

文章编号: 2095-4980(2025)05-0489-06

太赫兹自由电子激光与飞秒激光高精度同步验证

李兰斌^{a,b}, 朱刚贝^c, 金晓^a, 杨兴繁^a, 黎明^a, 吴岱^a, 李鹏^a, 王伟俊^a, 马帅^a, 周奎^a

(中国工程物理研究院 a.应用电子学研究所; b.研究生院; c.流体物理研究所, 四川 绵阳 621999)

摘要: 为在太赫兹自由电子激光装置上开展诸如太赫兹-激光泵浦探针等超快应用实验, 需要太赫兹脉冲与激光脉冲具有飞秒级的高精度同步, 本文介绍了一种基于光电探测及压电陶瓷快反馈的技术方法。使用 N-苄基-2-甲基-4-硝基苯胺(BNA)有机晶体产生太赫兹脉冲, 并使用电控位移台模拟自由电子激光脉冲的随机抖动, 由压电快反馈补偿系统快速调节激光光程, 减小抖动范围, 实现激光脉冲对太赫兹脉冲的高精度实时跟随。

关键词: 太赫兹自由电子激光; 超快应用; 压电; 高精度同步

中图分类号: O434.3

文献标志码: A

DOI: 10.11805/TKYDA2024049

Technical verification of high precision synchronization between THz-FEL and fs-laser

LI Lanbin^{a,b}, ZHU Gangbei^c, JIN Xiao^a, YANG Xingfan^a, LI Ming^a, WU Dai^a, LI Peng^a,
WANG Weijun^a, MA Shuai^a, ZHOU Kui^a

(a.Institute of Applied Electronics; b.Graduate School; c.Institute of Fluid Physics, China Academy of Engineering Physics, Mianyang Sichuan 621999, China)

Abstract: To conduct ultrafast application experiments such as terahertz-laser pump-probe experiments on the Terahertz Free Electron Laser Facility(THz-FEL), it is necessary to achieve high-precision synchronization at the femtosecond level between terahertz pulses and laser pulses. A technical method is proposed based on photoelectric detection and fast feedback from piezoelectric ceramics. Terahertz pulses are generated using the organic crystal N-Benzyl-2-methyl-4-nitroaniline(BNA), and the random jitter of the free electron laser pulses is simulated using an electrically controlled displacement stage. The piezoelectric fast feedback compensation system rapidly adjusts the optical path of the laser to reduce the jitter range, achieving high-precision real-time following of the terahertz pulses by the laser pulses.

Keywords: Terahertz Free Electron Laser(THz-FEL); ultrafast application; piezo; high precision synchronization

太赫兹波一般指频率范围在 0.1~10 THz 的电磁波。由于太赫兹光子能量与分子的拉伸、弯曲、振动的跃迁能级相对应^[1], 太赫兹泵浦-探针技术可用于研究大分子的振动及它们之间的弱相互作用, 但这需要获得 2 个脉冲之间的高精度同步。基于超导加速器的中国工程物理研究院太赫兹自由电子激光装置具有高重频、高峰值功率等特点^[2], 适合开展诸如太赫兹泵浦-探针、太赫兹选单、时间分辨光谱学等实验^[3-5]。种子激光脉冲在光阴极产生电子束后, 经过加速段、摇摆器及光腔耦合输出太赫兹脉冲, 由于加速场波动和光腔型太赫兹自由电子激

收稿日期: 2024-01-19; 修回日期: 2024-03-28

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(62205319; 11975218; 12035012; U2030113)

*通信作者: 周奎 email:zhoukui@163.com

引用格式: 李兰斌,朱刚贝,金晓,等. 太赫兹自由电子激光与飞秒激光高精度同步验证[J]. 太赫兹科学与电子信息学报, 2025,23(5):489-494. DOI:10.11805/TKYDA2024049.

Citation format: LI Lanbin,ZHU Gangbei,JIN Xiao,et al. Technical verification of high precision synchronization between THz-FEL and fs-laser[J]. Journal of Terahertz Science and Electronic Information Technology, 2025,23(5):489-494. DOI:10.11805/TKYDA2024049.

光脉冲起振时间的不确定性, 太赫兹脉冲到达时间会出现随机抖动^[6], 限制了相关应用在装置上的开展。因此, 提升装置利用效率及应用范围的关键是获得高稳定性的太赫兹脉冲。太赫兹脉冲为不可见光, 其频段特性决定了常规用于射频信号、光信号的同步技术手段无法适用。目前, 多数太赫兹自由电子激光装置的同步系统仍停留在实现加速器装置系统前端射频、激光系统的同步, 并未对传输至用户端的太赫兹束流做更多的操控以减小到达时间抖动, 太赫兹自由电子激光脉冲与外源激光间的时间抖动大都为皮秒级。德国 ELBE 装置采用了一种基于电光探测及数据时间重构的数据后处理方式获得所需的时间精确度, 但也未在根本上实现太赫兹脉冲与外源束流的高精确度同步^[7-8]。

本文提出了一个基于电光探测及压电陶瓷快反馈补偿系统的太赫兹-激光脉冲高精度同步技术方案, 通过压电反馈模块直接调控飞秒激光光程使其跟随以减小太赫兹脉冲的随机抖动范围。完成了实验平台搭建并进行了可行性验证, 在验证实验中成功缩小了束流到达时间抖动的范围。

1 太赫兹-激光同步技术原理

1.1 太赫兹电光探测

实验中使用的电光采样技术(Electro-Optic Sampling, EOS)^[9-10], 是一种利用线性电光效应进行光学采样的光电技术。利用外加电场影响材料折射率, 线偏振光脉冲偏振态在通过材料时被调制, 原本光束在电光晶体内的传播方向被改变, 通过偏振分光器实现探测, 调制深度受外加电场强度及材料普克尔斯系数大小的影响。对于垂直入射厚度为 d 的 $\langle 110 \rangle$ 晶向 ZnTe 晶体的线偏振激光和太赫兹辐射, 线偏光在其主轴方向上产生的相位延迟 Γ 为^[11]:

$$\Gamma(\alpha) = \frac{\omega d}{2c} r_{41} E_{\text{THz}} n_0^3 \sqrt{1 + 3 \cos^2 \alpha} \quad (1)$$

式中: r_{41} 为 ZnTe 晶体电光张量的非零项($r_{41} \approx 4 \text{ pm/V}$); α 为太赫兹电场偏振方向与晶体 $\langle -110 \rangle$ 轴夹角; E_{THz} 为太赫兹电场场强。探测端采用平衡探测的电光采样方法^[12-13], 探测光路使用 1/4 波片(Quarter-Wave Plate, QWP)和沃拉斯通棱镜(Wollaston Prism, WP)的偏振分光组合, 1/4 波片晶轴与光脉冲偏振方向夹角设置为 45° 。当存在太赫兹脉冲与探测光脉冲同时通过晶体时, 探测光脉冲偏振态被调制, 通过平衡探测器输出 2 个互相垂直偏振态间的差分信号:

$$\Delta I = I_{x'} - I_{y'} = |E_{x'}|^2 - |E_{y'}|^2 \propto K_1 E_{\text{THz}} \quad (2)$$

式中 K_1 为与太赫兹电场强度 E_{THz} 无关的其他参数(d 、 α 、 n_0 等)。被调制产生的差分信号正比于太赫兹电场强度。

图 1 为 BNA 晶体产生的太赫兹脉冲电场图, 使用波长 800 nm, 重频 100 Hz 的飞秒激光, 通过光整流效应激发 BNA 晶体产生太赫兹波, 2 mm 厚 ZnTe 晶体电光平衡方法探测得到太赫兹电场幅相信息。

1.2 太赫兹激光同步方法

对于太赫兹自由电子激光装置, 获得太赫兹脉冲与飞秒激光的精确同步会极大地拓展装置的应用范围, 是利用泵浦-探针等技术手段进行超快动力学等应用研究的前提。但太赫兹脉冲与外源飞秒激光的精确同步: 一方面受制于太赫兹脉冲为不可见光, 且其频率远小于通常的光波频率, 因而用于精确同步 2 列光波脉冲的平衡光学互相关法(Balanced Optical Cross-correlator, BOC)^[14] 等无法应用于太赫兹波与飞秒激光的精确同步; 另一方面对于加速器装置, 虽然加速器同步系统对各子系统都进行了精确同步, 但由于抖动累积, 会导致实验站末端的太赫兹脉冲的同步精确度下降, 无法满足同步精确度要求, 需要在实验站末端对太赫兹脉冲进行二次精确同步。压电陶瓷快反馈模块中激光光路如图 2(a) 所示, 水平偏振的飞秒激光依次通过偏振分光棱镜(Polarizing Beam Splitter, PBS)和 1/4 波片, 其偏振态由线偏振(水平)转换为圆偏振; 随后以垂直方向入射到固定于压电陶瓷一端的反射镜表面。反射光沿原光路返回, 第二次通过 1/4 波片后, 偏振态由圆偏振恢复为线偏振且方向变为垂直, 最终以 S 偏振态被 PBS 反射面高效反射。通过向压电陶瓷施加快电压调控(如图 2(b) 所示), 利用其伸缩位移改变飞秒激光在自由空间中的传播路径长度, 从而精确调整光程, 实现飞秒激光脉冲对太赫兹脉冲在时域的实时跟随, 提高与太赫兹脉冲的同步精确度。

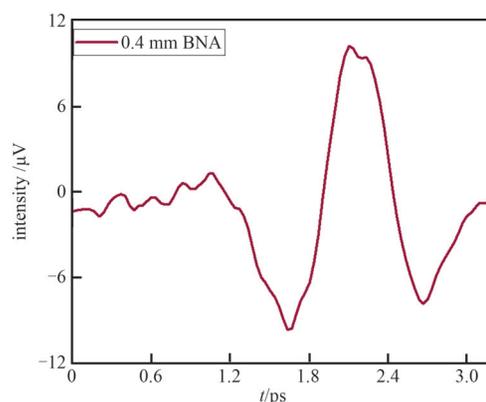


Fig.1 Terahertz pulse electric field generated by BNA crystals
图 1 BNA 晶体产生的太赫兹脉冲电场

实验中采用总行程为 38 μm 的压电陶瓷与最小位移精确度为 0.312 5 μm、总行程为 10 cm 的位移台，可同时满足大范围及高精度的光程变化需求。对于具有如图 1 所示电场分布类型且具有固定时域周期分布的稳定太赫兹脉冲，诸如太赫兹自由电子激光脉冲(THz-FEL)、脉冲激光激发产生的太赫兹脉冲等，其信号幅值仅在较小范围内波动。太赫兹脉冲测量及同步过程如下：在实验中选择太赫兹时域信号峰主瓣过零点为同步目标点 t_0 ，先扫谱得到太赫兹信号时域波形，将其主瓣上升沿(或下降沿)信号强度 y_i 及与位移台坐标相对应时间 t_i 转化得到一组 $y-t$ 曲线；移动位移台至目标零点附近，再由探测器实时测量得到的信号强度值计算得到太赫兹脉冲与激光脉冲

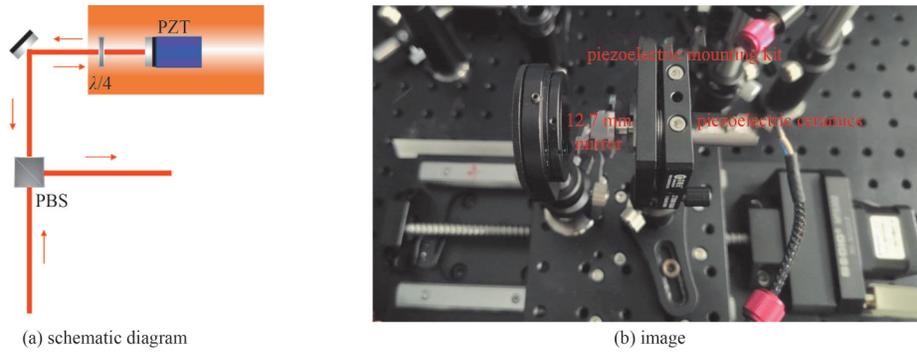


Fig.2 Piezoelectric ceramic fast feedback system
图2 压电陶瓷快反馈系统

在时域上的实时偏离并校正。

在反馈计算中，由于太赫兹自由电子激光束流的高重频特性，虽然可以做到逐束团测量，但由于压电陶瓷响应频率的限制无法实现逐束团调节，同时为避免单个偶然较大偏离造成压电补偿方向偏离导致的系统振荡，以及为了提升计算效率，采用了如图 3 所示的移动平均法的方式计算同步抖动均方根值 t_{rms} 和压电调节方向 Δt 。通过一段采样时间窗内采集的数据样本估算数据整体趋势，移动平均所用时间窗宽度为 T ，时间窗内有效测量值个数为 N 。抖动均方根值 t_{rms} 如式(3)所示。

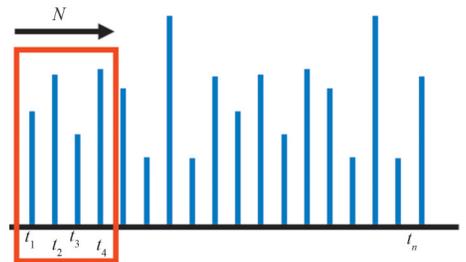


Fig.3 Diagram of moving average algorithm
图3 移动平均算法示意图

$$t_{rms} = \sqrt{\frac{\sum (t_i - t_0)^2}{N}} \quad (3)$$

对应的压电调节方向如式(4)所示，两者计算的时间窗不一致：

$$\Delta t = \frac{\sum (t_i - t_0)}{N} \quad (4)$$

2 实验相关参数设置

实验光路图如图 4 所示，使用透反比 $T:R=3:7$ 的分光平片将一束波长为 800 nm，能量为 2 mJ，重频为 100 Hz 的飞秒激光分为 2 路，2 个位移台(delay line I & delay line II)均在激光束 1 中(laser line I)，用于实现随机抖模拟及粗反馈跟随；激光束 2 (laser line II)中使用 BNA 有机晶体产生太赫兹脉冲模拟太赫兹自由电子激光；激光束 3(laser line III)为剩余激光，在完成同步后可用于与太赫兹脉冲的泵浦-探针实验。探测端使用 ZnTe 晶体用于探测，平衡探测器(Balanced Photodetector, PDB)用于输出太赫兹脉冲探测信号。

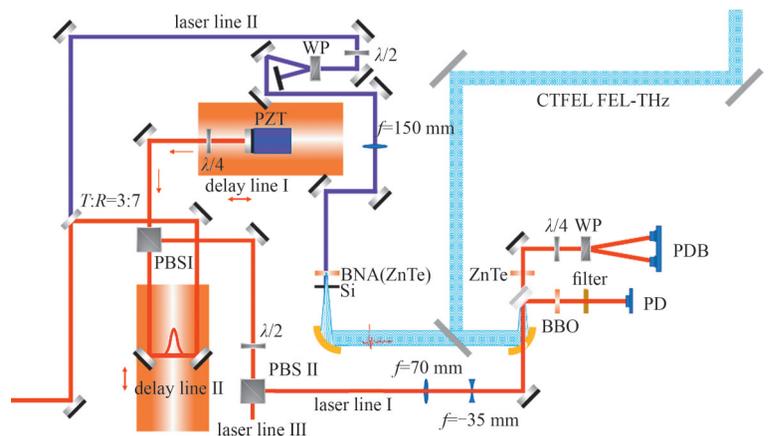


Fig.4 Experimental setup including pulse characterization
图4 实验光路示意图

实验中使用位移台 2(Delay Line II)产生一个服从正态分布的随机抖动模拟 THz-FEL 的随机抖动。位移台抖动范围即表示时域抖动范围，最大抖动范围对应的抖动时间和其中一组抖动分布如图 5 所示，产生抖动时位移台细分数设置为 4。共测试了抖动范围[50 μm,250 μm]，对应时域抖动范围[±167 fs, ±833 fs]，足够覆盖自由电子激光装置束流到达时间抖动范围。

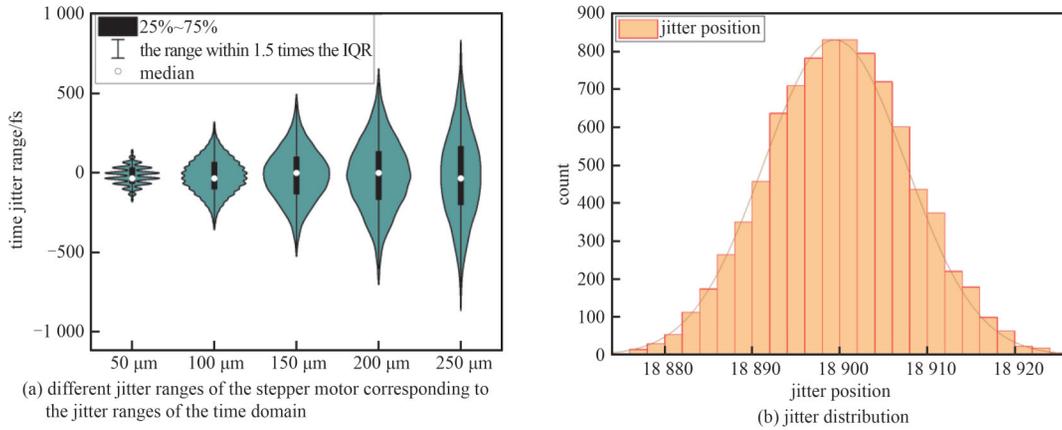


Fig.5 Maximum jitter range and its corresponding jitter time, along with a representative set of jitter distribution data
图 5 最大抖动范围对应的抖动时间和其中一组抖动分布

测试中，随着抖动范围的增大，信号信噪比逐渐降低，信号逐渐失真，如图 6 所示。图 6 中给出了不同抖动范围时测到的太赫兹信号电场波形。此时位移台细分数设置为 4，对应最小位移间距为 5 μm，实际光程改变为位移台行程的 2 倍，即光程改变量为 500 μm，对应时域共约为 1.660 ps 的到达时间抖动，位置单向最大偏离为 250 μm。所有抖动均包含一个初始偏置，即抖动中心为 $X_1=X_0+A$ ， X_0 为初始位置， A 为偏置， X_1 为抖动中心。无抖动时信号强度最大值约 11 μV，当抖动范围达到 300 μm，即可测量值下降至小于 3 μV 时，测试波形被噪声淹没，无法得到有效测量值。

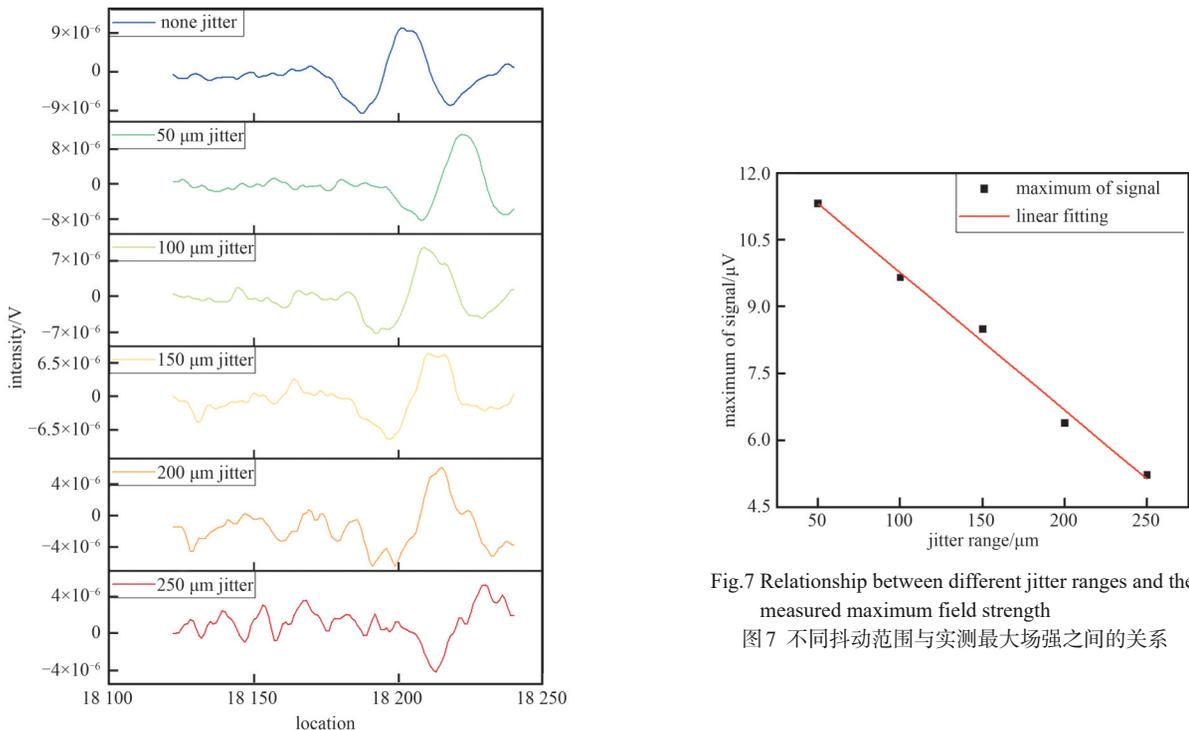


Fig.6 Test results of terahertz signal with different beam arrival time jitters
图 6 不同束流到达时间抖动太赫兹信号测试结果

Fig.7 Relationship between different jitter ranges and the measured maximum field strength
图 7 不同抖动范围与实测最大场强之间的关系

对于同一测量条件，测量到的太赫兹电场场强因测量环境波动影响仅会在小范围内抖动。如图 7 所示，随着

抖动范围的增大，因附加随机造成测到的电场幅值下降，太赫兹电场测量到的最大值与抖动范围近似成反比关系。实验中，通过增大太赫兹脉冲场强，在太赫兹脉冲场强增大至 $20 \mu\text{V}$ 时，抖动范围达到 $300 \mu\text{m}$ 时，仍可测试到太赫兹电场波形。

图 8 给出了不同抖动范围时，通过压电快反馈模块校正的结果，横坐标表示压电模块运动计数，纵坐标表示时间抖动均方根值。图 8(a) 中无抖动时的跟随结果反映了环境对系统的影响，其中在计数 200 附近的异常增大是由于此时开启了附加抖动。抖动范围 $< 50 \mu\text{m}$ ，可观察到系统仍能快速振荡收敛，并将时间抖动范围降低至稳定区间；图 8(c) 中，最大抖动 $100 \mu\text{m}$ 的跟随结果在计数 900 附近出现异常增大，这是由于此时人为停止了抖动。由于所有抖动信号均包含固定偏置量 A ，导致抖动停止后，相对同步目标零点会产生与偏差 A 相对应的时域偏移。尽管如此，系统仍能在数次振荡后回归跟踪目标位置，并将时间抖动的均方根值有效降低至稳定区间；图 8 中其余到达时间抖动均方根值的尖峰均是由于单次较大偏离导致的均方根值异常增大，此类异常增大现象可被系统有效校正。由于软件定义的随机抖动为有偏随机抖动，会使另一位移台存在引入人为初始偏移，改变数据采集时起始位置，无法完全抵消初始偏置影响，导致规律性偏移。

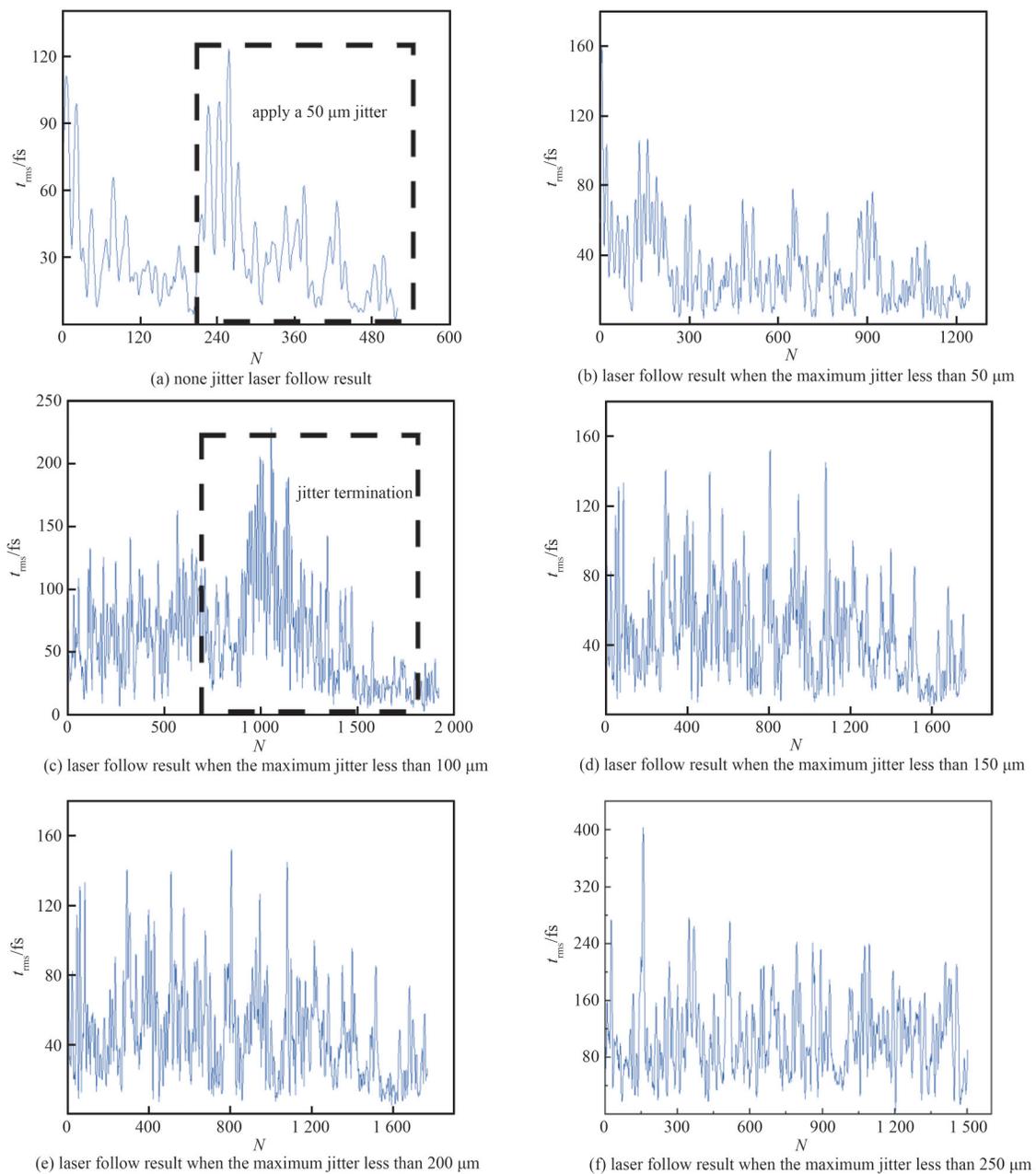


Fig.8 Correction results via the piezoelectric fast feedback module under different jitter ranges

图 8 不同抖动范围时,通过压电快反馈模块校正的结果

3 结论

本文提出了一种基于电光探测及压电陶瓷快反馈补偿系统的太赫兹-激光脉冲高精度同步技术方案,并利用激光器进行了验证工作。通过压电快反馈模块快速调控飞秒激光光程,使其对太赫兹脉冲的跟随,实现了缩小束流时间抖动范围的目标,在最大时间抖动 833 fs 时仍表现出一定的太赫兹-激光脉冲同步能力。实验结果也反映出对于拥有相似太赫兹峰值电场强度,当束流到达时间抖动小于 277 fs(rms)时,其太赫兹电场幅相信息可通过本系统测量,并通过压电快反馈系统缩小到达时间抖动范围至百飞秒量级。因此,本系统也展现了可应用于太赫兹自由电子激光装置后端的二次精确同步的能力,为利用太赫兹装置开展诸如泵浦-探针等超快实验提供了一种途径,有助于提高装置应用范围。

目前,数据采集速率受限于激光脉冲重复频率,激光器放大级输出脉冲重复频率最高为 100 Hz,与 THz-FEL 的 54 MHz 微脉冲重复频率相差甚远,同时由于 THz-FEL 运行在 10 Hz 的宏脉冲模式,同时为放大探测到的小信号,还需使用斩波器调制,导致数据有效采集频率仅为 5 Hz,影响了反馈校正的速率。同时,反馈计算最合适的时间窗口宽度也需要不断测量完善,以期最终在系统振荡时间及准确性方面取得更好平衡。

参考文献:

- [1] FERGUSON B,ZHANG Xicheng. Materials for terahertz science and technology[J]. *Nature Materials*, 2002,1(1):26-33. DOI:10.1038/nmat708.
- [2] ZHOU Kui,LI Peng,ZHOU Zheng,et al. Status and upgrade plan of CAEP THz-FEL facility[J]. *High Power Laser and Particle Beams*, 2022,34(10):104013. DOI:10.11884/HPLPB202234.220091.
- [3] NOVELLI F,HOBERG C,ADAMS E M,et al. Terahertz pump-probe of liquid water at 12.3 THz[J]. *Physical Chemistry Chemical Physics*, 2022,24(2):653-665. DOI:10.1039/D1CP03207K.
- [4] SCHMIDT J,WINNERL S,SEIDEL W,et al. Single-pulse picking at kHz repetition rates using a Ge plasma switch at the free-electron laser FELBE[J]. *Review of Scientific Instruments*, 2015,86(6):063103. DOI:10.1063/1.4921864.
- [5] 赵苏宇,吴岱. 基于等离子体镜的太赫兹单脉冲选择方法[J]. *太赫兹科学与电子信息学报*, 2020,18(6):957-961. (ZHAO Suyu,WU Dai. Theoretical analysis and experimental design of terahertz single-pulse picking based on plasma mirror[J]. *Journal of Terahertz Science and Electronic Information Technology*, 2020,18(6):957-961.) DOI:10.11805/TKYDA2019359.
- [6] JURANIĆ P N,STEPANOV A,PEIER P,et al. A scheme for a shot-to-shot,femtosecond-resolved pulse length and arrival time measurement of free electron laser x-ray pulses that overcomes the time jitter problem between the FEL and the laser[J]. *Journal of Instrumentation*, 2014,9(3):P03006. DOI:10.1088/1748-0221/9/03/P03006.
- [7] CHEN M,KOVALEV S,AWARI N,et al. Towards femtosecond-level intrinsic laser synchronization at fourth generation light sources[J]. *Optics Letters*, 2018,43(9):2213. DOI:10.1364/OL.43.002213.
- [8] KOVALEV S,GREEN B,GOLZ T,et al. Probing ultra-fast processes with high dynamic range at 4th-generation light sources: arrival time and intensity binning at unprecedented repetition rates[J]. *Structural Dynamics*, 2017,4(2):024301. DOI:10.1063/1.4978042.
- [9] VALDMANIS J A,MOUROU G,GABEL C W. Picosecond electro-optic sampling system[J]. *Applied Physics Letters*, 1982,41(3):211-212. DOI:10.1063/1.93485.
- [10] ANGELOVSKI A,KUHL A,HANSLI M,et al. High bandwidth pickup design for bunch arrival-time monitors for free-electron laser[J]. *Physical Review Special Topics*, 2012,15(11):112803. DOI:10.1103/PhysRevSTAB.15.112803.
- [11] 王伟. 高亮度电子束纵向特性测量的电光方法研究[D]. 北京:清华大学, 2017. (WANG Wei. Electro-optic methods of longitudinal bunch characterizing for high-brightness electron beam[D]. Beijing,China:Tsinghua University, 2017.)
- [12] WU Q,HEWITT T D,ZHANG X C. Two-dimensional electro-optic imaging of THz beams[J]. *Applied Physics Letters*, 1996,69(8):1026-1028. DOI:10.1063/1.116920.
- [13] WANG Xinke,CUI Ye,SUN Wenfeng,et al. Terahertz polarization real-time imaging based on balanced electro-optic detection[J]. *Journal of the Optical Society of America A*, 2010,27(11):2387-2393. DOI:10.1364/JOSAA.27.002387.
- [14] KIM J W,JUNG K Y,KIM C,et al. Progress in ultrafast fiber lasers for ultralow-jitter signal sources[C]// *Proceedings of SPIE the International Society for Optical Engineering*. San Francisco,California,United States:SPIE, 2012:823715. DOI:10.1117/12.907213.