

## 太赫兹技术在农产品检测中的应用研究进展

卢雪晶<sup>1,2</sup>, 葛宏义<sup>2,3</sup>, 蒋玉英<sup>2,3</sup>, 张元<sup>3\*</sup>

1. 战略支援部队信息工程大学, 河南 郑州 450001

2. 河南工业大学粮食信息处理与控制教育部重点实验室, 河南 郑州 450001

3. 河南工业大学信息科学与工程学院, 河南 郑州 450001

**摘要** 我国是农业大国,保障粮食安全是国家发展的战略需要。农产品检测技术的应用和发展对监控质量,预防由农产品品质问题引发的安全事故至关重要。太赫兹(Terahertz, THz)波位于电磁频谱空隙,频率高于微波而低于红外线,具备光子能量低、穿透性好、能表征分子结构等优点。基于太赫兹波的光谱检测技术受到研究人员广泛关注,在生物医学、安全检查等方面得到应用,被证明是一种可靠的检测手段。在农产品应用领域,太赫兹波特有的非接触、无标记检测能力为农产品成分分析、质量控制提供了技术手段,其良好的穿透性和无损性,可以用来在不破坏农产品表面及外包装的前提下,检测内部成分变化。与其他光谱(超声、X射线、红外等)检测手段相比,太赫兹波频率范围宽、表征能力强,可实现对目标物质的快速无损检测。近几年,随着太赫兹发射源、探测器等设备以及光谱和成像技术的发展,其在农产品领域的应用有了新的进展。通过收集整理近期的文献资料,综述了太赫兹技术在农产品检测方面的应用拓展和研究成果,总结了目前存在的应用局限。在此基础上,对未来太赫兹光谱和图像检测的研究方向进行了展望,提出提高检测灵敏度和检测速度是农产品领域太赫兹技术产业化应用的研究重点。在检测系统中引入基于超材料的传感器是提升灵敏度的一种有效手段,可以突破原有的太赫兹光谱检测极限,对研究农药残留、真菌毒素等危害农产品安全的痕量污染物具有重要意义。在农产品快速成像检测方面,基于单像素成像和压缩感知理论的太赫兹计算成像技术是提高检测速度的可行方案。这些研究成果将为后续太赫兹技术的发展提供方向性指导,对农产品检测领域的应用推广具有重要参考价值。

**关键词** 太赫兹波;太赫兹光谱;太赫兹成像;农产品检测

**中图分类号:** O434.3 **文献标识码:** R **DOI:** 10.3964/j.issn.1000-0593(2022)11-3330-06

### 引言

农产品品质影响食品安全,关系国计民生,快速准确的早期检测手段是农产品产业应用和自动化发展的技术保障。传统的免疫分析、荧光检测等农产品检测方法,存在样本预处理复杂,检测费时、费力,且对检测人员专业性要求高等问题,难以满足快速无损的检测需求。且农产品质量受储藏时间和环境的影响实时变化,需要穿透性更好的检测技术及早发现从内部开始变质的检测目标。太赫兹为农产品检测提供了新的方向,是目前极具潜力的农业领域应用的研究热点。

太赫兹波是电磁频谱的一部分,频率从 100 GHz 到 10

THz,如图 1 所示,具备这一波段独特的光谱特性<sup>[1]</sup>。首先,太赫兹波本质上是非电离的,其光子能量较低,照射样品时不会对活细胞上的生物分子造成负面影响。其次,太赫兹波具备良好的穿透性,能够透过晶体、塑料、纸张等多种非极性材料,对带包装的物体进行检测,识别内部物质信息。最后,由于许多分子的振动和转动能级都处于太赫兹频段,太赫兹光谱可以体现检测样本的内部结构及物理、化学反应信息,描绘出不同物质的指纹图谱。因此,太赫兹波作为一种非电离光束照射物体,利用不同物质在太赫兹频段对光子的吸收差异,就能达到检测识别的目的。近年来,太赫兹波已经在生物医药、医学诊断、反恐安全、雷达通讯等领域得到应用,而在农产品检测方面也表现出重要的研究价值,相关成果在后文阐述。

**收稿日期:** 2021-10-11, **修订日期:** 2022-01-16

**基金项目:** 国家自然科学基金项目(61975053, 61705061), 河南省重大公益专项(201300210100)资助

**作者简介:** 卢雪晶, 1980 年生, 战略支援部队信息工程大学博士研究生 e-mail: lxjemma0011@163.com

\* 通讯作者 e-mail: zy\_haut@163.com

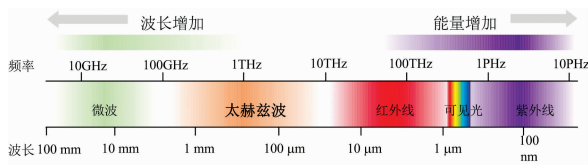


图 1 电磁波谱  
Fig. 1 Electromagnetic spectrum

## 1 太赫兹技术

### 1.1 太赫兹源和探测器

太赫兹检测系统包括源和探测器两个重要部分。图 2(a)和(b)所示为常见的太赫兹辐射产生方法：光导天线技术通过光激发，在半导体基上的两个金属电极之间产生载流子，进而生成太赫兹辐射；而光整流技术则是利用脉冲激光与非线性晶体的相互作用产生太赫兹波。太赫兹探测器依据探测原理不同，分为热效应、光电效应、电子学效应等多种类型。光导天线中探测光束激发电导介质产生自由载流子，再利用载流子产生的光电流与太赫兹辐射成正比的特性测得瞬时电场，如图 2(c)所示；而电光采样技术则使用 ZnTe 等电光晶体，利用偏振控制系统获得太赫兹辐射波形信息，如图 2(d)所示。

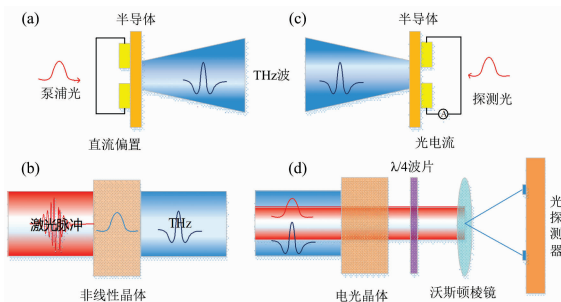


图 2 利用 (a) 光导天线和 (b) 光整流产生太赫兹波；利用 (c) 光导天线和 (d) 电光采样探测太赫兹波

Fig. 2 THz generation using (a) photoconductive antenna and (b) optical rectification; THz detection using (c) photoconductive antenna and (d) EOS

### 1.2 太赫兹光谱

太赫兹光谱中包含有目标样本的物理、化学、分子结构等信息，适用于表征并研究物质的指纹特性。典型的太赫兹时域光谱系统由飞秒激光器、发射器、光延时线和探测器几部分组成，根据检测方式的不同，又分为透射式和反射式，如图 3 所示。飞秒激光通过分束镜后被分为两束：一束经光延时线入射到 THz 发射器件上产生太赫兹脉冲，照射样品后聚焦到探测端；另一束作为探针，经多次反射也到达探测端。THz 探测设备通过计算太赫兹脉冲与探针光束之间的时延函数，得到时域光谱，获得电场的强度及变化情况。检测系统直接测量太赫兹信号的电场强度，获得待测物质的振幅和相位信息。通过对时域、频域光谱的分析，计算出样本的折射率、吸收系数等光学参数<sup>[2]</sup>，结合特征提取和模式识别分析手段，完成对目标物质的检测。

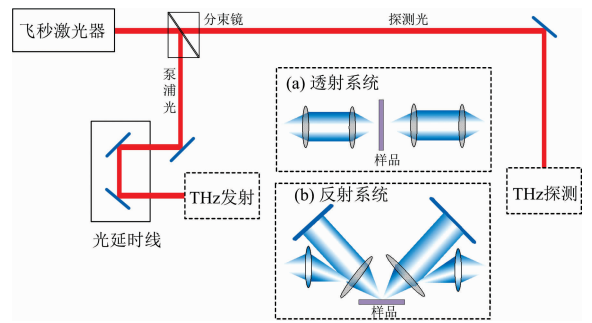


图 3 太赫兹时域光谱检测系统

(a): 透射模式; (b): 反射模式

Fig. 3 Terahertz time-domain spectroscopy system

(a): Transmission; (b): Reflection

### 1.3 太赫兹成像

太赫兹波比微波、毫米波的空间分辨率高，比红外线、可见光的穿透性好，利用太赫兹成像可以获得待测物质更多深度细节信息。常见的成像方式包括时域光谱成像、飞行时间成像、断层扫描成像以及近场成像等<sup>[3]</sup>。时域光谱成像采用机械扫描方式逐点采集样本信息，扫描结果是一个三维的数据结构，记录了不同时间域位置每个像素点的光谱信息。这种成像技术由于采样点多，扫描过程十分漫长，一个重要的研究方向就是在保证检测质量的情况下提高检测速度。飞行时间成像利用太赫兹脉冲的到达时间映射成像，根据时间差来测算样本的三维结构。这种成像技术在探测多层物体时具备明显的优势，其飞行时间不受样品表面灰度和特征的影响，扫描结果直接反映出样本的空间分布信息。断层扫描是由 X-Ray CT 技术衍生而来的一种成像方法。太赫兹光束以不同角度入射样本，得到多个投影方向上的投影图像，并借此重建目标样本的空间图像。这种成像方式适用于检测物质的内部结构信息，方便重构出待检物质的二维截面图。近场成像是指在距离样品表面只有波长甚至亚波长数量级的区域形成图像，此时需要检测只存在于离物体很近距离的隐失场，隐失场可以记录目标样品的细节信息。相较于远场成像，太赫兹近场成像可以突破衍射极限的限制，获得亚微米甚至纳米级别的高分辨率图像。

## 2 太赫兹技术在农产品检测中的应用

超快光学和光电子技术的发展，为太赫兹波提供了高功率且稳定的光源产生途径及高灵敏度的探测方法，激发研究人员对快速且具备超分辨性能的太赫兹光谱和成像技术的研究热情，相关成果推动了太赫兹技术在农产品检测领域的应用拓展。

### 2.1 水分含量监测

农产品中的水分含量会直接影响其品质、加工效率和保存周期。以稻谷为例，当水分含量保持在 13.5%~15% 之间时，精米加工性能最优，出米率高且大米口感筋道。水分过高或过低会导致稻谷脱壳难度增加，加工出的大米质量下降。利用太赫兹波被水强吸收的特性，可以对农产品的水分

含量进行检测分析和动态预测,为其在加工过程中的水分控制以及储藏过程中的湿度监测提供有效手段。Nie 等<sup>[4]</sup>利用太赫兹光谱检测油菜籽中的水分含量,每隔半小时获取一次其在 0.3~2 THz 范围内的透射光谱,结合 PLS 等数学方法建立出叶片水分含量的预测模型。Song 等<sup>[5]</sup>应用太赫兹成像技术研究腊梅、银杏和凤尾竹的叶片,根据透射光谱图像分析不同植物叶片的含水量以及水分空间变化趋势。实验表明,在叶片自然脱水的过程中:(1)叶基区域的水分流失速度比叶端区域快;(2)叶脉部分的脱水率要比叶肉部分大;(3)受损伤的叶片由于伤口位置改变了叶片内部水活动趋势,会导致叶端水流失率更明显。这些结果印证了应用太赫兹波研究植物水分时空变化的可行性,为农产品水分含量的监测和预测提供了理论基础和实验方向。

## 2.2 农产品定性分析

### 2.2.1 质量控制

农产品品质发生变化,其内部分子结构和物理化学特征也会相应地发生改变。太赫兹光谱可以表征出不同样本的特征信息,在分类溯源、质量评价、变质检测等方面有重要的应用价值。谷物等农产品对储存环境有一定要求,湿度升高会导致种子发芽、果实变质。利用太赫兹光谱和图像,结合分类算法可以区分不同阶段的样本,把无法用肉眼分辨的发芽、变质颗粒识别出来。Jiang 等<sup>[6]</sup>使用太赫兹时域光谱成像技术对小麦质量进行评估,获取了不同发芽阶段样品的二维太赫兹图像,结果显示正常小麦图像内部信号分布均匀,而发芽部分图像信号明显增强。同时,文章比较了应用 PLS、BPNN 以及 PCA-SVM 几种方法对图像数据处理后的结果,证明具有线性和多项式核的 PCA-SVM 模型性能最优,对发芽和正常小麦粒的预测精度可达 100%。

### 2.2.2 掺假检测

农产品的品类、等级决定其价值,这就导致以次充好,以假乱真的情况屡有发生,影响产品质量甚至食品安全。李斌等<sup>[7]</sup>使用太赫兹时域光谱对葛粉中掺杂薯粉的含量进行检测,利用 PLS 和 LS-SVM 分别建立判别模型,实现对掺杂薯粉的定性定量分析。Li 等<sup>[8]</sup>运用光谱数据和模式识别算法对不同混合比例的掺假米进行检测。首先用 PCA 算法从太赫兹原始光谱中提取特征,随后对数据进行标准正态变量变换、基线校正和一阶导数的预处理,最后采用 PLS、SVM 和 BPNN 结合不同预处理后的吸收光谱建立分类模型。实验结果表明,基于一阶导数预处理的吸收光谱的 SVM 模型具有最佳的鉴别能力,准确率高达 97.33%,可以用来判定高质量米中是否混杂低质量米。

### 2.2.3 转基因物种鉴定

转基因物种的引入可以提高农产品的产量和抗虫性,但也可能带来新的菌株及过敏原,因此,对相关物种的鉴定存在重要意义。传统的基因检测手段在一定程度上会破坏蛋白质和基因片段,而太赫兹光谱则可以利用生物分子在太赫兹频段的指纹特征来识别转基因物种。Li 等<sup>[9]</sup>通过对转基因和非转基因棉花种子的太赫兹光谱分析,得到不同样品的折射率和吸收系数,实验结果显示转基因样本的折射率较低,在 1.4~2.0 THz 区域有明显的特征峰,同时其吸收系数明显

高于非转基因样本,借此可以区分出转基因的棉花种子。Wei<sup>[10]</sup>等则采集了 255 个转基因和非转基因大豆样本的时域光谱,利用 PLS 选取光谱特征区间,结合判别最小二乘法、网络搜索支持向量机和反向传播网络算法分别建立识别模型,其中应用网络搜索支持向量机建模的识别效果最好,准确率达到了 98.25%,能有效区分转基因和非转基因大豆。

## 2.3 农产品定量分析

### 2.3.1 成分定量分析

太赫兹光谱对物质的表征能够到达分子层面,结合其光子能量低、不会改变分析物性质及结构的优点,可以用来对农产品中的氨基酸、蛋白质以及碳水化合物等组成成分进行检测和定量分析。Jiang 等<sup>[6]</sup>研究处于不同发芽阶段的小麦颗粒,根据组成成分的太赫兹光谱差异,揭示了小麦在萌芽过程中内部成分的变化趋势。随后,其团队利用太赫兹图像检测不同麦芽糖浓度的小麦样品,结合 PCA 和 SVM 算法,构建了检测精度可达 94% 的浓度分析模型。又提出融合光谱与图像的多元特征信息建模方法<sup>[11]</sup>,设计出增强迭代终止指标,实现了支持向量机基本模型参数的自动优化。实验结果表明,多元太赫兹数据融合建模算法能够测定小麦中麦芽糖含量,为农产品中糖、酸等有机成分的定量检测提供了研究方向。

### 2.3.2 农药残留检测

传统的农残检测方法(免疫分析、荧光检测等)需要标记检测物、破坏样本,且检测过程较为复杂。太赫兹光谱则可以实现快速、无损、免标记的检测,但受到农残含量少、浓度低的影响,检测灵敏度不高。基于超材料传感器的太赫兹检测可以有效提升微量元素的检测限,正逐步成为农残及真菌毒素快速检测的一个重要研究方向。Xu<sup>[12]</sup>等验证了将太赫兹超材料吸收器用于稻米中甲基毒死蜱检测的可行性,设计出结合纳米金颗粒和石墨烯的异质结构,用于增强超材料对甲基毒死蜱信号的放大效果。又利用石墨烯中电子移动可以改变太赫兹辐射吸收量的特性,制备了石墨烯基的太赫兹传感器,对甲基氯嘧啶酚的检测极限可达  $0.13 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ <sup>[13]</sup>。

## 2.4 异物及包装物检测

太赫兹波可以穿透塑料、纤维、晶体等聚合物,在不破坏目标物体表面或外包装的前提下检测其内部成分和结构,因此,太赫兹光谱和成像技术在农产品的异物及包装物检测方面具备明显优势。Jiang 等<sup>[14]</sup>应用时域光谱对小麦颗粒和面粉中的异物进行成像检测,应用 PCA 和 SVM 算法对数据进行分析,检测出隐藏在小麦颗粒中的金属、石子等异物,同时也检测到存在于面粉不同深度位置的异物。Wang 等<sup>[15]</sup>通过比较光谱差异,结合 PCA 和判别分析方法成功定位出香肠中的金属污染物,进一步验证了太赫兹波对不透明物体的检测能力,为农产品的无损检测提供了新的应用方向。

## 3 太赫兹技术在农产品检测中的问题与展望

### 3.1 农产品检测中的太赫兹应用局限

太赫兹光谱和成像技术在农产品检测领域的潜在价值得到研究人员越来越多的关注,但其应用发展也受到太赫兹本

身光谱特性和发射源、探测器等设备的限制，主要体现在几个方面：

(1)水吸收明显：将太赫兹波用于高含水量的农产品检测时，穿透能力会受到样品厚度的限制，进而降低光谱检测效率，需要对含水样品进行预处理，或者在数据处理阶段利用神经网络等方法去除光谱中的吸水线<sup>[16]</sup>，弱化太赫兹检测中的水吸收影响。(2)散射效应：农产品样本大多表面粗糙且形状不均匀，改变样品表面的平滑度可以减小太赫兹波散射对检测结果的影响。(3)检测物的低敏感度：农残、重金属、真菌毒素等微量存在的污染物，太赫兹光谱特征不明显，不能达到检测识别的目标，需要借助其他手段来提高待测物质的识别度。相关研究大多集中在数据处理阶段，依赖先进的建模方法提高检测精度，但更为积极的方向是改进太赫兹检测技术，在数据采集的过程中获取尽可能多的特征信息。(4)太赫兹元器件限制：太赫兹技术在农产品检测中的应用拓展受到发射源及探测器等设备制约，开发低成本、高性能的太赫兹组件对检测水平的提升至关重要。提高输出功率及输出稳定性是太赫兹源的发展方向，Koulouklidis等<sup>[17]</sup>提出使用中红外双色激光产生太赫兹波的方法，取得了太赫兹超宽带高功率源上的突破。而在太赫兹探测方面，需要增强探测器上的太赫兹能量，消除检测过程中的干涉效应来提高信号采集效率，检测范围广、灵敏度高的快速探测设备是未来的研究趋势。

### 3.2 农产品检测中的太赫兹技术展望

#### 3.2.1 基于超材料的高灵敏太赫兹检测

农产品检测面临的一个重要挑战是灵敏度的提升，太赫兹超材料因此受到研究人员的广泛关注。超材料由人工设计的亚波长结构单元组成，外界光场与结构中的自由电子相互作用，使得材料表面局域电场增强，在太赫兹频段出现谐振峰。超材料对其表面电磁环境的变化十分敏感，对于 THz 光谱曲线特征不明显的物质，可以将测量其对太赫兹波的反应转化为测量超材料的电磁响应变化，突破原有的太赫兹光谱检测极限。因此，太赫兹超材料的应用，可以拓宽农产品的检测范围。

基于超材料的太赫兹检测，对待测物质的特征信号有放大效果，可以显著提升响应速度和检测灵敏度。Liu<sup>[18]</sup>等使用图 4(a)所示的环状结构吸收器检测有机氯农药残留，超材料在 0.1~2 THz 范围内有两个谐振峰，滴入不同浓度的样本进行检测，谐振峰频率发生红移，与直接使用太赫兹波检测样品相比，检测灵敏度明显提高。Zhao<sup>[19]</sup>等提出了图 4(b)所示的聚酰亚胺底三分裂环结构的太赫兹生物传感器，并将谐振频率设计在对黄曲霉素 B1 和 B2 差异较大的频段，通过谐振频率偏移量的不同，论证了对 AFB1 和 AFB2 的定性定量检测的可行性。目前，太赫兹超材料传感器从结构设计到对特定分子特异性的研究都取得了一定进展<sup>[20]</sup>，微纳加工工艺日趋成熟，为超材料的制备提供了技术保障。未来，融合信息技术的可协调与可重构超材料可实现对太赫兹检测波束的智能控制，将进一步提升待测物质的检测灵敏度，对实现农残、真菌毒素等痕量污染物的检测有积极意义，是农产品太赫兹检测的一个重要研究方向。

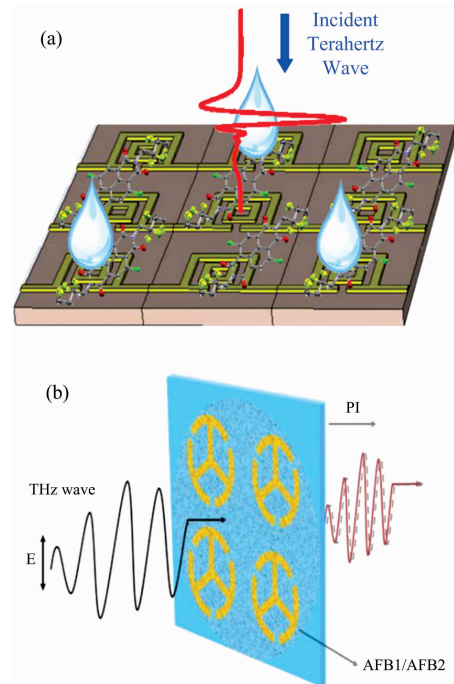


图 4 (a) 环形吸收器示意图<sup>[18]</sup>；

(b) 三分裂环谐振器示意图<sup>[19]</sup>

Fig. 4 (a) Schematic diagram of loop-shaped absorber; (b) Schematic diagram of three-split ring resonators

#### 3.2.2 基于单像素成像的快速太赫兹成像检测

太赫兹成像检测受到检测时长和成像分辨率的影响，应用范围有限。单像素成像方案将成像过程与信息技术融合，能够有效缩短图像采集和信息处理的时间，对提高农产品成像检测速度有一定的参考价值。传统的太赫兹时域光谱成像需要采集目标物体所有像素点的光谱信息，而基于压缩感知理论的单像素成像方案，利用信号的稀疏特性，使用一系列空间掩模调制太赫兹检测光束，采集每个空间模式下的信号强度，再根据掩模与检测目标的关联性重构出物体图像，其采集次数远小于目标物体的像素点个数。

典型的太赫兹单像素成像系统由光源、数字微镜设备(digital micromirror device, DMD)以及价格相对低廉的单像素探测器组成。Zanotto等<sup>[21]</sup>使用构建的成像系统获取聚乙烯结构样本的信息，并利用 50% 的数据重构出了物体图像，验证了单像素成像方案在太赫兹时域光谱中的应用可行性。如图 5 所示，分束器将飞秒激光光束分成三部分，除了用来产生太赫兹波的泵浦光束和探针光束外，第三路激光作为调制光束照射 DMD，通过不断翻转器件产生不同的调制图案，实现对目标物体太赫兹检测光束的空间调制。单像素成像系统中的探测器每次采集的是当前调制模式下的累加光信号强度，包含目标物体多个像素点信息，结合用于调制的掩模顺序，利用重构算法就可以实现对目标物体的图像重构<sup>[22]</sup>。与传统光栅扫描成像机制相比，基于压缩感知理论的单像素成像技术可以倍数级的提高系统检测速度，在光学成像和图像超分辨率重建等研究中备受关注。

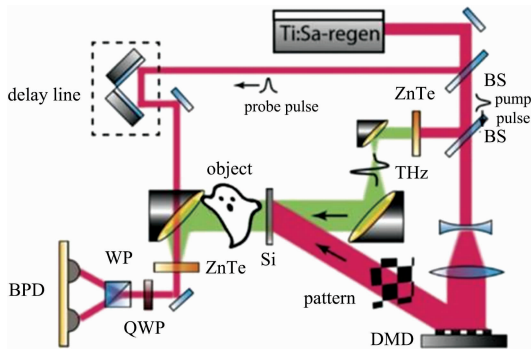


图 5 基于太赫兹时域光谱系统的单像素成像原理示意图<sup>[21]</sup>

Fig. 5 Schematic diagram of single-pixel imaging based on THz-TDS

### 3.2.3 基于太赫兹光谱图像数据的农产品数据库

农产品太赫兹检测数据的处理过程通常使用 PCA, SVM 和 BPNN 等特征提取和模式识别方法,既可以分别对光谱和图像进行处理,也可以采用融合算法提高待测物质的特征提取效率。Shen 等<sup>[23]</sup>设计了卷积神经网络 Wheat-V2,将太赫兹光谱和图像数据融合分析,对小麦杂质的检测精确度  $F1$  分值达到 97.83%。近几年,深度学习在非线性模型求解方面的优势受到关注,结合人工智能技术的光谱图像融合处理方法,为太赫兹检测数据深度分析提供了可能, Park 等<sup>[24]</sup>综述了机器学习算法在太赫兹时域光谱和图像中的应用。此外,光衍射神经网络、图卷积神经网络等技术也为太赫兹检测数据分析开拓出新的研究方向。

## References

- [1] Gong A, Qiu Y, Chen X, et al. *Applied Spectroscopy Reviews*, 2020, 55(5): 418.
- [2] Bernier M, Garet F, Kato E, et al. *Journal of Infrared, Millimeter, and Terahertz Waves*, 2018, 39(4): 349.
- [3] Guerboukha H, Nallappan K, Skorobogatiy M. *Advances in Optics and Photonics*, 2018, 10(4): 843.
- [4] Nie P, Qu F, Lin L, et al. *Sensors*, 2017, 17(12): 2830.
- [5] Song Z, Yan S, Zang Z, et al. *IEEE Transactions on Terahertz Science and Technology*, 2018, 8(5): 520.
- [6] Jiang Y, Ge H, Lian F, et al. *Scientific Reports*, 2016, 6: 21299.
- [7] LI Bin, DU Xiu-yang, LIU Yan-de, et al (李斌, 杜秀洋, 刘燕德, 等). *Laser & Optoelectronics Progress*(激光与光电子学进展), 2019, 56(20): 203001.
- [8] Li C, Li B, Ye D. *IEEE Access*, 2020, 8: 26839.
- [9] Li B, Shen X. *Food Science & Nutrition*, 2020, 8(10): 5426.
- [10] Wei X, Zheng W, Zhu S, et al. *Spectrochimica Acta Part A: Molecular and Biomolecular Spectroscopy*, 2020, 238: 118453.
- [11] Jiang Y, Ge H, Zhang Y. *Food Chemistry*, 2020, 307: 125533.
- [12] Xu W, Xie L, Zhu J, et al. *Carbon*, 2019, 141: 247.
- [13] Xu W, Huang Y, Zhou R, et al. *ACS Applied Materials & Interfaces*, 2020, 12(39): 44281.
- [14] Jiang Y, Ge H, Zhang Y. *Optik*, 2019, 181: 1130.
- [15] Wang C, Zhou R, Huang Y, et al. *Food Control*, 2019, 97: 100.
- [16] Mikerov M, Ornik J, Koch M. *IEEE Transactions on Terahertz Science and Technology*, 2020, 10(4): 397.
- [17] Koulouklidis A D, Gollner C, Shumakova V, et al. *Nature Communications*, 2020, 11(1): 292.
- [18] Liu J. *Materials Chemistry and Physics*, 2019, 242: 122542.
- [19] Zhao R, Zou B, Zhang G, et al. *Journal of Physics D: Applied Physics*, 2020, 53(19): 195401.
- [20] YANG Jun, QI Li-mei, WU Li-qin (杨君, 亓丽梅, 武利勤). *Spectroscopy and Spectral Analysis*(光谱学与光谱分析), 2021, 41(6): 1669.

目前,基于太赫兹光谱和成像技术的农产品研究工作尚在初级阶段,检测数据不够丰富,可以借鉴的实验结果和理论依据相对较少。因此,建立特定农产品的太赫兹标准数据库对农产品检测水平的提升和技术产业化落地具有实际价值。将太赫兹数据处理方法和分析模型集成进软件系统,依托内置的标准数据库,可实现对农产品太赫兹检测数据的一键式分析。结合现有的农产品分拣、色选设备,将大大提高对原材料品质的分级和异物检测能力,推动农产品加工流程自动化。

## 4 结论

综上所述,太赫兹检测具备无标记、高穿透及多元素分析等优势,能够满足农产品安全无损、快速准确的检测需求,监测目标样本的品质变化,实现对农产品的早期检测及变质预警,加速产业自动化,为农产品分类、加工、储藏环节的应用发展带来新的机遇。目前,太赫兹技术在农产品检测中的应用正逐步拓宽,从成分鉴定、质量控制到污染物测定和包装物检测,相关研究都取得了很大进展。但作为一种新兴的技术,太赫兹在农业自动化发展及农产品安全保障方面的检测应用也受到其光谱特质以及检测方式的限制,检测效率有待提高。未来几年,太赫兹技术在农产品检测领域的研究重点将集中在提高系统检测灵敏度、提升检测速度以及产业化实现几个方面。因此,研发基于超材料的高灵敏太赫兹传感器,设计实现太赫兹快速成像系统以及建立农产品太赫兹光谱图像标准数据库,对农产品领域的应用拓展具有重要意义。

- [21] Zanotto L, Piccoli R, Dong J, et al. *Optics Express*, 2020, 28(3): 3795.
- [22] Edgar M P, Gibson G M, Padgett M J. *Nature Photonics*, 2019, 13(1): 13.
- [23] Shen Y, Yin Y, Li B, et al. *Computers and Electronics in Agriculture*, 2021, 181: 105931.
- [24] Park H, Son J H. *Sensors*, 2021, 21(4): 1186.

## Application Progress of Terahertz Technology in Agriculture Detection

LU Xue-jing<sup>1,2</sup>, GE Hong-yi<sup>2,3</sup>, JIANG Yu-ying<sup>2,3</sup>, ZHANG Yuan<sup>3\*</sup>

1. PLA Strategic Support Force Information Engineering University, Zhengzhou 450001, China

2. Key Laboratory of Grain Information Processing & Control, Ministry of Education, Henan University of Technology, Zhengzhou 450001, China

3. College of Information Science and Engineering, Henan University of Technology, Zhengzhou 450001, China

**Abstract** China is a big agricultural country, and ensuring food security is a strategic need for national development. The application and development of agricultural product detection are crucial for quality control and avoiding safety accidents caused by quality problems. Terahertz (THz) wave is located in the gap between the microwave and infrared regions of the electromagnetic spectrum, the frequency of which is higher than a microwave but lower than infrared and has low photon energy, good penetration, as well as can be used to characterize the molecular structure. The detection technology based on terahertz has been applied in bio-medicine, safety inspection and other fields and has been proved to be a reliable detection method. For agricultural products, the terahertz wave's unique untouched and label-free capability provides a method for composition analysis and quality control. Based on its penetration and non-destructive, the terahertz spectrum is also used to detect the internal ingredients without damaging agricultural products' surface and outer packaging. Compared with other spectral detection technologies (ultrasonic, X-ray, infrared, etc.), terahertz wave is in a wide frequency range with a good characteristic spectrum and can be used for rapid non-destructive detection. In recent years, with the development of THz sources, THz detectors, THz spectroscopy and imaging technology, the application of terahertz in agricultural products detection has further development. Through collecting and sorting out recent relevant information, this paper reviewed the new progress of terahertz technology in agricultural product detection, summarized the limitation of terahertz application, and discussed the future study direction of terahertz spectrum and imaging—improving sensitivity and accelerating detection speed are research focuses for industrialization application of terahertz detection technology. The metamaterial-based sensors are applied in the terahertz detection system to improve the detection sensitivity, which is of great significance to detecting pesticides, mycotoxins and other pollutants that harm the safety of agricultural products. The terahertz computational imaging technology based on single-pixel imaging and compressed sensing algorithm is a feasible solution to accelerate the detection speed in the rapid imaging detection of agricultural products. These researches provide direction for the subsequent development of terahertz technology and offer an important reference for the application promotion of agricultural products terahertz detection.

**Keywords** Terahertz; Terahertz spectrum; Terahertz imaging; Agriculture detection

(Received Oct. 11, 2021; accepted Jan. 16, 2022)

\* Corresponding author