

一种基于锚系垂直阵列的水下移动目标警戒方法

邓秀华¹, 刘飞², 梅新华³

- (1. 中国船舶重工集团有限公司第七一〇研究所, 湖北 宜昌 443000;
2. 重庆前卫科技集团有限公司, 重庆 401121;
3. 中船重工鹏力大气海洋信息系统有限公司, 江苏 南京 210000)

摘要 提出了一种基于锚系垂直阵列的对水下移动目标警戒的方法, 论述了基于锚系垂直阵列时频瞬态特性探测和空间相关性探测的原理。利用海洋环境与目标噪声在时-频域与空间上的差异, 对水下移动目标探测警戒, 探测概率高且计算相对简便。垂直阵列悬挂于锚系潜标的系留缆或直接作为潜标的系留缆, 布放机动灵活、适应水深范围广, 可用于对水下移动目标的长周期、定点、大范围实时监测。

关键词 垂直阵列; 水下移动目标; 时频瞬态特性探测; 空间相关性探测

中图分类号 TP715.9

文献标识码 A

文章编号 2096-575(2020)01-0076-06

DOI 10.19838/j.issn.2096-5753.2020.01.014

An Alert Method for Underwater Mobile Target Based on Moored Vertical Array

DENG Xiuhua¹, LIU Fei², MEI Xinhua³

(1 No.710 R&D Institute, CSIC, Yichang 443003, China;

2 Chongqing Qianwei Science&Technology Group Co., Ltd, Chongqing 401121, China;

3 CSIC PRiDe Atmospheric and Oceanic Information System Co., Ltd, Nanjing 210000, China)

Abstract This paper puts forward an alert method for underwater mobile target based on moored vertical array, and discusses its theories of time-frequency transient characteristics detection and spatial correlation detection. The underwater mobile vehicle is monitored by utilizing the time-frequency and spatial difference between ocean environment and target noise, and this method has high detection probability with simple calculations. The vertical arrays are hanged on mooring cables of moored submerged buoy or directly used as mooring cables, and they can be used for long period and wide range fix-point real-time monitor for underwater mobile target, because of its good tactical performance and adaptation to wide-range water depth.

Key words vertical array; underwater mobile target; time-frequency transient characteristics detection; spatial correlation detection

0 引言

潜艇、水下无人潜器等水下移动目标由于隐蔽性, 其携带的先进水下设备, 可对其他国家领海进行侦测和调查。各临海国家纷纷推出海洋发展战略和海洋科技发展规划, 大力发展对水下移动目标的探测警戒装备^[1]。

声波是目前唯一能在水下远距离传播的物理场信号, 声呐是利用水下声波判断海洋中目标是否存在及其类型与位置的设备, 在水下移动目标探测中具有独特的作用。水下移动目标辐射或反射的声波比较微弱, 且处于复杂的海洋环境背景下, 因此, 通过水声换能器组成阵列和阵列信号处理, 以提高目标信号检测概率。

从近海到深海, 海深变化大, 平均深度从几十米到数千米, 舰船拖曳声呐、布放于海底或海面的声呐面临的水声环境复杂, 使用维护成本较高。而锚系方式可适应大水深变化范围, 将声呐布设于任意深度。声呐水声环境较好, 布放迅速简单, 可长周期、定点、大范围监测水下移动目标^[2]。

本文提出了一种基于锚系垂直阵列的水下移动目标警戒方法, 接收水声换能器组成垂直接收阵列, 阵列悬挂于锚系潜标的系留缆或直接作为潜标的系留缆。系统全工作周期进行不间断被动听声警戒与值守, 高可靠性立体全方位发现、搜索瞬态可疑噪声, 探测经过控制区域移动目标, 提取目标特征信息, 目标确认后, 释放卫星通讯浮标到水面, 实时传输信息与报警。

1 水声阵列设计

声呐的检测能力是由水声阵列、水声环境与目标特征共同决定的, 水声阵列的设计必须充分考虑到其工作环境与目标特征。锚系阵列特别是锚系垂直阵列的显著特点是其孔径仅受水深限制, 并可选择在有利的深度工作, 背景干扰大为减小, 传播条件相对有利, 低频仍可有较高的空间增益, 适合在低频工作^[3]。

1.1 工作水深的选择

根据海深变化大的实际情况, 声呐必须能有效适应很浅或深的海区。水声信号在深水区的相干性比沿海海区更大, 在信号不产生相互作用的情况下尤为如此。这就提供了利用相干性大幅度增大探测距离的机会。

深海传播条件受海面、海底影响较小, 具有特殊的会聚区效应。声波在深海声道中可以远距离传播, 深海声道轴所处水深随纬度不同而不同, 深海声道轴水深范围大约是 200~4 500 m。为了利用深海声道和可靠声道取得良好的探测效果, 需要将声呐布放到尽可能深的位置^[4]。

1.2 频段选择

俄罗斯学者 Miasnikov 把现代潜艇的水下辐射噪声分为 3 级: “嘈杂的”、“安静的”、“非常安静的”, 并指出这 3 种噪声在 30 Hz 处的谱级分别为

140 dB、120 dB 和 100 dB。现代潜艇的噪声已大幅减弱, 但低频段降噪困难。对于安静型潜艇的检测, 无论是现代的主动声呐还是被动声呐, 所使用的频率都在向低端移动。

一般将孔径在 -1~5 m 量级基阵所使用的 1 kHz 左右的声呐称为中频声呐, 频率在 -100 Hz~1 kHz 的称为低频声呐, 频率范围低于 100 Hz 的称为甚低频声呐。美国从 20 世纪 80 年代开始研制用于探测低噪声、安静型潜艇的低频主被动拖线阵声呐。这是一种专门用于远程警戒低噪声、安静型潜艇的甚低频声呐, 工作频率可低至 100 Hz 以下, 被动检测时使用 2 条长达 1 500 m 的声阵, 作用距离可达 100 km 以上。

1.3 阵列设计

垂直线列阵对噪声进行同步的空间采样, 在不同深度上接收多个中心频段的宽带噪声。垂直线列阵悬挂在潜标主浮体下部, 主要由减振结构和声学系统两大部分构成。减振结构的长度根据布放环境和布放使用需要来确定, 垂直线列两端各有一段减振结构。水听器阵受到海浪、海流的影响容易发生振动, 从而产生低频噪声, 减振结构作用是尽量消除这种噪声。

声学系统可制作成一整段或者数段, 可以根据布放水深的要求选择需要的阵列段数量, 各阵列段组合成完整的垂直阵列。声学模块含水听器基元、前置放大器以及各种支撑件, 外部由聚氨酯材料软管密封, 管内填充与海水密度相当的惰性油。声学系统的承力件为高强度的 Kevlar 绳, 延展性很小, 可以有效保证基元的确定位置, 并且耐挤压、抗拉伸, 具有灵活的收放特性, 可承受净重 2 t 以上的拉力。水听器以径向极化的压电陶瓷圆管作为振子, 结构上为圆柱形, 在全频段内为无方向性, 振子耐压大且灵敏度高, 是阵列的关键部件。各水听器基元在不同水深条件下, 灵敏度基本一致。与水听器匹配的前置放大器具有低噪声、低功耗的特点, 还具有高通滤波功能, 能够满足在水下长期工作、宽带接收噪声信号的使用需求。水听器基元按照处理最低频率, 采用半波长间距排列。图 1 为垂直阵列实物图。



图 1 垂直阵列实物

Fig. 1 Real object of vertical array

2 水下移动目标警戒信号处理

2.1 总体信号流程

信号处理的主要任务是利用各种技术手段提高输出信噪比,将目标信号从噪声和干扰中区分开来,实现水下移动目标警戒。

基于锚系垂直阵列的水下移动目标警戒系统要求,可在水下长周期自主工作,高可靠立体全方位发现目标。潜艇等水下移动目标与潜标遭遇态势不可知,且探测距离要求远,可靠性要求高,系统总体工作流程如下。

- 1) 系统布放于特殊海域,记录布放大地坐标。
- 2) 低功耗的垂直阵列及前置调理器,全工作周期进行不间断被动听声警戒与值守,进行远程低频段时频瞬态特性探测。
- 3) 时频瞬态特性探测不能在较远处及时发现水下移动目标,目标继续靠近时,垂直阵列利用空间相关性在近处形成的立体警戒网可再次探测到目标,探测距离与工作水深相关,垂直阵列布设得越深,探测距离越远。
- 4) 发现目标后,启动宽带时频特征识别,判断是否为水下移动目标,同时可启动空间特性估计算法,估计目标航行深度。
- 5) 各个功能模块的启动、工作时长和循环数等参数根据上一功能模块是否为水下目标的可信

程度输出,智能决策变化,直至目标确认。

6) 目标确认后,通过卫星通信实时将特征信息传送到陆地通信接收站。接收站结合布放点处水面信息,进一步确认目标。

功能实现框图如图 2 所示。

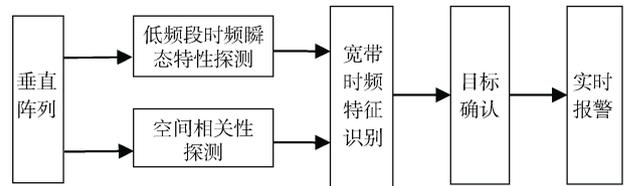


图 2 功能实现框图

Fig. 2 Block diagram of functional realization

2.2 低频段时频瞬态特性探测

瞬态特性探测含时域和频域 2 种,包括:声级突然增大和频谱结构突然变化。利用噪声时频瞬态特性的变化来探测目标,将目标探测问题转化为自适应模式识别问题^[5]。

按照噪声源的不同,海洋环境噪声大致可分为:1) 海洋动力噪声,它与风浪有关,是海水和大气中湍流产生的噪声,还包括海浪拍击噪声、雨噪声、气泡噪声等;2) 生物噪声,是海洋中各种生物(鱼、虾)发出的噪声;3) 地震噪声,是地震、火山活动和海啸产生的噪声;4) 冰噪声,是由冰层的形成和运动产生的噪声;5) 热噪声,是由海水分子运动产生的噪声。降雨会显著增加环境噪声,但噪声谱级随频率变化非常平坦。大量的海洋生物产生生物噪声,除了有海洋哺乳动物的特殊声音之外,成群结队的跳虾是显著的噪声源。

海洋环境噪声干扰场一般都是弥漫的混响声场,经多次反射后,声音从各方向入射到接收阵列的几率相同。在低频段,形成非常平坦的噪声谱,即使在浅水区和接近于海面的水域,其低频不连续谱偏离平均谱级也不特别明显。

安静型潜艇等水下移动目标的辐射噪声虽已得到大幅度降低,但由于在低频段降噪比较困难,目前其螺旋桨转动时产生的低频线谱仍然是难以消除的。潜艇为了自我隐蔽,一般在低于临界航

速下航行, 其螺旋桨空化不充分^[6], 连续谱较弱, 低频线谱却突出。频谱结构中低频谱与高频谱平均能量比一般应远高于水面舰船, 基于这一点, 构造潜艇等水下移动目标频段全覆盖的不同分频段能量比, 特别是低频段能量比的方法来发现水下移动目标。

瞬态特性探测分 2 步: 时频特性提取和人工智能决策^[7]。设计多通道程控自动增益放大滤波提取水下移动目标瞬态时频特性及噪声宽带、窄带能量, 构造比值序列描述噪声宽带频谱结构, 准确提取噪声的谱结构特征, 压缩信号动态范围, 并训练自适应神经网络构造水下移动目标探测器。

为提高处理增益与输出信噪比, 被动接收信号处理一般从以下 3 方面入手。

1) 利用空间滤波处理提高空间增益。信号与干扰的空间相关性不同, 可以采用波束形成或互相关接收来控制环境噪声, 提高信噪比。对 N 个基元构成的垂直阵列, 采用各基元直接相加作空间处理。

2) 频域滤波提取线谱分量。窄带信号处理已成为被动声呐信号处理的重要手段, 水下目标噪声低频段的线谱包含丰富的信息, 不仅可应用于目标检测, 还可用于目标的跟踪与识别, 核心是窄带谱分析。

3) 时间积分处理获得时间增益。时域处理本质上是利用信号和噪声时间波形在统计特性上的差异, 来改善被动声呐的性能。

瞬态时频特性提取步骤如图 3 所示。1 ~ M 为垂直阵列基元号, X 、 Y 、 Z 分别为滤波输出、平方输出、积分输出。

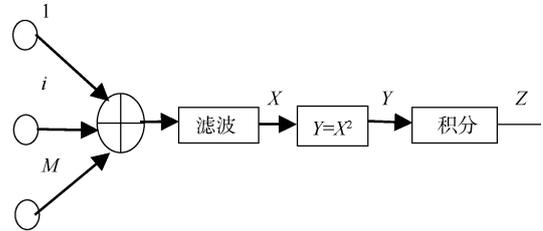


图 3 瞬态时频特性提取

Fig. 3 Extraction of time-frequency characteristics

图 4 给出了 16 基元的垂直阵列每个基元接收到的某水下移动目标通过时的原始噪声信号。各基元接收信号通过特征明显, 同时, 各基元接收信号的时延差非常清晰地反映了不同基元的不同空间位置。图 5 是按图 3 所示方法提取的海洋环境噪声谱和某水下移动目标的三维功率谱。

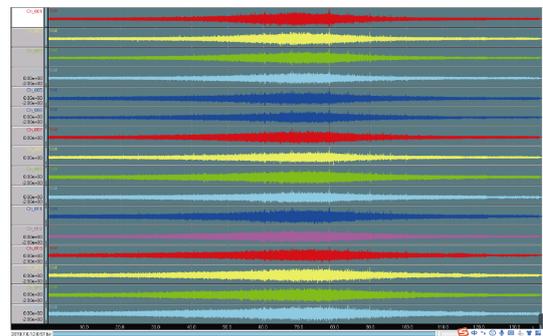


图 4 阵列原始噪声信号

Fig. 4 Original noise signals of array

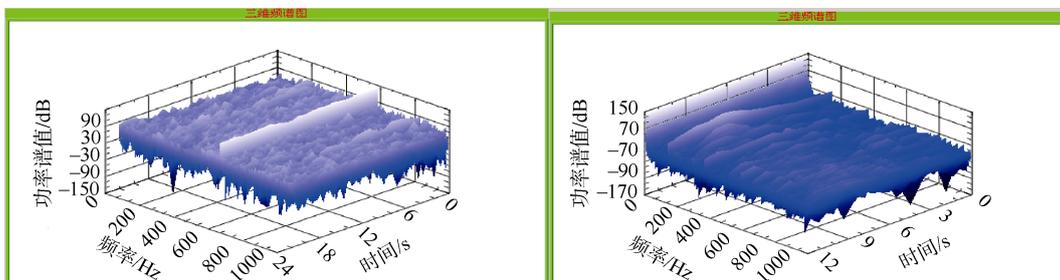


图 5 三维功率谱

Fig. 5 Three-dimensional power spectrum

三维谱图中, Z 轴是功率谱值, X 轴是频率值, Y 轴是时间。可以直观看出, 海洋环境噪声在 1 kHz 频率范围内, 功率谱幅度都起伏不大, 噪声谱级随频率变化非常平坦; 而水下移动目标噪声的功率谱却存在明显的起伏, 有的可以观察到持续数十秒的稳定线谱, 噪声谱级随频率和时间的变化而变化。

利用海洋环境噪声与水下移动目标辐射噪声的这种固有而本质的差异, 进行人工智能的自适应模式识别, 可以较为可靠地进行远程目标探测。

2.3 空间相关性探测

合理选择垂直阵列上的其中 2 个基元与处理器频段, 对两基元接收的信号进行互相关运算, 可使得从远方目标来的声信号其互相关系数较大, 而本地干扰互相关系数很小, 进而探测是否存在目标。

相干多途信道用线性时不变滤波器来描述。点源声场时空相关的理论模型如图 6 所示。

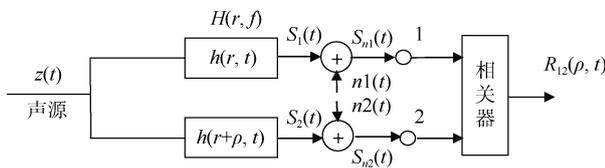


图 6 相干信道互相关模型

Fig. 6 Cross-correlation model of coherent channel

从声信道理论的观点看, 在声源和接收点 1 之间的海洋被看作一个滤波器, 它的冲击响应函数为 $h(r, t)$ 和 $H(r, f)$ [8], 在声源和接收点 2 之间的海洋信道被看作另一个滤波器, 它的冲击响应函数为 $h(r+\rho, t)$ 和 $H(r+\rho, f)$, r 与 $r+\rho$ 为信号到接收点矢径。

在相干多途信道 [9] 中, 信道的冲击响应函数为

$$h(r, t) = \sum_{i=1}^N A_i \delta(t - \tau_{oi})$$

$$h(r + \rho, t) = \sum_{j=1}^N A_j \delta(t - \tau_{oj})$$

式中: A_i 为第 i 途径到达的信号幅度; τ_{oi} 为第 i 途径到达的信号时延; A_j 为第 j 途径到达的信号幅度; τ_{oj} 为第 j 途径到达的信号时延。

相干信道中 2 个点之间的互相关就是 2 个滤波器输出的互相关, 关系如下。

$$s_1(r, t) = z(t) * h(r, t) = \int Z(f) H(r, f) e^{j2\pi ft} df$$

$$s_2(r + \rho, t) = z(t) * h(r + \rho, t) = \int Z(f) H(r + \rho, f) e^{j2\pi ft} df$$

$$s_{n1}(r, t) = S_1(r, t) + n1(t)$$

$$s_{n2}(r, t) = S_2(r, t) + n2(t)$$

则互相关函数为

$$R_{12}(\rho, \tau) = \langle s_{n1}(r, t) s_{n2}^*(r + \rho, t + \tau) \rangle$$

图 7 是以垂直阵列阵为中心, 形成从垂直阵列到水面和垂直阵列到水底的 2 个探测圆锥面示意图。

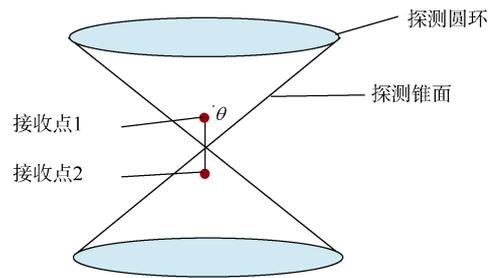


图 7 互相关探测圆锥面示意图

Fig. 7 Conical plane diagram of cross-correlation detection

声源辐射声波传输到垂直阵列的接收点 1、接收点 2, 存在延迟时间 τ 。当延迟时间为 0 时, 互相关函数值最大。处理系统预先将接收点 2 信号延迟时间 τ , 再与接收点 1 的信号求互相关, τ 的设定公式为

$$\tau = d \cos \theta / c$$

式中: d 为基元间距; c 为声速; θ 是以接收点 2 为顶点, 接收点 1 与接收点 2 的连线与接收点 2 与形成的探测圆环的连线的夹角, 简称为仰角。

水下移动目标在接近此圆锥面的过程中, 互相关函数值会越来越大, 直到触碰圆锥面, 互相关函数值达到最大值。设定动作门限, 即可可靠地进行水下移动目标探测。

为提高信噪比增益, 进行远距离低噪声水下移动目标探测, 有必要采取分裂波束法形成指向性波束。将垂直阵列分成 2 个子阵, 子阵信号相加, 各自形成波束再求互相关, 基阵增益近似: $DI = 10\lg N$, N 为形成一个子阵的水听器基元数。 $2N$ 个基元等间隔排列, 等效基阵孔径: $L = Nd$, d 为垂直阵列基元间隔^[10]。

利用垂直阵列波束预形成技术^[11], 原理上仰角 θ 从 90° 变为 0 , 即目标从无穷远到正横时, 均可以形成探测锥面, 设定系列不同的延迟时间 τ , 则可形成一个个不同仰角的探测圆锥面, 相当于形成了一道道警戒网, 对水下移动目标进行可靠的警戒探测。

3 结束语

国外水声技术与水下导航技术水平的不断提高, 使得潜艇等水下移动目标的水下航行隐蔽性越来越高。锚系垂直阵列水下移动目标警戒系统布放回收机动灵活, 适应水深范围广。时频瞬态特性探测和空间相关性探测, 提取和利用了环境与目标在时域频域及空间上的差异, 探测概率高, 计算相对简便, 是对水下移动目标实时预报预警的有力手段。锚系垂直阵列也可用于海洋环境水声数据资料收集, 用于水下水声信息网络的建设^[12]。

参考文献

[1] 李风华, 郭永刚, 吴立新, 等. 海底观测网技术进展

与发展趋势[J]. 海洋技术学报, 2015, 34(3): 37-39.

- [2] 李飞权, 张选明, 张鹏, 等. 海洋潜标系统的设计和应用[J]. 海洋技术, 2004, 23(1): 22-26.
- [3] A.D.Wait. 实用声呐工程[M]. 王德石, 译. 北京: 电子工业出版社, 2004.
- [4] 杨士莪. 水声传播原理[M]. 哈尔滨: 哈尔滨工程大学出版社, 2007.
- [5] 穆玉涛. 水声目标瞬态信号检测与识别技术研究[D]. 南京: 东南大学, 2008.
- [6] 刘伯胜, 雷家煜. 水声学原理[M]. 哈尔滨: 哈尔滨工程大学出版社, 1993.
- [7] 涂运华. 基于网络的智能决策应用系统研究[D]. 重庆: 重庆大学, 2001.
- [8] 王瑞兰. 信号与系统[M]. 北京: 机械工业出版社, 2001.
- [9] 惠俊英, 生雪莉. 水下声信道[M]. 北京: 国防工业出版社, 2007.
- [10] 李启虎. 数字式声呐设计原理[M]. 合肥: 安徽教育出版社, 2003.
- [11] 陈四根. 阵列信号处理相关技术研究[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工程大学, 2004.
- [12] 李启虎, 王宁, 赵进平, 等. 北极水声学: 一门引人关注的新型学科[J]. 应用声学, 2014, 33(6): 471-483.

(责任编辑: 肖楚楚)