

DOI: 10.19650/j.cnki.cjsi.J2108264

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*

龙盛蓉¹, 陈尧¹, 孔庆茹¹, 黄景兴²

(1. 南昌航空大学无损检测技术教育部重点实验室 南昌 330063; 2. 昌河飞机工业(集团)有限责任公司理化计量中心 景德镇 333002)

摘要:为同时提高双层介质下超声相干复合平面波(CPWC)成像的质量和效率,提出一种频域波束形成与符号相干因子加权(SCF)相结合的算法。提取平面波数据的相位符号,通过修正后的频域波束形成算法对其进行波场外推。利用外推后的相位符号构建SCF加权因子对波束形成后的平面波图像进行自适应加权。结果表明,经过SCF加权,时域和频域波束形成后图像中缺陷的平均半峰值宽度基本相同,分别为时域DAS的78%和75%,频域图像的信噪比高于时域5 dB左右,在提供相同分辨率和信噪比的前提下,相比于时域波束形成下的SCF加权算法,本文所提的复合算法成像效率提升4倍以上,同时兼顾较高的成像质量和较低的运算复杂度,进而形成一种适用于双层介质无损检测的高质量、低复杂度的超声相控阵成像技术。

关键词:相干复合平面波;符号相干因子;双层介质;频域;超声

中图分类号: TG115.28 TH878 **文献标识码:** A **国家标准学科分类代码:** 460.40

Fourier-domain coherent plane wave compounding imaging for two-layered medium based on sign coherence factor

Long Shengrong¹, Chen Yao¹, Kong Qingru¹, Huang Jingxing²

(1. Key Laboratory of Non-destructive Testing Technology, Nanchang Hangkong University, Nanchang 330063, China;
2. Changhe Aircraft Industries Group Co., Ltd., Physical and Chemical Metrology Center, Jingdezhen 333002, China)

Abstract:To improve the quality and efficiency of coherent plane wave compounding (CPWC) imaging for two-layered medium, a frequency-domain beamforming algorithm combined with sign coherence factor (SCF) is proposed. The phase symbol of plane wave data is extracted. And the wave field is extracted by the modified frequency-domain beamforming algorithm. The SCF weighting factor is established by using the field extrapolated phase symbol to weight the plane wave image after beamforming. Results show that, after SCF weighting, the average full-width at half maximum of defects in the time-domain and frequency-domain beamforming images are basically identical, which are 75% and 78% of the time-domain DAS respectively. The signal-to-noise ratio of the frequency-domain images is about 5 dB higher than that of the time-domain DAS. On the premise of the same resolution and signal-to-noise ratio, the imaging efficiency of the SCF weighting algorithm for frequency-domain beamforming are more than 4 times compared to the SCF weighting algorithm for time-domain beamforming. Meanwhile, the high image quality and the low computation complexity are both considered. The proposed ultrasound phased array imaging method is suitable for double medium in nondestructive detection.

Keywords: coherent plane wave compounding; sign coherence factor; two-layered medium; frequency-domain; ultrasound

0 引言

超声相控阵成像检测是广泛应用于无损检测领域的

无损检测技术,其优点为直观、安全、使用方便等^[1-3]。其中,相干复合平面波成像(coherent plane wave compounding, CPWC)是当下热点研究的超声相控阵成像检测技术^[4-6]。相比于被誉为“黄金标准”的全聚焦成

收稿日期:2021-07-18 Received Date: 2021-07-18

* 基金项目:江西省图像处理与模式识别重点实验室开放基金(ET202008414)、国家自然科学基金(62161028,51705232)项目资助

像,兴起于医疗领域的 CPWC 在声波发射次数和射入介质能量上更具优势。

成像信号采集方面,CPWC 采用全孔径多角度发射,即每次全部阵元发射,因此仅需 20~40 次发射即可完成成像阵列信号的采集。相比之下,单孔径发射全聚焦成像所需的信号采集次数则为阵元次。例如,64 阵元全聚焦需要采集 64 次,128 阵元全聚焦需要采集 128 次。因此,CPWC 可通过更少的发射次数实现缺陷的成像,在信号采集时间和处理量上较全聚焦具有优势。射入介质能量方面,相同的激励条件下全孔径多角度发射的能量高于单孔径发射,因而 CPWC 射入被检介质的能量更高。相关研究表明,得益于全孔径多角度发射,材料衰减和结构噪声对 CPWC 成像质量的影响小于全聚焦成像^[7]。

正因如此,相关研究者开展了 CPWC 在无损检测领域应用的研究。Le 等^[8]和 Velichko 等^[9]分别通过对比全聚焦成像结果,得出结论:CPWC 的图像质量与全聚焦成像相当,但发射次数更少、处理数据量更少因而成像效率较高。2019 年,Rachev 等^[10]通过改进 CPWC 的延时叠加(delay and sum,DAS)算法,实现了水浸系统中水-构件双层介质的 CPWC 成像。

尽管上述工作取得了一定进展,但若要使 CPWC 在工业无损检测领域充分发挥优势,也面临着诸多亟待解决和改进的问题。相比于生物医疗领域,无损检测领域中还需要考虑在水-构件或楔块-构件组成的双层介质中实现 CPWC 成像,且要保持较高的成像质量。因此,如何兼顾提升 CPWC 的成像质量与效率,同时适应更为复杂的无损检测环境,是推动该技术和推广的关键所在。

当下,绝大多数 CPWC 成像是基于时域 DAS 算法实现的,但 DAS 是一种非自适应波束形成算法,通过固定的延时模式对信号幅值进行处理,因此所获得的 CPWC 图像质量往往难以满足实际检测要求^[11]。更为遗憾的是,DAS 是一种基于“点对点”模式的迭代算法,实施过程需要海量的计算负载,导致成像效率较低,无形中限制了 CPWC 的成像效率^[7]。因此,尽管 Rachev 等通过改进后的 DAS 算法实现了双层介质的 CPWC 成像,但成像效率较低且缺陷成像质量仍有待于进一步提升。

为提升 CPWC 的成像效率,相关研究者提出了基于“块处理”运算模式的频域波束形成算法,如 Garcia 等^[12]改进的 Stolt 波束形成算法,Lu 等^[13]和 Cheng 等^[14]提出的波束形成算法。相关研究表明,频域波束形成算法可在提供与时域 DAS 相当的成像质量的前提下,显著降低计算负载和提升运算效率^[7,15]。然而,Garcia 等和 Lu 等所提的频域波束形成算法仍然是非自适应算法,仅提供与时域 DAS 相当的成像质量,显然无法满足实际检测中的分辨率、信噪比等质量指标要求,声传播更为复杂的双层介质中该问题更为突出。

为进一步提高双层介质检测环境下频域 CPWC 的成像质量,本文提出一种改进的 Stolt 波束形成算法与符号相干因子加权(sign coherence factor,SCF)相结合的频域 CPWC 成像方法,通过动态的符号因子实现自适应加权,进而形成一种低复杂度、高质量的超声相控阵成像检测技术。以半波高宽度和信噪比为指标,通过不同成像方法下钢制相控阵标准试块和黄铜中边钻孔图像,对本文所提算法的成像质量和运算复杂度进行分析和研究,验证其有效性。

1 原理

1.1 自发自收单层介质的频域波束形成

相控阵超声换能器自发自收模式下,假设阵元位于 $(x_n, 0)$,坐标 (x, z) 为介质内任意散射体的位置,则由阵元 $(x_n, 0)$ 发出达到散射体后,被阵元自身 $(x_n, 0)$ 接收的超声回波传播时间 t_n 表达式为

$$t_n = \frac{2}{c} \sqrt{(x - x_n)^2 + z^2} \quad (1)$$

式中: c 为介质的声速,系数 2 为由 $(x_n, 0)$ 到 (x, z) 的波场往返路径。

根据爆炸物反射模型(exploding reflector model,ERM)原理^[16],探头-反射体之间往返传播的声波,可被假设为由反射体向探头发出的单程波。因此,自发自收模式下可通过声波由反射体将双程声传播路径简化为单程声传播路径进行延时计算。

根据波动方程理论, $p=p(x, z, t)$ 可被假设为散射体 (x, z) 在传播时刻 t 的波场强度, c 为介质的实际声速,则其二维标量波动方程写作:

$$\left[\frac{\partial^2}{\partial x^2} + \frac{\partial^2}{\partial z^2} - \frac{1}{c^2} \frac{\partial^2}{\partial t^2} \right] p = 0 \quad (2)$$

由 Stolt 所提出的 f - k 波场迁移原理可知^[16],二维傅里叶频谱 $P(k_x, \omega)$ 表示散射体 (x, z) 在介质表面,即 $z=0$ 处的波场强度 $p(x, z, t)$ 。根据 ERM 原理,波场外推可被假设为波场逐渐由位于阵元向任意散射体 (x, z) 靠近的过程,最终归于 $t=0$ 时刻。因此, $p(x, z, t=0)$ 可表示为:

$$p(x, z, t=0) = \iint P(k_x, \omega) e^{i(k_x x + k_z z)} dk_x d\omega \quad (3)$$

式中: k_x 和 k_z 分别表示坐标 x 和 z 上的波数, ω 为角频率。 k_x 、 k_z 和 ω 之间的关系表示为:

$$\omega(k_x, k_z) = \hat{c}_s \operatorname{sign}(k_z) \sqrt{k_x^2 + k_z^2} \quad (4)$$

式中: \hat{c}_s 表示适用于 ERM 的等效声速,与实际声速之间的关系为 $\hat{c}_s = c/2$ 。考虑到 ERM 模型适用于波动方程的上行波解,式(4)中的 $\operatorname{sign}()$ 取正值。基于此,以 k_x 和 ω 为变量的频谱 $P(k_x, \omega)$ 可被转化以 k_x 和 k_z 为变量的频

谱,其表达式为:

$$S(k_x, k_z) = \frac{\hat{c}_s k_z}{\sqrt{k_x^2 + k_z^2}} P(k_x, \omega(k_x, k_z)) \quad (5)$$

将式(5)代入式(3),则 $t=0$ 时波场强度 $p(x, z)$ 被写作:

$$p(x, z) = \iint S(k_x, k_z) e^{i(k_x x + k_z z)} dk_x dk_z \quad (6)$$

1.2 平面波双层介质的频域波束形成

平面波的传播是通过控制各声源延时使声束以某一角度偏转,传播至反射体被各声源接收的过程。因此,相比于自发自收声传播过程,平面波的传播过程上行波和下行波路径是不同的。假设平面波的发射角度为 θ , 超声波在介质中的传播声速为 c , 探头阵元中心间距为 x , 则每个阵元的延时时间为 $dt = x \cdot \sin \theta / c$ 。根据 Montaldo 等^[17] 的报道, 倾角为 θ 的平面波传至散射体 (x, z) 的时间为 $\tau_T = (z \cos \theta + x \sin \theta) / c$, 由散射体 (x, z) 回传至阵元 $(x_n, 0)$ 所经历的时间为 $\tau_R = \sqrt{z^2 + (x - x_n)^2} / c$, 即阵元 $(x_n, 0)$ 接收信号中的总时长为 $\tau_n = \tau_T + \tau_R$ 。对应地, 超声图像中散射体 (x, z) 处的强度可表示为:

$$I_\theta(x, z) = \sum_{n=1}^N S_n(\tau_n) \quad (7)$$

式(6)为适用于自发自收信号数据集的频域成像方法, 即上行波和下行波为相同路径条件下采集到的信号数据集, 其中任意信号在 (x, z) 的声传播时间写作 $\tau_n = 2\sqrt{z^2 + (x - x_n)^2} / c$, 因而计算波场强度时可将双程波简化为单程波。对比式(1)可知, 平面波数据集中任意信号在 (x, z) 的声传播路径上, 下行波不相同, 无法直接满足式(6)的计算条件。

对此, Garcia 等^[12] 通过定义了与发射倾角 θ 相关的 α, β 和 γ 3 个参量, 其表达式写作:

$$\begin{cases} \alpha = 1 / \sqrt{1 + \cos(\theta) + \sin^2(\theta)} \\ \beta = \frac{(1 + \cos(\theta))^{\frac{3}{2}}}{1 + \cos(\theta) + \sin^2(\theta)} \\ \gamma = \frac{\sin(\theta)}{2 - \cos(\theta)} \end{cases} \quad (8)$$

通过 α, β 和 γ 可定义等效声速 $\hat{c} = \alpha c$ 、等效坐标点 $\hat{x} = x + \gamma z$ 和 $\hat{z} = \beta z$, 将复杂的平面波双程传播路径简化为单程传播路径, 获得适用于式(7)的平面波信号数据集频谱, 其表达式写作:

$$G_\theta(k_x, k_z) = \frac{\alpha c k_z / \beta}{\sqrt{(k_x + k_z \gamma)^2 + (k_z / \beta)^2}} P(k_x, \omega(k_z, k_z / \beta)) \quad (9)$$

将式(9)代入式(6), 可得到适用于平面波成像的外推公式如式(10)所示。

$$p_\theta(x, z) = \iint G_\theta(k_x, k_z) e^{i(k_x x + k_z z)} dk_x dk_z \quad (10)$$

式(10)所示的方法为一种频率-K 空间 (frequency-k space, FK) 算法, 即在频率-K 空间实施波束形成过程。

如图 1 所示, 当楔块或水作为耦合介质填充相控阵探头和被检工件之间时, 形成了由耦合介质和工件组成的双层介质。耦合介质-工件界面的存在, 会引起非零角度平面波的折射。在图 1 所示的声传播模型中, 角度为 θ_1 的平面波由探头发出传播至耦合介质-工件界面, 即耦合层厚度 h 处, 发射折射, 以角度 θ_2 在工件中传播。

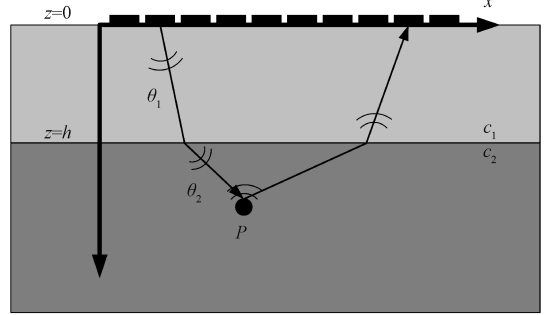


图 1 双层介质平面波成像的声传播模型

Fig. 1 Comparison of images of carbon steel block

假设耦合介质的纵波声速为 c_1 , 工件的纵波声速为 c_2 , 且 $c_1 < c_2$ 。若耦合介质中平面波的发射角度为 θ_1 , 则其在工件中的传播角度为 $\theta_2 = \arcsin((c_2/c_1) \sin \theta_1)$ 。因此, 需要对式(10)进行修正, 以补偿耦合介质厚度和声传播角度改变引起波场变化。式(10)中的 $G_\theta(k_x, k_z)$ 为深度为 0 时刻的波场记录, 需要修正为波传播至耦合层厚度 h 时刻的波场记录 $G_\theta(k_x, h, k_z)$, 表达式写作:

$$G_\theta(k_x, h, k_z) = G_\theta(k_x, k_z) e^{i h (\beta_1 k_z^1 + \gamma_1 k_x)} \quad (11)$$

式中: h 表示耦合层厚度; k_z^1 表示声速为 c_1 情况下坐标 z 上的波数, β_1 和 γ_1 为式(8)中的发射倾角参量, 下标“1”表示为声速 c_1 下对应的数值。这样, 将修正后波场记录 $G_\theta(k_x, h, k_z)$ 代入式(10), 即可实现双层介质平面波成像。

1.3 适用于频域波束形成的符号相干加权

符号相干因子 SCF 是 Camacho 等^[18] 提出的一种相位相干因子。根据 SCF 的原理, 符号 $b_n(\tau_n)$ 为 CPWC 成像射频信号数据集中信号实部的符号, 与信号实部 $\cos \phi_n(\tau_n)$ 之间的关系式如下:

$$b_n(\tau_n) = \begin{cases} -1, & \cos \phi_n(\tau_n) < 0 \\ +1, & \cos \phi_n(\tau_n) \geq 0 \end{cases} \quad (12)$$

式中: $\cos \phi_n(\tau_n)$ 代表阵元 n 和传播时间 τ_n 下的瞬时相

位实部值。假设共计 N 个阵元参与成像,则所有阵元信号延时后,符号 b_n 的方差写作:

$$\sigma^2 = \frac{N \sum_{n=1}^N b_n^2 - \left(\sum_{n=1}^N b_n \right)^2}{N^2} = 1 - \left(\frac{1}{N} \sum_{n=1}^N b_n \right)^2 \quad (13)$$

式中: σ^2 为符号 b_n 的方差。根据方差定义, Camacho 等将符号相干因子 SCF 定义为:

$$SCF = 1 - \sigma = 1 - \sqrt{1 - \left(\frac{1}{N} \sum_{n=1}^N b_n \right)^2} \quad (14)$$

由式(13)和(14)可知,符号相干因子 SCF 是一种基于统计学方差加权方法,严格遵循 Van Cittert-Zernike 聚焦准则^[19]。因此,式(14)中的 SCF 权重值的范围为 $0 \leq SCF \leq 1$ 。权重值接近于 1 时,信号相位一致程度高,处理后像素点处聚焦程度高。相反,权重值接近于 0 时,信号相位分散,处理后像素点处几乎不聚焦。对 $I(x, z)$ 进行 SCF 加权后, CPWC 图像会得到增强。

$$I_{SCF}(x, z) = I(x, z) \cdot SCF \quad (15)$$

通过观察式(14)可知,若要获得各像素点对的 SCF,需要将每个阵元通道的信号相位符号作为统计样本,算得各像素点的相位符号方差这一用于构建 SCF 的中间变量。对于“点对点”运算的时域 DAS 波束形成而言,算得 SCF 是非常容易的。但由于频域波束形成是一种“块处理”运算,仅能获得所有通道上信号幅值的叠加值,因而按照时域波束形成的算法流程是无法实施 SCF 因子构建的。针对上述问题,本文通过“等效替代”思路的构建相干加权因子 SCF。从原理上看,式(10)所示的波场外推表达式是建立在爆炸反射模型基础上的,外推至爆炸点深度 z 时,所有波场记录的信号信息都回归于此爆炸点^[7],即波场外推后爆炸点/像素点 $p(x, z)$ 处的相位是完全一致的。对应地,点 $p(x, z)$ 处的相位符号也会在完全一致。根据上述原理,本文在频域波束形成前从信号中提取符号特征,然后利用 FK 波束形成构建与式(14)等效的相干因子 SCF,最后通过式(15)实现加权处理。

2 实验

实验所用超声复合平面波成像阵列数据由图 2 所示的美国 Verasonics 公司 Vantage 32LE 系统匹配 128 阵元线性相控阵探头采集,探头参数如表 1 所示。分别以弱散射介质碳钢和强散射介质黄铜作为研究对象,对所提算法的有效性进行验证。考虑到碳钢晶粒细小,声透性较好,因此用于评价缺陷横向分辨率的改善程度。相比之下,黄铜晶粒粗大,检测时会引起强烈的结构噪声,声透性较差、超声图像信噪比低,因此用于考察各类算法处理后的信噪比增强效果。

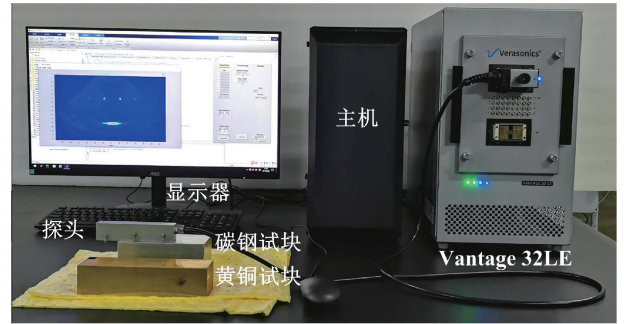


图 2 平面波阵列信号采集平台

Fig. 2 Platform for collecting array signals of plane wave

表 1 线性相控阵探头参数

Table 1 Parameters of linear phased array probe

参数	数值
阵元宽度/mm	0.9
阵元长度/mm	10
相邻阵元间距/mm	1
探头中心频率/MHz	5

如图 3 和 4 所示,探头通过纵波声速为 2 337 m/s 的树脂楔块作为耦合介质置于试块的正上方,楔块厚度为 20 mm。图 3 为碳钢材质的相控阵 A 型标准试块,选取试块中不同间隔的 7 个 $\Phi 1$ 边钻孔的区域进行分辨率验证,虚线框内为成像区域。由图 4 可知,黄铜试块厚度为 48 mm,在深度 24 mm 处加工有一个 $\Phi 2$ 边钻孔,成像区域为虚线框。经测定可知,碳钢和黄铜试块的纵波声速分别为 5 870 m/s 和 4 350 m/s。

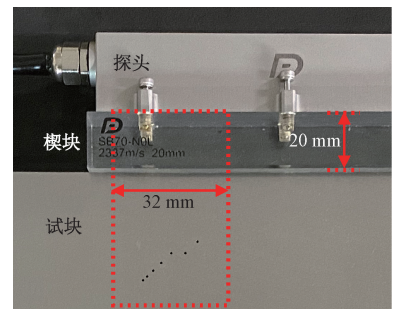


图 3 碳钢相控阵试块及成像区域

Fig. 3 Carbon steel phased array block and imaging zoom

超声探头连接到信号采集系统面板上的超声波发射和接收 32 通道接口,通过系统软件控制延时使超声波以 0.5° 间隔, $-5^\circ \sim 5^\circ$ 范围在楔块中传播,共采集 21 个偏转角度的平面波数据集。采样频率为 20 MHz。根据式(1)~(15),通过 MATLAB 脚本进行波束形成图像重建,获得时域 DAS、时域 DAS-SCF、频域 FK 和频域

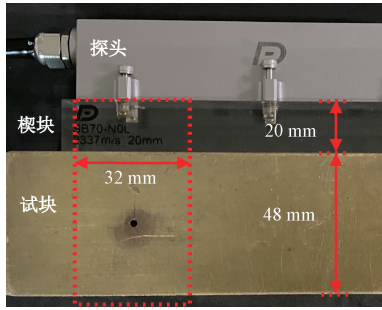


图4 黄铜试块及成像区域

Fig. 4 Brass block and imaging zoom

FK-SCF 4种波束形成算得的楔块-碳钢和楔块-黄铜平面波图像,所有实验图像的显示动态范围均为0~-50 dB。

所用PC主机的CPU为AMD Ryzen 9 4900HS,主频3.0 GHz,用于对比和分析不同波束形成算法的运算效率。为对比提出算法的有效性,利用半峰值宽度(full-width at half maximum, FWHM),即-6 dB波数宽度考察算法的分辨能力^[20-21]。同时,采用信噪比(signal to noise ratio, SNR)评估算法的幅值提升能力,SNR的定义如下:

$$\text{SNR} = 20 \lg_{10} \left(\frac{A_1}{A_2} \right) \quad (16)$$

式中: A_1 与 A_2 分别为缺陷回波幅值和噪声幅值。

3 结果

3.1 分辨率对比

图5为4种算法的碳钢相控阵试块成像结果,为进一步分析4种算法的缺陷分辨能力,沿图5(a)中的45°白色斜线,绘制出图像左侧5个斜孔的幅值曲线,如图6所示。同时,统计出5个斜孔的半峰值宽度,如表2所示。对比图5、6和表2可知,未进行SCF加权处理前,时域DAS和频域FK算法的缺陷回波幅值均在-24~-28 dB范围内,幅值水平基本相同。不过,与DAS图像相比,FK图像中1#和2#缺陷之间回波幅值和1#缺陷间最小幅值的差值为8.94 dB,而DAS图像中该差值仅为6.43 dB。不仅如此,FK图像中1#~5#缺陷回波的平均半峰值宽度为1.03 mm,为DAS图像中对应缺陷的平均半峰值宽度的96%。因此,FK算法具有略高于DAS算法的分辨率。

SCF加权处理后,频域FK-SCF图像中5个缺陷的回波幅值在-12~-17 dB范围内,时域DAS-SCF图像中5个缺陷的回波幅值在-16~-17 dB范围内。DAS-SCF图像和FK-SCF图像中1#和2#缺陷之间回波幅值和1#缺陷间最小幅值的差值分别为16.64 dB和14.98 dB,较时域DAS图像分别提高了10.21 dB和8.55 dB。虽然加权

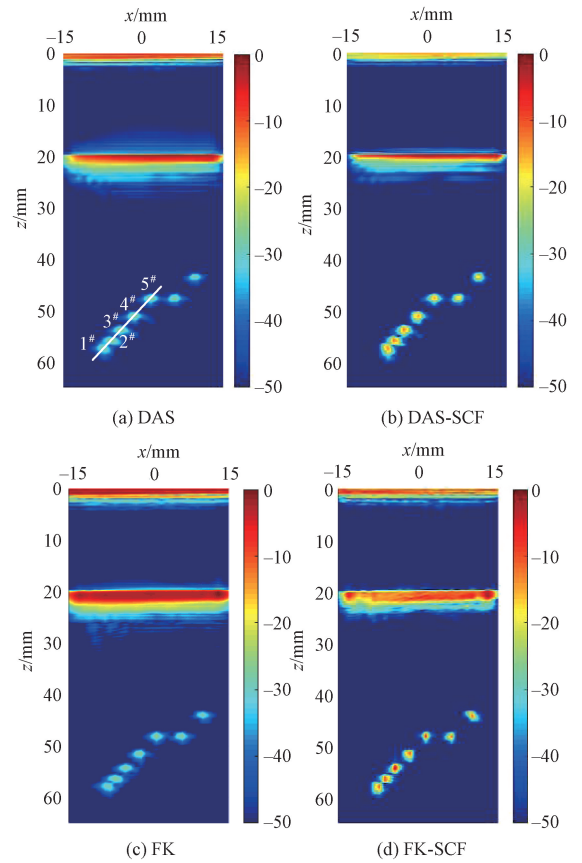


图5 碳钢试块的超声成像对比

Fig. 5 Comparison of images of carbon steel block

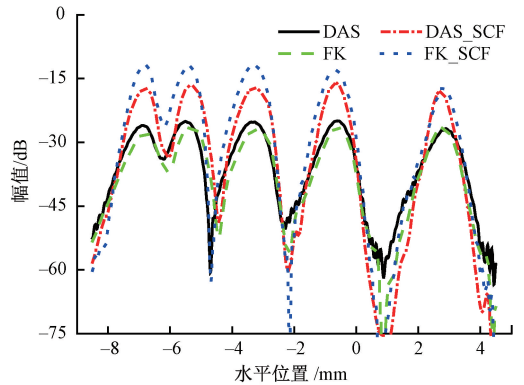


图6 碳钢图像斜线上的幅值变化曲线

Fig. 6 Amplitude change curve of oblique line for the image of carbon steel block

处理后,FK-SCF图像的差值提升稍逊于DAS-SCF图像,但差值已经明显高于6 dB,满足用于区分两个相邻缺陷的瑞利-金斯判据,能够十分容易地区分两个缺陷。DAS-SCF图像和FK-SCF图像中1#~5#缺陷回波的平均半峰值宽度分别为0.83 mm和0.80 mm,分别为时域DAS图像中1#~5#缺陷回波的平均半峰值宽度的78%和75%。

表2 不同算法的半峰值宽度

Table 2 Full-width at half maximum of different methods

序号	mm			
	DAS	FK	DAS-SCF	FK-SCF
1 [#]	1.07	1.09	0.85	0.71
2 [#]	0.98	0.96	0.81	0.80
3 [#]	1.12	1.14	1.04	0.92
4 [#]	1.04	0.99	0.78	0.86
5 [#]	1.13	0.96	0.66	0.71

上述结果表明,无论是时域 DAS 还是频域 FK 算法,实施 SCF 加权处理后,缺陷分辨率均会得到明显的提升。与声束成 45° 夹角下孔中心距为 2 mm 的 1[#] 和 2[#] 边钻孔,在 DAS 图像中较难分辨,SCF 处理后能够清晰地有效分辨该情况下的两个缺陷。

3.2 信噪比对比

图 7 为 4 种算法的黄铜试块成像结果。观察可知,当被检对象为黄铜这种晶粒粗大的材料时,超声波在粗大晶粒的传播过程中,会受到极强的散射作用,造成图像中出现严重的结构噪声,同时还会严重削弱缺陷的回波

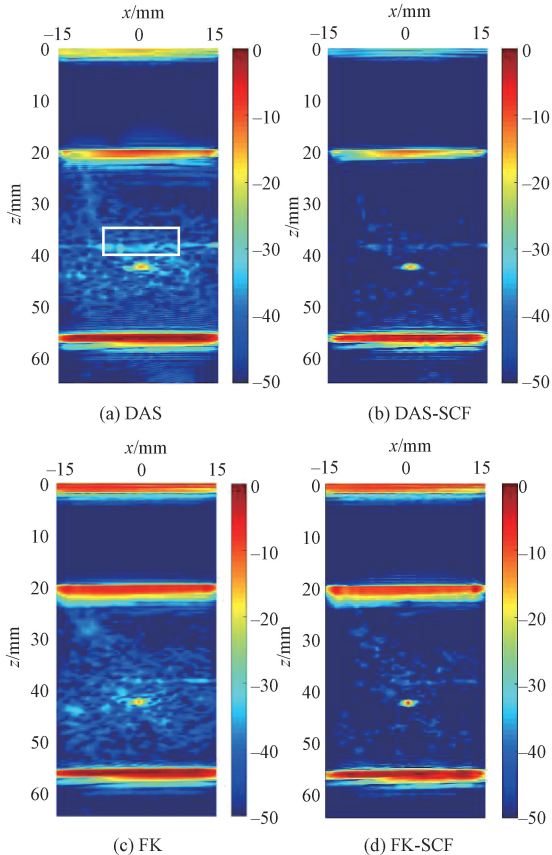


图7 黄铜试块的超声成像对比

Fig. 7 Comparison of images of brass block

幅值。因此,黄铜 CPWC 图像中出现了较强的结构噪声,并出现了缺陷回波聚焦效果差的现象,对缺陷判定带来严重影响。为进一步对比不同算法的信噪比增强能力,选取图 7(a) 中缺陷回波周围最大噪声处,即白色方框区域内的平均噪声作为参考基准,按照式(16)计算缺陷回波信噪比,算得 DAS、DAS-SCF、FK 和 FK-SCF 4 种算法的信噪比分别为 9.91、16.89、11.24 和 20.23 dB。结果表明,相比于时域 DAS 算法,频域 FK 算法能够获得略高的信噪比。因此,SCF 加权后,频域 FK-SCF 算法的信噪比增强能力略高于时域 DAS-SCF 算法。

3.3 时间复杂度对比

按照 Garcia 等^[12] 的时间复杂度评价方法,算得如表 3 所示的时间复杂度,讨论不同算法之间的成像效率。表 3 中 M 和 N 分别表示发射角度数量和阵元数量, N_t 代表信号的采样点数, N_x 和 N_z 分别代表成像区域 x 和 z 方向上的像素点数量。对于 DAS 算法而言,图像重建中的线性插值操作需要两次加法和两次乘法,因此其时间复杂度为 $4MNN_xN_z$ 。FK 算法图像重建操作需要一次二维傅里叶变换以及沿 x 和 z 方向上的两次逆傅里叶变换,因此操作时正逆傅里叶变换的时间复杂度表示为 $MNN_t \log_2(NN_t) + MN_xN_z \log_2(N_z) + N_xN_z \log_2(N_x)$ 。同时,FK 算法还包括一次双线性插值,时间复杂度为 $12MN_xN_z$ ^[22]。

表3 不同算法的时间复杂度

Table 3 Time complexity of different methods

步骤	DAS	FK	DAS-SCF	FK-SCF
Sign	-	-	MNN_xN_z	MNN_t
FFT2	-	$MNN_t \log_2(NN_t)$	-	$2MNN_t \log_2(NN_t)$
interp	$4MNN_xN_z$	$12MN_xN_z$	$4MNN_xN_z$	$24MNN_xN_z$
IFFT _z	-	$MN_xN_z \log_2(N_z)$	-	$2MN_xN_z \log_2(N_z)$
IFFT _x	-	$N_xN_z \log_2(N_x)$	-	$2N_xN_z \log_2(N_x)$

由表 3 可知,DAS 算法和 FK 算法之间的复杂度比值表示为:

$$\frac{C_{DAS}}{C_{FK}} = \frac{4N}{\frac{MNN_t \log_2(NN_t) / 4N_xN_z + 12 + \log_2(N_z)}{4N}} \approx \frac{4N}{12 + \log_2(N_z) + n} \quad (17)$$

通常,相控阵成像检测时所用的阵元数量 N 为 32、64 或 128,信号采样数范围为 $1000 < N_t < 3000$ 。此外, x 方向和 z 方向像素点数量 N_x 和 N_z 通常分别等于阵元数 N 和采样点 N_t 。因此,式(17)的比值范围在 6~7 之间。换而言之,本文的成像状况下,FK 算法的复杂度为 DAS 算法的 1/7~1/6。

相比之下,DAS-SCF 算法进行操作时,提取符号所需复杂度为 $MN_x N_z$,总复杂度为 $4MN_x N_z + MN_x N_z$ 。因此,DAS-SCF 算法的复杂度是 DAS 算法的 5/4 倍。相比于 FK 算法,FK-SCF 算法还包括了提取符号所需复杂度 MN_x ,其余操作的复杂度是 FK 算法的 2 倍。考虑到 MN_x 远小于后边的复杂度,因而 FK-SCF 算法的复杂度为 FK 算法的 2 倍。这样,FK-SCF 算法的复杂度为 DAS-SCF 算法的 $8/35 \sim 8/30$,即理论上运算效率提高 4 倍左右。

为了更直观地比较 4 种算法的运算效率,在章节 3 中的软硬件测试环境下统计了不同角度发射次数和阵元下 5 次图像重建的平均运行时间,结果如表 4 所示。测试中,信号的采样点数 $N_z = 2499$, N_x 与参与成像的阵元数相等。表 4 中的数据表明,常用发射次数和阵元数量下,FK-SCF 算法的运算效率较 DAS-SCF 算法提高了 4 倍以上。

表 4 不同算法的 5 次平均运算时间

Table 4 Average time for different algorithms using five executions

发射次数	阵元数	DAS	FK	DAS-SCF	FK-SCF
	32	1.77	0.28	2.14	0.51
11	64	2.64	0.42	3.78	0.85
	128	4.99	0.78	7.01	1.56
	32	2.53	0.38	3.52	0.77
21	64	4.87	0.75	6.89	1.49
	128	9.58	1.47	13.43	2.88
	32	4.65	0.72	6.68	1.43
41	64	9.43	1.41	13.21	2.76
	128	18.53	2.86	25.95	5.17

4 结 论

双层介质进行成像检测时,耦合介质的存在,会导致声传播更加复杂,造成缺陷成像质量难以满足检测要求。此外,相比于单层介质成像,耦合介质的存在会增加采样点数量和数据处理量,导致双层介质 CPWC 成像的计算负载量进一步增大。针对上述问题,本文提出了兼顾较高成像质量和较低运算复杂度的频域 FK-SCF 算法。一方面通过符号因子相干加权有效提升成像质量,另一方面通过“块处理”运算提升成像效率,非常适用于双层介质的 CPWC 成像。实验结果表明,相比于时域波束形成下的 SCF 加权算法,在提供相同分辨率和信噪比的前提下,本文所提的复合算法成像效率提升 4 倍以上,同时兼

顾较高的成像质量和较低的运算复杂度,进而形成一种适用于双层介质无损检测的高质量、低复杂度的超声相控阵成像技术。

参考文献

- [1] 冒秋琴,陈尧,石文泽,等. 频域相位相干合成孔径聚焦超声成像研究 [J]. 仪器仪表学报, 2020, 41(2): 135-145.
MAO Q Q, CHEN Y, SHI W Z, et al. Research on synthetic aperture focusing ultrasonic imaging based on phase coherence in frequency domain [J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2020, 41(2): 135-145.
- [2] 郑驰超,彭虎,韩志会. 基于空间广义相干系数加权的医学合成孔径超声成像 [J]. 声学学报, 2012, 37(6): 637-641.
ZHENG CH CH, PENG H, HAN ZH H. Medical ultrasound synthetic aperture imaging based on space synthetic general coherence factor weighting [J]. Acta Acustica, 2012, 37(6): 637-641.
- [3] 陈尧,冒秋琴,石文泽,等. 基于相位相干性的厚壁焊缝 TOFD 成像检测研究 [J]. 机械工程学报, 2019, 55(4): 25-32.
CHEN Y, MAO Q Q, SHI W Z, et al. Research on ultrasonic TOFD imaging inspection for heavy-walled weld based on phase coherence characteristics [J]. Journal of Mechanical Engineering, 2019, 55(4): 25-32.
- [4] 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.
- [5] CHEN Y, LUO Z, ZHOU Q, et al. Modeling of ultrasonic propagation in heavy-walled centrifugally cast austenitic stainless steel based on EBSD analysis [J]. Ultrasonics, 2015, 59:31-39.
- [6] 陈尧,冒秋琴,陈果,等. 基于 Omega-K 算法的快速全聚焦超声成像研究 [J]. 仪器仪表学报, 2018, 39(9): 128-134.
CHEN Y, MAO Q Q, CHEN G, et al. Research on high-speed total focusing ultrasonic imaging method based on Omega-K algorithm [J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2018, 39(9): 128-134.
- [7] 陈尧,冒秋琴,石文泽,等. 一种傅里叶域超声平面波复合成像处理构架 [J]. 仪器仪表学报, 2020, 41(7): 155-163.
CHEN Y, MAO Q Q, SHI W Z, et al. A novel

- processing framework for the ultrasound compounding plane wave imaging in Fourier-domain [J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2020, 41(7): 155-163.
- [8] LE J L, ROBERT S, PRADA C. Plane wave imaging for ultrasonic inspection of irregular structures with high frame rates [C]. AIP Conference Proceedings, AIP Publishing LLC, 2016, 1706(1): 020010.
- [9] VELICHKO A, CROXFORD A J. Strategies for data acquisition using ultrasonic phased arrays [J]. Mathematical Physical & Engineering Sciences, 2018, 474(2218): 20180451.
- [10] RACHEV R K, WILCOX P D, VELICHKO A, et al. Plane wave imaging techniques for immersion testing of components with nonplanar surfaces [J]. IEEE Transactions on Ultrasonics, Ferroelectrics, and Frequency Control, 2020, 67(7): 1303-1316.
- [11] KRUIZINGA P, MASTIK F, DE J N, et al. Plane-wave ultrasound beamforming using a nonuniform fast fourier transform [J]. IEEE Transactions on Ultrasonics, Ferroelectrics, and Frequency Control, 2012, 59(12): 2684-2691.
- [12] GARCIA D, TARNEC L L, MUTH S, et al. Stolt's fk migration for plane wave ultrasound imaging [J]. IEEE Transactions on Ultrasonics, Ferroelectrics, and Frequency Control, 2013, 60(9): 1853-1867.
- [13] LU J Y. Experimental study of high frame rate imaging with limited-diffraction beams [J]. IEEE Transactions on Ultrasonics, Ferroelectrics, and Frequency Control, 1998, 45(1): 84-97.
- [14] CHENG J, LU J Y. Extended high-frame rate imaging method with limited-diffraction beams [J]. IEEE Transactions on Ultrasonics, Ferroelectrics, and Frequency Control, 2006, 53(5): 880-899.
- [15] MERABET L, ROBERT S, PRADA C. 2-D and 3-D reconstruction algorithms in the fourier domain for plane-wave imaging in nondestructive testing [J]. IEEE Transactions on Ultrasonics, Ferroelectrics, and Frequency Control, 2019, 66(4): 772-788.
- [16] STOLT R H. Migration by fourier transform [J]. Geophysics, 1978, 43(1): 23-48.
- [17] MONTALDO G, TANTER M, BERCOFF J, et al. Coherent plane-wave compounding for very high frame rate ultrasonography and transient elastography [J]. IEEE Transactions on Ultrasonics, Ferroelectrics, and Frequency Control, 2009, 56(3): 489-506.
- [18] CAMACHO J, PARRILLA M, FRITSCH C. Phase coherence imaging [J]. IEEE Transactions on Ultrasonics, Ferroelectrics, and Frequency Control, 2009, 56(5): 958-974.
- [19] YANG C, JIAO Y, JIANG T, et al. A united sign coherence factor beamformer for coherent plane-wave compounding with improved contrast [J]. Applied Sciences, 2020, 10(7): 2250.
- [20] GUO W, WANG Y Y, YU J H. Ultrasound harmonic enhanced imaging using eigenspace-based coherence factor [J]. Ultrasonics, 2016, 72: 106-116.
- [21] ZHAO J X, WANG Y Y, YU J H, et al. Short-lag spatial coherence ultrasound imaging with adaptive synthetic transmit aperture focusing [J]. Ultrason Imaging, 2017, 39(4): 224-239.
- [22] YU L J. 2D and 3D high frame rate imaging with limited diffraction beams [J]. IEEE Transactions on Ultrasonics, Ferroelectrics, and Frequency Control, 1997, 44(4): 839-856.

作者简介



龙盛蓉, 2001年于湖北工业大学获得学士学位, 2005年于湖北工业大学获得硕士学位, 2014年于南昌大学获得博士学位, 现为南昌航空大学讲师, 主要研究方向为超声无损检测。

E-mail: lornalong@126.com

Long Shengrong received her B.Sc. degree and M.Sc. degree both from Hubei University of Technology in 2001 and 2005, and received her Ph.D. degree from Nanchang University in 2014. She is currently a lecture at Nanchang Hangkong University. Her main research interest is the ultrasonic nondestructive testing.



陈尧 (通信作者), 分别于 2008 年和 2011 年于辽宁工业大学获得硕士学位, 2016 年于大连理工大学获博士学位, 现为南昌航空大学讲师, 主要研究方向为弹性各向异性及非均质材料的超声成像检测及信号处理。

E-mail: chenyaoy1984@foxmail.com

Chen Yao (Corresponding author) received his B.Sc. degree and M.Sc. degree respectively in 2008 and 2011 from Liaoning University of Technology, received his Ph.D. degree from Dalian University of Technology in 2016. He is a lecturer at Nanchang Hangkong University. His main research interests include ultrasonic imaging test and signal processing for the anisotropic and heterogeneous materials.