

# 基于经验小波系数模态分解的太赫兹成像纵向分辨增强

李志龙<sup>1</sup>, 左剑<sup>1\*</sup>, 赵源萌<sup>1</sup>, 韩钟德<sup>2</sup>, 许志浩<sup>2</sup>, 赵云璋<sup>2</sup>,  
杨朝<sup>3</sup>, 胡伟东<sup>2</sup>, 张存林<sup>1</sup>

- (1. 首都师范大学物理系北京市太赫兹波谱与成像重点实验室 太赫兹光电子学教育部重点实验室, 北京 100048;
2. 北京理工大学信息与电子学院毫米波太赫兹技术北京市重点实验室, 北京 100081;
3. 深圳光启尖端技术有限责任公司 光启银星基地技术室, 广东 深圳 518000)

**摘要:** 为了提高太赫兹成像探测的纵向分辨率, 提出了一种基于连续小波的经验模态分解的纵向分辨率增强新方法。首先对样品的频域信号进行连续小波变换处理, 获得其相对应的连续小波变换系数; 然后对获得的连续小波系数进行经验模态分解, 将其自适应地分解为一系列的本征模式函数和一个残差信号, 并提取其中第一阶本征模式函数为成像参数进行三维重构, 获得最终的三维本征模式函数图像, 以此来提高太赫兹检测图像的纵向分辨率。为验证方法的有效性, 采用 150~220 GHz 高频太赫兹调频雷达成像系统分别对两种含内部脱胶缺陷的夹层结构复合材料进行成像检测并利用提出的方法进行处理, 得到了纵向分辨率被有效增强, 清晰度被有效提高的检测结果图像, 这为未来的太赫兹计算机断层扫描成像和太赫兹无损检测应用研究提供了新的思路。

**关键词:** 太赫兹成像; 连续小波变换; 经验模态分解; 纵向分辨率增强  
中图分类号: O43 文献标识码: A

## Longitudinal resolution enhancement of terahertz imaging based on empirical wavelet coefficient mode decomposition

LI Zhi-Long<sup>1</sup>, ZUO Jian<sup>1\*</sup>, ZHAO Yuan-Meng<sup>1</sup>, HAN Zhong-De<sup>2</sup>, XU Zhi-Hao<sup>2</sup>, ZHAO Yun-Zhang<sup>2</sup>,  
YANG Chao<sup>3</sup>, HU Wei-Dong<sup>2</sup>, ZHANG Cun-Lin<sup>1</sup>

- (1. Beijing Key Laboratory for Terahertz Spectroscopy and Imaging, MOE Key Laboratory of Terahertz Optoelectronics, Department of Physics, Capital Normal University, Beijing 100048, China;
2. Beijing Key Laboratory of Millimeter Wave and Terahertz Technology, School of Information and Electronics, Beijing Institute of Technology, Beijing 100081, China;
3. Kuang-Chi Silver Star Base Technology Room, Shenzhen Kuang-Chi Advanced Technology Co., Ltd, Shenzhen 518000, China)

**Abstract:** In order to improve the longitudinal resolution of terahertz imaging detection, a novel longitudinal resolution enhancement method based on empirical mode decomposition of continuous wavelet was proposed. Firstly, the frequency domain signals of the sample are processed by continuous wavelet transform to obtain the corresponding continuous wavelet transforms coefficients. Then, the obtained continuous wavelet coefficients are decomposed by empirical mode decomposition, which is adaptive decomposed into a series of intrinsic mode functions and a residual signal. And the first-order intrinsic mode functions are extracted as the imaging parameter for 3D reconstruction to obtain the final 3D intrinsic mode function image, so as improving the longitudinal resolution of terahertz detection image. In order to verify

收稿日期: 2021-11-10, 修回日期: 2022-03-29

Received date: 2021-11-10, Revised date: 2022-03-29

基金项目: 成像技术高精尖创新中心科技创新服务能力建设基金(008/19530012003), 首都师范大学分类发展--学位点建设与研究生教育立项及研究生高水平学术创新-物理系-专业学位实践基地项目(008-2155089)

**Foundation items:** Supported by the Beijing Advanced Innovation Center for Imaging Theory and Technology Scientific Research Funds (008/19530012003); the Capital Normal University Development Funds by Category - Physics Department - Practice Base Projects for Degree Study Program (008-2155089)

作者简介(Biography): 李志龙(1997-), 男, 北京人, 硕士研究生, 主要研究领域为太赫兹无损检测、图像增强、调频雷达信号处理  
E-mail: 1270990344@qq.com

\*通讯作者(Corresponding author): E-mail: jian.zuo@cnu.edu.cn

the effectiveness of the method, the 150~220 GHz high frequency terahertz frequency modulated radar imaging system was used to detect two kinds of sandwich structure composite material with internal adhesive debonding defects, and the proposed method was used to process them. The detection results images of the longitudinal resolution effectively enhanced and the sharpness effectively improved was obtained, which provides a new idea of future terahertz computer tomography imaging and terahertz non-destructive testing research.

**Key words:** terahertz imaging, continuous wavelet transform, empirical mode decomposition, longitudinal resolution enhancement

**PACS:** 81. 70. Fy, 42. 30. Va, 87. 63. Im

## 引言

太赫兹波是介于毫米波与红外光之间频率为 0. 1~10 THz 的电磁波<sup>[1-2]</sup>, 由于波段所处位置的特殊性, THz 辐射兼具微波电子学和红外光子学的特征。在利用 THz 成像检测技术进行检测时, THz 波对非极性物质(如泡沫、陶瓷、玻璃、树脂、涂料等)具有高透性, 相比于传统检测技术更容易发现和定位材料内部缺陷, 而且不需要接触被测材料; 除此之外, THz 波的光子能量在毫电子伏特量级, 在 THz 成像检测过程中通常不会损坏样品, 也不会造成对生物组织的辐射损伤<sup>[3-5]</sup>。基于以上 THz 波所有的特性, 并伴随着 THz 辐射源与 THz 探测技术的发展, THz 在无损检测、质量监测、内容提取、油画鉴别、THz 成像、安检等领域得到了越来越广泛的应用<sup>[6-8]</sup>。然而, 由于 THz 波位于微波和远红外相交叠的波长范围, 相比于 X 射线和红外光波长较长, 根据光学干涉原理可知, 辐射源的相干长度与中心波长的平方成正比; 并且采用相干光的成像方式, 也存在衍射极限问题, 因此限制了 THz 成像的纵向分辨率, 导致检测样品的纵向检测精度较低。另外, 由于混频器、倍频器和波导等器件的限制, 检测信号的调频带宽有限, 也降低了检测样品的纵向分辨率。

针对 THz 成像纵向分辨率较低的问题, 国内外研究人员已提出多种处理方法应对。在硬件方面, 由于辐射源的相干长度与辐射源的谱宽成反比, 宽频的辐射光源逐渐进入到人们的视线中, 但是在引入宽频光源的同时会引起色散问题, 尤其是在被测样品的色散系数较大时, 会严重影响成像系统的纵向分辨率, 所以提高 THz 成像系统的纵向分辨率的核心技术之一是色散补偿<sup>[9]</sup>。对于硬件的补偿方法, Drexler 等人提出在迈克尔逊干涉仪的参考臂中添加一些补偿色散的器件, 使参考臂和样品臂中的色散匹配, 从而实现了对成像系统的色散补偿<sup>[10]</sup>。但是额外引入的硬件将增大系统的实现难度和成本, 并且需要在成像检测前掌握被测样品的色散特性,

当改变被测样品的种类和光路时, 还需要从新调整色散补偿器件, 这会影响 THz 成像检测技术的实际应用。对于基于 THz 线性调频连续波技术的 THz 调频雷达成像系统, 根据调频连续波的距离像分辨率原理, 通过设计在更高的频带工作或组合多个频带, 可拓展成像系统的带宽以此来提高系统的纵向分辨率, 但是该方法在一定程度上也会增加成像系统的复杂度和成本。在信号处理方法方面, 为了提高 THz 成像纵向分辨率的同时, 保持系统简便、小型和低成本的特点, 李丹等人提出一种基于评价函数的迭代补偿算法对低通滤波后的 THz 检测信号进行色散补偿, 在迭代补偿算法的计算中, 无需知道待测样品的厚度和色散特性, 即可获得高精度的三维检测图像<sup>[11]</sup>。但方法依赖于所选取的评价函数, 通过不断地调用评价函数并使之达到极值的方式来获取最佳的补偿系数, 对于特定类型的被测样品, 该方法可实现高纵向精度的重构, 而对于不同类型的被测样品, 该方法受限于所选取的评价函数, 不能自适应性地获得高纵向分辨率的重构结果。近年来, 小波变换的使用越来越广泛, 其特有的数学属性可有效分辨信号的特征峰。代冰等人利用连续小波变换的方法对被测样品的检测信号进行处理, 以连续小波系数为成像参数进行三维重构, 获得的三维小波系数图像可比原始信号三维图像更精确<sup>[12]</sup>。在使用该方法解决信号合峰问题时, 对于单一结构的被测样品处理效果明显, 但对于多层结构且含不同材质的被测样品处理效果欠佳。在只有一个回波目标的情况下, Tak Ming Wong 使用 Sinc 函数对单一信号的回波峰值进行拟合, 实现峰值幅度、位置及宽度等信息的精确提取<sup>[13]</sup>, 但是此方法的假设前提过于苛刻, 并且仅限于单个回波目标, 限制了其实用性。因此, 根据 THz 波所具有的特性, 研究简便、有效、自适应性强的 THz 成像纵向分辨率增强新方法, 将有利于 THz 成像检测技术在无损检测领域的进一步发展。

通常 THz 检测信号是非线性、非平稳的信号, 其

含有多级的反射特征峰,不同的特征峰反映着不同的分界面信息,采用传统的信号分析方法无法对 THz 信号中的高频特征信息进行有效分辨,而对于被广泛使用的小波变换来说,其具有良好的时频局部化分析能力和多分辨率分析功能,可在不同分解尺度下对信号的特征信息进行有效分析,是信号处理分析领域强有力的数学工具,非常适合分析非平稳信号和提取信号的局部特征<sup>[14-16]</sup>。因此,本文基于小波变换的特性,首先利用连续小波变换方法对 THz 检测信号的一维距离像进行多分辨率分析,将 THz 检测信号的一维距离像分解到各尺度下,以此来提取不同分界面的特征信息以及抑制高频噪声的影响,从而获得特征信息初步增强后的样品信号。为了能进一步增强信号的特征信息、提高检测信号的纵向检测精度,以及实现对不同类型的待测样品都具有自适应性的纵向分辨率增强效果,我们继续利用经验模态分解(Empirical Mode Decomposition, EMD)方法对一维距离像的连续小波系数进行分解,将其分解为一系列含不同频率信息和能量信息的本征模式函数(Intrinsic Mode Functions, IMF)。其中,经验模态分解方法是 Huang 在 1998 年提出的一种自适应时频分析方法,与传统的时域相关分析,频域谐波分解等信号分解方法相比,EMD 在处理非平稳、非线性数据上具有非常明显的优势,特别适合处理含有多级反射峰的信号<sup>[17-18]</sup>,可根据信号自身的属性,自适应地分解为反映信号不同信息的 IMF。因此,我们以其中含最多特征信息和能量信息的第一阶 IMF 为成像参数并进行三维重构,有望显著增强信号的特征性,提高 THz 成像检测技术的纵向分辨率。

## 1 基本原理

### 1.1 THz 调频雷达成像系统原理

本文采用 150~220 GHz 高频 THz 调频雷达成像系统对夹层结构复合材料进行成像检测,该系统的

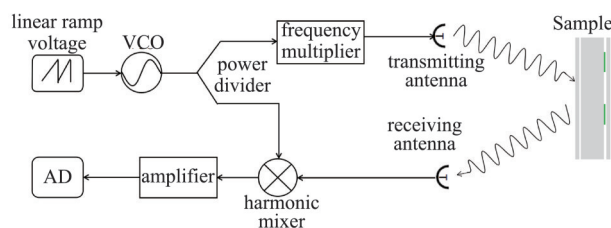


图1 THz 调频雷达成像系统示意图

Fig. 1 Diagram of THz frequency modulated radar imaging system

示意图如图 1 所示。为了检测被测材料的内部结构,即获取距离信息,需要获得被测信号的相位信息,因此该系统采用线性调频连续波(Linear Frequency Modulated Continuous Wave, LFMCW)的方式,通过一个线性斜坡电压驱动压控振荡器产生一个在微波波段的线性调频连续波信号,其瞬时频率随时间在 150~220 GHz 范围内呈线性变化,调频带宽为 70 GHz,根据距离像分辨率原理,该带宽下的系统纵向分辨率约为 2.1 mm。对于产生的微波信号,其经过功率分配器被分为两部分,一部分进入到倍频器产生 THz 波并经发射天线照射到被测样品上,另外一部分则直接进入谐波混频器作为本振信号。在调频带宽  $\Delta f$  和调频周期  $T$  一定的条件下,本振信号  $F$  与接收天线接收的携带样品信息的反射回波信号  $R$  进行混频产生差频信号  $B$ ,该信号在经过低频放大器放大和 AD 模数转换后,输入到数据处理单元进行被测信号的成像处理。其中本振信号  $F$  与反射回波信号  $R$  的角频率关系如图 2 所示,从图中可知差频信号  $B$  的角频率  $\omega_b$  与本振信号  $F$  和反射回波信号  $R$  的飞行时间差  $\Delta t$  满足如下比例关系

$$\omega_b = \frac{\Delta f}{T} \Delta t \quad (1)$$

其中  $\Delta f$  为调频带宽,  $T$  为调频周期。该公式表明差频信号  $B$  的角频率  $\omega_b$  与目标物体的距离  $D$  (即两信号到达探测器的时间差  $\Delta t$ ) 成正比,因此通过探测差频信号  $B$  的角频率  $\omega_b$  即可计算出目标物体的距离。基于这种比例关系,通过对被测样品进行逐点扫描探测,获取被测样品各位置处的纵向信息,即获得各分界面的距离信息,可实现对被测样品内部结构的探测以及三维图像重构。

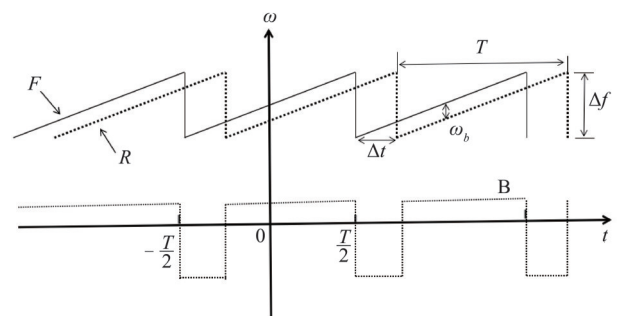


图2 LFMCW 探测原理图

Fig. 2 Schematic of the LFMCW detection theory

### 1.2 基于连续小波的经验模态分解方法原理

小波变换最早是由 Morlet 等人在进行地质学研究所提出的,与传统傅里叶分析方法不同的是,它



在分析非平稳信号时能同时在时域和频域上都具有良好的局部特征信息表征的能力,可将信号分解到各尺度上,在大尺度空间观察信号的概貌,在小尺度空间观察信号的细节,从而实现从粗到细的分析。若存在平方可积空间 $L^2$ ,对于一个平方可积函数 $f(x) \in L^2$ , $\psi_{a,b}(x)$ 为连续小波母函数,则对 $f(x)$ 进行连续小波变换的定义为

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

其中 $W_f(a,b)$ 为不同尺度因子 $a$ 和时间平移因子 $b$ 下的连续小波系数, $\overline{\psi(\cdot)}$ 为连续小波母函数的共轭函数<sup>[19]</sup>。对于连续小波母函数 $\psi(x)$ 必须满足容许条件

$$\int_0^{\infty} \frac{|\hat{\psi}(\omega)|^2}{\omega} d\omega < \infty, \quad (3)$$

其中 $\hat{\psi}(\omega)$ 为 $\psi(x)$ 的傅里叶变换值。由容许条件可知: $\hat{\psi}(0) = \int_{-\infty}^{\infty} \psi(x) dx = 0$ ,说明 $\psi(x)$ 具有波动性,

即在有限区间外恒等于0。对于连续小波变换是将 $f(x)$ 投影到二维时间-频率空间中,形成新的在时间 $b$ 时刻,频率为 $1/a$ 时的分量信息 $W_f(a,b)$ ,尺度因子 $a$ 和时间平移因子 $b$ 分别决定着连续小波母函数的中心和时域宽度,并且在小波母函数选定的前提下,小波窗口函数的窗口形状与尺度因子 $a$ 有关。 $a$ 越大,频窗的宽度就会随之越小,并且窗口形状也具有自适应性,在研究高频信号时,时间窗口的宽度会减小,从而提高时间分辨率;而在研究低频信号时,时间窗口的宽度就会变大,从而提高频率分辨率,以此来精确提取信号中细节信息的目的。

为了提取检测信号中不同交界面的局部特征信息,对THz检测信号进行连续小波变换处理。在连续小波变换之前,由于THz信号的一维距离像包含着不同样品交界面的反射特征峰,因此先对THz时域信号进行傅里叶变换获得其频域信息即一维距离像,然后在对其一维距离像进行连续小波变换,将被测信号分解在各尺度下,在大尺度空间分析信号的低频信息,在小尺度空间分析信号的高频信息,从而增强样品缺陷处的信号特征性和区分度。对比不同类型的小波母函数和尺度,在对THz检测信号进行连续小波变换处理时,采用高斯小波基的二阶导数(Gaus2)为小波母函数以及尺度为2

的小波组合,将在很好地保持信号特征峰的同时,抑制噪声的干扰。为了进一步增强信号的特征性、提高算法的自适应性,我们在连续小波变换的基础上对前面获取的THz检测信号的连续小波系数进行经验模态分解(EMD)。EMD方法是一种自适应性的时频分析方法,与傅里叶变换和小波变换不同的是,EMD可完全抛开基函数的束缚,仅依据信号自身的时间尺度特征来进行信号分解。由于EMD方法无需基函数,因此可将任意复杂信号分解为一系列含不同振荡模态的IMF和一个残差函数。其中,各阶的IMF包含着原始信号中不同的时间尺度特征,而较低阶的IMF包含着原始信号中更多的能量信息和频率信息,各阶IMF必须满足两个基本条件:(1)在全部时间范围内,极值和零交叉数量必须相等或最多相差一个;(2)在任意时刻,由局部最大值和局部最小值定义的包络,其平均值必须为零<sup>[20]</sup>。对于连续小波系数在EMD后可被表示为

$$W_f = \sum_{k=1}^N x_k(t) + r_N(t), \quad (4)$$

其中 $x_k(t)$ 为第 $k$ 个IMF分量, $r_N(t)$ 为残差函数。

分解连续小波系数的过程归纳如下:

- (1)找出连续小波系数全时间范围内的局部最大值和局部最小值;
- (2)使用三次样条曲线将所有局部最大值或局部最小值连接为上下包络线;
- (3)计算上下包络线的平均值 $m_1(t)$ ;
- (4)提取新的数据序列 $h_1(t) = W_f - m_1(t)$ ;
- (5)迭代 $h_1(t)$ ,直到 $h_1(t)$ 满足IMF的两个基本要求,以此来获得第一阶IMF分量 $x_1(t)$ ;
- (6)对信号 $r_1(t) = W_f - x_1(t)$ 重复上述步骤,获取其余的IMF。

当残差函数 $r_N(t)$ 变为单调函数或常数时,上述迭代过程停止<sup>[21]</sup>。对THz频域信号的连续小波系数进行EMD分解后,各阶IMF和残差函数如图3所示。由图可知,对于各阶的IMF,其第一阶的IMF包含最多的原始信号能量信息和频率信息,因此以第一阶IMF为成像参数并进行三维图像重构,将能最大程度上增强信号的特征性,提高检测图像的纵向分辨率。

## 2 实验样品介绍与实验设置

### 2.1 聚酰亚胺泡沫与聚氯乙烯板夹层结构复合材料

本文用聚酰亚胺泡沫与聚氯乙烯板组合成样

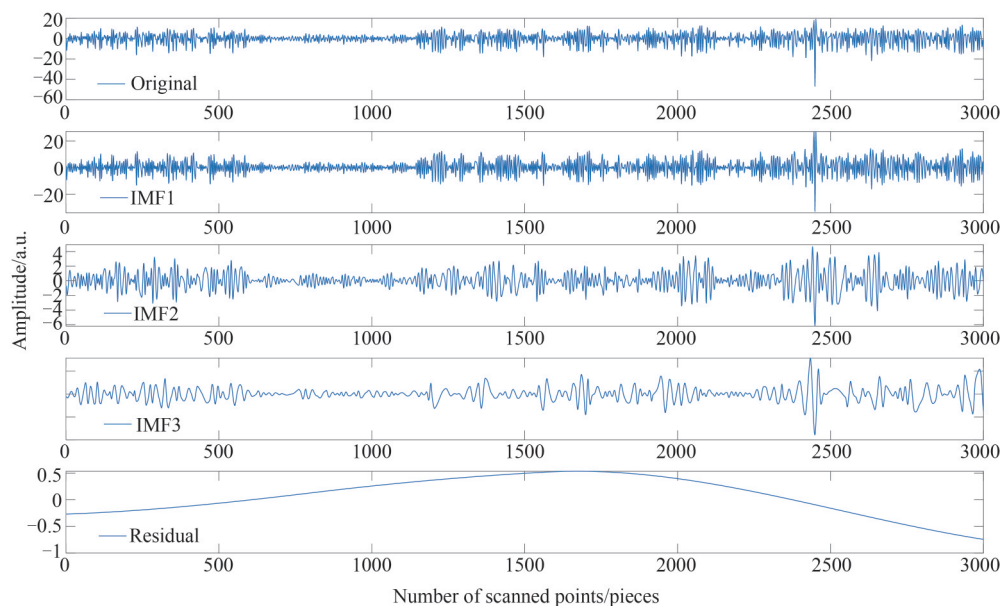


图3 THz频域信号的连续小波系数EMD分解后的IMF和残差函数

Fig. 3 IMF and residual function after EMD decomposition of continuous wavelet coefficient of THz frequency domain signal

品一,其实物照片、缺陷尺寸设计图以及结构示意图如图4所示。该样品由两层尺寸大小为100 mm×110 mm、厚为4.3 mm的聚酰亚胺泡沫与厚为2.0 mm的聚氯乙烯板通过环氧树脂胶粘接而成,并且利用两层直径为3.0 mm、厚为0.1 mm的聚四氟乙

烯薄膜来预制样品中的脱胶缺陷,脱胶缺陷的位置如图中红色圆圈和矩形长条处所示。

## 2.2 石英纤维增强氰酸酯树脂基与聚酰亚胺薄膜夹层结构复合材料

本文用石英纤维增强氰酸酯树脂基与聚酰亚

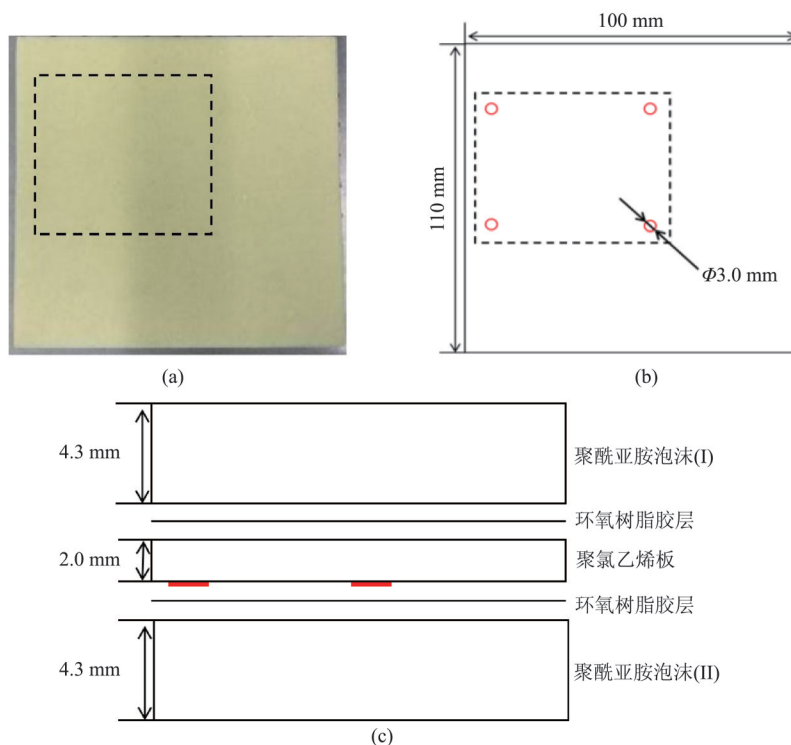


图4 样品一的实物照片、缺陷尺寸设计图和结构示意图 (a) 实物照片, (b) 缺陷尺寸设计图, (c) 结构示意图

Fig. 4 The actual photo, defect size design diagram and structure diagram of sample 1 (a) The actual photo, (b) defect size design diagram, (c) the structure diagram

胺薄膜组合成样品二,其实物照片、缺陷尺寸设计图以及结构示意图如图5所示。该样品由三层尺寸大小为110 mm×92 mm、厚度分别为0.45 mm、2.6 mm、0.45 mm的石英纤维增强氰酸酯树脂基与相同尺寸大小的聚酰亚胺薄膜同样利用环氧树脂胶粘接而成,并且利用两层直径为10.0 mm、厚为0.1 mm的聚四氟乙烯薄膜来预制样品中的脱胶缺陷,脱胶缺陷的位置如图中绿色圆圈和矩形长条处所示。

### 2.3 实验设置

本文利用如图1所示的150~220 GHz高频THz调频雷达成像系统对上述夹层结构复合材料进行成像检测,为减小系统噪声,使得到的图像更清晰,所有待测样品均被放置在成像系统的焦平面附近并通过单向逐点扫描的方式进行检测。根据检测精度要求和缺陷的情况,对于样品一中直径为3.0 mm的脱胶缺陷,设置步进电机的最小探测精度为1.0 mm×1.0 mm;对于样品二中直径为10.0 mm的脱胶缺陷,设置步进电机的最小探测精度为2.0 mm×2.0 mm。

### 3 实验方法与结果分析

本文分别利用150~220 GHz高频THz调频雷达成像系统对样品一和样品二进行成像检测,采用单向逐点扫描的方式采集沿 $z$ 轴不同位置处的检测信号,并利用幅值成像方法获得所需分界面处的 $xoy$ 平面图像。对于样品一中直径为3.0 mm的脱胶缺陷,其位于2.0 mm厚聚氯乙烯板的下表面,因此我们对聚氯乙烯板的上下表面以及内部界面进行了成像处理,以此来观察预制缺陷的识别效果,样品一中不同分界面处的成像结果如图6所示。其中沿 $z$ 轴的第1487扫描点处代表着聚氯乙烯板的上表面,沿 $z$ 轴的第1493扫描点处代表着聚氯乙烯板的下表面即直径为3.0 mm的脱胶缺陷所在位置。对于样品二中直径为10.0 mm的脱胶缺陷,其位于第二块石英纤维增强氰酸酯树脂基的下表面,因此我们对第二块石英纤维增强氰酸酯树脂基的上下表面以及内部界面信息也进行了成像处理,以此来观察该尺寸大小的脱胶缺陷的识别效果,样品二中不同分界面处的成像结果如图7所示。其中沿 $z$ 轴的第1483扫描点处代表着第二块石英纤维增强氰酸酯树脂基的上表面,沿 $z$ 轴的第1488扫描点处代表着第二块石英纤维增强氰酸酯树脂基的下表面即

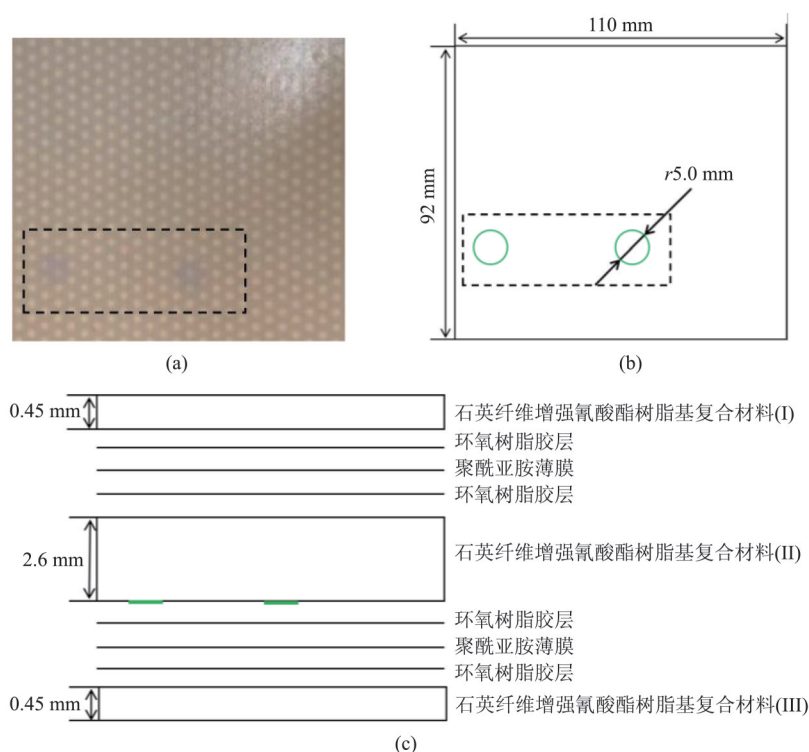


图5 样品二的实物照片、缺陷尺寸设计图和结构示意图 (a) 实物照片, (b) 缺陷尺寸设计图, (c) 结构示意图

Fig. 5 The actual photo, defect size design diagram and structure diagram of sample 2 (a) the actual photo, (b) defect size design diagram, (c) the structure diagram



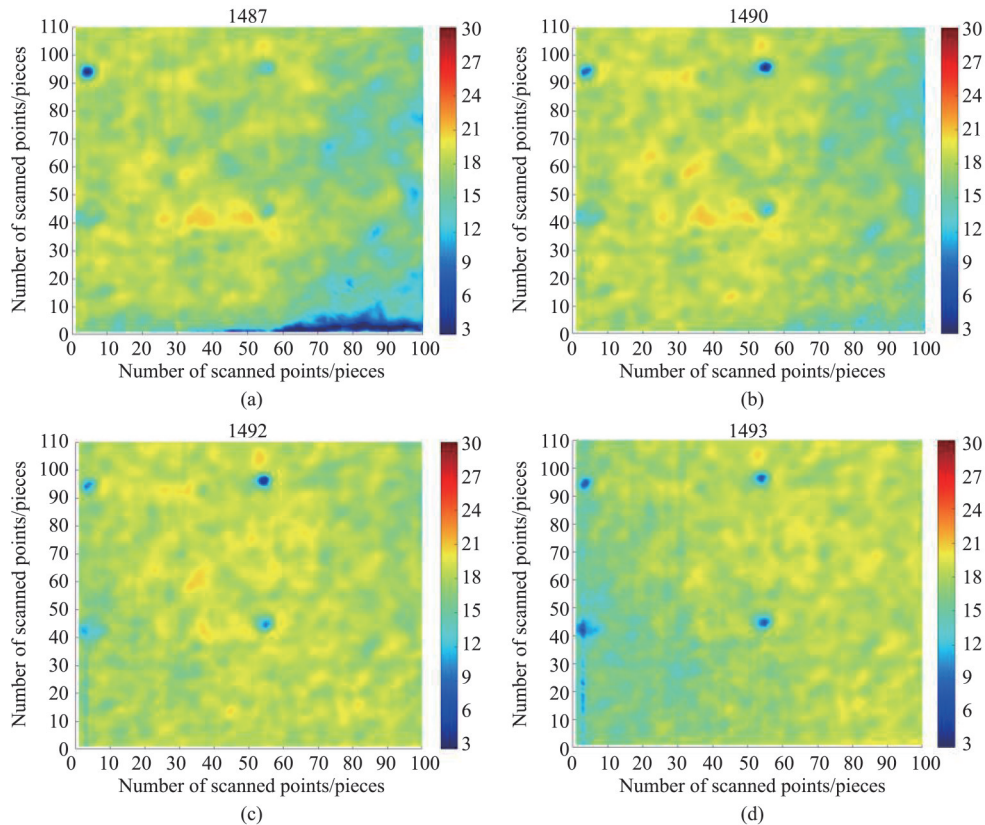


图6 样品一中沿 $z$ 轴不同位置处的THz图像 (a) 第1487扫描点处,对应2.0 mm厚聚氯乙烯板的上表面;(b) 第1490扫描点处;(c) 第1492扫描点处;(d) 第1493扫描点处,对应2.0 mm厚聚氯乙烯板的下表面

Fig. 6 THz images at different scan points along the  $z$  axis in sample 1 (a) The scan point 1487, corresponding to the upper surface of 2.0 mm thick polyvinyl chloride sheet; (b) The scan point 1490; (c) The scan point 1492; (d) The scan point 1493, corresponding to the lower surface of 2.0 mm thick polyvinyl chloride sheet

直径为10.0 mm的脱胶缺陷所在位置。观察两种被测样品各分界面处的检测图像可知,对于位于复合材料下表面的脱胶缺陷,都能在复合材料上表面以及内部分界面处识别出来,即在复合材料的上下表面区间范围内都有预制缺陷的信息,从而难以分辨该缺陷的准确分界面位置。产生这个结果的主要原因是THz检测信号的自身波长较长,导致相距太近的复合材料下表面信号与复合材料上表面信号相合并产生“合峰”问题,从而降低了检测图像的纵向分辨率,无法对预制缺陷进行准确判断,为了解决这个问题,利用本文提出的基于连续小波的经验模态分解方法进行处理。

为了清楚地观察信号“合峰”问题以及利用本文方法处理后的增强效果,分别对样品一和样品二中脱胶缺陷处的反射光强信息进行了对比分析,对于样品一中脱胶缺陷处的反射光强信息的对比结果如图8(a)所示,样品二中脱胶缺陷处的反射光强信息的对比结果如图8(b)所示。从两种样品的原

始反射光强信息的对比结果可知,不管是对于样品一中厚度为2.0 mm的聚氯乙烯板,还是对于样品二中厚度为2.6 mm的石英纤维增强氰酸酯树脂基,它们上下表面的反射波峰的区分度都不明显,出现了信号“合峰”问题(反射峰相距太近被合并),如图中绿色虚线框处所示。而在观察利用本文方法处理后的结果可知,两种样品中被合并的反射波峰均被有效地分离,且相应的峰宽度也被压缩,从而增强了信号的特征性,有利于对内部缺陷的准确识别。

为了更直观地对比本文方法处理后的缺陷识别效果,分别对两种样品特定区域的原始检测数据、前人提出的连续小波变换方法处理后的成像参数以及本文方法处理后的第一阶本征模式函数进行了三维图像重构。其中对于样品一所选取的重构区域如图9(a)中的红色虚线框处所示,沿 $L_2$ 边的 $xz$ 截面对应2.0 mm厚聚氯乙烯板的上下表面;对于样品二所选取的重构区域如图10(a)中的红色虚线框处所示,沿 $L_2$ 边的 $xz$ 截面对应2.6 mm厚石英纤

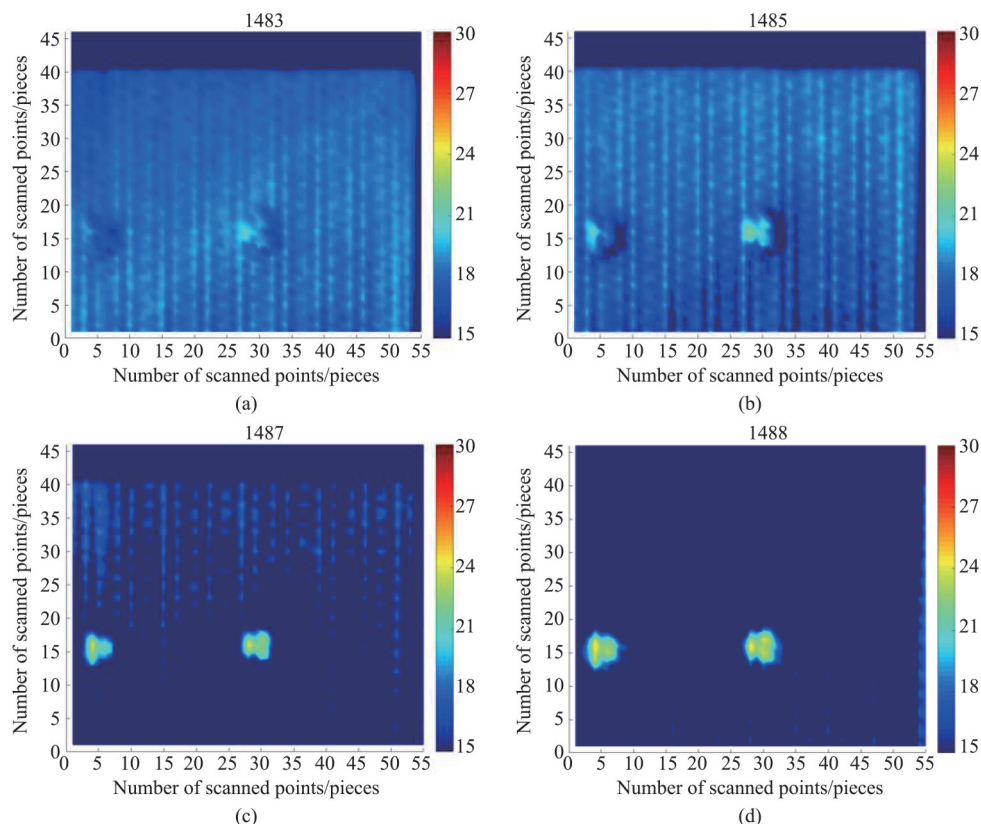


图7 样品二中沿 $z$ 轴不同位置处的THz图像 (a) 第1483扫描点处,对应第二块石英纤维增强氰酸酯树脂基的上表面;(b) 第1485扫描点处;(c) 第1487扫描点处;(d) 第1488扫描点处,对应第二块石英纤维增强氰酸酯树脂基的下表面

Fig. 7 THz images at different scan points along the  $z$  axis in sample 2 (a) The scan point 1483, corresponding to the upper surface of cyanate ester matrix composites reinforced by quartz yarns(II); (b) The scan point 1485; (c) The scan point 1487; (d) The scan point 1488, corresponding to the lower surface of cyanate ester matrix composites reinforced by quartz yarns(II)

维增强氰酸酯树脂基的上下表面。不同类型样品的各方法三维图像重构结果分别如图9(b-d)以及图10(b-d)所示,首先先对两个样品原始数据的重构结果观察可知,不管是厚度为2.0 mm的聚氯乙烯板还是厚度为2.6 mm的石英纤维增强氰酸酯树脂基,都无法准确识别预制缺陷的所在位置,产生这个结果的主要原因是因为缺陷处的反射回波信号与复合材料上表面的信号粘连在了一起,从而影响了成像检测的纵向检测精度,导致结果图像的视觉效果较差。再对经前人方法处理后的重构结果观察可知,虽然采用该方法可以在一定程度上解决信号“合峰”问题,使缺陷处信号与复合材料上表面信号得到一定的区分,增强检测图像的纵向分辨率,但是处理效果欠佳,部分缺陷处的信号仍与复合材料上表面的信号相粘连,导致部分缺陷的识别效果较差,需要对算法的性能进行进一步的提升,实现对不同类型的样品都具有有效性。最后在对经本文方法处理后的重构结果观察可知,两种不同类型的

实验样品在经过本文方法处理后,原本信号“合峰”的问题得到了有效地解决,缺陷处的信号与复合材料上表面的信号也得到了有效地区分,预制的脱胶缺陷均能被有效识别,在有效提高图像清晰度的同时,极大地增强了THz成像的纵向分辨率,检测图像的视觉效果更佳。

#### 4 结果图像的客观评价

为了对各方法处理后的结果图像进行准确评价,本文还采用能量梯度(Energy Gradient, EG)、局部对比度(Local Contrast, LC)和平均梯度(Mean Gradient, MG)三种客观评价指标对各方法重构的结果图像进行了客观评价。其中能量梯度是衡量图像清晰度的重要指标,能够较好地与人的主观感受相对应,可实时对图像的清晰度进行评价<sup>[22]</sup>,当图像的能量梯度越大时,图像的清晰度就越高,能量梯度的计算式如下:



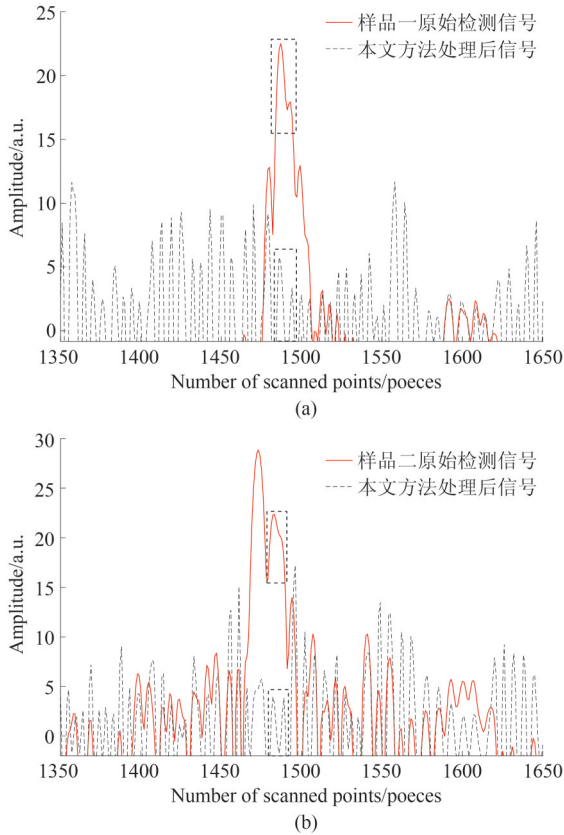


图8 原始检测信号与本文方法处理后信号的对比 (a) 样品一中脱胶缺陷处的信号对比, (b) 样品二中脱胶缺陷处的信号对比

Fig. 8 The comparison between the original detection signals and the signals processed by the proposed method (a) Signal comparison of adhesive debonding defect in sample 1, (b) signal comparison of adhesive debonding defect in sample 2

$$EG = \sum_{x=1}^G \sum_{y=1}^R (|f(x+1, y) - f(x, y)|^2 + |f(x, y+1) - f(x, y)|^2) \quad (5)$$

其中  $G$  和  $R$  表示图像的尺寸大小,  $f(x, y)$  表示图像  $f$  在像素点  $(x, y)$  处的灰度值。

图像的局部对比度可以反映图像像素灰度分布的动态范围, 动态范围越大, 图像中的局部对比度就越高, 相应的图像质量也就越好<sup>[23]</sup>, 局部对比度的定义式为

$$LC = \frac{1}{GR} \sum_{x=1}^G \sum_{y=1}^R \frac{I_{x,y}^{\max} - I_{x,y}^{\min}}{I_{x,y}^{\max} + I_{x,y}^{\min} + C} \quad (6)$$

其中  $I_{x,y}^{\max}$  和  $I_{x,y}^{\min}$  分别表示以像素点  $(x, y)$  为中心的某一子块中像素灰度最大值和最小值, 在本文中像素子块的大小设置为  $5 \times 5$ , 为了避免出现分母为 0 的情况,  $C$  是一较小的常数, 取值为 0.1。

图像的平均梯度反映着图像表达细节信息的

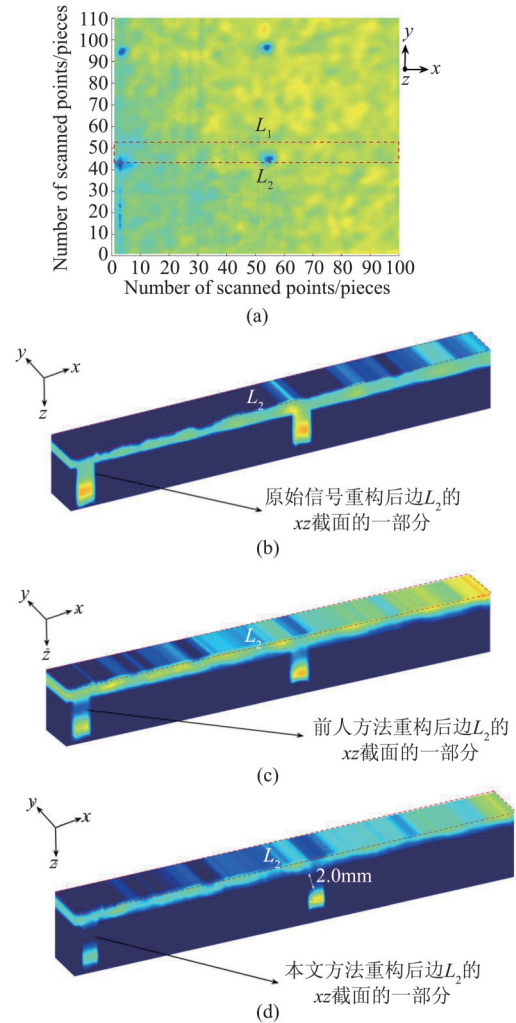


图9 样品一中特定区域数据的各方法重构图像 (a) 截取图中红色虚线框区域的  $z$  轴数据进行三维图像重构, (b) 原始检测数据重构的三维图像, (c) 前人方法重构的三维图像, (d) 本文方法重构的三维图像

Fig. 9 Each method of reconstructing image for specific region data in sample 1 (a) Select the  $z$  direction data within the dotted red line region for 3D reconstruction, (b) 3D image reconstruction from original detection data, (c) 3D image reconstructed by previous method, (d) 3D image reconstructed by proposed method in this paper

能力, 通常图像的平均梯度越大, 图像的细节层次就越多, 图像的清晰度也会越高<sup>[24]</sup>, 平均梯度的计算式如下

$$MG = \frac{1}{GR} \sum_{i=1}^G \sum_{j=1}^R \sqrt{\left[ \frac{\partial f(x, y)}{\partial x} \right]^2 + \left[ \frac{\partial f(x, y)}{\partial y} \right]^2} \quad (7)$$

其中  $\frac{\partial f(x, y)}{\partial x}$  表示图像水平方向的梯度,  $\frac{\partial f(x, y)}{\partial y}$  表示图像垂直方向的梯度。

不同处理方法的客观评价指标计算结果如表 1

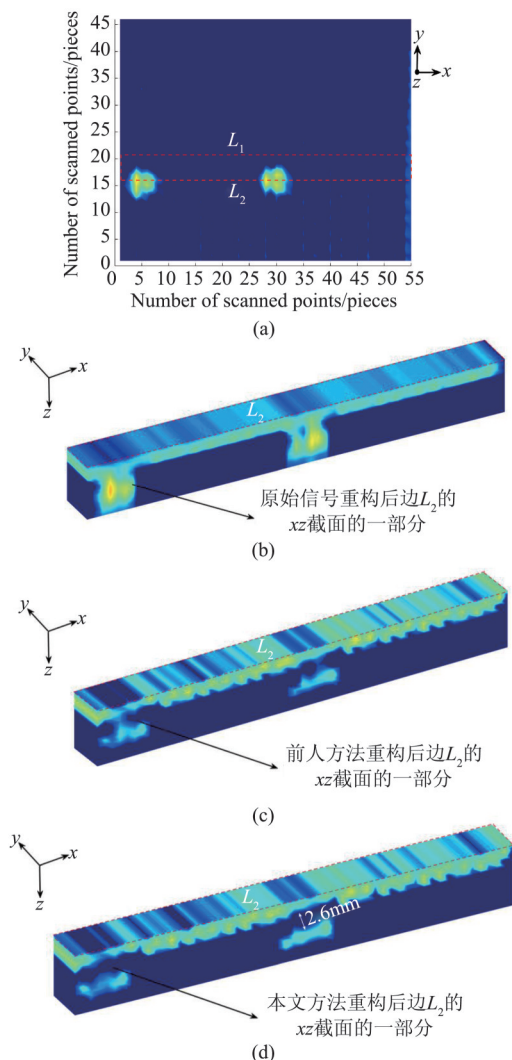


图10 样品二中特定区域数据的各方法重构图像 (a) 截取图中红色虚线框区域的 $z$ 轴数据进行三维图像重构, (b) 原始检测数据重构的三维图像, (c) 前人方法重构的三维图像, (d) 本文方法重构的三维图像

Fig. 10 Each method of reconstructing image for specific region data in sample 2 (a) Select the  $z$  direction data within the dotted red line region for 3D reconstruction, (b) 3D image reconstruction from original detection data, (c) 3D image reconstructed by previous method, (d) 3D image reconstructed by proposed method in this paper

所示,从表中可以看出,在经过本文提出的基于连续小波的经验模态分解的纵向分辨率增强方法处理后的结果图像在能量梯度、局部对比度和平均梯度三种客观评价指标上均取得了最优的值,表明本文方法可有效解决信号的“合峰”问题,使缺陷处的信号与复合材料上表面的信号得到有效的区分,达到有效提高检测图像纵向分辨率的目的,并且在提升图像纵向分辨率的同时,可抑制图像中的高频噪

声,使图像整体的清晰度也得到提高,有助于对被测材料内部缺陷的准确识别。

## 5 结论

本文针对由于THz波自身波长较长导致THz检测图像的纵向分辨率较低的问题,研究提出了一种基于连续小波的经验模态分解的太赫兹检测图像纵向分辨率增强新方法。通过对不同类型的夹层结构复合材料进行成像检测,并利用本文提出的方法进行纵向分辨率增强处理,实验结果和客观评价结果表明本文方法可有效增强信号的特征峰,解决信号的“合峰”问题,使相合并的反射回波信号得到较好的分离;并且在经过本文方法处理后,检测信号中的高频噪声也能得到较好的抑制,在有效增强检测图像纵向分辨率的同时,提高检测图像的清晰度,有利于对被测材料内部缺陷的准确识别,这为以后的THz计算机断层扫描成像和THz无损检测应用研究提供了新的思路。在未来的研究中,将对现有方法做进一步的改进,寻求满足在增强THz检测图像纵向分辨率的同时,实现识别出的缺陷位置与实际相吻合的新方法。

## References

- [1] SUN Wei-Dong, GENG Guo-Shuai, YANG Zhong-Bo, *et al.* Imaging porcine tissue using a near-field terahertz microscopy technique [J]. *J. Infrared Millim. Waves* (孙卫东, 耿国帅, 杨忠波, 等。猪肉组织的近场太赫兹成像检测研究。《红外与毫米波学报》) 2018, **37**(6): 769-774.
- [2] LI Zhi-Long, ZUO Jian, ZHAO Yuan-Meng, *et al.* A study on the terahertz nondestructive testing of foam sandwich structure composites based on morphological filtering [C]. 10th Applied Optics and Photonics China (AOPC 2021), 2021, **12065**: 1206538.
- [3] GUO Chun-Yan, XU Jian-Xing, PENG Hong-Ling, *et al.* Transfer process of LT-GaAs epitaxial films for on-chip terahertz antenna integrated device [J]. *J. Infrared Millim. Waves* (郭春妍, 徐建星, 彭红玲, 等。片上太赫兹天线集成器件LT-GaAs外延转移工艺。《红外与毫米波学报》) 2017, **36**(2): 220-224+234.
- [4] Lu S H, Zhang X, Zhang Z Y, *et al.* Quantitative measurements of binary amino acids mixtures in yellow foxtail millet by terahertz time domain spectroscopy [J]. *Food chemistry*, 2016, **211**: 494-501.
- [5] Kawase K, Shibuya T, Hayashi S, *et al.* THz imaging techniques for nondestructive inspections [J]. *Comptes. Rendus. Physique*, 2010, **11**(7-8): 510-518.
- [6] DENG Yu-Qiang, XING Qi-Rong, LANG Li-Ying, *et al.* Wavelet-transform in terahertz time-domain spectroscopy [J]. *Acta phys. Sin.*, (邓玉强, 邢歧荣, 郎利影, 等。Thz波的小波变换频谱分析。《物理学报》) 2005, **54**(11): 5224-5227.

表 1 原始检测图像与不同方法处理后图像的客观评价指标计算结果(加粗数字表示每组数据的最优值)

Table 1 The calculation results of the objective evaluation index of the original detection image and the image processed by different methods (Bold numbers indicate the optimal value for each set of data)

检测图像	指标	原始信号重构的图像	前人方法重构的图像	本文方法重构的图像
样品一直径为 3.0 mm 脱胶缺陷	EG	6.587 6 e+03	8.166 9 e+03	<b>1.045 8 e+04</b>
	LC	0.202 1	2.923 1	<b>5.502 3</b>
	MG	0.049 6	0.053 1	<b>0.085 6</b>
样品二直径为 10.0 mm 脱胶缺陷	EG	9.973 7 e+03	1.643 2 e+04	<b>2.371 1 e+04</b>
	LC	0.555 8	1.373 7	<b>6.317 3</b>
	MG	0.140 1	0.171 6	<b>0.237 2</b>

- [7] Stoik C D, Bohn M J, Blackshire J L. Nondestructive evaluation of aircraft composites using transmissive terahertz time domain spectroscopy [J]. *Optics Express*, 2008, **16**(21):17039-17051.
- [8] Kawase K, Ogawa Y, Watanabe Y, et al. Non-destructive terahertz imaging of illicit drugs using spectral fingerprints [J]. *Optics Express*, 2003, **11**(20):2549-2554.
- [9] Tumlinson A R, Hofer B, Winkler A M, et al. Inherent homogenous media dispersion compensation in frequency domain optical coherence tomography by accurate k-sampling [J]. *Applied Optics*, 2008, **47**(5):687-693.
- [10] Drexler W, Morgner U, Kartner F, et al. In vivo ultra-high-resolution optical coherence tomography [J]. *Optics Letters*, 1999, **24**(17):1221-1223.
- [11] LI Dan, RAO Yun-Kun, LING Fu-Ri. Study on dispersion compensation based on terahertz coherent tomographic imaging system [J]. *Laser Technol.* (李丹, 饶云坤, 凌福日. 基于太赫兹相干层析成像系统色散补偿的研究. *激光技术*) 2017, **41**(6):779-783.
- [12] DAI Bing, WANG Peng, ZHOU Yu, et al. Wavelet transform in the application of three-dimensional terahertz imaging for internal defect detection [J]. *Acta phys. Sin.*, (代冰, 王朋, 周宇, 等. 小波变换在太赫兹三维成像探测内部缺陷中的应用. *物理学报*) 2017, **66**(8):373-379.
- [13] Wong T M, Kahl M, Haring-Bolivar P, et al. Training auto-encoder-based optimizers for terahertz image reconstruction [C]. Pattern Recognition, DAGM GCPR 2019, 2019, **11824**: 93-106.
- [14] Mallat S, Hwang W L. Singularity detection and processing with wavelets [J]. *IEEE Transactions on Information Theory*, 1992, **38**(2):617-643.
- [15] ZHANG Ji-Yang, REN Jiao-Jiao, CHEN Si-Hong, et al. Application of wavelet denoising in terahertz nondestructive detection [J]. *Chin. J. 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] Maraun D, Kurths J. Cross wavelet analysis: significance testing and pitfalls [J]. *Nonlinear Processes in Geophysics*, 2004, **11**(4): 505-514.
- [17] LU Min, LI Xiao-Xia, SHANG Li-Ping, et al. Research on the method of improving terahertz frequency resolution based on empirical mode decomposition [J]. *Spectrosc. Spect. Anal.* (卢敏, 李小霞, 尚丽平, 等. 基于经验模态分解提高太赫兹频率分辨率的方法. *光谱学与光谱分析*) 2016, **36**(9):2732-2735.
- [18] ZHANG Rui, WU Tong, ZHAO Yue-Jin. Terahertz signal analysis for biological tissues based on empirical mode decomposition [J]. *Optik*, 2019, **183**:906-911.
- [19] Sappa A D, Carvajal J A, Aguilera C A, et al. Wavelet-Based visible and infrared image fusion: a comparative study [J]. *Sensors*, 2016, **16**(6):861.
- [20] SU Yun-Peng, ZHENG Xiao-Ping, DENG Xiao-Jiao. Terahertz spectrum analysis based on empirical mode decomposition [J]. *Journal of Infrared Millimeter and terahertz Waves*, 2017, **38**(8):972-979.
- [21] LIU Jing, LIU Hai-Shun, ZUO Jian, et al. Terahertz spectrum analysis for binary amino acids mixture based on empirical mode decomposition [J]. *Spectrosc. Spect. Anal.* (刘婧, 刘海顺, 左剑, 等. 基于经验模态分解的两种混合氨基酸太赫兹光谱分析研究. *光谱学与光谱分析*) 2020, **40**(10):3061-3065.
- [22] Subbarao M, Choi T, Nikzad A. Focusing techniques [J]. *Optical Engineering*, 1993, **32**(11):2824-2836.
- [23] Wang Y, Pan Z B. Image contrast enhancement using adjacent-blocks-based modification for local histogram equalization [J]. *Infrared Physics&Technology*, 2017, **86**:59-65.
- [24] Li Z L, Zuo J, Zhao Y M, et al. A novel method for the enhancement of composite materials' terahertz image using unsharp masking and guided filtering technology [J]. *Frontiers in Physics*, 2021, **9**:750588.