

DOI: 10.13382/j.jemi.B2306843

# 基于调频连续波的太赫兹透视测距技术\*

周子悦<sup>1</sup> 年夫顺<sup>1,2</sup> 孙超<sup>2</sup>

(1. 中北大学仪器与电子学院 太原 030000; 2. 中电科思仪科技股份有限公司 青岛 266000)

**摘要:** 由于太赫兹波能够穿透非金属、非极性材料,太赫兹技术能够弥补激光技术的不足,实现对目标内部的透视测距。研究分析提出基于线性调频连续波的太赫兹透视测距技术,实现了多种材料的厚度以及多层介质材料的介电常数的非接触式测量,进一步拓展了太赫兹线性调频连续波的应用范围,为材料介电常数测量提供了新途径。以3种常见的材料作为检测目标,利用0.11~0.17 THz、0.17~0.22 THz、0.22~0.33 THz、0.33~0.50 THz 4个频段的太赫兹线性调频连续波实验验证方法的有效性,并证明厚度测量和介电常数测量的精度随信号带宽的增加而提高,误差最小均可达到1%以下。此外,以雷达天线罩陶瓷材料作为检测目标,应用太赫兹透视测距的原理,结合二维扫描架获取样品的全部信息,实现了对内部缺陷的透视成像与定位。

**关键词:** 太赫兹;线性调频连续波测距;介电常数;太赫兹成像

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

## Terahertz perspective ranging technology based on frequency modulated continuous wave

Zhou Ziyue<sup>1</sup> Nian Fushun<sup>1,2</sup> Sun Chao<sup>2</sup>

(1. School of Instrument and Electronics, North University of China, Taiyuan 030000, China;

2. Ceyear Technologies Co., Ltd., Qingdao 266000, China)

**Abstract:** Since terahertz waves can penetrate non-metallic and non-polar materials, terahertz technology can make up for the shortcomings of laser technology and realize perspective ranging of the inside of the target. Terahertz perspective ranging technology based on chirp continuous wave is proposed, which realizes the non-contact measurement of the thickness and dielectric constant of multilayer dielectric materials, further expands the application range of terahertz chirp continuous wave, and provides a new way for the measurement of the dielectric constant of materials. Taking three common materials as the detection target, method is verified by using terahertz linear frequency modulated continuous waves in four frequency bands: 0.11~0.17 THz, 0.17~0.22 THz, 0.22~0.33 THz, and 0.33~0.50 THz, and it is proved that the measurement accuracy increases with the increase of the signal bandwidth, with errors below one percent. In addition, taking the ceramic material used to make radomes as the inspection target, applying the principle of terahertz perspective ranging and using the two-dimensional scanning frame to obtain all the information of this sample, perspective imaging and positioning of internal defects are realized.

**Keywords:** terahertz; linear frequency modulated continuous wave ranging; permittivity; terahertz imaging

## 0 引言

在工业生产、航空航天、以及工程建设等领域中,往往需要精确测量物体的距离和厚度,以确保产品的质量和结构的稳定性、安全性。基于激光的测距技术作为当

今应用最广泛的测量方法<sup>[1-5]</sup>,有着无需人工接触、测量精度高、方向性好、易于传输和控制的优点<sup>[6]</sup>。然而激光对一些非金属材料的穿透能力较弱,无法探测到物体内部的结构,难以获得多层结构的层距或定位内部的缺陷。且现阶段的激光测厚<sup>[7-9]</sup>也只是针对物体的外部结构而言,需利用两个激光测距传感器,分别测量上、下表面的

距离,间接计算物体厚度<sup>[10-12]</sup>。太赫兹波对陶瓷、塑料等非金属、非极性材料具有较高的穿透能力,能够透视物体的内部结构,直接获得物体外部和内部不同层的间距,很好地弥补了激光测距的不足之处<sup>[13-14]</sup>。

目前国内外利用太赫兹波的透视能力进行厚度表征多采用太赫兹时域光谱 (THz-TDS),在医学制药<sup>[15]</sup>、制造生产<sup>[16-18]</sup>等方面已经发展得较为成熟。基于调频连续波 (frequency modulated continuous wave, FMCW) 的相关研究及应用相对较少。国外在这方面研究较多的是德国 Fraunhofer ITWM 研究所,他们提出有效的方法克服瑞利分辨率限制,实现高分辨率测量<sup>[19-21]</sup>。国内利用太赫兹调频连续波做无损检测成像的比较多<sup>[22-23]</sup>,专门做厚度测量相关研究的比较少<sup>[24-26]</sup>,他们的实验工作倾向于距离分辨率的研究,对测量的误差没有深入研究,且实验材料的选择比较单一。事实上,基于线性调频测距原理的太赫兹检测技术,虽无法获取光谱信息,但其系统稳定性强、输出功率高、探测深度更深。不仅能够测量距离、厚度和定位内部缺陷,还能够获得材料的介电性质,具有很大的应用前景和发展潜力。目前,微波频段的线性调频波测量厚度和介电常数的工作已有相关报道<sup>[27]</sup>,但是延伸到太赫兹频段仍然需要进一步的研究。

本文是针对太赫兹频段的线性调频信号开展研究,利用太赫兹频段的独特优势实现非接触式的厚度和介电常数测量。基于线性调频连续波透视测距原理,推导厚度测量的公式,进而反演材料的介电常数。选择 3 种常见材料的样品并构造多层介质样品,利用 4 个频段带宽分别为 60、50、110、170 GHz,频率范围覆盖 0.11 ~ 0.50 THz 的太赫兹线性调频波测量,同时对比不同频段的测试误差大小。此外,利用二维扫描架,对陶瓷材料进行二维扫描,实现内部缺陷的定位与检测。

## 1 太赫兹线性调频连续波的测距与校准

### 1.1 太赫兹线性调频波透视测距原理

线性调频连续波 (linear frequency modulated continuous wave, LFMCW) 是一种频率随着时间线性增长的连续波,是利用发射信号和回波信号之间的频率差来确定目标的距离。用一个简单的太赫兹线性调频系统 (图 1) 来说明实现距离测量的原理。图 1(a) 简单描述了太赫兹频段的线性调频波的产生与测量,将微波频段的线性调频信号馈送到倍频器产生太赫兹频段的信号,功分器将该太赫兹信号分为两路,一路作为本振输入混频器,一路经 TX 发射天线向外辐射遇目标反射,回波信号被 RX 天线接收并输入到混频器,两路信号混频输出包含目标信息的差频信号。

图 1(b) 表示一个调制周期  $T$  内,带宽为  $B$  的理想太

赫兹线性调频测距的原理。理想的太赫兹发射信号可以表示为:

$$S_{TX}(t) = A_{TX} \cdot \exp\left[j2\pi\left(f_0 t + \frac{1}{2}Kt^2\right) + \varphi_0\right] \quad (1)$$

其中,  $A_{TX}$ 、 $\varphi_0$  分别表示信号的幅度和初始相位,  $f_0$  为信号的起始频率,  $K = B/T$  是调制斜率。设目标的距离为  $R$ , 电磁波传播速度  $c = 3 \times 10^8$  m/s, 那么发射信号和回波信号之间的延时  $\tau = 2R/c$ , 为方便表达, 不考虑系统器件、链路等引入的相位误差, 并且忽略幅度的衰减变化的具体过程, 将反射的回波信号幅度简单表示为  $A_{RX}$ , 因此, 回波信号为:

$$S_{RX}(t) = A_{RX} \cdot \exp\left[j2\pi\left(f_0(t - \tau) + \frac{1}{2}K(t - \tau)^2\right) + \varphi_0\right] \quad (2)$$

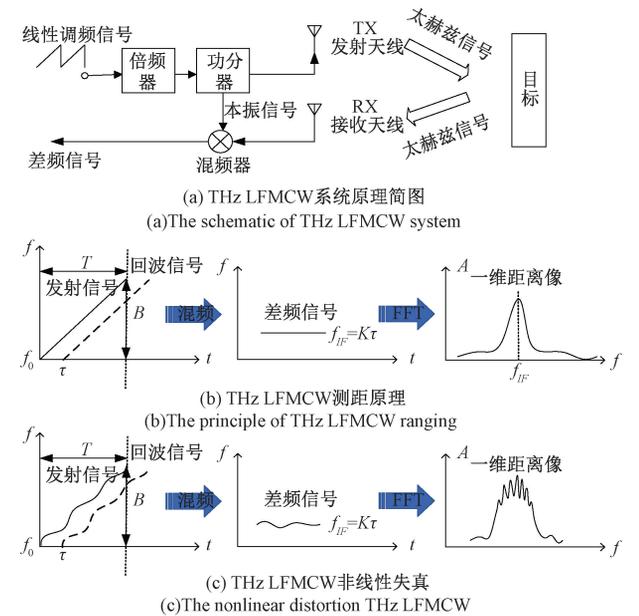


图 1 THz 线性调频测距原理

Fig. 1 The principle THz chirp ranging

按照图 1 所示流程将发射信号和回波信号混频得到差频信号:

$$S_{IF}(t) = A_{TX}A_{RX} \exp\left[j2\pi\left(Kt\tau + f_0\tau - \frac{1}{2}K\tau^2\right)\right] \quad (3)$$

该信号是一个单频信号,其时频图是一条平行于时间轴的直线,其频率值为  $f_{IF} = K\tau = 2KR/c$ , 与目标的距离成正比,这就是 LFMCW 测距的原理<sup>[28]</sup>。为了获得  $S_{IF}(t)$  的频率,对其做傅里叶变换,得到的幅频曲线称之为 1 维距离像 (图 1(b))。1 维距离像的峰值处对应的频率即为  $f_{IF}$ 。由此,可以推算出目标的距离:

$$R = \frac{cf_{IF}}{2K} = \frac{cTf_{IF}}{2B} \quad (4)$$

当太赫兹波的传播路径中遇到两种不同介质的边界,材料的介电常数发生变化,一部分能量可以穿过边界进入另一个介质,一部分能量会从边界反射回去。太赫兹波穿透表面进入目标的内部,当目标存在  $m$  个反射界面时,如图 2(b)~(d) 所示,相应地有  $m$  个延时,差频信号中包含  $m$  个频率成分,一维距离像可以观测到  $m$  个峰值,以此可将目标不同深度处的信息提取出来,实现透视测距的功能。

## 1.2 非线性补偿

如图 1(c) 所示,在实际的成像系统中,不可避免地会引入非线性的幅度和相位调制,产生的 LFMCW 信号的线性度恶化<sup>[29]</sup>,混频得到的差频信号的时频图也不再是一条直线,致使距离像旁瓣上升、主瓣下降等问题,难以定位到主峰,无法准确地获得目标的距离信息,影响后续测量。因此需要采用合适的方法补偿系统的非线性<sup>[30]</sup>。

采用文献[30]中的非线性补偿方法,设目标的差频信号中带有非线性的幅度调制项  $A_{IF}(t, \tau)$  和相位调制项  $\exp[j2\pi\delta_{IF}(t, \tau)]$ , 式(3)可改写为:

$$S_{IF_{nonlin}}(t) = A_{IF}(t, \tau) \exp[j2\pi(Kt\tau + f_0\tau)] \exp[j2\pi\delta_{IF}(t, \tau)] \quad (5)$$

为了消除非线性调制项,引入一个参考信号,其距离已知为  $R_0$ , 对应延时  $\tau_0$ , 根据式(5)该参考信号可以表示为:

$$S_{ref,IF}(t) = A_{ref,IF}(t, \tau_0) \exp[j2\pi(Kt\tau_0 + f_0\tau_0)] \exp[j2\pi\delta_{ref,IF}(t, \tau_0)] \quad (6)$$

具体补偿的过程是将目标的差频信号点除该参考信号,这时频率会偏移一个已知量  $K\tau_0$ , 为了计算绝对距离,需要在点除的基础上补偿已知项  $\exp[j2\pi(f_0 + Kt)\tau_0]$ , 以上非线性补偿过程可以用式(7)表达:

$$S_{IF}(t) = S_{IF_{nonlin}}(t) / S_{ref,IF}(t) \cdot \exp[j2\pi(f_0 + Kt)\tau_0] = \exp[j2\pi(Kt\tau_0 + f_0\tau_0)] \quad (7)$$

以上补偿过程中,对于较小的成像场景,能够满足目标和参考位置相近 ( $\tau \rightarrow \tau_0$ ), 那么补偿的幅度调制趋近于 1, 相位调制接近 0, 即:  $A_{IF}(t, \tau) / A_{ref,IF}(t, \tau_0) \rightarrow 1$ ,  $\delta_{IF}(t, \tau) - \delta_{ref,IF}(t, \tau_0) \rightarrow 0$ , 就不会发生明显的距离像展宽<sup>[31]</sup>。

## 2 太赫兹线性调频波的测厚与介电常数反演

根据太赫兹线性调频透视测距的原理,如图 2(a) 所示,当太赫兹 LFMCW 波(实线(1))从空气入射到介质 1

的前表面,其反射回波(实线(1)')可以定位前表面的距离  $R_1$ (延时  $\tau_1$ )。实线(2)表示穿过边界进入介质 1 中传播的太赫兹波,到达介质 1 的后表面也即介质 2 的前表面,又会产生一个包含后表面位置  $R_2$ (延时  $\tau_2$ )的回波信号(实线(2)')。这样,可以获得每一层界面的距离信息。

对于厚度为  $\Delta r_i$  的介质  $i, i=1, 2, \dots, m$ , 其前后两个表面的回波延时分别为  $\tau_i$  和  $\tau_{i+1}$ , 距离分别为  $R_i$  和  $R_{i+1}$ , 那么根据式(4), 电磁波在该层传播的距离(称之为电厚度)为:

$$\Delta R_{elec,i} = R_{i+1} - R_i = \frac{cT(f_{IF,i+1} - f_{IF,i})}{2B} = \frac{cT\Delta f_{IF,i}}{2B} \quad (8)$$

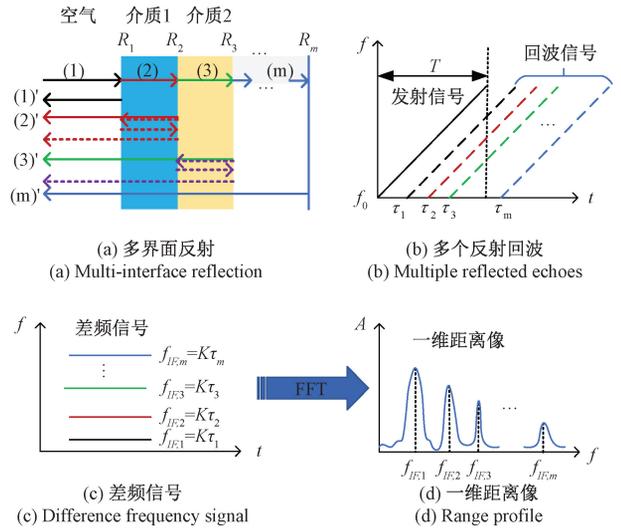


图 2 多层材料测厚与介电常数反演

Fig. 2 Multilayer material thickness measurement and permittivity inversion

值得注意的是,由空气进入介质时,电磁波的传播速度随之发生变化,不再适合用  $c$  表示,且不同介质中电磁波的传播速度也并不相同,根据麦克斯韦方程组,电磁波在介质中的传播速度与介质材料的介电常数有关。在第  $i$  层介质中传播速度表达式为:

$$v_i = \frac{c}{\sqrt{\epsilon_i}} \quad (9)$$

那么该层样品的实际厚度  $\Delta r_i$  可以计算为:

$$\Delta r_i = v_i \cdot \frac{T\Delta f_{IF,i}}{2B} = \frac{cT\Delta f_{IF,i}}{2\sqrt{\epsilon_i}B} = \frac{\Delta R_{elec,i}}{\sqrt{\epsilon_i}} \quad (10)$$

由此可得该层材料的介电常数为:

$$\epsilon_i = \left( \frac{\Delta R_{elec,i}}{\Delta r_i} \right)^2 \quad (11)$$

因此,对于一个已知几何厚度的介质,可以通过太赫兹 LFMCW 的一维距离像,如图 2(d) 所示,确定两个峰值之间的频率差,获取该层的电厚度,再利用上式便可计

算得到该介质的介电常数。

### 3 实验与结果

#### 3.1 实验系统介绍

本文借助中电科思仪科技股份有限公司的太赫兹物质结构三维成像仪(图 3),获取 0.11~0.17 THz(带宽 60 GHz)、0.17~0.22 THz(带宽 50 GHz)、0.22~0.33 THz(带宽 110 GHz)、0.33~0.50 THz(带宽 170 GHz)4 个频段的数据进行处理。“黑箱”内部存在多个频段的太赫兹收发模块和光学器件等,将各频段的信号通过光学器件合为一路从通光孔中心发出,同时入射到样品上,并接收各频段的反射信号。该系统可同时获得各频段的数据,节省测量时间。实验时,将样品放在夹具上,通过二维扫描架控制样品的位置,测量获得各频段的信号。

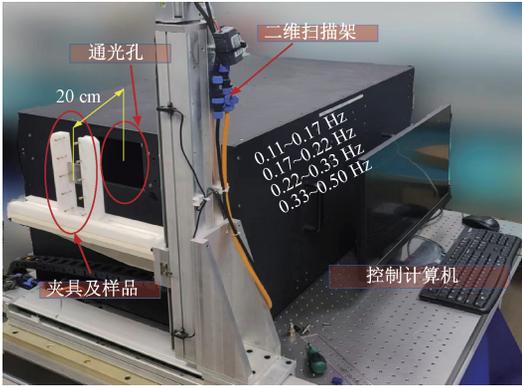


图 3 实验系统

Fig. 3 Experimental system

除了上述的频率范围和带宽之外,该系统还有一些重要的技术参数如:调频时间  $t = 100 \mu\text{s}$ 、采样率:  $f_s = 200 \text{ M/s}$ 、焦距:  $R_0 = 200 \text{ mm}$ 。

实验时,应首先采集金属板的数据作为参考信号  $S_{ref,IF}(t)$ ,再采集样品的数据  $S_{IFnonlin}(t)$ ,由于金属板和样品都夹持在同一位置,满足式(7)的使用条件( $\tau \rightarrow \tau_0$ ),

因此可按照 1.2 节的方法进行非线性矫正,得到较为理想的目标数据  $S_{IF}(t)$ 再做 FFT 变换得到一维距离像,最后利用式(10)、(11)计算厚度和介电常数。计算绝对距离时,非线性补偿的已知项  $\exp[j2\pi(f_0 + Kt)\tau_0]$  中的  $\tau_0$  用  $\tau_0 = 2R_0/c$  代入即可。

#### 3.2 基于太赫兹透视测距的厚度表征

本文选用了 3 种常见材料的样品进行实验,这 3 种样品的实物图和相关参数如表 1 所示。首先用游标卡尺分别测量聚四氟乙烯圆片、石英圆片、氧化铝陶瓷圆片的厚度作为标准值(列入表 1)对照,然后利用本文实验系统获取参考数据和样品的数据。

表 1 样品信息

Table 1 The information of samples

样品编号	实物图	材质	厚度/mm	介电常数标准值
1		聚四氟乙烯	3.53	2.06
2		石英	2.92	3.8
3		氧化铝陶瓷	2	9.87

将 3 个样品依次用夹具固定在扫描架上,调整位置使之位于通光孔中心附近,分别进行定点测试并做非线性矫正和 FFT,得到聚四氟乙烯、石英和氧化铝陶瓷在 4 个频段中的一维距离像的结果分别如图 4(a)~(c)所示,图中已根据式(4)将横轴转换为距离轴,可直接获得两个峰值之间的距离(即电厚度),根据式(10)计算样品的实际厚度,并与标准值对比,归纳总结为表 2。表中误差值=(实测值-标准值)/标准值。表格中并未按照频率增加顺序,而是按各频段带宽提高的顺序排列。分析表格数据可知,随着带宽的增加,测厚精度不断提升,误差最小可达到百分之零点几,与实际标准值相差最少仅几微米。

表 2 样品测厚结果

Table 2 The result of the thickness measurement

样品		0.17~0.22 THz (带宽 50 GHz)	0.11~0.17 THz (带宽 60 GHz)	0.22~0.33 THz (带宽 110 GHz)	0.33~0.50 THz (带宽 170 GHz)
聚四氟乙烯	实验值/mm	4.154 6	3.323 4	3.484 4	3.573 5
	误差值	17.69%	5.85%	1.29%	1.23%
石英	实验值/mm	3.383 2	3.201 6	2.961 5	2.932 2
	误差值	15.86%	9.64%	1.42%	0.42%
氧化铝陶瓷	实验值/mm	1.741 4	1.779 0	2.028 5	2.007 2
	误差值	12.93%	11.05%	1.43%	0.36%

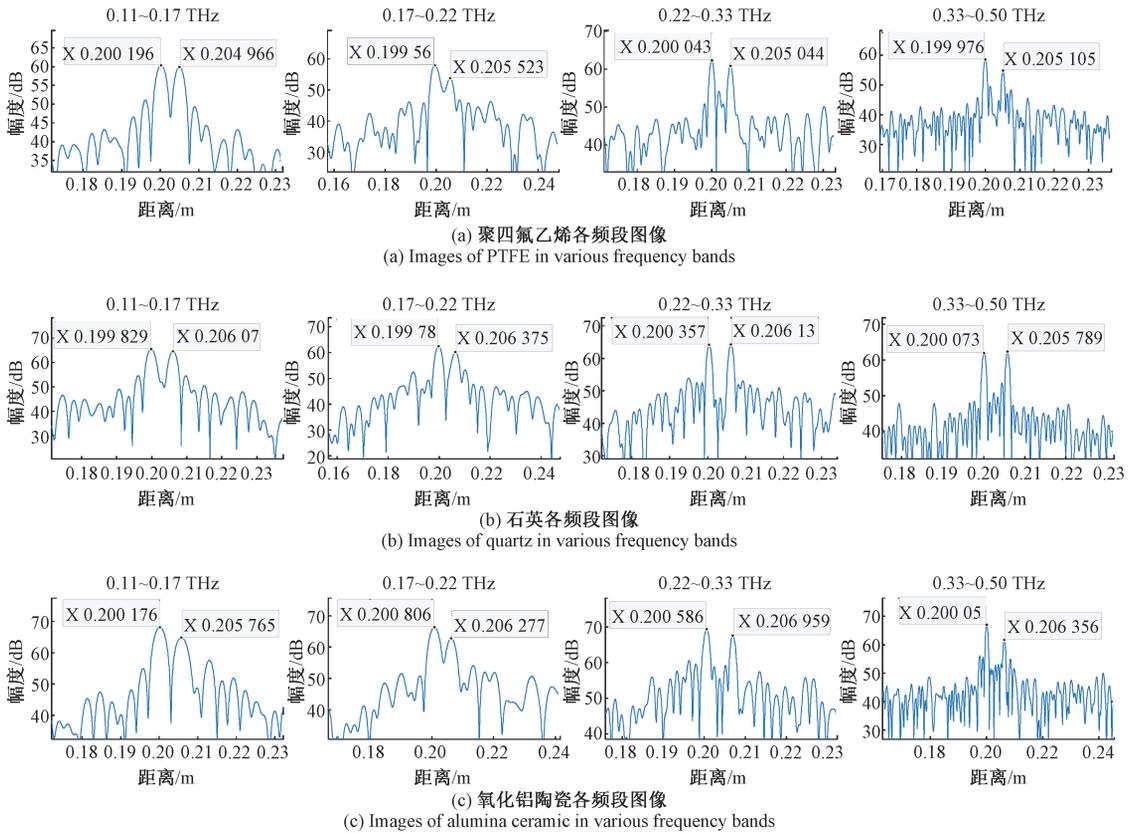


图 4 聚四氟乙烯、石英和氧化铝陶瓷的一维距离像

Fig. 4 The range profiles of PTFE, quartz and alumina ceramic

参考文献 [27] 微波频段的实验中, 调制带宽为 1 GHz, 调频周期为 20 ms, 实验样品为 10 和 16 cm 的木材, 其中与本文类似的测量方法的测量结果为 9.48 和 18.95 cm, 误差分别为 5.2% 和 18.4%。相比而言, 本文的带宽达 50GHz 及以上, 纵向分辨率更好, 能够测量毫米级厚度的样品, 并且能够做到更小的误差。

### 3.3 介电常数的反演

现阶段测量材料介电常数的方法有很多, 如同轴空气线法<sup>[32]</sup>、波导传输线法<sup>[33]</sup>、准光谐振腔法<sup>[34]</sup>等, 测试的频率范围已经覆盖几百 MHz~几百 GHz, 已经能够满足大部分样品的测试需求。这些方法不仅可以测量介电常数还可以测量材料的其他电磁参数, 但是都需要购买专用的设备且测试步骤较为复杂。对于比如 LFM CW

测量样品厚度的这一应用场景中, 只需要介电常数这一个参数, 采用以上方法无疑会增加时间和经济成本。因此如果能够利用本文中太赫兹 LFM CW 反演材料介电常数的方法, 事先测量某些材料样品的介电常数, 建立数据库, 之后再测量同种材料样品的厚度时, 就可以直接调取数据使用。

由于准光谐振腔法具有较高的测量精度和稳定性, 本文利用中电科思仪科技股份有限公司的准光谐振腔法测试平台测试这 3 种样品的介电常数作为实验的标准值 (表 1)。利用图 4 和式 (11) 计算介电常数的实验值 (表 3), 并与标准值对比分析结果表明, 通过太赫兹线性调频波测量样品厚度反演材料介电常数的方法是可行的, 并且测量的准确度也是随着带宽的增加而提高。

表 3 样品介电常数

Table 3 The result of the permittivity measurement

样品		0.17~0.22 THz (带宽 50 GHz)	0.11~0.17 THz (带宽 60 GHz)	0.22~0.33 THz (带宽 110 GHz)	0.33~0.50 THz (带宽 170 GHz)
聚四氟乙烯	实验值	2.853 5	1.825 9	2.007 1	2.111 1
	误差值	38.52%	11.36%	2.57%	2.48%
石英	实验值	5.101 1	4.568 2	3.908 7	3.831 9
	误差值	34.24%	20.22%	2.86%	0.84%
氧化铝陶瓷	实验值	7.483 0	7.809 2	10.153 8	9.941 4
	误差值	24.18%	20.88%	2.88%	0.72%

为检测多层介质材料的测试精度,将 3 个样品两两固定在一起,尽量避免样品之间的空气缝隙,人为构造具有两种介质的多层反射界面的样品。由于前两个频段的误差太大,测量结果不能为后续实验所用,对结果分析没有任何参考意义,多层样品的实验只采用第 3 个频段和第 4 个频段的数据。同样地,得到图 5~7 以及表 4 的结果。图中标记为“前”的介质是太赫兹波入射的第 1 层介质,标记为“后”的介质是第 2 层。根据图 2(a) 多层反射面的示意图,两层介质构成 3 个反射面,而图像中确实出现了 3 个较为明显的峰值,介电常数的计算结果也与标准值接近,因此,本文方法对多层介质的样品也具有适用性,并且也能达到百分之零点几的误差。相比于参考文献[27]只测量了 10 cm 厚的木材的介电常数,本实验针对多层介质的测量具有进步意义,给多层材料的介电常数测量提供了一种思路。

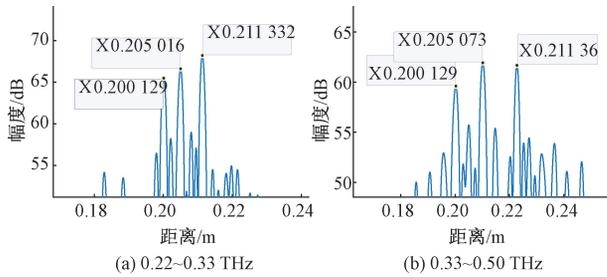


图 5 聚四氟乙烯(前)陶瓷(后)一维距离像

Fig. 5 The range profile of PTFE (front) and ceramic (back)

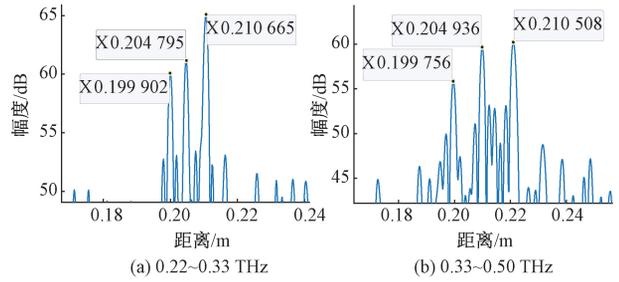


图 6 聚四氟乙烯(前)石英(后)一维距离像

Fig. 6 The range profile of PTFE (front) and quartz (back)

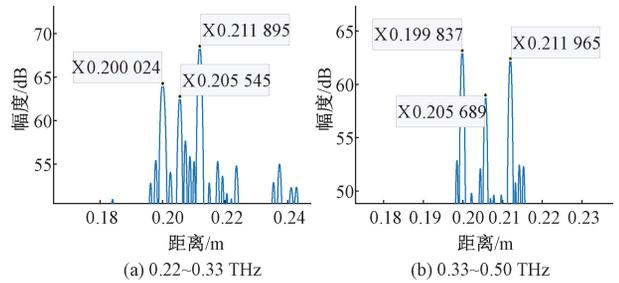


图 7 石英(前)陶瓷(后)一维距离像

Fig. 7 The range profile of quartz (front) and ceramic (back)

### 3.4 基于二维机械扫描的太赫兹透视成像

根据太赫兹透视测距的原理可以获得样品某一位置不同深度处的信息,采用二维扫描架对待测样品进行全

表 4 多层样品介电常数

Table 4 The permittivity of Multilayer samples

频段	聚四氟乙 烯(前)	氧化铝陶 瓷(后)	频段	聚四氟乙 烯(前)	石英(后)	频段	石英(前)	氧化铝 陶瓷(后)
0.22~0.33 THz	实验值	1.916 6	0.22~0.33 THz	实验值	1.921 3	0.22~0.33 THz	实验值	3.574 9
(带宽 110 GHz)	误差值	6.96%	(带宽 110 GHz)	误差值	6.73%	(带宽 110 GHz)	误差值	5.92%
0.33~0.50 THz	实验值	1.961 6	0.33~0.50 THz	实验值	2.153 3	0.33~0.50 THz	实验值	4.016 5
(带宽 170 GHz)	误差值	4.78%	(带宽 170 GHz)	误差值	4.53%	(带宽 170 GHz)	误差值	5.70%
								10.080 6
								2.13%
								9.847 0
								0.23%

覆盖式 XY 二维空间扫描,便可以获得样品所有位置的信息,实现样品的透视成像,检测内部缺陷的形貌。

如图 8 所示,在雷达天线罩陶瓷材料样品(70 mm×30 mm×5.03 mm)的内部预制一个直径为 10 mm,深度为 1 mm 的圆柱形空气层缺陷和一个长 30 mm,宽 2 mm,深度 1 mm 的长条形空气层缺陷。将样品固定在扫描架上,设置扫描范围为 60 mm×60 mm,扫描步进间隔为 0.5 mm,扫描速度为 4 mm/s 对该样品进行二维扫描成像。图 9 展示了各频段缺陷的成像结果。在低频段的图 9(a)和(b)中只能看到宽度较大的圆形缺陷,且其轮廓有变形。而在高频段的图 9(c)和(d)的中,信号带宽更宽,图像分辨率也更高,两个缺陷都清晰可见。

为了精确检测缺陷的位置,测量 0.33~0.50 THz 频段样品无缺陷处和有缺陷处的数据,获得的一维距离像如图 10 所示,据图 10 左图计算该材料的介电常数约为 2.991 6。对于图 10 右图,从左至右标记出来的峰值依次代表陶瓷上表面、缺陷上表面、缺陷下表面和陶瓷下表面的位置。那么可以计算得到缺陷在陶瓷上表面以下 1.98 mm 的位置。

以上结果表明,结合二维扫描,基于线性调频的太赫兹透视测距技术可以有效检测物体内部缺陷的形貌,确定缺陷的位置。该技术可以协助检测天线罩的加工质量,具备实际的应用价值。



图 8 样品实物、内部缺陷示意图与二维扫描架

Fig. 8 The sample, schematic diagram of internal defects and 2D scanning rack

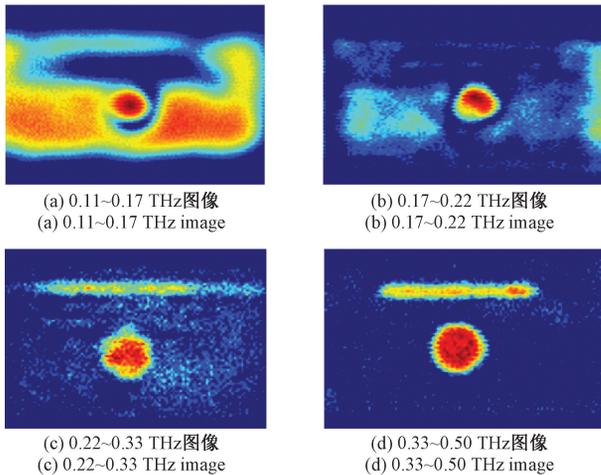


图 9 样品内部缺陷成像图

Fig. 9 Imaging of defects inside the sample

## 4 结 论

本文简单分析了太赫兹波测距技术相较于激光测距技术的优势,基于太赫兹线性调频透视测距原理实现精准测量样品的厚度。反演介电常数的计算公式,并通过实验数据验证太赫兹线性调频连续波测量多层材料介电常数的有效性,并初步得出结论,提高信号的带宽有利于提高测量的精度。最后对预制内部缺陷的雷达天线罩陶瓷材料进行二维扫描,检测缺陷的形貌和位置。基于太赫兹线性调频连续波的透视测距技术,可以实现非接触式高精度测厚,在工业产品尺寸测量中具有良好的应用

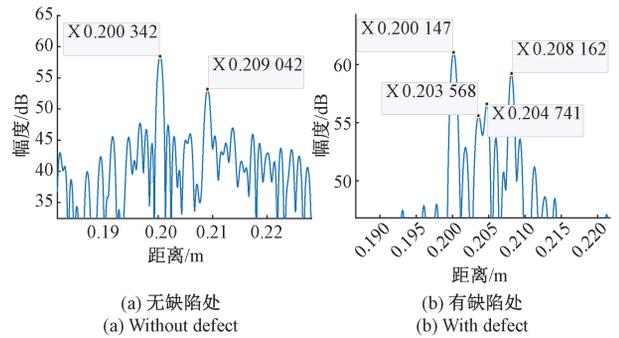


图 10 无缺陷处和有缺陷处一维距离像

Fig. 10 The range profile of defects inside the sample without defect and with defect

前景;可以精准测量材料的介电常数,未来可以应用到材料电磁参数测试领域;可以检测内部的缺陷信息,在无损伤检测领域也有着巨大的应用价值。

## 参考文献

- [1] 王一帆, 徐欣, 谈宜东. 激光精密测距技术进展[J]. 航天返回与遥感, 2021, 42(6): 22-33.  
WANG Y F, XU X, TAN Y D, Laser precision ranging technology[J]. Spacecraft Recovery & Remote Sensing, 2021, 42(6): 22-33.
- [2] ZIJIAN L, MIN T, QI Y, et al. Laser ranging method based on dual-threshold echo pulse prediction and correction[J]. Measurement Science and Technology, 2023, 34(11): 115003.
- [3] KOSTAMOVAARA J, HUIKARI J, HALLMAN L, et al. On laser ranging based on high-speed/energy laser diode pulses and single-photon detection techniques[J]. IEEE Photonics Journal, 2015, 7(2): 1-15.
- [4] 李欢, 余红英. 基于 FPGA 的高性能激光雷达测距系统设计[J]. 电子测量技术, 2021, 44(20): 6-10.  
LI H, YU H Y. Design of high performance lidar ranging system based on FPGA [J]. Electronic Measurement Technology, 2021, 44(20): 6-10.
- [5] 董驰, 赵宇, 张翀, 等. 基于 FPGA 的相位式激光测距系统[J]. 国外电子测量技术, 2021, 40(8): 36-40.  
DONG CH, ZHAO Y, ZHANG CH, et al. Phase laser ranging system based on FPGA [J]. Foreign Electronic Measurement Technology, 2021, 44(8): 36-40.
- [6] 冯小雷, 崔忠信, 杨现良, 等. 基于激光测距的板材厚度在线检测技术研究[J]. 中国设备工程, 2018(17): 62-63.  
FENG X L, CUI ZH X, YANG X L, et al. Research on online detection technology of plate thickness based on laser ranging[J]. China Plant Engineering, 2018(17): 62-63.

- [ 7 ] 孙晶玢. 基于差分激光三角法的水面油膜测厚系统光学传感器设计[D]. 天津:天津大学,2012.  
SUN J B. Research and development of optical sensor for oil film thickness measurement on the water surface based on differential laser trigonometry [ D ]. Tianjin: Tianjin University, 2012.
- [ 8 ] 汪石农,程志军,任超洋,等. 一种双臂激光测距系统设计和误差分析[J]. 电子测量与仪器学报,2022, 36(10):18-25.  
WANG SH N, CHENG ZH J, REN CH Y, et al. Design and error analysis of a two-arm laser ranging system[J]. Journal of Electronic Measurement and Instrumentation, 2022, 36(10):18-25.
- [ 9 ] SHLYCHKOV V, SHARDAKOV N. Laser thickness gauges in pipe rolling production [ C ]. AIP Conference Proceedings, 2022, 2456: 020048.
- [ 10 ] LÜ Q N, GE B ZH, YAO W D, et al. A method for measuring the thickness of transparent oil film on water surface using laser trigonometry[J]. Optics and Lasers in Engineering, 2011, 49(1): 13-15.
- [ 11 ] 王琦玮. 侧焦线法激光三角测厚仪[D]. 武汉:华中科技大学,2020.  
WANG Q W. Thickness measure instrument by laser triangulation with side focal line illumination [ D ]. Wuhan: Huazhong University of Science and Technology, 2020.
- [ 12 ] 郑骥,陈乃玉,姚辉,等. 贮箱壁板激光测厚数据处理技术研究[J]. 制造技术与机床, 2021 (3): 107-111.  
ZHENG J, CHEN N Y, YAO H, et al. The data processing technology for laser thickness measurement of tank sheets [ J ]. Manufacturing Technology & Machine Tool, 2021 (3): 107-111.
- [ 13 ] 刘钊,陈刚,赵爽,等. 多层隔热结构太赫兹无损检测及粘接缺陷识别[J]. 无损探伤, 2023, 47(2): 17-21.  
LIU ZH, CHEN G, ZHAO SH, et al. Terahertz non-destructive testing and bonding defect identification of multilayer heat-proof structure [ J ]. Nondestructive Testing Technology, 2023, 47(2): 17-21.
- [ 14 ] NÜBLER D, JONUSCHEIT J. Terahertz based non-destructive testing (NDT): Making the invisible visible[J]. Tm-Technisches Messen, 2021, 88(4): 199-210.
- [ 15 ] RUSSE I S, BROCK D, KNOP K, et al. Validation of terahertz coating thickness measurements using X-ray microtomography [ J ]. Molecular Pharmaceutics, 2012, 9(12): 3551-3559.
- [ 16 ] GREGORY I S, MAY R K, TADAY P F, et al. Extending terahertz paint thickness measurements to advanced industry-standard automotive paint structures [ C ]. 2016 41st International Conference on Infrared, Millimeter, and terahertz waves ( IRMMW-THz ), Copenhagen, Denmark, 2016: 1-2.
- [ 17 ] ZHAI M, LOCQUETET A, ROQUELET C, et al. Thickness characterization of multi-layer coated steel by terahertz time-of-flight tomography [ J ]. NDT & E International, 2020, 116.
- [ 18 ] 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.
- [ 19 ] SCHREINER N S, SAUER-GREFF W, URBANSKY R, et al. Multilayer thickness measurements below the rayleigh limit using FMCW millimeter and terahertz waves [ J ]. Sensors, 2019, 19(18): 3910.
- [ 20 ] SCHREINER N S, SAUER-GREFF W, BACCOUCHE B, et al. High-resolution FMCW millimeter-wave and terahertz thickness measurements [ J ]. 2017 47th European Microwave Conference ( EuMC ), Nuremberg, Germany, 2017: 1187-1190,.
- [ 21 ] LIEBERMEISTER L, NELLEN S, KOHLHAAS R B, et al. Optoelectronic frequency-modulated continuous-wave terahertz spectroscopy with 4 THz bandwidth [ J ]. Nat Commun, 2021, 12(1): 1071.
- [ 22 ] 孙凤山,范孟豹,曹丙花,等. 基于混沌映射与差分进化自适应教与学优化算法的太赫兹图像增强模型[J]. 仪器仪表学报,2021,42(4):92-101.  
SUN F SH, FAN M B, CAO B H, et al. The terahertz image enhancement model based on adaptive teaching-learning based optimization algorithm with chaotic mapping and differential evolution [ J ]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2021, 42(4): 92-101.
- [ 23 ] 游承武. 太赫兹调频连续波成像技术研究 [ D ]. 武汉:华中科技大学, 2022.  
YOU CH W. Research on terahertz frequency modulation continuous wave imaging technology [ D ]. Wuhan: Huazhong University of Science and Technology, 2022.
- [ 24 ] 张晨,史再峰,郭炜,等. 调频连续波太赫兹雷达近程测距精度提高算法 [ J ]. 传感器与微系统, 2016, 35(9):141-143,151.  
ZHANG CH, SHI Z F, GUO W, et al. Short-range measurement precision improvement algorithm for frequency modulated continuous wave terahertz radar [ J ].

- Transducer and Microsystem Technologies, 2016, 35(9): 141-143, 151.
- [25] HU W, XU Z, HAN Z, et al. Ultra-wideband signal generation and fusion algorithm for high-resolution terahertz FMCW radar imaging[J]. Opt 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] 曾秋雨. 基于 FMCW 雷达的测厚技术研究[D]. 电子科技大学, 2023.  
ZENG Q Y. Research on thickness measurement technology based on FMCW radar [D]. University of Electronic Science and Technology of China, 2023.
- [28] 卢铮, 李超, 方广有. 调频连续波太赫兹雷达方案研究及系统验证[J]. 电子测量技术, 2015, 38(8): 58-63.  
LU ZH, LI CH, FANG G Y. Scheme research and system verification of the terahertz LFMCW radar [J]. Electronic Measurement Technology, 2015, 38(8): 58-63.
- [29] 胡仕兵, 汪学刚, 姒强. 超宽带线性调频信号产生器系统失真分析[J]. 电子测量与仪器学报, 2007, 21(6): 71-76.  
HU SH B, WANG X G, SI Q. System distortion analysis of ultra wide-band LFM signal generator [J]. Journal of Electronic Measurement and Instrumentation, 2007, 21(6): 71-76.
- [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] 郝居博. 太赫兹雷达三维成像关键技术研究[D]. 成都: 电子科技大学, 2021.  
HAO J B. Research on key technology of three-dimensional imaging of terahertz radar [D]. Chengdu: University of Electronic Science and Technology of China, 2021.
- [32] 赵才军, 蒋全兴, 景莘慧. 改进的同轴传输/反射法测量复介电常数[J]. 仪器仪表学报, 2011, 32(3): 695-700.
- ZHAO C J, JIANG Q X, JING SH H. Determining complex permittivity with improved transmission / reflection method using coaxial line [J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2011, 32(3): 695-700.
- [33] 李涛, 年夫顺. 波导传输线材料电磁参数测试及适应性研究[J]. 测控技术, 2014, 33(7): 148-151, 156.  
LI T, NIAN F SH. Testing and adaptability research on material electromagnetic parameters of waveguide transmission line [J]. Measurement & Control Technology, 2014, 33(7): 148-151, 156.
- [34] 聂瑞星. 准光学谐振腔法复介电常数变温测试系统研究[D]. 成都: 电子科技大学, 2013.  
NIE R X. Research on quasi-optical resonator method complex permittivity variable temperature test system [D]. Chengdu: University of Electronic Science and Technology of China, 2013.

### 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. Now she is a M. Sc. candidate in 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: nfwxwmmk825@163.com

**Nian Fushun** received his B. Sc. degree from Xi'an Jiaotong University in 1983 and M. Sc. degree from Xi'an Jiaotong University in 1989, respectively. Now he is the deputy director of the Academic Committee of the State Key Laboratory of Electronic Testing Technology of 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.