

文章编号: 2095-4980(2018)02-0201-05

太赫兹时域光谱仪中幅值噪声的分析

臧元章, 邹 鋈

(中国电子科技集团公司 第五十研究所, 上海 200331)

摘 要: 明确指出太赫兹时域光谱仪系统的幅值噪声的来源为延时线的重合抖动、采样抖动以及飞秒激光功率的波动。通过理论和实验相结合的方法证明, 在测量样品的折射率和吸收系数等光学常量时, 延时线的重合抖动和采样抖动影响着系统提取的折射率值的精确度; 延时线的采样抖动和激光功率波动分别影响着系统提取的吸收系数的高频部分和低频部分的精确度。

关键词: 光谱学; 光谱分析; 光学系统; 光电导天线; 幅值噪声

中图分类号: TN206; O433.2

文献标志码: A

doi: 10.11805/TKYDA201802.0201

Analysis of amplitude uncertainty in Terahertz Time-Domain Spectroscopy

ZANG Yuanzhang, ZOU Si

(No.50 Research Institute, China Electronics Technology Group Corporation, Shanghai 200331, China)

Abstract: It is made clear that the sources of the amplitude uncertainty for Terahertz Time-Domain Spectroscopy (THz-TDS) system are registration jitter and sampling jitter of delay line and the femtosecond laser power fluctuation. The method of combination of theory and experiment is utilized to prove that registration jitter and sampling jitter of delay line affect the accuracy of the refractive index extracted by THz-TDS system, while sampling jitter of delay line and laser power fluctuation affect the accuracy of the high and low frequency parts of absorption coefficient extracted by THz-TDS system respectively.

Keywords: spectroscopy; spectrum analysis; optical systems; photoconductive antenna; amplitude uncertainty

太赫兹时域光谱仪(THz-TDS)经过二十几年的发展已趋于成熟, 在很多方面有着广泛应用, 如: 基础研究^[1-2]、医学诊断^[3]、安全应用^[4]以及非接触测量^[5-8]等。但噪声影响着 THz-TDS 系统提取的光学常数的精确度, 限制了其在物质定量分析方面的应用^[9], 也阻碍了向仪器的发展。在 THz-TDS 发展过程中, 很多人研究了整个系统的噪声来源, 研究表明噪声主要来源于: 太赫兹发射器^[10]、延时线^[11]、太赫兹探测器^[12]、样品厚度误差^[13]、太赫兹入射角度误差^[14]、太赫兹波聚焦特性^[15]以及空气折射率误差^[14]等。其中, W. Withayachumnankul 等详细地模拟了各种噪声对提取的光学常数的影响^[16], 同时通过与实验对比^[14], 确定幅值噪声是主要噪声来源, 但他们并没有明确指出幅值噪声的来源以及对其进行详细研究。

为明确幅值噪声的来源以及这些噪声对提取的光学常数的影响, 本文给出了计算系统幅值噪声的方法, 并结合实验证明了计算方式的可靠性, 最后分析了幅值噪声的来源以及对光学常数的影响。

1 基本理论

如图 1 所示, THz-TDS 系统的幅值测量是通过改变采样时间 t_k (即改变延时线 x_k) 来实现, 图中 x_{k-1} , x_k , x_{k+1} 为延时线不同的位置, 对应的时间为 t_{k-1} , t_k , t_{k+1} , 换算关系为 $t_k = 2x_k/c$ 。在时域信号的采集过程中, 由机械平移台组成的延时线的位置存在不确定性, 如某一次测量得到的实际位置为 $\Lambda x_{k-1}, x_k, x_{k+1} \Lambda$, 另一次测量得到的实际位置为 $\Lambda x_{k-1} + \Delta x' + \Delta x'', x_k + \Delta x' + \Delta x'', x_{k+1} + \Delta x' + \Delta x'' \Lambda$, 其中 $\Delta x'$ 为初始位置的差别, $\Delta x''$ 为去除初始位置差别后的位置误差, 一般 $\Delta x'' \ll \Delta x'$ 。此处, 定义 $\Delta x'$ 与 $\Delta x''$ 的标准差的 3 倍分别为延时线平移台的重合抖动(registration

jitter)与采样抖动(sampling jitter), $\Delta x'$ 与 $\Delta x''$ 相加的标准差的 3 倍为单向重复定位精确度。通过 $t=2x/c$ 的换算, 每一时刻 t_k 的幅值可以通过一阶 Taylor 级数表示为:

$$E(k) = E(t_k) + (\Delta t' + \Delta t'') \frac{dE(t_k)}{dt} \quad (1)$$

式中: $t_k = k\tau$, τ 为采样间隔; $E(t_k) = A(t_k)(P + \Delta P)$, $P + \Delta P$ 为入射在发射器上的激光光强, ΔP 为功率的波动量, $A(t_k)$ 代表 t_k 时刻的发射器的转换效率。假设在一次测试时域波形时, ΔP 在测试中不改变, 则太赫兹幅值可写为:

$$E(k) = A(t_k)(P + \Delta P) + (\Delta t' + \Delta t'')(P + \Delta P) \frac{dA(t_k)}{dt} \quad (2)$$

从式(2)可以看出, 太赫兹幅值的噪声主要来源于激光器功率波动、延时线的电动平移台的重合抖动及采样抖动。THz-TDS 系统对样品进行测试后, 光学参数提取的公式为^[16]:

$$n(\omega) = n_0 - \frac{c}{\omega d} \phi(\omega) \quad (3)$$

$$\alpha(\omega) = \frac{2}{d} \left\{ \ln \left[\frac{4n(\omega)n_0}{(n(\omega) + n_0)} \right] - \ln |H(\omega)| \right\} \quad (4)$$

式中: $H(\omega) = E_{\text{ref}}/E_{\text{sample}} = |H(\omega)| \exp(-i\phi(\omega))$, E_{ref} 为参考波, E_{sample} 样品波; n_0 为参考物质折射率, 一般为空气折射率, 取为 1; d 为样品厚度, ω 为频率; c 为光速。

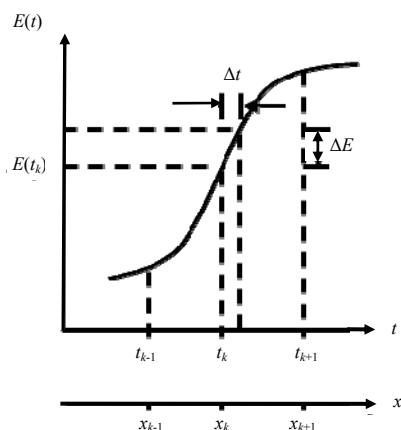


Fig.1 Schematic of delay line registration jitter and sampling jitter changing terahertz electric field amplitude

图 1 延时线的重合抖动和采样抖动改变太赫兹电场幅值的示意图

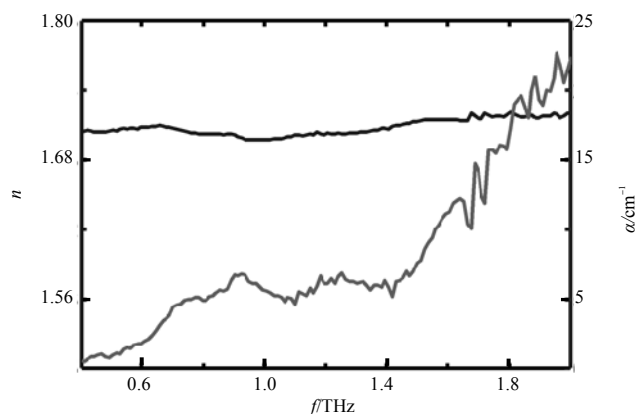


Fig.2 Means of refractive index and absorption coefficient for the same TNT sample tested for ten times

图 2 同一 TNT 样品, 测量 10 次获得的折射率和吸收系数的平均值

2 实验结果及分析

THz-TDS 系统采用常规的偶极子光电导天线作为太赫兹发射器和探测器, 飞秒激光为光纤式飞秒激光器(型号 FemtoFiber pro NIR), 脉宽为 100 fs, 重频为 80 MHz, 功率波动小于 1.5%。延时线由卓立汉光电动平移台(卓立汉光, 型号 TSA50-C)组成, 重复定位精确度小于 5 μm , 锁向放大器积分时间为 300 ms。测量了厚度为 3.26 mm 的三硝基甲苯(TNT)样品的吸收系数和折射率, 测量次数为 10 次, 参考波为空气。测试时为排除环境因素的影响, 保持测试环境温度为 24 $^{\circ}\text{C}$, 湿度 22%。测试顺序为: 样品, 参考, 样品, 参考, ……。为了排除其他噪声的影响, 在这 10 次测量中, 保持样品、太赫兹光路以及环境基本相同。测得 TNT 的平均折射率和吸收系数如图 2 所示, 折射率约为 1.7, 在 1.67 THz 有比较明显的吸收峰, 吸收峰位置与文献报道基本相同^[17], 误差在本系统的频谱分辨率内。

图 3 为实验和计算获得的吸收系数及折射率的不确定度与频率的关系。通过式(3)~式(4)获得 10 次测量样品的折射率与吸收系数, 求得标准差和平均值, 定义标准差除以平均值为不确定度, 然后相除获得图中曲线。下文将通过理论计算研究延时线的重合抖动、采样抖动以及激光功率波动对 THz-TDS 系统测得的吸收系数及折射率不确定度的影响。

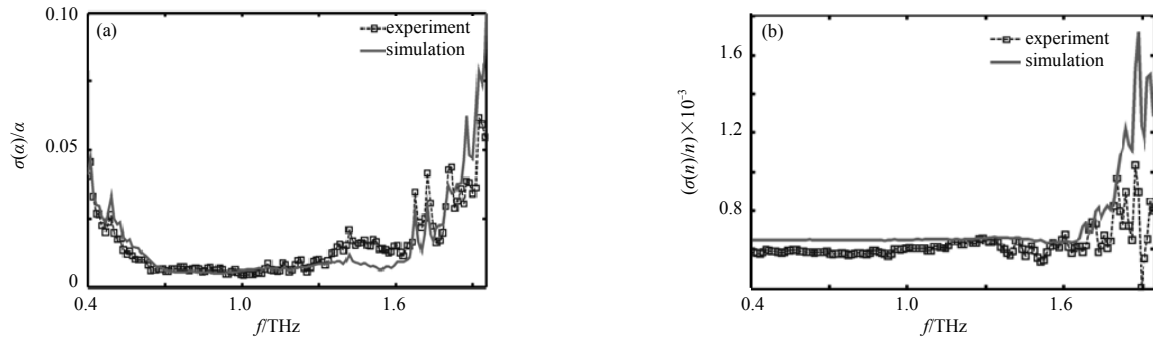


Fig.3 Experiment and calculating uncertainty of absorption coefficient(a) and refractive index(b) curves with frequency

图 3 实验与计算获得的吸收系数(a)及折射率(b)的不确定度与频率的关系

图 4 为固定其他参数, 改变延时线的重合抖动获得的吸收系数与折射率的不确定度曲线。从图中可以看出, 延时线重合抖动的改变, 不影响吸收系数的不确定度, 却影响折射率的不确定度。重合抖动越大, 折射率不确定度越高。

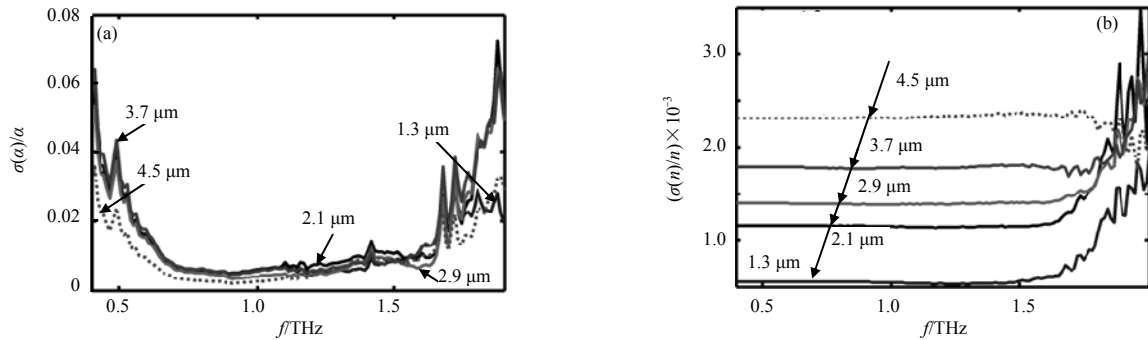


Fig.4 Uncertainty of absorption coefficient (a) and refractive index (b) curves by changing registration jitter and fixing others parameters

图 4 固定其他参数, 改变重合抖动获得的吸收系数(a)与折射率(b)的不确定度曲线

图 5 为固定其他参数, 改变延时线的采样抖动获得的吸收系数与折射率的不确定度曲线。从图中可以看出, 采样抖动的改变, 影响吸收系数与折射率不确定度的高频部分。采样抖动越大, 吸收系数和折射率高频不确定度越高。

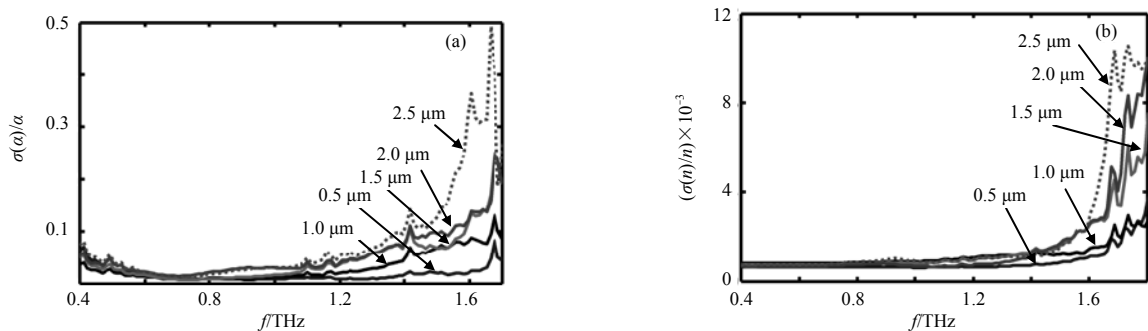


Fig.5 Uncertainty of absorption coefficient (a) and refractive index (b) curves by changing sampling jitter and fixing others parameters

图 5 固定其他参数, 改变采样抖动获得的吸收系数(a)与折射率(b)的不确定度曲线

图 6 为固定其他参数, 改变激光功率波动获得的吸收系数与折射率的不确定度曲线。从图中可以看出, 激光功率波动的改变, 不影响折射率的不确定度, 影响吸收系数不确定度的低频部分。激光功率波动越大, 吸收系数低频不确定度越高。值得注意的是, 此处激光功率指的是光电导天线接收的功率, 其波动不仅与激光器的功率缓变噪声($1/f$ 噪声)有关, 还与激光器的光斑指向稳定性有关。光电导天线接收面积较小, 只有约 $5\text{ }\mu\text{m} \times 5\text{ }\mu\text{m}$, 光斑指向的不稳定也会影响天线接收的功率。

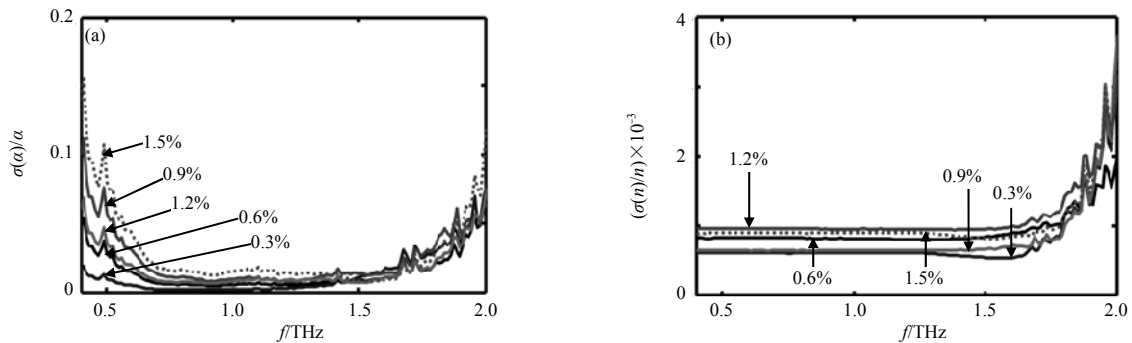


Fig.6 Uncertainty of absorption coefficient (a) and refractive index (b) curves by changing laser power fluctuation and fixing others parameters

图 6 固定其他参数, 改变激光功率波动比获得的吸收系数(a)与折射率(b)的不确定度曲线

综上, 延时线的重合抖动只影响折射率不确定度, 而采样抖动影响吸收系数和折射率不确定度的高频部分, 激光功率波动影响吸收系数不确定度的低频部分。虽然延时线的重合抖动影响折射率不确定度, 但其整体值比较小, 小于 0.3%, 而采样抖动对吸收系数的高频部分影响非常大, 当采样抖动为 $2.5 \mu\text{m}$ 时, 吸收系数的高频部分不确定度高达 50%。激光功率波动对吸收系数的低频部分影响也非常大, 当功率波动为 1.5% 时, 其不确定度约为 15%。为减小 THz-TDS 系统测得的光学常数的不确定度, 应尽量减小延时线的采样抖动与激光器的功率波动。

3 结论

通过理论和实验详细研究了 THz-TDS 幅值噪声的来源, 以及对系统测得吸收系数与折射率的影响。研究表明, 延时线的重复定位精确度(包括重合抖动和采样抖动)与激光器功率的变化是幅值噪声的主要来源; 延时线的重合抖动与采样抖动虽然影响折射率, 但整体不确定度较小, 基本可以忽略; 延时线的采样抖动和激光功率波动分别对吸收系数的高频部分与低频部分的不确定度有着非常大的影响。总体而言, 幅值噪声对折射率的影响基本可以忽略, 而对吸收系数的影响非常大。

参考文献:

- [1] ZALKOVSKIJ M, BISGAARD C Z, NOVITSKY A, et al. Ultrabroadband terahertz spectroscopy of chalcogenide glasses[J]. Applied Physics Letters, 2012, 100(3):031901-1-031901-4.
- [2] TANI S, BLANCHARD F, TANAKA K. Ultrafast carrier dynamics in graphene under high electric field[J]. Phys. Rev. Lett., 2012, 109(16):166603.
- [3] ZHANG C H, ZHAO G F, JIN B B, et al. Terahertz imaging on subcutaneous tissues and liver inflamed by liver cancer cells[J]. Terahertz Science Technology, 2012, 5(3):114-123.
- [4] 谢巍, 侯丽伟, 潘鸣. 被动太赫兹成像二维扫描技术[J]. 太赫兹科学与电子信息学报, 2014, 12(2):176-179. (XIE Wei, HOU Liwei, PAN Ming. 2D scanning technology in passive terahertz imaging[J]. Journal of Terahertz Science and Electronic Information Technology, 2014, 12(2):176-179.)
- [5] BEARD M C, TURNER G M, SCHMUTTENMAER C A. Terahertz spectroscopy[J]. J. Phys. Chem. B, 2002, 106(29):7146-7159.
- [6] ZEITLER J A, TADAY P F, NEWNHAM D A, et al. Terahertz-pulsed spectroscopy and imaging in the pharmaceutical setting-A review[J]. J. Pharm. Pharmacol., 2007, 59(2):209-223.
- [7] SCHMUTTENMAER C A. Exploring dynamics in the far-infrared with terahertz spectroscopy[J]. Chem. Rev., 2004, 104(4):1759-1779.
- [8] MITTLEMAN D M, GUPTA M, NEELAMANI R, et al. Recent advances in terahertz imaging[J]. Applied Physics B, 1999, 68(6):1085-1094.
- [9] 花月芳. 基于太赫兹时域光谱技术的农药定性和定量分析[D]. 杭州: 浙江大学, 2010. (HUA Yuefang. Qualitative and quantitative detection of pesticides by terahertz time-domain spectroscopy[D]. Hangzhou, China: Zhejiang University, 2010.)
- [10] DUVILLARET L, GARET F, COUTAZ J L. Influence of noise on the characterization of materials by terahertz time-domain spectroscopy[J]. Journal of Optical Society America B, 2000, 17(3):452-460.
- [11] COHEN N, HANDLEY J W, BOYLE R D, et al. Experimental signature of registration noise in pulsed terahertz systems[J]. Fluctuation and Noise Letters, 2006, 6(1):L77-L84.

(下转第 211 页)