

蛙人探测声纳技术研究进展

蒋立军, 杨娟, 许枫*

中国科学院声学研究所, 北京 100190

* 联系人, E-mail: xf@mail.ioa.ac.cn

2008-11-06 收稿, 2009-01-16 接受

摘要 蛙人探测声纳是近年来兴起的新型水下小目标探测设备, 可以针对蛙人、蛙人运载器及机器人等小目标进行探测. 由于探测对象与以往的舰船、鱼/水雷有所不同, 系统设计和跟踪识别技术有很大差异. 本文针对蛙人探测声纳研制的关键问题进行讨论, 介绍了该项技术的研究进展.

关键词

蛙人探测声纳

抗混响

目标识别

过去, 海上探测和防御的对象主要是舰船和潜艇等大型目标. 近年来随着科学技术的发展, 恐怖主义袭击开始具有鲜明的“非对称性”特点. 利用蛙人、蛙人运载器、水下机器人等小型武器, 就可以造成巨大的生命和财产损失. 随着水下武器装备小型化的发展和世界恐怖主义威胁的日趋紧张, 防御小目标入侵问题已经凸显出来, 针对小目标的探测技术也得到快速发展.

目前, 各国投入大量的力量研究针对蛙人、水下机器人等小目标探测专用的声纳技术^[1]. 加拿大国防部、英国国防部、美国海军和海岸警卫队以及NATO等机构资助并展开了一系列的研究计划和实验. NATO Undersea Research Center (NURC)于2006年4月组织了港口防御(NATO-HOP06)大型海上实验, 分别针对携带开式、闭式呼吸器的蛙人进行探测. 加拿大国防部的Defence R&D Canada-Atlantic的Maritime Force Protection (MFP)计划, 已于2006年12月至2007年3月专门针对各种类型蛙人及小型目标进行了浅海实验^[2].

国内相关单位也已开展了蛙人探测声纳的相关研究工作, 首先开展蛙人探测声纳研制的是中国科学院声学研究所, 并突破了国外技术封锁, 成功研制了全部自主知识产权的蛙人探测声纳, 该系统在北京奥运会的水下安保中得到了成功应用.

1 概述

蛙人探测声纳是以小目标为探测对象的高分辨

率图像声纳, 工作频率越高, 系统方位分辨率越高, 对目标的描述就越细致, 有利于对小目标的探测和识别. 然而, 由于水下声传播的弛豫效应等影响, 水下声吸收正比于信号频率, 频率越高, 作用距离越近. 而蛙人探测声纳用于水下反恐安保, 要求有尽量远的作用距离, 以达到较长的预警时间. 因此, 蛙人探测声纳的设计主要受到分辨率和作用距离的制约.

蛙人目标不同于水雷、舰船等现有声纳设备针对的目标, 其目标散射特性在不同频率时具有不同的特点. 国外研究机构已经进行了一系列相关研究, 文献[3]构建了蛙人散射模型, 仿真分析目标强度. 文献[4]通过水池实验, 测量了不同频率蛙人携带氧气瓶的目标强度, 从实验结果可以看出, 在20 kHz以上, 目标强度较大. 文献[5]给出了100 kHz时蛙人目标散射回波强度的海上测量结果, 闭式呼吸器蛙人目标强度仅有-20~-25 dB, 开式呼吸器蛙人呼出气泡的目标强度约为-15 dB.

此外, 蛙人探测声纳频带的选取还要考虑到环境噪声的影响. 根据文献[6]的海洋环境噪声谱分析可以看出, 在500 Hz~50 kHz之间的频带, 是具有-5~-6 dB/倍频程(-17 dB/十倍频程)的Knudsen谱(下降谱). 噪声的来源是距测量点不远的海面. 而在110 kHz以上频带, 主要是海水分子运动产生的热噪声, 这一频带的特征谱是有6 dB/倍频程的正斜率(上升谱). 在三级海况下, 海洋环境噪声谱的最低点在100 kHz. 表1给出了

国外主要蛙人探测声纳产品系统设计参数.

表 1 国外蛙人探测声纳主要参数

产品型号	中心频率/kHz	带宽/kHz	信号体制
加拿大 C-Tech 公司的 CSDS-85 型	80	3	CW
英国 Sonardyne 公司的 Sentinel 系统	70	20	CW, FM
以色列的 DSIT 公司的 DDS	60	5	CW, FM
挪威 Kongsberg 公司的 SM2000/9000/9001 系列	90	不详	CW, FM

国外蛙人探测声纳的中心频率主要集中在 60~100 kHz, 带宽 3~20 kHz, 其中挪威 Kongsberg 公司的 SM2000 系列产品已经装备美国海军和海岸警卫队, 9000 系列是针对 SM2000 系列产品的改进系列, 其中心频率为 90 kHz. 其他大部分蛙人探测声纳的中心频率都在 100 kHz 左右.

我们实验室在现有的高频声纳研制成熟技术基础上, 选取系统中心频率为 100 kHz, 带宽 10 kHz 研制了蛙人探测声纳, 是目前国内唯一的数字多波束蛙人探测声纳.

2 抗混响技术

由于蛙人回波强度较小, 提高蛙人探测声纳作用距离的关键就是如何提高信混比. 从两个方面考虑来减小混响影响, 一是从信号形式、系统设计角度进行考虑, 另外是从信号处理方面, 在输入信混比一定的情况下, 尽量抑制混响, 来提高输出信噪比.

首先, 从信号形式、系统设计角度来考虑抗混响的措施. 过去, 蛙人探测声纳都是采用 CW 信号, 为了抗混响, 改善信噪比, 进一步采用了宽带信号. C-Tech 公司产品仅具有窄带 CW 信号体制, 而 Sonardyne, DSIT 以及 Kongsberg 公司产品都具有 CW 和 FM 双信号体制. CW 脉冲的脉冲宽度决定了距离分辨率, 为了保证距离分辨率, 不能够发射太长的 CW 脉冲. 而宽带信号距离分辨率由带宽决定, 所以可以发射长脉冲, 来改善信噪比, 从而在不减小距离分辨率的基础上探测更远距离的目标.

我们实验室研制的蛙人探测声纳不仅具有 CW 脉冲体制, 还有 LFM、伪随机编码以及双曲调频等几种信号体制. 双曲调频信号由于具有比 LFM 信号更好的多普勒容限, 因此回波的稳定性大大提高. 宽带信号和窄带信号相比具有更好的抗混响白化作用, 并且由于宽带信号利用了宽带波束形成和脉冲压缩, 从而具有比窄带信号更好的方位和距离分辨力.

图 1 给出了在青岛奥帆基地同一极浅海域中, 同一时间对水下机器人的探测结果, 水下机器人的尺寸为 65 cm×37 cm×26 cm. 图 1(a)~(c)分别为 CW 信号、LFM 宽带信号、双曲调频信号的探测结果. 从图中比较可以看出, 宽带信号对体混响等随机混响具有更好的抑制效果, 并且混响尺度也可以更为精确地估计, 从而使得与目标尺寸相当的混响体数目明显减小, 具有更好的探测效果. 此外, 由于水声信道是一个梳状滤波器, 是频率选择性衰落信道. 因此, 窄带信号的目标回波即便在目标强度足够的情况下, 能量也会出现较大的起伏, 而宽带信号的稳定性则明显优于窄带信号.

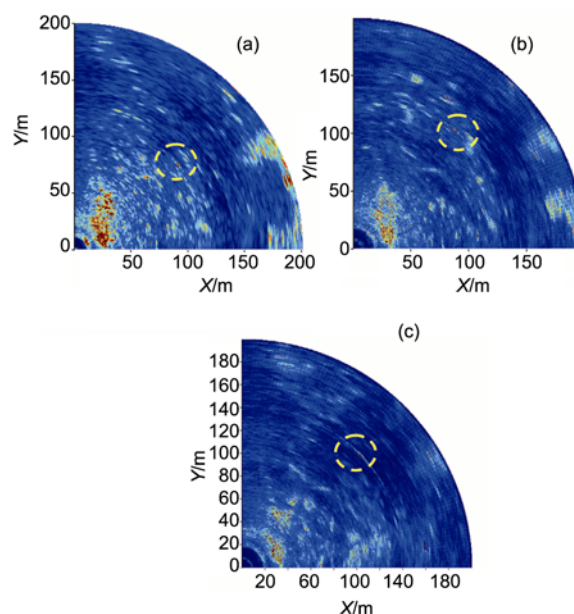


图 1 不同信号体制的蛙人探测声纳声图 (青岛极浅海实验结果)

(a) CW 信号; (b) 宽带 LFM 信号; (c) 双曲调频信号

其次, 为了更有效地对小目标进行探测, 还需要在信号处理上采用一系列的方法来进行背景平稳化. 为了减小近距离盲区范围, 增大远端探测距离, 扩大有效的自动探测和跟踪范围, 需要采取一系列的技术来进行处理, 包括自动图像配准、动静目标的分离等. 在对图像位置进行精确修正后, 就可以进一步对运动目标进行分析. 我们采用动静目标分离算法, 也就是利用连续帧图像信息, 把原始图像信息分离为运动目标和静态目标图像. 然后再通过一系列手段进行图像处理, 完成动目标的提取和检测. 图 2 给出

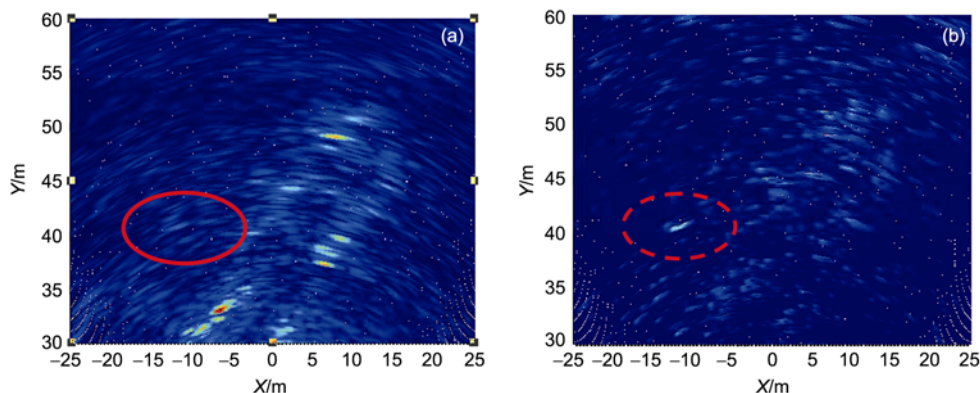


图2 强混响下的运动小目标探测

(a) 原始图像; (b) 处理后图像

了原始图像和经过处理后的图像。

图2探测的目标是微型水下机器人,而且动力推进螺旋桨已经关闭,实验过程中通过电缆将机器人从100 m的距离处拖曳到岸边。此时,机器人目标强度中几乎没有气泡的贡献。图2(a)原始图像的中部及右侧“倒U字形”部分是海底岩石群,水下机器人目标从远端运动至岩石群的左侧。图中虚线包围的部分,是目标应该出现的区域。受到海底岩石群较强的底混响影响,仅依靠单帧信息,机器人目标已无法探测。图2(b)给出了经过上述一系列算法的处理结果,从图中可以看出,机器人目标可检测性明显提高。通过处理,扩大了小目标的有效探测范围。

3 目标自动跟踪和识别技术

目标自动跟踪和识别是蛙人探测声纳技术发展的关键点和难点。目前,各国的蛙人探测声纳都具有一定的自动跟踪和识别能力,可以在操作者干预和最终决定的情况下,提供自动目标分类,不仅可以目标与噪声和鱼等区分开来,还可进一步分离目标类型(表面游泳者、闭式呼吸器的潜水者、开式呼吸器的潜水者、蛙人运载器、表面船等)。

关于蛙人目标的自动跟踪和识别的相关算法研究的文献并不多见,因此,我们实验室在目标自动跟踪和识别技术上进行了大量研究,目前已经能够对舰船与蛙人这类特征明显的目标进行跟踪和分类。对于水面舰船目标,由于在接收信号频段内,每个时刻都可以收到舰船辐射的连续谱噪声^[2],因此,可利用这一特征来识别水面船目标。当探测并跟踪水面船目标时,系统将不发出警报,避免了水面目标引起

系统的误报警。但是对于蛙人、机器人等特征相近的目标,还需要在操作者干预的情况下来进行分离。

蛙人和机器人在回波上利用亮点模型来区分比较困难,为了提高识别概率,提出了利用运动的不同点来进行识别。图3给出了蛙人跟踪结果。可以看出蛙人在水下运动的特征是方向变化比较多,这是由于水下能见度影响蛙人方向感,并且在水下有较大压力使得移动困难所造成的。而小型水下机器人由于推进系统简单且具有计算机导航装置,一般按照规划路径运动,方向的变化平缓,所以运动轨迹较为平滑。利用这一信息来提取特征量,采用聚类分析的方法^[8],来对运动目标进行分类。分类结果如图4所示。

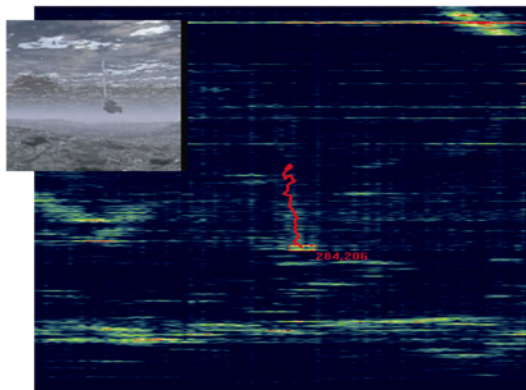


图3 蛙人跟踪

4 总结

针对蛙人等小目标的水下探测和防御,是国内重要海滨设施水下安保急需解决的重要问题。国外相关机构针对近海小目标防御技术发展,展开了大量的研究和实验,国内蛙人探测技术虽然开展时间不长,但也已经取得了很大的进展。蛙人探测声纳研

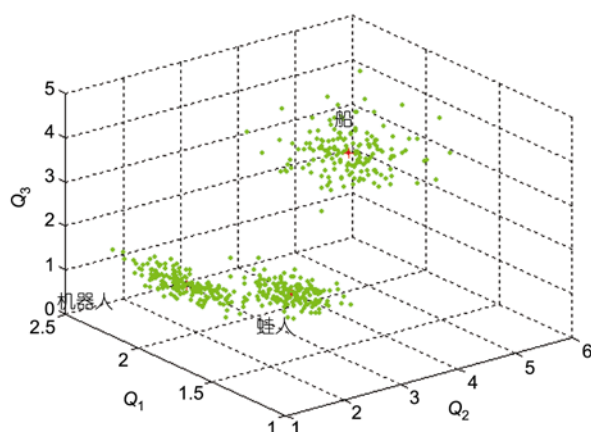


图 4 分类识别结果

制的关键技术是信混比的提高和小目标自动跟踪识别问题。为了提高信混比，我们采用不同的信号体制，改善了混响背景，增加了回波稳定性。并且采取一系列图像处理手段，来白化混响背景。根据舰船目标与蛙人/机器人目标的不同回波特征，对不同目标类型进行区分。利用蛙人/机器人的运动方式不同，人机结合对目标分类。

尽管如此，蛙人探测声纳的改进仍有较多技术问题需要解决。关键技术主要是如何进一步提高信混比，在较高的目标分辨率条件下得到较远的探测距离，以满足水下安保需求。目前，国外已经开始研究如何使蛙人探测声纳向低频、宽带、大垂直束宽的声纳系统^[9]发展，以适于浅海小目标探测和跟踪。

参考文献

- 1 Colin M G E D, Beerens S P, Ainslie M A. Optimum sonar frequency for diver detection in harbors. In: International Conference on Detection and Classification of Underwater Targets 2007. Proceedings of the Institute of Acoustics, 2007, 29: 213—220
- 2 Crawford A M, Vance C D. Observations from demonstrations of several commercial diver detection sonar systems. Oceans 2007, 1—3
- 3 Sarangapani S, Miller J H, Potty G R, et al. Measurements and modeling of the target strength of diver. Oceans 2005, 952—956
- 4 Houston B H, Carin L. Harbor Threat Detection, Classification, and Identification. Naval Research Laboratory. Award number: N0001407WX20775
- 5 Hollett R D, Kessel R T, Pinto M. At-Sea Measurements of Diver Target Strengths at 100 kHz: Measurement Technique and First Results. ADA454750, UDT Europe 2006
- 6 Urlick R J. Principles of Underwater Sound. Reprint edition. Los Altos, CA: Peninsula Pub, 1996
- 7 Lo K W, Ferguson B G. Automatic detection and tracking of a small surface watercraft in shallow water using a high-frequency active sonar. IEEE Trans Aerosp Electr Syst, 2004, 40(4): 1377—1388^[DOI]
- 8 Duda R O, Hart P E, Stork D G. Pattern Classification. 2nd ed. New York: John Wiley & Sons Inc, 2001
- 9 Lovik A, Bakken A R, Skogmo R, et al. A theoretical and experimental study on the performance of a wideband ASW sonar in littoral waters. UDT Europe 2007

Technological progress of diver detection sonar

JIANG LiJun, YANG Juan & XU Feng

Institute of Acoustics, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100190, China

Diver detection sonar is a new type of underwater target detection equipment for small targets, such as divers, diver delivery vehicles and underwater robots. Because the detection objects are not ships, torpedoes and mines but much smaller ones, the system design and tracking/identification technology are different. This paper discusses the key issues in developing diver detection sonar and introduces the latest technological progress.

diver detection sonar, anti-reverberation, target identification