

基于椭圆弧扫描转换的超声波 无损检测全聚焦算法

崔文凯, 秦开怀

(清华大学计算机科学与技术系, 北京 100084)

摘要: 针对超声波无损检测的全聚焦算法(TFM)处理全矩阵数据耗时巨大的问题, 本文基于椭圆弧扫描转换提出了一种单层物体超声波无损检测的新全聚焦算法 DEA-TFM. 相对于传统全聚焦算法的逆向处理过程, 新算法结合计算机光栅图形学中的椭圆绘制算法, 解释了全聚焦算法的计算过程实际上是一个正向处理过程; 它将结果图像的绘制和生成转化为椭圆弧的扫描转换操作和叠加; 同时对原 Bresenham 椭圆绘制算法进行扩展, 提出了绘制二维任意椭圆的改进算法, 使新全聚焦算法能够适用于任意形状的相控阵超声波换能器探头. 经过仿真实验证明, 新算法和传统算法有着相同的运行结果, 但是新算法运行速度有一个数量级的提升.

关键词: 超声相控阵; 无损检测; 全聚焦算法; 椭圆绘制; 正向解释

中图分类号: TG115.28+5

文献标识码: A

文章编号: 0372-2112(2017)10-2375-08

电子学报 URL: <http://www.ejournal.org.cn>

DOI: 10.3969/j.issn.0372-2112.2017.10.010

Total Focusing Method for Ultrasonic Non-Destructive Inspection of Homogenous Objects Based on Elliptical Arc Scan-Conversion

CUI Wen-kai, QIN Kai-huai

(Department of Computer Science and Technology, Tsinghua University, Beijing 100084, China)

Abstract: Since it is extremely time-consuming for the traditional total focusing method (TFM) to process ultrasonic full matrix data, a novel total focusing method based on drawing elliptical arcs (DEA), called DEA-TFM, is proposed in this paper. Unlike the reversed computing process of the traditional TFM, DEA-TFM reinterprets the new total focusing method in the forward direction to improve its performance. Combined with the generation of elliptic arcs in computer raster graphics, DEA-TFM converts the generation of the result image to scan-conversion operations of multiple elliptical arcs. Besides, based on Bresenham ellipse algorithm, a rendering algorithm applicable to arbitrary elliptic arcs is put forward, making the novel total focusing method suitable for phased array probes in any shapes. The simulation experiments show that the result images generated by the novel total focusing method, DEA-TFM, are identical to those obtained by the traditional method, but the new total focusing method speeds up the imaging process by one order of magnitude.

Key words: ultrasonic phased array; non-destructive testing; total focusing method; ellipse rendering algorithm; forward explanation

1 引言

相控阵超声检测系统在石油勘探、工业产品检测等诸多领域有着广泛应用. 相对于使用单一阵元换能器的传统检测方法, 相控阵检测系统的主要优点在于可以通过控制阵元的时延对波束的灵活控制, 来实现线性扫查、扇形扫查、动态聚焦等多种探测方式.

全矩阵捕获^[1]是一种面向相控阵检测系统的数据获取方式, 对于相控阵中的阵元, 能够获取所有发送-接收阵元组的时域数据. 即假设相控阵中有 N 个阵元, 全矩阵捕获能够收集 N^2 个 A 扫信号. 具体过程如图 1 所示, 每次选择相控阵中一个阵元作为发送阵元, 然后将所有的阵元作为接收阵元, 重复此过程直至所有的阵元均曾作为发送阵元.

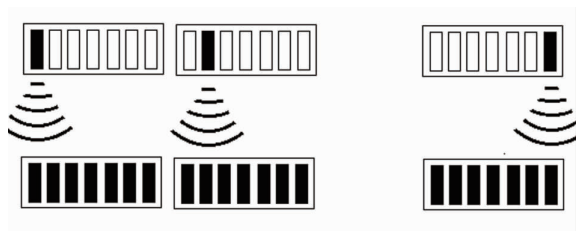


图1 全矩阵捕获

对于获取的全矩阵数据,运用合成孔径聚焦(SAFT)、衍射时差法(Time-of-Flight)^[2]等多种算法进行后处理生成结果图像.其中,全聚焦算法(TFM)可以实现探测区域内任何一点聚焦,获得最佳的信噪比和图像分辨率^[1].其基本原理同合成孔径聚焦^[3]相同,即根据声波传输延时获得对应的时域信号,将所有阵元信号的幅度值累加来获得图像中像素点的值.不同之处在于合成孔径聚焦中,发送阵元和接收阵元必须相同,而在全聚焦算法中可以任意组合.

全聚焦算法提升了无损检测的精度和范围,因此逐渐应用到动车轮^[4]、镁合金壳体^[5]、L型构件^[6]、铝制试件^[7]、复合材料^[8]、管道^[9]等诸多工业检测中.为了进一步提升全聚焦算法成像效果,向量全聚焦算法^[10-11]对原始全矩阵数据进一步处理,获得内部缺陷的方向、振幅以及反射率等相关信息;通过构建声波在多层介质传播过程中的能量衰减模型,可以进一步扩大检测范围,并降低检测误差^[12].

全聚焦算法需要对庞大的全矩阵数据进行处理,极大制约了算法的性能和工业应用.为了提升全聚焦算法的运行速度,当前主要有以下方法:

一是对全聚焦算法进行并行化,即使用GPU对算法进行加速^[13].由于全聚焦算法并行程度较高,该方法对全聚焦算法的速度提升最为明显.

二是在保证成像效果的前提下,综合考虑换能器方向、声波传输路径等因素,尽可能降低相控阵中阵元的数目^[14].此方法虽然可以一定程度上提升算法运行速度,但是考虑到对成像效果的影响,阵元数目不能太少,加速效果不如使用GPU明显.

在全聚焦算法和合成孔径聚焦算法中,最耗时的操作是计算换能器阵元与目标像素点之间的距离,因为涉及到均方根运算.全聚焦算法过程中,阵元与像素点之间的距离需要被重复计算多次,造成了计算资源的浪费.因此预先计算出每个阵元与所有像素点的距离并进行保存可以避免重复计算,传输路径划分为发送(阵元、像素点)和接收(阵元、像素点)两部分,在运算过程中通过查询已有数据得到路径长度^[15].该算法可以实时运行,但是仍需花费较长时间进行预处理和占用大量存储资源来保存计算结果.基于圆弧扫描转

换的合成孔径聚焦算法(AD-SAFT),通过正向解释聚焦过程,把生成结果图像的操作转化为圆弧扫描转换操作,将原有的均方根运算转换为乘法和加法运算,同时可以有效利用数据的稀疏性,使算法效率大幅度提升^[16].本文借鉴AD-SAFT算法思想,提出了新全聚焦算法(DEA-TFM),从正向解释全聚焦算法,将生成结果图像的操作转换为椭圆弧扫描转换操作,使算法性能大幅提升,而且无需进行预处理.

由于应用领域的不同,当前相控阵探头中阵元有多种组合方式,包括线性阵列、凸型阵列、凹型阵列等^[17].当前主流的Bresenham椭圆绘制算法^[18]仅适用于标准椭圆 $\frac{x^2}{a^2} + \frac{y^2}{b^2} = 1$,即一维线性阵列的情况.本文依据二维空间任意椭圆方程,分析椭圆切线的斜率变化,将椭圆生成过程分为四个部分,对于每一部分推导出判别式的递推公式,得到二维空间中任意椭圆的绘制算法.结合该算法,新全聚焦算法(DEA-TFM)能够适用于凸型、凹型等多种相控阵检测系统.

2 全聚焦算法正向解释

传统全聚焦算法^[1]中,结果图像中像素点的值 $I(x, z)$ 为

$$I(x, z) = \sum_{i=1}^N \sum_{r=1}^N S_{i,r} \left(\frac{\sqrt{(x_i - x)^2 + (z_i - z)^2} + \sqrt{(x_r - x)^2 + (z_r - z)^2}}{v} \right) \quad (1)$$

其中, (x_i, z_i) , (x_r, z_r) 为发送阵元 E_i 和接收阵元 E_r 的坐标, $S_{i,r}$ 为对应 (E_i, E_r) 阵元组的时域信号, v 为声波在介质中的传输速度.

如图2所示,对于相控阵探头中的阵元,其声场边界为两条虚线,虚线的夹角为阵元的半功率波束角 $\beta_{0.5} = 0.84\lambda/d_e$, 其中 λ 为声波波长, d_e 为阵元直径.阵元在深度为 z 时的合成孔径有效长度为 $L = \beta_{0.5} \cdot z$ ^[6].

传统全聚焦算法其实是一个逆向的运算过程,将聚焦点设为已知条件,而发送阵元和接收阵元都是未知条件.每次选定一个像素点 p ,对于所有发送接收阵元组 (E_i, E_r) ,计算出声波在路径 $E_i \rightarrow p \rightarrow E_r$ 的传输时间,根据传输时间在全矩阵数据中找出对应的时域信号,将其幅度值累加得到 p 的像素值.

而实际情况下,发送阵元和接收阵元的位置是已知的,而聚焦点是未知的.因此,我们从正向来对全聚焦算法进行解释.在逆向运算过程中,需要根据像素点来查找所有参与该像素值运算的时域信号 $S_{i,r}(T)$.而在正向运算过程中,根据时域信号 $S_{i,r}(T)$ 在结果图像中找出其参与运算的像素点.

如图 2 所示,接收信号 $S_{i,r}(T)$ 除了参与像素点 $I(x,z)$ 的运算,还参与到其他像素点的运算. 所有 $S_{i,r}(T)$ 参与运算的像素点 p 都满足这样一个条件: $E_i \rightarrow p \rightarrow E_r$ 有相同传输时延 T 和相同的传输路径长度 $d = vT$, 即像素点 p 到发送阵元 E_i 和接收阵元 E_r 的距离之和为 d . 因此所有满足条件的点 p 均位于以 E_i, E_r 为焦点, 以 d 为长轴的椭圆弧上.

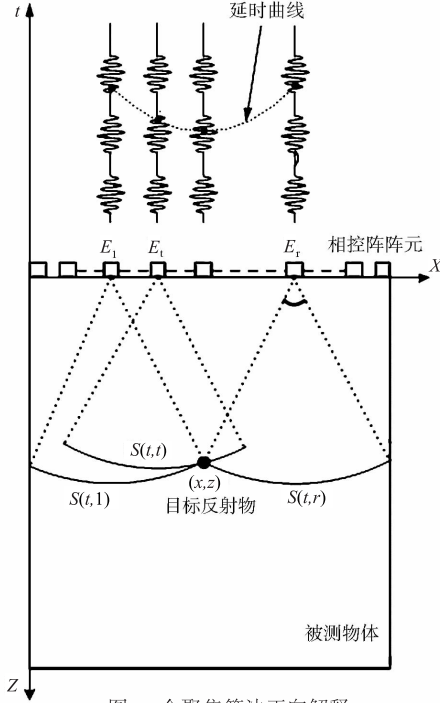


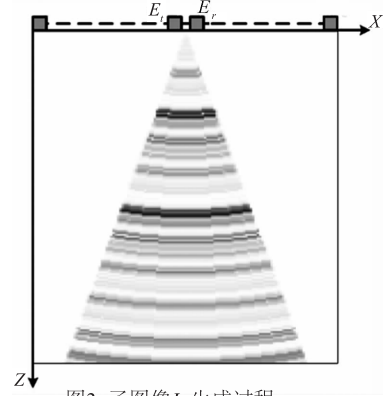
图2 全聚焦算法正向解释

若仅考虑单个发送接收阵元组 (E_i, E_r) 对应的时域信号 $S_{i,r}$, 则可得到一幅子图像 $I_{i,r}$. 在子图像 $I_{i,r}$ 中, 接收信号 $S_{i,r}(T)$, 对应着以 (E_i, E_r) 为焦点, 长轴为 vT 的椭圆弧. 因此 $I_{i,r}$ 由多个以 (E_i, E_r) 为焦点的椭圆弧构成 (如图 3 所示). 结果图像的生成可以看作将所有的子图像 $I_{i,r}$ 进行累加:

$$I(x, z) = \sum_{i=1}^N \sum_{r=1}^N I_{i,r}(x, z) \quad (2)$$

3 任意椭圆的扫描转换算法

为了获得椭圆弧上各点的坐标, 需要借助计算机图形学中的椭圆绘制算法, 当前运用最为广泛的是 Bresenham 椭圆绘制算法^[6], 主要适用于标准状态下的椭圆 $\frac{x^2}{a^2} + \frac{y^2}{b^2} = 1$. 对于一维线性阵列探头, 时域信号 $S_{i,r}(T)$ 所对应的椭圆方程为 $\frac{(x-x_0)^2}{a^2} + \frac{y^2}{b^2} = 1$ (发送阵元坐标为 $(x_i, 0)$, 接收阵元坐标为 $(x_r, 0)$, 椭圆中心点坐标为 $(x_0 = \frac{x_i + x_r}{2}, 0)$, 旋转角度为 $\theta = 0$), 该椭圆上的

图3 子图像 $I_{i,r}$ 生成过程

点可以从标准椭圆上的点平移得到.

对于凸型阵列或凹型阵列, 即椭圆的旋转角度 $\theta \neq 0$ 时, 可以首先生成构成标准状态下椭圆的各个像素点 $p'(x', z')$, 然后将 p' 点绕椭圆中心点 (x_0, z_0) 旋转、平移, 得到最终的像素点 $p(x, z)$:

$$\begin{cases} x = x' \cos \theta - z' \sin \theta + x_0 \\ z = x' \sin \theta + z' \cos \theta + z_0 \end{cases} \quad (3)$$

以上方法绘制的椭圆如图 4 所示. 可以看出, 旋转后椭圆上的点不一定相邻, 而且会出现两个点旋转后映射到同一个点的情况 (图中黑色的点). 因此该方法不能应用到凸型阵列, 需要根据空间中任意椭圆方程对传统 Bresenham 算法进行适当改进, 推导出任意椭圆的绘制算法.



图4 椭圆像素点旋转后结果

二维空间中椭圆任意方程为

$$f(x, z) = c_1 x^2 + c_2 z^2 + c_3 xz + c_4 x + c_5 z + c_6 = 0 \quad (4)$$

如图 5(a) 所示, 首先在椭圆上找出五个点 p_1, p_2, p_3, p_4, p_5 . 其中, 点 p_1, p_5 的切线与 y 轴平行, 点 p_3 的切线与 x 轴平行, 点 p_2 的切线斜率为 $k_{p_2} = 1$, 点 p_4 的切线斜率为 $k_{p_4} = -1$. 因为椭圆关于中心点对称, 因此只需绘制上半部分 $\overline{p_1 p_2 p_3 p_4 p_5}$ 即可. 如图 5(b) 所示, 根据椭圆的斜率变化, 将整个椭圆生成过程分为 $p_1 \rightarrow p_2, p_2 \rightarrow p_3, p_3 \rightarrow p_4, p_4 \rightarrow p_5$ 四部分.

令 $A(x_p, z_p)$ 为当前生成点, 下一候选点为 B_1 或 B_2 , 其中 M 为线段 $B_1 B_2$ 的中点. 具体算法流程如下:

步骤 1 计算出 p_1, p_2, p_3, p_4, p_5 点的坐标为 $p_i(x_i,$

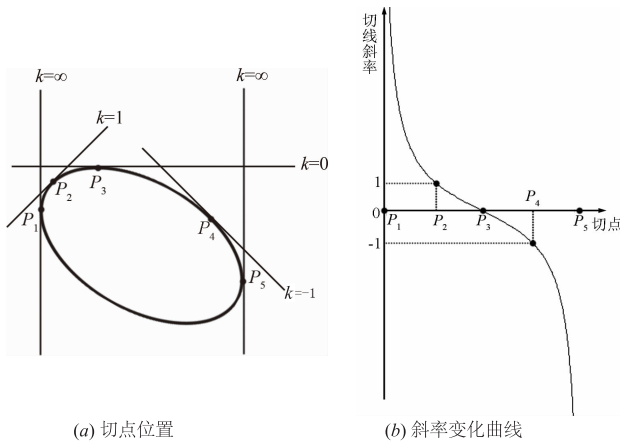


图5 椭圆切线斜率变化

z_i ($i=1,2,3,4,5$), 初始化点 A 为 $A(x_p, z_p) = (x_1, z_1)$.

(2) 生成 $p_1 \rightarrow p_2$ 之间的点, 其切线斜率满足 $k \geq 1$, 即以 z 方向为步进方向 (如图 6(a) 所示).

步骤 2.1 计算判别式

$$\begin{aligned} \Delta &= d_p \\ &= f(M) \\ &= f(x_p + 0.5, z_p + 1) \end{aligned} \quad (5)$$

步骤 2.2 如果 $\Delta \geq 0$, M 位于椭圆之外, 生成点为 $B_2(x_p + 1, z_p + 1)$, 更新判别式为

$$\begin{aligned} \Delta &= d_{p+1} \\ &= f(x_p + 1.5, z_p + 2) \\ &= d_p + x_p(2c_1 + c_3) + z_p(2c_2 + c_3) \\ &\quad + 2c_1 + 3c_2 + 2.5c_3 + c_4 + c_5 \end{aligned} \quad (6)$$

令 $x_p = x_p + 1$. 否则, 生成点为 $B_1(x_p, z_p + 1)$. 更新判别式为

$$\begin{aligned} \Delta &= d_{p+1} \\ &= f(x_p + 0.5, z_p + 2) \\ &= d_p + c_3x_p + 2c_2z_p + 3c_2 + 0.5c_3 + c_5 \end{aligned} \quad (7)$$

步骤 2.3 令 $z_p = z_p + 1$, 如果 $z_p < z_2$, 转至步骤 2.1. 否则, 转至步骤 3.

步骤 3 生成 $p_2 \rightarrow p_3$ 之间的点, 其切线斜率满足 $1 > k \geq 0$, 即以 x 方向为步进方向 (如图 6(b) 所示).

步骤 3.1 计算判别式

$$\begin{aligned} \Delta &= d_p \\ &= f(M) \\ &= f(x_p + 1, z_p + 0.5) \end{aligned} \quad (8)$$

步骤 3.2 如果 $\Delta \geq 0$, M 位于椭圆之外, 生成点为 $B_2(x_p + 1, z_p)$. 更新判别式为

$$\begin{aligned} \Delta &= d_{p+1} \\ &= f(x_p + 2, z_p + 0.5) \\ &= d_p + 2c_1x_p + c_3z_p + 3c_1 + 0.5c_3 + c_4 \end{aligned} \quad (9)$$

如果 $\Delta < 0$, 生成点为 $B_1(x_p + 1, z_p + 1)$, 更新判别式为

$$\begin{aligned} \Delta &= d_{p+1} \\ &= f(x_p + 2, z_p + 1.5) \\ &= d_p + x_p(2c_1 + c_3) + z_p(2c_2 + c_3) \\ &\quad + 3c_1 + 2c_2 + 2.5c_3 + c_4 + c_5 \end{aligned} \quad (10)$$

令 $z_p = z_p + 1$.

步骤 3.3 令 $x_p = x_p + 1$. 如果 $x_p < x_3$, 转至步骤 3.1. 否则, 转至步骤 4.

步骤 4 生成 $p_3 \rightarrow p_4$ 之间的点, 其切线斜率满足 $0 > k \geq -1$, 即以 x 方向为步进方向 (如图 6(c) 所示).

步骤 4.1 计算判别式

$$\begin{aligned} \Delta &= d_p \\ &= f(M) \\ &= f(x_p + 1, z_p - 0.5) \end{aligned} \quad (11)$$

步骤 4.2 如果 $\Delta \geq 0$, M 位于椭圆之外, 生成点为 $B_2(x_p + 1, z_p - 1)$. 更新判别式为

$$\begin{aligned} \Delta &= d_{p+1} \\ &= f(x_p + 2, z_p - 1.5) \\ &= d_p + x_p(2c_1 - c_3) + z_p(c_3 - 2c_2) \\ &\quad + 3c_1 + 2c_2 - 2.5c_3 + c_4 - c_5 \end{aligned} \quad (12)$$

令 $z_p = z_p - 1$. 否则, 生成点为 $B_1(x_p + 1, z_p)$. 更新判别式为

$$\begin{aligned} \Delta &= d_{p+1} \\ &= f(x_p + 2, z_p - 0.5) \\ &= d_p + 2c_1x_p + c_3z_p + 3c_1 - 0.5c_3 + c_4 \end{aligned} \quad (13)$$

步骤 4.3 令 $x_p = x_p + 1$. 如果 $x_p < x_4$, 转至步骤 4.1. 否则, 转至步骤 5.

步骤 5 生成 $p_4 \rightarrow p_5$ 之间的点, 其切线斜率满足 $k < -1$, 即以 z 方向为步进方向 (如图 6(d) 所示).

步骤 5.1 计算判别式为

$$\begin{aligned} \Delta &= d_p \\ &= f(M) \\ &= f(x_p + 0.5, z_p - 1) \end{aligned} \quad (14)$$

步骤 5.2 如果 $\Delta \geq 0$, M 位于椭圆之外, 生成点为 $B_1(x_p, z_p - 1)$. 更新判别式为

$$\begin{aligned} \Delta &= d_{p+1} \\ &= f(x_p + 0.5, z_p - 2) \\ &= d_p - c_3x_p - 2c_2z_p + 3c_2 - 0.5c_3 - c_5 \end{aligned} \quad (15)$$

否则, 生成点为 $B_2(x_p + 1, z_p - 1)$, 更新判别式为

$$\begin{aligned} \Delta &= d_{p+1} \\ &= f(x_p + 1.5, z_p - 2) \\ &= d_p + x_p(2c_1 - c_3) + z_p(c_3 - 2c_2) \\ &\quad + 2c_1 + 3c_2 - 2.5c_3 + c_4 - c_5 \end{aligned} \quad (16)$$

令 $x_p = x_p + 1$.

步骤 5.3 令 $z_p = z_p - 1$, 如果 $z_p \leq z_5$, 算法结束. 否

则,转至步骤 5.1.

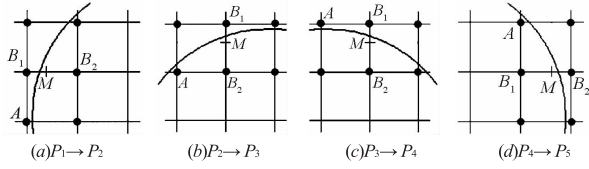


图6 椭圆生成过程

4 椭圆弧扫描全聚焦算法

4.1 算法流程

相控阵中阵元的数目为 N , 各个阵元的位置坐标为 $E_k(x_k, z_k)$ ($1 \leq k \leq N$), 发送阵元为 E_t , 接收阵元为 E_r . 最终生成图像尺寸为 $X_L * Z_L$. 对于任一发送接收阵元组 (E_t, E_r) ($1 \leq t, r \leq N$), 椭圆弧扫描全聚焦算法流程如下(图 7 为算法流程图).

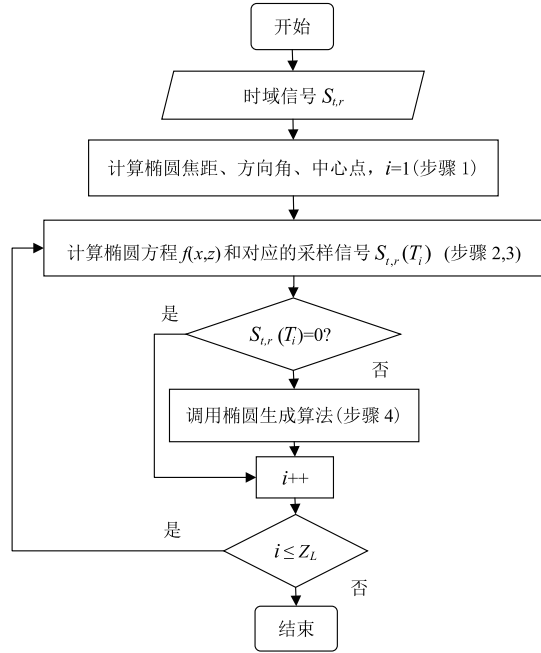


图7 DEA-TFM算法流程图

步骤 1 发送-接收阵元 E_t, E_r 之间的距离为 $C = \sqrt{(x_t - x_r)^2 + (z_t - z_r)^2}$ (即椭圆的焦距), 椭圆的方向角为 $\theta = \arcsin \frac{|z_r - z_t|}{C}$, 椭圆的中心点坐标为 $(\frac{x_t + x_r}{2}, \frac{z_t + z_r}{2})$, 令 $i = 1$.

步骤 2 椭圆长半轴为 $a_i = i + \sqrt{(x_t - x_r)^2 + (z_t - z_r - i)^2}$, 根据椭圆长半轴 a_i 和焦点坐标 $(x_t, z_t), (x_r, z_r)$ 推导出椭圆方程 $f(x, z)$.

步骤 3 椭圆 $f(x, z)$ 对应的超声波传输时间为 T_i

$= \frac{2a_i}{v}$, 即对应采样信号为 $S_{t,r}(T_i)$. 如果采样信号 $s_{t,r}(T_i)$ 为零, 执行步骤 5. 否则, 执行步骤 4.

步骤 4 计算出椭圆 $f(x, z)$ 在阵元 E_t, E_r 公共声场范围的起始点 p_s 和终止点 p_e (如图 8 所示), 调用第 3 节中的任意椭圆扫描转换算法获得位于椭圆 $f(x, z)$ 上的像素点坐标 $p(x, z)$. 对于所有满足 $s \leq x \leq e$ 且 $1 \leq x \leq X_L$ 的像素点 $p(x, z)$, 其像素值累加 $S_{t,r}(T_i)$.

步骤 5 $i \leftarrow i + 1$. 如果 $i \leq Z_L$, 转至步骤 2. 否则, 算法结束.

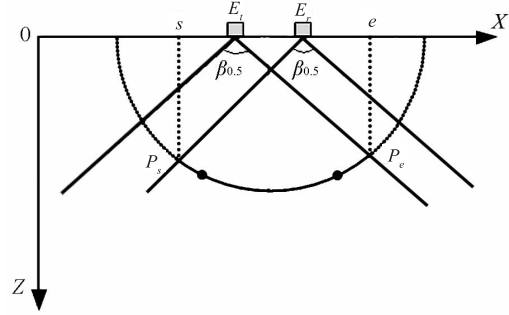


图8 椭圆弧扫描算法起始点和终止点

4.2 算法复杂度分析

在原始全聚焦算法 (TFM) 中, 对于每个发送-聚焦点-接收三元组, 需要 2 次均方根运算 (计算发送阵元到聚焦点的距离和聚焦点到接收阵元的距离). 计算一个像素点的值需要 $O(N^2)$ 次均方根运算 (计算两点间距离), 整个全聚焦算法需要 $O(Z_L * X_L * N^2)$ 次均方根运算.

在椭圆弧扫描全聚焦算法 (DEA-TFM) 中, 每调用一次椭圆生成算法, 需要 $O(X_L)$ 次乘法运算和 $O(1)$ 次均方根运算. 每生成一幅子图像 $I_{t,r}$, 需要绘制椭圆弧 M 次, 共需要 $O(M * X_L)$ 次乘法运算和 $O(M)$ 次均方根运算. 整个算法需要 $O(M * X_L * N^2)$ 次乘法运算和 $O(M * N^2)$ 次均方根运算.

最坏情况下, $M = O(Z_L)$, 算法需要 $O(Z_L * X_L * N^2)$ 次乘法运算和 $O(Z_L * N^2)$ 次均方根运算, 由于均方根运算比乘法运算需要消耗更多的时间, 因此本算法性能有大幅度提升. 此外, 当全矩阵数据稀疏时, $M = O(1)$, 算法时间复杂度为 $O(X_L * N^2)$, 算法速度提升效果更为明显.

5 实验结果与分析

5.1 任意椭圆扫描转换算法

为验证椭圆绘制算法的正确性, 绘制不同旋转角度的椭圆. 其中, 椭圆的中心点坐标为 $(200, 150)$, 长短半轴为 $(100, 60)$, 绘制旋转弧度为 $-1, -0.5, 0.5, 1$ 的

椭圆. 绘制效果图如图 9 所示, 生成椭圆上的点没有像图 4 中出现间断的情况, 且所有点灰度值相同.

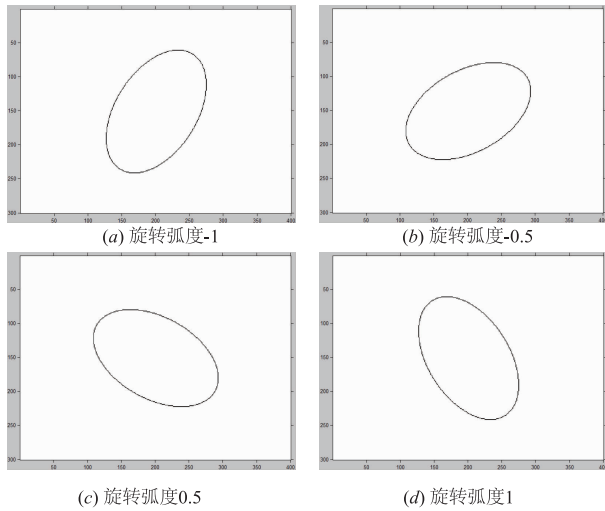


图9 不同旋转弧度绘制的椭圆

5.2 椭圆弧扫描转换全聚焦算法

实验数据由 field2^[19-20] 软件模拟产生. 被检测物体和探头结构如图 10 所示, 探头为凸型探头, 探头中的阵元等间距排列在圆弧上. 探测物体有五个直径为 1mm 的缺陷, 所在的位置为 $(-10, 7)$, $(-5, 9)$, $(0, 11)$, $(5, 13)$, $(10, 15)$, 相关的模拟参数在表 1 中详细列出.

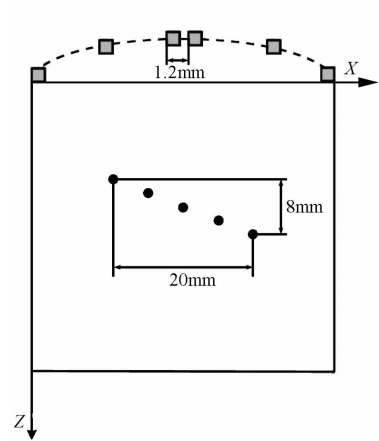
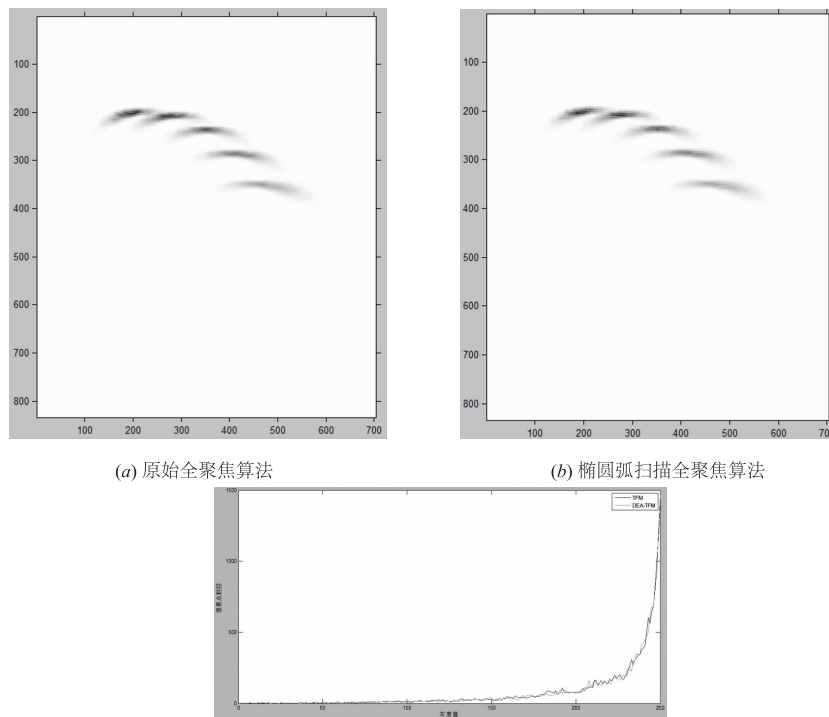


图10 探头结构和探测物体结构

运行算法的实验机器, CPU 配置为 Intel4[®] Core[™] i5-4210 CPU @ 1.7GHz, 内存为 4GB. 原始全聚焦算法和基于椭圆弧扫描的全聚焦算法的运行结果如图 11(a) 和图 11(b) 所示, 图 11(c) 为图 11(a) 和图 11(b) 的灰度对比图, 算法运行时间如表 2 所示. 通过对比, 发现两种算法的运行结果几乎完全一致. 但是原始全聚焦算法 (TFM) 的运行时间为 21.48s, 而新算法 (DEA-TFM) 的运行时间仅为 0.60s, 相对于原算法有 35 倍的性能提升.



(c) 图(a)和图(b)的灰度对比图

图11 算法运行结果

表 1 相关模拟参数

参数	值
阵元所在圆弧的半径	32mm
阵元中心频率	3MHz
采样频率	100MHz
声速	1540m/s
阵元宽度	1mm
阵元高度	1mm
阵元间距	0.2mm
阵元数目	32
脉冲响应	海宁窗
激励信号	正弦信号
缺陷尺寸	1mm * 1mm

表 2 算法运行时间

算法	第 1 次	第 2 次	第 3 次	平均
TFM	21.28s	20.51s	22.65s	21.48s
DEA-TFM	0.65s	0.60s	0.56s	0.60s

6 总结

全聚焦算法在全矩阵数据处理过程中涉及大量的均方根运算,这限制了算法性能的提升.对于凸型、凹型等非线性阵列探头,全新聚焦算法(DEA-TFM)需要绘制旋转角度 $\theta \neq 0$ 的椭圆弧;而计算机图形学中的椭圆绘制 Bresenham 算法仅适用于旋转角度 $\theta = 0$ 的情况.因此本文对传统的 Bresenham 算法进行了扩展,使其能够对任意旋转角度的椭圆弧进行扫描转换.同时,本文通过从正向解释全聚焦算法,提出了基于任意椭圆弧扫描转换的全聚焦算法(DEA-TFM),并将该算法应用于各种非线性相控阵列超声波信号的快速成像.其中,将结果图像的生成划分为多次椭圆弧的扫描转换操作,极大地减少了均方根运算的次数.而且,新算法可以充分利用全矩阵数据的稀疏性,使算法效率有了极大的提升.另外,该算法针对每一个发送-接收阵元组的回波信号进行实时处理,无需等待所有的全矩阵数据都获取后才开始处理.

参考文献

- [1] HOLMES C, DRINKWATER B W, WILCOX P D. Post-processing of the full matrix of ultrasonic transmit-receive array data for non-destructive evaluation[J]. NDT & E International, 2005, 38(8): 701-711.
- [2] SPIES M, RIEDER H, DILLH? FER A, et al. Synthetic aperture focusing and time-of-flight diffraction ultrasonic imaging—past and present[J]. Journal of Nondestructive Eval-

uation, 2012, 31(4): 310-323.

- [3] JENSEN J A, NIKOLOV S I, GAMMELMARK K L, et al. Synthetic aperture ultrasound imaging [J]. Ultrasonics, 2006, 44: e5-e15.
- [4] 彭华. CRH 动车轮对超声相控阵全矩阵成像技术研究[D]. 四川:西南交通大学, 2014.
PENG Hua. Study on Ultrasonic Phased Array Full Matrix Capture Imaging Technique for CRH Wheel-Set [D]. Sichuan: Southwest Jiaotong University, 2014. (in Chinese)
- [5] 梁佳佳, 李雄兵, 倪培君, 等. 镁合金壳体的超声相控阵检测方法[J]. 兵器材料科学与工程, 2014, 37(4): 108-111.
LIANG Jia-jia, LI Xiong-bing, NI Pei-jun, et al. Ultrasonic phased array testing method for magnesium alloy shell [J]. Ordnance Material Science and Engineering, 2014, 37(4): 108-111. (in Chinese)
- [6] 徐娜, 何方成, 周正干. 基于动态孔径聚焦的 L 型构件相控阵超声检测[J]. 北京航空航天大学学报, 2015, 41(6): 1000-1006.
XU Na, HE Fang-cheng, ZHOU Zheng-gan. Ultrasonic phased array inspection of L-shaped components based on dynamic aperture focusing [J]. Journal of Beijing University of Aeronautics and Astronautics, 2015, 41(6): 1000-1006. (in Chinese)
- [7] 孙欣蓉. 基于矢量全聚焦的超声阵列缺陷识别方法研究及其应用[D]. 北京:北京工业大学, 2014.
SUN Xin-rong. Research on Defect Identification with Ultrasonic Array Based on vector Total Focusing Method [D]. Beijing: Beijing University of Technology, 2014. (in Chinese)
- [8] 周正干, 孙广开, 李洋. 先进无损检测技术在复合材料缺陷检测中的应用[J]. 航空制造技术, 2016, 499(4): 30-35.
ZHOU Zheng-gan, SUN Guang-kai, LI Yang. Application of advanced nondestructive testing technologies for the detection of defects in composites [J]. Aeronautical Manufacturing Technology, 2016, 499(4): 30-35. (in Chinese)
- [9] TEN GROTENHUIS R, HONG A, SAKUTA A. Inspection of complex geometries using the full matrix capture (FMC) method [A]. Proceedings of the 9th International Conference on NDE in Relation to Structural Integrity for Nuclear and Pressurized Components [C]. Seattle WA, USA: NDT Press, 2012: 395-404.
- [10] WILCOX P D, HOLMES C, DRINKWATER B W. Advanced reflector characterization with ultrasonic phased arrays in NDE applications [J]. IEEE Transactions on Ultrasonics, Ferroelectrics, and Frequency Control, 2007, 54(8): 1541-1550.
- [11] HOLMES C, DRINKWATER B W, WILCOX P D. Ad-

- vanced post-processing for scanned ultrasonic arrays: application to defect detection and classification in non-destructive evaluation [J]. *Ultrasonics*, 2008, 48 (6): 636 – 642.
- [12] 周正干, 彭地, 李洋, 等. 相控阵超声检测技术中的全聚焦成像算法及其校准研究[J]. *机械工程学报*, 2015, 51 (10): 1 – 7.
ZHOU Zheng-gan, PENG Di, LI Yang, et al. Research on phased array ultrasonic total focusing method and its calibration[J]. *Journal of Mechanical Engineering*, 2015, 51 (10): 1 – 7. (in Chinese)
- [13] SUTCLIFFE M, WESTON M, DUTTON B, et al. Real-time full matrix capture for ultrasonic non-destructive testing with acceleration of post-processing through graphic hardware[J]. *NDT & E International*, 2012, 51: 16 – 23.
- [14] QUAEGBEUR N, MASSON P. Correlation-based imaging technique using ultrasonic transmit-receive array for non-destructive evaluation[J]. *Ultrasonics*, 2012, 52 (8): 1056 – 1064.
- [15] NJIKI M, ELOUARDI A, BOUAZIZ S, et al. A real-time implementation of the total focusing method for rapid and precise diagnostic in non destructive evaluation[A]. *Proceedings of the IEEE 24th International Conference on Application-Specific Systems, Architectures and Processors (ASAP)* [C]. USA: IEEE Press, 2013: 245 – 248.
- [16] YANG C, QIN K, LI Y. Real-time ultrasonic imaging for multi-layered objects with synthetic aperture focusing technique [A]. *Proceedings of the IEEE International Conference on Instrumentation and Measurement Technology (I2MTC)* [C]. USA: IEEE Press, 2014: 561 – 566.
- [17] 靳世久, 杨晓霞, 陈世利, 等. 超声相控阵检测技术的发展及应用[J]. *电子测量与仪器学报*, 2014, 28 (9): 925 – 934.
JIN Shi-jiu, YANG Xiao-xia, CHEN Shi-li, et al. Development and application of ultrasonic phased array inspection technology[J]. *Journal of Electronic Measurement and Instrumentation*, 2014, 28(9): 925 – 934. (in Chinese)
- [18] ROGERS D F. *Procedural Elements for Computer Graphics* [M]. US: McGraw-Hill, Inc, 1984.
- [19] JENSEN J A, SVENDSEN N B. Calculation of pressure fields from arbitrarily shaped, apodized, and excited ultrasound transducers[J]. *IEEE Transactions on Ultrasonics, Ferroelectrics, and Frequency Control*, 1992, 39 (2): 262 – 267.
- [20] JENSEN J A. Field; a program for simulating ultrasound systems[A]. *Proceedings of the 10th Nordicbaltic Conference on Biomedical Imaging (VOL. 4, Supplement 1, PART 1)* [C]. USA, 1996: 351 – 353.

作者简介



崔文凯 男, 1990 年 3 月出生, 山东菏泽人. 2011 年在山东大学获得工学学士学位, 2014 年在中国科学院大学获得工学硕士学位. 现为清华大学博士研究生, 主要从事超声波成像及数字图像处理方面的研究.

E-mail: cuiwk1990@163.com



秦开怀 (通信作者) 男, 1958 年 3 月出生, 湖北潜江人. 1982 年在华南理工大学获得工学学士学位, 1984 年和 1990 年在华中科技大学分别获得工学硕士和工学博士学位. 1999 年至 2000 年在哈佛大学哈佛医学院 SPL 实验室做访问研究员. 现为清华大学计算机科学与技术系教授, 博士生导师. 主要从事数字几何处理、小波变换及多分辨率几何造型、真实感图形实时绘制、动画与虚拟现实、组合显示/多投影组合显示墙、图像处理及可视化、超声波实时成像及无损检测等方面的研究.

E-mail: qkh@tsinghua.edu.cn