

DOI: 10.19650/j.cnki.cjsi.J1905868

频域相位相干合成孔径聚焦超声成像研究^{*}

冒秋琴¹, 陈 尧^{1,2}, 石文泽¹, 卢 超^{1,3}, 李秋锋¹

(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. 中国科学院声学研究所 声场声信息
国家重点实验室 北京 100190; 3. 赣南师范大学 赣州 341000)

摘 要:为提高合成孔径聚焦技术(SAFT)的成像质量和成像效率,提出一种基于相位环形统计矢量(PCSV)的频域 SAFT 超声成像算法。首先,通过希尔伯特变换和欧拉公式提取波场记录中信号的瞬时相位。然后,将瞬时相位的实部和虚部视作圆形复平面上分布的 PCSV,并通过波场外推构建用于频域 SAFT 加权的相位相干因子。最后,通过加权处理获得高质量频域 SAFT-PCSV 图像。成像结果表明,频域 SAFT-PCSV 成像算法有效增强了图像分辨率和信噪比。在相同测试条件下,频域 SAFT-PCSV 成像算法的运算时间小于传统时域 SAFT 算法的 1/46,所占内存空间低于时域 SAFT 算法的 1/47。

关键词: 相位环形统计矢量;超声;合成孔径聚焦技术;频域

中图分类号: TG115.28 TN957.52 **文献标识码:** A **国家标准学科分类代码:** 460.40

Research on synthetic aperture focusing ultrasonic imaging based on phase coherence in frequency domain

Mao Qiuqin¹, Chen Yao^{1,2}, Shi Wenzhe¹, Lu Chao^{1,3}, Li Qiufeng¹

(1. Key Laboratory of Non-destructive Testing Technology, Nanchang Hangkong University, Nanchang 330063, China;

2. State Key Laboratory of Acoustics, Institute of Acoustics, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100190, China;

3. Gannan Normal University, Ganzhou 341000, China)

Abstract: In order to improve the imaging quality and efficiency of synthetic aperture focusing technique (SAFT), a frequency domain SAFT ultrasonic imaging algorithm based on phase circular statistics vector (PCSV) is proposed. Firstly, the Hilbert transform and Euler's formula are used to extract the instantaneous phase of the signals in wave field record. Secondly, the real part and imaginary part of the instantaneous phase are regarded as the PCSVs distributed in circular complex plane, and through wave field extrapolation, the phase coherence factor used for frequency domain SAFT weighting is constructed. Finally, the high quality frequency domain SAFT-PCSV image is obtained through weighting processing. The imaging results show that the frequency-domain SAFT-PCSV imaging algorithm effectively enhances the image resolution and signal-to-noise ratio. Under the same test conditions, the operational time and occupied memory space of the frequency-domain SAFT-PCSV imaging algorithm are less than 1/46, and 1/47 of those of traditional time-domain SAFT algorithm, respectively.

Keywords: phase circular statistics vector; ultrasonic; synthetic aperture focusing technique (SAFT); frequency domain

0 引 言

合成孔径聚焦技术(synthetic aperture focusing

technique, SAFT)是一种广泛应用于无损检测、医疗等领域的超声成像技术^[1-3]。但是,受限于有效孔径宽度^[4],传统 SAFT 图像分辨率差强人意,尤其是各向异性粗晶介质为被检对象时,难以获取足够信噪比的检测图像,容

收稿日期:2019-12-03 Received Date:2019-12-03

^{*} 基金项目:国家自然科学基金青年项目(51705232, 51705231)、国家自然科学基金地区项目(11764030)、声场声信息国家重点实验室开放课题基金(SKLA201806)、江西省自然科学基金(20192BAB216026)、江西省教育厅基金(GJJ170577, GJJ170621)、研究生创新基金(YC2019046)项目资助

易造成缺陷或病灶的错判和误判。此外,传统 SAFT 是基于时域延时叠加(delay and sum, DAS)算法进行图像重建的,处理较大数据集时涉及大量繁重的迭代运算,成像效率明显难以满足低硬件环境下在线实时成像的要求。综上所述,如何同时提高 SAFT 的成像质量和运算效率,是当下无损检测领域中亟待解决的一个重要技术问题。

为改善 SAFT 的成像质量,国内外学者们提出了多种用于提高成像质量的自适应加权算法^[5-7]。其中,相位相干成像(phase coherence imaging, PCI)是一种同时改善 SAFT 成像分辨率和信噪比的自适应加权算法,通过提取检测信号的相位构建用于表达相位分布一致性的相干因子,如符号相干因子(sign coherence factor, SCF)^[8]、环形相干因子(circular coherence factor, CCF)等^[9-10],利用相位相干加权提高分辨率和信噪比^[11-13]。研究表明,PCI 可通过相位相干加权增强孔径波束指向性,提高了 SAFT 图像的横向分辨力,更有利于病灶的检测和判别^[14-17]。此外,PCI 技术还能够通过放大相位对图像幅值的贡献,有效抑制奥氏体不锈钢检测信号中的旁瓣和噪声,提高了各向异性粗晶材料的缺陷检测能力^[13, 18-19]。虽然 SAFT 与 PCI 相结合的复合成像技术可有效改善成像质量,但这种复合成像技术的实现仍是以 DAS 运算为基础,PCI 加权处理会导致运算量的增加,使得成像效率进一步降低。

近十年来,相关学者将地球物理领域中相位迁移技术(phase shift migration, PSM)、Omega-K 等频域算法引入超声成像领域,力图通过高效的频域算法代替时域 DAS 算法,显著提升 SAFT 成像的运算效率^[20-21]。相比于时域 DAS 算法,以 PSM 为代表的频域算法利用波场外推矩阵运算代替针对单个像素点的迭代计算,大幅度提高了 SAFT 成像速度。此外,研究表明,PSM 在提高成像效率的同时,还能使 SAFT 图像具有较高的横向分辨力,也会对旁瓣有一定抑制作用^[9, 22]。若考虑将类似于 PCI 的相位相干自适应加权算法引入以 PSM 为基础的频域 SAFT,有望使 SAFT 的成像质量和运算效率共同提高。

文献[23]提出的环形统计(circular statistics, CS)是统计学的一个重要分支,其核心思想是将复数样本数据视作圆形复平面分布的样本点,更加便捷、直观地处理抽象复数的统计问题。实际应用中,CS 方法可将信号的瞬时相位、图像的色调等复数参量抽象为环形统计矢量,以处理信号和图像问题^[24-25],为以相位一致性为基础的自适应加权算法提供一种新的解决思路。根据文献[26],PSM 是将接收信号聚焦视作反射体向接收方向辐射声场逆过程的算法。理想状况下波场外推后,不同波场记录中来自同一反射体的回波信号相位是相同的。据此,本文在波场外推前,提取波场记录中信号的相位信

息并将其视作相位环形统计矢量(phase circular statistics vector, PCSV),即圆形复平面上分布的样本点。然后,利用波场外推构建用于频域 SAFT 自适应加权的相位相干因子,通过加权处理快速获得高质量频域 SAFT-PCSV 图像。最后,通过对比时域 SAFT、时域 SAFT-CCF 和频域 SAFT,分析和研究频域 SAFT-PCSV 的成像质量和运算效率。

1 相位相干成像原理

1.1 时域相位相干成像

时域 SAFT 是一种基于 DAS 的后处理成像技术,其数据采集过程中阵元按相应延时法则自发自收并记录信号。假设阵元数为 N ,共可采集 $A \times N$ 的二维矩阵,其中 A 为采样点个数。将成像区域划分为像素点网格,若发射阵元 i —像素点 (x, z) —接收阵元 i 之间的传播时间为 t_i ,则所有发射-接收对中该像素点回波幅值的总和,即其信号强度响应值可表示为:

$$I_{\text{SAFT}}(x, z) = \sum_{i=1}^N S(t_i) \quad (1)$$

式中: $S(\cdot)$ 为信号幅值。

利用希尔伯特变换(Hilbert)构造 $S(t)$ 的复解析函数 $S_a(t)$,可表示为:

$$S_a(t) = S(t) + jH[S(t)] \quad (2)$$

式中: $H[\cdot]$ 为信号 $S(t)$ 的希尔伯特变换式, $j^2 = -1$ 。利用式(2)可以提取复信号的瞬时相位 $\varphi(t)$ 。

$$\varphi(t) = \arctan \frac{H[S(t)]}{S(t)} \quad (3)$$

由式(3)可知,通过解析信号得到的瞬时相位所反映的相位信息与原始信号 $S_a(t)$ 是等价的,等价双方由一方重建另一方时不会丢失任何信息^[27]。

根据欧拉公式,若信号的模为 1 个单位,由式(3)构建的 $\cos\varphi$ 和 $\sin\varphi$ 分别表示信号的实部与虚部,则单位复信号可表示为:

$$S = e^{j\varphi} = \cos\varphi + j\sin\varphi \quad (4)$$

以 S 作为样本数据,通过 S 的相位标准差构建用于表征相角一致性特征的 CCF,其表达式为:

$$F_{\text{CCF}}(x, z) = 1 - \sqrt{\text{var}(\cos\varphi) + \text{var}(\sin\varphi)} \quad (5)$$

式中: $\text{var}(\cos\varphi)$ 和 $\text{var}(\sin\varphi)$ 分别表示相位信息实部和虚部的方差。

由式(5)可知,相位相干因子 $F_{\text{CCF}}(x, z)$ 值域为 $[0, 1]$ 。 F 值越大表示相位分布越一致,反之,相位分布越混乱。当相位集中分布于某值周围, F 值趋近于 1。当相位均匀分布时, F 值趋近于 0。

对图像幅值 $I_{\text{SAFT}}(x, z)$ 利用相位相干因子 $F_{\text{CCF}}(x, z)$ 进行加权处理,相位分布较乱的噪声幅值加权后减弱,

相位分布一致的缺陷回波幅值加权后增强,可得到新幅值 $I_{\text{SAFT-CCF}}(x, z)$, 其表达式为:

$$I_{\text{SAFT-CCF}}(x, z) = F_{\text{CCF}}(x, z) \cdot I_{\text{SAFT}}(x, z) \quad (6)$$

1.2 频域相位相干成像

PSM 成像技术将超声检测模型作为爆炸物的反射模型,通过外推运算求解波动方程,实现成像区域的聚焦。该方法通过每隔 Δz 的深度切片逐级波场外推,外推至所需深度实现整个成像区域的频域聚焦,每一个切片即代表一条成像线。当采用 B 扫检测时,整个成像区域成二维分布,此时 t 时刻坐标 (x, z) 处的波场 p 满足以下二维波动方程,其表达式为:

$$\left[\frac{\partial^2}{\partial x^2} + \frac{\partial^2}{\partial z^2} - \frac{1}{c^2} \frac{\partial^2}{\partial t^2} \right] p = 0 \quad (7)$$

式中: c 为材料声速,在各向同性介质成像中 c 为常数。

利用二维傅里叶变换将波场 p 由时域转化为频域,利用式(8)将深度 z_0 外推至深度 $z = z_0 + \Delta z$, 对式(7)进行求解。

$$p(\mathbf{k}_x, z_0 + \Delta z, \omega) = p(\mathbf{k}_x, z_0, \omega) \exp \left[-j\Delta z \sqrt{\frac{\omega^2}{c^2} - \mathbf{k}_x^2} \right] \quad (8)$$

式中: $\mathbf{k}_x$ 为 x 方向上的波数矢量; ω 为角频率; $p(\mathbf{k}_x, z_0, \omega)$ 为 $p(x, z_0, t)$ 的二维傅里叶变换。 x 和 z 方向的波数矢量分量满足二维色散关系: $\mathbf{k}_x^2 + \mathbf{k}_z^2 = \omega^2/c^2$ 。

由于 SFAT 信号采集采用自激自收脉冲回波模式,声波的发射和接收路径完全相同,因而可利用爆炸反射模型进行波场外推。为适应爆炸发射模型,引入符号 α 对式(8)进行简化,故将 α 中的声速值设置为真实材料声速值的 $1/2$, 即表示为:

$$\alpha(\mathbf{k}_x, \Delta z, \omega) = \exp \left[-j\Delta z \sqrt{\frac{4\omega^2}{c^2} - \mathbf{k}_x^2} \right] \quad (9)$$

实施波场外推操作后,利用二维反傅里叶变换得到 0 时刻重建波场 $p(x, z, t=0)$, 即 $t=0$ 时刻成像区域内任意坐标 (x, z) 处的波场 p 。

$$p(x, z, t=0) = \iint p(\mathbf{k}_x, z_0, \omega) \cdot \alpha \cdot e^{jk_x x} d\mathbf{k}_x d\omega \quad (10)$$

鉴于 PSM 将接收信号聚焦视作爆炸点向接收方向辐射声场逆过程,如图 1 所示,波场外推可被假设为波场逐渐由阵元向任意爆炸点 p 靠近的过程。当外推至爆炸点深度时,可认为所有波场记录的信号信息都回归到此爆炸点上。因此,波场记录中信号的相位在波场外推后,理想状态下 $t=0$ 时刻成像区域内任意坐标 (x, z) 是一致的。

根据上述原理,PSM 过程中代表波场强度的 $p(x, z, t)$ 变为 $p_{\cos\varphi}(x, z, t)$ 和 $p_{\sin\varphi}(x, z, t)$, $p_{\cos\varphi}(x, z, t)$ 和 $p_{\sin\varphi}(x, z, t)$ 为相位正、余弦值外推矩阵。利用上述 PSM 原

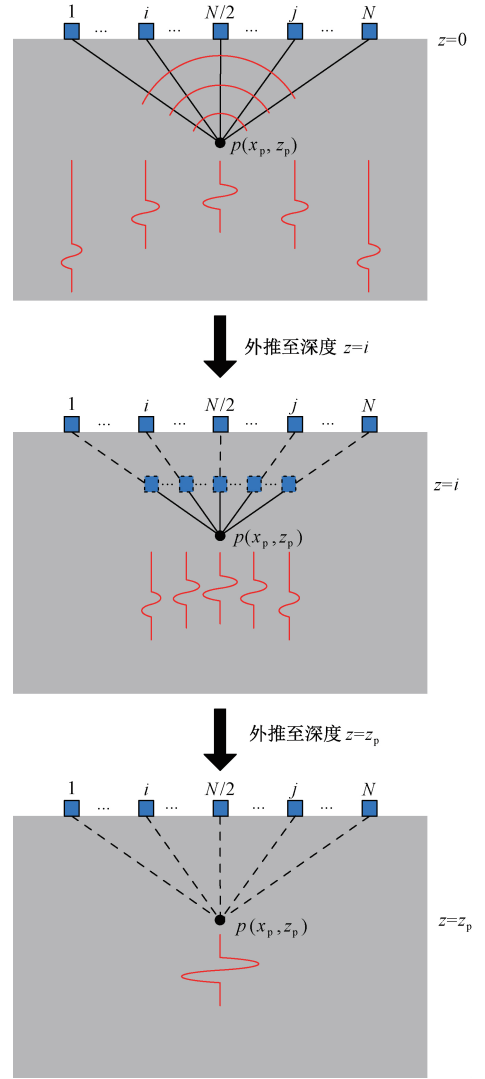


图 1 相位迁移原理

Fig.1 Schematic diagram of phase shift migration principle

理,则对相位实部和虚部进行重建之后的值为:

$$p_{\cos\varphi}(x, z, t=0) = \iint p_{\cos\varphi}(\mathbf{k}_x, z_0, \omega) \cdot \alpha \cdot e^{jk_x x} d\mathbf{k}_x d\omega \quad (11)$$

$$p_{\sin\varphi}(x, z, t=0) = \iint p_{\sin\varphi}(\mathbf{k}_x, z_0, \omega) \cdot \alpha \cdot e^{jk_x x} d\mathbf{k}_x d\omega \quad (12)$$

式中: $p_{\cos\varphi}(\mathbf{k}_x, z_0, \omega)$ 和 $p_{\sin\varphi}(\mathbf{k}_x, z_0, \omega)$ 分别为 $p_{\cos\varphi}(x, z_0, t)$ 和 $p_{\sin\varphi}(x, z_0, t)$ 的二维傅里叶变换。

在实际检测中,由于缺陷的尺寸非完全呈点状、激发脉冲存在一定的频带宽度等因素,阵元接收的相位外推之后与爆炸点处的相位分布并不一致,进行相位加权处理时,成像结果会受到干扰。

通过环形统计学 CS 方法评价相位分布一致程度,以减小上述因素带来的影响。CS 是一种以相角值 θ 作为

数据样本点的统计分析方法^[25],样本点离散地分布在单位圆上,如图2所示,以复平面上的单位矢量 $(\cos\theta, \sin\theta)$ 进行表征。相位的集中程度可采用样本点的合成矢量长度以及方向描述。若合成矢量长度越大,方向指向相位某一集中方向,说明相位分布一致程度越高;反之,相位分布一致程度越低。

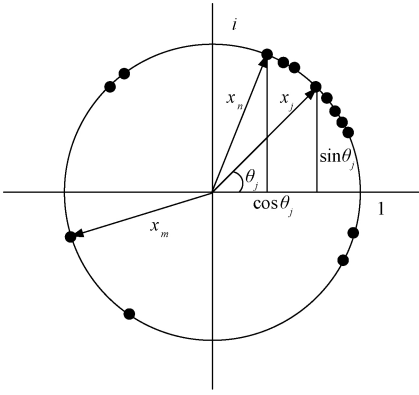


图2 复平面上的环形矢量分布表征

Fig.2 The representation schematic diagram of the circular vector distribution on the complex plane

当环形上分布有 N 个 $\{X_j = 1, 2, \dots, m, \dots, n\}$ 单位复数样本点时,通过欧拉公式和矢量叠加,得到复平面上的平均合矢量表示为:

$$\{X_{j=1,2,\dots,n}\} = \frac{1}{N} \sum_{j=1}^N e^{i\theta_j} = \frac{1}{N} \sum_{j=1}^N (\cos\theta_j + i\sin\theta_j) = a + ib \quad (13)$$

式中: i 为虚数单位; θ_j 为样本点的相位角; a 和 b 为合矢量的实部和虚部,表达式可写为:

$$a = \frac{1}{N} \sum_{j=1}^N \cos\theta_j, \quad b = \frac{1}{N} \sum_{j=1}^N \sin\theta_j \quad (14)$$

根据式(13)和(14),平均合矢量的模可写为:

$$R = (a^2 + b^2)^{\frac{1}{2}} \quad (15)$$

式中:平均合矢量模 R 表示相角值样本的平均长度,其值为 $[0, 1]$ 。若 $R=1$,表明所有数据高度一致,均指向同相位,当 R 接近于 1 表明数据集集中于平均方向周围,相位指向较为一致。若 $R=0$,表明数据随机散乱分布,相位一致性低。

式(4)中的实部与虚部值经相位迁移后,由式(13)可知, $p_{\cos\phi}(x, z, t)$ 和 $p_{\sin\phi}(x, z, t)$ 即分别为相位平均合矢量的余弦矩阵和正弦矩阵。根据式(13)~(15)可构建 R ,其表达式为:

$$R = (p_{\cos\phi}^2 + p_{\sin\phi}^2)^{\frac{1}{2}} \quad (16)$$

进行合成孔径聚焦成像时,对迁移重建之后的幅值矩阵进行相位加权处理,得到基于相位环形统计矢量的频域合成孔径聚焦成像表达式。

$$I_{\text{SAFT-PCSV}}(x, z) = R \cdot p(x, z, t) \quad (17)$$

2 阵列信号采集实验

采集数据集的超声检测系统如图3所示,该系统由超声信号发射接收仪器、多通道信号转换器、电脑主机和阵元数为 128 的线性相控阵探头组成。电脑主机控制超声信号发射接收仪器产生激励信号,通过多通道信号转换器选择探头所需激励的阵元序列,激励信号使选择的阵元振动产生超声波,超声波由相控阵探头传入工件进行缺陷检测,检测数据经系统传回电脑主机并保存。探头中心频率为 5 MHz,阵元宽度为 0.9 mm,阵中心间距为 1 mm。实验所用试块如图4所示。图4(a)所示为厚度 60 mm 的铝制试块,加工有呈水平排列的 4 个 $\Phi 2$ 边钻孔,孔深度 30 mm,相邻两孔间隔均为 20 mm,从左至右编号依次为 1[#]~4[#]。图4(b)所示为厚度 48 mm 的黄铜试块,在深度 24 mm 处加工一个 $\Phi 2$ 边钻孔。图4(c)所示为分别加工了 0°、15°、30°、45°、60° 和 75° 底面开口槽的 3 个壁厚 50 mm 的铝块,槽长 10 mm,槽宽 0.4 mm。经测定,铝和黄铜试块的声速分别为 6 225 和 4 350 m/s。

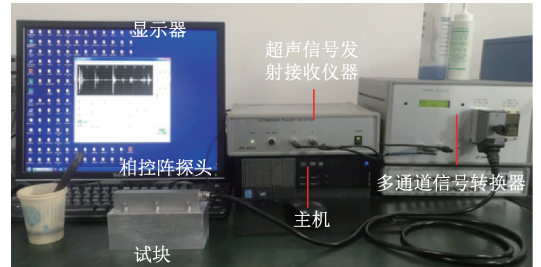


图3 阵列信号采集系统

Fig.3 Array signal acquisition system

以 100 MHz 的采样频率产生超声信号,使系统按一定的延时法则逐次激励 1~ N 号阵元。每次激发声波经过检测目标后的反射信号采用单阵元自发自收模式,经过 N 次阵元激励后,共采集到 N 个采样点数为 2 999 的 A 型扫描信号,采集到的原始回波数据以矩阵形式存于主机内,形成.txt 文件。基于式(1)~(17),将获得的实验矩阵数据导入 MATLAB 软件,以实现不同算法下的 SAFT 成像。同时,测定四孔铝块 2[#]缺陷和黄铜试块中缺陷的原始 A 扫回波信号,并统计其归一化后的幅值,以分贝作为单位进行描述。最后统计超声信号中缺陷的幅值和信噪比,其表达式为:

$$dB = 20\log_{10} \frac{I_d}{\max(I)} \quad (18)$$

式中: I_d 为回波信号中缺陷或最大噪声处的最大幅值; I 为回波信号中各采样点处的幅值。

数值计算软件的版本为 MATLAB 2015a。测试所用计算机 CPU 为 Intel core i7 4700,主频 3.6 GHz,4 核,用于考察和比较不同算法的运算效率和所占运算空间。如图 4(a)~(c)所示的四孔铝制试块、黄铜试块和底面开口槽铝制试块的成像区域分别为 65 mm×128 mm,55 mm×64 mm 和 55 mm×32 mm。

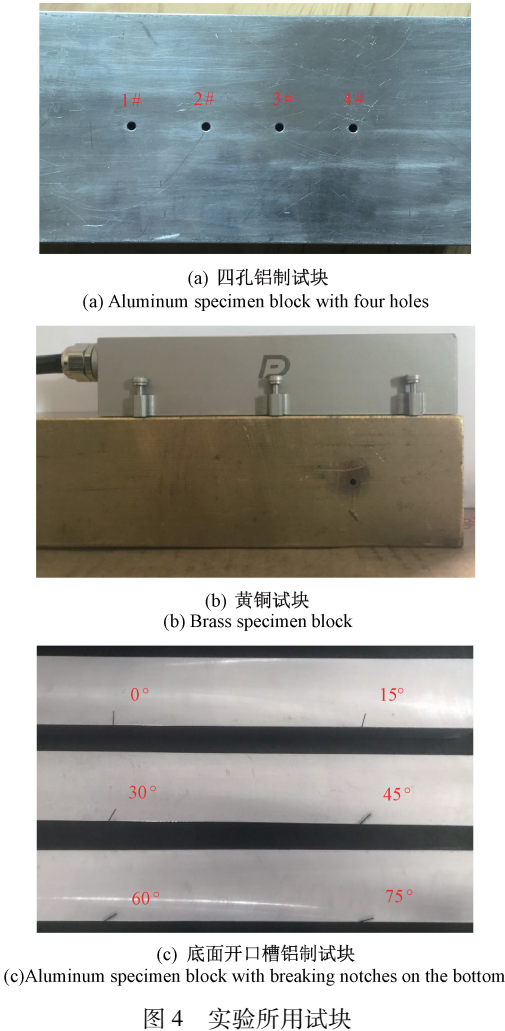


图 4 实验所用试块

Fig.4 The specimen blocks used in the experiment

3 超声成像结果与讨论

3.1 成像结果

利用时域 SAFT、时域 SAFT-CCF、频域 SAFT 和频域 SAFT-PCSV 4 种算法分别对采集到的合成孔径数据进行处理,成像结果如图 5~7 所示。

以分贝作为单位描述超声图像中缺陷的幅值,其计算表达式为:

$$dB(x,z) = 20\log_{10} \frac{I(x,z)}{\max(|I|)}$$
 (19)

式中:(x,z)为成像区域中像素点的坐标; I 为成像区域各像素点幅值。

图 5 所示为铝制试块在不同成像算法下的合成孔径聚焦图像。对比成像结果可知,4 种算法在-20 dB 闸门内所有图像均未出现噪声,均可实现铝制试块中 4 个孔状缺陷的检测,但成像效果存在一定的差异性。

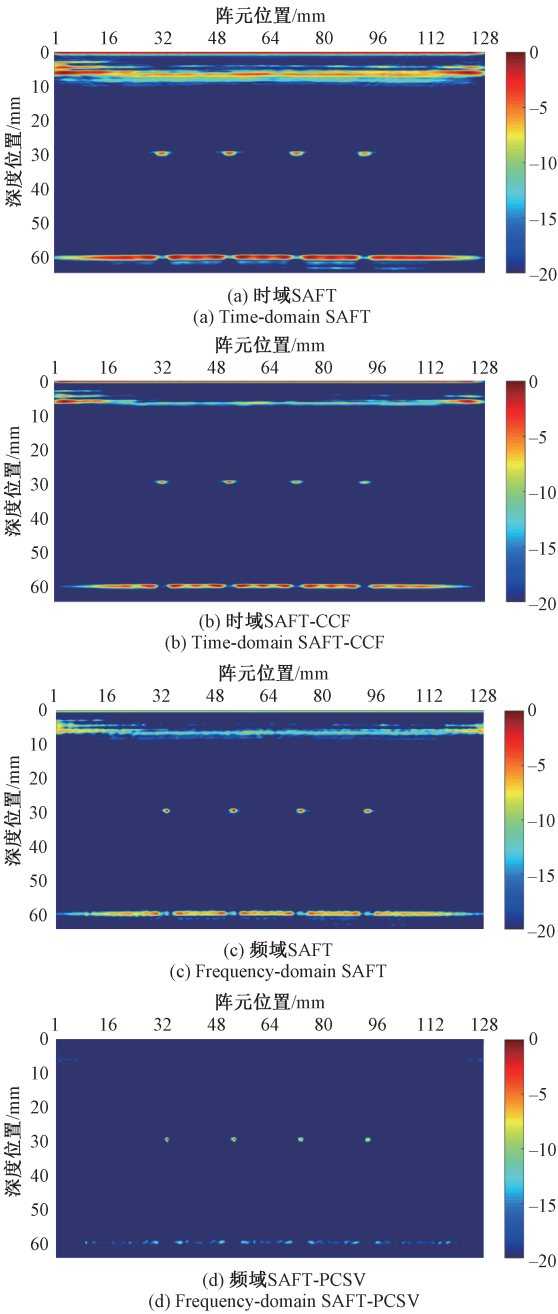


图 5 四孔铝制试块超声成像对比

Fig.5 Comparison of ultrasonic imaging of the aluminum specimen block with four holes

由图 5 可知,经时域 SAFT-CCF、频域 SAFT 和频域

SAFT-PCSV 3 种算法处理后,缺陷横向分辨力均得到了提高,且频域 SAFT-PCSV 的横向分辨力最高。对比时域和频域图像可知,在-20 dB 显示下,频域成像算法分辨率好于时域成像算法。

图 6 所示为黄铜试块的成像结果。对比图 5 可知,当被检对象为晶粒粗大的散射介质黄铜时,晶粒之间的声阻抗差异引起了超声背散射,4 种图像中均出现了较强噪声,对缺陷的判定造成影响。由于相位加权算法对信号相位较为敏感,黄铜中噪声相位干扰缺陷信号相位较强,检测信号的相位易产生畸变,降低了相位相干值。分析图 6(b) 和 (c) 可知,经时域 SAFT-CCF 和频域 SAFT 处理后,缺陷回波幅值得到提高的同时,噪声幅值也随之增加,噪声抑制效果不明显,检测能力降低。而经频域 SAFT-PCSV 处理之后,缺陷回波幅值增强,噪声信号的抑制程度较大,一定程度上提高了分辨率和信噪比。

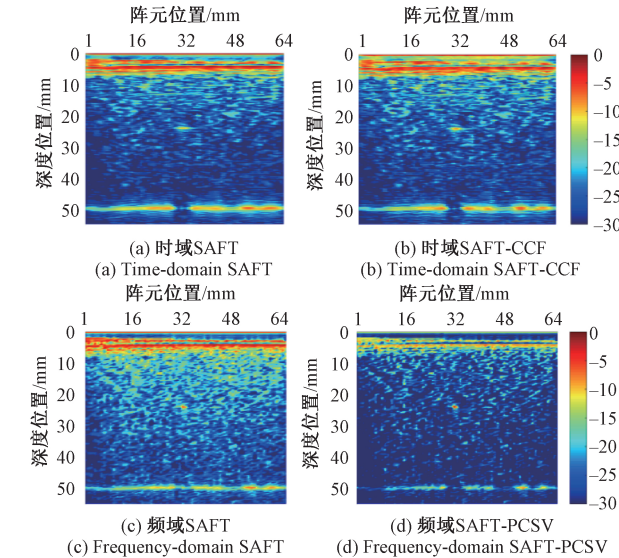


图 6 黄铜试块超声成像对比

Fig.6 Comparison of ultrasonic imaging of brass specimen block

图 7 所示分别为 0°、15°、30°、45°、60°、75° 底面开口槽的 3 个铝制试块的成像结果。由图 7 可知,对于 10 mm 的槽长,0.4 mm 的槽宽,4 种算法均能有效地检出槽类缺陷。且随着槽向的改变,4 种算法处理结果都比较稳定,均能呈现槽的尺寸及指向。

相比于时域 SAFT、时域 SAFT-CCF、频域 SAFT,频域 SAFT-PCSV 的横向分辨力最佳,与孔的检测结果保持一致。进一步分析可知,随着角度的增大,超声波入射方向与槽的指向接近垂直,底面槽的形状逐渐明显,区别于孔类缺陷图像。结合图 7(e) 和 (f) 发现,频域算法底面槽的成像结果更清晰,更利于裂纹

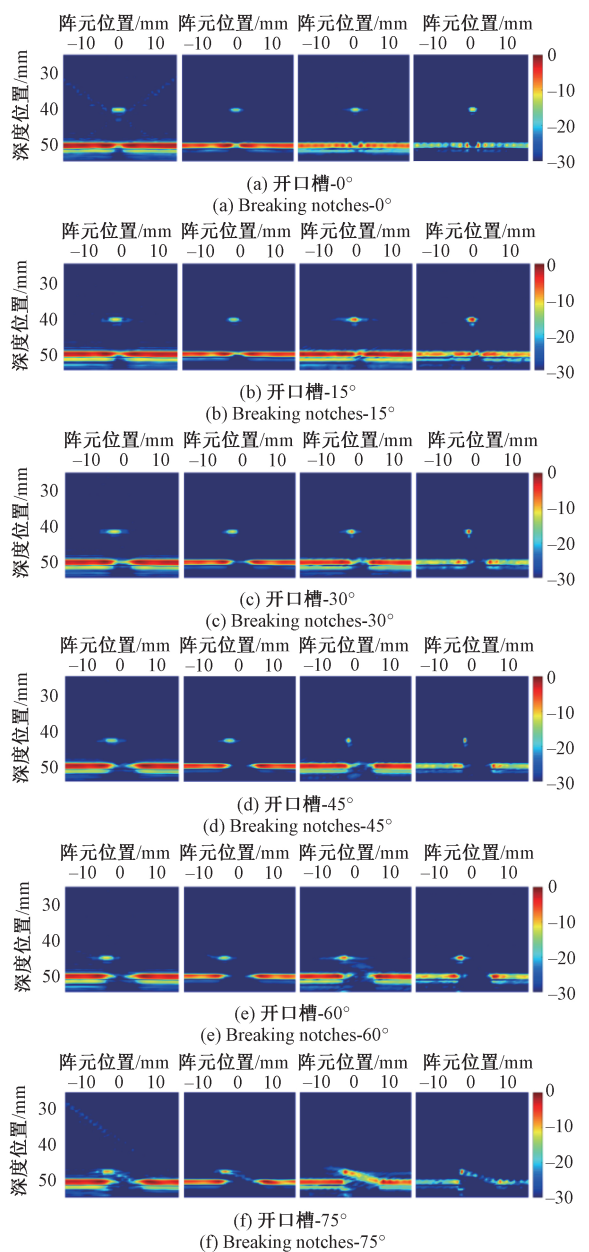


图 7 底面开口槽铝制试块超声成像对比

Fig.7 Comparison of ultrasonic imaging of aluminum specimen block with breaking notches on the bottom

缺陷的识别。

3.2 成像质量对比

为具体分析成像算法对合成孔径聚焦加权成像的影响效果,分别提取图 5 深度 30 mm 和图 6 深度 24 mm 处孔类缺陷回波处的像素点幅值,并绘制出如图 8 和 9 所示的水平幅值曲线,用以评价各算法的横向分辨力。表 1 所示为图 8 和 9 统计的缺陷最高回波幅值。表 2 所示为回波信噪比。表 3 所示为缺陷最高回波幅值处降-6 dB 水平宽度。

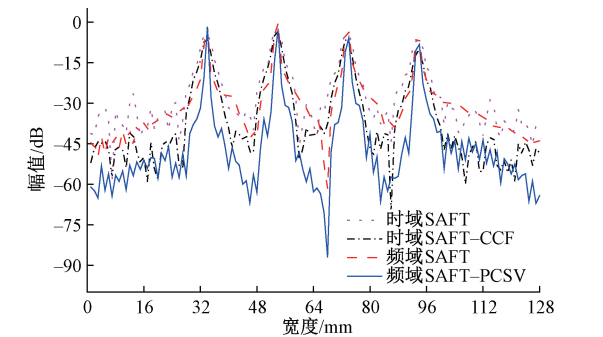


图 8 铝制试块深度 30 mm 处水平幅值曲线

Fig.8 Horizontal amplitude curves of the aluminum specimen block at depth of 30 mm

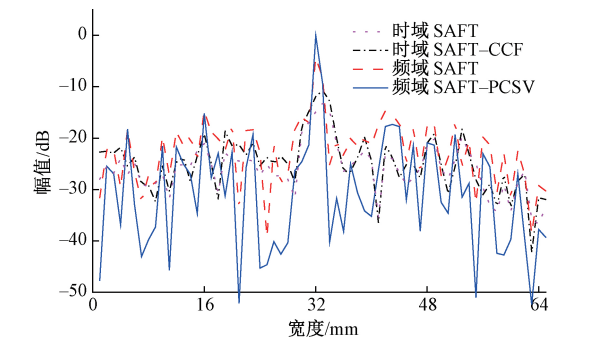


图 9 黄铜试块深度 24 mm 处水平幅值曲线

Fig.9 Horizontal amplitude curves of brass specimen block at 24 mm depth

表 1 缺陷回波幅值					
Table 1 The amplitude of flaw echo					dB
成像算法	孔 1	孔 2	孔 3	孔 4	黄铜
时域 SAFT	-4.5	-3.0	-4.6	-6.4	-13.2
时域 SAFT- CCF	-5.6	-3.4	-6.7	-10.2	-10.7
频域 SAFT	-1.2	-0.5	-3.0	-5.5	-4.4
频域 SAFT- PCSV	-1.8	-2.5	-5.9	-8.3	0.0

表 2 缺陷回波信噪比					
Table 2 The SNR of flaw echo					dB
成像算法	孔 1	孔 2	孔 3	孔 4	黄铜
时域 SAFT	22.0	23.5	21.9	20.1	6.6
时域 SAFT- CCF	35.7	37.9	34.6	31.1	7.6
频域 SAFT	36.8	37.5	35.0	32.5	10.3
频域 SAFT- PCSV	44.2	43.5	40.1	37.7	15.2

表 3 缺陷回波半波高水平宽度					
Table 3 The horizontal width of flaw echo at half-height					mm
成像算法	孔 1	孔 2	孔 3	孔 4	黄铜
时域 SAFT	3.6	3.5	3.6	3.6	4.7
时域 SAFT- CCF	2.6	2.7	3.1	3.0	4.1
频域 SAFT	1.1	1.6	1.8	1.9	1.6
频域 SAFT- PCSV	0.5	0.8	1.5	1.6	0.9

经测定,原始信号中四孔铝块 2#缺陷的回波幅值和信噪比分别为-3.9 和 15.6 dB。黄铜试块中缺陷的回波幅值和信噪比分别为-8.8 和 5.8 dB。对比表 1 和 2 结果可知,原始信号中缺陷回波幅值越高,即超声波强度越高,成像后图像中缺陷回波的幅值也越高。当被检对象导致回波强度变弱时,图像中的回波强度有可能会低于原始信号强度。但 4 种图像处理后,信噪比均有不同程度的提升。因此,原始信号中缺陷超声波回波强度和信噪比越高,图像处理后的回波强度和信噪比越高。

此外,超声检测频率也会对超声波回波强度和信噪比产生极大的影响。根据经典散射理论,当晶粒平均直径与检测波长之比小于 1/10 时,晶粒对超声波的散射较小,成像质量效果较好。当晶粒平均直径与检测波长之比为 $1/3 < d/\lambda < 3$ 时,将会造成极大的随机散射。根据式 $\lambda = c/f$ 可知,检测波长与超声波频率有关。实验结果表明,当探头激励频率为 5 MHz 时,铝制试块的晶粒平均直径与检测波长之比较小,晶粒对超声波的散射程度较弱,噪声幅值较低,缺陷回波幅值较高,具有较高信噪比,有利于缺陷的识别。而对于晶粒粗大的黄铜试块,晶粒尺寸与波长大小比值为 0.332,晶粒对超声波的散射程度较强,信号中结构噪声幅值显著增加,结构噪声已经掩盖了缺陷回波信号,相应地,缺陷回波信噪比显著降低,难以有效识别缺陷。若采用较低频率的超声波检测,一定程度上可以提高黄铜试块的缺陷回波幅值和信噪比。

由图 8 和表 1 可知,经时域 SAFT-CCF、频域 SAFT 和频域 SAFT-PCSV 加权处理之后,时域 SAFT 图像中缺陷处的幅值均得到保留。比较 4 条曲线发现,4 种算法的噪声信号均未达到-20 dB 闸门,而频域 SAFT-PCSV 主瓣两侧信号幅值降低幅度最大,噪声信号在-50 dB 以下,比时域 SAFT 噪声信号幅值下降 20 dB 左右,信噪比达到 44.2 dB 之高。然而,从图 9 中可看出,黄铜缺陷幅值经频域算法处理后虽增幅明显,但曲线中噪声信号依旧很强,噪声峰值均集中在-30 dB 左右,信噪比最高为频域 SAFT-PCSV 图像中的 15.2 dB,仅比时域 SAFT 提高

8.6 dB。分析表 3 可知,经加权处理之后,降-6 dB 水平宽度均有不同程度变窄,横向分辨力得到提高,且频域 SAFT-PCSV 中的半波高水平宽度最窄,减小到时域 SAFT 的 1/3 以上。由上述结果分析可知,弱散射体铝制试块经频域 SAFT-PCSV 加权后噪声抑制效果最明显,信噪比提高幅度较大。而对于散射较强介质黄铜,由于相位相干性较低,4 种算法抑制噪声能力均降低。但频域 SAFT-PCSV 处理后缺陷处回波幅值增强较大,信噪比提高幅度大于其他 3 种算法。

结合图 8~9 和表 1~3,综合考虑上述 4 种不同算法,获得的缺陷回波幅值:频域 SAFT-PCSV>频域 SAFT>时域 SAFT-CCF>时域 SAFT,信噪比:频域 SAFT-PCSV>频域 SAFT>时域 SAFT-CCF>时域 SAFT,缺陷最高回波幅值处降-6 dB 的水平宽度:频域 SAFT-PCSV<频域 SAFT<时域 SAFT-CCF<时域 SAFT,横向分辨力:频域 SAFT-PCSV>频域 SAFT>时域 SAFT-CCF>时域 SAFT。

由实验结果可知,本文所提方法能有效提高缺陷横向分辨率,并不能提高由探头频率决定的纵向分辨率。但是,有望与脉冲压缩等算法结合,同时提高横、纵向分辨率,以期发现和识别更微小的缺陷。尽管本文仅通过 5 MHz 探头进行了研究,但所提出图像后处理方法可适用于整个超声检测频率波段,可在低频导波,高频水浸聚焦,甚至超高频超声显微镜中得到应用。

为了分析裂纹类缺陷对 4 种算法的影响,图 10 和 11 所示分别给出时域 SAFT、时域 SAFT-CCF、频域 SAFT 和频域 SAFT-PCSV 4 种不同成像方法测得的裂纹角度和长度的误差。结果表明,当槽取向不断变化时,4 种成像方法均能够实现 10 mm 裂纹的测量。由图 10 可知,4 种算法的角度误差范围为-3°~6°,且时域 SAFT 角度误差普遍高于其他 3 种算法。分析图 11 可得,槽长度的误差在-0.6~0.6 mm 之内,且频域 SAFT-PCSV 与实际情况误差较小,测量精度更高,成像质量较稳定。

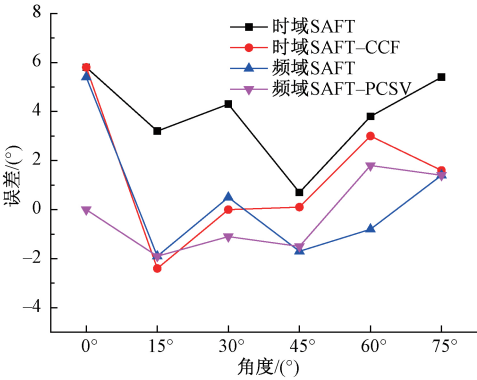


图 10 底面开口槽倾角测量误差

Fig.10 The measurement error of inclination angle of breaking notches on the bottom

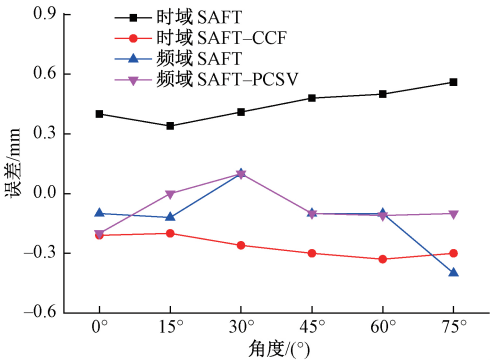


图 11 底面开口槽长度测量误差

Fig.11 The measurement error of length of breaking notches on the bottom

3.3 成像效率对比

通过第 2 节中的软硬件运行环境分别测试不同试块下 4 种算法的运行时间,以更直观的方法对比 4 种算法的实际运算效率。在不同的阵元数目下,对不同算法运行时所占内存空间的大小进行了统计。表示各算法实际运算时间和占内存大小分别如表 4 和 5 所示。

表 4 各算法 5 次平均运算时间

Table 4 The operation time of different algorithms in five time average s			
成像算法	128 阵元	64 阵元	32 阵元
时域 SAFT	234. 250	115. 550	60. 653
时域 SAFT-CCF	304. 771	141. 238	73. 398
频域 SAFT	1. 011	0. 977	0. 843
频域 SAFT-PCSV	1. 562	1. 503	1. 331

表 5 各算法 5 次平均所占内存空间

Table 5 The occupied memory space of different algorithms in five time average MB			
成像算法	128 阵元	64 阵元	32 阵元
时域 SAFT	4 039. 6	2 232. 7	1 156. 6
时域 SAFT-CCF	6 359. 5	3 749. 3	1 893. 5
频域 SAFT	55. 06	40. 79	15. 23
频域 SAFT-PCSV	59. 33	47. 02	22. 47

实测结果表明,在 32 阵元下,频域 SAFT-PCSV 的运算时间是时域 SAFT 的 1/46。当阵元数为 64 和 128 时,频域 SAFT-PCSV 的运算时间分别是时域 SAFT 的 1/77 和 1/150。综合分析可知,频域 SAFT-PCSV 的运算效率至少可比时域 SAFT 提高 46 倍,大幅减少了成像时间。分析表 4 可知,随着阵元数目的不断增加,4 种算法的运

算时间均变长,时域 SAFT 和频域 SAFT-PCSV 运算时间之间的差距也逐渐增大。在4种算法里,频域 SAFT 具有最高的计算效率,时域 SAFT-CCF 运算时间最长,且频域算法运算效率均高于时域算法。综上,4种算法的实际运算时间大小为:频域 SAFT<频域 SAFT-PCSV<时域 SAFT<时域 SAFT-CCF。

由表5可知,当处理128阵元下数据时,时域 SAFT 运算时所占内存达到4 039.6 MB,相当于4 GB 大小,而频域 SAFT-PCSV 运行时所占空间仅为其1/68。在64和32阵元下,执行频域 SAFT-PCSV 算法所占空间也分别只有时域 SAFT 的1/47和1/51。综合表5可得,算法执行时内存空间占用大小为:频域 SAFT<频域 SAFT-PCSV<时域 SAFT<时域 SAFT-CCF。由此可知,频域 SAFT 和频域 SAFT-PCSV 算法所占内存小于时域 SAFT 和时域 SAFT-CCF。当处理的数据集过大时,频域 SAFT、频域 SAFT-PCSV 这两种算法受硬件限制不大,而时域 SAFT 和时域 SAFT-CCF 则需要匹配更大的内存空间予以支持运算,成本也随之增加。

4 结 论

为提高合成孔径聚焦技术的成像质量和算法效率,本文提出一种基于相位环形统计矢量的频域合成孔径聚焦算法。一方面,通过以环形统计矢量为基础的相位相干因子放大相位对缺陷回波幅值的贡献,提高分辨率和信噪比等成像质量指标;另一方面,借助频域 SAFT 算法,避免了低效的迭代运算,使得成像效率显著提高。通过对比分析时域 SAFT、时域 SAFT-CCF、频域 SAFT 和频域 SAFT-PCSV 4种不同成像方法,得到如下结论:

1) 成像结果表明,频域 SAFT-PCSV 成像算法通过放大相位分布对信号幅值的作用增强了 SAFT 图像分辨率和信噪比。对于切槽的倾角识别和长度测量,由误差分析可知,频域 SAFT-PCSV 成像算法成像结果更准确。

2) 在相同条件下,频域 SAFT-PCSV 成像算法运算时间低于时域 SAFT 的1/46,满足实时成像要求。且运行时所占内存更小,能有效减轻硬件负担,便于嵌入廉价超声探伤仪或超声医疗设备中,具有潜在的应用前景。

参考文献

[1] 周正干,李洋,周文彬,等.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 ZH G, LI Y, ZHOU W B, et al. Ultrasonic

phased array post-processing imaging techniques: A review[J]. Journal of Mechanical Engineering, 2016, 52(6): 1-11.

[2] 富志凯,石立华,付尚琛,等.基于幅度补偿的混凝土合成孔径聚焦成像方法[J].南京航空航天大学学报,2017,49(4):540-547.

FU ZH K, SHI L H, FU SH CH, et al. SAFT imaging method for concrete blocks based on amplitude compensation[J]. Journal of Nanjing University of Aeronautics & Astronautics, 2017, 49(4): 540-547.

[3] 吴文焘,蒲杰,吕焱.最小方差波束形成与广义相干系数融合的医学超声成像方法[J].声学学报,2011,36(1):66-72.

WU W T, PU J, LYU Y. Medical ultrasound imaging method combining minimum variance beaming and general coherence factor[J]. Acta Acustica, 2011, 36(1): 66-72.

[4] 杨洋.基于合成孔径聚焦的CRH动车轮对超声成像方法研究[D].成都:西南交通大学,2014.

YANG Y. Ultrasonic imaging methods of wheels detection based on synthetic aperture focusing technique[D]. Chengdu: Southwest Jiaotong University, 2014.

[5] LI P C, LI M L. Adaptive imaging using the generalized coherence factor[J]. IEEE Transactions on Ultrasonics, Ferroelectrics, and Frequency Control, 2003, 50(2): 128-141.

[6] 郑驰超,成娟,彭虎.次方样本熵自适应加权的超声合成孔径成像算法[J].声学学报,2017,42(1):109-114.

ZHENG CH CH, CHENG J, PENG H. Ultrasonic synthetic aperture imaging algorithm based on power sample entropy as adaptive weight[J]. Acta Acustica, 2017, 42(1): 109-114.

[7] 贺庆,汪亚中,郑驰超,等.广义相干系数加权的超声虚拟源成像算法研究[J].生物医学工程研究,2019,38(3):341-346.

HE Q, WANG Y ZH, ZHENG CH CH, et al. Ultrasound virtual source imaging weighted by general coherence factor weighting[J]. Journal of Biomedical Engineering Research, 2019, 38(3): 341-346.

[8] 郑驰超,彭虎,赵巍.符号相干系数加权的超声平面波复合成像算法[J].电子学报,2018,46(1):31-38.
ZHENG CH CH, PENG H, ZHAO W. Ultrasound

- imaging based on coherent plane wave compounding weighted by sign coherence factor[J]. *Acta Electronica Sinica*, 2018, 46(1): 31-38.
- [9] 王立, 陈果, 石文泽, 等. 厚壁管道周向压电 Lamb 波缺陷图像增强研究[J]. *压电与声光*, 2018, 40(6): 46-50.
- WANG L, CHEN G, SHI W Z, et al. Research on defect image enhancement of circumferential piezoelectric lamb wave in thick-walled pipelines [J]. *Piezoelectric & Acoustooptics*, 2018, 40(6): 46-50.
- [10] 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.
- [11] ANWAR N S N, ABDULLAH M Z. Sidelobe suppression featuring the phase coherence factor in 3-D through-the-wall radar imaging [J]. *Radioengineering*, 2016, 25(4): 730-740.
- [12] 焦敬品, 杨素方, 何存富, 等. 相位加权的矢量全聚焦超声阵列成像方法研究[J]. *声学学报*, 2017, 42(4): 485-494.
- JIAO J P, YANG S F, HE C F, et al. Investigation of an ultrasonic array imaging method of phase weighting vector total focusing [J]. *Acta Acustica*, 2017, 42(4): 485-494.
- [13] 陈尧. 厚壁 CASS 超声检测建模和 PCI 降噪算法研究[D]. 大连: 大连理工大学, 2016.
- CHEN Y. Modeling of ultrasonic testing and noise suppression using phase coherence imaging algorithm in heavy-walled cast austenitic stainless steel[D]. Dalian: Dalian University of Technology, 2016.
- [14] HASEGAWA H. Enhancing effect of phase coherence factor for improvement of spatial resolution in ultrasonic imaging [J]. *Journal of Medical Ultrasonics*, 2018, 43(1): 1-9.
- [15] XIA X Y, LI P, WU W T, et al. A coherence-based phase aberration correction method in medical ultrasound[J]. *Chinese Journal of Acoustics*, 2015, 40(3): 217-229.
- [16] HASEGAWA H, KANAI H. Effect of subaperture beamforming on phase coherence imaging [J]. *IEEE Transactions on Ultrasonics, Ferroelectrics, and Frequency Control*, 2014, 61(11): 1779-1790.
- [17] 夏新源, 李平, 吴文焘, 等. 利用回波相干性的医学超声成像相位畸变校正方法 [J]. *声学学报*, 2015, 40(2): 276-284.
- XIA X Y, LI P, WU W T, et al. A coherence-based phase aberration correction method in medical ultrasound[J]. *Acta Acustica*, 2015, 40(2): 276-284.
- [18] CAMACHO J, BRIZUELA J, FRITSCH C, et al. Grain noise reduction by phase coherence imaging [C]. *Proceedings of the AIP Conference*, 2010, 1211(1): 855-862.
- [19] CHEN Y, CAO H Q, GUO Y H, et al. Research of SNR enhancement for coarse-grained CASS based on phase coherence imaging [C]. *Proceedings of the 2016 IEEE Far East NDT New Technology & Application Forum*, Nanchang, 2016: 44-48.
- [20] 杨春. 分层物体的合成孔径聚焦超声成像技术研究[D]. 北京: 清华大学, 2014.
- YANG CH. Research on the synthetic aperture focusing technique for ultrasound imaging of layered objects[D]. Beijing: Tsinghua University, 2014.
- [21] 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.
- [22] QIN K H, YANG C, SUN F, et al. Generalized frequency-domain synthetic aperture focusing technique for ultrasonic imaging of irregularly layered objects[J]. *IEEE Transactions on Ultrasonics, Ferroelectrics, and Frequency Control*, 2014, 61(1): 133-146.
- [23] HARRISON D, KANJI G K, GADSDEN R J. Analysis of variance for circular data [J]. *Journal of Applied Statistics*, 2006, 13(2): 123-138.
- [24] 王宁, 彭华. 基于环形统计量和支持向量机的 CPM 信号调制识别[J]. *信号处理*, 2012, 28(1): 47-53.
- WANG N, PENG H. Modulation recognition of CPM signals based on circular statistics and SVM[J]. *Signal Processing*, 2012, 28(1): 47-53.

[25] HANBURY A. Circular statistics applied to colour images[C]. Proceedings of the 8th Computer Vision Winter Workshop, 2003, 91(1-2): 53-71.

[26] 陈尧, 冒秋琴, 石文泽, 等. 基于虚拟源的非规则双层介质频域合成孔径聚焦超声成像[J]. 仪器仪表学报, 2019, 40(6): 48-55.

CHEN Y, MAO Q Q, SHI W Z, et al. Frequency domain synthetic aperture focusing technique for irregular two-layered medium based on virtual source [J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2019, 40(6): 48-55.

[27] 马玉华, 林文华. 解析信号的瞬时相位与原始信号的等价关系[J]. 黑龙江大学自然科学学报, 1995, 12(3): 56-60.

MA Y H, LIN W H. Equivalence between instantaneous phase of analytic signal and original signal[J]. Journal of Natural Science of Heilongjiang University, 1995, 12(3): 56-60.

作者简介



冒秋琴, 2018 年于南京信息工程大学获得学士学位, 现为南昌航空大学硕士研究生, 主要研究方向为超声成像检测及评价。
E-mail: tinamamo@foxmail.com

Mao Qiuqin received her B. Sc. degree in 2018 from Nanjing University of Information Science and Technology. Now, she is a M. Sc. candidate in Nanchang Hangkong University. Her main research interests include

ultrasonic imaging testing and evaluation.



陈尧, 分别于 2008 年和 2011 年于辽宁工业大学获得学士和硕士学位, 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: chenyaol984@foxmail.com

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



李秋锋(通信作者), 2008 年于南京航空航天大学获得博士学位, 现在为南昌航空大学教授、硕士生导师, 主要研究方向为声学检测技术及检测信号处理等方面的研究。
E-mail: qiufengli@nuaa.edu.cn

Li Qiufeng (Corresponding author) received his Ph. D. from Nanjing University of Aeronautics and Astronautics in 2008. Currently, he is a professor and master student supervisor in Nanchang Hangkong University. His main research interests include acoustic testing technology, test signal processing and so on.