

文章编号: 1002-1582(2026)03-0355-06

基于 MAsLS 的邮件太赫兹光谱重建技术研究

李涛^{1*}, 王超¹, 张健², 乔德军¹, 张婧¹

(1. 邯郸学院 软件学院, 河北省光纤生物传感与通信器件重点实验室, 河北 邯郸 056005)

(2. 冀南技师学院, 河北 邯郸 056011)

摘 要: 随着电子商务行业的快速发展, 邮件无损检测技术变得愈发关键。太赫兹技术凭借其独特的指纹光谱特性和穿透非极性材料的能力, 已成为邮件隐匿危险源检测的优选方案。文章探究邮件包装材料对太赫兹光谱的影响, 成功构建邮件太赫兹透射模型, 并详细剖析样品与包装材料间不规则间隙对太赫兹光谱的复杂干扰机制。在此基础上, 提出了一种基于多重非对称最小二乘 (MAsLS) 拟合方法的光谱重建技术。结合无效数据滤波算法, 运用逻辑判别序列精确重建样品的太赫兹吸收光谱。实验表明该方法可有效滤除包装间隙导致的低频波动与干扰峰。对 10 种物质的光谱样本进行分类测试, SVM 模型识别准确率从 85.27% 提升至 92.19%, MLP 神经网络模型准确率达 96.09%, 较重建前提高近 8 个百分点。该方法为太赫兹辐射邮件检测系统的实用化提供了技术支撑, 在邮件快速筛查领域具有应用价值。

关 键 词: 光谱学; 太赫兹光谱; 无损检测; 光谱重建; 非对称最小二乘法

中图分类号: O433.4

文献标识码: A

Research on terahertz spectral reconstruction technology of Mail based on MAsLS

LI Tao^{1*}, WANG Chao¹, ZHANG Jian², QIAO Dejun¹, ZHANG Jing¹

(1. Hebei Key Laboratory of Optical Fiber Biosensing and Communication Devices, School of Software, Institute of Information Technology, Handan University, Handan 056005, China)

(2. Jinan Technician College, Handan 056011, China)

Abstract: With the rapid development of the e-commerce industry, non-destructive testing technology for mail has become increasingly critical. Terahertz technology, with its unique fingerprint spectral characteristics and ability to penetrate non-polar materials, has become the preferred solution for detecting hidden hazards in mail. The influence of mail packaging materials on terahertz spectra is deeply explored in this article, a terahertz transmission model for mails is successfully constructed, and the complex interference mechanism of irregular gaps between samples and packaging materials on terahertz spectra is analyzed in detail. On this basis, a spectral reconstruction technique based on multiple asymmetric least squares (MAsLS) fitting method is proposed. Combining with the invalid data filtering algorithm, use logical discrimination sequence to accurately reconstruct the terahertz absorption spectrum of the sample. The experimental verification results of spectral samples of 10 substances showed that the recognition accuracy of SVM model increased from 85.27% to 92.19%, and the accuracy of MLP neural network model reached 96.09%, which was nearly 8 percentage points higher than before reconstruction. This method provides technical support for the practical application of terahertz radiation mail detection system and has practical value in the field of rapid screening of mail items.

Keywords: spectroscopy; terahertz spectroscopy; nondestructive testing; spectral reconstruction; asymmetric least squares

收稿日期: 2026-02-04; 收到修改稿日期: 2026-04-22

基金项目: 邯郸市科学技术研究与发展计划项目 (23422402150ZC, 25422021188ZC); 河北省高等学校科学研究项目 (ZC2026340); 国家重点研发项目 (2022YFC2302700)

作者简介: 李涛 (1982—), 男, 讲师, 博士, 从事太赫兹检测技术与智能仪器研究。

* 通讯作者: litao9106@126.com

0 引 言

随着电子商务的快速发展，邮件数量激增。从国家邮政局获悉，2025年快件数量达到1989亿件，且以每年20%左右速度增长。伴随着快递业务的猛增，在邮寄物中隐匿危险品已经成为犯罪分子重要的犯罪手段，威胁公共安全和社会稳定^[1]。解决这一问题的关键在于构建快速精准的检测技术与方法^[2]。

太赫兹 (Terahertz, THz) 波的频率范围处于0.1THz至10THz之间，作为当代科技领域一项具有突破性的新技术，已在全球范围内引发广泛关注与浓厚研究兴趣^[3,4]。太赫兹辐射能够穿透纸张、塑料和纺织品等多种非极性包装材料，不影响遮挡目标的光谱特征，可以用于探测并识别隐藏在邮件包裹中的潜在危险物质^[5]。爆炸物、毒品等危险品在太赫兹波段下存在特征吸收光谱，可以作为高效、准确地识别有害物质的科学依据^[6,7]。因此，太赫兹技术被认为是邮件安全检测领域的理想选择，特别适用于对邮件中隐匿的有害物质进行高效、精准的筛查与识别^[8,9]。早在2003年，Kawase等^[10]率先展开了利用太赫兹技术识别邮件信封中非法药物可能性的探索。Molter等^[11]开发了一套识别邮件中隐藏可疑物质的扫描系统，实现了小型化需求，能够抑制由邮件纸张多次反射引起的人工吸收带，大大降低了算法的误报率。Huang等^[12]利用太赫兹技术实现了药物的检测和定量分析。

这些研究多是局限于理想化的实验环境，在实际检测邮件时，由于样品和包装材料之间存在间隙，太赫兹辐射会在样品与包装之间多次反射，致使透射光谱变得极为复杂^[9]。非对称最小二乘法 (Asymmetric Least Squares, AsLS) 巧妙融合了平滑处理和非对称加权技术，在光谱基线校正方面效果显著^[13,14]。本文提出了一种增强的多重AsLS拟合方法。通过无效数据预处理、多参数组合拟合与逻辑判别筛选，实现滤除干扰峰同时保留特征吸收峰。采用支持向量机与神经网络模型验证光谱重建效果，旨在提升违禁品邮件检测的准确性与可靠性，为物流安全检测提供技术保障。

1 太赫兹光谱检测系统

太赫兹检测系统如图1所示，飞秒激光器产生波长为1560nm的重复频率为100MHz的飞秒脉冲激光，经分光镜分为泵浦光束和探测光束。泵浦光束照射LT-GaAs太赫兹源，辐射出53ps THz的

太赫兹脉冲，透过样品后汇聚在太赫兹探测器上，经探测光束触发产生太赫兹电场^[15,16]。

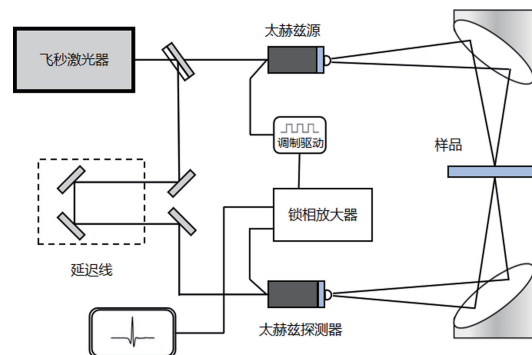


图1 太赫兹时域光谱系统原理图

为确保太赫兹吸收光谱的稳定性与一致性，实验所有样品均源自同一可靠供应商。将实验模拟物与高密度聚乙烯粉末进行充分混合，在10MPa的压力条件下，压制成直径为13毫米、厚度介于1至1.5毫米之间的圆片状样品，以便进行后续的实验分析^[17]。

太赫兹时域光谱 (Terahertz Time-Domain Spectroscopy, THz-TDS) 是一种用于表征太赫兹频率范围内样品的强大技术。相较于非相干测量方案，THz-TDS可以获得THz电场的振幅和相位特性^[18]，计算样品的光学参数。当THz辐射在样品中传播时，由于样品的色散和吸收，THz辐射的强度和相位发生变化。在预知样品厚度的前提下，通过公式获得样品的折射率和吸收系数^[19]。在检测过程中，邮件对象的厚度在大多数情况下是不可预测的。因此，样品的太赫兹吸收光谱简化为

$$A(\omega) = -\log_{10} \left| \frac{E_{\text{sam}}(\omega)}{E_{\text{ref}}(\omega)} \right| \quad (1)$$

式中， $E_{\text{sam}}(\omega)$ 和 $E_{\text{ref}}(\omega)$ 分别表示具有样本和参考的THz频谱。

2 实验与方法

2.1 无效数据处理

在邮件检测过程中，太赫兹光谱会产生随机误差，通过对光谱多次测量取平均值，能够减小随机误差。但邮件检测过程中测量次数有限，而且受到空气湿度和包装材料的影响，而这些误差在计算过程中会被除法运算放大，简单的均值对误差改善有限。因此，用相邻2N个点的加权平均值替换幅度明显高于或低于附近数据的无效数据^[2]。

$$y_i = \frac{1}{2N} \sum_{j=-N}^N a_j y_{i+j} \quad (2)$$

式中， a_j 为点的权重。

2.2 非对称最小二乘法

非对称最小二乘法 (AsLS) 是由 Eilers 等^[20,21]提出的一种创新数据处理技术。该技术融合了数据滤波与数据拟合的优势,能有效去除噪声。AsLS 的核心思想是找到一个函数所拟合的级数来解决优化问题

$$\arg \min_z \left[w_i \sum_i (y_i - z_i)^2 + \lambda \sum_i (\Delta z_i)^2 \right] \quad (3)$$

式中, y 为噪声序列; Δ 是差分算子, 即 $\Delta z_i = z_i - z_{i-1}$; w_i 是权重系数; λ 是平滑因子。权重系数 w_i 根据 AsLS 的方式选择, 当 $y_i > z_i$ 时 $w_i = p$, 而 $y_i \leq z_i$ 时 $w_i = 1 - p$, 其中 $0 < p < 1$, 一般选择很小的值。 y 和 z 的差的平方和表示原始数据和拟合数据的近似程度。差值平方和 $(\Delta z_i)^2$ 表示拟合平滑度。

2.3 多重非对称最小二乘拟合方法

针对 AsLS 算法在复杂光谱干扰场景下的局限性, 本文提出一种改进的多重非对称最小二乘 (MA_{LS}) 校正算法, 更为精准地滤除数据中的干扰峰值。

在式 (2) 中, w_i 决定是用于过滤还是基线拟合, λ 则反映了拟合或平滑的程度。算法创新性地构建多组 (w_i, λ) 参数组合, 生成多样化候选基线集合, 经阈值比较筛选出最优拟合曲线^[22]。通过计算各候选曲线与原始光谱的差异, 生成逻辑判别序列, 精准定位并消除干扰峰特征, 最终合成保留真实吸收峰特性的纯净光谱。

选择不同 λ 获得 y 的 m 个不同拟合度的序列 z_j ($j=1, \dots, m$)。序列 b 是不同拟合序列之间的差异:

$$b_{j+1} = z_j - z_{j+1}, (j=1, \dots, m-1) \quad (4)$$

通过比较拟合曲线与阈值 ϵ 之间的差来获得矩阵 D , 其中

$$d_{ij} = \begin{cases} 1, & b_{ij} \geq \epsilon \\ 0, & b_{ij} < \epsilon \end{cases} \quad (5)$$

逻辑判别序列为

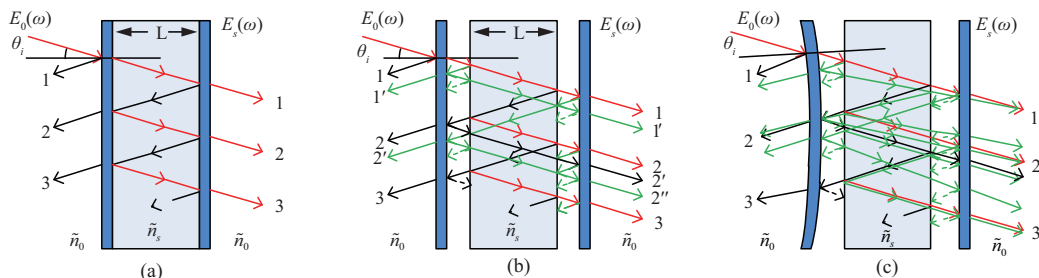


图3 邮件包装下样品的太赫兹辐射传输模型

非极性材料的信封在太赫兹波段是透明的, 在理想状态下不会影响样品的吸收光谱^[2,11]。但邮

$$c = \prod_{j=1}^m d_j \quad (6)$$

通过序列 c 的值来判断是有效频谱还是干扰噪声。如果判别因子为“1”, 则选择光谱数据, 否则选择拟合数据。该方法将有效滤除常用滤波算法无法实现的干扰和虚假吸收峰。

2.4 实验装置

实验装置如图2所示, 将样品放在 EMS 信封中, 保持自然间隙。环境湿度对太赫兹光谱的影响可以通过无效数据率滤除。但如果湿度过高仍会影响识别准确率, 可使用高纯氮气对样品仓进行吹扫, 保持检测环境湿度小于 30%。太赫兹波垂直入射, 穿过样品, 获得太赫兹吸收光谱。每次测量的太赫兹光谱取 100 次的均值, 以滤除随机噪声。

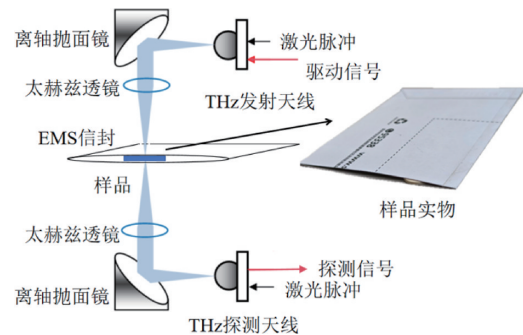


图2 实验装置示意图

3 结果和讨论

透过样品传输的太赫兹辐射模型如图3所示。图3 (a) 中颜色较浅的是样品, 颜色较深的是邮件包装。当太赫兹波垂直入射时, 入射角 $\theta_i = 0$ 。图3 (a) 为理想状态, 探测天线接收到的信号由透射光谱和多次反射光谱 (法布里-珀罗回波) 组成, 即: $E_{\text{sam}}(\omega) = \sum_{i=1}^N E_{si}(\omega)$ 。当样品厚度相对较大时, 可通过窗函数提取来消除法布里-珀罗的影响。而当厚度相对较小时, 透射光谱和反射光谱难以区分, 结果导致吸收光谱不是平滑曲线, 低频部分会存在周期性波动^[23,24]。

件包装和样本之间存在间隙, 如图3 (b) 所示。不规则间隙为毫米级, 太赫兹辐射在样品和包装

材料之间经过多次反射，探测器接收的太赫兹波在 0.1~1THz 波段（毫米级）存在透射光谱和法布里-珀罗回波的叠加。这些间隙是不规则的，如图 3（c）所示。当太赫兹波垂直入射时，由于不规则间隙的影响，透过包装和样品的太赫兹波是入射波的水平分量。复杂的回波脉冲会加剧光谱的波动，甚至出现假吸收峰。

选择在太赫兹波段具有特征吸收峰的谷氨酸（Glu）作为样品，重复测量 3 次，每次测量的太赫兹吸收光谱取 100 次的均值，以滤除随机噪声。使用无效滤波算法对吸收光谱进行预处理，滤除由环境湿度等因素影响产生的异常光谱数据。

图 4 中黑色虚线是 Glu 的吸收光谱，存在两个特征吸收峰。不同颜色的实线是样品放入信封中测量三次的光谱。位于信封内的样品，其特征吸收峰依然存在，并且振幅和峰形与标准吸收光谱保持一致。但由于受到信封材料散射损耗的影响，光谱基线出现了上升的情况，受动态范围的限制，有效带宽变窄。此外，受到信封和样品之间不规则间隙的影响，光谱的低频部分产生了较大幅度的波动，并且出现了大量干扰峰。而且每次测量时干扰峰的位置不同，这些干扰峰不能体现样本的特征，影响邮件识别的准确性。

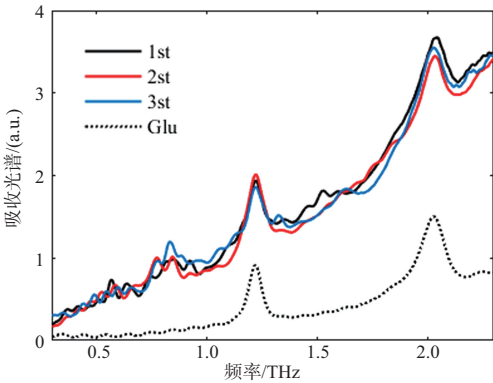


图 4 无遮挡和邮件包装下谷氨酸的太赫兹光谱

取三次测量的吸收光谱的平均值，如图 5 中的黑色实线所示。根据第 3 节中改进的 MAsLS 拟合方法对太赫兹吸收谱进行重建。选择权重系数 $p=0.01$ ，计算出当 λ 为 100、500、1000、5000 时的拟合曲线，如图 4 所示。随着 λ 的增加，除吸收峰外，拟合曲线趋于重合。阈值由均方根误差 σ 选择， $\varepsilon=k\sigma$ 。其中 k 为调整系数，一般为 0.1~0.5。根据式（5）和（6）计算逻辑判别序列，如表 1 所示。

重建的 Glu 光谱如图 6（a）中的实线所示。通过与标准吸收光谱的对比，重建的光谱在滤除干扰峰的同时保持了样品的特征吸收峰。选择谷氨酰胺（Gln）进行验证，如图 6（b）所示，红色虚

线是信封中 Gln 的吸收光谱，黑色虚线是标准吸收光谱，而黑色实线是通过 MAsLS 拟合方法重建的吸收光谱。通过两个样本的实验，表明样本与信封之间不规则间隙的影响可以通过 MAsLS 拟合方法滤除。这种方法将提高邮件检测的准确性，但会牺牲一些检测灵敏度。

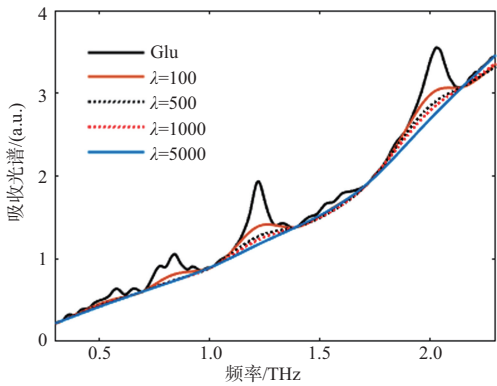
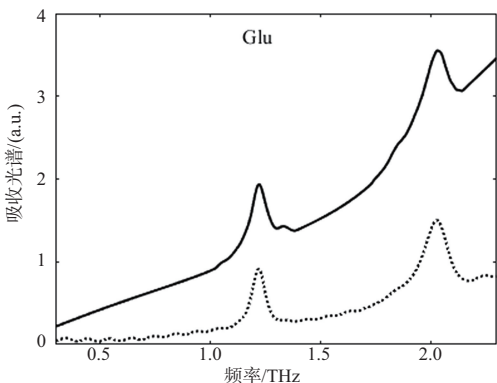


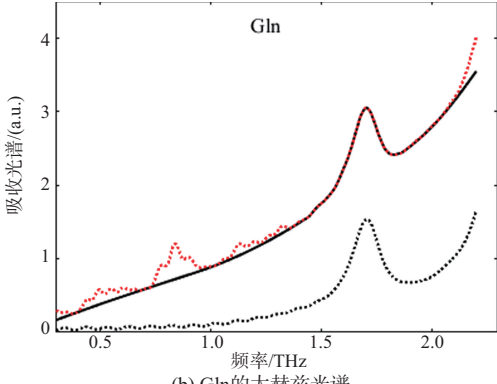
图 5 拟合不同 λ (100、500、1000、5000) 的光谱曲线

表 1 逻辑判别序列表

$f_{\text{peak}}/\text{THz}$	d_1	d_2	d_3	c
0.63	0	0	0	0
0.92	0	0	1	0
1.22	1	1	1	1
2.05	1	1	1	1



(a) Glu 的太赫兹光谱



(b) Gln 的太赫兹光谱

图 6 重建前后的太赫兹光谱

为了验证重建光谱的效果，从毒品、危化品、生物制品和普通化学品中选择 10 种物质作为测试

样品。每种物质制备 8 组平行样品，将样品置于模拟 EMS 快递包裹环境中，获取样品的太赫兹时域光谱。每组样品在不同时间重复测量 16 次，最终得到 1280 条太赫兹吸收光谱数据。分别采用 MAsLS、非对称重加权惩罚最小二乘法（ARPLS）及自适应迭代加权惩罚最小二乘法（AirPLS）三种算法对原始太赫兹光谱进行基线校正与光谱重建，并利用支持向量机（Support Vector Machine, SVM）和神经网络分类模型，对原始光谱及三种算法重建后的光谱分别开展分类识别对比实验，以客观评估不同算法的光谱重建效果。

SVM 分析是一种可以对高维样本进行分类的学习算法。使用交叉验证的网格搜索来联合优化 PCA 和 SVM 的参数。通过优化超参数 C 和 g ，避免 SVM 的过拟合。通过网格搜索法，得到最优的值为 C 和 g 分别为 0.4 和 0.02。图 7 是采用 MAsLS 方法光谱重建后支持向量机（SVM）识别结果的混淆矩阵，每种样品的识别准确率都在 80% 以上，个别样本存在识别错误。

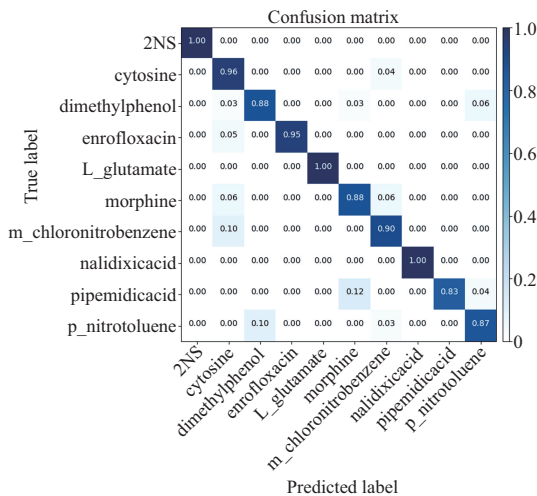


图 7 重建光谱的 SVM 模型混淆矩阵

构建多层感知机（Multilayer Perceptron, MLP）神经网络模型。MLP 的初始的学习率为 0.01，迭代周期（Epoch）个数为 40。采用 Adam 优化器，利用梯度的一阶矩和二阶矩估计，训练时，根据梯度进行动态调整，动态调整每个参数的学习率，一旦陷入局部最小值时，更新幅度较大可以跳出局部最优。识别结果的混淆矩阵如图 8 所示，每种样品都能准确识别。

光谱重建前后的识别准确率结果如表 2 所示，使用 SVM 分类模型，三种基线校正或波形重建算法都明显提高了识别准确率，基于 MAsLS 算法光谱重后的分类准确率达到 92.19%，比未重建高出 7 个百分点。同样的，利用 MLP 模型，MAsLS 算

法波形重建后的识别精度提高到 96.09%，略高于 AirPLS 基线校正算法，比重建前提高了近 8 个百分点。

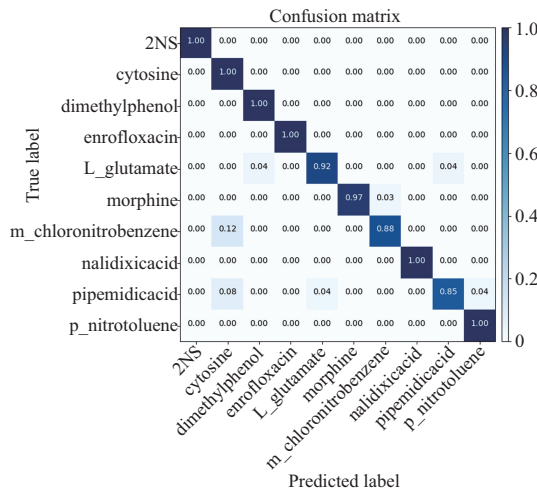


图 8 重建光谱的 MLP 模型混淆矩阵

表 2 光谱重建前后分类准确率对比

分类模型	识别准确率			
	重建前	ARPLS	AirPLS	MAsLS
SVM	85.27%	90.54%	91.21%	92.19%
MLP	88.33%	92.18%	95.40%	96.09%

4 结 论

随着电子商务的快速发展，邮件的安全性尤为重要。THz-TDS 技术以其独特的特点，具有快速方便邮件识别的潜力。到目前为止，许多科研机构已经研究了不同包装和覆盖物下的毒品和爆炸物，以分析检测潜在危险物质的可行性。但在实际检测过程中，邮件包装材料和样品间的不规则间隙对检测结果存在很大影响。

本文深入探究了邮寄物包装材料对太赫兹光谱检测技术的潜在影响因素，成功构建了邮件透射模型，并详细剖析了样品与包装材料间不规则间隙对太赫兹光谱的复杂干扰机制。这种干扰在低频段尤为显著，易引发光谱的显著波动并产生虚假的吸收峰，进而对邮件查验的准确性构成影响。考虑到检测过程中环境湿度等因素对光谱的影响，提出无效数据滤波和基于 MAsLS 的光谱重建算法。通过无效数据滤波滤除湿度等因素产生的部分频率点的异常数据，再根据逻辑判别因子利用 MAsLS 重建样品的太赫兹吸收光谱。实验验证结果显示，分类测试结果显示，MAsLS 方法显著提升了检测准确率。对 10 种物质的 1280 个光谱样本进行分析，SVM 模型的识别准确率从 85.19% 提升至 92.19%，MLP 神经网络模型准确率达到 96.09%，较重建前提高近 8 个百分点，其中 MLP

模型实现了所有样品的精准识别。这一结果验证了光谱重建方法在提升模型分类性能方面的显著作用。

受太赫兹辐射功率的限制,检测到的邮件的厚度是有限的。提高太赫兹的激发功率和提高信噪比是太赫兹应用中亟待解决的问题。

参考文献:

- [1] Murate K, Mine S, Torii Y, et al. Wide dynamic range and real-time reagent identification and imaging using multi-wavelength terahertz parametric generation and machine learning[J]. Scientific Reports, 2023, 13(1): 12743.
- [2] 李涛, 张良, 何建安, 等. 太赫兹时域光谱在邮件隐匿危险品检测中的应用[J]. 光谱学与光谱分析, 2019, 39(12): 3724—3730.
Li Tao, Zhang Liang, He Jianan, et al. Terahertz Time-domain spectroscopy for identification of hazardous substances in Mail[J]. Spectroscopy and Spectral Analysis, 2019, 39(12): 3724-3730.
- [3] Yao J, Jiao S, Wang X, et al. Fast terahertz image classification with a single-pixel detector[J]. Optics Communications, 2024, 550: 130016.
- [4] 邓雨旺, 刘钧, 肖海龙等. 太赫兹气象遥感技术发展现状及趋势[J]. 光学技术, 2025, 51(06): 690—697.
Deng Yuwang, Liu Jun, Xiao Hailong, et al. Developments and outlook of terahertz meteorological remote sensing technology[J]. Optical Technique, 2025, 51(06): 690—697.
- [5] Ge H, Jiang H, Zhang Y. THz Spectroscopic investigation of wheat-quality by using multi-source data fusion[J]. Sensors, 2018, 18(11): 3945.
- [6] Tahhan S R, Aljoubouri H K, Altahan B R. Anti-resonant based nested terahertz fiber design for illicit drugs detection[J]. International Journal of Electrical & Computer Engineering, 2023, 13(2): 1588—1598.
- [7] 张瑞萍, 王琴, 暴丽霞. 太赫兹光谱技术在爆炸物探测中的应用及研究进展[J]. 红外与激光工程, 2024, 53(12): 284—291.
Zhang Ruiping, Wang Qin, Bao Lixia. Application and research progress of terahertz spectroscopy technology in explosive detection[J]. Infrared and Laser Engineering, 2024, 53(12): 20240293.
- [8] 刘桂锋, 赵红卫, 葛敏, 等. 太赫兹时域光谱技术在危险品检测方面的应用[J]. 光谱学与光谱分析, 2008, 28(5): 966—969.
Liu Guifeng, Zhao Hongwei, Ge Min, et al. Application of terahertz time domain spectroscopy to explosive and illegal drug [J]. Spectroscopy and Spectral Analysis, 2008, 28(5): 966—969.
- [9] Yamamoto K, Yamaguchi M, Miyamaru F, et al. Noninvasive inspection of C-4 explosive in mails by terahertz time-domain spectroscopy[J]. Japanese Journal Of Applied Physics, 2004, 43: L414—L417.
- [10] Kawase K, Ogawa Y, Watanabe Y, et al. Non-destructive terahertz imaging of illicit drugs using spectral fingerprints[J]. Optics Express, 2003, 11(20): 2549—2554.
- [11] Molter D, Hübsch D, Sprenger T, et al. Mail inspection based on terahertz time-domain spectroscopy[J]. Applied Sciences, 2021, 11(3): 950.
- [12] Huang S, Deng H, Wei X, et al. Progress in application of terahertz time-domain spectroscopy for pharmaceutical analyses [J]. Frontiers in Bioengineering and Biotechnology, 2023, 11: 1219042.
- [13] Qu F, Lin L, Nie P, et al. Terahertz multivariate spectral analysis and molecular dynamics simulations of three pyrethroid pesticides[J]. Journal of Infrared, Millimeter and Terahertz Waves, 2018, 39(11): 1148—1161.
- [14] Qu F, Lin L, Cai C, et al. Terahertz fingerprint characterization of 2, 4-dichlorophenoxyacetic acid and its enhanced detection in food matrices combined with spectral baseline correction [J]. Food Chemistry, 2020, 334: 127474.
- [15] Artesani A, Lamuraglia R, Menegazzo F, et al. Terahertz time-domain spectroscopy in reflection configuration for inorganic and mineral pigment identification[J]. Applied Spectroscopy, 2023, 77(1): 74—87.
- [16] Jung S H, Yeo W H, Maeng I, et al. Self-supervised deep-learning for efficient denoising of terahertz images measured with THz-TDS system[J]. Expert Systems with Applications, 2025, 271: 126595.
- [17] 赵渺钰, 燕芳, 李文文, 等. 基于层次分析法的太赫兹时域光谱定性识别[J]. 红外技术, 2025, 47(5): 656—661.
Zhao Miaoyu, Yan Fang, Li Wenwen, et al. Qualitative identification of terahertz time-domain spectra based on analytic hierarchy process[J]. Infrared Technology, 2025, 47(5): 656—661.
- [18] Li T, Xu Y, Luo J, et al. A method of amino acid terahertz spectrum recognition based on the convolutional neural network and bidirectional gated recurrent network model[J]. Scientific Programming, 2021, 2097257.
- [19] Duvillaret L, Garet F, Coutaz J L. A reliable method for extraction of material parameters in terahertz time-domain spectroscopy[J]. IEEE Journal of Selected Topics in Quantum Electronics, 2002, 2(3): 739—746.
- [20] P. H. C. Eilers. A perfect smoother[J]. Analytical Chemistry, 2003, 75(14): 3631—3636.
- [21] P. H. C. Eilers, H. F. M. Boelens. Baseline correction with asymmetric least squares smoothing[J]. Life Sci. 2005, 1—26.
- [22] Peng J, Peng S, Jiang A, et al. Asymmetric least squares for multiple spectra baseline correction[J]. Analytica Chimica Acta, 2010, 683: 63—68.
- [23] Kim H S, Jun S W, Ahn Y. Developing a novel terahertz fabry-perot microcavity biosensor by incorporating porous film for yeast sensing[J]. Sensors, 2023, 23(13): 5797.
- [24] Li T, Gu Y, Wang C, et al. Identification of hazardous substances in mail by terahertz radiation based on voigt and asls fitting spectral reconstruction[J]. International Journal of Optics, 2025, 2025(1): 5636677.