

基于 ZYNQ 加速的激光超声全聚焦成像技术研究

吴婵娟¹, 应恺宁², 戴鹭楠², 谭钧夫³, 沈中华², 倪辰荫^{1*}¹南京理工大学电子工程与光电技术学院, 江苏 南京 210094;²南京理工大学理学院, 江苏 南京 210094;³南京理工大学计算机科学与工程学院, 江苏 南京 210094

摘要 全聚焦方法(TFM)具有成像分辨率高、缺陷表征能力强的优点,但其存在数据需求量大、计算复杂、耗时过长等问题。针对上述问题,并结合激光超声检测技术,进行了基于 ZYNQ 平台加速的激光超声全聚焦技术研究。首先建立了基于激光超声的全聚焦算法,并引入激光超声方向性系数进行优化;进一步,搭建了激光超声扫描检测装置进行实验验证,使用线激光源激发超声信号,利用多普勒测振仪探测回波信号;然后使用形成的激光超声全聚焦成像算法进行内部缺陷的检测和定位,并与合成孔径聚焦算法获得的结果进行比较,从而验证了算法的正确性和可行性;最后将形成的激光超声全聚焦成像算法移植到 ZYNQ 平台上,对激光超声全聚焦成像算法进行了并行优化及双核设计,实现了算法加速。研究表明:激光超声全聚焦技术相比于合成孔径聚焦技术,成像信噪比更高、定位更准确;基于 ZYNQ 加速的激光超声全聚焦成像算法不会降低成像质量,且耗时相比于计算机缩短了 86%。

关键词 测量; 激光超声; 全聚焦成像算法; ZYNQ 平台; 无损检测

中图分类号 TG115.28

文献标志码 A

DOI: 10.3788/CJL221223

1 引言

随着各种材料的不断涌现及现代工业对机械零件质量要求的提高,无损检测技术得到了快速的发展,超声无损检测因其灵敏度高、具有穿透性等优点而被广泛应用在无损探伤中,成为航天^[1]、铁路^[2]、石油管道^[3]等领域中必不可少的工具。常规超声检测通常采用压电陶瓷在待测物体表面发射超声波,并利用携带物体内部信息的脉冲回波进行检测^[4]。作为近年来工业无损检测领域的研究热点,相控阵检测技术^[5-6]具有灵活聚焦的特点,通过控制超声换能器,其内部各阵元按照一定延时规律独立发射或接收超声,超声在空间中叠加并合成波阵面,从而实现了一定空间范围内的扫描聚焦。然而,所有超声子波束都在一个恒定的深度上聚焦,远离聚焦点处的成像分辨率不高,该方法无法灵敏检测到位于聚焦区域之外的反射体,检测范围存在局限性^[7]。

为解决上述问题,学者提出了多种缺陷成像算法。合成孔径聚焦技术(SAFT)是目前研究的热点成像算法之一^[8]。SAFT^[9-10]能够将多个小数值孔径换能器等效合成为大数值孔径换能器,基于延时叠加和全范围动态聚焦原理进行计算^[11],具有提高成像空间分辨率的能力。与超声相控阵成像方法相比,在同样采用换

能器阵元探头的情况下,使用 SAFT 能够得到更高分辨率的重建图像,为缺陷的定性分析提供更可靠的依据。

全聚焦成像技术是基于合成孔径聚焦技术发展而来的^[12]。Holmes 等^[13-17]提出基于全矩阵数据的全聚焦成像技术,这一技术是利用全矩阵采集(FMC)数据集进行图像重建的超声后处理技术^[18]。在采集过程中,阵列的每一个阵元发射一个超声波,对于每次发射,阵列的 N 个阵元都会接收到一组 A 扫信号, N 个阵元依次发射后,将接收到 $N \times N$ 组 A 扫信号的数据矩阵,即 FMC 数据集。相比于相控阵检测技术,全聚焦技术利用相控阵阵元中所有收发组合进行缺陷探测,为后处理提供了更加完整的缺陷信息。在相同检测环境下,全聚焦算法使用了大量超声回波数据,与 SAFT 相比,其利用数据的全部信息最大限度地恢复检测信号,提高了成像分辨率,能够更准确地得到成像结果,实现缺陷的高精度成像^[19]。冉超^[20]、贾乐成等^[21]考虑了以激发探测阵元为焦点形成的椭圆轨迹带来的影响。前者指出椭圆轨迹会降低图像的横向分辨率,通过增强中心斜率差较大的轨迹、抑制中心斜率差较小的轨迹,引入了加权系数,进而实现了全聚焦成像算法的优化;后者指出椭圆轨迹会导致图像失真甚至造成伪缺陷,提出了基于阵元指向性函数的校正模型,校正后图像

收稿日期: 2022-09-06; 修回日期: 2022-11-09; 录用日期: 2022-12-20; 网络首发日期: 2023-02-07

基金项目: 江苏省研究生科研与实践创新计划项目(KYCX22_0420)

通信作者: *chenyin.ni@njjust.edu.cn

噪声有所下降。

在传统超声检测领域,上述检测技术都是使用超声换能器实现超声的激发和探测,然而接触式超声换能器加载到样品表面上时通常会影响超声的传播^[22]。此外,超声换能器探头尺寸受制作工艺的限制,一般最小在毫米量级,限制了检测横向分辨率,且存在一定的检测盲区,易受人因素为影响。电磁声换能器^[23]等非接触式换能器与接触式换能器一样,同样由于尺寸限制,很难在一些空间受限的结构中使用。激光超声检测技术因其非接触、纯光学的检测方式,可在自由空间中远距离激发和探测超声,已被应用于微小缺陷的检测和定量定位以及材料特定分析等领域^[24]。此外,热弹机制下激发的激光超声场存在方向性,不同方向上的能量分布不同。针对激光超声全聚焦成像这一技术,Stratoudaki等^[25-26]考虑了激光超声方向性的影响,在全聚焦算法中引入了超声波的激发探测方向性系数,提高了图像的信噪比。然而,激光超声方向性系数的引入会大大增加计算的复杂程度,降低成像效率,难以满足应用需求^[27]。

为解决全聚焦计算复杂、数据量大、耗时长的问题,Velichko等^[28]对全聚焦算法进行了理论分析,得出全聚焦算法适用于并行计算的结论。Nikolov等^[29]基于现场可编程门阵列(FPGA)平台设计了超声合成孔径成像系统,利用FPGA的并行性及高性能进行了超声合成孔径成像的延时叠加,实现了加速运算。此外,也可以将图形处理器(GPU)^[30]应用到超声成像算法的并行加速中。Amaro等^[31]将GPU应用到超声成像算法中,得到GPU适用于超声合成孔径成像算法加速的结论。与多核中央处理器(CPU)及GPU架构相比,FPGA等可重构计算设备具有显著优势,提高了许多复杂计算应用的性能。Huang等^[32]利用FPGA的并行性实现了对超声成像全聚焦算法的加速。现代的FPGA芯片集成了越来越多的并行计算资源,提供了强大的计算能力。此外,对于大型项目,往往需要外接CPU等主控芯片进行高性能计算。Xilinx公司推出的ZYNQ-7000^[33]系列产品将ARM处理器的软件可编程性与FPGA的硬件可编程性进行集成,其高度灵活的可编程逻辑可以实现系统的优化和差异化,允许添加定制外设与加速器,适用于各种应用场景。随着ZYNQ的兴起,这类嵌入式系统级芯片在全聚焦算法领域有着潜在的应用前景,可以在降低开发难度的条件下实现大量数据的并行加速。

本文研究了基于ZYNQ的激光超声全聚焦方法(TFM)。首先建立了基于激光超声的全聚焦算法,并引入激光超声方向性系数进行信噪比优化。然后搭建了激光超声扫描检测装置进行实验验证,使用线激光源激发超声波,利用激光测振仪探测超声波,获得了缺陷回波信号。并使用形成的激光超声全聚

焦成像算法进行内部缺陷定位,然后与合成孔径聚焦算法获得的结果进行比较,结果显示:激光超声全聚焦成像的信噪比更高,缺陷表征能力更强,从而验证了算法的正确性和可行性。最后将该算法移植到ZYNQ平台上进行流水线、循环展开等并行优化及双核设计,并比较了ZYNQ和计算机(PC)计算得到的激光超声全聚焦成像结果,结果表明:基于ZYNQ的激光超声全聚焦成像算法不会降低成像质量,且耗时为82.6 s,相比于PC缩短了86%,在低成本条件下实现了激光超声全聚焦成像算法的加速。

2 激光超声全聚焦算法和ZYNQ的加速原理

2.1 激光超声全聚焦原理

激光超声全聚焦采用一点激发、多点接收的方式,采集全矩阵A扫数据,具体算法实现如图1所示。假设共有 N 个激发/探测点,在第一个点处(图1中“1”处)激发后,在 N 个点处进行探测,之后在第二个点处(图1中“2”处)激发,在 N 个点处进行探测……直到第 N 个点激发,在 N 个点处探测后,便可得到 N^2 组A扫数据,即全矩阵数据。

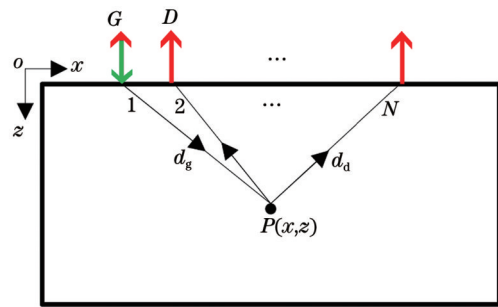


图1 全聚焦原理图

Fig. 1 Schematic of total focusing

全聚焦算法通过延时叠加,将全矩阵数据聚焦到每个成像点上,进而实现对待测区域的缺陷检测。其原理如图1所示,其中, G 表示激发点, D 表示探测点, N 表示第 N 个激发探测点, $P(x, z)$ 表示任意一成像点,以激发探测点移动方向为 x 轴,超声波深度方向为 z 轴,在待测区域建立直角坐标系。超声波从激发点经 $P(x, z)$ 反射到探测点的声程为

$$d = d_g + d_d = \left| \sqrt{(x - x_g)^2 + z^2} + \sqrt{(x - x_d)^2 + z^2} \right|, \quad (1)$$

式中: d_g 和 d_d 分别为激发点和探测点到成像点的声程; x_g 和 x_d 分别为激发点和探测点的坐标。超声波传播时间为

$$t = \frac{d}{c}, \quad (2)$$

式中: c 为超声波声速。成像点 P 的超声信号幅值在A扫数据中的索引位置为

$$n = tf_s = \frac{df_s}{c}, \quad (3)$$

式中: f_s 为数据采样率。成像点 P 处叠加后的超声幅值 $I(x, z)$ 为

$$I(x, z) = \left| \sum_{d=1}^N \sum_{g=1}^N A_{gd}(n) \right| = \left| \sum_{d=1}^N \sum_{g=1}^N A_{gd} \left(\frac{\sqrt{(x-x_g)^2+z^2} + \sqrt{(x-x_d)^2+z^2}}{c} f_s \right) \right|, \quad (4)$$

式中: A_{gd} 表示第 g 个点激发、第 d 个点探测得到的回波信号幅值。

需要指出的是,在全聚焦成像过程中,对于一个特定的到达时间,以一对激发探测点为焦点可形成椭圆轨迹。如图 2 所示,点 P 为待成像的目标点,结合椭圆特性^[34]及式(1)、(2)可知,在以激发点 G 、探

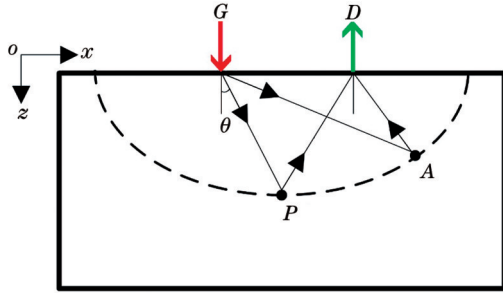


图 2 可形成椭圆轨迹的全聚焦原理图

Fig. 2 Schematic of total focusing for forming elliptic trajectories

测点 D 为焦点的椭圆上,存在成像点 A ,有 $d_A = d_{GA} + d_{AD} = d = d_{GP} + d_{PD}$,即超声波在 A 点的声程和在 P 点的声程相等,经式(4)计算,得 $I_A = I_P$ 。多次叠加后,在 A 点的成像幅值明显大于其实际幅值,进而导致了伪影的产生,降低了成像信噪比。针对这一问题,可通过综合考虑激光超声方向性来解决。

激光超声横波方向性表达式为

$$G(\theta) = \frac{\sin(2\theta) \cos(2\theta)}{\cos^2(2\theta) + 2(k^{-2} - \sin^2\theta)^{1/2} \sin\theta \sin(2\theta)}, \quad (5)$$

式中: θ 是激发超声波传播到成像点的方向与垂直于表面的法线方向的夹角; k 是纵波和横波的波速之比。方向性系数^[35]为

$$Z_g(x, z) = \frac{G(\theta)}{d^{1/2}}. \quad (6)$$

加入方向性系数后成像点 P 的幅值为

$$I(x, z) = \left| \sum_{d=1}^N \sum_{g=1}^N Z_g(x, z) A_{gd}(n) \right| = \left| \sum_{d=1}^N \sum_{g=1}^N \frac{G(\theta)}{d^{1/2}} A_{gd} \left(\frac{\sqrt{(x-x_g)^2+z^2} + \sqrt{(x-x_d)^2+z^2}}{c} f_s \right) \right|. \quad (7)$$

使用式(5)计算得到的激光超声横波方向性^[35]如图 3 表示,可以看出:横波以双瓣的形式向外辐射,主瓣在 $\theta \approx 35^\circ$ 处最大,在 $\theta \approx 45^\circ$ 时消失。

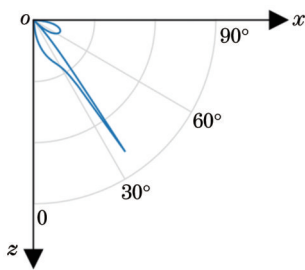


图 3 横波方向性图

Fig. 3 Directionality diagram of shear waves

从式(7)可以看出:引入激光超声方向性系数进行计算,需要多次计算三角函数和平方开方,计算复杂度大大提升,大量数据叠加后计算时间将成倍增加。针对这一问题,本文通过 ZYNQ 并行计算缩短时间。

2.2 ZYNQ 的并行优化及双核设计原理

针对全聚焦算法计算复杂、耗时长的问题,本文在 ZYNQ 平台上进行了基于 ZYNQ 加速的激光超声全聚焦成像技术研究。与常规 FPGA 开发板不同,

ZYNQ 集成了处理系统(PS)和可编程逻辑(PL),既可以使用 PS (ARM) 作为主控,又可以直接使用 PL (FPGA) 进行数据高速运算。此外,还可以结合 Python 用作 PYNQ (Python+ZYNQ) 开发,使用人员使用 Python 接口来编程和控制硬件库,更方便快捷。本文利用 PL 灵活性好、资源丰富、并行的优势,在 PL 端实现核心算法优化,循环展开 (UNROLL) 和流水线 (PIPELINE)^[36] 是本文并行加速的主要优化方法。

2.2.1 循环展开优化

UNROLL 可以展开循环以创建多个独立操作、实现并行处理。其通过在逻辑设计中创建循环体的多个副本来转换循环,允许部分或所有循环迭代并行发生,从而增加数据访问和吞吐量。默认情况下 for 循环是嵌套折叠的,每次循环均采用同一套硬件电路,这套电路被分时复用,UNROLL 则将 for 循环复制自定义份数,增加板载资源的使用量,进而同时使用多套电路,缩短计算时间。其原理如图 4 所示,在 UNROLL 优化前[图 4(a)],1 个嵌套循环的 n 个循环回路复用同一资源串行计算,假设 1 个循环回路中的计算需要 s 次操作,操作内容为 S_1, S_2, \dots, S_n ,每次操作消耗 1 个时钟周期,时长为 Δt ,那么 n 个循环回路消耗的总时间为

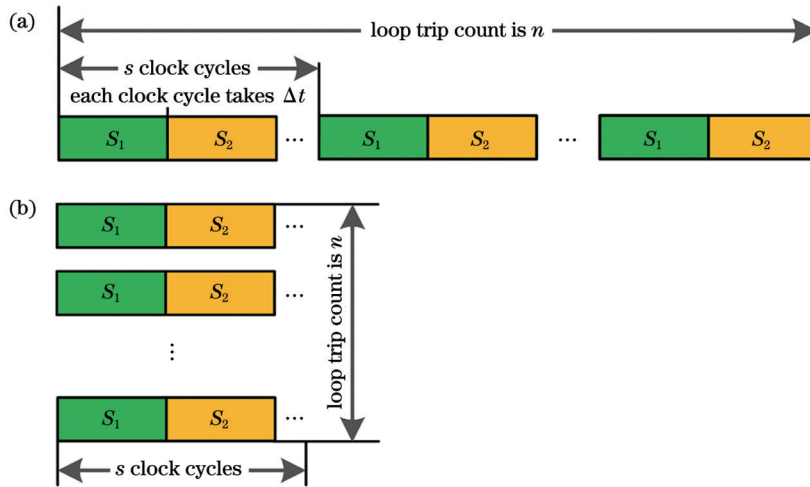


图 4 循环展开原理图。(a)优化前;(b)优化后

Fig. 4 Schematics of UNROLL. (a) Before optimization; (b) after optimization

$T_{U1} = ns\Delta t$ 。UNROLL 优化后 [图 4(b)], 最多可将 1 个嵌套循环展开为 n 个循环回路, 同时分配 n 套资源进行并行计算, 消耗总时间为 $T_{U2} = s\Delta t$, 耗时缩短到 T_{U1} 的 $\frac{1}{n}$, 板载资源使用量提高 n 倍。

2.2.2.2 流水线优化

实现多组算术运算的电路可以看作是组合逻辑电路, 组合逻辑越长, 使用的逻辑门就越多。由于门电路存在延时, 组合逻辑过长势必会造成很大的延时, 延时限制了系统的时钟频率, 如果时钟频率过大, 输入数据无法在逻辑门中正常工作, 会导致输出异常, 因此组合逻辑的频率不能太大。PIPELINE 解决了上述时钟频率受限的问题, 流水线就是将组合逻辑系统进行分割, 并在各个部分(分级)之间插入寄存器并进行数据暂存。每级组合逻辑运算后, 输出数据都

被暂存在寄存器中, 使得空闲状态的组合逻辑电路可以进行下一次运算, 以此类推, 各级组合逻辑电路都可通过寄存器暂存中间数据, 从而已经计算完毕的组合逻辑电路不必等待最终的运算结果, 直接输入寄存器数据即可开始运算。这种优化方式通过增大寄存器的使用量减小了初始化间隔(组合逻辑运算接受新输入数据之前的时钟周期数 Π), 提高了数据吞吐率, 进而提高了工作频率。其原理如图 5 所示, 假设一次计算需要 s 次操作, 每次消耗时间为 Δt 。在流水线优化前 [图 5(a)], n 次计算消耗时间为 $T_{P1} = ns\Delta t$ 。流水线优化后 [图 5(b)], 初始化间隔减小, 完成第一次计算的第一个操作后, 即可开始第二次计算。两次计算将同时进行, 以此类推, 将有 n 次计算同时进行, 通过增加资源利用率, 达到了缩短时间的目的, 消耗总时间为 $T_{P2} = (s + n - 1)\Delta t$ 。

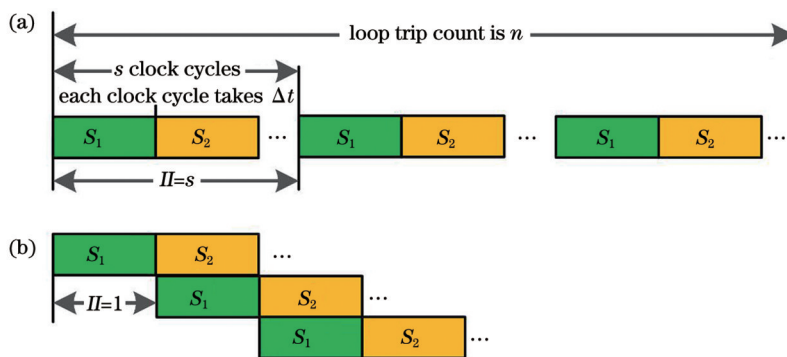


图 5 流水线原理图。(a)优化前;(b)优化后

Fig. 5 Schematics of PIPELINE. (a) Before optimization; (b) after optimization

2.2.2.3 PS 双核优化原理

ZYNQ 是一种主从关系的非对称多处理(AMP)架构, 提供了两个 Cortex-A9 处理器。双核优化是基于 ZYNQ 的 AMP 机制实现的: 在 AMP 的机制下, 允许两个处理器同时运行自己的操作系统或者裸机应用程序, 但在访问共享资源或者外设时, 要避

免同时访问, 否则将导致程序运行时出现问题。ZYNQ 系统中的每个 CPU 都能用软件产生中断(SGI)来中断自己和另一个 CPU 或同时中断两个 CPU。向软件产生的中断寄存器写入中断编号并指向目标 CPU, 就产生了一个 SGI。每个 CPU 各自有一组 SGI 寄存器, 可以产生 16 个软件产生中断中

的一个或多个。本文所采用的开发板有两个 CPU，需要利用共享的自定义算法芯核 (IP) 分别实现全聚焦成像计算，其原理如图 6(a)、(b) 所示，SGI 可以触发 CPU 产生中断，两个 CPU 利用产生的中断可以避免对共享 IP 的同时访问。CPU0 先访问

TFM IP 进行计算，这个过程中 CPU1 处于等待状态，直到 CPU0 完成计算并向 CPU1 发送中断信号，CPU1 接收中断后开始访问 TFM IP，与此同时，CPU0 进行下一步操作，然后等待中断即可开始对 TFM IP 的访问。

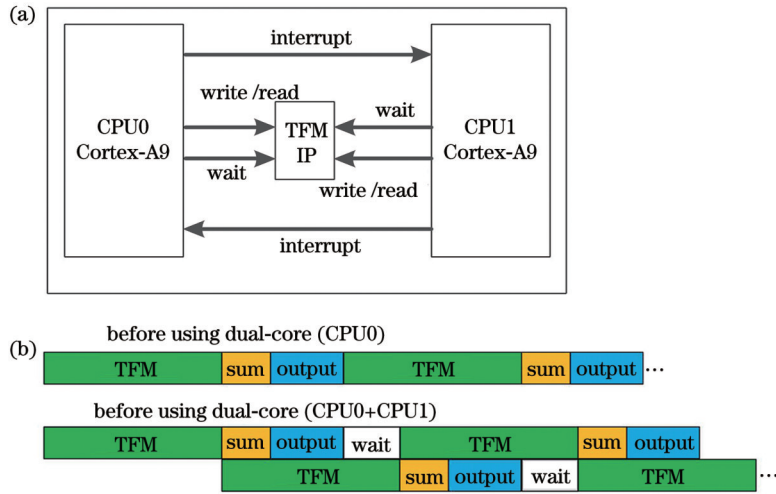


图 6 PS 双核优化原理图。(a)共享外设通信图;(b)采用双核设计前后的原理图

Fig. 6 Schematics of dual-core optimization of PS. (a) Shared peripheral communication diagram; (b) schematic before and after using dual-core design

3 实验装置及方法

为了进一步验证激光超声全聚焦成像算法的正确性，本文搭建了激光超声扫描检测装置进行内部缺陷检测，实验中使用步进电机移动激发光和样品以实现一发多收的扫查，并将基于 ZYNQ 加速的激光超声全聚焦成像技术应用于

实验中。

图 7 所示为激光超声全聚焦实验装置图。实验使用的样品为 120 mm × 30 mm × 8 mm 的铝板。铝板内含一个直径为 1.2 mm、长度为 10 mm 的横穿孔缺陷，缺陷中心距离样品表面 4 mm。实验使用柱面镜将波长为 1064 nm、能量为 1 mJ、重复频率为 3 kHz 的脉冲激光聚焦为线源，并以该线源作为激发光源，使用激光

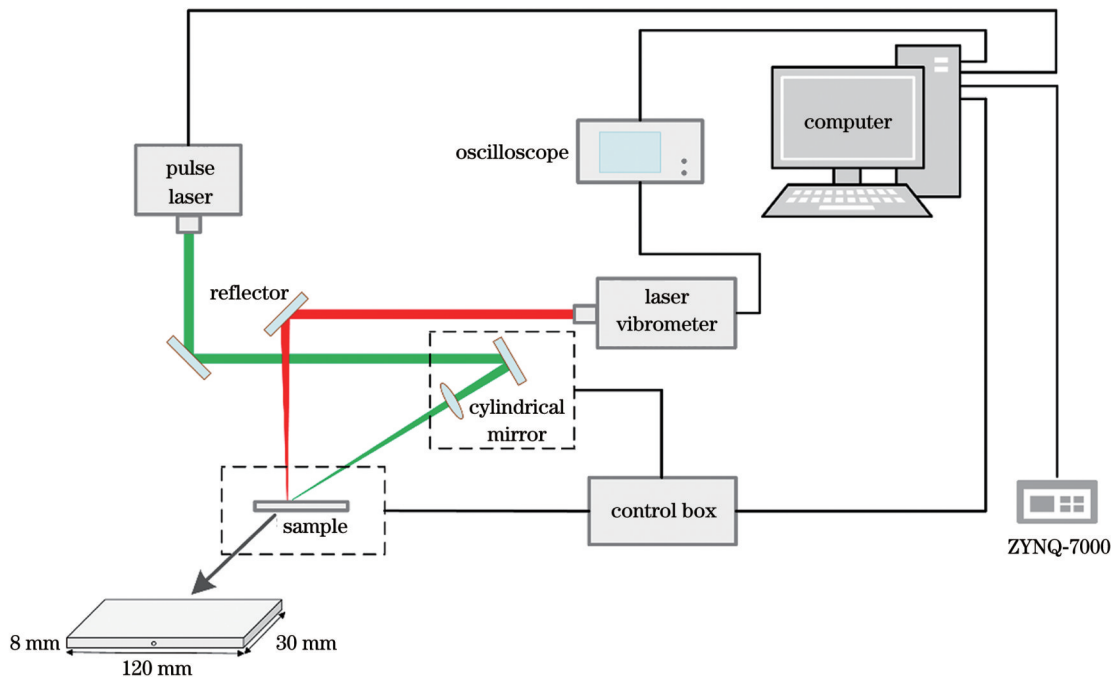


图 7 实验装置图

Fig. 7 Diagram of experimental setup

测振仪(波长 $\lambda \approx 633 \text{ nm}$, 检测带宽为 $0 \sim 20 \text{ MHz}$)作为超声探测装置。

具体扫查流程如图 8 所示。

第一步, 如图 8 中“1”行所示, 探测光固定在正方向距离缺陷中心 $\Delta = +4.8 \text{ mm}$ 的位置, 激发光从负方向距离缺陷中心 $\Delta = -4.8 \text{ mm}$ 位置起, 以 0.2 mm 为

步长向正方向开始扫查, 直至正方向距离缺陷中心 $\Delta = +4.8 \text{ mm}$ 的位置停止;

第二步, 如图 8 中“2”行所示, 将探测光以 0.2 mm 为步长向负方向移动一次, 到达距离缺陷中心 $\Delta = +4.6 \text{ mm}$ 的位置, 激发光则恢复到起始位置, 继续以 0.2 mm 为步长遍历一次;

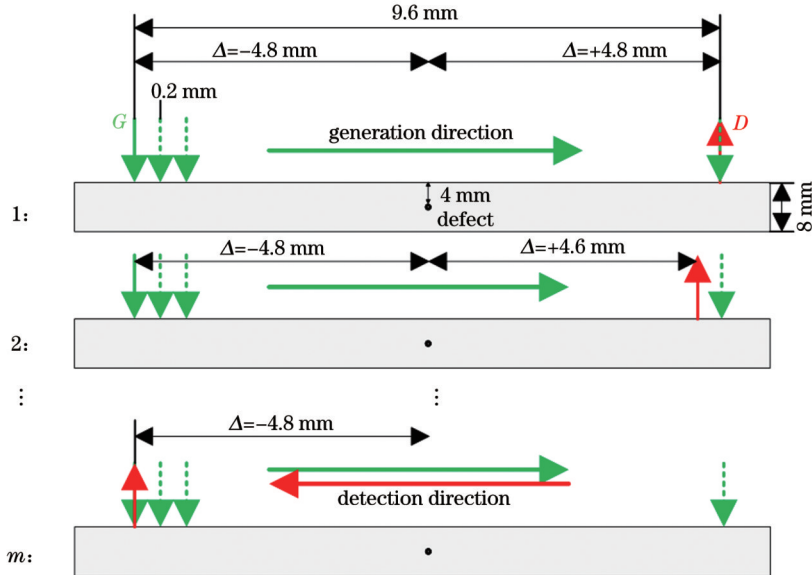


图 8 激发和探测光扫查图

Fig. 8 Scan diagrams of generation laser and detection laser

以此类推, 每次探测光以 0.2 mm 为步长向负方向移动一次, 激发光恢复到起始位置遍历一次, 直到第 m 次探测光到达负方向距离缺陷中心 $\Delta = -4.8 \text{ mm}$ 的位置, 激发光继续遍历一次, 如图 8 中“ m ”行所示, 扫查结束。

获得全矩阵待测数据后, 首先通过 PC 分别使用本文形成的激光超声全聚焦成像算法和 SAFT 对待测数据进行计算, 并将二者所得结果进行比较。然后

在 ZYNQ 平台上对激光超声全聚焦成像算法进行加速, 图 9 为基于 ZYNQ 的算法流程图。在 PS 中进行主控操作, 首先设置成像空间的大小, 然后将单组 A 扫数据输入到 PL 中进行全聚焦算法计算, 再将单组计算结果进行叠加, 若所有 A 扫数据计算并叠加完毕, 则 PS 不再输入数据到 PL 中, PS 将输出最后的叠加结果。

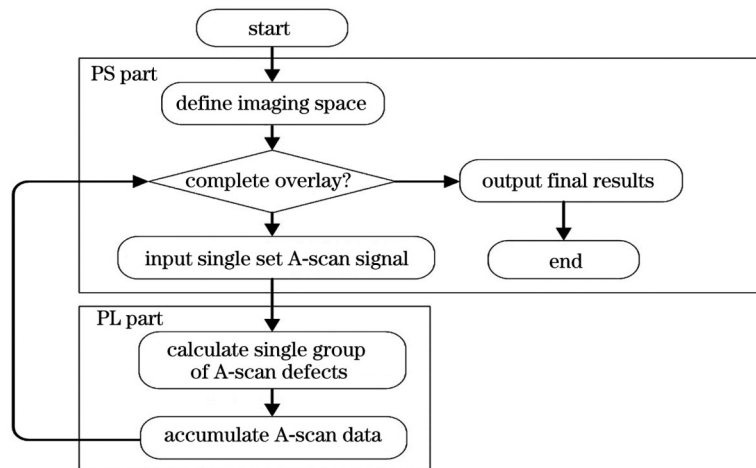


图 9 基于 ZYNQ 的算法流程图

Fig. 9 Algorithm flow chart based on ZYNQ

4 结果与讨论

图 10 给出了使用激光超声全聚焦成像算法获得

的结果。其中, 图 10(a)和图 10(c)未考虑超声波方向性, 图 10(b)和图 10(d)考虑了超声波的方向性, 其中圆圈表示缺陷的实际位置。

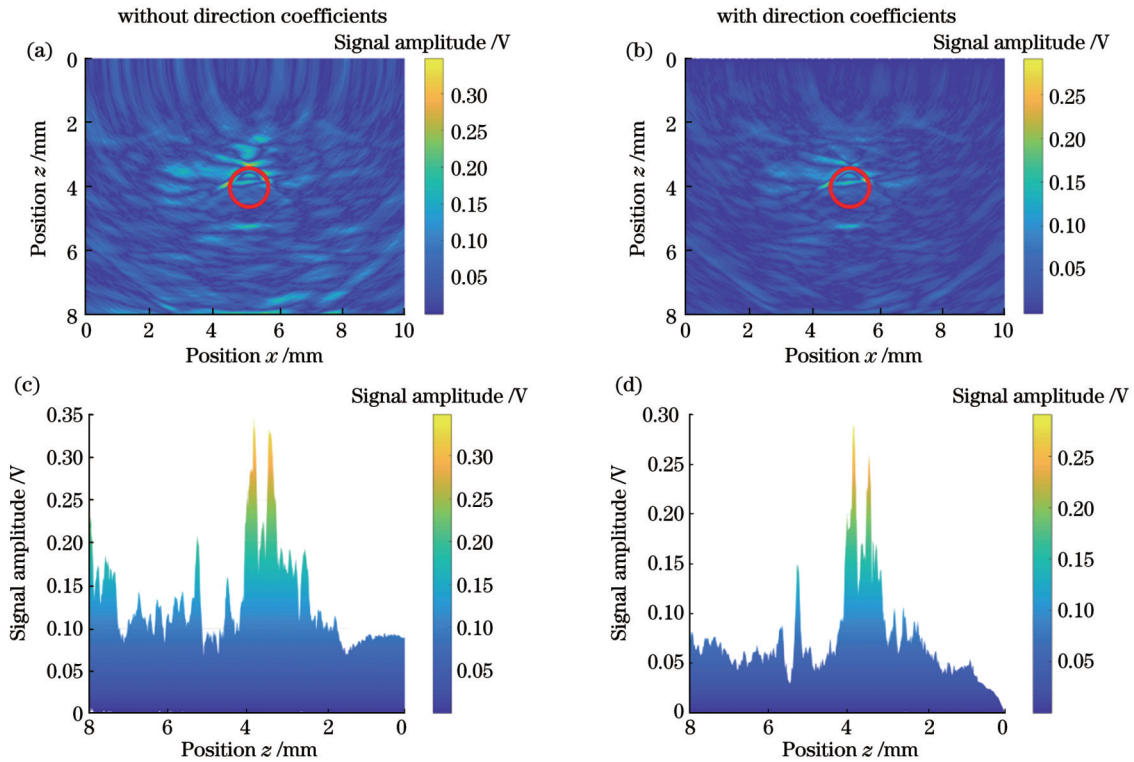


图 10 使用激光超声 TFM 获得的结果图。(a)不考虑激发方向性的 TFM 成像图;(b)考虑激发方向性的 TFM 成像图;(c)不考虑激发方向性的 TFM 成像侧视图;(d)考虑激发方向性的 TFM 成像侧视图

Fig. 10 Results obtained using laser ultrasonic TFM. (a) TFM image without generation direction coefficients; (b) TFM image with generation direction coefficients; (c) side view of TFM image without generation direction coefficients; (d) side view of TFM image with generation direction coefficients

铝板内实际缺陷顶端位于 $x=5\text{ mm}$, $z=3.4\text{ mm}$ 的位置, 本文将成像图中信号幅值最大处的轮廓作为缺陷成像结果。图 10(a)、(b) 中缺陷图像信号顶端均位于 $z=3.44\text{ mm}$ 处, 误差均为 1.18%。由此可见: 引入激发方向性系数前后, 成像结果均可反映缺陷位置。相较而言, 图 10(a) 中的高幅值信号分散在缺陷处及其四周, 而图 10(b) 中的高幅值信号主要集中在缺陷处, 图像信噪比更高。使用公式 $R_{\text{SN}} = 20\lg \frac{I_{\text{signal}}}{I_{\text{noise}}}$ 进一步计算图像信噪比, 其中, I_{signal} 表示信号最大幅值, I_{noise} 表示噪声的算数平方根均值。图 10(c) 中信号最大幅值为 0.3481, 信号信噪比为 17.32 dB; 图 10(d) 中信号最大幅值为 0.2908, 信号信噪比为 20.81 dB。由此可以看出: 引入激发方向性系数后, 虽然图像最大幅值会降低, 但是信噪比得到明显改善, 这表明加入方向性系数对噪声信号有抑制作用。由此可知: 引入激发方向性系数能够有效抑制噪声、改善图像信噪比。

为了进一步验证激光超声全聚焦成像算法的优势, 将该算法结果与 SAFT 结果进行比较。图 11 为使用相同数据进行 SAFT 计算^[11]得到的成像图, 其中圆圈表示缺陷的实际位置。

图 11(a)、(b) 中缺陷顶端都位于 $z=3.46\text{ mm}$ 处, 误差均为 1.76%。相较而言, 图 11(a) 中的高幅值信号

分散在缺陷处及其四周, 而图 11(b) 中的高幅值信号主要集中在缺陷处, 图像信噪比更高。图 11(c) 中图像的信噪比为 15.78 dB, 图 11(d) 中图像的信噪比为 17.22 dB。对比图 11(c)、(d) 可以看出: 与全聚焦算法一样, 引入激发方向性系数后, SAFT 图像的最大幅值会降低, 但是信噪比得到改善。最后将加入激发方向性系数后的结果进行对比可以发现: 激光超声全聚焦成像算法测得的缺陷位置误差更小、缺陷图像信噪比更高, 结果更准确。这表明激光超声全聚焦算法具有更强的缺陷表征能力。

然而, 前文形成的激光超声全聚焦成像算法包含平方、开方及三角函数运算, 存在计算复杂、耗时长的问题。接下来将该算法移植到 ZYNQ 平台中, 进行激光超声全聚焦成像算法的加速。本文使用高层次综合指令对算法进行优化, 利用循环展开和流水线指令在二维待测平面的内层 for 循环上开展循环展开和流水线工作, 在综合优化后, 内层循环由初始的 501 次循环缩短为 251 次循环, 1 次循环占用 224 个时钟周期, 可在 975 个时钟周期内完成内层循环计算, 与 2.2.2 节中 $T_{\text{P2}} = (s + n - 1)\Delta t = [224 + 3 \times (251 - 1)]\Delta t = 974\Delta t$ 一致。同时, ZYNQ-7000 的载板资源得到充分利用, 各资源利用率如表 1 所示, 其中, LUT 表示查找表, LUTRAM 表示分布式随机存储器, FF 表示触发

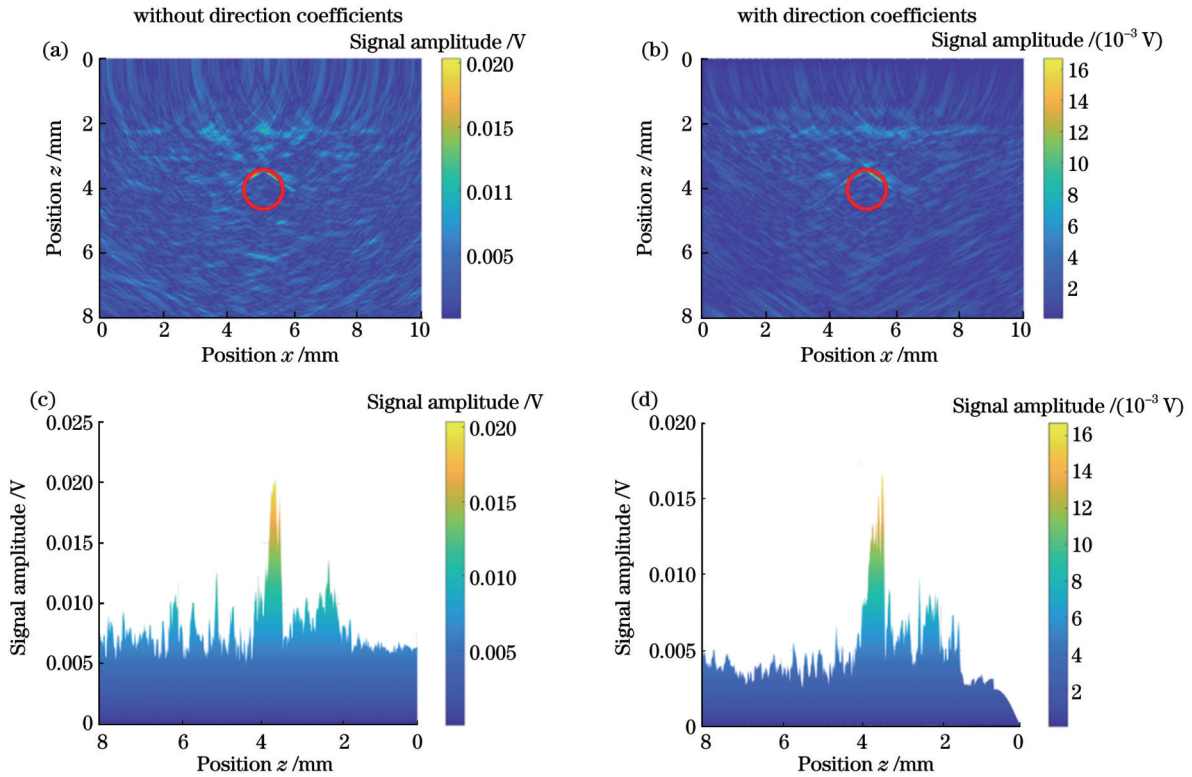


图 11 使用激光超声 SAFT 获得的结果图。(a)不考虑激发方向性的 SAFT 成像图;(b)考虑激发方向性的 SAFT 成像图;(c)不考虑激发方向性的 SAFT 成像侧视图;(d)考虑激发方向性的 SAFT 成像侧视图

Fig. 11 Results obtained using laser ultrasonic SAFT. (a) SAFT image without generation direction coefficients; (b) SAFT image with generation direction coefficients; (c) side view of SAFT image without generation direction coefficients; (d) side view of SAFT image with generation direction coefficients

表 1 板载资源的使用情况
Table 1 Usage of on-board resources

Resource	Utilization number	Available number	Utilization rate /%
LUT	42969	53200	80.77
LUTRAM	2621	17400	15.06
FF	41335	106400	38.85
BRAM	3	140	2.14
DSP	90	220	40.91
BUFG	1	32	3.13

器, BRAM 表示块随机存储器, DSP 表示数字信号处理器, BUFG 表示全局缓冲资源。

将 2401 组待测数据分为两部分, 使用 ZYNQ 的两个 ARM 核同时计算, 使用一个 ARM 核的计算时间是 136.9 s, 使用双核的计算时间是 82.6 s, 时间缩短了 40%。计算时间与核的数量有关, 核数越多, 待测数据就可以分配到越多的核内进行计算, 并行性就越高, 整体的计算时间就越短。图 12 为 ZYNQ 加速后的激光超声全聚焦成像图。

图 12(a) 中缺陷顶端位于 $z=3.46$ mm 处, 误差为 1.76%, 图 12(b) 中图像的信噪比为 21.2 dB。与图 10(b) 中缺陷误差 1.18% 相比, ZYNQ 的计算误差

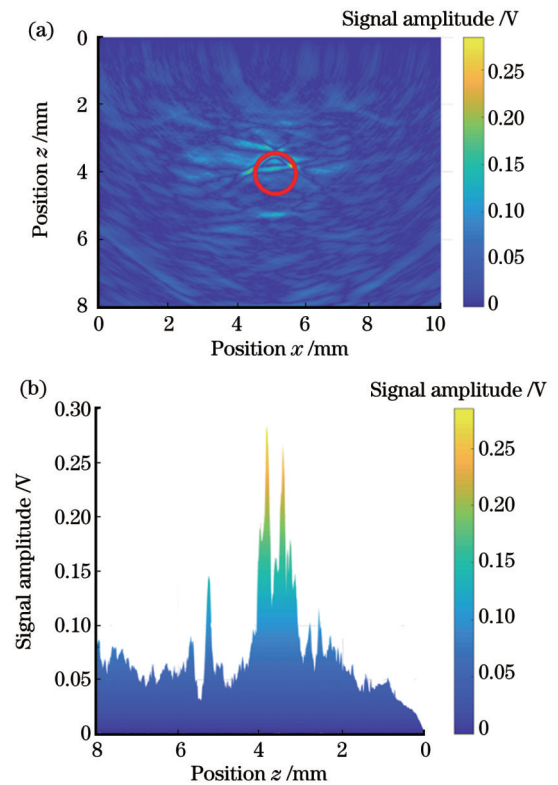


图 12 基于 ZYNQ 的 TFM 成像图。(a) 正视图; (b) 侧视图
Fig. 12 TFM images based on ZYNQ. (a) Front view; (b) side view

比 PC 大 0.58%，两者测得的缺陷位置几乎一致；与图 10(d)中缺陷信噪比 20.81 dB 相比，ZYNQ 计算的成像图信噪比 PC 高 0.39 dB，两幅图的成像效果基本相同。导致两者差别的原因：PC 使用浮点数进行计算，而 ZYNQ 的计算数据需定点化，存在量化误差。在不影响计算结果的前提下，本文使用的 ZYNQ 开发板将各参数定义为包含 16 位小数的 32 位定点数类型和 8 位小数的 16 位定点数类型，量化精度分别为 2^{-16} 和 2^{-8} ，存在量化误差，而且当数据小于量化精度时，取 0 进行计算，因此导致 ZYNQ 计算结果与 PC 计算结果略有不同。但研究结果表明，ZYNQ 同样能够较准确地检测到样品的内部缺陷。

上述结果证明了基于 ZYNQ 的激光超声全聚焦成像算法的正确性，下面对基于 PC [Intel(R) Core (TM) i5-8250U 4-core CPU] 和基于 ZYNQ 两种平台进行计算的耗时和成本进行了比较，结果如表 2 所示，ZYNQ 在时间和成本上均占优势，耗时缩短为 PC 的 $82.6/602.6 = 137/1000$ ，成本减少到 PC 的 $1500/5000 = 3/10$ 。这表明 ZYNQ 具有更高的性价比。

表 2 基于 PC 和 ZYNQ 的全聚焦算法的计算时间、成本对比
Table 2 Comparison of running time and cost between ZYNQ-based TFM and PC-based TFM

TFIM calculation tool	Time /s	Cost /yuan
PC-based TFM	602.6	5000
ZYNQ-based TFM	82.6	1500

进一步，本文使用快速时域扫查模型获得了两组探测数据，并进行了激光超声的全聚焦缺陷成像。结果显示：引入激发方向性系数后，虽然图像的最大幅值会降低，但是信噪比得到明显改善；同时基于 ZYNQ 加速的激光超声全聚焦算法不会降低成像质量，且耗时得到明显缩短，验证了基于 ZYNQ 的激光超声全聚焦成像算法的可行性和普遍适用性。

5 结 论

开展了基于 ZYNQ 的激光超声全聚焦成像算法研究，实现了对样品内部微小缺陷的检测和快速定位。一方面，通过分析椭圆轨迹在全聚焦算法中产生的影响，将激光超声方向性作为系数引入算法；另一方面，这一算法的优化增加了计算复杂度，使耗时大大增加。针对这一问题，利用 ZYNQ PL 端的并行性对全聚焦算法进行循环展开和流水线优化，同时使用 ZYNQ 双核设计进一步加速算法。实验结果表明：引入激发方向性系数后，全聚焦图像信噪比得到明显改善。对比 SAFT 算法和全聚焦算法的成像结果发现：全聚焦成像图误差更小，信噪比更高。由此可知，激光超声全聚焦成像算法具有更强的缺陷表征能力，成像结果具有

更高的信噪比，验证了激光超声全聚焦成像算法的可行性。此外，使用 ZYNQ 对激光超声全聚焦成像算法进行优化处理后发现，ZYNQ 计算与 PC 计算的最终成像效果基本一致，但是 ZYNQ 的计算时间缩短了 86%，成本减少了 68.5%，进一步证实了基于 ZYNQ 的激光超声全聚焦成像算法的可行性。

参 考 文 献

- [1] 杨辰龙. 大型航空复杂形状复合构件自动化超声无损检测研究[D]. 杭州: 浙江大学, 2005.
Yang C L. Research of automated ultrasonic non-destructive test of large complex geometry composite structures in aeronautic industry [D]. Hangzhou: Zhejiang University, 2005.
- [2] 王晶. 金属表面缺陷和钢轨踏面残余应力的激光超声无损检测研究[D]. 北京: 北京交通大学, 2016.
Wang J. Research on nondestructive testing for metal surface defect detection and rail tread residual stress determination using a laser ultrasonic technique[D]. Beijing: Beijing Jiaotong University, 2016.
- [3] 汪永康, 刘杰, 刘明, 等. 石油管道内缺陷无损检测技术的研究现状[J]. 腐蚀与防护, 2014, 35(9): 929-934.
Wang Y K, Liu J, Liu M, et al. NDT technology research status of internal defect detection for oil and gas pipelines[J]. Corrosion & Protection, 2014, 35(9): 929-934.
- [4] 姚来凤, 冯益华, 王丽. 超声波及超声检测[J]. 山东轻工业学院学报(自然科学版), 2007, 21(2): 67-69, 73.
Yao L F, Feng Y H, Wang L. Ultrasonic and ultrasonic measuring [J]. Journal of Shandong Institute of Light Industry (Natural Science Edition), 2007, 21(2): 67-69, 73.
- [5] 单宝华, 喻言, 欧进萍. 超声相控阵检测技术及其应用[J]. 无损检测, 2004, 26(5): 235-238.
Shan B H, Yu Y, Ou J P. Ultrasonic phased array inspection technology and its applications[J]. Nondestructive Testing, 2004, 26(5): 235-238.
- [6] 杨晓霞, 薛彬, 靳世久, 等. 压缩传感在超声相控阵检测系统中的应用研究[J]. 电子测量与仪器学报, 2015, 29(9): 1286-1294.
Yang X X, Xue B, Jin S J, et al. Application study on compressed sensing in ultrasonic phased array detection system[J]. Journal of Electronic Measurement and Instrumentation, 2015, 29(9): 1286-1294.
- [7] 张鹏辉, 赵扬, 李鹏, 等. 超声成像检测技术研究进展综述[J]. 激光与光电子学进展, 2022, 59(2): 0200003.
Zhang P H, Zhao Y, Li P, et al. Research progress in ultrasonic imaging detection technology[J]. Laser & Optoelectronics Progress, 2022, 59(2): 0200003.
- [8] 孙宝申. 合成孔径成像的应用及发展[J]. 应用声学, 2018, 37(5): 787-793.
Sun B S. Applications and development of synthetic aperture imaging[J]. Journal of Applied Acoustics, 2018, 37(5): 787-793.
- [9] 沈玉娣. 现代无损检测技术[M]. 西安: 西安交通大学出版社, 2012: 12-67.
Shen Y D. Modern nondestructive testing technology[M]. Xi'an: Xi'an Jiaotong University Press, 2012: 12-67.
- [10] 杜英华. 合成孔径聚焦超声成像技术研究[D]. 天津: 天津大学, 2010.
Du Y H. Research on synthetic aperture focusing technology for ultrasonic imaging[D]. Tianjin: Tianjin University, 2010.
- [11] 陈楚, 应恺宁, 刘念, 等. 相移迁移法在激光超声合成孔径聚焦技术中的应用[J]. 中国激光, 2021, 48(3): 0304001.
Chen C, Ying K N, Liu N, et al. Application of phase shift migration method in laser ultrasonic SAFT[J]. Chinese Journal of Lasers, 2021, 48(3): 0304001.
- [12] 王冠, 黄丽霞, 王志刚, 等. 基于全聚焦算法的混凝土超声阵列探测成像方法[J]. 声学技术, 2021, 40(4): 482-489.

- Wang G, Huang L X, Wang Z G, et al. A TFM based ultrasonic array detection and imaging method for concretes[J]. *Technical Acoustics*, 2021, 40(4): 482-489.
- [13] 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.
- [14] Hunter A J, Drinkwater B W, Wilcox P D. The wavenumber algorithm for full-matrix imaging using an ultrasonic array[J]. *IEEE Transactions on Ultrasonics, Ferroelectrics, and Frequency Control*, 2008, 55(11): 2450-2462.
- [15] Velichko A, Wilcox P D. Reversible back-propagation imaging algorithm for post-processing of ultrasonic array data[J]. *IEEE Transaction on Ultrasonics, Ferroelectrics, and Frequency Control*, 2009, 56(11): 2492-2503.
- [16] Hunter A J, Drinkwater B W, Wilcox P D. Autofocusing ultrasonic imagery for non-destructive testing and evaluation of specimens with complicated geometries[J]. *NDT & E International*, 2010, 43(2): 78-85.
- [17] Li C, Pain D, Wilcox P D, et al. Imaging composite material using ultrasonic arrays[J]. *NDT & E International*, 2013, 53: 8-17.
- [18] 周正干, 李洋, 周文彬. 相控阵超声后处理成像技术研究、应用和发展[J]. *机械工程学报*, 2016, 52(6): 1-11.
Zhou Z G, Li Y, Zhou W B. Ultrasonic phased array post-processing imaging techniques: a review[J]. *Journal of Mechanical Engineering*, 2016, 52(6): 1-11.
- [19] Drinkwater B W, Bowler A I. Ultrasonic array inspection of the Clifton Suspension Bridge chain-links[J]. *Insight*, 2009, 51(9): 491-498.
- [20] 冉超. 基于FPGA的快速超声全聚焦成像研究[D]. 成都: 西南交通大学, 2017: 13-24.
Ran C. Fast ultrasonic total focus imaging based on FPGA[D]. Chengdu: Southwest Jiaotong University, 2017: 13-24.
- [21] 贾乐成, 陈世利, 白志亮, 等. 超声全聚焦成像校正模型及加速算法[J]. *仪器仪表学报*, 2017, 38(7): 1589-1596.
Jia L C, Chen S L, Bai Z L, et al. Correction model and accelerating algorithm for ultrasonic total focusing method[J]. *Chinese Journal of Scientific Instrument*, 2017, 38(7): 1589-1596.
- [22] 沈中华, 袁玲, 张宏超. 固体中的激光超声[M]. 北京: 人民邮电出版社, 2015: 2-3.
Shen Z H, Yuan L, Zhang H C. *Laser ultrasound in solids*[M]. Beijing: Posts & Telecom Press, 2015: 2-3.
- [23] Gao H D, López B. Development of single-channel and phased array electromagnetic acoustic transducers for austenitic weld testing[J]. *Materials Evaluation*, 2010, 68: 821-827.
- [24] 周益, 李三星. 基于多重双波混频干涉仪的Lamb波频散特性研究[J]. *激光与光电子学进展*, 2021, 58(23): 2319001.
Zhou Y, Li S X. Study of lamb wave dispersion characterization using multiplexed two-wave mixing interferometer[J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2021, 58(23): 2319001.
- [25] Stratoudaki T, Clark M, Wilcox P D. Laser induced ultrasonic phased array using full matrix capture data acquisition and total focusing method[J]. *Optics Express*, 2016, 24(19): 21921-21938.
- [26] Stratoudaki T, Clark M, Wilcox P. Adapting the full matrix capture and the Total Focusing Method to laser ultrasonics for remote non destructive testing[C] //2017 IEEE International Ultrasonics Symposium, September 6-9, 2017, Washington, DC, USA. New York: IEEE Press, 2017.
- [27] 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, 59(4): 30-35.
Zhou Z G, Sun G K, Li Y. Application of advanced nondestructive testing technologies for the detection of defects in composites[J]. *Aeronautical Manufacturing Technology*, 2016, 59(4): 30-35.
- [28] Velichko A, Wilcox P D. An analytical comparison of ultrasonic array imaging algorithms[J]. *The Journal of the Acoustical Society of America*, 2010, 127(4): 2377-2384.
- [29] Nikolov S I, Jensen J A, Tomov B G. Fast parametric beamformer for synthetic aperture imaging[J]. *IEEE Transactions on Ultrasonics, Ferroelectrics, and Frequency Control*, 2008, 55(8): 1755-1767.
- [30] 吴恩华, 柳有权. 基于图形处理器(GPU)的通用计算[J]. *计算机辅助设计与图形学学报*, 2004, 16(5): 601-612.
Wu E H, Liu Y Q. General purpose computation on GPU[J]. *Journal of Computer Aided Design & Computer Graphics*, 2004, 16(5): 601-612.
- [31] Amaro J, Falcao G, Yiu B Y S, et al. Portable parallel kernels for high-speed beamforming in synthetic aperture ultrasound imaging [C]//2013 IEEE International Conference on Acoustics, Speech and Signal Processing, May 26-31, 2013, Vancouver, BC, Canada. New York: IEEE Press, 2013: 2688-2692.
- [32] Huang H J, Yu Y Y, Wang J J, et al. Parallel design for ultrasound synthetic aperture imaging FPGA[C]//TENCON 2015-2015 IEEE Region 10 Conference, November 1-4, 2015, Macao, China. New York: IEEE Press, 2015.
- [33] IncXilinx. Zynq-7000 all programmable SoC technical reference manual[EB/OL]. (2017-12-06) [2022-08-01]. <https://usermanual.wiki/Document/Zynq7000TechRefManual.1945247997/view>.
- [34] 孙学文. 椭圆双曲线的焦点三角形的性质[J]. *数学教学研究*, 1997(3): 38-39.
Sun X W. Properties of the focus triangle of hyperbola[J]. *Mathematics Teaching Research*, 1997(3): 38-39.
- [35] Bernstein J R, Spicer J B. Line source representation for laser-generated ultrasound in aluminum[J]. *The Journal of the Acoustical Society of America*, 2000, 107(3): 1352-1357.
- [36] IncXilinx. Vivado design suite user guide high-level synthesis [EB/OL]. (2012-12-18) [2022-08-01]. http://www.xilinx.com/support/documentation/sw_manuals/xilinx2012_4/ug902-vivado-high-level-synthesis.pdf.

Research on Laser Ultrasonic Total Focusing Imaging Method Based on ZYNQ Acceleration

Wu Chanjuan¹, Ying Kaining², Dai Lunan², Tan Junfu³, Shen Zhonghua², Ni Chenyin^{1*}

¹*School of Electronic Engineering and Optoelectronic Technology, Nanjing University of Science and Technology, Nanjing 210094, Jiangsu, China;*

²*College of Science, Nanjing University of Science and Technology, Nanjing 210094, Jiangsu, China;*

³*College of Computer Science and Engineering, Nanjing University of Science and Technology, Nanjing 210094, Jiangsu, China*

Abstract

Objective With the continuous emergence of various materials and the improvement of the quality requirements of modern industry

for mechanical parts, non-destructive testing technology has been rapidly developed. Ultrasonic non-destructive testing has been widely used because of its high sensitivity, penetrability and other advantages; it has become an indispensable tool in aerospace, railway, oil pipeline, and other industrial testing. As a hot spot in the field of industrial non-destructive testing in recent years, phased array testing technology exhibits the characteristic of flexibility in focusing. However, all ultrasonic sub beams are focused at a constant depth, and reflectors outside the focus area cannot be detected sensitively. Synthetic aperture focusing technology (SAFT) can synthesize multiple small numerical aperture transducers into large numerical aperture transducers, which can obtain higher resolution reconstructed images and provide a more reliable basis for the qualitative analysis of defects. The total focusing method (TFM) is developed by combining phased array detection technology and synthetic aperture focusing technology. The total focusing method uses all the transceiver combinations in the phased array elements to detect defects and performs image post-processing on the obtained full matrix data. It uses all the information of the data to recover the detection signal to the maximum extent, and obtains imaging results with a stronger defect characterization ability and higher resolution. However, it has many limitations such as a large data demand, complex calculations, and the need for a substantial amount of time. To address these issues, the laser ultrasonic total focusing imaging method based on ZYNQ acceleration is studied in conjunction with laser ultrasonic testing technology.

Methods First, the total focusing imaging method based on laser ultrasound is established, and the laser ultrasound directivity coefficient is then introduced to optimize the algorithm by analyzing the imaging principle. Furthermore, a laser ultrasonic scanning detection device is built for experimental verification. The ultrasonic signal is excited by a linear laser source and the echo signal is detected by a Doppler vibrometer. The laser ultrasonic total focusing imaging method is then used to detect and locate the internal defects, and the results are compared with those obtained by synthetic aperture focusing technology. Finally, the personal computer (PC) is connected to the ZYNQ-7000 development board to test the data received by the PC. The total focusing imaging method is accelerated based on the loop expansion and pipeline principles of the ZYNQ programmable logic (PL) part and the dual core design principle of the processing system (PS) part, and the results are analyzed.

Results and Discussions Before and after the introduction of the laser ultrasonic directivity coefficient, the imaging results reflect the defect location (Fig. 10). In contrast, in the results obtained by the original total focusing method, the high amplitude signals are scattered around the defects. In the results obtained by introducing the laser ultrasonic directivity coefficient, the high amplitude signals are mainly concentrated at the defects, and the image signal-to-noise ratio is higher. Therefore, the introduction of the excitation directivity coefficient can effectively suppress noise and improve the image signal-to-noise ratio. Moreover, compared with the SAFT image (Fig. 11), the laser ultrasonic total focusing imaging method has a smaller defect position error, a higher signal-to-noise ratio of the defect image, and a stronger defect characterization ability. The algorithm is then transplanted to the ZYNQ platform for acceleration. Compared with the PC based imaging results, the imaging effects of the two are essentially the same (Fig. 12); however, ZYNQ has the advantages of time and cost (Table 2). The time consumption is reduced to 317/1000 that of the PC, and the cost is reduced to 3/10 that of the PC. This shows that ZYNQ has a higher cost performance ratio.

Conclusions An algorithm of the laser ultrasonic total focusing imaging method based on ZYNQ is investigated in this study. The results indicate that the signal-to-noise ratio of the full focus image is improved significantly after the introduction of the laser ultrasonic directivity coefficient. Upon comparing the imaging results of synthetic aperture focusing technology and the total focusing imaging method, it is noted that the total focusing imaging method image has a smaller error and higher signal-to-noise ratio. The laser ultrasonic total focusing imaging method has a stronger defect characterization ability and higher signal-to-noise ratio, which further verifies the feasibility of the laser ultrasonic total focusing imaging method. After using ZYNQ to optimize the laser ultrasonic total focusing imaging method, it is deduced that the final imaging effect based on the ZYNQ calculation is essentially the same as that based on the PC calculation. However, the calculation time of ZYNQ is reduced by 86%, and the cost is reduced by 68.5%; this further confirms the feasibility of the laser ultrasonic total focusing imaging method based on ZYNQ.

Key words measurement; laser ultrasonic; total focusing imaging method; ZYNQ platform; nondestructive testing