

# 基于希尔伯特变换和功率谱估计的薄缺陷厚度太赫兹检测

王洁<sup>1</sup>, 谭冰冲<sup>1</sup>, 陶星竹<sup>1</sup>, 徐成城<sup>1</sup>, 常天英<sup>1</sup>, 崔洪亮<sup>1,2</sup>, 张瑾<sup>1\*</sup>

(1. 吉林大学仪器科学与电气工程学院, 吉林 长春 130061;

2. 中国科学院重庆绿色智能技术研究院, 重庆 400714)

**摘要:** 提出将希尔伯特变换和功率谱估计相结合的光谱分析算法, 对太赫兹反射时域波形进行处理, 并将该算法应用于太赫兹时域光谱成像, 将缺陷厚度和图像灰度关联, 实现同时对玻璃纤维层压板内部缺陷厚度、位置和形状的成像检测。实验结果表明: 将多重信号分类谱估计、自回归谱估计和希尔伯特变换结合时, 能成功区分厚度为 0.08 mm 缺陷上下表面反射脉冲, 反射脉冲的时间分辨率小于 0.5 ps, 缺陷厚度的检测误差不高于 0.03 mm。

**关键词:** 太赫兹时域光谱; 厚度检测; 希尔伯特变换; 功率谱估计; 玻璃纤维层压板

中图分类号: TH744

文献标识码: A

## Terahertz detection of thin defects thickness based on Hilbert transform and power spectrum estimation

WANG Jie<sup>1\*</sup>, TAN Bing-Chong<sup>1</sup>, TAO Xing-Zhu<sup>1</sup>, XU Cheng-Cheng<sup>1</sup>, CHANG Tian-Ying<sup>1</sup>,  
CUI Hong-Liang<sup>1,2</sup>, ZHANG Jin<sup>1\*</sup>

(1. Jilin University, College of Instrumentation & Electrical Engineering, Changchun 130061, China;

2. Chongqing Institute of Green and Intelligent Technology, Chinese Academy of Sciences, Chongqing 400714, China)

**Abstract:** A spectral analysis algorithm based on the combination of Hilbert transform (HT) and power spectrum estimation has been proposed, and the terahertz reflection time domain waveform was processed. At the same time, the algorithm was applied to terahertz time domain spectroscopy imaging, defect thickness was correlated with image gray level, and the thickness, position and shape of defects in glass fiber laminate can be detected by imaging simultaneously. The experimental results show that when the multi-signal classification (MUSIC) spectrum estimation and auto regressive (AR) spectrum estimation are combined with Hilbert transform, the reflected pulses between upper and lower surfaces of defect with thickness of 0.08 mm can be successfully distinguished, the time resolution of reflected pulses is higher than 0.5 ps, and the detection error of defect thickness is no more than 0.03 mm.

**Key words:** terahertz time domain spectroscopy, thickness estimation, Hilbert transform, power spectrum estimation, glass fiber laminate

## 引言

玻璃纤维增强复合材料是以玻璃纤维及其制品作为增强材料, 合成树脂作为基体材料, 经过一定成型工艺制成的新型复合材料, 具有机械强度

高、可设计性强、抗腐蚀性好等优良特性, 在航天航空、船舶航运、石油化工、汽车工业等领域得到广泛应用<sup>[1-2]</sup>。但玻璃纤维复合材料在其制造和使用过程中难免会出现各种缺陷, 而缺陷的存在是威胁玻

收稿日期: 2021-04-17, 修回日期: 2021-06-15

基金项目: 山东省自然科学基金项目(ZR2020KF007)

Foundation items: Supported by the Natural Science Foundation of Shandong Province (ZR2020KF007)

作者简介(Biography): 王洁(1994-), 女, 吉林大学仪器科学与电气工程学院, 博士, 主要从事太赫兹复合材料无损检测方面的课题. Email: wangjie16831@163.com

\*通讯作者(Corresponding author): E-mail: zhangjin0109@jlu.edu.cn

Received date: 2021-04-17, Revised date: 2021-06-15

玻璃纤维复合材料结构安全的主要原因<sup>[3-4]</sup>,因此采用无损探伤技术对其进行检测是十分必要的<sup>[5-6]</sup>。

太赫兹技术具有高透性、安全性和非接触性等优点,已经日益成为一种新型的无损检测手段<sup>[7-8]</sup>。太赫兹时域光谱技术是太赫兹技术的典型代表,其时间分辨率可达皮秒量级,适合测试和分析材料内部多层结构缺陷<sup>[9]</sup>。在利用太赫兹时域光谱技术检测含有不同厚度聚四氟乙烯缺陷的玻璃纤维层压板时,准确区分玻璃纤维层压板内部缺陷不同界面的反射脉冲十分重要。传统方法是直接通过寻找缺陷上下表面反射脉冲在时间上的峰值分离,读出时延差来计算缺陷厚度。但是当缺陷过薄时,缺陷上下表面的反射脉冲会发生重叠,无法直接准确地获得时延差来计算缺陷厚度<sup>[10]</sup>。因此,需要从硬件或算法上提高时间分辨率,实现对薄缺陷厚度的精确检测。但是,从硬件上提高时间分辨率成本较高,周期较慢,相较于改进硬件设备,通过数据处理算法提高时间分辨率是一种低成本、高效率的手段。因此,有必要采取合适算法对太赫兹反射时域波形进行处理,提高对反射脉冲的分辨能力,以便准确获得时延差来计算缺陷厚度,降低缺陷厚度的检测误差。

目前,利用反褶积结合功率谱估计是常用的提高太赫兹反射脉冲分辨能力的方法<sup>[11-14]</sup>。但是,反褶积方法依赖于平面镜反射参考信号和样本反射信号之间的相关性,在测量过程中需要周期性地获取参考信号来进行重复校准<sup>[11]</sup>。此外,反褶积方法会引入高频噪声,导致太赫兹反射时域波形出现严重的高旁瓣和异常值<sup>[12]</sup>。结合功率谱估计方法可以有效抑制旁瓣噪声,减小脉冲宽度,提高时间分辨率<sup>[14]</sup>。相比反褶积方法,希尔伯特变换(HT)方法不需要周期性地获取参考信号来进行重复校准。因此,本文利用HT方法结合功率谱估计方法来处理太赫兹反射时域波形,提高对缺陷上下表面反射脉冲的分辨能力。

首先利用小波方法对太赫兹反射时域波形进行去噪,再基于HT方法区分缺陷上下表面的反射脉冲。为了进一步提高对缺陷上下表面反射脉冲的分辨能力,分别采用周期图功率谱估计(T)、自回归谱估计(AR)和多重信号分类谱估计(MUSIC)等功率谱估计方法替换反傅里叶变换。实验结果表明,经过多重信号分类谱估计和希尔伯特变换结合(MUSIC-HT)、自回归谱估计和希尔伯特变换结合

(AR-HT)两种方法处理后,能成功区分厚度为0.08 mm缺陷上下表面反射脉冲,反射脉冲的时间分辨率小于0.5 ps,缺陷厚度的检测误差不高于0.03 mm。此外,本文将MUSIC-HT、AR-HT两种结合方法应用于太赫兹时域光谱成像,利用图像灰度值表征缺陷厚度,实现了同时对玻璃纤维层压板内部薄缺陷厚度、位置和形状的成像检测。

## 1 实验系统及样本介绍

该实验使用Zomega公司生产的太赫兹时域光谱成像系统FICO REV 2.0,其时域范围为0~110 ps,时间分辨率为0.05 ps,有效频谱带宽范围为0.1~2 THz,频谱分辨率为11 GHz。该系统有两种工作模式:透射模式和反射模式。根据探测目的可选择透射或反射模式,两种模式信号的产生和探测原理基本一致。本文使用反射模式进行测试,可获取样本内部不同界面的反射脉冲,反射系统原理图如图1所示。该系统主要由飞秒激光器、太赫兹发射和探测器件以及时间延迟控制系统组成。中心波长为1560 nm的飞秒激光器发出的激光脉冲经第一个分束镜分为两束,一束较强的作为泵浦光,经过时间延迟控制系统调整入射至发射器上产生太赫兹脉冲,太赫兹脉冲经透镜准直后传输到被测样本上,经过样本反射后的太赫兹脉冲信号经第二个分束镜传输至探测器;另一束较弱的作为探测光,用于探测太赫兹脉冲的瞬时电场振幅。通过扫描太赫兹脉冲和探测激光的相对时间延迟可以得到太赫兹脉冲电场强度随时间变化的波形,即太赫兹反射时域波形。其中,分束镜1是通过在石英玻璃基底上镀对红外波具有高透过率的硒化锌薄膜制成;分束镜2是由对太赫兹波具有高透过率的高阻硅材料制成,通过改变分束镜的倾斜角度可以调整透射和反射光束的光强比。为避免水蒸气的吸收,整个系统处于充满干燥空气的密封环境中。

该实验所用的玻璃纤维层压板由哈尔滨玻璃钢研究院加工。样本尺寸为100 mm(长)×100 mm(宽)×3 mm(高),在样本内部距离样本上表面1.5 mm处插入四块不同厚度的聚四氟乙烯薄膜,来模拟异物夹杂缺陷。聚四氟乙烯薄膜厚度分别为0.47 mm、0.22 mm、0.12 mm和0.08 mm,对应图2(a)的紫色、绿色、红色和蓝色五角星,分别定义为缺陷1、缺陷2、缺陷3和缺陷4。从图2(b)可以看出,聚四氟乙烯薄膜均为正五角星形状,直径为20 mm,锐角为36°。从图2(c)观察到样本外观平整,完全

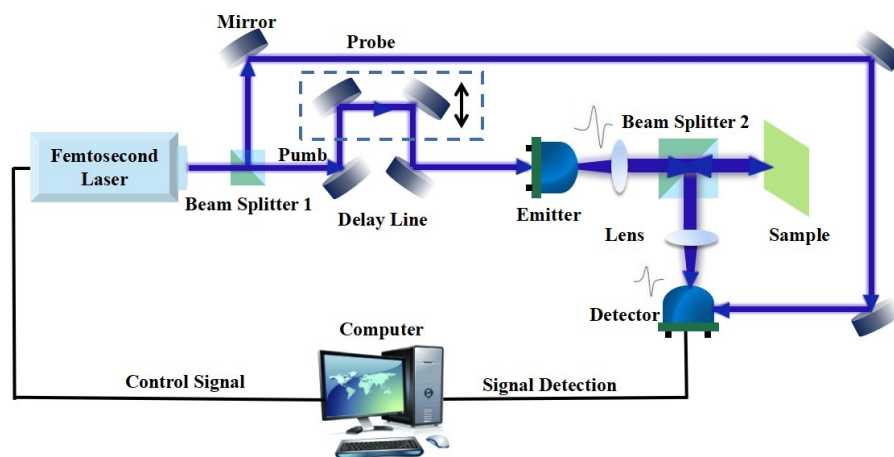
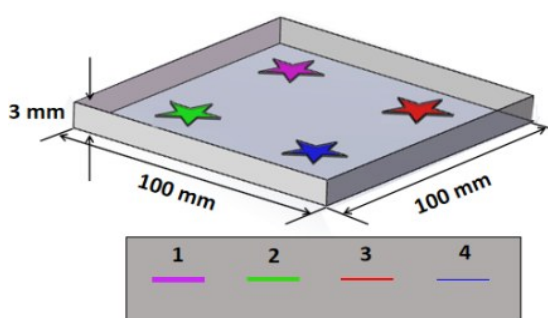


图1 太赫兹反射时域光谱系统原理图

Fig. 1 The schematic diagram of terahertz reflection time domain spectral system

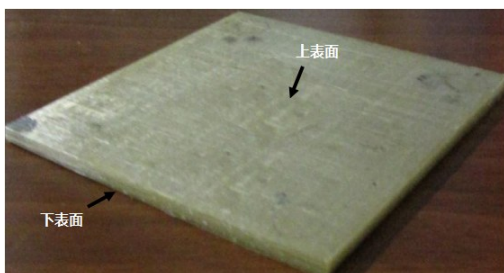
看不到样本内部存在缺陷。



(a) 三维设计图



(b) 缺陷大小



(c) 光学实物图

图2 内含不同厚度缺陷的玻璃纤维层压板

Fig. 2 Glass fiber laminate with defects of different thickness

## 2 缺陷厚度光谱分析

### 2.1 太赫兹反射时域波形分析及去噪

用太赫兹反射时域光谱系统测试样本,分别获得无缺陷位置的反射波形以及4个不同厚度缺陷位置的反射波形,如图3所示。其中22 ps左右的反射脉冲来自样本上表面,66 ps左右的反射脉冲来自样本下表面,89 ps左右的反射脉冲来源于系统,43 ps左右的反射脉冲来自样本内部缺陷上下表面反射脉冲的叠加。由于缺陷过薄,系统延迟线无法分辨缺陷上下表面反射脉冲,反射脉冲叠加严重,难以直接从反射时域波形读取上下表面反射脉冲的时延差,进而计算缺陷厚度。受外界测试环境、太赫兹时域光谱系统噪声、材料自身特性等影响,样本太赫兹反射时域波形的信噪比较低。因此,本文首先采用Sym3小波基对太赫兹反射时域波形进行小波去噪处理<sup>[15]</sup>,然后对去噪后的太赫兹反射时域波形进行截取,仅截取缺陷界面引起的反射脉冲进行分析。截取具体过程如下:在样本上表面(约22 ps处)和样本下表面(约66 ps处)之间设置阈值,检测样本内部是否存在来自缺陷界面的反射脉冲,并确定缺陷的反射脉冲位置,以该位置为中心,引入适当长度的时间窗(约20 ps),可截取缺陷完整的反射脉冲信号。以缺陷1的太赫兹反射时域波形为例,经过小波去噪和信号截取处理后,如图4所示,相比未去噪前,去噪后的信号更加平滑。

### 2.2 希尔伯特变换和功率谱估计结合

HT是研究信号包络和瞬时频率的有效工具,定义<sup>[16]</sup>为:

$$C(t) = \frac{1}{\pi} \int_{-\infty}^{\infty} \frac{x(t-\tau)}{\tau} d\tau = x(t) \otimes h(t), \quad (1)$$

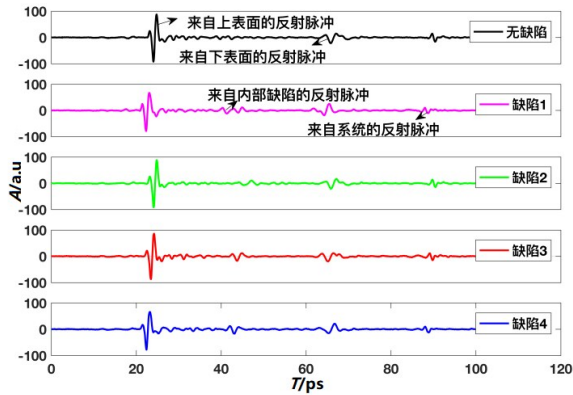


图3 样本的太赫兹反射时域波形

Fig. 3 Terahertz reflected time domain waveforms measured from the sample

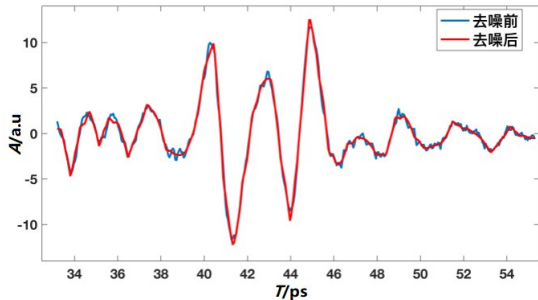


图4 缺陷1上下表面太赫兹反射脉冲

Fig. 4 Terahertz reflected pulses between upper and lower surfaces of defect 1

其中  $C(t)$  为变换后的信号,  $h(t) = \frac{1}{\pi t}$  为脉冲响应函数, 其对应的频响函数为:

$$H(\omega) = -j\sin(\omega) = \begin{cases} -j\omega > 0 \\ j\omega < 0 \end{cases} \quad (2)$$

因此, HT 的频域变换过程为:

$$x(t) \xrightarrow{FFT} X(\omega) \xrightarrow{H(\omega)} C(\omega) \xrightarrow{IFFT} C(t) \quad (3)$$

太赫兹反射频谱经过 HT 处理后, 振幅信号的形状比未处理前更加规则, 且峰值位置不受影响。因此, 可以利用 HT 后的频谱来确定信号传播过程中的时间延时, 并且峰值定位更加准确, 对由材料色散和半波损耗引起的信号极性反转造成的波形畸变具有较好鲁棒性。

为了进一步提高脉冲的时间分辨率, 将式(3)的反快速傅里叶变换 (Inverse Fast Fourier Transform, IFFT) 替换为功率谱估计来减小脉冲宽度。功率谱估计分为经典谱估计和现代谱估计, 经典谱估计主要包括周期图法和自相关法, 现代谱估计主要包括参数模型谱估计和非参数模型谱估计两类,

前者有自回归模型、动平均模型、自回归动平均模型和普罗尼指数模型等, 后者有多窗口谱法、特征向量法和多重信号分类法等。经典谱估计计算简单, 但分辨率低、方差性能差。现代谱估计又被称为超分辨率技术, 可以克服经典谱估计的分辨率极限。本文考虑 3 种常用的功率谱估计方法, 分别是周期图功率谱估计 (T)、自回归模型谱估计 (AR) 和多重信号分类谱估计 (MUSIC), 式(3)的变换过程更新如下:

$$x(t) \xrightarrow{FFT} X(\omega) \xrightarrow{H(\omega)} C(\omega) \xrightarrow{T} C_T(t) \quad (4)$$

$$x(t) \xrightarrow{FFT} X(\omega) \xrightarrow{H(\omega)} C(\omega) \xrightarrow{AR} C_{AR}(t) \quad (5)$$

$$x(t) \xrightarrow{FFT} X(\omega) \xrightarrow{H(\omega)} C(\omega) \xrightarrow{MUSIC} C_{MUSIC}(t) \quad (6)$$

周期图功率谱估计<sup>[17]</sup>是将随机信号的有限样本点进行傅里叶变换, 平方和后求得功率谱估计值。其谱估计公式为:

$$S_{per}(e^{j\omega}) = \frac{1}{N} X_N(e^{j\omega}) X_N^*(e^{j\omega}) = \frac{1}{N} |X_N(e^{j\omega})|^2 \quad (7)$$

其中  $N$  为数据长度,  $\omega$  为频率。式(7)以离散傅里叶变换为基础, 相当于对无限长的数据序列增加有限宽度的矩形窗处理, 而加窗效应导致频率域内主瓣平滑和旁瓣泄漏, 限制分辨率和精度, 因此不适合对分辨率要求较高的情况下使用。

参数模型谱估计是为随机信号建立合适的数学模型, 并利用样本信号估计模型参数, 最终将估计的参数代入模型得到完整的功率谱。整个建模过程等效于对有限长度信号的自相关序列进行合理外推, 从而提高谱估计的分辨率。自回归模型谱估计是参数模型谱估计的一种, 它假设信号是由均值为零、方差为  $\sigma^2$  的白噪声激励线性时不变系统得到的。输入信号  $u(n)$  和分析信号  $x(n)$  之间满足差分方程:

$$X(n) = -\sum_{k=1}^p a_k x(n-k) + u(n) \quad (8)$$

其中  $p$  为模型阶数,  $a_k$  为模型系数。对式(8)两边进行  $Z$  变换, 得到参数模型的传递函数  $H(z)$  为:

$$H(z) = \frac{1}{A(z)} = \frac{1}{1 + \sum_{k=1}^p a_k z^{-k}} \quad (9)$$

则谱估计公式为:

$$S_{AR}(e^{j\omega}) = \frac{\sigma^2}{\left| 1 + \sum_{k=1}^p a_k e^{-j\omega k} \right|^2} \quad (10)$$

式(10)中的未知数  $\sigma^2$  和  $a_k$  采用 Yule-Walker 方程求解<sup>[18]</sup>:

$$\begin{bmatrix} R(0) & R(-1) & \cdots & R(-p) \\ R(1) & R(0) & \cdots & R(-(p-1)) \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ R(p) & R(p-1) & \cdots & R(0) \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 1 \\ a_1 \\ \vdots \\ a_k \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \sigma^2 \\ 0 \\ \vdots \\ 0 \end{bmatrix}. \quad (11)$$

多重信号分类谱估计<sup>[19]</sup>是非参数模型谱估计的一种,它利用矩阵特征分解方法,将数据空间分解成信号子空间和噪声子空间,并利用这两个子空间的特点来估计功率谱。其基本思想是将有用信号从噪声中通过特征分解分离出来,从而提高分辨率和估计质量。假设信号由  $M$  个复指数信号加白噪声组成,定义信号矢量为:

$$e_i = [1 \quad e^{j\omega_i} \quad e^{j2\omega_i} \quad \cdots \quad e^{j(N-1)\omega_i}]^T, i = 1, 2, \dots, M, \quad (12)$$

$N \times N$  阶信号自相关矩阵的特征值按从大到小的顺序排列,将对应的特征向量  $v_i$  分为两组:一组是  $M$  个最大特征值对应的信号特征向量,张成信号子空间;另一组是  $N-M$  个最小特征值对应的噪声特征向量,张成噪声子空间。功率谱估计计算公式为:

$$P_{\text{MUSIC}}(e^{j\omega}) = \frac{1}{\sum_{i=M+1}^N |e^{j\omega} v_i|^2}, \quad (13)$$

其中  $N$  为信号自相关矩阵的阶数,  $M$  为复正弦信号个数,  $e^{j\omega}$  是  $e$  的共轭转置矩阵,  $v_i$  是信号特征向量。

对于自回归模型谱估计和多重信号分类谱估计两种方法,阶数选择过低,得到的功率谱估计将被平滑,功率谱的细节会受到损失;阶数选择过高,虽然有助于提高分辨率,但是可能出现虚假谱峰。自回归模型谱估计采用最小描述长度准则 (Minimum Description Length criterion, MDL)<sup>[20]</sup> 来确定阶数,其定义为:

$$MDL(p) = N \ln(\epsilon_p^2) + p \ln N, \quad (14)$$

其中  $N$  为数据长度,  $p$  为模型阶数,  $\epsilon_p^2$  为  $p$  阶预测误差功率的估计值。该准则是根据模型对应过程的概率分布最大可能逼近实际过程概率分布这一思想,用 Kullback-Leibler 信息测度来度量两个概率分布之间的距离,选择  $MDL(p)$  取得最小值时的阶数作为最终的阶数。多重信号分类谱估计采用 Akaike 信息量准则 (AIC)<sup>[21]</sup> 来确定阶数,其定义为:

$$AIC(p) = N \ln(\epsilon_p^2) + 2p, \quad (15)$$

根据 AIC 理论,可以将  $AIC(p)$  最小值对应的阶数选择为需要的阶数。

综上所述,本文采用的三种功率谱估计方法提高时域光谱时间分辨率主要是基于以下两种机理:

机理一是通过有效扩展信号长度,提高时间分辨率。时间分辨率反比于信号的长度,有效扩展信号长度可以提高时间分辨率。快速傅里叶变换 (FFT) 提高时间分辨率的方法一般是对有限长的信号两端补零形成无限长序列进行计算,但由于补零方式补充的是无效数据,对改善分辨率无有效帮助,因此直接进行傅里叶变换,分辨率一般较低。周期图功率谱估计 (T) 是对有限长自相关序列直接进行傅里叶变换得到的,因而其分辨率与直接进行傅里叶变换基本相同。自回归模型谱估计 (AR) 是通过建立数据估计参数模型,对有限长度信号的自相关序列进行合理外推,有效扩展了信号长度,从而能够提高谱估计的分辨率。

机理二是通过从噪声中有效分离出有用信号来提高时间分辨率。多重信号分类谱估计 (MUSIC) 利用矩阵特征分解将数据空间分解成信号子空间和噪声子空间,从而将有用信号从噪声中分离出来,提高了分辨率和分析质量。

图 5(b)、(c)、(d) 和 (e) 分别是对缺陷 1 上下表面太赫兹反射脉冲进行 HT 结合多重信号分类算法 (MUSIC-HT)、自回归模型谱估计 (AR-HT)、周期图功率谱谱估计 (T-HT) 和反快速傅里叶变换后 (IFFT-HT) 的结果。从图中可以看出, T-HT 处理后获得的分辨率与 IFFT-HT 处理后的结果基本相同,分辨率比较低且噪声干扰严重;而经 MUSIC-HT 和 AR-HT 处理后能清晰分辨出两个脉冲峰,分辨率明显提高。因此,下文将 MUSIC-HT、AR-HT 和 T-HT 方法用于薄缺陷厚度检测,并进一步评价三种方法的厚度测量误差。

### 2.3 缺陷厚度结果分析

根据反射式太赫兹光学参数的计算方法,推导出聚四氟乙烯缺陷的厚度计算公式如下:

$$d = \frac{c}{n} \times \frac{\Delta t}{2}, \quad (16)$$

其中  $d$  为缺陷厚度,  $c$  为空气中太赫兹波的传播速度,  $n$  为缺陷折射率,  $\Delta t$  为缺陷上下表面反射脉冲的时延差。

图 5-8(a) 是经过小波去噪处理后的样本内 4 个缺陷上下表面的太赫兹反射脉冲,全部都呈现叠加状态。从图 5(a) 可以看出,半波损耗导致缺陷 1 上下表面的两个太赫兹反射脉冲极性相反,勉强只能分辨出半个脉冲。结果表明,太赫兹反射脉冲的时间分辨率至少要大于 4.45 ps。图 5-8 的 (b)、(c) 和 (d) 分别是经过 MUSIC-HT、AR-HT 和 T-HT 处理后

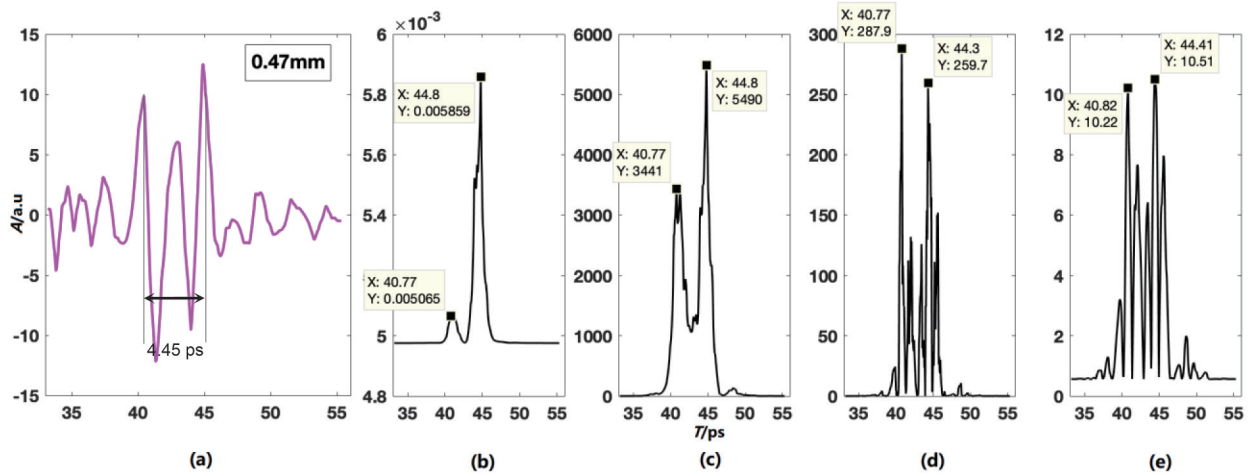


图5 缺陷1厚度分析结果:(a)缺陷1太赫兹反射脉冲,(b)MUSIC-HT,(c)AR-HT,(d)T-HT,(e)IFFT-HT

Fig. 5 The thickness analysis results of defect 1: (a) Terahertz reflected pulses of defect 1, (b) MUSIC-HT, (c) AR-HT, (d) T-HT, (e) IFFT-HT

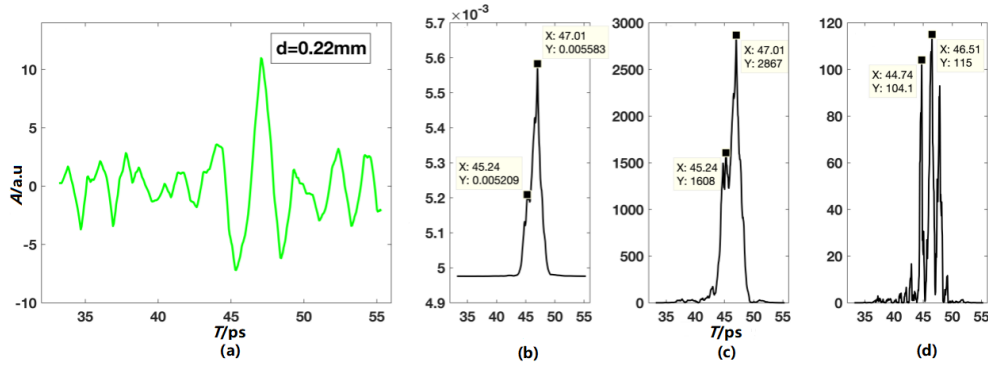


图6 缺陷2厚度分析结果:(a)缺陷2太赫兹反射脉冲,(b)MUSIC-HT,(c)AR-HT,(d)T-HT

Fig. 6 The thickness analysis results of defect 2: (a) Terahertz reflected pulses of defect 2, (b) MUSIC-HT, (c) AR-HT, (d) T-HT

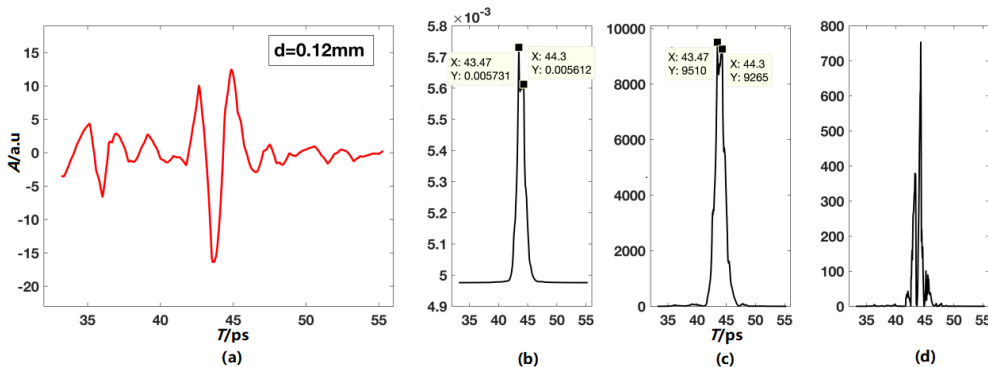


图7 缺陷3厚度分析结果:(a)缺陷3太赫兹反射脉冲,(b)MUSIC-HT,(c)AR-HT,(d)T-HT

Fig. 7 The thickness analysis results of defect 3: (a) Terahertz reflected pulses of defect 3, (b) MUSIC-HT, (c) AR-HT, (d) T-HT

的结果,表1是计算得到缺陷上下表面反射脉冲的时延差和缺陷厚度。从图5-8(d)可以看出,采用T-HT方法可以区分缺陷1和缺陷2上下表面反射脉冲,但不能区分缺陷3和缺陷4上下表面反射脉冲,反射脉冲的时间分辨率位于0.83~1.77 ps之间。从图5-8

的(b)和(c)可以看出,采用MUSIC-HT和AR-HT方法可以区分4个缺陷上下表面的反射脉冲,反射脉冲的时间分辨率至少小于0.5 ps。由公式(16)可知,准确的时延差是精确计算缺陷厚度的前提。采用MUSIC-HT和AR-HT方法可以有效提高太赫兹反射时

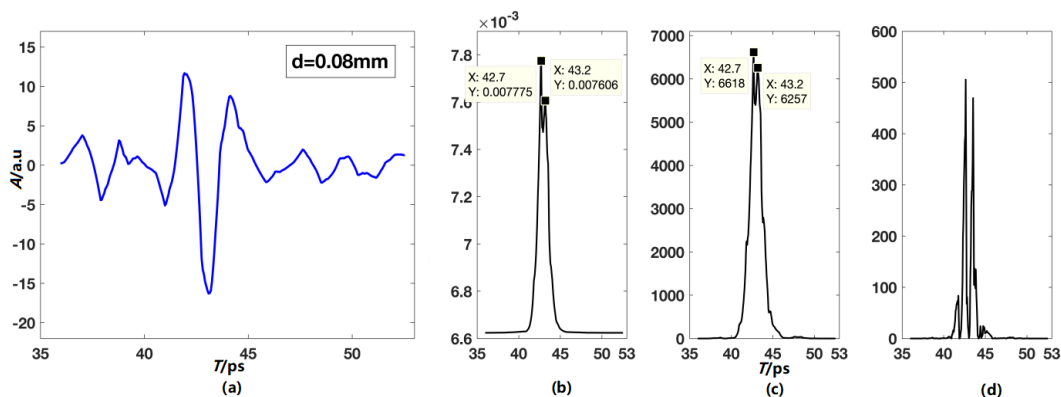


图8 缺陷4厚度分析结果:(a)缺陷4太赫兹反射脉冲,(b)MUSIC-HT,(c)AR-HT,(d)T-HT

Fig. 8 The thickness analysis results of defect 4: (a) Terahertz reflected pulses of defect 4, (b) MUSIC-HT, (c) AR-HT, (d) T-HT

域波形的时间分辨率,从而能分辨出薄缺陷上下表面重叠的反射脉冲,获得准确的时延差,进而提高缺陷厚度的检测精度。从表1可以看出,MUSIC-HT和AR-HT方法计算缺陷厚度的精度最高,相比实际缺陷厚度,测量误差不高于0.03 mm。

### 3 缺陷厚度成像分析

#### 3.1 成像算法

逐点扫描型太赫兹反射时域光谱成像系统通过二维扫描台的移动,可以获取样本每一空间点的太赫兹反射时域波形,利用太赫兹反射时域波形的幅值和相位等信息进行成像。本文采用HT和功率谱估计结合的方法对缺陷处的太赫兹反射时域波形进行处理,区分缺陷上下表面反射脉冲并获取时延差,并利用时延差进行成像。从式(16)可知,缺陷厚度和缺陷上下表面反射脉冲的时延差成正比关系。因此,利用时延差成像可以直观地在图像灰度值上体现缺陷厚度信息。

表1 缺陷上下表面反射脉冲的时延差及厚度

Table 1 The time delay differences of reflected pulses between upper and lower surfaces of defects and the thicknesses

	缺陷No.	缺陷一	缺陷二	缺陷三	缺陷四
	实际厚度(mm)	0.47	0.22	0.12	0.08
MUSIC-HT	时延差(ps)	4.03	1.77	0.83	0.50
	计算厚度(mm)	0.45	0.20	0.09	0.06
	测量误差(mm)	0.02	0.02	0.03	0.02
AR-HT	时延差(ps)	4.03	1.77	0.83	0.50
	计算厚度(mm)	0.45	0.20	0.09	0.06
	测量误差(mm)	0.02	0.02	0.03	0.02
T-HT	时延差(ps)	3.53	1.77	-	-
	计算厚度(mm)	0.40	0.20	-	-
	测量误差(mm)	0.07	0.02	-	-

#### 3.2 成像结果

图9(a)和(b)分别是经过MUSIC-HT和AR-HT处理后,利用缺陷上下表面反射脉冲的时延差进行成像的结果。从图9(a)和(b)可以看出,不同厚度

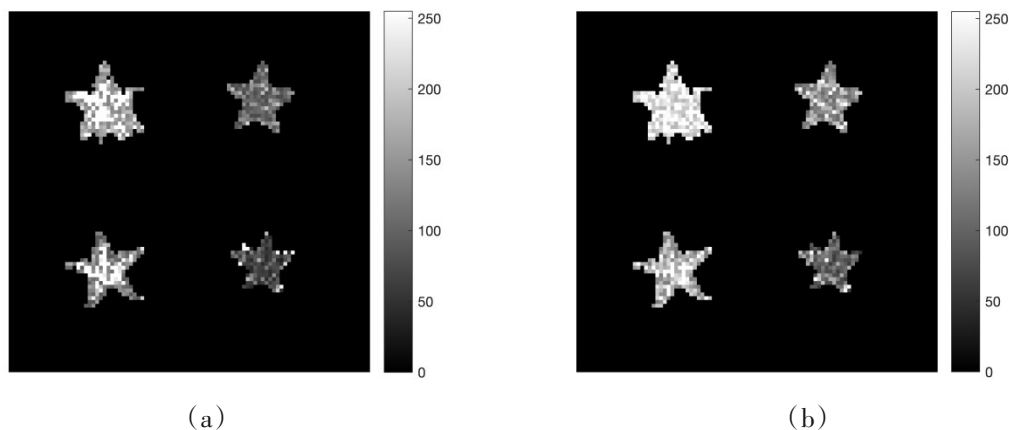


图9 太赫兹成像结果:(a)MUSIC-HT,(b)AR-HT

Fig. 9 THz imaging results: (a) MUSIC-HT, (b) AR-HT

聚四氟乙烯缺陷的成像效果有着明显差异,4处缺陷的灰度值反映聚四氟乙烯的厚度变化,其中缺陷1最厚(0.47 mm),图像灰度值最大,缺陷4最薄(0.08 mm),图像灰度值最小。此外,从表1可以看出,MUSIC-HT和AR-HT两种结合方法检测缺陷厚度的精度基本相同。因此,图9(a)和(b)的缺陷厚度成像效果也基本相同。

#### 4 结论

本文在对含有四块不同厚度聚四氟乙烯缺陷的玻璃纤维层压板进行太赫兹时域光谱检测时,采用基于HT和功率谱估计相结合的光谱分析算法处理太赫兹反射时域波形,提高反射脉冲的时间分辨率,分辨较薄缺陷上下表面反射脉冲并读取时延差,从而计算缺陷厚度。实验结果表明,MUSIC-HT和AR-HT两种方法能成功区分厚度为0.08 mm缺陷的上下表面反射脉冲,反射脉冲的时间分辨率小于0.5 ps,缺陷厚度的检测误差不高于0.03 mm。此外,首次将MUSIC-HT和AR-HT方法运用于太赫兹时域光谱成像,不仅可以识别缺陷的位置和形状,还包含缺陷厚度信息,提高缺陷无损检测效果。

#### References

- [1] Gu X, Yu B, Wu M. Experimental study of the bond performance and mechanical response of GFRP reinforced concrete [J]. *Construction and Building Materials*, 2016, **114**: 407-415.
- [2] Wang Y, Restrepo J. Investigation of concentrically loaded reinforced concrete columns confined with glass fiber-reinforced polymer jackets [J]. *ACI Structural Journal*, 2001, **98**(3): 377-385.
- [3] Zou Y, Tong L, Steven G. Vibration-based model-dependent damage (delamination) identification and health monitoring for composite structures—a review [J]. *Journal of Sound Vibration*, 2000, **230**: 357-378.
- [4] Voyiadjis G Z, Kattan, P I. Damage of fiber-reinforced composite materials with micromechanical characterization [J]. *International Journal of Solids and Structures*, 1993, **30**: 2757-2778.
- [5] Adams R D, Cawley P. A review of defect types and nondestructive testing techniques for composites and bonded joints [J]. *NDT International*, 1988, **21**: 208-222.
- [6] Tsuda H. Ultrasound and damage detection in CFRP using fiber Bragg grating sensors. *Composites science and technology*, 2006, **66**(5): 676-683.
- [7] Stoik C, Bohn M, Blackshire J. Nondestructive evaluation of aircraft composites using reflective terahertz time domain spectroscopy [J]. *NDT and E International*, 2010, **43**(2): 106-115.
- [8] Dong J L, Locquet A, Citrin D S. Enhanced terahertz imaging of small forced delamination in woven glass fibre-reinforced composites with wavelet de-noising [J]. *Journal of Infrared, Millimeter, and Terahertz Waves*, 2016, **37**(3): 289-301.
- [9] Ryu C H, Park S H, Kim D H, et al. Nondestructive evaluation of hidden multi-delamination in a glass-fiber-reinforced plastic composite using terahertz spectroscopy [J]. *Composite Structures*, 2016, **156**: 338-347.
- [10] CHANG Tian-ying, GUO Qi-jia, LIU Ling-yu, et al. Hilbert-transform-based accurate determination of ultra-short-time delays in terahertz time-domain spectroscopy [J]. *IEEE transactions on terahertz science and technology*, 2017, **7**(5): 514-520.
- [11] Takayanagi J, Takayanagi H. High-resolution time-of-flight terahertz tomography using a femtosecond fiber laser [J]. *Optics Express*, 2009, **17**(9): 7549-7555.
- [12] Walker G C. Terahertz deconvolution [J]. *Optics Express*, 2012, **20**(25): 27230-27241.
- [13] Dong J, Jackson B. Terahertz frequency-wavelet domain deconvolution for stratigraphic and subsurface investigation of art painting [J]. *Optics Express*, 2016, **24**(23): 26972-26985.
- [14] Dong J, Jackson A, Citrin D S. Depth resolution enhancement of terahertz deconvolution by autoregressive spectral extrapolation [J]. *Optics Letters*, 2017, **42**(9): 1828.
- [15] ZHANG Ji-yang, REN Jiao-jiao, CHEN Si-hong. Application of wavelet denoising in terahertz nondestructive detection [J]. *Chinese Journal of Lasers* (张霁阳, 任姣姣, 陈思宏等. 小波去噪在太赫兹无损检测中的应用. *中国激光*), 2020, **47**(1): 326-333.
- [16] Hahn S L. Hilbert transform in signal processing [M]. ArtechHouse, 1996.
- [17] YAO Tian-run, SUN Hong. Advanced digital signal processing [M]. Wuhan: Huazhong University of Science and Technology Press (姚天任, 孙洪. *现代数字信号处理*). 武汉: 华中科技大学出版社, 2018.
- [18] Akaike H. Power spectrum estimation through autoregressive model fitting [J]. *Annals of the Institute of Statistical Mathematics*, 1969, **21**(1): 407-419.
- [19] Schmidt R. Multiple emitter location and signal parameter estimation [J]. *IEEE Transaction Antennas Propagation*, 1986, **34**(3A): 276-280.
- [20] Rissanen J. Universal coding, information, prediction, and estimation [J]. *IEEE Transactions on Information Theory*, 1984, **30**(4): 629-636.
- [21] Tong H. Determination of the order of a Markov chain by Akaike's information criterion [J]. *Journal of Applied Probability*, 1975, **12**(3): 488-497.