

DOI: 10.19650/j.cnki.cjsi.J2108407

基于 Lamb 波的数据传输与缺陷检测同步实现方法*

徐云飞¹, 孙永顺¹, 丁晓喜^{1,2}, 黄文彬^{1,2}

(1. 重庆大学机械与运载工程学院 重庆 400044; 2. 重庆大学机械传动国家重点实验室 重庆 400044)

摘要:在结构健康监测领域,超声导波相对于体波具有传输距离远、覆盖范围大、检测成本低的优点。提出了一种基于 Lamb 波的数据传输与缺陷检测同步实现方法,实现了超声系统的多功能复用。通过理论仿真与扫频实验验证了 Lamb 波模式调制理论,使用压电晶片主动传感器在铝板上以 500 kHz 的中心频率激发出 S_0 模式 Lamb 波进行数据传输和缺陷检测。针对 Lamb 波边界反射引起的码间串扰问题,采用移不变稀疏编码方法进行信息恢复,在具有反射边界的铝板上成功实现 100 kbps 的信息传输速率,并且误码率为 0。同时,利用移不变稀疏编码中的原子信号进行结构缺陷检测,根据合成孔径聚焦技术实现了缺陷的准确定位,定位误差小于 0.2%。

关键词: 结构健康监测; Lamb 波; 数据传输; 稀疏编码; 缺陷检测

中图分类号: TH878 **文献标识码:** A **国家标准学科分类代码:** 460.99

A synchronous implementation method of data transmission and defect detection based on Lamb waves

Xu Yunfei¹, Sun Yongshun¹, Ding Xiaoxi^{1,2}, Huang Wenbin^{1,2}

(1. College of Mechanical and Vehicle Engineering, Chongqing University, Chongqing 400044, China;

2. State Key Laboratory of Mechanical Transmission, Chongqing University, Chongqing 400044, China)

Abstract: In the field of structure health monitoring, compared to body waves, ultrasonic guided waves have advantages of long transmission distance, large coverage, and low inspection cost. This article proposes a synchronous implementation method of data transmission and defect detection based on Lamb waves, which realizes the multi-functional multiplexing of the ultrasound system. The Lamb wave mode tuning theory is evaluated by the theoretical simulation and frequency sweeping experiments. A piezoelectric wafer active sensor is used to excite S_0 mode Lamb waves on the aluminum plate at a center frequency of 500 kHz for data transmission and defect detection. To solve the cross-talk problem caused by Lamb wave boundary reflection, a shift-invariant sparse coding method is used to recover the information. The information transmission rate of 100 kbps is successfully achieved on the aluminum plate with reflected boundary, and the bit error rate is 0. Meanwhile, atomic signals in shift-invariant sparse coding are used to detect structural defects. The precise location of defects is realized according to synthetic aperture focusing technology, and the positioning error is less than 0.2%.

Keywords: structural health monitoring; Lamb waves; data transmission; sparse coding; defect detection

0 引 言

超声体波、射线、涡流、磁漏等多种健康评估技术已被广泛地应用于结构健康监测 (structural health monitoring, SHM) 领域。然而,使用这些技术监测管道、船舶和飞机等大型结构往往比较缓慢和繁琐^[1]。基于超

声导波的结构健康监测可以很好地解决传统技术的这些弊端,其中 Lamb 波作为一种常见的超声导波更是得到广泛地应用。

超声导波具如下特点:1) 传输距离远,能量损耗低,可以实现高灵敏度的远距离检测;2) 具有频散和多模态特性,可以通过选择合适的频率激发特定的模态,以识别和定位出不同类型的缺陷;3) 基于超声导波的 SHM 过程

收稿日期:2021-08-13 Received Date: 2021-08-13

* 基金项目:国家自然科学基金(51975065)项目资助

简单、快速,且成本较低^[2]。正是这些优点使得超声导波成为目前 SHM 领域的研究热点之一。

而在金属薄壁结构的健康监测方面,特别是封闭箱体结构,超声导波更是具有天然优势。传统的结构健康监测都是利用穿孔走线的方式进行供能和数据传输,这无疑会破坏结构的完整性从而带来不必要的工程问题。而利用超声导波进行数据传输,只需要在关键节点布置传感器,即可将结构本身作为物理通信媒介,实现节点之间共享信息。结合超声导波传输距离远,同时可用于定位不同类型缺陷的特点,因此基于超声导波的数据传输和缺陷检测在近年来更是得到了广泛的关注。

在基于超声导波的数据传输方面,Kexel 等^[3-5]通过互相关的方式成功实现了数据通信,并且通信速率达到了 112 kbps。Jin 等^[6]通过时间反转脉冲位置调制技术实现了超声导波在钢管上的可靠数据传输。Zonzini 等^[7]利用码分多址调制技术对信号的多径衰落、频散以及多模态带来的不利影响进行了消除。Kexel 等^[8-9]分析了环境因素对超声导波通信效果的影响,并研发出低功耗、多输入、多输出的导波通信电路。Tang 等^[10]构建了一种声耦合传感器网络,能够通过 FPGA 实现基于超声导波的数据遥测。

在基于超声导波的缺陷检测方面,Cawley 等^[11]设计的压电换能器阵列可以检测到钢轨不同部位的人工损伤,证明了使用超声导波检测钢轨损伤的可行性。焦敬品等^[12]提出了一种板结构 Lamb 阵列复合成像方法,可以很好地实现板中多个裂纹方向识别,其角度测量误差小于 20%。李震等^[13]提出了一种基于时间反转聚焦的缺陷回波增益新方法,可以用于提高导波检测能力。王彭等^[14]提出了一种利用钢轨裂缝反射系数和波幅分解的方法,在长 2.8 m 的含有裂缝的钢轨上能实现精确定位。朱力强等^[15]提出了一种基于超声导波实现无缝线路完整性检测的技术方案,实现了 2 km 区间的无缝线路钢轨完整性的在线检测。

本文的创新点主要包括两点,一是首次将移不变稀疏编码应用于 Lamb 波数据传输领域,二是可以在一套装置中同时实现数据传输与缺陷检测两种功能。在数据传输方面,移不变稀疏编码(shift-invariant sparse coding, SISC)是通过计算出的稀疏系数与传输的原始序列信息之间的对应关系来实现对原始序列信息的恢复。在进行缺陷检测时,本文使用了合成孔径聚焦技术(synthetic aperture focusing technique, SAFT),通过圆形压电晶片主动传感器(piezoelectric wafer active sensors, PWAS)阵列接收来自缺陷的反射信号从而对缺陷进行成像定位。

1 理论分析

1.1 Lamb 波模态调制

Lamb 波作为一种板内导波,具有显著的频散特性,其对称与反对称模式的速度取决于频率与板厚的乘积^[16]。随着频厚积的增大,板内存在的 Lamb 波的模态数量也会增加。通过求解 Rayleigh-Lamb 方程,可以得到 1.5 mm 厚铝板内的 Lamb 波相速度与群速度的频散曲线,如图 1 所示。

在给定的激励频率下,压电换能器可以激发出多个不同的 Lamb 波模态,而这些模态组合起来将会导致接收到的波形极其复杂,这将会给后期的数据处理带来不利的影响。因此,有必要研究 Lamb 波的调制理论,通过理论推导与实验验证的方式,选择合适的频率激发出特定模态的 Lamb 波。

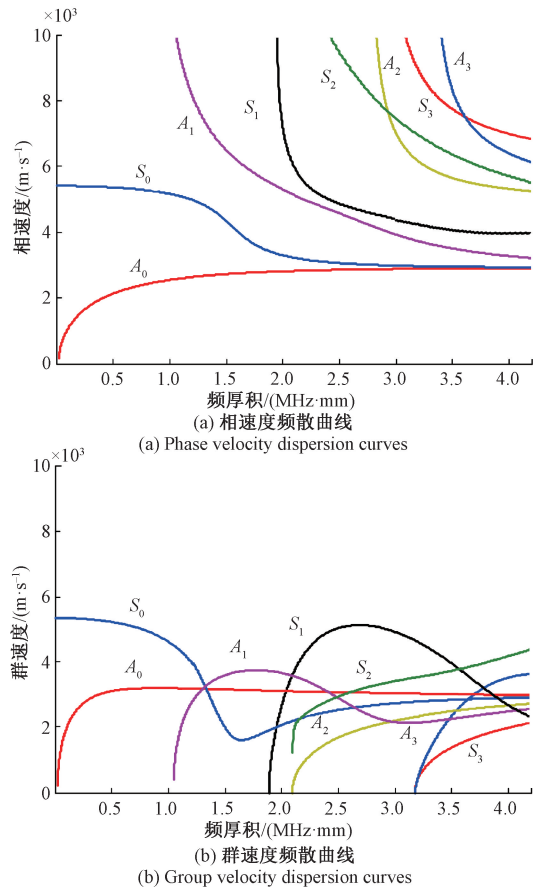


图 1 1.5 mm 厚铝板内的 Lamb 波频散曲线
Fig. 1 Dispersion curves of the Lamb waves within a 1.5 mm aluminum plate

本文利用 PWAS 在铝板上激励产生 Lamb 波。关于理想粘贴条件下圆形 PWAS 的 Lamb 波模态调制理论, Giurgiutiu 等^[16]已经做了相应的推导。基于留数定理,可

以得到圆形 PWAS 的径向位移响应与径向应变响应:

$$u_r(r) \Big|_{z=d} = -\pi i \frac{a^2 \tau_a}{2\mu} \sum_{\xi^S} \frac{J_1(\xi^S a) N_S(\xi^S)}{D'_S(\xi^S_n)} H_1^{(1)}(\xi^S r) \times e^{-i\omega t} - \pi i \frac{a^2 \tau_a}{2\mu} \sum_{\xi^A} \frac{J_1(\xi^A a) N_A(\xi^A)}{D'_A(\xi^A)} H_1^{(1)}(\xi^A r) e^{-i\omega t} \quad (1)$$

$$\varepsilon_r(r) \Big|_{z=d} = -\pi i \frac{a^2 \tau_a}{2\mu} e^{-i\omega t} \sum_{\xi^S} \frac{J_1(\xi^S a) N_S(\xi^S)}{D'_S(\xi^S)} \times \left[\xi^S H_0^{(1)}(\xi^S r) - \frac{H_1^{(1)}(\xi^S r)}{r} \right] - \pi i \frac{a^2 \tau_a}{2\mu} e^{-i\omega t} \times \sum_{\xi^A} \frac{J_1(\xi^A a) N_A(\xi^A)}{D'_A(\xi^A)} \left[\xi^A H_0^{(1)}(\xi^A r) - \frac{H_1^{(1)}(\xi^A r)}{r} \right] \quad (2)$$

其中, τ_a 代表理想粘贴条件下的切应力; a 是圆形 PWAS 长度的一半; μ 是拉梅常数。 J_1 是 1 阶第一类贝塞尔函数, $H_1^{(1)}$ 是 1 阶第一类 Hankel 函数。式中的求和运算包含了激励频率为 ω 时板内存在的所有对称模式波数 ξ^S 和反对称模式波数 ξ^A 。 D_S 和 N_S 是关于对称模式的参数, D_A 和 N_A 是关于反对称模式的参数^[16]。

1.2 SISC 理论

稀疏编码 (sparse coding, SC) 的概念起源于神经生物学中关于视觉神经网络的研究^[17], 它可以表述为生物视觉系统对于目标进行感知时, 仅有少量神经元被激活, 即用最少的神经元来表示目标最本质的特征, 它是对于冗余信息进行表示的一种有效方法。

根据稀疏分解理论可知, 给定输入信号 $\mathbf{x} = [x_1, x_2, \dots, x_M]^T \in \mathbf{R}^M$ 总可以被表示为一组基函数的线性组合加上噪声的形式^[18]:

$$\mathbf{x} = \mathbf{D}\mathbf{s} + \boldsymbol{\varepsilon} = \sum_{k=1}^K \mathbf{d}_k s_k + \boldsymbol{\varepsilon} \quad (3)$$

其中, $\mathbf{D} = [\mathbf{d}_1, \mathbf{d}_2, \dots, \mathbf{d}_K] \in \mathbf{R}^{M \times K}$ 是一个 $M \times K$ 维的过完备字典, $\mathbf{d}_k \in \mathbf{R}^M, k = 1, 2, \dots, K$ 是构成字典的原子信号, $\mathbf{s} = [s_1, s_2, \dots, s_K]^T \in \mathbf{R}^K$ 是输入信号 x_i 的稀疏表示, 其中仅有少量元素非零, $\boldsymbol{\varepsilon} \in \mathbf{R}^M$ 是噪声项。

SC 模型可以规范的表示为下式:

$$\min \|\mathbf{s}\|_0, \text{ s. t. } \|\mathbf{x} - \mathbf{D}\mathbf{s}\| \leq \gamma \quad (4)$$

式中: 引入零阶范数 $\|\mathbf{s}\|_0$ 来对稀疏向量中非零元素的数目进行度量; γ 是容差极限, 它表示的是重构信号与给定信号之间的重构误差。SC 的整个过程是在过完备字典 \mathbf{D} 已知的条件下进行的, 在固定字典 \mathbf{D} 和输入信号 \mathbf{x} 的情况下, 根据 SC 的模型, 就可以对稀疏向量 \mathbf{s} 进行求解。

SISC 作为传统 SC 的拓展^[19], 适用于同一基函数在时域信号的不同时间点重复出现的情形。在这种情形下, 信号可以被表示为基函数与移位算子乘积的叠加, 因此可以将给定输入信号以卷积的形式进行表示。将前文给定的一维输入信号 \mathbf{x} 扩展为向量组的形式

$\mathbf{X} = [\mathbf{x}_1, \mathbf{x}_2, \dots, \mathbf{x}_m]$, 其中 $\mathbf{x}_i \in \mathbf{R}^p, i = 1, 2, \dots, m$, 重新定义过完备字典为 $\mathbf{D} = [\mathbf{d}_1, \mathbf{d}_2, \dots, \mathbf{d}_k]$, 其中 $\mathbf{d}_j \in \mathbf{R}^q, j = 1, 2, \dots, k$, 则用卷积的形式可将输入信号表示为:

$$\mathbf{x}_i = \sum_{j=1}^k \mathbf{d}_j * \mathbf{s}_{i,j} + \boldsymbol{\varepsilon}_i \quad (5)$$

其中, $\mathbf{s}_{i,j} \in \mathbf{R}^{p-q+1}$ 为卷积系数, 它标记的是基函数在时域信号上出现的时间。由于基函数在连续时间上具有移不变的特点, 故可以仅通过少数几个基函数以及非零系数就可以实现对输入信号的重构。

关于基函数与系数的求解, 本文采用后验概率最大 (maximum-a-posteriori estimates, MAP) 的方法对模型进行优化^[20], 可以得到其代价函数:

$$J_4(\mathbf{D}, \mathbf{s}) = \min_{\mathbf{D}, \mathbf{s}} \sum_{i=1}^m \left\| \mathbf{x}_i - \sum_{j=1}^k \mathbf{d}_j * \mathbf{s}_{i,j} \right\|_2^2 + \lambda \sum_{i,j} \|\mathbf{s}_{i,j}\|_1, \quad (\|\mathbf{d}_j\|_2^2 \leq 1, 1 \leq j \leq k) \quad (6)$$

代价函数主要由两部分组成, 一是重构误差项, 二是稀疏度优化项。其中 λ 是稀疏惩罚系数, 由它决定稀疏度优化项在整个代价函数中的贡献程度, 约束条件是为了防止求解的原子信号太大而稀疏系数太小。本文中采集单脉冲信号作为字典 \mathbf{D} 的原子信号, 然后利用 LBGFs 梯度下降法来对稀疏系数进行求解^[8], 完成原始编码信息的恢复。

1.3 缺陷成像

SAFT 是采用“小孔径合成”来获得高空间分辨率的超声检测技术。单个聚焦探头的孔径是有限的, 同时其聚焦点也是固定的。采用多个小孔径探头合成大孔径阵列, 可以弥补上述不足之处^[21]。在基于 Lamb 波的 SHM 中, 采用 SAFT 的目的是定位出缺陷的位置。基于 Lamb 波的 SAFT 原理如图 2 所示。

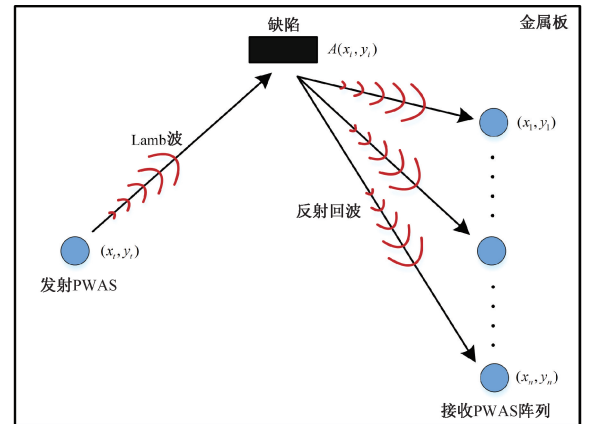
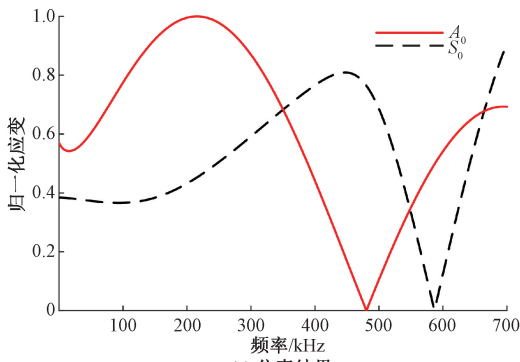


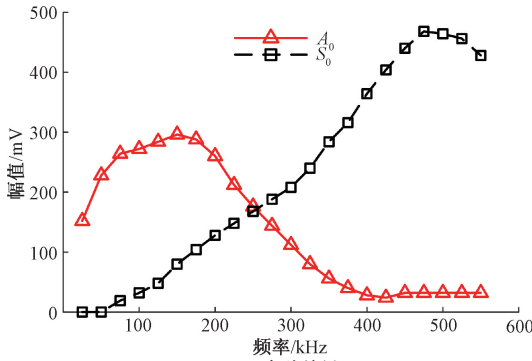
图2 基于 Lamb 波的 SAFT 原理

Fig. 2 SAFT principle based on Lamb waves

由于缺陷的存在, 入射 Lamb 波将在缺陷处产生反射回波信号并传播到接收端。假设检测区域内所有点均



(a) 仿真结果
(a) Simulation results



(b) 实验结果
(b) Experimental results

图5 Lamb波调制

Fig. 5 Lamb waves modulation

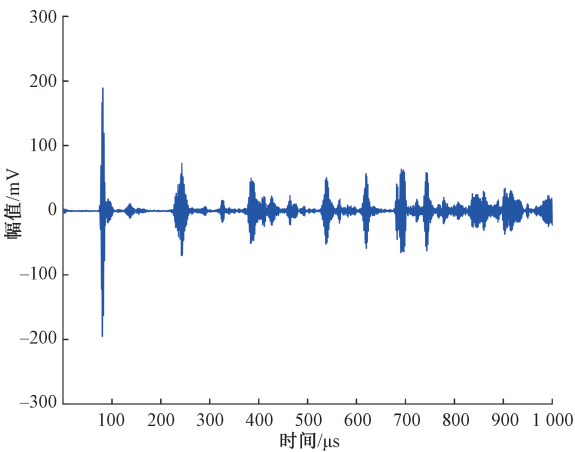
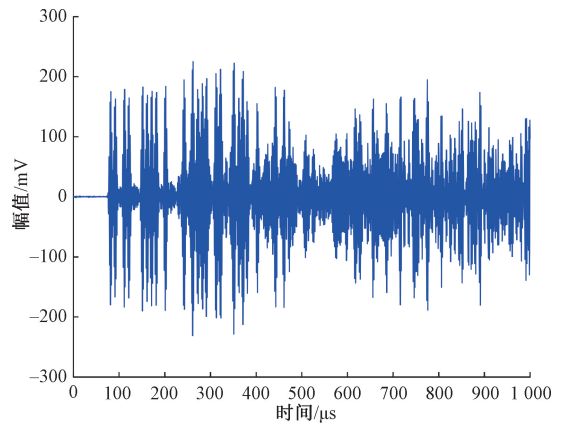


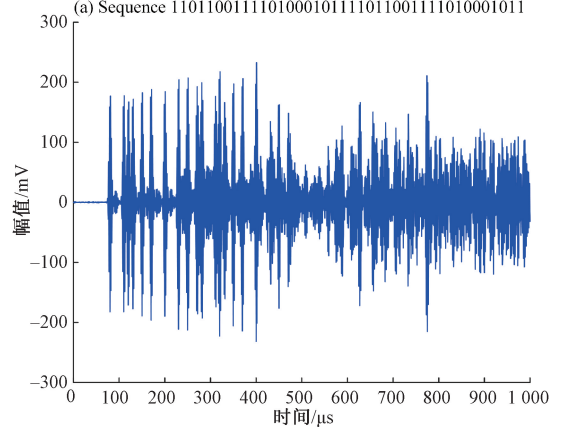
图6 参考信号波形

Fig. 6 Reference signal waveform

从图6中可以看出,由于多路径传输和频散现象的原因,接收到的信号会有多个峰值,并且会出现除 S_0 外的其他 Lamb 波模态。而且当编码信息序列较长时,必然会出现直达信号与反射信号相互叠加的情况,这一现象在图7中可以明显看出。正是由于这些原因的出现,利用互相关方法恢复原始编码信息序列就会存在一定的困难。其主要体现在3个方面:1)需要对互相关函数执



(a) 序列1101100111101000101111011001111010001011



(b) 序列1001110101001001010110011101010010010101

(b) Sequence 1001110101001001010110011101010010010101

图7 编码序列波形

Fig. 7 Code sequence waveform

行包络、峰值提取等数据处理操作,序列恢复过程更加繁琐;2)需要利用统计的方法选择出最佳阈值进行阈值判断,这需要足够大的数据量进行支撑;3)需要人为找到编码信息序列的起点并对时间域进行划分,不利于准确且快速地分析出原始序列信息^[3]。

SISC 则可以有效解决这些问题,由于作为基函数的参考信号中已包含所有的结构信息,而接收到的编码序列信号只是基函数在时间域上的平移和累加求和,因此,通过代价函数以及 LBGFs 梯度下降法对稀疏系数进行求解,就可以准确判断出信息中“1”出现的位置。利用 SISC 恢复的编码序列信息如图8所示。

从图8可以观察到,稀疏系数中的非零项与零项在幅值上差别很大,阈值确定不需要通过复杂的统计计算。而且稀疏编码非零项在时间域上出现的位置也是富有规律的,几乎每个系数都出现在预先划分的时间间隔内,而时间间隔是通过所发送 tone-burst 信号的时域长度来确定的,这就可以实现时间间隔的自动划分。在编码信息序列起点的定位方面,本文采用信息“1”作

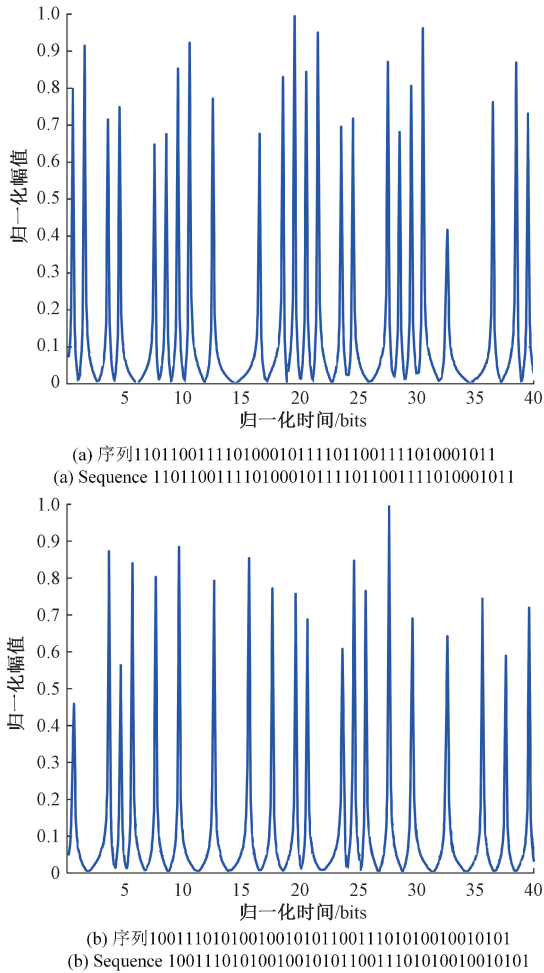


图 8 SISC 恢复结果
Fig. 8 SISC recovery results

为起点标志位,即每个编码序列都是以“1”开始。在信号处理时,只需要以参考信号与编码序列信号中的第一个峰值为参考,按照一定规律对两个信号进行截取,即可实现序列起点的准确定位,因此不会存在因系数位置偏差而导致恢复出的编码信息有乱码的现象。综上所述,利用 SISC 来实现 Lamb 波数据传输不仅在数据处理上更方便,而且恢复出来的结果也更直观、更准确。通过使用该方法,Lamb 波数据传输速率可以达到 100 kbps,且误码率为 0。

2.4 缺陷成像实验

为了验证系统的缺陷成像效果,在铝板上预先设置了一个边长为 4 mm 的方孔,发射端使用一个 PWAS 激励 Lamb 波,接收端使用 9 个 PWAS 合成孔径阵列以接收 Lamb 波进行缺陷成像实验。基于基线减法^[22],将铝板无缺陷时 PWAS 接收到的信号作为基线,用铝板有缺陷时 PWAS 接收到的信号减去基线,得到缺陷反射信号如图 9 所示。

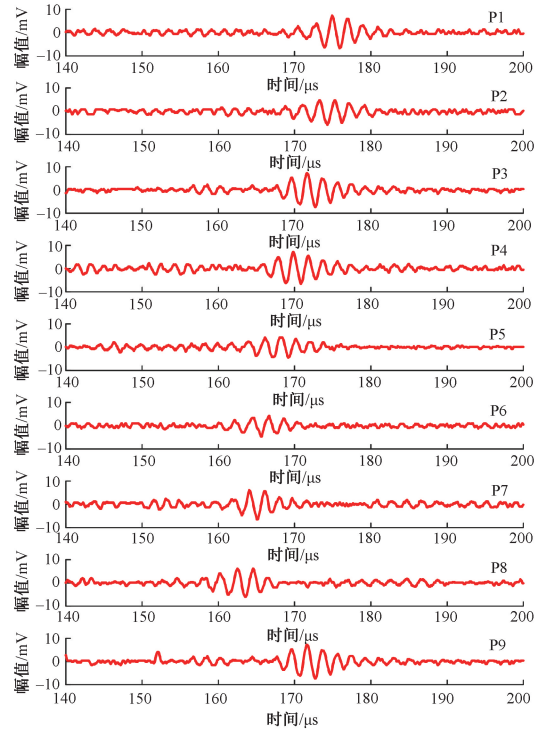


图 9 反射信号
Fig. 9 Reflection signal

使用极坐标(r, φ)将检测区域离散化,利用 SAFT 对缺陷进行成像,如图 10 所示。阴影区域代表扫描的范围,幅值最大的位置即最亮点为缺陷位置。图 10 表明缺陷位置的直角坐标为(383.4 mm, 191.2 mm),对应极坐标为(428.4 mm, 26.5°),与实际缺陷位置的极坐标(429.4 mm, 27.8°)吻合较好,误差小于 0.2%。由此可见,通过使用 SAFT,该系统能够准确定位缺陷。

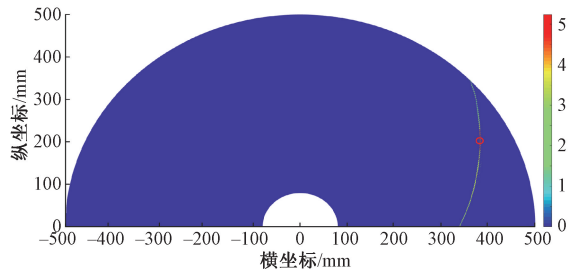


图 10 缺陷成像结果
Fig. 10 Defect imaging results

3 结 论

通过对 Lamb 波模式调制进行仿真与实验验证,选择中心频率为 500 kHz 的 S_0 模式作为数据传输与缺陷检测的载体。在数据传输方面,首次将 SISC 与导波数据传

输相结合,利用 SISC 能够表达信息最本质特征的特点,将参考信号作为基函数,编码信息序列作为目标函数,对稀疏系数进行求解从而能恢复出原始编码信息。相较于互相关的方案,SISC 适用的范围更广,提取特征的能力更强,不需要进行最佳阈值选择和序列起始位置选择等操作。在缺陷检测方面,利用 SAFT 方案成功实现了缺陷的成像与定位,方案中使用到的缺陷反射信号是从参考信号中提取出来的,而参考信号又将作为原子信号用于稀疏系数的求解,这就将数据传输与缺陷检测联系起来,实现了超声系统的多功能复用。

不过目前开展的研究都是利用实验仪器完成的,距离实际工程应用还有一定距离,因此在后续的文章中,还将对能量传输、数据采集、数据无线发送等相关电路进行深入研究,以实现整套超声系统的多功能化以及微型化。

参考文献

- [1] MITRA M, GOPALAKRISHNAN S. Guided wave based structural health monitoring: A review [J]. *Smart Materials and Structures*, 2016, 25(5): 053001.
- [2] WANG L, YUAN F G. Group velocity and characteristic wave curves of Lamb waves in composites: Modeling and experiments [J]. *Composites Science and Technology*, 2007, 67(7-8): 1370-1384.
- [3] KEXEL C, MAETZ T, MÄLZER M, et al. Digital communication across orthotropic composite components using guided waves [J]. *Composite Structures*, 2019, 209: 481-489.
- [4] KEXEL C, MÄLZER M, MOLL J. Guided wave based acoustic communications in structural health monitoring systems in the presence of structural defects [C]. 2018 IEEE International Symposium on Circuits and Systems (ISCAS). IEEE, 2018: 1-4.
- [5] KEXEL C, MÄLZER M, MOLL J. Connecting physics to ICT: Demonstrating a ‘data drawbridge’ by means of guided ultrasound waves [J]. *European Journal of Physics*, 2018, 39(5): 055806.
- [6] JIN Y, YING Y, ZHAO D. Time reversal enabled elastic wave data communications using sensor arrays [C]. *Proceedings of Meetings on Acoustics 166ASA*. Acoustical Society of America, 2013, 20(1): 045001.
- [7] ZONZINI F, DE MARCHI L, TESTONI N, et al. Direct spread spectrum modulation and dispersion compensation for guided wave-based communication systems [C]. 2019 IEEE International Ultrasonics Symposium (IUS). IEEE, 2019: 2500-2503.
- [8] KEXEL C, MAETZ T, MÄLZER M, et al. Ultrasonic data transmission across metal structures affected by environmental conditions [J]. *Journal of Sound and Vibration*, 2021, 490: 115691.
- [9] KEXEL C, TESTONI N, ZONZINI F, et al. Low-power MIMO guided-wave communication [J]. *IEEE Access*, 2020, 8: 217425-217436.
- [10] TANG X, SAMEER M, MANDAL S. Acoustic wireless power and data telemetry for structural health monitoring [C]. 2018 IEEE Sensors. IEEE, 2018: 1-4.
- [11] CAWLEY P, LOWE M J S, ALLEYNE D N, et al. Practical long range guided wave inspection-applications to pipes and rail [J]. *Mater Eval*, 2003, 61(1): 66-74.
- [12] 焦敬品, 李勇强, 杜礼, 等. 板结构裂纹兰姆波阵列复合成像方法研究 [J]. *仪器仪表学报*, 2016, 37(3): 593-601.
- JIAO J P, LI Y Q, DU L, et al. Study on the compound imaging method for crack detection in plate structure using array of Lamb waves [J]. *Chinese Journal of Scientific Instrument*, 2016, 37(3): 593-601.
- [13] 李震, 赵钰龙, 王少锋. 基于时间反转聚焦的缺陷回波增益新方法 [J]. *仪器仪表学报*, 2018, 39(8): 154-161.
- LI ZH, ZHAO Y L, WANG SH F. New method of magnifying defect echo based on time reversal focusing [J]. *Chinese Journal of Scientific Instrument*, 2018, 39(8): 154-161.
- [14] 王彭, 刘扬, 周亮, 等. 利用宽频导波的轨道断轨检测算法 [J]. *噪声与振动控制*, 2015, 35(1): 110-113.
- WANG P, LIU Y, ZHOU L, et al. Rail crack detection algorithm based on broadband guided wave [J]. *Noise and Vibration Control*, 2015, 35(1): 110-113.
- [15] 朱力强, 许西宁, 余祖俊, 等. 基于超声导波的钢轨完整性检测方法研究 [J]. *仪器仪表学报*, 2016, 37(7): 1603-1609.
- ZHU L Q, XU X N, YU Z J, et al. Study on the railway integrity monitoring method based on ultrasonic guided waves [J]. *Chinese Journal of Scientific Instrument*, 2016, 37(7): 1603-1609.
- [16] GIURGIUTIU V. *Structural health monitoring: With piezoelectric wafer active sensors* [M]. Elsevier, 2007.
- [17] OLSHAUSEN B A, FIELD D J. Emergence of simple-cell receptive field properties by learning a sparse code for natural images [J]. *Nature*, 1996, 381(6583): 607-609.
- [18] ANZAI Y. *Pattern recognition and machine*

learning [M]. Elsevier, 2012.

- [19] SMITH E C, LEWICKI M S. Efficient auditory coding [J]. *Nature*, 2006, 439(7079): 978-982.
- [20] LEWICKI M S, SEJNOWSKI T J. Learning overcomplete representations [J]. *Neural Computation*, 2000, 12(2): 337-365.
- [21] 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.
- [22] MICHAELS J E. Detection, localization and characterization of damage in plates with an in situ array of spatially distributed ultrasonic sensors [J]. *Smart Materials and Structures*, 2008, 17(3): 035035.

作者简介



徐云飞, 2020 年于湖北工业大学获得学士学位, 现为重庆大学硕士研究生, 主要研究方向为超声导波、传感器、结构健康监测。
E-mail: 202007131209@cqu.edu.cn

Xu Yunfei received his B. Sc. degree from Hubei University of Technology in 2020. He is currently a master student at Chongqing University. His main research interests include ultrasonic guide waves, sensors, and structural health monitoring.



丁晓喜, 2012 年于中国科学技术大学获得学士学位, 2017 年于中国科学技术大学获得博士学位, 现为重庆大学讲师、博士生导师, 主要研究方向为信号处理、故障诊断、数据挖掘。

E-mail: dxu@cqu.edu.cn

Ding Xiaoxi received his B. Sc. degree and Ph. D. degree both from the University of Science and Technology of China in 2012 and 2017, respectively. He is currently a lecturer and a Ph. D. advisor at Chongqing University. His main research interests include signal processing, fault diagnosis, and data mining.



黄文彬 (通信作者), 2010 年于中国科学技术大学获得学士学位, 2014 年于美国北卡罗来纳州州立大学获得博士学位, 现为重庆大学教授、博士生导师, 主要研究方向为智能材料和结构、故障诊断、传感器。

E-mail: whuang@cqu.edu.cn

Huang Wenbin (Corresponding author) received his B. Sc. degree from the University of Science and Technology of China in 2010, and received his Ph. D. degree from the North Carolina State University in 2014. He is currently a professor and a Ph. D. advisor at Chongqing University. His main research interests include smart materials and structures, fault diagnosis, and sensors.