

DOI: 10.16300/j.cnki.1000-3630.23110701 CSTR: 32055.14.sxjs.1000-3630.23110701

引用格式: 张海燕, 张语心, 张辉, 等. 薄板缺陷的兰姆波全聚焦优化成像[J]. 声学技术, 2025, 44(1): 40-47. [ZHANG Haiyan, ZHANG Yuxin, ZHANG Hui, et al. Lamb wave optimized total focusing imaging for defects in thin plates[J]. Technical Acoustics, 2025, 44(1): 40-47.]

薄板缺陷的兰姆波全聚焦优化成像

张海燕¹, 张语心¹, 张辉², 朱文发², 朱琦³

(1. 上海大学通信与信息工程学院, 上海 200444; 2. 上海工程技术大学城市轨道交通学院, 上海 201620;
3. 上海大学机电工程与自动化学院, 上海 20444)

摘要: 全聚焦算法依靠信号的幅度信息进行延迟叠加 (delay and sum, DAS) 成像, 实际应用中信号并非总能满足相干叠加这一前提, 而非相干信号的叠加导致噪声和伪影。文章提出一种循环相干因子 (circular coherence factor, CCF) 加权的延迟乘和 (delay multiply and sum, DMAS) CCF-DMAS 优化算法, 实现薄板中缺陷的兰姆波全聚焦成像。该方法考虑接收阵元间的空间相干性, 对接收信号进行相乘耦合, 利用数据中的相位信息计算相干因子实现自适应加权, 以扩大相干和非相干信号间的差异, 从而达到缩窄主瓣, 减少旁瓣, 提高成像分辨率的效果。建立超声阵列发射、接收实验系统, 通过楔块耦合, 在含通孔缺陷的铝合金薄板上激发 S_0 模式兰姆波, 捕获全矩阵数据; 通过 CCF-DMAS 算法对采集的数据相位加权, 生成新的频率分量; 利用带通滤波保留二次谐波分量进行全聚焦成像。实验结果表明: 与 DAS 和 DMAS 全聚焦成像算法相比, CCF-DMAS 全聚焦优化算法能够有效抑制噪声和伪影, 信噪比提高约 39% 和 22%, 阵列性能指数提高约 86% 和 69%, 为薄板无损检测的后处理提供了一种有效的改进方案。

关键词: 延迟乘和; 循环相干因子; 兰姆波; 全聚焦优化成像

中图分类号: TB559

文献标志码: A

文章编号: 1000-3630(2025)-01-0040-08

Lamb wave optimized total focusing imaging for defects in thin plates

ZHANG Haiyan¹, ZHANG Yuxin¹, ZHANG Hui², ZHU Wenfa², ZHU Qi³

(1. School of Communication and Information Engineering, Shanghai University, Shanghai 200444, China; 2. School of Urban Rail Transportation, Shanghai University of Engineering Science, Shanghai 201620, China; 3. School of Mechatronic and Automation Engineering, Shanghai University, Shanghai 200444, China)

Abstract: The traditional total focusing method (TFM) mainly relies on the amplitude information of the signals for delay and sum (DAS). In practical applications, signals may not always meet the prerequisite of coherent superposition. However, the superposition of incoherent signals can lead to the generation of artifacts in result images. To solve this issue, an optimized total focusing imaging method (CCF-DMAS) with delay multiply and sum (DMAS) weighted by circular coherence factor (CCF) is proposed in this paper, which could realize Lamb wave total focusing imaging of defects in thin plates. Considered with the spatial coherence between the receiving array elements, the received signals is multiplied and coupled in this method. Meanwhile, the phased weighted factor is calculated based on phase information in the data to expand the differences between coherent and incoherent signals, which can narrow the main lobe, reduce sidelobes, and improve imaging resolution. In this study, an ultrasonic array data acquisition experimental system is established to excite S_0 mode Lamb wave on a zirconium alloy thin plate with through-hole defects and capture full matrix data. The new frequency components are generated by phase weighting the collected data using proposed CCF-DMAS. Then the second harmonic component is retained by bandpass filtering for total focusing imaging. The experimental results show that CCF-DMAS can effectively suppress noise and artifacts, with a signal-to-noise ratio improvement of about 39% and 22%, and an array performance index (API) improvement of about 86% and 69% compared to DAS and DMAS. It provides an effective improvement scheme for the post-processing of non-destructive testing on thin plate.

Key words: delay multiply and sum; circular coherence factor; Lamb wave; optimized total focusing imaging

收稿日期: 2023-11-07; 修回日期: 2023-12-19

基金项目: 国家自然科学基金 (12174255、12374443) 资助项目

作者简介: 张海燕 (1970—), 女, 山东菏泽人, 博士, 教授, 研究方向为超声检测。

通信作者: 张海燕, E-mail: hyzh@shu.edu.cn

0 引言

超声相控阵技术是近年来发展迅速的一种无损检测技术, 被广泛应用于航空航天、汽车、船舶

等，以实现工件内部缺陷的高效、精准检测^[1]。Homles 等^[2]在 2005 年提出一种超声相控阵全矩阵数据的后处理算法，称为全聚焦算法 (total focusing method, TFM)。全聚焦算法被视为无损检测超声成像的黄金标准^[3]，它对成像区域内的每个像素的全矩阵数据进行合成聚焦。Muller 等^[4]提出适应圆形压电传感器的全聚焦算法，可以用于检测各向同性板中小于波长的缺陷。庄泽宇等^[5]提出一种水平分置线性双阵列超声全聚焦成像算法，能够将成像信噪比提高约 5~10 dB。上述全聚焦算法主要依靠数据的幅度延迟叠加 (delay and sum, DAS) 成像，然而实际应用中信号并非总能满足相干累加这一前提，非相干信号的累加会导致低回声区域伪影的产生^[6]。

在微波成像领域，Lim 等^[7]提出了一种延迟乘和 (delay multiply and sum, DMAS) 波束形成方法，DMAS 中的相乘耦合运算能够将数据中的空间相干性引入波束成形过程，从而抑制非相干信号的影响。与 DAS 相比，该方法能够有效降低噪声，在对比度和分辨率方面都有更优的表现。近年来，DMAS 方法也被应用在超声领域。Matrone 等^[8-10]研究了 DMAS 在医学超声成像中的应用，结合合成孔径成像、平面波成像等技术，获得了更好的图像分辨率及图像对比度。Shen 等^[11]在超声成像中引入基带空间相干性，提出超声基带延迟乘和成像算法。该方法波束形成的速率相比 DMAS 有所提升，且有效去除了囊肿及肾脏超声图像中的伪影。Guo 等^[12]提出将滤波延迟求和与基于像素的波束成形方法结合，针对医学超声图像可实现更好的杂波抑制和更高的图像分辨率。在无损伤检测领域，Yu 等^[13]为了检测强衰减材料的缺陷，提出一种将滤波延迟乘和与伪彩色技术相结合的自动缺陷提取算法，该方法在信噪比、检测能力和缺陷的视觉呈现能力方面与线性波束全聚焦方法相比都有显著提升。

然而在信号处理过程中，依赖于数据的幅度信息是有局限性的。图像处理领域的相位相干成像因其优异的性能已被广泛应用于各个领域。Camacho 等^[14]基于孔径数据提出了相位相干因子和符号相干因子，利用相位信息对波束形成进行校正。Chen 等^[15]将相位相干因子与激光超声兰姆波信号结合，实现了缺陷定位。Zhang 等^[16]将符号相干因子与超声兰姆波技术相结合，抑制了回波信号中的噪声和兰姆波散射效应，提高了成像分辨率。龙盛蓉等^[17]将频域波束形成与符号相干因子加权相结合，相比时域符号相干因子加权算法，在相同分

辨率和信噪比的前提下，成像效率提高 4 倍以上。针对超声检测中材料结构噪声淹没缺陷噪声的问题，Camacho 等^[18]利用散射体的散射场信息提出了循环相干因子 (circular coherence factor, CCF)，结果表明，CCF 具有更优秀的聚焦质量，能够有效抑制材料结构噪声，更有利于小缺陷的检测。通过相干因子对成像区域内的每个像素点进行加权缩放，可以有效减少旁瓣并提高分辨率。

为有效抑制噪声和伪影，提高薄板中缺陷的兰姆波检测效果，本文提出一种循环相干因子加权的延迟乘和全聚焦优化成像算法 (circular coherence factor-delay multiply and sum, DMAS, CCF-DMAS)。该方法将接收信号进行相乘耦合，用延迟乘和非线性波束形成方法替代传统全聚焦算法的合成聚焦，并在此基础上，利用加权因子对相位差大的信号进行抑制，保留相位差小的信号，提高缺陷成像的信噪比和分辨率。

1 CCF-DMAS 成像算法

CCF-DMAS 算法基于全矩阵数据和全聚焦算法进行优化。全矩阵数据采集所有发射和接收元件组合的时域信号。假设相控阵阵元数为 N ，使用一个阵元激励信号， N 个阵元接收信号。该过程重复依次执行，直到采集到所有 A 扫描信号，形成 $N \times N$ 的矩阵。该数据矩阵提供了能够从阵列探头获得的有关缺陷最全面的信息，在后处理阶段有助于提高最终成像的质量。

全聚焦算法 (TFM) 是全矩阵采集的后处理算法，其中成像区域将根据所需的分辨率离散化为网格。该算法在应用延时叠加波束形成的每个网格点上构建声束的全聚焦。全聚焦成像算法示意图如图 1 所示，对于成像区域中的任意给定点 $p(x_p, z_p)$ ，可以根据式 (1) 计算出每个可能的发射器-接收器组合的信号传播时间 T_p ：

$$T_p(x_p, z_p) = \frac{\sqrt{(x_i - x_p)^2 + z_p^2} + \sqrt{(x_j - x_p)^2 + z_p^2}}{c} \quad (1)$$

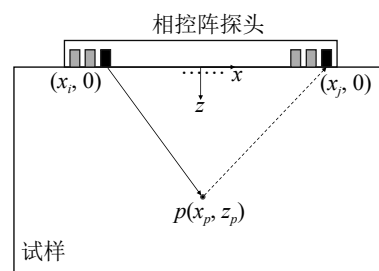


图 1 全聚焦算法示意图
Fig.1 Schematic diagram of TFM

其中： c 是材料中的声速； x_i 和 x_j 分别是发射和接收阵元的横向坐标； x_p 和 z_p 分别为聚焦点的横、纵坐标。根据计算出的延迟值，计算 p 点的声压幅度，如式 (2) 所示：

$$I_{\text{DAS}}(p) = \sum_{i=1}^N \sum_{j=1}^N H_{(i,j)}(T_p) \quad (2)$$

式中： i 代表发射阵元； j 代表接收阵元； $H_{(i,j)}$ 表示阵元 i 发送，阵元 j 接收的回波信号，给回波信号施加 T_p 的时延； N 代表相控阵阵元数。对网格中的所有像素点重复上述操作，以重建目标区域的图像。

然而只是对信号进行直接延迟叠加并非总能满足信号相干叠加，非相干信号的叠加会导致大量伪影的产生。采用延迟乘和替代延迟叠加，在时间延迟和求和步骤之间，对信号进行相乘操作，这里乘法的目的是将信号的相干性引入波束成形过程，即在每个时刻计算来自所有阵元回波信号之间的空间互相关。由于主瓣回波在不同阵元位置接收时表现出比旁瓣回波和随机噪声更高的相干性，因此理论上延迟乘和可以获得更好的波束形成性能和图像重建质量。在点 p 的声压幅度如式 (3) 所示：

$$I_{\text{DMAS}}(p) = \sum_{i=1}^N \sum_{j=1}^{N-1} \sum_{k=j+1}^N \text{sgn}[H_{(j,i)}(T_p) \cdot H_{(k,i)}(T_p)] \cdot \sqrt{H_{(j,i)}(T_p) \cdot H_{(k,i)}(T_p)} \quad (3)$$

式 (3) 中的 sgn 函数表示符号函数提取，符号平方根计算是为了保证每个乘法项的振幅被正确缩放，能够与回波信号具有相同维数。由于式 (3) 中的组合乘法，以 f_0 为中心频率的原始信号被调制到直流信号和中心频率为 $2f_0$ 的波束中。因此，在进行包络检波前，信号需通过中心频率为 $2f_0$ 的带通滤波器提取二次谐波分量，同时去除直流分量。

由于该算法包含了大量的相乘耦合运算，这虽然有利于提升成像质量，但也增加了计算量。为保证检测效率，对其进行简化，首先对从不同发射阵元获得的信号进行延迟叠加，然后对不同接收阵元得到的信号进行延迟乘和操作，即仅计算接收阵元信号间的空间互相关。此时，在 p 点的声压幅度计算如式 (4) 所示：

$$I_{\text{DMAS}}(p) = \sum_{i=1}^N \sum_{j=i+1}^{N-1} \text{sgn}[S_i(T_p) \cdot S_j(T_p)] \cdot \sqrt{S_i(T_p) \cdot S_j(T_p)} \quad (4)$$

其中： $S_i(T_p)$ 为当接收阵元为 i 时， N 个发射阵元发送信号的延迟叠加，由式 (5) 计算得到：

$$S_i(p) = \sum_{k=1}^N H(k,i)(T_p) \quad (5)$$

在上述计算过程中，显式地考虑孔径数据的振幅，而其相位仅隐式参与该波束形成过程，因此引

入相位加权因子进一步克服信号旁瓣问题。利用相控阵的孔径数据的相位信息来构建图像中各像素点相位分布特征的相干因子 $C(x, z)$ 。相干因子的值为 $[0,1]$ ，因子值越小，表明相位相干性越差，反之则相干性越好。基于阵列信号的相位标准差，可构建循环相干因子 (CCF)^[18]，计算公式为

$$C_{\text{CCF}}(p) = 1 - \sqrt{\text{var}_p(\sin\varphi) + \text{var}_p(\cos\varphi)} \quad (6)$$

其中： $\varphi(i,j)$ 表示第 i 阵元作为发射阵元，第 j 阵元作为接收阵元，采集到的回波信号在 p 点的瞬时相位； $\text{var}_p(\sin\varphi)$ 和 $\text{var}_p(\cos\varphi)$ 分别由式 (7) 和式 (8) 定义：

$$\text{var}_p(\sin\varphi) = \frac{\sum_{i=1}^N \sum_{j=1}^N \sin^2[\varphi(i,j)]}{N^2} - \frac{\left\{ \sum_{i=1}^N \sum_{j=1}^N \sin[\varphi(i,j)] \right\}^2}{N^2} \quad (7)$$

$$\text{var}_p(\cos\varphi) = \frac{\sum_{i=1}^N \sum_{j=1}^N \cos^2[\varphi(i,j)]}{N^2} - \frac{\left\{ \sum_{i=1}^N \sum_{j=1}^N \cos[\varphi(i,j)] \right\}^2}{N^2} \quad (8)$$

采用循环相干因子对式 (4) 进行加权矫正得到点 p 的声压幅度，如式 (9) 所示。矫正过后，相位差大的信号由于低相干因子而被抑制，而相位差小的信号能够得到保留。

$$I_{\text{CCF-DMAS}} = I_{\text{DMAS}}(p) \cdot C_{\text{CCF}}(p) \quad (9)$$

对成像区域内的每个像素点都执行上述声压幅度计算操作，得到优化后的全聚焦成像。

2 实验验证与结果分析

2.1 实验装置

本文搭建的实验装置如图 2 所示。实验仪器与材料包括：相控阵超声波探伤仪 (Multi2000, M2M Inc, Les Ulis, France)、服务器、相控阵探头、两块铝合金薄板试样、楔块。其中，两块试样的规格均为 $300 \text{ mm} \times 150 \text{ mm} \times 1 \text{ mm}$ ，相控阵探头的参数取值如表 1 所示。

由于直接与试块耦合检测时，超声相控阵接收的信号中包含仪器内部的非线性初始激励信号，以及初始激励信号在相控阵探头内部结构多次反射带来的混响等，这都会使成像结果产生大量伪像^[19]。同时为了简化兰姆波的检测过程，使其不受频散效应和多模态的影响，选择采用楔块耦合的方式激发单模式的兰姆波。相比于其他模态， S_0 模态的导波更适合用于检测薄板的通孔缺陷^[20]。根据计算的

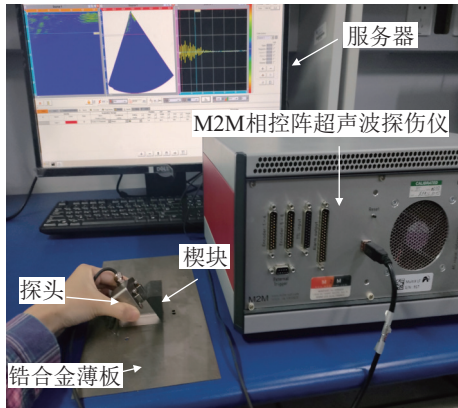


图 2 实验装置图
Fig.2 Photo of experimental device

表 1 超声相控阵参数
Table 1 Parameters of ultrasonic phased array

参数	取值
阵元数	16
阵元中心距/mm	2.0
阵元间距/mm	0.2
中心频率/MHz	1.0

锆合金入射角频散曲线 (图 3), 采用角度为 32° 的楔块与相控阵耦合, 在频厚积为 1 MHz·mm 的锆合金薄板下激发出单一的 S₀ 模态兰姆波, 在薄板中的传播速度为 4 100 m·s⁻¹。

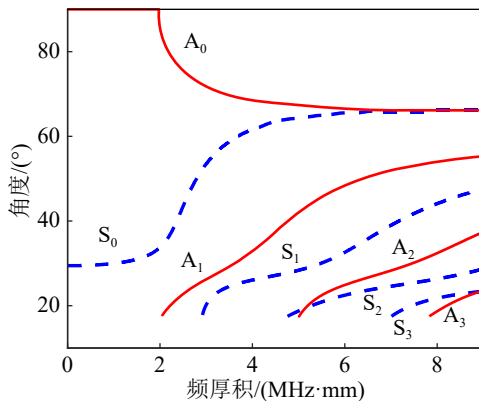


图 3 锆合金薄板兰姆波入射角频散曲线
Fig.3 Dispersion curves of Lamb wave incidence angle on zirconium alloy thin plate

图 4 为超声相控阵探头耦合于斜楔块上, 实现激发兰姆波的示意图。图 4 中 (x_i, z_i) 代表相控阵探头与楔块的接触点, (x'_i, z'_i) 代表超声波传播至锆合金薄板处的接触点。激发的超声波在楔块与锆合金薄板界面接触的位置发生波形转换, 以 S₀ 模态的兰姆波形式向前传播, 遇到缺陷、边界反射回来的回波信号被探头中所有阵元接收。

对于某个入射点而言, 纵波在楔块中传播的速度是固定的, 波速为 2 337 m·s⁻¹, 这里用 c_L 表示。

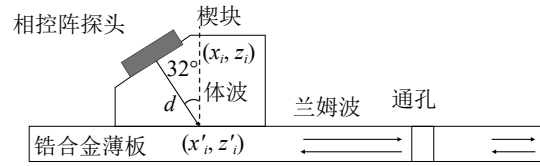


图 4 楔块耦合激发兰姆波示意图
Fig.4 Schematic diagram of Lamb wave excited by wedge coupling

相控阵探头中心到锆板的传播距离 d 为 30 mm, 即 d=30 mm。根据式 (10) 得到超声纵波在楔块中的传播时间 T_i 约 18 μs, 在进行延时计算时需考虑这段时间。

$$T_i = \frac{d}{c_L} = \frac{\sqrt{(x_i - x'_i)^2 + (z_i - z'_i)^2}}{c_L} \quad (10)$$

对两块试样进行楔块斜入射法采集数据的实验装置俯视图如图 5 所示。

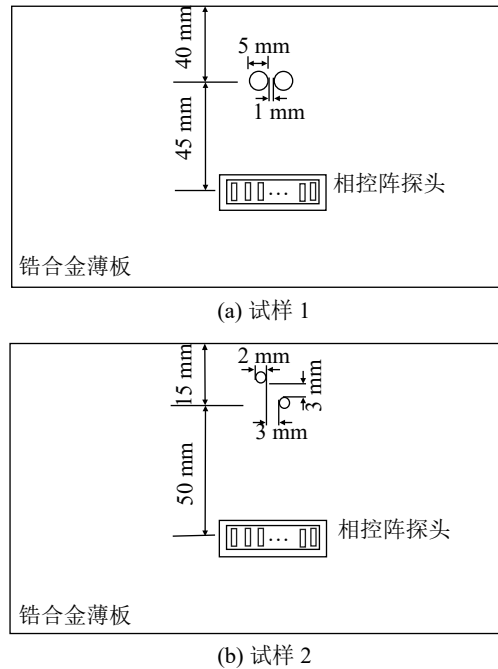


图 5 两块试样的实验装置俯视图
Fig.5 Top view of experimental setup for two samples

2.2 结果与讨论

采用图 2 中的相控阵实验装置, 从第 1 个阵元开始发射纵波, 16 个阵元同时接收, 依次激发每个阵元, 最终采集到 16×16 的全矩阵兰姆波回波数据。为了提高成像质量, 需对数据进行带通滤波预处理, 保留了探头中心频率为 1 MHz 的主要信息, 进一步提取了成像的有用信号。图 6 为滤波前后前 8 个阵元的 B 扫信号对比图, 从虚线框标注的位置可以明显看到使用滤波器后, 关键的缺陷回波信号更明显, 这为接下来的成像提供了良好的基础。

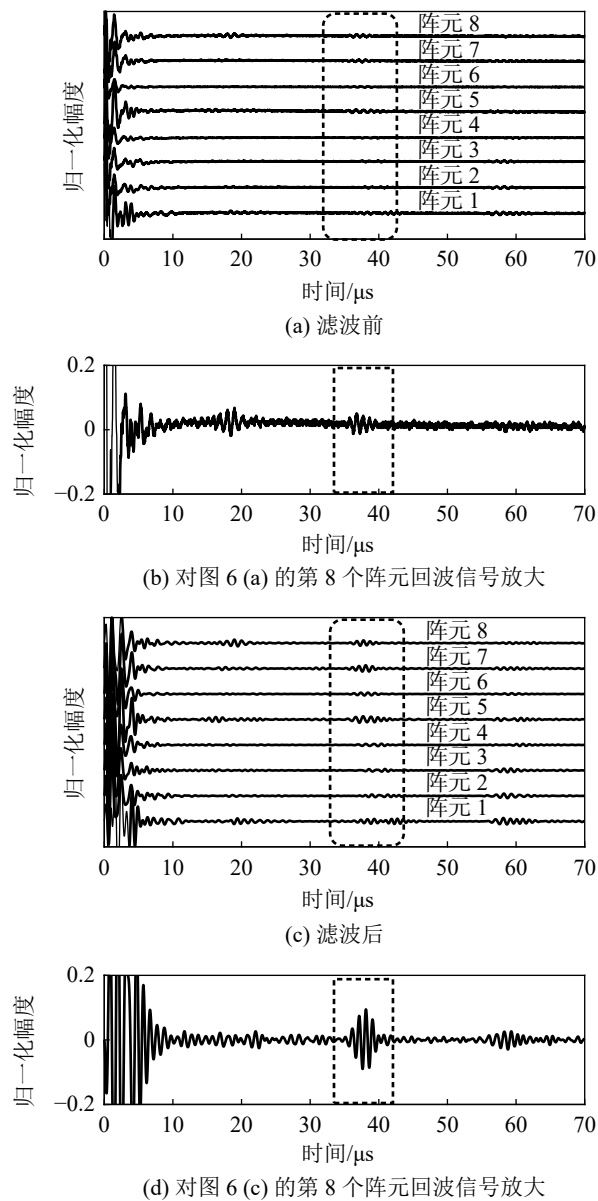


图 6 滤波前后的前 8 个阵元的 B 扫信号对比图及细节放大图
Fig.6 Comparison of the B-scan signals of the first 8 elements before and after filtering and detailed drawing

为验证 CCF-DMAS 缺陷成像分辨率的性能, 针对试样 1 进行实验。试样 1 两个通孔缺陷的内边距为 1 mm, 约为 1/4 波长。图 7 为试样 1 的成像结果图。图 7(a) 为利用延迟叠加计算的全聚焦算法成像图, 两个缺陷图像产生混叠。图 7(b) 为 DMAS 成像图, 经过相耦合运算, 有效抑制了不相干的噪声, 能够区分图像上的两个混叠缺陷。从图 7(c) 中可以看到, 超声数据通过循环相位因子加权后, 伪像减少, 声束能量更为集中。图 8 为在 $z=45$ mm 处的横剖曲线图, 优化后的全聚焦算法相比传统的全聚焦成像, 旁瓣明显减少, 且主瓣宽度明显减小。

为验证该算法对于亚波长缺陷的成像效果, 对

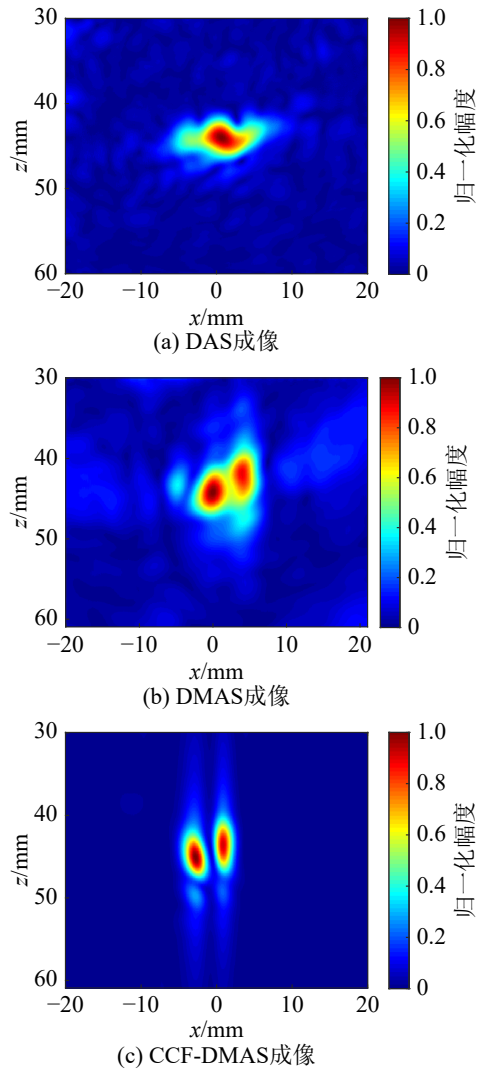


图 7 试样 1 的 DAS, DMAS 及 CCF-DMAS 全聚焦算法成像结果

Fig.7 Comparison of imaging results of DAS, DMAS, CCF-DMAS TFM of sample 1

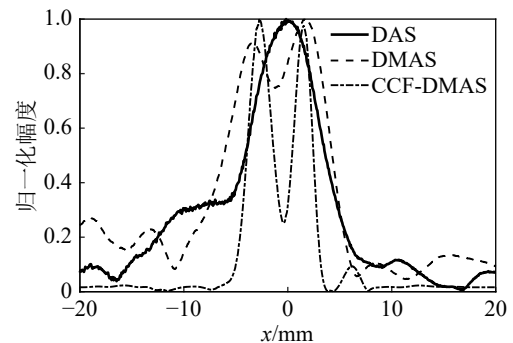


图 8 不同全聚焦成像算法的试样 1 缺陷中心的横剖曲线
Fig.8 Horizontal profile curves of defect center of sample 1 with different total focusing imaging algorithms

试样 2 的两个通孔缺陷进行实验。两个缺陷的直径约为 1/2 波长, 且位置靠近边界, 因此在成像过程中会受到底波和噪声的影响, 使得缺陷位置的像素点归一化幅度较小, 光斑亮度较低, 直观上难以区

分(图 9(a))。经过相乘耦合计算、互相关操作,抑制了缺陷之间的不相关噪声后,从图 9(b)中可以看到大量伪像消失。然而,缺陷位置的光斑依旧较暗,可见性较低。进行自适应相位加权后,根据不同的权重能够进一步抑制非相干信号,缺陷位置处的归一化幅度更大(图 9(c))。在 $z=50\text{ mm}$ (上缺陷)和 $z=55\text{ mm}$ (下缺陷)处的横剖曲线如图 10 所示。由图 10 可以看出延迟叠加处理受到杂波干扰,峰值较宽,而使用 CCF-DMAS 算法处理的两个通孔缺陷的峰宽更窄。

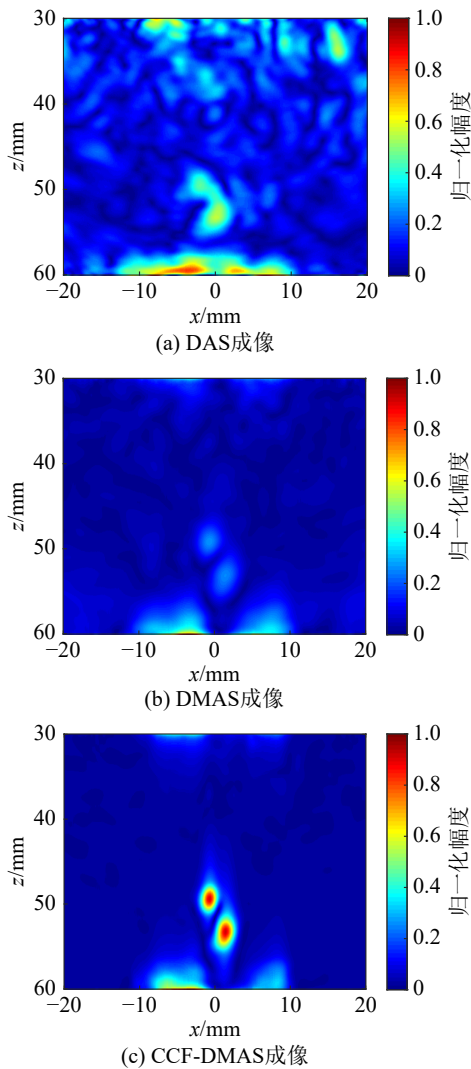


图 9 试样 2 的 DAS, DMAS 及 CCF-DMAS 全聚焦算法成像结果对比
Fig.9 Comparison of imaging results of DAS, DMAS, CCF-DMAS TFM for sample 2

为了定量分析 DAS, DMAS 与 CCF-DMAS 对噪声的抑制能力,计算了每个缺陷的信噪比(signal-to-noise ratio, SNR)^[21],结果如表 2 所示。信噪比的大小可以反映出有用信号与噪声之间的强弱关系,信噪比由式(11)计算可得:

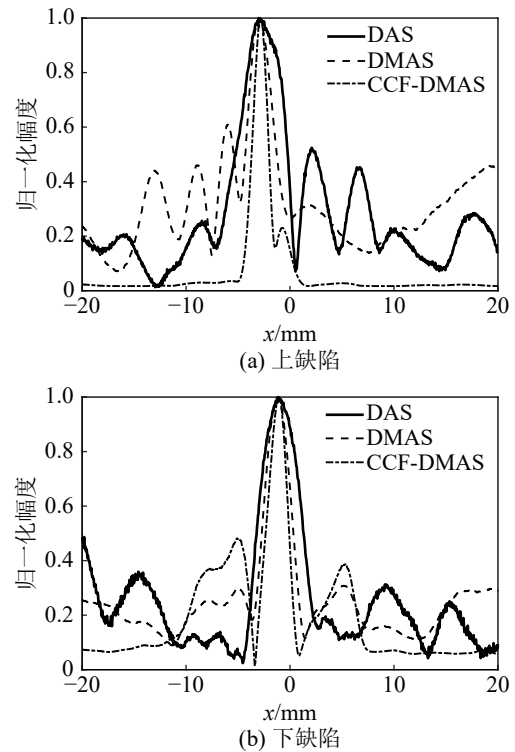


图 10 不同全聚焦成像算法的试样 2 上、下缺陷中心的横剖曲线
Fig.10 Horizontal profile curves of upper and lower defect centers of sample 2 with different total focusing imaging algorithms

表 2 不同全聚焦成像算法时缺陷的信噪比
Table 2 Signal to noise ratios of defects with different total focusing imaging algorithms

试样	缺陷	R_{SN}/dB		
		DAS	DMAS	CCF-DMAS
试样1	缺陷1	19.02	20.92	27.81
	缺陷2	20.76	24.55	26.77
试样2	缺陷1	10.53	12.72	15.30
	缺陷2	12.03	13.14	16.14

$$R_{SN} = 20\lg\left(\frac{I_{\max}}{I_{\text{average}}}\right) \quad (11)$$

其中: I_{\max} 表示缺陷回波信号的最大幅度, I_{average} 表示噪声幅度平均值。

从表 2 中可知, CCF-DMAS 对全聚焦算法优化后有效提高了信噪比。与 DAS 全聚焦算法相比,针对试样 1 的缺陷 1 信噪比提高约 46%,缺陷 2 提高约 29%;针对试样 2 的缺陷 1 信噪比提高约 45%,缺陷 2 提高约 34%。与 DMAS 全聚焦优化算法相比,针对试样 1 的缺陷 1 提高约 33%,缺陷 2 提高约 9%;针对试样 2 的缺陷 1 提高约 20%,缺陷 2 提高约 23%。

同时为了量化 DAS,DMAS 与 CCF-DMAS 对全聚焦算法在分辨率性能的表现,采用阵列性能指

数 (array performance index, API) 进行分析^[22], API 越低, 缺陷成像分辨率越高, 其计算公式为

$$I_{AP} = \frac{A}{\lambda^2} \quad (12)$$

其中: I_{AP} 表示 API; A 是当点扩展函数的归一化幅度大于 0.5 即大于阈值 (-6 dB) 时的面积; λ 为超声波波长。

试样 1 和试样 2 的 DAS, DMAS, CCF-DMAS 全聚焦成像三维图如图 11 和图 12 所示, 图中标注了阈值 -6 dB 的位置。由图 11、12 可知, 经过优化后的全聚焦三维图像的背景更加平坦, 噪声更低, 在阈值幅度上的面积范围更大。

两块试样阵列性能指数的计算结果如表 3 所

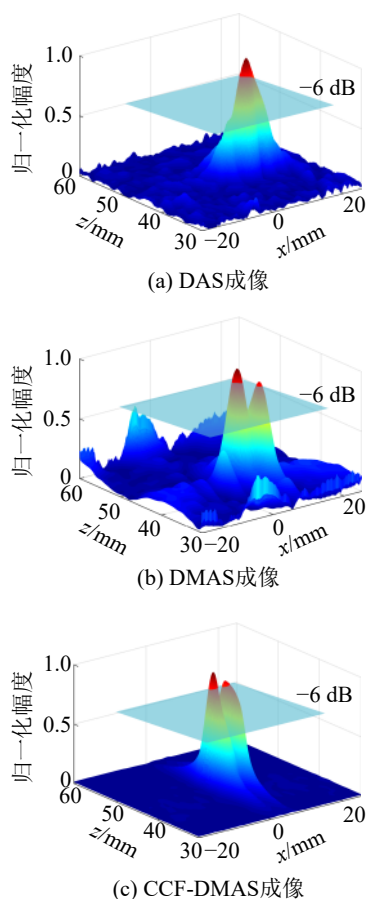
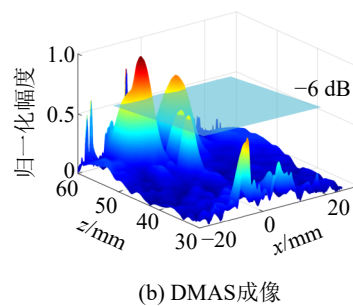
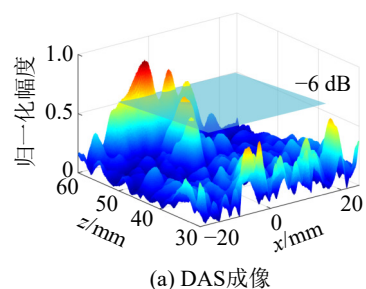
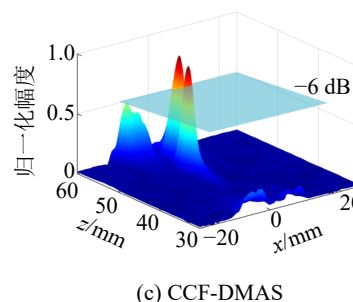


图 11 试样 1 的 DAS, DMAS 及 CCF-DMAS 全聚焦算法成像三维图

Fig.11 Three-dimensional images with DAS, DMAS, CCF-DMAS TFM for sample 1



(b) DMAS成像



(c) CCF-DMAS

图 12 试样 2 的 DAS, DMAS 及 CCF-DMAS 全聚焦算法成像三维图

Fig.12 Three-dimensional images with DAS, DMAS, CCF-DMAS TFM for sample 2

表 3 不同全聚焦成像算法的阵列性能指数

Table 3 Array performance indexes with different total focusing imaging algorithms

试样	阵列指向性指数		
	DAS	DMAS	CCF-DMAS
试样1	4.77	2.74	0.49
试样2	2.10	0.80	0.36

示。相较于 DAS 全聚焦成像算法, 试样 1 的 CCF-DMAS 优化算法的 API 降低了 89%; 试样 2 的 API 降低了 83%。相较于 DMAS 全聚焦优化算法, 试样 1 的 CCF-DMAS 优化算法的 API 降低了 82%; 试样 2 的 API 降低了 55%。

3 结论

为抑制超声成像过程中伪影带来的成像质量影响, 本文提出一种 CCF-DMAS 全聚焦优化算法, 实现了薄板缺陷的兰姆波高分辨率成像。本文得到的主要结论如下:

(1) 将延迟乘和波束形成方法 (DMAS) 替代延迟叠加和方法 (DAS), 对传统全聚焦算法进行改进。该方法通过相乘耦合运算, 将信号的相干性引入波束成形过程, 有效缩窄了信号主瓣宽度。

(2) 利用全矩阵数据中的相位信息计算循环相干因子, 对延迟乘和信号进行加权, 扩大相干信号和非相干信号差异, 可以进一步提升全聚焦成像质量。

(3) 在两块含缺陷的铝合金薄板试样上进行实验, 证明了该优化算法具有较好的噪声抑制能力和分辨率提升能力, 相比 DAS 和 DMAS 全聚焦算法, CCF-DMAS 算法能够将信噪比提高约 39% 和 22%, 将阵列性能指数提高约 86% 和 69%。

参 考 文 献

- [1] DRINKWATER B W, WILCOX P D. Ultrasonic arrays for non-destructive evaluation: a review[J]. *NDT & E International*, 2006, **39**(7): 525-541.
- [2] 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.
- [3] CRUZA J F, CAMACHO J. Total focusing method with virtual sources in the presence of unknown geometry interfaces[J]. *IEEE Transactions on Ultrasonics, Ferroelectrics, and Frequency Control*, 2016, **63**(10): 1581-1592.
- [4] MULLER A, ROBERTSON-WELSH B, GAYDECKI P, et al. Structural health monitoring using lamb wave reflections and total focusing method for image reconstruction[J]. *Applied Composite Materials*, 2017, **24**(2): 553-573.
- [5] 庄泽宇, 廉国选, 王小民. 基于水平分置线性双阵列的超声全聚焦成像方法在粗晶材料检测中的应用[J]. *声学技术*, 2022, **41**(3): 355-362.
ZHUANG Zeyu, LIAN Guoxuan, WANG Xiaomin. Application of ultrasonic total focusing method in the detection of grained materials based on a horizontal dual linear array setup[J]. *Technical Acoustics*, 2022, **41**(3): 355-362.
- [6] ZIKSARI M S, ASL B M. Minimum variance combined with modified delay multiply-and-sum beamforming for plane-wave compounding[J]. *IEEE Transactions on Ultrasonics, Ferroelectrics, and Frequency Control*, 2021, **68**(5): 1641-1652.
- [7] LIM H B, NHUNG N T T, LI E P, et al. Confocal microwave imaging for breast cancer detection: delay-multiply-and-sum image reconstruction algorithm[J]. *IEEE Transactions on Bio-Medical Engineering*, 2008, **55**(6): 1697-1704.
- [8] MATRONE G, SAVOIA A S, CALIANO G, et al. Ultrasound Synthetic Aperture Focusing with the Delay Multiply and sum beamforming algorithm[C]//2015 37th Annual International Conference of the IEEE Engineering in Medicine and Biology Society (EMBC). Milan. IEEE, 2015: 137-140.
- [9] MATRONE G, SAVOIA A S, CALIANO G, et al. The delay multiply and sum beamforming algorithm in ultrasound B-mode medical imaging[J]. *IEEE Transactions on Medical Imaging*, 2015, **34**(4): 940-949.
- [10] MATRONE G, SAVOIA A S, CALIANO G, et al. Ultrasound plane-wave imaging with delay multiply and sum beamforming and coherent compounding[C]//2016 38th Annual International Conference of the IEEE Engineering in Medicine and Biology Society (EMBC). Orlando, FL, USA. IEEE, 2016: 3223-3226.
- [11] SHEN C C, HSIEH P Y. Ultrasound baseband delay-multiply-and-sum (BB-DMAS) nonlinear beamforming[J]. *Ultrasonics*, 2019, **96**: 165-174.
- [12] GUO H, XIE H W, ZHOU G Q, et al. Pixel-based approach to delay multiply and sum beamforming in combination with Wiener filter for improving ultrasound image quality[J]. *Ultrasonics*, 2023, **128**: 106864.
- [13] YU L D, SONG Y F, LI X B. Ultrasonic pseudo-color imaging in strongly attenuating materials with Filtered-Delay Multiply And Sum nonlinear beamforming[J]. *NDT & E International*, 2022, **130**: 102660.
- [14] CAMACHO J, PARRILLA M, FRITSCH C. Phase coherence imaging[J]. *IEEE Transactions on Ultrasonics, Ferroelectrics, and Frequency Control*, 2009, **56**(5): 958-974.
- [15] CHEN H L, XU K L, LIU Z H, et al. Sign coherence factor-based search algorithm for defect localization with laser generated Lamb waves[J]. *Mechanical Systems and Signal Processing*, 2022, **173**: 109010.
- [16] ZHANG M K, FAN G P, ZHU W F, et al. Multi-defect detection based on ultrasonic Lamb wave sign phase coherence factor imaging method[J]. *Insight - Non-Destructive Testing and Condition Monitoring*, 2021, **63**(11): 659-666.
- [17] 龙盛蓉, 陈尧, 孔庆茹, 等. 基于符号相干因子加权的双层介质频域相干复合平面波成像[J]. *仪器仪表学报*, 2022, **43**(3): 32-39.
LONG Shengrong, CHEN Yao, KONG Qingru, et al. Fourier-domain coherent plane wave compounding imaging for two-layered medium based on sign coherence factor[J]. *Chinese Journal of Scientific Instrument*, 2022, **43**(3): 32-39.
- [18] CAMACHO J, FRITSCH C. Phase coherence imaging of grained materials[J]. *IEEE Transactions on Ultrasonics, Ferroelectrics, and Frequency Control*, 2011, **58**(5): 1006-1015.
- [19] ZHANG H Y, XU M Y, ZHANG H, et al. Full focal imaging of ultrasonic Lamb waves using diffuse field information[J]. *Acta Physica Sinica*, 2018, **67**(22): 224301.
- [20] 周正干, 冯占英, 高翌飞, 等. 超声导波在大型薄铝板缺陷检测中的应用[J]. *航空学报*, 2008, **29**(4): 1044-1048.
ZHOU Zhenggan, FENG Zhanying, GAO Yifei, et al. Application of ultrasonic guided waves to defect inspection of large thin aluminum plate[J]. *Acta Aeronautica et Astronautica Sinica*, 2008, **29**(4): 1044-1048.
- [21] 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.
- [22] ZHU W F, XIANG Y X, ZHANG H Y, et al. Super-resolution ultrasonic Lamb wave imaging based on sign coherence factor and total focusing method[J]. *Mechanical Systems and Signal Processing*, 2023, **190**: 110121.