

单向性二元阵

张天伟[†] 陈 航 李志舜

(西北工业大学 西安 710072)

摘要 本文介绍了一种单向性二元阵,探讨了其在基阵小型化中应用的可能性,分析了影响这种阵单指向性的主要因素。经过理论分析和实测数据验证,此阵结构简单,性能稳定,能形成良好的心脏形指向性图,适合于低频条件下使用。

关键词 二元阵, 单向性, 超指向性

Two-element array of unilateral directivity

ZHANG Tian-Wei CHEN Hang LI Zhi-Shun

(Northwestern Polytechnical University, Xian 710072)

Abstract This paper presents a kind of two-element array, discusses its possibility of being used for array miniaturization and analyses the main factors for influencing its unilateral directivity. Theoretical analysis and experimental survey verify that this kind of array is of simple structure, steady performance, can form a good heart-shape directivity. It is suitable for low frequency condition.

Key words Two-element array, Unilateral directivity, Super directivity

1 引言

基阵(含波束形成器)作为声纳信号的空间处理器,其主要功用是形成指向性和获取空间增益。一般说来,基阵的这些性能随着阵的尺寸波长比的增大而改善。

基阵的指向性和增益与声纳的技术指标(如作用距离、定向精度、工作方式、尺寸和重量等)关系极大。良好的基阵性能是实现声纳设备技术指标的保证。例如,为了避免指示混

淆,对声纳基阵的一个最基本要求就是单指向性,即方向图中不能出现栅瓣,而次瓣级愈小愈好。在一般基阵结构中,利用声障板能容易地将前后两个方向的信号分隔,但在体积阵或展开式基阵中,障板技术的利用受到了极大的限制。因之,需另行寻找形成单向性的方法。这里需要指出,声纳的某些技术要求与基阵性能的提高有时存在着很大的矛盾。例如,一方面为了提高声纳探测的作用距离,需要降低工作频率,这使其工作波长增大;而另一方面,

2005-07-20 收稿; 2006-04-24 定稿

作者简介: 张天伟(1968-),男,陕西三原县人,讲师,在职博士。研究方向: 通信、信号处理及检测技术。

陈航(1956-),男,教授,博士。李志舜(1938-)男,教授,博士生导师。

[†] 通讯联系人 Email: ztw@nwpu.edu.cn

基阵尺寸又不宜过分增大, 特别是因为某些安装平台尺寸的限制, 基阵必须小型化。因此, 如何在阵的尺寸波长比较小的情况下, 获得良好的基阵性能, 就成为—个需要面对的问题。本文介绍一种单向性二元阵, 并探讨其在基阵小型化中应用的可能性。

2 单向性二元阵的指向性函数

阵的指向性函数是阵的指向性分析和综合的出发点。为了求解单向性二元阵的指向性, 首先需求得它的指向性函数的表达式。

所谓二元阵, 是由二个阵元所组成的一种结构形式最简单的基阵, 其原理图如图 1 所示。图中 θ 为声线方向与基阵轴线的夹角, d 为两阵元相位中心的间距。阵元 2 的信号经移相与阵元 1 的信号相加输出。取阵元 1 为相位参考点, 则阵元 1 和阵元 2 的输出信号可分别写出为

$$\begin{aligned} u_1 &= u_{10}e^{j\omega t} \\ u_2 &= u_{20}e^{j(\omega t - kd \cos \theta + \phi)} \end{aligned} \quad (1)$$

式中, ϕ 为阵元 2 的相移角, $k = 2\pi/\lambda$ 为波数, λ 为工作波长, 两阵元相加后的合成输出信号为

$$u = u_{10}e^{j\omega t} + u_{20}e^{j(\omega t - kd \cos \theta + \phi)} \quad (2)$$

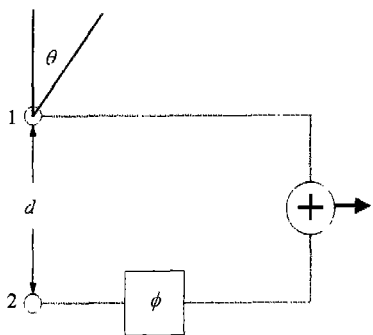


图 1 单向性二元阵的原理图

文献 [1, 2] 曾提出了一种极端的波束形成技术, 可以用有限尺寸的基阵获得窄的声束, 称

其为超指向性。超指向性基阵的阵元间距小于四分之一波长, 而相邻阵元的极性是相反的。根据这一原理, 为使二元阵具有超指向性, 取其间距小于或等于四分之一波长, 并且令 $u_{10} = u_{20} = u_0$, 同时, 取 $\phi = \phi_0 = \pi - kd$, 则输出信号的振幅及指向性函数分别为:

$$|u| = u_0 \sqrt{2 - 2 \cos[kd(\cos \theta + 1)]} \quad (3)$$

$$D(\theta) = \sqrt{\frac{1 - \cos[kd(\cos \theta + 1)]}{1 - \cos(2kd)}} \quad (4)$$

在 $d \leq \lambda/4$ 的条件下由式 (4) 可得出一个很好的单指向性图。不同的 d/λ 参数条件下, 单指向性二元阵的半功率点开角 θ_{-3dB} , 如表 1 所列。

3 指向性指数

单指向性二元阵, 具有很好的心脏形指向特性, 能抑制后半空间的噪声, 因此, 具有相当高的空间增益。在平稳、均匀、各向同性噪声场中, 接收窄带平面波信号时的增益, 称之为指向性指数。其一般表达式可写出为 [3]

$$DI = 10 \lg \frac{4\pi}{\int_0^{2\pi} \int_0^\pi D^2(\alpha, \theta) \sin \theta d\theta d\alpha} \quad (5)$$

针对单指向性二元阵这种简单情况, 上式可简化为

$$DI = 10 \lg \frac{2}{\int_0^\pi D^2(\theta) \sin \theta d\theta} \quad (6)$$

将式 (4) 代入式 (6), 得单指向性二元阵的指向性指数的表达式为

$$DI = 10 \lg \frac{1 - \cos 2kd}{1 - \frac{\sin 2kd}{2kd}} \quad (7)$$

不同间距波长比条件下的指向性指数也列在表 1 中。

由表 1 可见, 这里所介绍的二元阵, 在间

距波长比很小的条件下，不仅可以得到很好的单指向性，还可获得比一般二元阵高得多的空间增益。并且在一个很宽的频率范围内，性能基本保持不变。因之，单向性二元阵具有良好的超指向性。这里需要指出的是，由式 (3) 可以看出，这种阵的指向性的获得是以牺牲其输出为代价的，阵元间距愈小，其输出愈低。

4 影响二元阵单指向性的主要因素

二元阵的单指向性是以两阵元输出信号的幅值完全相等，相移角保持稳定为前提条件的。实际上，幅值的差异和相移角的漂移在所难免。因而，需要较深入地研究这两个因素对于二元阵单指向性的影响。

4.1 幅值差异的影响

如果两阵元的输出幅值不相等，则合成输出的信号幅值为

$$|u| = \sqrt{u_{10}^2 + u_{20}^2 - 2u_{10}u_{20} \cos[kd(1 + \cos \theta)]}$$
 (8)

此时 $|u|$ 的最大、最小值仍分别在 $\theta = 0^\circ$ 和 $\theta = 180^\circ$ 处，今用前后幅值 $|u|_0$ 和 $|u|_\pi$ 之比

$$\sigma = \frac{|u|_0}{|u|_\pi}$$
 (9)

来评价单指向性，易见，

$$\sigma = \sqrt{1 + \frac{4(1 + \rho)}{\rho^2} \sin^2(kd)}$$
 (10)

其中， ρ 为两阵元输出幅值的相对差异

$$\rho = \frac{u_{10} - u_{20}}{u_{20}}$$
 (11)

由式 (10) 可见，两阵元幅值相等时， σ 趋于无穷大。而幅值不等时， $|\rho|$ 值越大， σ 越小，单向性变的越差。表 2 给出了两阵元在不同间距波长比时， σ 与 ρ 的关系。同时在图 2 中给出 $d/\lambda = 1/10$ 条件下，幅值差异对二元阵指向性的影响。

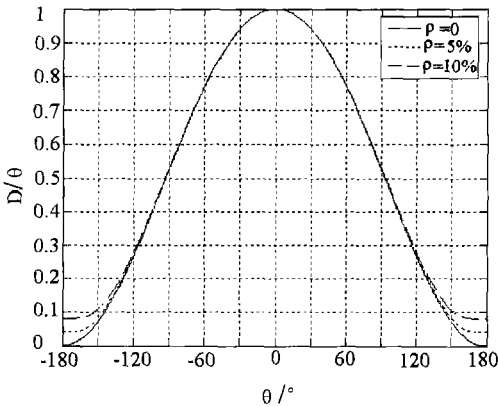


图 2 幅值差异对指向性的影响 ($d/\lambda = 1/10$)

表 1 不同间距波长比条件下，单向性二元阵的半功率点束宽和指向性指数

d/λ	1/5	1/8	1/10	1/12	1/15	1/18	1/24	1/36	1/50	1/100	1/200	1/500	1/1000
$\theta_{-3\text{dB}}$	159.9	141.1	137.3	135.3	133.7	132.9	132.1	131.5	131.3	131.1	131.1	131.1	131.1
DI	3.731	4.396	4.536	4.609	4.668	4.700	4.731	4.754	4.762	4.769	4.771	4.771	4.771

表 2 不同 d/λ 时 σ 与 ρ 的关系

ρ	-0.05	-0.04	-0.03	-0.02	-0.01	0	0.01	0.02	0.03	0.04	0.05
1/500	1.114	1.174	1.296	1.596	2.693	∞	2.717	1.616	1.313	1.188	1.125
d/λ 1/100	σ 2.644	3.235	4.242	6.296	12.54	∞	12.66	6.420	4.365	3.354	2.761
1/10	22.94	28.81	38.61	58.20	116.97	∞	118.15	59.37	39.78	29.99	24.11
1/5	37.09	46.60	62.45	94.16	189.26	∞	191.16	96.06	64.36	48.50	38.99

4.2 相移角漂移的影响

在幅值相等的条件下,若相移条件得到满足,即 $\phi = \phi_0 = \pi - kd$,则二元阵可形成理想的单向性,如果相移角漂移 $\Delta\phi$,则二元阵的输出幅值为

$$|u| = u_0 \sqrt{2 - 2 \cos[kd(1 + \cos \theta) - \Delta\phi]} \quad (12)$$

可见, $\theta = 0^\circ$ 仍为最大值方向。因之,仍可用前后幅值比 σ 来评价单向性

$$\sigma = \frac{|u|_0}{|u|_\pi} = \sqrt{\frac{1 - \cos(2kd - \Delta\phi)}{1 - \cos \Delta\phi}} \quad (13)$$

表 3 列出了二元阵间距波长比不同时,相移角的漂移对单指向性的影响。同时,在图 3

中给出了 $d/\lambda = 1/10$ 条件下,相位漂移对二元阵指向性的影响。

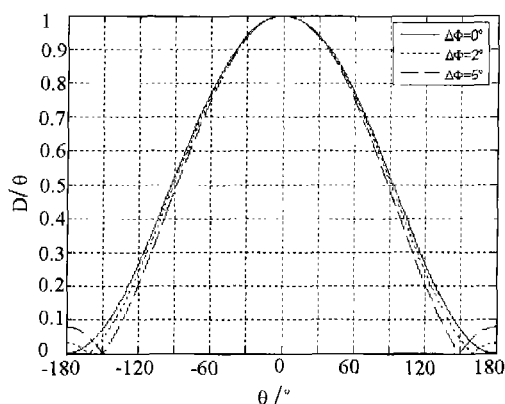


图 3 相位漂移对指向的影响 ($d/\lambda = 1/10$)

表 3 不同间距波长比条件下,相移角漂移对二元阵单指向性的影响

$\Delta\phi$ (度)	-3	-2	-1.5	-1.0	-0.5	0	0.5	1.0	1.5	2.0	3.0
d/λ	1/500	1.480	1.720	1.960	2.440	3.880	∞	1.880	0.440	0.040	0.280
σ	1/100	3.396	4.595	5.795	8.193	15.39	∞	13.39	6.197	3.799	2.599
	1/10	23.26	34.48	45.71	68.16	135.52	∞	133.90	66.54	44.09	32.87
	1/5	36.63	54.80	72.96	109.29	218.27	∞	217.66	108.67	72.34	54.18

4.3 幅值差异和相位漂移同时存在对指向性的影响

当幅值差异与相位漂移同时存在时,单指向性二元阵的指向性函数可写出为

$$D(\theta) = \sqrt{\frac{\rho^2 + 2(1 + \rho)\{1 - \cos[kd(1 + \cos \theta) - \Delta\phi]\}}{\rho^2 + 2(1 + \rho)[1 - \cos(2kd - \Delta\phi)]}} \quad (14)$$

二元阵的指向性曲线如图 4 所示,图中实线为理想条件下的指向性曲线,虚线为幅值差异和相位漂移同时存在时的理论曲线。

由上图可见,从理论上讲,二元阵是能够形成稳定的单指向性的。

我们曾用压电陶瓷圆管作阵元组成了一个二元阵,其间距波长比 $d/\lambda = 1/12$,在消声水池进行了指向性测量。所得结果如图 5 所示。图中实线为理论曲线,*号为实测值。

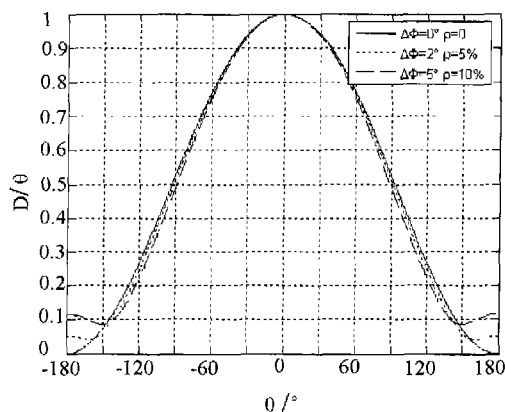


图 4 幅值差异和相漂移同时存在

5 结果与讨论

(1) 利用两个相同的阵元,只要通过电子移相的方法,就能形成良好的心脏形指向性图,

这种无须利用声障板而形成单指向性的技术, 在水声工程, 如展开式体积阵、拖曳阵、垂直线列阵等中有着广泛的利用价值。

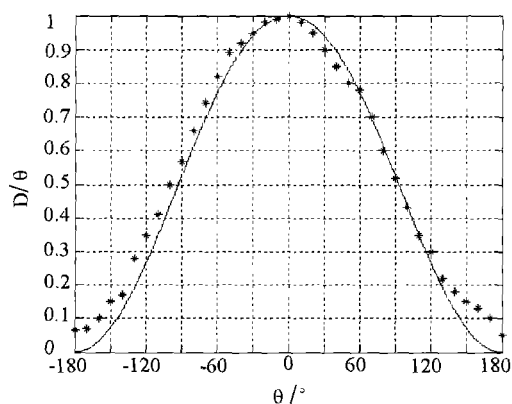


图 5 实测指向性

(2) 单向性二元阵具有超指向性, 在间距小于四分之一波长条件下, 不但具有良好的单指向性, 还能获取相当高的空间增益。

(3) 在一个相当大的间距波长比变化条件下, 波束宽度基本不变。特别是频率愈低, 其波束随频率的变化愈小。可见, 这种单指向性

阵是一种适用于低频宽带条件下的阵型。适应现代水声技术的发展方向。

(4) 单向性二元阵结构简单, 性能稳定。

(5) 单指向性阵的主极大方向与基阵轴线重合, 它具有端射特性, 这一点对合理利用基阵布设平台空间, 优化基阵性能设计是很重要的。

(6) 由于此二元阵阵元极性接近反相, 输出较低, 因此更适于作为低频接收基阵。

(7) 最后需要说明的一点是, 单向性二元阵存在的一个问题是, 波束宽度太大。不能满足定向的要求。为解决这一问题, 曾进行了单向性多元阵的研究, 使这一问题得到了较好的解决, 相关研究另文论述。

参 考 文 献

- 1 Pritchard R L. J. Acous. Soc. Am., 1954, 26(6):1034~1039.
- 2 尤立克 R J. 水声原理. 洪申译. 哈尔滨: 哈尔滨船舶工程学院出版社. 1990. 47~49.
- 3 栾桂冬, 张金铎, 王仁乾编著. 压电换能器和换能器阵 (下册). 北京: 北京大学出版社, 1990.161.

“公共广播”与“系统集成”新技术论坛在北京举行

由中国电子学会/中国声学学会音频工程分会和中国音像协会音视频工程专业委员会主办, 斯雅克·迪士普国际科技有限公司和广州市声雅音响器材有限公司协办的“公共广播”与“系统集成”新技术论坛于2006年5月31日下午在北京皇家大饭店召开。中国电子学会/中国声学学会音频工程分会的部分副主任委员和学会秘书长及委员, 来自全国各地专家、学者和从事声频工程的工程师 120 多人参加了论坛。

广州迪士普国际科技有限公司总工程师, 著名电声专家钟恭良教授在会上作了《公共广播企业新标准和系统集成企业新标准》的报告, 他对公共广播企业标准和系统集成行业新标准、新技术作了详细的介绍, 并对合作研发成功的拥有中国自主知识产权的“声像

灯光中央集控平台”作了全面详实的解析。内容涉及由“中央集控平台”控制的公共广播系统; 具有“故障自我检测功能”的总线制“可寻址”广播系统; 突破距离限制的以局域网为传输媒介的数字“网络化”广播系统; 集中所有广播系统功能的高度集成的“智能化”广播中心等。

中国电子科技集团公司三所著名电声专家崔广中高级工程师在会上对目前的音频工程标准作了精彩的报告。他详细讲解了国内和国际上有关音频工程标准和音频工程中经常使用的有关标准, 并对目前经常使用的几个重点标准的相关内容作了详实的解析。他的报告引人瞩目, 吸引了许多工程技术人员和工程师。

(远 征)