

多基元宽频带恒定束宽圆弧形声基阵

陈桂生 周永椒

(上海市测试技术研究所 200233) (苏州产品质量监督检验所 215007)

本文介绍了通过改变参与形成波束的基元数目,实现多基元圆弧形声基阵宽频带恒定束宽方法,并详细阐述了一个具体模拟实施方案,证实在基阵尺寸受到限制情况下,能在相对频率比为7:1的倍率范围保持束宽恒定不变。理论计算与模拟实验数据相符。

A broad-band constant beamwidth method for circular multi-element array

Chen Guisheng Zhou Yongjiao*

(Shanghai Institute of Testing Technology)

*(Suzhou Institute of Products Quality Examine)

This paper describes a broad band constant beamwidth method for circulars multi-element acoustic array by means of changing the number of beamforming element and gives in detail a simulated test circuit installation.

1 引言

声呐设备设计中,声基阵空间利用,几何尺寸是首先考虑的关键问题之一,直接关系到整个系统的总体性能,它与主要技术参数如:工作频率、基阵主束宽度等有着密切的关系。我们知道,声基阵的线度、工作频率、束宽之间关系相互依赖、相互制约。一般情况下,当基阵几何尺寸根据安装对象而限定以后,工作频率与主束宽度是反比例变化的。但是,对于某些声呐设备,所要检测的声信号的频率、方位、到达时间均未知。面临这样的实际问题,检测系统必须满足几

个性能要求:

(1)声基阵的主束宽度在被测声信号可能出现的频率范围内保持恒定不变。以实现声信号的方位、频率检测,并能达到确定的、一致的方位检测精度,还能使测频、测向一次完成。

(2)为了提高对声信号的检测概率,单波束系统在搜索扫描过程中的时间损失难以克服,不理想。拟采用多波束系统,各方位波束相互交叉叠合、覆盖全方位。实现全方位警戒,可运用模拟或数字技术完成波束形成设施。

(3)声呐设备的另一个重要技术指标是作用距离,设计人员除必须达到对声信号的

测频，测向精度以外，还必须尽力提高系统增益，从声基阵设计角度而言，欲提高系统的空间增益，这就牵涉到基阵结构、旁瓣抑制等一系列声基阵设计问题。

2 多基元圆弧形声基阵指向性函数

多基元圆弧声基阵如图 1 所示。声束从 φ 方向入射，如以垂直于入射声束的圆直径作为参考线，则第 i 个基元的超前相位应为：

$$\psi_{0i} = -kR\cos\theta$$

式中 $k = \omega/c = 2\pi/\lambda$ ， R 为圆半径， θ 为声束与第 i 个基元的方位线之间的夹角，显然 $\theta = |\varphi_1 - \varphi|$ 。指向性函数为：

$$D(\varphi) = \sum_{i=0}^{N-1} \sigma_i \xi_i(\varphi, \varphi_1) e^{j\beta_i} e^{-jkR\cos(\varphi_1 - \varphi)} \quad (1)$$

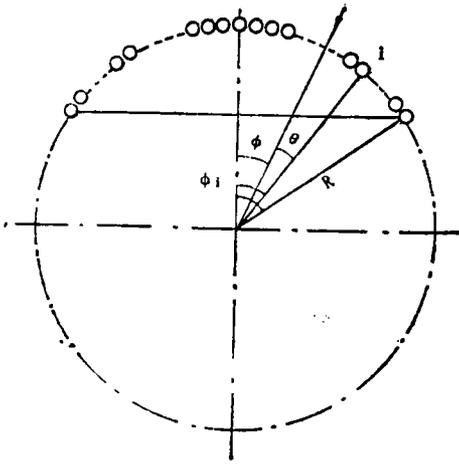


图 1 多基元圆弧形声基阵

式中： φ_1 为第 i 个基元的方位角；

σ_i 为第 i 个基元的灵敏度权重因子；

$\xi_i(\varphi, \varphi_1)$ 为第 i 个基元的指向性函数；

β_i 为第 i 个基元的初始相位；

$$D(\varphi) = \sum_{i=0}^{N-1} \sigma_i \xi_i(\varphi, \varphi_1) \exp\{-jkR[\cos(\varphi_1 - \varphi) - \cos(\varphi_1 - \varphi_p)]\} \quad (3)$$

由此可知，圆弧形声基阵的比较理想的方位对称特性，能在任意方位形成主束，使波束形成设施尤其简单，可利用完全一样的电子补偿技术设施形成多波束系统，并能方便地使各个波束逐一交叉叠合并覆盖预定的方位角或全方位。从而才能对到达时间未知的入射声信号进行方位检测。

3 圆弧形声基阵旁瓣问题

本节着重讨论圆弧声阵的旁瓣，我们将可看到，圆阵旁瓣电平比较高，是设计中首先要解决的问题。

不妨改变一下指向性函数公式的形式：

声学技术

N 为参与形成波束的基元数目。

如按下列方式进行相位补偿，即

$$\beta_i = kR\cos(\varphi_1 - \varphi_p) \quad (2)$$

则声基阵在 φ 方位形成主束。

指向性函数变为：

$$\begin{aligned} \psi_i &= kR[\cos(\varphi_1 - \varphi) - \cos(\varphi_1 - \varphi_p)] \\ &= 2kR\sin\frac{\varphi - \varphi_p}{2} \sin\left(\varphi_1 - \frac{\varphi + \varphi_p}{2}\right) \end{aligned}$$

利用下列关系式：

$$\begin{aligned} \exp(jx\cos\alpha) &= J_0(x) \\ &+ 2 \sum_{n=1}^{\infty} j^n J_n(x) \cos n\alpha \end{aligned}$$

为了便于说明问题，把方位参考轴选在主束方位并通过某一个基元，这样 $\varphi_p = 0$ ，还假设：

$$\sigma_i = 1, \quad \xi_i(\varphi_1, \varphi) = 1$$

这时 (3) 式变为：

$$D(\varphi) = J_0\left(2kR\sin\frac{\varphi}{2}\right) + 2 \sum_{n=1}^{\infty} \left[(-j)^n J_n\left(2kR\sin\frac{\varphi}{2}\right) \sum_{i=0}^{N-1} \cos n\left(\varphi_1 - \frac{\varphi + \pi}{2}\right) \right] \quad (4)$$

注意(4)式中,第1项是零阶贝塞尔函数,它的第1个极值最大为0.403,其余的依次逐个减小;而第2项为n阶贝塞尔函数的无穷级数,称之为指向性函数畸变项,正与旁瓣级有关。从指向性函数式(4)分析可知,圆弧形声基阵指向性,将与参与形成波束的基元数目、贝塞尔函数宗量(即参量) $2R/\lambda$ 及方位角 φ 等有密切关系,问题十分复杂。但是,对于圆弧声阵的波束形成系统,旁瓣抑制至关重要,是一切圆弧阵设计所必须克服、应予解决的问题。在一些声呐工程设计中,方便而行之有效的技术措施有如下几个方面,这里结论性予以介绍:

(1)基阵结构设计,一般在基阵中央敷设一个刚性腔体支架,以安装换能器基元,不仅要求达到基元的机械安装精度,还要求此刚性腔体的反声屏蔽作用能使各换能器基元自然形成特殊的指向性。实验证明,能使基元在较低频段内,产生近似心脏形指向性图,而在相对较高的频率上,基元指向性函数近似为余弦函数。从而,圆弧声基阵指向性特性获得改善,消除了声基阵的“后辐射”,靠近主束的最大旁瓣级降为12.8dB。

(2)理论与实践表明,上述刚性反声腔体对基阵“后辐射”确有非常理想的抑制作用,但不能完全地解决基阵旁垂各个方位的旁瓣的抑制问题。工程设计人员,研究了基元总数即各基元之间相邻间距与基阵指向性的关系,发现当间距大于 0.80λ 时, λ 为入射声波波长,在基阵旁垂大片方位区域内产生的旁瓣级远远超过邻近主束的最大旁瓣级。当然,如果间距过小,即基元数目选得过多也不合理,造成设备庞大,造价高,不足取。设计人员应根据具体问题通过严格

计算确定最佳设计间距。本文作者在有关文章中,针对具体设计实例,根据计算及实践提出的间距设计范围为 $0.5\sim 0.75\lambda$ 。

(3)使用了上述技术措施,即设置反声刚性障体以及合理选取基元之间的间距,基阵的“后辐射”以及其旁垂方位的旁瓣级均可获得比较满意的抑制效果。但是,邻近主束的第一旁瓣级仍为 -12.8dB ,进一步抑制旁瓣级,提高声呐设备的总体性能又成为设计中需要深入解决的问题。权重抑制旁瓣技术设施比较简单,并能达到预期的设计效果,广为设计人员接受。具体实现措施较多,常用的是幅值权重方法,即保持各基元的相位一致,按设定的关系改变各基元的振幅系数,如基元灵敏度,使基阵旁瓣级抑至某一设计值;其次是与此相反,保持各基元灵敏度一致,按设定的关系改变基元的相位,称之为相位法抑制旁瓣,也能产生比较好的效果;还有同时变化各基元的幅值及相位的方式。

幅值权重方法,其实质问题是权重系数的选取,所要设定的权重系数一方面能使旁瓣级低于设计高度,同时应该考虑到在旁瓣级被抑制的时候,主束宽度将产生不同程度的增宽,总体方案设计必须充分地考虑这一问题。

这里,我们选取两个幅值权重系数,即余弦函数及指数函数,通过一个设计实例,计算它们所产生的束控能力。

$$\begin{aligned} \text{(i)} \quad \sigma_1 &= \cos^2 i\alpha \\ \text{(ii)} \quad \sigma_1 &= \exp \left[-a \left(\frac{i}{N_0} \right)^2 \right] \end{aligned} \quad (5)$$

还假定各基元由于反声障体的声屏蔽作用,形成心脏形指向性函数,即:

$$\xi_i = \frac{1}{2} [1 + \cos(\varphi - i\alpha)] \quad (6)$$

式中 α 为相邻基元的圆心夹角；第 i 个基元的方位角为 $\varphi_i = i\alpha$ ；参与形成波束的基元数目为 $N = 2N_0 + 1$ ，所以 $i = -N_0, -N_0 + 1 \dots 0 \dots N_0$ ； a 为设定系数，根据旁瓣级的设计高度确定，下述计算实例中取 $a = 1.2$ 。

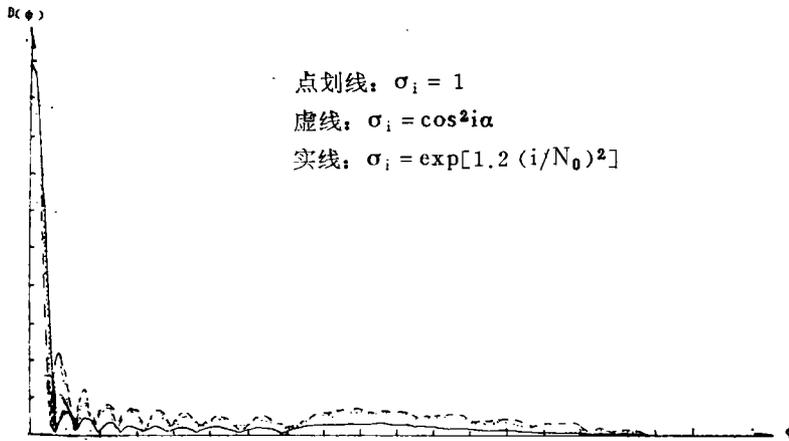
还假设具体设计实例为 $2R/\lambda = 25$ ， $\alpha = 3^\circ$ ， $N_0 = 15$ 。

则由(3)式所计算的指向性图如图2所示。可见，余弦函数型权重系数 $\sigma_i = \cos^2 i\alpha$ ，对旁瓣的抑制作用不显著，主束宽度也基本不变，这是因为按照余弦函数的特性，在小角度范围内其函数值的变化比较小，从而实际对各基元的加权贡献也小。但是，如果信号频率比较低，为了保持主束宽度不变，则

参与形成波束的基元数目应多，即 N 大，对应的圆弧阵的张角比较大，此时余弦函数型权重系数也能产生良好的旁瓣抑制效果。还从图2知，指数型权重系数，即

$$\sigma_i = \exp[-1.2 \left(\frac{i}{N_0}\right)^2]$$

有强烈的抑制作用，使旁瓣级从 -13dB 下降至 -26dB ，主束也相应增宽了2度。然而，低频情况，参与形成波束的基元数增大时，圆弧阵两侧对应张角比较大的一些基元， i 大，相对应的指数加权系数很小，也就是弧两侧的基元经指数加权以后，其幅值很小，这些基元对波束形成实际不起作用，形同虚设，在此情况，指数型加权系数就不合适了。所以，设计时，权重系数的选取，必须认真通过严格计算确定，具体问题要具体分析。



$$\frac{2R}{\lambda} = 25; N_0 = 15; \alpha = 3^\circ; \xi_i = \frac{1}{2} [1 + \cos(\phi + i\alpha)]$$

图2 几个权重因子对于圆弧阵旁瓣抑制效果比较

4 宽频带恒定束宽原理及技术措施

圆弧形声基阵的这一系列设计任务圆满完成，再来进一步讨论恒定束宽问题及其技术措施才有实际意义。所谓宽频带恒定束宽，

就是在某一定的频率范围内，声基阵的主束宽度保持恒定、不随频率的变化而变化。由(3)式可知，圆弧阵的空间指向性图不但与频率有关，还与参与形成波束的基元数目、权重系数以及单基元指向性函数等参数密切相关。在圆弧中央设置刚性反声腔体以后，单基元形成特殊指向性，实践证明其低频指

向性图基本为心脏形，函数式如(6)式所示；再根据上述分析，若采用(5)式所示指数形加权系数，那末根据计算，指向性图如图2所示，其旁瓣级、“后辐射”均被明显抑制、可达到设计要求，且基阵主束宽度变化很小。实际上，当基阵直径确定以后，对基阵主束束宽变化最敏感的参数是频率及参与形成波束的基元数目即它们所对应的弧长。所以，为了达到在确定的频率范围内，保持主束束宽恒定不变，切实可行的措施是改变参与形成波束的基元数目，由高频至低频，基元数目由少至多增加，即基元所对应的弧长由短及长变化，直至基元所占的弧长接近于圆弧基阵的半周长，从而使束宽恒定不变并覆盖整个频段。

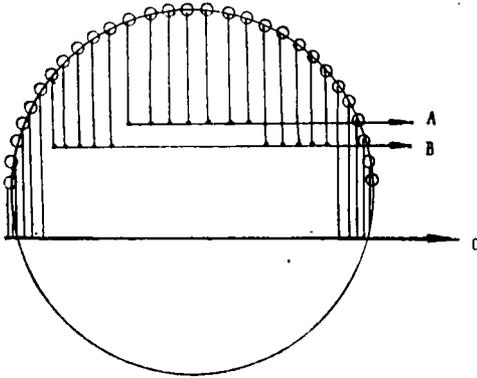


图3 宽频段恒定束宽原理示意图

上述原理示于图3，图中：

输出A——对应高频段

输出A+B——对应中频段

输出A+B+C——对应低频段

在具体实施过程中，首先将总体方案确定的主频段分成若干个子频段，子频段的数目将取决于总体定向精度要求，还受设备体积、成本限制。例如，所划分的子频段愈细，则波束束宽恒定的精度将愈高，但设备趋复杂、造价高。然后，在各子频段的中心频率上，运用(3)式通过数字计算机严格反复计算，确定参与形成波束的基元数目，因为基元之间的间距，设计时早先选定了，从而形成波

束的基元所对应的总的弧长也确定了。最后，在各子频段的所有频率上，根据上述确定的对应于各中心频率的基元数，进行验算，看基阵主束宽度是否恒定且达到了设计精度要求，通过折衷调节，最终确定各个子频段所需参与形成波束的基元数目。这是总体方案设计的很重要的一步。

实践表明，在某特定频率范围，对于补偿圆弧形声基阵，一段圆弧的指向性主束束宽可近似用其所对应的弦的线列指向性函数计算。所以，在工程设计中，设计人员常先用下列公式进行近似估算，在此基础上，再用精确指向性函数式(3)最终确定，更省计算时间。

$$\begin{cases} \theta = 0.8 \times 57 \frac{\lambda}{d} \\ N_0 = \frac{1}{\alpha} \sin \frac{d}{2R} \end{cases} \quad (7)$$

式中，d为圆弧所对应的弦长；λ为入射声信号波长；θ为-3dB点主束宽度，以度表示；α为相邻基元之间圆心夹角，N = 2N₀ + 1为参与形成波束的基元数目，当圆直径比较大，设计束宽θ较小时，用(7)式计算更接近实际。

具体估算步骤是，因圆弧形声阵直径，各个波束束宽θ等参数均应是总体设计方案首先确定的，所以由7式先算出各个子频率的中心频率及有关感兴趣的频率上的对应弦长d，再由7式计算各相应子频段参与形成波束的基元数目N = 2N₀ + 1。

关键问题是，上述一系列计算应通过实验证实。

5 恒定束宽模拟实施装置

模拟或数字技术设施都能有力地证实方案切实可行。作为一个例子，本文给出一模拟实验装置。图4画出的是相邻三个波束形

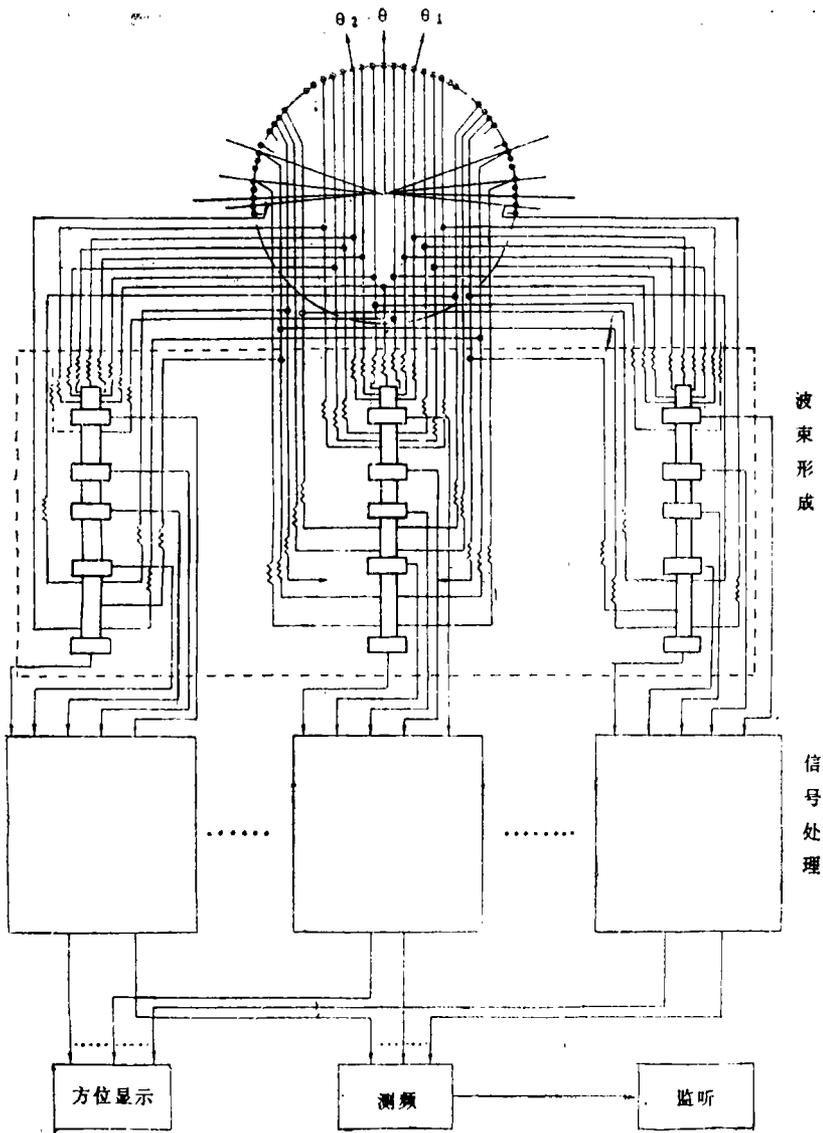


图4 模拟实验装置

成及信号处理系统原理方块图。例子把整个频段划分成五个子频段。

基阵中各基元接收到某方位的入射声信号后，经前置放大，再通过加权平衡电阻馈送给某一相应方位的单向延迟线相对应的补偿点。单向延迟线主要作用是实现各基元的空间时延补偿，并必须避免各子频段内信号相互串行，以保证各子频段波束形成，为此与一般延迟线不同的是在延迟线中，各子频段间插入隔离级及匹配放大器，从而实现使

信号沿单向流过。也就是各子频段信号经过相应的时延补偿后，由隔离匹配放大器输出再经由限幅放大和各子频段滤波器过滤后，就在空间形成波束。又由于各子频段所需接入的基元数目是根据计算稳定的，所以波束的束宽在整个频段内保持恒定不变。为了抗不平稳干扰和获得门限稳定，我们又在各子频段滤波器前加限幅放大器，而在其后接上自动增益放大器，最后通过检波、积分获得后置处理增益。为了使处理通道简化起见，

采用一个瞬时峰值选择电路,通过瞬时峰值选择电路的信号,经电子开关送至荧光屏上,各波束的输出大小全景地显示在荧光屏上,从而可根据幅值大小(光点偏离位置)得到目标方位信息。此外,通过相邻波束的波瓣比较,测向精度要比波束宽度所得精度更高一些。从这方块图可知,在获得目标方位信息的同时,还可获得入射信号的频率信息,图中简单地画出了测频方法。通过测频还可进一步利用外差相关监听技术实现对目标信号的监听。

可见,模拟实验方案,概念清晰、明瞭,但每个波束必须配置一个延迟线,如果每个波束宽度为10度,为了覆盖全方位,当需36根延迟线,从而使设备复杂、累赘、体积庞大。采用数字技术,配以线性集成电路,现代大规模集成工艺日新月异,可使系统大大

简化。

表1是理论计算与模拟实验结果相比较。基阵主束束宽的理论计算与实测结果吻合,但是,在各子频段的交界频率上,不管是理论计算还是实测结果,分别对应于相邻频段的束宽有一定的差异,因为在这些交界频率上,当它被划入比较高的子频段时,由于对应这较高子频段所需参与形成波束的基元数目比较少即对应弧长较短,所以主束宽度就比较大些;而当它被划入较低子频段时,因这时所对应的弧长比较大,从而主束束宽相应比较小。从表1所示数据,我们可以很容易解决这个问题,只要把这些交界频率划入其比较高的子频段,就能使主束宽度在整个频带上保持基本恒定。当然,如果设备条件允许,子频段划分再细密些,那末结果更是理想。

表 1 计算与实测结果

子频段(2R/λ)		21.3~13.9			13.9~10.5		10.5~7.4		7.4~4.5		4.5~3.2	
		21.3	17.7	13.9	13.9	10.5	10.5	7.4	7.4	4.5	4.5	3.2
基元数N		11			17		23		29		53	
束宽	理论	11.5°	12°	16°	10°	13°	10°	14.5°	9°	18°	11°	25°
	实测	11°	11°	15°	10°	11°	11°	15°	9°	18°	11°	23°

从表1所示设计实例,波束能在7:1的频率范围内,保持在10°左右。如果基阵尺寸允许进一步扩大,则频率范围尚可增宽,可在10:1的频段内保持波束宽度基本恒定不变。

此外,本系统可获得比较高的空间增益。

作者致谢中科院东海研究站沈志华副研究员,上海交通大学姬树森教授为系统模拟实验设计所作出的贡献。

参考文献

1 陈桂生. 离散多基元声基阵指向性函数.

声学学报, 1990, 15:272~278

2 Chen Guisheng. Rejection of sectoral multi-element cylinder array with amplitude weighting methods. Chinese Journal of Acoustics, 1991, 10:258~264

3 陈桂生. 权重抑制扇形多基元柱面声基阵旁瓣. 声学学报, 1992, 17:50~56

4 Chen Guisheng. An array detecting acoustical signals with unknown frequencies and directions. Canadian Conference on Electrical and Computer Engineering, 1992, MA3.11.1