

基于迈克尔逊干涉仪的太赫兹光谱高速探测方法研究

曹 灿^{1,2}, 张朝晖^{1,2*}, 赵小燕^{1,2}, 张 寒^{2,3}, 张天尧^{1,2}, 于 洋^{1,2}

1. 北京科技大学自动化学院, 北京 100083
2. 北京市工业波谱成像工程技术研究中心, 北京 100083
3. 北京科技大学计算机与通信工程学院, 北京 100083

摘 要 太赫兹光谱技术作为获取物质在太赫兹频段信息的主要方法, 已经被广泛应用于物质成分的测定, 而其在成分分布成像方面则有着更广阔的应用前景, 例如片剂药品的有效成分检测、行李安检的危险物品检测等。现有的太赫兹光谱探测方法时域光谱技术(THz-TDS)和频域光谱技术(THz-FDS)均不能很好地兼顾光谱分辨率与扫描时间; 且获得物质光谱数据往往要花费数秒乃至数分钟时间(取决于光谱仪的结构), 这对多像素成像系统显得过于迟缓, 更无法达到视频成像的速率需求, 严重制约了太赫兹光谱成像的实际应用。目前的太赫兹波成像多为全频段波强度成像, 只能反映样品的空间分布信息, 并不能反映出样品的光谱即成分信息。因此, 对太赫兹光谱探测速率的提升十分迫切, 太赫兹光谱高速探测的实现不仅可以显著减少物质成谱的实验耗时, 还为实现物质的太赫兹光谱成分分布成像提供了可能。提出了一种基于迈克尔逊干涉仪的太赫兹光谱高速探测方法, 在设计了该方法装置结构的基础上, 理论分析了其工作过程, 同时进行了太赫兹光谱的计算。然后从数据采样、数据处理及参数选择这几个方面进行问题分析, 计算得出该方法能够显著加快物质太赫兹光谱的扫描获取速率。最后, 对该方法建模进行仿真研究, 模拟实现其完整的探测过程。在仿真研究中, 以太赫兹辐射源的频谱分布为例, 将该方法的建模仿真结果与时域光谱技术(THz-TDS)测试结果进行了对比, 结果表明时域光谱技术(THz-TDS)所测得的频谱曲线可以近似看作是高速光谱探测法所得频谱曲线的包络线, 两种不同方法所得频谱结果具有较强的一致性。总之, 该方法能够进行样品的太赫兹光谱探测, 且在保证分辨率相同的前提下, 较时域光谱技术(THz-TDS)显著加快了成谱速率, 为实用、高通量太赫兹光谱成像提供了一种可能。

关键词 太赫兹光谱; 高速探测; 迈克尔逊干涉仪; 傅里叶变换

中图分类号: O433.1 **文献标识码:** A **DOI:** 10.3964/j.issn.1000-0593(2019)08-2634-06

引 言

太赫兹光谱已经应用于多种物质的成分分析, 而成分分布成像则具有更大的应用潜力, 例如片剂药品的有效成分检测、行李安检的危险物品检测。目前的太赫兹成像以全频段强度成像为主, 只反映空间分布, 并不能反映出样品的光谱信息即成分信息。制约太赫兹光谱成像的关键是获取太赫兹光谱的速率, 为了获得光谱数据往往要花费数秒乃至数分钟时间(取决于光谱仪的结构)。为此, 我们探索一种快速获取物质太赫兹谱的光机电结构配置, 为实用的、高通量的太赫

兹光谱成像提供一种可能。

目前, 常用的太赫兹光谱探测方法是太赫兹时域光谱技术 THz-TDS 和频域光谱技术 THz-FDS。在利用 THz-TDS 进行光谱测量时, 光路延迟线的长度限制导致频谱分辨率偏低, 典型值是 30 GHz; 完成一次扫描大约需要数秒到十几分钟, 具体时间与样品及参数设置有关。在利用 THz-FDS 进行光谱测量时, 虽然能得到很高的光谱分辨率, 典型值 10 MHz, 但是扫描时间长达数分钟甚至一小时, 具体时间取决于频率步长、频带宽度和激光器性能。可见, 目前的太赫兹光谱探测方法不能兼顾光谱分辨率与扫描时间; 获取一条光谱至少也要花费几秒钟, 这对多像素成像系统显得过于迟

收稿日期: 2018-08-13, 修订日期: 2018-12-21

基金项目: 国家自然科学基金项目(61302007), 中国博士后科学基金项目(2017M610771)和北京科技大学中央高校基本科研业务费专项资金项目(FRF-BD-17-002A)资助

作者简介: 曹 灿, 1992年生, 北京科技大学控制科学与工程系博士研究生 e-mail: 18810699648@163.com

* 通讯联系人 e-mail: zhangzhaohui@ustb.edu.cn

缓,更无法达到视频成像的速率需求。

在相关研究方面,首都师范大学太赫兹光电子重点实验室利用干涉理论对太赫兹连续波实现了频谱及能量谱的探测^[1];电子科技大学刘盛纲院士团队在远红外傅里叶变换光谱仪的基础上进行改造,实现了对太赫兹光谱的探测;俄罗斯国家科学院 Ioffe 物理技术研究所基于法布里-珀罗干涉仪设计了一种太赫兹光谱系统^[2];加拿大魁北克大学 INRS-EMT 研究所将马赫-森德尔干涉仪(MZI)引入到太赫兹探测光束延迟线中,消除了两探针脉冲间时间重叠的影响,提升了太赫兹光谱测量系统的性能^[3]。总之,已有多支团队将干涉理论用于太赫兹波光谱探测中,但未见专门用于提升光谱探测速率的研究,本文对此做了深入分析。

1 光谱系统结构

基于迈克尔逊干涉仪的太赫兹光谱高速探测系统主要由光源部分 A、系统干涉光路部分 B 及信号采集部分 C 三个模块组成,如图 1 所示。

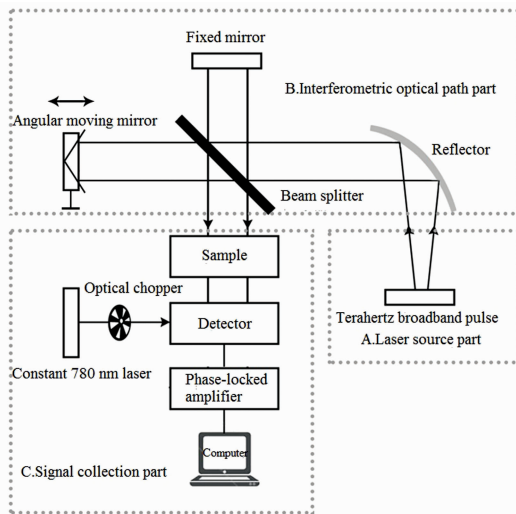


图 1 基于迈克尔逊干涉仪的太赫兹光谱高速探测系统示意图

Fig. 1 Schematic diagram of high speed detection of terahertz spectrum based on Michelson interferometer

其中,光源部分 A 采用宽带脉冲太赫兹波,由飞秒激光器激发 GaAs-LT 偶极子天线所产生。我们使用了飞秒激光器 FemtoFERb 780 nm,中心波长 780 nm,脉冲宽度小于 100 fs,重复频率 100 MHz,平均功率大于 50 μ W,功率波动范围在 $\pm 1\%$ 内,其具体参考信号详见 4.1。

系统干涉光路部分 B 主要由反射镜、分束器、动镜、固定镜等器件组成。结构与采用迈克尔逊干涉仪的傅里叶变换红外光谱仪类似,不同之处在于:①由于太赫兹波相比于红外光源更易发散,为了使其反射成平行光束,将原有的平面反射镜改为镀银抛物面镜;②分束器采用高阻硅片;③为保证动镜在高速运动中与定镜的垂直度,采用角面镜代替平面镜,减少了动镜失调带来的误差;④动镜的最大行程(厘米

量级)远高于傅里叶变换红外光谱仪中的最大行程(毫米量级),为保证行程并提高动镜移动速率,采用了具有高速度、快响应及平滑运动性能的 SMAC 公司 LAL500-050-8 音圈电机系统。其最大行程可达 5 cm,最大速度可达 $2 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$,编码解析度为 $0.05 \mu\text{m}$,推力系数为 $100 \text{ N} \cdot \text{A}^{-1}$ 。

信号采集部分 C 主要由样品池、探测器、恒定激光源、斩波器、锁相放大器及计算机等器件组成。为了探测到微弱的太赫兹波信号,将 THz-TDS 的飞秒探测激光束换成了 780 nm 连续激光束,持续照射在 LT-GaAs 偶极子天线上,以持续捕获太赫兹波信号。同时,辅以光学斩波器对探测激光束实施调制,以便配合锁相放大器将微弱太赫兹电场信号放大到适当幅度,进入计算机采集通道。

2 太赫兹光谱的计算

这里采用宽频带的太赫兹脉冲光源,每一个宽带脉冲波都包含不同频率的太赫兹信息。当太赫兹天线发出的宽带太赫兹脉冲波通过图 1 装置干涉光路部分 B 时,每一个频率的太赫兹辐射都会形成干涉,产生干涉波。该高速光谱探测法中太赫兹辐射最终的干涉图就是由这无数个不同频率的太赫兹辐射的干涉图组成的。

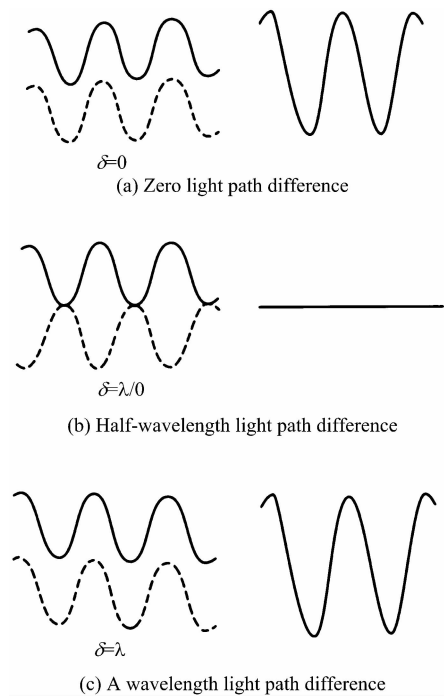


图 2 来自固定镜(实线)和动镜(虚线)的太赫兹波在不同光程差时的相位示意图和检测器检测到的光强示意图

Fig. 2 The phase diagram of the terahertz wave from the fixed mirror (solid line) and the moving mirror (dashed line) at different optical path difference and the schematic diagram of the intensity

高阻硅片分束器不吸收太赫兹波,且反射率和透射率都为 50%。只考虑单一频率的太赫兹波,当动镜以匀速移动

时, 两束太赫兹波之间的光程差 Δ 发生改变, 形成不同的干涉波, 探测器将检测到不同的干涉强度, 且呈余弦变换, 如图 2 所示。因为动镜是匀速运动, 探测器探测到的单一频率太赫兹干涉强度是关于光程差 Δ 的函数, 用 $I(\Delta)$ 表示, 可写作

$$I(\Delta) = B(f) \cos(2\pi f \Delta / c) \quad (1)$$

其中, f 为太赫兹辐射的频率, $B(f)$ 表示经修正后的频率为 f 的单一频率太赫兹辐射的强度, Δ 为两束太赫兹辐射之间的光程差, c 为真空中光速。

该式为单一频率太赫兹辐射最简单的干涉方程, 当辐射源是包含不同频率的太赫兹脉冲波时, 干涉现象就变得更为复杂。对于太赫兹脉冲波, 干涉强度需用积分表示, 也就是对单一频率太赫兹干涉强度式(1)进行积分

$$I(\Delta) = \int_{-\infty}^{+\infty} B(f) \cos(2\pi f \Delta / c) df \quad (2)$$

$I(\Delta)$ 为光程差在 Δ 这一点时, 从 $-\infty$ 到 $+\infty$ 对所有频率 (不同频率的太赫兹辐射) 进行积分得到的结果, 即所有不同频率太赫兹辐射在光程差 Δ 这一点的干涉强度的总和。式(2)表示的仅是干涉强度信息, 为了得到太赫兹频谱信息, 还需对其进行傅里叶变换, 由于为一偶函数, 最终的太赫兹频谱图可以表示为

$$B(f) = 2 \int_0^{+\infty} I(\Delta) \cos(2\pi f \Delta / c) d\Delta \quad (3)$$

3 需要关注的几个问题

3.1 数据采样

从理论上讲, 式(3)表明我们可以得到一个频率从 0 到 $+\infty$, 且分辨率无限高的太赫兹频谱。但是这要求光程差 Δ 需在 0 到 $+\infty$ 之间变换, 即意味着动镜的扫描距离必须为无限长。同时, 利用计算机对干涉强度图式(2)进行傅里叶变换, 需首先对干涉图进行数字化处理, 且光程差间隔 $d\Delta$ 无限小。显然, 这都是不现实的。因为动镜的扫描距离是有限的, 数据采集间隔 $d\Delta$ 也不可能无限小。

在动镜从 0 到 $+\infty$ 之间移动时, 每隔一个无限小的距离 $d\Delta$ 就采集数据, 对采集到的所有数据进行傅里叶变换, 就可以得到一个频率从 0 到 $+\infty$ 完整的太赫兹频谱图。但是采集无限个数据既会占据大量计算机存储空间, 又需无限长的时间对这些数据进行傅里叶变换。因此在动镜移动的一定距离范围内, 每隔一段相等的距离采集数据, 由这些数据构成干涉强度图, 再进行傅里叶变换, 得到一定频率范围内的太赫兹频谱图。

由式(3)可知, 采样间隔 $d\Delta$ 越小, 所获得太赫兹频谱范围就越大。采样间隔 $d\Delta$ 与所测频率范围内最大频率 f_{\max} 应满足如下关系

$$d\Delta \leq \frac{0.5c}{f_{\max}} \quad (4)$$

其中, c 为真空中光束。

3.2 数据处理

由于动镜移动距离有限, 最大光程差 L 须在一定范围

内, 采集数据的间隔 $d\Delta$ 不可能无限小, 采集的数据点也不可能无限多。因此, 在式(3)进行傅里叶变换时, 需要对空白的数据点进行补零处理, 才能得到完整的太赫兹频谱。但是对大量的空白数据点进行补零操作, 不仅加大了计算机的运算量, 而且还会造成太赫兹频谱信息失真。所以我们需对式(3)乘以一个截止函数 $D(\Delta)$, 表示为

$$B_m(f) = 2 \int_0^{+\infty} I(\Delta) D(\Delta) \cos(2\pi f \Delta) d\Delta \quad (5)$$

数学关系上, $I(\Delta)$ 与 $D(\Delta)$ 乘积的傅里叶变换与其傅里叶变换之后的卷积结果一致。所以, 式(5)可表示为

$$B_m(f) = B(f) * D(f) \quad (6)$$

其中, $*$ 表示卷积。 $B_m(f)$ 为最大光程差为 L 时的实际频谱; $B(f)$ 为理想条件下, 动镜移动距离无限长时的频谱; $D(f)$ 为截止函数 $D(\Delta)$ 的傅里叶变换。式(6)卷积的结果即为实际测量得到的频谱。

如图 3、图 4 所示, 当分别采用不同的截止函数对理想条件下单一频率太赫兹干涉图进行截取时, 所得到的最终频谱不同。图 4 采用三角函数进行截取所得的结果较图 3 采用矩形函数的结果而言, 频谱带宽更宽, 频谱主峰的半高宽更大, 即分辨率更低。但是主峰两侧的旁瓣基本消除, 且其余旁瓣未出现负峰。对于同一个样品的同一个理想干涉图, 当采用不同的截止函数进行截取时, 得到的最终频谱略有差别, 分辨率也不同。因此, 选择合适的截止函数不仅可以加快数据处理速度, 还能提高频谱的分辨率。

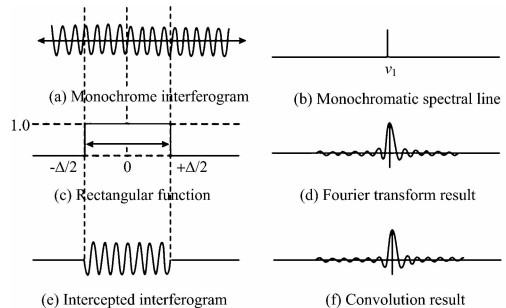


图 3 矩形函数截取干涉图得到的光谱

Fig. 3 The spectrum obtained by a rectangular function intercepting interferogram

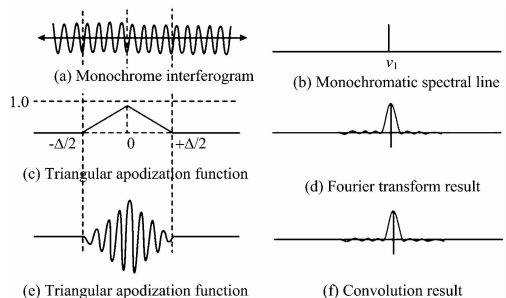


图 4 三角切趾函数截取干涉图得到的光谱

Fig. 4 The spectrum obtained by a trigonometric function intercepting interferogram

3.3 几个参数的选择

(1) 采样间隔 $d\Delta$ 与截止函数 $D(\Delta)$ 的选择

一般情况下,样品的太赫兹吸收峰多位于频谱带宽 0.1~5 THz 范围内。因此令 f_{\max} 为 5 THz,由式(4)可得, $d\Delta$ 不能超过 30 μm 。选择 30 μm 作为采样间隔 $d\Delta$,既能满足频谱带宽的需要,又能最大程度上加快扫描速度。

常见的截止函数有很多种,例如 Blackman-Harris, Trapezoidal, gaussian, Norton-Beer, cosine, 三角形和矩形等函数。在选择截止函数时,需要考虑以下几点:①卷积计算应尽量简单;②在尽可能消除旁瓣影响的同时,减少对频谱图主瓣的影响;③最大程度上保持数据点的统计独立性。为了在尽可能满足以上几点要求的同时,使得最终太赫兹频谱分辨率尽可能高,应选择 Norton-Beer Weak^[4]截止函数。

(2) 动镜移动速度与斩波器斩波频率的选择

根据上文可知,动镜移动速度应与斩波器斩波频率保持一致,使恒定激光源进行斩波后能以一定的频率到达太赫兹探测器表面激发探测器进行干涉信息的采集,从而保证探测器采样频率与动镜移动一个采样间隔 $d\Delta$ 所需的时间吻合。这里将高精度音圈电机系统 LAL500-050-8 控制动镜的移动速度设定为 $60 \text{ cm} \cdot \text{s}^{-1}$,则每移动一个采样间隔 $d\Delta$ 所需时间 t_s 为 $0.5 \times 10^{-4} \text{ s}$,即每隔 $0.5 \times 10^{-4} \text{ s}$ 的时间进行一次采样,因此斩波器的斩波频率应为 20 kHz。同时,锁相放大器的锁相放大频率也应与斩波器一致同为 20 kHz。

(3) 探测器工作过程及扫描时间分析

恒定激光照射到太赫兹探测器激发探测器进行信息采集的过程,就是恒定激光辐射与太赫兹干涉波进行卷积的过程。而在斩波器的配合下,可以将恒定激光源辐射看作阶跃函数(ϵ 函数)。在数学关系上,任意一个函数与阶跃函数进行卷积的结果就是该函数的变上限积分。因此,太赫兹探测器经过卷积后输出的信号为太赫兹干涉波的积分结果,与理论分析一致。

这里动镜的移动速度设计为 $60 \text{ cm} \cdot \text{s}^{-1}$,采样间隔 $d\Delta$ 为 30 μm ,则动镜每移动一个采样间隔所需要的时间为 $0.5 \times 10^{-4} \text{ s}$ 。当采样数据点数为 1 024 时,一次完整的扫描时间仅需 0.051 2 s。由此可知,该系统在保证分辨率的基础上,显著提高了太赫兹成谱扫描速率,为实现物质太赫兹波的光谱成像提供了一种可能。

4 模拟验证

4.1 系统光源部分

针对该系统结构(见图 1)中光源即太赫兹宽带脉冲部分 A,这里选取 THz-TDS 飞秒激光泵浦激发的太赫兹宽带脉冲源,利用传统的太赫兹时域光谱仪记录其无样品时的时域信号即参考信号,采样间隔为 0.033 ps,并对时域参考信号进行傅里叶变换,得到该光源频域参考波形,并截取常用的 0~2 THz 范围波段,实现对该系统结构中光源部分 A 的模拟仿真,如图 5 所示。该太赫兹时域光谱仪的系统描述见已有文献,实验超净洁间环境温度为 25 $^{\circ}\text{C}$,太赫兹辐射光路被密封在氮气环境中以消除水对太赫兹辐射的吸收。

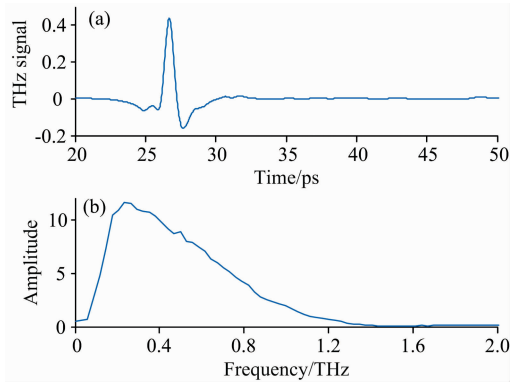


图 5 太赫兹时域光谱仪的时域与频域参考波形

(a): 太赫兹时域光谱仪-空气时域信号;

(b): 太赫兹时域光谱仪-空气频谱图

Fig. 5 Time domain and frequency domain reference waveforms of terahertz time-domain spectrometer

(a): THz-TDS-Air time-domain signal; (b): THz-TDS-Air spectrum

4.2 系统干涉光路及信号采集部分

针对该系统结构(见图 1)中干涉光路部分 B 与信号采集部分 C,这里利用 MATLAB 软件对其作用过程进行建模,模拟实现太赫兹宽带脉冲光源在该系统中的后续探测过程。在进行建模时,该系统太赫兹辐射源的光谱分布函数 $B(f)$ 即为时域光谱仪所得的太赫兹频域参考信号,如图 5(b)所示。在实际的探测过程中,测量太赫兹干涉信号时光程差 Δ 只能在有限区间 $[0, L]$ 内,与选择的采样间隔 $d\Delta$ 及采样数据点数有关;而太赫兹宽带脉冲光源信号的频率也不能无限扩充,只在有限区间 $[0, f]$ 之内。这里取采样间隔 $d\Delta$ 为 30 μm ,采样数据点数为 1 024 个。因此,探测的干涉图光程差范围在 0~3.072 cm 之间,时域光谱仪产生的太赫兹宽带脉冲辐射光源信号的频率在 0~15 THz 之间,一个完整的扫描时间仅需 0.051 2 s。

将式(2)所示的干涉强度写成离散傅里叶变换公式的形式

$$I(nd\Delta) = \sum_{f=0}^{15} 2B(f) \cos(2\pi fnd\Delta/c) \quad (7)$$

式中, $d\Delta$ 为采样间隔 30 μm ; n 为采样数据点数 1 024 个,信号采集部分以等光程差间隔 $d\Delta$ 进行采样;光源频率在 0~15 THz 之间,以一定的频率间隔 Δf 离散累加,将离散累加结果依次通过后续干涉光路及信号采集部分的模拟仿真过程,即将系统连续频率光源的干涉强度计算转换成许多不同频率的分量之和,相当于是以数值积分计算的方式代替了原积分公式。

将时域光谱仪中所得的太赫兹参考信号作为 $B(f)$ 代入式(7),而不是直接将其代入(2),这样做可以避免太赫兹辐射信号规律的复杂性导致的相应积分部分计算困难,降低系统误差,提高系统运行速度。基于 MATLAB 软件建模计算,得到该高速光谱探测法的干涉强度图,如图 6 所示。再对其进行傅里叶变换,即可得到最终的频谱图,并截取常用的 0~2 THz 范围波段,如图 7 所示。

将两种方法探测所得频谱结果图 5(b) 与图 7 进行数据归一化处理, 绘制在一张图中, 如图 8 所示。其中, 蓝色阴影部分为该高速光谱探测法所测得的频谱图, 黑色曲线部分为传统时域光谱仪所测得的频谱图。从该图可以看出, 在

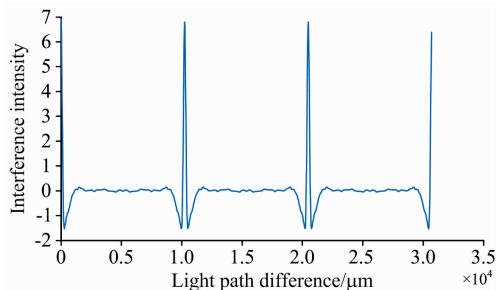


图 6 基于迈克尔逊干涉仪的太赫兹光谱高速探测方法的干涉强度图

Fig. 6 Interferogram of high speed detection of terahertz spectrum based on Michelson interferometer

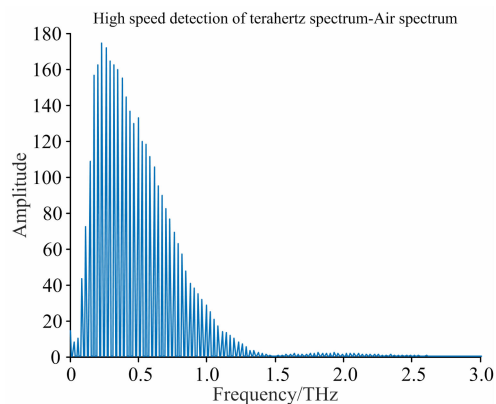


图 7 基于迈克尔逊干涉仪的太赫兹光谱高速探测方法的频谱图

Fig. 7 Frequency spectrum of high speed detection of terahertz spectrum based on Michelson interferometer

0~2 THz 范围内, 传统时域光谱仪所测得的频谱曲线可以近似看作是高速光谱探测法所得的频谱曲线的包络线, 即两种不同方法所得到的频谱曲线结果一致。

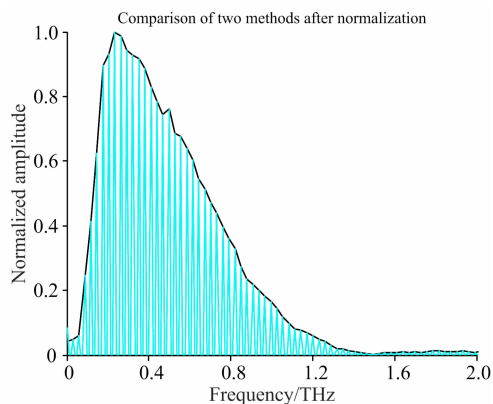


图 8 两种方法测得结果的对比图

Fig. 8 Comparison diagram of the results measured by two methods

4.3 对比结果分析

对比模拟结果表明, 该方法所得的频谱结果与太赫兹时域光谱仪所得结果基本一致, 且在保证频谱信息不失真的基础上, 剔除了冗余的太赫兹频段信息。同时, 经全文分析, 该方法测量 1 024 个数据点时, 仅需要 0.051 2 s, 大大提高了检测速率, 为太赫兹频谱的高速探测提供了一种可行的方法。两种不同方法在性能方面各有优劣, 其相关性能参数对比如表 1 所示。

该装置在实际工作过程中, 动镜移动速度的快慢决定了其扫描成像时间的长短, 而动镜移动速度的稳定性则决定了其采样误差的大小。动镜移动速度越稳定, 其采样误差越小, 该方法所得结果精度越高。因此, 在不断提高动镜移动速度的前提下, 如何保持其移动速度的稳定性, 是该装置需要进一步研究的问题。

表 1 太赫兹时域光谱法与基于迈克尔逊干涉仪的太赫兹光谱高速探测方法性能的比较

Table 1 Comparison of Terahertz time domain spectroscopy and high speed detection of Terahertz spectrum based on Michelson interferometer

相关性能	太赫兹时域光谱法	基于迈克尔逊干涉仪的太赫兹光谱高速探测方法
峰值信噪比	>100 db	一般为 50 db
光谱分辨率	30 GHz	分辨率可调, 可达 1 GHz
扫描时间 (完成一个周期)	数十秒到几分钟不等, 取决于分辨率与延迟线	一般在 0.1 s 以下, 取决于光程差与总行程
探测方式	基于“时间门”, 延迟线是关键	基于“干涉现象”, 动镜移动是关键
所控制变量	太赫兹脉冲与探测脉冲之间的时间间隔	两束太赫兹脉冲之间的光程差
所获样品信息	包含太赫兹电场的相位和振幅信息, 无需 K-K 变换	只对太赫兹辐射信息的振幅敏感

5 结 论

在设计了该方法装置结构的基础上, 以太赫兹辐射源的频谱分布为例进行模拟仿真, 将本装置的建模仿真结果与

THz-TDS 测试结果进行了对比, 两者具有较强的一致性。这表明, 本文的方法能够进行样品的太赫兹光谱探测, 且在相同分辨率的前提下, 较 THz-TDS 显著加快了成谱速率, 为实用、高通量太赫兹光谱成像提供了一种可能。

References

- [1] Lu Tielin, Yuan Hui, Kong Linggin, et al. Chinese Physics B, 2016, 25(8): 80702.
- [2] Tzibizov I A, Kaveev A K, Kropotov G I, et al. International Conference on Infrared, Millimeter, and Terahertz Waves. IEEE, 2013.
- [3] Ibrahim A, Sharma G, Singh K, et al. Journal of Infrared Millimeter & Terahertz Waves, 2016, 37(9): 837.
- [4] Lee L, Chen H, Chen S, et al. Applied Optics, 2012, 51(20): 4622.

Study on High Speed Detection of Terahertz Spectrum Based on Michelson Interferometer

CAO Can^{1,2}, ZHANG Zhao-hui^{1,2*}, ZHAO Xiao-yan^{1,2}, ZHANG Han^{2,3}, ZHANG Tian-yao^{1,2}, YU Yang^{1,2}

1. School of Automation & Electrical Engineering, University of Science and Technology Beijing, Beijing 100083, China

2. Beijing Engineering Research Center of Industrial Spectrum Imaging, Beijing 100083, China

3. School of Computer & Communication Engineering, University of Science and Technology Beijing, Beijing 100083, China

Abstract Terahertz spectroscopy, as the main method to obtain the information of substances in terahertz frequency band, has been widely used in the determination of substance composition, and it has a broader application prospect in the imaging of composition distribution, such as the detection of effective components of tablets and drugs, the detection of dangerous goods in baggage security inspection and so on. The current terahertz spectral detection methods, time-domain spectroscopy (THz-TDS) and frequency-domain spectroscopy (THz-FDS), can't take account of both spectral resolution and scanning time well, and it often takes several seconds or even minutes (depending on the structure of the spectrometer) to obtain spectral data, which makes the multi-pixel imaging system appear to be overdone. The application of terahertz spectroscopic imaging is seriously restricted because of the delay and the inability to meet the speed requirement of video imaging. At present, terahertz imaging is mostly full-band intensity imaging, which can only reflect the spatial distribution information of the sample, but can't reflect the spectral information of the sample. Therefore, it is very urgent to improve the detection rate of terahertz spectroscopy. The realization of high-speed detection can not only greatly reduce the time-consuming of spectroscopy experiment, but also provide the possibility to realize the terahertz spectroscopic composition distribution imaging. In this paper, a high-speed detection method of terahertz spectrum based on Michelson interferometer is proposed. On the basis of designing the structure of the device, the working process is analyzed theoretically, and the terahertz spectrum is calculated. Then, the aspects of data sampling, data processing and parameter selection are analyzed, and the results show that the method can significantly speed up the acquisition rate of THz spectra. Finally, the method is modeled and simulated, and the whole detection process is simulated. Taking the spectrum distribution of terahertz radiator as an example, the simulation results of this method are compared with the test results of time domain spectroscopy (THz-TDS). It is found that the spectrum curve measured by time domain spectroscopy (THz-TDS) can be approximately regarded as the envelope of the spectrum curve obtained by this high-speed spectral detection method. The results have strong consistency. This shows that the proposed method can detect the terahertz spectra of samples, and it can significantly accelerate the spectral formation rate compared with the time-domain spectroscopy (THz-TDS) on the premise of the same resolution. It provides a possibility for practical and high-throughput terahertz spectroscopy imaging.

Keywords Terahertz spectrum; High speed detection; Michelson interferometer; Fourier transform

(Received Aug. 13, 2018; accepted Dec. 21, 2018)

* Corresponding author