

文章编号: 2095-4980(2016)01-0007-06

基于太赫兹光谱成像技术的智能处理方法分析

陈 韬, 孟 坤, 朱礼国, 李泽仁, 刘 乔

(中国工程物理研究院 流体物理研究所, 四川 绵阳 621999)

摘 要: 太赫兹图谱的智能处理技术可以将样本的特性提取出来, 并有目的地加以分类和识别, 能够提高太赫兹成像的准确性, 是太赫兹成像技术发展的重要标志和方向。介绍了几种智能处理太赫兹成像技术的方法的基本概念和原理, 分析了它们的优缺点, 并从实际应用场景出发对空间成分识别、化学模式识别、人工神经网络做了具体的分析及分类。

关键词: 太赫兹时域光谱成像; 空间成分识别; 化学模式识别; 人工神经网络

中图分类号: TN29; O433

文献标识码: A

doi: 10.11805/TKYDA201601.0007

Intelligent processing methods based on the terahertz spectral imaging technique

CHEN Tao, MENG Kun, ZHU Ligu, LI Zeren, LIU Qiao

(Institute of Fluid Physics, China Academy of Engineering Physics, Mianyang Sichuan 621999, China)

Abstract: Intelligent processing techniques for terahertz spectral image can extract characteristics of the samples, classify and identify them for a certain purpose. These techniques, which can improve the accuracy of terahertz imaging, are an important symbol and direction for the development of terahertz imaging techniques. In this paper, basic concepts and principles of several intelligent processing methods for terahertz spectral imaging techniques are introduced, advantages and disadvantages of these methods are analyzed. Based on practical applications, specific analysis and classification are made for component spatial pattern analysis, chemical pattern recognition and artificial neural network.

Key words: THz time-domain spectroscopic imaging; component spatial pattern analysis; chemical pattern recognition; artificial neural network

太赫兹波(0.1 THz~10 THz)是介于微波和红外之间的电磁辐射, 其独特的光谱特性、穿透性和低能性, 在物质的检测和识别方面独具优势。太赫兹时域光谱技术是太赫兹诊断技术的基础, 它基于相干探测的方式, 能够同时获得太赫兹脉冲辐射的振幅和相位, 振幅和相位则分别对应于样品的吸收和色散信息, 从而可以获得样本的折射率、介电常数和电导率等。在医学上, 健康组织与病变组织在各种参数上存在差别, 通过对参数的分析可以对病症准确诊断且将病变组织成像^[1-12]。太赫兹成像技术能克服光学显微成像技术检测范围有限的瓶颈, 成功地将组织病理学性质检查与大体成像的边界范围检查有效结合。而目前通常采用峰值成像、频率点、功率积分谱成像和脉宽成像等方法将太赫兹脉冲成像的图像重构。虽然采用不同的图像重构方式可以获得相应的样品特征, 然而大多数情况下, 并不能通过简单的图像重构来实现样品成分的有效识别, 因此需要更为智能的处理方法来完善太赫兹图像处理技术。基于太赫兹光谱技术的数据处理方法有很多, 如小波变换、最小二乘法 and 因子分析技术等。这些较为简单数学处理方法较为普遍, 对于一般的光谱数据处理而言较为常见, 它们不能根据实际测量的需求而优化。而智能的处理技术可以依据需要采集的样本信息及样本自身特性进行归类、识别和成像。本文将介绍其中几种可用于太赫兹脉冲成像技术的智能处理技术, 在总结前人研究工作的同时针对不同的应用环境分析其优缺点, 尤其是几种智能处理方法对于医学诊断、治疗方面的贡献。

1 太赫兹光谱成像的智能处理技术的主要方法

目前基于太赫兹光谱成像的智能处理技术主要有: 空间成分识别方法、化学模式识别方法及人工神经网络方

收稿日期: 2015-01-02; 修回日期: 2015-03-16

基金项目: 中国工程物理研究院太赫兹研究中心资助项目; 太赫兹生物医学诊断技术资助项目(T2014-05-0201)

法等,其中化学模式识别方法主要有主要成分分析方法和聚类方法,人工神经网络方法又包含向前型神经网络、反馈型神经网络、自组织型神经网络。

1.1 空间成分识别

空间成分识别技术的基本原理是利用存在差异的样品吸收光谱通过矩阵运算实现对样品空间图像的识别。Yuuki Watanabe 和 Kodo Kawase 用此方法对阿司匹林、维生素 B2 药品的成分含量进行了测量,实现了对直径为 13 mm 的靶目标进行成像,并通过不同药物的掺杂含量不同实现了空间成分识别^[13-15]。

空间成分识别技术模型认为被测物体是由 M 种成分组成,每种成分具有不同的特征谱,在有效频率段内以 N 个频率(波长)成像,每个图像有 L 个像素。若认为成像系统是线性的,则吸收光谱可描述为下列线性矩阵方程:

$$[I] = [S][P] \quad (1)$$

式中: $[I]$ 是实验得到的太赫兹成像数据所构成的一个 $N \times L$ 矩阵,其行向量 $i_1, i_2, i_3, \dots, i_N$ 为 N 个频率的吸收光谱,列向量为在样品二维空间上的采样点; $[S]$ 是一个由 M 种成分构成的 $N \times M$ 吸收矩阵,每一列 $s_1, s_2, s_3, \dots, s_M$ 表示一种成分在 N 个频率的吸收光谱; $[P]$ 是 M 个成分的空间图样所构成的一个 $M \times L$ 矩阵,行矢量 $p_1, p_2, p_3, \dots, p_M$ 表示每一个样品对应的空间图样。当矩阵 $[I]$ 和 $[S]$ 已知时,容易求得 $[P]$ 。若 $N=M$, $[P] = [S]^{-1}[I]$, 若 $N>M$, 通过最小二乘法可得 $[P] = ([S]^T[S])^{-1}[S]^T[I]$ 。这样就可得到每种成分在整个图像中的分布情况。

空间成分识别技术的区分准确性使其在医学检测方面有着独特的优势,它可以对 2、3 个已知的样本进行准确的定位,这个优势可用于手术定位成像。空间成分识别技术需要样品具有明显吸收峰的光谱敏感,而且它需要待测样品的各个成分的吸收光谱数据,这对于组成成分不明确或者吸收光谱不易获得的样品,其识别比较困难。

1.2 化学模式识别

化学模式识别是化学计量学的内容,它采用的方法是首先将样本的特征人为地建立一个“群”,并使用实际的样本与之比较,如果与预先建立的“群”越相似,那么就认为它与“群”是同类,就将它放在与“群”“距离”较近的位置,反之则将其放在“距离”较远的位置。这样可以通过函数来表示各个样本间的距离,从而进行识别、分类及预报未知^[16]。而化学模式识别方法包括主成分分析、聚类分析和判别分析等^[17]。

1.2.1 主成分分析方法

主成分分析方法是一种有效的特征压缩方法,它把众多具有一定相关性的特征利用线性变换得到一批新的互相无关的特征,每个特征都是原有特征的函数,但新特征总数少于原有特征数,这样新特征既保留了原有特征的主要信息,又减少了特征个数,通过对特征的选择,在一定程度上还能滤除噪音。Miller J N 和 Miller J C 使用主要成分识别技术成功从大量光谱数据中提取癌组织信息,并成功地实现了成像^[3]。

主成分分析方法的模型建立是通过数学迭代的方法对数据进行最佳拟合,寻找一条线形方程,使每个样本点在该线形方程上的垂直投影点的总方差最大,这个线形方程就是第 1 主成分。每个样本点在第 1 主成分上的投影值即为该样本在第 1 主成分上的得分。以此类推,还可以提取第 2 主成分和第 3 主成分。不同样本点在各个主成分上的得分分布图之间的距离反映了样本点之间的差异,可以用来进行分类。

主成分分析与奇异值分解是等价的^[18]。若 $M \times N$ 阶实矩阵 A 表示某信号,且奇异值分解为 $A = U \Sigma V^T$, 其中 U 和 V 分别为 $M \times M$ 和 $N \times N$ 阶正交矩阵, $M \times N$ 阶广义对角矩阵 $\Sigma = \begin{bmatrix} \sum_r & 0 \\ 0 & 0 \end{bmatrix}$, $\sum_r = \text{diag}(\sigma_1, \sigma_2, \dots, \sigma_r)$, 且 $\sigma_1 \geq \sigma_2 \geq \dots \geq \sigma_r > 0$, 矩阵 A 的秩等于 r 。定义奇异值 σ_i 的贡献率 $\varepsilon_i = \sigma_i^2 / \sum_j \sigma_j^2$, 若 $\sum_{j=1}^p \varepsilon_j = \sum_{j=1}^p \sigma_j^2 / \sum_{j=1}^r \sigma_j^2$ 接近于 1, 则该信号的主要信息包含在特征值 $\sigma_1, \sigma_2, \dots, \sigma_p$ 所表示的矩阵中,其他的特征值 $\sigma_{p+1}, \sigma_{p+2}, \dots, \sigma_r$ 所表示的矩阵则包含了该信号的次要信息,一般认为是信号的噪声或误差。

从上述几种混沌映射方程中可以发现,混沌序列与其初值及函数参数有很大关系,这些参数被称为分形参数。

1.2.2 聚类方法

最常用的聚类方法包括系统聚类方法、 k 均值聚类法、模糊聚类法、最优分割法、图论方法中的最小生成树等方法。它们的共同思路是将样本特征定义成“群”,并通过比较的方式将样本划分到“群”的同类中或者不断地扩大“群”,使得所有的样本都以“距离”的方式表征出来,从而实现识别。

MA Brun 和 Formanek F 等人通过探测脉冲太赫兹辐射的折射信息对癌组织进行成像,通过聚类的方法分析了样品/石英和空气/石英的折射光谱,从而清晰得到癌组织的切片的图像^[19]。

聚类方法数学模型的建立一般是通过优化一个局部定义或者全局定义的准则函数来得到数据的聚类。如 k 均值聚类法就是先定义“群”的个数 k 后, 随机选择 k 个点作为代表点, 然后将每个点分配给离它最近的代表点所在的“群”中, 分配完毕后再重新计算每个“群”的均值, 重复这个过程直到准则函数收敛。一般采用准则函数式类内方差准则函数:

$$E = \sum_{i=1}^k \sum_{x \in C_i} (\text{dis}(x, m_i))^2 \quad (2)$$

式中: m 表示群 C 的均值点; $(\text{dis}(x, m_i))^2$ 表示类内点到群的均值点距离的平方。当然聚类模型还存在更多的算法与模型, 但它们的模型建立的主题思路是一致的。

图 1 为日本 RIKEN 公司 Sachiko Nakajima 等人对 4 个癌变肝细胞样品的太赫兹图像进行化学模式识别的结果^[20]。从太赫兹图像上来看, 样品 1 的癌变组织吸收率较低(对应绿色部分), 样品 3 则吸收率较高, 样品 2 的癌变组织在折射率图中可明显识别, 样品 4 则无法区分。因此不同样品中癌变组织和正常组织的太赫兹像具有不同的关系, 不能作为识别的依据。由于整个组织没有明显的光谱特征, 其他频率的太赫兹像与此类似。经过奇异值分解后, 采用 k 均值聚类和 AH 聚类法对样品的太赫兹成像数据进行化学模式识别。由图 1 可见, 前 3 个样品中 AH 聚类效果较好, 对于样品 4, 都没有有效的识别。样品 3 中, AH 聚类将其分成了 3 类: 癌变组织、正常组织、样品缺陷。因此样品的前期准备对这种处理方法影响较大。进一步观察发现前 3 个样品中活性细胞为主, 而样品 4 含有大量坏死细胞, 这也许是未能有效识别的原因。

相对于空间成分识别技术, 化学模式识别不需要各组成成分的光谱响应数据, 可以自行对样品数据进行聚类, 或者经过一定量的已知样本训练后对样本进行识别。化学模式识别方法很多, 针对不同的样品需要选择合适的算法, 提取合适的特征值。化学模式识别技术具有的特异性特点使其主要用于医学病理诊断, 它可以准确地对未知样本分类、选择, 以确定样本类别, 有利于诊断某些特定病理因素^[21-23]。但是化学模式识别只能将样本归类识别, 按照样本的某一特定属性归类其他特性无法展现, 且分类较为笼统, 所以选择关键特性尤为重要。

1.3 人工神经网络识别

人工神经网络是一种可以由计算机来模拟人类大脑系统一阶特性的人工智能研究方法。它是由大量处理单元(神经元)相互连接而成的网络, 它模拟生物体中神经网络的某些结构和功能, 如学习、控制和识别等。

首都师范大学的 THz 光谱和成像实验室的梁美彦^[24]、王新柯^[25]和李薇薇^[26]等人利用径向基函数(Radial Basis Function, RBF)、误差反传(Back Propagation, BP)网络、自组织特征映射(Self-Organization Mapping, SOM)神经网络、学习矢量量化(Learning Vector Quantization, LVQ)神经网络等人工神经网络模型对毒品、爆炸物等进行检测和识别, 成功地对 8 种样品(环三次甲基三硝铵(RDX)、三硝基甲苯(Trinitrotoluene, TNT)、环四亚甲基四硝铵(HMX)、食盐、白糖、淀粉、人工牛黄、白参)进行了逐点成像, 并实现了在人造丝、黑塑料袋和泡沫塑料等 9 种包装材料隐蔽下的成像。

人工神经网络的运行分训练和工作两个阶段。在训练阶段, 对网络随机输入训练集中的样本, 比如各成分的吸收光谱, 网络会自动调整各层的权值, 直到输出误差满足要求。在工作时, 输入一个样本, 如太赫兹光谱图像中某个像素的光谱数据, 网络会自动对其分类, 如果不属于训练时见过的任何模式类, 则将其归入最近的模式类。对于自组织网络, 可以只需要输入太赫兹光谱图像各个像素的光谱数据, 设置好训练次数和类别数, 网络会根据数据间的内在联系和差异自动将其分类。目前已有数十种的神经网络模型, 可分成 3 大类^[26]: 前向网络、反馈网络、自组织网络。前向型神经网络在计算输出值的过程中, 输入值从输入层单元向前逐层传播经过隐藏层最后到达输出层得到输出。神经元的激发函数可采用线性硬阈值函数或单元上升的非线性函数等来表示。反馈性神经网络也称为递归网络或回归网络。其输入包含有延迟的输入或者输出数据的反馈, 所以它是一种反馈动力学系统。这种系统的学习过程就是它的神经元状态的变化过程, 这个过程最终会达到一个神经元状态不变的稳定态, 也标志着学习过程的结束。自组织神经网络是一类采用无教师学习方式的神经网络模型, 它无需期望输出, 只是根据数据样本进行学习, 并调整自身的权重以达到训练的目的, 这也是自组织名称的由来。SOM 神经网络是一种典型的自组织网络, 它采用的是 Kohonen 算法^[26], 可以简单理解成以下步骤实现: 首先对输出层各权值向量赋值并对其归一化处理, 得到 ω_j , $j=1,2,\dots,m$, 并建立优胜领域 $N_j(0)$, 以及学习效率的初始值 $\tau(t)$; 其次将所有样本归一化, 得到 X^p , $p \in \{1,2,\dots,p\}$; 通过计算 ω_j 与 X^p 的点积, 从而选得点积最大的获胜节点 j ; 以 j 为中心, 定义出优胜领域 $N_j(t)$, 其中 t 为中心确定的时刻; 再调整优胜领域 $N_j(t)$ 内的所有节点权值 $\omega_{ij}(t+1) = \omega_{ij}(t) + \tau(t, N)[X_i^p - \omega_{ij}(t)]$, $i=1,2,\dots,n$, $j \in N_j(t)$; 最后当学习率 $\tau(t)$ 衰减到零或者低于某一特定值时, 认为训练结束。

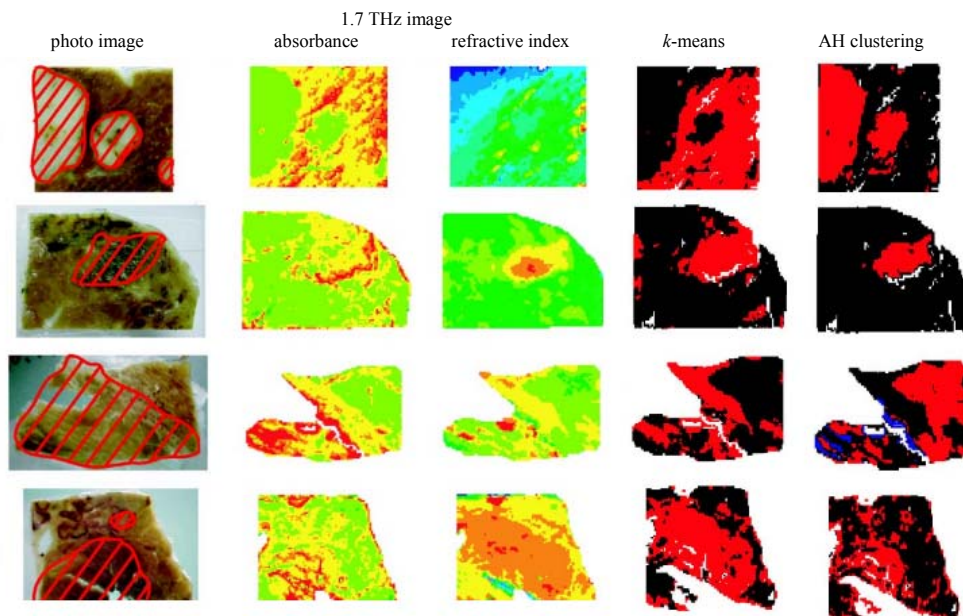


Fig.1 Processing results of cancer tissue by chemical pattern recognition

图 1 癌变组织的化学模式识别处理结果

人工神经网络可以看作是一个已经优化了的像素地图,它将不同频率的太赫兹波对应不同材料的反射、透射强度做了分类及定义,它们都有对应的像素点来表征,当神经网络感知并识别出定义的材料时,将已定义好的像素点来成像,而未知的材料将被归类于未知像素点来成像,人造神经网络就是在这样一个一个像素点的基础上实现的。图 2 中, Federici^[1]等人采用多层感知器(MLP)网络、径向基函数(RBF)网络等网络模型分析太赫兹成像技术来识别爆炸物,并对 2 种神经网络技术的识别效果做了比较。实验人员胸口处放置 RDX 炸药,隐藏在衬衫下,经太赫兹成像和神经网络处理后,由图可见二者都可实现物质的识别,但 MLP 的空间分辨率较低,勉强能识别出炸药。去掉造成空间分辨率较差的低频成分后,可以识别出小尺寸的金属,但总体成像效果并不明显。RBF 网络具有更好的性能,可以清晰地看出各物体的像,物体周围其他的颜色是由边界效应引起。

因为人工神经网络识别的数据是采用大规模并行的处理方式,所以人工神经网络识别的速度快,而且难以找到好的求解规律的数据,人工神经网络识别是最优的选择。所以人工神经网络识别技术在医学上一般用于病理筛查、体检,由于其具有大规模、快速数据分析的能力^[27-30],能够从大量检测数据中找到可能的病理数据,节省了病人的时间,为快速、准确治疗提供了可能。但人工神经网络识别难以精确分析神经网络的各项性能指标,且适用型比较单一,无法简单地通用于识别不同结构体系的样本。

2 技术对比

每一种的智能处理方法有着它们各自的优势。空间成分识别方法需要详细的参考标准库对待测样本信息的描

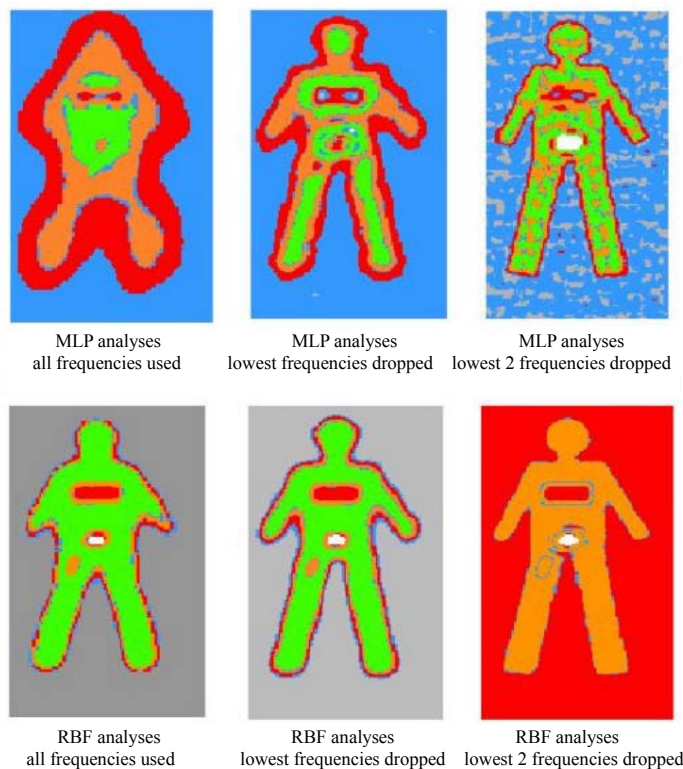


Fig.2 Bitmap of MLP and RBF analyses of terahertz imaging

图 2 太赫兹成像经 MLP、RBF 网络处理后的位图

述,需要各个成分的特征光谱,对已知或测试目的明确的样本区分能力强。正是因为这一优势使得空间成分识别方法在医学病理成分定位中有了一席之地,通过空间的识别、成像可以准确地找到已知的某种患病组织结构的所在,医生可以清晰地了解患病组织的形状、大小、结构组成等信息,为手术的准确性、安全性提供了保证。

而化学模式识别的方法会相对“笼统”定义出待测样本可能组成成分的“群”,通过不断比较将待测样本分别放入不同的“群”(如:塑料、金属、爆炸物、生物体等)中来完成识别,化学模式识别的方法适用对未知待测样本进行分析、分类、成像及发现异常。其明显的特异性优势对于医学诊断是不言而喻的,当医生无法确定患病组织的类型时,化学模式识别技术可以将各类未知的病理组织、结构进行分析并分类,使医生可以清晰区分各类不同的组织所在的位置及类型,从而达到对症下药的效果。

神经网络识别技术则需要人为定义待测样品的材料特性,将它们定义成不同的表征方式,通过计算机大量的计算进行待测样品分类、识别,而对于杂乱无章的大量数据识别是神经网络方法的优势,一般多用于数据筛查。神经网络识别技术必将因其准确性在医学筛查、体检中得到广泛使用。在面临大量检测数据时,如何快速筛查出有用的信息是至关重要的。神经网络技术可以大大提高医学诊断的有效检出率,为医生治疗及患者病理检测赢得了更为宝贵的时间。

当然也可以多种智能处理方法配合使用,比如主成分分析与神经网络相结合,可以对大量的数据先降维提取特征值再进行识别,从而使得不同的智能识别方法的优势得以配合,识别更为复杂的数据。另外对数据的预处理:包括将光谱数据进行滤波、归一化、平滑化等方法,通过预处理将直接采集的信号从噪声中提取出来,大大减少了待处理的数据量,平滑的信号更加有利于智能识别及分类,可以提高数据处理速度和识别能力。

3 结论

太赫兹时域光谱成像系统能获得丰富的样品信息,选择最能反映样品特征及其差异性的图像重构方法是成功识别的前提。太赫兹光谱成像用智能处理技术相比传统的太赫兹光谱成像处理技术而言已拥有更强的识别能力、更快的处理速度、更广的检测领域。上述 3 种智能处理方式各有优势,也适用于处理不同的数据类型。不难看出,太赫兹光谱成像用智能处理技术的发展为太赫兹成像领域拓宽了前进的道路。

参考文献:

- [1] JOHN F Federici,BRIAN Schulkin,FENG Huang,et al. THz imaging and sensing for security applications-explosives, weapons and drugs[J]. Semiconductor Science and Technology, 2005,20(7):266-280.
- [2] 张存林,牧凯军. 太赫兹波谱与成像[J]. 激光与光电子学进展, 2010,47:023001. (ZHANG Cunlin,MU Kaijun. THz spectroscopy and imaging[J]. Laser & Optoelectronics Progress, 2010,47:023001.)
- [3] CAROLINE B Reid,ANTHONY Fitzgerald,GEORGE Reese,et al. Terahertz pulsed imaging of freshly excised human colonic tissues[J]. Physics in Medicine and Biology, 2011,56(14):4333-4353.
- [4] HE M X,HAN J G,LI M,et al. Terahertz spectroscopy studies of far infrared optical and dielectric signatures of melamine[J]. Chinese Optical Letters, 2011,9(s1):s10507.
- [5] 汪一帆,尉万聪,周凤娟,等. 太赫兹光谱在生物大分子研究中的应用[J]. 生物化学与生物物理进展, 2010,37(5):484-489. (WANG Yifan,YU Wancong,ZHOU Fengjuan,et al. Applications of Terahertz(THz) spectroscopy in biological macromolecules[J]. Progress in Biochemistry and Biophysics, 2010,37(5):484-489.)
- [6] WILMINK G J. Current state of research on biological reflects of terahertz radiation[J]. Journal of Infrared:Millimeter and Terahertz Waves, 2011,30(10):1074-1122.
- [7] 何明霞,陈涛. 太赫兹科学技术在生物医学中的应用研究[J]. 电子测量与仪器学报, 2012,26(6):471-483. (HE Mingxia, CHEN Tao. Application of terahertz science and technology in biology and medicine research[J]. Journal of Electronic Measurement and Instrument, 2012,26(6):471-483.)
- [8] TAYLOR Z D,SINGH R S,BENNETT D B,et al. THz medical imaging:in vivo hydration sensing[J]. Terahertz Science and Technology IEEE, 2011,1(1):201-219.
- [9] ARORA A,LUONG T,KRUNGER M,et al. Terahertz time domain spectroscopy for the detection of PCR amplified DNA in aqueous solution[J]. The Royal Society of Chemistry, 2012,137(3):575-579.
- [10] JI Y B,KIM S H,JEONG K. Terahertz spectroscopic imaging and properties of gastrointestinal tract in rat model[J]. Biomedical Optics Express, 2014,5(12):4162-4170.
- [11] SEUNG J O,JIHYE C,INHEE M,et al. Molecular imaging with terahertz waves[J]. Optical Express, 2011,19(5):4009-4016.

- [12] JOSEPH C S,YAROSLAVSKY A N,LAGRAVES J L,et al. Dual-frequency continuous-wave terahertz transmission imaging of nonmelanoma skin cancers[J]. *Lasers in Surgery and Medicine*, 2011,43(6):457–462.
- [13] WATANABE Y,KAWASE K,IKARI T,et al. Component spatial pattern analysis of chemicals using terahertz spectroscopic imaging[J]. *Applied Physics Letters*, 2003,86(4):800–802.
- [14] WATANABE Y, KAWASE K,IKARI T,et al. Component analysis of chemical mixtures using terahertz spectroscopic imaging[J]. *Optics Communications*, 2004,234(1–6):125–129.
- [15] 何明霞. 生物组织与微纳材料太赫兹时域光谱特性研究[D]. 天津:天津大学, 2002. (HE Mingxia. Far infrared properties of biological tissues and micro/nano structures characterized by terahertz time domain spectroscopy[D]. Tianjing,China: Tianjing University, 2002.)
- [16] 刘学仁,张莹,何光召. 化学模式识别技术在药物分析中的应用与研究进展[J]. *数理医药学杂志*, 2011,24(1):101–104. (LIU Xueren,ZHANG Ying,HE Guangzhao. Chemical pattern recognition technique application in pharmaceutical analysis and the research progress[J]. *Journal of Mathematical Medicine*, 2011,24(1):101–104.)
- [17] 倪永年. 化学计量学在分析化学中的应用[M]. 北京:科学出版社, 2004. (NI Yongnian. The Application of Chemometrics in Analytical Chemistry[M]. Beijing:Science Press, 2004.)
- [18] 吴春国,梁艳春,孙延凤,等. 关于SVD与PCA等价性的研究[J]. *计算机学报*, 2004,27(2):286–288. (WU Chunguo,LIANG Yanchun,SUN Yanfeng,et al. On the equivalence of SVD and PCA[J]. *Chinese Journal of Computers*, 2004,27(2):286–288.)
- [19] MA Brun,FORMANEK F,YASUDA A,et al. Terahertz imaging applied to cancer diagnosis[J]. *Physics in Medicine and Biology*, 2010,55(16):4615–4623.
- [20] SACHIKO Nakajima,HIROMICHI Hoshina,MASATSUGU Yamashita,et al. Terahertz imaging diagnostics of cancer tissues with a chemometrics technique[J]. *Applied Physics Letters*, 2007,90(4):041102.
- [21] 何明霞,陈涛,杨吉龙,等. 太赫兹成像技术在肿瘤诊断方面的应用[J]. *肿瘤*, 2012,32(12):1039–1042. (HE Mingxia, CHEN Tao,YANG Jilong,et al. The application of terahertz imaging in tumor diagnosis[J]. *Tumor*, 2012,32(12):1039–1042.)
- [22] JOSEPH C S,YAROSLAVSKY A N,NEEL V A,et al. Continuous wave terahertz transmission imaging of nonmelanoma skin cancers[J]. *Lasers Surg Med*, 2011,43(6):457–462.
- [23] BROWN E R,TAYLOR Z D,TEWALI P,et al. THz imaging of skin tissue exploiting the strong reflectivity of liquid water[C]// 35th International Conference on Infrared,Millimeter and Terahertz Waves. Rome:[s.n.], 2010,1109:1–2.
- [24] 梁美彦. 利用人工神经网络识别毒品的太赫兹光谱[D]. 北京:首都师范大学, 2009. (LIANG Meiyan. Identification of terahertz spectroscopy of illicit drugs using artificial neural networks[D]. Beijing:Capital Normal University, 2009.)
- [25] 王新柯. 隐蔽爆炸物的太赫兹检测[D]. 北京:首都师范大学, 2007. (WANG Xinke. Terahertz detection of hidden explosives[D]. Beijing:Capital Normal University, 2007.)
- [26] 李薇薇. 神经网络对爆炸物太赫兹光谱的识别[D]. 北京:首都师范大学, 2009. (LI Weiwei. Neural network identification of explosives terahertz spectrum[D]. Beijing:Capital Normal University, 2009.)
- [27] OH S J,HUH Y M,KIM S H,et al. Terahertz pulse imaging of fresh brain tumor[C]// 36th International Conference on Infrared, Millimeter and Terahertz Waves. Houston:[s.n.], 2011,978:1–2.
- [28] SON J H. Terahertz electromagnetic interactions with biological matter and their applications[J]. *Journal of Applied Physics*, 2009,105(10):102033.
- [29] FIZGEALD A J,WALLACE V P,JIMENEZ L M,et al. Terahertz pulsed imaging of human breast tumors[J]. *Radiology*, 2006,239(2): 553–540.
- [30] RADPOUR R,BAJWA N,GARRITANO J,et al. THz imaging studies of painted samples to guide cultural heritage investigations at the ekleistra of st. neophytos in paphos,Cyprus[C]// Conference on Terahertz Emitters,Receivers,and Applications V. San Diego, CA:[s.b.], 2014:9199.

作者简介:



陈 韬(1987–), 女, 四川省绵阳市人, 硕士, 研究实习员, 主要从事太赫兹成像技术及其应用研究. email: ct_tao@126.com.

李泽仁(1961–), 男, 四川省三台县人, 博士, 研究员, 博士生导师, 主要从事快光电测试技术及其在武器物理中的应用研究. email:zeren109@yeah.net.

孟 坤(1984–), 男, 山东省青岛市人, 硕士, 助理研究员, 主要从事太赫兹技术及其在生物医学中的应用研究.

朱礼国(1983–), 男, 四川省绵竹县人, 博士, 副研究员, 主要从事太赫兹技术、快光电技术及其在武器物理和生物医学中的应用研究.

刘 乔(1973–), 男, 四川省泸州市人, 博士, 副研究员, 主要研究方向为太赫兹光谱成像技术及其在武器物理和生物医学中的应用.