

DOI: 10.19650/j.cnki.cjsi.J2312060

基于多频段拼接的高分辨率太赫兹成像技术

周子悦¹, 年夫顺^{1,2,3,4}, 孙超^{2,3,4}, 张婷¹, 董继刚^{2,3,4}

(1. 中北大学仪器与电子学院 太原 030051; 2. 中电科思仪科技股份有限公司 青岛 266400;
3. 山东省电子测量仪器技术创新中心 青岛 266400; 4. 青岛市先进测试技术实验室 青岛 266400)

摘要:为解决带宽限制导致的太赫兹调频连续波成像纵向分辨率低的问题,提出一种适用于线性调频体制的多频段拼接的方法。该方法基于参考信号的非线性补偿算法,改进传统宽带时域合成算法,在非线性校正的同时实现各频段信号频率和相位上的连续性,无需再进行频移和相位补偿。搭建0.11~0.75 THz 5个频段线性调频成像系统进行实验验证,结果表明,该方法显著提高太赫兹成像纵向分辨率,同时提高材料介电常数测试精度,未来可应用于材料测试领域。此外,设计了表面台阶型样品和多层胶粘的内部缺陷样品进行成像,证明融合信号的图像包含更多的细节,样品的每一层分离得更为明显,高度差仅0.2 mm也能清晰地分辨,能够满足高精度无损检测的需求。

关键词: 太赫兹成像; 线性调频连续波; 多频段拼接; 无损检测; 材料介电常数

中图分类号: TN957 TH89 **文献标识码:** A **国家标准学科分类代码:** 510.40

High-resolution terahertz imaging technology based on multi-band stitching

Zhou Ziyue¹, Nian Fushun^{1,2,3,4}, Sun Chao^{2,3,4}, Zhang Ting¹, Dong Jigang^{2,3,4}

(1. School of Instrument and Electronics, North University of China, Taiyuan 030051, China; 2. Ceyear Technology Co., Ltd., Qingdao 266400, China; 3. Shandong Province Electronic Measuring Instrument Technology Innovation Centre, Qingdao 266400, China; 4. Qingdao Advanced Test Technology Laboratory, Qingdao 266400, China)

Abstract: To address the issue of low-range resolution caused by bandwidth limitation in terahertz imaging, this article proposes a multi-band stitching method for the linear frequency-modulated continuous wave system. The method enhances the conventional time-domain synthetic bandwidth algorithm by incorporating a non-linear compensation algorithm based on a reference signal. This method ensures frequency and phase continuity for each frequency band while rectifying non-linear effects, thereby eliminating the need for further frequency shift and phase compensation. Experimental results using a linear FM imaging system with five frequency bands ranging from 0.11 to 0.75 THz show that the proposed method can significantly improve the longitudinal resolution of terahertz imaging and improve the accuracy of material dielectric constant measurement, and can be applied to the field of materials testing in the future. In addition, two surface step samples and an internal defect sample with an adhesive multilayer are designed for imaging. The imaging results reveal that the fused signals contain more detailed information compared to individual bands, enabling clearer separation of each layer within the samples. Additionally, steps with a height difference of only 0.2 mm can be distinctly distinguished, which can meet the demands of high-precision non-destructive testing.

Keywords: terahertz imaging; linear frequency modulated continuous wave; multi-band fusion; nondestructive testing; dielectric constant

0 引言

太赫兹波具有高穿透力、低光子能量和良好的方向性等优点,可实现对物体表面和内部的非接触式探

测^[1-2],逐渐应用于成像领域中。常见的太赫兹成像技术分为脉冲波成像和连续波成像^[3]。其中,基于线性调频连续波(linear frequency modulated continuous wave, LFMCW)的太赫兹成像技术,系统输出功率高,相比脉冲波成像^[4-5],能测量更厚的样品,适合检测较大体积的非

金属物体。目前已经在人体安检^[6]、无损检测^[7-9]等方面取得了巨大的进展。

然而由于硬件的限制,太赫兹信号的调制带宽难以提高,导致纵向分辨率低,影响成像的质量,无法满足新兴测试需求,例如孔洞、异物等的非侵入式检测等高精度场景。为提高太赫兹信号的带宽,国内外研究人员提出多频段合成技术,将来源于不同探测器采集的同一目标的多个频段的宽带信号,按频率顺序融合成一个超宽带的信号,实现更高的分辨率。

早在20世纪90年代,Cuono等^[10-11]用拟合的信号模型外推两个频带间的空白实现融合成像,外推的准确度影响成像的质量,频带间隔如若过大甚至导致预测失真。Wang等^[12]开展了稀疏子带的多频段融合一维距离像^[13]、幅相补偿^[14-15]、二维信号融合ISAR成像^[16]的研究工作,避免了频谱外推的问题,但仍处于仿真实验阶段。另一种思路是时域合成^[17]的方法,其效果相当于发射一个大时间带宽信号的接收信号,在SAR成像中已得到深入研究^[18-21]。在太赫兹成像领域中,有关多频段合成的研究也逐渐受到关注。文献[22-24]虽然也避免了空白频带的估计误差,但并未具体阐述合成带宽的算法或者校准数据、补偿非线性相位的方法。而Hu等^[25-26]则对此展开了深入的研究,为太赫兹超宽带信号合成提供了宝贵的经验。

本文基于前人的研究,选用相邻频段的信号,以降低空白频带的估计误差和重叠频带的数据冗余。提出用参考信号补偿系统非线性方法简化传统时域合成算法的流程,实现多频段的拼接,合成超宽带信号。用陶瓷片实验验证本文方法的有效性;利用拼接后的超宽带信号,测量常见材料的样品的介电常数,验证本文方法对测量精度的影响。设计样品并进行二维扫描成像,验证本文方法能够提高系统分辨率,提高成像质量。

1 太赫兹线性调频连续波的基本原理

利用太赫兹线性调频信号的频率随时间线性变化,以及反射回波滞后性的特点,获取待测物距离向信息。发射信号和回波信号混频得到的差频信号如下:

$$S_{IF_LFM}(t) = A \cdot \exp \left[j2\pi \left(Kt\tau + f_0\tau - \frac{1}{2}K\tau^2 \right) \right] \quad (1)$$

式中: A 为信号幅度; f_0 为起始频率; K 为调频斜率(其为信号带宽 B 是与周期 T 的比值); $\tau = 2R/c$ 是发射信号和回波信号之间的延时, R 为待测物的距离, $c = 3 \times 10^8$ m/s 为电磁波的传播速度。

显然差频信号的频率 $f_{IF} = K\tau = 2KR/c$, 包含距离的信息。用快速傅里叶变换确定差频频率,所得的幅频曲线即为该目标的一维距离像,曲线的峰值 f_{IFmax} 对应于目

标的位置。其距离分辨率与带宽有关,在空气中分辨率为:

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

在介电常数为 ϵ 的介质中,电磁波传播速度发生改变,不再等于 c ,距离分辨率相应地也受到影响变为:

$$\Delta R_{\epsilon} = \frac{c}{2\sqrt{\epsilon}B} \quad (3)$$

对于 m 个反射界面的待测物,会有 m 个反射回波,相应地距离像也会出现 m 个峰值 $f_{IFmax,i}$, $i = 1, 2, \dots, m$, 以此提取待测物不同深度处的信息,实现距离向多个分界面的分辨。任意两个峰值之间的距离即该层介质的电厚度为:

$$R_{elec-thickness} = \frac{c(f_{IFmax,i+1} - f_{IFmax,i})}{2K} \quad (4)$$

假设样品的介电常数为 ϵ ,样品的实际厚度、电厚度和介电常数之间的关系如下:

$$R_{thickness} = \frac{R_{elec-thickness}}{\sqrt{\epsilon}} \quad (5)$$

由此,可以根据样品的实际厚度和电厚度测算出该样品的介电常数值。

结合XY二维扫描获取待测物不同位置的反射信息,由于边缘特性和介电性质,接收的太赫兹信号的强度有所不同,反映到图像上为明暗的差异,能够获取待测物的形状和内部结构等信息。根据太赫兹波在样品内部不同深度的反射信号传输延时不同,提取出不同深度处二维太赫兹图像重建成三维图像^[27]。

2 基于线性调频体制的多频段拼接算法

传统的时域合成方法^[25,28]主要包括频移、时移、相位补偿3个步骤,实现多个频段信号在频率、时间和相位上的连续性,从而将多频段信号合成一路超宽带信号。本文提出利用参考信号补偿非线性误差的方法,改进传统时域合成方法的流程。本文方法的流程与示意图如图1、2所示。

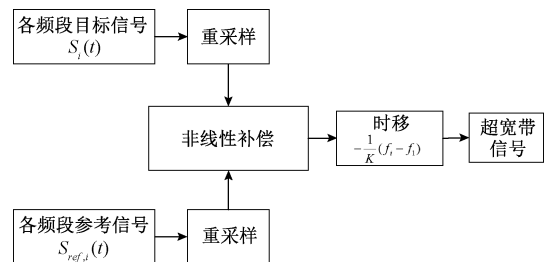


图1 基于线性调频体制的多频段拼接流程

Fig.1 Flow chart of multi-band stitching method based on LFM CW

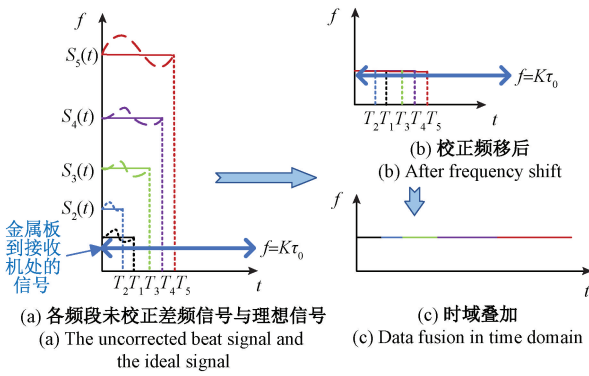


图2 多频段拼接原理示意

Fig. 2 Schematic diagram of the multi-band stitching method

对于式(1)的差频信号,其相位 $\phi = 2\pi(Kt\tau + f_0\tau - 1/2K\tau^2)$,实际计算过程中由于 $1/2K\tau^2$ 项很小,可以忽略不计。不同频段的传输链路长度不一样,因此放在同一位置的目标的回波延时 τ_i 互不相同。虽然各频段采样均匀,但由于各频段的采样同时进行,采样率相同而带宽不同,导致合成后的信号采样不均匀。因此,需要对每个频段的差频信号进行重采样,并确保调频斜率 K 相同。则各频段的信号表示为:

$$S_i(t) = A_i \exp[j2\pi(Kt\tau_i + f_i\tau_i)] \quad (6)$$

式中: $i = 1, 2, 3, \dots, N$; f_i 为各频段的起始频率; A_i 为各频段信号幅度; $K = B_i/T_i$ 为各频段的调频斜率, B_i 、 T_i 分别为各频段的带宽和调制周期。

在频段拼接之前需要注意的一点是,由于实际的系统并非完全理想,传输的信号往往会携带一定的非线性误差,导致幅相失真,引起距离像模糊、旁瓣上升以及主瓣不对称等,从而严重影响系统的纵向分辨率^[29]。图2(a)中实线表示理想的差频信号时频关系,虚线表示受非线性影响,差频信号不再是单频信号。对此,本文利用金属板的强反射信号作为参考信号对各频段信号的幅度和相位进行非线性校正^[30]。图2(a)和(b)中箭头表示参考金属板到接收机的差频信号,箭头是为了做线型的区分没有特殊含义。

首先应当获取各频段的参考信号,参考文献[30]可以表示为:

$$S_{ref,i}(t) = A_{ref,i}(t, \tau_i) \exp[j2\pi(Kt\tau_i + f_i\tau_i)] \times \exp[j2\pi(\delta_{ref,i}(t, \tau_i))] \quad (7)$$

式中: $A_{ref,i}(t, \tau_i)$ 和 $\exp[j2\pi\delta_{ref,i}(t, \tau_i)]$ 分别表示系统造成的幅度调制和相位调制。同一位置处测量获取目标信号的表达式为:

$$S_i(t) = A_i(t, \tau_i) \exp[j2\pi(Kt\tau_i + f_i\tau_i)] \times \exp[j2\pi(\delta_i(t, \tau_i))] \quad (8)$$

式中: $A_i(t, \tau_i)$ 和 $\exp[j2\pi\delta_i(t, \tau_i)]$ 分别表示系统造成的非线性幅度调制和相位调制。对各频段目标波形用参考

波形校正,表达式为:

$$S_{IF,i}(t) = S_i(t) \cdot S_{ref,i}(t) \cdot \exp[j2\pi(f_i + Kt)\tau_0] = \exp[j2\pi(f_i + Kt)\tau_0], 0 < t < T_i \quad (9)$$

式中: τ_0 为金属板与雷达接收机之间的已知距离的延时,不包含内部传输链路的时长, $\exp[j2\pi(f_i + Kt)\tau_0]$ 为一个已知的补偿项(图2(a)中箭头位置)。过程中, $A_i(t, \tau_i)/A_{ref,i}(t, \tau_i) \rightarrow 1$, $\delta_i(t, \tau_i) - \delta_{ref,i}(t, \tau_i) \rightarrow 0$ 。

此时不仅消除了非线性幅度和相位,同时还消除了由于链路不同造成的同一目标各频段之间的距离差,各频段的信号频移到了同一个 τ_0 的位置(图2(b)),并且每个频段信号边缘的相位是连续的,完成了频移和相位补偿的操作。

接下来,以第1频段信号为基准,将其他各频段信号时移: $-1/K(f_i - f_1)$, 因此,式(9)变换为:

$$S_{IF,i}(t) = \exp[j2\pi(f_1 + Kt)\tau_0], \sum_{n=1}^{i-1} T_n < t < \sum_{n=1}^i T_n \quad (10)$$

最后,在时域上将各频段信号叠加起来即可实现多频段信号的拼接融合,如图2(c)所示。之后便可利用该信号进行傅里叶变换、二维和三维成像的处理。

3 实验验证与结果分析

3.1 基于线性调频体制的多频段拼接成像系统

本文利用基于线性调频体制的多频段成像系统进行实验,验证所提算法的有效性。该成像系统(图3)主要由控制计算机、太赫兹收发模块组、光学器件组、二维扫描架等组成,收发模块组和光学器件组以及连接线等集成在“黑箱子”里。系统通过计算机控制收发模块组发射和接收各频段太赫兹信号,各频段信号经过光学器件组聚焦合成一路波束,实现不同频段信号在同一时间入射到待测物(夹持在扫描架上)相同位置点并接收反射信号。计算机下发指令控制扫描架运动,对待测物进行二维平动扫描,采集每个点信息。最后按照第2章多频段拼接的流程,合成超宽带信号,再根据第1章线性调频连续波成像的基本原理进行分析。系统的焦距为 $R_0 = 0.2$ m,非线性补偿中式(9)的已知项 $\exp[j2\pi(f_i + Kt)\tau_0]$ 中的 τ_0 用 $\tau_0 = 2R_0/c$ 代入即可。

除了第2章提到的非线性误差之外,实验系统中的光学部分也会引入一定的测量误差。光路一旦有所偏移或倾斜,样品就不在焦距处,这会降低成像的清晰度和准确性。此外,波束不再是正入射到样品上,可能会出现干涉条纹^[31]现象,影响成像质量,不利于缺陷的检测。因此,在安装调试时应注意调整光学元器件的位置和角度,使得光路正入射到样品上,并将样品夹具固定在焦平面处。

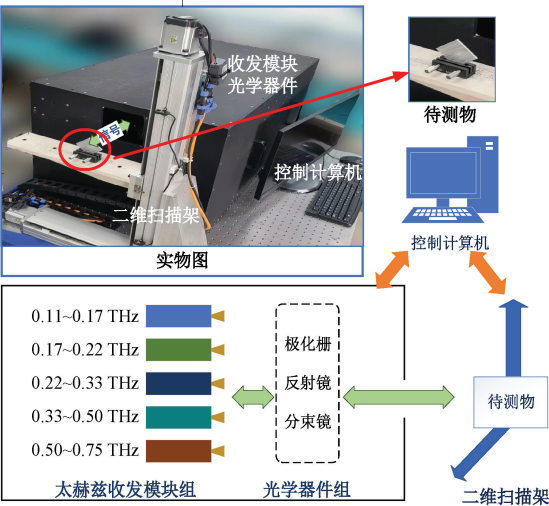


图 3 成像系统示意图与实物

Fig.3 Schematic diagram and photograph of the imaging system

3.2 基于多频段拼接的纵向分辨率分析

利用 0.1 mm 厚的氧化铝陶瓷薄片验证本文提出的多频段拼接方法的可行性。根据式(4)可知,电厚度约为 0.32 mm。0.1 mm 氯化铝陶瓷片距离像如图 4 所示,其中虚线表示 4 个频段拼接(频率范围为 110~500 GHz)的一维距离像,带宽为 390 GHz,其理想分辨率约为 0.385 mm,此时无法分辨陶瓷片的前后表面。实线为 5 个频段(频率范围为 110~750 GHz)的拼接结果,此时带宽已达到 640 GHz,可以明显分辨出样品前后表面的两个反射峰,达到 0.32 mm 的纵向分辨率,实现了高分辨测量的目的。这表明本文方法能够正确实现多个频段信号的拼接,有效地提高太赫兹成像的纵向分辨率。

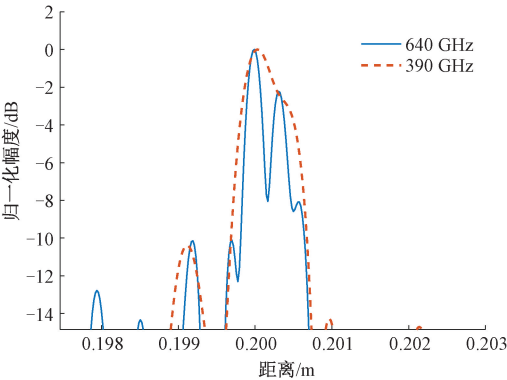


图 4 0.1 mm 氧化铝陶瓷片距离像

Fig.4 Range profile of 0.1 mm aluminum oxide ceramic piece

3.3 介电常数测量

用中电科思仪科技股份有限公司的准光学谐振腔法测试平台(图 5)测量常见的 3 种材质样品的介电常数作

为标准值,与式(5)计算的结果进行对比。首先用游标卡尺测量石英、聚四氟乙烯、氧化铝陶瓷这 3 种材质样品的实际厚度分别为 2.92、4.2 mm,再测得标准介电常数的值分别为 3.80、2.06、9.87。计算结果与标准值对比如表 1 所示,随着拼接的频段数目的增加,测量值与标准值逐渐接近,最终测量值趋于稳定。因此,使用本文提出的多频段拼接方法能够提高介电常数的测试精度,未来可将本方法应用于材料介电常数的测试中。

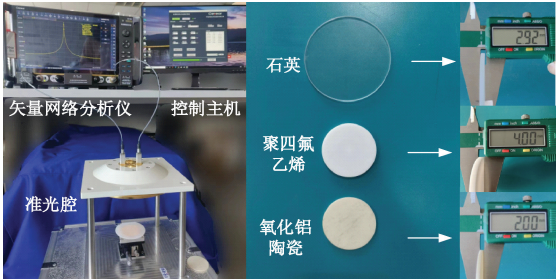


图 5 准光学谐振腔法测试平台及样品

Fig.5 Quasi-optical resonator test platform and samples

表 1 介电常数测量结果

Table 1 Measurement results of dielectric constant

样品		频段数				
		1	2	3	4	5
石英	测量值	4.557	4.004	3.817	3.817	3.817
	误差/%	19.92	5.37	0.45	0.45	0.45
聚四氟 乙烯	测量值	2.413	2.134	2.035	2.035	2.049
	误差/%	17.14	3.59	1.21	1.21	0.53
氧化铝 陶瓷	测量值	8.477	9.352	9.775	9.898	9.898
	误差/%	16.43	6.11	1.12	0.33	0.33

3.4 二维、三维成像结果及分析

为了分析本文的方法在二维、三维成像中的适用性,验证多频段拼接能够提高系统成像的分辨力,设计并用氧化铝陶瓷制作了 3 个样品,如图 6~8 所示。样品 1(图 6)是一块 50 mm×50 mm×5 mm 的矩形台阶,在其表面铣出的 8 层台阶,图 6(c)是内部台阶剖面图,每层台阶的高度不一,已标记出。样品 2(图 7)为环形的阶梯,外圈直径为 50 mm,内圈直径约为 13 mm,阶梯的高度每一层都是 0.2 mm。样品 3(图 8)为多层胶粘的内部空气缺陷,共有 7 层,缺陷层厚度为 0.25 mm,缺陷层之间间隔 0.125 mm。缺陷层按“K”字形摆放。

以 220~330 GHz 和 330~500 GHz 两个频段为主,当这两个频段拼接的成像结果不能体现缺陷信息时,再扩展到其他频段。图 9 和 10 所示为样品 1 和样品 2 的太赫兹成像结果。图 9 自上而下对应图 6(a)中的①~⑧层

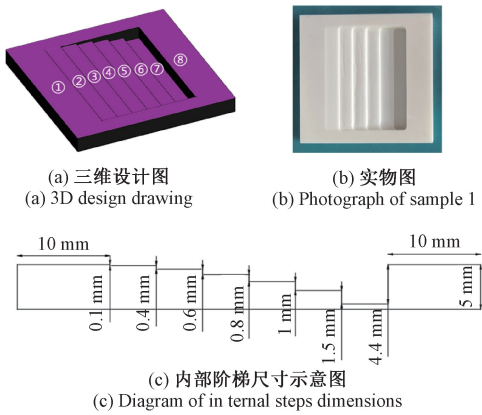


图 6 样品 1 设计与实物

Fig. 6 The design drawing and photograph of sample 1

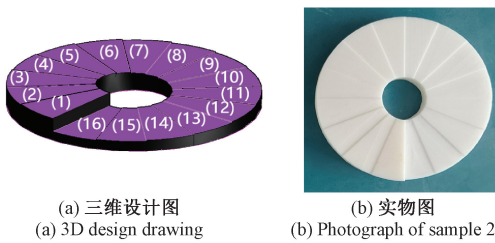


图 7 样品 2 设计图和实物

Fig. 7 The design drawing and photograph of sample 2

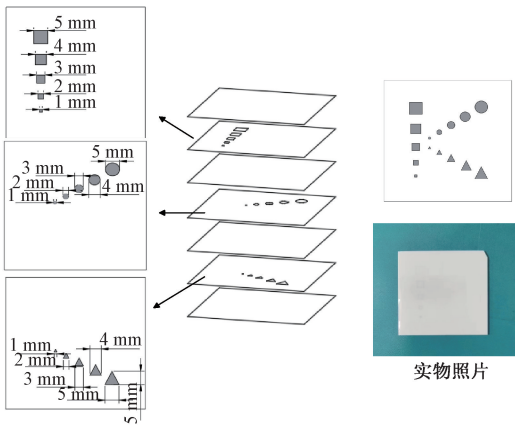


图 8 样品 3 设计与实物

Fig. 8 The design drawing and photograph of sample 3

台阶。图 10 中以①为起始,箭头方向依次对应于图 7 的每层台阶。

由图 9(d)和 10(d)可以看出,每一层台阶都清晰可见,即使是样品 1 中仅有 0.1 mm 高度的台阶也能被分辨。由图 9(a)和 10(a)可以看出,图像对比度高但分辨率低,由图 9(b)和 10(b)可以看出,结果分辨率较高但信号弱,图像对比度低。图 9(d)和 10(d)的成像很好地解决了这些问题,台阶间边缘更加明显,粘合部分得以区

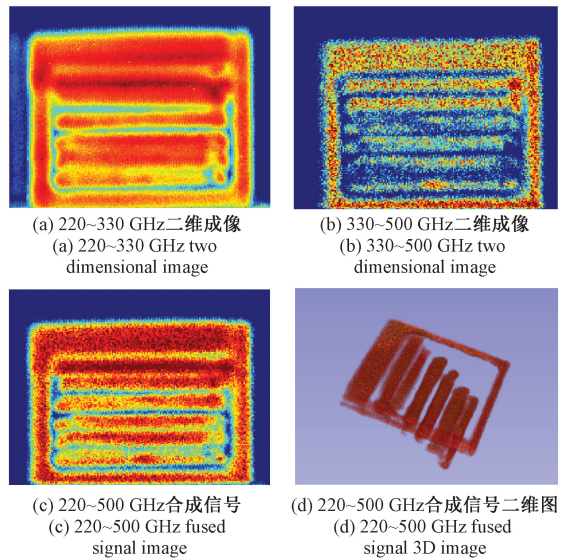


图 9 样品 1 太赫兹成像

Fig. 9 Terahertz imaging of sample 1

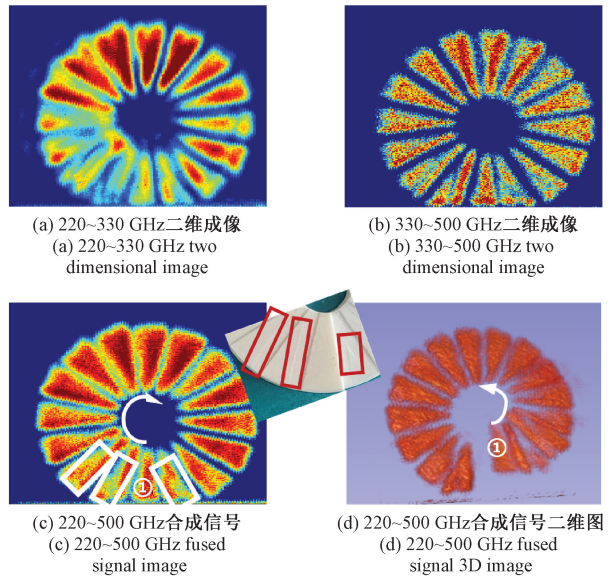


图 10 样品 2 太赫兹成像

Fig. 10 Terahertz imaging of sample 2

分,表明利用本文方法拼接后的信号进行成像能展现更丰富的样品信息,甚至识别出样品表面加工不平整之处(图 10(c)矩形框部分,其右上角是实物相对应的位置)。

分析样品 1 和 2 的二维切片图像,结果如图 11 和 12 所示。若两层台阶依次出现,且下一层出现时上一台阶的颜色较浅,则表明能分辨出这两层台阶。图 11 为样品 1 单个频段(220~300 GHz)和两个频段(220~500 GHz)拼接的 Z 轴方向的二维切片图(按自左向右、自上而下的顺序排列),对比显示,合成信号图像中台阶之间颜色对比更加鲜明,样品的每一层分离效果更加出色。样

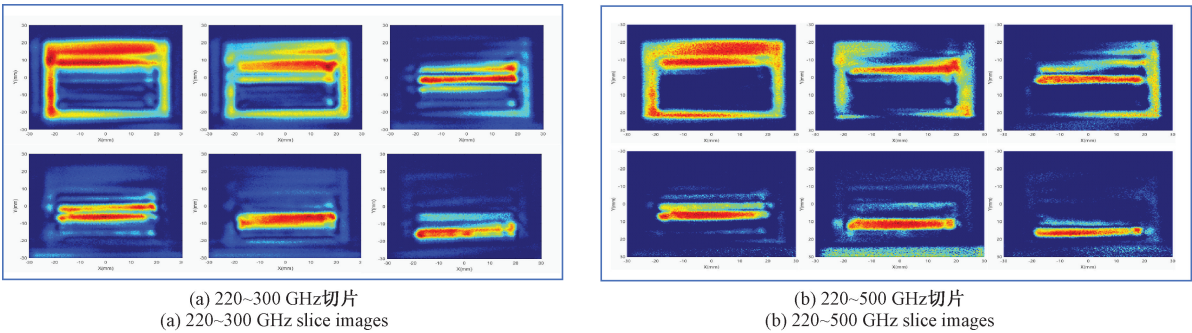


图 11 样品 1 二维切片图像(沿 Z 轴切片)
Fig. 11 Two-dimensional slice images of sample 1 (sliced along the Z-axis)

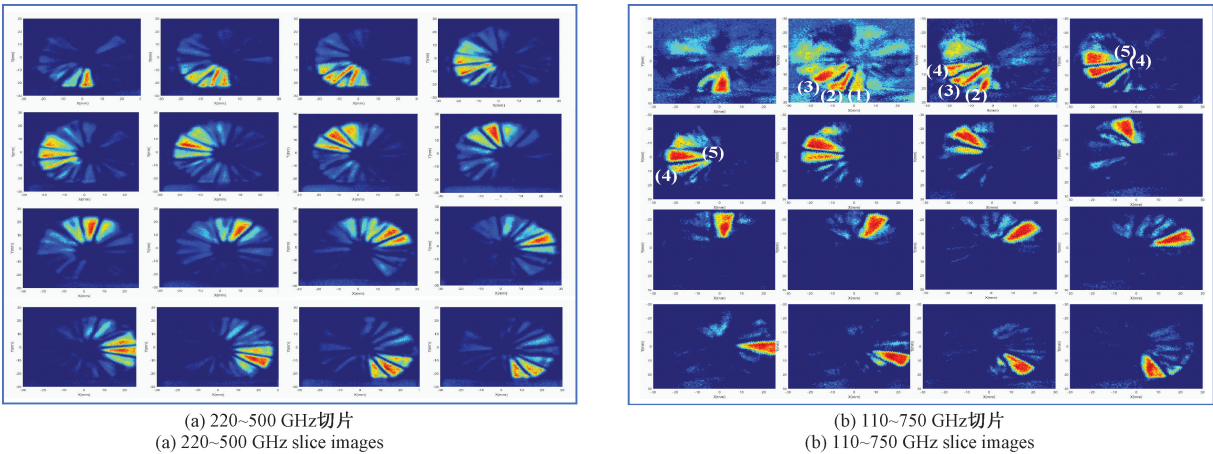


图 12 样品 2 二维切片图像(沿 Z 轴切片)
Fig. 12 Two-dimensional slice images of sample 2 (sliced along the Z-axis)

品 1 的①、②层间高度为 0.1 mm,这两层同时出现,未见分离,而由于边缘特性,图像中能看到两层的边界,更多频段拼接结果没有改善,不再展示。之后的每层颜色都明显红于其他,表明 0.4 mm(及以上)高度差的两层界面可以分辨。

图 12 为样品 2 两个频段(220~500 GHz)和 5 个频段(110~750 GHz)拼接的切片结果。显然,5 个频段拼接的成像效果更好,每一层台阶分辨得更清晰,即随着带宽的提高,系统的分辨力越来越好。由于加工的问题,图 10 中框出的台阶(主要是(2)和(3)台阶)被分割成两部分,反映在切片图像上就是颜色与附近的台阶难以区分。台阶(4)出现时,台阶(5)大部分显现。当台阶(5)出现时,台阶(4)又近乎消失。这可能是二者的层差不均匀导致的。除此之外,其他每一层都能明显分辨。这表明本系统能够分离最小高度差 0.2 mm 的两个界面。

对于多层结构的样品 3,三维结构如图 13 所示,具有明显的分层。由于缺陷在内部,直接分析二维切片图。如图 14(a)所示,单频段的切片图中存在方形缺陷和圆形缺陷同时出现的情况,表明这两层未完全分辨,而将两

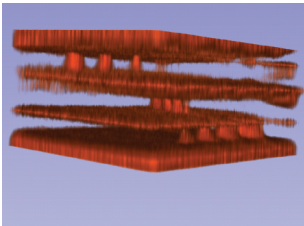
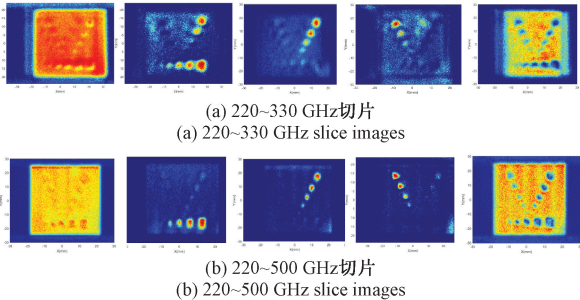


图 13 样品 3 三维图像(220~500 GHz)
Fig. 13 Three-dimensional image of sample 3 (220~500 GHz)



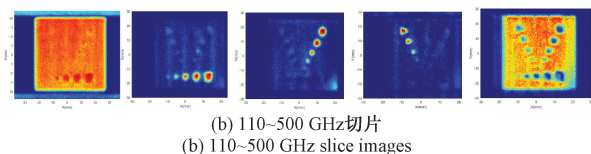


图14 样品3二维切片图像(沿Z轴切片)

Fig. 14 Two-dimensional slice images of sample 3
(sliced along the Z-axis)

个频段(图14(b))拼接之后,便可完全区分,但是每层最小的缺陷不能识别。4个频段拼接后(图14(c))方形和圆形最小缺陷开始显现。以上表明本文方法能够提高系统的分辨力,实现非金属物体表面和内部缺陷的高分辨成像。

4 结 论

由于太赫兹线性调频连续波成像的纵向分辨率要求日益提高,本文提出了一种多频段拼接的方法,该方法结合了基于参考信号的非线性校正算法和传统的宽带时域合成算法,显著简化了时域合成的流程。通过实际测量5个频段的数据,验证了该方法在提升纵向分辨率和材料介电常数测试精度方面的有效性。设计3种样品,对比单个频段信号和合成信号的成像结果,进一步证明了合成信号能够揭示更多的细节。进一步分析样品二维切片发现,随着拼接频段数量的增加,信号带宽提高,系统的分辨力明显提升。本文多频段拼接方法的流程简单易行,在材料介电常数测试和高精度无损检测方面表现出优越的实验效果,具有广泛的应用前景,不足之处是需要事先获取一个参考信号。

参考文献

- [1] 武帅, 屈浩, 涂昊, 等. 太赫兹技术应用进展[J]. 电子技术应用, 2019, 45(7): 3-7, 18.
WU SH, QU H, TU H, et al. Progress towards the application of Terahertz technologies[J]. Application of Electronic Technique, 2019, 45(7): 3-7, 18.
- [2] 朱浩. 太赫兹层析成像的理论实验研究[D]. 成都: 电子科技大学, 2020.
ZHU H. Research on theoretical and experimental study of Terahertz tomography[D]. Chengdu: University of Electronic Science and Technology of China, 2020.
- [3] 崔峻岳. 基于调频连续波的太赫兹成像系统的设计与搭建[D]. 武汉: 华中科技大学, 2020.
CUI L Y. Design and construction of terahertz imaging system based on frequency modulated continuous wave[D]. Wuhan: Huazhong University of Science and

Technology, 2020.

- [4] 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 spectrum detection of non-metallic coating defects[J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2020, 41(11): 129-136.
- [5] MURPHY K N, NAFTALY M, NORDON A, et al. Polymer pellet fabrication for accurate THz-TDS measurements[J]. Applied Sciences, 2022, 12(7): 3475.
- [6] SONG Q, ZHAO Y, REDO-SANCHEZ A, et al. Fast continuous terahertz wave imaging system for security[J]. Optics Communications, 2009, 282(10): 2019-2022.
- [7] 张振伟, 赵跃进, 缪寅宵, 等. 基于线性调频机制的太赫兹无损检测成像技术[J]. 光学学报, 2022, 42(4): 83-93.
ZHANG ZH W, ZHAO Y J, MIAO Y X, et al. Terahertz nondestructive testing imaging technology based on linear frequency modulation mechanism [J]. Acta Optica Sinica, 2022, 42(4): 83-93.
- [8] CRISTOFANI E, FRIEDERICH F, WOHSIEDLER S, et al. Nondestructive testing potential evaluation of a terahertz frequency-modulated continuous-wave imager for composite materials inspection[J]. Optical Engineering, 2014, 53(3): 031211.
- [9] SOULIMAN A, KAHL M, STOCK D, et al. Defect detection in bidirectional glass fabric reinforced thermoplastics based on 3-D-THz imaging[J]. IEEE Transactions on Terahertz Science and Technology, 2023, 13(3): 209-220.
- [10] CUOMO K M, PION J E, MAYHAN J T. Ultrawideband coherent processing [J]. IEEE Transactions on Antennas and Propagation, 1999, 47(6): 1094-1107.
- [11] CUOMO K M, PION J E, MAYHAN J T. Ultrawideband sensor fusion for BMD discrimination [C]. IEEE 2000 International Radar Conference, 2000: 31-34.
- [12] WANG C, HU W D, DU X Y, et al. A new method of HRR profile formation based on multiple radars LFM signal fusion [C]. The Fifth IEEE International Symposium on Signal Processing and Information Technology, 2005: 131-135.

- [13] 王成, 胡卫东, 杜小勇, 等. 稀疏子带的多频段雷达信号融合超分辨率距离成像[J]. 电子学报, 2006, 34(6): 985-990.
WANG CH, HU W D, DU X Y, et al. The super-resolution range imaging based on sparse band multiple frequency bands radars signal fusion [J]. Acta Electronica Sinica, 2006, 34(6): 985-990.
- [14] WANG C, HU W D, YU W X. Amplitude-phase compensation parameter estimation in multi-band radar signal fusion [J]. Journal of Electronics & Information Technology, 2004, 26: 475-480.
- [15] 王成, 胡卫东, 郁文贤. 基于 ESPRIT-LS 的幅相补偿参数估计算法[J]. 系统工程与电子技术, 2006, 28(3): 350-354, 375.
WANG CH, HU W D, YU W X. ESPRIT-LS based amplitude-phase compensation parameters estimation algorithm [J]. Systems Engineering and Electronics, 2006, 28(3): 350-354, 375.
- [16] 王成. 雷达信号层融合成像技术研究[D]. 长沙: 国防科学技术大学, 2006.
WANG CH. Research on radar signal level fusion imaging techniques [D]. Changsha: National University of Defense Technology, 2006.
- [17] LORD R T, INGGS M R. High range resolution radar using narrowband linear chirps offset in frequency [C]. Proceedings of the 1997 South African Symposium on Communications and Signal Processing, 1997: 9-12.
- [18] 张梅, 刘畅, 王岩飞. 频带合成超高分辨率机载 SAR 系统的相位误差校正[J]. 电子与信息学报, 2011, 33(12): 2813-2818.
ZHANG M, LIU CH, WANG Y F. Channel error correction for ultra-high resolution airborne SAR system with synthetic bandwidth [J]. Journal of Electronics & Information Technology, 2011, 33(12): 2813-2818.
- [19] 王岩飞, 刘畅, 李和平, 等. 基于多通道合成的优于 0.1 m 分辨率的机载 SAR 系统[J]. 电子与信息学报, 2013, 35(1): 29-35.
WANG Y F, LIU CH, LI H P, et al. An airborne SAR with 0.1 m resolution using multi-channel synthetic bandwidth [J]. Journal of Electronics & Information Technology, 2013, 35(1): 29-35.
- [20] 高梓植, 李志强. 基于合成带宽提高距离分辨率的改进方法[J]. 雷达科学与技术, 2017, 15(1): 95-98.
GAO Z ZH, LI ZH Q. An improved method for increasing range resolution based on synthesized bandwidth technique [J]. Radar Science and Technology, 2017, 15(1): 95-98.
- [21] LI W J, REN L X, SHA M H, et al. A synthetic wideband profiling method for high-speed target based on echo model inversion [C]. 2021 CIE International Conference on Radar (Radar), 2021: 1066-1071.
- [22] YI X, WANG C, LU M, et al. 4.8 A terahertz FMCW comb radar in 65 nm CMOS with 100 GHz bandwidth [C]. 2020 IEEE International Solid-State Circuits Conference, 2020: 90-92.
- [23] YI X, WANG C, CHEN X, et al. A 220-to-320-GHz FMCW radar in 65-nm CMOS using a frequency-comb architecture [J]. IEEE Journal of Solid-State Circuits, 2021, 56(2): 327-339.
- [24] FRIEDERICH F, MAY KH, BACCOUCHE B, et al. Terahertz radome inspection [J]. Photonics, 2018, 5(1): 1.
- [25] HU W, XU Z, HAN Z, et al. Ultra-wideband signal generation and fusion algorithm for high-resolution terahertz FMCW radar imaging [J]. Optics Express, 2022, 30(6): 9814-9822.
- [26] 胡伟东, 许志浩, 蒋环宇, 等. 超宽带太赫兹调频连续波成像技术[J]. 太赫兹科学与电子信息学报, 2023, 21(4): 563-571.
HU W D, XU ZH H, JIANG H Y, et al. Ultra-wideband terahertz FMCW imaging technology [J]. Journal of Terahertz Science and Electronic Information Technology, 2023, 21(4): 563-571.
- [27] 王与焯, 陈霖宇, 徐德刚, 等. 太赫兹波三维成像技术研究进展[J]. 中国光学, 2019, 12(1): 1-18.
WANG Y Y, CHEN L Y, XU D G, et al. Advances in Terahertz three-dimensional imaging techniques [J]. Chinese Optics, 2019, 12(1): 1-18.
- [28] 白霞, 毛士艺, 袁运能. 时域合成带宽方法: 一种 0.1 m 分辨率 SAR 技术[J]. 电子学报, 2006, 34(3): 472-477.
BAI X, MAO SH Y, YUAN Y N. Time domain synthetic bandwidth methods: A 0.1 m resolution SAR technique [J]. Acta Electronica Sinica, 2006, 34(3): 472-477.
- [29] VASCONCELOS M, NALLABOLU P, LI C. Range resolution improvement in FMCW radar through VCO's nonlinearity compensation [C]. 2023 IEEE Topical Conference on Wireless Sensors and Sensor Networks, 2023: 53-56.

[30] COOPER K B, DENGLER R J, LLOMBART N, et al. THz imaging radar for standoff personnel screening[J]. IEEE Transactions on Terahertz Science and Technology, 2011, 1(1): 169-182.

[31] 杜培甫. 太赫兹成像技术与图像增强算法研究[D]. 成都:电子科技大学, 2018.

DU P F. Research on the terahertz imaging technology and image enhancement algorithms [D]. Chengdu: University of Electronic Science and Technology of China, 2018.

作者简介



周子悦(通信作者),2018 年于东北林业大学获得学士学位,现为中北大学硕士研究生,主要研究方向为太赫兹成像技术。

E-mail: kikiqzrykx@163.com

Zhou Ziyue (Corresponding author) received her B.Sc. degree from Northeast Forestry University in 2018. She is currently a M. Sc. candidate at North University of China. Her main research interest includes terahertz imaging technology.



年夫顺,1983 年于西安交通大学获得学士学位,1989 年于西安交通大学获得硕士学位,现为中北大学电子测试技术国家重点实验室学术委员会副主任,中国电子科技集团公司测试仪器首席科学家,主要研究方向为微波毫米波测量技术及仪器、太赫兹测试技术研究和矢量网络分析技术。

E-mail: nfwxmnk825@163.com

Nian Fushun received his B. Sc. degree from Xi'an Jiaotong University in 1983, and received his M. Sc. degree from Xi'an Jiaotong University in 1989. He is currently the deputy director of the Academic Committee of the State Key Laboratory of Electronic Testing Technology at North University of China, and the chief scientist of testing instruments of China Electronics Technology Group Corporation. His main research interests include microwave and millimeter wave measurement technology and instruments, terahertz testing technology research, and vector network analysis technology.