

DOI:10.19651/j.cnki.emt.2416149

基于连续太赫兹波频谱信息提取方法研究*

毕建敏 陈友兴 薛凯亮 李泽宙

(中北大学信息与通信工程学院 太原 030051)

摘要: 调频连续太赫兹系统受激励器件限制导致其带宽普遍较窄,在检测样件时由于单点处数据量有限,存在不易提取特征信号的问题,针对此问题,本文提出了一种基于 Kaiser 窗的线性调频 z 变换算法。首先对原始信号进行加窗处理,采用线性调频 z 变换对不同样件中深度缺陷特征信号进行提取,引入不同信号处理方法进行比较分析,结果可得本文提出方法在有限的数量中保留样件特征信息的同时,降低了计算复杂度,通过与不同种复合材料检测数据处理对比,证明了该方法的有效性与普适性。

关键词: 太赫兹波;FMCW;CZT;Kaiser 窗;信息提取

中图分类号: TN911;TN52+6 **文献标识码:** A **国家标准学科分类代码:** 510.40

Research on the method of extracting spectral information
based on continuous Terahertz waves

Bi Jianmin Chen Youxing Xue Kailiang Li Zezhou

(School of Information and Communication Engineering, North University of China, Taiyuan 030051, China)

Abstract: FM continuous terahertz wave system is limited by the excitation device, resulting in a generally narrow bandwidth, in the detection of samples due to the limited amount of data at a single point, there is not easy to extract the feature signal, to address this problem, this paper proposes a chirp-z transform algorithm based on the Kaiser window. First of all, the original signal is processed by adding windows, and the linear frequency modulated z-transform is used to extract the feature signals of the depth defects in different samples, and different signal processing methods are introduced for comparative analysis, and the results show that the method proposed in this paper reduces the computational complexity while retaining the feature information of the samples in the limited amount of data, comparing with different kinds of composite material detection data processing, which proves the validity and universality of the method.

Keywords: Terahertz waves;FMCW;CZT;Kaiser window;information extraction

0 引言

太赫兹波(Terahertz, THz)指的是频率范围在 0.1~10 THz(30~3 000 μm)之间的电磁波,处在宏观电子学向微观光子学过渡的区间^[1-2]。在无损检测方面,太赫兹波对大多数的非金属材料具有良好的穿透性,使其检测技术成为了一种新兴的无损检测方式。与传统的无损检测方式相比,太赫兹无损检测无需接触样件、无需耦合剂,对操作人员安全无害。因此在复合材料、粘接材料等无损检测中,太赫兹检测技术得到了广泛的应用^[3]。

太赫兹检测主要是根据检测波在不同结构界面产生折反射,从得到检测信号中得到样件内部多层的回波信息和

缺陷的表征信息。从有限的数量中准确提取到样件的特征信息是尤为重要的。蒋强等^[4]通过对滤波后的时域信号进行自相关性分析,结合高斯滤波反卷积运算,提高了太赫兹响应信号的信噪比;Zhang 等^[5]使用双高斯反滤波技术对时域信号进行处理,结合玻璃纤维材料特性,提高了缺陷的检测能力和识别精度;代冰^[6]使用小波系数三维重构,并引入利普希茨(Lipschitz)指数来描述信号特征,提高了太赫兹检测的纵向分辨率;张丹丹等^[7]对太赫兹时域光谱数据进行维纳滤波反卷积处理,使信号脉宽变窄,提高检测精度,同时降低了计算复杂度,提高了处理效率。

在实际的检测过程中,系统采样时间、采样率等会影响采样点数据和效率,进而影响检测结果,对特征提取造成影

收稿日期:2024-05-31

* 基金项目:山西省自然科学基金(202203021221118)项目资助

响。针对时频域信号的特征信息的提取, Nalband 等^[8] 使用平滑伪维格纳准概率分布 (Wigner-ville distribution, WVD) 和 HHT 来分析振动谱信号, 使用自适应噪声完全集成经验模态分解来计算内涵模态分量 (IMFs), 提取信号中的信息特征; Liu 等^[9] 提出了一种基于高阶同步压缩变换和确定性有限自动机 (DFA) 的时频分析方法, 使用 DFA 来自适应 IMFs, 然后利用分解模态相应包络的时频表示来提取识别特征频率; 因为雷达返回信号会被高频信号干扰, 影响后续信号处理, Zhao 等^[10] 使用总变分平稳小波变换优化变分模态分解 (variational mode decomposition, VMD) 算法来去噪, 在不失真的情况下滤除信号中的强噪声; Voznesensky 等^[11] 使用固定时间尺度分解 (intrinsic time decomposition, ITD) 作为基础, 使用希尔伯特变换和自适应去噪算法, 减低处理时间的同时提高信号在时频域中的表示质量。在计算量较大的情况下, 使用不同的机器学习方式^[12-14] 对数据中的特征信息提取。

对 THz-CW 系统来讲, 为了保证有限数据中准确提取特征信息, 通常会使用补零的方式来对采集回来的数据进行处理, 以便更好地识别并提取信号中的特征信息, 但补零的方式会导致计算量加大、计算时间变长^[15], 因此使用较少的信号数据准确提取特征信息就变得尤为重要。

本文将以不同类型的复合材料为实验样件, 提取不同深度位置的层间界面数据, 在保证不增加数据量的情况下, 对比不同的信号处理方式, 探究有限数据量下对特征信息的准确提取。

1 连续太赫兹波的无损检测系统

1.1 系统构成

本实验用到的是德国 TRILITEC 公司生产的太赫兹线性调频连续波 (linear frequency modulated continuous wave, LFMCW) 雷达传感器, 工作频率带宽为 56 GHz, 采用的是逐点扫描、自发自收、反射式检测的工作方式。

该系统具体参数如表 1 所示。

表 1 系统参数

Table 1 System parameter

参数	数值/指标
中心频率	154 GHz
带宽	56 GHz
扫查时间	1 024 μ s
采样率	1 MHz
工作模式	反射式逐点扫描
	主动式自发自收
调频波形	LFMCW

信号发生与采集的具体过程如图 1 所示。首先, 信号由斜坡信号发生器发生, 经振荡器 (voltage controlled

oscillator, VCO) 产生快速锯齿状低频扫描信号, 该信号通过倍频链路放大, 成为发射信号 F_1 , 并由收发一体式接收器发射。在理想状态下, 信号发射之后, 一部分信号会通过一组凸透镜, 凸透镜组会将信号汇聚到焦点处, 用来检测样件; 而另一部分信号则会直接被接收器接收, 用来与回波信号混频。当汇聚后的发射信号遇到不同介质时信号能量会发生反射, 这样的信号被称为反射信号 F_2 。反射信号会按照原路径返回, 并由接收器接收。接收回来的信号通过混频器进行转换, 最后由数模转换器记录为差频信号, 保存并展示到 PC 端。

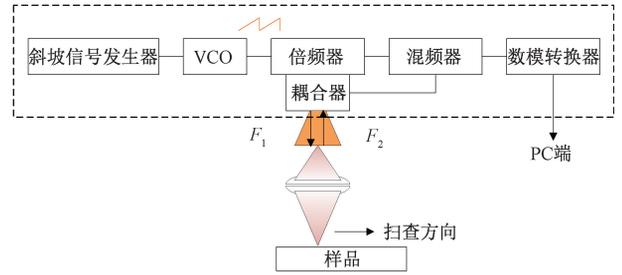


图 1 连续太赫兹检测系统示意图

Fig. 1 Diagram of a continuous terahertz detection system

1.2 FMCW 系统测厚原理

根据信号发生源工作方式的不同, 连续波的线性调频方式也相较于非线性调频方式, 系统的扫描时间会缩短、成像速度变快, 应用会更加广泛, 其测量原理如图 2 所示。图中 f_1 为发射信号, f_2 为回波信号, f_0 为起始频率, f 为终止频率, 调频带宽为 $B = f - f_0$, t_s 为扫查周期时间, Δt 为发射信号与回波信号之间时延差, 调频斜率 $\mu = B/t_s$ 。

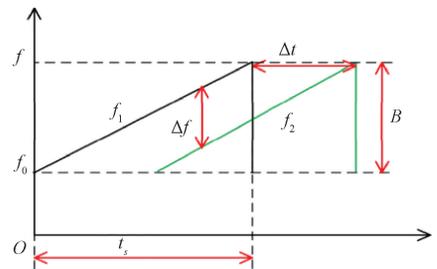


图 2 连续波原理图

Fig. 2 Continuous wave schematic

发射信号 f_1 的频率函数为:

$$f_1 = f_0 + \mu t, 0 \leq t \leq T \quad (1)$$

回波信号 f_2 的频率函数为:

$$f_2 = f_1(t + \Delta t) = f_0 + \mu(t + \Delta t) \quad (2)$$

其中 $0 \leq t + \Delta t \leq T$ 。

接收器将发射信号和回波信号接收, 经混频器进行差频得到差频信号, 其函数频率为:

$$f_3 = |f_2 - f_1| = \mu \cdot \Delta t = \frac{B}{t_s} \cdot \frac{2d}{c} \quad (3)$$

其中, d 为系统探头到待测样件的距离, c 表示真空中

的波速。

由式(3)可进一步推导出深度分辨率,即检测的纵向分辨率有:

$$\Delta d = \frac{ct_s}{2B} \cdot \Delta f \quad (4)$$

扫频信号周期性变化,根据 FFT 理论可得 $\Delta f = 1/t_s$, 故检测系统的纵向分辨率为:

$$\Delta d = \frac{c}{2B} \quad (5)$$

在实际应用中,对厚度较薄样件的检测频谱信号会出现中波峰重合的情况,不易将不同界面特征的能量峰值分离开来,这就对样件厚度的计算造成干扰,影响检测结果。

2 方法及原理

该系统太赫兹波会因频段带宽、采样率等影响,导致采集数据量较少,时空分辨率较低,限制了其在纵向分辨率测量中的实际应用。因此,需要对检测信号进行频域上的处理,以便可以达到实际检测的要求。

针对调频连续太赫兹波的检测信号进行相应的频谱细化处理,常用的方法有:线性调频 z 变换(CZT)和复调制细化频谱傅里叶变换算法(ZFFT)。

2.1 CZT 原理

线性调频 z 变换(chirp- z transform, CZT)是一种广义的 z 变换,其输入点数 N 和输出点数 M 可以不相等,选择感兴趣的频段进行细化校正。

已知 $x(n)$ 序列点数为 $N, 0 \leq n \leq N-1$ 。其 Z 变换为:

$$X(z) = \sum_{n=0}^{N-1} x(n)z^{-n} \quad (6)$$

令 Z 的取样点为 $z_k = AW^{-k}, 0 \leq k \leq M-1$ 。其中 $A = A_0 e^{j\theta_0}, W = W_0 e^{j\psi_0}, A_0$ 为弧线起点, θ_0 为起始角度, W_0 用来表示弧线盘旋方向, ψ_0 表示频率的角度间隔。默认情况下, $A = 1, W = e^{-j2\pi/M}$ 。

将 $z_k, nk = 0.5[n^2 + k^2 - (k-n)^2]$ 带入到 z 变换中可得到:

$$\begin{aligned} CZT[x(n)] &= X(Z_k) = \sum_{n=0}^{N-1} x(n)A^{-n}W^{nk} = \\ W^{\frac{k^2}{2}} \sum_{n=0}^{N-1} x(n)A^{-n}W^{\frac{n^2}{2}} W^{\frac{(k-n)^2}{2}} \end{aligned} \quad (7)$$

由此公式可知 CZT 算法适用于宽频信号中某一窄带范围进行较高分辨率的频谱分析。

2.2 ZFFT 原理

复调制细化频谱傅里叶变换算法(zoom-FFT, ZFFT)是在 FFT 的基础上发展而来的,可以对选定频带细化,在采样点相同的情况下提高频率分辨率,或降低相同分辨率下的计算量,其具体步骤如图 3 所示。

首先,对输入序列 $x_0(n)$ 进行调制移频,利用 DFT 的

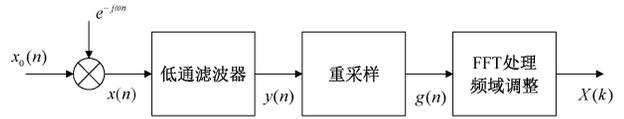


图 3 ZFFT 流程示意图

Fig. 3 ZFFT process diagram

频移特性在时域乘以 $e^{-j\omega n}$ 因子,然后进行 DFT,实现频域上的移动,得到频移后的序列 $x(n)$;之后为避免后续信号产生混叠,引入低通滤波器对信号 $x(n)$ 进行滤波,得到想要的频带范围,得到输出信号 $y(n)$;信号 $y(n)$ 频带为 $B = f_s/D$,对其进行重采样,重采样频率为 $f_{sm} = f_s/D$,信号长度为 $M = N/D$,故分辨率 $\Delta f_{sm} = \frac{f_{sm}}{M} = \frac{f_s}{N} = \Delta f$;最后对重采样后的信号进行时域加窗、FFT 变换,得到细化频谱,之后其进行频率调整,获得最终的细化频谱。

2.3 窗函数选择

一般来说实际信号都是连续、有限长的,在对其使用频谱细化处理时,会将连续信号进行截取,然后针对截取信号进行细化处理。在信号细化过程中,连续信号的旁瓣效应和频谱泄露可能会造成波形偏移,导致获取到的数据产生偏差,影响实验计算结果。为了尽可能的减小细化产生的影响,对细化信号进行加窗,降低旁瓣效应和频谱泄露的影响^[16]。常见的窗函数有: Hanning 窗、Hamming 窗、Blackman 窗和 Kaiser 窗。根据不同窗函数的幅频响应结果可知, Kaiser 窗的最大特点就是可以通过形状因子来调整主瓣和旁瓣的宽度,即在满足主瓣分辨率的同时降低旁瓣对主瓣的影响。如图 4 所示。

根据图 4 中的结果可以看到,同样位置处圈内的波形包含信息不同,这是由于不同其他类型的窗函数不可以调整其形状系数,在结合 CZT 算法后会对波形造成影响,“淹没”关键的特征信息,导致检测出错;而 Kaiser 窗可以调整其形状系数,可以在同样条件下保留特征信息,不影响检测检测结果。

Kaiser 窗系数有:

$$\omega(n) = \frac{I_0\left(\beta\sqrt{1 - \left(\frac{n - N/2}{N/2}\right)^2}\right)}{I_0(\beta)}, 0 \leq n \leq N \quad (8)$$

其中, I_0 为第一类零阶修正贝塞尔系数, N 为数据长度, β 为形状系数,增大 β 就会加宽主瓣宽度,增大旁瓣衰减。在本文研究中 β 取 0.5 来计算。

本文方法具体步骤如表 2 所示。

3 实验结果与分析

本文实验中使用到的调频连续太赫兹波检测系统带宽为 56 GHz,采样率为 1 MHz,原始数据采样点个数为 1 024。带入式(5),可以算出系统理论上的纵向分辨率约为 2.67 mm。实验处理方式包括对原始数据 FFT 处理、补

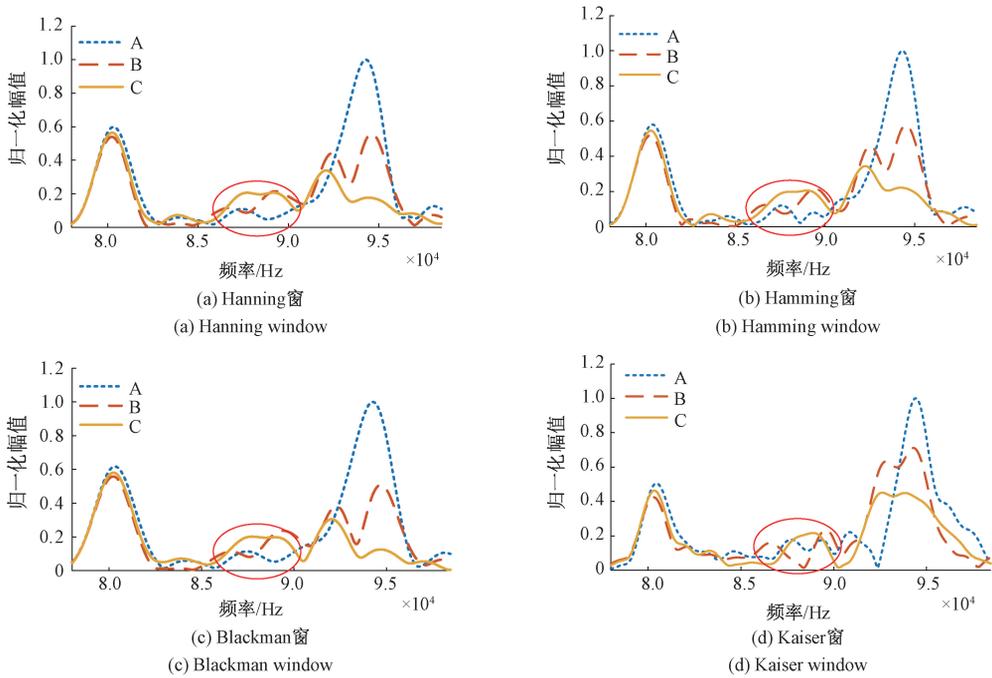


图4 不同窗函数与CZT算法结合使用结果

Fig. 4 Results of using different window functions with the CZT algorithm

表2 本文方法步骤

Table 2 Methodological steps in this article

具体步骤:

步骤①:对原始信号 $x(n)$ 进行加 Kaiser 窗处理和 FFT 处理;

步骤②:通过①中 FFT 处理确定分析区间的起始频率 f_0 , 细化倍数 D 以及设置输出数据量和输入数据量同为 N ;

步骤③:确定构造序列点数 L 且 $L \geq 2N - 1$, 序列有 $g(k) = x(k)A^{-k}W^{-k \cdot k/2}$ 和 $h(k) = W^{k \cdot k/2}$, 其中 $0 \leq k \leq N - 1$, 其他区间序列值取 0 即可, 对其进行 FFT 处理得到 $G(m)$ 和 $H(m)$;

步骤④: $G(m)$ 和 $H(m)$ 相乘得到 $Y(m)$, 对其进行 IFFT 处理得到 $y(k)$;

步骤⑤:最后计算得到原始数据中分析区间内数据的频谱 $X(z) = y(k)W^{-k \cdot k/2}$

零至 65 536, ZFFT, CZT 和本文介绍的方法, 通过计算可得到待测目标的厚度信息。即原始数据经过信号处理方式后, 得到峰峰值对应的横坐标频率数据记为 A 和 B, 通过式(9)可计算得到厚度信息, 其中频率分辨率约为 $\Delta f = 976.56$ Hz, 纵向分辨率为 $\Delta d = 2.67$ mm, n 为折射率, D 为计算所得的厚度信息。

$$D = \frac{|A - B| / \Delta f \cdot \Delta d}{n} \quad (9)$$

3.1 系统纵向分辨率测试

使用 3D 打印的厚度检测板来测试, 该检测板呈台阶状, 厚度分别为 2 mm、4 mm 和 6 mm, 实物如图 5 所示, 检测结果如图 6 所示。



图5 3D 打印厚度检测板样件图及检测

Fig. 5 3D printing thickness inspection plate sample drawing and detection

其中图 6(a) 为原始数据直接进行 FFT 变换所得, 图 6(b) 为将原始数据补零到 65 536 后再进行 FFT 变换所得。根据图 6 中的波形对比可以看到, 原始数据量无法满足检测的要求, 因此需要对数据量进行扩充补零或者选定区间进行频谱细化处理。

3.2 检测应用与分析

陶瓷基热防护复合材料(CMCs)因其质地轻、耐热性好, 广泛应用于航空航天事业中。它是由陶瓷基、应变隔热垫和冷结构粘接而成, 在制作、使用过程中容易出现脱粘、气泡等缺陷, 造成安全隐患^[17]。本文在研究过程中, 制

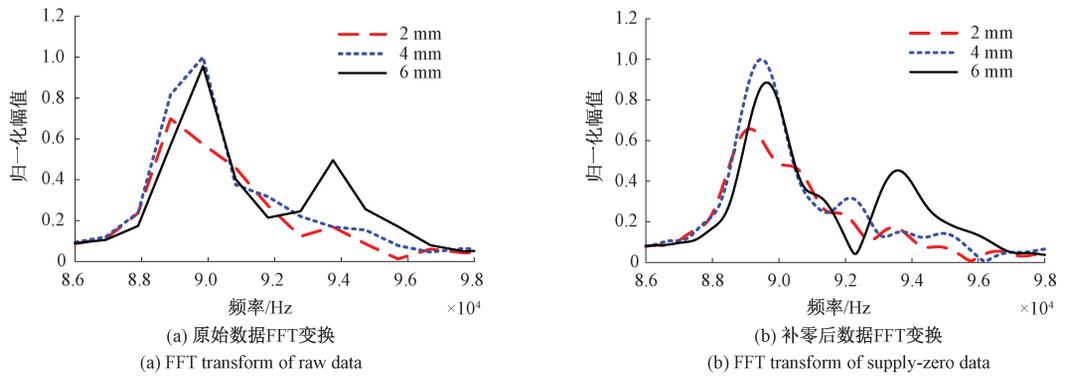


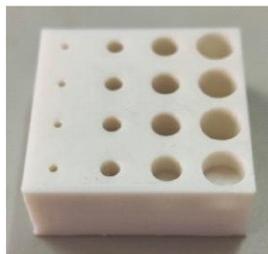
图 6 厚度检测板典型信号分析结果

Fig. 6 Typical signal analysis results for thickness detection plates

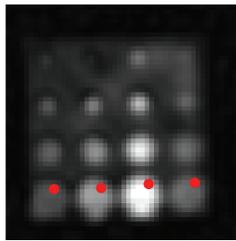
备了同种柱状缺陷类型的 3D 打印样件和陶瓷基热防护复合材料,用于采集相关数据。

3D 打印样件中预制的缺陷为圆柱状空洞缺陷,样件

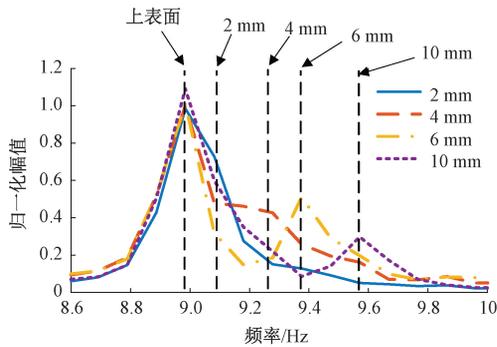
大小为 50 mm×50 mm×15 mm,预埋缺陷深度即距上表面深度分别为 2 mm、4 mm、6 mm 和 10 mm。样件及检测结果如图 7 所示。



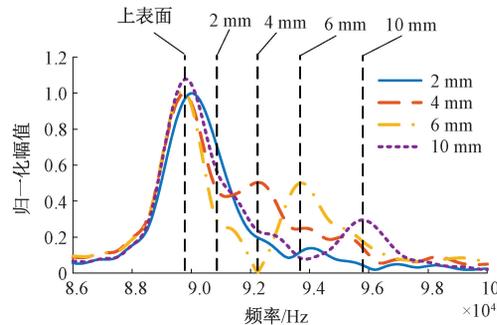
(a) 样件实物图
(a) Physical sample photo



(c) 样件灰度图像及不同深度选点
(c) Sample greyscale image and selection of points at different depths



(b) 原始信号FFT处理结果
(b) FFT transform of raw data



(d) 信号经Kaiser窗结合CZT处理后结果
(d) Signal processed by Kaiser window combined with CZT results

图 7 3D 打印样件检测结果

Fig. 7 3D printed sample test results

根据图 7(b)和(d)中波形可以看出受系统分辨率限制,2 mm 处检测困难,其他深度则可以较好的检测出。在传播过程中,太赫兹波遇到不同种界面时,会有较强的反射,故而通过区间内不同的波峰来区分并得到不同界面的位置信息。根据检测到的数据计算,对原始数据直接进行频域处理误差最大,其余方法计算结果如表 3 所示,从误差上分析可得到本文使用的方法要优于常用的处理方式。

陶瓷基热防护复合材料预制了同类型的圆柱状缺陷,缺陷深度由浅到深分别是距上表面 19.5 mm、21.1 mm 和 24.1 mm。样件检测结果如图 8 所示。

图 8(b)的波形相关数据是原始数据经补零处理之后所得到的,实际值和测量值如表所示,图 8(d)为原始信号经本文方法处理之后的结果。其他信号处理计算结果如表 4 所示。

表3 3D打印样件数据不同方式处理结果

Table 3 Results of different ways of processing

3D printing sample data

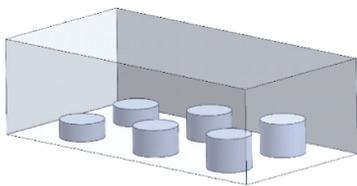
处理方式	实际厚度值/	计算厚度值/	误差/
	mm	mm	%
FFT	4.00	4.62	15.5
	6.00	6.17	2.8
	10.00	9.25	7.5
补零法	4.00	4.00	0
	6.00	6.36	6.0
	10.00	9.42	5.8
ZFFT	4.00	4.01	0.25
	6.00	6.32	5.33
	10.00	9.26	7.40
CZT	4.00	3.98	0.5
	6.00	6.36	6
	10.00	9.41	5.9
本文方法	4.00	3.98	0.5
	6.00	6.35	5.83
	10.00	9.48	5.2

表4 陶瓷基热防护复合材料数据不同方式处理结果

Table 4 Results of different ways of processing ceramic-

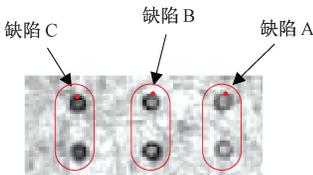
based thermal protection composite data

处理 方式	实际厚度值/	计算厚度值/	误差/
	mm	mm	%
FFT	A(24.1)	24.75	2.69
	B(21.1)	22.50	6.63
	C(19.5)	20.25	3.85
补零法	A(24.1)	23.97	0.53
	B(21.1)	21.37	1.27
	C(19.5)	19.68	0.92
ZFFT	A(24.1)	24.07	0.12
	B(21.1)	21.37	1.27
	C(19.5)	19.80	1.53
CZT	A(24.1)	24.01	0.37
	B(21.1)	21.41	1.46
	C(19.5)	19.67	0.87
本文方法	A(24.1)	24.05	0.20
	B(21.1)	21.28	0.85
	C(19.5)	19.63	0.66



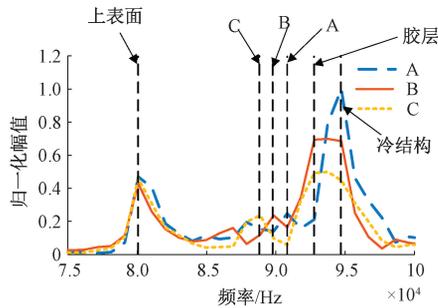
(a) 样件三维示意图

(a) Three-dimensional diagram of the sample



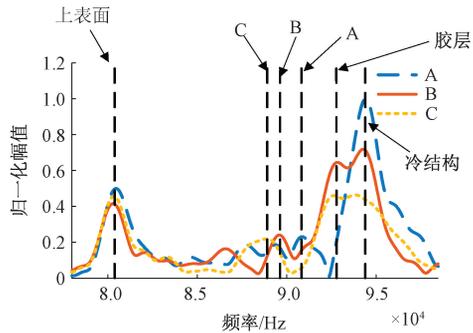
(c) 样件检测灰度图及选点

(c) Sample inspection greyscale image and point selection



(b) 原始信号FFT处理结果

(b) FFT transform of raw data



(d) 信号经Kaiser窗结合CZT处理后结果

(d) Signal processed by Kaiser window combined with CZT results

图8 陶瓷基热防护复合材料检测结果

Fig. 8 Ceramic-based thermal protection composites test results

根据表中计算数据可以看出本文方法相较于其他算法,计算结果较好,没有受到更换检测样件的影响。其中补零法同样误差较低,满足实际应用,但因为对原始数据进行补零,会导致计算量变大,不适用于工件的大范围扫描检测计算。与此相反,本文提出的方法在原始数据量保持不变的情况下,可以达到补零法的精度,更适合于实际

应用检测。

为了避免因样件缺陷类型而产生的特殊情况,使用同样的信号处理方式对不等厚 PVC-ABS 粘接板的多个数据进行了处理,其中 PVC 厚度分别为 2.9 mm 和 5.13 mm,折射率为 1.9,ABS 厚度均为 5.1 mm,折射率为 1.6。结果如表 5 所示。

表 5 PVC-ABS 粘接板数据不同方式处理结果

Table 5 Results of different ways of processing PVC-ABS bonding plate data

处理方式	PVC			ABS		
	实际厚度值/mm	测量厚度值/mm	误差/%	实际厚度值/mm	测量厚度值/mm	误差/%
FFT (1 024 个点数据)	2.90	4.26	46.8	5.10	3.37	33.9
	5.13	5.68	10.7		5.06	0.78
补零法	2.90	2.56	11.72	5.10	5.25	2.94
	5.13	5.26	2.53		5.19	1.76
ZFFT	2.90	2.55	12.06	5.10	5.23	2.54
	5.13	5.39	5.06		5.06	0.78
CZT	2.90	2.58	11.03	5.10	5.29	3.72
	5.13	5.31	5.06		5.19	1.76
本文方法	2.90	2.62	9.65	5.10	5.29	3.72
	5.13	5.32	3.70		5.18	1.56

通过表中计算结果可以看出在同样数据量下,本文提出的 Kaiser 窗结合 CZT 的算法更加准确;相较于补零法,其计算量更少,在实际应用当中更有优势。

4 结 论

连续太赫兹波检测技术在无损检测领域有着很大的应用前景。本文针对一种带宽为 56 GHz,采样率为 1 MHz 的 THz-LFMCW 系统,使用一种基于 Kaiser 窗的 CZT 的方法,在不提高运算量的前提下,准确提取出了层状结构的不同界面信息。通过实验测试验证,与常用的信号处理方式对照,证明了方法的可行性和准确性。但在对层状结构的检测中由于波的折反射及散射的影响,回波信号中的特征信息包含了较多的噪声,影响检测效果,例如图 8 的热防护复合材料中,内部除空洞缺陷的波峰外,其他波峰则可能是由噪声导致的,因此对缺陷定量分析的方式方法仍需要继续研究探索。

参考文献

- [1] 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): 110901-110901.
- [2] 李迎,张朝晖,赵小燕,等. 非金属涂层缺陷的太赫兹时域谱检测[J]. *仪器仪表学报*, 2020, 41(11): 129-136.
- LI Y, ZHANG ZH H, ZHAO X Y, et al. Terahertz

time-domain spectral detection of non-metallic coating defects[J]. *Chinese Journal of Scientific Instrument*, 2020, 41(11): 129-136.

- [3] 李文军,王天一,周宇,等. 多层胶接结构胶层空气缺陷的太赫兹无损检测[J]. *光学学报*, 2017, 37(1): 138-145.
- LI W J, WANG T Y, ZHOU Y, et al. Terahertz nondestructive detection of adhesive layer air defects in multilayer glued structures[J]. *Acta Optica Sinica*, 2017, 37(1): 138-145.
- [4] 蒋强,俞跃,叶凌伟,等. 基于修正自相关算法的 THz-TDS 聚乙烯测厚反卷积算法[J]. *红外技术*, 2020, 42(5): 473-482.
- JIANG Q, YU Y, YE L W, et al. Inverse convolution algorithm for THz-TDS polyethylene thickness measurement based on modified autocorrelation algorithm[J]. *Infrared Technology*, 2020, 42(5): 473-482.
- [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.
- [6] 代冰. 小波分析在太赫兹无损检测中的应用[D]. 武汉:华中科技大学, 2017.
- DAI B. Application of wavelet analysis in terahertz nondestructive testing [D]. Wuhan: Huazhong

- University of Science and Technology, 2017.
- [7] 张丹丹,李璐璐,顾健,等. 高分辨 THz-TDS 采集传输的嵌入式设计与优化[J]. 电子测量与仪器学报, 2023, 37(12):29-36.
ZHANG D D, LI L L, GU J, et al. Embedded design and optimisation of high-resolution THz-TDS acquisition and transmission[J]. Journal of Electronic Measurement and Instrumentation, 2023, 37 (12): 29-36.
- [8] NALBAND S, VALLIAPPAN C, PRINCE A A, et al. Time-frequency based feature extraction for the analysis of vibroarthrographic signals[J]. Computers and Electrical Engineering, 2018, 69720-69731.
- [9] LIU W, CHEN W, ZHANG Z. A novel fault diagnosis approach for rolling bearing based on high-order synchrosqueezing transform and detrended fluctuation analysis[J]. IEEE Access, 2020, 8: 12533-12541.
- [10] ZHAO L, MAO J. A novel lidar signal denoising method based on variational mode decomposition optimized using whale algorithm [J]. Journal of Applied Physics, 2024, 135(17):174501-174516.
- [11] VOZNESENSKY A, KAPLUN D. Adaptive signal processing algorithms based on EMD and ITD[J]. IEEE Access, 2019, 7: 171313-171321.
- [12] 李俊豪,杨宏晖. 用于水声目标信号时频特征提取与识别的深度卷积神经网络[J]. 无人系统技术, 2019, 2(4):26-30.
LI J H, YANG H H. Deep convolutional neural network for time-frequency feature extraction and recognition of hydroacoustic target signals [J]. Unmanned Systems Technology, 2019, 2(4):26-30.
- [13] 王淑青,罗平章,胡文庆,等. 基于小波包分解与 CEEMDAN 能量熵的水电机组振动信号特征提取[J]. 水电能源科学, 2024(6):203-207, 220.
WANG SH Q, LUO P ZH, HU W Q, et al. Feature extraction of hydropower unit vibration signal based on wavelet packet decomposition and CEEMDAN energy entropy[J]. Water Resources and Power, 2024(6): 203-207, 220.
- [14] 陈彬,全宇轩,刘阁,等. 旋转设备故障特征提取的研究[J]. 机械设计与研究, 2024, 40(1):190-199.
CHEN B, QUAN Y X, LIU G, et al. Research on fault feature extraction of rotating equipment [J]. Mechanical Design and Research, 2024, 40 (1): 190-199.
- [15] 连亚容,陈友兴,薛凯亮,等. 基于 CW-THz 的防热瓦结构缺陷深度检测校正方法[J]. 强度与环境, 2024, 51(1):59-64.
LIAN Y R, CHEN Y X, XUE K L, et al. A correction method for depth detection of structural defects in heat-resistant tiles based on CW-THz[J]. Strength and Environment, 2024, 51(1):59-64.
- [16] 李橙橙. 高精度三谱线插值 DFT 算法及其在三相不平衡度测量中的应用[D]. 长沙:湖南大学, 2021.
LI CH CH. High-precision trispectral interpolation DFT algorithm and its application in three-phase unbalance measurement [D]. Changsha: Hunan University, 2021.
- [17] DIAZ O G, LUNA G G, LIAO Z, et al. The new challenges of machining Ceramic Matrix Composites (CMCs): Review of surface integrity[J]. International Journal of Machine Tools and Manufacture, 2019, 139: 24-36.

作者简介

毕建敏, 硕士研究生, 主要研究方向为太赫兹无损检测技术、信号捕获与处理等。

陈友兴(通信作者), 教授, 博士生导师, 主要研究方向为无损检测技术、信号处理等方向。