

基于线性调频机制的太赫兹无损检测成像技术

张振伟^{1,2}, 赵跃进^{1*}, 缪寅宵³, 张存林²¹北京理工大学光电学院精密光电测试仪器及技术北京市重点实验室, 北京 100081;²首都师范大学物理系太赫兹光电子学教育部重点实验室, 北京市太赫兹与红外工程技术研究中心, 北京市成像理论与技术高精尖创新中心, 北京 100048;³北京航天计量测试技术研究所, 北京 100076

摘要 基于全固态电子器件和零中频机制, 设计了基于调频连续波的太赫兹无损检测成像系统。所提系统的有效频率范围为 9.375~13.75 GHz, 经 24 倍频后自由空间中的频率范围为 0.225~0.330 THz。采用单个喇叭天线与定向耦合器结合, 实现收发一体, 并利用光学透镜组对太赫兹波束进行准直聚焦。对准光系统的波束质量进行了优化, 提高了系统的信噪比, 确保了在现有参数条件下的最佳空间分辨率。同时, 采用相位聚焦的方法对系统进行了非线性矫正, 使得深度分辨率接近理论分辨率。系统采用直线扫描和旋转扫描组合的方式, 实现了柱坐标三维数据的获取。利用所提系统对高压绝缘端子进行了检测评估, 并重构了全视角透视图像, 实现了目标三维结构在实空间和像空间的孪生对应。此外, 所提系统能够准确地显示绝缘端子内部的异常区域, 有助于直观地评估被测目标的内部状态, 进而可以进一步满足工业领域无损检测的需求。

关键词 成像系统; 太赫兹波; 太赫兹成像; 无损检测; 调频连续波; 绝缘端子

中图分类号 O438

文献标志码 A

doi: 10.3788/AOS202242.0411002

Terahertz Nondestructive Testing Imaging Technology Based on Linear Frequency Modulation Mechanism

Zhang Zhenwei^{1,2}, Zhao Yuejin^{1*}, Miao Yinxiao³, Zhang Cunlin²¹Beijing Key Laboratory for Precision Optoelectronic Measurement Instrument and Technology,

School of Optics and Photonics, Beijing Institute of Technology, Beijing 100081, China;

²Key Laboratory of Terahertz Optoelectronics, Beijing Engineering Research Center of Terahertz and Infrared Technology,

Beijing Advanced Innovation Center for Imaging Theory and Technology, Department of Physics,

Capital Normal University, Beijing 100048, China;

³Beijing Aerospace Institute for Metrology and Measurement Technology, Beijing 100076, China

Abstract A terahertz nondestructive testing imaging system with frequency modulated continuous wave is developed based on all-solid-state electronic devices and the zero intermediate frequency mechanism. The effective frequency range of the proposed system is 9.375–13.75 GHz, and the frequency ranges from 0.225 to 0.330 THz after frequency multiplication by a factor of 24 in the free space. A single horn antenna is combined with a directional coupler to achieve transceiver integration, and the terahertz beam is collimated and focused using a pair of lenses. The beam quality of the quasi-optical system is optimized and the signal-to-noise ratio of the system is improved, by which the best spatial resolution is ensured under current parameters. At the same time, nonlinear correction of the system is carried out by the phase focusing method so that the depth resolution is close to the

收稿日期: 2021-07-14; 修回日期: 2021-08-16; 录用日期: 2021-08-27

基金项目: 国家自然科学基金重点项目(61935001)、国家重点研发计划(2020YFB2009303)、国家自然科学基金委航天制造联合基金(U1837202)

通信作者: *yjzhao@bit.edu.cn

theoretical resolution. Combining rectilinear scanning and rotating scanning, the system is capable of acquiring three-dimensional data in the cylindrical coordinate system. The high voltage insulation terminal is tested and evaluated by the proposed system, and the full-view perspective image is reconstructed, which realizes the digital twin of the three-dimensional structure of the detected target in real space and image space. In addition, the proposed system can accurately display abnormal areas inside the insulation terminal, which is conducive to the intuitive evaluation of the internal state of a detected target, and thus can further meet the requirements of nondestructive testing in the industrial field.

Key words imaging systems; terahertz wave; terahertz imaging; nondestructive testing; frequency modulated continuous wave; insulation terminal

1 引言

随着工业领域中新工艺与新材料的大量应用,新的质量检测和可靠性评价问题不断产生,因此在现有的无损检测技术体系中迫切需要新的技术方法来应对这些新问题。由于太赫兹波具有单光子能量较低、穿透性高(对于大部分非金属材料)等特点,因此非常适用于进行非接触三维信息的获取,可实现目标内部亚毫米级空间分辨率和微米级深度分辨率的三维成像^[1-3]。与核磁成像和超声成像技术类似,太赫兹检测成像技术已经在航空航天^[4-5]、文物检测^[6-7]、能源电力^[8]和生物医药^[9-11]等领域中展现出巨大的应用潜力,特别是对于多种新型复合材料的质量检测,其是一种较理想的优化方案。因此,太赫兹检测成像技术成为了近几年的研究热点。太赫兹无损检测技术的主要技术路线:1)基于宽带脉冲太赫兹信号,如太赫兹时域波谱成像;2)基于连续波信号,包括点频连续波和宽带扫频连续波技术,如人体安检成像^[12]、太赫兹焦平面成像^[13-15]和太赫兹线性调频连续波成像^[16-17]。

1995年,Hu等^[1]将光导天线作为发射源与探测器相结合搭建了太赫兹时域光谱系统,再结合二维扫描装置,实现了太赫兹二维成像,识别出了塑料封装的半导体集成线路和叶片中的水分含量分布。1997年,Mittleman等^[3]实现了反射太赫兹成像,进而获取了磁盘层析结构。2005年,Karpowicz等^[4]研制了基于频率为200 GHz的耿氏源和肖特基探测器的单频太赫兹扫描成像系统,检测了绝热泡沫材料的脱粘缺陷,进而对哥伦比亚航天飞机失事原因进行了分析,这也促使太赫兹无损检测技术被NASA定为航天器质检必检的手段,标志着太赫兹技术开始走向实际应用。2006年,张振伟等^[18]成功搭建了基于InAs晶体发射、ZnTe晶体光电取样探测的太赫兹时域光谱成像系统,获得了葵花子内部果仁的太赫兹透视图像,并验证了多种图像重构方法。2009年,Quast等^[16]采用固态电子器件研制了

中心频率在300 GHz的调频雷达系统,采用18倍频链路获得了230~320 GHz的调频输出,平均有效功率大约为100 μ W。结合二维扫描装置,并通过两个透镜实现了近距离聚焦反射层析成像,获得了泡沫材料和胶结界面的深度位置信息。2013年,杨振刚等^[19-22]使用连续太赫兹系统测试了蜂窝材料人工缺陷样本、复合材料钢板黏合面脱落情况、夹杂异物的多层蜂窝样件和隔热板上制造的不同人工缺陷等实际样件。2015年,Zhang等^[6]利用连续太赫兹系统检测了油画颜料层的分层状态。2017年,Friederich等^[23]开发了双波段太赫兹波三维成像系统,用于对雷达罩加工过程中缺陷的检测。该系统结合了两个相邻频段的连续波太赫兹探测单元,可在70~110 GHz和110~170 GHz的相邻频率范围内工作。该系统不仅可以同时收集两个不同频率范围内的太赫兹数据,还可以通过对两个频段的数据融合进一步提高深度分辨率。2020年,Shen等^[24]实现了一套低成本的频率范围为76~81 GHz的调频连续波成像系统,具有每秒40000个波形的快速测量速度。2020年,Pan等^[25]利用太赫兹介质波导连接收发模块进行样本间的信号传输,简化了调频成像的实验装置,并提高了预期的信噪比。目前,基于调频的太赫兹三维检测成像已经显示出了巨大的应用前景,因此对其关键技术进行全面研究是有效利用该技术所必需的。

本文设计了一套基于调频连续波的太赫兹无损检测成像系统,对高压变电绝缘端子进行了检测评估,并在柱坐标下重构出了太赫兹三维立体图像。所提系统的有效本振频率范围为9.375~13.750 GHz,通过24倍频可实现频率范围为0.225~0.330 THz的宽带太赫兹波收发,并且将单个喇叭天线与定向耦合器相结合可实现收发一体。利用光学透镜组对太赫兹波束进行准直聚焦,并利用聚焦后的太赫兹波束垂直入射被检测目标,通过接收原路返回的回波序列可对目标的结构特征进行分析。由于所提系统基于的是全固态电子器件

和零中频机制,故易于扩展带宽。本文将从成像装置和原理、光束测量、相位矫正和三维成像等方面对所提技术进行详细地介绍。

2 原理与系统

2.1 原理与实验装置

理想的调频系统工作原理如图 1(a)所示,其中 f 为信号频率、 T_x 为发射信号、 R_x 为接收信号。当射频和本振的调频连续波在时间上线性扫描时,中频的频率与时间延迟(飞行时间)成正比,发射单元与目标之间的距离可通过中频信号的频率分量来测量。系统发射的调频信号可以表示为

$$S_{tx}(t) = a(t) \exp[j(2\pi f_0 t + \pi\mu t^2 + \theta_0)], \quad (1)$$

式中: f_0 为载波频率; t 为脉冲重复间隔内的时间变

量; $\mu = B/t_s$ 为调频斜率,其中 B 为调频带宽和 t_s 为时间间隔; $a(t)$ 为发射信号幅度; θ_0 为初始相位。当距离为 R 处的目标为理想静止单平面时,调频信号会被目标反射。对低频本振信号与倍频后的太赫兹发射信号进行同相调节,因此低频本振信号与 $S_{rx}(t)$ 的相位相同。此时,接收到的太赫兹信号可以用 $S_{rx}(t)$ 表示,其表达式为

$$S_{rx}(t) = b(t - \tau) \exp\{j[2\pi f_0(t - \tau) + \pi\mu(t - \tau)^2 + \theta_0]\}, \quad (2)$$

式中: τ 为回波延时,回波延时与目标界面距离的关系为 $\tau = \frac{2R}{c}$,其中 c 为电磁波传播速度; $b(t - \tau)$ 为发射信号幅度。

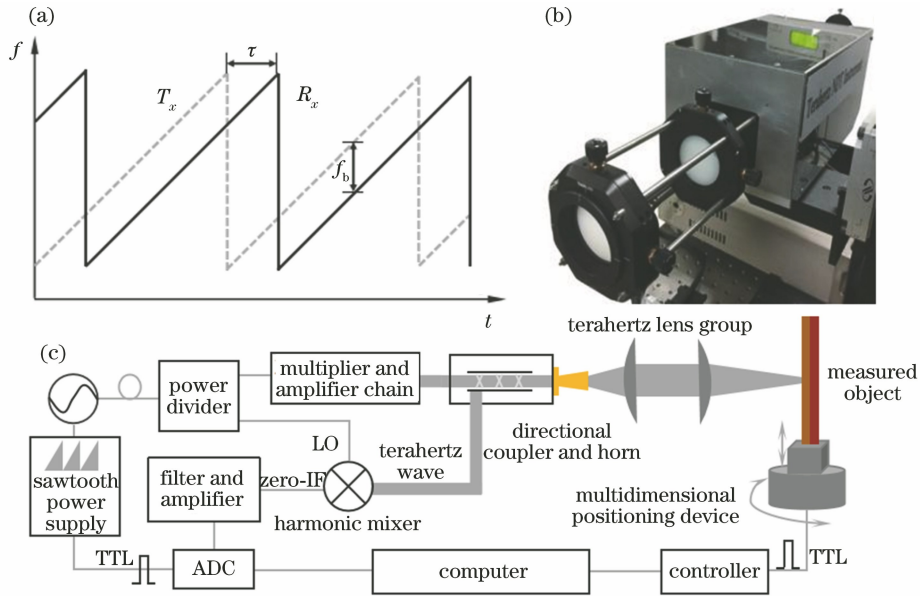


图 1 太赫兹调频连续波检测成像系统。(a)系统工作原理图;(b)系统实物图;(c)系统结构图

Fig. 1 Terahertz frequency modulated continuous wave detection imaging system. (a) Working principle diagram of system; (b) physical map of system; (c) structural diagram of system

本振信号与接收到的太赫兹信号在混频器中谐波混频后,经过低通滤波和放大。混频后的中频信号可以用 $S_{zf}(t)$ 表示,其表达式为

$$S_{zf}(t) = c(t) \cdot$$

$$b(t - \tau) \exp[j(\pi f_0 \tau + 2\pi\mu t \tau - \pi\mu \tau^2)]. \quad (3)$$

对(3)式中的相位求导,可得到相应的差拍频率,其表达式为

$$f_b(t) = \frac{1}{2\pi} \times \frac{d\Phi_b(t)}{dt} = \mu\tau, \quad (4)$$

式中: $\Phi_b(t)$ 为差拍信号相位。

对于固定目标,差拍信号的频率仅与距离和调频斜率有关。目标距离 R 与差拍频率 f_b 的关系为

$$R = \frac{f_b c}{2\mu} = \frac{ct_s}{2B} f_b, \quad (5)$$

通常 μ 与 c 为常量,故只需求出差拍信号的频率 f_b 即可计算出目标距离 R 。

对于单界面目标,界面的定位精度约为 $10 \mu\text{m}$ ^[16]。对于多界面目标,太赫兹信号不仅有目标的第一界面回波,同时还有其他不同深度界面的回波序列,并且回波在不同界面之间还会多次反射,并发生相互作用。另外,传输过程还会受到目标折射率的影响。当不考虑多次反射的影响,相邻两个

界面的分辨能力可以表示为 $\Delta R = \frac{c}{n} \cdot \frac{1}{2B}$,其值由

调频带宽决定。当信号在复杂介质材料中传播时,需进一步考虑材料的折射率分布。

图 1(b)是系统的实物图,系统结构如图 1(c)所示,其中 TTL 为同步方波触发信号,ADC 为采集卡模数转换,LO 为本振,IF 为中频。锯齿波调制驱动压控振荡器产生宽带低频本振信号,该信号被功率分束器分成两部分,一部分被接入 24 倍倍频链路和放大链路中,然后与定向耦合器连接,再通过宽带波纹喇叭天线被发射到自由空间中。输出的宽带太赫兹信号,经过波束调控,被准直聚焦后垂直照射到被测目标上。调控装置是一个由两个太赫兹透镜组成的透镜组。被目标表面以及内部不同界面反射的信号经过原路返回,并且被定向耦合器耦合到外差混频器的信号输入端。另一部分的低频信号作为本振信号,直接接入混频器的本振输入端口。混频器输出的中频信号经过滤波、放大和 ADC 数字化后被记录。采集卡与锯齿波电源保持同步。采用定向耦合器、单天线与透镜组结合的方案,有利于系统的小型化,进而该方案在实际应用中更加灵活。结合多维扫描定位装置,所提系统可以实现对目标扫描成像。

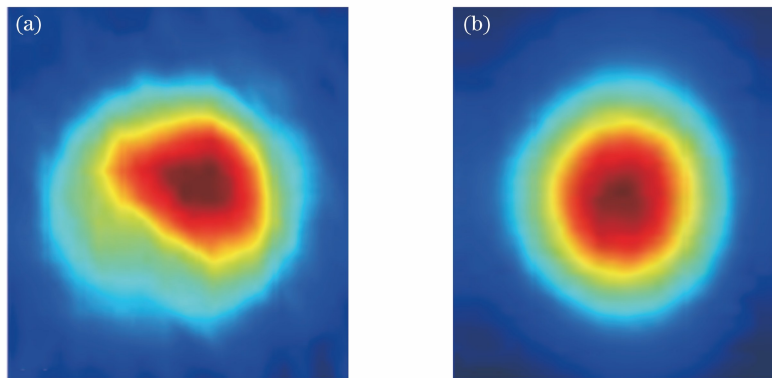


图 2 焦平面光强分布。(a)优化前;(b)优化后

Fig. 2 Intensity distribution of focal plane. (a) Before optimization; (b) after optimization

2.2.2 非线性优化

对于调频系统,在深度方向上的分辨率由调频带宽决定。理想的调频系统是线性调频,而理想的线性器件是不存在的,即系统器件都存在非线性,这会导致扫频系统的相位离焦,进而引起深度分辨率降低。太赫兹宽带器件具有强烈的群延迟抖动^[27-29],特别是系统中的倍频器和谐波混频器等电子器件,进而非线性不可忽略^[30]。这些非线性因素会将目标聚焦良好的频谱响应扩展到不同的频率,产生距离分辨率下降、信噪比降低、旁瓣升高和主瓣不对称等负面影响。采用文献[31-32]中的相位矫

2.2 实验系统优化

三维成像系统由宽带太赫兹调频收发装置、光学准直聚焦装置和扫描定位装置构成。在获取三维成像数据之前,需要对系统进行优化,以获取接近衍射极限的空间分辨率和接近理论值的界面分辨能力。

2.2.1 波束优化

系统的空间分辨率由太赫兹波束中心波长的衍射极限确定。当检测目标时,物体通常位于波束焦点附近,在扫描成像过程中电磁波的空间分布对实际的成像质量影响非常大,故需要对系统的波束质量进行优化。让系统处于非扫频状态,并保持点频输出,即利用 TTL 触发点频持续输出,在聚焦点位置放置点探测器(中国科学院苏州纳米技术与纳米仿生研究所研制的 AlGaIn/GaN-HEMT 太赫兹波探测器),并连接锁相放大器,使锁相放大器与 TTL 触发同步。将点探测器放置在一个三维扫描架上,通过扫描可以精确获取波束的强度分布^[26],通过调节喇叭天线和透镜组的相对位置,可以获得接近理想的高斯焦斑,如图 2 所示。图 2(a)为优化前的焦平面光强分布图,图 2(b)为优化后的焦平面光强分布图,其可近似为高斯分布。

正方法,可以有效地降低系统非线性效应的影响。只需在测试时,将高反射参考界面作为典型的目标,再通过循环移位、加窗、相位估计和迭代步骤即可有效降低非线性的影响。第一步是将孤立的散射回波从其在频域中的原始点移到零频率处,以消除时间延迟引起的频率偏移。第二步是在频域中对信号加窗,一般使用矩形窗口滤波器来保留主要的未聚焦回波,同时丢弃对相位估计没有贡献的信号,进而获取循环移位和加窗后参考面在时域中的信号。接下来,进行相位估计,相位项梯度的线性无偏最小方差估计的表达式为

$$\Delta\hat{\phi}_{\text{ref}}(n) = \frac{\sum_m \text{Im}\{S_{\text{ref}}^*(n)[S_{\text{ref}}(n) - S_{\text{ref}}(n-1)]\}}{\sum_m |S_{\text{ref}}(n)|^2}, \quad (6)$$

式中： $S_{\text{ref}}(n)$ 为离散的参考界面处的信号； n 为离散的时间采样点； m 为典型参考面的重复观测数据。

通过对整个 $\Delta\hat{\phi}_{\text{ref}}(n)$ 求和可估计 $S_{\text{ref}}(n)$ 的相位项 $\phi_{\text{ref}}(n)$ ，相位项的表达式为

$$\phi_{\text{ref}}(n) = \sum_{i=1}^n \Delta\hat{\phi}_{\text{ref}}(i). \quad (7)$$

将其他非参考点反射信号中的相位项减去估计的相位项 $\phi_{\text{ref}}(n)$ ，便可显著减小系统的非线性效应。对补充后的信号进行傅里叶变换，便可得到相位聚焦后的一维像。最后，按照上述步骤进行重复迭代。随着距离剖面中的回波越来越聚焦，旁瓣越来越小，循环移位可以更精确地消除频率偏移。逐渐减小的窗口可以更有效地消除噪声，同时保留散射信息。当估计相位项的标准偏差下降到百分之几弧度时，便可以结束迭代。

3 结果与分析

3.1 量化试件检测与分析

在优化波束质量后，将系统与二维扫描装置相连接，对图 3(a)所示的不同深度的同心圆金属试件和 3D 打印的 ABS(A 为丙烯腈、B 为丁二烯、S 为苯

乙烯)材料台阶试块进行扫描，两试件的前表面处于同一平面，并定义此处为深度方向的零点。ABS 台阶试件的一侧为平面(前表面)，另一侧为台阶表面(后表面)，不同位置处前后表面的厚度从最薄的 4 mm，依次递增 2 mm，厚度依次为 4, 6, 8, 10, 12, 14, 16 mm。考虑到试件的稳固性，设定试件两侧的厚度也为 16 mm。ABS 材料在 275 GHz 频率处的折射率近似为 1.56。在长为 170 mm、高为 60 mm、厚为 20 mm 的金属铝块上铣出三个同心圆。每个同心圆的半径加工参数依次为 25, 15, 5 mm，对应深度依次递增 2, 3, 5 mm。重构出的 $Z=0$ 处的 X - Y 平面图，如图 3(b)所示。图 4(a)、(b)分别为金属试件上 S 点和台阶试件 A_7 点处非线性矫正前后的一维距离相信号。带有十字标记的点线为校准前的一维像，带有圆圈标记的实线为校准后的一维像，对比发现，主回波得到了显著增强。

图 5(a)、(b)分别为金属试件在 $Y=69$ 处的 B (X - Z 平面)扫描图像和三维图像。图 5(c)为 Z 为 0, 2, 4, 5, 6, 9, 10, 15 mm 处的 C (X - Y 平面)扫描图像。图 3 中金属试件上的 S 点和 $S_1 \sim S_9$ 点在不同深度位置处的界面回波如图 6 所示。回波位置很好地反映了不同界面的位置，对于 S_3 点和 S_5 点，深度坐标都为 6 mm。实际测量的原始数据可能存在一个数据点间隔的误差，可以通过提高数据采样率或信号处理的手段来改善。

对于 ABS 介质的阶梯试件，不同厚度处光程的

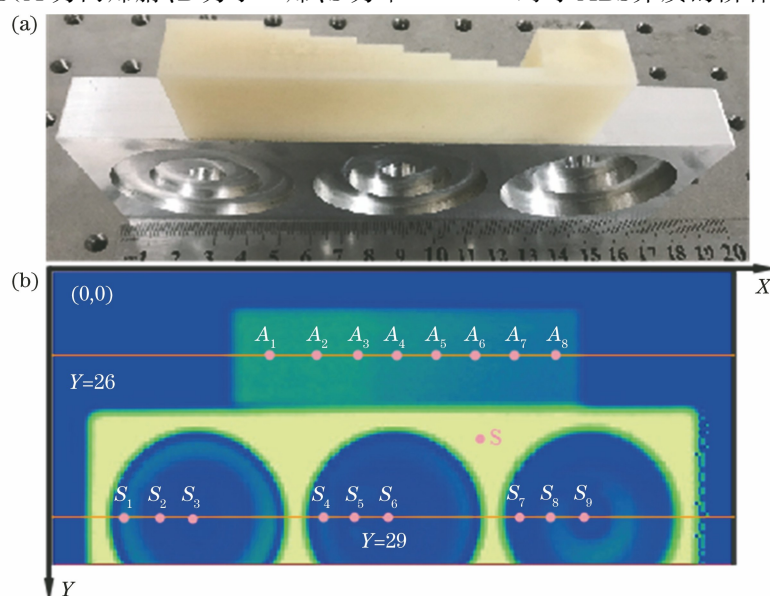


图 3 样品的照片和太赫兹图像。(a) ABS 试件和金属试件照片；(b) ABS 试件和金属试件的太赫兹 C 扫描图像

Fig. 3 Photo and terahertz image of sample. (a) Photos of ABS and metal specimen; (b) terahertz C-scan images of ABS and metal specimen

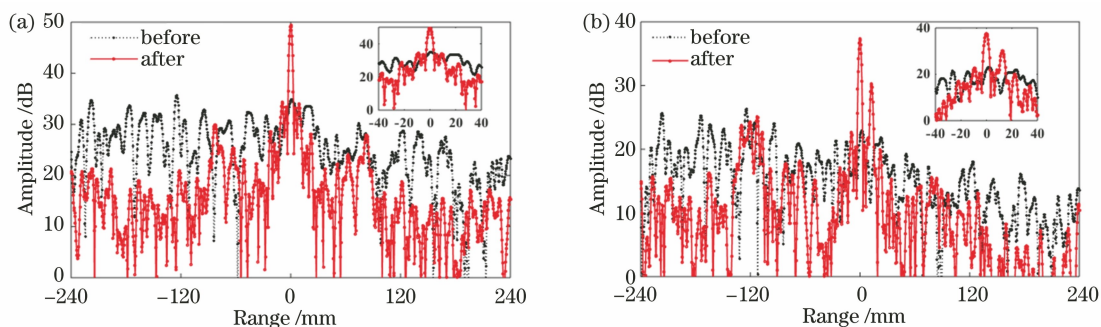


图 4 不同位置处矫正前后的一维像图。(a)金属试件上 S 点;(b) ABS 试件上 A_7 点

Fig. 4 One-dimensional images before and after correction at different positions. (a) Point S on metal specimen; (b) point A_7 on ABS specimen

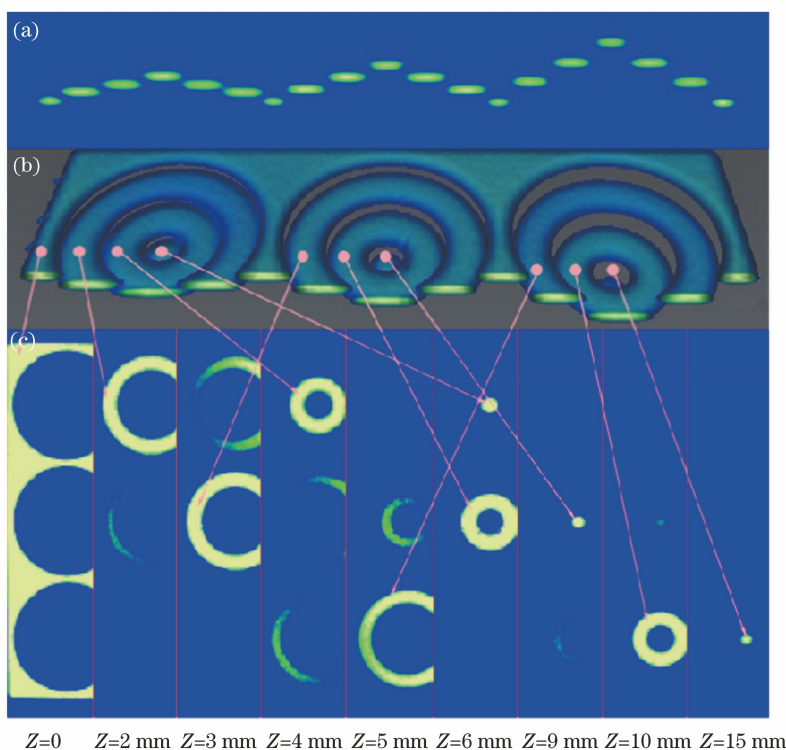


图 5 金属试件的太赫兹图像。(a) $Y=69$ 处的 B 扫描图像;(b) $Y=69$ 处的三维图像;(c) 不同 Z 处的 C 扫描图像

Fig. 5 Terahertz image of metal specimen. (a) B-scan image at $Y=69$; (b) three-dimensional image at $Y=69$; (c) C-scan images at different Z

变化梯次增大。图 3(b)中 $A_1 \sim A_8$ 点,分别对应不同的厚度。其中, A_1 和 A_8 位置处的介质厚度相同并且最大, A_7 位置处厚度最薄,其值为 4 mm,其余位置的对应厚度依次变化 2 mm。图 7 为 $A_1 \sim A_8$ 点处前后界面的回波图。可以发现,所有点位的前表面回波位置几乎重叠,原始数据存在一个数据点的数据采集误差。后界面回波根据不同的厚度变化依次出现,首先出现的是 A_7 点处的回波信号, $A_7 \sim A_3$ 点处的回波幅值随着厚度值递减,回波位置相应地等比例变化,在图 7 中从左到右依次排列。对于 A_2 点,厚度约为 14 mm,后界面回波与前界面回波

光程约为 43.68 mm,已经明显超出采用的光束准直组件的有效焦深,进而会导致后界面回波的反射率和回波波形发生一定程度的变形。

考虑景深的影响,当将单一界面作为参考时,可以将不同界面位置作为校准参考点,或者将不同参考界面的参考相位值进行复合加权后作为非线性校准的参考。图 8(a)~(c)分别是采用 S 点、 S_7 点和 S_8 点处的数据作为参考值的 $Y=26$ 处的 B 扫描图像,图 8(d)为采用 $0.3S+0.3S_7+0.4S_8$ (S 点数据占比 0.3, S_7 点数据占比 0.3, S_8 点数据占比 0.4)的多界面参考相位校准的结果。当校准参考点为 S

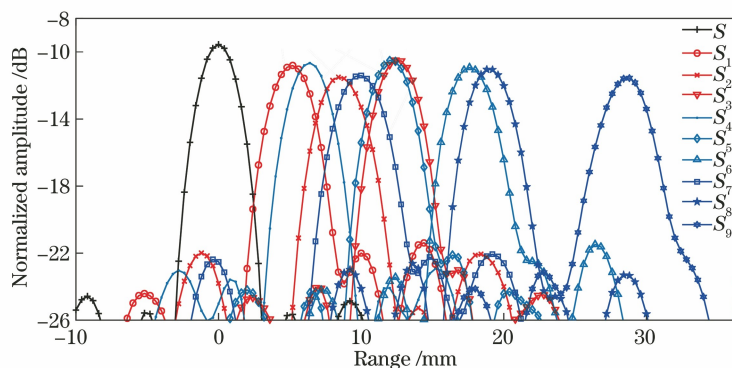


图 6 金属试件中 S 和 $S_1 \sim S_9$ 点处的回波信号

Fig. 6 Echo signals of S and $S_1 \sim S_9$ points on metal specimen

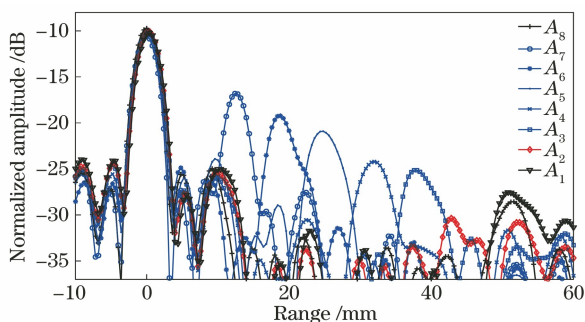


图 7 $A_1 \sim A_8$ 点前后界面的回波信号

Fig. 7 Echo signals of front and back surfaces at $A_1 \sim A_8$ points

点时(以 $Z=0$ 界面作为参考面),B 扫描图像对前表面有非常理想的相位聚焦效果,但是对于远离前表面的 A_1 、 A_2 和 A_8 位置处的后界面的相位聚焦效果变差。在采用相同的阈值时,无法观察到这三处的后界面回波信号。当将 S_7 点和 S_8 点处数据作为参考值时,较厚三处的后界面回波明显增强,但是相邻前界面也出现了一定程度的伪影。通过复合三个界面的相位参数,并将其作为校准参数,在前后界面处都可获得较好的相位聚焦效果。另外,为了获得更大范围的有效焦深,还可以通过光学器件设计获得所需要的特殊波束(如长距离的无衍射波束),以便实现大的成像景深^[33]。

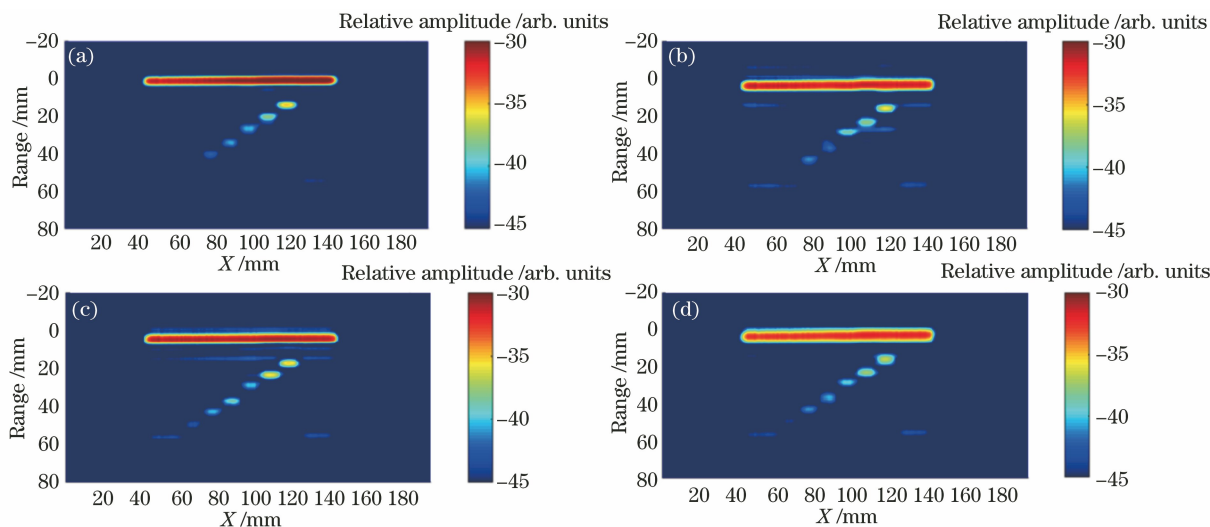


图 8 不同参考点情况下,ABS 试件在 $Y=26$ 处的 B 扫描图像。(a) S; (b) S_7 ; (c) S_8 ; (d) $0.3S+0.3S_7+0.4S_8$

Fig. 8 B-scan images of ABS specimen at $Y=26$ under different reference points. (a) S; (b) S_7 ; (c) S_8 ; (d) $0.3S+0.3S_7+0.4S_8$

3.2 三维成像与分析

高压绝缘端子是高压电网工程的关键结构,主要由内部导电部件和包裹塑料绝缘材料组成,内部导体柱直径大约为 10 mm,假定导体内芯的

中心为位置零点。样品实物图如图 9(a)所示。长时间的高压负荷和复杂环境条件因素的作用会导致材料和结构产生损伤,进而影响绝缘端子的质量。现有的质量检测需要在停电的情况下拆卸部

件进行检测。利用所提系统,结合一维线性扫描和旋转扫描进一步对绝缘端子进行了检测。将被测绝缘端子放置于一个电控的旋转台上,绝缘端子的柱面旋转轴与电控旋转台的旋转轴同轴。太赫兹信号沿垂直旋转轴方向照射到样品表面,透射到样品内部,被内部的导体柱反射,不同界面返回的回波被记录并被用于信号分析和图像重构。在样品顶部放置了一个金属参考面,初始位置垂直于太赫兹入射信号,用于信号的非线性校准。金属参考面大致与金属内导体的外径处于同一平面,同时太赫兹信号聚焦平面也近似在该位置,以便有效提高内部金属反射面反射回波的能量。控制电动旋转台和太赫兹信号的采集,每个照射位置采集 256 次太赫兹扫描信号并平均,然后电控旋转台旋转 1° ,当旋转一周后,样品和电控旋转台整体上升 1 mm,直到覆盖所需的测试范围,进而获得样品的三维数据立方。

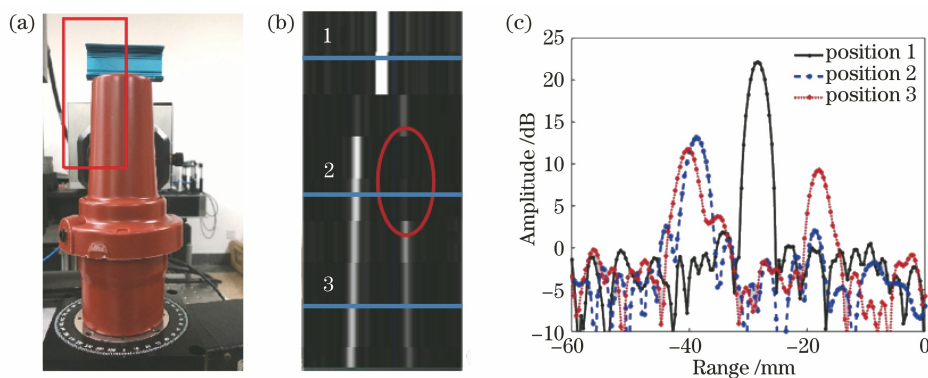


图 9 高压绝缘端子。(a)样品照片;(b)旋转角度为 0° 位置处的 B 扫描剖面图;
(c)当旋转角度为 0° 时,图 9(b)中位置 1、2 和 3 处的太赫兹回波信号

Fig. 9 High voltage insulation terminal. (a) Photo of sample; (b) B-scan profile at position with rotation angle of 0° ;
(c) terahertz echo signals at positions 1, 2, and 3 in Fig. 9(b) when rotation angle is 0°

为了进一步通过图形分析样品内部的结构信息,对位置 2 和位置 3 处 $0^\circ \sim 360^\circ$ 范围内的回波信号进行了记录,如图 10(a)和图 10(b)所示。可以看出,位置 2 在所有角度的第二界面回波都很弱,位置 3 所有角度的第二界面回波都非常明显。为了更加直观地通过图形分析该处的结构,将直角坐标系变换为柱面坐标系,使得重构出的图像与实物的空间尺寸有很好的对照性。图 10(c)和图 10(d)为相应的位置 2 和位置 3 处柱面坐标的太赫兹剖面图像。重构所有剖面数据能够还原出绝缘子的三维形貌,如图 11 所示。在三维太赫兹图像中,绝缘层内部与导体内芯界面存在一个反射率异常区域,该区域已经形成了一个条带,可为进一步诊断分析提供直观

在旋转角度为 0° 的初始位置处,绝缘端子内部的太赫兹 B 扫描图如图 9(b)所示,其中椭圆中的区域代表异常反射区。可以发现,位置 1 处金属界面的反射率最强,如图 9(c)中带有十字标记的实线所示。绝缘端子的外表面有一个小的倾角,位置 2 对应的外径尺寸要稍小于位置 3 处,因此垂直入射的信号先到达位置 3 再到达位置 2,进而位置 3 处的反射回波先出现,如图 9(c)中带方形标记的实线中左侧第一回波与带圆形标记的实线中左侧第一回波的位置关系所示。此外,两回波强度变化较小,说明虽然表面有微小倾角,但是外表面不同位置处反射强度变化不大。图 9(c)中位置 2 和位置 3 处右侧第二回波的强度变化明显。绝缘包裹层与导体芯的界面处金属的反射率应较高。然而,此时位置 2 处的第二回波的强度已经接近本地杂波,说明该处回波信号没有原路返回探测器(发生散射或吸收),内部界面是不一致的。

图像支持。

4 结 论

获取目标的空间透视三维结构分布具有广阔的工业应用前景。基于全固态电子器件和零中频机制,设计并实现了一套具有应用前景的太赫兹三维成像系统。通过波束优化和非线性矫正处理,可提高系统的三维成像质量。通过对高压变电绝缘端子进行检测,重构出了柱坐标下全向 360° 太赫兹三维立体图,进而验证了系统的检测成像能力。所提系统可以向小型化、高功率、大带宽和集成化方向发展,以便更好地满足工业领域无损检测的需求。

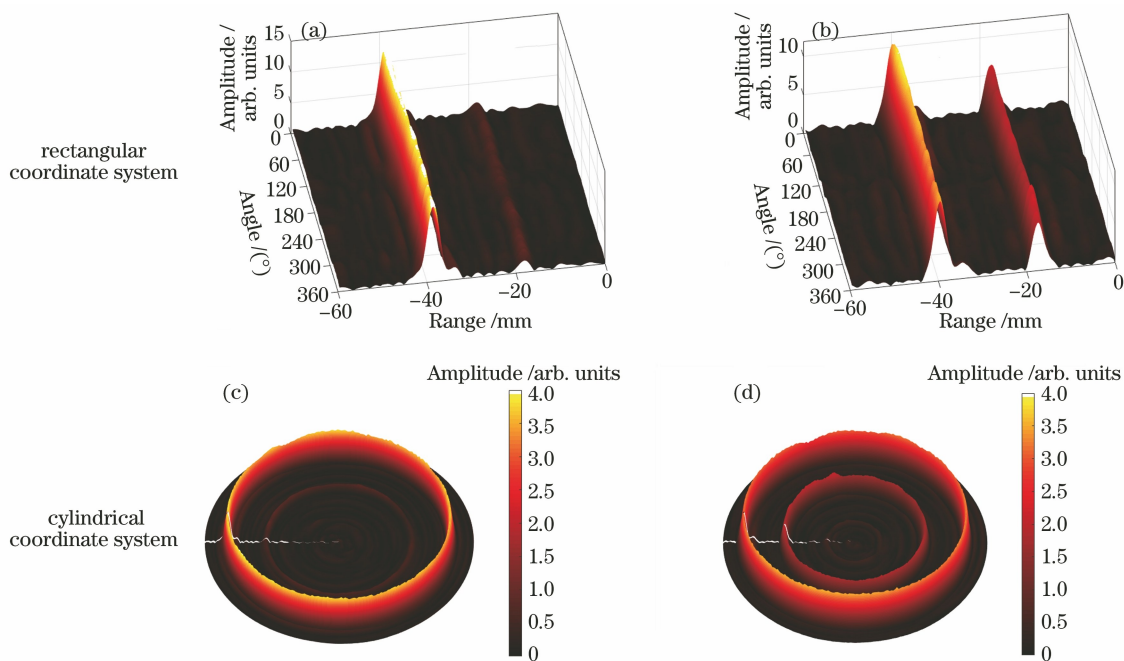


图 10 在不同位置处, $0^{\circ}\sim 360^{\circ}$ 范围内的回波信号。(a)(c)位置 2; (b)(d)位置 3
 Fig. 10 Echo signals in range of $0^{\circ}\sim 360^{\circ}$ at different positions. (a)(c) Position 2; (b)(d) position 3

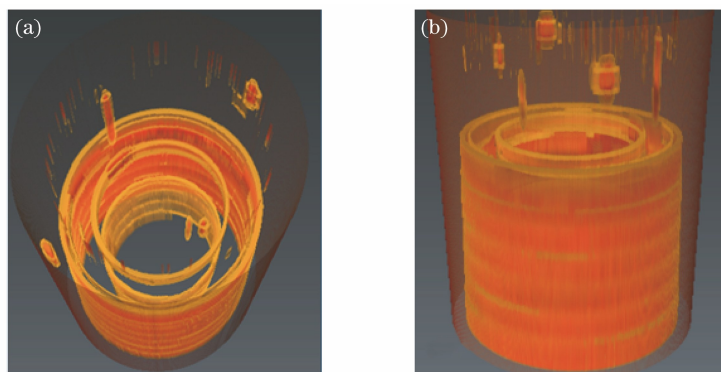


图 11 不同视角下重构的高压绝缘端子太赫兹三维图。(a)斜视图; (b)正视图
 Fig. 11 Reconstructed terahertz three-dimensional images of high voltage insulation terminal from different perspectives. (a) Oblique view; (b) front view

参 考 文 献

[1] Hu B B, Nuss M C. Imaging with terahertz waves [J]. Optics Letters, 1995, 20(16): 1716-1718.

[2] Redo-Sanchez A, Heshmat B, Aghasi A, et al. Terahertz time-gated spectral imaging for content extraction through layered structures [J]. Nature Communications, 2016, 7: 12665.

[3] Mittleman D M, Hunsche S, Boivin L, et al. T-ray tomography [J]. Optics Letters, 1997, 22(12): 904-906.

[4] Karpowicz N, Zhong H, Zhang C L, et al. Compact continuous-wave subterahertz system for inspection applications [J]. Applied Physics Letters, 2005, 86(5): 054105.

[5] Fukuchi T, Fuse N, Okada M, et al. Surface roughness measurement of thermal barrier coating using terahertz waves [J]. IEEJ Transactions on Fundamentals and Materials, 2017, 137(3): 147-152.

[6] Zhang Z W, Wang K J, Lei Y, et al. Non-destructive detection of pigments in oil painting by using terahertz tomography [J]. Science China Physics, Mechanics & Astronomy, 2015, 58(12): 124202.

[7] Guillet J P, Roux M, Wang K, et al. Art painting diagnostic before restoration with terahertz and millimeter waves [J]. Journal of Infrared, Millimeter, and Terahertz Waves, 2017, 38(4): 369-379.

[8] Park J W, Im K H, Yang I Y, et al. Terahertz radiation NDE of composite materials for wind

- turbine applications [J]. *International Journal of Precision Engineering and Manufacturing*, 2014, 15(6): 1247-1254.
- [9] Shen Y C. Terahertz pulsed spectroscopy and imaging for pharmaceutical applications: a review [J]. *International Journal of Pharmaceutics*, 2011, 417(1/2): 48-60.
- [10] Liu H S, Zhao K, Liu X Y, et al. Diagnosis of hepatocellular carcinoma based on a terahertz signal and VMD-CWSE [J]. *Biomedical Optics Express*, 2020, 11(9): 5045-5059.
- [11] Fu Z L, Li R Z, Li H Y, et al. Progress in biomedical imaging based on terahertz quantum cascade lasers [J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2020, 47(2): 0207014.
符张龙, 李锐志, 李弘义, 等. 基于太赫兹量子级联激光器的生物医学成像研究进展 [J]. *中国激光*, 2020, 47(2): 0207014.
- [12] Feng H, Bu W H, Wang W J, et al. Passive terahertz imaging system for fast scanning of human body by a single detector [J]. *Acta Optica Sinica*, 2020, 40(7): 0711002.
冯辉, 卜伟华, 王文静, 等. 单探测器快速扫描被动太赫兹人体成像系统 [J]. *光学学报*, 2020, 40(7): 0711002.
- [13] Li B, Wang D Y, Zhou X, et al. A continuous-wave terahertz 3-D computed tomography using a pyroelectric array detector [J]. *Journal of Terahertz Science and Electronic Information Technology*, 2017, 15(1): 21-25.
李斌, 王大勇, 周逊, 等. 基于面阵式探测器连续太赫兹波三维层析成像 [J]. *太赫兹科学与电子信息学报*, 2017, 15(1): 21-25.
- [14] Yao R, Ding S H, Li Q, et al. Improvement of 2.52 THz array transmission imaging system and resolution analysis [J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2011, 38(1): 248-253.
姚睿, 丁胜晖, 李琦, 等. 2.52 THz 面阵透射成像系统改进及分辨率分析 [J]. *中国激光*, 2011, 38(1): 248-253.
- [15] Wang Y Y, Jiang B Z, Xu D G, et al. Continuous terahertz wave biological tissue imaging technology based on focal plane array [J]. *Acta Optica Sinica*, 2021, 41(7): 0711001.
王与焯, 蒋博周, 徐德刚, 等. 基于焦平面阵列的连续太赫兹波生物组织成像技术研究 [J]. *光学学报*, 2021, 41(7): 0711001.
- [16] Quast H, Löffler T. 3D-terahertz-tomography for material inspection and security [C]//2009 34th International Conference on Infrared, Millimeter, and Terahertz Waves, September 21-25, 2009, Busan, Korea (South). New York: IEEE Press, 2009: 10976893.
- [17] Kapilevich B, Pinhasi Y, Arusi R, et al. 330 GHz FMCW image sensor for homeland security applications [J]. *Journal of Infrared, Millimeter, and Terahertz Waves*, 2010, 31(11): 1370-1381.
- [18] Zhang Z W, Cui W L, Zhang Y, et al. Terahertz time-domain spectroscopy imaging [J]. *Journal of Infrared and Millimeter Waves*, 2006, 25(3): 217-220.
张振伟, 崔伟丽, 张岩, 等. 太赫兹成像技术的实验研究 [J]. *红外与毫米波学报*, 2006, 25(3): 217-220.
- [19] Yang Z G, Zhao B Q, Liu J S, et al. Nondestructive inspection with terahertz waves [J]. *Physics*, 2013, 42(10): 708-711.
杨振刚, 赵毕强, 刘劲松, 等. 太赫兹无损检测的研究 [J]. *物理*, 2013, 42(10): 708-711.
- [20] Yang Z G, Liu J S, Wang K J. Terahertz nondestructive inspection for adhesive face with composite materials and steel plate [J]. *Nondestructive Testing*, 2014, 36(4): 42-44, 48.
杨振刚, 刘劲松, 王可嘉. 复合材料与钢板黏合面的太赫兹无损检测 [J]. *无损检测*, 2014, 36(4): 42-44, 48.
- [21] Yang Z G, Liu J S, Wang K J. Experimental research on nondestructive inspection for multilayer cellular samples using continuous terahertz waves imaging system [J]. *Journal of Optoelectronics · Laser*, 2013, 24(6): 1158-1162.
杨振刚, 刘劲松, 王可嘉. 连续太赫兹成像系统对多层蜂窝样品无损检测的实验研究 [J]. *光电子·激光*, 2013, 24(6): 1158-1162.
- [22] Zhao B Q, Wei X L, Yang Z G, et al. Terahertz nondestructive inspection of heat shield [J]. *Laser Technology*, 2015, 39(2): 185-189.
赵毕强, 魏旭立, 杨振刚, 等. 隔热板的太赫兹无损检测 [J]. *激光技术*, 2015, 39(2): 185-189.
- [23] Friederich F, Baccouche B, May K H, et al. Industrial radome inspection with terahertz waves [C]//2017 10th UK-Europe-China Workshop on Millimetre Waves and Terahertz Technologies (UCMMT), September 11-13, 2017, Liverpool, UK. New York: IEEE Press, 2017: 17259524.
- [24] Shen Y C, Yang X Y, Zhang Z J. Broadband terahertz time-domain spectroscopy and fast FMCW imaging: principle and applications [J]. *Chinese Physics B*, 2020, 29(7): 078705.
- [25] Pan M M, Chopard A, Fauquet F, et al. Guided reflectometry imaging unit using millimeter wave FMCW radars [J]. *IEEE Transactions on Terahertz*

- Science and Technology, 2020, 10(6): 647-655.
- [26] Zhang Z W, Zhang C L. Terahertz beam quality characterization system and method: CN109855724A [P]. 2019-06-07.
张振伟, 张存林. 太赫兹波束质量表征系统及方法: CN109855724A [P]. 2019-06-07.
- [27] Langenbach M, Roggenbuck A, Cámara Mayorga I, et al. Group delay in THz spectroscopy with ultrawideband log-spiral antennae[J]. Journal of Infrared, Millimeter, and Terahertz Waves, 2014, 35(11): 918-931.
- [28] Chen B, Lou L H, Tang K, et al. A 13.5–19 GHz 20.6-dB gain CMOS power amplifier for FMCW radar application[J]. IEEE Microwave and Wireless Components Letters, 2017, 27(4): 377-379.
- [29] Kwon D H. Effect of antenna gain and group delay variations on pulse-preserving capabilities of ultrawideband antennas [J]. IEEE Transactions on Antennas and Propagation, 2006, 54(8): 2208-2215.
- [30] Dong Y W, Liang X D, Ding C B. Non-linear signal processing for FMCW SAR [J]. Journal of Electronics & Information Technology, 2010, 32(5): 1034-1039.
- [31] Eichel P H, Ghiglia D C, Jakowatz C V. Speckle processing method for synthetic-aperture-radar phase correction[J]. Optics Letters, 1989, 14(1): 1-3.
- [32] Bates R H T, Cady F M. Towards true imaging by wideband speckle interferometry [J]. Optics Communications, 1980, 32(3): 365-369.
- [33] Zhang Z W, Zhang H Y, Wang K J. Diffraction-free THz sheet and its application on THz imaging system [J]. IEEE Transactions on Terahertz Science and Technology, 2019, 9(5): 471-475.