

基于闭环控制的太赫兹时域光谱快速采集

黄战华 胡子晓* 何明霞 龙宁波 刘洋

天津大学光电信息技术教育部重点实验室, 天津 300072

摘要 太赫兹时域光谱 (THz-TDS) 技术作为一种快速发展的新型光谱分析方法在诸多领域备受关注。目前传统 THz-TDS 检测时间慢, 数据采集量低。为了提高 THz-TDS 检测速度与精度, 根据等效采样原理, 设计了一种基于闭环控制的快速 THz-TDS 数据采集系统。该系统可进行快速连续扫描采集, 步进扫描时通过光学延迟线的信号反馈来实时获取其位置信息, 完成自动化快速扫描。通过每步连续采集多个数据点来提高单步采集的准确性。结果表明, 该系统充分利用了光学延迟线的硬件性能, 可实现最高 500 kHz 的数据采集, 步长 5 μm 时单步连续采集 1000 个数据时间仅为 86.34 ms, 系统能够对太赫兹时域脉冲信号进行高精度自动化快速采集。

关键词 光谱学; 太赫兹时域光谱; 数据采集; 闭环控制; 连续扫描; 步进扫描

中图分类号 O436

文献标识码 A

doi: 10.3788/LOP52.040401

Terahertz Time-Domain Spectroscopy Rapid Data Acquisition Based on Closed-Loop Control

Huang Zhanhua Hu Zixiao He Mingxia Long Ningbo Liu Yang

Key Laboratory of Opto-electronics Information Technology, Ministry of Education, College of Precision Instrument and Optoelectronics Engineering, Tianjin University, Tianjin 300072, China

Abstract As a new spectral analysis method, terahertz time-domain spectroscopy (THz-TDS) is rapidly developing in many fields. Conventional THz-TDS systems have a long detection time and a small amount of collected data. To improve THz-TDS system's detection speed and accuracy, a rapid THz-TDS data acquisition and control system based on closed-loop control are presented. The system can perform continuous scanning and data collection with a high speed. When performing step scanning, it can get real-time location information of the optical delay line by the delay line's feedback signal, and thus can complete automatic scanning rapidly. By acquiring multiple data continuously in a single step, the accuracy of acquisition in every step is improved. Results show that the system can take full advantage of the optical delay line to achieve a highest data acquisition speed of 500 kHz. When the step length is 5 μm , the time of continuous acquisition of 1000 data is only 86.34 ms, which means the system can perform automatic and rapid acquisition of terahertz time-domain pulse signal with high precision.

Key words spectroscopy; terahertz time-domain spectroscopy; data acquisition; closed-loop control; continuous scanning; step scanning

OCIS codes 040.2235; 070.1170; 120.1880; 120.5800; 300.6495

1 引言

太赫兹电磁波 (THz) 其波长范围为 0.03~3 mm, 相应频率范围在 10 Hz~0.1 THz, 介于微波和红外之间。由于其处于电磁波谱中电子学向光子学过渡的特殊位置, 具有穿透性强、光谱分辨率高、安全性好等特点, 近年来其学术和应用价值受到世界范围的广泛关注^[1]。太赫兹时域光谱 (THz-TDS) 技术能够同时探测 THz 波的振幅和相位信息, 在生物医学, 安全检查, 无损检测, 材料特性分析, 环境与食品安全, 通讯等许多

收稿日期: 2014-10-21; 收到修改稿日期: 2014-11-26; 网络出版日期: 2015-03-21

基金项目: 科技部重大仪器专项(2011YQ150021)

作者简介: 黄战华(1965—), 男, 博士, 教授, 主要从事光电图像和光电子信息技术方面的研究。

E-mail: zhanhua@tju.edu.cn

*通信联系人。E-mail: huzixiao@tju.edu.cn

领域展现出巨大的应用潜力并已迅速发展成为一个令人关注的新兴研究方向^[2-11]。

THz-TDS系统目前已从庞大笨重的实验室装置发展为紧凑廉价的实用化光谱仪^[12],近年来对于THz-TDS技术及其系统仪器化进行大量的研究^[13-14],太赫兹时域脉冲信号快速自动化采集是仪器化应用亟需解决的主要问题之一,传统的THz-TDS进行THz时域脉冲信号采集时获得的是商用锁相放大器提供给计算机的采集数据,锁相放大器与计算机的通信时间较长,且锁相放大器提供的数据为单点数据,易受噪声影响。步进扫描采集时一般利用延时时间控制单步采集^[15],往往由于不能获得合适的延时时间而使整个采集过程时间较长。本文考虑光学延迟线的控制特点,基于闭环控制原理,设计了一种自动化快速扫描的THz时域脉冲信号采集控制系统,主要包括锁相放大控制,光学延迟线控制,数据采集,数据传输存储,数据处理分析等单元模块。进行连续扫描采集时,为避免锁相放大器与上位机通信造成的非等间隔采样,系统采用高速模数(AD)转换与Flash同步存储数据的方法。步进扫描采集时,为缩短单步采集的时间,提高单步采集时数据的准确性,系统根据控制延迟线的输出信号反馈来实时获取延迟线运动情况,且通过每步采集多个数据点来提高精度。

2 采集控制系统基本原理和设计

2.1 等效时间采样原理

对于瞬态信号的测量,一般有实时采样与等效时间采样两种方式,由于飞秒激光产生的THz脉冲为皮秒量级,其频率远超出一般电子器件的响应范围。因此记录THz脉冲的电场随时间变化的波形,一般采用等效时间采样原理进行处理获取完整的THz时域脉冲。等效时间采样原理如图1所示。

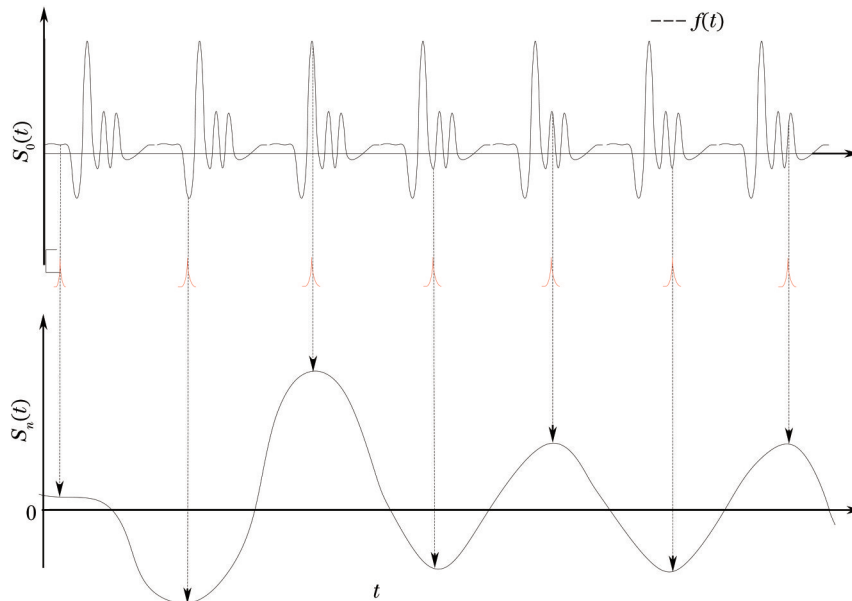


图1 等效时间采样基本原理

Fig.1 Basic principle of equivalent time sampling

对于一个重复出现的周期性信号 $S_0(t)$, 其周期为 T , 即

$$S_0(t) = S_0(t + nT). \quad (1)$$

设冲击序列为 $f(t)$, 其抽样间隔为 $T_f = n_1T + \Delta t$, 在抽样间隔点得到信号 $S_n(t)$:

$$S_n(t) = S_0(n_1T + \Delta t) f(n_1T + \Delta t) = S_0(\Delta t) f(n_1T + \Delta t), \quad (2)$$

当 n_1 取不同值时, 相当于分别在信号的不同周期上抽取采样点, 当改变 Δt 时, 这些采样点分别取自信号不同周期的不同位置, 最终重新组成待测信号的波形 $S_n(t)$. $S_n(t)$ 的形状与 $S_0(t)$ 形状相似, 但在时间上比原信号展宽若干倍, 这样一个高频、快速的信号可变成低频、慢速的信号进行处理。

2.2 快速 THz-TDS 数据采集控制系统

通过光电导天线探测到的信号经过前置处理与锁相放大后进入数据采集控制系统。数据采集控制系

统功能主要包括控制可编程锁相放大器的中心频率及增益,控制生成频率可调斩波电压,锁相放大后模拟信号进行模数转换,光学延迟线移动控制,数据的上下位机存储,上下位机间的通信传输,及上位机的数据处理等。本系统将采集的数据与采集时的状态同时存储,方便后期的数据处理。

系统中数字控制电路为基于 8051 与 CPLD 的嵌入式系统,其结构如图 2 所示。

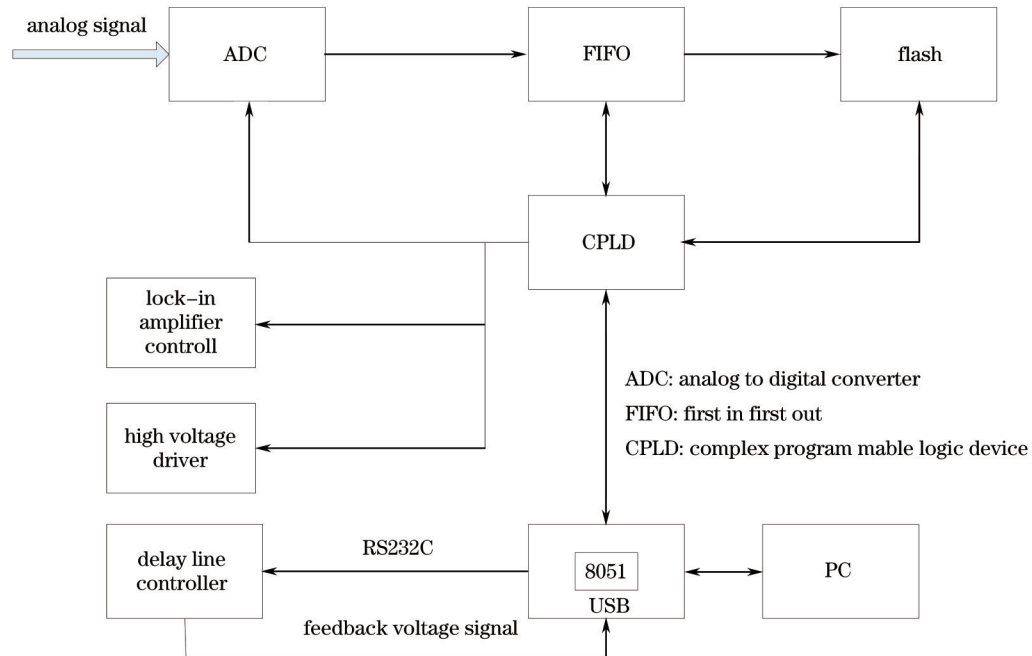


图 2 数据采集系统基本构成

Fig.2 Basic constitute of the data acquisition system

上位机向 USB 发送控制码,USB 通过串口转发给光学延迟线控制器来控制光学延迟线的运动,包括速度、加速度及位移的设定,及光学延迟线输出状态的复位等。光学延迟线控制器的输出信号直接反馈给 USB,USB 在检测到延迟线装置输出的电平上升沿时可进行单步采集,达到闭环控制的效果。首先设定采集频率,启动数据采集后,模拟信号经锁相放大后通过 AD 转换进入到 FIFO 缓冲。经 FIFO 缓冲后的数据可写入到 Flash 中,也可以通过 USB 直接传输到上位机中进行存储。

2.3 数据采集中运动自动控制设计

由等效时间采样原理可知,为得到一个完整的 THz 时域脉冲波形,需要改变取样冲击序列取样间隔中的时间延迟 Δt 。这里通过光学延迟线来调整泵浦脉冲光和探测脉冲光的相对延迟,得到 THz 脉冲不同位置的强度,从而可探测到整个太赫兹时域波形。

光学延迟线的运动控制往往决定 THz 时域脉冲数据采集的速度及采集量,进而决定 THz-TDS 系统检测时间及分辨率。对于 THz 时域系统的扫描控制,一般分为连续扫描与步进扫描两种方式。

2.3.1 连续扫描控制设计

连续扫描的基本原理为:系统初始化后,根据设定的位移量与速度控制延迟线进行运动,并同时进行数据采集。数据采集发生在光学延迟线运动的整个过程中。采集数据量为单个数据采集时间与扫描时间的乘积。

对于连续扫描,通常的 THz-TDS 系统利用锁相放大器与计算机通信后的采集数据或者利用数据采集卡传到计算机中的数据^[16],单个数据采集时间较长,导致整个扫描过程的数据量较低。并且由于每次数据采集与计算机通信时间存在差异,故不能保证完全等间隔采样。

本数据采集系统直接对锁相放大后的模拟信号进行 AD 转换。采用高速 AD,能在较短时间内采集大量数据。并且将 AD 转换后的数据直接同步存储到下位机的 Flash 中,尽量避免了由上位机程序通信造成的非等间隔采样,连续扫描采集流程图如图 3 所示。

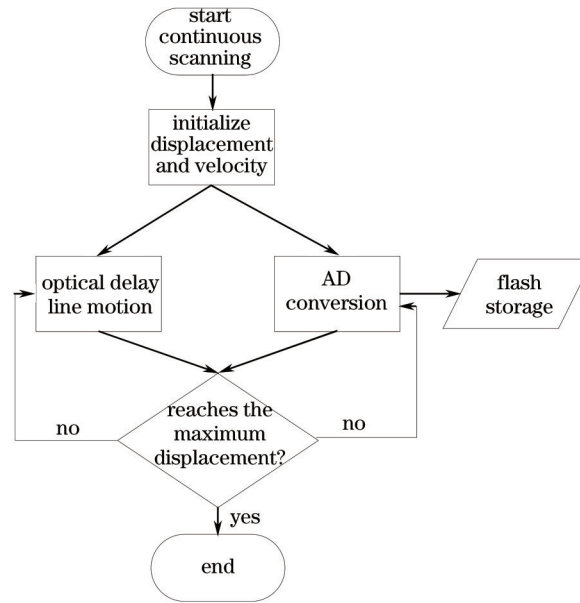


图3 连续扫描采集流程图

Fig.3 Acquisition flowchart of continuous scanning

2.3.2 步进扫描控制设计

步进扫描的基本原理为系统初始化后,光学延迟线根据预先设定的步长移动,移动一个步长后采集数据,达到设定步数后完成数据采集。由于数据采集发生在延迟线处于停止状态时,因此能够保证等间隔采集数据,数据准确性高。

对于步进扫描,通常THz-TDS系统利用一定的延时控制每步的扫描,即设定一个远大于移动单步与采集数据总时间的延时时间,等待到延时时间后进行下一步的移动与采集。由于无法准确计算移动单步与采集数据的总时间,因此往往无法得到较合适的延时时间,使整个扫描过程时间较长,无法实现快速自动化扫描。

本文设计的数据采集系统根据光学延迟线的闭环反馈实现步进扫描采集的自动化控制。其控制原理为每次开始单步移动时设定延迟线控制器输出电平为低,移动单个步长后延迟线的电平输出反馈为高,电平输出反馈即可代表单步移动的位置信息,数据采集系统只有检测到延迟线控制器反馈的电平上升沿时才进行每步的数据采集,完成设定的单步数据采集量。若未到达设定步数则重复上述单步数据采集过程,直到达到设定步数结束采集,具体流程如图4所示。

采用这种步进扫描方式,采集时间由延迟线控制器的反馈信号决定,单步采集时间为

$$t_{\text{step}} = t_{\text{move}} + t_{\text{simple}} + t_{\text{com}}, \quad (3)$$

式中 t_{move} 为平移台移动单步距离的时间, t_{simple} 为每步采集数据时间, t_{com} 为采集系统与平移台控制器通信时间。本系统中光学延迟线利用PID控制运动,短距离移动时间与速度不是线性关系,表1为移动不同步长的最短时间; t_{simple} 由AD采样速率与单步采样量决定,AD的最高转换速率为500 kHz; t_{com} 由串口的通信速率决定,系统串口通信速率最高可达38400 Baud。因此单步采集时间较短,由于每步移动依靠反馈信号,无需等待到延时时间,整个扫描过程时间与延时步进扫描相比大大减小。

表1 移动单步最短时间

Table 1 Shortest time of moving single-step

Displacement of single-step / μm	Time /ms
1	39.87
3	50.36
5	74.71
10	106.57

为了避免由于运动时延迟线平移台发生振动引起的误差,步进扫描时数据采集时间应该发生在延迟线

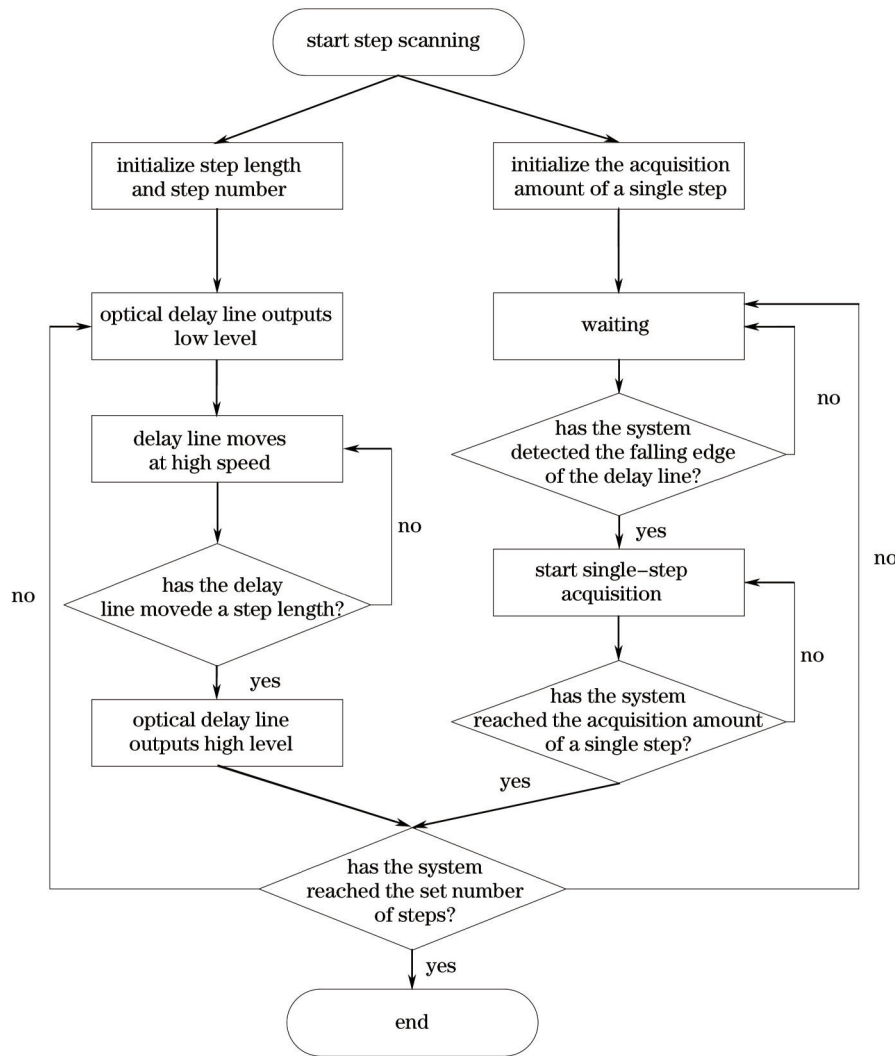


图4 步进扫描采集流程图

Fig.4 Acquisition flowchart of step scanning

平移台静止期间。一般 THz-TDS 系统在每步停止后直接读取锁相放大器提供的单点数据,容易受噪声影响。而本系统可根据预先设定的单步采集量进行数据采集。 Δn 单步移动停止后在固定位置可连续采集多个数据,在后期的数据处理中可通过平均求值等方式消除噪声的影响,从而提高步进扫描中每步数据的准确性。

图5为设定系统采样速率为 100 kHz,扫描步长为 5.00 μm ,每步采集 1000 个数据,扫描位移为 1000 μm 时进行数据采集下延迟线控制器输出信号随时间的变化。可以看出步进扫描时延迟线的反馈信号为周期

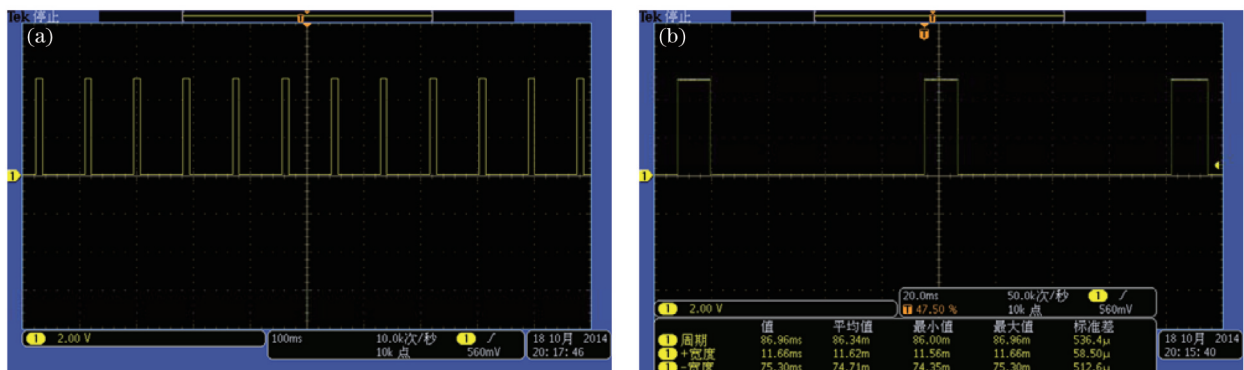


图5 (a) 延迟线的反馈输出信号;(b)单步反馈信号周期

Fig.5 (a) Output feedback signal of the delay line; (b) period of the single-step feedback signal

方波电平信号,方波信号低电平宽度为平移台移动单步位移时间,高电平宽度为采集与通信时间,反馈信号的周期为 86.34 ms,即步进扫描时每步连续采集 1000 个数据的时间,而相同条件下延时步进采集单步采集 1 个数据点的时间大于 320 ms,结果表明利用闭环控制的方式进行步进扫描采集时采集时间短,单步采集数据量多。

3 实验与分析

快速 THz-TDS 数据采集系统采集到的数据可在上位机软件中进行数据处理及频谱变换分析等,为测试该数据采集系统的性能,使用该数据采集系统对天津大学太赫兹研究中心搭建的 8F THz-TDS 系统进行 THz 时域脉冲的数据采集。

THz-TDS 系统标准信噪比为^[17]

$$S_{\text{isnr}} = S_{\text{isnr}} \cdot \sqrt{\frac{10}{t}} \cdot \sqrt{\frac{p}{50}} \cdot k, \quad (4)$$

式中 S_{isnr} 为单次信噪比, t 为系统一次采集测量的时间, p 为该次测量采集点数, k 为比例系数。可见对 THz 系统进行数据采集时,一般需要考虑两方面性能指标:系统的采集速度与采集数据量。

3.1 连续扫描结果分析

图 6 为以连续扫描方式采集得到的 THz 时域脉冲信号, (a)、(b)、(c)、(d) 分别为系统在 AD 采样速率为 100 kHz, 扫描速度为 300、500、1000、1500 $\mu\text{m/s}$ 情况下的得到的 THz 时域脉冲波形。

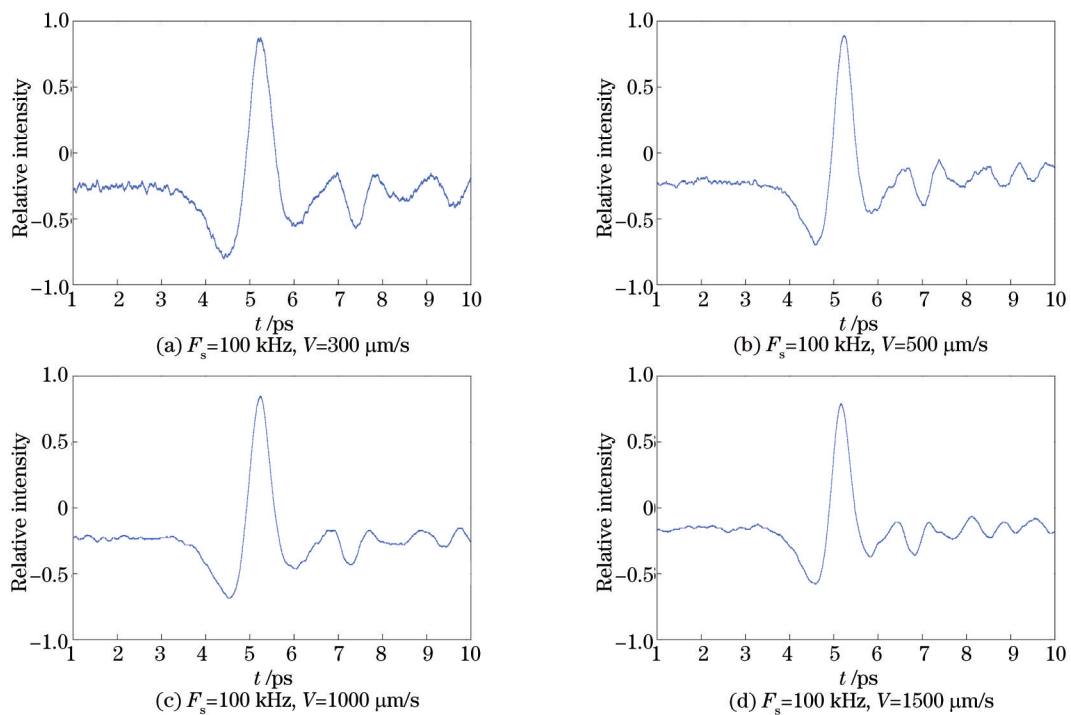


图 6 不同扫描速度采集的信号

Fig.6 Acquisition signals with different scanning speeds

相同采样速率下,扫描速度越低,扫描相同位移时采集时间越长,采集到的数据量越大,包含波形细节越多,采集系统的性能越好,在后期的数据处理上也会更加准确。以上实验结果表明系统能够在快速连续扫描时采集到正确的 THz 时域波形数据。

3.2 步进扫描结果分析

设定系统采样速率为 100 kHz,扫描步长为 5.00 μm ,每步采集 1000 个数据,扫描位移为 1000 μm 进行数据采集,得到以步进方式采集的 THz 时域脉冲波形,如图 7 所示。

图 7(a) 表示步进扫描获得的整个时域波形, (b)、(c)、(d) 分别为采集数据中的部分数据量波形,图 7(a) 表明采集总数据量为 200000 个,图 7(d) 表明单步数据采集量为 1000,与设定相符。由于单步连续采集 1000 个

数据点,后期可用平均等数据处理方式处理来降低前端噪声,提高单步采集准确性。以上实验结果表明该系统能够以自动步进扫描的方式对太赫兹时域脉冲信号进行数据采集。

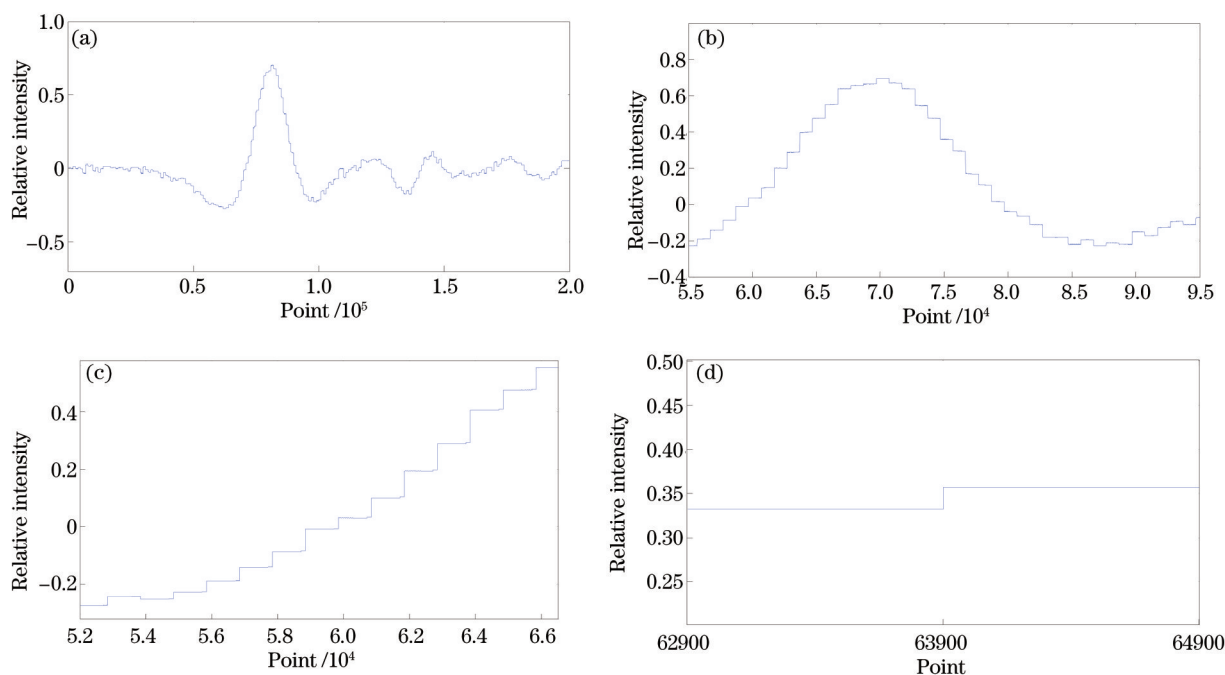


图8 步进扫描采集信号。(a)完整波形图;(b)局部波形放大图1;(c)局部波形放大图2;(d)局部波形放大图3

Fig.8 Acquisition signals with step scanning. (a) Full waveform; (b)enlarged waveform 1; (c) enlarged waveform 2; (d) enlarged waveform 3

4 结 论

为实现 THz 时域脉冲信号的快速自动化采集,设计一种基于闭环控制的快速自动扫描 THz-TDS 数据采集系统,利用系统中的高速 AD 采集与 Flash 存储,可短时间内等间隔采集大量数据;通过光学延迟线输出信号反馈来控制步进扫描,大大降低单步采集的时间,能够快速自动化步进扫描,单步采集时通过连续采集多个数据点,可提高单步采集的准确性,从而提高 THz-TDS 系统的信噪比。结果表明,设计的系统能够快速采集到 THz 时域脉冲波形,可应用于 THz-TDS 系统的仪器化。

参 考 文 献

- 1 Xi-Cheng Zhang, Jingzhou Xu. Introduction to THz Wave Photonics [M]. Berlin: Springer, 2010.
- 2 Vincent P Wallace, Anthony J Fitzgerald, Emma Pickwell, *et al.*. Terahertz pulsed spectroscopy of human basal cell carcinoma [J]. Appl Spectrosc, 2006, 60(10): 1127-1133.
- 3 Ashworth P C, Pickwell-MacPherson E, Provenzano E, *et al.*. Terahertz pulsed spectroscopy of freshly excised human breast cancer [J]. Opt Express, 2009, 17(15): 1244-1254.
- 4 He Mingxia, Che Tao. Application of terahertz science and technology in biology and medicine research [J]. J Electronic Measurement and Instrument, 2012, 26(6): 471-483.
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.
- 5 M C Kemp, P F Taday, B E Cole, *et al.*. Security applications of terahertz technology [C]. SPIE, 2003, 5070: 44-52.
- 6 Yang Zhengang, Zhao Huaqiang, Liu Jinsong, *et al.*. Nondestructive inspection with terahertz waves [J]. Physics, 2013, 42(10): 708-711.
杨振刚, 赵华强, 刘劲松, 等. 太赫兹无损检测的研究[J]. 物理, 2013, 42(10): 708-711.
- 7 Zhang Xin, Zhao Yuanmeng, Deng Chao, *et al.*. Study on the passive terahertz image target detection [J]. Acta Optica Sinica, 2013, 33(2): 0211002.
张 馨, 赵源萌, 邓 朝, 等. 被动式太赫兹图像目标检测研究[J]. 光学学报, 2013, 33(2): 0211002.
- 8 M V Exter, C Fattinger, D Grischkowsky. Terahertz time domain spectroscopy of water vapor[J]. Opt Lett, 1989, 14(20):

1128–1130.

- 9 Zheng Xianhua, Wang Xinke, Sun Wenfeng, *et al.*. Developments and applications of the terahertz digital holography [J]. *Chinese J Lasers*, 2014, 41(2): 0209003.
郑显华, 王新柯, 孙文峰, 等. 太赫兹数字全息术的研发与应用[J]. *中国激光*, 2014, 41(2): 0209003.
- 10 Jiang Linkun, Wu Liang, Yao Jianquan. Research progress of ferromagnetic materials in terahertz wave band [J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2013, 50(8): 080022.
蒋霖坤, 吴亮, 姚建铨. 铁磁材料在太赫兹波段的研究进展[J]. *激光与光电子学进展*, 2013, 50(8): 080022.
- 11 Wang Ruijun, Wang Hongqiang, Zhuang Zhaowen, *et al.*. Research progress of terahertz radar technology [J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2013, 50(4): 040001.
王瑞君, 王宏强, 庄钊文, 等. 太赫兹雷达技术研究进展[J]. *激光与光电子学进展*, 2013, 50(4): 040001.
- 12 N Vieweg, F Rettich, A Deninger, *et al.*. Terahertz–time domain spectrometer with 90 dB peak dynamic range [J]. *J Infrared, Millimeter, and Terahertz Waves*, 2014, 35(10): 823–832.
- 13 Zhao Ziran, Wang Yingxin. Development of a portable terahertz time–domain spectrometer [J]. *J Terahertz Science and Electronic Information Technology*, 2013, 11(1): 57–61.
赵自然, 王迎新. 便携式太赫兹时域光谱仪的研制[J]. *太赫兹科学与电子信息学报*, 2013, 11(1): 57–61.
- 14 Wang Wenxia. Instrumentation of FPcA–I Terahertz [D]. Tianjin: Tianjin University, 2011.
王文霞. FPcA–I型太赫兹时域光谱系统仪器化研究[D]. 天津: 天津大学, 2011.
- 15 Li Meng. Study on Quality Factors and Improvement for Terahertz Time–Domain Spectroscopy [D]. Tianjin: Tianjin University, 2011.
李萌. 太赫兹时域光谱品质影响因素及改进研究[D]. 天津: 天津大学, 2011.
- 16 Zheng Zheng. Study on Rapid Detection Technology of THz–TDS Based on the Electro–Optic Sampling [D]. Tianjin: Tianjin University, 2009.
郑峥. 基于电光采样的THz–TDS中快速探测技术研究[D]. 天津: 天津大学, 2009.
- 17 Li Meng, He Mingxia, Tian Zhen. Studies on signal to noise standardization for THz time–domain spectroscopy [J]. *Spectroscopy and Spectral Analysis*, 2013, 32(3): 606–609.
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*, 2013, 32(3): 606–609.

栏目编辑: 何卓铭