等)的检测和识别频率大致在 100kHz 和 400kHz, 对于悬浮小目标的检测距离和识别距离分别为 400~500m、200~300m。由于高频声波在海底沉积层中会快速衰减, 使得这些常规声纳难以检测和识别掩埋小目标。为了解决这一问题, 现在的研究重点开始向低频和宽带信号(如 40kHz 以下)方向转移。低频能够穿透海底沉积层, 沉积层对声波的衰减影响随之减小, 保证了能够有效照射和接收到目标散射回波; 而利用宽带信号可以弥补空间分辨力的不足, 又可为探测和识别提供丰富的目标散射特征信息。

文献[8]介绍的掩埋小目标探测声纳的工作频段下降至 20~40 kHz 范围, 并以高于临界掠射角照射目标, 可以有效地探测掩埋目标, 甚至深掩埋目标, 但其最大的缺点是声纳覆盖范围小。为增大覆盖范围和提高分辨力, 人们把中心频率降至 20kHz 以下^[9-11], 并广泛采用大带宽信号(例如 2~20kHz 的宽带信号^[9])。Maguer^[9]等人的研究表明, 如果进一步降低掠射角, 工作频段有望降低到 0.5~3kHz, 但在这种情况下只能探测到掩埋较浅的目标。

参量阵声纳是一种典型的低频小目标探测声纳, 其优点是能够利用小尺寸基阵实现低频窄波束, 提高声纳抗混响的能力; 同时能够实现低频宽带发射, 提高声纳检测能力。基于参量阵声纳的上述优点, 国内外很多单位^[12,13]都在积极探索利用参量阵声纳来探测沉底和掩埋小目标。例如, 在文献[9]和[13]的实验研究中都使用 TOPAS 参量阵声纳, 它由 24 条发射换能器组成, 原频 40 kHz 的声源级为 243 dB, 差频 1~10kHz 的声源级为 190~213 dB; 采用电子可控波束(在 $\pm 40^\circ$ 内可选), 具体的工作参数如表 1 所示。法国大西洋水下研究部门利用该参量阵声纳进行了掩埋小目标的探测试验, 试验选用了 8 kHz Ricker 波, 试验结果表明能够有效探测到掩埋深度为 40cm 的水雷目标。

2.3 重点发展基于声学成像技术的掩埋小目标探测方法

不论是海底剖面仪、侧扫声纳等常规小目标探测声纳, 还是参量阵声纳、合成孔径声纳、时反探测方法等, 对掩埋小目标的探测都是利用声学成像技术来实现的。但是沉底/掩埋小目标探测声纳的使用平台往往是 AUV、UUV、USV 等水下航行器, 限制了接收阵孔径。常规波束形成的束宽近似与波长和接收阵孔径的倒数成比例, 在小孔径低频情况下, 意味着束宽大、分辨率低, 限制了信混比的提

表 1 TOPAS 参量阵声纳的工作参数
Table 1 Parameters of TOPAS parametric array sonar

发射脉冲	束宽 HF/LF (-3dB)	带宽 LF(-3dB)	LF SL (dB/1uPa)	HF SL (dB/1uPa)
Ricker 10kHz	2.1°/3.5°	6kHz	208.6	241.5
Ricker 8kHz	2.2°/3.5°	7kHz	210.1	242.3
Ricker 5kHz	2.2°/3.5°	6kHz	212.4	244.9

高,这就要求在接收处理中采用具有良好空时聚焦能力和混响干扰抑制能力的处理方法。

目前,主动合成孔径成像处理被广泛地用于提高目标聚焦和混响抑制能力^[9,12-13],其分辨率与作用距离和工作频率(在一定条件下)无关,可对远距离目标实现高分辨率成像,是探测沉底/掩埋目标的重要发展方向。合成孔径通过利用运动平台的动态信息来合成大的虚拟孔径,以提高空间分辨力,这对实际物理孔径的要求大为下降。例如,工作频率为 20 kHz 的合成孔径声纳只需要 30 cm 长的阵列,便可在 4 kn 速度条件下,对 50 m 距离上的掩埋目标提供 15 cm 分辨力;而如果采用实际孔径要达到相同性能,则接收阵需要一个由约 200 个换能器组成的 30m 长阵列。Pipe^[14]、Johson^[15]对 SAX04 合成孔径声纳(5~35 kHz)的数据分析表明,对掩埋的填充硅油的 36 cm 不锈钢钢球目标在高于或低于临界掠射角情况下,合成孔径处理都获得了 20 dB 以上的处理增益;多途传播条件下的海底混响概率密度函数偏离通常假设的高斯分布,导致传统检测方法的性能下降,在通过合成孔径增强回波信号的同时还应抑制非高斯混响。

目前,在很多小目标探测声纳系统中,主动合成孔径成像处理往往与其它方法组合使用。典型的组合方法有:合成孔径处理与参量阵相结合、合成孔径处理与地层剖面测量技术相结合等探测方式。

2.3.1 合成孔径处理与参量阵相结合

北约 SACLANT 水下研究中心与麻省理工学院在 1998 年的合作实验中,采用 TOPAS 参量阵发射频段为 2~16 kHz 的信号,采用 12 m 线阵或 10 m×1.4m 的平面阵接收,进行了两维合成孔径成像,实现了对掩埋水雷(MP80)的检测。文献[16, 17]也采用了 TOPAS 参量阵发射,并采用 UUV 上长 0.7 m 的 8 元水平阵接收差频(低频 2~5 kHz)反向或前向散射信号,再进行合成孔径处理。实验区域水深 14m,砂底,对三个半掩埋、平掩埋和掩埋 1 m 深的直径 1 m 的球壳目标进行探测,探测结果如图 1 所示。实验结果表明:以次临界角 18.7°照射,合成孔径方

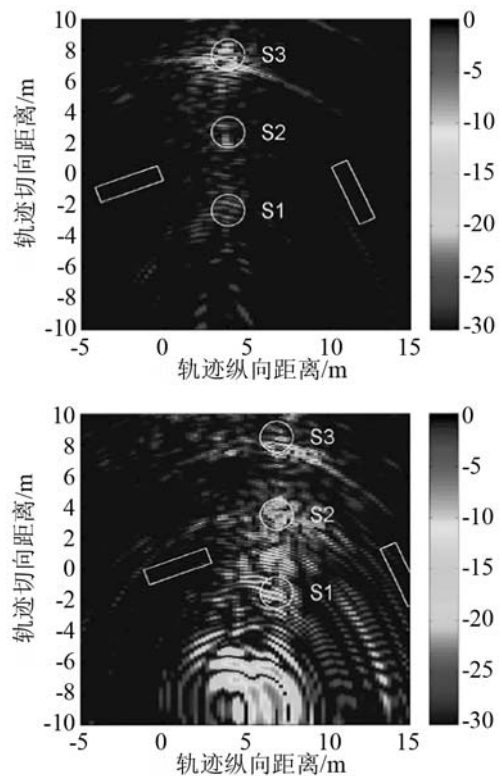


图 1 对沉底和掩埋目标的合成孔径成像结果
Fig.1 SAS images of bottom-objects and buried-objects

法可探测半掩埋目标(S3)和平掩埋目标(S2);以高于临界角 24.4°和 30.5°照射目标,合成孔径方法可探测平掩埋目标(S2)和深掩埋目标(S1)。

2.3.2 合成孔径处理与地层剖面测量技术相结合

德国水声和地球物理研究所开发的 SEFAS 和 EXSESO 探测系统基本上属于地层剖面测量与合成孔径相结合的,采用垂直入射海底为主要技术特征的探测方法。SEFAS 声纳系统采用一个 1 m×0.5 m 孔径的声基阵,在发射和接收方式下以 3°为中心形成 30 个 3°×6°的波束,将声能聚焦在海底上,使穿透海底的能力达到 5m。由于 SEFAS 采用了合成孔径技术,具有比海底剖面仪高得多的分辨力。

EXSESO 系统的发射阵与接收阵都是平面相控阵,安装在同一平台上。发射信号为中心频率是 10 kHz 或 20kHz 的 PCW 信号,信号带宽都为 5 kHz,垂直发射束宽都为 30°,水平发射束宽分别为 30°和 15°。接收阵的水平束宽和垂直束宽相同,在工作频率 20 kHz 和 10 kHz 时的束宽分别为 3°和 6°,波束形成可在 20°(水平)×50°(垂直)范围内扫描。EXSESO 采用合成孔径处理来增强分辨力,并与安装在同一个平台上的侧扫声纳进行数据融合处理。

EXSESO 在波罗的海进行了对球、柱、操雷等目标在不同掩埋深度(平掩埋、浅掩埋、深掩埋)下的探测试验研究,海深为 30m,海底沉积层为砂地

或淤泥，实验船在离目标 10m 远处直线航行。试验结果如图 2、3 所示，对软淤泥中掩埋的多数目标(图 3)都可以检测；而对细砂中掩埋的目标难以直接利用实孔径阵检测，利用合成孔径则可以检测到部分目标。

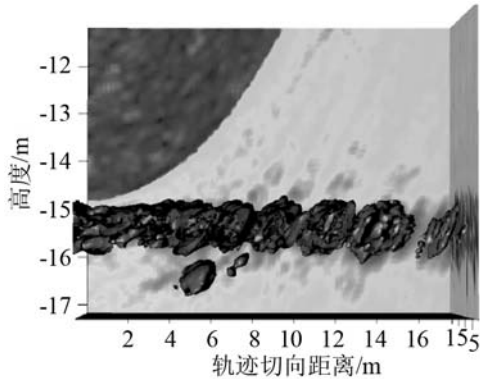


图 2 EXSESO 试验系统的显示画面
Fig.2 Graphic display of EXSESO system

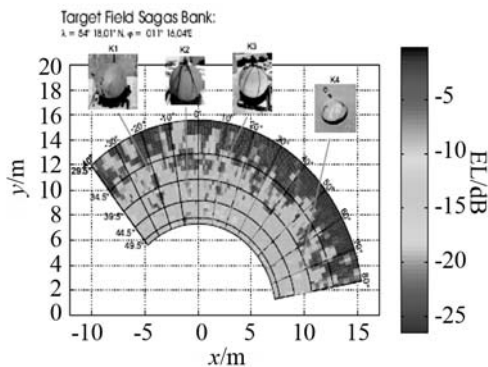


图 3 对掩埋目标的探测结果
Fig.3 Detection result of buried objects

杭州应用声学研究所把多波束地层剖面仪技术与合成孔径技术相结合，通过对地层高分辨力三维成像来探测掩埋目标，该掩埋目标探测声纳在走航过程中，通过垂直向下发射低频宽带声波来实时测量和绘制两侧三维海底地形地貌和地层分层结构的声学成图，通过图像处理来识别掩埋目标。图 4 给出了该声纳对掩埋沉船探测的海试结果，其中沉船长度 6~7m，驾驶室顶棚高度 3m，最大掩埋深度 4m，该沉船原型照片如图 5 所示。

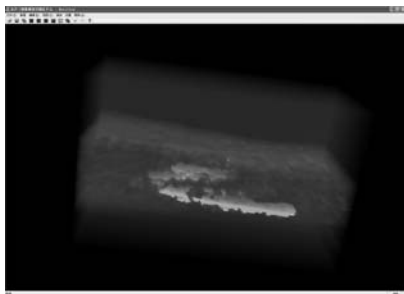


图 4 对掩埋沉船探测的三维成像海试结果
Fig.4 3D sonar image of buried-ship from sea trial



图 5 被探测沉船的原型照片
Fig.5 Photo of the ship before sinking

2.4 积极探索基于时反、多发多收(MIMO)的小目标探测方法

2.4.1 基于时反的小目标探测方法

时反探测技术利用波动方程的时反不变性和声波的互易性原理，具有在目标位置处的空-时聚焦能力以及在强混响处的零化能力，可大幅度提高信混比。美国 Kuperman 教授的研究小组利用 32 元物理时反阵(工作频率为 3.5~4 kHz)在海深 120m 的浅海环境下进行了时反探测的实验研究，结果表明，声波在两种不同声阻抗的介质上仍具有空-时聚焦特性，能够穿越流体-固体界面，时反技术可用于掩埋目标探测。

Sabra^[18]通过海上实验验证了利用人工时反技术探测沉底/掩埋目标的可行性，采用了 28 元的平板型声源-接收阵(SRA)，其水平波束束宽约为 16°，垂直束宽约 2.9°。实验表明，通过人工时反和多次迭代处理，可对较大范围的海底进行聚焦成像，并能够清晰地直接分辨出浅掩埋目标，而对深掩埋目标需要利用先进的分类算法进行确认，输出信混比提高了约 6dB。

时反技术是一种环境自适应的探测新方法，有望将海底变为“声透明”。虽然今天的时反技术发展还未能达到这样的水平，但的确给掩埋小目标探测提供了一条有效途径。

2.4.2 基于 MIMO 的小目标探测方法

与传统的单发单收 SISO 探测系统不同，多发多收(MIMO)探测系统利用多个充分分开排列的发射阵元同时发射彼此不相干的正交信号，从不同入射角度“照亮”目标，在接收端则利用不相干的回波信号对目标进行检测与定位。研究表明，在频率选择性信道或目标散射具有较强空间不均匀性等复杂条件下，MIMO 技术能够利用空间分集特性提高探测能力，有望获得较传统方法更好的性能。

2001 年 4 月，利用 BOSS 系统探测沉底/掩埋目标的实验研究表明，掩埋目标的散射特性具有较强的空间不均匀性，显示出采用 MIMO 技术较传统技术具有潜在优势，是探测掩埋目标的重要途径。

2.5 小目标识别技术向联合利用图像特征和散射特征的方向发展

声波经由透射到散射再透射的过程不仅导致掩埋目标的回波能量十分微弱,而且使得掩埋目标的声特征与水中目标相比会有较大差别,这不仅增大了目标检测的难度,而且使目标识别的任务十分艰巨。

传统的小目标探测声纳常采用图像阴影法进行目标识别。由于目标图像主要反映了目标的形状特征,无法反映目标材质、结构等重要信息,因此很难识别小目标属性,即很难从目标图像中判别是水雷目标还是形状与水雷相似的石质物体。基于目标散射特征的识别技术主要利用目标散射回波的时间域和频率域统计特性、目标散射的方位关系、目标弹性波的色散特性等特征进行识别,可反映目标材质与结构等物理特性。可见,基于图像特征的识别方法与基于散射特征的识别方法具有较强的互补性,通过两种方法的联合利用,将有效提高识别性能。

Stemlicht 等人^[19]利用 BOSS 系统的输出数据,联合利用海底图像和宽带回波信号特征进行了掩埋目标的识别研究,从厘米级分辨力的海底图像中提取出目标大小、目标轮廓形状、声阴影区的几何结构等空间特征;从单个波束输出的宽带目标回波序列中提取出在时间-频率联合域中具有较强可分性的散射特征;最后将图像特征识别结果与宽带信号分类结果进行融合处理,使得最终的分类正确率达到了 91%。Maguer^[9]联合利用掩埋目标散射特征模型和图像进行识别,通过对多方位入射产生的目标回波信号进行综合分析,提取出目标反射层析图像、弹性目标回波的共振响应特征及其与方位和频率的变化关系,用来判别人造目标和天然目标,并成功地识别了沉底的 MP80 操雷。

3 结 语

目前,对沉底/掩埋小目标的探测仍然是一项难题,作为最主要手段的声学探测技术及其相关的声学基础问题研究受到了越来越多的重视,正在世界范围内如火如荼地进行,表现出探测频率向低频发展、重点发展合成孔径探测技术、积极探索时反探测和 MIMO 探测方法、日益重视联合利用图像特征和散射特征的识别技术等发展趋势。除了声探测方

法外,沉底/掩埋目标的探测也可采用非声探测方法,研究基于声/光/磁相结合的探测和识别技术也是一个重要的发展方向,并得到了广泛研究。

参 考 文 献

- [1] Lopes J L. Observations of anomalous acoustic penetration into sediment at shallow grazing angles[J]. Journal of the Acoustic Society of America, 1996, **99**(4): 2473-2500.
- [2] Chotiros N P, Mautner A M, Bergem O. Acoustic penetration of a silty sand sediment in the 1-10kHz band[J]. IEEE Journal of Oceanic Engineering, 1997, **22**(4): 604-615.
- [3] Thorsos E I, et al. Modeling of subcritical penetration into sediments due to interface roughness[C]// High Frequency Acoustics in Shallow Water (N. G. Pace, et al., Eds), SACLANTCEN CP-45, 563-569, NATO, SACLANT Undersea Research Centre, 1997.
- [4] Jensen F N, Schmidt H. Subcritical penetration of narrow Gaussian beams into sediment[J]. Journal of the Acoustical Society of America, 1987, **82**: 574-579.
- [5] Biot M A. Theory of propagation of elastic waves in a fluid-saturated porous solid. I. Low-frequency range[J]. Journal of the Acoustical Society of America, 1956, **28**(2): 168-178.
- [6] Biot M A. Theory of propagation of elastic waves in a fluid-saturated porous solid. II. Higher frequency range[J]. Journal of the Acoustical Society of America, 1956, **28**(2): 179-191.
- [7] Chotiros N P. Biot model of sound penetration in water saturated sand[J]. Journal of the Acoustical Society of America, 1995, **97**(1): 199-214.
- [8] Clem T R, Lopes J L. Progress in the development of buried mine hunting systems[C]// CA, USA, Proceedings, San Diego, oceans 2003: 500-511.
- [9] Maguer A, Fox W L J, Zerr B, et al. Buried mine detection and classification (Research Summary 1996-1999)[C] // SACLANTCEN, SR 315, La Spezia, Italy, SACLANTCEN Undersea Research Centre, 2000.
- [10] Peine H, Brecht D. Detection of objects in the seafloor[C]// Oceans, Europe, 2005(1): 177-181.
- [11] Schock S G, Tellier A, Wulf J. Buried Object Scanning Sonar[J]. IEEE Journal of Oceanic Engineering, 2001, **26**(10): 677-689.
- [12] Fioravanti S, Maguer A. A Synthetic aperture parametric sonar for detection of buried objects[C]// UDT, UK, 1996, 198-201.
- [13] Marc A. Pinto, et al. Real and synthetic-array signal processing of buried targets[J]. IEEE Journal of Oceanic Engineering, 2002, **27**(3): 484-494.
- [14] Pipe J E, Lim R. Buried sphere detection using a synthetic aperture sonar[J]. IEEE Journal of Oceanic Engineering, 2009, **34**(4): 485-494.
- [15] Johnson S F, Lyons A P, Abraham D A. The impact of multipath on high-resolution SAS image statistics[J]. IEEE Journal of Oceanic Engineering, 2009, **34**(4): 476-494.
- [16] Waters Z J, Dzikowicz B R. Sensing a buried resonant object by single-channel time reversal[J]. IEEE Trans. On Ultrasonics, Ferroelectrics and Frequency Control, 2009, **56**(7): 1429-1411.
- [17] Sternlicht D D, Lemonds D W. Detection and classification of buried objects with an adaptive acoustic mine-hunting system[C]// Oceans MTS/IEEE, 2001, 1: 212-219.
- [18] Schmidt H. Bistatic scattering from buried targets in shallow water[C]// Oceans MTS/IEEE, 2000, 1-12.
- [19] Schmidt H, Leonard J, Edwards J R, Liu T C. Sub-Seabed Mapping Using AUV-Based Multi-Static Acoustic Sensing and Adaptive Control[C]// Oceans MTS/IEEE, 2004, 1-12.