

doi: 10.11823/j.issn.1674-5795.2022.05.06

高精度光学定时探测技术及其应用研究

王童, 李明哲, 于子航, 张祎, 任群, 辛明*

(天津大学电气自动化与信息工程学院, 天津 300072)

摘要: 被动固体锁模激光器的发明拉开了高精度定时探测技术高速发展的序幕, 近三十年来, 多种降低测量本底噪声的定时探测技术应运而生, 不断逼近锁模激光器高频定时抖动测量的极限 (远小于 1 fs), 这些定时探测器的分辨力、鲁棒性、稳定性、功耗等多项指标也有着突破性的进步。本文介绍了目前较为主流的光学定时探测手段, 包括直接检测、BOC技术、AOM探测、光学外差技术等, 分析了各种定时探测器的优势与应用场景, 阐述了高精度定时探测技术在相干脉冲合成、自由电子激光等大型科学装置中发挥的重要作用, 最后对光学定时探测器的发展方向做出展望, 旨在通过综述各种光学定时探测技术, 为推动阿秒科学、定时同步等高精尖领域的发展提供技术参考与借鉴。

关键词: 定时抖动; 定时表征; 锁模激光器; 激光光学

中图分类号: TB96

文献标识码: A

文章编号: 1674-5795(2022)05-0051-10

High precision optical timing detection technology and its application

WANG Tong, LI Mingzhe, YU Zihang, ZHANG Yi, REN Qun, XIN Ming*

(School of Electrical and Information Engineering, Tianjin University, Tianjin 300072, China)

Abstract: The invention of passive solid-state mode-locked lasers has promoted the rapid development of high-precision timing detection technology. In the past three decades, a variety of timing detection techniques have emerged to reduce the measurement noise floor, and keep approaching the high-frequency timing jitter measurement limit of mode-locked lasers (far less than 1 fs), with significant improvements in terms of the resolution, robustness, stability, power consumption and many other aspects. In this paper, different kinds of optical timing detection methods including direct detection, BOC technology, AOM detection, optical heterodyne technology are reviewed. The advantages and application scenarios of various timing detectors are discussed, and the important role of high-precision timing detection technology in large-scale scientific instruments such as coherent pulse synthesis and free electron lasers are introduced. Finally, the development direction of optical timing detectors is prospected. The purpose of this paper is to provide technical reference for promoting the development of high precision and cutting-edge fields such as attosecond science and timing synchronization by summarizing various optical timing detection technologies.

Key words: timing jitter; timing characterization; mode-locked laser; laser optics

0 引言

抖动 (Jitter) 是物理学中的重要参数, 虽然

在各领域的定义有所不同, 但都表示与某个参考标准之间的偏差^[1]。如果参考标准是时刻, 则对应的抖动称为定时抖动 (Timing jitter)。为更好地

收稿日期: 2022-08-29; 修回日期: 2022-09-09

基金项目: 科技部重点研发计划(2021YFC2201902); 科技部重点研发计划(2019YFB2203602); 国家自然科学基金(61975149)

引用格式: 王童, 李明哲, 于子航, 等. 高精度光学定时探测技术及其应用研究 [J]. 计测技术, 2022, 42 (5): 51-60.

Citation: WANG T, LI M Z, YU Z H, et al. High precision optical timing detection technology and its application [J]. Metrology and measurement technology, 2022, 42 (5): 51-60.



理解定时抖动的概念，在此先给出定时 (Timing) 的定义，定时指某事件发生的特定时间点或时间段。电磁波脉冲的定时信息通常借助其时间重心 (Center of Gravity, COG) 来刻画，数学表达式为

$$T_{\text{COG}} = \frac{\int_{-\infty}^{+\infty} t |E(t)|^2 dt}{\int_{-\infty}^{+\infty} |E(t)|^2 dt} \quad (1)$$

式中： T_{COG} 为时间重心； $E(t)$ 为脉冲的电场； t 为脉冲变化的时间。对于标称周期为 T 的电磁脉冲序列， $\{T_n - nT | n=1, 2, \dots\}$ 的均方根误差称为定时抖动，其中 T_n 为第 n 个脉冲的 T_{COG} 。该定义为功率和定时信息之间搭建了桥梁，便于从功率测量中提取定时信息^[2]。

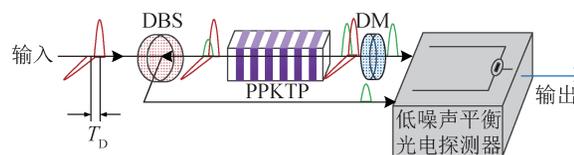
直接检测法是最初测定锁模激光器定时抖动的方法^[3]，光电探测器将激光器输出的光脉冲信号直接转换为射频电压信号，再利用射频信号源分析仪等设备，测量脉冲序列重复频率的任意一个谐波的相位噪声，从而得到原始光脉冲的定时抖动功率谱密度。然而，由于激光器内的定时抖动会随测量环境不断演变，在低频范围的定时抖动功率谱密度无法被精确测量；受到因环境波动、光生载流子、空间电荷运动等效应而产生的幅度-相位 (Amplitude-to-Phase, AM-PM) 噪声影响^[4-5]，直接检测法的定时误差为数十飞秒，远不能满足近些年阿秒光子学等领域对定时误差的需求。因此，基于光电探测器和信号源分析仪的方法无法满足高精度的探测需求。为解决该问题，近二十年来各种高精度的定时探测器应运而生，开发高精度光学定时探测器成为了一个重要的研究课题。本文将回顾近年来出现的高精度光学定时探测手段，分析其工作原理与性能，并介绍这些探测器在高精度控制与同步系统中的应用，最后对未来光学定时探测器的发展方向进行展望。

1 定时抖动的测量

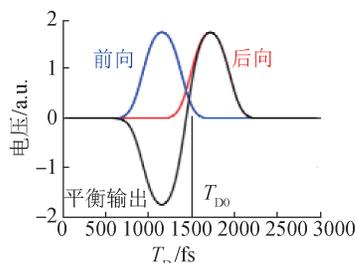
1.1 BOC 技术

为克服直接检测法幅度-相位噪声对定时测量精度的限制，Franz X. Kärtner等人提出了平衡互相关技术 (Balanced Optical Cross Correlator, BOC)^[6-9]，这是一种基于非线性光学中二次和频/倍频效应的定时探测技术，将两脉冲间的延时转换为电压信号，避免了幅度-相位噪声的引入。其工作原理如

图1 (a) 所示，两束偏振正交、中心波长为1550 nm的光脉冲，具有初始相对延时 T_D ，在通过二类准相位匹配、周期性极化的 KTiOPO_4 (PPKTP) 晶体时，受双折射效应影响，两个脉冲在晶体中的传播速度不同，在时域会产生交叠并发生非线性效应，产生新的脉冲，即和频信号。和频信号经二向色镜 (Dichroic Mirror, DM) 透射，被低噪声平衡光电探测器的一个光电二极管检测，该过程称为前向传输。基频脉冲信号经二向色镜反射回 PPKTP 晶体中，在此反向传播的过程中将再次产生一个和频信号，该信号通过一个二向色分束器 (Dichroic Beam Splitter, DBS) 与基频信号分离，被第二个光电二极管检测到，该过程称为后向传输。当初始的延时 T_D 不同时，输入端的两个脉冲信号在 PPKTP 晶体内交叠的时间不同，因此所产生的和频信号的功率也有所不同，最终体现为两个光电二极管检测到的电压不同。低噪声平衡光电探测器将两个光电二极管所检测到的电压做差分，以消除两路传输的共同背景噪声，最终得到如图1 (b) 所示的平衡定时特性曲线，在交叉零点 T_{D0} 附近，BOC探测器将提供最大的灵敏度。文献[10]利用基于 PPKTP 晶体的 BOC，对中心波长为1582 nm的掺铒光纤锁模激光器的定时抖动进行了表征，激光器奈奎斯特频率以下的噪声基底为 $10^{-12} \text{ fs}^2/\text{Hz}$ ，[10 kHz, 38.8 MHz] 范围内积分的定时抖动为70 as。



(a) 单晶体BOC的工作原理
(a) Operating principle of single crystal BOC



(b) 典型的BOC定时表征曲线^[2]
(b) Typical BOC timing characterization curve^[2]

图1 BOC技术的实验装置与定时曲线

Fig.1 Experimental setup and timing curve of BOC method

BOC前置光学元器件消光比不足会导致一些无效偏振分量的产生,这些无效的偏振信号也会在PPKTP晶体中和频,对待测的定时信号产生干扰。针对此问题,Xin对BOC技术进行了改进,提出了偏振噪声抑制的平衡互相关技术(Polarization-Noise-Suppressed Balanced Optical Correlation, PNS-BOC)^[11],通过在BOC系统之前放置一块双折射晶体(如BBO晶体),对偏振误差脉冲引入显著的延迟,避免了误差脉冲在PPKTP晶体中产生和频效应,从而完全消除了偏振噪声。

基于PPKTP晶体的BOC,入射的两个脉冲具有相同的波长。如果将PPKTP晶体替换为其他非线性晶体,比如 β -硼酸钡(BBO)晶体,则可以实现测量不同中心波长脉冲延时的双色BOC。文献[12]完成了Ti:sapphire激光器和铟晶体锁模激光器间的定时同步,由于两台激光器输出脉冲的中心波长不同,它们之间的定时探测使用了双色BOC技术,该过程通过中心波长分别为800 nm和1550 nm的脉冲在BBO晶体内的一类相位匹配和频效应实现。

基于非线性晶体的BOC,其定时灵敏度严重受限于晶体内自由空间聚焦光的低和频转换效率。得益于集成光波导技术的快速发展,集成BOC的解决方案得以实现,集成光波导对于光束的束缚性强,可以在较长的传播距离内将光束限制在较小的横截面中,使光束传播过程中的和频转换效率显著提高。研究人员利用集成BOC,在10 mW的输入功率下,测得集成波导BOC的定时灵敏度高达16.72 mW/fs,相较于相同功率输入的晶体BOC的定时灵敏度提高了近100倍^[13-15]。得益于如此高的灵敏度,[1 Hz, 4 MHz]积分的电子噪声被降到不高于20 as^[15]。

1.2 光学外差技术

作为BOC技术的替代方案,美国科罗拉多大学的T. R. Schibli课题组提出了基于光学外差探测的定时抖动表征技术^[16],并对两台松散同步的锁模激光器反馈带宽以外的相对定时抖动进行了测定。两台锁模激光器输出重复频率相差 Δf_{Rep} 的脉冲信号(Δf_{Rep} 是一个很小的量)。两台激光器输出脉冲的长波尾分量和短波尾分量分别在光电探测器内发生干涉,得到两个射频信号(“拍频1”和

“拍频2”)。将这两个外差拍频信号在一个无源、双平衡式混频器内做正交混频,以消除两台激光器的相对载波-包络偏移频率(Carrier envelope frequency offset, f_{ceo})的影响,最终得到一个高灵敏度的鉴相信号,该鉴相信号只与 Δf_{Rep} 有关。利用此鉴频信号,两个激光器的重复频率可以松散地锁定在一起,环路带宽之外的定时抖动可以采用射频频谱分析仪进行测量。

相较BOC技术,光学外差探测不需要产生二次和频信号,基于一阶线性效应的探测方法不仅降低了系统的整体功耗需求,还能在低输入光功率区间获得更小的噪声基底,该定时探测方案所测得的本底噪声为 $2.8 \times 10^{-13} \text{ fs}^2/\text{Hz}$ (对应530 ys的定时分辨力,其中ys为时间单位,1 ys = 1×10^{-24} s),在[10 kHz, 250 MHz]区间的定时抖动积分仅为16.3 as。

与上述光外差技术类似,韩国高等科学研究院(KAIST)的Jungwon Kim课题组利用包含非对称光纤延迟线的迈克尔逊干涉仪,对一台锁模激光器的定时抖动进行了直接测量^[17]。利用长达数公里的延迟线对锁模激光器输出脉冲进行延迟,再将经过延迟的脉冲与未经延迟的脉冲进行干涉比较,经过光电探测器后得到两个外差拍频信号,将两个信号混频,激光器的 f_{ceo} 即可被消除。利用该方法可有效避免参考激光源的引入。文献[18]在此架构的基础上对锁模振荡器、超连续光谱振荡器等信号源的定时抖动进行了直接表征,最终测得该方案的噪声基底为 $2 \times 10^{-9} \text{ fs}^2/\text{Hz}$ 。该装置同时支持锁相环(PLL)与延迟锁定(DLL)两种模式,当激光器自身具备频率调谐装置(例如PZT)时,可以采用PLL模式,将重复频率误差信号反馈到待测激光器的PZT处;如果激光器自身没有配备PZT,则采用DLL模式,将重复频率误差信号反馈到探测器链路中的光纤拉伸器处,将长光纤链路提供的时间延迟锁定到自由运行的待测激光器上。两种模式均可以在锁定带宽之外测量待测激光器的定时抖动功率谱密度。文献[19]将这种基于非对称延迟线的干涉仪打造成一个复合的测量平台,可用于测量锁模激光器的重复频率噪声、 f_{ceo} 噪声与第 n 个光学频率梳分量的噪声谱。

1.3 AOM 定时技术

天津大学辛明团队提出了一种基于线性光学效应的低功耗定时探测方案^[20]，该方案突破了低输入功率对定时探测精度的限制，在毫瓦量级的输入功率下，探测误差可控制在阿秒级别，且该方案仅需简单的实验装置即可实现高可靠性的定时探测。

图2为基于线性光学效应的定时探测装置原理图。该定时探测器的核心器件是一个声光调制器 (Acousto-Optic Modulator, AOM)，输入的光脉冲序列进入到 AOM 中，在射频 (Radio Frequency,

RF) 信号的驱动下，产生两路衍射光 (0 阶衍射光与 1 阶衍射光)，调节入射光的角度与方向，可使两路衍射光的光功率基本相等。受 AOM 的调制，1 阶衍射光发生了移频。待测定的定时元件置于 1 阶衍射光的路径上，通过该元件后，微小的定时误差会附加到 1 阶衍射光上。本实验中，采用雪崩光电二极管 (Avalanche Photo Diode, APD) 作为光电探测器。两路衍射光耦合进入光电探测器中发生拍频作用，拍频信号依次通过带通滤波器与检波装置 (Zero-bias Schottky Diode, ZSD) 后输出的电压信号，包含所需测量的全部定时信息。

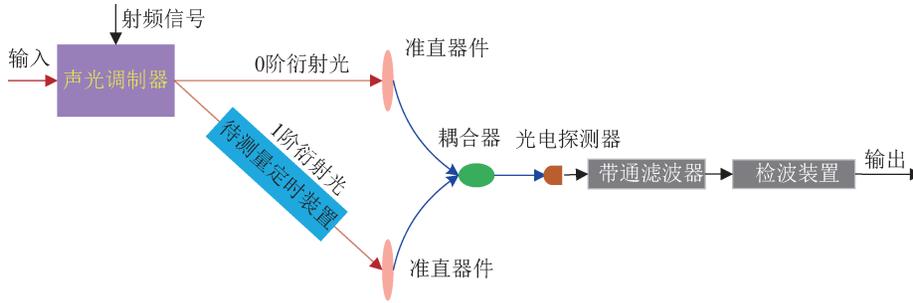


图2 基于 AOM 的定时探测器原理图^[20]

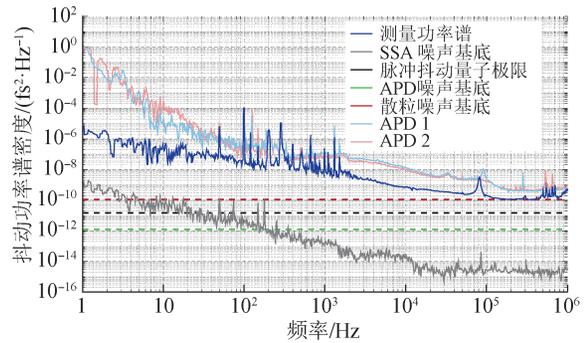
Fig.2 Schematic diagram of the AOM-based timing detector^[20]

经过 ZSD 的检波作用后输出的电压信号 $V_{\text{检波}}$ 满足以下关系

$$V_{\text{检波}}(\Delta t) \propto \left| \sum_{n=-\infty}^{+\infty} A_n B_n^* \right|^\alpha \propto \left| \int_{-\infty}^{+\infty} A(t) A(t - \Delta t)^* dt \right|^\alpha \quad (2)$$

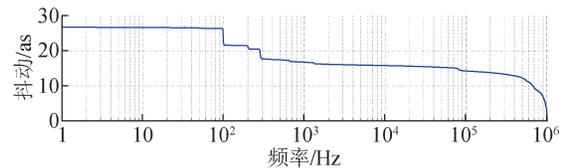
式中： α 为与检波装置的非线性特性有关的参数； A_n 和 B_n 分别为 0 阶衍射光和 1 阶衍射光脉冲序列包络的傅里叶级数；* 为共轭符号； $A(t)$ 为输入光脉冲包络； Δt 为由待测量定时装置引入的定时误差。对于典型的脉冲形状（如高斯、双曲正切等形状），总存在一个 Δt 的时间间隔，满足 $V_{\text{检波}}$ 随 Δt 单调地变化。在此段时间内，待测元件的定时信息可通过式 (2) 计算。

当输入光功率为 2 mW 时，利用信号源分析仪 (Signal Source Analyzer, SSA) 可以测量该定时探测器的噪声基底，根据如图 3 所示的测量结果，基于 AOM 的定时探测器的最小定时抖动基底约为 $1 \times 10^{-10} \text{ fs}^2/\text{Hz}$ ，已逼近散粒噪声极限，比理论计算得出的量子极限仅仅高出约 10 dB。1 Hz~1 MHz 积分后的定时抖动只有 26.57 as，定时测量范围约为 500 fs，相当于 85 dB 的检测动态范围。



(a) 抖动功率谱密度测量结果

(a) Measurement results of jitter power spectral density



(b) 抖动测量结果

(b) Jitter measurement results

图3 AOM 定时探测器的实验测量结果^[20]

Fig.3 Experimental measurement results of AOM-based timing detector^[20]

根据式 (2) 可知，如果 0 阶衍射光和 1 阶衍射光脉冲序列经历了相同的啁啾，则色散相位系

数可以通过乘积 $A_n B_n^*$ 抵消, 因此, 输入脉冲不需要保持很短的脉冲宽度, 只要两个脉冲序列具有相同的啁啾量, 即可获得很高的定时检测灵敏度。

1.4 基于异步光学采样的定时抖动表征

通过借鉴采样示波器而提出的线性光学采样技术, 也可以用来测量定时抖动。文献[21]利用此技术, 实现了自由空间光学的时间与频率双向传输。文献[22]利用相似的原理, 提出了基于异步光学采样的定时抖动表征方法, 该方法能够在时间上线性拉伸超快过程, 使得光脉冲信号中亚飞秒级的周期性抖动能够被高速数据采集卡采集, 再借助可视化的“眼图”来观测脉冲信号在时域的定时抖动。

该方案的基本原理为: 待测信号源与本地参考信号源输出光脉冲的重复频率分别为 f_r 和 $f_r - \Delta f_r$ (Δf_r 是一个很小的量), 当待测信号源无抖动时, 以本地脉冲信号的重复频率对待测光脉冲信号的不同位置进行采样, 并转化为电信号, 每经历 $T = 1/\Delta f_r$ 的采样时间, 本地脉冲可等效地完成对一个完整待测脉冲的全部采样, 此过程需要 $N = f_r/\Delta f_r$ 个本地信号脉冲。该方案可以在时域将飞秒脉冲信号线性拉伸 N 倍, 同时定时抖动也被放大, 转变为缓变易观测的电信号。通过改变时间拉伸比 N , 即可实现亚飞秒至阿秒级别的定时分辨力。利用该方法对中心波长为1550 nm、重复频率为100 MHz的掺铒光纤锁模激光器进行定时抖动表征, $\Delta f_r = 2$ kHz时, 可测得的最小定时抖动为0.35 fs, 进一步减小 Δf_r 至500 Hz, 定时抖动分辨力可降低至43.75 as。

图4给出了晶体BOC、集成BOC, AOM探测器三种定时探测器噪声基底随输入功率的变化曲线, 计算使用的各个参数均为实验中的典型值: 输入脉冲的脉宽为170 fs, 集成波导和自由空间晶体的和频转换效率分别为 $4 \times 10^{-2} \text{ W}^{-1}$ 和 $4 \times 10^{-3} \text{ W}^{-1}$, BOC和AOM采用的平衡光电探测器的噪声等效功率 (Noise Equivalent Power, NEP) 分别为 $7 \text{ pW} \cdot \text{Hz}^{-1/2}$ 和 $2 \text{ pW} \cdot \text{Hz}^{-1/2}$ 。为了便于直观比较, 图4中, 一些文献中报道的定时探测器的实验测量噪声基底及对应的输入功率也通过不同的符号点进行了标记。

以上介绍的几种高精度光学定时探测技术各有优缺点。BOC技术以其超高的定时精度、紧凑

的实验装置成为当前主流的定时测量技术^[23-26], 在高功率场景下工作时, 集成BOC和晶体BOC技术能够达到更低的噪声基底; 且BOC是目前唯一可以实现不同波长脉冲之间定时测量的技术。然而其局限性也相当明显: 由于BOC技术基于非线性光学效应, 它需要较高的输入光功率以补偿较低的非线性转化率。尽管集成BOC技术已经大大降低了定时系统所需的平均功率, 但当输入平均光功率低于1 mW时, 该技术依然很难提供足够的定时分辨力 (如图4所示), 在某些对非线性效应限制较高的应用场景中, BOC方案的表现往往不尽如人意。随着输入功率的降低, 非线性光学效应的衰减速度远远快于线性光学效应, 所以输入功率越低, 基于线性光学效应的AOM探测、光外差探测和光纤延迟线探测相对于BOC定时探测器的优势就越明显, 输入光功率同为1 mW时, AOM的噪声基底比BOC技术的噪声基底低约5个数量级。基于光学外差技术的线性探测器能够在较低输入功率下工作^[16-17], 可以作为BOC技术的替代方案, 但是其实验装置非常复杂。

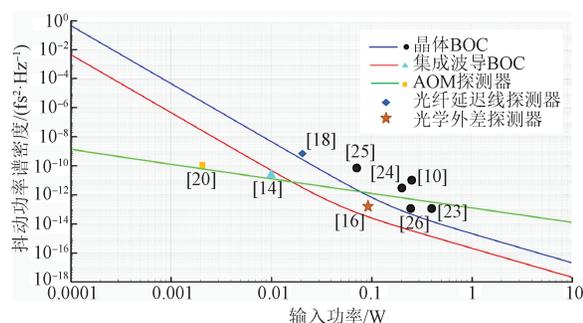


图4 不同输入平均功率水平下定时探测器的噪声基底

Fig.4 Noise floor of timing detectors at different input average power levels

尽管各种光学定时探测技术在特定的实验条件下已经达到了极低的噪声基底, 减少测量过程中引入的技术噪声仍可以进一步提高这些定时探测器的精度。例如, 对于集成BOC技术, 通过设计低损耗的耦合结构、优化光波导尺寸、改善波导加工工艺等手段来提高非线性转化效率将直接提高探测器的灵敏度; 对于AOM定时探测器, 优化装置中准直器的耦合效率, 采用更稳定的电源和射频源, 使用噪声等效功率更低、响应度更高的光电探测器等措施均可以提高定时灵敏度, 从

而获得更高分辨力的探测器。图4中各种光学定时探测器的噪声基底终将受限于散粒噪声决定的量子极限,因此上述对技术噪声的优化将是提高精度的唯一途径。

2 高精度定时探测技术的应用

高精度光学定时探测器是许多前沿应用的关键部件。例如,在很多大科学装置中,需要阿秒级别的定时检测与控制误差以维持整体系统的正常运转,在分布式光纤链路定时同步系统^[27]、远程激光/微波同步^[28-30]和泵浦-探测实验^[31-32]等研究领域同样需要高效且精准的定时探测技术。此外,近年来,高精度定时检测在天文望远镜阵列^[33]、应变传感^[34]、移动光学时钟^[35]、飞行时间检测^[36]、高功率激光脉冲相干合成^[37-38]、波形合成^[39]、孤子表征^[40-41]等诸多领域发挥着至关重要的作用。本节对上文所述的各种高精度光学定时探测器在前沿领域中的典型应用进行介绍。

2.1 X射线自由电子激光装置的同步

高精度光学定时探测技术最具代表性的应用是X射线自由电子激光器(X-ray Free-Electron Laser, XFEL),下一代X射线自由电子激光器的建

设正在全世界如火如荼地展开,包括:我国上海的软X射线自由电子激光装置SXFEL^[42]与硬射线自由电子激光装置SHINE^[43]、意大利的FERMI^[44]、瑞士的SwissFEL^[45]、日本的SACLA^[46]、德国汉堡的European-XFEL^[47]等。这些大型装置用于产生极高能量的阿秒X射线脉冲,使研究人员能够应用亚原子量级的分辨力来拍摄未知的物理、化学、生物反应过程。一个完整的XFEL系统中包括光学主激光器、电子枪、注入激光器、线性加速器、电子束压缩器、参考微波源、种子激光器、探测激光器等子系统,如图5所示。为产生亚飞秒量级的X射线脉冲信号,各个子系统之间(光源与光源、微波源与光源)需要进行超高精度的定时探测,再通过链路补偿、反馈控制等手段实现整体系统的同步。由于电子加速及同步辐射过程均需要很长的作用距离,XFEL的长度通常在几百米到几公里量级,因此实现长距离、高精度定时探测对于XFEL的正常运转具有重要意义。在过去的十年中,高精度定时同步系统已全面部署在大型XFEL设施中,无论是光-光还是光-微波的同步,高精度的定时探测器在整个同步系统中发挥的作用都举足轻重。

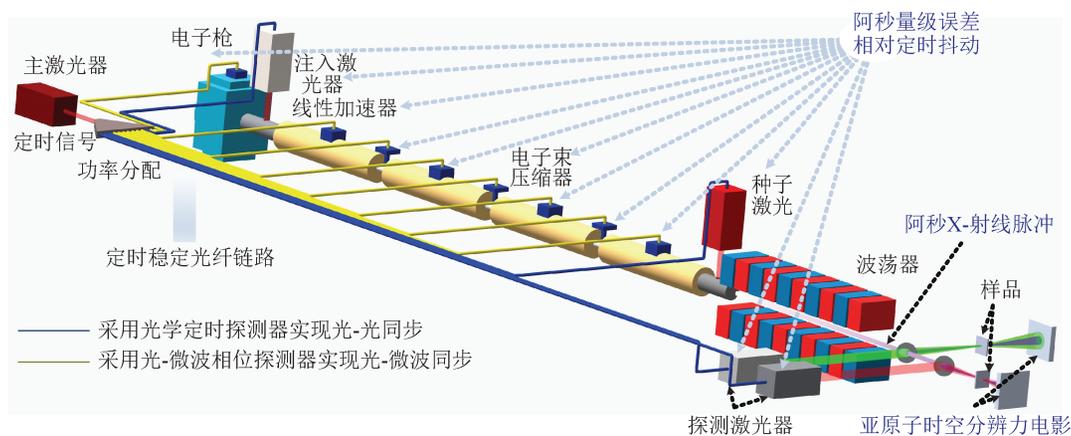


图5 X射线自由电子激光器定时分配系统的布局^[11]

Fig.5 Layout of X-ray free electron laser timing distribution system^[11]

以光源与光源间的同步为例,光-光远程同步包括两部分:链路稳定^[48]和远程激光锁定^[28]。BOC定时探测技术是实现这两项工作的基础。进行链路稳定时,需要一台主激光器,主激光器产生的光脉冲串被耦合到长距离光纤链路中传输,链路末端的耦合器将脉冲序列的一部分功率反射

回来,在链路的输入端放置一个BOC定时探测器,用于检测链路反射的脉冲和主激光器新输出的脉冲之间的定时差,生成用于反馈的定时误差信号来控制可变延迟元件(如光纤拉伸器)以补偿定时抖动,实现链路稳定。

远程激光锁定时,链路输出的主激光器脉冲

序列与远端激光器输出的脉冲序列（二者重复频率差为 Δf ）同时进入BOC定时探测器中，探测器输出重复频率同样为 Δf 的定时特性S曲线序列。该曲线序列可作为控制远端激光器PZT的反馈信号。当BOC输出电压落入S曲线中间零点附近的线性范围内时，反馈信号可以减小两台激光器的重复频率差。随着反馈持续进行，S曲线会变得越来越平坦，直至变为直流电压，表示远端激光器的重复频率已经锁定到主激光器的重复频率上。

文献[28]中，研究人员利用BOC定时探测器对两台相距3.5 km的激光源进行了远程同步，40 h内的定时漂移（ < 1 Hz）仅为2.3 fs。残留定时漂移主要受限于链路中的光功率波动。

位于美国加州的二代直线加速器相干光源（LCLS-II）每秒可产生100万个X射线脉冲，在如此高的重复频率下进行实验，需要对泵浦激光器与X射线脉冲之间的相对定时抖动进行超高精度测量，文献[49]为LCLS-II搭建了基于脉冲光学的定时分配系统，利用BOC定时探测器来稳定两条链路并测量它们之间的相对定时抖动和漂移，在长达19 h内的观测时间内，链路之间的定时漂移为1.05 fs（均方根）。

综上所述，定时探测器的精度对于系统能否高效地完成各个子模块之间的同步工作起着决定性作用，这也是研究人员不懈地开发更高精度、更低功耗、更低噪底的新型定时探测手段的原因所在。

2.2 激光脉冲的相干合成技术

获得峰值功率更强、脉宽更窄的激光脉冲是高能激光研究的前沿方向。由欧盟发起的Extreme Light Infrastructure (ELI) 项目^[50-51]，至今已有十多个国家的四十多个机构参与，并计划利用相干合成技术获得艾瓦（ 10^{18} W）量级的激光输出；俄罗斯筹备的Exawatt Center for Extreme Light Studies (XCELS) 项目同样计划合成200 PW（PW为功率单位， 1 PW= 1×10^{15} W）的激光脉冲^[52]，其内部要求种子光源与泵浦光源之间的同步误差不高于10 fs，以完成光学参量啁啾脉冲放大（Optical Parametric Chirped Pulse Amplification, OPCPA）过程。2019年，位于中国上海的超强超短激光装置“羲和”（SULF）获得激光中心波长800 nm，输出能量

404 J，平均峰值功率11.7 PW，最高峰值功率12.9 PW的结果，打破了国际上宽带激光放大输出最高能量的记录^[53]。此外，国际上发起的International Coherent Amplification Network (ICAN) 项目也提出了合成超短超强激光的实现方法，该项目计划用半导体激光器作为泵光，利用掺杂光纤作为增益介质，将飞秒激光脉冲分为一千多路放大后再进行相干合成，最终得到十焦耳量级的高能脉冲，这一过程需要分辨力不低于10 as的定时控制^[54-56]。为此，需要在每个装置内部都装备高精度的定时探测器，以实现同步、控制等功能。

2001年，美国国家标准与技术研究院（National Institute of Standards and Technology, NIST）的Robert K. Shelton等人首次成功将两个独立的飞秒激光脉冲进行相干合成^[57]，该技术要求两台锁模激光器之间进行紧密地锁相与同步，然而由于缺乏高精度的定时探测技术，利用直接检测法的电锁定直接受限于光电探测器的幅度-相位噪声，两台激光器之间的精确同步难以实现，定时探测器精度不足成为当时实现相干合成技术的重大障碍。直至出现高精度BOC定时探测技术，其将飞秒脉冲的定时表征误差控制在阿秒量级，上述技术难题才得以解决，并加速了高功率、窄脉宽激光脉冲相干合成技术的研究进度。

德国CFEL的F. X. Kartner团队利用两路超宽光谱的OPCPA技术，得到了超过1.8倍频程的光谱，获得了0.8个光学周期的脉冲输出，单个脉冲能量达到15 μ J^[58]。在该过程中，他们将近红外OPCPA脉冲和短波红外OPCPA脉冲进行相干合成，利用BOC定时探测器测量两路脉冲间的相对抖动，再通过30 Hz的带宽上对短波红外OPCPA脉冲的路径长度进行反馈控制，最终使得两路脉冲的相对定时漂移减小到250 as，小于短波红外OPCPA振荡周期（7.2 fs）的5%。两路脉冲经过BOC技术的探测和控制，达到了控制在阿秒级误差的相对定时稳定性，相干合成后最终实现高能周期量级脉冲输出。

2.3 超低相位噪声光学和微波源产生

尽管锁模激光器在高频处（例如 > 10 kHz）具有极低的定时抖动，在低频段受环境温度、机械振动等因素的影响，其定时抖动性能并不理想，无

法满足光子模数转换、光子雷达等系统的要求。借助高精度定时探测器,可将锁模激光器的重复频率锁定到更稳定的参考源上,从而抑制锁定带宽内的定时噪声,实现全频段的超低定时噪声信号源。

在文献[17]中,利用2.2节介绍的光纤延迟线定时探测器,掺铒光纤锁模激光器的重复频率被锁定到2.5 km长光纤的延迟时间上。由于光纤链路被封装在双层屏蔽箱内,并进行了被动隔振处理,其低频段的噪声得到有效抑制,从而使锁模激光器在[1 Hz, 1 MHz]内积分的定时抖动从10 ps降至20 fs,实现了全频段全光纤低定时抖动光源。利用光电探测器直接提取锁模激光器的重频信号(或其高次谐波),则可以在低频段(例如<10 kHz)获得低相位噪声的微波信号^[17]。如果采用光-微波鉴相器,则可以克服光电转换过程中的幅度-相位噪声,从而将激光器全频段内的低定时抖动特性转移到微波域。例如文献[59]首先利用光纤延迟线定时探测器实现全频段低定时抖动光源,然后利用FLOM-PD光-微波鉴相器开发了超低相位噪声的X波段微波信号合成器,在10 GHz的载波频率下,10 kHz频率偏移处的相位噪声低至-145 dBc/Hz。

3 总结与展望

对定时的极致追求推动着高精度光学定时探测器的高速发展,BOC探测器的本底噪声在特定的输入功率下能够逼近输入脉冲的标准量子极限,并且已经实现了片上集成,集成定时探测器的鲁棒性与长期稳定性将会使定时同步系统发挥更出色的性能。AOM定时探测器能够在低功耗场景中发挥出色的性能,装置也更加简单。尽管如此,研究人员依然追求着更高精度、更低功耗、更易集成的定时探测手段。

高精度光学定时探测器的诞生,源自低相位噪声的锁模激光器。近些年,虽然锁模激光器的相位噪声已很接近理论上的量子极限,但是定时探测器仍具有广阔的研究空间。未来新型定时探测器的开发有三个可能的发展方向:①继续降低其本底噪声,提高定时分辨力。例如研究BOC探测器在极高输入功率下的性能,对光脉冲的标准量子极限以及光学介质的量子涨落等效效应进行实验测量;②拓展定时探测器的工作频率。研究极

紫外、中红外波段甚至X射线、THz的定时探测器的实现方法,从以光学定时探测器作为辅助的间接定时测量逐步向这些波段之间的直接定时测量过渡;③定时探测器大规模片上集成。近几年随着微腔光频梳等片上集成光源的飞速发展,研究与集成光源兼容的高精度集成定时探测器逐渐成为迫切需求。低功耗、微型化、低成本、高精度的定时探测器有可能在定位测距、自动驾驶、精准医疗等领域开辟诸多新的应用,使定时探测器最终将从科研实验室走向民用。

光学定时探测器作为人类探索未知的关键器件,它的每一次性能提升都推动着前沿科技的进步。最高精度的定时技术能够带领人类看得更清、走得更远。

参考文献

- [1] BALESTRIERI E, PICARIELLO F, RAPUANO S, et al. Review on jitter terminology and definitions[J]. Measurement, 2019, 145: 264-273.
- [2] XIN M, ŞAFAK K, KÄRTNER F X. Ultra-precise timing and synchronization for large-scale scientific instruments[J]. Optica, 2018, 5(12): 1564-1578.
- [3] VON DER LINDE D. Characterization of the noise in continuously operating mode-locked lasers[J]. Applied physics B, 1986, 39(4): 201-217.
- [4] QUINLAN F, FORTIER T M, JIANG H, et al. Exploiting shot noise correlations in the photodetection of ultrashort optical pulse trains[J]. Nature photonics, 2013, 7(4): 290-293.
- [5] SUN W, QUINLAN F, FORTIER T M, et al. Broadband noise limit in the photodetection of ultralow jitter optical pulses[J]. Physical review letters, 2014, 113(20): 203901.
- [6] JIANG L A, WONG S T, GREIN M E, et al. Measuring timing jitter with optical cross correlations[J]. IEEE journal of quantum electronics, 2002, 38(8): 1047-1052.
- [7] SCHIBLI T R, KIM J, KUZUCU O, et al. Attosecond active synchronization of passively mode-locked lasers by balanced cross correlation[J]. Optics letters, 2003, 28(11): 947-949.
- [8] KIM J, CHEN J, COX J, et al. Attosecond-resolution timing jitter characterization of free-running mode-locked lasers[J]. Optics letters, 2007, 32(24): 3519-3521.
- [9] KAERTNER F X, WONG F N C, KIM J W. Compact background-free balanced cross-correlators: U. S. patent 7940390[P]. 2011-05-10[2022-08-09].
- [10] KIM T K, SONG Y, JUNG K, et al. Sub-100-as timing

- jitter optical pulse trains from mode-locked Er-fiber lasers [J]. *Optics letters*, 2011, 36(22): 4443-4445.
- [11] XIN M, ŞAFAK K, PENG M Y, et al. Attosecond precision multi-kilometer laser-microwave network [J]. *Light: science and applications*, 2017, 6(1): 16187-16194.
- [12] ŞAFAK K, XIN M, ZHANG Q, et al. Jitter analysis of timing-distribution and remote-laser synchronization systems [J]. *Optics express*, 2016, 24(19): 21752-21766.
- [13] CALLAHAN P T, SAFAK K, BATTLE P, et al. Fiber-coupled balanced optical cross-correlator using PPKTP waveguides [J]. *Optics express*, 2014, 22(8): 9749-9758.
- [14] JONES B, HAWTHORNE T, BATTLE P, et al. Development of a waveguide-based optical cross-correlator for attosecond timing synchronization [J]. *Ultrafast optics (UFO) XI*, 2017.
- [15] ŞAFAK K, DAI A, XIN M, et al. Extreme-timing-resolution with waveguide-based balanced optical cross-correlators [C]//CLEO: Science and Innovations, May 15-20, 2022, San Jose, California. San Jose: Optica Publishing Group, STh5N. 3, 2022.
- [16] HOU D, LEE C C, YANG Z, et al. Timing jitter characterization of mode-locked lasers with $< 1 \text{ zs}/\sqrt{\text{Hz}}$ resolution using a simple optical heterodyne technique [J]. *Optics letters*, 2015, 40(13): 2985-2988.
- [17] JUNG K, KIM J. All-fibre photonic signal generator for attosecond timing and ultralow-noise microwave [J]. *Scientific reports*, 2015, 5(1): 1-7.
- [18] KWON D, JEON C G, SHIN J, et al. Reference-free, high-resolution measurement method of timing jitter spectra of optical frequency combs [J]. *Scientific reports*, 2017, 7(1): 1-9.
- [19] TIAN H, YANG W, KWON D, et al. Optical frequency comb noise spectra analysis using an asymmetric fiber delay line interferometer [J]. *Optics express*, 2020, 28(7): 9232-9243.
- [20] WANG T, REN Q, ŞAFAK K, et al. Attosecond-precision balanced linear-optics timing detector [J]. *Optics express*, 2021, 29(23): 38140-38149.
- [21] GIORGETTA F R, SWANN W C, SINCLAIR L C, et al. Optical two-way time and frequency transfer over free space [J]. *Nature photonics*, 2013, 7(6): 434-438.
- [22] SHI H, SONG Y, YU J H, et al. Quantum-limited timing jitter characterization of mode-locked lasers by asynchronous optical sampling [J]. *Optics express*, 2017, 25(1): 10-19.
- [23] KIM H, QIN P, SHIN J, et al. Reduction of timing jitter to the sub-20-attosecond regime in free-running femtosecond mode-locked fiber lasers [C]//CLEO: June 9-14, 2013, San Jose, California. San Jose: IEEE, 2013: 1-2.
- [24] SONG Y, JUNG K, KIM J. Impact of pulse dynamics on timing jitter in mode-locked fiber lasers [J]. *Optics letters*, 2011, 36(10): 1761-1763.
- [25] COX J A, NEJADMALAYERI A H, KIM J, et al. Complete characterization of quantum-limited timing jitter in passively mode-locked fiber lasers [J]. *Optics letters*, 2010, 35(20): 3522-3524.
- [26] BENEDICK A J, FUJIMOTO J G, Kärtner F X. Optical flywheels with attosecond jitter [J]. *Nature photonics*, 2012, 6(2): 97-100.
- [27] SCHULZ S, GRGURAŠ I, BEHRENS C, et al. Femtosecond all-optical synchronization of an X-ray free-electron laser [J]. *Nature communications*, 2015, 6(1): 1-11.
- [28] XIN M, ŞAFAK K, PENG M Y, et al. One-femtosecond, long-term stable remote laser synchronization over a 3.5 km fiber link [J]. *Optics express*, 2014, 22(12): 14904-14912.
- [29] XIN M, ŞAFAK K, PENG M Y, et al. Breaking the femtosecond barrier in multi-kilometer timing synchronization systems [J]. *IEEE journal of selected topics in quantum electronics*, 2016, 23(3): 97-108.
- [30] ŞAFAK K, XIN M, PENG M Y, et al. Synchronous multi-color laser network with daily sub-femtosecond timing drift [J]. *Scientific reports*, 2018, 8(1): 1-8.
- [31] HARMAND M, COFFEE R, BIONTA M R, et al. Achieving few-femtosecond time-sorting at hard X-ray free-electron lasers [J]. *Nature photonics*, 2013, 7(3): 215-218.
- [32] KIM H W, VINOKUROV N A, BAEK I H, et al. Towards jitter-free ultrafast electron diffraction technology [J]. *Nature photonics*, 2020, 14(4): 245-249.
- [33] HE Y, BALDWIN K G H, ORR B J, et al. Long-distance telecom-fiber transfer of a radio-frequency reference for radio astronomy [J]. *Optica*, 2018, 5(2): 138-146.
- [34] LU X, ZHANG S, CHEN X, et al. Ultrasensitive, high-dynamic-range and broadband strain sensing by time-of-flight detection with femtosecond-laser frequency combs [J]. *Scientific reports*, 2017, 7(1): 1-6.
- [35] BERGERON H, SINCLAIR L C, SWANN W C, et al. Femtosecond time synchronization of optical clocks off of a flying quadcopter [J]. *Nature communications*, 2019, 10(1): 1-7.
- [36] NA Y, JEON C G, AHN C, et al. Ultrafast, sub-nanometre-precision and multi-functional time-of-flight detection [J]. *Nature photonics*, 2020, 14(6): 355-360.
- [37] MOUROU G, BROCKLESBY B, Tajima T, et al. The future is fibre accelerators [J]. *Nature photonics*, 2013, 7(4): 258-261.

- [38] BETTI R, HURRICANE O A. Inertial-confinement fusion with lasers [J]. *Nature physics*, 2016, 12 (5) : 435-448.
- [39] ROSSI G M, MAINZ R E, YANG Y, et al. Sub-cycle millijoule-level parametric waveform synthesizer for attosecond science [J]. *Nature photonics*, 2020, 14 (10) : 629-635.
- [40] SONG Y, ZHOU F, TIAN H, et al. Attosecond timing jitter within a temporal soliton molecule [J]. *Optica*, 2020, 7(11): 1531-1534.
- [41] BAO C, SUH M G, SHEN B, et al. Quantum diffusion of microcavity solitons [J]. *Nature physics*, 2021, 17 (4) : 462-466.
- [42] ZHAO Z, WANG D, GU Q, et al. SXFEL: a soft X-ray free electron laser in China [J]. *Synchrotron radiation news*, 2017, 30(6): 29-33.
- [43] 沈百飞, 吉亮亮, 张晓梅, 等. 强场X射线激光物理 [J]. *物理学报*, 2021, 70 (8): 55-72.
SHEN B F, JI L L, ZHANG X M, et al. Strong-field X-ray laser physics [J]. *Acta physica sinica*, 2021, 70(8) : 55-72. (in Chinese)
- [44] ALLARIA E, APPIO R, BADANO L, et al. Highly coherent and stable pulses from the FERMI seeded free-electron laser in the extreme ultraviolet [J]. *Nature photonics*, 2012, 6(10): 699-704.
- [45] MILNE C J, SCHIETINGER T, AIBA M, et al. Swiss-FEL: the Swiss X-ray free electron laser [J]. *Applied sciences*, 2017, 7(7): 720.
- [46] HUANG Z, LINDAU I. SACLA hard-X-ray compact FEL [J]. *Nature photonics*, 2012, 6(8): 505-506.
- [47] ALTARELLI M, BRNKMANN R, CHERGUI M, et al. XFEL: The European X-ray free-electron laser [R]. Notkestrasse, Hamburg: DESY, 2006.
- [48] PENG M Y, CALLAHAN P T, NEJADMALAYERI A H, et al. Long-term stable, sub-femtosecond timing distribution via a 1.2 km polarization-maintaining fiber link: approaching 10^{-21} link stability [J]. *Optics express*, 2013, 21(17): 19982-19989.
- [49] ŞAFAK K, DROSTE S, CHENG H P H, et al. A pulsed-optical timing distribution system for LCLS-II [C]// CLEO: Science and Innovations, May 10-15, 2020, San Jose, California. San Jose: Optical Society of America, SM2N. 5, 2020.
- [50] MOUROU G, KORN G, SANDNER W, et al. Science and technology with ultra-intense laser [M]. *Wolfshanger: Andreas Thoss*, 2011.
- [51] MOUROU G, TAJIMA T. More intense, shorter pulses [J]. *Science*, 2011, 331(6013): 41-42.
- [52] BASHINOV A V, GONOSKOV A A, KIM A V, et al. New horizons for extreme light physics with mega-science project XCELS [J]. *The European physical journal special topics*, 2014, 223(6): 1105-1112.
- [53] GAN Z, YU L H, WANG C, et al. *Progress in ultrafast intense laser science XVI* [M]. Cham: Springer, 2021.
- [54] BROCKLESBY W S, NILSSON J, SCHREIBER T, et al. ICAN as a new laser paradigm for high energy, high average power femtosecond pulses [J]. *The European physical journal special topics*, 2014, 223(6): 1189-1195.
- [55] MOUROU G A, HULIN D, GALVANAUSKAS A. The road to high peak power and high average power lasers: coherent-amplification-network (CAN) [J]. *American institute of physics*, 2006, 827(1): 152-163.
- [56] SOULARD R, QUINN M N, MOUROU G. Design and properties of a coherent amplifying network laser [J]. *Applied optics*, 2015, 54(15): 4640-4645.
- [57] SHELTON R K, MA L S, KAPTEYN H C, et al. Phase-coherent optical pulse synthesis from separate femtosecond lasers [J]. *Science*, 2001, 293(5533): 1286-1289.
- [58] HUANG S W, CIRMI G, MOSES J, et al. High-energy pulse synthesis with sub-cycle waveform control for strong-field physics [J]. *Nature photonics*, 2011, 5(8): 475-479.
- [59] WEI J, KWON D, ZHANG S, et al. All-fiber-photonics-based ultralow-noise agile frequency synthesizer for X-band radars [J]. *Photonics research*, 2018, 6 (1): 12-17.

(本文编辑:刘圣晨)



第一作者: 王童 (1998—), 男, 博士研究生, 主要研究方向为超快光学、阿秒光子学。



通讯作者: 辛明 (1982—), 男, 教授, 长期从事阿秒光子学及硅基集成光子学方面的研究。国家级青年人才, 主持国家自然科学基金、科技部重点研发计划课题等项目。研究成果被合众国际社 (美国第二大通讯社)、ScienceDaily、Phys.org、EurekAlert 等媒体报道, 相关技术已被美国斯坦福 LCLS II、欧洲极端光源 ELI、上海 SXFEL 等大科学装置采用。担任《光子学报》青年编委、CLEO 技术委员会成员。