

被动声呐信号检测技术发展

张晓勇, 罗来源

(西南电子通信技术研究所, 四川成都 610041)

摘要: 水声信号检测是被动声呐系统进行目标探测所需的重要支撑技术, 信号检测的性能直接影响到被动声呐系统对目标探测的能力。对被动声呐信号检测技术的研究情况进行了梳理, 将其归纳为基于时域信息的信号检测技术和基于空域信息的信号检测技术两大类。在分析现有技术不足和应用需求的基础上, 指出弱信号、低虚警率和有效利用水声传播信息等是被动声呐信号检测技术可能的发展方向。

关键词: 被动声呐; 信号检测; 发展趋势;

中图分类号: TN929.3

文献标识码: A

文章编号: 1000-3630(2014)-06-0559-05

DOI 编码: 10.3969/j.issn1000-3630.2014.06.016

Recent development of passive sonar signal detection

ZHANG Xiao-yong, LUO Lai-yuan

(Southwest Electronics and Telecommunication Technology Research Institute, Chengdu 610041, Sichuan, China)

Abstract: Underwater signal detection is the important supporting technology for passive sonar system to monitor targets, and the performance of signal detection directly affects the target detection capability of passive sonar system. This paper sort out the main techniques and achievements of passive sonar signal detection, which could be classified into two categories: the temporal information based signal detection technique and the spatial information based signal detection technique. Through the analyses of the existing problems and the application requirements, the potential developing direction of passive sonar signal detection is pointed out, that is, weak signal detection, false alarm probability reduction, and effective use of underwater acoustic propagation information in signal detection.

Key words: passive sonar; signal detection; development trend

0 引言

被动声呐具有隐蔽性高、探测距离远等优点, 是对各类舰船目标进行水声探测的主要手段之一。被动声呐系统的主要任务是通过探测舰船目标的水声信号, 识别和测向定位等处理, 获取舰船目标的存在性、方位、属性、运动态势等信息。

被动声呐系统直接采集得到的时域信息包含舰船目标辐射声信号(由船只的机械噪声、螺旋桨噪声和水动力噪声共同组成)、水声通信信号、主动水声探测信号、海洋生物叫声、地震、水下爆破等产生的瞬态信号和因刮风、降雨等引起的环境噪声等。多数情况下系统关注的是舰船辐射声信号, 其它信号则作为噪声和干扰来处理。此外, 对直接采集的信号经计算得到的方位历程图(Bearing-Time Record, BTR), 也是进行水声目标探测的重要依据,

反映了目标和环境的空域信息。

在被动声呐信号处理流程中, 目标信号检测通常位于前端, 是目标识别分类和定位的前提。经过半个多世纪的发展, 被动声呐信号检测技术从最初的仅依靠模拟的限幅相关检测^[1]的方法发展到综合应用 LOFAR 谱分析、DEMON 谱分析等数字信号处理方法, 取得了较多的研究成果, 尤其是小波分析、混沌检测等新理论和新方法的应用给被动声呐信号检测技术注入了新的活力。

目前, 被动声呐信号存在性检测主要分为两种思路: 一种是基于时域信息的检测技术, 它处理的是系统直接采集的时间采样序列, 主要应用于复杂噪声条件下的特定水声信号的检测, 通常通过各种变换处理提取特征参数进行检测; 另一种是基于空域信息的检测技术, 它处理的是系统在所有方向上不同时间内接收到的声强信息, 主要应用于噪声和干扰具有空域分布不均衡性情况下的信号检测, 通常先要对整个空间内的环境噪声门限进行估计, 再通过门限比较实现对信号的存在性检测。

基于空域信息的检测技术与系统前端结合紧密, 技术理论成熟, 在实际工程中得到了较为广泛

收稿日期: 2013-09-10; 修回日期: 2013-12-23

作者简介: 张晓勇(1982-), 男, 江苏海安人, 博士, 研究方向为水声信号处理技术。

通讯作者: 张晓勇, E-mail: tianzxy@126.com

的应用；而基于时域信息的检测技术利用水声信号本身的更多信息，对于处理微弱目标以及复杂环境条件下的检测问题有优势，是目前的研究热点。

1 基于时域信息的检测技术

1.1 线谱检测技术

在基于时域信息的检测技术中，针对信号中含有的线谱分量进行检测的技术占据着重要的地位，它通常的处理方法是对信号时间序列使用周期图法计算功率谱，再通过检测功率谱中的谱值实现对信号存在性的判断。根据检测过程中所需要的观测次数的多少，这类检测方法还可以分为利用单次观测的功率谱值的实时检测法和利用多次观测数据的推迟决策法^[2]。

实时检测法直接利用单次功率谱计算结果检测线谱，具有实现简单、快速的优点。2008年李启虎等^[3,4]针对舰船辐射噪声中单频分量的检测问题，探讨了自相关检测、FFT分析、自适应线谱增强等几种低信噪比条件下检测信号的不同理论方法，指出分段的FFT检测具有明显的优势，且对频率漂移现象有较好的宽容性。实时检测法在高信噪比时可以同时保证高检测概率和较低的虚警概率，但随着信噪比的降低，虚警变得越来越严重，影响了实际的可应用性。

推迟决策法利用连续的多次观测的功率谱组成LOFAR谱图，线谱对应的频率位置会形成清晰的亮线即谱线，而信号检测问题也就转变成了对谱线的检测和提取问题，常用的图像检测和跟踪的方法都可以得到应用^[2,5]。推迟决策法利用了多次观测的信息，即使部分观测的信号信噪比较低也能够获得较好的检测结果，缺点在于处理相对较为复杂。

1.2 其它检测技术

虽然多数情况下舰船辐射声信号中均含有线谱分量，但不含线谱分量的情况也是广泛存在的，在这种情况下，基于线谱这种相对稳定特征的检测方法都失去了应用基础。

对于不含线谱分量的舰船辐射声信号，检测的思路和方法千差万别。2002年余秋星等^[6]介绍了过零点分布、峰间幅值分布和波长差分布等可用于信号检测和识别的时域波形结构特征，这些特征的计算简单、意义明确，但是易受到噪声的影响，取值的稳定性较差。2008年柳革命等^[7]将语音信号处理中的倒谱分析应用于提取舰船辐射声信号的特征，分别对比了线性预测倒谱方法和Mel倒谱方法提取

的特征用于区分三类典型目标时的性能。倒谱特征本质上反映的还是信号的时域特征，因此，低信噪比条件下的应用问题仍需进行研究。2010年王红萍等^[8]将混沌理论的基本思想应用于水声信号检测，提出一种基于混沌预测的水声信号检测模型，根据混沌系统的动力学特性，给出了对应于这种检测模型的检验准则，仿真试验取得了较好的结果。基于预测的方法需要积累一定长度的信号用于预测器的训练，并且检测器的结构相对复杂，不利于工程实施。2007年胡桥等^[9]通过对水声信号进行经验模式分解，提取信号的本征模式分量并转化为能量特征向量，计算得到经验模式能量熵，与门限比较从而实现水声目标的检测。基于信号分解的检测算法将信号投影到不同的观测尺度上进行分析，可以得到舰船辐射声信号的不同细节，但这种方法在低信噪比条件下的表现并不突出。

类似的，这类检测技术也可以分为实时检测法和推迟决策法两种，波形结构检测、倒谱检测、混沌检测、信号分解检测等多数检测技术都属于实时检测法，而推迟决策法较为典型的是预测检测技术。预测检测将待检测的时间序列看作为一个特定系统的输出，使用某种模型来模拟该系统，通过历史数据对系统进行训练，再将模拟出的输出结果与实际观测到的结果进行比对，根据误差的大小来判别检测对象是否出现。

此外，学者们还对水下瞬变信号的检测问题做了较多研究^[10-13]。1991年Marple L.等^[14]将水声瞬变信号建模为阻尼的复指数信号的叠加，应用奇异值分解降低高斯白噪声的影响，根据能量进行信号检测。1999年吴国清等^[15]通过对海上记录的几十条水声目标噪声短时谱图的分布形态进行分析，采用谱相关技术检测水声瞬态信号，仿真实验对18个实际瞬态信号进行实验，结果表明近80%的实际信号使用谱相关检测比使用常规功率谱检测有3~6 dB的增益。2006年Chaillan F.等^[16]对鲸鱼叫声采用随机匹配滤波器进行检测，仿真结果表明当信噪比大于-8 dB时可以正确检测。2008年韩建辉等^[17]提出一种水声瞬态信号检测方法，该方法先通过小波去噪，去除信号中的随机频谱成分，再利用Page-Test检测器检测，可以在低信噪比条件下有效提取瞬态信号的起始位置。

2 基于空域信息的检测技术

基于空域信息的检测技术的信息来源是水声探

测系统根据阵列接收的信号计算得到的方位历程图,它反映了不同观测时刻、不同方位上接收到的声强情况。通常每次观测分别对方位强度信号(某次观测探测系统接收到的各个方位上的声信号强度序列)进行检测,判断舰船辐射声信号在各个方向上的存在性,再根据多次观测的结果进行判定以增加检测的准确性。由于目标辐射声信号的具体形式是不可确知的,因而不能用匹配滤波的方式实现最佳检测;同样,鉴于海洋环境噪声在空域分布上的不平衡性,根据假定的噪声分布进行信号检测很难获得较好的效果。

基于空域信息的检测技术的基本实现思路是:根据系统接收的阵列数据计算得到方位历程图,对方位历程图进行预处理估计噪声门限,将各次观测的声强数据与噪声门限进行比较得到信号检测结果。目前,基于空域信息的检测技术的研究主要从三个方面展开:一是使用优化的波束形成技术,提高空域上对信号的分辨能力;二是采用更为合理的方位历程图生成方法,提高对信号的凸显能力;三是研究更为有效的噪声门限估计技术,提高对信号的检测能力。其中,前两个方面都是研究如何更好地产生方位历程图的方法,而后一个方面则是与信号检测能力关联最为紧密的部分,也是研究的热点。

2.1 优化的波束形成技术

波束形成是水声阵列测向的基本方法,通过对探测系统直接采集后的时间序列进行计算获得探测范围内各个方位上的声信号频率与强度的对应关系,是生成方位历程图的基础。波束形成可以通过较高分辨率的方位估计实现对信号的测向,同时通过阵列处理获得抗噪声和干扰的空间增益。最基本的波束形成技术是常规波束形成(Conventional Beamforming, CBF),采用固定的加权方法进行空间信号的合成,这种方法实现简单、性能稳定但精度较低。为了获得更高的角度分辨力,发展了多种高分辨的方位估计方法,如线性预测算法、子空间算法等。除此之外,为了尽可能降低噪声和干扰对信号方位估计的影响,各种自适应波束形成算法应运而生^[18],如最小均方算法、递归最小二乘算法等,实现压低旁瓣或对强干扰方向陷波等。这些方位估计的优化技术相继应用于被动声呐系统,以获得更易分辨的方位历程图。

2.2 方位历程图生成技术

对于每次观测得到的波束形成结果,需要应用方位历程图生成方法,将频率信息进行综合得到方位与声强相关的方位强度信号,再由多次观测的方

位强度信号按照时间先后顺序排列为方位历程图。最为简单的方位历程图生成方法是直接频率累加法,它将某个方位所有频率对应的声强直接求和作为该方位上的总声强。这种方法忽略了舰船辐射声信号能量在频率上分布较为集中而噪声的能量分布较为分散的特点,容易造成信号的遗漏。2003年杨晨辉^[19]等介绍了子带峰值能量检测(Subband Peak Energy Detection, SPED)在水声信号检测中的应用,并提出了波束域宽带峰值能量检测算法,具有提高方位历程图显示清晰度的作用。2005年郑援等^[20]使用图像处理的方法对方位历程图进行处理,通过图像降噪、亮点提取、历程扩展、非目标历程剔除等四个步骤实现了对多目标方位历程的自动提取。2011年蒋小勇等^[21]提出了一种将导向最小方差(Steered Minimum Variance, STMV)的宽带自适应波束形成与SPED结合的宽带检测新方法,海试数据测试结果表明,该方法的性能优于基于常规波束形成的SPED方法。

2.3 自适应噪声门限估计技术

自适应噪声门限估计已经广泛应用于频域谱分析、弱信号检测、方向性数据的空域滤波等方面,其基本思想是:按照设计准则自动地对有限窗长内的待处理数据进行挑选和计算,使得待处理数据中代表噪声的取值较小的数据低于计算得到的噪声门限,而其中代表信号的取值较大的数据高于计算得到的噪声门限,从而达到有效抑制噪声、提高信号检测能力的目的。2000年李启虎等^[22]将中值滤波和排序截断平均(Order Truncate Average, OTA)相结合,利用可变长的窗口匹配不同主瓣宽度的波束图,对模拟的拖曳式声呐阵列数据进行处理,正确地显示了目标方位轨迹。2002年Suojoki T等^[23]使用图像处理的方法对于二维声呐图像进行噪声归一化及目标检测,噪声归一化采用二维中值滤波器,二维窗口选择矩形窗或十字形窗,目标检测使用的是二元假设检验方法,通过归一化后的采样值与检测门限的比较实现检测。2009年陶剑锋等^[24]对增强方位历程图显示效果的峰值检出器、均值检出器、均值-峰值检出器、峰值-均值检出器、数据均匀缩减检出器、数据插值检出器等几种典型方法进行了对比分析,指出峰值检出器和自适应插值处理算法的性能在同类算法中比较有优势。2009年王晓宇等^[25]提出了一种新的差分邻域均衡算法实现对噪声背景的准确估计,该方法比OTA方法更易于工程实现。

2.4 与跟踪相结合的检测技术

除了上面提到的几个方面外,还有一些学者将

基于空域信息的信号检测问题与目标跟踪问题一起探讨。2000年 Shapo B.等^[26]针对方位历程图提出一种基于单元概率密度函数的目标检测/跟踪算法,分三步实现:第一步是预处理,用中值滤波器估计噪声水平和噪声功率标准差,并根据估计的信噪比进行归一化;第二步是检测,使用迭代 Bayes-Markov 算法找到关联性较强的区域,通过比较似然比与门限实现该次观测的信号检测;第三步是跟踪,使用最近邻法和滤波器进行轨迹平滑。2003年 Sonmez T.^[27]在其博士论文中研究了用于目标监视的多传感器的优化配置问题,以及被动声呐的纯方位目标跟踪问题,使用考虑了实际物理环境情况的改进概率数据关联方法生成目标方位轨迹。2011年 Chung Kil Woo^[28]在其博士论文中研究了浅海环境下的被动声呐潜水者检测问题,提出了一种多频带匹配滤波器方法,选择具有高信噪比的频带进行信号检测,并用 Hudson 河的实验数据验证了算法。

3 发展趋势

3.1 弱信号检测技术是研究重点

一方面,随着现代舰船自身辐射噪声谱级的大幅降低,被动声呐系统所接收到的水声信号的强度也相应降低;另一方面,实际应用要求被动声呐能够对更远距离的目标进行检测发现,这意味着对于同一个舰船目标,考虑到传播损失的影响,系统的检测门限需要降得更低。因此,对于弱信号的有效检测技术是被动声呐信号检测需要研究的一个重点问题。

3.2 低虚警检测是需要深入研究的问题

对于基于空域信息的信号检测技术,影响信号检测概率与虚警概率的主要技术是自适应噪声门限估计技术。海洋噪声的分布具有一定的空间指向性^[29],而这种噪声在空域上的不均衡分布并不能直接精确测定,因此,现有的自适应门限估计技术都是纯数据的处理方式,即不考虑噪声数据的概率分布特性而仅根据数据的取值情况估计噪声门限,这就导致不能通过噪声门限的设定来控制虚警概率(因为虚警概率与噪声门限之间没有直接的对应关系),使得基于空域信息的信号检测方法往往存在虚警概率较高的问题。而虚警概率的高低将直接影响被动声呐系统的实际可用性。因此,能够有效降低虚警概率的自适应噪声门限估计方法是需要进行深入研究的。

3.3 水声传播信息的利用是潜在的突破点

当水声传播使得声源信号发生扩展、延迟叠加等畸变时,舰船辐射声信号的特征可能发生改变,导致检测方法失效。此外,当接收到的信号极其微弱,超出了检测器的能力范围时,常规的检测方法已经不能实现对信号有效检测的要求。

海洋环境参数和水声传播信道响应可以通过主动探测的方式获得,有效利用这些水声传播信息为上述问题的解决带来了希望。匹配场处理技术和时间反转处理技术是对水声传播信息有效应用的典范,因此,通过对这类方法的研究,不仅可以去除水声传播对信号特性的影响,还可以通过阵列处理增益提高被动声呐对弱信号的检测能力,具有较好的应用前景。

参 考 文 献

- [1] Ide J M. Development of underwater acoustic arrays for passive detection of sound sources[C]// Proceedings of the IRE, 1959, 47(5): 864-866.
- [2] 陈敬军, 陆佳人. 被动声呐线谱检测技术综述[J]. 声学技术, 2004, 23(1): 57-60.
CHEN Jingjun, LU Jiren. A review of techniques for detection of line-spectrum in passive sonar[J]. Technical Acoustics. 2004, 23(1): 57-60.
- [3] 李启虎, 李敏, 杨秀庭. 水下目标辐射噪声中单频信号分量的检测: 理论分析[J]. 声学学报, 2008, 33(3): 193-196.
LI Qihu, LI Min, YANG Xiuting. The detection of single frequency component of underwater radiated of target: theoretical analysis[J]. Acta Acustica, 2008, 33(3): 193-196.
- [4] 李启虎, 李敏, 杨秀庭. 水下目标辐射噪声中单频信号分量的检测: 数值仿真[J]. 声学学报, 2008, 33(4): 289-293.
LI Qihu, LI Min, YANG Xiuting. The detection of single frequency component of underwater radiated of target: digital simulation[J]. Acta Acustica, 2008, 33(4): 289-293.
- [5] Lampert T A, Pears N E, O'Keefe S E M. A multi-scale piecewise-linear feature detector for spectrogram tracks[C]// Sixth IEEE International Conference on Advanced Video and Signal Based Surveillance, AVSS '09., 2009: 330-335.
- [6] 余秋星, 李志舜. 舰船辐射噪声的特征提取方法[J]. 鱼雷技术, 2002, 10(2): 10-12.
YU Qixing, LI Zhishun. Characteristics extraction methods of ship radiative noise[J]. Torpedo Technology. 2002, 10(2): 10-12.
- [7] 柳革命, 孙超, 杨益新. 两种倒谱特征提取技术在水声目标识别中的应用[J]. 西北工业大学学报, 2008, 26(3): 276-281.
LIU Geming, SUN Chao, YANG Yixin. Feature extraction of passive sonar target based on two cepstrums[J]. Journal of Northwestern Polytechnical University, 2008, 26(3): 276-281.
- [8] 王红萍, 王黎明, 方程亮. 混沌理论在水声信号检测中的应用研究[J]. 舰船电子工程, 2010, 30(7): 169-172.
WANG Hongping, WANG Liming, WAN Chengling. Application of chaotic detection technology to underwater acoustic signals[J]. Ship Electronic Engineering, 2010, 30(7): 169-172.
- [9] 胡桥, 郝保安, 吕林夏, 等. 经验模式能量熵在水声目标检测中的应用[J]. 声学技术, 2007, 26(5): 181-183.
HU Qiao, HAO Baoan, LV Linxia, et al. Application of empirical mode energy entropy to target-detection of underwater acoustic signals[J]. Technical Acoustics, 2007, 26(5): 181-183.

- [10] Mellinger D K. Handling time variability in bioacoustic transient detection[C]// OCEANS '93 Proceedings, 1993(3): 116-121.
- [11] Mellinger D K, Clark C W. A method for filtering bioacoustic transients by spectrogram image convolution[C]// OCEANS '93 Proceedings, 1993(3): 122-127.
- [12] Ravier P, Amblard P O. A transient detector based on Malvar wavelets[C]// OCEANS '96 Proceedings, 1996(2): 914-918.
- [13] Leung T S T, White P R. A fuzzy logic based underwater acoustic transient classifier[C]// 1996 IEEE Digital Signal Processing Workshop Proceedings, 1996: 494-497.
- [14] Marple L, Brotherton T. Detection and classification of short duration underwater acoustic signals by Prony's method[C]// 1991 International Conference on Acoustics, Speech, and Signal Processing, 1991(2): 1309-1312.
- [15] 吴国清, 陈永强, 李乐强, 等. 水声瞬态信号短时谱形态及谱相关法检测[J]. 声学学报, 2000, 25(6): 510-515.
WU Guoqing, CHEN Yongqiang, LI Leqiang, et al. The analysis of underwater transient signal and their detection by spectral correlation[J]. Acta Acustica, 2000, 25(6): 510-515.
- [16] Chaillan F, Courmontagne P. Detection of short signal in a noisy underwater environment[C]// OCEANS 2006-Asia Pacific, 2006: 1-7.
- [17] 韩建辉, 杨日杰, 王伟, 等. 基于小波变换的 Page-Test 水声瞬态信号检测[J]. 测试技术学报, 2008, 22(2): 160-165.
HAN Jianhui, YANG Rijie, WANG Wei, et al. Research on page-test underwater acoustic transient signal detection based on wavelet transform[J]. Journal of Test and Measurement Technology, 2008, 22(2): 160-165.
- [18] 关钦锦. 波束形成技术在水声定位中的应用[D]. 南京: 南京理工大学硕士学位论文, 2008.
GUAN Qinjin. Application of beamforming in underwater target positioning[D]. Nanjing: Master degree thesis of Nanjing University of Science and Technology, 2008.
- [19] 杨晨辉, 马远良, 杨益新. 峰值能量检测及其在被动声呐显示中的应用[J]. 应用声学, 2003, 22(5): 31-35.
YANG Chenhui, MA Yuanliang, YANG Yixin. Peak energy detection with application to passive sonar display[J]. Applied Acoustics, 2003, 22(5): 31-35.
- [20] 郑援, 胡成军, 李启虎, 等. 一种多目标方位历程实时提取方法[J]. 声学学报, 2005, 30(1): 83-88.
ZHENG Yuan, HU Chengjun, LI Qihu, et al. A method to extract multi-target's bearing time tracks on real time[J]. Acta Acustica, 2005, 30(1): 83-88.
- [21] 蒋小勇, 于李洋, 杜选民. 提高被动声呐宽带检测性能的一种新方法[J]. 声学技术, 2011, 30(6): 484-488.
JIANG Xiaoyong, YU Liyang, DU Xuanmin. A novel efficient technique to improve performance of passive sonar broadband detection[J]. Technical Acoustics, 2011, 30(6): 484-488.
- [22] 李启虎, 潘学宝, 尹力. 数字式声呐中一种新的背景均衡算法[J]. 声学学报, 2000, 25(1): 5-9.
LI Qihu, PAN Xuebao, YIN Li. A new algorithm of background equalization[J]. Acta Acoustica, 2000, 25(1): 5-9.
- [23] Suojoki T, Tabus I. A novel efficient normalization technique for sonar detection[C]// Proceedings of the 2002 International Symposium on Underwater Technology, 2002: 296-301.
- [24] 陶剑锋, 刘洪生. 声呐数据动态显示算法研究[J]. 声学与电子工程, 2009(4): 35-38.
TAO Jianfeng, LIU Hongsheng. Research on the algorithm of dynamic display of sonar data[J]. Acoustics and Electronics Engineering, 2009(4): 35-38.
- [25] 王晓宇, 杨益新. 一种新的宽带声呐波束域背景均衡方法[J]. 航海工程, 2009, 38(5): 181-185.
WANG Xiaoyu, YANG Yixin. A new background equalization algorithm in beamspace of broadband sonar[J]. Ship & Ocean Engineering, 2009, 38(5): 181-185.
- [26] Shapo B, Bethel R. A novel passive broadband Bayesian detector/tracker[C]// 2000 IEEE Sensor Array and Multichannel Signal Processing Workshop Proceedings, 2000: 92-96.
- [27] Sonmez T. Sensor scheduling, target detection and estimation in sonar applications[D]. Dissertation of Doctor degree of the Faculty of the Graduate School of the University of Maryland, USA, 2003.
- [28] Chung Kil Woo, Signal processing for passive detection and classification of underwater acoustic signals[D]. Dissertation of Doctor degree of the Faculty of the Stevens Institute of Technology, USA, 2011.
- [29] 顾金海, 叶学千. 水声学基础[M]. 北京: 国防工业出版社, 1981.
GU Jinhai, YE Xueqian. The basis of underwater acoustics[M]. Beijing: National Defence Industry Press, 1981.