

太赫兹时域光谱仪光谱范围和信噪比校准技术

马世帮 李栋 解琪 李宏光 张灯 储隽伟 孙宇楠

Calibration technology for spectral range and signal-to-noise ratio of terahertz time-domain spectrometer

MA Shibang, LI Dong, XIE Qi, LI Hongguang, ZHANG Deng, CHU Junwei, SUN Yu'nan

引用本文:

马世帮, 李栋, 解琪, 等. 太赫兹时域光谱仪光谱范围和信噪比校准技术[J]. 应用光学, 2023, 44(5): 1068–1072. DOI: 10.5768/JAO202344.0503002

MA Shibang, LI Dong, XIE Qi, et al. Calibration technology for spectral range and signal-to-noise ratio of terahertz time-domain spectrometer[J]. Journal of Applied Optics, 2023, 44(5): 1068–1072. DOI: 10.5768/JAO202344.0503002

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.5768/JAO202344.0503002>

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

超快太赫兹时域光谱系统

Ultra-fast terahertz time domain spectroscopy system

应用光学. 2019, 40(2): 229–232 <https://doi.org/10.5768/JAO201940.0201008>

太赫兹光谱技术在四氢双环戊二烯检测中的应用

Application of terahertz spectroscopy in THDCPD isomers detection

应用光学. 2020, 41(4): 786–790 <https://doi.org/10.5768/JAO202041.0409903>

用太赫兹时域光谱法检测沙粒中的微量原油

Detection of trace crude oil in surface sands by THz time-domain spectroscopy

应用光学. 2020, 41(2): 361–365 <https://doi.org/10.5768/JAO202041.0203004>

高精度太赫兹探测器响应度定标系统

High-precision responsivity calibration system for terahertz detector

应用光学. 2018, 39(5): 691–696 <https://doi.org/10.5768/JAO201839.0503003>

紫外-真空紫外成像光谱仪校准技术研究

Research for calibration technology of ultraviolet-vacuum ultraviolet imaging spectrometer

应用光学. 2020, 41(4): 778–785 <https://doi.org/10.5768/JAO202041.0409902>

无人机载多光谱侦察效能研究

Study on performance of multi spectral reconnaissance of unmanned aerial vehicle

应用光学. 2017, 38(5): 685–688 <https://doi.org/10.5768/JAO201738.0501001>



关注微信公众号, 获得更多资讯信息

文章编号: 1002-2082 (2023) 05-1068-05

太赫兹时域光谱仪光谱范围和信噪比校准技术

马世帮¹, 李 栋², 解 琪¹, 李宏光¹, 张 灯¹, 储隽伟¹, 孙宇楠¹

(1. 西安应用光学研究所, 陕西 西安 710065; 2. 陆装航空局洛阳室, 河南 洛阳 471000)

摘 要: 光谱范围和信噪比是评价太赫兹时域光谱仪性能的重要参数。为了解决太赫兹时域光谱仪光谱范围和信噪比的校准问题, 介绍了太赫兹时域光谱仪的构成及原理, 比较了目前常用的光谱范围和时域信噪比校准方法的优缺点, 并优选其中一种方法, 设计了太赫兹时域频域信噪比参数校准方法。以空测时频域信号幅值最大值的 $1/M$ 对应的频率范围作为光谱范围, 研究了 M 取值对光谱范围的影响。 M 值越大, 则光谱范围越宽。当 M 值 ≥ 50 时, 光谱范围变化不大。对空测时域信号的信号和噪声进行定义, 并计算出时域信噪比。以空测时的频域功率谱作为信号, 以金属板遮挡光路时的频域功率谱作为噪声, 从而计算出频域信噪比。进行了光谱范围和信噪比校准实验, 采用对照法研究了湿度变化对太赫兹时域光谱仪测量范围和信噪比参数的影响。当相对湿度 $\leq 50\%$ 时, 对光谱范围和时域信噪比影响不大; 当相对湿度 $> 50\%$ 时, 因为空气中水蒸气对于太赫兹的吸收急剧增加, 光谱范围和信噪比急剧缩小。

关键词: 太赫兹; 时域; 光谱仪; 光谱范围; 信噪比

中图分类号: TN98

文献标志码: A

DOI: 10.5768/JAO202344.0503002

Calibration technology for spectral range and signal-to-noise ratio of terahertz time-domain spectrometer

MA Shibang¹, LI Dong², XIE Qi¹, LI Hongguang¹, ZHANG Deng¹, CHU Junwei¹, SUN Yu'nan¹

(1. Xi'an Institute of Applied Optics, Xi'an 710065, China; 2. Military Representative Organization of the Army Aviation in Luoyang District, Luoyang 471000, China)

Abstract: Spectral range and signal-to-noise ratio (SNR) are important parameters to evaluate the performance of terahertz time-domain spectrometer (TDS). To solve the calibration problems of spectral range and SNR for TDS, the composition and principle of TDS were introduced. The advantages and disadvantages of the commonly-used calibration methods were compared, and one of the methods was selected to design the parameter calibration method of terahertz time-domain frequency-domain SNR. The frequency range corresponding to $1/M$ of the maximum amplitude of signal in the frequency domain was taken as the spectral range, and the influence of M value on spectral range was studied. The larger the M value, the wider the spectral range. When M value was greater than or equal to 50, the spectral range changed little. The signal and noise of the time-domain signal were defined, and the time-domain SNR was calculated. Using the frequency-domain power spectrum of air as the signal, the frequency-domain power spectrum in the light path covered by metal plate was taken as the noise, and the frequency-domain SNR was calculated. The calibration experiments of spectral range and SNR were carried out, and the influence of humidity variation on spectral range and SNR parameters of TDS was studied by contrast method. When the relative humidity was less than or equal to 50%, the influence on spectral range and time-domain SNR was not obvious. When the relative humidity was greater than 50%, because the absorption of water vapor increased sharply, the spectral range and SNR decreased sharply.

Key words: terahertz; time domain; spectrometer; spectral range; signal-to-noise ratio

收稿日期: 2022-05-20; 修回日期: 2022-09-14

基金项目: 装备发展部计量项目 (Y1951)

作者简介: 马世帮 (1984—), 男, 硕士, 高级工程师, 主要从事光学计量与测试研究。E-mail: metrology2012@163.com

引言

太赫兹时域光谱仪是火炸药、生化战剂等材料进行特征光谱测量的核心仪器,广泛应用于目标识别、危险品成分鉴别、穿透探测等军事应用领域^[1-5]。信噪比参数和光谱范围参数是太赫兹时域光谱仪的关键技术指标参数^[6-8],目前已具备太赫兹时域光谱仪特征光谱、线性度和透射比参数的计量能力。但由于光谱范围和信噪比参数存在着名称术语和指标定义不统一的问题,导致太赫兹名称术语常常被混用,从而引起仪器性能评价的误解。

太赫兹时域光谱仪光谱范围的定义不明确,导致同一台仪器使用不同方法进行光谱范围测量的结果相差很大。光谱范围的定义方式主要有两种^[9],一是在频谱数据中,以超过 N 倍噪声限的频谱数据对应的上下限频率为光谱范围;二是在频谱数据中,以超过 $1/M$ 频谱数据最大值的频谱数据对应的上下限频率为光谱范围, M 取值为 10~80。

信噪比是反映太赫兹光谱仪计量性能的关键指标^[10-12],信噪比差的光谱仪很容易将噪声尖峰误判为特征光谱^[13-14]。目前缺乏太赫兹信噪比测量和评价的统一方法,各种商用太赫兹光谱仪的测量结果无法准确统一。当前,太赫兹光谱仪存在几种不同的信噪比名词术语。如美国俄克拉荷马州立大学把主要信号段最大值定义为信号,信号前段峰峰值的 1/2 定义为噪声。首都师范大学把主要信号段峰峰值定义为信号,信号前段均方差定义为噪声^[15]。不同术语之间的混用造成结果相差几个量级,严重影响太赫兹光谱仪性能判断。因此,有必要统一太赫兹光谱仪信噪比定义方法,使不同系统具有可比性。信号计算分为两种,分别是最大值和峰峰值,对于信号值的评估采用峰峰值更合理。

综上,需要研究太赫兹时域光谱仪光谱范围和信噪比校准技术,统一光谱范围和信噪比指标定义,解决太赫兹时域光谱仪光谱范围和信噪比校准难题,从而实现太赫兹时域光谱仪的量值统一。

1 太赫兹时域光谱仪的分类和组成

太赫兹时域光谱仪按照不同的时间延迟方式,可分为机械延迟式时域光谱仪和异步采样式时域光谱仪。其中,机械延迟式时域光谱仪组成框图如图 1 所示。

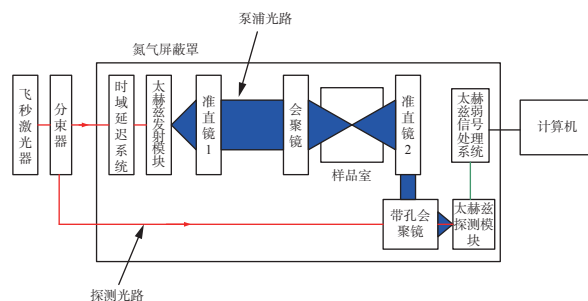


图 1 机械延迟式时域光谱仪组成框图

Fig. 1 Composition block diagram of mechanical delayed time-domain spectrometer

机械延迟式时域光谱仪主要由飞秒激光器、分束器、时域延迟系统、太赫兹发射模块、准直镜 1、会聚镜、样品室、准直镜 2、带孔会聚镜、太赫兹探测模块、太赫兹弱信号处理系统和计算机组成。飞秒激光器的出射激光经分束器分为两束,一束作为泵浦光路,另一束作为探测光路。其中,泵浦光谱经时域延迟系统产生时间延迟之后入射至太赫兹发射模块,太赫兹发射模块经准直和汇聚后进入样品室之中,穿过样品,携带被测样品信息的太赫兹波经准直镜 2 准直并经带孔反射镜反射之后,入射至太赫兹探测模块。另一束太赫兹探测光路穿过带孔反射镜之后,也入射至太赫兹探测模块。探测光路和携带样品信息的泵浦光路同时入射至太赫兹探测模块,太赫兹弱信号处理系统对太赫兹探测模块的输出信号进行放大滤波,并采集太赫兹弱信号处理系统随不同延迟时间下的信号曲线,即可得到太赫兹时域光谱仪的时域信号。经傅里叶变换之后,即可得到频谱信息。异步采样式时域光谱仪组成框图如图 2 所示。

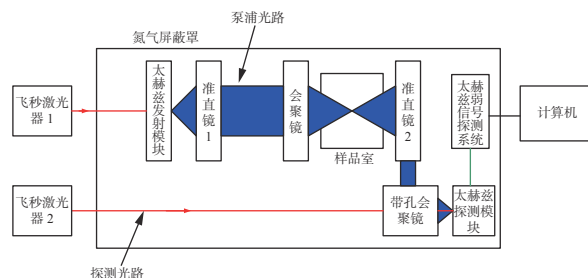


图 2 异步采样式时域光谱仪组成框图

Fig. 2 Composition block diagram of asynchronous sampling time-domain spectrometer

不同于机械延迟式时域光谱仪,异步采样式时域光谱仪利用 2 台重频不同的飞秒激光器替换了机械延迟式时域光谱仪的飞秒激光器、分束器和时域延迟系统。通过 2 个激光器的重频之差,实现

了泵浦光和探测光的时间延迟^[15]。

2 光谱范围和信噪比较准方法

2.1 光谱范围校准方法

对于定义方式一,由于噪声限不好确定,不同的噪声限确定方式对于光谱范围的影响很大,故排除该方法;对于定义方式二,频谱数据的最大值很容易确定,因此最终选择定义方式二作为光谱范围的测量依据。

太赫兹时域光谱仪光谱范围示意图如图 3 所示。以超过频谱数据最大值 $1/M$ 的频谱数据作为光谱范围,其中 M 取 10~80。

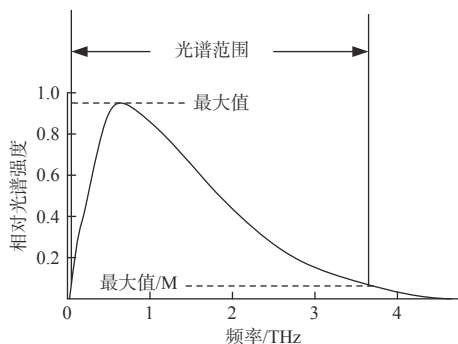


图 3 太赫兹时域光谱仪光谱范围示意图

Fig. 3 Schematic diagram of spectral range for THz time-domain spectrometer

2.2 信噪比较准方法

太赫兹时域光谱仪的信噪比分为时域信噪比和频域信噪比。时域信噪比可以反映时域光谱仪时域信号的信噪比水平,但不能反映每个频点下的信噪比水平;频域信噪比不仅可以反映不同频率下的信噪比水平,还可以反映不同频点的信噪比。

1) 时域信噪比较准原理

太赫兹脉冲时域信号如图 4 所示。其中 a 段为信号前段,其波动由噪声引起;b 段为主要信号段,集中了 THz 信号的绝大部分能量;c 段为信号衰减部分,THz 信号能量很少。由于频谱的可靠分辨率完全取决于 c 段所取的长度,因此太赫兹时域脉冲信号的采集时间主要是在 c 段。将图 4 中的 b 段峰峰值定义为信号,a 段均方差定义为噪声。由此可以得到太赫兹时域光谱时域信噪比计算公式:

$$R_{SN} = 20 \log_{10} \left(\frac{S_{\max} - S_{\min}}{\sqrt{N}} \right) \quad (1)$$

式中: $S_{\max}$ 为时域脉冲信号的最大值,即 b 段信号

的最大值; $S_{\min}$ 为时域脉冲信号的最小值,即 b 段信号的最小值; $\sqrt{N}$ 为时域信号噪声的均方根值,即 a 段信号的均方根值。

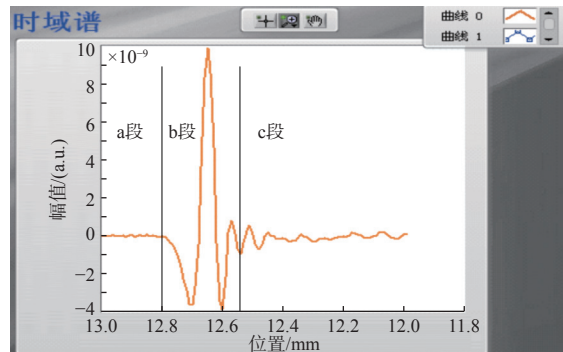


图 4 太赫兹时域光谱信号

Fig. 4 THz time-domain spectral signal

2) 频域信噪比较准原理

不放入样品,利用时域光谱仪测量时域信号曲线,对采集的时域信号进行傅立叶变换,得到此时的信号功率谱曲线 P_{SA} ;将金属板移入样品室,利用时域光谱仪测量时域信号曲线,对采集的时域信号进行傅立叶变换,得到此时的噪声功率谱曲线 P_{NA} ;利用式(2)计算频域信噪比曲线 $R_{SN\lambda}$:

$$R_{SN\lambda} = 10 \log \frac{P_{SA}}{P_{NA}} \quad (2)$$

式中: $R_{SN\lambda}$ 为频域信噪比; P_{SA} 为信号功率谱曲线; P_{NA} 为噪声功率谱曲线。

3 实验

3.1 光谱范围实验

以日本爱德万公司的异步采样时域光谱仪作为被校对象,型号为 TAS-7500TS。对空测时域信号进行处理,得到光谱范围。当光路内相对湿度为 5%、且 M 取值不同时,光谱范围的校准结果如表 1 所示。

表 1 不同 M 值的光谱范围校准结果

Table 1 Calibration results of spectral range with different M values

M 值	光谱范围/THz
10	0.11~2.83
20	0.09~3.23
30	0.09~3.42
40	0.08~3.58
50	0.08~3.63
60	0.08~3.63
70	0.08~3.64
80	0.08~3.68

由表 1 可以看出, M 值越大, 光谱范围就越宽。当 M 值 ≥ 50 时, 光谱范围变化不大, 因此建议 M 取值 50。当 M 取值 50 时, 不同湿度环境下的光谱范围校准结果如表 2 所示。

表 2 不同湿度环境下的光谱范围校准结果
Table 2 Calibration results of spectral range with different humidity

相对湿度/%	光谱范围/THz
5	0.08~3.68
10	0.08~3.65
15	0.08~3.62
20	0.08~3.61
25	0.08~3.57
30	0.08~3.56
35	0.08~3.54
40	0.08~3.52
45	0.08~3.50
50	0.08~3.48
60	0.08~2.61
70	0.08~1.42

由表 2 可以看出, 相对湿度越小, 光谱范围就越宽。当相对湿度 $\leq 50\%$ 时, 相对湿度对于光谱范围影响不大; 当相对湿度 $> 50\%$ 时, 由于空气中水蒸气对于太赫兹的吸收急剧增加, 所以光谱范围急剧缩小。因此在使用太赫兹时域光谱仪时, 建议将光路内的相对湿度保持在 50% 及以下。

3.2 时域信噪比实验

以日本爱德万公司的异步采样时域光谱仪作为被校对象, 型号为 TAS-7500TS。对空测时域信号进行处理, 得到时域信噪比。不同湿度环境下的时域信噪比校准结果如表 3 所示。

表 3 不同湿度环境下的时域信噪比校准结果
Table 3 Calibration results of signal-to-noise ratio in time domain with different humidity

相对湿度/%	时域信噪比/dB
5	69.6
10	69.4
15	69.3
20	69.1
25	68.8
30	68.6
35	68.5
40	68.4
45	68.2
50	67.7
60	22.4
70	5.4

由表 3 可以看出, 相对湿度越小, 时域信噪比就越大。当相对湿度 $\leq 50\%$ 时, 相对湿度对时域信噪比的影响不大; 当相对湿度 $> 50\%$ 时, 由于空气中水蒸气对于太赫兹的吸收急剧增加, 所以时域信噪比急剧缩小。因此在使用太赫兹时域光谱仪时, 建议将光路内的相对湿度保持在 50% 及以下。

3.3 频域信噪比实验

以日本爱德万公司的异步采样时域光谱仪作为被校对象, 型号为 TAS-7500TS。对空测时域信号进行处理, 得到信号功率谱曲线。将金属板放入泵浦光路, 对测得的时域信号进行处理, 得到噪声功率谱曲线。当光路内的相对湿度为 5% 时, 得到频域信噪比曲线如图 5 所示。

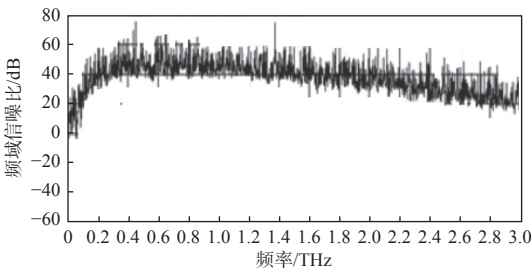


图 5 频域信噪比曲线

Fig. 5 Signal-to-noise ratio curve in frequency domain

由表 5 可以看出, 当频点从 0.1 THz 变化至 0.2 THz 时, 该时域光谱仪的频域信噪比迅速增加, 之后增速变缓, 待增加至 1.4 THz 之后, 该时域光谱仪的频域信噪比开始缓慢减小。另外, 频域信噪比的最大值为 70 dB 左右, 和时域信噪比的最大值接近。

4 结论

比较了目前常用的光谱范围和时域信噪比校准方法的优缺点, 并优选其中一种方法, 设计了太赫兹时域频域信噪比参数校准方法。研究了 M 取值对光谱范围的影响, M 值越大, 光谱范围就越宽。当 M 值 ≥ 50 时, 光谱范围变化不大, 因此在光谱范围校准时建议 M 取值 50。同时研究了光路内相对湿度变化对于光谱范围和时域信噪比的影响, 相对湿度越小, 时域信噪比越大, 光谱范围就越宽。当相对湿度 $\leq 50\%$ 时, 相对湿度对于光谱范围和时域信噪比的影响不大; 当相对湿度 $> 50\%$ 时, 因为空气中水蒸气对于太赫兹的吸收急剧增加, 光谱范围和时域信噪比急剧缩小。此外, 完成了频域信噪比校准实验, 得到了频域信噪比曲线,

频域信噪比曲线的最大值和时域信噪比接近。在太赫兹时域光谱实验中,光路中的相对湿度必须 $\leq 50\%$,才能使时域光谱仪处在比较良好的工作状态之下。光路内相对湿度变化对光谱范围和时域信噪比的影响研究结论,对于太赫兹时域光谱仪的使用、太赫兹光谱仪相关标准的制定具有重要的指导意义。

参考文献:

- [1] 黄秋萍,蔡宏磊,陆亚林.高性能和强扩展性的太赫兹时域光谱仪的研制[J].分析测试技术与仪器,2019,25(2):86-92.
HUANG Qiuping, CAI Honglei, LU Yalin. Development of terahertz time-domain spectroscope with high performance and excellent expandability[J]. Analysis and Testing Technology and Instruments, 2019, 25(2): 86-92.
- [2] 冯美琦,孙青,邓玉强,等.激光偏振态对光纤型太赫兹时域光谱仪的影响[J].中国激光,2019,46(6):218-223.
FENG Meiqi, SUN Qing, DENG Yuqiang, et al. Influence of laser polarization on fiber-type terahertz time-domain spectrometer[J]. Chinese Journal of Lasers, 2019, 46(6): 218-223.
- [3] 于东钰,杨鸿儒,李宏光.太赫兹微弱信号检测系统噪声处理方法研究[J].应用光学,2012,33(6):1101-1104.
YU Dongyu, YANG Hongru, LI Hongguang. Analysis and processing of noise in weak terahertz signal detection system[J]. Journal of Applied Optics, 2012, 33(6): 1101-1104.
- [4] ZHANG X C, XU J Z. Introduction to THz wave photonics[M]. Berlin: Springer, 2010: 1-240.
- [5] 张存林,张岩,赵国忠.太赫兹感测与成像[M].北京:国防工业出版社,2008:1-5.
ZHANG Cunlin, ZHANG Yan, ZHAO Guozhong. Terahertz sensing and imaging[M]. Beijing: National Defense Industry Press, 2008: 1-5.
- [6] 龚鹏伟,谢文,姜河,等.太赫兹脉冲测量技术及其在计量领域的应用[J].宇航计测技术,2013,33(5):1-8.
GONG Pengwei, XIE Wen, JIANG He, et al. Measurement technique of terahertz pulses and application in metrology[J]. Journal of Astronautic Metrology and Measurement, 2013, 33(5): 1-8.
- [7] 左剑,张存林.基于飞秒激光的太赫兹时域光谱仪器及其工程化产业化开发[J].现代科学仪器,2012(6):15-17.
ZUO Jian, ZHANG Cunlin. Terahertz time-domain spectrometer based on femtosecond laser and its engineering and industrialization developments[J]. Modern Scientific Instruments, 2012(6): 15-17.
- [8] TONOUCHI M. Cutting-edge terahertz technology[J]. Nature Photonics, 2007, 1(2): 97-105.
- [9] 李萌,何明霞,秦蕊.扫描速度对于太赫兹时域光谱系统信号品质的影响[J].光谱学与光谱分析,2012,32(5):1180-1183.
LI Meng, HE Mingxia, QIN Rui. Studies on signal-to-noise ratio standard for THz time-domain spectroscopy[J]. Spectroscopy and Spectral Analysis, 2012, 32(5): 1180-1183.
- [10] TAKAHASHI Y, YAMASAKI Y, TOKURA Y. Terahertz magnetoelectric resonance enhanced by mutual coupling of electromagnons[J]. Physical Review Letters, 2013, 111(3): 037204.
- [11] 龚鹏伟,湛贝,谢文,等.太赫兹时域光谱仪校准技术[J].宇航计测技术,2016,36(5):5-11.
GONG Pengwei, CHEN Bei, XIE Wen, et al. Overview of terahertz time domain spectrometer calibration technique[J]. Journal of Astronautic Metrology and Measurement, 2016, 36(5): 5-11.
- [12] NAFTALY M, DUDLEY R. Methodologies for determining the dynamic ranges and signal-to-noise ratios of terahertz time-domain spectrometers[J]. Optics Letters, 2009, 34(8): 1213-1215.
- [13] NAFTALY M. Metrology issues and solutions in THz time-domain spectroscopy: noise, errors, calibration[J]. IEEE Sensors Journal, 2013, 13(1): 8-17.
- [14] 张宏飞,苏波,何敬锁,等.超快太赫兹时域光谱系统[J].应用光学,2019,40(2):229-232.
ZHANG Hongfei, SU Bo, HE Jingsuo, et al. Ultra-fast terahertz time domain spectroscopy system[J]. Journal of Applied Optics, 2019, 40(2): 229-232.
- [15] 李萌,何明霞,田震.太赫兹时域频谱信噪比分析与规范性研究[J].光谱学与光谱分析,2012,32(3):606-609.
LI Meng, HE Mingxia, TIAN Zhen. Studies on signal-to-noise ratio standardization for THz time-domain spectroscopy[J]. Spectroscopy and Spectral Analysis, 2012, 32(3): 606-609.