

文章编号: 1001-3806(2017)03-0342-04

实时飞秒激光单次测量研究

赵研英, 耿易星, 李荣凤

(北京大学核物理与核技术国家重点实验室, 北京 100871)

摘要: 为了能够对强场飞秒激光进行单发实时准确的测量, 采用 LabVIEW 对单次自相关仪测量的数据进行实时分析处理, 设计了实时在线测量飞秒激光脉冲的测量系统。在数据分析时, 通过对图像处理区域的限制以及对图像数据积分极大地降低了信号的噪声, 提高了测量的准确性。利用自标定方法在线标定自相关仪, 实时获得激光脉冲宽度信息; 结合小尺寸像素 CCD, 获得单像素 3.6fs 的精度; 并利用自主搭建的设备, 成功在线实时测量了中心波长 800nm、脉宽约 50fs 的钛宝石激光脉冲。结果表明, 基于 LabVIEW 的单次相关仪能够实时测量飞秒脉冲, 且测量结果精度高、可靠性好。

关键词: 超快光学; 激光脉宽; 单次自相关仪; 实时测量

中图分类号: O437

文献标志码: A

doi: 10.7510/jgjs.issn.1001-3806.2017.03.008

Study on real-time single-shot measurement of femtosecond laser

ZHAO Yanying, GENG Yixing, LI Rongfeng

(State Key Laboratory of Nuclear Physics and Technology, Peking University, Beijing 100871, China)

Abstract: In order to measure high intensity femtosecond laser with single-shot precisely in real-time, a real-time measurement system was designed via processing data from a single-shot autocorrelator with LabVIEW. The precision is highly improved with signal noise decreased by limiting image processing area and integrating the image data. The autocorrelator was calibrated on-line by means of self-calibration, and pulse duration was obtained in real time. The precision of 3.6fs per pixel was obtained with small-pixel-size CCD. Ti:sapphire laser with pulsewidth of 50fs and center wavelength of 800nm was measured in real-time with our developed device. The results prove that femtosecond pulses can be measured precisely in real-time with a single-shot autocorrelator based on LabVIEW.

Key words: ultrafast optics; pulse duration; single-shot autocorrelator; real-time measurement

引言

啁啾脉冲技术(chirped-pulse amplification, CPA)的出现^[1-2], 极大地提高了激光脉冲的峰值功率。目前激光聚焦功率密度已达到 10^{20} W/cm² 以上^[3], 在激光等离子体物理、激光加速、强场下团簇光物理、超短 X 射线和 γ 射线脉冲等研究领域具有重要的应用^[4-9]。对于飞秒激光脉冲, 脉冲宽度是非常重要的激光参量, 它决定了激光脉冲的时间特性, 由此指导激光脉冲可具体应用在超快领域。除此之外, 通过激光能量和脉宽信息可得知激光峰值功率, 结合激光峰值功率和激光聚焦焦斑可以获得激光的光强, 由此指导激光可应用的强场领域。因此实时、准确、快捷地测量激光脉冲

宽度是非常必要的。

对于强场飞秒激光, 脉冲的重复频率通常为赫兹量级甚至是单发^[10-11], 对于脉宽低于 100fs 的脉冲测量常用单次自相关方法^[12]。该方法的基本思路是通过利用线阵或面阵 CCD 测量激光脉冲的自相关信号, 通过自相关信号的宽度信息除以反卷积因子 D 从而获取激光脉冲宽度信息。传统的单次自相关方法都是通过 CCD 采集到信号以后, 再离线分析数据^[13-14], 这无法实时获取激光的脉冲宽度信息。对于大型强场飞秒激光系统, 考虑到激光系统需要在超净恒温环境中运行, 且激光系统抽运源的有限寿命等因素, 这导致激光运行成本极高。实时获取激光脉冲信息能够让激光系统在优化运行时实时反映激光脉宽状态, 从而及时地提供反馈调整激光脉宽, 这不仅能最大程度地节约激光的优化调整时间, 而且极大地提高激光系统的运行机时, 降低运行成本。针对北京大学正在建设的超小型激光粒子加速器(compact laser plasma accelerator, CLAPA)^[15-16], 其基础是 200TW 的强场钛宝石飞

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(11504009)

作者简介: 赵研英(1982-), 女, 工程师, 现主要从事超快飞秒及应用的研究。

E-mail: zhaoyanying@pku.edu.cn

收稿日期: 2016-07-18; 收到修改稿日期: 2016-08-10

秒激光系统,快速精确地诊断激光脉宽信息可以极大的提高 CLAPA 中激光系统机时,提高激光的使用效率,降低激光使用成本,从而提高 CLAPA 系统的运行效率。

本文中通过单次自相关方法,基于 LabVIEW 实现对 CCD 采集到的信号进行实时处理,在图像处理时通过减小计算区域以及对图像数据积分的方法降低噪声对数据的影响,结合在线自标定,从而实现了**对强场飞秒激光脉冲的实时、准确测量**。

1 测量原理

图 1 是单次自相关仪测量原理图。两束具有一定宽度的激光脉冲在非线性晶体(例如 β 相偏硼酸钡 (BaB_2O_4 , BBO))中产生和频光(second-harmonic generation, SHG)信号,激光脉冲的宽度与产生的和频光信号的空间尺寸相关^[17]:

$$\Delta x = \frac{\tau \times v_g}{\sin\varphi} \tag{1}$$

式中, Δx 为和频光信号的空间宽度, τ 为激光脉冲宽度, v_g 为激光脉冲的群速度, φ 为两束激光脉冲夹角的半角。由(1)式可见,激光脉冲的时间宽度通过和频光信号转换到光束的空间尺寸,通过测量产生的和频光信号空间宽度以及参与和频的两脉冲夹角可以获得激光脉冲宽度信息。实际操作中,产生和频的两个激光脉冲的夹角不易准确测量,而且随着光路调节,夹角会有略微变化,因此通常不是直接测量夹角来得到激光脉冲宽度,而是采用自标定的方法。自标定原理如图 2 所示。在 T_0 时刻,两路激光延时相同,给两路激

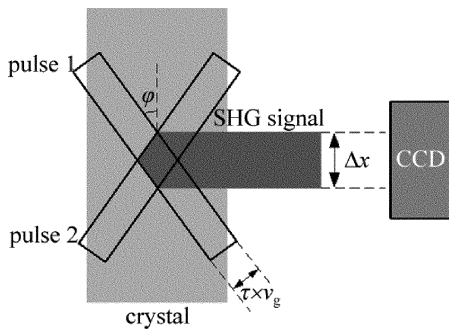


Fig. 1 Principle of single-shot autocorrelator

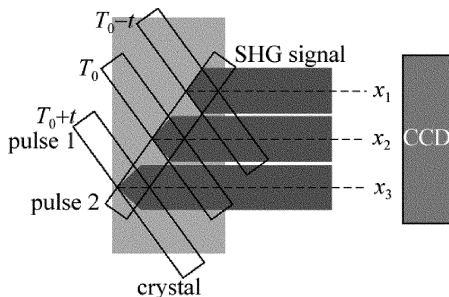


Fig. 2 Principle of self-calibration

光的其中一路激光脉冲 1 提供延时 t 后,两路激光在晶体中重叠的位置将发生变化,因此产生的和频光信号会有位置的偏移,利用偏移量 $(x_2 - x_1)$ 除以延时 t ,获得和频光信号单位偏移量对应的时间尺度 Δt 。

2 实验系统

在干涉仪的基础上设计单次相关仪光路,如图 3 所示。入射飞秒激光经过分束片 (beam splitter, BS) 分成 2 束激光,其中一束激光经过 M_1 和 M_2 反射后入射到 M_6 镜片上,另一束光经过 M_3, M_4, M_5 反射后也入射到 M_6 上, M_1 和 M_2 放置在平移台上,该平移台行程为 10cm,精度为 $1.25\mu\text{m}$,可为光路提供精确延时。两束激光经过 M_6 反射后在晶体 BBO 中产生和频光信号,和频光信号由面阵 CCD (型号 Basler acA1600-60gm) 接收。通过调节 M_5 可以方便地使两路激光在 BBO 晶体中空间重合,调节 M_1 和 M_2 放置的平移台可以使两路激光在 BBO 晶体中时间重合。考虑到色散对飞秒激光的展宽效应,装置中尽可能使用低色散元件:分束片 BS 厚度为 2mm,镜片 $M_1 \sim M_6$ 均为银镜, BBO 厚度为 $50\mu\text{m}$ 。测量的激光源是 CLAPA 系统中的掺钛蓝宝石飞秒激光,中心波长为 800nm,重复频率为 5Hz。

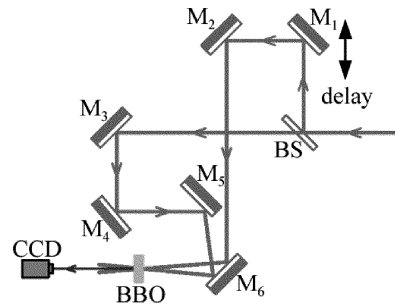


Fig. 3 System of autocorrelator

3 实时测量

基于 LabVIEW,将单次自相关脉冲宽度的测量集成在如图 4 所示的实时测量显示的程序中,具体包括 CCD 图像显示、自标定以及脉冲宽度计算。程序分为 Setup 和 Data 两部分显示界面。其中图 4a 是程序 Setup 界面,主要用于显示利用所搭建的装置进行测量时 CCD 接收到的信号,CCD 采用 Basler 面阵 CCD,每个像素的尺寸是 $4.5\mu\text{m} \times 4.5\mu\text{m}$ 。图 4b 是程序 Data 界面,主要用于图像数据处理、自标定及脉宽计算显示部分。

在 Setup 界面中对 CCD 采集的图像进行显示并对图像计算区域进行选择。在进行脉宽测量时,首先在 Setup 界面中观察采集到的和频光信号,并调节单次自相关仪装置:通过调节装置中的延时使光信号最强,然

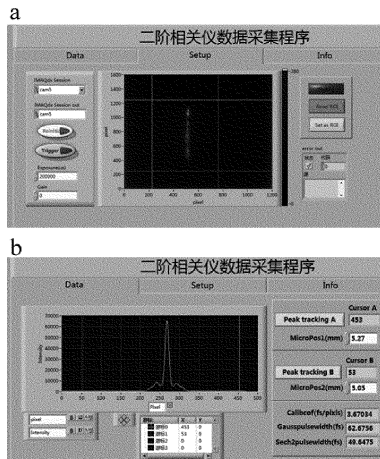


Fig. 4 Real-time measurement program of single-shot autocorrelator

a—setup interface b—data interface

后调节装置中的镜片 M_6 使光信号在 CCD 中间部分,再调整 CCD 的姿态使采集到的光信号呈竖直状态。最终在相关仪 CCD 中采集到的图像如图 4a 所示,和频光信号为竖直的长条形状。

为了减小 CCD 采集信号中噪声的影响,需要将采集到的图像选择进行计算的区域。图 4a 中点击 Reset ROI,拖动图像中的 4 条游标,选定将要计算的区域,游标中间的方形区域便是选定的计算区域,该区域应包含采集到的和频光信号,选择好游标的位置后点击 Set as RIO 确定选择的区域。选定区域后,程序将对选定区域的每一列像素数值进行积分获取自相关曲线,该在 Data 界面中实时显示,如图 4b 所示,其中图中横坐标是选定区域的每一列的坐标值。如该图中进行计算的图像选择了 500 列像素,纵坐标是每一列像素积分的数值。相对于直接选取某一行的像素作为自相关曲线计算,采取对每列像素积分这样的数据处理能够极大程度地减小光斑强度不均匀对测量精确性的影响。

在 Data 界面进行自相关曲线的显示、测量的自标定以及脉宽的计算显示。为了获取脉冲宽度的具体数值,需要利用光路中的延时并结合 Data 界面中自相关曲线的显示对相关仪进行自标定。当移动光路中的平移台为脉冲提供延时,此时图 4a 中 Setup 界面的光信号将左右移动,转换到 Data 界面中,图 4b 中的相关曲线会沿着 x 轴移动。由于此时 Data 界面显示的是 Setup 界面选定区域的图像数据,因此为了能够进行自标定,Setup 界面中选定的区域应该尽可能地包含多列数据。具体标定如下:先移动平移台将相关曲线移动到 Data 显示界面的一端,如图 5a 所示,并在软件中的 MicroPos1 输入此时平移台微分尺的读数 5.27,再反向移动光路中的平移台将相关曲线移动到 Data 显示界面的另一端,如图 5b 所示,并在软件中的 MicroPos1 输

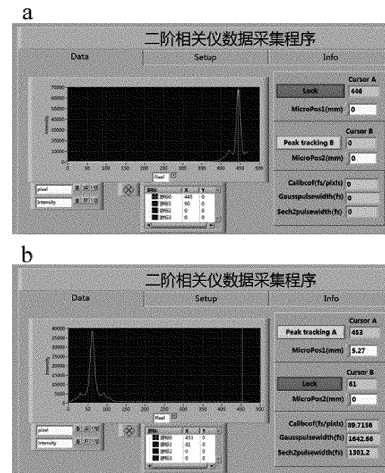


Fig. 5 Self-calibration of single-shot autocorrelator

入此时平移台微分尺的读数 5.05。通过平移台的 2 次读数可以获取时间延迟 t ,程序获取当提供延时 t 时光信号在 CCD 上移动的像素个数 P ,利用 t 除以像素个数 P 获取单个像素对应的时间尺度 Y 。如图 4b 所示,在 Calibcof 中显示的是该次实验中 CCD 一个像素对应的时间尺度 Y ,为 3.67fs。由于作者采用的 CCD 像素尺寸小,因此极大地缩小了每个像素对应的时间尺度,提高了脉冲测量的精度。

在完成自标定后,程序计算出自相关曲线半峰全宽的像素个数 B ,利用 B 乘以每个像素对应的时间尺度 Y 来获得这次测量中自相关信号的宽度。利用自相关信号的宽度除以反卷积因子 D 获得激光脉冲的实际宽度^[18]。图 4b 中 Gausspulsewidth 和 Sech2pulsewidth 分别显示了此次测量中飞秒激光的高斯型和双曲正割型脉冲的脉宽。

4 结论

基于 LabVIEW 程序实现了飞秒激光脉冲单次自相关仪的实时测量,对数据进行实时采集、处理,及时获得激光脉宽信息。利用该自相关仪对强场飞秒激光进行了实时测量,准确、快捷地获得脉冲的宽度信息。飞秒激光脉宽实时、精确、便捷的测量更有利于激光系统的应用和发展,为激光的应用提供了可靠的工具。该自相关仪将用于北京大学激光加速器 CLAPA 中 200TW 激光系统脉宽的测量研究。

参考文献

- [1] STRICKLAND D, MOUROU G. Compression of amplified chirped optical pulses[J]. Optics Communications, 1985, 56(3):219-221.
- [2] MOUROU G, UMSTADER D. Development and applications of compact high-intensity lasers[J]. Physics of Fluids, 1992, B4(7):2315-2325.
- [3] LEDINGHAM K W, MCKENNA P, SINGHAL R P. Applications for nuclear phenomena generated by ultra-intense lasers[J]. Science, 2003, 300(5622):1107-1111.

- [4] ZHANG J. High field physics—a new scientific arenas[J]. *Physics*, 1997, 26(11):643-649 (in Chinese).
- [5] WANG Q Y. Femtosecond laser technology and its relative new subjects[J]. *Journal of Quantum Electronics*, 1994, 11(4):211-218 (in Chinese).
- [6] MOUROU G A. Ultraintense lasers; relativistic nonlinear optics and applications[J]. *Comptes Rendus de l'Académie des Sciences-Series IV-Physics*, 2001, 2(10):1407-1414.
- [7] MORA P. Physics of relativistic laser-plasmas[J]. *Plasma Physics and Controlled Fusion*, 2001, 43(12):A31-A37.
- [8] LI Y T, LIAO G Q, ZHAO G, *et al.* Progress and prospects of high-energy density physics driven by intense lasers[J]. *Scientia Sinica Physica, Mechanica & Astronomica*, 2013, 43(7):795-809 (in Chinese).
- [9] STEINKE S, van TILBORG J, BENEDETTI C, *et al.* Multistage coupling of independent laser-plasma accelerators [J]. *Nature*, 2016, 530(7589):190-193.
- [10] WANG Z, LIU C, SHEN Z, *et al.* A high contrast 1.16 PW Ti:sapphire laser system combined with DCPA scheme and femtosecond optical-parametric amplifier [J]. *Optical Letters*, 2011, 36(16):3194-3196.
- [11] SUNG J H, LEE S K, YU T J, *et al.* 0.1 Hz 1.0PW Ti:sapphire laser[J]. *Optics Letters*, 2010, 35(18):3021-3023.
- [12] CHUNG J H, WEINER A M. Ambiguity of ultrashort pulse shapes retrieved from the intensity autocorrelation and the power spectrum [J]. *IEEE Journal on Selected Topics in Quantum Electronics*, 2001, 7(4):656-666.
- [13] YU H. Study on measurement of femtosecond laser pulse width [J]. *Laser Technology*, 2013, 37(5):679-681 (in Chinese).
- [14] WANG X T, YIN D J, SHU A B, *et al.* Measure ultrashort pulse-width with total reflection[J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2004, 31(8):1018-1020 (in Chinese).
- [15] SHANG Y, ZHU K, LIN Ch, *et al.* Progress of compact laser plasma accelerator in Peking University [J]. *Scientia Sinica Physica, Mechanica & Astronomica*, 2013, 43(10):1282-1287 (in Chinese).
- [16] YAN X Q, LIN C, LU H Y, *et al.* Recent progress of laser driven particle acceleration at Peking University [J]. *Review Article Frontiers of Physics*, 2013, 8(5):577-584.
- [17] ZHANG Z G. *Femtolaser technology* [M]. Beijing: Science Press, 2011:213-214 (in Chinese).
- [18] SHAPIRO S L. *Ultrashort light pulses* [M]. 2nd ed. New York, USA: Springer-Verlag, 1984:85-88.