

新型换能器及声基阵的发展概况

周福洪 郑士杰 姚青山

(哈船院五系)

一、导 言

近年来,由于新材料及新技术的飞速发展,促使人们研制了多种新型的换能器及声基阵。新型换能器的换能机理均与能量转换材料有关,某些最有应用前途的换能器基本上取决于新材料的换能特性,因此本文将有一定数量的篇幅阐明新型换能材料的工作机理及其重要应用。近期,声学技术在不断地扩展其新的应用范围,尤其声基阵作为水声设备,超声检测仪表及超声医疗诊断器材的重要组成部分,人们设计了满足特种要求的新型基阵,本文将逐一说明其简要工作原理及应用场合。

二、几种新型换能器的机理及使用领域

新型换能器的转换机理基本上有下列几种不同的物理机构形成的,详细情况在下面各节逐一说明。就水声和超声应用场合而言,所包括的频率范围很广,从几赫到数兆赫,所要求的技术和设备也有很大差异。下面我们将略述这些机理的基本特征,并指出每种类型换能器最合适的应用场合。

1. 铁磁流体换能器

铁磁流体换能器是一种新型宽带辐射器。其工作物质是由有机溶液中载有胶状铁氧体悬浮粒所构成。其悬浮微粒的直径约 $20\sim 200\text{\AA}$ 。

当铁磁流体在恒定磁场中,使其有很大的磁化强度 M 值并使它受到大交流磁场梯度作用时,利用多模振动,可得8个倍频程低频宽带辐射。並由于铁流体密度为 $1.2\sim 1.75\times 10^3\text{kg/m}^3$,它的声速为 $1.6\sim 1.8\times 10^3\text{m/S}$,故它的特性阻抗为 $1.75\sim 2.2\times 10^6\text{kg/m}^2\text{S}$,因而它易于和海水匹配。再因它的涡流磁滞损耗均很低。因此它可做成低频宽带的辐射声源,其有效声输出低到10赫左右。如加上均衡器,可制成高保真度声源。

2. 超导换能器

美国海军研究所利用超导材料,研制出大功率的水声换能器,这种换能器的功率密度为2.2千瓦/公斤/千赫左右,而压电陶瓷换能器的功率密度约从8—30瓦/公斤/千赫,平均在20瓦/公斤/千赫左右。因此超声换能器的功率密度要比常规压电换能器的大出百倍。

3. 脉冲莱塞声源

依据苏联L.M.Lyamazhev及英国D.A.Hutchins等人的研究,利用激光脉冲向水中辐射,能使水中产生声脉冲。其产生的机理有下列几种:1)热膨胀;2)爆炸式沸腾;3)表面蒸发;4)介质破裂。在低功率密度,在低于蒸发阈,热膨胀(或称为热弹振荡)是主要的。

当功率密度增加时,引起蒸发,热弹效应仍保持,再增加功率密度,爆炸式沸腾,产生激波,随它产生高频振荡。在高度增加功率密度时,介质破裂发生了,介质破裂是

最有效产生声辐射的机制，虽然在理论上来证明在水中辐射的关系式是很困难的，但从实验上来演示，用一个Q突变技术的红宝石激光器，向水中辐射一个30ns光脉冲，它能激起接近于 5×10^4 kpa的峰值声压的声源。D.A.Hutchins 想利用激光脉冲热弹激励的声脉冲作为声呐的辐射源。

4. 新型稀土元素磁致伸缩合金换能器

最有前途的稀土元素铁合金磁致伸缩材料有。TbFe₂、Tb_{0.15}Ho_{0.85}Fe₂及Tb_{0.3}Dy_{0.7}Fe₂，Tb_{0.74}Dy_{0.26}Fe₂或Tb_{0.27}Dy_{0.73}Fe₂。在室温条件下，稀土元素铁合金的饱和磁致伸缩应力比镍大50—60倍，并且在较大的交变磁场下(极化场为2千奥斯特)，其应变与交变磁场仍为线性关系。2千奥斯特极化磁场可用永久磁钢产生，TbFe₂在1千奥斯特的交变磁场激励下，其磁致伸缩应力比压电应力大12.5倍，即大22分贝。特别对于三元合金的机电耦合系数大于镍，且有较高的电阻系数。因此，它是有发展前途的大功率磁致伸缩换能器。不过为了减少涡流损耗，常将镍做成薄叠片型，而稀土合金难以做成薄叠片。当它做成自由溢流式环形换能器使用时，它可以在任何深度的水下工作。

5. 宽带压电换能器

通常压电换能器的辐射声压频率特性，主要取决于压电材料的机械Q_m值，和来自于机械安装以及来自于辐射阻抗负载产生的结果。倘若我们采用多组基元，每个基元的谐振频率稍有差别，但它们各自选择在感兴趣的工作频带内。

我们以一个三基元为例，三基元的频率(谐振)稍有不同，而中间频率元件的相位和另两个相反，其Et(f)及Bt(f)如图(图1)所示。

从上图可知，可得稍低于6的有效Q值。

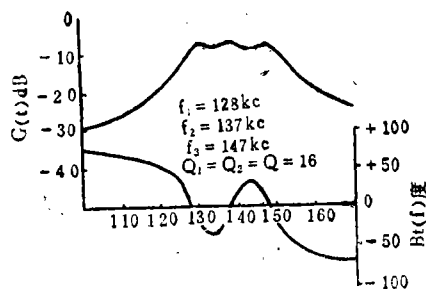


图1

照此分析可推广m个谐振频率换能器的组合。

6. 光纤水听器

光纤水听器是一种新型的水下检测器，单模干涉型水听器具有最佳的接收灵敏度，约-160dB(参考级为1V/μpa)。适合于声检测的干涉型水听器的结构有三种：Mach—Zehnder型，Fabry—Perot型和圆环谐振型。它们各有优缺点。Mach—Zehnder型能工作在低相干源的情况，可以利用长光纤以提高灵敏度，但需要一个声敏感度不高的参考光纤和两个光纤耦合器，它导致复杂的水下设计。Fabry—Perot型，省去了耦合器及参考光纤，仅用一根单模光纤，光纤两个端面镀上一层半反射的介质膜，这样，光纤自身就构成一个(F—P)的共振腔。外界扰动可以改变腔的光学长度，从而产生对干涉条纹的调制，但是对莱塞二极管的高反向反射将导致源的不稳定性，此外还要求光源有很好的相干性。单腔环形谐振型，其结构如图2所示。

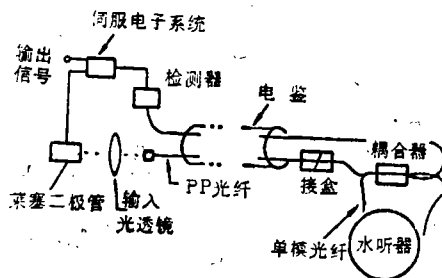


图2 环形谐振水听器

其单腔环形谐振器所产生的反向反射很低，如果利用高相干和稳定的光源，如单模氦氖激光器，它将提供高灵敏度的接收特性，从50赫到5千赫将具有约-160dB(1V/ μ pa)的灵敏度。

7. PVDF水听器及传感器

压电高聚物，特别是PVDF(聚偏氟乙烯)，它是一种半结晶薄膜，具有卓越的接收压电特性，低密度，机械抗挠性及有与水介质密切匹配的特性阻抗，因此可用作水听器。

PVDF一般由一二氟乙烯自由基聚合而成。PVDF中晶体占50%，其晶型有四种异构体，即 α 、 β 、 γ ，极性 α 或极性 δ 。 α 相由熔体结晶而成，单胞是非极性， β 相是产生压电性的相，在所有温度下均有形成，且有垂直于链方向的强偶极矩(7.0×10^{-3} cm)，由熔体结晶的 α 相薄膜受机械形变而构成， γ 相由溶液结晶形成，机械形变易使之转变为 β 相，是 α 态与 β 态在分子内的结

电介常数	数值 10~13	单位
密度	1.78	10^3 kg/m^3
声速	2.1~2.3	10^3 m/sec
压电常数 d_{31}	20	$10^{-12} \text{ m/Newton}$
压电常数 d_t	-12.7	$10^{-12} \text{ C/Newton}$
g_h	-63	$10^{-3} \text{ Vm/Newton}$
比阻抗	3.8~4.1	10^6 kg/secm^2

合。 δ 相是 α 相经强电场处理产生极性 α 态。在交替链中形成偶极矩。PVDF的极化是使它得到铁电活性的必要措施。其办法是将薄膜浸入油中，加热到100℃，然后在约80mV/M的电场下处理。经极化处理的25 μ m双轴取向薄膜特性为由于PVDF的声特性阻抗低，压电常数 g 高，极适宜用作水听器的传感材料。马可尼公司制成的 $6 \times 25 \mu\text{m}$ 的叠层水听器，用100个这样的元件做成了360°全向扫描声纳(警戒声纳)，方位分辨率为1.1°，距离分辨率可达0.1m。超声传感器是频率高于0.5MHz~20MHz的理想传感材料。将经过极化的PVDF粘在硅片上，形成MSFEJ放大器阵列，已制成34元的线性阵，带宽6兆赫，动态范围70dB的医疗摄像仪。

8. 复合材料换能器

复合材料是将压电陶瓷和高聚物按一定的连通方式，一定的体积或重量比例和一定空间几何分布复合制成的。经过恰当的连通方式的设计，已经研制出多种压电复合材料。它有优越的性能：有比PZT高一到二个数量级的 g 值，有低的密度，意味着能遇水及生物组织有良好的声匹配，且能制成质轻、柔软易弯曲，可作成所需要的形状，机械 Q 值低，频带宽；抗振动耐机械冲击；有高的 K_t/K_p 比，适用于超声检测中作厚度模辐射的换能器。

表1列出了几种有代表性的压电复合材料的性能参数，为了便于比较，将PZT-5

表1 几种材料参数

材料类型	$P \times 10^3 \text{ kg/m}^3$	ϵ_{33}/ϵ_0	$d_{33} \times 10^{-12} \text{ C/N}$	$g_{33} \times 10^{-3} \text{ Vm/N}$	$d_{31} \times 10^{-12} \text{ C/N}$	$g_{31} \times 10^{-3} \text{ Vm/N}$	$d_{32} \times 10^{-12} \text{ C/N}$
PZT5	7.8	1800	374	25	32	2	64
$\text{Pb}_2\text{Nb}_2\text{O}_3$	6.0	225	85	42.5	57.6	34	2300
1-3PZT/环氧	1.37	100~300		97	59.7	69	4100
3-3PZT/硅橡胶	3.3	40	95	280	35.6	30	2800
3-1PZT/环氧		410	275	76			3500
3-2PZT/环氧		360	290	90			17600

有关参数一并列于表中。

在复合材料中，由两个分量相组成的复合材料可有许多连通性。通常以第一个数字代表压电相的连通维数，第二个数字代表聚合物维数图3、4画出了几种典型的情况

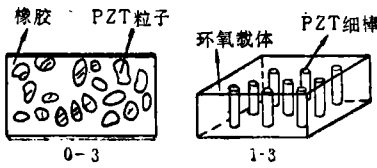


图3

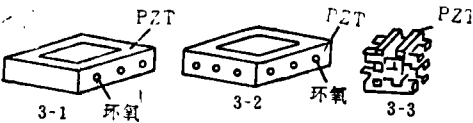


图4

3—1压电复合材料是在PZT陶瓷片上打孔并在孔内充以聚合物。由于垂直于极化方向引入了一维环氧棒，从而减小了 g_{31} 和 g_{32} ，结果使 $g_A = 70 \times 10^{-3} \text{ v.m/N}$ 而比PZT5

的 $g_A = 2 \times 10^{-3} \text{ v.m/N}$ 大了35倍，可制作水听器。

1—3型可制作柔软易弯曲的医疗诊断用的超声换能器。一个直径19mm，厚0.6mm载体有聚胺酯1—3型复合材料，片中细棒直径有0.45mm，相距周期为0.9和0.73mm，PZT体积分数为20~30%，测出 $\rho = 2.29 \text{ g/cm}^3$ ，相对介电常数为238， $d_{33} = 320 \text{ PC/N}$ ，以空气为背衬材料，共振频率为2.5兆赫，当以10伏的电压激励时，对于50 Ω 的输入阻抗，可得2.4V的最大反向信号，该材料用加热方法，可使它变成聚焦型换能器。

9.含金属无定形体合金磁致伸缩材料的水听器

含金属无定形体磁致伸缩合金是高铁含量磁致伸缩材料，它的最大优点是价格低，且有高的机电耦合系数，约0.9，它的接收灵敏度比镍大约大50倍，比PZT的大4.5倍，它适合作水听器。

它的组成及特性如表2所示。

表2 组成及特性

特 性	符 号	$\text{Fe}_{81}\text{Bi}_{13}\text{Si}_4\text{C}_2$	$\text{Fe}_{80}\text{BO}_{20}$	$\text{Fe}_{80}\text{P}_{16}\text{C}_3\text{B}_1$
饱和磁通密度	$B_s(\text{T})$	1.50	1.60	1.48
剩磁饱和	$B_r(\text{T})$ B_s	0.8~0.9	0.51	0.4
矫顽场	$H_c(\text{A/m})$	<4	~15	
居里点	$T_c(\text{K})$	693	647	565
饱和磁致伸缩	$\lambda_3(10^{-6})$	30	31	29
密 度	$\rho(\text{kg/m}^3)$	7100	7400	7700
杨氏模量	$E(\text{GPa})$	150	172	138
电阻率	$\rho(10^{-8}\Omega/\text{m})$	130	130	

利用它做成加筋薄膜形圆管形水听器，将它们组合成线性列阵可作为拖曳阵。

三、几种新型的基阵

10.稀疏阵

为了改善被动式声纳角度分辨率和提高

信噪比的增益，通常增大基阵及增加基元个数，其水听器的间隔大约是工作频带中最高频率在水中波长的一半，其理由是避免空间的栅辨效应，通过复数加权来控制波束在空间扫描。在“总和平方”处理器输出端的均方功率输出可写成：

$$R = \sum_i^N \sum_j^N R_{ij}(C_{ij}) \quad (1)$$

其中 $R_{ij}(C_{ij})$ 为第 i 个和第 j 个水听器之间的互相关函数的系数。

由于在信号和噪声场中呈现出空间相关系数,就产生了基阵的指向性,其信号取自待测目标所发出总信号场之一部分,因此整体基阵系表现得像一个衍射光栅,亦即产生一个在基阵处声场的空间付里叶变换。被动系统中的基阵有二个主要功能:(1)通过基阵增益提高信噪比,(2)提供方位分辨率。基阵的分辨率基本上由基阵具有多少个波长数的几何尺寸来确定。特别是运用自适应基阵处理的方式进行束控可以提高一些分辨力,但是另一个提高基阵分辨率的简单办法是利用稀疏阵技术。关系式(1),基阵输出仅包含在基阵各对水听器之间相互函数系数的概算,如果信号和噪声场在空间中稳定的,那么这些系数仅依赖于各对水听器相隔的距离,而不随它们的绝对位置而变。因此基阵输出可通过每对水听器输入的相关系数的测量值来综合。于是基阵输出可改写成

$$R_{\text{稀疏}} = NR_0 + \sum_{n=1}^{N-1} 2(N-n)R_n \quad (2)$$

这些下标 n 是基元下标之差($i-j$)

这种稀疏阵的优点,可由下列事实中看出,其基阵输出可以由 n 个相关系数的信息来确定。稀疏阵概念的基础,通常其 n 值常小于满阵基元 N 的个数。举例说明一个18基元相隔半波长的等间距的均匀阵可以由一个七基元,它们基元间距为1:1:4:4:4:4:3的稀疏阵来代替。因此它可以大量节省基元个数,但它的几何尺寸较大,而定向精度仍很高,且其增益减少不多。

众所周知,一个总和平方基阵处理器(基阵具有 N 个基元时)

$$\text{其输出信噪比} \left(\frac{S}{N}\right)_{\text{out}} = N^2 BT (\bar{S}/\bar{N})^2 \quad (3)$$

B 为输入带宽, T 为积分时间, $\bar{S}$, $\bar{N}$ 为单个基元接收信号和噪声的均方功率。对于稀疏阵,其输出信噪比(当稀疏阵基元仍相当多,亦为 N 时)

$$\left(\frac{S}{N}\right)_{\text{out, 稀疏}} = \left[\frac{3N^2}{8} + \frac{3}{2}N\right] BT (\bar{S}/\bar{N})^2 \approx \frac{3N^2}{8} BT \left(\frac{S}{N}\right)^2 \quad (4)$$

其增益为均匀间隔阵相同个数基元阵的 $\frac{3}{8}$ 。

11. 随机阵

产生随机阵的原因是:在大型基阵中,由于基元中存在着相位和振幅的不一致性所形成随机分布。J. Ruge应用统计理论研究了它们对主瓣束宽,旁瓣级,增益有多大影响,虽然他研究的是周期阵,但他所建立的这套方法为研究随机阵的理论奠定了基础。Seiuberg对随机阵理论已作了系统的论述,下面扼要地说明其基本理论:

(1) 描述随机阵特性的几个统计参量

(a) 声压分布图函数及其系综平均值(期望值函数)

$$\text{声压分布图函数为 } F(\vec{u}) = \sum_{n=1}^N a_n e^{jk\vec{x}_n \cdot \vec{u}} \quad (5)$$

a_n 为基元的振幅, k 为波数, $\vec{u} = (\sin\theta - \sin\theta_0)$, θ 有入射声线方向。 θ_0 为主瓣方位, $\vec{x}_n$ 为基元位置,它是随机量,故 $F(\vec{u})$ 为随机函数。

因为在主瓣方向 $\theta = \theta_0$, $F(0) = N$, 故归一化函数(令 $a_n = 1$)

$$F(\vec{u}) = \frac{1}{N} \sum_{n=1}^N e^{jk\vec{x}_n \cdot \vec{u}}$$

$$\text{系综平均值 } \overline{F(\vec{u})} = \frac{1}{N} \sum_{n=1}^N e^{jk\vec{x}_n \cdot \vec{u}} \quad (6)$$

(b) 功率图函数及其系综平均值(期望功率图)

$$\text{功率图函数 } b(\vec{u}) = |F(\vec{u})|^2 = \frac{1}{N^2} \sum_{n=1}^N \sum_{m=1}^N e^{jk(\vec{x}_n - \vec{x}_m) \cdot \vec{u}} \quad (7)$$

$$\text{系综平均值 } \overline{b(u)} = \frac{1}{N^2} \sum_{n=1}^N \sum_{m=1}^N \overline{e^{jk(\vec{x}_n - \vec{x}_m) \cdot \vec{u}}} = |F_0(u)|^2 \left(1 - \frac{1}{N}\right) + \frac{1}{N} \quad (8)$$

其中 $|F_0(u)|^2 \left(1 - \frac{1}{N}\right)$ 为在主瓣附近的值, $\frac{1}{N}$ 为远旁瓣区的值。

(c) 平均旁瓣级, 它由下式定义

$$\text{平均旁瓣级} = \frac{\text{平均旁瓣功率}}{\text{主瓣功率}} = \frac{N}{N^2} = \frac{1}{N}, \text{ 取对数, 并用 ASL 表示}$$

$$\text{即 } \text{ASL} = 10 \log_{10} \left(\frac{1}{N} \right) \quad (9)$$

(d) 声压图函数的方差 $\sigma_F^2(u)$

$$\sigma_F^2(u) = \overline{(F(\vec{u}) - \overline{F(\vec{u})})^2} = \frac{1}{N} \left(1 - |F_0(u)|^2 \right) \quad (10)$$

由上式可知, 在主瓣上, $u=0$, $F(u_0)=1$, $\sigma_F^2=0$, 波束在这处无起伏。在远旁

瓣区, $F_0(u) \rightarrow 0$, $\sigma_F^2 \rightarrow \frac{1}{N}$, 其声压图起伏

的标准方差 $\sigma_F = \frac{1}{\sqrt{N}}$, 与阵元个数 N 有关。

(e) 旁瓣高低分布的渐近理论

随机阵旁瓣高低不平, 它满足一定的概率函数 $p(F)$

$$P(F) = 2 |F| e^{-\frac{|F|^2 - |F_0|^2}{\sigma_F^2}} I_0 \left(\frac{2 |F_0| |F|}{\sigma_F^2} \right) \quad (11)$$

I_0 为零阶第一类虚变量 Bessel 函数。在远旁瓣区, 它满足瑞利分布

$$P(F) = 2 |F| e^{-\frac{|F|^2}{\sigma_F^2}} \quad (12)$$

任取一旁瓣可能超过 A_0 (振幅) 的概率

$$\text{为 } \int_{A_0}^{\infty} P(A) dA = \alpha$$

任取 n 个旁瓣都不超过 A_0 的概率为 $(1-\alpha)^n$ 。

在旁瓣区中, 任取 n 个旁瓣没有一个比旁瓣幅度超过给定值 A_0 的概率称置信级, 以 β 来表示

$$\beta = (1-\alpha)^n = \left(1 - e^{-\frac{A^2}{N}} \right)^n \quad (13)$$

我们又定义 $B = \frac{A^2}{N} = \frac{\text{给定 } A \text{ 的旁瓣功率}}{\text{理论上平均旁瓣功率}}$

(14)

从上式我们又可见, B 代表允许最高的旁瓣功率与平均旁瓣功率之比。

(13) 可写成

$$B = -\ln \left(1 - \beta^{\frac{1}{n}} \right) \quad (15)$$

当给定 n , β , 就确定最大功率旁瓣与平均旁瓣功率之比。

B 的无偏估计值 B_p 为最高旁瓣功率的峰值与理论平均旁瓣功率之比值。

对它取分贝数用 PSL 表示, 则

$$\text{PSL} = 10 \ln \left(\frac{Bp}{N} \right) \quad (16)$$

依据上述研究, 我们得出下列结论: ①, 随机阵的主瓣束宽 θ_{-3dB} 接收于常规参数阵 (同尺寸) 的主瓣束宽 $\theta_{-3dB} = K \left(\frac{\lambda}{L} \right)$ 。②,

随机阵的平均旁瓣级 $\text{ASL} = 10 \log_{10} \frac{1}{N}$, 随

$$P_r(\gamma_n, \theta_n, Z_n) = \begin{cases} \left[\pi \left(\frac{D}{2} \right)^2 \tau \right]^{-1}, & -\frac{T}{2} \leq Z_n \leq \frac{T}{2}, 0 \leq \gamma_n \leq \frac{D}{2} \\ 0 & \text{其它} \end{cases}$$

$$\vec{x}_n = \{x_n = \gamma_n \cos \theta_n, y_n = \gamma_n \sin \theta_n, z_n = Z_n\}$$

$$\vec{k} = \begin{cases} u_x = k(\cos \theta \sin \phi - \cos \theta_0 \sin \phi_0), \\ u_y = k(\sin \theta \sin \phi - \sin \theta_0 \sin \phi_0), \\ u_z = k(\cos \phi - \cos \phi_0) \end{cases}$$

$$F(u) = N \frac{\sin u_x \frac{T}{2}}{u_x \frac{T}{2}} \frac{2J_1 \left(\sqrt{u_x^2 + u_y^2} \frac{D}{2} \right)}{\sqrt{u_x^2 + u_y^2} \frac{D}{2}}$$

主瓣水平束宽 $\theta_{-3dB} = 6.8^\circ$, 主瓣垂直束宽 $\theta_{-3dB} = 11.5^\circ$

全空间范围内波束数 $M = 4\pi \frac{D}{\lambda} \frac{T}{\lambda} = 4\pi \times 12 \times 6 = 804$ 个

$$\text{ASL} = 10 \log_{10} \frac{1}{N} = -10 \log_{10}(90) = -19.6 \text{ dB}$$

12. 声全息换能器基阵

随着海洋开发事业日益发达, 希望能研究一种可在浑浊水中的显象装置, 在浑水中, 超声波的衰减比电磁波和光波的较少, 且海水的扰动和浑浊对声全息的影响亦较小, 而目标信息较多, 所以采用声全息原理受到人们的重视。

应用声全息的水下观察装置, 只在视界内发射声波, 和迅速无畸变地记录由物体在空间反射, 散射声的信息。只在视界内发射声波, 就必有旁瓣小而少的电声换能器。检测散射波信息的方法采用换能器对声压的振幅和相位进行线性检波。因基阵的各元件间

机阵最高旁瓣功率的峰值与平均旁瓣功率之比值 $\text{PSL} = 10 \ln \left(\frac{Bp}{n} \right)$, 经验规则 $\text{PSL} = \text{ASL} + 10 \text{ dB}$ 。

我们举例表明上述论述, 设有一个圆盘形声纳浮标随机阵, 直径为 D 厚度为 T , 均匀分布 $N = 90$ 个浮标。它是一个完全的随机阵。每个阵元互不相关, 概密函数相同

的信号产生泄漏会引起图象品质恶化, 必须使信号泄漏尽量减少。

根据上述原理, 日本试制出一台应用多波束扫描法的声全息水下观察装置的收, 发换能器基阵。考虑到因浑浊水引起声波衰减的增加, 海中噪声及整体基阵大小等因素。该装置采用 4×4 的稀排列发射平面阵和 32×32 的密排列接收平面阵, 它能得到 128×128 的分辨像点, 为得到 0.34° 的方位分辨率, 接收基元的间隔为 1 cm , 发射基元间隔为 32 cm 。发射基元采用特种结构型式的换能器。其共振频率约 280 kc , 使用频率为 200 KC , 灵敏度偏差在 1 dB 之内, 用幅度束控, 指向性的全开角为 44° 时, 旁瓣可抑制在 -29 dB

之下。接收器阵元件为短圆柱形，它放置在隔声材料上，可防止灵敏度降低。并把灵敏度偏差控制在1.16dB以内。用插座提高了可靠性，而且元件间串音可控制在-50dB以内。发射接收时总合动态范围最大可达55dB。用声全息方法对水下的图象质量影响极小。

13. 自适应基阵

自适应处理是对非平稳状态进行最佳处理的一种有效方法。把这种方法用于主动式声纳，其信噪比可提高10~15dB，而被动式能提高15dB。在超声医疗中的心音分析亦应用了自适应技术。

下面我们着重提供为声纳中应用所述及的那些自适应基阵算法，并为产生这些算法而引进一些时间-频率域中和阵元一波束空间中实时检测的一些方法。

最佳阵处理实质上是一个最佳多通道滤波器。在理想条件下，信号的互功率谱密度矩阵可表成双积式，此时对输入数据用矢量加权。在有扰动条件下，信号的互功谱密度通常用矩阵加权，在某个准则下，通过合成处理器性能的最佳化能获得滤波问题的解。最佳阵处理技术可分成以下几类：

1. 理论条件下的处理：①性能最优化技术，②最大熵技术，③本征值分解技术，④零点控制技术。2. 扰动条件下的处理：匹配基阵技术

1) 理想条件下性能最优化技术

最佳处理器的方框图如(17)所示

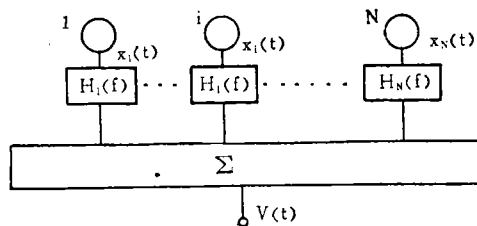


图5 最佳阵处理器

(a)非约束最优化：最大信噪比(MNSR)和最小均方误差(LMS)准则是流行的，产生

的滤波器矢量分别为：MNSR： $H(f) = \phi_a^{-1} S^*(f)$ ；LMS： $H(f) = \phi_x^{-1} x(f) \cdot \phi_{xx}(f)$ 。式中 $\phi_a(f)$ 为噪声功率谱密度矩阵。 $S(f)$ 为信号谱矢量， $\phi_x(f)$ 是信号加噪声功率谱密度矩阵， $\phi_{xx}(f)$ 是输入过程和“期望”信号的互相关矢量是付里叶变换。

(b)约束型最优化，实质上是 $A \cdot H \cdot Nuttall$ 的最小方差不失真监视器。它的滤波器矢量

$$H(f) = \frac{\phi_x^{-1}(f) E_0(f)}{E_0'(f) \phi_x^{-1}(f) E_0(f)} \quad (17)$$

其中 $E_0(f)$ 为与方向 θ_0 及频率 f 有关的方向矢量。而上标“'”表示共轭转置矢量。

(c)最大似然准则。用最大似然(ML)准则所得的滤波器，其滤波器矢量的形式同(17)式，因此这准则有一个潜在的约束存在。当ML滤波器后级联一个标量维纳滤波器时，其结果就是LMS处理器。

2) 最大熵技术

对于旨在为进行判决而得到整个声场的方向性成份和频率成份的最好可能的估计。对被动声纳站尤为适用。这种技术最初是有功率谱估计引入的，它做推广到用作统一的空间-频率多通道信息处理。这种方法依据：在空一时协方差矩阵中包含着确定噪声场分布估计的可用信息，而且在原理上可以用逆变换，声场分布的最大熵估计可通过取每个噪声分量的平均熵的最大值得得，

最大熵技术的吸引力在于它在多目标环境中给出较好的分辨力。

3) 本征值分解技术：

通过将背景协方差矩阵分解为一些用基本波前的本征矢量来表示的正交分量，它能够在检测弱目标时，抑制干扰源和获得近似独立于背景中存在的可分解不相关波前之相对电平的方向响应。分解后的波束图有某些重要特征。首先，可舍去其中一些波束，而只留下一部分占支配地位的本征值，因为空

相干分量的信息常集中在较大本征值周围。

4) 在扰动条件下的匹配处理

由于在传播介质或接收装置中有扰动,使平面波目标信号的假设条件不再成立时,当人们希望使处理器匹配某一任意信号时,采用对输入数据矩阵加权的匹配基阵技术就很有用。此时最佳权矩阵可用最大增益或约束最小功率准则来得到。

14. 拖曳线列阵

一般舰壳声纳要发现深水散射层及温度跃变层下面的潜艇较为困难。因海水存在温跃层便产生声影区,也就是舰壳声纳反潜搜索的死角。当拖曳线阵放入等温层就避免上述情况,并且可放在声纳作用距离最佳深度,可利用各种声波的传播条件;由于与本舰相隔一大段距离,本舰噪声影响甚小;因拖曳线长达数公里,例如美国的萨尔塔斯系统就是一种长达5km的管状声纳。它上面安装着许多个具有能测到潜水艇发出的各种“音响”的高性能的特殊水听器。这种拖曳声纳比舰壳声纳有大约10倍的探测能力,可探测到半径400—500公里范围内的音响。以时速3海里的慢速航行的监视舰在舰尾拖着这种声纳,搜索音响情报。通过使用通讯卫星的军事通讯网,将收集到的音响情报传到陆上中心,用电子中心计算机分析;然后同来自海底的“固定音响监测系统”、反潜侦察机以

及其他舰艇等方面的情报对照核实后,供反潜作战使用。线列阵有个缺陷,它不能分辨目标在线列阵的左方还是右方,亦即它有左右模糊性的缺点。依据Williams、Hodgkiss, Jr 的研究。他们建议采用拖曳舰进行机动的运动,使声源改变相对于基阵空间方位所发生的变化来分辨声源的方位。但采取这种机动运动需化费几分—十几分钟时间,搞不好还会丢失目标。特别是在作机动运动时,阵形亦将发生扰动和变化,阵形扰动要使波束加宽及增大测距误差。例如一条具有32个基元的线阵,基元等间隔(7.5m),共长232.5m,在运动中形成一个具有6m弓高的弧形阵,在50Hz时,它将使波束展宽3倍,另一个例子,对于一个800m长的线阵,在运动过程中形成3m的弓形弧阵,在声源离基阵10km处,它将有20%的测距误差,最近拖曳阵,是利用光纤水听器构成的被动声学阵。它给声纳带来一次技术变革,它能克服常规压电换能器的不足。它的优点是体积小,重量轻,有柔韧性,可以形成非常规的弯曲形状。抗电磁干扰能力强,工作频带宽,而且灵敏度高,动态范围大;又具有与光纤遥测技术的兼容性。美国海军水下系统中心和美国海军研究所对光纤拖曳阵被动声纳进行了可行性研究和样机试验。表明光纤水听器应用了拖曳阵是可行的。

国际物理声学讨论会在南京举行

一九九〇年八月一日至八月四日在南京召开了国际物理声学讨论会,讨论会由中国声学学会、南京大学和江苏省声学学会联合主办并受到中国自然科学基金会的资助。来自美国、法国、苏联和中国的物理声学专家共90名代表出席了会议,会议收到论文八十篇,其中特邀报告五篇,评述有关孤子和混沌的水槽实验进展和光声学的进展。提交讨论会的报告触及了物理声学的各个分支,如非线性声学在各种媒质中的传播特征和效应,超声场的分析研究,特别受到与会专家热烈讨论的是光声学和热波。这一专题的论文数约占全部的三分之一。

会议期间,与会代表参观了南京大学声学所,对南京大学声学所在声学研究中取得的成就获得了深刻的印象。

(编辑部)