

参量阵及其在水声工程中的应用进展

李颂文

(上海船舶电子设备研究所水声对抗技术国防科技重点实验室, 上海 201108)

摘要: 参量阵技术因其可以在小的基阵尺寸下获得低频窄波束, 且波束无旁瓣, 并容易获得较大的信号带宽, 从上个世纪 60 年代起获得了广泛的关注和深入的研究, 并且在水声工程和超声成像领域获得了比较广泛的应用。文章介绍了参量阵产生次级声场的基本原理、参量阵声场的特点以及相关的物理和数学模型, 回顾了参量阵技术在水声工程中的主要应用历史, 特别指出了其最成功的应用是高分辨率海底底层剖面仪, 因为这个应用最大限度地回避了参量阵技术面临的两个主要问题: 转换效率低因而差频声源级不高, 以及实现多波束困难因而探测效率较低, 并从物理和工程角度深入探讨了这两个问题, 提出了进一步研究的重点和对未来应用的展望。

关键词: 声学非线性; 参量阵; 水声工程

中图分类号: TB566

文献标识码: A

文章编号: 1000-3630(2011)-01-0009-08

DOI 编码: 10.3969/j.issn1000-3630.2011.01.002

Parametric array and its application in underwater acoustic engineering: an overview

LI Song-wen

(Shanghai Marine Electronic Equipment Research Institute, Shanghai 201108, China)

Abstract: Since 1960's, parametric array has been widely researched and applied to underwater acoustic engineering and ultrasonic imaging on account of its three technical advantages: achieving narrow sound beam-width at low frequencies with small aperture, no side-lobe for the sound beam, and easy to generate broad band signals. Parametric array is introduced on its generation, characteristics of acoustic field and related mathematical and physical models. The application of parametric array technology in underwater acoustic engineering is reviewed. High resolution sub-bottom profiler, which is the most successful application of this technology in underwater acoustic engineering by avoiding its two major shortcomings (the low conversion efficiency and low detection efficiency), is analyzed in physical scenario as well as in engineering scenario especially. The emphases of the future research on parametric array technology are suggested and the prospect of more widely using this technology in underwater acoustic engineering is discussed.

Key words: acoustic nonlinearity; parametric array; underwater acoustic engineering

1 引言

强声波在海洋中可能产生的主要非线性效应^[1]:

谐波;

当声场中同时存在两个高强度声波时, 产生差频波及和频波;

空化;

声流;

声辐射压力。

从水声工程的角度来看, 由两个高强度声波产

生差频波, 即通常所说的参量阵, 因其具有不同于常规线性声场的特点, 使得声学换能器能够在分辨力上突破瑞利限, 因而具有较大的应用价值。从 20 世纪 60 年代起, 国内外针对参量阵技术开展了大量的理论、实验和设备研究, 本文在分析总结参量阵技术的特点的基础上, 回顾了其主要的水声工程应用历史, 分析了阻碍其获得更广泛应用的技术瓶颈以及针对这些技术瓶颈所开展的研究, 提出了今后应该重点研究突破的工程技术难题。

2 参量阵的基本物理原理

2.1 声散射声

根据线性声学的原理, 如果声场中同时存在着

收稿日期: 2010-05-28; 修回日期: 2010-08-22

作者简介: 李颂文(1966-), 男, 研究员, 研究方向为水声信号处理、水下声成像和非线性水声学。

通讯作者: 李颂文, E-mail: lisongwen@smmail.cn

两个不同频率的声波，总的声场只是这两个声波的线性叠加，他们彼此之间并不产生相互作用。比如，假设存在两个频率分别为 ω_1 和 ω_2 、振幅分别为 P_1 和 P_2 的正弦波，如果他们沿着相同方向传播，初始相位相同，那么声场中的声压可以表示为：

$$p(t) = P_1 \cos(\omega_1 t) + P_2 \cos(\omega_2 t) \quad (1)$$

但是，从非线性声学的角度来看，如果空间存在两个不同频率的声波，则每个声波的传播都是在被另一个声波扰动了的介质中进行的，不再能看成是在均匀介质中的传播，因此会因为介质不均匀而发生散射。这种声波受到被另一个声波扰动的不均匀介质的散射的现象，通常称为“声散射声”^[2]。因为介质是被另一个声波扰动的，可以定性理解为散射声中存在被另一个声波所调制的频率成分，即存在着两个声波的差频及和频成分，可以简单表示为：

$$p(t) = P_1 \cos(\omega_1 t) + P_2 \cos(\omega_2 t) + S \cos(\omega_1 t) \cos(\omega_2 t) = P_1 \cos(\omega_1 t) + P_2 \cos(\omega_2 t) + \frac{S}{2} (\cos(\omega_1 - \omega_2) + \cos(\omega_1 + \omega_2)) \quad (2)$$

其中 S 表示非线性效应的强弱。

式(2)只是从声波的互散射角度说明非线性声场，实际上声波还存在有限振幅效应，即当声波的振幅不同时传播速度也不同，因此还会产生谐波，乃至形成冲击波。谐波声场不是本文要讨论的主要内容，但因其会对参量阵声场产生影响，后文也将有所说明。

2.2 参量阵

两列同向传播的平面波(原频波)，在垂直于传播方向的平面上产生的声散射声的相位相同。对于没有频散效应的介质，各种频率成分以相同的波速传播。因为两个原频波在传播过程中不断产生声散射声，其正向散射部分(与原频波传播方向相同的部分)同相叠加到前些时刻产生的散射声上得以逐渐加强^[2]。这个过程可看作空间有一个由无数个产生二级声场的虚源组成的体积阵，通常称为参量(发射)阵，如图1所示。

参量阵的二级声场包括差频声场、和频声场和谐波声场，从声纳应用角度来看，差频声场特性是参量阵声场所主要关注的。

参量阵声场因为是一个累加场，差频波的总能量是随着传播距离的增加而增加的，扣除差频波的吸收效应以后，近场测量的声源级要比远场测量的声源级低。因此要准确测量参量阵的声源级，测量点必须距离声源足够远。

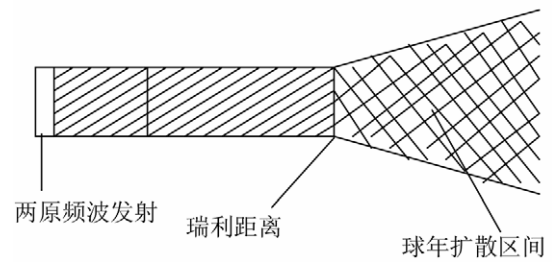


图1 参量(发射)阵原理图

Fig.1 Principle of parametric transmitting array

3 参量阵的主要数学模型

3.1 准直平面波模型

Westervelt 于1963年最早从流体力学的 Lighthill 方程得出了两列准直平面波同向传播时的参量阵远场差频声压计算公式^[3]：

$$p_s = \frac{\omega_s^2 P_1 P_2 \beta S_0}{8\pi \rho_0 c_0^4 R} \frac{1}{\sqrt{\alpha^2 + k_s \sin^4 \frac{\theta}{2}}} \quad (3)$$

其中 β 为介质的非线性参数(海水约 3.6, 淡水约 3.1), ω_s 为差频波频率, P_1 、 P_2 为两原频波振幅, ρ_0 为介质密度, c_0 为介质声速, S_0 为波束截面积, k_s 为差频波波数, θ 为方向角, R 为场点到声源的距离, $R \gg 1/\alpha$, $\alpha = (\alpha_1 + \alpha_2)/2$, α_1 、 α_2 分别是两个原频的声吸收系数, $1/\alpha$ 一般称为参量阵的有效阵长。

Westervelt 的计算公式是基于两列准直平面波束形成的参量阵，对于实际的换能器，通常只有在瑞利距离之内才满足这个假设。在此假设下不考虑原频旁瓣的影响，原频形成的虚源阵产生的二级声场只在沿声轴方向传播时才能获得同相叠加的累积效应，其他方向因为没有累加效应而能量非常低，因此虚源阵产生的差频声场也没有旁瓣。

从 Westervelt 的积分式可看出参量阵的一些显而易见的特性：

(a) 差频波是由两个原频波的乘积效应产生的，因此差频波的振幅是跟两个原频波振幅的乘积成正比的；如果两个原频波振幅相同(通常情况下差不多都是这样)，则差频波振幅跟原频波振幅的平方成正比。因此，如果原频波声源级下降 6dB，差频波的声源级将下降 12dB；

(b) 其他参数一定时，差频波的声压幅度跟差频频率的平方成正比，即差频频率提高一倍，声源级将提高 12dB。

对于海水这样的介质，因为声吸收系数相对较小，因此虚源阵的有效阵长 $1/\alpha$ 很大，并且由于声吸收(考虑孔径效应时还有扩散)的影响，虚源的强

度是逐渐减弱的,因此参量阵类似于一个幅度加权的很长的端射阵。根据端射阵的指向性特性可知其差频波束宽度很窄,理论分析和实验结果都表明,通常情况下其波束宽度跟原频波束宽度相近。在准直平面波假设下,其波束宽度的近似计算公式为^[4]:

$$2\theta_{-3dB} \approx 4\left(\frac{\alpha}{k_s}\right)^{\frac{1}{2}} \quad (4)$$

从式(4)可以看出,忽略差频波的吸收效应时,差频波束的宽度仍然随频率的降低而增加,但不是线性关系,而是1/2次方的关系。也就是说,差频波的束宽对频率的变化相对较不敏感,如果考虑差频波的吸收随频率的降低还有微小下降,则这个敏感性还要更小。

3.2 原频波扩散效应的影响

众所周知,瑞利距离 $R_r=S/\lambda$, λ 为两原频波的平均波长, S 为平面换能器的辐射面积。在瑞利距离内,原频波近似为准直平面波束,维持高强度不变,因而这个范围内的原频互作用产生差频波时转换效率相对较高。

在瑞利距离以外,原频波随距离增加按球面扩散效应迅速衰减,因而原频互作用产生差频波时的转换效率急剧下降。当然,瑞利距离内产生的差频波比扩散区间产生的差频波距离场点要远,因而本身的扩散衰减要大,但是此扩散衰减是与距离成反比的,而原频扩散衰减后产生的差频减小幅度却是与原频减小的幅度成平方反比关系,即与距离成平方反比关系,因此瑞利距离内产生的差频波对于场点的贡献相对要大一些。

因为准直平面波假设下忽略了扩散效应的影响,对于远场扩散区间的参量阵声场不能再以式(3)计算。

Berktag 和 Leahy 在考虑了扩散因子后得出的远场差频声场的计算公式为^[5]:

$$p_s(R, \theta, \eta) = \frac{\omega_s P_1 P_2 \beta e^{(-\alpha_s + jk_s)R}}{4\pi \rho_0 c_0^4 R} \int \int_{-\frac{\pi}{2}}^{\frac{\pi}{2}} \frac{D_1(\gamma, \phi) D_2(\gamma, \phi) \cos \gamma}{A + jk_s(1-u)} d\gamma d\phi \quad (5)$$

其中 $A=(\alpha_1+\alpha_2)/2-\alpha_s$, α_s 是差频波的声吸收系数,

$$u = \cos \gamma \cos \theta \cos(\phi - \eta) + \sin \gamma \sin \theta \quad (6)$$

θ, η 为场点的方位角, γ, ϕ 为源点的方位角, D_1, D_2 是两个原频的方向性函数,其他物理参数同式(3)。从式(5)可以看出,其不仅考虑了原频的方向因子,还考虑了差频本身的声吸收效应。

式(5)没有解析式,以前为了工程计算方便,制

作了若干图表供查询。现在随着计算机的普及以及计算速度的提高,直接针对式(5)进行数值计算已经很方便了。

由于计及扩散效应时(水声工程中一般皆如此),参量阵的近、远场通常不再以 $1/\alpha$ 来区分了,但是也不能完全忽略扩散区间产生的差频波对场点的影响,因而以原频的瑞利距离来划分近、远场也不合适。这就给计算或测量参量阵的差频声场的远场特性时如何选取合适的场点距离带来了麻烦。比较保险的方法是,当补偿了吸收损失之后,测量到的差频声源级不再随距离增加而变化了,则可以认为测量点位于参量阵的远场。

虽然计及扩散效应时原频是有旁瓣的,但是因为原频波的旁瓣比主瓣声级低很多,而差频声压是跟原频声压的平方成正比,再加上原频波的旁瓣通常都产生于声压已经下降很大的远场,因此由于原频波的旁瓣而产生的差频波是非常小的,通常情况下观察不到。

3.3 原频波声饱和的影响

如前所述,原频声源级越高,参量阵的转换效率也越高。但是,随着原频发射功率的不断增大,由于有限振幅效应,原频从正弦波畸变为锯齿波的倾向性也不断增加,即出现了谐波。在波形从正弦波向锯齿波畸变的过程中,不断有原频波的能量向其谐波转移,形成了所谓的“逾量衰减”^[6],致使原频波的声级不再随着发射声功率的增加而线性增加,并且在某个距离之后不再因发射功率的增加而变化(即所谓的声饱和),因而限制了差频波转换效率随原频波发射声功率的提高而提高的能力。

对于平面波,忽略吸收效应,冲击波(锯齿波)的形成距离为^[7]:

$$R_s = 1/(\beta kM) \quad (7)$$

其中 β 为介质的非线性系数, $k=2\pi/\lambda$, 为波数, $M=u/C_0$ 为声马赫数,即换能器表面附近介质质点振动速度与小信号声速之比。

判断是否进入声饱和状态,有下述公式^[8]:

$$SL_c = 20 \log L - 20 \log(f_p)_{kHz} + 292 \quad (8)$$

其中 f_p 是以千赫为单位的原频频率, L 是下式的解。

$$\exp\left(-\frac{\pi}{2\beta L}\right) = 4.5\alpha_p \frac{S}{\lambda\beta L} \quad (9)$$

这里 λ 是原频波长, β 是介质的非线性系数, S 是换能器的有效辐射面积。

声饱和现象不仅会造成原频波能量的损失,还因为不同方向声波的饱和深度不同而使原频波束

展宽,再加上相对阵长缩短,差频波束宽度也会增大,因此参量阵声纳通常都避免工作在原频波深度饱和的工作状态,即尽可能使原频声源级小于 SL_c 。

3.4 参量阵理论模型总结及工程应用的一般考虑

考虑三个声场中的距离参数:有效阵长 $R_A=1/\alpha$, 瑞利距离 $R_F=S/\lambda$, 锯齿波形成距离 $R_S=1/(\beta kM)$, 参量阵的理论模型主要分 3 种^[9]:

(1) 吸收限制的模型, $R_S > R_F > R_A$, 可用 Westervelt 的准直波束假设条件下的解析式(3)来估算;

(2) 扩散限制的模型, $R_S > R_A > R_F$, 可用 Berklay and Leahy 考虑原频指向性的解析式(5)来估算;

(3) 冲击波截断限制的模型, $R_F > R_A > R_S$, Mellen and Moffet 对此有详细定量分析^[10], 可以根据式(8)来判断是否需要考虑声饱和效应;

早期对于上述三种物理条件下的参量阵声场进行理论计算时,需要分别采用不同的计算方法。随着计算机运算速度的提高,数值求解偏微分方程的能力大大提高。数值求解抛物近似的非线性声波方程(KZK 方程)来计算参量阵声场已经被广泛采用^[11-15], 可以不分模型,以最少的近似来精确地求解参量阵声场的近、远场结构,大大方便了参量阵声纳的设计工作。特别是对于近场声场的计算,该方法可以避免积分运算时因为场点同时也是极点而造成的数学困难^[16]。

归一化的抛物近似的非线性波动方程(KZK 方程)为^[17]:

$$\frac{\partial^2}{\partial \tau \partial \sigma} T = \frac{1}{4(1+\sigma)^2} \left(\frac{\partial^2}{\partial u_x^2} + \frac{\partial^2}{\partial u_y^2} \right) T + \alpha r_0 \frac{\partial^3}{\partial \tau^3} T + \frac{r_0}{2l_d(1+\sigma)} \frac{\partial^2}{\partial \tau^2} T^2 \quad (10)$$

其中

$$\sigma = \frac{z}{r_0}, \quad u_x = \frac{x/a}{1+\sigma}, \quad u_y = \frac{y/a}{1+\sigma} \quad (11)$$

$$\tau' = \tau - k \frac{x^2 + y^2}{2(r_0 + z)}, \quad T = (1+\sigma)p$$

直角坐标 xyz , z 为声传播方向, a 为矩形换能器阵的边长比, r_0 为瑞利距离, τ 为延迟时间, p 为声压, α 为声吸收系数。通过适当的选取初始条件,上述方程可以用来求解两个不同频率相互作用产生的差频声场^[13], 并且可同时考虑吸收效应、扩散效应和逾量衰减效应。缺点是计算复杂,对计算机有一定的速度和内存容量要求。

综合考虑三个模型,理想的参量阵设计应该满足: $R_S = R_F = R_A$ 。此时,换能器的尺寸达到了产生最佳有效阵长的尺寸,而且原频波的能量没有因为逾

量衰减而浪费;根据上述关系式以及声吸收与频率的关系式,可以求出给定的换能器体积下的最佳原频频率和最佳发射声功率。

但是实际水声应用中,上述理想情况是不太可能实现的,通常适用的是受扩散限制的参量阵模型,因为水声工程应用中声波频率相对较低,则有效阵长不可能太小,而换能器尺寸受限,则瑞利距离又不可能太大,要使有效阵长与瑞利距离相等几乎不可能。例如原频频率 100kHz,换能器孔径 1000mm×200mm,其瑞利距离只有 13m,而其有效阵长大于 1000m。

受饱和限制的参量阵在设备功率足够、差频波束宽度可以适当放宽、而差频声源级的微小提高也至关重要时也有应用^[18]。

除上述三种常见的参量阵声场的理论模型外,还有一种截断参量阵模型在水声工程中也比较重要。参量阵应用于浅海海底地层剖面或掩埋物探测时,因为介质特性在水-底界面处的突然改变,参量阵阵长常常直接受限于海底界面,因此形成截断参量阵。截断参量阵由于其阵长被界面截断而缩短,其差频波束宽度会增加,声源级会下降^[19,20]。

3.5 宽带参量阵及非线性声场的自解调效应

在参量阵声场中,原频波较小的带宽转化成差频波时可以形成相对较大的带宽。比如,如果 100kHz 的原频有 15kHz 的带宽,则可以产生频率范围为 5~15kHz 的波束宽度变化不太大、而相对带宽则从 15%增加到 100%的差频信号(实际设计时应该综合考虑换能器的准确的频率响应曲线、参量阵转换效率跟频率的关系、以及介质的声吸收跟频率的关系等因素来具体计算差频频率范围的最佳选取值)。

宽带参量阵因为有无限多个频率成分,其差频波形不再像两个单频形成的差频波那样简单。针对实际应用中常用的脉冲调制原频波的形式,早在 1965 年, Birmingham 大学的 Berklay 就推导出了差频波形的数学表示^[4]:

$$p(z,t) = -A \frac{\partial^2}{\partial t^2} f^2 \left(t - \frac{z}{c_0} \right) \quad (12)$$

其中 z 为声波传播方向, t 为时间, f 是调制脉冲的波形表达式,即原频的包络, A 是幅度因子。式(12)表明,参量阵的差频声场是原频包络的平方的二阶导数。也就是说,声场的非线性效应可以将原频的包络(以平方二阶导数的形式)解调出来,一般称为声场的非线性自解调效应。

从参量阵声场的自解调效应中获得的一个被

广泛应用的结果就是在差频波中产生 Ricker 子波。Ricker 子波恰好是高斯波的二阶导数,因此只需要将高斯波开根号,然后调制原频波,即可以在二级声场中产生 Ricker 子波。更简便的方法是采用滤波平滑后的半余弦波调制原频波来产生 Ricker 子波。Ricker 子波带宽较大,相位特性好,是地震勘探中常用的波形,在参量阵海底地层剖面仪和掩埋物探测等应用中被广泛采用^[21-25]。

参量阵声场的自解调效应很早就被广泛认识,因此实际的工程应用、甚至实验室的实验中,都很少采用直接发射两个原频波的方式来形成参量阵,一般都采用一个换能器发射脉冲调制原频波的方式来形成参量阵。形成 CW 信号的方式主要有发射载波频率为原频、调制波频率为差频的非平衡调制的调幅信号,以及发射载波频率为原频、调制波频率为差频的一半的平衡调制信号两种方式。实际的水声工程应用中也偶尔出现过采用两个换能器阵分别发射两个原频信号的形式,其主要目的是为了增加换能器的辐射面积,以承受更大的发射电功率^[26]。

4 参量阵技术的水声工程应用

4.1 参量阵的特点

从参量阵的物理和数学模型中可以知道,其主要优点有三点:

- (1) 可以在小孔径下实现低频窄波束,即具有超指向性能力;
- (2) 通常没有可观察到的旁瓣;
- (3) 容易实现高带宽。

其缺点是转换效率低,因而差频声源级不大。实际上早期人们忽略了参量阵还有另外一个缺点:实现多波束困难。本文将在第 5 节详细论述此问题。

4.2 参量阵技术在水声工程领域的主要应用

从参量阵的优、缺点可以看出,其主要的应用方向是在要求窄波束、低频率而换能器尺寸又不能太大的场合,最典型的水声应用是高分辨率海底地层剖面仪,其他如掩埋物探测、大深度多普勒计程仪、水声通讯等领域国内外也有应用研究,直到最近国外才出现了比较成熟的基于参量阵技术的水下小目标探测声纳。

(a) 参量阵地层剖面仪

海底地层的声吸收非常大,通常只有很低频率(几百赫兹到几千赫兹)的声波才能穿透底层到达海底以下几十到数百米深的地方;采用线性声纳原理的常规海底地层剖面仪通常波束很宽,在 $40^{\circ}\sim 60^{\circ}$

之间,因而径向分辨率很低,而且非常容易受到海面回波的干扰,且因为宽波束造成的侧向回波与正向回波时延相差很大,使得界面混响大幅度降低了设备的轴向分辨率,即便采用拖曳阵接收也只能解决一维问题。这个缺陷使得常规海底地层剖面仪在地质勘探中的使用价值一直不高。当海底地层剖面仪的波束宽度小于 5° 时,上述问题则可以基本得到解决。但是如果用常规线性声纳方式来实现这么窄的波束宽度,对换能器孔径的要求极大(几米到十几米的平面阵),通常是不现实的,而参量阵技术的低频、小尺寸、高指向性特点正好能满足要求。

国内中国科学院声学研究所东海研究站曾于 20 世纪 80 年代仿 ATLAS 公司的海底地层剖面仪研制了线性调频参量阵海底地层剖面仪,达到了差频(8kHz 左右) 4.5° 束宽,声源级 195dB 左右的性能指标。工作方式为单波束。

德国的 Innomar 公司于上世纪末推出了轻便式参量阵海底地层剖面仪,其原频频率为 100kHz,差频频率为 4~12kHz,差频束宽 3.6° 。工作方式为单波束。

挪威 Kongsberg 公司于本世纪初推出了两款海底地层剖面仪,Topas PS18 和 Topas PS40。Topas PS18 的原频频率为 15~21kHz,差频频率为 0.5~6kHz,4kHz 时声源级为 204dB,差频波束宽度 4.5° (圆形阵);Topas PS40 的原频频率为 35~45kHz,差频频率为 1~10kHz,6kHz 时声源级为 204dB,差频波束宽度 $3^{\circ}\sim 5^{\circ}$ (圆形阵);两个型号均为单波束。

ATLAS 公司于 2004 年推出了最新的参量阵测深、海底地层剖面两用声纳 PARASOUND,其最大差频声源级可以达到 206dB,测深深度可达 10000m,海底地层剖面深度可达 200m。其原频频率范围为 18~39kHz,差频频率范围为 0.5~6.0kHz,典型差频波束宽度为 $4.5^{\circ}\times 5.0^{\circ}$ 。PARASOUND 可以采用 13 个独立波束的发射,据介绍是采用线性调频信号和 Barker 码信号,并且可以允许用户自己编码。但是多波束并不是其成熟功能。

国内中国科学院声学研究所东海研究还曾采用参量阵技术研制了水库堤坝安全检测设备,其应用类似于地层剖面仪。其中采用了电子波束旋转技术,实现了 $\pm 16^{\circ}$ 的波束旋转,但是不具备同时区分不同方向回波的能力,仍然必须等待一个方向探测完成后,再旋转到另外一个方向探测,只不过电子旋转代替了以往国内的机械旋转方式。

(b) 大深度多普勒计程仪

多普勒计程仪提高测速灵敏度需要窄波束;高

频声波在几千至上万米的海水传播中吸收很大,须选择低频;上述两项要求使得参量阵技术是一种较好的选择,因此 20 世纪七八十年代美国研制过参量阵大深度多普勒计程仪,工作深度达 6000m,但是最终没有获得广泛的应用(也许是因为相关测速技术的发展使得低频宽指向性常规声纳得以应用)^[27]。

(c) 掩埋物探测声纳

20 世纪 90 年代是世界各国竞相研制海底掩埋雷探测声纳的时期,当时的欧共体数国曾联合研制试验了参量阵探雷声纳,国内也同期开展了相应的研究。但到目前为止,参量阵技术并没有能够在掩埋雷探测声纳中获得广泛应用,其中有一个重要的原因就是军用声纳对探测效率要求较高,而参量阵声纳的多波束技术还处于探索阶段,目前一般只能以单波束方式工作,因此虽然参量阵声纳常常是实验室和海上进行掩埋物探测试验的首选^[22,23,25,28-30],却没有能够成为成熟的装备。

(d) 参量阵通信声纳

参量阵的低频、窄波束、高带宽、几乎无旁瓣的特性有一定的水声通信应用价值。对于浅海远距离高速率的水声通讯,要求低频以满足作用距离,宽带以满足通讯速率,窄波束以减小浅海界面的多途效应,参量阵技术是一个较好的选择;英国伯明翰大学在上世纪末本世纪初进行了相关的理论和试验研究^[9,31-34]。

(e) 港口警戒声纳

本世纪初,美国 Nuvosonic 公司推出了 SeaScout 港口警戒声纳。其原频频率范围为 21~33kHz,差频频率范围为 4~7kHz,5kHz 时的声源级超过 200dB;差频波束宽度为 $7^\circ \times 8^\circ$,号称作用距离超过 2000m。该声纳采用相控阵发射和接收(收发分置),采用复杂长脉冲信号(PCW 及编码脉冲信号,典型脉宽 100ms,最大脉宽 3S),其与以往参量阵技术的水声工程应用的最显著的区别是采用了相对复杂的信号处理技术,但从其使用方式判断仍为单波束。

5 参量阵技术面临的主要问题及相关研究

从以往的工程应用中可以看出,参量阵技术在水声工程中的最主要、最成功的应用是高分辨率海底地层剖面仪。这个应用最大限度地回避了参量阵声纳面临的两个主要问题:

(1) 转换效率低因而差频声源级不高;

(2) 实现多波束很困难

参量阵的差频声源级低在前面已经介绍过了,而参量阵实现多波束困难主要是工程范畴的问题而不是物理范畴的问题,后文有详细说明。

因为海底地层中的声吸收随频率的升高急剧增加,参量阵因转换效率低带来的差频声源级的损失相比较频率增加带来的吸收损失要小很多,因此在要求小体积、窄波束的情况下,其相对较低的声源级但是频率很低的特点,比起较高声源级但吸收损失很大的高频声波仍然有明显的优势;再者,海底地层剖面仪通常没有多波束要求,垂直向下的单个波束具有最佳穿透效率。

而因为参量阵差频声源级较低、实现多波束困难,其在常规的水下目标探测声纳中则一直没有获得很好应用;同时,国内外针对参量阵的这两个弱点的研究也一直在进行。

5.1 差频声源级的提高

从公式(3)和公式(5)都可以看出来,提高参量阵转换效率,因而提高差频声源级有 3 个可能的途径:(1) 改变介质参数;(2) 提高原频声源级;(3) 提高差频频率。

通过发射波形选择可以使差频声源级相对于两个单频波发射的情况有几分贝的改善,但是实际应用从来都不是采用两个单频信号,因此一般不将这种发射信号形式的选择认为是提高差频声源级的方法。

最早的提高参量阵转换效率的研究都是从改变介质参数入手,如果介质的密度减小、声速减小、非线性参数增大,差频声源级会显著增大。硅橡胶、气泡层作为提高转换效率的手段都获得了实验验证^[35,36],但是显然这两种物质都不可能大范围地出现在探测声纳的前方,因而不具有在水声工程中实际应用的价值。

提高原频声源级也是常用的提高参量阵转换效率的手段,但是原频声源级的提高也是有限制的,即使能够忍受声饱和效应对参量阵性能带来的恶化,声空化也将限制原频声源级的提高。通常情况下声源级仅适合提高到弱饱和的状态(即 SL_c 量级)。

再有一个手段则是提高差频波的频率。这个手段以往较少采用,主要有两个原因:一是提高差频波的频率意味着要提高换能器的带宽,这对于换能器的要求很高;二是提高了差频波的频率,也就增加了其吸收损失,而且波束宽度变窄的比率相比较而言没有更低的差频频率情况下那么显著。

随着宽带换能器技术的发展,提高差频频率变得比较简单后,较高的差频频率、即小下移比(原频和差频频率的比值)的情况越来越多地出现在了国外参量阵技术的水声工程应用中。比如 Parasound 的下移比达到了 6,而 Topas 的下移比达到了 3~4,比以往常用的 10 左右的下移比大大减小了,致使差频声源级可以提高十几分贝,因此声源级大于 200dB 在国外近年的海底地层剖面仪中比较常见。

5.2 多波束参量阵

因为通常的探测声纳对于探测速度都是有一定的要求的,单波束方式较低的探测效率也是参量阵声纳获得更广泛应用的一个制约因素。如果说提高参量阵的转换效率、使差频声源级基本达到水声工程的实用阶段在国外已经基本实现了的话,多波束参量阵技术则是国内外都还在继续探索的课题。

从前面的分析可知,参量阵的低频窄波束特性是在换能器发射的声波的传播过程中产生的,而其声波的接收方式通常为低频宽波束接收(如果采用低频窄波束接收,必然接收阵的孔径很大,失去了参量阵声纳换能器孔径小这一最主要的优点),因此不具有常规多波束声纳通过接收多波束来区分不同方向的信号的能力。

采用电子扫描方式实现参量阵声纳的波束旋转,在国内(如前述中国科学院声学研究所东海研究的水库堤坝安全检测设备)和国外^[37]都有应用,但都不是真正意义上的多波束,因为必须等待一个方向的信号回波到达后波束才能旋转到另外一个方向,否则宽指向性接收时无法区分不同方向的回波信号。只有电子扫描多波束发射的各个方向的波束之间的相关性很小时,宽指向性接收情况下才有可能通过信号相关检测来区分不同方向的信号,实现真正的多波束发射(即不需要等一个方向的信号回来之后再发射另一个方向的信号)。

从信号的空间特性角度来区分不同方向的波束主要可以采用频分和码分的方式,可以有多种信号形式,但是考虑到在复杂的海洋环境下实际探测时对信号带宽、脉冲长度的要求,抑制混响的要求,以及参量阵信号的自解调效应等等因素,很多方法的实际应用效果都受到限制。国内在这方面做了一些仿真和实验研究,研究了包括频分多址和码分多址技术应用于参量阵的多波束发射的可能性^[38-40],但是国内外都没有相关的成熟的工程应用的报道。国外在 Parasound 的性能介绍中提到了 13 个独立波束,其是否是真正的多波束发射、性能如何,从其技术人员的介绍来看并不乐观。采用正交编码的方

式来形成多个发射波束有两个问题:一是高效率地产生双极性码调制的正弦信号,对于参量阵的非线性自解调效应来说并不是很简单,二是因为不同的编码方式占用的是同一个频带,在强混响环境下会增加混响强度,此时的混响强度须按接收的宽波束考虑,而不是如单波束参量阵声纳那样按发射的窄波束考虑。而采用频分的方式来形成多个发射波束也有问题,会大幅度降低单个波束的带宽,对声纳的距离分辨率和抗混响特性都会产生较大的影响。如何在浅海混响环境下实现参量阵声纳的有效多波束发射仍是一个有待深入研究的课题。

6 总结及展望

由于介质的非线性,两个同向传播的高强度声波可产生具有累积效应的同向传播的差频波,此即参量阵技术的基本物理原理。参量阵技术的主要特点是可以用小孔径的换能器产生高指向性的低频声波,且波束基本无旁瓣,较容易实现大带宽。其在水声工程中主要应用在高分辨率海底地层剖面仪上,在掩埋物体探测、大深度多普勒计程仪、水声通讯等应用领域也有相关研究,最近还出现了基于参量阵技术的水下小目标探测声纳。

限制参量阵技术在水声工程中、特别是在水下目标探测中被广泛应用的主要问题是:差频声源级较低以及形成多波束较困难。对这两个问题的研究目前都有一些进展,但仍有待进一步提高,目前能实现的差频声源级比常规线性声纳常用的声源级还低一个量级,在多波束性能上还不能很好地满足浅海高混响环境下的应用。如果在两个问题的研究上能更进一步,参量阵技术将在声纳领域有更好的应用。

参 考 文 献

- [1] Medwin H. *Sounds in the Sea: From Ocean Acoustics to Acoustical Oceanography*[M]. New York: Cambridge University Publishing House, 2005.
- [2] 钱祖文. 非线性声学[M]. 北京: 科学出版社, 1992, 143. Qian Zuwen. *Nonlinear Acoustics*[M]. Beijing: Science Press, 1992, 143.
- [3] Westervelt P J. Parametric acoustic array[J]. *J. Acoust. Soc. Am.* 1963, **35**(4): 535-537.
- [4] Berkta H O. Possible exploitation of nonlinear acoustics in underwater transmitting applications[J]. *J. Sound Vib*, 1965, **2**(3): 435-461.
- [5] Berkta H O, Leahy D J. Farfield Performance of Parametric Transmitters[J]. *J. Acoust. Soc. Am*, 1974, **55**(2): 539-546.
- [6] David T. Blackstock, Thermoviscous Attenuation of Plane, Periodic, Finite-Amplitude Sound Waves, *J. Acoust. Soc. Am*, 1964, **36**(3):

- 534-542.
- [7] 何祚庸, 赵玉芳. 声学理论基础[M]. 北京: 国防工业出版社, 1986, 416.
HE Zuoyong, ZHAO Yufang. Theoretical foundation of acoustics[M]. Beijing: National Defense Industry Publishing House, 1986, 416.
- [8] Pederson T B. A parametric sonar performance calculator[J]. J. Phys. Colloque C8, 1979 (Suppl): C8-137-C8-139
- [9] Kopp L. Potential performance of parametric communications[J]. IEEE J. Oceanic Eng, 2000, **25**(2): 282-295.
- [10] Mellen R H, Moffett M B. Model for parametric acoustic source[J]. J. Acoust. Soc. Am, 1977, **61**: 325-337.
- [11] Novikov B. K, Rudenko O V, Timoshenko V I. Nonlinear Underwater Acoustics[M]. Amer. Inst. of Phys., New York, 1987.
- [12] Baker A C, Berg A M. The nonlinear pressure field of plane, rectangular apertures: Experimental and theoretical results[J]. J. Acoust. Soc. Am, 1995, **97**(6): 3510-3517.
- [13] 李颂文. 不同波束形成的参量阵近场研究[J]. 声学技术, 2001, **20**(2): 81-83.
LI Songwen. Parametric array nearfield of different sound beams[J]. Technical Acoustics, 2001, **20**(2): 81-83.
- [14] Li S. The underwater nonlinear beams and their applications in acoustic imaging and bottom profiling[C]. The proceedings of AUSTRALIAN-CHINESE OCEAN SCIENCE & TECHNOLOGY, Canberra, Nov. 2005.
- [15] Bernière L, Kraus D. Numerical modeling of parametric sonar systems for buried mine hunting applications[C]. UDT Europe 2001.
- [16] 李颂文. 矩形换能器参量阵近场声场研究[J]. 声学技术, 2004, **23**(增刊): 351-353.
LI Songwen. Parametric array nearfield of a rectangular transducer[J]. Technical acoustics, 2004, **23**(Suppl): 351-353.
- [17] Hamilton M F, Tjøta J N, Tjøta S. Nonlinear effects in the farfield of a directive sound source[J]. J. Acoust. Soc. Am. 1985, **78**(1): 202-216.
- [18] Huckabay J M, Wallace R H. Saturation limited parametric sonar source[R]. United States Patent, 1982, 432-474.
- [19] 刘文森. 参量阵辐射的声波在水-沙界面的传播[D]. 中国科学院东海研究站, 硕士毕业论文, 1986.
LIU Wenseng. Acoustic field of parametric array near the water-sand interface[D]. thesis for master degree, Shanghai acoustics lab., Academia Sinica, 1986.
- [20] Pace N G, Ceen R V. Time domain study of the terminated transient parametric array[J]. J. Acoust. Soc. Am. 1983, **73**(6): 1972-1978.
- [21] Dybedal J, Lnvik A, Malmo O. The parametric array source and application of signal processing[J]. ULTRASONICS SYMPOSIUM, 1987, 735-740.
- [22] Chotiros N P, Mautner A M. Acoustic penetration of a silty sand sediment in the 1-10-kHz band[J]. IEEE J. Oceanic Eng. 1997, **22**(3): 604-615.
- [23] Trucco A, Pescetto A. Acoustic detection of objects buried in the sea floor[J]. Electronics Letters, 2000, **36**(5): 1595-1595.
- [24] Caiti A, Bergem O, Dybedal J. Parametric sonars for seafloor characterization[J]. Meas. Sci. Technol, 1999, **10**(5): 1105-1115
- [25] Trucco A. Experimental results on the detection of embedded objects by a prewhitening filter[J]. IEEE J OCEANIC ENG, 2001, **26**(4): 783-794.
- [26] Andebura V A, Donskoy D M, et al, Sound field of a powerful radiator in a parametric regime[C]. Proceedings of 12th ISNA, Elsevier Science Publisher Ltd, London, 1990, 229-239.
- [27] 邹明达, 徐继渝. 船用测速声纳[M]. 北京: 人民交通出版社, 1992, 131-140.
ZOU Mingda, XU Jiyu. Velocity log and its application[M]. Beijing: Renming Jiaotong Publishing House, 1992, 131-140.
- [28] Jacobsen N, Sundin G, Pihl J. System for mono- and bi-static sonar investigation of buried objects[C]. IEEE Proceedings of Oceans Europe 2005, 1147-1150
- [29] Zakharia M E, Pollet C, Regaud E. Combined parametric synthetic and interferometric sonar for the detection of buried objects[C]. IEEE Proceedings of Oceans Europe 2005, 522-526.
- [30] Fawcett J A. Scattering from a partially fluid-filled, elastic-shelled sphere[J]. J. Acoust. Soc. Am, 2001, **109**(2): 508-513.
- [31] Coates R F W, Zheng M, Wang L. "Bass 300 Paracom": a "model" underwater parametric communication system[J]. IEEE J. Oceanic Eng, 1996, **21**(2): 225-232.
- [32] ZHENG M, Wang L S, Stoner R, Coates R F W. Underwater digital communication utilizing parametric sonar with M-ary DPSK modulation[J]. IEE Pmc.-Radm; Sonar Navig, 1999, **146**(2): 213-218.
- [33] Galvin R, Wang L S. Measured channel characteristics and the corresponding performance of an underwater acoustic communication system using parametric transduction[J]. IEEE Proc.-Rudul: Sonar. Nuvig, 2001, **147**(2): 247-253.
- [34] Smith, B V. Conditions for distortionless underwater communications using parametric array[J]. Acoustica, 1995, **81**(1): 161-166.
- [35] Ryder J D. Radiation of difference-frequency sound by nonlinear interaction in a silicon rubber cylinder[J]. J. Acoust. Soc. Am. 1976, **59**(5): 1077-1086.
- [36] HASHIBA K, MASUZAWA H. Effect of Micro-Bubbles in water on beam patterns of parametric array[J]. Jpn. J. Appl. Phys, 2003, **42**(4): 3227-3232.
- [37] Woodward B, Cook J C, Goodson A D, Lepper P A. A phase steered parametric array for sub-bottom profiling[C]. IEEE, Proceedings of Electronic Engineering in Oceanography, Conference Publication No 394, 1994, 77-82.
- [38] LI S. Pre-processing methods for parametric array to generate wideband difference frequency signals[C]. Proceedings of Oceans 08, MTS/IEEE, 2008.
- [39] 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 detectionsystem based on pseudo-noise sequence[J]. Technical Acoustics, 2007, **26**(3): 389-394.
- [40] 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[C]. 中国声学学会 2002 年全国声学学术会议论文集, 桂林, 2002.
LI Songwen, WANG Jinbo. Simulation and experimental research on interference between LFM parametric signals[C]. Proceedings of year 2002 meeting of Acoustic Society of China, Guillin, China, 2002.