

宽带换能器基阵的计算机辅助设计

杨瑞科 陈启敏 魏忠仁

(陕西师范大学物理系、声学所 西安·710062)

1 前言

换能器(或基阵)是超声及水声设备中必不可少的关键部件,且是声学检测设备区别于其它设备的主要标志。由于换能器向着大功率、高指向性、宽带等方向发展,单个换能器已无法满足综合性的要求,必须采用换能器阵来达到近代声学仪器的技术指标。基阵是由许多高效率、高灵敏度和一致性较好的换能器构成,在辐射时,它能把声能尽可能地集中到某一指定方向上,而在其它方位上尽量减少,即能得到较优的波束分布,使主瓣尽量变窄,而旁瓣尽可能的压缩。在接收时,它能抑制干扰,能增强待测信号能量,减少有用信号的损失,即具有较好的指向性及较宽的带宽。

目前,对于频率相同的阵元构成的基阵换能器的研究已经较为成熟^[1],几种新型的换能器阵,如参量阵、乘积阵、相关阵及自适应阵等,有些正在研制,而有些已经采用^[2]。本文所要介绍的是一种风格完全不同的基阵换能器的设计,这种方案设计出的换能器具有较宽的频率宽度,较优的指向特性,并且可根据应用的要求,设计出合乎要求的宽带基阵换能器来。

2 理论与方法

2.1 基阵的指向特性

设非均匀宽带基阵是由 N 个频率分别为 $f_0 \sim f_{N-1}$ 的无指向性的阵元沿一直线按一定的条件排列而成的阵,如图1。那么,它在远场空间某一点 $R(r, \theta)$ 处的声压指向特性利用叠加原理可以求得。第 n 个阵元在 $R(r, \theta)$ 点的声压可表示为:

$$P_n = \frac{P_0}{r} A_n e^{-jk_n r} e^{+jk_n d_n \sin \theta} \quad (1)$$

其中 $n=0, 1, \dots, N-1$; A_n 为幅度加权系数; P_0 为0号阵元辐射面处的声压; k_n 为第 n 个阵元的波数($k_n = 2\pi/\lambda_n$), d_n 为第 n 个阵元距第0号阵元(即坐标原点)的距离。此宽带阵的阵元分布情况如图1所示(关于原点对称,因此分析时只取一半)。利用叠加原理, $R(r, \theta)$ 点处的总声压为:

$$P = \frac{P_0}{r} \sum_{n=0}^{N-1} A_n e^{-jk_n r} e^{-jk_n d_n \sin \theta} \quad (2)$$

若选择复加权系数使得下式成立:

$$A_0 e^{-jk_0 r} = A_1 e^{-jk_1 r} = \dots = A_n e^{-jk_n r} \\ = \dots = A_{N-1} e^{-jk_{N-1} r}$$

则声压表达式可写为:

$$P = \frac{P_0}{r} A_0 e^{-jk_0 r} \sum_{n=0}^{N-1} e^{-jk_n d_n \sin \theta} \quad (3)$$

进行归一化处理,则可得到非均匀宽带线阵

收稿日期: 93-12-7

的声压指向特性:

$$D(r, \theta) = \frac{1}{N} \sum_{n=0}^{N-1} e^{-jk_n d_n \sin \theta} \quad (4)$$

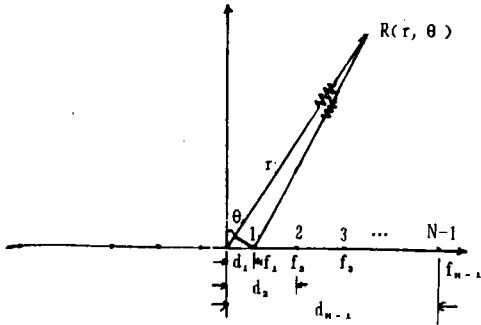


图1 非均匀宽带阵元分布图

2.2 设计方法简介

按照所要求的带宽选定各阵元谐振频率为 f_0, f_1, \dots, f_{N-1} , 从而得到相对应的 $k_0 \sim k_{N-1}$ 。再根据所要求的指向特性, 而得到一组 $D'(r, \theta)$ 值 (即以确定的角度 $\Delta\theta$ 对 $D'(r, \theta)$ 进行采样)。令 $D'(r, \theta) = D(r, \theta)$ 的对应项相等, 这样, 可以得到一组非线性方程, 借助于计算机来解这个方程组, 从而可求得一组阵元分布坐标 d_n 的值。而按这种方法得到的基阵满足设计所要求的带宽及指向特性。

2 模拟设计

3.1 对均匀线阵指向特性的模拟

对于 N 个阵元 (由于基阵关于原点对称, 因此取一半。) 的均匀线阵的指向特性可以表示如下 (线阵阵元是同频率 (f_0)、等间距 (d_0) 的):

$$D_1(r, \theta) = \frac{1}{N} \sum_{n=0}^{N-1} e^{-jk_0 n d_0 \sin \theta} \quad (5)$$

令 $D_1(r, \theta) = D(r, \theta)$ 对应项相等, 则:

$$d_n = \frac{k_0}{k_n} n d_0 = \frac{f_0}{f_n} n d_0 \quad (6)$$

从 (6) 式可以看出, 对线阵模拟较简单, 只要确定一组 f_n , 就可得到与均匀线阵指向特性完全相同的频率范围为 $f_0 \sim f_{N-1}$ 的非均匀阵的布阵方案 (d_n) 及阵元间距 ($\Delta d_n = d_n - d_{n-1}$)。

如要获得带宽为 2.5~5.0MHz, 具有均匀线阵 $f_0 = 5.0$ MHz, $d_0 = 0.3$ mm 指向特性的非均匀阵, 可选基阵各阵元频率 (MHz) $f_0 \sim f_5$ 分别为: 5.0, 4.5, 4.0, 3.5, 3.0, 2.5; 分别代入 (6) 式可求得 d_n 的值, 即 $d_0 \sim d_5$ (mm): 0.000, 0.333, 0.750, 1.286, 2.000, 3.000。因此, 将求得 d_n 值再代入 (4) 式, 就可得到带宽为 2.5~5.0MHz 的宽带非均匀阵的指向特性 $D_2(r, \theta)$ 。其指向特性与均匀线阵的指向特性几乎完全相同。在表 1 中每隔 $\Delta\theta = 2^\circ$ 给出了均匀线阵指向性函数 $D_1(r, \theta)$ 的值与模拟线阵 $D_2(r, \theta)$ 的值, 从各 θ 点上的值可以看出它们相当接近。它们的指向性波束分布图均可用图 2 (a) 表示。

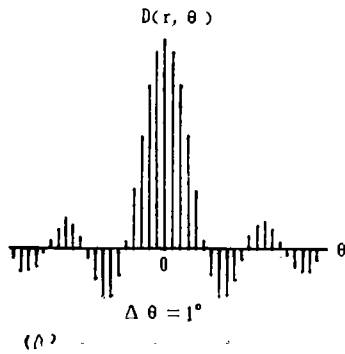
表1 指向性函数 $D(r, \theta)$ 以 $\Delta\theta = 2^\circ$ 采样的前10个值

$D_1^0(r, \theta)$	1.0000	0.7761	0.2784	-0.1292	-0.2127
	-0.0435	0.1213	0.1088	-0.0264	-0.1079
$D_2^0(r, \theta)$	1.0000	0.7763	0.2792	-0.1281	-0.2118
	-0.0436	0.1199	0.1064	-0.0286	-0.1088
$D_1^1(r, \theta)$	1.0000	0.7234	0.1822	-0.1231	-0.0743
	0.0351	-0.0078	-0.0716	0.0187	0.1488
$D_2^1(r, \theta)$	1.0000	0.7235	0.1827	-0.1223	-0.0735
	0.0350	-0.0095	-0.0740	0.0195	0.1588

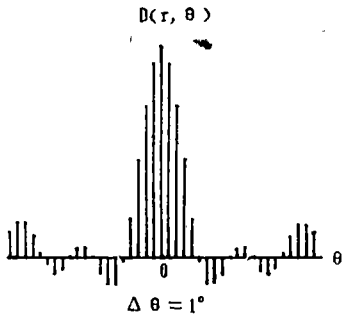
3.2 对较优指向特性的模拟设计

利用计算机模拟设计一个非均匀的宽带阵使其具有均匀线阵的指向特性, 通过上面可以看出较易实现。而要得到一个比线阵具有更好的波束特性的宽带阵 (即此阵, 不但要有一定的带宽, 且其指向性图的主瓣要更窄, 旁瓣要更低), 利用前述的方法, 也可以实现。

首先, 以均匀线阵的指向特性为基础, 对其指向性进行优化处理, 也就是压缩其第



(a) 均匀线阵及其模拟阵



(b) 优化阵及其模拟阵

图 2. 基指向阵特性图

1、2级旁瓣，且限制其主瓣宽度。所以，根据这些条件，每隔 $\Delta\theta = 3^\circ$ 取得 $D(r, \theta)$ 的值如表 2 中的 $D(r, n\Delta\theta)$ 其阵的频率范围和各阵元的频率见表 2，与前面相同。以此 $D(r, n\Delta\theta)$ 为初值，利用计算机模拟计算可得到一组 d_n 的值，同时在表 2 中给出。再把 d_n 的值代入 (4) 式，就会得到较优的指向性函数值 $D_4(r, \theta)$ ，以 $\Delta\theta = 2^\circ$ 的间隔采样的值列在表 1 中。其指向特性图如图 2(b)。这就是所得到的较好指向特性，从表 1 中的数据和图 2 中(a)与(b)的对照均可看出，其指向特性较线阵为好。

表 2 优化指向特性模拟的参数表

$f_n(\text{MHz})$	5.000	4.500	4.000	3.500	3.000	2.500
$D(r, n\Delta\theta)$	1.000	0.530	-0.120	-0.140	0.120	0.040
$d_n(\text{mm})$	0.000	0.343	0.806	1.354	2.136	3.607

再就以 $\Delta\theta = 3^\circ$ 对 $D_3(r, \theta)$ 进行采样，取其前 6 个值作为优化模拟设计的初值，求优化阵的布阵方案 (d_n)。其 $D_3(r, \theta)$ 的前 6 个值及求得的 d_n 分别如下：

$D_3^*(r, \theta)$: 1.000 0.451 -0.123 -0.006 -0.007 -0.04
 $d_n(\text{mm})$: 0.000 0.337 0.816 1.342 2.141 2.606

因此，把求得的 d_n 值代入 (4) 式，就可得到优化阵的指向性函数 $D_4(r, \theta)$ ，对其以 $\Delta\theta = 2^\circ$ 的采样值也在表 1 中给出。其指向性图也可用 2(b) 来表示。从 $D_3(r, \theta)$ 与 $D_4(r, \theta)$ 的值看出，能够实现优化阵的模拟，即能设计出满足事先给出条件的非均匀宽带阵。

4 结果分析

(1) 通过前面的模拟计算结果可以看出，利用此方法进行非均匀的宽带线阵的设计，方法简便，精度高，且设计出的基阵满足实际设计的要求；

(2) 对均匀线阵的模拟设计可看出，这种方法能简便地得到一个宽带阵，该宽带阵具有与线阵同样的波束指向特性，而其具有较宽的带宽；

(3) 对较优指向特性的模拟可看出，该方法不但能得到较线阵有较宽频带的宽带阵，而且还能改善其波束特性，即可设计出具有一定的带宽，并且其指向性较线阵为更好，也就是说，其主瓣会更窄，旁瓣会更低的优良基阵来。因此这将为基阵换能器的设计提供一种新的方法。

参考文献

- 1 周福洪编. 水声换能器及基阵. 科技出版社, 1984
- 2 栾桂冬、张金铎、王仁乾编著. 压电换能器和换能器阵. 北京大学出版社, 1990