

# 参量阵声纳的新应用分析

吴培荣<sup>1</sup>, 李颂文<sup>2</sup>

(1. 东南大学无线电系, 南京 210018; 2. 上海船舶电子设备研究所, 上海 201108)

**摘要:** 介绍了近几年国外参量阵技术在浅海探测声纳、吊放声纳、鱼雷自导声纳、浅海水声通讯等方面的应用进展情况。针对频率为 30kHz 的线性小目标探测声纳, 对原频 90kHz、差频 30kHz 的非线性参量阵进行了性能估算, 结果表明, 参量阵声纳在高混响背景下探测小目标的性能优于线性声纳。文章还分析了参量阵声纳的新应用所面临的一些技术难点, 给出了一种相对简单的宽带参量阵的实现方法。

**关键词:** 参量阵声纳; 浅海探测; 小目标探测

中图法分类号: TN911.7

文献标识码: A

文章编号: 1000-3630(2010)-01-0041-03

DOI 编码: 10.3969/j.issn1000-3630.2010.01.009

## Analysis of some new applications of parametric sonar

WU Pei-rong<sup>1</sup>, LI Song-wen<sup>2</sup>

(1. Department of Radio Engineering, Southeast University, Nanjing 210018, China;

2. Shanghai Marine Electronic Equipment Institute, Shanghai 201108, China)

**Abstract:** Recent applications of parametric array technology in shallow water detection sonar, dipping sonar, torpedo homing sonar and shallow water communication sonar is introduced briefly in this paper. A parametric sonar design according to the linear sonar whose working frequency is 30k Hz is analyzed. The primary frequency of the parametric sonar is 90 kHz and the difference frequency is the same as the working frequency of the linear sonar. It is shown that the parametric sonar has better performance than the linear sonar in reverberation limited environment. The encountered difficulties for parametric sonar in recent applications are also analyzed, and a relatively simple method to achieve broadband parametric array is suggested.

**Key words:** parametric sonar; detection in shallow water; small object detection

## 1 引言

参量阵技术以其能够在小孔径下实现低频窄波束且无旁瓣的特点, 一直在水声工程领域受到广泛的关注, 从上个世纪 60 年代起, 国内外开展了广泛的理论和应用研究。不过, 直到上个世纪末, 参量阵声纳最成功的应用仍然是民用的高分辨率海底地层剖面仪。虽然在掩埋物体探测中各国不断在进行参量阵探测技术的运用试验, 但似乎没有见到相关的民用产品或军用装备的报道。

本世纪以来, 随着新的军事形势的要求, 参量阵探测技术又重新在军用声纳领域活跃起来。除了原来的利用参量阵的低频、高指向性和高带宽的特点继续从事掩埋雷探测和识别方面的研究外, 还在港口低速目标探测、航空吊放声纳、鱼雷自导声纳方面有了新的探索和应用。例如美国 SciFish 公司研制了参量阵航空吊放声纳, 与一般的线性声纳相

比, 这种吊放声纳不需要线性声纳的伸缩支架来安装水听器以提高分辨率, 在结构和操作上便利了不少。美国 ASSETT 公司在 2004 年曾提出利用参量阵技术改造鱼雷自导功能, 其目的是与鱼雷已有的线性声自导声纳结合, 利用参量阵声纳的窄波束和高带宽能力, 极大地减小海洋混响的影响, 并通过窄波束的快速扫描来判断目标大小, 以区分诱饵和舰艇。从研究目的来看, 似乎不是要降低频率来提高鱼雷的自导作用距离, 而是要提高原频频率, 但差频可能只比原来略低或相当, 以提高波束宽度和信号带宽, 大幅度减小混响强度, 并且通过窄波束扫描来判断目标大小。这样既利用了高频的高指向性和高的绝对带宽值, 又保持了差频的适当作用距离, 避免了原频的快速吸收。欧盟在上世纪末到本世纪初有一个参量阵声纳通讯技术项目 (PARACOM), 试验结果表明了参量阵声纳在水声通讯领域的应用前景, 但是也暴露了一些问题, 比如: 对于相位突变信号的处理问题, 以及虽然窄波束带来了抗多途效应, 但同时也增加了声纳发射方向的控制难度。美国 NuvoSonic 公司于 2003 年推出了一种采用参量阵技术的 P2S3 港口警戒声纳。

收稿日期: 2009-03-24; 修回日期: 2009-06-30

作者简介: 吴培荣(1964-), 男, 浙江人, 博士研究生, 研究方向为水声信号处理。

通讯作者: 吴培荣, E-Mail: pprwu@sina.com

在这些新的应用中, P2S3、PARACOM、鱼雷自导等针对的都是浅海强混响环境。这里出现了一种应用参量阵技术的新思路: 原来应用参量阵的目的主要是通过降低频率来提高声纳作用距离, 而新的思路(P2S3 除外)是: 在不改变声纳的工作频率的情况下, 采用非线性方式来实现原来工作频率下的声发射, 以大幅度缩小波束宽度和增加信号带宽, 通过牺牲信噪比的方式来提高信混比。针对这个思路, 下面对参量阵技术应用于浅海混响背景下的小目标探测进行一些设计估算和技术难点分析。

## 2 设计估算

首先针对浅海强混响背景下的小目标探测声纳, 采用同样的工作频率和阵孔径, 进行线性和非线性设计的比较。在此根据国外常用的近距离探测声纳的低端频率和较小的阵孔径进行设计比较。这个频率也属于鱼雷自导声纳的常用频率范围。

线性设计: 工作频率为 30kHz, 带宽为 10kHz, 换能器阵尺寸为 0.6m×0.2m, 实现的-3dB 波束开角约为: 水平 4.1°×垂直 12.3°

近岸港口的海底反向散射强度假设为  $S_b = -35\text{dB}$ , 则: 混响强度 =  $S_b + 10\log(c\tau/2*\theta*r)$

其中  $\tau = 0.1\text{ms}$  为 10kHz 带宽的等效脉宽,  $\theta = 4^\circ = 0.07$  弧度。假设目标强度为 -25dB, 且信号强度足够大, 因此不考虑信噪比, 检测阈  $DT$  仅由信混比决定。设  $DT = 6\text{dB}$ , 则要求混响强度小于 -31dB, 根据上面的混响强度的公式可以求出  $r = 479\text{m}$ 。若海底反向散射强度  $S_b = -30\text{dB}$ , 则  $r = 151\text{m}$ (如果根据 Lambert 定律计算, 在 5°掠射角时, 反向散射强度分别约为: 淤泥 -35dB, 沙 -30dB, 岩石接近 -20dB, 但国外的测量结果有时候比 -40dB 还低。实际海底特别是港口附近, 情况可能比较复杂, 还经常碰到淤泥加贝壳的情况, 散射强度又不同。需要了解浅海港口的底质情况, 才能准确估算出混响背景主导下的声纳探测性能。英国专家 A. D. Waite<sup>[1]</sup>建议, 在声纳设计中这个值总不要低于 -35dB。

如果采用非线性设计, 换能器尺寸为 0.6m×0.1m(垂直方向缩小一半, 以保证足够宽的垂直指向性, 以覆盖整个海深), 发射频率为 90kHz, 那么原频波束开角为: 水平 1.4°×垂直 8.4°

假设差频中心频率也为 30kHz, 波束开角也为 1.4°×8.4°(实际上假设差频波束开角几乎跟原频相等是要满足一定条件的, 这里假设条件满足), 带宽是 20kHz(对于单个中心频率为 90kHz 的换能器阵, 要实现中心频率 30kHz、带宽 20kHz 的差频并不是

很容易。但采用两个换能器阵就比较容易实现, 后面将专门讨论这个问题), 那么很显然, 由于波束开角减小到了 1/3, 带宽又增加了 1 倍, 同样距离下, 理想情况下由混响限制的作用距离将扩大 6 倍, 即对于  $S_b = -35\text{dB}$  可达到近 2900m, 对于  $S_b = -30\text{dB}$ , 也有  $r = 900\text{m}$ (如果目标强度只有 -30dB, 那么对于  $S_b = -35\text{dB}$  和  $S_b = -30\text{dB}$  的作用距离则分别为 900m 和 287m, 而线性声纳则只有 151m 和 48m)。

2900m 的作用距离实际上是做不到的, 因为还必须考虑参量阵的声源级相对较低, 距离增大之后, 尽管信混比仍能满足要求, 但是信噪比未必满足要求, 即参量阵声纳的作用距离将主要受信噪比限制, 而不是像线性声纳那样受信混比的限制。

根据上面的设计, 相关处理的主动声纳方程为:

$$DT = SL - 2TL + TS - (NL - DI) + 10\log T;$$

基本参数如下:

$$\text{噪声谱级 } NL = 42^{[2]};$$

$$1000\text{m 传播损失: } 2TL = 5.5 * 2 + 40\log 1000 = 131;$$

阵增益  $DI = 19.8\text{dB}$ ; (单个换能器阵在远离谐振频率处接收)

$$\text{目标强度 } TS = -25\text{dB};$$

$10\log T$  为时间处理增益,  $T$  为宽带信号的脉冲长度。

因为是宽带相关接收, 噪声带宽在相关处理中被抵消, 因此只需要考虑噪声谱级。

假设  $DT = 6\text{dB}$ ,  $T = 20\text{ms}$ , 可算出, 在  $SL = 201\text{dB}$  的差频声源级下作用距离为 1000m,  $SL = 198\text{dB}$  时作用距离为 800m。对于下移比不大的设计, 实现 200dB 差频声源级不是非常困难。比如 PARASOUND 就号称实现了 6kHz 差频(下移比约为 5)的 206dB 声源级。另外, 如果采用两个换能器一起接收(在远离共振频率点上), 阵增益还可以提高 3dB。实际上 2 个换能器阵的接收垂直指向性开角也仅有 12.3°, 此时, 198dB 的差频声源级作用距离可达 1000m, 195dB 可以实现作用距离 800m。

宽带对抑制混响是非常重要的, 特别对于参量阵声纳, 因为实际上要做到差频跟原频一样的波束宽度是有一定的困难的(只有在阵增益较小时才可能, 但这时差频声源级又会偏低), 通常差频波束宽度会略宽于原频, 因此上面基于信混比的作用距离估算是要打折扣的。实际上参量阵声纳主要还是受信噪比的限制, 信混比打折扣并不影响根据信噪比所做的作用距离的估算, 比如, 即使差频波束宽度只能做到 2°, 混响限制距离也超过 2000m。

参量阵声纳的优点就是能够实现小孔径下发射低频窄波束。然而小尺寸孔径意味着接收指向性

指数降低,而参量阵本来就有差频声源级不足的弱点,两个因素相加,使其抗噪声能力较弱。而宽带复杂信号则可以通过时间处理增益,将信号在低信噪比下检测出来,这进一步说明宽带参量阵的重要性。

根据上面分析可知,在相同尺度的换能器阵、相同的工作频率下,采用非线性参量阵方式可具有更窄的波束宽度,更大的带宽及更好的抗混响能力。尽管声源级不易做到很高,但通过宽带处理,在混响背景主导的环境下仍有可能实现更大的作用距离。

### 3 针对新应用的技术难点

浅海探测声纳采用参量阵方式面临的待解决的问题主要有:多波束参量阵技术、超宽带参量阵技术以及复杂信号波形设计技术。

多波束参量阵技术对于探测速度要求很高的场合是非常重要的。如果采用单波束方式,在上述估算参数下,对于 800m 的距离,扫描 90°的范围需要  $t=800 \times 2 / 1500 \times 90 / 1.4 = 69\text{s}$ ,而线性声纳通过接收预成多波束方式,理论上只需要略大于 1s 的时间。如果采用参量阵多波束发射,脉宽为 20ms,则  $t=20\text{ms} \times 90 / 1.4 + 800 \times 2 / 1500 = 2.4\text{s}$ 。

参量阵的窄波束是在发射过程中形成的,无法利用接收多波束方式(除非采用与线性声纳同样尺寸的接收阵来实现同样的波束宽度,但这样就丧失了参量阵的小孔径特点),因此参量阵的多波束只能通过发射波束的快速扫描实现,因此如何区分不同发射波束的回波,是实现多波束参量阵的关键。目前这方面还没有非常成功的应用,但国内外都有一些相关的研究,主要是基于频分<sup>[3]</sup>(不同的发射波束采用不同的频率)和码分<sup>[4]</sup>(不同的发射波束采用不同的编码信号)技术。两种技术都对参量阵差频波的带宽提出了较高的要求。

采用复杂编码信号,对于参量阵声纳来说也比线性声纳要复杂一些,因为参量阵差频波是通过传播介质对原频包络的非线性解调作用形成的。目前仅在参量阵通讯声纳试验中采用了带宽较窄的编码信号,宽带编码信号还要面临着二级声场畸变、信号不满足准静态条件等若干问题,需进一步研究。

### 4 一种相对简单的宽带参量阵技术

根据前面的论述,无论从抗混响、增加信噪比,还是参量阵快速扫描技术角度,都必须形成有足够带宽的差频声场。下面针对前述差频 30kHz、原频 90kHz 的参量阵声纳,提出一种相对简单的宽带技术。

对于单个 90kHz 的换能器阵,要实现中心频率 30kHz、带宽 20kHz 的差频发射,实际上是要发射 20~40kHz 的差频信号,这就意味着需要换能器阵有 40kHz 的带宽。这在换能器技术上虽然不是不可能,但是代价比较高。而如果采用两个换能器阵来发射,对换能器技术的要求就可以低很多。比如:一个阵发射 70~80kHz 的信号,另一个阵发射 100~110kHz 的信号,它们相互作用就可以产生 20~40kHz 的差频信号(实际上还有 10kHz 以下的差频信号。10kHz 以下的差频信号在对水雷目标的识别、掩埋雷的探测中非常重要),这样对换能器带宽的要求就比较容易满足了。

虽然参量阵最初的形式就是两个换能器分别发射单频,但后来普遍采用的是单个换能器发射调制信号。因为过去的应用通常很少采用小的下移比,一般的下移比都在 10 左右,这样实现大的差频带宽并不需要很大的原频带宽,单个换能器很容易实现。不过也有采用两个换能器阵发射的形式,但目的不一定是为了实现更大的带宽,也可能是为了实现更大的原频声源级,因为采用两个换能器可以增加辐射面积,提高发射功率。但是采用这种方式形成的差频声场是什么样的频率结构,转换效率如何,以往的自解调方法研究宽带参量阵信号如何应用到新的发射形式上来以获得最佳的差频信号形式,尚需要进行系统的研究。

## 5 结论

近年来参量阵技术在水下军事领域逐渐有了新的应用研究。在浅海混响背景条件下进行小目标探测时,参量阵技术在同样的阵孔径、同样的工作频率下,有可能实现更远的探测距离。参量阵探测技术的新应用还面临着多波束技术、复杂波形产生技术以及超宽带技术等需要深入研究的问题。

### 参 考 文 献

- [1] Waite A D. 实用声纳工程[M]. 电子工业出版社, 2004.  
A. D. Waite, Sonar for Practicing Engineers[M]. Third Edition, John Wiley & Sons, Ltd, 2002.
- [2] Urick. 水声原理[M]. 哈尔滨船舶工程学院出版社, 1990.
- [3] 李颂文, 王锦柏. 线性调频参量阵信号间互干扰的计算机模拟及传播实验[A]. 中国声学学术会议[C]. 2002.  
LI Songwen, WANG Jinbo. Simulation and experiment of interference of linear frequency modulated parametric array signals[A]. Proceedings of Chinese Acoustics conference[C]. 2002.
- [4] 姜雪, 李颂文. 基于伪随机序列的多波束水声探测系统的信道估计技术[J]. 声学技术, 2007, 26(3): 389-394.  
JIANG Xue, LI Songwen. Channel estimation for multi-beam underwater acoustic detection system based on pseudo-noise sequence[J]. Technical Acoustics, 2007, 26(3): 389-394.