

基于稀疏表示的太赫兹时域光谱分层检测算法

刘猛, 李腾, 刘旭东, 孙怡雯*

深圳大学医学部生物医学工程学院, 广东 深圳 518000

摘要 太赫兹无损检测是一种非侵入、非接触性的新型检测技术, 在无损检测领域极具潜力。但在实际探测中, 对于复杂的太赫兹回波信号, 如色散回波和重叠回波, 仅利用传统的信号处理方法(如直接法、反卷积法)难以满足对飞行时间定位精度的要求。稀疏表示法作为一种太赫兹信号处理的新方法, 具有良好的定位精度和抗噪性。提出基于最小绝对收缩和选择算子(LASSO)的稀疏表示法, 从复杂的太赫兹回波信号中重建脉冲响应函数, 并构建双过完备字典完成对太赫兹反射信号的色散补偿。针对重建脉冲响应函数幅值不准确的问题, 提出幅值衰减系数, 修正脉冲响应函数幅值, 有效提升时域峰-峰值的成像质量。通过数值计算和实验分析, 验证了所提方法的有效性。可以预期, 基于LASSO的稀疏表示法能够为太赫兹无损检测中的信号处理提供新的解决思路。

关键词 太赫兹无损检测; 稀疏表示; 脉冲响应函数; 时间脉冲扩展

中图分类号 O436

文献标志码 A

DOI: 10.3788/LOP231372

Terahertz Time-Domain Spectral Hierarchical Detection Algorithm Based on Sparse Representation

Liu Meng, Li Teng, Liu Xudong, Sun Yiwen*

School of Biomedical Engineering, Health Science Center, Shenzhen University, Shenzhen 518000, Guangdong, China

Abstract Terahertz nondestructive testing (THz-NDT) technology is a new noninvasive and noncontact detection technology with strong penetration capability for nonmetallic and nonpolar composite materials, and has a great potential in the field of NDT. In practical detection, for complex terahertz echo signals, such as dispersive echoes and overlapping echoes, it is difficult to meet the requirements of localization accuracy for the time-of-flight only via traditional signal processing methods, such as the direct and deconvolution methods. In this context, the sparse representation method, as a new method for THz signal processing, has good localization accuracy and noise immunity. In this study, we propose a sparse representation method based on the least absolute shrinkage and selection operator (LASSO) to reconstruct an impulse response function from the complex THz echo signal and construct a double-over-complete dictionary to complete the dispersion compensation for the THz reflection signal. An amplitude decay coefficient is proposed to address the problem of inaccurate amplitude of the reconstructed impulse response function. This correction can effectively improve the peak-to-peak imaging quality in the time domain. The effectiveness of the proposed method is verified through numerical calculations and experimental analysis. The proposed method is expected to provide a novel solution for signal processing in THz-NDT.

Key words terahertz nondestructive testing; sparse representation; impulse response function; time pulse expansion

1 引言

太赫兹检测技术是近年来新兴的一种极具潜力的无损检测方法。太赫兹波拥有非侵入性、非接触性及非电离特性, 能够克服传统检测技术需要耦合剂^[1]或

者检测深度不够^[2-4]的局限, 对非金属及非极性复合材料的单层或多层结构的厚度或内部缺陷信息展现出优异的检测能力^[5], 并已在先进泡沫材料^[6-7]、飞机热障涂层^[8]、船舶的防护涂层^[9]、纤维增强复合材料^[10-16]、陶瓷复合材料^[17-18]、塑料复合材料^[19-20]及氟橡胶^[21]等材料的

收稿日期: 2023-05-24; 修回日期: 2023-07-05; 录用日期: 2023-08-01; 网络首发日期: 2023-08-15

基金项目: 国家自然科学基金(61975135, 61805148)、广东高校生物医药与健康重点领域专项(2022ZDZX2053)

通信作者: *ywsun@szu.edu.cn

缺陷检测领域突显出极具潜力的应用价值。但在实际检测过程中,除了环境噪声、系统振荡等因素的干扰,太赫兹波在材料内部传播时自身的频率相关衰减和材料色散损耗造成的太赫兹脉冲扩展和多层结构材料内部各层间的多次反射都会造成严重的回波重叠、峰值漂移、振幅衰减等问题,导致各反射界面之间飞行时间定位不准确,从而严重影响了太赫兹无损检测的灵敏度。因此,如何从太赫兹反射信号中准确地进行飞行时间(TOF)的定位是定量表征被测材料内部结构信息的关键。

在传统的太赫兹反射信号中,可以通过直接观察相邻峰的延迟时间来确定飞行时间。然而当被检测材料很薄,或者太赫兹波的色散等因素导致反射界面的回波信息无法直接识别时,信号处理方法的选择至关重要。太赫兹反射信号通常可以表示为太赫兹参考信号和系统脉冲响应函数的卷积^[22],利用反卷积方法在频域中进行脉冲响应函数的重构。但是直接进行逆运算会在时域-频域转换过程中引入高频噪声,导致脉冲响应函数出现严重的振铃效应,极大地影响了反卷积的性能。目前可以用来消除振铃效应的方法,例如频域-小波域反卷积(FWDD)^[23-25],结合汉宁窗^[24]、高斯滤波器^[26]、双高斯滤波器^[27]、维纳滤波器^[28-29]等可以提取脉冲响应函数完成飞行时间定位,并可进一步实现介质层结构的计算。然而,基于FWDD的滤波器通常由于受到截止频率等参数的限制,对太赫兹时域光谱的最小飞行时间分辨能力降低,当样品介质层很薄时,介质层上下界面的反射回波重叠而导致上下界面的飞行时间无法分辨^[30]。此外,在频域加入滤波器虽然能够达到降噪的目的,但也可能因此造成过多的信号丢失。当被检测介质层中含有细微缺陷时,反射产生的微弱信号往往重叠在信号回波或者淹没在噪声中而无法分辨,严重影响了检测结果的可靠性。

近年来,时域类处理方法逐渐兴起,该类方法通过某些算法建立参考信号与被测样件信号之间的联系,进而提取脉冲响应函数,如多元线性回归分析^[31]、多变量分析的偏最小二乘法^[32]、机器学习^[33]等。稀疏表示法作为一种典型的时域信号处理方法,以高分辨率、时不变性和灵活性,广泛应用于参数估计、缺陷检测、信号去噪和数据压缩等无损检测领域。稀疏表示方法^[34]基于信号的稀疏先验信息,将原始信号分解为卷积字典和稀疏向量的乘积。对于只包含少量非零元素的稀疏向量,可以利用反问题的优化策略进行稀疏求解。2017年美国佐治亚理工学院的Dong等^[35]提出软阈值迭代收缩算法并设计了一种简单的描述太赫兹波时间脉冲扩展的时域卷积模型,完成了对太赫兹脉冲响应函数的重构。2021年西安交通大学的Xu等^[36-37]使用基追踪降噪(BPDN)算法并基于双高斯混合模型(DGMM)模拟太赫兹信号脉冲扩展,实现对脉冲响应函数的稀疏重构。然而目前利用稀疏表示方法进行系

统脉冲响应函数重构的精度、稀疏度及算法的抗噪性方面还有待进一步提高。

本文提出一种基于最小绝对收缩和选择算子(LASSO)的稀疏表示方法,并将其用于多层结构反射太赫兹信号的处理运算。为提高数据采样周期限制的时间分辨率,建立了LASSO回归模型并使用双高斯混合模型描述其脉冲扩展,用以解决太赫兹波在材料内部传播过程中的频率相关衰减和色散引起的时间脉冲扩展问题。此外,在基于LASSO的稀疏表示方法中,通过双过完备字典实现对脉冲响应函数的稀疏重构及对太赫兹信号的色散补偿,提出了幅值衰减系数对重构信号进行修正,显著提升了缺陷成像的对比度。通过数值模拟和实验测量,验证了基于LASSO的稀疏表示方法的有效性,并与FWDD算法和BPDN算法对脉冲响应函数的重构结果进行比较。

2 方法原理

2.1 太赫兹卷积模型

在时域中,测量的太赫兹反射信号 $y(t)$ 可以表示为参考信号 $x(t)$ 与脉冲响应函数 $h(t)$ 的卷积,脉冲响应函数 $h(t)$ 取决于被检测物体的结构特性。通过加入噪声 $e(t)$ 建立太赫兹反射信号的卷积模型,表达式为

$$y(t) = x(t) \otimes h(t) + e(t) = \int_{-\infty}^{+\infty} x(t-\tau)h(\tau)d\tau + e(t), \quad (1)$$

参考信号 $x(t)$ 可以通过金属反射镜的太赫兹回波信号获得。根据香农-奈奎斯特采样定理(Shannon-Nyquist sampling theorem),将式(1)改写成采样时间为 T_s 的离散化形式,有

$$y[n] = \sum_{p=0}^{N-1} x[n-p]h[p] + e[n], \quad (2)$$

式中: $y[n] = y(nT_s)$, $h[p] = h(pT_s)$; $n=1, 2, 3, \dots$, $N, p=0, 1, 2, \dots, N-1$; N 为测量信号数据点的长度。

由于实际检测中单层或多层结构待测样件的反射界面是有限的,接收到的反射信号只有有限个回波脉冲,所以脉冲响应函数 $h[p]$ 是稀疏的,只包含少数的非零向量,其余向量均为零或接近零,因此 $h[p]$ 可假设为

$$h[p] = \sum_{m=1}^I \beta_m \delta[n - \tau_m], \quad (3)$$

式中: I 是太赫兹回波信号峰的个数; β_m 代表峰的幅值; $\delta[n]$ 是狄拉克函数(Dirac delta function)^[38]; τ_m 表示延迟时间。

2.2 太赫兹信号的LASSO回归模型

为了准确而稀疏地重构脉冲响应函数,找到表征被测物体分层结构反射峰延迟时间 τ_m 的最优估计,假设立向量 \mathbf{Y} 、 \mathbf{x} 、 \mathbf{h} 、 \mathbf{e} 分别收集 $y[n]$ 、 $x[n]$ 、 $h[n]$ 、 $e[n]$

的样本,则式(2)可表示为

$$\mathbf{Y} = \mathbf{A}\mathbf{h} + \mathbf{e}, \quad (4)$$

式中: \mathbf{A} 为根据特普利茨 (Toeplitz) 矩阵形式构建的矩阵 ($N \times M$), 矩阵 \mathbf{A} 中每一个列向量都是参考信号 \mathbf{x} 的延时变换。对于重构的反射信号, 由于 \mathbf{x} 与 \mathbf{h} 的卷积转换为 \mathbf{A} 与 \mathbf{h} 的乘积, 因此称 \mathbf{A} 为卷积字典, 字典中的每一个列向量被称为一个原子。则式(4)将包含被测物体结构信息的脉冲响应函数 \mathbf{h} 的求解过程转变为: 在给定太赫兹反射信号 \mathbf{Y} 和卷积字典 \mathbf{A} 的前提下, 根据脉冲响应函数 \mathbf{h} 稀疏的先验性质, 求方程唯一解。式(4)是稀疏表示理论中信号处理的典型问题, 可将其转换为求解向量最小 l_0 范数的优化问题:

$$\hat{\mathbf{h}} = \arg \min_{\mathbf{h}} \left\{ \|\mathbf{Y} - \mathbf{A}\mathbf{h}\|_2 + \lambda \|\mathbf{h}\|_0 \right\}, \quad (5)$$

其中, 向量的 l_0 范数的定义是该向量中非零元素的个数。关于 l_0 范数的求解问题, 理论上可以精确恢复出 k 阶稀疏信号, 但是由于需要计算 \mathbf{h} 中所有非零值的位置, 其解有 C_N^k 种可能。对于该类 NP-hard 问题, 为了简便计算, 可将其转换为 l_1 范数正则化约束下的 LASSO 回归模型:

$$\hat{\mathbf{h}} = \arg \min_{\mathbf{h}} \|\mathbf{Y} - \mathbf{A}\mathbf{h}\|_2^2 \quad \text{s.t.} \|\mathbf{h}\|_1 \leq \tau, \quad (6)$$

式中: τ 是非负的正则化参数, 用于平衡 $\|\mathbf{Y} - \mathbf{A}\mathbf{h}\|_2^2$ 项的拟合误差和 $\|\mathbf{h}\|_1$ 项的稀疏度。

LASSO 算法是用于求解 LASSO 回归模型的一种迭代算法。具体来说, LASSO 算法通过交替地对模型参数和正则化系数进行更新来求解 LASSO 问题, 这个过程使用谱投影梯度 (SPG) 算法^[39]实现。每次迭代只对一个参数进行更新, 而将其他参数保持不变。通过调节 τ 的值, 不断改变正则化的强度, 使某些权重变为零, 理论上可以获得更加稀疏的回归系数向量, 具体流程如图 1 所示。

1. initialize regression coefficient vector $\mathbf{h}_0 = 0$, error $r_0 = \mathbf{y}$
2. after the k iteration, the updated regression coefficient: \mathbf{h}_{k+1}
- a. update direction \mathbf{d}_k

$$\mathbf{d}_k = P\left(\mathbf{h}_k - \frac{\mathbf{g}_k}{\sigma_k}\right) - \mathbf{h}_k$$

- b. update step size α_k

$$\alpha_{\text{tmp}} = - \frac{\alpha_k^2 \delta}{2(y_{k+1} - y_k - \alpha_k \delta)}$$

determine whether α_{tmp} meets the requirements: $\sigma_{k-1} \leq \alpha_{\text{tmp}} \leq \sigma_k \alpha_k$

if the condition $\alpha_k = \alpha_{\text{tmp}}$ is met, otherwise $\alpha_k = \frac{\alpha_{k-1}}{2}$

- c. update regression coefficient: $\mathbf{h}_{k+1} = \mathbf{h}_k + \alpha_k \mathbf{d}_k$

3. calculate error r_k :

$$r_k = \mathbf{y} - \mathbf{D}\mathbf{h}_k + \mathbf{X}(j)\mathbf{h}_k$$

wherein $\mathbf{X}(j)$ is obtained by removing column j from matrix \mathbf{D}

4. if the residual is less than the set stop iteration threshold, stop iteration; otherwise, return to step 3

图 1 基于 LASSO 的稀疏表示方法

Fig. 1 Sparse representation method based on LASSO

2.3 考虑脉冲扩展的稀疏表示

理想情况下的太赫兹反射信号具有时不变特性, 即在中层结构样品中不同反射界面产生的太赫兹回波是太赫兹参考信号延时和幅度缩放的复制品。然而由于太赫兹波在材料传播过程中的频率相关衰减和材料色散效应, 实际获得的太赫兹反射信号具有时变特性, 不同界面的太赫兹回波具有脉冲展宽现象, 导致严重的回波重叠和峰值偏移。在本文的研究中, 使用 DGMM 构建过完备色散字典, 描述色散等因素导致的太赫兹脉冲扩展。Xu 等^[37]在相关研究中已经证明通过调节 DGMM 中的参数向量, 可以充分描述太赫兹时间脉冲扩展的情况。

在实际太赫兹检测中, 太赫兹参考信号可以采用 DGMM 表示为

$$g(\boldsymbol{\theta}, t) = \beta_1 \exp\left[-\frac{(t-t_1)^2}{\alpha_1^2}\right] + \beta_2 \exp\left[-\frac{(t-t_2)^2}{\alpha_2^2}\right], \quad (7)$$

式中: 参数向量 $\boldsymbol{\theta} = [\alpha_1, t_1, \beta_1, \alpha_2, t_2, \beta_2]$, β_1 和 β_2 分别表示对应的高斯回波的最大幅值, α_1 和 α_2 分别表示对应的高斯回波信号峰的带宽, 是与被测试材料中太赫兹波色散相关的时间脉冲扩展系数, t_1 和 t_2 分别表示对应的高斯回波峰值对应的初始延迟时间。由于实际检测中的噪声影响, 在 DGMM 中添加零均值的高斯白噪声, 因此参考信号 $x(t)$ 可以表示为

$$x(t) = g(\boldsymbol{\theta}, t) + e(t). \quad (8)$$

理想时不变的太赫兹反射回波信号可以表示为

$$y(t) = \sum_{m=1}^I g(\boldsymbol{\theta}, t) \rho_m \delta(t - \tau_m) + e(t). \quad (9)$$

对于实际的太赫兹反射信号, 在中层结构样品中, 由 DGMM 拟合每一个反射界面的回波, 则最终接收的太赫兹回波信号可以描述为有限数量的 DGMM 和噪声的总和, 其中每个 DGMM 都包含各自回波的色散特性。基于此, 具有时间脉冲扩展的太赫兹反射信号模型可以重建为

$$y(t) = \sum_{i=1}^P g(\boldsymbol{\theta}_i, t) + e(t), \quad (10)$$

式中: P 是样品的反射界面个数; $g(\boldsymbol{\theta}_i, t)$ 表示不同界面反射回波的 DGMM, 每个 DGMM 的时间脉冲扩展程度不同。对于每个 DGMM 的参数估计, 通过 Levenberg-Marquardt (L-M) 迭代算法^[40]完成。利用 L-M 迭代算法拟合太赫兹信号, 获得 DGMM 中包含色散信息的参数向量 $\boldsymbol{\theta}$, 其中与时间脉冲扩展有关的参数称为色散参数 $\boldsymbol{\xi} = [\alpha_1, \alpha_2, \tau]$, 其中 $\tau = |t_1 - t_2|$ 是两峰之间的时间间隔。构建色散字典的关键步骤是确定色散参数的波动范围。一般情况下, 随着太赫兹波在介质中传播距离的增加, 色散参数 $\boldsymbol{\xi}$ 也在增大。

经拟合后得到参考信号的参数向量 $\boldsymbol{\theta}_0$, 从太赫

兹反射信号得到各个回波的色散参数 $\Phi = [\theta_1, \theta_2, \dots, \theta_k]$, 分别取 $[\theta_0, \theta_1, \theta_2, \dots, \theta_k]$ 中最大和最小的色散参数 $\xi_{\max} = k_1 \times [\alpha_1, \alpha_2, \tau]_{\max}$ 和 $\xi_{\min} = k_2 \times [\alpha_1, \alpha_2, \tau]_{\min}$, 确定测试样品的色散参数范围, k_1 和 k_2 是考虑误差和噪声影响适当选取的常数, 用于调整区间范围, 经过实际数据模拟选取 $k_1=1.2$ 和 $k_2=0.8$ 。对参数估计区间 $[\xi_{\min}, \xi_{\max}]$ 以合适的步长 $[\Delta\alpha_1, \Delta\alpha_2, \Delta\tau]$ 进行均匀离散化, 相对应的参数分量数为 $[N_{\alpha_1}, N_{\alpha_2}, N_{\tau}]$, 字典中的原子总数为 $M = N_{\alpha_1} \times N_{\alpha_2} \times N_{\tau}$ 。在参考信号的 DGMM 中, 通过增加步长的方式改变时间脉冲宽度, 构建新的原子, 表达式为

$$x(t) = \beta_1 \exp\left[-\frac{(t-t_1-\tau_N)^2}{\alpha_{1_N}^2}\right] + \beta_2 \exp\left[-\frac{(t-t_2-\tau_N)^2}{\alpha_{2_N}^2}\right], \quad (11)$$

根据特普利茨矩阵的形式将新的原子构建成字典 $\mathbf{D} \in \mathbf{R}^{N \times M}$ ($M > N$), 当 $M \gg N$ 时, \mathbf{D} 为过完备字典。字典 \mathbf{D} 中的原子包含太赫兹信号的因色散导致的时间脉冲扩展信息, 因此称字典 \mathbf{D} 为色散字典。卷积字典 \mathbf{A} 的原子没有包含脉冲扩展信息, 因此称字典 \mathbf{A} 为非色散字典。其中 \mathbf{D} 中的原子数量应与 \mathbf{A} 中原子数量相等。双字典中部分原子如图 2 所示。

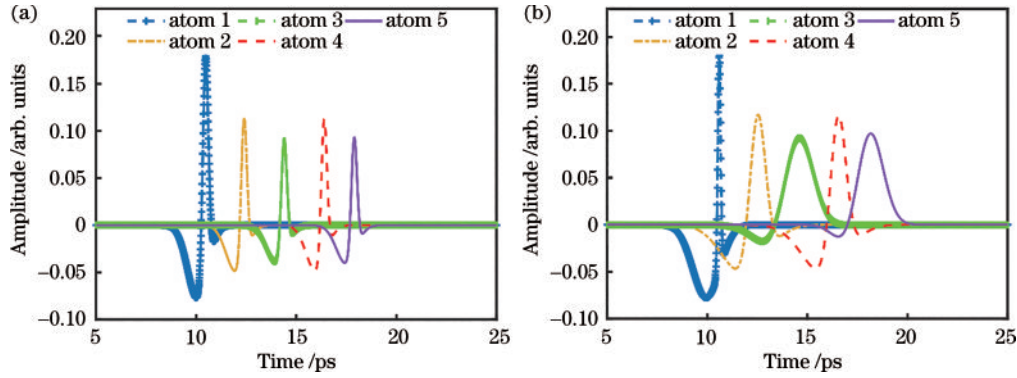


图 2 字典中的部分原子示意图。(a)非色散字典 \mathbf{A} 中的部分原子; (b)色散字典 \mathbf{D} 中的部分原子
Fig. 2 Schematic of some atoms in the dictionary. (a) Some atoms in non-dispersive dictionary \mathbf{A} ; (b) some atoms in dispersion dictionary \mathbf{D}

综上, 考虑到信号的脉冲扩展信息, 将太赫兹信号卷积模型表示为

$$\mathbf{Y} = \mathbf{D}\mathbf{h} + \mathbf{e}, \quad (12)$$

其对应的 LASSO 回归模型为

$$\hat{\mathbf{h}} = \arg \min_{\mathbf{h}} \|\mathbf{h}\|_1 \text{ s.t. } \|\mathbf{Y} - \mathbf{D}\mathbf{h}\|_2 \leq \sigma, \quad (13)$$

因此, 理想的太赫兹时域信号 $\hat{\mathbf{Y}}$ 可以重构为

$$\hat{\mathbf{Y}} = \mathbf{A}\hat{\mathbf{h}}, \quad (14)$$

在构建字典时, 理论上步长越小, 字典越大, 精度会越高, 但是小步长带来的是极复杂的计算, 应该选择合适的步长以平衡计算效率和精度。

2.4 幅值衰减系数

在复杂的太赫兹回波信号中, 由于噪声和色散的影响, 提取的脉冲响应函数的幅值并不准确, 这会严重影响重构信号的幅值进而影响成像图像的对比度和分辨率。本文利用太赫兹波反射模型推导理想状态下的峰值振幅, 在已知各介质层的光学常数后, 可以确定各个介质层反射界面峰值的衰减系数, 修正重构的太赫兹信号。太赫兹波反射模型如图 3 所示。

基底介质的第一次反射回波信号 $E_{\text{air}}(\omega)$ 和第二次反射回波信号 $E_{\text{sub}}(\omega)$ 与太赫兹发射信号 $E_{\text{ori}}(\omega)$ 之间的关系可以表示为

$$E_{\text{air}}(\omega) = E_{\text{ori}}(\omega) \gamma_{\text{ab}} P_{\text{air}}(\Delta l), \quad (15)$$

$$E_{\text{sub}}(\omega) = E_{\text{ori}}(\omega) t_{\text{ab}} P_{\text{sub}}(l) \gamma_{\text{ba}} P_{\text{sub}}(l) t_{\text{ba}}, \quad (16)$$

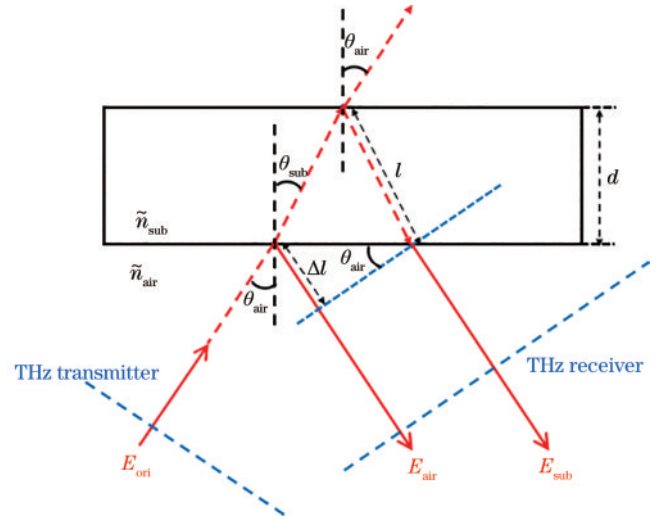


图 3 太赫兹波反射模型
Fig. 3 Terahertz wave reflection model

定义传递函数 $T(\omega)$,

$$T(\omega) = A(\omega) e^{-i\Phi(\omega)}, \quad (17)$$

令 $E_{\text{sub}}(\omega)$ 与 $E_{\text{air}}(\omega)$ 的光强比为

$$T(\omega) = \frac{E_{\text{sub}}(\omega)}{E_{\text{air}}(\omega)}, \quad (18)$$

式中: t_{ab} 和 t_{ba} 为透射系数; γ_{ab} 和 γ_{ba} 为反射系数; $P_{\text{air}}(\Delta l)$ 和 $P_{\text{sub}}(l)$ 为传输损耗因子。它们的公式分别为

$$t_{ab} = \frac{2\tilde{n} \cos \theta_{air}}{\tilde{n} \cos \theta_{air} + \tilde{n} \cos \theta_{sub}}, \quad (19)$$

$$\gamma_{ab} = \frac{\tilde{n} \cos \theta_{air} - \tilde{n} \cos \theta_{sub}}{\tilde{n} \cos \theta_{air} + \tilde{n} \cos \theta_{sub}}, \quad (20)$$

$$P_{air}(\Delta l) = \exp\left(-i \frac{\omega}{c} n_{air} \Delta l\right), \quad (21)$$

$$P_{sub}(l) = \exp\left(-i \frac{\omega}{c} \tilde{n} l\right), \quad (22)$$

$$l = \frac{d}{\cos \theta_{sub}}, \quad (23)$$

$$\Delta l = 2l \sin \theta_{sub} \sin \theta_{air}, \quad (24)$$

进行化简, 可得

$$A(\omega) = -\frac{4\sin\theta_{air} \sin\theta_{sub} \cos\theta_{air} \cos\theta_{sub}}{\sin^2(\theta_{air} + \theta_{sub})} \times \exp\left(-\frac{4\pi\omega l \kappa}{c}\right), \quad (25)$$

$$\Phi(\omega) = \frac{2\pi\omega}{c} (n_{sub} 2l - n_{air} \Delta l), \quad (26)$$

式中: $A(\omega)$ 代表 $E_{sub}(\omega)$ 对于 $E_{air}(\omega)$ 的幅值比; $\Phi(\omega)$ 代表 $E_{sub}(\omega)$ 对于 $E_{air}(\omega)$ 的相位比。所以以 $E_{air}(\omega)$ 为参考, 那么经过介质之后的光强幅值的衰减系数为 $\mu = \text{IFFT}[A(\omega)]$, 可得修正之后的重构信号为

$$\hat{Y} = A\mu\hat{h}. \quad (27)$$

综上, 只需确定多层结构样品中各层材料的光学常数, 可以得到准确的幅值衰减系数, 即可对重构信号进行幅值修正。

3 数值模拟

基于典型的单层和多层结构的反射信号进行数值模拟, 使用参数向量 $\theta = [1.5, 33.5667, 0.2, -0.5, 33.3333, 0.7]$ 的 DGMM 构建参考信号, 如图 4 所示。

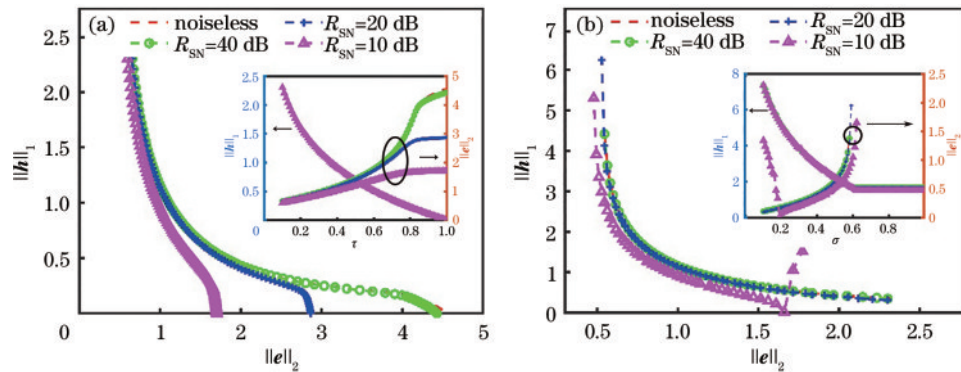


图 5 不同噪声水平下的正则化问题的 L 曲线及其取值。(a) LASSO 问题; (b) BPDN 问题

Fig. 5 L-curve diagrams and their values for regularization problems under different noise levels. (a) LASSO; (b) BPDN

其次, 使用 LASSO 算法对非重叠回波信号的脉冲响应函数进行重构并与 BPDN 和 FWDD 算法重构的脉冲响应函数进行对比。从图 6 可以观察到 3 种方

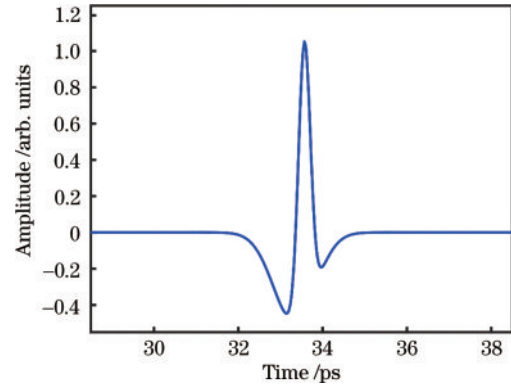


图 4 DGMM 生成的采样周期为 0.0333 ps 的 3000 个数据点的太赫兹参考信号

Fig. 4 THz reference signal generated by DGMM for 3000 data points with a sampling period of 0.0333 ps

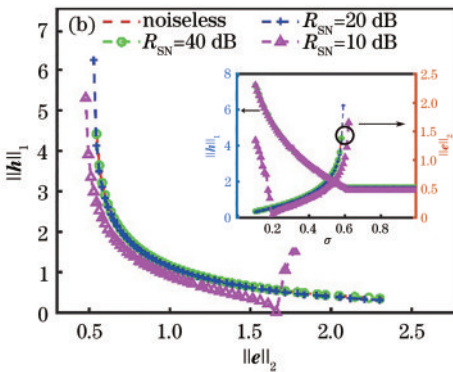
3.1 单层结构信号的稀疏重构

1) 根据稀疏性假设, 对于单层结构, 预设与太赫兹参考信号具有相同采样周期和数据点数的简单且理想的脉冲响应函数 $h_1[n]$ 为

$$h_1[n] = \begin{cases} 0.5, & n = 500 \\ 0.35, & n = 520, \\ 0, & \text{others} \end{cases} \quad (28)$$

式中: $h_1[500]$ 和 $h_1[520]$ 对应着该结构的上下表面的峰值, 两个峰值之间的时间间隔对应厚度的飞行时间。太赫兹回波信号可以通过参考信号与脉冲响应函数的卷积获得, 此时信号为非重叠回波信号。对于薄厚度的单层结构物体, 通常忽略其色散影响, 脉冲响应函数的重构可以看作是一个由式(6)表示的稀疏优化问题。

首先, 使用 L 曲线法确定正则化参数的取值, LASSO 和 BPDN 算法在不同噪声水平 (R_{SN}) 下的正则化参数取值如图 5 所示, 正则化参数的最优解通常位于解和残差的 L 曲线的拐点附近, 然后使用试差法来确定最优的正则化参数。



法都能够重建带有不同高斯噪声的预设脉冲响应函数, 重建的解与预设的尖峰位置很好地吻合, 其中尖峰的位置对应的是单层结构的上下反射面, 两尖峰的时

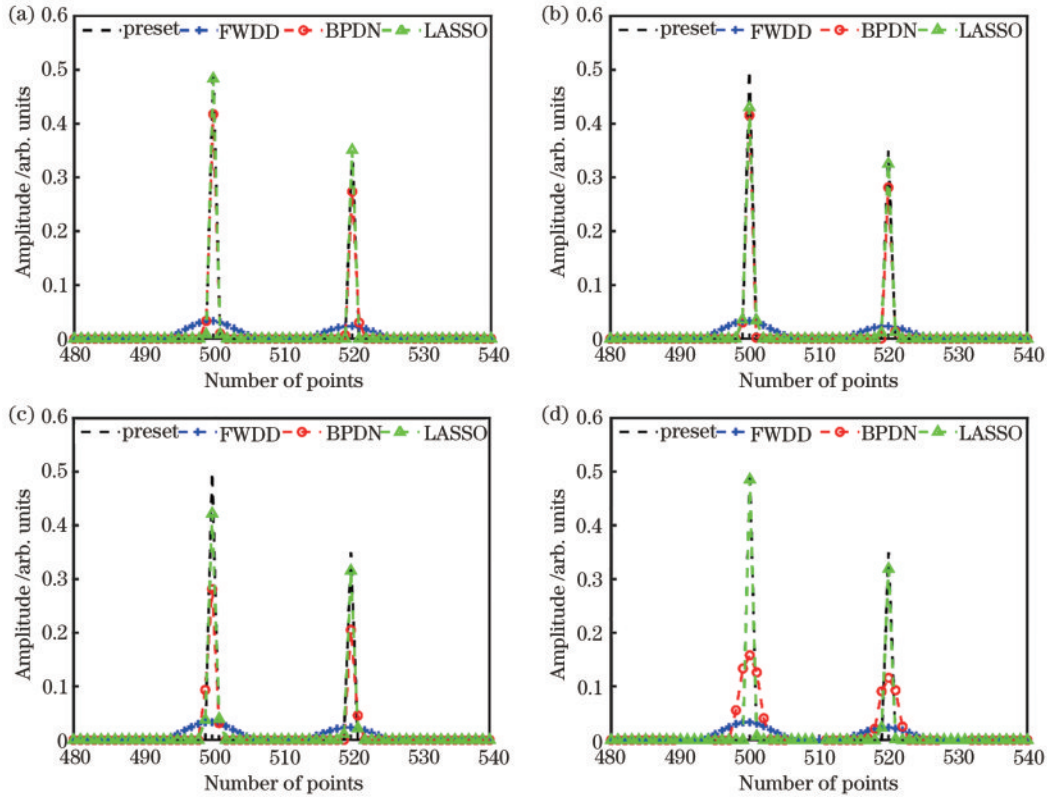


图 6 3 种方法对不重叠回波信号的脉冲响应函数重建结果。(a) 无噪声情况;(b) $R_{SN}=40$ dB 情况;(c) $R_{SN}=20$ dB 情况;(d) $R_{SN}=10$ dB 情况

Fig. 6 Reconstruction results of pulse response function for non overlapping echo signals using three methods. (a) Absence of noise; (b) $R_{SN}=40$ dB; (c) $R_{SN}=20$ dB; (d) $R_{SN}=10$ dB

间间隔为太赫兹信号在单层结构中的飞行时间。然而,对比 BPDN 和 FWDD, LASSO 算法重建的脉冲响应函数更加稀疏且尖峰更窄,与预设函数更加接近。尤其是随着噪声水平的不断增加,其稀疏度几乎没有变化,表明 LASSO 算法对噪声的耐受程度明显强于 BPDN。

2) 为了评估重叠回波的单层结构的稀疏表示方法的有效性,预设具有相同采样周期和数据点数的简单且理想的脉冲响应函数 $h_2[n]$ 为

$$h_2[n] = \begin{cases} 0.5, & n = 500 \\ 0.35, & n = 505 \\ 0, & \text{others} \end{cases} \quad (29)$$

由图 7 可知, LASSO 算法能够在不同的噪声水平下准确地重建脉冲响应函数,且受噪声的干扰较小。BPDN 在低噪声水平下可以完成对脉冲响应函数的重建,但在高噪声水平下不能准确地重建脉冲响应函数。FWDD 在任何噪声水平下都不能准确地重建脉冲响应函数。由此可以得出结论,对于单层结构产生的双回波信号,基于 LASSO 的稀疏表示方法对脉冲响应函数的重建效果要强于 BPDN 和 FWDD。

为了进一步研究基于 LASSO 的稀疏表示方法对小时间间隔单层结构的时间分辨性能的优势,进行了一系列数值实验,如图 8 所示,可以清楚地观察到基于 LASSO 的稀疏表示方法可分辨的最小时间间隔优于 BPDN 和 FWDD,这进一步揭示了基于 LASSO 的稀疏表示方法拥有良好的小时间间隔分辨率。

3.2 多层结构信号的稀疏重构

基于表 1 所示的参数向量 θ 模拟太赫兹时间脉冲,扩展构建具有重叠回波的太赫兹反射信号,如图 9 所示,可以观察到由于脉冲扩展的影响,第 3 次和第 4 次回波信号无法直接区分,此时脉冲响应函数的重构可以看作是一个由式 (13) 表示的稀疏优化问题。

重构结果如图 10 所示,虽然 LASSO 和 BPDN 算法都能有效地重建脉冲响应函数,但是 LASSO 算法重建的脉冲响应函数对飞行时间的定位精度优于 BPDN。FWDD 能够有效地重建信号不重叠部分的脉冲响应函数,但在重叠的部分不能获得具有区分效果的尖峰。因此,从数值分析来看,基于 LASSO 的稀疏表示方法在对单层结构和多层结构的脉冲响应函数的稀疏重构和飞行时间定位精度方面优于 FWDD 和 BPDN。

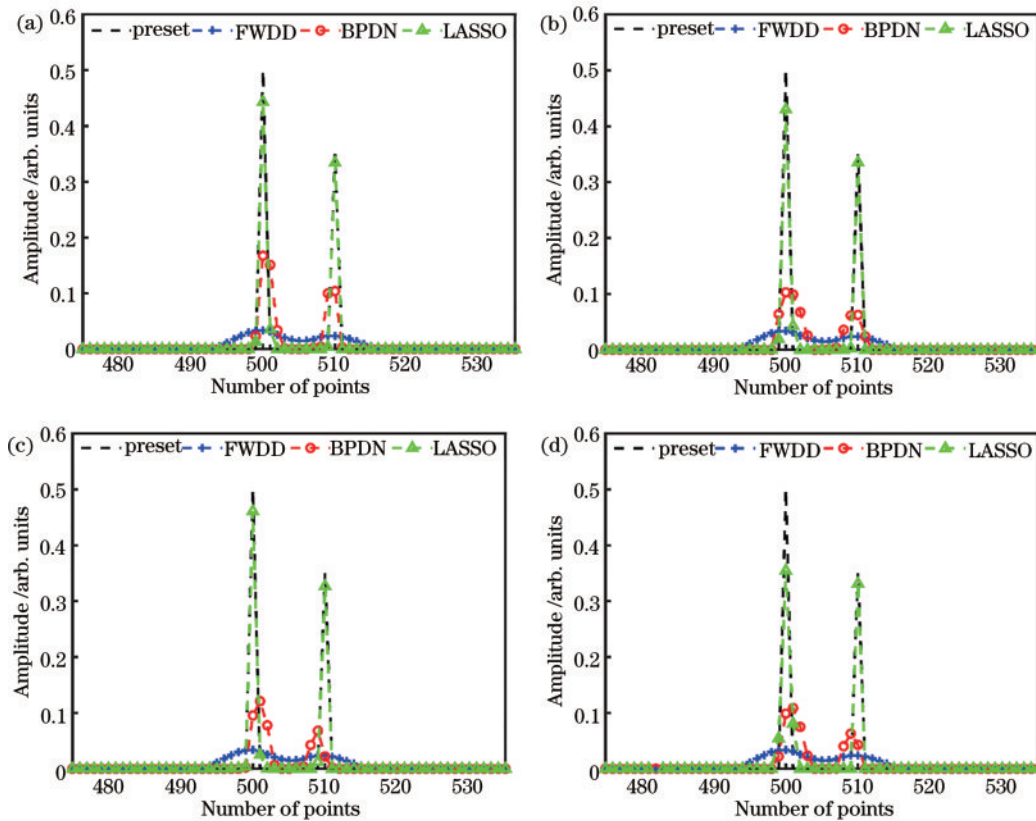


图 7 3 种方法对重叠回波信号的脉冲响应函数重建结果。(a) 无噪声情况；(b) $R_{SN}=40$ dB 情况；(c) $R_{SN}=20$ dB 情况；(d) $R_{SN}=10$ dB 情况

Fig. 7 Reconstruction results of pulse response function for overlapping echo signals using three methods. (a) Absence of noise; (b) $R_{SN}=40$ dB; (c) $R_{SN}=20$ dB; (d) $R_{SN}=10$ dB

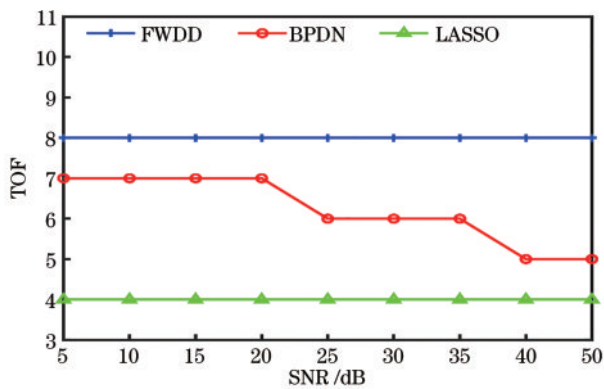


图 8 不同算法可分辨的最小 TOF 随噪声水平的变化

Fig. 8 Variation of the minimum TOF with noise level distinguishable by different algorithms

表 1 太赫兹信号中不同回波的 DGMM 预设值

Table 1 DGMM preset values for different echoes in THz signals

Signal	β_1	t_1	α_1	β_2	t_2	α_2
Echo1	1.5	10.45	0.2	-0.5	10	0.7
Echo2	0.9	13.7	0.3	-0.375	13.1	0.9
Echo3	0.6	15.55	0.5	-0.25	14.9	1.1
Echo4	0.3	18.2	0.8	-0.125	17.2	1.4

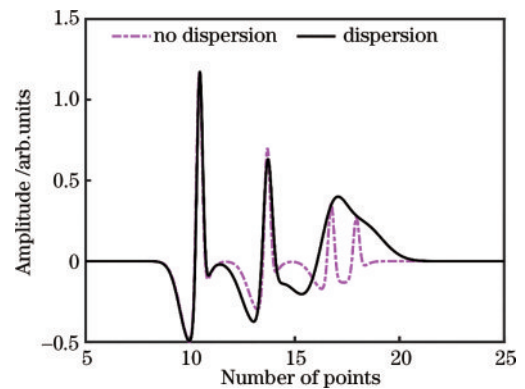


图 9 色散对太赫兹反射回波信号的影响

Fig. 9 Effect of dispersion on the reflected THz echo signal

4 样本和实验

实验中所用装置为德国 Menlo Systems GmbH 公司提供的型号为 Tera K15 的 THz-TDS 系统。该系统通过激发全光纤耦合光电导天线,产生高稳定性的太赫兹时域光谱,光谱范围为 0.1~5 THz,太赫兹频率分辨率小于 1.2 GHz,中心波长为 780 nm,扫描范围大于 850 ps,动态范围大于 95 dB,入射角为 30°。整个

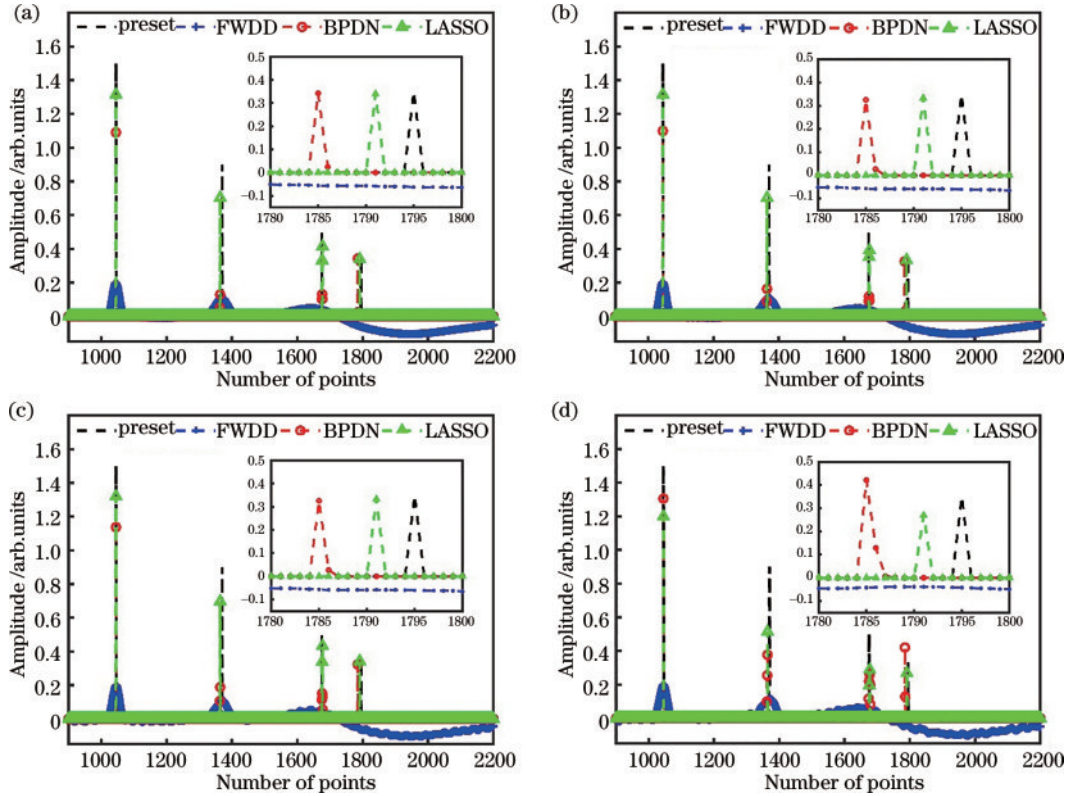


图 10 3 种方法的重建结果与预设值的对比。(a) 无噪声情况;(b) $R_{SN}=40$ dB 情况;(c) $R_{SN}=20$ dB 情况;(d) $R_{SN}=10$ dB 情况
 Fig. 10 Comparison between the reconstruction results of three methods and the preset value. (a) Absence of noise;
 (b) $R_{SN}=40$ dB; (c) $R_{SN}=20$ dB; (d) $R_{SN}=10$ dB

THz-TDS 系统搭建在光学平台上,并封装进四面为亚克力板的透明箱体中。通过加装步进电机和位移台可以实现扫描成像,部分实验装置和数据采集界面如

图 11 所示。在进行实验检测前,通过向箱体中充入干燥空气,将太赫兹检测空间湿度降低至 3% 以下,环境温度控制在 21~23 °C。

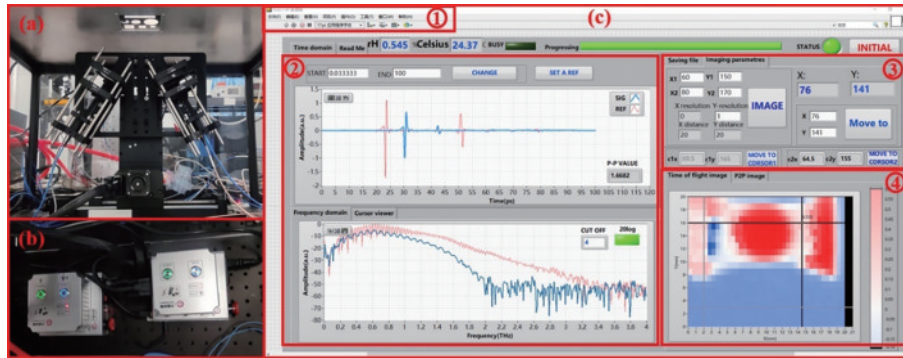


图 11 THz-TDS 系统。(a) 太赫兹系统和样品放置窗口;(b) 位移台开关;(c) LabVIEW 软件编写的控制数据采集、显示与储存的软件程序的显示界面,第 1 部分为系统初始化、开始/停止运行与数据存储等相关控制按钮,第 2 部分为光谱范围设置与显示,第 3 部分为控制位移台进行移位或成像扫描的操作,第 4 部分为扫描结果显示
 Fig. 11 THz-TDS system. (a) Physical image of the THz system and sample placement window; (b) switch for displacement table; (c) display interface of the software program for controlling data collection, display, and storage written through LabVIEW, the first part includes control buttons related to system initialization, start/stop operation, and data storage, the second part is about setting and displaying the spectral range, the third part is to control the displacement table for displacement or imaging scanning, the fourth part is the display of scanning results

4.1 单层结构的层厚检测

对 3 种不同厚度的聚四氟乙烯 (PTFE) 薄膜进行厚度检测。将镀金反射镜得到的太赫兹脉冲信号作为

本次实验的参考信号。样品的太赫兹时域光谱图以及重构的脉冲响应函数曲线如图 12 所示。从图 12(a) 可知,不同样品的两个相邻界面的太赫兹回波之间的重

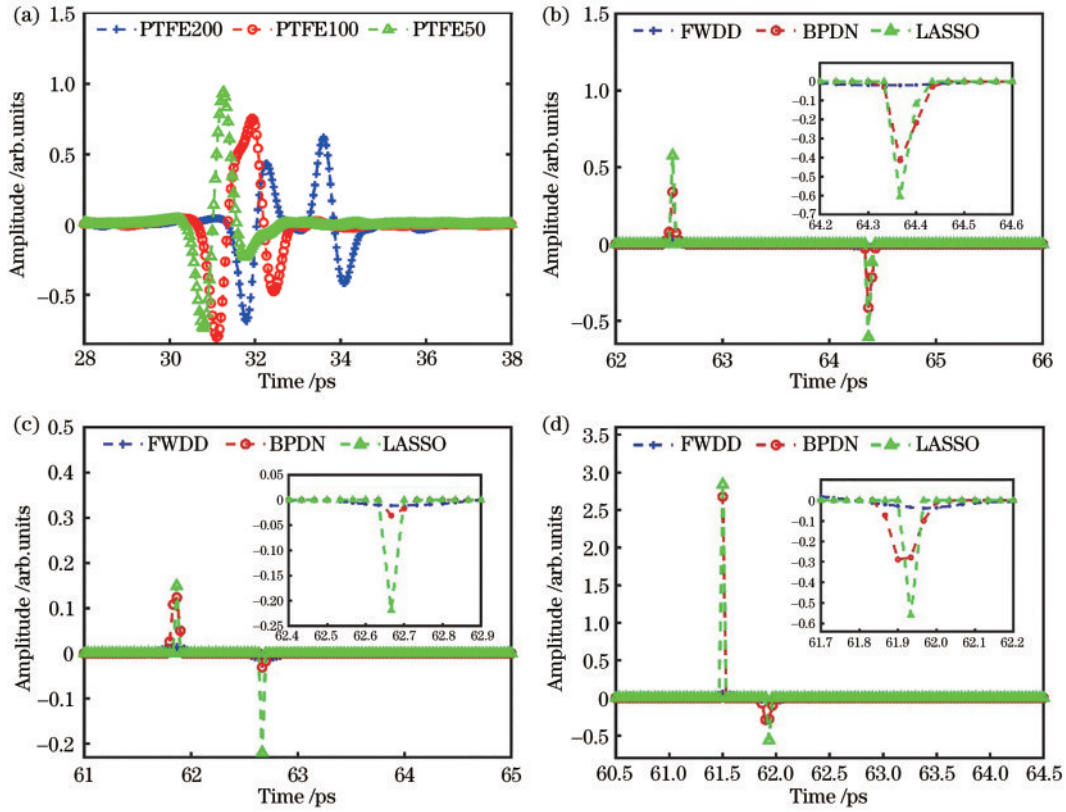


图 12 实验光谱图以及 3 种算法重构的脉冲响应函数。(a) 不同厚度 PTFE 薄膜的太赫兹时域光谱;(b)PTFE200;(c) PTFE100;(d) PTFE50

Fig. 12 Experimental spectrograms and pulse response functions reconstructed using three algorithms. (a) THz time-domain spectra of PTFE films with different thicknesses; (b) PTFE200; (c) PTFE100; (d) PTFE50

叠随着层厚的减小而逐渐加剧,从而难以识别反射界面信息。PTFE200、PTFE100、PTFE50 分别表示厚度为 200、100、50 μm 的 PTFE 薄膜,重建的脉冲响应函数如图 12(b)~(d)所示,经观察,基于 LASSO 的稀疏表示方法提取的脉冲响应函数稀疏度更高、脉冲宽度更窄,能够有效地区分样品界面。

为了定量评估所提方法的性能,根据重建的脉冲响应函数中相邻尖峰之间的飞行时间和折射率,计算

被测薄膜的厚度,表达式为

$$d = \frac{c\Delta t}{2n_{\text{sub}} \cos \theta_{\text{sub}}}, \quad (30)$$

式中: c 为真空中的光速; n 为 PTFE 的折射率,为 1.45; Δt 表示两个尖峰之间的飞行时间。

获得的飞行时间如表 2 所示。计算厚度与真实厚度及误差如表 3 所示。结果可知,在单层薄膜的层厚估算中,所提方法在厚度较薄的情况下,计算厚度比

表 2 3 种算法对不同厚度 PTFE 薄膜的飞行时间的定位

Table 2 Localization of TOF of PTFE films with different thicknesses by three algorithms

unit: ps

Method	PTFE200			PTFE100			PTFE50		
	t_1	t_2	Δt	t_1	t_2	Δt	t_1	t_2	Δt
FWDD	62.5333	64.3667	1.8333	61.8667	62.6667	0.8	61.5	61.9667	0.4667
BPDN	62.5333	64.3667	1.8333	61.8667	62.6667	0.8	61.5	61.9	0.4
LASSO	62.5333	64.3667	1.8333	61.8667	62.6667	0.8	61.5	61.9333	0.4333

表 3 3 组 PTFE 薄膜的实际厚度与不同算法求出的厚度

Table 3 Actual thickness of three sets of PTFE films and detected thicknesses obtained by different algorithms respectively unit: μm

Method	PTFE200	Error	PTFE100	Error	PTFE50	Error
Actual value	200		100		50	
FWDD	208.4	4.2%	94.8	5.2%	53.1	6.2%
BPDN	208.4	4.2%	94.8	5.2%	45.5	9.0%
LASSO	208.4	4.2%	94.8	5.2%	49.3	1.4%

FWDD和BPDN的结果更加接近真实厚度。

4.2 多层结构目标层的层厚检测

使用玻璃纤维布的预浸料与环氧树脂堆叠而成的玻璃纤维增强复合材料(GFRP)、聚氯乙烯(PVC)、PTFE薄膜构建5层结构的GFRP模型,其中PTFE薄膜的厚度分别为200、100、50 μm 。部分实物图与检测原理如图13所示。经Butterworth带通滤波器预处理后的时域光谱及重建的脉冲响应函数如图14所示,其中,GFRP1、GFRP2、GFRP3分别对应目标层厚度为200、100、50 μm 。

经观察,所提方法重建的脉冲响应函数具有更高的稀疏度。获得的飞行时间如表4所示。计算厚度与真实厚度及误差如表5所示。传统的FWDD方法对具有严重回波重叠的太赫兹色散信号几乎失去了对脉冲响应函数重构的能力。BPDN算法在目标检测层厚度为100、50 μm 时也不能重构有效的脉冲响应函数。综上结果可知,在多层结构的目标层层厚的估算中,所提方法的计算结果比FWDD和BPDN的结果更加接

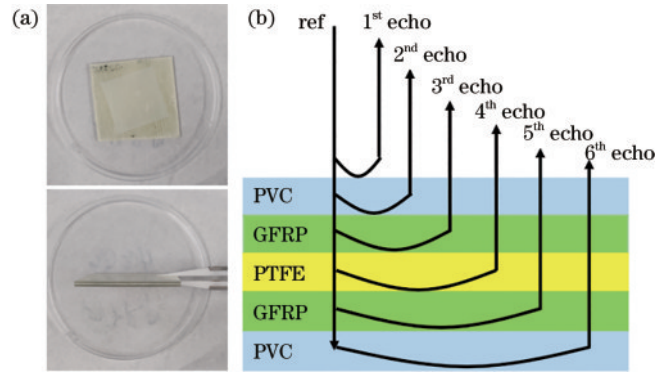


图13 GFRP模型的实物图及太赫兹检测原理示意图。

(a) 实物图;(b) 检测原理示意图

Fig. 13 Physical diagram of GFRP model and schematic of THz detection principle. (a) Physical image; (b) schematic of detection principle

近实际厚度,而且随着目标层厚度的减小,所提方法重建的脉冲响应函数的优势更加明显,具有重要的实践意义。

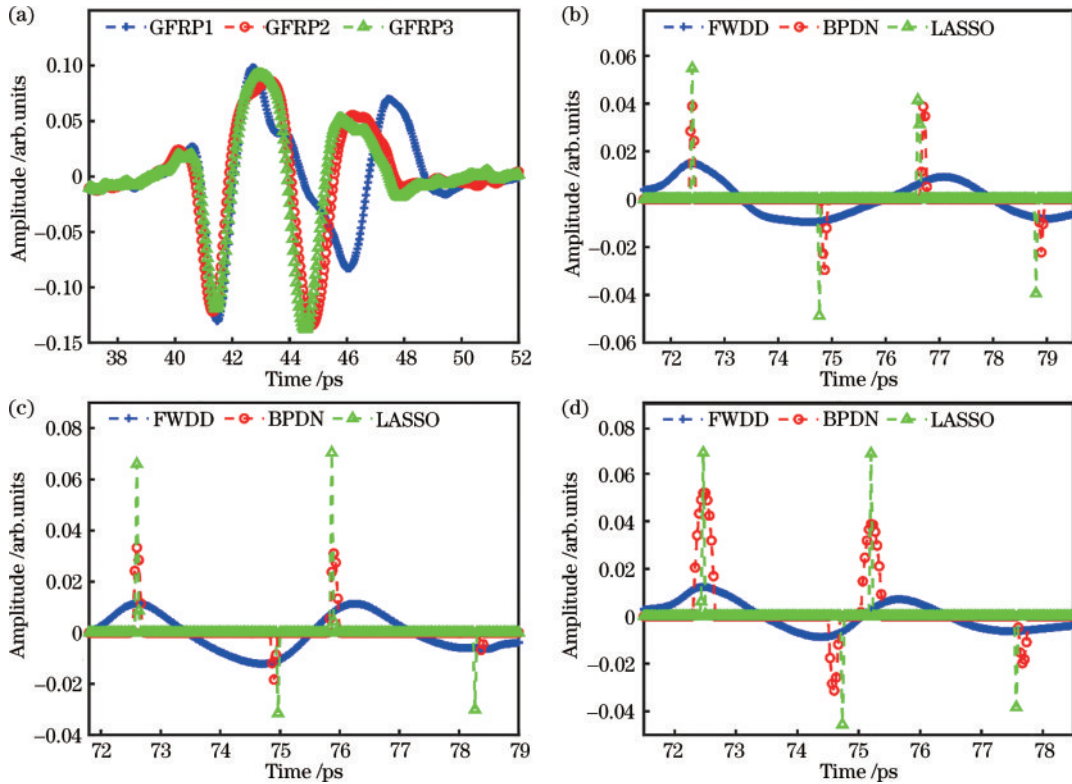


图14 实验光谱图以及3种算法重构的脉冲响应函数。(a) 三组模型的太赫兹时域光谱;(b)GFRP1;(c) GFRP2;(d) GFRP3

Fig. 14 Experimental spectrograms and pulse response functions reconstructed using three algorithms. (a) THz time-domain spectrograms of three sets of models; (b) GFRP1; (c) GFRP2; (d) GFRP3

4.3 多层结构模型的缺陷检测成像

使用PVC与GFRP构建6层结构的复合材料模型,在第3和第4层中间加入200 $\mu\text{m} \times 5 \text{ mm} \times 5 \text{ mm}$ 大小的PTFE薄膜作为夹杂缺陷。该模型的实物图、检测原理、缺陷位置和成像区域如图15所示。对该模型进行太赫兹反射成像,受聚焦光斑大小限制,实验所用

装置在x和y方向的最小分辨率约500 μm ,以500 μm 的步长扫描20 mm \times 20 mm的矩形成像区域,采集1600个数据点的信号,用时约15 min。

在太赫兹时域光谱中通过时域峰-峰值成像获得的40 \times 40个像素的无损检测图像实质上是由各个采样点的太赫兹信号某部分峰值信息构成的。在未处理

表 4 3 种算法对检测层 PTFE 薄膜的飞行时间的定位

Table 4 Localization of TOF of PTFE thin film in detection layer by three algorithms

unit: ps

Method	GFRP1			GFRP2			GFRP3		
	t_1	t_2	Δt	t_1	t_2	Δt	t_1	t_2	Δt
FWDD	74.5333	77.1	2.5667	74.7333	76.2333	1.5	74.3667	75.6667	1.3
BPDN	74.8667	76.7	1.8333	74.9	75.9	1.0	74.6	75.2	0.6
LASSO	74.7667	76.6	1.8333	74.9667	75.8667	0.9	74.7333	75.2	0.4667

表 5 3 组 GFRP 模型的实际厚度与不同算法分别求出的厚度

Table 5 Actual thickness of three sets of GFRP models and detected thicknesses obtained by different algorithms respectively unit: μm

Method	GFRP1	Error	GFRP2	Error	GFRP3	Error
Actual value	200		100		50	
FWDD	291.8	45.9%	170.5	70.5%	147.8	195.6%
BPDN	208.4	4.2%	113.7	13.7%	68.2	60.4%
LASSO	208.4	4.2%	102.3	2.3%	53.1	6.2%

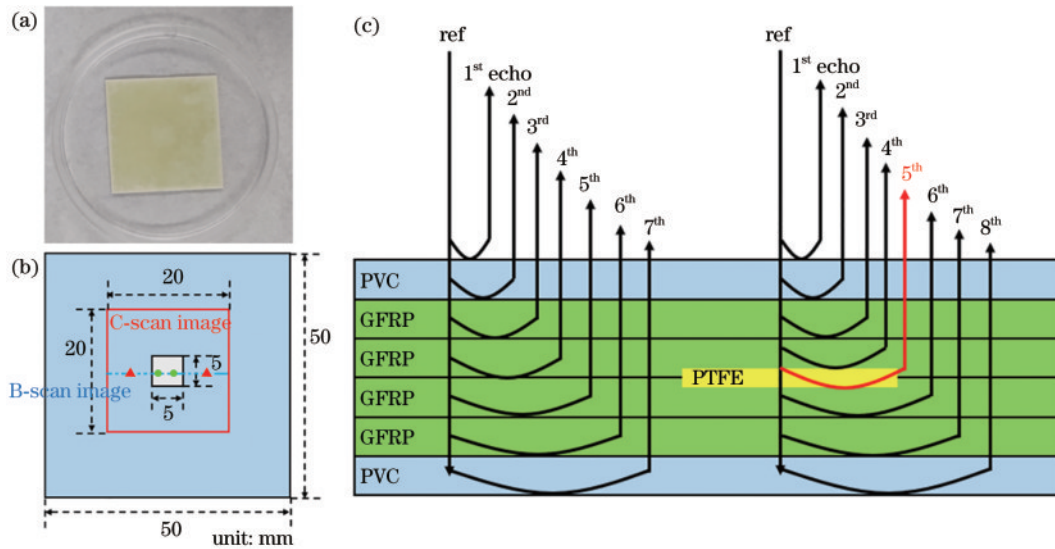


图 15 复合材料模型实物图、成像区域示意图及太赫兹检测原理图。(a) 实物图；(b) 成像区域示意图，三角点表示无缺陷区域的随机采样点，圆点表示缺陷区域的随机采样点；(c) 太赫兹检测原理

Fig. 15 Physical image of composite material model, schematic of imaging area, and diagram of terahertz detection principle.

(a) Physical image; (b) schematic of the imaging area, triangulation dots represent random sampling points in defect-free areas, round dots represent random sampling points in the defect area; (c) schematic of terahertz detection

的信号中,由于多重回波的干扰,缺陷层信号峰与正常背景层信号峰重叠,成像的图像质量不高甚至缺陷层得不到区分,因此使用基于 LASSO 的稀疏表示方法对太赫兹色散信号进行补偿,重建理想的太赫兹信号,并经衰减系数修正之后进行时域峰-峰值成像。

基于上述分析,对图 15(b)所示虚线上的所有太赫兹信号进行 B-scan 成像,结果如图 16 所示。未处理之前的信号缺陷区域和无缺陷区域对比不明显,而且信号的脉冲扩展导致各个反射介质层界面区分不明显,从处理之后的信号可以清晰地观察到缺陷层且脉冲扩展得到补偿,使得各个反射界面区分明显。

利用缺陷信号 38.5~39.6 ps 区间的 1600 个像素点通过时域峰-峰值进行 C-scan 成像,成像结果如图 17 所示。可以观察到经所提算法进行太赫兹信号色散补

偿之后的信号质量明显更好,具体表现在:两个缺陷点的信号基本一致,两个无缺陷点的信号也基本一致;缺陷处对比无缺陷点的信号峰的幅值和相位差异较稳定,两者能够被明显区分。可以清楚地观察到,处理之前的原始图像缺陷区域与无缺陷区域对比不明显且缺陷边界模糊,而经幅值衰减系数修正之后的如图 17(d)所示的缺陷成像更加清晰且接近预制缺陷大小。

为了客观地评价上述图像的成像质量,借助 Weber 对比度法进行评价,公式^[41]表示为

$$C_w = \frac{|L_d - L_b|}{|L_b|}, \quad (31)$$

式中: L_d 代表图像预制缺陷区域的平均亮度; L_b 代表图像无缺陷区域的平均亮度。 C_w 的值越大,缺陷区域与无缺陷区域二者的视觉对比效果就越好,结果如表 6 所示。

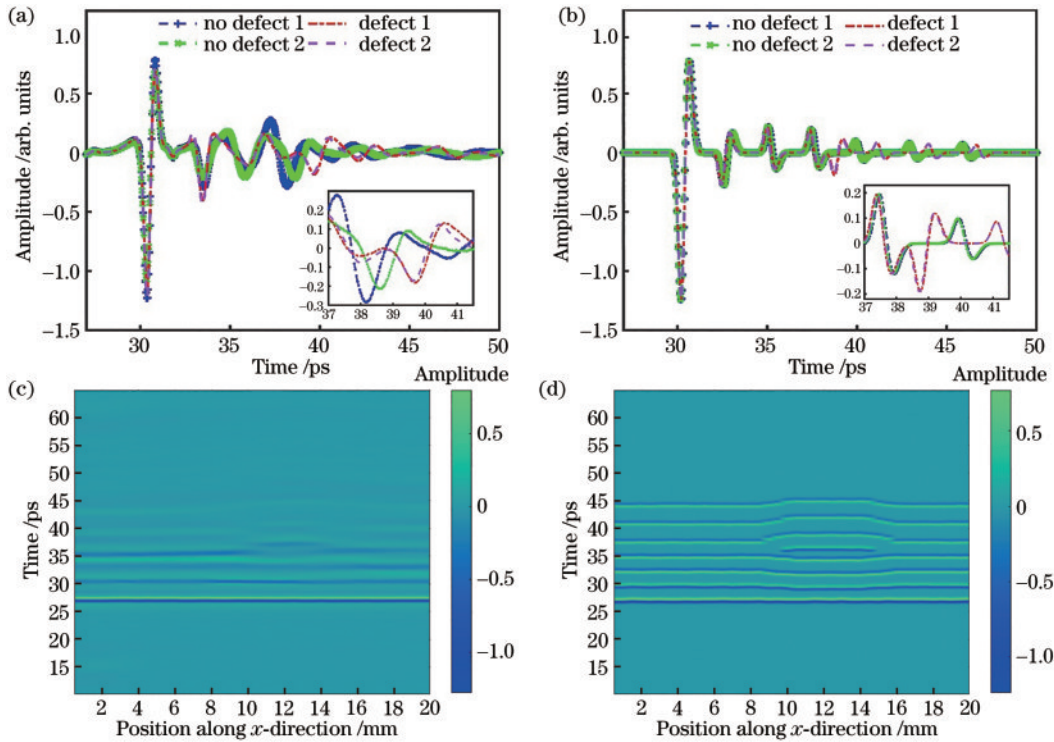


图 16 两组采样点处理前后的原始数据图和模型的 B-scan 成像图。(a)处理前的太赫兹时域光谱图;(b)处理后的太赫兹时域光谱图;(c)处理前的 B-scan 成像图;(d)处理后的 B-scan 成像图

Fig. 16 Original data graph and B-scan imaging graph of the model before and after processing for two groups of sampling points. (a) Terahertz time-domain spectrogram before processing; (b) terahertz time-domain spectrogram after processing; (c) B-scan imaging image before processing; (d) B-scan imaging image after processing

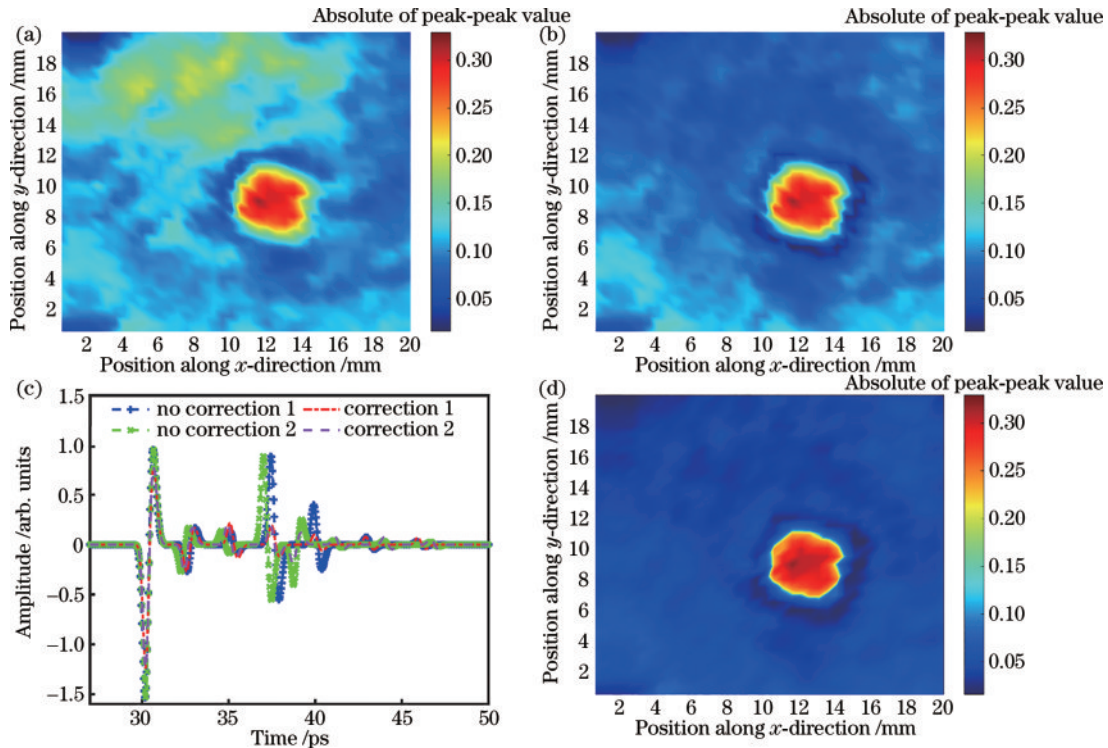


图 17 夹杂缺陷的 GFRP 样件处理前后的成像伪彩图像。(a)原始成像结果;(b)未经幅值修正的成像结果;(c)缺陷区域采样点幅值修正前后的太赫兹时域光谱图;(d)幅值修正后的成像结果

Fig. 17 Imaging pseudo color images of GFRP samples with mixed defects before and after processing. (a) Original imaging result; (b) imaging result without amplitude correction; (c) terahertz time-domain spectrogram before and after correcting the amplitude of sampling points in the defect area; (d) imaging result after amplitude correction

表 6 图像的韦伯对比度

Table 6 Weber contrast of images

Parameter	Fig. 16 (a)	Fig. 16 (b)	Fig. 16 (d)
C_w	0.1021	0.6756	0.8985

综上所述,实验分别基于视觉效果和韦伯对比度的方法评价处理前后太赫兹无损检测缺陷成像质量,结果表明经过幅值衰减系数修正之后的太赫兹色散补偿信号的 C-scan 成像图像缺陷区域效果更清晰,与无缺陷区域的对比度更好。

5 结 论

采用了基于太赫兹信号稀疏先验的稀疏表示方法,对 LASSO 算法进行改良实现了对单层和多层结构的复杂太赫兹回波信号飞行时间的精确定位。通过数值仿真和实验分析,验证了基于 LASSO 的稀疏表示方法在不同情况下的有效性和鲁棒性。与太赫兹无损检测中的经典方法 FWDD 和同样为稀疏表示方法的 BPDN 算法相比,基于 LASSO 的稀疏表示方法拥有更好的飞行时间定位精度,同时重建的脉冲响应函数具备稀疏性和对加性噪声不敏感的特性。此外,利用推导的幅值衰减系数对色散补偿后的重构信号进行幅值修正,能够有效地避免重建信号失真,且能够明显提高时域峰-峰值缺陷成像的质量。综上所述,所提基于 LASSO 的稀疏表示方法为太赫兹信号的处理提供一种新的技术和思路,为多层结构模型的太赫兹无损检测的广泛应用奠定了基础。

参 考 文 献

- [1] Zhang G M, Zhang C Z, Harvey D M. Sparse signal representation and its applications in ultrasonic NDE[J]. *Ultrasonics*, 2012, 52(3): 351-363.
- [2] Zolfaghari A, Zolfaghari A, Kolahan F. Reliability and sensitivity of magnetic particle nondestructive testing in detecting the surface cracks of welded components[J]. *Nondestructive Testing and Evaluation*, 2018, 33(3): 290-300.
- [3] Delenkovskii N V, Gnusin A B. Vacuum intensification of filling defects with penetrants under liquid-penetrant testing[J]. *Russian Journal of Nondestructive Testing*, 2019, 55(1): 68-72.
- [4] Gao P, Wang C, Li Y, et al. Electromagnetic and eddy current NDT in weld inspection: a review[J]. *Insight-Non-Destructive Testing and Condition Monitoring*, 2015, 57(6): 337-345.
- [5] Safian R, Ghazi G, Mohammadian N. Review of photomixing continuous-wave terahertz systems and current application trends in terahertz domain[J]. *Optical Engineering*, 2019, 58(11): 110901.
- [6] Xing L Y, Cui H L, Shi C C, et al. Nondestructive examination of polymethacrylimide composite structures with terahertz time-domain spectroscopy[J]. *Polymer Testing*, 2017, 57: 141-148.
- [7] Xing L Y, Cui H L, Shi C C, et al. Void and crack detection of polymethacrylimide foams based on terahertz time-domain spectroscopic imaging[J]. *Journal of Sandwich Structures & Materials*, 2017, 19(3): 348-363.
- [8] Ye D D, Wang W Z, Huang J B, et al. Nondestructive interface morphology characterization of thermal barrier coatings using terahertz time-domain spectroscopy[J]. *Coatings*, 2019, 9(2): 89.
- [9] Tu W L, Zhong S C, Shen Y C, et al. Nondestructive testing of marine protective coatings using terahertz waves with stationary wavelet transform[J]. *Ocean Engineering*, 2016, 111: 582-592.
- [10] Lu X X, Shen Y, Xu T, et al. Accurate detection of porosity in glass fiber reinforced polymers by terahertz spectroscopy[J]. *Composites Part B: Engineering*, 2022, 242: 110058.
- [11] Wang J, Zhang J, Chang T Y, et al. Terahertz nondestructive imaging for foreign object detection in glass fibre-reinforced polymer composite panels[J]. *Infrared Physics & Technology*, 2019, 98: 36-44.
- [12] Cheng L, Wang L, Mei H, et al. Research of nondestructive methods to test defects hidden within composite insulators based on THz time-domain spectroscopy technology[J]. *IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation*, 2016, 23(4): 2126-2133.
- [13] Han D H, Kang L H. Nondestructive evaluation of GFRP composite including multi-delamination using THz spectroscopy and imaging[J]. *Composite Structures*, 2018, 185: 161-175.
- [14] Zhang J, Shi C C, Ma Y T, et al. Spectroscopic study of terahertz reflection and transmission properties of carbon-fiber-reinforced plastic composites[J]. *Optical Engineering*, 2015, 54(5): 054106.
- [15] Ospald F, Zouaghi W, Beigang R E, et al. Aeronautics composite material inspection with a terahertz time-domain spectroscopy system[J]. *Optical Engineering*, 2013, 53(3): 031208.
- [16] Wang Q, Li X Y, Chang T Y, et al. Nondestructive imaging of hidden defects in aircraft sandwich composites using terahertz time-domain spectroscopy[J]. *Infrared Physics & Technology*, 2019, 97: 326-340.
- [17] Chen C C, Lee D J, Pollock T, et al. Pulsed-terahertz reflectometry for health monitoring of ceramic thermal barrier coatings[J]. *Optics Express*, 2010, 18(4): 3477-3486.
- [18] Zhang D D, Ren J J, Gu J, et al. Nondestructive testing of bonding defects in multilayered ceramic matrix composites using THz time domain spectroscopy and imaging[J]. *Composite Structures*, 2020, 251: 112624.
- [19] Palka N, Krimi S, Ospald F, et al. Precise determination of thicknesses of multilayer polyethylene composite materials by terahertz time-domain spectroscopy [J]. *Journal of Infrared, Millimeter, and Terahertz Waves*, 2015, 36(6): 578-596.
- [20] Lee I S, Lee J W. Nondestructive internal defect detection using a CW-THz imaging system in XLPE for power cable insulation[J]. *Applied Sciences*, 2020, 10(6): 2055.

- [21] Yin X H, Mo W, Wang Q A, et al. A terahertz spectroscopy nondestructive identification method for rubber based on CS-SVM[J]. *Advances in Condensed Matter Physics*, 2018, 2018: 1-8.
- [22] Fletcher J R, Swift G P, Dai D C, et al. Pulsed terahertz signal reconstruction[J]. *Journal of Applied Physics*, 2007, 102(11): 113105.
- [23] Dong J L, Locquet A, Citrin D S. Terahertz quantitative nondestructive evaluation of failure modes in polymer-coated steel[J]. *IEEE Journal of Selected Topics in Quantum Electronics*, 2017, 23(4): 8400207.
- [24] Dong J L, Jackson J B, Melis M, et al. Terahertz frequency-wavelet domain deconvolution for stratigraphic and subsurface investigation of art painting[J]. *Optics Express*, 2016, 24(23): 26972-26985.
- [25] Wang F, Xu T, Qiang Z, et al. Soot optical properties in the terahertz spectra domain[J]. *Journal of Heat Transfer*, 2012, 134(7): 074501.
- [26] Pickwell-MacPherson E, Huang S Y, Sun Y W, et al. Terahertz image processing methods for biomedical applications[C]//2008 30th Annual International Conference of the IEEE Engineering in Medicine and Biology Society, August 20-25, 2008, Vancouver, BC, Canada. New York: IEEE Press, 2008: 3751-3754.
- [27] Crawley D A, Longbottom C, Wallace V P, et al. Three-dimensional terahertz pulse imaging of dental tissue [J]. *Journal of Biomedical Optics*, 2003, 8(2): 303-307.
- [28] Chen Y, Huang S Y, Pickwell-MacPherson E. Frequency-wavelet domain deconvolution for terahertz reflection imaging and spectroscopy[J]. *Optics Express*, 2010, 18(2): 1177-1190.
- [29] He Y Z, Liu K, Au C, et al. Determination of terahertz permittivity of dehydrated biological samples[J]. *Physics in Medicine & Biology*, 2017, 62(23): 8882-8893.
- [30] Huang S Y, Ashworth P C, Kan K W, et al. Improved sample characterization in terahertz reflection imaging and spectroscopy[J]. *Optics Express*, 2009, 17(5): 3848-3854.
- [31] Yasuda T, Iwata T, Araki T, et al. Improvement of minimum paint film thickness for THz paint meters by multiple-regression analysis[J]. *Applied Optics*, 2007, 46(30): 7518-7526.
- [32] Iwata T, Yoshioka S, Nakamura S, et al. Prediction of the thickness of a thin paint film by applying a modified partial-least-squares-1 method to data obtained in terahertz reflectometry[J]. *Journal of Infrared, Millimeter, and Terahertz Waves*, 2013, 34(10): 646-659.
- [33] Xu Y F, Hao H B, Citrin D S, et al. Three-dimensional nondestructive characterization of delamination in GFRP by terahertz time-of-flight tomography with sparse Bayesian learning-based spectrum-graph integration strategy [J]. *Composites Part B: Engineering*, 2021, 225: 109285.
- [34] Aharon M, Elad M, Bruckstein A. K-SVD: an algorithm for designing overcomplete dictionaries for sparse representation[J]. *IEEE Transactions on Signal Processing*, 2006, 54(11): 4311-4322.
- [35] Dong J L, Wu X L, Locquet A, et al. Terahertz superresolution stratigraphic characterization of multilayered structures using sparse deconvolution[J]. *IEEE Transactions on Terahertz Science and Technology*, 2017, 7(3): 260-267.
- [36] Xu Y F, Wang X Y, Zhang L Y, et al. Terahertz nondestructive quantitative characterization for layer thickness based on sparse representation method[J]. *NDT & E International*, 2021, 124: 102536.
- [37] Xu Y F, Fang X D, Fan S T, et al. Double Gaussian mixture model-based terahertz wave dispersion compensation method using convex optimization technique[J]. *Mechanical Systems and Signal Processing*, 2022, 164: 108223.
- [38] Zhang Z P, Buma T. Terahertz impulse imaging with sparse arrays and adaptive reconstruction [J]. *IEEE Journal of Selected Topics in Quantum Electronics*, 2011, 17(1): 169-176.
- [39] Birgin E G, Martínez J M, Raydan M. Inexact spectral projected gradient methods on convex sets[J]. *IMA Journal of Numerical Analysis*, 2003, 23(4): 539-559.
- [40] Ahookhosh M, Aragón Artacho F J, Fleming R M T, et al. Local convergence of the Levenberg-Marquardt method under Hölder metric subregularity[J]. *Advances in Computational Mathematics*, 2019, 45(5/6): 2771-2806.
- [41] He S, Xie Y N, Yang Z W. High-boost-based local Weber contrast method for infrared small target detection [J]. *Remote Sensing Letters*, 2023, 14(2): 103-113.

