

相控阵超声成像补偿聚焦技术

彭小冲,费跃农,俞志伟

(深圳大学 机电与控制工程学院,广东 深圳 518000)

摘要:针对相控阵成像中因为聚焦深度唯一且不能改变而导致成像失真问题,提出改进方法,提高相控阵检测成像质量。在用单个换能器单元轮流发射声波,全孔径单元接收的收发超声方式得到基础数据组的基础上,在数据处理中重构出发射聚焦和接收聚焦。提出在重构过程中运用动态聚焦补偿技术,使各个深度都聚焦。该文给出重构发射和接收聚焦点及动态聚焦补偿的理论基础,补偿点的计算方法,补偿电路的具体实现。从仿真结果可看出成像效果比传统单点聚焦相控阵有显著提高。提出的相控阵动态深度补偿技术改善了成像质量,物理实现电路简单且具有实用价值。

关键词:无损检测;超声波;相控阵;发射聚焦;动态聚焦

中图分类号:TB559

文献标识码:A

Phased Array Ultrasound Imaging with Compensatory Focusing Technique

PENG Xiaochong, FEI Yuenong, YUE Zhiwei

(College of Electrical and Control Engineering, Shenzhen University, Shenzhen 518000, China)

Abstract: A new scheme of phased array imaging was proposed in this paper in order to improve lateral resolution at all depths compared with the conventional scheme with a signal depth focusing. Each array element is excited individually and the resulting pulse echoes are received at all elements of the corresponding aperture. After repeating the transmit-and-receive step for all array elements, the receive focusing and transmit focusing can be reconstructed by using those echoes signal. During the reconstruction process, the echo signals are dynamically compensated in the special positions in order to focus in all depths. This paper presents the theoretical basis for the reconstruction and dynamical compensation. And the algorithm to figure out the compensation position is also provided. The computer simulation results show that the proposed scheme has significantly improved lateral resolution at all depths compared to the conventional one. The proposed scheme has the features of simple circuit and practical value.

Key words: nondestructive testing; ultrasound; phased array imaging; transmit focusing; dynamic focusing

0 引言

相控阵超声成像检测系统的相控效果(声束的偏转和聚焦效果)是由各阵元通道的发射和接收时延实现的。由于发射和接收时延影响系统的焦点的控制,进而影响到系统的空间分辨力。但因相控阵检测在一次收发过程中只有一个发射聚焦点和一个接收聚焦点,如果缺陷位置不在聚焦深度上,各个换能器单元接收波不能在缺陷深度同相位叠加,叠加出现相位差,成像失真;且成像离聚焦深度越远其失真越严重,缺陷成像越不清晰。

为了使上述失真减小,要实现发射和接收在被测物内各深度都聚焦。实现各深度都聚焦具有难点:

1) 传统相控阵发射聚焦点在各阵元发射瞬间已决定,不能动态改变。

2) 理想的动态聚焦需实现每个采样点都具有不同的各单元相对接收延时。否则就会由于相邻两聚焦点相距较远导致焦点盲区的问题。

3) 要使每个采样点都为聚焦点,需计算大量的聚焦法则,成像帧率会很低,要提高重构图像速度,势必要使用逻辑电路设计迭代算法来计算大量的延迟法则,一些研究者提出了具有实时动态聚焦功能的波束合成器^[1-3]。

4) 实际工业运用中,相控阵列不与被测物直接接触,他们之间存在着各种形状的楔块,声波穿过楔块时必然发生折射。折射后的声波路径(介质间入射点)会因为焦点改变而改变,即不存在一个可表征折射后单元延迟与聚焦点移动轨迹的迭代公式。在折射条件下,要设计可行的迭代电路只能通过用单一介质等效相控阵组来替代原来的相控阵组,再来

收稿日期:2014-02-21

作者简介:彭小冲(1990-),男,广东人,硕士生,主要从事无损检测的研究。E-mail:523208615@qq.com。费跃农(1962-),男,教授,博士。E-mail:feiyun@szu.edu.cn。

设计硬件电路实现动态聚焦算法,这种等效势必存在替代误差的问题。

在这种研究背景下,本文在采样相控阵^[4-5]采集基础数据组的基础上,提出相控阵聚焦补偿技术,离线地计算出各个深度的聚焦延时补偿表,对每个深度进行查表补偿聚焦,其好处有

1) 用采样相控阵发射和接收声波方式,可重构出发射聚焦点,在此基础上进行发射各深度聚焦补偿。

2) 查表补偿的方式重构图像成像效率高。

3) 我们在计算补偿点时,用楔块折射后的声路径,使在折射的条件下也可成功动态聚焦。

4) 在动态聚焦过程中,用读写表的方式代替了硬件电路迭代的方式,动态聚焦模块可简单地与波束合成器合成,可靠性好。

大多采样相控阵的文献只是对其发射和接收检测的描述,缺少方法说明和动态聚焦点重构的具体实现方案,本文将基于采样相控阵技术提出重构聚焦点和动态聚焦补偿实现方法。

1 动态发射聚焦补偿原理

假设有 N 个发射单元,对于每一个发射单元用下标 n 来区分,每个单元在电信号的激励下发出的超声波信号为

$$S_n(t) = P(t - t_{n0}, 0) \quad (1)$$

这里我们定义一个描述超声波脉冲的函数为

$$P(t, \varphi) = Ae^{-\alpha t} \sin(\omega t + \varphi) \epsilon(t) \quad (2)$$

由式(2)来描述超声波探头被激励后的振动。其原因是如果把超声波换能器等效成一个具有一定固有频率和阻尼系数的二阶电路,其冲激响应可描述为 $e^{-\alpha t} \sin(\omega t + \varphi)$,假设所有发射单元具有相同的固有频率 ω 和阻尼系数 α ,且假设 $\varphi = 0$ 。则 $P(t - t_{n0}, 0)$ 描述了第 n 个单元发出的超声波。其中 t_{n0} 为 n 单元发射延时。

1) 假设 1:每个超声波发射单元发出的都是球面波,即声场中某个点超声强度只与该点和各个发射单元间的距离有关。

2) 假设 2:超声波传播过程中的幅度衰减已被电子系统通过时间增益控制(TGC)予以补偿。

定义: R_m 为声场中某个点 x 到第 n 个发射单元的距离。则从第 n 个单元发出的超声脉冲在 x 点产生的振动为

$$S_{nx} = P(t - t_{n0} - t_{nx}, 0) \quad (3)$$

式中 t_{nx} 为超声波在声场中传播 R_m 所需的时间。因

此, N 个单元在 x 点产生的振动的总合 $S_x(t) = \sum_{n=1}^N S_{nx}(t)$ 。要使各单元发射聚焦在 x 点,即对于 $n=1, 2, \dots, N$, $S_{nx}(t)$ 在 x 点振动要同相位。令

$$S_{nx}(t) = P(t - t_{n0} - t_{nx}, 0) = P(t - t_{10} - t_{1x}, 0) \quad (4)$$

其中我们定义单元 1 为基准单元,并且假设 $t_{10} = 0$ (基准单元发射初始延时为 0,即以基准单元发射声波时刻为计时 0 点)。可反算出聚焦在 x 点,单元 n 的初始延时 t_{10} ,则

$$t_{n0} = t_{1x} - t_{nx} \quad (5)$$

满足式(5)有

$$S_x(t) = \sum_{n=1}^N S_{nx}(t) = \sum_{n=1}^N P(t - t_{1x}, 0) \quad (6)$$

如果空间 x 点产生反射,则单元 m 接收到反射的信号为

$$r_{xm}(t) = \sum_{n=1}^N P(t - t_{n0} - t_{nx} - t_{mx}, 0) = \sum_{n=1}^N P(t - t_{1x} - t_{mx}, 0) \quad (7)$$

式中 t_{mx} 为超声波传播 R_m 所需的时间,与 x 点位置和单元 m 位置有关。要使式(7)成立(发射聚焦在点 x),要满足式(5)。

$r_{xm}(t)$ 为 n 个单元的发射信号反射后以不同延时叠加。可以看出,要发射聚焦到 x 点, m 单元接收信号可当作 n 单元($n=1, 2, \dots, N$)发射信号反射后,进行 $t_{nx} - t_{1x}$ 相对前移的合成信号。即我们可将 m 单元接收到的 n 个回波信号进行 $t_{nx} - t_{1x}$ 的相对前移,来重构出单元 m 要在 x 点发射聚焦的接收信号。 t_{mx} 则是单元 m 接收延迟时间,合成 m 单元回波信号的 n 个信号的接收延迟相等,只与 m 单元与 x 点位置有关。影响发射聚焦点的只有相对延时 t_{n0} 。

$$r_{xm}(t) = \sum_{n=1}^N R_{mn}(t - t_{n0}) = \sum_{n=1}^N R_{mn}(t - t_{1x} + t_{nx}) \quad (8)$$

在只分析发射聚焦的情况下, $r_{xm}(t)$ 可看成只和 t_{n0} 参数有关的函数,这里的 $R_{mn}(t)$ 为单元 n 发出信号后 m 单元收到的回波信号。式(8)为发射聚焦在 x 点条件。

假设:存在 x^* 点接近 x ,如图 1 所示,这里讨论的 x^* 点必须满足

1) x^* 点为基准单元(这里取 $n=1$ 为基准单元)发出超声波过 x 点的传播路径上的一点(即 x^* 点为合成线上的点,折射路径适用)。

2) 对于 $n=1, 2, \dots, N$ 都有 $t_{nx}^* > t_{nx}$ (x^* 较 x 远), 并假设有 $t_{nx}^* - t_{nx} = \Delta t_n$ 。

如果要对 x^* 点发射聚焦, 聚焦算法应使接收到 n 单元发出的反射信号的信号向前移动 $t_{nx}^* - t_{1x}^*$, 即

$$r_{x^*m}(t) = \sum_{n=1}^N R_{mn}(t + t_{nx}^* - t_{1x}^*) \quad (9)$$

相当于

$$r_{x^*m}(t) = \sum_{n=1}^N R_{mn}(t + t_{nx} - t_{1x} + \Delta t_n - \Delta t_1) \quad (10)$$

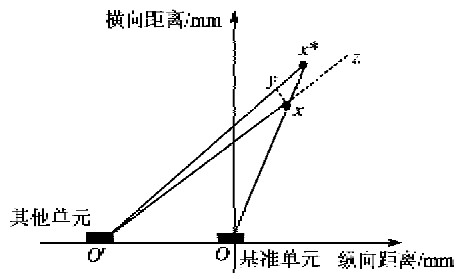


图1 聚焦点与换能器单元位置关系

由假设条件得到几何关系如图1所示。当 x^* , x 与基准单元在同一条传播线上时必有 $xx^* > yx^*$ (其中 $O'y = O'x$)。

证明: $\triangle O'yx$ 为等腰三角形, 有 $\angle O'yx = \angle O'xy$ 。作 $O'x$ 延长线 xz , 由于 $O'x$ 与 Ox 必相交于 x 点, 所以 $\angle x^*xz > 0$ 。明显有 $\angle x^*yx = \angle xzy$, 即 $\angle x^*yx = \angle x^*xz + \angle x^*xy$, 得出 $\angle x^*yx > \angle x^*xy$ 。三角形内大角对大边, 得出结论 $xx^* > yx^*$ 。即必有 $\Delta t_1 > \Delta t_n$, 又有 $r_{x^*m}(t) = \sum_{n=1}^N R_{mn}(t + t_{nx} - t_{1x} + \Delta t_n - \Delta t_1)$, 即每个单元通道向前移动来合成 x^* 发射聚焦的时间变短了, 这是符合实际的, 因为聚焦点越远, 各个单元间的延迟差越小, 当聚焦在无穷远处时, 相当于每个单元间没有相对延迟。

将 $r_{x^*m}(t)$, $r_{xm}(t)$ 分段取出, 结合成一个新的 $r_m(t)$ 。在初始发射聚焦在 x 点后, 对 $t_{1x} + t_{nx}$ 后的信号进行长度为 $\Delta t_1 - \Delta t_n$ 的信号补偿 $\delta_n(t)$, 补偿后由 $t_{1x} + t_{nx} + \Delta t_1 - \Delta t_n$ 时刻开始信号对 x^* 发射聚焦。补偿函数 $\delta_n(t)$ 可取常数, 若 $\Delta t_1 - \Delta t_n$ 较小, 可取为两端信号均值。

$$r_{x,x^*}^n(t) = \begin{cases} R_{mn}(t + t_{nx} - t_{1x}) & t \leq t_{1x} + t_{nx} \\ \delta_n(t) & t_{1x} + t_{nx} < t < t_{1x} + t_{nx} + \Delta t_1 - \Delta t_n \\ R_{mn}(t + t_{nx} - t_{1x} + \Delta t_n - \Delta t_1) & t \geq t_{1x} + t_{nx} + \Delta t_1 - \Delta t_n \end{cases} \quad (11)$$

上述默认以基准单元发出声波时刻为各单元接收声波起点 (即 $t_{10} = 0$), $t_{1x} + t_{nx}$ 为单元 n 接收到点 x 回波所需的时间, 由此时刻开始补偿。由于 $\Delta t_1 - \Delta t_n$ 与通道 n 有关, 每个通道补偿时刻不同, 先补偿后再进行各单元信号的合成。

$$r_m(t) = \sum_{n=1}^N r_{x,x^*}^n(t) \quad (12)$$

最终得到的 $r_m(t)$ 为具有初始发射聚焦点 x 和补偿发射聚焦点 x^* 的 m 单元接收合成信号。同理, 我们可对更多的点进行补偿聚焦, 实现动态发射聚焦的效果。

实际情况中, $\Delta t_1 - \Delta t_n$ 不可能取到无限小, 补偿的最小单位与采样周期 T 有关, 离散化后有

$$r_{xm}(\tau) = \sum_{n=1}^N R_{mn}(\tau - \tau_{nx}) \quad (13)$$

与式(8)的推导相同, $r_{xm}(\tau)$ 可表示为 n 个单元的发射的回波信号在不同延时周期的叠加。即我们可将 m 单元接收到的 n 个反射信号进行 $\tau_{nx} - \tau_{1x}$ 个采样周期的相对前移, 来重构出单元 m 接收到要在 x 点发射聚焦的离散信号。

$$r_{xm}(\tau) = \sum_{n=1}^N R_{mn}(\tau - \tau_{nx}) = \sum_{n=1}^N R_{mn}(\tau - \tau_{1x} + \tau_{nx})x^* \quad (14)$$

式(13)与同样满足假设1, 2, 在点 x^* 发射聚焦时有

$$r_{x^*m}(\tau) = \sum_{n=1}^N R_{mn}(\tau + \tau_{nx}^* - \tau_{1x}^*) \quad (15)$$

相当于

$$r_{x^*m}(\tau) = \sum_{n=1}^N R_{mn}(\tau + \tau_{nx} - \tau_{1x} + \Delta \tau_n - \Delta \tau_1) \quad (16)$$

式中 $\Delta \tau_n = \tau_{nx}^* - \tau_{nx}$ 。 $r_{xm}(\tau)$ 为 n 个单元信号向前移动 $\tau_{nx} - \tau_{1x}$ 后合成 m 单元接收到的对于 x 点的发射聚焦信号。 $r_{x^*m}(\tau)$ 为 n 个单元信号向前移动 $\tau_{nx} - \tau_{1x}$ 后再向后移动 $\Delta \tau_1 - \Delta \tau_n$ 合成 m 单元接收到的对于 x^* 点的发射聚焦信号。因此, 在表示 x 点前信号向前移动 $\tau_{nx} - \tau_{1x}$, 表示 x^* 点后信号再向后移动 $\Delta \tau_1 - \Delta \tau_n$, 中间插入补偿值 δ_n (可取两端均值)。这样处理相当于 m 单元接收信号具有两个发射聚焦点。

$$r_{x,x^*}^n(t) = \begin{cases} R_{mn}(\tau + \tau_{nx} - \tau_{1x}) & \tau \leq \tau_{1x} + \tau_{nx} \\ \delta_n & \tau_{1x} + \tau_{nx} < \tau < \tau_{1x} + \tau_{nx} + \Delta \tau_1 - \Delta \tau_n \\ R_{mn}(\tau + \tau_{nx} - \tau_{1x} + \Delta \tau_n - \Delta \tau_1) & \tau \geq \tau_{1x} + \tau_{nx} + \Delta \tau_1 - \Delta \tau_n \end{cases} \quad (17)$$

各单元求和后得到和信号为

$$r_n(\tau) = \sum_{s=1}^N r_{n,s}^*(\tau) \quad (18)$$

不断地通过补偿延迟来增加聚焦点,极限的情况是—旦 $\Delta\tau_1 - \Delta\tau_n > 1$, 通道 n 就从这点开始向后延迟一个单位(补偿一个单位),对初始聚焦点后所有点都进行判断,实现全采样点发射聚焦目的。

传统超声检测的发射方式是各个单元通过不同延迟激励,来聚焦到空间中的某点,这样每个单元接收到的 n 个 R 分量相对延迟时间就已固定,不能重构出其他聚焦点。我们可用采样相控阵技术,即单元轮流单独发射方式,来得到合成每个单元接收信号的 n 个 R 分量。如图 2 所示。

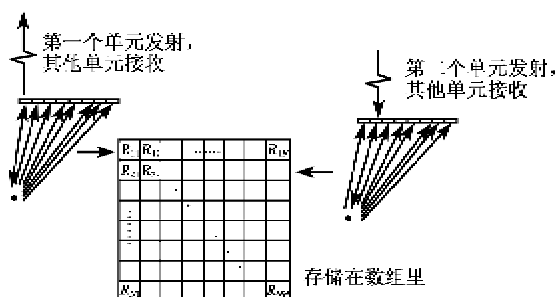


图 2 N 个晶片采样相控阵基础元素组

每一个单元单独发出超声波,然后所有的单元接收回波,获得的基础元素组,这个过程称为超声采样。由于每个晶片轮流发射,即每个合成接收信号的 R 都是独立的。我们可利用得到的采样相控阵元素组来重构出所有单元的发射和接收聚焦信号。

为了验证用采样相控阵采得的基础元素组重构单聚焦点的阵元接收信号与普通相控阵单聚焦发射接收的信号相同,做出以下计算机仿真,即

仿真采用线型扫查方式,换能器有 100 个单元,每次将 32 个单元分为一组发射和接收,共采集 69 条线扫描信号重构图像。换能器中心频率为 3 MHz,单元中心距为 0.5 mm。空间中有 5 个反射理想点,分布在 10 mm、20 mm、30 mm、40 mm、50 mm。采样频率为 100 MHz,介质声速为 1 540 m/s。图 3 为传统相控阵发射接收方式,发射与接收聚焦在 10 mm(第一个反射点深度)。图 4 为用采样相控阵发射接收方式。由图可知,单阵元轮流发射,全探头接收,得到基础元素组,再重构出 B 扫图。重构后的信号值与普通发射接收方式信号值相同,检测效果无区别。

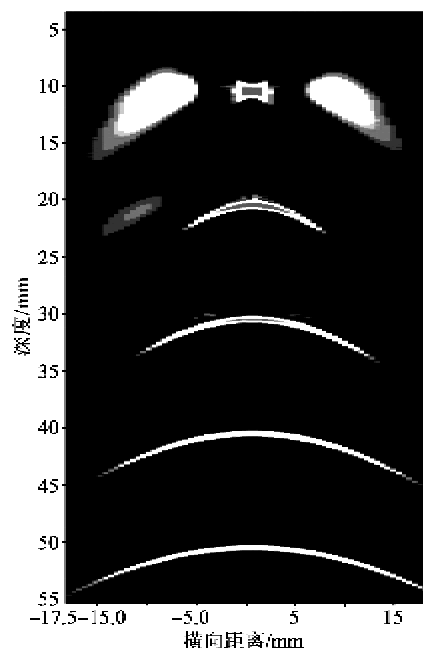


图 3 传统相控阵检测

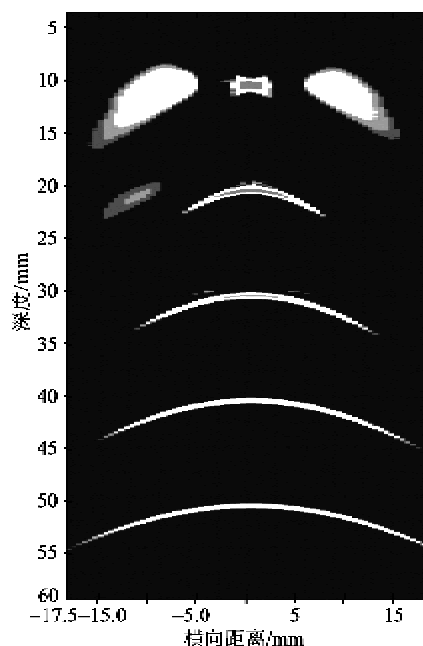


图 4 采样相控阵检测,元素组重构

2 动态接收聚焦补偿原理

在发射聚焦的推导过程中,我们知道相控阵发射聚焦在 x 点后,空间如果产生反射,则单元 m 接收到反射的信号为

$$r_{xm}(t) = \sum_{n=1}^N R_{mn}(t + t_{nx} - t_{1,x}) \quad (19)$$

如果是经过发射动态聚焦补偿处理, $r_{xm}(t)$ 可表示为

$$r_{xm}(t) = r_m(t) = \sum_{n=1}^N r_{x,x^*}^n \dots \quad (20)$$

如果想要对于 x 点进行接收聚焦, 根据接收聚焦法则, 应使所有的 $r_{xm}(t)$ 都与 $r_{x1}(t)$ (这里单元 1 为基准单元) 对齐, 假设 $t_{mx} > t_{1x}$, $r_{xm}(t)$ 要向前移动 $t_{mx} - t_{1x}$, 则

$$r_x(t) = \sum_{n=1}^N r_{xm}(t + t_{mx} - t_{1x}) \quad (21)$$

位移后 $r_x(t)$ 为具有接收聚焦点 x 接收的求和信号。

同样假设存在 x^* 点接近 x , 这里讨论的 x^* 点相同必须满足图 1 所示的条件。假设条件几何关系如图 1 所示, 如果 $r_x(t)$ 要对 x^* 点接收聚焦, 聚焦算法应使所有的 $r_{xm}(t)$ 都向前移动 $t_{mx^*} - t_{1x}$, 则

$$r_{x^*}(t) = \sum_{n=1}^N r_{xm}(t + t_{mx^*} - t_{1x}) \quad (22)$$

相当于

$$r_{x^*}(t) = \sum_{n=1}^N r_{xm}(t + t_{mx} - t_{1x} + \Delta t_m - \Delta t_1) \quad (23)$$

从图 1 下面的证明结果可知 $\Delta t_1 > \Delta t_m$, 即当接收聚焦到 x^* 点时, 相对于接收聚焦在点 x , 每个单元通道 $r_{xm}(t)$ 向前移动的时间变短了, 这是符合实际的, 因为聚焦点越远, 各个单元间的延迟差越小, 当聚焦在无穷远处时, 相当于每个单元间没有相对延迟。

将 $r_{x^*}(t)$ 、 $r_x(t)$ 分段取出, 结合成一个新的 $r_{x,x^*}^n(t)$ 。在初始接收聚焦在 x 点后, 对时间 $t_{1x} + t_{mx}$ 后的信号进行长度为 $\Delta t_1 - \Delta t_m$ 的信号补偿 $\delta_m(t)$, 补偿后由 $t_{1x} + t_{mx} + \Delta t_1 - \Delta t_m$ 时刻开始信号对 x^* 聚焦。补偿函数 $\delta_m(t)$ 可取常数, 若 $\Delta t_1 - \Delta t_m$ 较小, 可取为两端信号均值, 即

$$r_{x,x^*}^n(t) = \begin{cases} r_{xm}(t + t_{mx} - t_{1x}) & t \leq t_{1x} + t_{mx} \\ \delta_m(t) & t_{1x} + t_{mx} < t < t_{1x} + t_{mx} + \Delta t_1 - \Delta t_m \\ r_{xm}(t + t_{mx} - t_{1x} + \Delta t_m - \Delta t_1) & t \geq t_{1x} + t_{mx} + \Delta t_1 - \Delta t_m \end{cases} \quad (24)$$

由于每个单元通道的补偿时刻不同, 各通道补偿后再进行各单元信号的合成。

$$r(t) = \sum_{n=1}^N r_{x,x^*}^n(t) \quad (25)$$

最终得到的 $r(t)$ 为具有初始聚焦点 x 和补偿聚焦点 x^* 的合成信号。同理, 我们可对更多的点进行

补偿聚焦, 实现动态接收聚焦的效果。

实际情况中, $\Delta t_1 - \Delta t_m$ 不可能取到无限小, 补偿的最小单位与采样周期 T 大小有关, 离散化后:

$$r_{x,x^*}^n(\tau) = \begin{cases} r_{xm}(\tau + t_{mx} - t_{1x}) & \tau \leq t_{1x} + t_{mx} \\ \delta_n & t_{1x} + t_{mx} < \tau < t_{1x} + t_{mx} + \Delta t_1 - \Delta t_m \\ r_{xm}(\tau + t_{mx} - t_{1x} + \Delta t_m - \Delta t_1) & \tau \geq t_{1x} + t_{mx} + \Delta t_1 - \Delta t_m \end{cases} \quad (26)$$

各单元求和后得到和信号为

$$r(\tau) = \sum_{m=1}^N r_{x,x^*}^m(\tau) \quad (27)$$

不断地通过调整延迟来增加聚焦点, 极限的情况是一旦 $\Delta t_1 - \Delta t_m > 1$ 时, 通道 m 就从这点开始向后延迟一个单位, 对初始聚焦点后所有采样点都进行判断, 若满足条件就插入补偿值, 实现动态聚焦目的。

通过对动态发射聚焦补偿和动态接收聚焦补偿原理的对比可看出, 补偿时刻都是以 $\Delta t_1 - \Delta t_m > 1$ 作为判据的。这是符合实际的, 因为发射聚焦和接收聚焦本来就是互逆的过程, 它们之间没有本质区别。动态补偿实际补偿的是空间中某点动态轨迹与各单元间的距离差, 与单元发射或接收声波无关, 只与他们的空间位置有关。这说明在补偿发射动态聚焦和补偿接收动态聚焦时是用同一个补偿规则补偿的, 补偿点位置可同用。图 5 为相控阵超声补偿聚焦的数据处理过程。

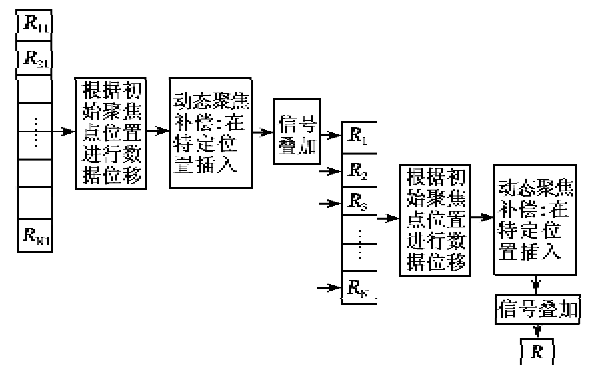


图 5 采样相控阵补偿聚焦数据处理过程

3 补偿时刻计算

假设有 N 个换能器单元, 对于每一个单元用下标 n 来区分, t_{nx} 为 n 单元接收到 x 点信号所需的超声传播时间, T 为采样周期。 t_{nx} 可根据 x 点到单元 n 的声波传播最短距离除以声波传播速度得到。

假设 x 点为初始聚焦点, 并把基准单元 (这里

将 1 单元设为基准单元)发出超声波过 x 点的传播路径称为声束合成线(折射路径适合)。定义数组 A_n 来记录通道 n 的补偿时刻。在补偿发射聚焦时, n 以发射单元区分。在补偿接收聚焦时, n 以接收单元区分。

在合成线上找到点 x_{nd}^* , 满足 $t_{1x_{nd}^*} - t_{1x} = nd \times 0.5 \times T$, $t_{1x_{nd}^*}$ 为基准单元 1 到点 x_{nd}^* 声波传播时间, t_{1x} 为单元 1 到初始聚焦点 x 的声波传播时间, 系数 0.5 是声波传播路径为两采样点间代表距离的 2 倍, 在 1 单元接收信号里, x_{nd}^* 点信号是初始聚焦点 x 信号后第 nd 点, 参考如图 6 所示。 $nd \in (1, \max)$, $\max$ 取决于总采样点数。参考图 6 可求出基准单元接收信号中, 每个采样周期对应的实际点位置。

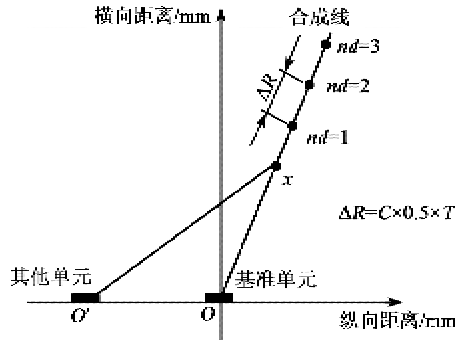


图 6 合成线上两采样点间隔为 ΔR

对 x_{nd}^* 逐个进行判断, 判断条件为

$$t_{1x_{nd}^*} - t_{1x} - (t_{1x_{nd}^*} - t_{1x}) \geq num \times T \quad (28)$$

式中 num 为通道 n 的插入补偿次数, 若条件成立则 x 点信号后第 nd 个点要插入单位延时, 将此 nd 存入 A_n , 并将 num 加 1, 用下一个 x_{nd}^* 进行判断, 一直运行直至 $nd = \max$ 。

算法流程如图 7 所示。

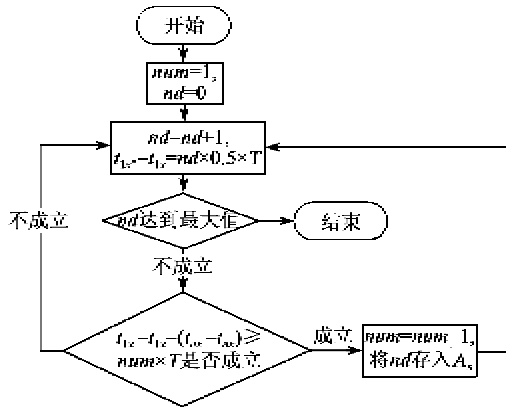


图 7 补偿位置计算流程图

4 计算机仿真

仿真采用线型扫描方式, 换能器有 100 个单元,

每次将 32 个单元分为一组发射和接收, 共采集 69 条线扫描信号重构图像。换能器中心频率为 3 MHz, 单元中心距为 0.5 mm。空间中有 10 个反射理想点, 均匀分布在 10~100 mm 位置。发射聚焦在 10 mm (第一个反射点深度)。采样频率为 100 MHz, 介质声速为 1540 m/s。图 8~10 分别为普通相控阵技术, 接收动态聚焦补偿成像, 和采样相控阵补偿聚焦重构成像。

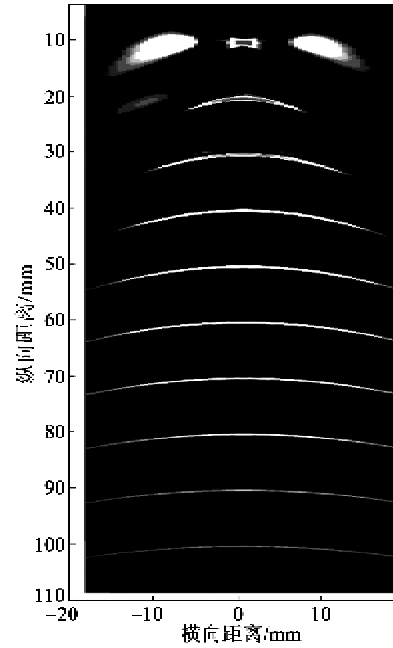


图 8 传统相控聚焦, 聚焦 10 mm 深度

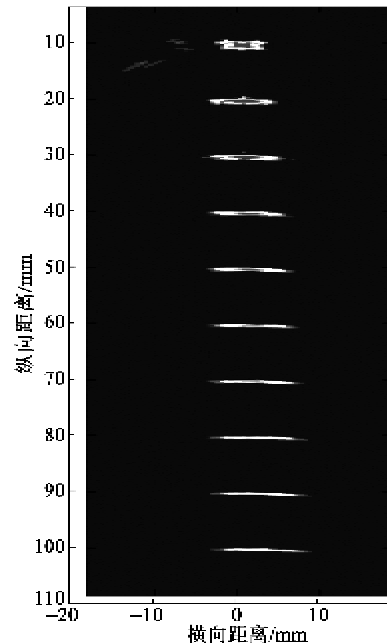


图 9 接收动态补偿后图像

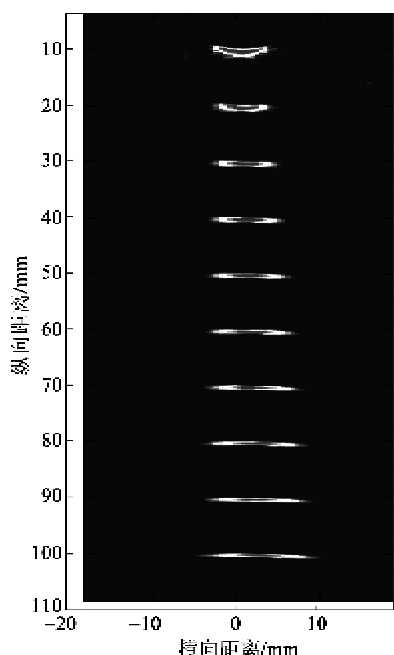


图 10 发射和接收动态聚焦补偿

图 8 为发射与接收聚焦都在 10 mm 深度(第一个反射点深度)。第一个反射点成像清晰,横向分辨力强,但是由于是近场聚焦,其他点成像失真严重,成像位置偏离原点位置,离聚焦深度越远,失真越严重,远场中的反射点成像模糊,甚至没有成像。

图 9 为发射聚焦在 10 mm 深度,只对接收信号进行动态深度聚焦处理后的成像。图中,无论是近场点还是远场点,横向和纵向分辨力强,成像位置与实际位置无误差,但远场点成像能量衰减了。

图 10 为运用采样相控阵技术重构,并进行发射和接收补偿后的图像,与图 9 相比,各反射点成像均匀,无论是近场点还是远场点,成像均匀清晰,横向和纵向分辨力强,成像位置与实际位置无误差。

采样相控阵补偿聚焦技术使超声成像质量有了巨大提高。

5 补偿系统的实现

图 11 为补偿系统实现框图。图中,相控阵超声换能器有 N 个单元。换能器发射超声波至被测物体,然后接收回波信号。通过调节延迟可控制聚焦点位置和角度。由于采样相控阵补偿聚焦数据处理过程包括两次补偿和两次叠加(见图 5),而补偿只是数据的平移,可和叠加交换顺序,所以设计的补偿聚焦系统如图 11 所示,将两次补偿放在一起,节省资源。图 12 为补偿系统运行方式,每次单个阵元发射都会合成出一个部分线扫描信号,最后将 N 次发

射的部分线扫描信号再叠加起来得到最终的合成线扫描信号。

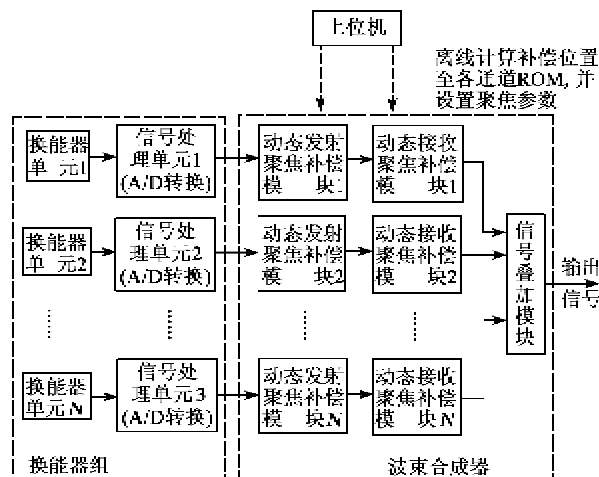


图 11 补偿聚焦信号处理环节

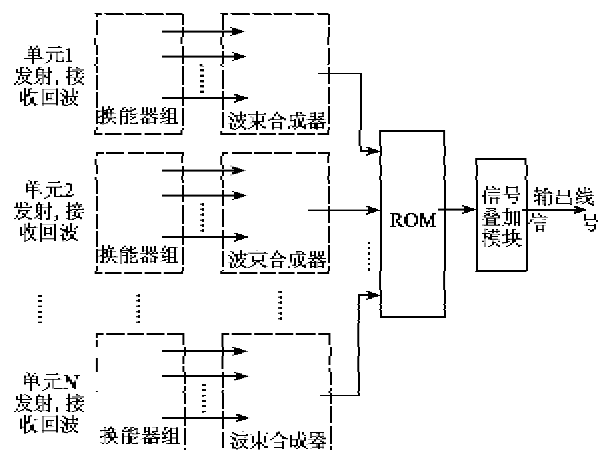


图 12 孔径每个单元轮流发射,波束合成器输出信号先存入 ROM,最后叠加输出

换能器组接收到回波后,将振动转换成电信号,再通过信号处理单元,将信号离散数字化,最后将信号输入到波束合成器。波束合成器由动态发射聚焦补偿模块组、动态接收聚焦补偿模块组和信号叠加模块 3 部分组成。动态发射聚焦补偿模块和动态接收聚焦补偿模块可改变信号叠加时各通道的初始延迟和插值延迟来改变初始聚焦点和增加动态聚焦点。

图 13 为动态发射(接收)聚焦补偿模块的内部结构框图。模块由存储器,双口 RAM,比较器和若干计数器等构成。每个通道的离散数字信号从信号处理单元同时在每个时间周期将数据一个个地写入相应通道的双口 RAM 中,并在每个时间周期一个个读出,通过动态改变 RAM 的读写地址差来改变

各通道的延迟。假设通道要补偿一个单位时间延迟,则通道这个周期 RAM 读地址保持不变,延迟周期数等于写地址与读地址的差,因为写地址每个周期都加 1,此时写读地址差增加 1,相当于补偿了 1

个延迟。用计数器记录下启动补偿后的第几个输出值。假设通道 n 这个周期不用插入补偿延迟,写读地址都加 1,写读地址差不变。

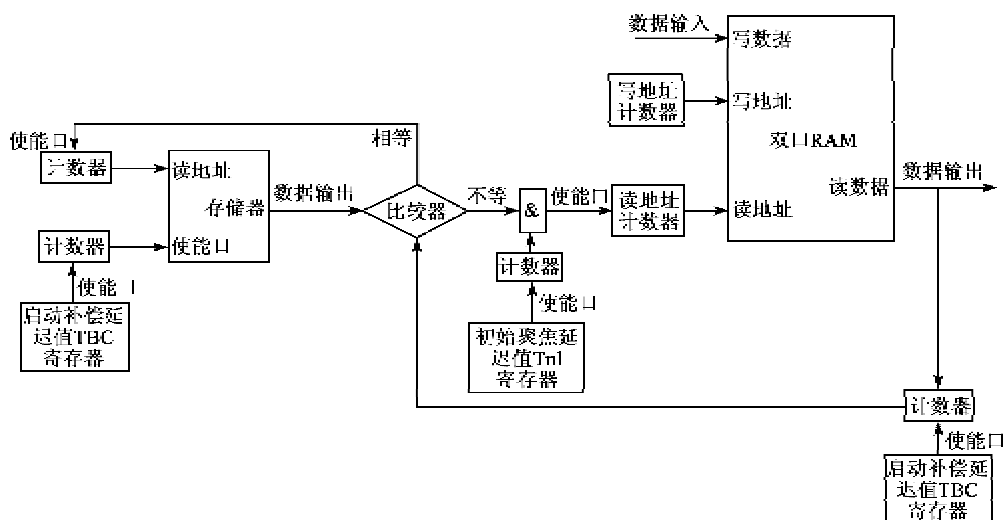


图 13 动态发射(接收)聚焦补偿模块

将 A_n 存入第 n 个通道的存储器中,来产生补偿延迟信号。存储器输出值经过一个比较器与双口 RAM 输出值计数器比较。若相等,双口 RAM 读地址不变,增加一个延迟,存储器读地址加 1,输出下一个存储器值;若不等,双口 RAM 读地址加 1,存储器读地址不变。

对于动态发射聚焦模块,存入模块内存储器的 A_n 下标 n 为当前发射通道号。对于动态接收聚焦模块,存入模块内存储器的 A_n 下标 n 为本通道号。

由图 13 可知,动态发射聚焦模块和动态接收聚焦模块内部都有两个延迟参数寄存器,初始聚焦延迟值是 RAM 读写地址的初始差,用来决定合成线的角度和初始聚焦点 x ,根据初始聚焦点与单元 n 间距离对应采样周期设置,其中动态接收补偿模块初始聚焦延迟值为发射补偿模块的两倍。启动补偿延迟值(TBC)是补偿功能启动延迟,即存储器的开始输出补偿点值时间,动态发射补偿模块的补偿功能启动延迟是基准单元至初始聚焦点距离的两倍对应声波传播时间的采样周期数。动态接收补偿模块的启动延迟为本通道的发射启动补偿延迟加上本通道的初始聚焦延迟,使在初始聚焦点后开始插值功能。这 4 个参数可以在上位机调节。

6 结论

本文基于采样相控阵技术可知,单个单元轮流

发射全单元接收得到基础信号组,提出动态聚焦补偿法,对基础信号进行发射动态聚焦补偿和接收动态聚焦补偿。用补偿后得到的线扫图可重构出理论上全图聚焦的超声检测成像,由计算机仿真可看出这种方法对比传统单聚焦点相控阵成像质量有了巨大提高。文章提供了聚焦重构的理论基础,动态聚焦补偿原理,给出动态聚焦补偿点的计算方法,最后设计了具有动态补偿功能的波束合成器的实现方案,并在 Simulink 与 Xilinx 联合平台进行设计方案的功能性验证。

本文提出补偿方法优势:

1) 在计算补偿点时,用模块折射后的声波路径,使在折射的条件下也可成功动态聚焦。满足工业上实际检测探头不与被测物直接接触要求。

2) 把计算聚焦法则的时间在上位机提前完成,动态聚焦过程就变成了查找表的过程,成像帧高。在选用楔块固定和被测物声速不变的情况下,延时补偿位置可复用,只要离线计算一次补偿表就可长期满足补偿要求。仿真中,上位机离线计算一条扫描线各通道补偿位置要用 10 s 左右,在可接受的范围内。

3) 在动态聚焦过程中,用读表的方式代替了硬件电路迭代的方式,动态聚焦模块可简单地与波束合成器合成,可靠性好。

(下转第 133 页)