

# 医用线列阵声场计算方法

刘鹏华, 戴明远

(同济大学信息与通信工程系, 上海 200092)

**摘要:** 用指向性函数分别描述了医用线列阵单频波和宽带波声场。讨论了应用电子聚焦处理、幅度加权变迹处理和孔径变迹处理的方法来改善波束特性; 论述了在实际中应用较多的宽带波声场的计算。通过分析表明, 宽带波持续时间愈长, 宽带波声场就愈接近于单频波声场。

**关键词:** 指向性函数; 线列阵; 变迹处理; 声场

中图分类号: TB559 文献标识码: A 文章编号: 1000-3630(2004)03-0163-05

## Methods for calculating acoustic fields of medical linear array

LIU Peng-hua, DAI Ming-yuan

(Department of Information and Communication Engineering, Tongji University, Shanghai 200092, China)

**Abstract:** The directivity function is used to describe the sound field of single-frequency and broad-band waves produced by a medical linear array. A method is developed with electronic focusing, amplitude weighting and aperture apodization to improve the beam patterns. In this paper, calculation of the sound field of broad-band waves, which are used more frequently in practice, is emphasized. The results show that the longer the broad-band wave lasts, the more the sound field is similar to that of the single-frequency wave.

**Key words:** directivity function; linear array; apodization processing; sound field

## 1 引 言

超声医疗仪器应具有安全和无创伤的特点, 因此在临床诊断中得到了广泛的应用。但目前超声图像质量较其它一些成像方式(如 CT) 还有很大差距, 从而影响了诊断的可靠性, 同时也限制了其应用范围。影响图像分辨力最关键的因素是超声波束的指向性。

目前, 对各种医用超声阵列换能器的波束特性还缺乏系统的研究, 电路的改进还没有明确的理论依据, 有一定的盲目性, 从而很难使图像质量有较大提高。因此计算超声阵列换能器的指向性分布具有理论和实际上的价值。Shi Chang Wooh 等<sup>[1]</sup> 讨论过相控阵阵元宽度对波束偏转的影响, 王波等<sup>[2]</sup> 用指向性函数研究了波束特性。但到目前为止, 许多学者研究的都是单频波声场, 而没有考虑宽带波声场。

本文以线列阵为基础, 分别推导出单频波和宽带波声场的波束指向性函数, 并由此计算和讨论了它们的超声阵列波束特性。

## 2 单频波(窄带波)声场

乘积定理指出<sup>[3]</sup>, 由相同特征的阵元组成的换能器阵的指向性函数为

$$D(\theta, \varphi, \omega) = D_1(\theta, \varphi, \omega) \cdot D_2(\theta, \varphi, \omega) \quad (1)$$

式中:  $D_1(\theta, \varphi, \omega)$  为阵元因子;  $D_2(\theta, \varphi, \omega)$  为阵因子;

线列阵分布如图 1 所示。由于计算线列阵二维声场分布, 所以不考虑  $y$  轴方向, 而只是计算 XOZ 平面指向性函数, 式(1)中的阵元因子(有时称作调和函数)为:

$$D_1(\theta, \varphi, \omega) = \left| \frac{\sin\left(\frac{ka}{2} \sin\theta\right)}{\frac{ka}{2} \sin\theta} \right| \quad (2)$$

归一化阵因子为:

收稿日期: 2003-12-30; 修回日期: 2004-03-30

作者简介: 刘鹏华(1979), 男, 硕士研究生, 江西樟树人, 研究方向为信号处理及其应用。

$$D_2(\theta, \varphi, \omega) = \frac{\left| \sum_{i=1}^N A_i \exp(-j \Delta \varphi_i) \right|}{\left| \sum_{i=1}^N A_i \right|} \quad (3)$$

式中  $k$  为波数,  $A_i$  为离散阵第  $i$  个阵元的响应复振幅;  $\Delta \varphi_i$  为第  $i$  个阵元在  $(\theta, \varphi)$  方向与主极大方向的声波相位差。

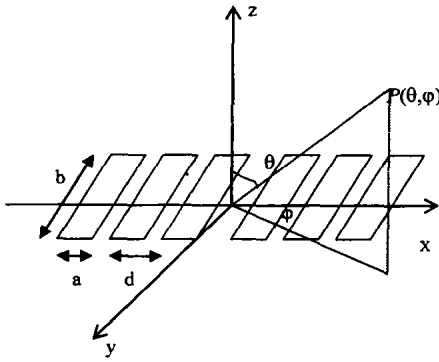


图 1 波束分布示意图

### 2.1 自然指向性函数

自然指向性函数是指线列阵不采用任何措施改善波束性质的情况下所求得的指向性函数。各阵元以同频率、同相位等幅振动时,  $A_1 = A_2 = \dots = A_N$ ,  $\Delta \varphi_i = (i - 1) k d \sin \theta$ , 由式(1)~ 式(3)得:

$$D(\theta, 0, \omega) = \left| \frac{\sin(\frac{ka}{2} \sin \theta)}{\frac{ka}{2} \sin \theta} \right| \left| \frac{\sin(N \frac{kd}{2} \sin \theta)}{N \sin(\frac{kd}{2} \sin \theta)} \right| \quad (4)$$

### 2.2 线阵电子聚焦指向性函数

在发射和接收过程中, 对不同阵元通道设置时间延迟, 可以使波束聚焦<sup>[4]</sup>。焦距为  $F$ , 焦点坐标为  $(0, F)$ , 如图 2 所示。现计算给定一个  $z$  值时, 声场随  $x$  值变化的趋势。阵元  $i$  的坐标为:

$$x_i = (2i - 1) \times d/2 - N \times d/2 \quad (i = 1, 2, 3, \dots, N) \quad (5)$$

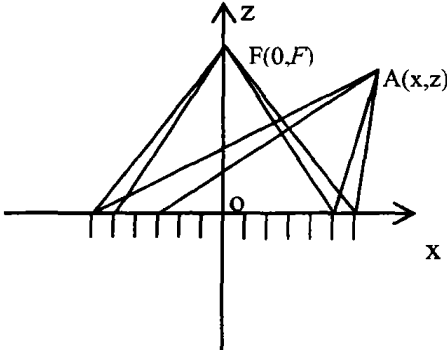


图 2 阵元坐标取法

阵元  $i$  发射的超声波到  $A$  点与到  $F$  点之间的延时为  $\Delta t_i = (l_2 - l_1) / c$ ,  $c$  为声速。

$$l_1 = \sqrt{x_i^2 + F^2}, \quad (6)$$

$$l_2 = \sqrt{(x_i - x)^2 + z^2}. \quad (7)$$

对于阵元  $i$  来说, 在  $A$  点与在  $F$  点的声波相位不同, 其相位差  $\Delta \varphi_i = 2\pi f \cdot \Delta t_i$ , 得

$$D_2(\theta, \varphi, \omega) = \frac{\left\{ \left[ \sum_{i=1}^N \cos(2\pi f \cdot \Delta t_i) \right]^2 + \left[ \sum_{i=1}^N \sin(2\pi f \cdot \Delta t_i) \right]^2 \right\}^{1/2}}{N} \quad (8)$$

$$D_1(\theta, \varphi, \omega) = \left| \frac{\sin(\frac{ka}{2} \sin(\tan^{-1}(x/z)))}{\frac{ka}{2} \sin(\tan^{-1}(x/z))} \right| \quad (9)$$

$$D(x, 0, \omega) = \left| \frac{\sin(\frac{ka}{2} \sin(\tan^{-1}(x/z)))}{\frac{ka}{2} \sin(\tan^{-1}(x/z))} \right| \cdot \frac{\left\{ \left[ \sum_{i=1}^N \cos(2\pi f \cdot \Delta t_i) \right]^2 + \left[ \sum_{i=1}^N \sin(2\pi f \cdot \Delta t_i) \right]^2 \right\}^{1/2}}{N} \quad (10)$$

### 2.3 幅度加权变迹指向性函数

在发射和接收过程中, 可以通过对不同的阵元通道设置不同增益来进行幅度变迹处理, 以降低波束旁瓣。本文计算在线阵电子聚焦情况下幅度加权变迹对波束的影响。设第  $i$  个阵元权系数为  $W_i$ , 仍计算给定一个  $z$  值时, 声场随  $x$  值变化的趋势, 推导得此时的指向性函数为:

$$D(x, 0, \omega) = \left| \frac{\sin(\frac{ka}{2} \sin(\tan^{-1}(x/z)))}{\frac{ka}{2} \sin(\tan^{-1}(x/z))} \right| \cdot \frac{\left\{ \left[ \sum_{i=1}^N W_i \cdot \cos(2\pi f \cdot \Delta t_i) \right]^2 + \left[ \sum_{i=1}^N W_i \cdot \sin(2\pi f \cdot \Delta t_i) \right]^2 \right\}^{1/2}}{\sum_{i=1}^N W_i} \quad (11)$$

本文选用的加权函数为指数函数:

$$W_i = \begin{cases} \exp\left(-\left(\frac{2r(i - N/2 - 1)}{N}\right)^2\right), & i = 1, 2, \dots, N/2; \\ \exp\left(-\left(\frac{2r(i - N/2)}{N}\right)^2\right), & i = N/2 + 1, N/2 + 2, \dots, N \end{cases} \quad (12)$$

其中  $r$  值可选, 用来控制加权窗口的大小, 决定权函数的权重特性。

### 2.4 孔径变迹处理指向性函数

孔径变迹是指在发射时采用全部  $N$  个阵元, 而在接收过程中只采用中心  $M$  个阵元<sup>[5]</sup>。在前面讨论线列阵的指向性函数时, 由于采用恒定孔径收发, 为简单起见, 只计算了发射波束的指向性。实际线列阵总的指向性函数  $D(\theta)$  等于发射指向性函数  $D_T(\theta)$  和接收指向性函数  $D_R(\theta)$  的乘积, 即  $D(\theta) = D_T(\theta)D_R(\theta)$ , 由此推导出线列阵总的指向性函数

$$D(\theta) = \left[ \frac{\sin(\frac{ka}{2}\sin\theta)}{\frac{ka}{2}\sin\theta} \right]^2 \left| \frac{\sin(N\frac{kl}{2}\sin\theta)}{N\sin(\frac{kl}{2}\sin\theta)} \right| \left| \frac{\sin(M\frac{kd}{2}\sin\theta)}{M\sin(\frac{kd}{2}\sin\theta)} \right| \tag{13}$$

### 2.5 计算结果与分析

下面给出线列阵在不同情况下的指向性函数计算结果。超声波频率为  $f = 3.5\text{MHz}$ , 声速  $c = 1540\text{m/s}$ , 线列阵参数为:  $N = 32, d = 0.4\text{mm}, a = 0.35\text{mm}$ 。

#### 2.5.1 电子聚焦处理

在电子聚焦处理中, 焦点附近声束宽度  $d_f$  与焦距  $F$  和阵元数  $N$  有关。从图 3 可以看出, 当  $N$  保持不变时,  $d_f$  随  $F$  的增大而增大, 随  $F$  的减小而减小, 从而强聚焦方式的侧向分辨力比弱聚焦方式强。图 4 中  $F = 70\text{mm}$ , 对于每个  $N$  作出了两条曲线, 幅值相对较大的是不考虑调和函数作用时的指向性函数图, 另一条则是考虑调和函数作用时的指向性函数图。可以看出  $N$  越大,  $d_f$  越小, 调和函数对最大旁瓣值的影响也越小。由式(2)可知, 调和函数与阵元宽度  $a$  有关, 所以当  $N$  值较大时, 可以不考虑阵元宽度对波束的影响, 即将线列阵阵元看作点源。而当  $N$  较小时, 则必须考虑阵元宽度的影响。图 5 所示为  $N = 4$  时, 阵元宽度对波束的影响图。可见阵元宽度越大, 最大旁瓣压缩越明显。

#### 2.5.2 幅度变迹处理

在幅度加权变迹处理中, 将阵元幅度分布取中间大, 两边小的部分。图 6 给出了当焦距  $F = 70\text{mm}$  时, 不同  $r$  值所对应的指向性函数图。当  $r = 1, 2$  时, 最大旁瓣幅值比未经幅度变迹处理时大约分别下降了 20dB 和 50dB, 阵列换能器的波束特性得到明显改善。但同时可以看到, 主瓣宽度增加了 1mm 和 3mm, 旁瓣的降低总是伴随着波束宽度的增大, 因此权系数的选取必须综合考虑两方面的要求, 在

波束宽度满足要求的前提下尽可能降低旁瓣。

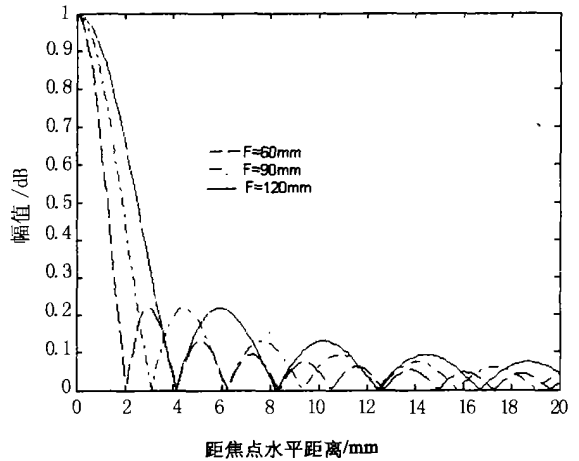


图 3 不同焦距时的指向性函数图

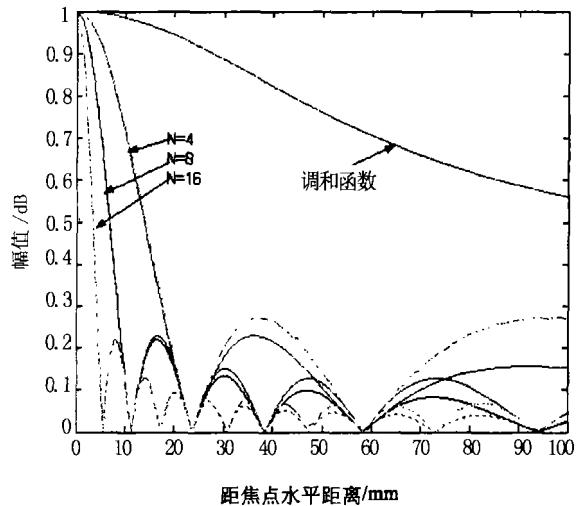


图 4 阵元数时, 阵的不同指向性函数图

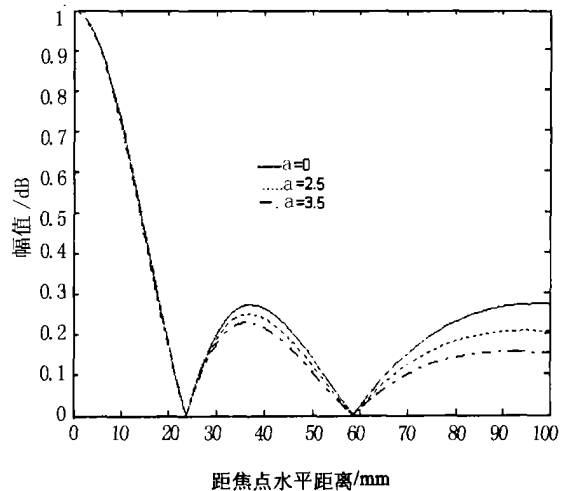


图 5 阵元宽度对波束的影响

#### 2.5.3 孔径变迹处理

当  $d = 0.25\text{mm}, a = 0.2\text{mm}$  系统其他参数不变

时,如果发射阵元数  $N = 15$ ,最大旁瓣随  $M$  的变化曲线图如图 7 所示。当  $M = 11$  时最大旁瓣值最小,所以 15 阵元线列阵的最佳接收孔径为 11。

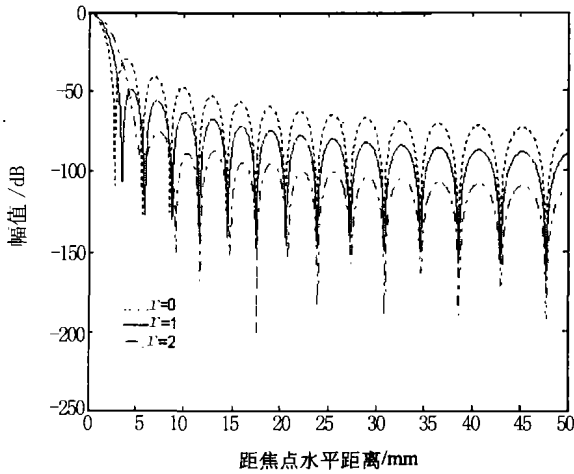


图 6 幅度加权变迹对波束的影响

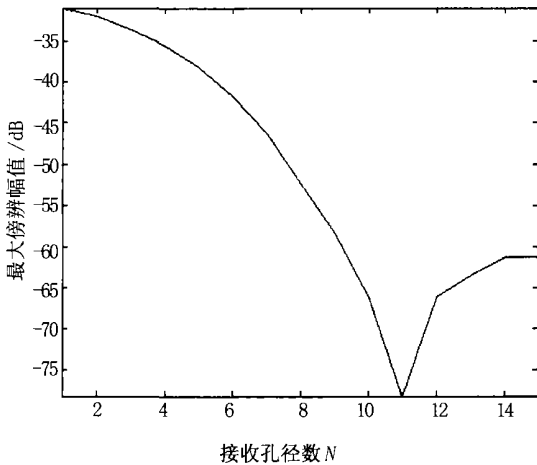


图 7 孔径变迹的旁瓣抑制性

### 3 宽带波声场

#### 3.1 宽带波功率指向性函数

前面讨论的都是单频波(窄带波)声场,在实际应用中,更多的是采用宽带波(时域上表现为持续时间很短的脉冲波)。在医学超声诊断中,使用脉冲波不但容易识别来自各种边界的回波信号,增强抗干扰能力,而且可以显著提高检测的纵向分辨力,同时又大大减少了总的声功率。脉冲波可看做是不同频率的单频波的叠加,因此采用能量检测方法,用功率指向性函数来表征阵的特性。宽带阵的功率指向性函数计算公式为<sup>[6]</sup>:

$$b(\theta, \varphi, \Delta\omega) = \frac{\int_{\omega_1}^{\omega_2} S(\omega) b(\theta, \varphi, \omega) d\omega}{\int_{\omega_1}^{\omega_2} S(\omega) d\omega} \quad (14)$$

式中  $S(\omega)$  为信号功率谱密度;  $\omega_1, \omega_2$  为频带下、上限;  $b(\theta, \varphi, \omega)$  为单频波功率指向性函数;  $b(\theta, \varphi, \omega) = D^2(\theta, \varphi, \omega)$ 。

#### 3.2 计算与分析

对于间隔为  $d$ 、阵元数为  $N$  的线列阵

$$b(\theta, \varphi, \omega) = D^2(\theta, \varphi, \omega) = \left| \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N \exp(-j\Delta\varphi_i) \right|^2 = \frac{1}{N} + \frac{2}{N^2} \sum_{i=1}^{N-1} \sum_{j=i+1}^N \cos(k\beta_{ij}) \quad (15)$$

式中  $\beta_{ij} = (j - i) d \sin\theta \cos\varphi$ 。假设信号  $s(t) = Sa(\omega_c t) \cos(\omega_0 t)$ , 对其进行傅立叶变换得

$$S(\omega) = \begin{cases} \frac{\pi}{2\omega_c} & \omega_1 \leq \omega \leq \omega_2 \\ 0 & \omega < \omega_1, \omega > \omega_2 \end{cases} \quad (16)$$

式中  $\omega_1 = \omega_0 - \omega_c$ ;  $\omega_2 = \omega_0 + \omega_c$

将式(15)、(16)代入式(14), 推导得到:

$$b(\theta, \varphi, \Delta\omega) = \frac{1}{N} + \frac{2}{N^2} \sum_{i=1}^{N-1} \sum_{j=i+1}^N \frac{\sin(\frac{\omega_2 \beta_{ij}}{c}) - \sin(\frac{\omega_1 \beta_{ij}}{c})}{\frac{\omega_2 \beta_{ij}}{c} - \frac{\omega_1 \beta_{ij}}{c}} \quad (17)$$

假设脉冲波经调制后,中心频率固定在  $f_0 = 2\text{MHz}$ 。线列阵参数与讨论单频波时相同。由式(16)知,带宽仅与  $\omega_c$  有关,通过改变  $\omega_c$  值可改变带宽。图 8 ~ 图 10 为不同带宽下的功率指向性函数图,图 11 为频率  $f = 2\text{MHz}$  的单频波声场功率指向性函数图。从图中可知,当带宽为  $1\text{MHz}$  时,指向性函数未出现起伏变化的旁瓣。随着带宽减小,脉冲

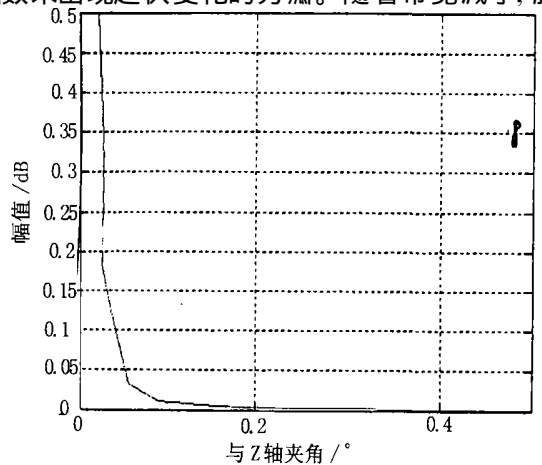


图 8 带宽为 1MHz 时功率指向性函数图

持续时间变长, 其功率指向性函数接近单频波时的图形, 当带宽为 0.001MHz 时, 其图形与单频波图形基本一致。

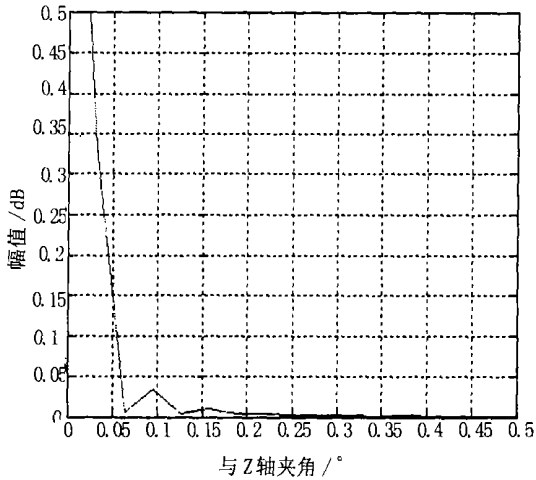


图9 带宽为 0.1MHz 时功率指向性函数图

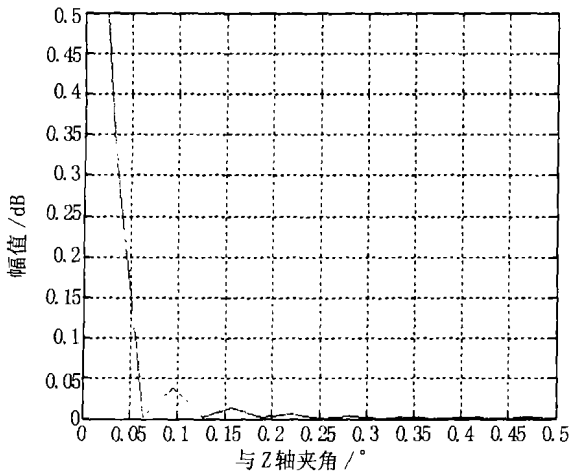


图10 带宽为 0.001MHz 时功率指向性函数图

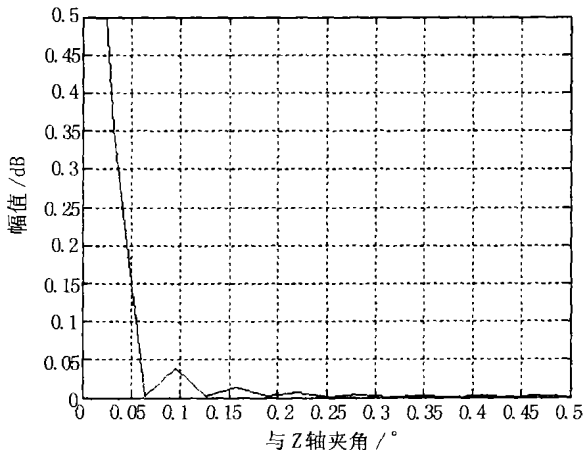


图11 单频  $f = 2\text{MHz}$  时功率指向性函数图

## 4 结束语

本文以线列阵为基础, 分别推导出单频波和宽带波声场的波束指向性函数, 并由此计算和讨论了它们的超声线阵列波束特性。分析结果表明:

(1) 电子聚焦处理能改善在声束扫描平面上的横向分辨特性。焦点附近的声束宽度与阵元数成反比, 与焦距成正比。

(2) 幅度加权变迹处理能够降低旁瓣, 但同时也会使波束宽度有所增大, 所以权系数的选取必须综合考虑两方面的要求。

(3) 孔径变迹基本不影响主瓣, 旁瓣的大小却随接收阵元数的变化而变化。一个恒定孔径发射, 可变孔径超声线阵列接收系统存在一个最佳接收孔径, 此时旁瓣最小。

(4) 当阵元数目较大时, 可以不考虑阵元宽度对波束的影响, 即将线列阵阵元看作点源, 而当阵元数目较少时, 则需考虑阵元宽度对波束的影响, 阵元宽度越大, 最大旁瓣抑制越明显。

(5) 宽带波带宽越小, 持续时间愈长, 宽带波声场的功率指向性函数图就愈接近单频波声场的功率指向性函数图。

## 参 考 文 献

- [1] Shi-Chang Woo, SHI Yijun. Influence of phased array element size on beam steering behavior[J]. Ultrasonics, 1998, 36(6): 737-749.
- [2] 王波, 万明习. 医用超声阵列换能器波束容差分析与变迹处理[J]. 西安交通大学学报, 1999, 33(3): 4-9.
- [3] 冯若. 超声诊断设备原理与设计[M]. 中国医药科技出版社, 1993. 48-49.
- [4] 左月萍, 孙肖子, 黄宇星. 超声波声场的计算法[J]. 西安电子科技大学学报, 2000, 27(4): 419-423.
- [5] 万明习, 卞正中, 程敬之. 医学超声——原理与技术[M]. 西安: 西安交通大学出版社, 1992. 197-199.
- [6] 栾桂冬. 压电换能器和换能器阵(下册)[M]. 北京: 北京大学出版社, 1990. 141-143.