

文章编号 1004-924X(2016)10-2392-08

基于太赫兹时域光谱系统的爆炸物识别

解 琪*, 杨鸿儒, 李宏光, 韩占锁, 孙宇楠
(西安应用光学研究所, 陕西 西安 710065)

摘要:描述了太赫兹时域光谱系统的原理和组成,研制了太赫兹时域光谱(0.1~3 THz)系统。介绍了太赫兹时域光谱技术在爆炸物识别方面的优势及其特点,提出了爆炸物识别的数学模型和方法。采用太赫兹时域光谱系统测试爆炸物样品的特征吸收光谱并将其作为标准模板,然后将爆炸物置于土壤、水泥和塑料障碍物后,采用太赫兹时域光谱系统得到穿透障碍物后爆炸物的特征吸收光谱,并将其与标准模板比对,从而实现爆炸物的隔物穿透识别。实验得到爆炸物 RDX 的特征吸收光谱,其特征频率为 0.82, 1.70 和 2.40 THz。实验还对不同厚度和种类障碍物下爆炸物 RDX、CL-20、LLM-105 和 FOX-1 进行了实验测试,结果表明:穿透障碍物后爆炸物可识别的特征吸收光谱与标准模板匹配得很好,证明根据爆炸物特征吸收光谱实现爆炸物匹配识别的方法是可行的。基于文中提出的太赫兹时域光谱系统可进一步开展爆炸物残留痕量探测识别和隔物技术研究。

关键词:太赫兹时域光谱系统;特征吸收光谱;爆炸物识别;匹配识别

中图分类号:O433.1;TQ560.71 **文献标识码:**A **doi:**10.3788/OPE.20162410.2392

Explosive identification based on terahertz time-domain spectral system

XIE Qi*, YANG Hong-ru, LI Hong-guang, HAN Zhan-suo, SUN Yu-nan

(Xi'an Institute of Applied Optics, Xi'an 710065, China)

* Corresponding author, E-mail: xieqix_ie@163.com

Abstract: The principle and composition of terahertz time-domain spectrum systems were described, and a terahertz time-domain spectrum system ranged from 0.1 THz to 3 THz was developed. The characters and predominance of terahertz time-domain spectrum technology on explosive identification were introduced and a mathematical model and a method for the explosive identification were proposed. The terahertz time-domain spectrum system was used to test the character absorbing spectra of explosives and main absorbing spectra were regarded as standard templates. Then, four kinds explosives(RDX, CL-20, LLM-105 and FOX-1) were put behind the barriers (soil, cement and plastic), and the terahertz time-domain spectrum system was used to obtain the character absorbing spectra of explosives penetrating through the barriers. The results were compared with standard templates to implement the explosive identification. The character absorbing spectra of RDX were obtained, and their character frequencies are 0.82, 1.70 and 2.40 THz. Furthermore, these explosives were tested through different barriers with different thicknesses. The results show that character absorbing spectra of explosives penetrating through the barriers match the standard templates perfectly, which veri-

收稿日期:2016-04-19;修订日期:2016-06-15.

基金项目:总装备部十二五预研基金资助项目(No. 62201050104)

fies that it is feasible to use the terahertz time-domain spectrum system to realize explosive identification according to character absorbing spectra. Moreover, the terahertz time-domain spectrum system can be used to identify the residual trace of explosives and explore the imaging technology for penetrating through barriers.

Key words: terahertz time-domain spectral system; character absorbing spectrum; explosive identification; matching identification

1 引 言

太赫兹时域光谱(Terahertz Time Domain Spectroscopy, THz-TDS)技术是太赫兹光谱技术的典型代表,是一种新兴的、非常有效的相干探测技术。与其它光谱技术相比,THz-TDS 具有独特的性质^[1-2]。首先,THz-TDS 光谱测量的频谱区间是太赫兹频段,这是其它光谱技术很难获得的。其次,太赫兹脉冲具有皮秒的脉冲宽度,易于进行时间分辨的光谱测量,用以探测样品的动态性质^[3-4]。

THz-TDS 系统在爆炸物探测识别方面有着独特的优势。在实际应用中,爆炸物经常处于某些物质的掩盖之下,从而给爆炸物识别带来困难。太赫兹波具有穿透特性,因此 THz-TDS 系统可以根据不同种类的爆炸物独有的太赫兹波段的特征吸收光谱曲线来识别爆炸物的物质成分,从而实现隐蔽爆炸物的探测识别^[5-11]。目前,该技术是国际上最前沿的爆炸物探测识别技术,广泛应用于军事、反恐和安检等领域,国内外已有多家单位开展了部分爆炸物特征光谱提取实验。本文在组建 THz-TDS 系统的基础上,开展了隐蔽爆炸物识别方法的研究,初步实现了 THz-TDS 系统在复杂环境下的应用。

2 太赫兹时域光谱系统原理和组成

THz-TDS 系统原理如图 1 所示。太赫兹波的产生采用光电导原理,首先采用飞秒激光器产生中心波长为 780 nm 的飞秒激光脉冲,飞秒激光脉冲经过分束镜后被分为泵浦脉冲和探测脉冲。一路泵浦激光脉冲经过时间延迟系统,入射

到低温砷化镓(GaAs)材料制作的光电导天线上产生太赫兹辐射脉冲,太赫兹光束经一对抛物面镜传输聚焦到待测爆炸物上。太赫兹脉冲穿透障碍物罩并透过爆炸物后,携带爆炸物太赫兹光谱信息的光束,经过第二对抛物面镜聚焦到电光采样探测系统的碲化锌(ZnTe)晶体上,被转换为电信号。另一束激光探测脉冲脉宽为飞秒量级,入射到 ZnTe 晶体上。激光探测脉冲脉宽远远小于太赫兹脉冲的皮秒量级脉宽,在与太赫兹脉冲同时入射到 ZnTe 探测晶体上时,在晶体内太赫兹脉冲产生的电场会改变激光探测脉冲的偏振态,该偏振态变化被电光采样系统探测到,信号由锁相放大器提高信噪比后输入计算机,再经过傅里叶变换处理得到载有被测爆炸物信息的太赫兹时域脉冲的波形、振幅和相位等参数。时间延迟系统通过移动平移台来改变太赫兹脉冲的光程,保证与激光脉冲同时入射到 ZnTe 晶体上。此时,所测到的太赫兹光谱最准确^[12-14]。

THz-TDS 系统主要包括太赫兹脉冲晶体辐射源、时间延迟太赫兹光谱标定系统、太赫兹成像系统、太赫兹电光采样探测系统、锁相探测系统、爆炸物隐蔽探测样品室和太赫兹时域特征光谱计算软件。其中,太赫兹脉冲晶体辐射源包括飞秒激光器、分光镜、透镜和太赫兹发射源,用于产生 ps 量级的太赫兹脉冲。飞秒激光器发出 100 fs 的激光脉冲经透镜会聚到太赫兹天线中的 GaAs 晶体表面,晶体在 35 V 的电压驱动下产生太赫兹波。太赫兹成像光学系统包括离轴抛物面镜、透镜和平面反射镜等,负责把太赫兹辐射会聚到爆炸物上,再把透过爆炸物的太赫兹辐射会聚到太赫兹探测系统上。时间延迟太赫兹光谱标定系统包括平面反射镜和电动平移台,可改变泵浦激光

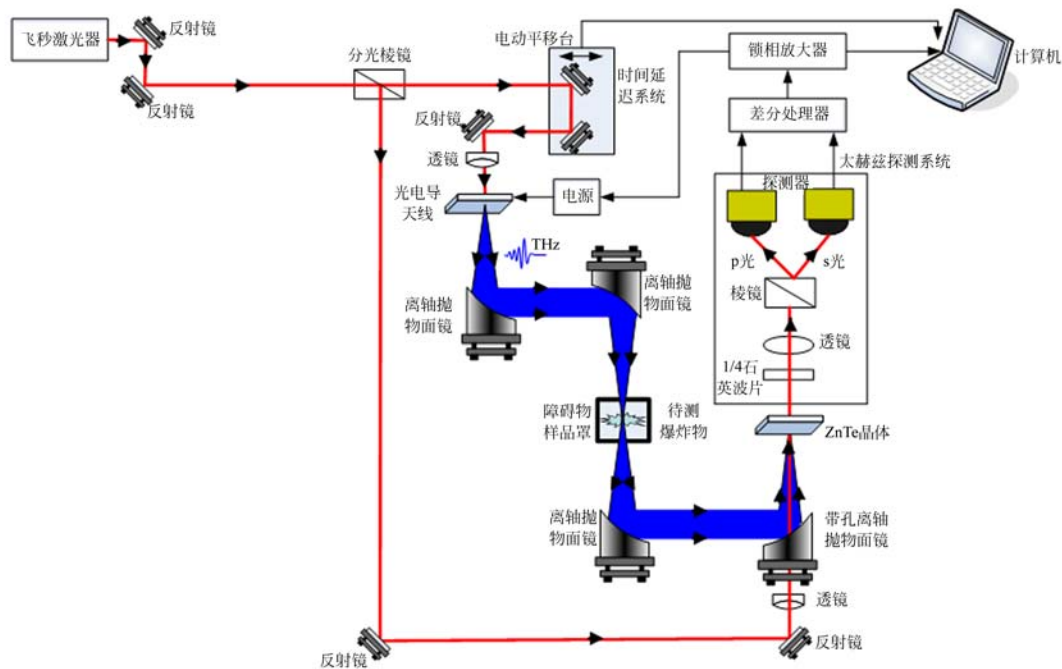


图 1 太赫兹时域光谱系统原理图

Fig. 1 Schematic diagram of terahertz time-domain spectrum system

的光程。由于太赫兹脉冲的周期(皮秒量级)远大于探测脉冲(飞秒量级),通过改变泵浦激光的光程和调制电动平移台的速度来改变探测脉冲和太赫兹脉冲之间的时间延迟,保证探测脉冲和太赫兹脉冲同时通过电光晶体,从而确保太赫兹光谱的测量准确度。电动平移台对两个反射镜速度的控制由计算机来完成,通过改变光程进而改变太赫兹光束到达晶体的时间,电动平移台改变光程的最终结果是改变锁相放大器的输出信号。在移动过程中会出现锁相最大输出信号,计算机通过记录平移台位置和锁相信号间的关系,可解算出 THz 的信息。太赫兹电光采样探测系统包括 ZnTe 晶体探测器、1/4 石英波片、沃拉斯顿棱镜和光电二极管探测器等,负责把太赫兹辐射转换为电信号。太赫兹脉冲经过离轴抛物面镜准直后照射样品,样品的透射光被第二个带孔离轴抛物面镜聚焦在 ZnTe 晶体上。同时,反射的一路光作为探测光,穿过带孔抛物面镜中心,经过透镜会聚到电光晶体的同一位置。此时飞秒激光的偏振状态由线偏振转变为椭圆偏振,再经过棱镜分为 s 偏振光和 p 偏振光。这两束光的光强差正比于太赫兹电场。使用差分探测器可将两束光的光强

差转换为电流差,从而探测到太赫兹电场随时间变化的时域光谱。锁相探测系统包括锁相放大器,可提高太赫兹探测的信噪比,并获得太赫兹电场的振幅和相位信息。太赫兹时域特征光谱计算软件实现爆炸物特征吸收光谱的计算、显示、保存和调用。图 2 为无爆炸物时的 THz-TDS 测试结果,横坐标为电动平移台位置,纵坐标为输出的太赫兹信号。

3 爆炸物识别的数学模型和方法

3.1 爆炸物识别的数学模型

爆炸物识别基于其特征吸收光谱,特征吸收光谱测试方法的基础是材料的太赫兹光谱参数测试模型。建立材料太赫兹光谱参数测试模型的基本思路为:首先通过采样的方法获得太赫兹电磁辐射的脉冲时域波形,将该时域脉冲波形经过傅里叶变换后得到其电场部分的振幅和相位信息,然后利用建立的理论模型,通过计算得到样品在太赫兹波段的折射率和吸收系数,最后从折射率和消光系数两个基本光学常数出发,进一步可以得到材料的其它光学和介电参数。

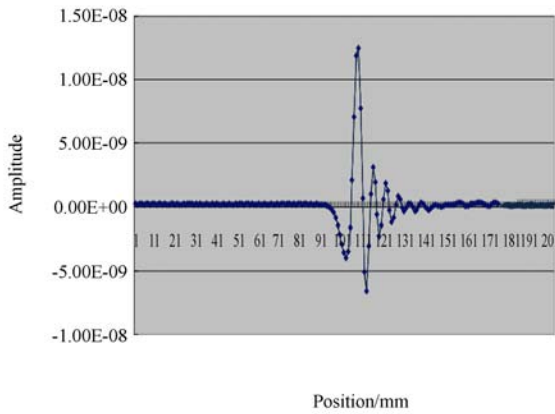


图 2 无爆炸物时的太赫兹时域系统测试结果

Fig. 2 Output pulse waveform of terahertz time-domain system without exploder

材料的光学常数(折射率和消光系数)是用来表征材料宏观光学性质的物理量。太赫兹光谱的反射比和透射比测试技术可测量得到太赫兹波的振幅和相位,基于 THz-TDS 技术提取材料的光学常数模型,可得出材料在太赫兹波段的光学常数。

若样品倾斜放置,则太赫兹脉冲在样品中传输时会存在折射。设爆炸物样品的厚度为 d ,太赫兹脉冲在样品中的传输距离为 L ,根据几何关系可知, $L = d / \cos \theta'$,其中 θ' 为太赫兹脉冲在样品后表面的折射角。试验时,首先测量参考信号 $E_{\text{ref}}(\omega)$,即尚未放置爆炸物样品的函数形式为:

$$E_{\text{ref}}(\omega) = E_{\text{thz}}(\omega), p_{\text{air}}(\omega, L), \quad (1)$$

式中: $E_{\text{thz}}(\omega)$ 为入射的太赫兹电场, $p_{\text{air}}(\omega, L)$ 为太赫兹脉冲在空气中的传递因子, ω 为角频率。

当太赫兹脉冲入射到爆炸物样品前表面上时,入射光电场方向垂直入射面和平行入射面两种情况下的反射系数表示为 r_{12s} 和 r_{12p} ,透射系数表示为 t_{12s} 和 t_{12p} ;同理,在样品的后表面上,入射光电场方向垂直入射面和平行入射面两种情况下的反射系数表示为 r_{23s} 和 r_{23p} ,透射系数表示为 t_{23s} 和 t_{23p} 。同时,在试验时通过数据处理截取时域窗口范围只包含一个主透射太赫兹脉冲,忽略其余的反射波,则透射太赫兹脉冲 $E_{\text{sam}}(\omega)$ 为:

$$E_{\text{sam}}(\omega) = E_{\text{thz}} t_{12p} t_{23p} p_{\text{sam}}(\omega, L-x) p_{\text{air}}(\omega, L) =$$

$$E_{\text{thz}} \frac{4 \tilde{n}_2}{(1 + \tilde{n}_2)^2} \exp\left\{\frac{-j\omega(L-x)}{c}\right\} \exp\left\{\frac{-j\omega \tilde{n}_2 L}{c}\right\} = E_{\text{thz}} \frac{4 \tilde{n}_2}{(1 + \tilde{n}_2)^2} \exp\left\{\frac{-j\omega(L-x + \tilde{n}_2 L)}{c}\right\}, \quad (2)$$

式中: $p_{\text{sam}}(\omega, L-x)$ 为太赫兹脉冲在爆炸物中的传递因子; $x = L \cos(\theta - \theta')$,其中 θ 为太赫兹脉冲在样品前表面的入射角, \tilde{n}_2 为爆炸物样品的复折射率, c 为太赫兹脉冲的真空光速。

计算得到样品在太赫兹波段的复透射系数为:

$$H(\omega) = \frac{E_{\text{sam}}(\omega)}{E_{\text{ref}}(\omega)} = \frac{E_{\text{thz}} \frac{4 \tilde{n}_2}{(1 + \tilde{n}_2)^2} \exp\left\{\frac{-j\omega(L-x + \tilde{n}_2 L)}{c}\right\}}{E_{\text{thz}}(\omega) \exp(-j\omega x)} = \frac{4 \tilde{n}_2}{(1 + \tilde{n}_2)^2} \exp\left[-j\omega L \frac{\tilde{n}_2(\omega) - 1}{c}\right]. \quad (3)$$

样品折射率 $n(\omega)$ 、消光系数 $\kappa(\omega)$ 和吸收系数 $\alpha(\omega)$ 分别为:

$$n(\omega) = \frac{\phi(\omega)c}{\omega d} + 1, \quad (4)$$

$$\kappa(\omega) = \frac{-\ln\left\{\rho(\omega) \frac{[n(\omega) + 1]^2}{4n(\omega)}\right\}c}{\omega d}, \quad (5)$$

$$\alpha(\omega) = \frac{2\kappa(\omega)}{c} = \frac{2}{d} \ln\left\{\frac{4n(\omega)}{\rho(\omega)[n(\omega) + 1]^2}\right\}, \quad (6)$$

式中: $\phi(\omega)$ 为爆炸物样品信号和参考信号的相位差, $\rho(\omega)$ 为爆炸物样品信号和参考信号振幅模的比^[15-16]。

3.2 爆炸物识别方法

将实验环境下的太赫兹光谱和普通环境下的太赫兹光谱相结合,在去除环境噪声、背景噪声,消除随温度变化的水蒸气吸收造成的影响后,获得用于识别的太赫兹特征吸收光谱。然后调用太赫兹特征吸收光谱数据库,采用模板匹配和吸收峰比对的方法,依次判断、识别并扣除各样品的吸收光谱。最后,判定扣除后的吸收光谱数据,直到实现爆炸物识别。爆炸物识别的步骤如下:

(1) 载入被测爆炸物的背景环境信号和对应湿度的水蒸气吸收光谱。

(2) 在太赫兹频率连续变化的情况下,用被测样品的太赫兹吸收光谱扣除背景环境信号和水蒸气吸收谱。

(3)对上述数据进行多点平滑从而去除振荡。由于测试时存在噪声干扰,测量数据中会混入噪声信号,而这些信号在进一步获取太赫兹特征吸收光谱进行的傅里叶变换相除运算中会被放大,于是被测样品的太赫兹特征吸收光谱和预处理太赫兹特征吸收光谱对应的曲线会出现振荡。这里采取数据平滑的方式消除了振荡,从而消除了噪声影响。

(4)从爆炸物特征吸收光谱数据库中获得主吸收峰顶点并提取主吸收峰,然后以此主吸收峰为标准模板,与上述提取的爆炸物特征吸收光谱进行比对,判断载入的爆炸物是否存在于被测样品中,具体流程如下:

① 计算标准模板和特征吸收光谱的峰值高度偏差,若高度偏差大于阈值,则进入步骤③,否则进入步骤②;

② 计算标准模板和特征吸收光谱的峰值面积偏差,若小于阈值则认为爆炸物质存在并记录,若大于阈值则返回继续判断;

③ 在漂移处理数范围内计算标准模板和特征吸收光谱的峰值高度偏差,若大于阈值则判定结束,认为所载入物质不存在于被测样品中;若小于阈值则进入步骤④;

④ 在漂移处理数范围内计算标准模板和特征吸收光谱的面积偏差,若小于阈值则认为爆炸物质存在并记录;若大于阈值则认为所载入物质不存在于被测样品中,判断结束。

(5)当有爆炸物识别并记录时,用特征吸收光谱扣除被识别物质的标准谱,并判断是否存在大于特征吸收光谱高度阈值的点,如果有,返回步骤(4)继续判断;如果没有则表明本次爆炸物识别完毕。

4 爆炸物的特征吸收光谱测试和爆炸物识别

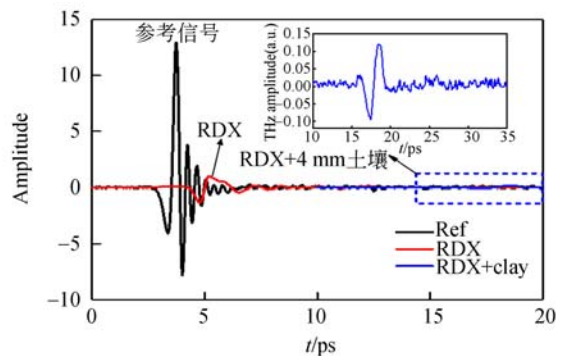
4.1 爆炸物特征吸收光谱测试机理

爆炸物分子的振动能量比转动能量大,当发生振动能级跃迁时,不可避免地伴随有转动能级

的跃迁,所以无法测量纯粹的振动光谱,只能得到分子的振动-转动光谱。当样品受到频率连续变化的太赫兹光照射时,分子吸收了某些频率的辐射,并由其振动或转动运动引起偶极矩的净变化,产生分子振动和转动能级从基态到激发态的跃迁,使对应于这些吸收区域的透射光强度减弱。记录太赫兹波的透射比与波长的关系曲线,就得到太赫兹特征吸收光谱。其吸收强度由以下两个因素决定:(1)根据量子理论,太赫兹光谱的吸收强度与分子振动时原子通过它们平衡位置的偶极矩变化的平方成正比,偶极矩变化越大,吸收峰越强;(2)能级跃迁的概率越大,吸收峰就越强。

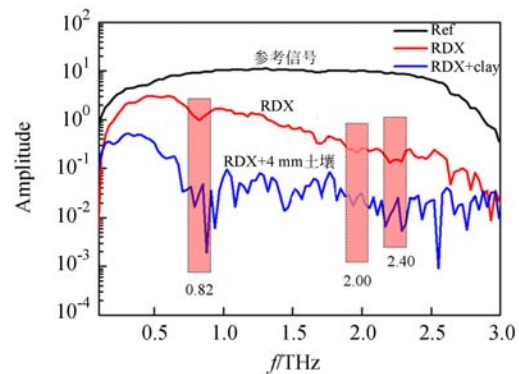
4.2 爆炸物特征吸收光谱测试结果

由于 THz 波能穿透很多非金属和非极性材料,由此可以探测隐藏的爆炸物,而且不同种类爆炸物在 THz 波段具有不同的特征吸收光谱。图 3(a)给出了无爆炸物时的太赫兹特征信号、爆炸物 RDX 的特征吸收光谱和通过 4 mm 土壤障



(a) 太赫兹吸收光谱

(a) Original terahertz absorbing spectra



(b) 傅里叶变换后的光谱

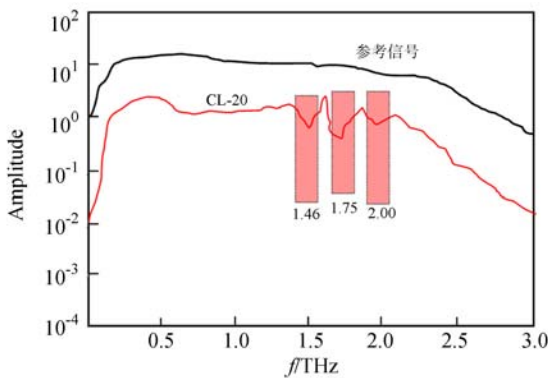
(b) Spectra after FFT

图 3 爆炸物 RDX 的特征吸收光谱对比

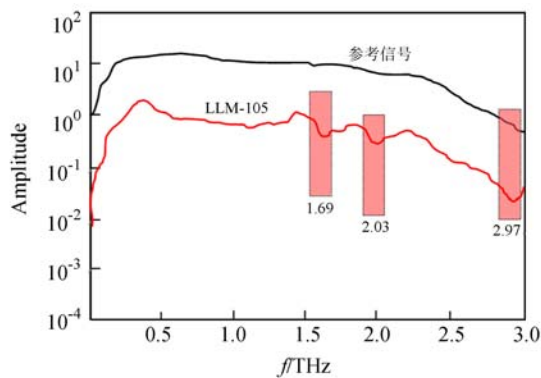
Fig. 3 Comparison of character absorbing spectra of RDX

碍物后的测试结果对比。为了更清楚地分析样品信息,对图 3(a)所示的时域波形进行了傅里叶变换,得到的频谱图如图 3(b)所示。从图 3(b)中可以看到,RDX 在 0.82,1.70 和 2.40 THz 3 个频率位置表现出 RDX 的特征吸收光谱,0.82 THz 处尤其明显,与国际上的相关报道吻合。经过障碍物后,该特征吸收光谱仍然存在。另外,采用太赫兹时域光谱系统测试了 CL-20、LLM-105 和 FOX-1 三种爆炸物的特征吸收光谱,测试结果如图 4 所示。图 4 显示,CL-20 的特征频率为 1.46,1.75 和 2.00 THz,LLM-105 为 1.69,2.03 和 2.97 THz,FOX-1 为 0.83,1.99 和 2.50 THz。

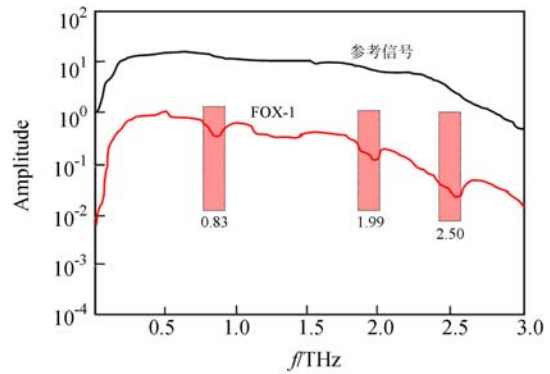
最后,将 RDX、CL-20、LLM-105 和 FOX-1 四种爆炸物放置于土壤、水泥和塑料障碍物后,障碍物厚度为 2,4 和 6 mm。测试穿透障碍物后爆炸物的特征吸收光谱,将测试结果与无障碍物时的特征吸收光谱进行对比,从而实现爆炸物的识别。爆炸物的特征频率如表 1 所示。



(a)CL-20



(b)LLM-105



(c)FOX-1

图 4 爆炸物 CL-20、LLM-105 和 FOX-1 的特征吸收光谱

Fig. 4 Character absorbing spectra of CL-20、LLM-105 and FOX-1

表 1 爆炸物的特征频率

Tab. 1 Character absorbing spectra of exploders (THz)

条件	爆炸物的特征频率			
	RDX	CL-20	LLM-105	FOX-1
无障碍物	0.82	1.46	1.69	0.83
	1.70	1.75	2.03	1.99
	2.40	2.00	2.97	2.50
2 mm 土壤	0.82	1.46	1.69	0.83
	1.70	1.75	2.03	1.99
	2.40	1.75	2.03	2.50
4 mm 土壤	0.82	1.46	1.69	0.83
	1.70	1.75	2.03	1.99
	2.40	1.75	2.03	2.50
6 mm 土壤	0.82	1.46	1.69	0.83
	1.70	1.75	2.03	1.99
	2.40	1.75	2.03	2.50
2 mm 水泥	0.82	1.46	1.69	0.83
	1.70	1.75	2.03	1.99
	2.40	1.75	2.03	2.50
4 mm 水泥	0.82	1.46	1.69	0.83
	1.70	1.75	2.03	1.99
	2.40	1.75	2.03	2.50
6 mm 水泥	0.82	1.46	1.69	0.83
	1.70	1.75	2.03	1.99
	2.40	1.75	2.03	2.50
2 mm 塑料	0.82	1.46	1.69	0.83
	1.70	1.75	2.03	1.99
	2.40	2.00	2.97	2.50
4 mm 塑料	0.82	1.46	1.69	0.83
	1.70	1.75	2.03	1.99
	2.40	2.00	2.97	2.50
6 mm 塑料	0.82	1.46	1.69	0.83
	1.70	1.75	2.03	1.99
	2.40	2.00	2.97	2.50

从表 1 可以看到,土壤和水泥对太赫兹波的吸收和散射较大,导致部分特征吸收光谱无法被识别,从而给爆炸物识别带来困难。为了降低影响,可采用以下几种方式:第一,只有在特征吸收光谱对太赫兹光谱的调制度大于系统的测量噪声时,爆炸物的特征吸收光谱才能被检测出来,因此需要提高太赫兹时域光谱系统的信噪比。信噪比定义为太赫兹信号的最大幅值与探测器噪声均方根值之比。改变探测光路的光能使探测器处于最佳响应状态,可提高太赫兹时域光谱系统的信噪比。第二,环境中水蒸气的吸收包含在太赫兹参考光谱中。制作太赫兹光谱探测装置屏蔽罩并向罩内充入氮气,减少水蒸气影响并使得频谱中水蒸气的时域光谱消失,从而减小对爆炸物识别带来的干扰。第三,增加测量次数,通过降低部分随机噪

声来减小噪声对爆炸物时域特征光谱识别的影响。

5 结 论

本文研制了太赫兹时域光谱系统,介绍了 THz-TDS 系统的原理和组成,研究了爆炸物识别的数学模型和方法。最后采用 THz-TDS 测试了无障碍物条件下爆炸物 RDX、CL-20、LLM-105 和 FOX-1 的特征吸收光谱作为标准模板,在此基础上测试了穿透土壤、水泥和塑料障碍物后这 4 种爆炸物的特征吸收光谱,通过特征吸收光谱值的比对实现爆炸物的识别。实验结果表明,本文提出的 THz-TDS 在爆炸物识别领域是非常有效的。以此为基础,采用 THz-TDS 系统可进一步开展爆炸物残留痕量探测识别和隔物成像技术的研究。

参考文献:

- [1] 李允值. 太赫兹科学与技术原理[M]. 崔万照,李韵,译. 北京:国防工业出版社,2012:51-52.
LI Y ZH. *Principles of Terahertz Science and Technology*[M]. CUI W ZH, LI Y, transl., Beijing: National Defense Industry Press,2012:51-52. (in Chinese)
- [2] 李宏光,杨鸿儒,薛战理,等. 窄带光谱滤光法探测低温黑体太赫兹辐射[J]. 光学 精密工程,2013,21(6):1410-1416.
LI H G, YANG H R, XUE ZH L, et al.. Terahertz radiation detection of low temperature blackbody based on narrow band spectral filter method[J]. *Opt. Precision Eng.*, 2013, 21(6): 1410-1416. (in Chinese)
- [3] 许景周,张希成. 太赫兹科学技术和应用[M]. 北京:北京大学出版社,2007:69-71.
XU J ZH, ZHANG X CH. *THz Science Technology and Application* [M]. Beijing: Peking University Press, 2007:69-71.
- [4] 张兴宁,陈稷,周泽魁. 太赫兹时域光谱技术[J]. 激光与光电子学进展,2005,42(7):35-38.
ZHANG X N, CHEN J, ZHOU Z K. THz time-domain spectroscopy technology[J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2005, 42(7): 35-38. (in Chinese)
- [5] 常胜利,王晓峰,邵铮铮. 太赫兹光谱技术原理及其应用[J]. 国防科技,2015,36(2):17-22.
CHANG SH L, WANG X F, SHAO ZH ZH. Terahertz spectrum and its application[J]. *National Defense Science & Technology*, 2015, 36(2): 17-22. (in Chinese)
- [6] 冯瑞妹,李微微,周庆莉,等. 爆炸物及相关混合材料的太赫兹波谱[J]. 无损检测,2009,31(5):337-339.
FENG R SH, LI W W, ZHOU Q L, et al.. Terahertz spectroscopy of explosives and the related compounds[J]. *Nondestructive Testing*, 2009, 31(5):337-339. (in Chinese)
- [7] 王高,周汉昌,姚宝岱,等. 爆炸物太赫兹光谱探测技术研究进展[J]. 激光与光电子学进展,2011,48(1):1-7.
WANG G, ZHOU H CH, YAO B D, et al.. Progress of terahertz spectroscopy detection technique of explosives[J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2011, 48(1):1-7. (in Chinese)
- [8] 许欣,吴勋,孟宪君,等. 太赫兹技术在爆炸物检测中的应用[J]. 光学技术,2008,34(增刊):265-269.
XU X, WU X, MENG X J, et al.. Application of terahertz technology in explosive detection [J]. *Optical Technique*, 2008, 34 (Suppl.): 265-269. (in Chinese)
- [9] 杜宇,张伟斌,肖丽. 太赫兹检测技术在炸药检测中的应用[J]. 信息与电子工程,2011,9(3):287-290.
DU Y, ZHANG W B, XIAO L. Application of terahertz wave technology in explosive analysis[J]. *Information and Electronic Engineering*, 2011, 9(3): 287-290. (in Chinese)
- [10] 卢树华. 基于太赫兹光谱技术的爆炸物类危险品检测[J]. 激光与光电子学进展,2012,49(4):42-48.

- LU SH H. Dedection of explosives by terahertz spectroscopic techniques [J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2012,49(4): 42-48. (in Chinese)
- [11] 陈涛,李智,莫玮. 基于模糊模式识别的爆炸物 THz 光谱识别[J]. *仪器仪表学报*, 2012,33(11): 2480-2486.
- CHEN T, LI ZH, MO W. Identification of terahertz absorption spectra of explosives based on fuzzy pattern recognition[J]. *Chinese Journal of Scientific Instrument*, 2012, 33(11): 2480-2486. (in Chinese)
- [12] LI H. Measurement precision analysis for terahertz absorption spectrum of explosive materials by using terahertz transmission spectroscopy [J]. *SPIE*, 2013,8909:8909U-1-U-17.
- [13] 姚宝岱,王高. 钝感 RDX 及 HMX 炸药的太赫兹光谱分析[J]. *光电技术应用*, 2010,25(6):11-13.
- YAO B D, WANG G. Analysis of terahertz spectrum of explosives RDX and HMX[J]. *Electro-optic Technology Application*, 2010, 25(6): 11-13. (in Chinese)
- [14] 张泽,尚丽平,邓璇. 基于 LabVIEW 的太赫兹时域光谱系统数据采集实现[J]. *太赫兹科学与电子信息学报*, 2014,12(4):491-495.
- ZHANG Z, SHANG L P, DENG H. Data acquisition realization of terahertz time-domain spectroscopy system based on LabVIEW[J]. *Journal of Terahertz Science and Electronic Information Technology*, 2014,12(4):491-495. (in Chinese)
- [15] 王秀敏. 太赫兹时域谱提取样品光学参数的具体算法[J]. *北京建筑工程学院学报*, 2009,25(1):46-51.
- WANG X M. Method of extracting materials' optical parameter from terahertz time-domain spectroscopy [J]. *Journal of Beijing University of Civil Engineering and Architecture*, 2009,25(1): 46-51. (in Chinese)
- [16] 吴猛,赵国忠,梁承森,等. 基于 LabVIEW 的太赫兹时域光谱数据处理[J]. *现代科学仪器*, 2009,2(4):9-11.
- WU M, ZHAO G ZH, LIANG CH S, *et al.*. Data processing of terahertz time domain spectroscopy based on LabVIEW [J]. *Modern Scientific Instrument*, 2009,2(4):9-11. (in Chinese)

作者简介:



解 琪 (1984—),女,陕西西安人,硕士,工程师,主要从事微光计量和太赫兹技术的研究。E-mail: xieqix_i_e@163.com



杨鸿儒 (1962—),男,陕西户县人,教授,博士生导师,主要从事激光探测、辐射度计量测试和太赫兹技术方面的研究。E-mail: ehryang@126.com

(版权所有 未经许可 不得转载)