

应用于 Lamb 波的最小功率无畸变波束形成算法

褚兆飞, 骆英, 秦云

(江苏大学国家级高端装备关键结构健康管理国际联合研究中心, 镇江, 212000)

摘要: 在利用 Lamb 波进行板状结构损伤检测时, 采用经典最小功率无畸变波束形成算法可以获得较高的损伤成像精度, 但仍无法避免频散效应对成像精度的影响, 且该算法存在谱矩阵求逆运算复杂、奇异谱矩阵无法求逆等缺陷, 显著降低计算效率。为解决上述问题, 本文提出了更适用于 Lamb 波检测的改进型最小功率无畸变波束形成算法。该算法在频域进行波束形成以解决频散对成像的影响, 并结合最小二乘递推法与对角加载法来进行谱矩阵求逆, 以提高计算效率。实验及仿真结果表明, 该算法能有效去除频散对损伤成像结果的影响, 从而有效地解决了传统波束形成算法的成像结果中存在伪影, 且成像分辨率低的问题; 同时解决了谱矩阵求逆困难的问题, 使得计算时间显著缩减。

关键词: 超声 Lamb 波; 最小功率无畸变; 最小二乘递推; 旁瓣伪影; 频散

中图分类号: TN92 **文献标志码:** A

Minimum Power Undistorted Beamforming Algorithm for Lamb Waves

CHU Zhaofei, LUO Ying, QIN Yun

(International Joint Research Center for Health Management on Key Structure of the High-End Equipment, Jiangsu University, Zhenjiang, 212000, China)

Abstract: When using Lamb waves to detect the damage of the plate structures, the classic minimum power distortion beamforming algorithm can obtain good damage imaging accuracy, but it still can not avoid the influence of dispersion effect on the imaging accuracy. And this algorithm has shortcomings such as complex spectral matrix inversion operation and inability to invert singular spectral matrix, which may reduce computing efficiency significantly. In order to solve the above problems, this paper proposes an improved minimum power distortion beamforming algorithm that is more suitable for Lamb waves detection. The proposed algorithm performs beamforming in the frequency domain to solve the dispersion effect on imaging result, meanwhile combines the least square recursion method and the diagonal loading method to invert the spectral matrix to improve computational efficiency. Experimental and simulation results show that the algorithm can effectively remove the impact of dispersion on the imaging results of damage, thereby effectively solving the problems of artifacts and low imaging resolution in the imaging results of traditional beamforming algorithm. This algorithm also solves the problem of difficulty in inversion of the spectral matrix, which reduces calculation time significantly.

Key words: ultrasonic Lamb wave; minimum power without distortion; recursion least squares; sidelobe artifact; dispersion

基金项目: 国家自然科学基金重点国际合作(11520101001)资助项目。

收稿日期: 2020-03-07; **修订日期:** 2020-10-16

引言

Lamb波相控阵监测技术一直是板状结构健康监测研究的热点,该技术利用Lamb波对结构中的裂纹等小损伤较为敏感这一特性,在结构中预置激励器/传感器阵列,阵列接收板中包含损伤特征信息的Lamb波信号并对其分析解读,进而可对结构损伤实施成像监测^[1],而相控阵成像所用算法的运算效率及成像精度对最终损伤评估有着重要影响,既有超声相控阵方法多采用时域延时叠加(Delay and sum, DAS)成像算法^[2-3],该类虽具有成像计算效率高的优点,但成像结果都会受到主瓣、旁瓣的影响,使得成像结果横向分辨率差,且存在旁瓣伪影。为此,最小功率无畸变(Minimum power without distortion response, MPDR)自适应波束形成算法在Lamb波损伤检测领域已得以应用^[4-7],其相较于传统时域DAS成像算法具有成像分辨率高,可抑制旁瓣伪影的优点,然MPDR算法在超声Lamb波损伤检测中的应用面临诸多挑战:(1)超声Lamb波所特有的频散特性将导致信号时域波形畸变,影响基于时域成像方法的精度;(2)自适应算法涉及谱矩阵求逆计算,直接进行求逆运算效率低,需耗费大量计算资源;(3)构成谱矩阵的有效信息量少,导致奇异矩阵无法求逆。

针对频散问题,骆英等^[8]根据频散关系对不同频率信号施加不同的相位延时,去除了频散对成像结果的影响。按此思路,可在频域上进行MPDR算法处理,如此有效解决了频散对MPDR算法的影响。

针对矩阵求逆计算困难的问题,已有文献提出最小二乘递推算法(Recursive least squares, RLS)来求解矩阵逆^[9-10],其可与MPDR算法相结合并进一步优化计算过程,提高效率。而对于奇异矩阵无法求逆的问题,亦有文献提出使用对角加载改进算法,提高算法稳健性^[11]。

综上,本文研究了适用于Lamb波损伤检测的MPDR算法,其利用自适应算法提高了损伤成像区域的横向分辨率,有效抑制旁瓣伪影;通过在频域上进行波束形成以消除频散对成像结果的影响;通过RLS算法及对角加载技术相结合以实现谱矩阵的求逆运算,优化了计算过程。

1 MPDR算法基本原理

1.1 压电阵列接收到的信号模型

用换能器主动激励Lamb波,使其在铝板中与损伤相互作用发生散射,再由接收压电阵列采集。由于本文考虑在频域上进行MPDR算法处理以去除频散对成像结果的影响,由此需对接收阵列所采集的频域信号进行建模,根据文献[6],接收阵元*i*所接收到的频域信号为

$$X_i(\omega) = \sum_{d=1}^D \sum_m \frac{1}{\sqrt{r_{ds}r_{di}}} R_{dm} T(\omega) e^{-jk_m(\omega)(r_{ds}+r_{di})} \quad (1)$$

该频域信号由*D*个空间散射源对应的多模态信号组成,其中*D*为空间散射点数目;*m*表示Lamb波传播模态;*r_{ds}*, *r_{di}*分别为信号激励源*s*到散射点*d*的距离,散射点*d*到阵元*i*的距离,其具体表示为:*r_{ds}* = |*z_d* - *z_s*|, *r_{di}* = |*z_d* - *z_i*|, *z_d*, *z_i*, *z_s*分别表示散射点*d*, 阵元*i*, 激励源*s*的空间位置;*T*(*ω*)表示激励信号的频域, *R_{dm}*表示散射点*d*对模态*m*的Lamb波的散射系数, *k_m*(*ω*)为模态*m*, 角频率*ω*所对应的波数,该波数可由文献[12]所研究的Rayleigh-Lamb方程求解得出。根据式(1)可推导出*M*个阵元所接收到频域信号矢量模型为

$$X(\omega) = \sum_{d=1}^D \sum_m S_d(\omega, m) v_m(\omega, z_d) \quad (2)$$

式中

$$S_d(\omega, m) = R_{dm} T(\omega) \quad (3)$$

$\mathbf{v}_m(\omega, \mathbf{z}_d)$ 为导向矢量,用于表征阵列接收到单模态、单散射源信号的相位及幅度差异特征,可表示为

$$\mathbf{v}_m(\omega, \mathbf{z}_d) = \begin{bmatrix} \frac{1}{\sqrt{r_{ds}r_{d1}}} e^{-jk_m(\omega)(r_{ds}+r_{d1})} \\ \frac{1}{\sqrt{r_{ds}r_{d2}}} e^{-jk_m(\omega)(r_{ds}+r_{d2})} \\ \vdots \\ \frac{1}{\sqrt{r_{ds}r_{dM}}} e^{-jk_m(\omega)(r_{ds}+r_{dM})} \end{bmatrix} \quad (4)$$

1.2 应用于Lamb损伤检测的MPDR权值求解

最小功率波束形式算法的最优加权向量是在保持对空间位置 $\mathbf{z}=(x, y)$ 处传来的Lamb波增益不变的条件下,使阵列输出的能量最小而得到的^[6]。

$$\begin{cases} \min E[|\mathbf{y}|^2] = \min \mathbf{w}^H E[\mathbf{X}\mathbf{X}^H] \mathbf{w} = \min \mathbf{w}^H \mathbf{R}_x \mathbf{w} \\ \text{s.t. } \mathbf{w}^H \mathbf{v}_m(\omega, \mathbf{z}) = 1 \end{cases} \quad (5)$$

式中 \mathbf{R}_x 为谱矩阵。利用拉格朗日数乘法可解得最优权值矢量为

$$\mathbf{w}_m(\omega, \mathbf{z}) = \frac{\mathbf{R}_x^{-1} \mathbf{v}_m(\omega, \mathbf{z})}{\mathbf{v}_m^H(\omega, \mathbf{z}) \mathbf{R}_x^{-1} \mathbf{v}_m(\omega, \mathbf{z})} \quad (6)$$

考虑到在单阵元发射、多阵元接收这种检测方案下,接收传感阵列只会接收到一组损伤信号,则对应的 $\mathbf{X}(\omega)$ 只有一次采样数据,由此谱矩阵可表示为

$$\bar{\mathbf{R}}_x = \mathbf{X}(\omega) \mathbf{X}^H(\omega) \quad (7)$$

然而 $\bar{\mathbf{R}}_x$ 只含一个特征向量,其为一奇异矩阵,为保证谱矩阵逆存在,使用对角加载技术,即令

$$\bar{\mathbf{R}}_x = \mathbf{X}(\omega) \mathbf{X}^H(\omega) + \sigma^2 \mathbf{I} \quad (8)$$

本文 σ^2 的取值参考文献[11]选取的方法,则

$$\text{std}(\text{diag}(\mathbf{R}_x)) \leq \sigma^2 < \text{trace}(\mathbf{R}_x)/M \quad (9)$$

且本文中令

$$\sigma^2 = [\text{std}(\text{diag}(\mathbf{R}_x)) + \text{trace}(\mathbf{R}_x)/M] / 2 \quad (10)$$

1.3 RLS递推求逆

在MPDR最优权值求解中,计算涉及到矩阵求逆运算,常规矩阵求逆采用伴随矩阵求逆法,其耗费极大的计算资源,降低了计算效率。为此本文引入了最小二乘法递推法(Recursion least squares, RLS),其通过迭代形式实现矩阵求逆运算,其具体形式如图1所示。

$\mathbf{X}(\omega, k)$ 表示对 $\mathbf{X}(\omega)$ 的第 k 次采样, $\mathbf{P}(k)$ 即为第 k 次递推得到的谱矩阵逆,而在本文中只需进行一次递推求逆,只需初始化 $\mathbf{P}(0)=\mathbf{I}/\sigma^2$,递推结果 $\mathbf{P}(1)$ 为所求解的逆,经递推后的所求矩阵逆为

$$\bar{\mathbf{R}}_x^{-1} = \frac{1}{\sigma^2} \left[\mathbf{I} - \frac{\mathbf{X}(\omega) \mathbf{X}^H(\omega)}{\sigma^2 + \mathbf{X}^H(\omega) \mathbf{X}(\omega)} \right] \quad (11)$$

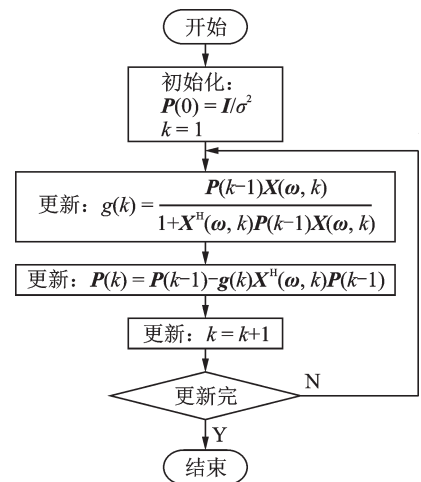


图1 RLS递推求逆流程图
Fig.1 RLS recursive inverse flow chart

而根据式(6),用 $a\bar{R}_x^{-1}$ (a 为一复数) 代替原 \bar{R}_x^{-1} 并不会使权值 w_m 发生改变,由此可对式(11)进一步简化,令

$$\hat{R}_x^{-1} = \sigma^2[\sigma^2 + X^H(\omega)X(\omega)]\bar{R}_x^{-1} = [\sigma^2 + X^H(\omega)X(\omega)]I - X(\omega)X^H(\omega) \quad (12)$$

使式(11)中的除法变为乘法,计算更易实现。

1.4 损伤成像指标求解及优化

根据求解的权值,位置 z 处的波束合成输出

$$Y(\omega, z) = \frac{v_m^H(\omega, z)\hat{R}_x^{-1}X(\omega)}{v_m^H(\omega, z)\hat{R}_x^{-1}v_m(\omega, z)} \quad (13)$$

注意到式(13)计算空间中任意位置的波束合成值都需计算 $\hat{R}_x^{-1}X(\omega)$,可推导为

$$\hat{R}_x^{-1}X(\omega) = [\sigma^2 + X^H(\omega)X(\omega)]X(\omega) - X(\omega)X^H(\omega)X(\omega) = \sigma^2X(\omega) \quad (14)$$

如此式(13)可简化为

$$Y(\omega, z) = \frac{\sigma^2 v_m^H(\omega, z)X(\omega)}{v_m^H(\omega, z)\hat{R}_x^{-1}v_m(\omega, z)} \quad (15)$$

可得式(15)比式(13)少计算 M^2-1 次复数乘法, M^2-M 次复数加法 (M 表示阵元数目)。频域波束合成求解后,即可整合 z 点所有频域波束合成值 $Y(\omega, z)$ 进行逆傅里叶变换求取 z 处的成像指标

$$I(z) = \frac{1}{2\pi} \left| \int_0^{+\infty} Y(\omega, z) e^{j\omega t} d\omega \right|_{t=0} \quad (16)$$

式(16)只对 $Y(\omega, z)$ 的正频率部分进行了逆傅里叶变换,目的是取逆傅里叶变换结果的包络信号,且以零时刻幅值作为 z 处成像指标输出。

1.5 成像流程

前面的部分详细描述了成像所用到的方法,其具体成像过程如下:

- (1) 阵列采集 Lamb 波信号并从中剔除直达波及边界反射信号得到损伤散射信号。
- (2) 将信号傅里叶变换到频域,得到频域采样数据 $X(\omega)$ 。
- (3) 进行谱矩阵求逆运算(如式(12)所示)。
- (4) 对位置 z 求取频域波束合成值(如式(15)所示)。
- (5) 重复步骤(3)、(4)直至所有频率点及位置点的频域波束合成值求解完成。
- (6) 求取所有位置的成像指标(如式(16)所示)。

2 成像算法的 COMSOL 仿真验证

为检验 MPDR 算法特性,在 Comsol 平台设置如图 2(a) 所示铝板结构模型,材料参数如表 1,激励源位于铝板中心,以 150 kHz 中心频率的五峰波作为检测波,采样点间隔为 3.86 mm,其为 150 kHz 频率下 A_0 模态对应的半波长,取离面方向的结构位移量作为信号输出,最终仿真出的信号如图 2(b) 所示,其损伤散射信号部分经放大后如图 2(c) 所示,其中 A_0 模态所引起的主要为离面方向,而 S_0 模态所引起的主要为面内位移^[13],因此离面方向的损伤散射信号以 A_0 模态为主。分别利用 MPDR 算法、频域 DAS 算法及时域 DAS 算法进行成像处理,其最终成像结果如图 3 所示。为评估成像结果,引入阵列性能指标(Array performance indicator, API)^[14],该指标定义为损伤处幅值最大值下降到 50% 之内所有像素点的面积 S 。

表 1 仿真材料相关参数

Table 1 Simulation material related parameters				
杨氏模量/ GPa	泊松比	密度/ (kg·m ⁻³)	横波波速/ (m·s ⁻¹)	纵波波速/ (m·s ⁻¹)
70	0.33	2 700	3 160	6 370

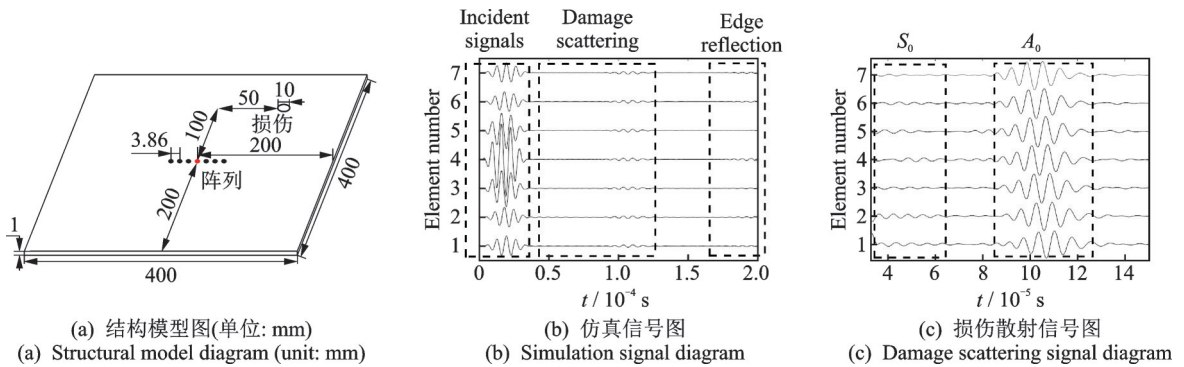


图2 仿真示意图

Fig.2 Simulation diagram

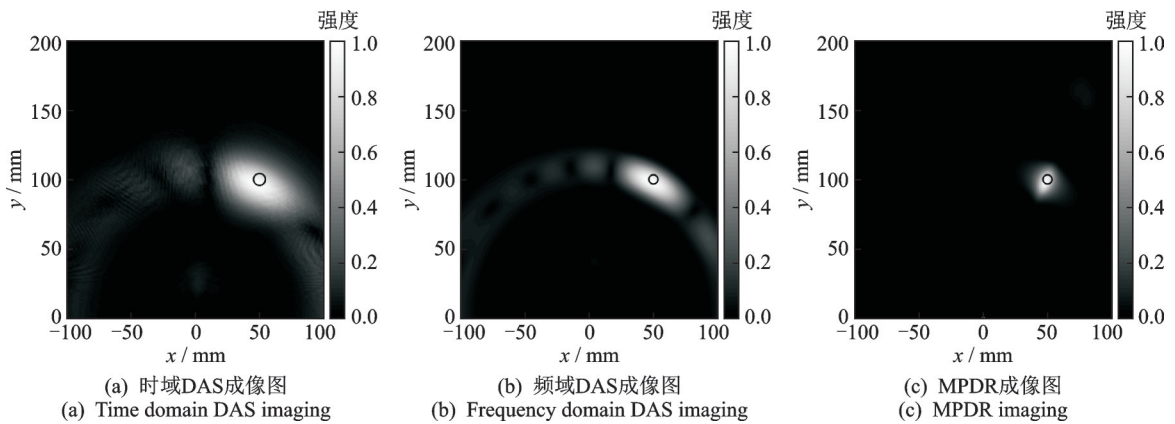


图3 仿真成像结果图

Fig.3 Simulation imaging results

$$API = \frac{S}{\lambda^2} \quad (17)$$

此处 λ 取激励信号中心频率下 A_0 模态对应的波长,API越小,说明成像分辨率越高。对比图3中各个成像结果的API指数以及损伤位置准确度可得结果如表2所示,经分析可得如下结果:

(1)MPDR损伤区域径向分辨率与相较于时域DAS损伤区域径向分辨率有了显著提高,分析原因在于MPDR算法能去除频散对成像结果的影响,提高了径向分辨率亦提高了损伤定位准确度。

(2)MPDR成像结果的损伤区域横向分辨率显著优于时域及频域DAS算法,且MPDR算法可有效抑制时域及频域DAS算法中的旁瓣伪影,分析原因为MPDR算法可有效抑制非扫查方位的回波信号,保证扫查结果接近真实情况,有效提高了损伤区域的横向分辨率,且抑制了旁瓣伪影。

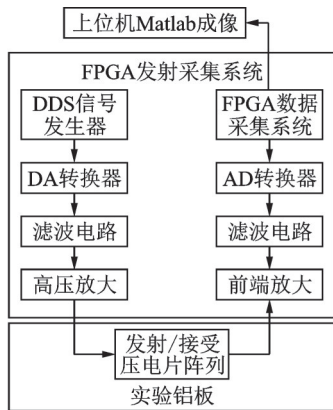
3 实验验证

为进一步验证MPDR算法的特性,特搭建如图4所示实验平台。实验中所用的铝板尺寸为1 000 mm×1 000 mm×1 mm,以铝板中心为坐标原点,黏贴7个间隔为8 mm的压电片(型号APC851,

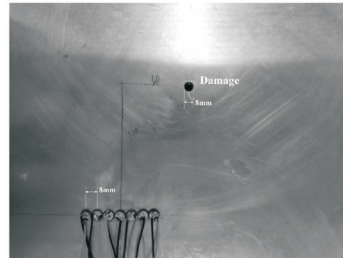
表2 仿真成像结果对比

Table 2 Comparison of simulation imaging results

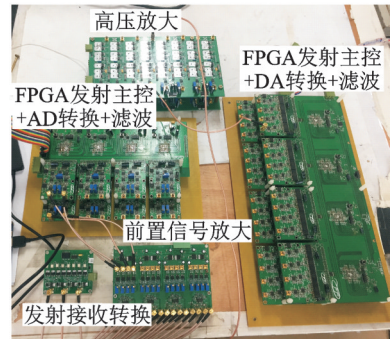
项目	损伤位置/mm			API
	成像方法	检测结果	绝对误差	
(50,100)	时域DAS	(52, 102)	(-2, -2)	19.38
	频域DAS	(49, 99)	(1, 1)	10.22
	MPDR	(49, 99)	(1, 1)	2.57



(a) 实验平台结构
(a) Structure of experimental platform



(b) 压电阵列布置图
(b) PZT array layout



(c) 实验所用仪器
(c) Experimental instrument

图4 实验平台图

Fig.4 Experimental platform

直径7 mm,厚度0.2 mm)位于(-24 mm, 0 mm)~(24 mm, 0 mm)范围内,预制直径4 mm圆形通孔损伤位于坐标(50 mm, 100 mm),压电阵列布置实物如图4(b),具体实验步骤如下:

(1)利用信号发生模块产生100 kHz五峰波信号,经DA转换、滤波及高压放大后产生Lamb波信号,该发射压电片位置位于中心原点。

(2)Lamb波信号发射之后发射压电片转换为接收功能,接收阵列开始采集信号,阵列将采集到的微弱损伤散射信号经由前端放大、滤波电路、AD转换传输给FPGA数据采集系统。

(3)FPGA数据采集系统将采集到的数据打包通过串口传输至上位机中。

(4)上位机利用Matlab软件将采集到的信号以 A_0 模式为基准进行成像处理并显示。

最终实验所采集的损伤信号如图5所示,可以看出损伤散射信号以 A_0 模式为主,而 S_0 模式信号微弱,难以区分,原因在于 A_0 模式导致的结构位移主要在离面方向,而本实验所使用的压电晶片对于离面位移更加敏感,根据此损伤散射信号,最终的损伤成像结果如图6所示,对比成像结果的API指数以及损伤位置准确度可得结果见表3。

可得MPDR算法的成像结果显著优于时域及频域DAS算法,MPDR算法的成像有效区域相较于时域DAS算法成像有效区域面积缩小了56.3%;相较于频域DAS算法的有效区域面积缩小了54.8%。此外MPDR成像结果有效抑制了旁瓣伪影,有效提高了损伤区域的横向分辨率,此外通过在频域上实施MPDR算法,有效去除了频散对成像结果的影响,提高了成像结果的径向分辨率。以上结论与仿真结果保持一致,进一步验证了本文所研究

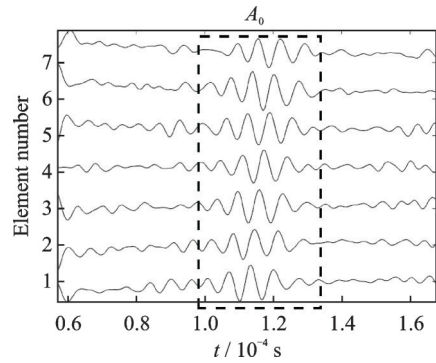


图5 实验损伤散射信号

Fig.5 Experimental damage scattering signal

表3 实验结果对比

Table 3 Comparison of experimental results

项目	损伤位置/mm			API
	成像方法	检测结果	绝对误差	
(50,100)	时域DAS	(47, 96)	(3, 4)	6.645
	频域DAS	(46, 95)	(4, 5)	6.423
	MPDR	(46, 96)	(4, 4)	2.901

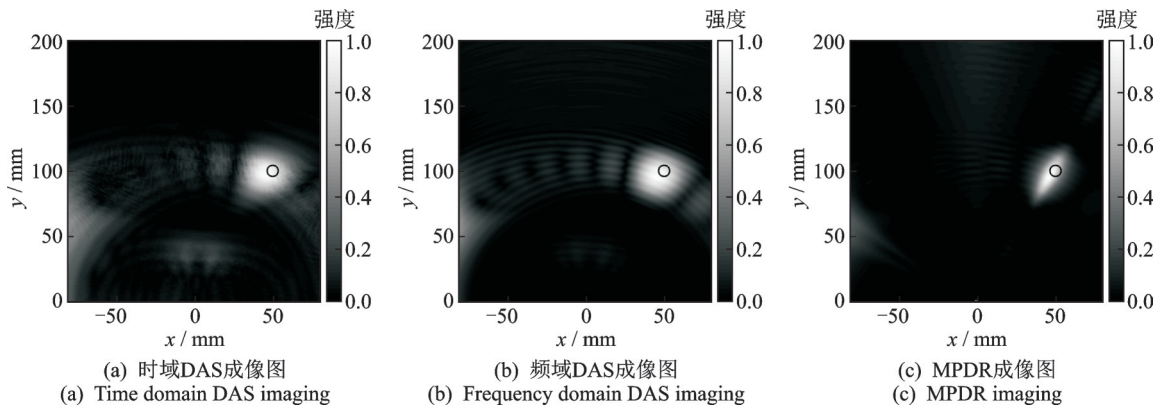


图6 实验成像结果图

Fig.6 Experimental imaging results

MPDR算法的优异性能。

为分析 RLS 递推及算法优化对成像效率的影响,在 Matlab 中分别利用优化后的 RLS 求逆 MPDR 算法以及伴随矩阵求逆 MPDR 算法进行成像,其成像过程所耗费时间如表 4 所示。对比发现,优化后的 RLS 求逆 MPDR 算法相较于伴随矩阵求逆 MPDR 算法提高了 61.4% 的计算效率。

表 4 成像耗费时间对比

Table 4 Comparison of time consuming on imaging

成像所用算法	优化 RLS 求逆 MPDR 算法	伴随矩阵求逆 MPDR 算法
耗费时间/s	86	223

4 结束语

本文提出了一种适用于 Lamb 波损伤检测的 MPDR 波束形成算法,该算法通过最小二乘递推与对角加载相结合的方式实现了谱矩阵求逆运算,通过变换到频域处理得以消除频散对成像结果的影响。通过仿真与实验表明,与时域 DAS 算法相比,本文所研究的 MPDR 算法能有效提高成像分辨率,有效抑制旁瓣伪影,去除频散对成像结果的影响,提高最终损伤评估准确度,同时对 MPDR 的优化改进使得计算量降低,提高了计算效率。本文所研究的超声 Lamb 波相控阵自适应成像方法在金属板状结构的成像检测精度和检测效率方面得到改进,相关成果有望为进一步优化发展自适应波束形成算法提供新方法,也有望为超声 Lamb 波相控阵损伤检测的实际工程运用提供理论和方法基础。

参考文献:

- [1] 何存富, 郑明方, 吕炎, 等. 超声导波检测技术的发展、应用与挑战[J]. 仪器仪表学报, 2016, 37(8): 1713-1735.
HE Cunfu, ZHENG Mingfang, LYU Yan, et al. Development, application and challenges of ultrasonic guided wave detection technology [J]. Journal of Chinese Instrumentation, 2016, 37 (8): 1713-1735.
- [2] LIANG Z, LI P H, JING L. Damage imaging of composite structures using multipath scattering Lamb waves [J]. Composite Structures, 2019, 216: 331-339.
- [3] XU C, YANG Z, QIAO B, et al. Sparse estimation of propagation distances in Lamb wave inspection[J]. Measurement Science and Technology, 2019, 30(5): 1-12.
- [4] TIAN Z H, YU LY, SUN X Y, et al. Damage localization with fiber Bragg grating Lamb wave sensing through adaptive phased array imaging[J]. Structural Health Monitoring, 2019, 18(1): 334-344.
- [5] TIAN Z H, HOWDEN S, MA Z Y, et al. Pulsed laser-scanning laser Doppler vibrometer (PL-SLDV) phased arrays for damage detection in aluminum plates[J]. Mechanical Systems and Signal Processing, 2019, 121: 158-170.

- [6] ENGHOLM M, STEPINSKI T, OLOFSSON T. Imaging and suppression of Lamb modes using adaptive beamforming[J]. Smart Materials & Structures, 2011, 20(8): 085024.
- [7] ASL B M, DEYLAMI A M. A low complexity minimum variance beamformer for ultrasound imaging using dominant mode rejection[J]. Ultrasonics, 2018, 85: 49-60.
- [8] 骆英,范敏,徐桂东,等.Lamb波稀疏阵列CFRP层合板损伤成像检测[J].固体力学报,2018,39(4):403-411.
LUO Ying, FAN Min, XU Guidong, et al. Damage imaging detection of CFRP laminates in lamb wave sparse arrays[J]. Chinese Journal of Solid Mechanics, 2018, 39(4): 403-411.
- [9] FARES D, AHMED L N, ABDELMALEK K, et al. An approved superiority of real-time induction machine parameter estimation operating in self-excited generating mode versus motoring mode using the linear RLS algorithm: Ideas & applications [J]. International Journal of Electrical Power and Energy Systems, 2020, 118: 725.
- [10] 董浩,丛伟杰,商锋.基于RLS算法的阵列天线抗干扰性能研究[J].宇航计测技术,2020,40(1):79-84.
DONG Hao, CONG Weijie, SHANG Feng. Research on anti-jamming performance of array antennas based on RLS algorithm [J]. Aerospace Measurement Technology, 2020, 40(1): 79-84.
- [11] 许琴.超声成像中波束形成算法研究[D].重庆:重庆大学,2012.
XU Qin. Research on beamforming algorithm in ultrasound imaging [D]. Chongqing: Chongqing University, 2012.
- [12] 许凯亮,张正罡,刘丹,等.高分辨率超声Lamb波频散曲线测量与板厚估计[J].数据采集与处理,2017,32(2):286-292.
XU Kailiang, ZHANG Zhengang, LIU Dan, et al. High-resolution ultrasonic Lamb wave dispersion curve measurement and plate thickness estimation [J]. Data Acquisition and Processing, 2017, 32 (2): 286-292.
- [13] ENGHOLM S. Adaptive beamforming for array imaging of plate structures using lamb waves[J]. Ultrasonics Ferroelectrics & Frequency Control IEEE Transactions on, 2010, 57(12): 2712-2724.
- [14] 温姣玲.航空复合材料层压板钻孔分层缺陷相控阵检测方法研究[D].南昌:南昌航空大学,2017.
WEN Jiaoling. Research on phased array inspection method for delamination defects of aerospace composite laminates[D]. Nanchang: Nanchang Hangkong University, 2017.

作者简介:



褚兆飞(1992-),男,硕士研究生,研究方向:无损检测,E-mail:825414066@qq.com。



骆英(1964-),男,教授,博士生导师,研究方向:结构健康管理、基于挠曲电效应的应变梯度传感器、智能压电传感与驱动器技术。



秦云(1972-),男,副教授,硕士生导师,研究方向:控制工程、自动化装置。

(编辑:陈珺)