

## 基于压缩感知的快速激光超声合成孔径聚焦技术

何志同<sup>1</sup>, 应恺宁<sup>2</sup>, 戴鹭楠<sup>2</sup>, 倪辰荫<sup>1\*</sup><sup>1</sup>南京理工大学电子工程与光电技术学院, 江苏 南京 210094;<sup>2</sup>南京理工大学理学院, 江苏 南京 210094

**摘要** 传统激光超声合成孔径聚焦技术(LU-SAFT)通常需要在待测样品表面以小步长扫描来提高横向分辨率,但小扫描步长会导致总检测时间过长,影响检测效率。针对这一问题,笔者提出了基于压缩感知的LU-SAFT方法,以提升扫描效率。该方法首先使用压缩感知根据稀疏扫描点处A扫信号的最大强度恢复出全场的扫描点A扫信号最大强度,进而确定样品表面的最优扫描区域,然后在最优扫描区域内进行扫描,最后对缺陷进行SAFT图像重建。在实验中,笔者采用脉冲激光在含有缺陷的样品表面激发超声,使用激光多普勒测振仪探测超声,并利用基于压缩感知的LU-SAFT方法对样品内部缺陷进行检测,以验证所提方法的可行性。实验结果显示:针对相同的扫描区域,传统LU-SAFT需要扫描500个点,花费3.15 min;与传统LU-SAFT相比,本文所提方法在扫描点数上减少了80%,在扫描时间上缩短了80%,并且缺陷的SAFT成像信噪比提高了约42%。本文研究内容及结果可为激光超声无损检测提供更快速的检测方案。

**关键词** 激光光学; 压缩感知; 合成孔径聚焦技术; 激光超声; 缺陷检测

**中图分类号** TG115.28

**文献标志码** A

**DOI:** 10.3788/CJL230711

## 1 引言

在工业领域中,不同金属材料工件的加工或长期使用均有可能使工件表面、内部产生不同类型的缺陷,从而影响工件的机械强度和缩短工件的使用寿命。为了确保生产安全,必须将其检出。传统的光学检测手段,例如人工观测法、激光扫描法等<sup>[1-3]</sup>,均难以获取材料内部的缺陷信息。超声检测具有穿透能力强、灵敏度高的优点,在缺陷检测领域被广泛应用<sup>[4]</sup>。传统的超声检测通常使用压电换能器进行超声的激发和检测,声耦合剂如水或甘油用于换能器和试件之间的超声传输<sup>[5]</sup>,然而耦合剂的使用可能会对被测样品产生影响,例如使用水作耦合剂会对样品表面造成腐蚀等。激光超声检测<sup>[6-10]</sup>是超声检测中的一种新型的检测方法,其通过激光远程激发超声波来实现对样品的检测,克服了耦合剂引入的附加影响。此外,激光超声检测还具有高空间分辨率的特点,这对于微小缺陷(直径不超过0.5 mm)的检测和成像非常有利<sup>[11-12]</sup>。

近些年的缺陷检测,不论是基于传统超声还是基于激光超声的检测,都更加关注成像算法。合成孔径聚焦技术(SAFT)<sup>[13-30]</sup>是一种适合超声检测的成像算法,其基本原理是用一系列单一的小孔径传感器代替大孔径传感器,以达到提高横向检测分辨率的目的。

该技术最早被应用在雷达领域<sup>[24]</sup>。目前的SAFT大致可以分为时域SAFT<sup>[23-24,20]</sup>和频域SAFT<sup>[13-22,25,30]</sup>。时域SAFT基于延时叠加和全范围动态聚焦,仅通过简单的累计求和便可获得分辨率较高的成像结果<sup>[31]</sup>。

激光超声合成孔径聚焦技术(LU-SAFT)<sup>[32]</sup>是一种将SAFT与激光超声相结合的技术。LU-SAFT兼具SAFT与激光超声技术的优势,例如:远距离获取成像数据,激发多种模式的超声波等。为了获得高空间分辨率和高信噪比的LU-SAFT缺陷图像,传统的LU-SAFT通常需要在被测样品表面进行高空间分辨率扫描,而这需要非常长的扫描时间,从而严重限制了传统LU-SAFT的实用性<sup>[33]</sup>。

压缩感知(CS)<sup>[35-36]</sup>是信号处理的一个新领域,其目标是用尽可能少的测量值重构信号。压缩感知假设一个信号可以用适当的基函数在另外一个域中以稀疏的形式表示,通过在基空间中进行信号重构便可重构出完整的原始信号。针对传统LU-SAFT扫描过程耗时的问题,人们将压缩感知运用到LU-SAFT中,以提升传统LU-SAFT的扫描效率,缩短扫描时间。Park等<sup>[37]</sup>将二分搜索和压缩感知技术运用到表面缺陷波场的重建中,解决了表面缺陷的定位加速问题;之后,孙强等<sup>[38]</sup>又进一步运用二分搜索和压缩感知技术解决了体内缺陷的定位加速问题。但是到目前为止,尚未有人运用压缩感知技术来提升LU-SAFT的扫描

收稿日期: 2023-04-12; 修回日期: 2023-05-17; 录用日期: 2023-05-24; 网络首发日期: 2023-07-04

通信作者: \*chenyin.ni@njust.edu.cn

效率从而解决传统 LU-SAFT 扫描过程耗时长的

问题。为了解决传统 LU-SAFT 扫描效率低的问题,笔者将压缩感知与 LU-SAFT 相结合。在实验上,首先将脉冲激光入射到含有缺陷样品的表面激发超声波信号,利用激光测振仪探测超声波信号;然后基于压缩感知和稀疏扫描得到的 A 扫信号确定最优检测区域,进而对最优检测区域进行扫描;最后利用最优检测区域内所有扫描数据进行 SAFT 图像的重建,从而验证算法的正确性。此外,通过选取合适的稀疏扫描点数和最优检测区域,减小了干扰信号对 SAFT 重建图像的影响并缩短了扫描时间,从而提高了传统 LU-SAFT 的扫描效率和重建图像的信噪比。

## 2 基本原理及处理流程

### 2.1 基于压缩感知的 LU-SAFT 原理

在基于压缩感知的 LU-SAFT 原理中,假设样品表面共有  $N$  个扫描点,其中只有  $X_s$  个稀疏点被实际扫描并获得信号。搜集  $X_s$  个稀疏扫描点处 A 扫信号的最大强度,并形成向量  $U_s$ ,则  $U_s$  的大小为  $X_s \times 1$ 。将检测区域内全场  $N$  个扫描点处 A 扫信号的最大强度组合形成向量  $U$  ( $U$  的大小为  $N \times 1$ ),则  $U_s$  可表示成

$$U_s = AU, \quad (1)$$

式中:  $A$  为测量矩阵,表示稀疏扫描点的位置,  $A$  的大小为  $X_s \times N$ 。式(1)中  $U$  是未知的,是欲通过压缩感知恢复出的信号,而  $U_s$  和  $A$  是已知的。通过线性变化可以将  $U$  表示成一系列基的线性加权组合<sup>[39]</sup>,即

$$U = D\alpha, \quad (2)$$

式中:  $D$  称为字典,是  $U$  的完备集,  $D = (c_1, \dots, c_L)$ ;  $\alpha$  是  $U$  在字典  $D$  上的稀疏表示。  $D$  中的  $c_1, \dots, c_L$  称为字典中的基,  $c_1, \dots, c_L$  是一系列与  $U$  具有相同维度的时域信号,并且  $c_1, \dots, c_L$  分别表示缺陷位于不同位置时样品表面全场的扫描点 A 扫信号最大强度。文中使用缺陷位于样品内各个位置时样品表面全场的扫描点 A 扫信号最大强度作为基构成字典  $D$  (即缺陷位于样品内某一确定位置时样品表面全场的扫描点 A 扫信号最大强度是字典  $D$  中的一个基),此时,缺陷位于样品内某一确定位置时样品表面全场的扫描点 A 扫信号最大强度在字典  $D$  上可以看作是 1 稀疏的。将式(2)代入式(1)可得

$$U_s = AD\alpha. \quad (3)$$

为了获得空间分辨率尽可能高的 SAFT 图像,  $N$  的值通常比较大,远大于  $X_s$ ,这会导致式(3)中未知数的个数  $N$  远大于方程个数  $X_s$ ,此时  $\alpha$  的解不唯一。但是若假设  $\alpha$  在字典  $D$  上有最稀疏的表示(即  $\alpha$  有最少的非零值),则  $\alpha$  的解唯一<sup>[39]</sup>。基于这个假设,可以使

用基追踪法来求解式(3)所示方程组<sup>[40]</sup>,即  $\alpha$  在字典  $D$  上最稀疏的表示可以通过求解式(4)得到。

$$\min \|\alpha\|_1, \text{ s.t. } U_s = AD\alpha, \quad (4)$$

式中:  $\|\alpha\|_1$  表示  $\alpha$  的  $l_1$  范数。求解出  $\alpha$  之后,将其代入式(2)即可得到检测区域内全场的扫描点 A 扫信号最大强度组合形成的向量  $U$ 。

当使用 LU-SAFT 对样品内部缺陷进行成像时,由于激光超声的方向性,样品表面全场的扫描点 A 扫信号的最大强度呈双峰分布,在双峰附近的小扫描区域内激光超声信号较强,而在其他扫描区域内激光超声信号较弱,并且越靠近双峰的扫描点对 SAFT 成像的贡献越大<sup>[32]</sup>。两个峰对应的检测位置即为本次实验的最优扫描位置,最优扫描位置附近激光超声信号较强的小扫描区域即为本次实验的最优扫描区域。因此,压缩感知恢复出样品表面全场的扫描点 A 扫信号最大强度后输出两个峰对应的检测位置,输出的位置即为样品表面的最优扫描位置,以最优扫描位置为中心拓展形成的小扫描区域即为样品表面的最优扫描区域。

### 2.2 基于压缩感知的 LU-SAFT 检测流程

传统的 LU-SAFT 技术主要使用体横波和体纵波对内部缺陷进行成像。由于扫描点处探测到的 A 扫信号中除了包含体横波和体纵波等目标信号外,还包含表面波和掠面纵波等干扰信号。这些干扰信号的幅值通常都比目标信号大,它们的存在会影响压缩感知算法的结果。因此,在得到扫描点处 A 扫信号后需要使用窗函数来进行模式选择。图 1 为基于压缩感知的 LU-SAFT 处理流程示意图。

第一步:首先在目标检测区域内随机扫描  $X_s$  个点 ( $X_s$  的取值将在 4.1 节介绍),并搜集每个扫描点处 A 扫信号的最大强度,然后基于压缩感知通过稀疏扫描点的 A 扫信号的最大强度恢复出检测区域内未扫描点的 A 扫信号的最大强度,进而得到目标检测区域内全场的扫描点 A 扫信号最大强度。

第二步:比较目标检测区域内全场的扫描点 A 扫信号最大强度,输出最大值  $S$ 。若  $S$  值大于噪声值的两倍,则认为该检测区域内有缺陷,继续进行后续步骤;若  $S$  值小于等于噪声值的两倍,则认为该检测区域内没有缺陷,停止后续步骤。

第三步:根据目标检测区域内全场的扫描点 A 扫信号最大强度,确定样品表面的最优扫描位置。

第四步:以最优扫描位置为中心向左右两边拓展  $L$  长度 ( $L$  的取值将在 4.3 节介绍)形成最优扫描区域。

第五步:在最优扫描区域内进行精确扫描并使用最优扫描区域内所有的扫描数据进行 SAFT 图像重建。

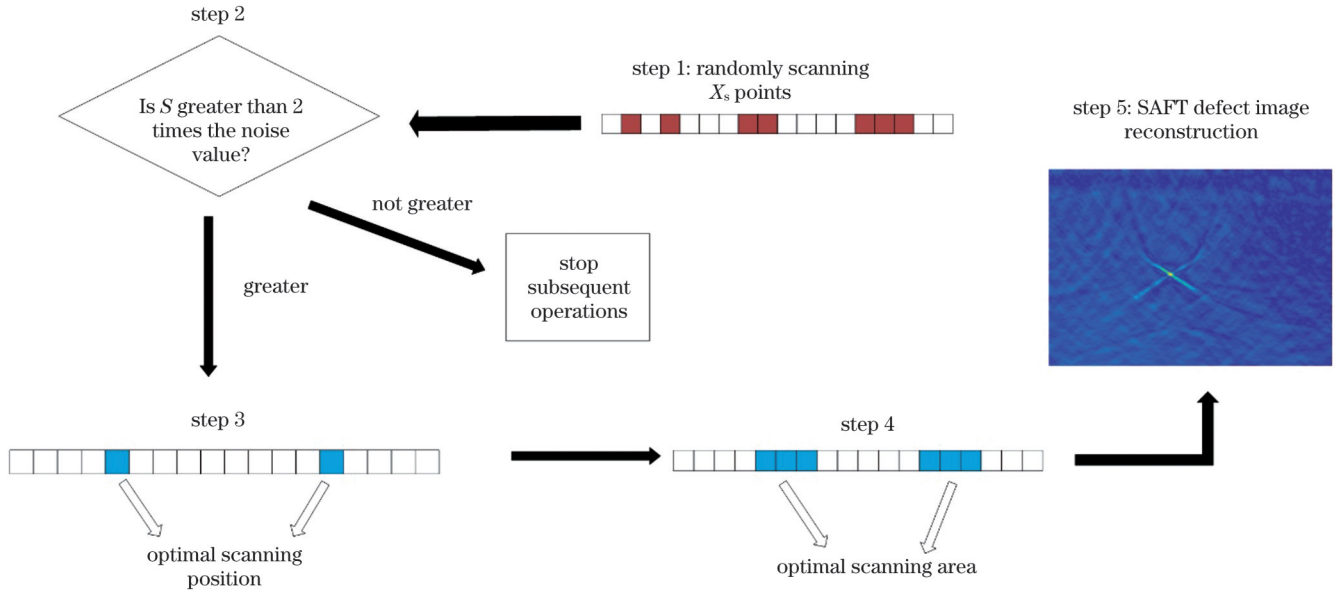


图 1 基于压缩感知的 LU-SAFT 处理流程图

Fig. 1 Flow chart of LU-SAFT method based on compression sensing

### 3 实验装置及参数

实验样品与装置如图 2 所示。实验样品是一块尺寸为 120 mm×30 mm×8 mm 的铝合金样品,其内含一个直径为 0.5 mm、长度为 15 mm 的横穿孔,如图 2(a) 所示。横穿孔的孔顶距离样品表面约 3.75 mm。搭建了如图 2(b) 所示的实验装置。将波长为 1064 nm、重复频率为 3000 Hz、能量为 1 mJ 的脉冲激光通过柱面聚焦透镜聚焦成线光源并入射至样品表面激发超声(使用线光源可以有效地将激光超声的激发控制在热弹性范围内);将激光多普勒测振仪(控制器型号为 Polytec OFV-5000,光学头型号为 Polytec OFV-505,波长  $\lambda \approx 633$  nm,检测带宽为 DC~20 MHz)作为超声探测装置,用来探测样品表面的超声信号。放大后的信号传入示波器,每组信号进行 128 次平均,并记录在计算机中。进行 LU-SAFT 扫描的范围为样品表面缺

陷中心左边  $x = -12$  mm 处至右边  $x = 13$  mm 处之间的区域。图 2(a) 中的虚线箭头表示扫描方向。

实验样品中缺陷的直径为 0.5 mm,当有 10 个扫描点覆盖到缺陷时,对于检测缺陷的空间分辨率来说是足够的。因此,使用传统 LU-SAFT 以逐点扫描的方式对检测区域进行扫描时,选择 0.05 mm 作为扫描步长。本次实验中,检测区域的长度为 25 mm,以 0.05 mm 为步长进行逐点扫描时,需要扫描 500 个点。首先在检测区域内规划好这 500 个扫描点的位置,并将这 500 个扫描点的位置分别记为 1~500;然后使用随机函数 randperm(500) 随机生成 500 个 1~500 范围内的整数,接着选取生成的前 40 个随机数作为稀疏扫描点的位置,再根据确定的稀疏扫描点位置规划好随机扫描时每一步的扫描步长。随机扫描时的扫描步长确定后,固定激发、探测光距离  $\Delta x$  为 0.17 mm,并将铝合金样品固定于电控平移台上,保持激发、探测光不动,通过

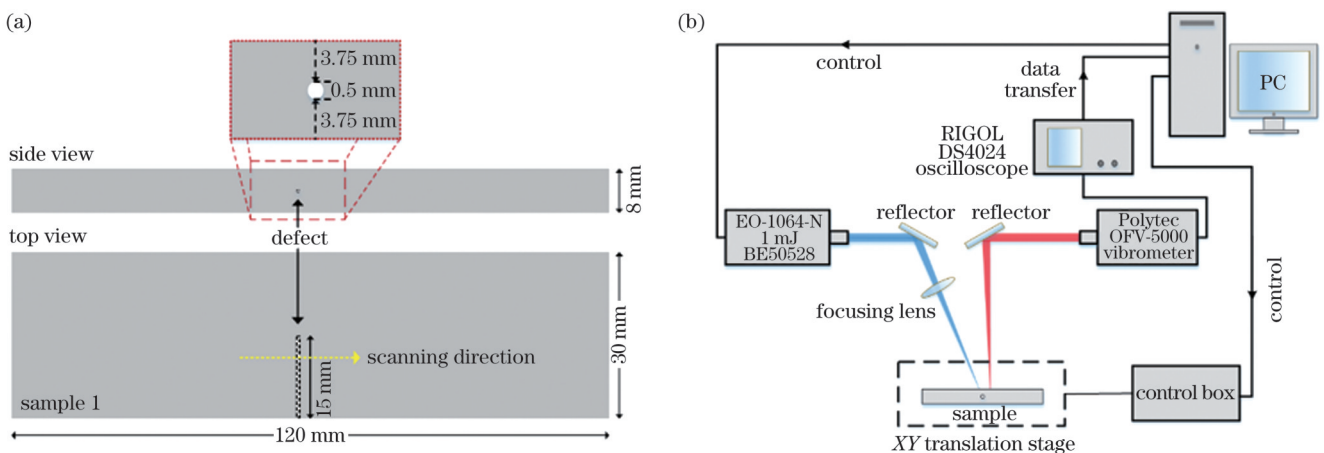


图 2 实验样品及装置示意图。(a) 铝合金样品结构示意图;(b) 实验装置图

Fig. 2 Diagram of experimental sample and setup. (a) Diagram of aluminum sample structure; (b) diagram of experimental setup



移动样品实现激发、探测光的同时移动,从而实现信号的随机稀疏采样。

## 4 结果与讨论

前文已经介绍过,在基于压缩感知的 LU-SAFT 的处理过程中,需要通过在样品表面随机扫描  $X_s$  个稀疏点获得的 A 扫信号的最大强度恢复出样品表面全场的扫描点 A 扫信号最大强度,从而确定样品表面的最优扫描位置。在此基础上,以最优扫描位置为中心向左右两边拓展  $L$  长度形成最优扫描区域,再对这一区域进行扫描并使用这些扫描数据进行 SAFT 成像。从这一处理流程可以看出,稀疏扫描点数  $X_s$  的取值、压缩感知算法中的字典  $D$  以及  $L$  的取值都会显著影响最终的 SAFT 成像效果。因此,需要对稀疏扫描点数  $X_s$  的取值、压缩感知算法中的字典  $D$  及  $L$  的取值进行详细讨论。

### 4.1 $X_s$ 的取值

假设样品表面全场的扫描点个数为  $N$ ,当  $X_s$  的取值不同时,缺陷 SAFT 重建图像的信噪比和扫描时间都不同,如图 3 所示,因此需要对  $X_s$  的取值进行讨论。缺陷 SAFT 重建图像信噪比 (SNR, 在公式中记为  $f_{\text{SNR}}$ ) 的计算公式为

$$f_{\text{SNR}} = 20 \lg \frac{I_{\text{max}}}{I_{\text{mean}}}, \quad (5)$$

式中:  $I_{\text{max}}$  表示缺陷 SAFT 重建图像的最大强度;  $I_{\text{mean}}$  表示缺陷 SAFT 重建图像的平均强度。

图 3 给出了缺陷 SAFT 重建图像的信噪比和扫描时间随  $X_s$  的变化。横轴表示  $X_s$  的大小,左纵轴表示缺陷 SAFT 重建图像的信噪比,右纵轴表示扫描时间。

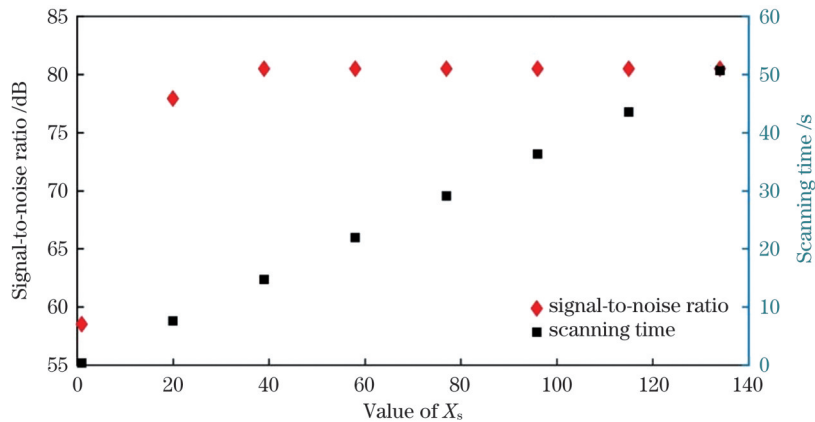


图 3 缺陷 SAFT 重建图像的信噪比和扫描时间随  $X_s$  的变化

Fig. 3 Variation of signal-to-noise ratio and scanning time of defective SAFT reconstructed images with  $X_s$ .

### 4.2 字典 $D$ 的构建

样品表面全场的扫描点 A 扫信号最大强度受方向性影响呈双峰分布,只需要确定双峰对应的检测位置 (即最优扫描位置) 即可,并不需要确定双峰的强度,因此可以只考虑样品表面全场的扫描点 A 扫信号最大强度的相对强度分布,而不用考虑它们的绝对强度,此时

由图 3 可知,随着  $X_s$  增大,缺陷 SAFT 重建图像的信噪比先增加后保持不变,而扫描时间则单调增加。缺陷 SAFT 重建图像的信噪比先增加后保持不变是因为:随着  $X_s$  增加,样品表面被扫描的稀疏点的数量增加,从而使得压缩感知恢复出的全场的扫描点 A 扫信号最大强度与样品表面真实的全场的扫描点 A 扫信号最大强度之间的差异减小 (即被扫描的稀疏点的数量越多,通过压缩感知恢复出的全场的扫描点 A 扫信号最大强度越准确),所以缺陷 SAFT 重建图像的信噪比增大;随着  $X_s$  继续增大,缺陷 SAFT 重建图像的信噪比达到饱和值,此时压缩感知已经可以准确地恢复出样品表面全场的扫描点 A 扫信号最大强度,并且继续增大  $X_s$ ,缺陷 SAFT 重建图像的信噪比保持不变。扫描时间单调增加是因为随着  $X_s$  增大,扫描点的数量增加,从而需要花费更多的时间进行扫描。此外,稀疏扫描点数  $X_s$  的取值还需要满足稀疏采样定理,即

$$X_s \geq c \cdot K \cdot \lg(N/K), \quad (6)$$

式中:  $N$  为被测信号维度;  $K$  为稀疏度;  $c$  是与信噪比和算法效率有关的常数,通常在 1~4 之间取值。当以 0.05 mm 为步长对检测区域进行逐点扫描时,需要扫描 500 个点,即样品表面全场的扫描点个数为 500,此时压缩感知中被测信号维度  $N=500$ 。文中被测信号在字典上是 1 稀疏的,所以  $K=1$ 。当  $c=4$ 、 $N=500$ 、 $K=1$  时,  $X_s \geq 11$ ,即在样品表面至少需要扫描 11 个稀疏点才能够通过压缩感知成功恢复出样品表面全场的扫描点 A 扫信号最大强度。

综合考虑 SAFT 缺陷图像的信噪比、扫描时间和稀疏采样定理后,本文选择缺陷 SAFT 重建图像的信噪比刚好为饱和值时的  $X_s$  值 (即  $X_s=40$ ) 作为  $X_s$  的最优值。

可使用缺陷位于样品内各个位置时样品表面全场的扫描点 A 扫信号最大强度的相对强度分布作为基构成字典  $D$ 。当缺陷的大小、形状、位置确定时,样品表面全场的扫描点 A 扫信号最大强度的相对强度分布也是确定的,若通过建立仿真模型来模拟样品内声波的传播情况,则可由模型计算出样品表面全场的扫描点 A 扫

信号最大强度的相对强度分布。由于字典  $D$  的构建需要大量的实验数据,很难通过实验获得,因此,在构建字典  $D$  时可使用仿真模型计算得到的样品表面全场的扫描点 A 扫信号最大强度的相对强度分布来代替样品表面真实的全场的扫描点 A 扫信号最大强度的相对强度分布。字典  $D$  中的基数量越多、种类越丰富,字典的功能就越强大。为了使字典更具有普适性,通过仿真模型构建字典  $D$  时,应当在仿真模型中设置不同类型的缺陷,并获得相应的样品表面全场的扫描点 A 扫信号最大强度的相对强度分布。但为了方便验证字典的可行性,本文只针对横穿孔缺陷建立字典,其他缺陷类型的字典可以在以后的工作中补充。本文使用文献 [32] 中建立的模型来构建字典  $D$ 。字典  $D$  构建好后,在含有横穿孔缺陷的实验样品上进行实验,以验证本文算法的有效性。由于该模型计算的是样品表面全场的扫描点 A 扫信号最大强度的相对强度分布,可以不

用考虑超声波信号的绝对强度,因此在模型中默认超声波信号的初始振幅为 1,只考虑由方向性引起的横波和纵波的相对强度分布。

接下来用文献 [32] 的模型构建字典  $D$ 。该模型将缺陷设置在不同位置,并计算出 B 扫数据阵列,进而获得缺陷位于不同位置时样品表面全场的扫描点 A 扫信号最大强度的相对强度分布,获得的每一份全场的扫描点 A 扫信号最大强度的相对强度分布就是字典  $D$  中的一个基。文献 [32] 中的模型假设激发点处的超声信号可以通过式 (7) 获得。

$$h(t) \propto (x - ct) \exp \left[ -\frac{4(x - ct)^2}{d^2} \right], \quad (7)$$

式中:  $h(t)$  表示  $t$  时刻激发点处超声信号的强度;  $x$  表示激发点与缺陷之间的横向距离;  $d$  表示激发点与缺陷之间的距离;  $c$  表示声波的速度。激发的方向性可以通过式 (8) 和式 (9) 获得。

$$A_L \propto \frac{s_T^3 \cos(\alpha) \sin(2\alpha) [s_T^2 - s_L^2 \cos^2(\alpha)]^{\frac{1}{2}}}{4s_L^3 \cos^2(\alpha) \sin(\alpha) [s_T^2 - s_L^2 \cos^2(\alpha)]^{\frac{1}{2}} + [s_T^2 - 2s_L^2 \cos^2(\alpha)]^2}, \quad (8)$$

$$A_T \propto \frac{-s_T^4 \cos(2\alpha) \sin(2\alpha)}{s_T^4 [1 - 2\cos^2(\alpha)]^2 + 4s_T^3 \cos^2(\alpha) \sin(\alpha) [s_L^2 - s_T^2 \cos^2(\alpha)]^{\frac{1}{2}}}, \quad (9)$$

式中:  $A_L$  和  $A_T$  分别表示纵波和横波的归一化振幅;  $\alpha$  表示超声波与样品表面之间的夹角;  $s_L$  和  $s_T$  分别表示由纵波波速和横波波速的倒数定义的慢度。对于线源,超声波信号在铝合金样品中衰减后的振幅可以表示为

$$I = I_0 \exp(-\beta x), \quad (10)$$

式中:  $I_0$  表示超声波信号的初始振幅;  $\beta$  为衰减系数。对于铝合金,  $\beta = 1.7125$ , 当  $x = 20$  mm 时  $I = 0.966I_0$ 。因此,超声波信号在铝合金样品中的衰减很小,在计算时可以忽略。因此,激发点处的超声波信号可以表示

为  $h(t=0) \cdot A(\alpha)$ 。

如图 4 所示,  $P(x_P, y_P)$  是一个半径为  $r$  的全反射缺陷。激发、探测点位置分别为  $E(x_E, y_E)$  和  $D(x_E + x_{\text{bias}}, y_E)$ 。在  $P$  上找一点  $A(x_A, y_A)$ , 使  $AP$  在  $\angle EAD$  的平分线上, 即

$$\frac{\overrightarrow{EA}}{|\overrightarrow{EA}|} + \frac{\overrightarrow{DA}}{|\overrightarrow{DA}|} \parallel \overrightarrow{AP}. \quad (11)$$

式 (11) 是一个四次函数, 很难求解。因此, 可以用惠更斯-菲涅耳原理将其转化成一个最小问题 [32], 即

$$\begin{cases} d_{\min} = \min \left( \sqrt{(x_E - x_A)^2 + y_A^2} + \sqrt{(x_E + x_{\text{bias}} - x_A)^2 + y_A^2} \right), \\ (x_A - x_P)^2 + (y_A - y_P)^2 = r^2 \end{cases}, \quad (12)$$

式中:  $d_{\min}$  表示激发点到缺陷再到探测点的最短声程, 即图 4 中  $d_1 + d_2$  的最小值, 它可以通过离散化得到。声波的到达时间可以表示为  $t(i) = d_{\min}(i)/c$ , 其中  $i$  表示第  $i$  个激发点,  $c$  表示声波的速度。因此, B 扫数据集为

$$\text{data}[i, t(i)] = h[t(i)] A(\alpha), \quad (13)$$

式中:  $\text{data}[\cdot]$  表示计算出的 B 扫数据阵列。

将一个直径为 0.5 mm 的全反射缺陷分别设置在 2、4、6、8 mm 深度时, 样品表面全场的扫描点 A 扫信号

最大强度的相对强度分布如图 5 所示。由图 5 可知, 样品表面全场的扫描点 A 扫信号最大强度的相对强度呈双峰分布。图 5 中的每一个双峰曲线都是字典  $D$  中的一个基。由于实验样品中横穿孔缺陷的直径为 0.5 mm, 深度为 4 mm, 为了兼顾计算效率与准确度, 在模型中设置全反射缺陷直径以 0.05 mm 为间隔从 0.1 mm 递增到 1 mm (缺陷直径的变化范围及间隔可以根据具体实验选取, 只要确保缺陷直径的变化范围包含样品内实际缺陷的直径即可), 缺陷直径每改变一

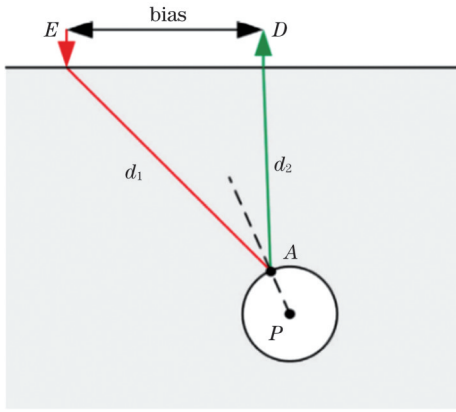


图 4 反射法示意图

Fig. 4 Diagram of reflection method

次就计算一遍缺陷位于样品内各位置时样品表面全场

的扫描点 A 扫信号最大强度的相对强度分布, 计算完成后将获得的所有全场的扫描点 A 扫信号最大强度的相对强度分布作为基构成字典  $D$ 。

### 4.3 $L$ 的取值

在基于压缩感知的 LU-SAFT 的处理流程中, 最优扫描区域是以最优扫描位置为中心向左右两边拓展  $L$  长度形成的。当  $L$  的取值不同时, 缺陷 SAFT 重建图像的信噪比和扫描时间都不同, 如图 6 所示, 因此也需要对  $L$  的取值进行讨论。

图 6 给出了缺陷 SAFT 重建图像的信噪比和扫描时间随  $L$  的变化。横轴表示  $L$  的大小, 左纵轴表示缺陷 SAFT 重建图像的信噪比, 右纵轴表示扫描时间。由图 6 可知, 随着  $L$  的增加, 缺陷 SAFT 重建图像的信噪比先增加后减小, 而扫描时间则单调增加。

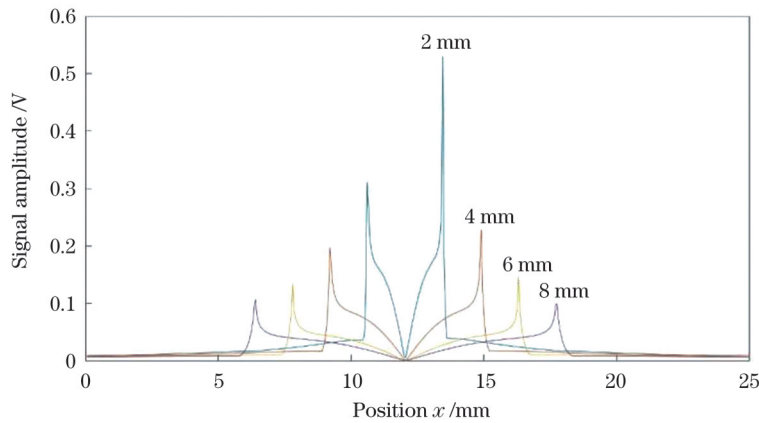


图 5 缺陷深度分别为 2、4、6、8 mm 时样品表面全场的扫描点 A 扫信号最大强度的相对强度分布

Fig. 5 Relative intensity distribution of A-scanning signal maximum intensities at the scanning points of the full field of the sample surface obtained with the defect setting at a depth of 2, 4, 6, 8 mm, respectively

由于激光超声的方向性, 在包含最优扫描位置的小区域内激光超声信号较强, 而在其他区域内激光超声信号较弱<sup>[30]</sup>。当最优扫描区域位于激光超声信号较强区域时, 缺陷 SAFT 重建图像的信噪比随着  $L$  的增加而增大; 而当最优扫描区域大于激光超声信号较强的区域时, 随着  $L$  的增加, 更多对 SAFT 成像贡献小的检测结果被引入, 导致缺陷 SAFT 重建图像的信噪比

减小。所以, 缺陷 SAFT 重建图像的信噪比随着  $L$  的增加表现出先增加后减小的变化趋势。扫描时间增加同样是因为随着  $X_s$  的增加扫描点数量增加, 从而需要花费更多的时间进行扫描。因此, 综合考虑 SAFT 缺陷图像的信噪比和扫描时间这两个因素后, 本文选择缺陷 SAFT 重建图像信噪比最大时的  $L$  值(即  $L=1.5$  mm)作为  $L$  的最优值。

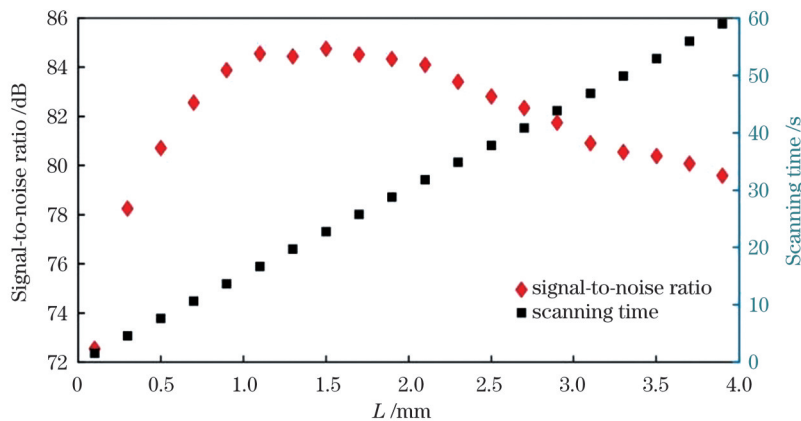


图 6 缺陷 SAFT 重建图像的信噪比和扫描时间随  $L$  的变化

Fig. 6 Variation of signal-to-noise ratio and scanning time of defective SAFT reconstructed images with  $L$

#### 4.4 基于压缩感知的 LU-SAFT 成像结果及讨论

基于以上分析所得参数进行实验,获得了样品表面扫描点处 A 扫信号的最大强度,如图 7 所示。图 7(a)是采用基于压缩感知的 LU-SAFT 方法对检测区域进行扫描得到的样品表面  $X_s$  个稀疏扫描点处 A 扫信号的最大强度,图 7(b)是基于压缩感知通过这  $X_s$  个稀疏扫描点处的 A 扫信号最大强度恢复出来的

样品表面全场的扫描点 A 扫信号最大强度,图 7(c)是采用传统 LU-SAFT 方法对检测区域进行扫描后得到的样品表面全场的扫描点 A 扫信号最大强度。对比图 7(a)、图 7(b)和图 7(c)可知,压缩感知可以在没有扫描到对应点的情况下复原出真正的幅值最大的点,即复原出最优扫描位置处 A 扫信号的最大强度。

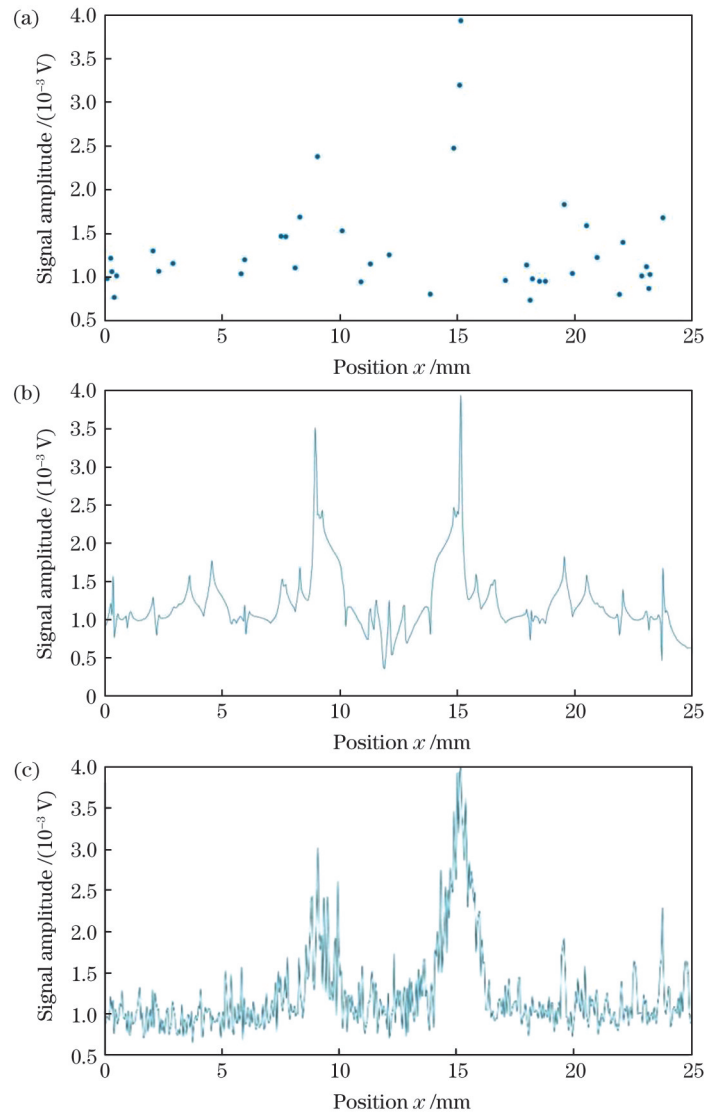


图 7 样品表面扫描点处 A 扫信号的最大强度。(a)稀疏扫描点处 A 扫信号的最大强度;(b)压缩感知恢复出的全场的扫描点 A 扫信号最大强度;(c)样品表面全场的扫描点 A 扫信号最大强度

Fig. 7 Maximum intensity of the A-scanning signal at the scanning points on the sample surface. (a) Maximum intensity of the A-scanning signal at the sparse scanning points; (b) maximum intensity of the A-scanning signal at the whole field scanning points recovered by compressive sensing; (c) maximum intensity of the A-scanning signal at the whole field scanning points on the sample surface

实验中获得 B 扫图和 SAFT 缺陷图像如图 8 所示,图 8(a)和图 8(b)分别是对最优扫描区域和扫描区域全场进行扫描后得到的 B 扫图。对比图 8(a)和图 8(b)可知,图 8(a)相当于将图 8(b)中目标信号强度相对较小的 A 扫信号滤除,只留下最大强度相对较大的 A 扫信号(即只保留对 SAFT 缺陷重建图像贡献较

大的 A 扫信号)。图 8(e)是基于压缩感知的 LU-SAFT 缺陷重建图像,图 8(c)为其信号幅值图;图 8(f)是传统 LU-SAFT 缺陷重建图像,图 8(d)为其信号幅值图;图 8(e)和图 8(f)中的黄色高亮部分表示 SAFT 所成的缺陷顶端散射。图 8(e)中的缺陷顶端散射位于  $y = -3.76$  mm 深度处,与实际位置偏差 0.01 mm,



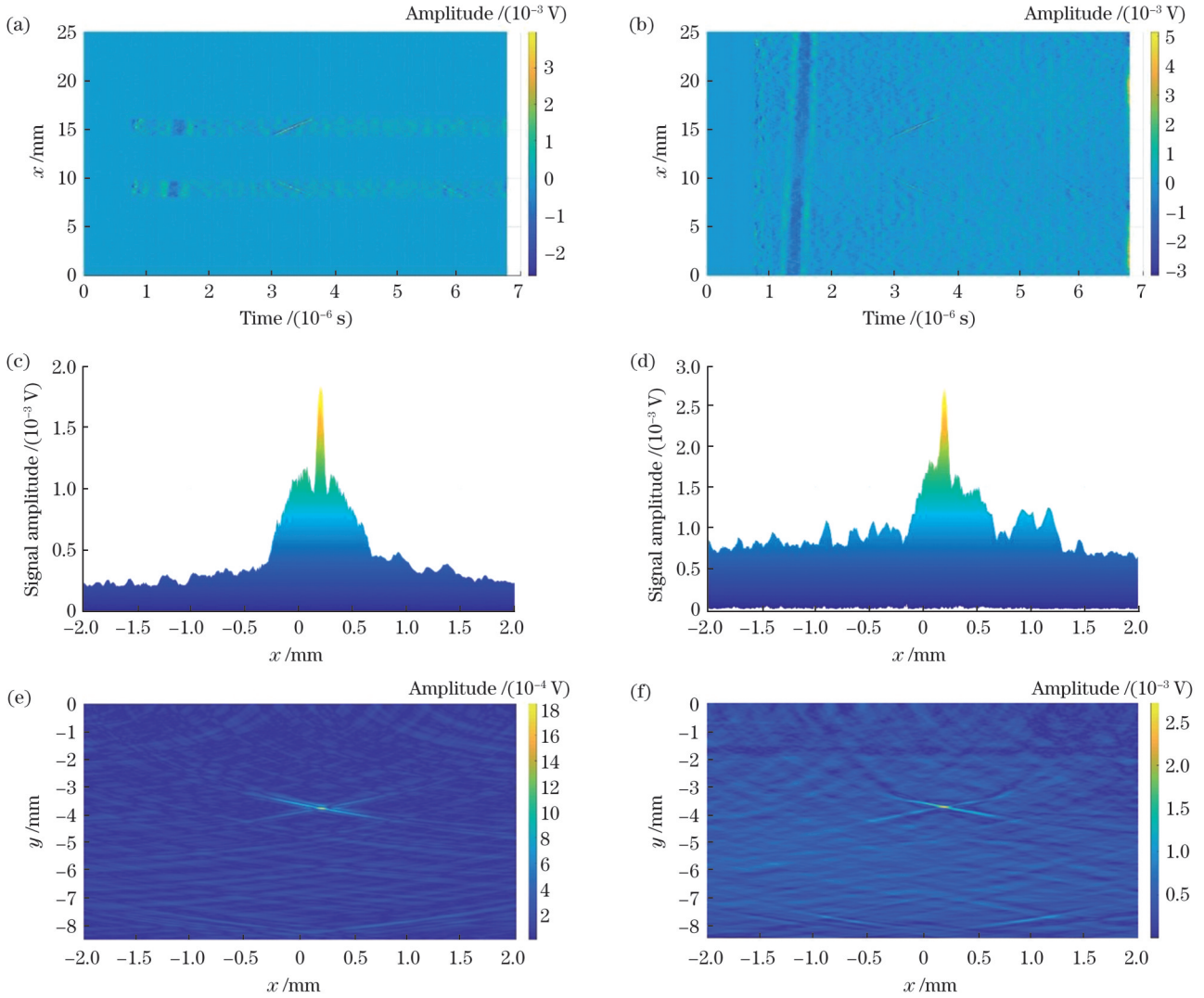


图8 实验中获得的B扫图和SAFT缺陷图像。(a)对最优扫描区域进行扫描后得到的B扫图;(b)全场B扫图;(c)基于压缩感知的LU-SAFT缺陷重建图像;(d)传统LU-SAFT缺陷重建图像;(e)基于压缩感知的LU-SAFT缺陷重建图像的信号幅值图;(f)传统LU-SAFT缺陷重建图像的信号幅值图

Fig. 8 B-scanning and SAFT defect images obtained in the experiment. (a) B-scanning image obtained by scanning the optimal scanning area; (b) full-field B-scanning image; (c) LU-SAFT defect reconstruction image based on compressive sensing; (d) traditional LU-SAFT defect reconstruction image; (e) signal amplitude graph of LU-SAFT defect reconstruction image based on compressive sensing; (f) signal amplitude graph of traditional LU-SAFT defect reconstruction image

误差为 0.3%;其横向位置为  $x=0.18$  mm,与实际偏差 0.18 mm,误差为 1.4%。图 8(c)的信噪比为 71.31 dB。图 8(f)中缺陷顶端散射也位于  $y=-3.76$  mm 深度处,并且其横向位置也为  $x=0.18$  mm。图 8(d)的信噪比为 50.35 dB。对比图 8(e)和图 8(f)可知,两幅图中缺陷的深度和横向位置相同并且与缺陷的实际位置几乎一致。图 8(c)的信噪比比图 8(d)更高,需要扫描的点数更少。

文中选择缺陷 SAFT 重建图像信噪比最大时的  $L$  值(即  $L=1.5$  mm)作为  $L$  的最优值,即样品表面每一个最优扫描区域的长度均为 1.5 mm,则样品表面两个最优扫描区域的总长度为 3 mm。对最优扫描区域进行精确扫描时,扫描步长越小,SAFT 成像的横向分辨率就越高,但扫描花费的时间也会越长。综合考虑后,

实验中以小步长 0.05 mm 对最优扫描区域进行精确扫描,并使用最优扫描区域内所有扫描的数据进行成像。因此,本次实验在最优扫描区域内共扫查了 60 个点,这 60 个点加上 40 个稀疏扫描点总共为 100 个点。

按照基于压缩感知的 LU-SAFT 方法对检测区域进行扫描,共扫描了 100 个点,耗时 0.63 min;而扫描同一检测区域,以 0.05 mm 为步长按照传统 LU-SAFT 逐点扫描的方式进行扫描,则需要扫描 500 个点,耗时 3.15 min。相比于传统 LU-SAFT 的逐点扫描过程,按照基于压缩感知的 LU-SAFT 方法进行扫描,扫描点数减少了 80%,扫描时间缩短了约 2.52 min。

从以上结果可以看出,基于压缩感知的 LU-SAFT 方法相比传统 LU-SAFT 可以缩短扫描时间,提升扫描效率。



## 5 结 论

首先对基于压缩感知的 LU-SAFT 原理及处理流程进行分析, 然后对流程中稀疏扫描点数  $X_s$  的取值、字典  $D$  的构建以及  $L$  的取值进行讨论并选取了合适的  $X_s$  值和  $L$  值, 最后基于分析所得的参数进行实验。实验结果表明, 对于相同的扫描面积, 传统 LU-SAFT 的扫查过程需要扫查 500 个点, 耗时 3.15 min; 而使用基于压缩感知的 LU-SAFT 可以将扫描点数量减少到 100, 将扫描时间缩短到 0.63 min。同时, 相比于传统 LU-SAFT, 基于压缩感知的 LU-SAFT 方法能够重建出更高信噪比的 SAFT 缺陷图像, 从而证明了基于压缩感知的 LU-SAFT 的有效性和可行性。综上, 基于压缩感知的 LU-SAFT 相比传统 LU-SAFT 有效提升了扫描效率, 缩短了扫描时间, 为传统 LU-SAFT 扫描过程耗时长的问题提供了新的解决思路和解决方法。

### 参 考 文 献

- [1] 李新科. 桥梁拉索表面缺陷图像检测关键技术的研究[D]. 重庆: 重庆大学, 2014.  
Li X K. Research on key technology of image detection of surface defects of bridge cables[D]. Chongqing: Chongqing University, 2014.
- [2] 宋登元, 王秀山. 超大规模集成电路芯片的激光缺陷检测技术[J]. 激光杂志, 1998, 19(6): 11-13.  
Song D Y, Wang X S. Laser defect detection techniques for very large scale integration(VLSI) wafers[J]. Laser Journal, 1998, 19(6): 11-13.
- [3] 王世通, 杨雨英, 赵丽敏, 等. 光学元件表面缺陷散射光成像数值模拟研究[J]. 中国激光, 2015, 42(7): 0708005.  
Wang S T, Yang Y Y, Zhao L M, et al. Numerical simulation research on scattering light imaging of surface defects of optical components[J]. Chinese Journal of Lasers, 2015, 42(7): 0708005.
- [4] Jian X, Fan Y, Edwards R S, et al. Surface-breaking crack gauging with the use of laser-generated Rayleigh waves[J]. Journal of Applied Physics, 2006, 100(6): 064907.
- [5] Bannouf S, Robert S, Casula O, et al. Data set reduction for ultrasonic TFM imaging using the effective aperture approach and virtual sources[J]. Journal of Physics: Conference Series, 2013, 457(1): 012007.
- [6] An Y K, Song H, Sohn H. Wireless ultrasonic wavefield imaging via laser for hidden damage detection inside a steel box girder bridge[J]. Smart Materials and Structures, 2014, 23(9): 095019.
- [7] Lomonosov A M, Hess P. Nonlinear surface acoustic waves: realization of solitary pulses and fracture[J]. Ultrasonics, 2008, 48(6/7): 482-487.
- [8] Wang H C, Fleming S, Lee Y C, et al. Laser ultrasonic surface wave dispersion technique for non-destructive evaluation of human dental enamel[J]. Optics Express, 2009, 17(18): 15592-15607.
- [9] Zhao Y, Chen J W, Sun J H, et al. Applications of laser ultrasonic technique on nondestructive testing and evaluation of materials[J]. MATEC Web of Conferences, 2018, 173: 02033.
- [10] 杨晨, 段滋华, 马海桃, 等. 金属管道表面缺陷微波无损检测[J]. 无损检测, 2013, 35(3): 34-37, 44.  
Yang C, Duan Z H, Ma H T, et al. Microwave nondestructive testing of metal pipe surface defects[J]. Nondestructive Testing, 2013, 35(3): 34-37, 44.
- [11] 李海洋, 智斌亮, 潘强华, 等. 表面窄缺陷深度的光声检测方法[J]. 光学学报, 2022, 42(2): 0212001.  
Li H Y, Zhi B L, Pan Q H, et al. Photoacoustic detection method for depth of surface narrow defects[J]. Acta Optica Sinica, 2022, 42(2): 0212001.
- [12] 谭辉, 陈友兴, 金永, 等. 丁羟衬层固化状态的激光超声实时监测方法研究[J]. 光学学报, 2022, 42(8): 0814004.  
Tan H, Chen Y X, Jin Y, et al. Laser ultrasonic real-time monitoring method for solidification state of butylated hydroxy lining[J]. Acta Optica Sinica, 2022, 42(8): 0814004.
- [13] Bednar J B. A brief history of seismic migration[J]. Geophysics, 2005, 70(3): 3MJ-20MJ.
- [14] Lévesque D, Asaumi Y, Lord M, et al. Inspection of thick welded joints using laser-ultrasonic SAFT[J]. Ultrasonics, 2016, 69: 236-242.
- [15] Lévesque D, Bescond C, Lord M, et al. Inspection of additive manufactured parts using laser ultrasonics[C]. AIP Conference Proceedings, 2016, 1706(1): 130003.
- [16] Lévesque D, Blouin A, Néron C, et al. Performance of laser-ultrasonic F-SAFT imaging[J]. Ultrasonics, 2002, 40(10): 1057-1063.
- [17] Levesque D, Ochiai M, Blouin A, et al. Laser-ultrasonic inspection of surface-breaking tight cracks in metals using SAFT processing[C]//2002 IEEE Ultrasonics Symposium, 2002. Proceedings, October 8-11, 2002, Munich, Germany. New York: IEEE Press, 2003: 753-756.
- [18] Lukowski T, Stepinski T, Kowal J. Synthetic aperture focusing technique with virtual transducer for immersion inspection of solid objects[J]. Insight-Non-Destructive Testing and Condition Monitoring, 2012, 54(11): 623-627.
- [19] Ochiai M, Levesque D, Talbot R, et al. Visualization of surface-breaking tight cracks by laser-ultrasonic F-SAFT[C]. AIP Conference Proceedings, 2002, 657(1): 1497-1503.
- [20] Qin K H, Yang C, Sun F. 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.
- [21] Stepinski T, Lingvall F. Optimized algorithm for synthetic aperture imaging[C]//IEEE Ultrasonics Symposium, August 23-27, 2004, Montreal, QC, Canada. New York: IEEE Press, 2005: 701-704.
- [22] Yang C, Qin K H, Li Y Z. Real-time ultrasonic imaging for multi-layered objects with synthetic aperture focusing technique[C]//2014 IEEE International Instrumentation and Measurement Technology Conference (I2MTC) Proceedings, May 12-15, 2014, Montevideo, Uruguay. New York: IEEE Press, 2014: 561-566.
- [23] 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. Study on synthetic aperture focused ultrasound imaging technology[D]. Tianjin: Tianjin University, 2010.
- [24] 李俊燕, 沈中华, 倪晓武, 等. 基于合成孔径聚焦技术的激光超声无损检测方法研究[J]. 中国激光, 2018, 45(9): 0904003.  
Li J Y, Shen Z H, Ni X W, et al. Laser-ultrasonic non-destructive detection based on synthetic aperture focusing technique[J]. Chinese Journal of Lasers, 2018, 45(9): 0904003.
- [25] 罗嵘. 基于频域合成孔径聚焦的主轴超声成像方法研究[D]. 南昌: 南昌航空大学, 2018.  
Luo R. Research on spindle ultrasonic imaging method based on frequency domain synthetic aperture focusing[D]. Nanchang: Nanchang Hangkong University, 2018.
- [26] 孙宝申, 沈建中. 合成孔径聚焦超声成像(一)[J]. 应用声学, 1993, 12(3): 43-48.  
Sun B S, Shen J Z. Synthetic aperture focused ultrasound imaging (I)[J]. Journal of Applied Acoustics, 1993, 12(3): 43-48.
- [27] 孙宝申, 沈建中. 合成孔径聚焦超声成像(二)[J]. 应用声学, 1993, 12(5): 39-44.  
Sun B S, Shen J Z. Synthetic aperture focused ultrasound imaging (II)[J]. Journal of Applied Acoustics, 1993, 12(5): 39-44.
- [28] 孙宝申, 沈建中. 合成孔径聚焦超声成像(三)[J]. 应用声学, 1994, 13(2): 39-44.

- Sun B S, Shen J Z. Synthetic aperture focused ultrasound imaging (III)[J]. *Journal of Applied Acoustics*, 1994, 13(2): 39-44.
- [29] 孙宝申, 张凡, 沈建中. 合成孔径聚焦声成像时域算法研究[J]. *声学学报*, 1997, 22(1): 42-49.
- Sun B S, Zhang F, Shen J Z. Synthetic aperture focusing in time-domain for acoustic imaging[J]. *Acta Acustica*, 1997, 22(1): 42-49.
- [30] 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 C. Study on synthetic aperture focused ultrasound imaging technology for layered objects[D]. Beijing: Tsinghua University, 2014.
- [31] 陈楚, 应恺宁, 刘念, 等. 相移迁移法在激光超声合成孔径聚焦技术中的应用[J]. *中国激光*, 2021, 48(3): 0304001.
- Chen C, Ying K N, Liu N, et al. Application of phase shift migration method in laser ultrasonic SAFT[J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2021, 48(3): 0304001.
- [32] Ying K N, Ni C Y, Dai L N, et al. Multi-mode laser-ultrasound imaging using time-domain synthetic aperture focusing technique (T-SAFT)[J]. *Photoacoustics*, 2022, 27: 100370.
- [33] Park B, Sohn H. Accelerated damage visualization using binary search with fixed pitch-catch distance laser ultrasonic scanning[J]. *Smart Materials and Structures*, 2017, 26(7): 075005.
- [34] Yu L J, Xie X C. Brief introduction of compressed sensing theory [J]. *Video Engineering*, 2008, 32(12): 16-18.
- [35] Elad M. Optimized projections for compressed sensing[J]. *IEEE Transactions on Signal Processing*, 2007, 55(12): 5695-5702.
- [36] Zymnis A, Boyd S, Candes E. Compressed sensing with quantized measurements[J]. *IEEE Signal Processing Letters*, 2010, 17(2): 149-152.
- [37] Park B, Sohn H, Liu P P. Accelerated noncontact laser ultrasonic scanning for damage detection using combined binary search and compressed sensing[J]. *Mechanical Systems and Signal Processing*, 2017, 92: 315-333.
- [38] 孙强, 戴鹭楠, 应恺宁, 等. 二分搜索和压缩感知在激光超声内部缺陷快速检测技术的应用[J]. *红外与激光工程*, 2022, 51(2): 20210810.
- Sun Q, Dai L N, Ying K N, et al. Application of binary search and compressive sensing for rapid detection of defects inside laser ultrasound[J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2022, 51(2): 20210810.
- [39] Park B, Sohn H. Reconstruction of laser ultrasonic wavefield images from reduced sparse measurements using compressed sensing aided super-resolution[C]. *AIP Conference Proceedings*, 2017, 1806(1): 030003.
- [40] Ohlsson H, Yang A Y, Dong R, et al. Nonlinear basis pursuit [C]//2013 Asilomar Conference on Signals, Systems and Computers, November 3-6, 2013, Pacific Grove, CA, USA. New York: IEEE Press, 2014: 115-119.

## Fast Laser Ultrasonic Synthetic Aperture Focusing Technology Based on Compressed Sensing

He Zhitong<sup>1</sup>, Ying Kaining<sup>2</sup>, Dai Lunan<sup>2</sup>, Ni Chenyin<sup>1\*</sup>

<sup>1</sup>*School of Electronic Engineering and Optoelectronic Technology, Nanjing University of Science and Technology, Nanjing 210094, Jiangsu, China;*

<sup>2</sup>*College of Science, Nanjing University of Science and Technology, Nanjing 210094, Jiangsu, China*

### Abstract

**Objective** In the industrial sector, the processing or extended utilization of various metal workpieces can generate assorted surface and internal defects. These imperfections can compromise the mechanical strength of the workpiece, thereby reducing its operational lifespan. Given its high penetration capacity and sensitivity, ultrasonic inspection has gained widespread usage in defect detection. In recent years, there has been an increased focus on imaging technologies in the evolution of defect detection methods. Among these, the synthetic aperture focusing technique (SAFT) is a viable imaging algorithm for ultrasonic inspections. It replaces large-aperture sensors with a series of individual small-aperture sensors, thereby enhancing the lateral resolution. The laser ultrasound synthetic aperture focusing technology (LU-SAFT) is a fusion of SAFT and laser ultrasound technologies, reaping the benefits of both. However, conventional LU-SAFT typically requires small-step scanning of the sample surface to be tested to enhance lateral resolution. This methodology, while effective, results in a prolonged overall detection time, thereby reducing the efficiency of the detection process. This major limitation hinders the practicality of traditional LU-SAFT. In our study, we aim to enhance the scanning efficiency and reduce the scanning duration of the conventional LU-SAFT.

**Methods** This study presented a LU-SAFT method based on compressed sensing to enhance the scanning efficiency of conventional LU-SAFT. Initially, compressed sensing was employed to retrieve the maximum intensity of the A-scanning signal at the scanning points of the entire field from the maximum intensity of the A-scanning signal at sparse scanning points. Following that, the optimal scanning area of the sample surface was determined. Subsequently, scanning was conducted in this optimal area. Finally, SAFT image reconstruction was conducted for the defect. In the experiment, a pulsed laser was utilized to incite ultrasound on the surface of a defective sample. A laser Doppler vibrometer was employed to detect the ultrasound, and the LU-SAFT method rooted in compressed sensing was applied to identify the defects in the sample. This process served to confirm the feasibility of the proposed method.

**Results and Discussions** The LU-SAFT method is used to scan the detection area based on compressed sensing. A total of 100 points are scanned, taking 0.63 min. Conversely, scanning with the conventional LU-SAFT method, which employs a scan step of 0.05 mm, requires 500 points and takes 3.15 min. When compared to the traditional LU-SAFT scanning process, the LU-SAFT

method based on compressed sensing reduces the number of scanning points by 80% and decreases the scanning time by approximately 2.52 min. In the LU-SAFT defect reconstruction image based on compression sensing (Fig. 8), the top of the defect is located at a depth of  $-3.76$  mm, deviating from the actual measurement by  $0.01$  mm, an error of  $0.3\%$ . The lateral position is  $0.18$  mm, deviating from the actual value by  $0.18$  mm, with an error of  $1.4\%$ . The signal-to-noise ratio corresponds to  $71.31$  dB. Meanwhile, in the conventional LU-SAFT defect reconstruction image (Fig. 8), the top scattering of the defect is positioned at a depth of  $-3.76$  mm and its lateral position remains at  $0.18$  mm. However, the signal-to-noise ratio is lower at  $50.35$  dB. Comparing the LU-SAFT defect reconstruction image based on compression sensing with the conventional LU-SAFT defect reconstruction image, it is evident that the depth and lateral positions of the defects in both images are nearly identical to the actual defects. Furthermore, the signal amplitude map of the LU-SAFT defect reconstruction image based on compression sensing (Fig. 8) showcases a higher signal-to-noise ratio and requires fewer scanned points than the conventional LU-SAFT defect reconstruction image (Fig. 8). From these results, it is clear that the LU-SAFT method based on compression sensing significantly reduces the scanning time of traditional LU-SAFT, thereby enhancing scanning efficiency.

**Conclusions** In this study, the principle and processing flow of LU-SAFT based on compressed sensing are analyzed initially. Subsequently, the value of sparse scan points, construction of a dictionary, size of the optimal scanning area, and selection of suitable values are discussed. Finally, experiments are conducted using the parameters obtained from this analysis. The experimental results demonstrate that the LU-SAFT defect reconstruction image based on compressed sensing can enhance scanning efficiency and reduce the scanning time. These findings can offer fresh perspectives and solutions to address the time-consuming scanning process inherent in conventional LU-SAFT.

**Key words** laser optics; compressed sensing; synthetic aperture focusing technology; laser ultrasonic; defect detection