

小波去噪在太赫兹无损检测中的应用

张霁旸^{1,2}, 任姣姣^{1,2}, 陈思宏^{1,2}, 李丽娟^{1,2*}, 赵常双³

¹长春理工大学光电工程学院光电测控与光信息传输技术教育部重点实验室, 吉林 长春 130022;

²长春理工大学光电工程学院光电工程国家级实验教学示范中心, 吉林 长春 130022;

³中国人民解放军 93367 部队, 吉林 四平 136000

摘要 提出了层析短时积分成像法,并通过实验验证了该方法的数据质量更高,成像效果优于传统的层析成像法;在小波去噪理论方面,结合太赫兹信号的特点提出 $\delta\text{-}\sigma$ 评价规则,利用该评价规则遴选出最优的小波去噪组合(即 sym7 小波,分解尺度为 5),并以此为基础设计酚醛塑料样件进行无损检测层析短时积分成像实验,对比不同的小波去噪组合,从识别缺陷数量、缺陷识别率这两个主观评价指标和韦伯对比度这一客观评价指标上对比小波去噪的效果,结果表明:sym7 小波(分解尺度为 5,软阈值处理)对酚醛楔形缺陷无损检测信号小波去噪具有良好的效果,信号预处理后的样件无损检测图像背景噪声带得到了有效抑制,预制缺陷与背景区域的对比效果更加明显,能够清晰准确地获取样件的内部结构变化。

关键词 成像系统; 太赫兹成像; 层析成像; 小波; 无损检测

中图分类号 TN911.74; O4343.1

文献标志码 A

doi: 10.3788/CJL202047.0114001

Application of Wavelet Denoising in Terahertz Nondestructive Detection

Zhang Jiyang^{1,2}, Ren Jiaojiao^{1,2}, Chen Sihong^{1,2}, Li Lijuan^{1,2*}, Zhao Changshuang³

¹Key Laboratory of Photoelectric Measurement and Control and Optical Information Transmission Technology, Ministry of Education, College of Optoelectronic Engineering, Changchun University of Science and Technology, Changchun, Jilin 130022, China;

²National Experimental Teaching and Demonstration Center of Optoelectronic Engineering, College of Optoelectronic Engineering, Changchun University of Science and Technology, Changchun, Jilin 130022, China;

³93367 troops of the Chinese People's Liberation Army, Siping, Jilin 136000, China

Abstract This paper proposes a tomographic short-time integral imaging method. In terms of terahertz tomography, the experimental results show that the data quality and imaging effect of the proposed short-time integral imaging method are better than those of the traditional method. In the wavelet denoising theory, a $\delta\text{-}\sigma$ evaluation rule is proposed based on the characteristics of the terahertz signal, and the optimal wavelet denoising combination (e.g., the sym7 wavelet with a decomposition scale of 5) is selected using the evaluation rule. Based on this, the short-time integral imaging experiment of nondestructive detection tomography of phenolic plastic samples is set up, and different wavelet denoising combinations are compared. The effect of wavelet denoising is compared from two subjective evaluation indexes of defect number and defect recognition rate and the objective evaluation index of Weber contrast. Results prove that the sym7 wavelet (with the decomposition scale of 5, soft-threshold processing) is effective in wavelet denoising of nondestructive detection signals of phenolic wedge defects. The background noise in the nondestructive detection image of the sample after signal preprocessing is effectively suppressed. The contrast effect between prefabricated defects and the background area is more obvious, and the internal structural changes in the sample can be detected easily and accurately.

Key words imaging systems; terahertz imaging; tomographic imaging; wavelets; nondestructive detection

OCIS codes 110.6795; 110.6955; 110.7410; 120.4290

收稿日期: 2019-07-04; 修回日期: 2019-08-28; 录用日期: 2019-10-09

基金项目: 国家 863 计划(JSZL2015411C002)

* E-mail: custjuan@126.com

1 引 言

太赫兹 (THz) 无损检测是一种新兴的无损检测技术, 它以不损伤或不破坏被测材料的结构和稳定性为前提, 利用太赫兹波来获取材料的特性和内部结构信息。通常, 太赫兹波是特指频率为 $0.1 \sim 10$ THz 的电磁波^[1], 该波段介于微波与红外波之间, 与其他波段的电磁波相比, 太赫兹波具有瞬态性、高透性、安全性、指纹谱性等特性^[2]。近年来, 随着波谱探测器和太赫兹辐射源的不断发展、完善, 太赫兹无损检测技术发展迅猛, 已成为前沿热点课题。

在实际的无损检测应用中, 太赫兹信号会受到以下几方面因素的干扰:

- 1) 水蒸气及空气分子的运动和能级吸收;
- 2) 系统内部噪声(光子辐射噪声、热噪声、散粒噪声等);
- 3) 待测样件的材料特性(层压结构内部微小孔隙造成的层间多次反射、表面粗糙度较差或颗粒性较大造成的散射等)^[3]。

上述干扰因素直接制约着太赫兹无损检测成像的质量, 影响对检测材料相关信息的准确判定。小波变换具有良好的时频局部化分析能力和多分辨率分析的功能, 是信号分析、处理领域强有力的应用工具。

本文采用小波变换对太赫兹探测信号进行去噪预处理。首先研究小波阈值去噪各项参数对太赫兹时域信号去噪的影响, 并借助自建的去噪性能评价

标准, 从中遴选出较为理想的小波去噪组合; 然后设计无损检测成像实验, 通过对比去噪预处理前后的检测结果, 验证小波变换在太赫兹无损检测信号预处理中的有效性。

2 原理与方法

2.1 太赫兹无损检测成像的原理

本实验采用图 1 所示自行搭建太赫兹的时域光谱系统对样品进行成像, 该系统所采用的飞秒激光器为锁模钛蓝宝石飞秒激光器, 产生的光脉冲的中心波长为 810 nm , 重复频率为 80 MHz , 脉宽为 100 fs , 光电晶体为砷化镓晶体, 光电导天线偏置电压为 $\pm 50 \text{ V}$ 。探测带宽为 $0.02 \sim 2 \text{ THz}$, 输出频率可达到 1 kHz , 信噪比不小于 70 dB 。成像实现过程如下: 飞秒激光器发出的激光脉冲经过分束器被一分为二, 其中较强的一束为抽运光, 到达发射单元后激发出太赫兹脉冲; 较弱的一束光作为探测光, 从分束器出射后进入时间延迟控制单元。时间延迟控制单元利用偏振态变化实时改变探测光与抽运光之间的光程, 使探测光可以在不同时刻对太赫兹脉冲瞬时电场的大小进行取样测量, 从而获得完整的太赫兹脉冲电场强度随时间变化的单点检测信息。按照一定的顺序对垂直于太赫兹波传播方向的 $x-y$ 平面进行采样, 可以获得与平面各采样点对应的太赫兹时域波形数据阵列, 在实际应用中根据不同的检测要求对数据阵列选取不同的物理量进行重构, 就能够得到一幅反映样件特定信息的二维图像^[4-5]。

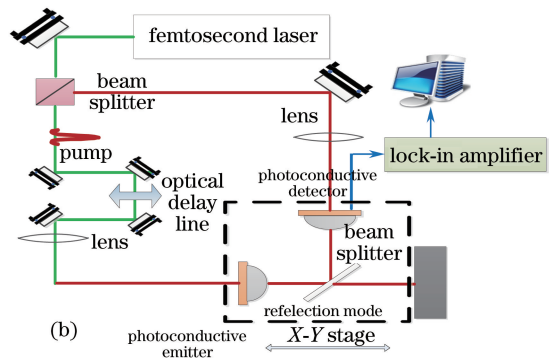
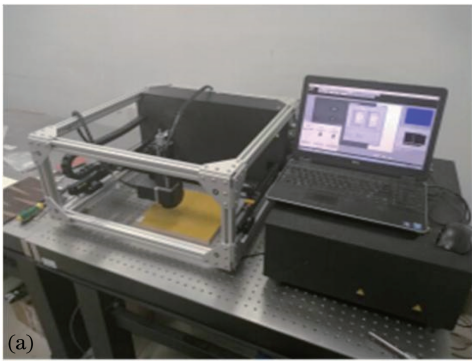


图 1 太赫兹时域光谱系统实物及原理图。(a) 实物图; (b) 原理图

Fig. 1 Photograph and schematic of terahertz time-domain spectroscopy system. (a) Photograph; (b) working principle

在太赫兹无损检测的实际应用中, 也可根据检测需求自主选择成像参数。

(1) 层析成像法^[6]

层析成像法以特定时间点样件的时域波形振幅值作为成像参数。该成像法可用于获取材料内部的

切面信息, 其表达式为

$$S_5(x, y) = S_{\text{sample}}(x, y, t_0), t_0 \in (t_1, t_2), \quad (1)$$

式中: S_5 为 t_0 时刻太赫兹信号集, 其大小为 $x \times y$; S_{sample} 为样件的太赫兹信号集, 其大小为 $x \times y \times (t_2 - t_1)$; t_1, t_2 分别为样件上、下表面反射的太赫

兹信号到达探测器的时间; t_0 具体取值需根据实际检测需求相应。在反射式探测中,该成像方法获取材料内部切面信息的实现原理可简要表述如下:

假设材料是均质体,折射率为 n ,厚度为 d 。由光程差公式可推出

$$c(t_2 - t_1) = 2nd, \quad (2)$$

式中: c 为光速。则 t_0 与材料纵向探测深度 d_0 的对应关系为

$$\frac{d_0}{d} = \frac{t_0 - t_1}{t_2 - t_1}, \quad (3)$$

式中: t_1 、 t_2 、 d 均为常数。因此,选取 t_0 时刻的太赫兹时域波形振幅重构成像能够反映深度为 d_0 时材料的切面信息。

层析成像法中单个时间点的振幅数据容易受到不确定因素的干扰而引起偏差,因此本文在层析成像法的基础上提出了层析短时积分成像法。

(2) 层析短时积分成像法

层析短时积分成像法选取 t_0 附近微小时间区域振幅平方的积分作为成像参数,如图 2 所示,其表达式为

$$S_6(x, y) = \int_{t_0 - \Delta t}^{t_0 + \Delta t} S_{\text{sample}}^2(x, y, t) dt, t_0 \in (t_1, t_2), \quad (4)$$

式中: S_6 为 t_0 时刻前后 Δt 范围积分的太赫兹信号集,其大小为 $x \times y$; t 为太赫兹飞行时间; Δt 具体取值需要根据实际检测需求相应调整。由于层析短时积分成像法的成像参数是采用多个时间点振幅数据构成的,因此理论上来说数据质量更好,成像效果要优于传统的层析成像法。在反射式探测中,层析短时积分成像法同样能够反映材料不同深度处的切面信息,从而定位到缺陷所在的具体位置。

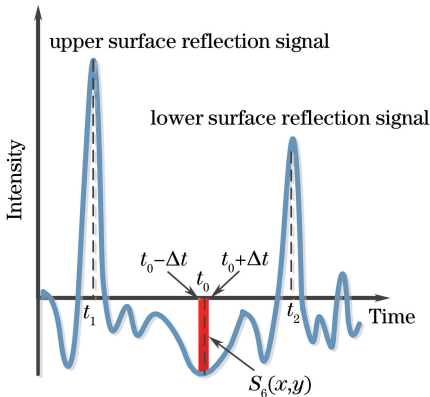


图 2 层析短时积分成像法示意图

Fig. 2 Schematic of tomographic short-time integral imaging

为了证实层析短时积分成像法在获取材料切面信息中的优势,本文建立了成像对比实验,实验样件为上下表面平行的酚醛塑料板,在样件底部设置了 6 个直径和深度均相同的孔隙缺陷,选取的缺陷区域如图 3(b)中虚线框区域所示。在使用 THz-TDS 成像系统得到各采样点的时域波形数据后,对样件的同一纵向深度位置分别使用传统的层析成像法和新的层析短时积分成像法进行信息重构成像。获得的检测图像如图 3 所示,可观察到:层析成像法所得图像的清晰度较差,且仅能识别个别缺陷;相比之下,层析短时积分成像法可识别全部缺陷,成像质量显著提升。

2.2 小波变换去噪理论

通常,含有噪声的信号可以简单地表示为

$$y_i = f_i + \varepsilon z_i, i = 1, \dots, n, \quad (5)$$

式中: y_i 为含有噪声的信号; f_i 为理想的无噪信号; z_i 为掺杂的噪声; ε 为噪声水平; n 为采样长度。小波去噪的本质就是利用信号和噪声在小波变换下的不同特点,将噪声 εz_i 从含噪信号 y_i 中抽离出来,从而尽可能地还原出信号 f_i [7]。

若 L^2 为平方可积空间,则存在函数 $\psi(t) \in L^2$, 并且其 Fourier 变换为 $\hat{\psi}(\omega)$, 若 $\hat{\psi}(\omega)$ 满足容许条件

$$\int_0^\infty \frac{|\hat{\psi}(\omega)|^2}{|\omega|} d\omega < \infty, \quad (6)$$

式中: ω 为频率,则函数 $f(t) \in L^2$ 的连续小波变换为

$$W_f(a, b) = \langle f(t), \psi_{a,b}(t) \rangle = a^{-1/2} \int_{-\infty}^{+\infty} f(t) \bar{\psi}\left(\frac{t-b}{a}\right) dt, a > 0, \quad (7)$$

式中: W_f 为 $f(t)$ 连续小波变换的结果; a 为尺度因子; b 为时间平移因子; $\psi_{a,b}(t)$ 为小波母函数; $\bar{\psi}(\cdot)$ 为小波母函数的共轭。取 $a = a_0^j, b = a_0^j k$ (j 为离散化值数, k 为离散化系数, j, k 为正整数),将二者进行离散化处理,则离散小波变换可定义为

$$W_f(j, k) = a_0^{-j/2} \int_{-\infty}^{+\infty} f(t) \bar{\psi}(a_0^j t - k) dt. \quad (8)$$

以三层分解为例分析小波去噪过程,如图 4 所示。

第一步,使用选定的小波函数将信号分解到各尺度中, CA_1 、 CA_2 、 CA_3 为小波分解后的低通分量, CD_1 、 CD_2 、 CD_3 为小波分解后的高通分量,噪声一般被包含于 CD_1 、 CD_2 、 CD_3 中。

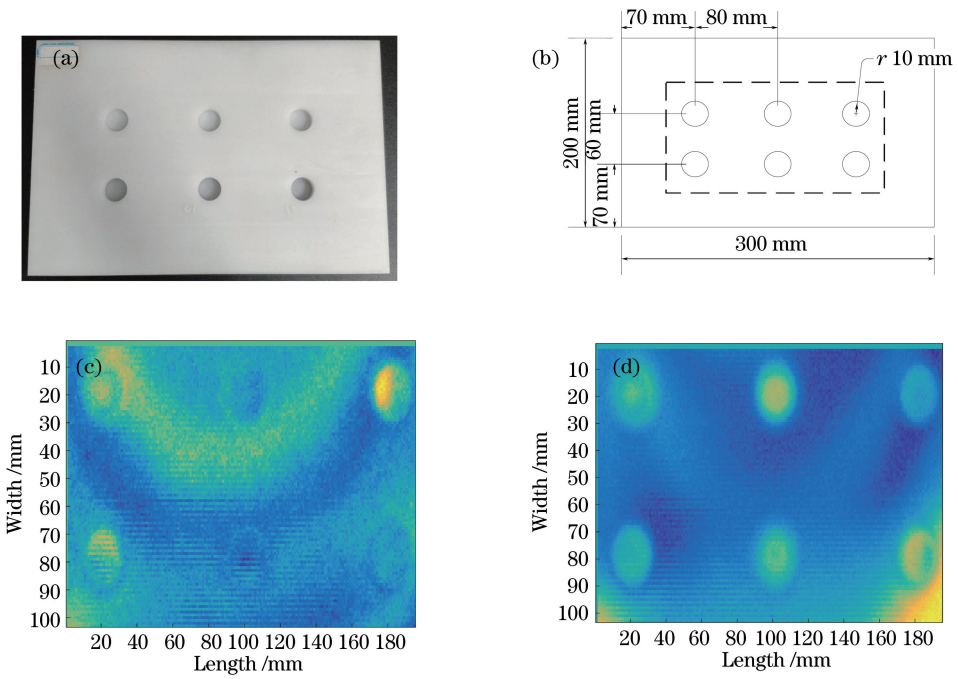


图 3 酚醛塑料板样件实物图及两种层析成像方法缺陷检测图像的对比。(a)酚醛塑料板样件实物图；
(b)缺陷尺寸设计图；(c)层析成像法的检测结果；(d)层析短时积分成像法的检测结果

Fig. 3 Photograph of phenolic plastic plate and comparison of defect detection images of two tomographic methods.
(a) Photograph of phenolic plastic plate; (b) defect size design; (c) detection result of tomographic imaging method; (d) detection result of tomographic short-time integral imaging method

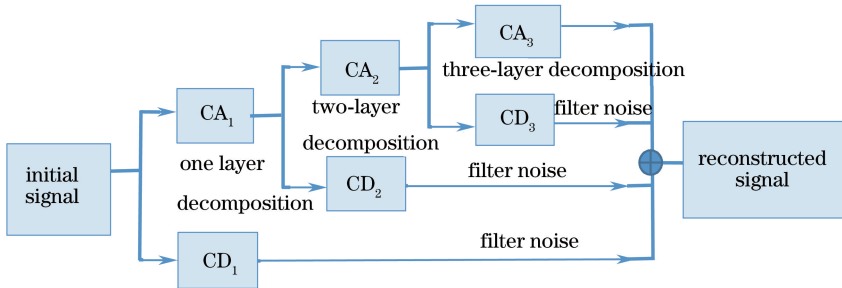


图 4 小波阈值去噪实现过程

Fig. 4 Implementation process of wavelet threshold denoising

第二步,针对分解后各个层次的高频系数按照一定的阈值量化规则进行处理。

第三步,利用最底层低频系数 CA_3 和处理后的各个层次的高频系数 CD_1 、 CD_2 、 CD_3 重构信号,完成去噪^[8]。

小波阈值去噪使用的传统的阈值函数主要有硬阈值函数和软阈值函数两种,其中:硬阈值函数将小于阈值的小波系数全部置零,保留大于阈值的小波系数,这种“一刀切”的处理策略势必会导致重构后的信号产生局部抖动,使去噪结果有较大方差;软阈值函数将所有大于阈值的小波系数都减去一个阈值量,虽然克服了硬阈值函数在阈值处不连续的缺点,但由于在整个小波域内小波系数改动较大,去噪后

脉冲信号的峰值信噪比较低^[9]。

对太赫兹时域信号去噪处理应满足两点要求:既要去除噪声区间波形的振荡,平滑谱线,又要防止主脉冲信号出现明显失真。因此,建立的去噪评价规则应综合衡量信号去噪后的噪声滤除效果和关键信息的保留程度,从而使得在该评价规则下选取的最优去噪组合能够在抑制噪声干扰和避免信号失真两者间达到一个较好的平衡。

在信号处理领域,传统的评价规则主要有信噪比和均方根误差两种^[10]。本文经多次实验证实,在对太赫兹时域信号的去噪效果进行评价时,采用这两种方法选取的去噪最优解会与真实最优解有较大偏差。

太赫兹时域信号具有噪声幅值相对很小,主要信息集中在主脉冲区间的特点。本文结合信号特点提出了 δ - σ 评价规则,同时使用参数 δ 和 σ 对信号的去噪效果进行评价。

$$\begin{cases} \delta = 10 \times \lg\left(\frac{P_{\text{signal}}^*}{P_{\text{noise}}^*}\right) \\ \sigma = \sum_{m_1}^{m_2} (\hat{f} - f)^2 \end{cases}, \quad (9)$$

式中: $P_{\text{signal}}^* = \frac{1}{m_2 - m_1} \sum_{m_1}^{m_2} \hat{f}^2$; $P_{\text{noise}}^* = \frac{1}{m_1} \sum_0^{m_1} \hat{f}^2 + \frac{1}{k - m_2} \sum_{m_2}^k \hat{f}^2$,其中 k 为太赫兹时域信号采样点的总数,取 $k=3200$; m_1 为主脉冲前2 ps时刻; m_2 为主脉冲后2 ps时刻; f 为去噪前的太赫兹时域信号; \hat{f} 为去噪后的太赫兹时域信号。(9)式表达的物理意义可解释如下:如图5所示, $[m_1, m_2]$ 代表主脉冲信号所在区间,其中 $[m_1, m_2]$ 选取主脉冲峰值位置前后2 ps范围; $[0, m_1]$ 和 $[m_2, k]$ 代表主脉冲信号区间以外的噪声区间; δ 值反映的是信号去噪后主脉冲信号区间与噪声区间功率之比, δ 值越高,表示去噪效果越明显; σ 值反映去噪前后主脉冲区间变化的程度, σ 值越低,说明主脉冲区间的失真程度越低。 δ - σ 评价规则利用 δ 和 σ 两参数可兼顾噪声滤除效果与主脉冲区间信号的保留程度。利用该评价规则依次选取各项参数去噪的最优解,结果表明:针对大多数太赫兹时域信号,在阈值法中选用sym7小波进行5层分解,并应用软阈值法时能获得较为稳定、理想的去噪效果,在较大程度上还原真实信号。

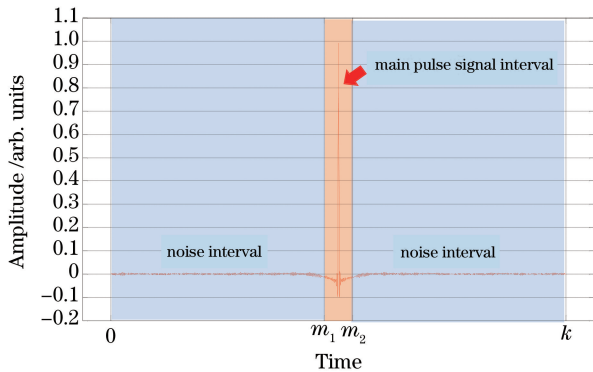


图5 δ - σ 评价规则区间设置示意图

Fig. 5 Schematic of interval setting of δ - σ evaluation rule

3 实验过程及结果

3.1 样品制备与实验设置

在材料使用和制造过程中,环境侵蚀、工艺落

后、人为疏忽等原因,可能会导致材料出现不同程度和不同类型的损伤,其中,内部孔隙缺陷对材料弯曲性能、层间剪切性能的影响较大,而且直观上难以及时发现,容易埋下重大安全隐患,因此对该类型缺陷实现准确检测具有重要的现实意义^[11-12]。

本次实验使用的样件是预制楔形缺陷的酚醛塑料板,在该材料中设置的楔形缺陷尺寸及实物如图6所示,将样件预制缺陷面倒扣在金属板上模拟内部孔隙缺陷,并在楔形缺陷样件同一缺陷相同深度不同位置分别选取两处,记为缺陷采样点1、2,在无缺陷的背景位置分别选取两处,标记为背景采样点3、4,以便于后续分析。采用太赫兹脉冲逐点扫描成像得到 $M \times N$ 的无损检测图像,其本质是由 $M \times N$ 个采样的太赫兹信号的某部分参数信息重构而成的,因此对各个采样点的太赫兹信号使用不同的阈值处理方法和分解尺度进行小波去噪,通过分析去噪前后获得无损检测图像的质量来评价小波去噪在太赫兹无损检测成像中的应用价值。实验时的环境温度设置为20℃,相对湿度 $<20\%$,选用透镜的焦距为76.2 mm,扫描步距设置为1 mm。反射基底为表面抛光金属板,并在金属板上表面摆放待测样件。为了尽可能获得好的成像质量,将透镜聚焦点设置于金属板上表面。

3.2 结果与讨论

在本实验中分别选取3组小波去噪组合:1) sym7小波,软阈值法,分解尺度为3层;2) sym7小波,硬阈值法,分解尺度为5层;3) sym7小波,软阈值法,分解尺度5层。分别对楔形缺陷样件选取141~145 ps处各像素点太赫兹时域信号进行功率谱积分成像,此时信号预处理前后的成像效果如图7所示。

针对设置的楔形缺陷,未经信号预处理直接获取的检测图像仅能隐约识别出部分预制缺陷,而且检测出的缺陷边界模糊,成像对比不明显,清晰度较低。理论上,背景区域的伪彩色分布应该比较均匀一致。但预处理前图像背景区域颜色分布的差异较大,并存在明显的噪声带,影响了成像质量,仅能目视观察到少部分缺陷,识别效果较差。产生这种现象主要是因为太赫兹波在酚醛塑料中传播时能量损失严重,探测器接收到的反射信号较弱,因此降低了无损检测信号的信噪比,降低了成像效果。观察经过信号预处理后获得的图像可以发现,预制缺陷区域的识别效果明显优于小波去噪预处理前的图像,同时背景区域噪声干扰产生的颜色带得到了显著抑

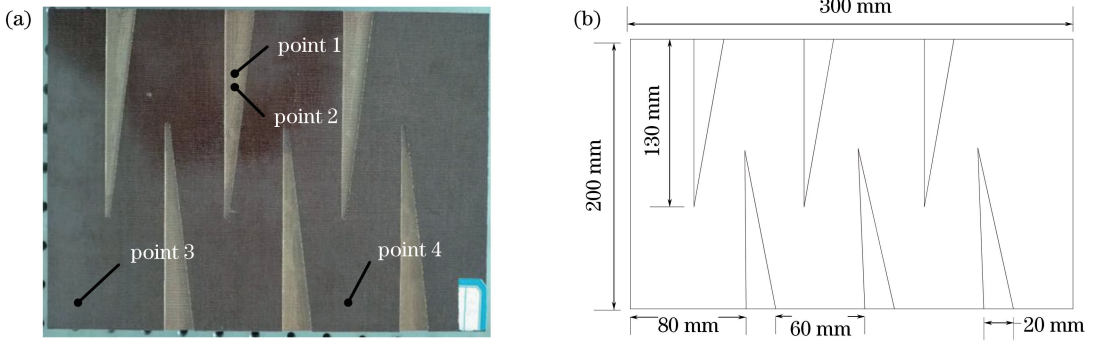


图 6 酚醛塑料样件实物及缺陷尺寸设计图。(a)实物图;(b)缺陷尺寸设计图

Fig. 6 Photograph and defect size design of phenolic plastic samples. (a) Photograph; (b) defect size design

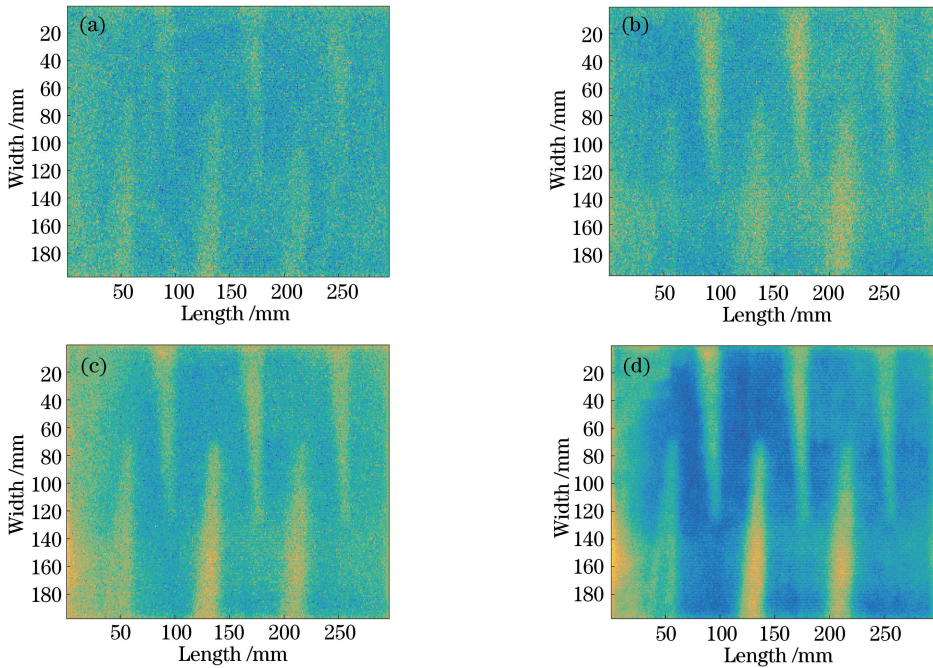


图 7 功率谱成像伪彩图。(a)预处理前;(b) sym7, 3 层, 软阈值预处理;
(c) sym7, 5 层, 硬阈值预处理;(d) sym7, 5 层, 软阈值预处理

Fig. 7 Pseudo-color maps of power spectral imaging. (a) Before preprocessing; (b) sym7, three layers, soft-threshold preprocessing; (c) sym7, five layers, hard-threshold preprocessing; (d) sym7, five layers, soft-threshold preprocessing

制。相同条件下,分解尺度为 5 层时的去噪效果明显优于 3 层时的去噪效果,并且相比于硬阈值处理方式,软阈值处理后的目标边缘更清晰,噪声带平滑效果更好。

上述目视观察图像属于主观评价方法,受观测环境、观测者的心理生理状态等因素的影响,评价结果不够稳定、客观。为了准确衡量小波去噪预处理对无损检测成像质量提升的效果,本文借助韦伯定律的思想采用韦伯对比度来评价去噪效果。韦伯对比度可表示为

$$C_w = \frac{L_t}{L_b}, \quad (10)$$

式中: C_w 为韦伯对比度; L_t 为图像目标(预制缺陷区域)的平均亮度; L_b 为图像背景(无预制缺陷区域)的平均亮度。(10)式可以较好地衡量目标与背景的对比如果。 C_w 值越大,两者的视觉对比效果越好。分别基于主观的缺陷识别率和客观的韦伯对比度来评价预处理前后的无损检测成像质量(取 141 ps 处成像图),结果如表 1 所示。

由表 1 可以看出:小波去噪预处理后,图像预制缺陷区域和背景区域的对比效果更好,成像更清晰,能够有效提高对材料内部结构的纵向探测能力;采用 sym7 小波,分解尺度为 5,并使用软阈值处理方式时,能获得比其他小波去噪组合更高的无损成像质量。

表 1 酚醛塑料样件中不同预制缺陷的无损检测图像评价结果

Table 1 Evaluation results of nondestructive detection images of different prefabricated defects in phenolic plastic samples

Phenolic plastic sample	Subjective evaluation		Objective evaluation
	Identify number of defects	Defect recognition rate /%	Weber contrast
Before pretreatment	4	66	0.292
Soft threshold, 3 layers	5	83	0.321
Hard threshold, 5 layers	6	100	0.388
Soft threshold, 5 layers	6	100	0.415

为探究成像质量提升的原因,以所选缺陷采样点 1、2 和背景采样点 3、4 为研究对象,对预处理前

后在 141~145 ps 处无损检测信号的形态进行研究,结果如图 8 所示。

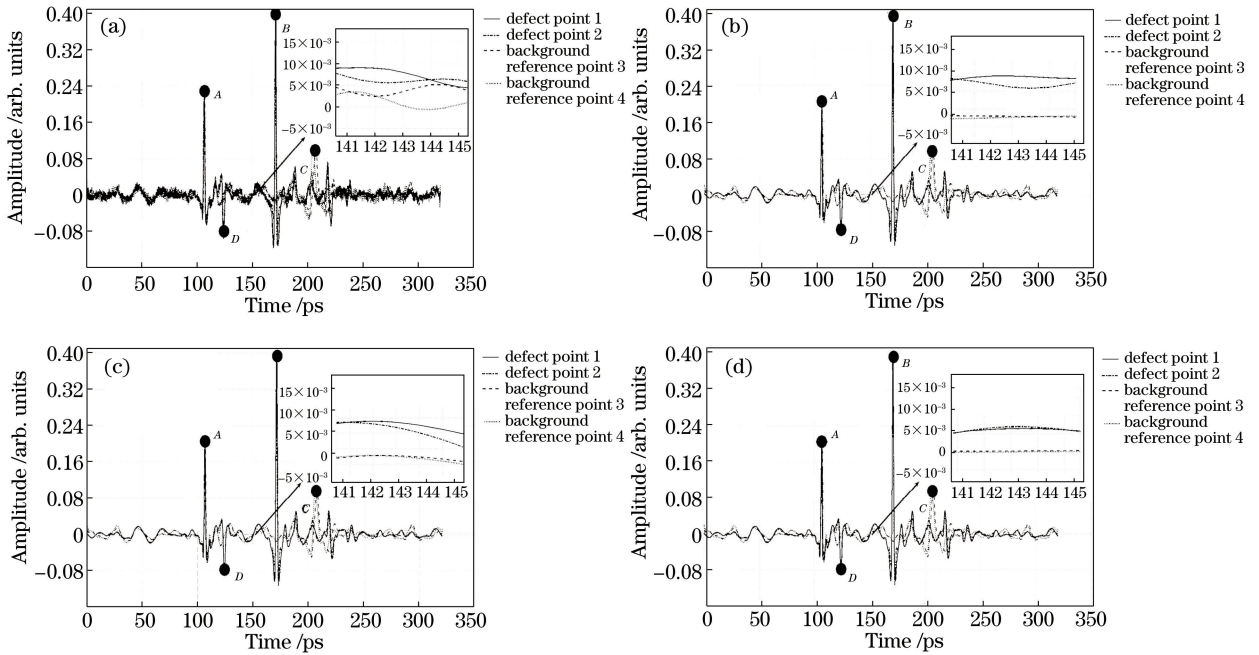


图 8 预处理前后各采样点的无损检测信号。(a)预处理前;(b) sym7, 3 层,软阈值预处理;(c) sym7, 5 层,硬阈值预处理;(d) sym7, 5 层,软阈值预处理

Fig. 8 Nondestructive detection signals of samples before and after preprocessing. (a) Before preprocessing; (b) sym7, three layers, soft-threshold preprocessing; (c) sym7, five layers, hard-threshold preprocessing (d) sym7, five layers, soft-threshold preprocessing

在图 8 中,点 A 所在的波峰信号表示太赫兹波传播到样品上表面时产生的反射回波;B 和 C 点所在的波峰信号分别表示缺陷采样点(1、2)和背景参考采样点(3、4)处的太赫兹波传播到样品下表面金属板时产生的反射回波。由于酚醛塑料的折射率大于空气的折射率,因此背景参考采样点要比缺陷采样点的下表面反射回波略有延迟;当缺陷采样点处的太赫兹波刚好传播到样品内部缺陷位置时,会在样品-空气界面发生反射,如 d 点所示。背景参考采样点处的太赫兹波在单一介质中传播,因此在该时间点不会产生反射回波。

理论上无损检测信号有如下特征:1)由于缺陷采样点 1、2 处设置的样品缺陷深度一致,因此两点

的信号形态应该基本相似;同理,背景采样点 3、4 的信号形态也应当基本相似。2)由于传播介质的不同,D 点之后的预制缺陷信号和背景参考信号形态会有显著差异。

对孔洞缺陷样品在 141~145 ps 附近的信号进行放大,可以发现,预处理前的信号完全杂糅在一起,无法有效分辨出缺陷信号和背景参考信号两者之间的差别,而使用各小波去噪组合预处理后的信号质量则有明显改善,表现在:1)缺陷处 1、2 两点采样信号的形态基本一致,背景处 3、4 两点采样信号的形态也基本一致;2)缺陷处与背景处采样信号之间的幅值差异较稳定,两者能够被明显区分,使用 sym7 小波,分解尺度为 5 层,并使用软阈值处理方

式时,能获得比其他小波去噪组合更高的信号质量。由此可以证实小波变换可以通过对无损检测信号进行预处理的方式使信息重构后的图像质量得到明显提升,且合理选择小波去噪的各项参数,能够获得相对更好的无损检测图像,从而清晰准确地探测到材料的内部信息。

4 结 论

本文主要通过使用小波变换对太赫兹信号进行处理,从而改善信息重构后获得的太赫兹无损检测成像质量。首先进行无损检测成像实验,对酚醛塑料样件设置规则的楔形缺陷,然后使用反射式层析成像方法比较不同的小波去噪组合对缺陷的识别效果,并分别基于主观的目视缺陷识别率和客观的韦伯对比度对图像进行评价。结果表明:使用 sym7 小波,分解尺度为 5 层,并使用软阈值处理方式时,酚醛楔形缺陷无损检测信号的小波去噪效果相对较好,无损检测图像中的背景噪声带都得到了有效抑制,预制缺陷与背景区域的对比效果明显,能够清晰准确地获取样件的内部结构变化。在太赫兹技术相关领域,采用小波去噪方法进行信号预处理具有一定的现实意义和广阔的应用前景。

参 考 文 献

- [1] Guan A H, Li Z, Ge H Y. The qualitative and quantitative detection of potassium alum in sweet potato starch based on terahertz time-domain spectroscopy [J]. Spectroscopy and Spectral Analysis, 2018, 38(1): 267-270.
管爱红, 李智, 葛宏义. 红薯淀粉中添加剂明矾的定性和定量太赫兹时域光谱技术检测[J]. 光谱学与光谱分析, 2018, 38(1): 267-270.
- [2] Zhu X, He X, Wang P, et al. Development of terahertz imaging technology in the assessment of burn injuries[J]. Journal of Biomedical Engineering, 2016, 33(1): 184-187.
- [3] Li M. Study on quality factors and improvement of terahertz time-domain spectroscopy [D]. Tianjin: Tianjin University, 2011.
李萌. 太赫兹时域光谱品质影响因素及改进研究[D]. 天津: 天津大学, 2011.
- [4] Bao R M, Wu S X, Zhao K, et al. Applying terahertz time-domain spectroscopy to probe the evolution of kerogen in close pyrolysis systems[J]. Science China Physics, Mechanics and Astronomy, 2013, 56(8): 1603-1605.

- [5] Zhang D D, Ren J J, Li L J, et al. Terahertz non-destructive testing technology for glass fiber honeycomb composites [J]. Acta Photonica Sinica, 2019, 48(2): 0212002.
张丹丹, 任姣姣, 李丽娟, 等. 玻璃纤维蜂窝复合材料的太赫兹无损检测技术[J]. 光子学报, 2019, 48(2): 0212002.
- [6] Ren J J, Li L J, Zhang D D, et al. Terahertz time domain spectral reflective tomography technology[J]. Infrared and Laser Engineering, 2018, 47(2): 0225002.
任姣姣, 李丽娟, 张丹丹, 等. 太赫兹时域光谱反射式层析成像技术[J]. 红外与激光工程, 2018, 47(2): 0225002.
- [7] Wang F. Research and application of signal denoising based on wavelet analysis [D]. Chengdu: Xihua University, 2009.
王芳. 小波分析在信号去噪中的应用研究[D]. 成都: 西华大学, 2009.
- [8] Ma X H, Cao J P, Dong S F. Wavelet analysis and application [J]. Microcomputer Development, 2003, 13(8): 93-94, 100.
马秀红, 曹继平, 董晟飞. 小波分析及其应用[J]. 微机发展, 2003, 13(8): 93-94, 100.
- [9] Gao Y D, Wang H L, You S H, et al. X-ray pulsar signal denoising based on two-parameter threshold function and multi-layer threshold [J]. Acta Optica Sinica, 2019, 39(12): 1204001.
高迎东, 王宏力, 由四海, 等. 基于双参数阈值函数和多层阈值的 X 射线脉冲星信号消噪[J]. 光学学报, 2019, 39(12): 1204001.
- [10] Liu X Y, Nie W, Wei H. Research of image edge detection based on wavelet multi-resolution analysis [J]. Software Engineer, 2015, 18(7): 55-56.
刘小豫, 聂维, 魏浩. 基于小波多分辨率分析的图像边缘检测研究[J]. 软件工程师, 2015, 18(7): 55-56.
- [11] Xiang J Y, Liu C X, Ma F G. Research progress on high performance silicone-modified phenolic resin[J]. Silicone Material, 2019, 33(1): 71-74.
向靖宇, 刘春霞, 马凤国. 高性能有机硅改性酚醛树脂的研究进展[J]. 有机硅材料, 2019, 33(1): 71-74.
- [12] Gao S S, Jin W Q, Wang Y J, et al. Target-background perceptual contrast metric for gray fusion images[J]. Infrared and Laser Engineering, 2015, 44(5): 1660-1665.
高绍姝, 金伟其, 王延江, 等. 灰度融合图像目标与背景感知对比度客观评价模型[J]. 红外与激光工程, 2015, 44(5): 1660-1665.