基于太赫兹反射成像技术的花生空果无损检测

孙晓荣 1,2, 张小勤 1,2*, 刘翠玲 1,2, 张天巽 1,2

(1. 北京工商大学人工智能学院, 北京 100048; 2. 北京工商大学, 食品安全大数据技术 北京市重点实验室, 北京 100048)

摘 要:目的 基于太赫兹反射成像技术(Terahertz reflection imaging method, THz-RIM)实现花生空果的无损检测。方法 利用太赫兹脉冲光谱仪 TeraPulse 4000 及反射成像附件和采集软件,在 0.2 mm 采集步长下对去壳花生仁进行太赫兹反射成像预实验,确定出正式实验的图像颜色模式为 hot 模式。人为制备若干个花育36 号满仁花生果样本和空果样本(仅有一粒花生仁),在与预实验相同的条件下采集样本光谱图像,以时域/频域2点外相加成像(integrated time slice)重构方式进行图像重构,突出花生空果样本图像的显著几何特征。结果 通过太赫兹反射图像可以实现满仁与花生空果样本的检测区分,但图像细节仍然比较模糊,需进一步提高图像清晰度。采用数字图像方法进行图像增强,利用 OpenCV-Python 提高图像的亮度、色度、对比度及锐度。提升对比度后的图像可观测度最高,且空果图像中含仁部分黑色面积占比最大,与空果部分对比最为明显,可以实现空果及满仁花生果的快速区分。结论 THz 波对花生外壳具有良好的穿透性,利用 THz-RIM 技术结合 OpenCV-Python 数字图像处理方法进行花生空果带壳无损检测具有可行性,利用太赫兹光谱技术对油料作物内部品质进行无损检测研究具有极大潜力。

关键词:太赫兹反射成像技术;花生;无损检测;图像增强

Nondestructive inspection of empty peanut based on Terahertz reflection imaging method

SUN Xiao-Rong^{1,2}, ZHANG Xiao-Qin^{1,2*}, LIU Cui-Ling^{1,2}, ZHANG Tian-Xun^{1,2}

(1. College of Artificial Intelligence, Beijing Technology and Business University, Beijing 100048, China; 2. Beijing Key Laboratory of Big Data Technology for Food Safety, Beijing Technology and Business University, Beijing 100048, China)

ABSTRACT: Objective To inspect empty peanut nondestructively based on Terahertz reflection imaging method (THz-RIM). **Methods** TeraPulse 4000 Terahertz pulse spectrometer, reflection imaging accessories and the acquisition software of the instrument were used to conduct the pre-experiment of Terahertz reflection imaging on the shelled peanut kernels at the acquisition step of 0.2 mm, and the color mode of the image for the formal experiment was also identified to be hot mode. Several samples of Huayu No.36 which were full of kernel peanut fruit and empty fruit samples (with

基金项目: "北京市大学生创新创业训练计划"创新训练项目(B044)、北京市自然科学基金项目(4222043)、2021 年教育部高教司产学合作协同育人项目(202102341023)、2022 年北京工商大学研究生教育教学改革专项(19008022056)

Fund: Supported by the "Beijing College Students' Innovative Entrepreneurial Training Plan Program" Innovative Training Project (B044), the Beijing Natural Science Foundation Project (4222043), the 2021 Production University Cooperation Collaborative Education Project of the Department of Higher Education of the Ministry of Education (202102341023), and the 2022 Beijing Technology and Business University Postgraduate Education and Teaching Reform Project (19008022056)

^{*}通信作者: 张小勤, 主要研究方向为光电检测系统与建模分析。E-mail: zhangxiaoqin_btbu@163.com

^{*}Corresponding author: ZHANG Xiao-Qin, Beijing Key Laboratory of Big Data Technology for Food Safety, Beijing Technology and Business University, Beijing 100048, China. E-mail: zhangxiaoqin btbu@163.com

only one peanut kernel) were prepared artificially. Then the spectral images of the samples were collected under the same conditions as the pre-experiment. And the integrated time slice reconstruction method was used to reconstruct the image to highlight the significant geometric features of the empty peanut image. **Results** The Terahertz reflection image could be used to distinguish between full peanut and empty peanut, but the details of the image were still vague. There needed other ways to improve the clarity of the images that were collected in above experiment. For instance, in this paper, the digital image processing method was used for image enhancement. OpenCV-Python was selected to improve the brightness, chroma, contrast and sharpness of the image. The image with improved contrast had the highest observability, and the black part of the kernel part accounted for the largest proportion, which was most obvious compared with the empty fruit. That was to say full peanut and empty peanut could be distinguished in this way. **Conclusion** THz waves can penetrate peanut shell, and it is feasible to use THz-RIM technology combined with OpenCV-Python for nondestructive inspection of shelled empty peanut. Also, using Terahertz spectroscopy technology to conduct nondestructive inspection research on the quality of oil crop itself has great potential.

KEY WORDS: Terahertz reflection imaging method; peanut; nondestructive inspection; image enhancement

0 引言

太赫兹(Terahertz, THz, 1 THz=10¹² Hz)波是频率位于 0.1~10 THz 波段,介于微波和红外之间的电磁波。其在频谱中的特殊位置使得太赫兹科学技术领域融合了电子学和光子学的特点^[1-2]。相较于其他各类光谱如 X 射线谱等,太赫兹光谱具备较多优势,主要包括: 低能性、瞬态性、穿透性、惧水性、安全性等,使得太赫兹波在军事^[3]、遥感^[4]、医疗^[5-6]、食品安全^[7]、安检^[8]等领域具有广泛的应用前景,并在无损检测领域极具潜力。

太赫兹反射成像系统主要由太赫兹时域光谱系统、图像处理设备和扫描控制设备组成,通过 THz 波的反射数据来获取样品扫描点处反射的 THz 脉冲的幅值、相位和时间信息,从而对样品进行三位层析成像,并获得样品的三维结构信息^[9]。太赫兹成像技术融合光谱技术和成像技术,实现"图谱合一"。相较于其他波段的成像技术,其得到的图像具有更高的分辨率及景深^[10]。同时,太赫兹光子的辐射能量仅有 X 光的千分之一,在进行生物组织成像时不会对观测样品造成电离损害^[11]。因此,太赫兹反射成像技术(Terahertz reflection imaging method, THz-RIM)将在农产品品质无损检测领域发挥巨大作用^[12-14]。

我国是世界花生产量最高的国家,其种植面积仅次于油菜^[15-17]。花生已成为我国四大油料作物之一和世界第三大植物蛋白来源,具备经济价值的同时拥有丰富的营养价值^[18-19]。花生采摘后可直接食用或进行其他加工,深受城乡居民喜爱。但对于花生等带壳类油料作物,若内部籽粒不饱满会影响后续食用及加工^[20]。目前,我国对花生的品质检测主要依靠人工方法,品质评定受主观因素的影响,误差大。实验中常用化学法和光谱技术检测花生品质,化学方法难以实现对批量花生的品质快速检测^[21],并且必定会破坏花生外壳、影响销售。刘永惠等^[22]借助近红外光谱

分析技术和主成分分析方法将花生的粗脂肪含量、蛋白质 含量等21项品质性状综合成5个主成分因子,实现对花生 品质的综合评价。陈天华等[23]利用近红外光谱检测技术, 通过近红外实验和 BP 神经网络模型对 30 个不同含水率的 花生样本进行含水率达标检测, 实验结果中测试样本全部 识别正确。以上两种方法均基于近红外光谱技术, 但其只 能获取光谱信息, 空间信息无法获取, 因此不能形成化学 图像。刘翠玲等^[24]基于 THz 时域光谱技术,结合误差反向 传播(back propagation, BP)神经网络算法和支持向量机算 法判别不同程度的花生霉变样本。两种模型分别对两个品 种预测集的识别正确率均达到88%以上。王冬等[25]利用太 赫兹衰减全反射技术对电离辐照后的花生进行快速无损鉴 别,采用偏最小二乘法判别分析(partial least squares discrimination analysis, PLS-DA)算法及全交互验证算法建 立鉴别模型,并验证了模型的预测性能。以上研究内容均 对花生仁的内部品质进行研究, 而受限于实验仪器或实验 方法, 均剥除花生外壳后保留花生仁进行研究, 无法实现 对花生仁的带壳无损检测。因此,本研究利用 THz-RIM 对 带壳满仁/空瘪花生果进行成像, 研究不同图像重构方式 对于花生图像质量的影响,并利用特定的图像处理方法对 太赫兹图像进行去噪和增强, 探索太赫兹成像技术在花生 品质的无损检测研究中具有的潜力, 为太赫兹技术在农产 品及食品快速无损检测中的应用奠定基础。

1 材料与方法

1.1 材料、仪器与设备

实验所用花生样本均购自某种子公司,包括两个花生品种:鲁花9号和花育36号。

TeraPulse 4000 太赫兹脉冲光谱仪(英国剑桥 Tera View 公司), 其可以发射的太赫兹波频率介于 0.06~4 THz

之间, 信噪比最高可至 70 dB。

实验通过太赫兹反射成像附件及采集软件完成太赫兹图像数据采集,采集平台如图 1 所示。反射式 THz 时域光谱系统发出的 THz 波经抛面镜反射并聚焦至样品上,进入样品内部后再反射到剖面镜,最后由探测器接收^[26],可以实现对较厚样品的检测而透射模式却很难做到^[27]。

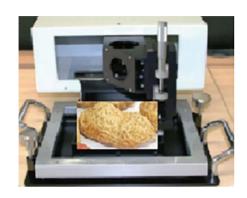


图 1 太赫兹反射成像采集方式及成像图

Fig.1 Acquisition mode of Terahertz reflection imaging and the image acquired

1.2 实验方法

1.2.1 实验样品制备

太赫兹波对绝大多数非金属和非极性材料表现出较强的穿透能力^[28],但实际上其穿透能力及成像效果较大程度上也取决于物质本身,不同物质对太赫兹波的穿透性存在差异。因此,本研究方案首先对整个花生样本进行去壳检测,即直接对花生仁进行太赫兹反射成像预实验。目的是首先了解太赫兹图像的分辨率情况、验证通过实验室THz 仪器成像的样本图像是否达到成像需求,为后续对带壳样本的检测奠定基础。

在正式实验中,为了更好地凸显出太赫兹波的穿透性能及反射成像效果,实验采用花育 36 号花生果制备满仁花生果样本与空果样本,从而形成正负对比样本。因肉眼无法辨别花生果内部的花生仁情况,即: 花生果内部是包含 2 粒花生仁、或是仅存在 1 粒花生仁的情况,实验样本需通过人为验证的方法判断: 轻轻剥开花生外壳验证。验证中挑选表面完好无损、内部包含 2 粒饱满花生仁的花生果作为满仁花生果样本。空果样本从满仁花生果样本中选取: 剥开花生外壳后取走 1 粒花生仁并确保花生果仍然剩余 1 粒花生仁,然后将花生外壳尽量严丝合缝地扣在一起。其在外观上与满仁花生果样本区别不大。

1.2.2 太赫兹反射图像采集

利用太赫兹反射成像附件进行样本图像采集的操作 步骤大致可以分为 4 步: 光学单元校准、载物台水平校正、 参考信号及基底信号获取、样本反射图像采集。

(1)校准光学单元

将反射成像的基本光学单元装置嵌入到样品室中,

拧紧旋钮后将用于光学单元校准的金块扣于基本光学单元 装置上,人为调节相应旋钮使得采集软件中观测到的 THz 信号最大化。

(2)水平校正载物台

在反射图像采集时需要使整个载物台需处于水平面上,以确保采集到的样本图像整体均匀、不同部位不存在因光路路径长短不同所造成的差异。首先移走金块,将成像单元置于基本光学单元上,拧紧旋钮以确保定位准确,将用于电机驱动的电缆连接好之后进行水平校正,同样先搁置载物片于成像单元相应位置;其次,再将作为参考样本的镀金镜置于载物片上,在采集软件界面中选择采集方式为 Line-scan,选择 X 轴或 Y 轴分别进行一维成像。

(3)参考信号及基底信号获取

在采集样本的反射成像图像之前,需要获取样本的参考信号及基底信号。在获取样本的参考信号时,先搁置载物片于成像单元相应位置,再将作为参考样本的镀金镜置于载物片上,利用千分尺旋钮将光线聚焦于镀金镜下表面,确保 THz 光束在样品台中间。此时太赫兹时域信号处于最大值处且峰最高最尖锐,完成样本的参考信号采集。其中,采集参数设置为:分辨率为 0.94 cm⁻¹,每次快速扫描的平均次数为 450。

参考信号采集完成后移走镀金镜,此时仅载物片存在,确保没有任何反射信号,完成基底信号采集。此时采集参数保持不变。实验中的参考信号及基底信号图像如图 2 所示。

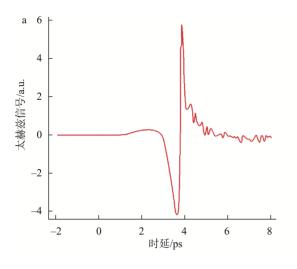
(4)样本反射图像采集

为防止样本在采集过程中随移动平台发生轻微振动,实验时使用透明胶带将样本与平台进行固定,保证样本与平台之间接触良好、采集过程中尽量保持静止。数据采集间隔长且扫描步长小可以提高太赫兹扫描成像的质量,获取较高的空间分辨率。但此方法只适用于小目标细节处的高分辨率成像,对于较大目标则会大幅提高成像时间,导致成像速度降低。因此,采集区域的具体位置参数与步长需要根据样本大小及具体成像质量灵活选取。由于聚焦光斑太小,步长小于 0.2 mm 以下没有意义,因此在整个实验中,仪器的采集步长设为 0.2 mm。

1.3 数据处理

1.3.1 图像重构方法研究

太赫兹时域脉冲成像技术可以获取样品的二维空间 (x, y)(振幅和相位信息)轴向及一维时间轴向(t)构成的三维时空数据集合。成像中的每个像素都与一条太赫兹光谱对应,光谱任意一点的振幅和相位信息是成像的必要元素。获得太赫兹图像后可进一步重构出样品的折射率、空间密度分布及厚度分布等。THz-RIM 所获取的数据信息量巨大,不同的图像重构方法将产生不同的图像效果,对于获取样品的物理结构也会产生很大的影响。实验中对以下几种太赫兹图像重构方法进行研究。



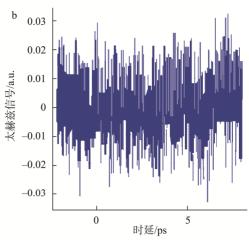


图 2 参考信号(a)与基底信号(b)

Fig.2 Reference (a) and base signals (b)

(1)时间点/频率点成像(time/frequency slice)

选择不同的时间或频率点,可以得到太赫兹波在特定时间点到达样品的不同深度处所形成的单层反射图像。 图像中不同位置处,由于物质组成、疏密程度等理化因素的影响,反射信号的强弱存在一定差异,表现在图像上的颜色深浅不同。

(2)最大峰值时间成像[time of flight (Max)]

在最大峰值时间处,对每一个像素点成像。通常从样品上表面反射回来的信号最强,即幅值达到最大的峰高位置。因为随着穿透深度的增加,太赫兹波及其反射信号都会逐渐衰减。若样品表面平整,那么每个像素点处的a-Scan 中最大值峰值时间为常数,即最大峰值时间的c-Scan 图像均匀清晰。

(3)最小峰值时间[time of flight (Min)]

与最大峰值时间成像相似,典型的空气和样品交界面处反射峰很大且在一个波谷之后。c-Scan 图像是对 a-Scan 中最小峰值所出现的时间或频率处的测量信号成像。若样品表面平整,则 c-Scan 图像均匀清晰。

(4)时域最大值/最小值成像[Max (Min) peak size]

利用时域光谱信号的最大值成像。每个像素由该点的时域光谱波形上的最大值进行成像得到。最小值成像也是类似,由所在点形成的时域光谱信号波形上的最小值成像得到。该成像方式能够反映样品对太赫兹辐射的消光系数。

(5)时域/频域 2 点间相加成像(integrated slice)

即选中两个时间点(频率点),利用两点之间范围内的时域(频域)值相加,得到其成像。

(6)时域/频域 2 点外相加成像(integrated time slice)

与 integrated slice 成像方式不同的是, 该成像方法是

选中两个时间点(频率点)、但利用两点之外范围内的时域 (频域)值相加,再进行成像。

在本研究中采用时域/频域 2 点外相加成像图像重构方式,应用太赫兹反射成像附件完成。

1.3.2 图像增强处理

在获取较好的花生果成像数据后,仍然存在图像模糊问题。因此,希望通过对太赫兹图像进一步研究,实现THz-RIM 对花生品质的无损检测,并提高 THz-RIM 在穿透检测中的实际应用价值。本研究利用 OpenCV-Python 对图像的亮度、色度、对比度及锐度进行增强^[29-30],以提升图像成分的清晰度,改善视觉效果。

以上数据处理过程采用 Python 集成开发环境 PyCharm 2020 软件完成, Python 解释器为 Python 3.7.4 版本。

2 结果与分析

2.1 预实验效果分析

在对花生果直接检测前,首先人为剥去花生果外壳,取其内部花生仁进行太赫兹反射成像预实验。不同成像颜色下的太赫兹图像结果如图 3 所示。可以看出当选择图像颜色为 hot 模式时,通过微调可以获取边缘分明且较为满意的成像结果。因此在后期实验中,主要选择在 hot 模式下得到初步的样本成像图像。

在对花生仁的太赫兹反射成像预实验获得较满意的结果后,进一步探索THz-RIM对带壳的花生果进行检测的可能性,即采集满仁花生果样本与空果样本的太赫兹反射成像图像。实验采取较大的扫描步长、粗略获取图像来验证。验证图像如图 4 所示,为花生果样本在 2 个时间点之间作差值的层析图像粗略图,可以大致看到样本的性状大小、内部含仁情况。

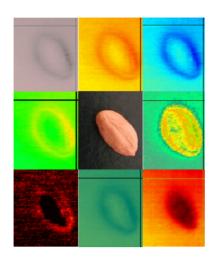


图 3 不同颜色下的太赫兹图像 Fig.3 Terahertz images in different colors

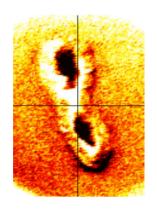
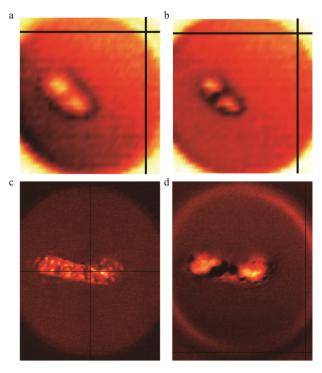


图 4 层析图像粗略图 Fig.4 Preliminary sketch of tomographic image

在取得单个花生果样本的太赫兹反射图像后,通过选择时间轴上的不同时间点,可以获取由花生仁反射太赫兹波形成的图像,进而可得到花生仁在不同深度的层析图像。由于实验仪器分辨能力的限制,在具体操作过程中,在同样采集参数下、个头较小的鲁花 9 号花生果成像效果不如个头较大的花育 36 号清楚,具体采集图像如图 5 所示。图 5a、c 分别为鲁花 9 号、花育 36 号样本在其上(下)表面左右位置的层析图像,基本上只能看到花生仁的外部轮廓,无法看清花生仁之间的间隔及具体形状,但能够明显看出花育 36 号层析图像更为清晰、甚至能够看到花生外壳纹理;而图 5b、d 则为鲁花 9 号、花育 36 号在靠近花生仁中部位置处的层析图像,同样从花育 36 号层析图像中,能够更清晰地观测到两粒花生仁的基本形状以及间隔距离,为利用 THz-RIM 实现花生内部品质的无损检测研究奠定了基础。

为方便后期图像观测,实验挑选整体个头较大、且形状大小相似的若干个花育 36 号花生果作为此次反射成像的主要实验对象。实验时根据花生果样本的实际物理大小

参数,通常将 2 个方向的采集区域参数设定为 X(-10,10)、Y(-15,15),单位均为 mm。单个花生果样本的单次太赫兹反射成像过程大约耗时 45 min。

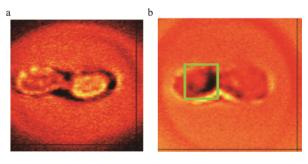


注: a 为鲁花 9 号上(下)表面位置; b 为鲁花 9 号中部位置; c 为花育 36 号上(下)表面位置; d 为花育 36 号中部位置。

图 5 不同层面的花生图像 Fig.5 Images of peanut in different layers

2.2 时域/频域 2 点外相加成像结果

本研究中主要对 integrated time slice 图像重构方法进行研究,即利用 2 个时间点之外范围的时域值相加后再成像,能够比较清楚地看出 2 个样本的差异,如图 6 所示。



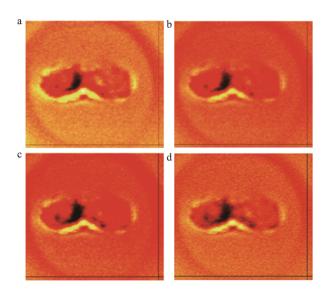
注: a 为满仁样本; b 为空瘪样本。 图 6 integrated time slice 方式下的样本图像 Fig.6 Sample images in integrated time slice mode

图 6a 为满仁花生样本,图 6b 为花生空果样本(只有左侧含有一颗籽粒),可看出双仁花生样本与单仁花生样本图像存在显著差异。可见利用 THz-RIM 可以实现满仁与花

生空果样本的检测区分,但图像细节仍然比较模糊,因此需要借助如图像去噪、增强等预处理方法来提高图像的品质,使图像更清晰、更可观^[31]。并且可人为选择对花生样本的感兴趣区域进行图像成像,从而观测样本的几何信息^[32-33]。在对样本进行成像时,选择最佳的成像方式可得到最佳频率点的成像图像,或提取该频率点的光谱数据。然后通过对比满仁花生果样本与空果样本的图像及光谱数据并融合分析,即可实现太赫兹技术无损检测花生品质研究。

2.3 空果图像增强结果

为了获得可观测度更高、视觉效果更好的图像,突出在决策分析中对人或机器有帮助作用的图像特征信息,挖掘图像中更多的使用价值,可以采用数字图像处理技术^[34-36]进行图像增强。通常,图像处理时会通过改变图像的亮度和对比度增强图像色彩。尤其是光线不足情况下,图像显得很暗、或者有时候背景跟目标物无法清楚观测时,可以通过适当地调节图像的两个基本属性—亮度与对比度来提升图像的整体效果,使得图像的可观测效果更佳。针对本研究中得到的花生太赫兹图像,利用 OpenCV-Python 对图像的亮度、色度、对比度及锐度进行处理操作后的图像增强效果如图 7 所示。



注: a 为亮度; b 为色度; c 为对比度; d 为锐度。 图 7 增强效果图 Fig.7 Enhancement effect graphs

可以看到,提升对比度之后的图像中,即图 7c,空果图像中右边空瘪部分与左边含仁部分对比最为明显,含仁部分黑色区域所占像素最多,即黑色部分面积最大,且最为清晰。

在对花生太赫兹图像分别进行亮度、色度、对比度及 锐度的增强后,进一步探究对 4 种方式的复合处理,并主要 调节图像的对比度。复合处理后的图像效果图如图 8 所示。 对图像的 4 个属性进行融合处理后的图像中,可以明显看出右边空瘪部分存在凹陷,与左边含仁部分对比明显。且含仁部分统计出的黑色像素点占比最多,图像处理效果优于对 4 个属性分别处理。

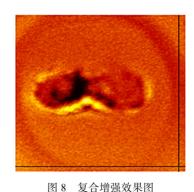


Fig.8 Composite enhancement effect graphs

因此在得到花生空果的太赫兹检测图像后,提升图像的对比度,可以实现对花生空果的无损检测。

3 结 论

实验利用太赫兹波的可穿透性及三维层析成像特点, 对满仁以及花生空果进行太赫兹反射图像采集, 探索不同 图像重构方式下的图像质量差异。最终发现在 integrated time slice 图像重构方式下、图像颜色为 hot 模式、图像分 辨率为 0.2 mm 时,满仁样本与空瘪样本图像差异显著并 且肉眼可观测、清晰度较高, 这表明太赫兹波对花生外壳 具有较好的穿透性,并且可以利用THz-RIM实现花生满仁 与空果样本的检测区分。实验利用图像增强预处理方法来 提高图像的清晰度及可观测度, 其中增强图像的对比度后 图像的可观测度提升明显。通过对图像的 4 个属性进行融 合处理, 并主要调节对比度, 可以得到可观测度最佳的图 像,并能通过图像中黑色区域部分辨别出花生含有一粒花 生仁。与传统的人工检测方法及实验方法相比, THz-RIM 可以不破坏花生外壳,实现了对花生空果的带壳无损检 测。后续研究中也可提取感兴趣区域中若干频率点的光谱 进行光谱数据处理,并将图像信息与光谱信息特征融合建 模,有望提高模型精确度,实现利用太赫兹反射成像技术 对花生品质的无损检测研究。

参考文献

- [1] 吴炜东,王迎新,赵自然.太赫兹光热电探测方法研究进展[J]. 科学通报,2022,67(8):714-727.
 - WU WD, WANG YX, ZHAO ZR. Research progress of Terahertz photothermoelectric detection methods [J]. Chin Sci Bull, 2022, 67(8): 714–727
- [2] BARDEN P, SOSIAK CE, GRAJALES J, et al. Non-destructive comparative evaluation of fossil amber using Terahertz time-domain spectroscopy [J].

- PLoS One, 2022, 17(3): e0262983.
- [3] 杨光鲲, 袁斌, 谢东彦, 等. 太赫兹技术在军事领域的应用[J]. 激光与 红外, 2011, 41(4): 376-380.
 - YANG GK, YUAN B, XIE DY, et al. Analysis on the use of THz technology in them ilitary application [J]. Laser Infrared, 2011, 41(4): 376–380.
- [4] 戴宁, 葛进, 胡淑红, 等. 太赫兹探测技术在遥感应用中的研究进展 [J]. 中国电子科学研究院学报, 2009, 4(3): 231-237.
 - DAI N, GE J, HU SH, *et al.* The development of the Terahertz detection techniques in the applications of remote sensing [J]. J Chin Acad Electron Inf Technol, 2009, 4(3): 231–237.
- [5] 韩丽娜, 教媛媛, 宁威. 太赫兹成像和光谱在医疗领域的应用综述[J]. 重庆邮电大学学报(自然科学版), 2021, 33(2): 242–252.
 - HAN LN, JIAO YY, NING W. A review of applications of Terahertz imaging and spectroscopy in the medical field [J]. J Chongqing Univ Posts Telecommun (Nat Sci Ed), 2021, 33(2): 242–252.
- [6] ZHANG X, HU M, ZHAO X, et al. Biomedical applications of Terahertz near-field imaging [C]. 2021 46th International Conference on Infrared, Millimeter and Terahertz Waves (IRMMW-THz), 2021.
- [7] 张仲雄,张东莉,田世杰,等.太赫兹波谱技术在食品掺假检测中的研究进展[J].光谱学与光谱分析,2021,41(5):1379-1386.
 - ZHANG ZX, ZHANG DL, TIAN SJ, *et al.* Research progress of Terahertz spectroscopy techniquein food adulteration detection [J]. Spectrosc Spect Anal, 2021, 41(5): 1379–1386.
- [8] 李虹,李彬,马立鹏,等. 太赫兹光谱成像技术及其在安检中的应用 [J]. 云南警官学院学报,2020,(3):122-128.
 - LI H, LI B, MA LP, *et al.* Terahertz spectral imaging technology and its application in security inspection [J]. J Yunnan Police Coll, 2020, (3):
- [9] LI B, LONG Y, LIU H, et al. Research progress on Terahertz technology and its application in agriculture [J]. Trans Chin Soc Agric Eng, 2018, 34(2): 1–9.
- [10] 琚新刚, 廉飞宇, 张元, 等. 虫蛀麦粒的太赫兹成像检测方法研究[J]. 中国粮油学报, 2018, 33(8): 106-111, 118.
 - JU XG, LIAN FY, ZHANG Y, et al. The detection of vermiculate grain of wheat using Terahertz imaging [J]. J Chin Cere Oils Ass, 2018, 33(8): 106–111, 118.
- [11] ZHONG SC. Progress in Terahertz nondestructive testing: A review [J]. Front Mech Eng, 2019, 14(3): 273–281.
- [12] 刘燕德,徐振,胡军,等. 太赫兹光谱检测技术对农产品品质检测的研究进展[J]. 激光与光电子学进展, 2021, 58(1): 71-82.
 - LIU YD, XU Z, HU J, *et al.* Research on quality of agricultural products by Terahertz spectroscopy [J]. Laser Optoelectron Prog, 2021, 58(1): 71–82.
- [13] 罗娜, 王冬, 王世芳, 等. 太赫兹技术在农产品品质检测中的研究进展 [J]. 光谱学与光谱分析, 2019, 39(2): 349–356.
 - LUO N, WANG D, WANG SF, *et al.* Progress in Terahertz technique for quality inspection of agro-food products [J]. Spectrose Spect Anal, 2019, 39(2): 349–356.

- [14] 吴静珠,李晓琪, 孙丽娟, 等. 太赫兹时域光谱及成像技术在农作物品质检测中的应用研究进展[J]. 光谱学与光谱分析, 2022, 42(2): 358-367.
 - WU JZ, LI XQ, SUN LJ, *et al.* Advances in the application of Terahertz time-domain spectroscopy and imaging technology in crop quality detection [J]. Spectrosc Spect Anal, 2022, 42(2): 358–367.
- [15] 农业部种植业管理司. 全国大宗油料作物生产发展规划(2016~2020年)[J]. 中国农业信息, 2017, (1): 6-15.
 - Development Plan of National Bulk Oil Crop Production. National bulk oil crop production and development plan (2016—2020) [J]. Chin Agric Inf., 2017, (1): 6–15.
- [16] 万书波,单世华,郭峰. 提高花生产能,确保油料供给安全[J]. 中国农业科技导报,2010,12(3):22-26.
 - WAN SB, SHAN SH, GUO F. Improving peanut production capacity to ensure oil supply [J]. J Agric Sci Technol, 2010, 12(3): 22–26.
- [17] 王丽, 刘红芝, 刘丽, 等. 油用花生品质评价模型的建立及其加工适宜性研究[J]. 食品科学技术学报, 2016, 34(1): 21-27.
 - WANG L, LIU HZ, LIU L, *et al.* Establishment of an evaluation model for oil peanut quality and its processing suitability [J]. J Food Sci Technol, 2016, 34(1): 21–27.
- [18] 厉广辉, 王兴军, 石素华, 等. 我国鲜食花生研究现状及展望[J]. 中国油料作物学报, 2018, 40(4): 604-607.
 - LI GH, WANG XJ, SHI SH, *et al*. An overview of research progress and prospect for fresh peanut in China [J]. Chin J Oil Crop Sci, 2018, 40(4): 604–607.
- [19] 周雪松, 赵谋明. 我国花生食品产业现状与发展趋势[J]. 食品与发酵工业, 2004, (6): 84-89.
 - ZHOU XS, ZHAO MM. Present situation and developing trend of peanut food industry in China [J]. Food Ferment Ind, 2004, (6): 84–89.
- [20] 孙建非. 基于高光谱成像技术的花生多项品质参数无损检测方法的研究[D]. 淄博: 山东理工大学, 2020.
 - SUN JF. Nondestructive dection methods of some peanut quality parameters based on hyperspectral imaging technology [D]. Zibo: Shandong University of Technology, 2020.
- [21] 杨晶晶,卢俊玮. 光谱技术在花生品质检测中的应用研究进展[J]. 作物研究, 2018, 32(4): 345–348.
 - YANG JJ, LU JW. Research progress of spectral technology in peanut quality detection [J]. Crop Res, 2018, 32(4): 345–348.
- [22] 刘永惠, 沈一, 陈志德. 利用近红外技术分析与评价花生资源的品质 性状[J]. 花生学报, 2013, 42(2): 21-27.
 - LIU YH, SHEN Y, CHEN ZD. Analysis and evaluation of quality characters of peanut varieties with near infra-red spectroscopy technology [J]. J Peanut Sci, 2013, 42(2): 21–27.
- [23] 陈天华, 雷春宁, 李月. 基于近红外光谱特性分析的花生含水率检测 [J]. 食品科学技术学报, 2013, 31(5): 50-54.
 - CHEN TH, LEI CN, LI Y. Moisture detection of peanuts based on near-infrared spectral characteristics [J]. J Food Sci Technol, 2013, 31(5):
- [24] 刘翠玲, 胡莹, 吴静珠, 等. 基于太赫兹衰减全反射技术的花生霉变程

度判别[J]. 农业机械学报, 2019, 50(4): 333-338, 355.

LIU CL, HU Y, WU JZ, *et al.* Discrimination of peanut mildew degree based on Terahertz attenuated total reflection spectroscopy [J]. Trans Chin Soc Agric Mach, 2019, 50(4): 333–338, 355.

[25] 王冬, 王纪华, 吴静珠, 等. 基于 ATR-THz 波谱的劣变花生快速无损 鉴别研究[J]. 农产品质量与安全, 2018, (4): 13-17, 24.

WANG D, WANG JH, WU JZ, et al. Research on the rapid and non-destructive identification to deteriorated peanut based on ATR-Terahertz spectroscopy [J]. Qual Saf Agro-products, 2018, (4): 13–17, 24.

[26] 刘俊彬. 薄壳类作物种子质量 THz 光谱和图像检测应用基础研究[D]. 南昌: 华东交通大学, 2021.

LIU JB. Basic research on application of Terahertz spectrum and image thin shell seed qulity detection [D]. Nanchang: East China Jiaotong University, 2021.

- [27] 李斌, NING W, 张伟立, 等. 基于太赫兹光谱技术的山核桃内部虫害 检测初步研究[J]. 光谱学与光谱分析, 2014, 34(5): 1196–1200.
 - LI B, NING W, ZHANG WL, et al. Preliminary researchon insect damage detectionin pecans using Terahertz spectroscopy [J]. Spectrosc Spect Anal, 2014, 34(5): 1196–1200.
- [28] JIANG Y, LI G, GE H, et al. Machine learning and application in Terahertz technology: A review on achievements and future challenges [J]. IEEE Access, 2022, 10: 53761–53776.
- [29] 秦小文, 温志芳, 乔维维. 基于 OpenCV 的图像处理[J]. 电子测试, 2011, (7): 39-41.
 - QIN XW, WEN ZF, QIAO WW. Image processing based on OpenCV [J]. Electron Test, 2011, (7): 39–41.
- [30] 王福斌, 李迎燕, 刘杰, 等. 基于 OpenCV 的机器视觉图像处理技术实现[J]. 机械与电子, 2010, (6): 54-57.
 - WANG FB, LI YY, LIU J, *et al.* Implementation of machine vision image processing technology based on OpenCV [J]. Mach Electron, 2010, (6): 54–57.
- [31] 李镇. 太赫兹图像识别与处理技术研究[D]. 成都: 电子科技大学, 2018.
 - LI Z. Reasearch on Terahertz image recognition and processing technology [D]. Chengdu: University of Electronic Science and

- Technology of China, 2018.
- [32] 刘治群,杨万挺,朱强. 几种图像增强算法的研究比较[J]. 合肥师范 学院学报,2010,28(6):60-63.
 - LIU ZQ, YANG WT, ZHU Q. A comparative study on several algorithms of image enhancement [J]. J Hefei Norm Univ, 2010, 28(6): 60–63.
- [33] 张鹏程. 太赫兹反射成像与图像增强算法的研究[D]. 天津: 天津大学, 2020
 - ZHANG PC. Research on Terahertz reflection imaging and image enhancement algorithms [D]. Tianjin: Tianjin University, 2020.
- [34] 陈汗青, 万艳玲, 王国刚. 数字图像处理技术研究进展[J]. 工业控制 计算机, 2013, 26(1): 72-74.
 - CHEN HQ, WAN YL, WANG GG. Progress of digital image technology processing research [J]. Ind Control Comp, 2013, 26(1): 72–74.
- [35] 李红俊, 韩冀皖. 数字图像处理技术及其应用[J]. 计算机自动测量与控制, 2002, (9): 620-622.
 LI HJ, HAN JW. Digital image processing and its application [J]. Comp
- [36] LI JS, LI SG, GU GH, et al. A novel method based on digital image processing technique and finite element method for rapidly modeling optical properties of actual microstructured optical fibers [J]. IEEE

Meas Control, 2002, (9): 620-622.

Photonics J, 2016, 8(6): 1-14.

(责任编辑: 于梦娇 张晓寒)

作者简介



孙晓荣,硕士,教授,主要研究方向为 为智能测量技术与数据处理、系统建模与仿 真方法、智能控制方法。

E-mail: sxrchy@sohu.com



张小勤,主要研究方向为光电检测系 统与建模分析。

E-mail: zhangxiaoqin_btbu@163.com