

# 阿秒精度的定时控制与前沿应用\*

武子铃 宋有建<sup>†</sup>(天津大学精密仪器与光电子工程学院 光电信息技术教育部重点实验室  
超快激光研究室 天津 300072)

2021-10-08收到

<sup>†</sup> email: yjsong@tju.edu.cn

DOI: 10.7693/wl20211104

## Attosecond-precision timing control and applications

WU Zi-Ling SONG You-Jian<sup>†</sup>

(Ultrafast Laser Laboratory, Key Laboratory of Opto-electronic Information Technology, Ministry of Education, College of Precision Instrument and Opto-electronics Engineering, Tianjin University, Tianjin 300072, China)

**摘要** 精密的定时控制在探索前沿科学过程中不可或缺,它是先进科学探测装置在极限条件下高性能工作的重要保障。阿秒精度的定时控制技术,为科学探测装置实现更精细、更快速、更高能量、更高分辨率的观测提供了有力的技术支撑。文章介绍阿秒抖动的光学主时钟发生器,阿秒精度的定时信号向光学、无线电信号源的分发技术,以及长链路的高精度时间误差补偿技术的科学原理,并介绍了这些前沿技术在X射线自由电子激光器、超强超短激光装置、大规模射电望远镜阵列中的应用。

**关键词** 阿秒, 定时同步, 激光光学, 飞秒激光器

**Abstract** Ultra-high precise timing control is indispensable for exploring new frontiers in science, as it guarantees high-performance operation of advanced scientific detection facilities under extreme conditions. In particular, attosecond precision timing control provides powerful technical support for achieving faster, more precise, higher energy, and higher resolution observations. This article introduces the principle of optical master oscillator with precise timing distribution and jitter on the order of attoseconds, as well as high precision fiber link stabilization. The application of these techniques in X-ray free electron laser facilities, ultra-intense laser systems and large-scale millimeter wave antenna arrays are summarized.

**Keywords** attosecond, timing synchronization, laser optics, femtosecond lasers

## 1 引言

科学家们不断地开发新技术、研制新设备来观察世界,追求探测到尺寸最小、速度最快、能量最强、距离最远等实验现象。在诸多前沿科学中,实验装置内部的时间基准需要非常精确地分

配,才能达到极致的探测效果。目前在已建成或在建设的科学探测装置中,阿秒( $1\text{ as}=10^{-18}\text{ s}$ )量级定时同步控制是能达到的最高标准。

微观世界中许多物理过程、化学反应的时间极短,为了观测其中微观粒子的运动状态,需要采用高强度且脉宽极窄的脉冲探测源,才能完整准确地分析其中的动力学问题。X射线自由电子激光器(XFEL)(图 1(a))有能力聚焦于单个原子,

\* 国家自然科学基金(批准号: 61975144)资助项目

甚至聚焦于复杂体系的分子内部<sup>[1, 2]</sup>, 并在它们的固有时间尺度上观察电子和核运动。这得益于过去十余年中X射线源性能的大幅提升, 可以提供前所未有的时间分辨力(约50 as)和强度, 能够探索物质在极端条件下的行为<sup>[3]</sup>。世界范围内已经有许多建成或在建的大型XFEL设备, 也催生出原子分子物理<sup>[4-6]</sup>、超快化学<sup>[7]</sup>、俄歇效应<sup>[8, 9]</sup>等一系列研究成果。文献[10]报道了用XFEL产生孤立的软X射线阿秒脉冲, 光源具有比软X射线光谱域内任何其他孤立阿秒脉冲源大数百万倍的脉冲能量, 峰值功率超过100 GW(1 GW=10<sup>9</sup> W)。这种高强度、高光子能量和超短脉冲持续时间的独特组合, 使X射线非线性光谱学和单粒子成像的电子动力学研究成为可能。文献[11]证明了利用XFEL超快泵浦一探测可以获得Ru表面CO氧化过程中过渡态区域分子的电子结构。文献[12]报道了用孤立的阿秒脉冲来激发氨基酸苯丙氨酸的电离, 在4.5 fs(1 fs=10<sup>-15</sup> s)的时间尺度下进行了超快动力学检测, 观测到分子内的电荷迁移。完全相干的软X射线阿秒脉冲一般需要在外部种子脉冲激光注入的条件下, 通过高增益谐波放大(HGHG)才能够产生<sup>[13, 14]</sup>。为此, 需要XFEL中的各部分有源器件(例如种子光源、各级放大器、微波网络)必须具有阿秒级别的定时同步精度<sup>[15]</sup>。另外, 利用XFEL作为探测光源开展泵浦一探测实验同样需要阿秒级别的延时精度<sup>[16]</sup>。

极高峰值功率的激光脉冲所产生的极端环境也是诸多科学家的兴趣所在<sup>[17, 18]</sup>。超强超短激光可以看作能在实验室里产生的最亮光源<sup>[19]</sup>, 其通常的定义为: 峰值功率大于1 TW(1 TW=10<sup>12</sup> W), 脉冲宽度小于100 fs<sup>[20]</sup>。上海超强超短激光实验装置“羲和”(SULF)(图1(b))在2019年输出了最高峰值功率为12.9 PW(1 PW=10<sup>15</sup> W)的超强超短激光脉冲, 打破了该单位在2017年创造的世界纪录<sup>[21]</sup>。欧洲的极端光基础设施(ELI)被用来产生具有极高峰值功率和聚焦强度的激光脉冲, 其峰值功率预计达到艾瓦(1 EW=10<sup>18</sup> W)量级, 脉冲宽度为10 fs<sup>[22]</sup>。超强超短激光为新一代实验室天体物理、材料物理、高能物理、医学应用等研究提供

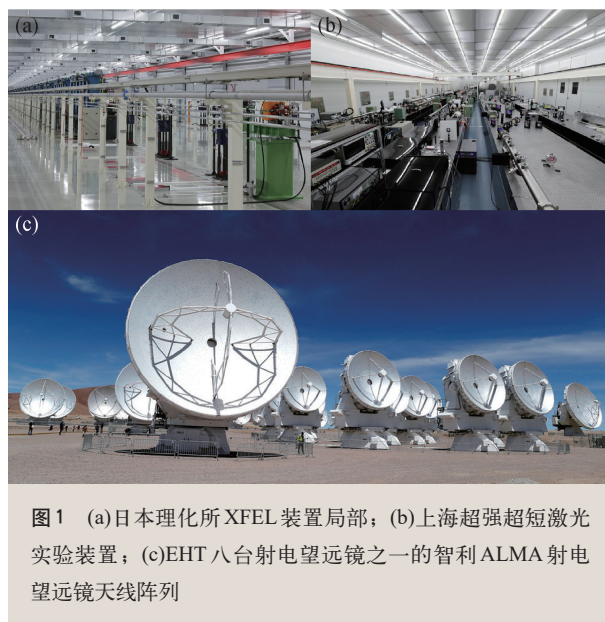


图1 (a)日本理化所XFEL装置局部; (b)上海超强超短激光实验装置; (c)EHT八台射电望远镜之一的智利ALMA射电望远镜天线阵列

了新的技术手段, 促成了学科间的交叉和发展。产生超强超短激光的一种方式是利用光参量啁啾脉冲放大(OPCPA)技术, 其中光参量放大器(OPA)需要将信号光和泵浦激光同时注入到非线性介质中, 要求泵浦激光器与种子源实现10 fs级别的同步精度。此外, 利用飞秒光纤激光器的相干合成技术同样可以产生超强超短激光<sup>[23]</sup>, 以欧盟提出的国际相干放大网络项目(ICAN)为例, 基本方法是将数以千计的飞秒光纤激光器进行时域内的相干合成产生超强超短激光<sup>[24-26]</sup>。为达到超高脉冲峰值功率与飞秒级脉宽, 这一过程需要精确控制多束同源飞秒光纤激光器的延时, 定时控制系统的抖动必须控制在10 as量级。

天文学家希望能看到宇宙中遥远的星体, 比如散落在宇宙中的黑洞。2019年美国国家射电天文台的科学家公布了M87星系中心黑洞的照片, 并发表了系列文章记录这一突破性的科学研究。为遥远的黑洞拍照不是一件容易的事情, 需要拍摄相机有足够高的角分辨率。综合考虑黑洞的体积和距地距离, M87星系中心黑洞是最方便观测的黑洞之一, 但仍需要相机提供22微角秒的角分辨率。这相当于在地球上分辨月球表面网球大小的物体, 需要极大口径的望远镜来观测。为黑洞拍照用到了事件视界望远镜(EHT)<sup>[27]</sup>, 它由分散在世界各地的8台射电望远镜(图1(c))组成, 其原

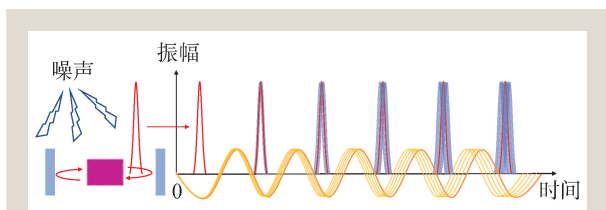


图2 飞秒激光脉冲的抖动

理基于甚长基线干涉测量技术(VLBI):理想状态下相距很远的两台望远镜同步接收天体信号,通过干涉分析相位差整合天体图像,探测效果等同于一个直径为两望远镜间距的超大口径望远镜。EHT的8台射电望远镜组成的口径接近地球的直径,各国科学家利用EHT进行了数天的同步观测,通过两年的数据分析最终得到了M87星系中心黑洞的照片。值得注意的是,VLBI技术需要将来自不同望远镜的波束进行干涉并分析信号相位,意味着望远镜阵列需要有一个精确的定时信号执行探测任务。而对于波长更短的光学望远镜阵列同步精度要求更高,其工作状态若要等同于一个虚拟大口径望远镜,则各个子望远镜之间必须构建飞秒甚至阿秒级别的定时同步控制网络<sup>[28, 29]</sup>。

上述用来探测极端条件的科学探测仪器大都为分布式构型,随着科学技术对世界的探索不断深入,先进科学探测装置中不同终端设备之间的协同工作需要依靠阿秒级定时同步控制,否则无法发挥整体系统的高性能。接下来将主要介绍定时同步技术以及定时同步技术在先进科学探测装置中的应用。

## 2 阿秒级定时同步技术

阿秒精度的定时同步是在阿秒级抖动的主时钟发生器、超高稳定性的时钟分发系统这两项关键技术的支撑下完成的。主时钟发生器起到节拍器的作用,为整个科学探测装置提供定时基准。不同于乐器中的节拍器,科学装置对定时抖动的要求极为苛刻,传统的射频时钟都很难满足要求。飞秒激光器产生周期性的超短脉冲序列,其承载的微波信号具有极低的抖动,可以作为先进

科学装置的超稳“节拍器”,被称为光学主时钟振荡器(optical master oscillator, OMO)。

OMO定时同步信号必须通过光纤链路稳定发送至不同的终端设备,并严格校准终端设备内的激光器、微波源的定时才能实现超高稳定性的时钟分发,于是探测并补偿终端装置与光纤链路的定时抖动极为重要。以下分别介绍OMO和超稳时钟分发系统这两项关键技术。

### 2.1 基于飞秒激光的光学主时钟振荡器

飞秒激光器产生超短脉冲序列,单个脉冲宽度低至数十飞秒,其脉冲的重复频率在MHz—GHz量级,从而提供了一个天然的信号源。飞秒脉冲的间隔不是严格一致的,受到量子噪声、环境噪声的影响,脉冲序列产生随机的抖动,表现为序列中的各个脉冲包络的重心与其理想位置的随机时间偏差。自由运转的飞秒激光器中没有反馈控制,脉冲重心位置相对于理想时刻的偏差幅度会随着时间的增加而增长,呈现随机游走的态势<sup>[30]</sup>。如图2所示,周期性的红色脉冲串为飞秒激光脉冲在无噪声情况下的理想位置,它的脉冲间隔是严格一致的。蓝色脉冲串表示激光器在噪声影响下,存在一定抖动的光脉冲出现位置的范围。随着时间的推移,脉冲的定时不确定范围逐渐扩大,飞秒激光脉冲承载的重复频率信号(微波信号,黄色曲线)也会随之产生抖动。由于每一个脉冲内的光子高密度地聚合在窄至飞秒级的时间窗口内,提供极高的峰值功率,使得放大的自发辐射(ASE)等随机光子噪声对飞秒激光脉冲的影响微乎其微,量子极限的定时抖动低至阿秒量级<sup>[31—33]</sup>。尽管如此,飞秒激光器的腔长不可避免地受到环境温度、振动等环境噪声的影响而随机波动,使得脉冲序列产生额外的定时抖动。

环境噪声引起的抖动通常具有有限的带宽,可以通过电子学锁相环路进行有效的补偿。利用铷原子钟等频率基准锁定飞秒激光器的重复频率,能够很好地消除环境噪声的影响,使得飞秒激光器获得与铷原子钟相同的频率稳定度。量子



噪声无法通过反馈控制完全消除,但是剩余的高频抖动极低(通常 $<1$  fs),从而使得参考至原子频率基准的飞秒激光器能够胜任提供超稳“节拍”信号的**光学主时钟振荡器 OMO**。

## 2.2 超高稳定性的时钟分发系统

在庞大的科学探测装置内分布着多种激光器、微波源,需要将 OMO 定时信号通过光纤链路分发至这些信号源,才能使科学装置正常运转。为此需要解决激光器与 OMO 的定时同步(简称**光—光定时同步**)、微波源与 OMO 的定时同步(简称**光—微波定时同步**)、构建超稳 OMO 时钟分发链路等关键问题。

### 2.2.1 基于平衡光学互相关的光—光定时同步技术

平衡光学互相关(BOC)技术能够实现两台独立的飞秒激光器的定时同步。BOC 方法本质是通过和频(SFG)等非线性光学效应测量 OMO 和从飞秒激光器(Slave)输出的光脉冲之间的时间误差,测量灵敏度直接由脉冲宽度决定。图 3 是单晶体 BOC 的工作原理图。由 OMO 和 Slave 激光器产生的偏振方向正交的两束脉冲(红色)以特定的时间差  $\Delta\tau$  进入 BOC 测量系统,对应初始位置①。透过**双色镜 1**后到达位置②。两束脉冲在非线性晶体内传输时,其交叠部分产生和频信号(绿色),最终到达位置③。值得注意的是,正交的两束脉冲在晶体内的折射率不同,光程也就不同,影响到两束脉冲的时延量。由于水平方向的脉冲在晶体内走得更“快”,假设特定初始脉冲间隔为  $\Delta\tau_0$ (由晶体厚度决定),到达位置③时,两脉冲完全对齐,即延量为 0。和频信号透射过**双色镜 2**到达平衡探测器的一端,而基频光被**双色镜 2**反射,再次经历一次和频过程,两束脉冲的延量正好变为  $-\Delta\tau_0$ ,产生的和频信号由平衡探测器的另一端接收。由于两次和频过程完全相同(因为脉冲的相对延迟由  $\Delta\tau_0$  变为 0,再变为  $-\Delta\tau_0$ ),平衡探测器将两

路信号相减,输出零电平,脉冲自身的强度波动引起的电平幅值波动则被平衡探测过程自动消除。对于任意的脉冲相对延量  $\Delta\tau$ ,得到如图 3 右侧图所示的平衡互相关曲线。在曲线的过零点  $\Delta\tau_0$  附近有一段具有较大斜率和较好线性特征的区域,平衡探测器输出的电平值与  $(\Delta\tau - \Delta\tau_0)$  成正比,探测灵敏度可达阿秒量级。利用 BOC 得到的电平信号反馈控制飞秒激光器的腔长,则可以实现从激光器输出的脉冲序列与 OMO 的严格同步。

### 2.2.2 光—微波定时同步技术

光—微波相位测量方法能够使终端设备中的微波信号源同步至 OMO。在光—微波网络中,OMO 定时信号需要通过一定的方式转换为微波定时信号才能提供给待同步微波源使用,传统的直接利用光电探测器提取定时信号的方式误差很大,因为光电探测过程会引入新的定时噪声,无法发挥 OMO 极低抖动的优势<sup>[34]</sup>。为了解决这一问题,人们开发了多种基于光学—微波相位检测的光—微波同步技术,如平衡光—微波相位探测器(BOMPDP)、光纤环路光—微波鉴相器(FLOM-PD)等<sup>[35-37]</sup>,具有飞秒至阿秒级的定时精度。这些同步技术的基本思想是利用 OMO 输出的低抖动超短脉冲激光序列作为探针,检测脉冲与微波信号的过零点之间的时间误差(图 4),并转化为电平信号,反馈控制微波信号源,将脉冲序列的重复频率稳定性传递给微波信号,从而巧妙地回避了直接光电探测附加的相位噪声。

图 4 给出了基于 FLOM-PD 的光学—微波鉴相器的工作原理。OMO 发出的飞秒激光脉冲序列的周期是  $T_{rep}$ (通常为 10 ns 左右),微波信号的周期为

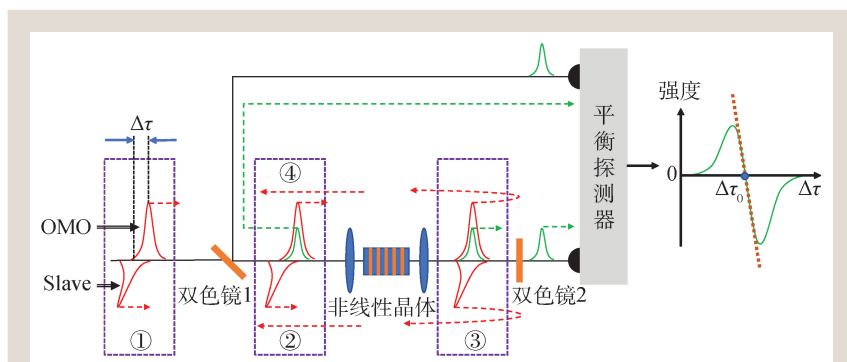


图 3 平衡光学互相关测量原理



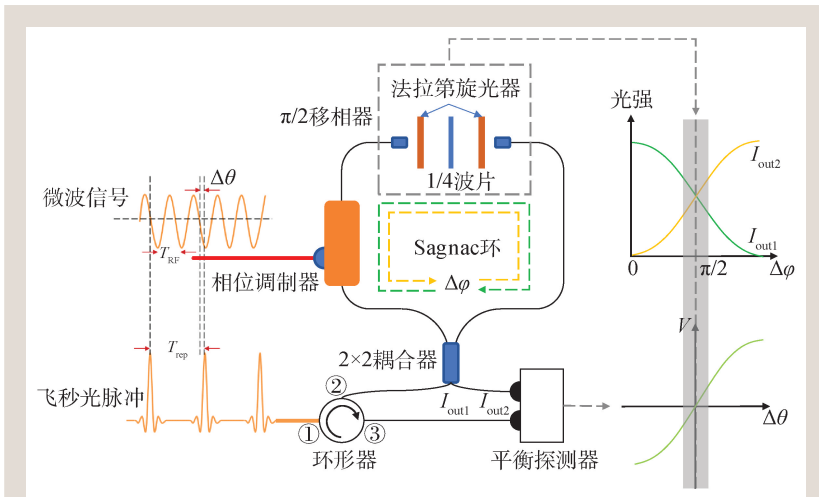
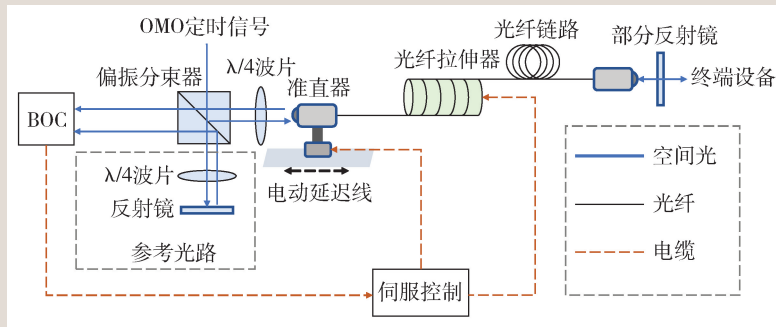


图4 基于FLOM-PD的光学—微波鉴相原理

图5 光纤链路的时间噪声补偿<sup>[38]</sup>

$T_{RF}$  (通常为 0.1 ns 左右),  $T_{rep}$  与  $T_{RF}$  之间整除后的余数对应了二者的相位差  $\Delta\theta$ 。飞秒激光脉冲从①端进入环形器, 从②端输出进入  $2\times 2$  耦合器, 在光纤萨格纳克(Sagnac)环中按照 50:50 的比例双向传输, 两束光在 Sagnac 环中经历不同的相位调制产生相位差  $\Delta\phi$ ,  $\Delta\phi$  来源于  $\pi/2$  移相器和与  $\Delta\theta$  相关的相位调制, 两束光传输一圈后重新返回  $2\times 2$  耦合器并发生干涉, 耦合输出为两路, 一路为  $I_{out2}$ , 另一路  $I_{out1}$  返回到环形器②端口再由③端口输出。 $I_{out1}$ 、 $I_{out2}$  在平衡探测器中作差, 输出与  $\Delta\theta$  相关的电平信号。在平衡探测器输出的零电平附近, 输出的电平值与  $\Delta\theta$  成正比, 从而作为误差信号对微波信号源进行反馈控制, 使得微波信号的频率稳定度与 OMO 完全一致。

### 2.2.3 超稳时钟分发链路

大科学装置中 OMO 输出的飞秒激光脉冲序列通过链路为不同终端设备的激光器、微波源传递超稳定时信号, 光纤链路代替电缆降低了电磁干

扰的影响, 传输损耗更低。但是光纤链路会受到环境温度、应力变化等外界因素的影响, 引入额外的时间误差。利用平衡光学互相关(BOC)技术可以高精度地探测这一时间误差, 其过程如图 5 所示: OMO 经过偏振分束器分为两部分, 一部分透过偏振分束器进入参考光路, 参考光路将这部分 OMO 定时信号传递至 BOC。另一路飞秒激光经偏振分束器反射至准直器, 进入光纤链路传输, 到达终端设备时由部分反射镜反射回一部分 OMO 光, 再次经历光纤链路最后到达 BOC。BOC 比对参考 OMO 定时信号与经历往返光纤链路的 OMO 定时信号, 实时得到链路引入的定时误差, 并反馈至伺服控制系统。伺服控制系统根据 BOC 的反馈信号对光纤链路中的电动延迟线和光纤拉伸器进行控制, 通过主动改变光程来矫正

链路受环境影响而引入的时间误差。其中, 电动延迟线补偿温度变化等因素引起的较长期的时间漂移, 光纤拉伸器补偿振动、应力等引起的高频定时抖动。

## 3 定时同步技术在先进科学探测中的应用

### 3.1 基于 XFEL 的泵浦—探测实验

超高时间精度 X 射线自由激光器(XFEL)的应用之一是时间分辨的泵浦—探测光谱学。高次谐波产生(HHG)技术产生的孤立阿秒脉冲为人类打开了探索阿秒科学的大门。但是, 为了探测内层电子动力学, 光子能量必须达到软 X 射线谱段。目前, 能够输出软 X 射线阿秒脉冲的 XFEL 是开展此类泵浦—探测实验的唯一选项。XFEL 是一种大科学装置, 高能量泵浦激光脉冲与 X 射线阿

秒探测脉冲需要在公里级的链路上保持时间同步。简化的XFEL泵浦—探测系统如图6所示，泵浦脉冲经过延时装置控制其到达样品的时间，X光探测脉冲周期性地照射样品进行探测。为了开展阿秒泵浦—探测实验，整个装置需要亚飞秒量级的定时同步设计<sup>[39, 40]</sup>。为此，XFEL装置中的电子枪、加速器、电子束压缩器等微波器件需要通过BOMPD等光—微波定时技术与OMO同步；XFEL中的注入激光器、种子激光器、泵浦激光器、泵浦激光器相对种子激光器的延迟通过BOC等光—光定时技术与OMO同步。目前，XFEL泵浦—探测实验装置的链路同步精度可以达到5 fs的水平<sup>[13]</sup>。

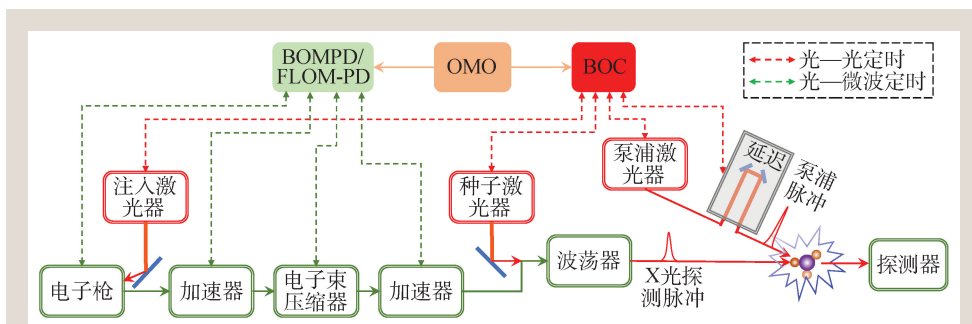


图6 基于XFEL的泵浦—探测实验

探测。为了开展阿秒泵浦—探测实验，整个装置需要亚飞秒量级的定时同步设计<sup>[39, 40]</sup>。为此，XFEL装置中的电子枪、加速器、电子束压缩器等微波器件需要通过BOMPD等光—微波定时技术与OMO同步；XFEL中的注入激光器、种子激光器、泵浦激光器、泵浦激光器相对种子激光器的延迟通过BOC等光—光定时技术与OMO同步。目前，XFEL泵浦—探测实验装置的链路同步精度可以达到5 fs的水平<sup>[13]</sup>。

### 3.2 亚周期激光的频域相干合成

利用亚周期强激光脉冲与原子、分子、团簇等介质的极端非线性作用，激光脉冲的每一次电场振荡都会产生一个阿秒级的X射线<sup>[41, 42]</sup>。光谱越宽对应时域脉宽越窄，于是可以通过合成高能量的超倍频程光谱来产生亚周期激光<sup>[43]</sup>。超倍频程光谱横跨了紫外、可见光、近红外光谱，很难通过一台激光器直接输出。一种方式是利用多路飞秒激光的光频域相干合成实现超倍频程光谱的拼合，原理如图7所示。为了使飞秒激光源之间建立相干性，需要对合成通路之间的脉冲相对延时和光谱相位进行精确控制<sup>[44]</sup>。其中，脉冲同步精度必须达到小于1/10光周期的百阿秒量级，BOC<sup>[45]</sup>、光谱干涉法<sup>[43]</sup>是实现如此高定时同步精度的重要技术保障。

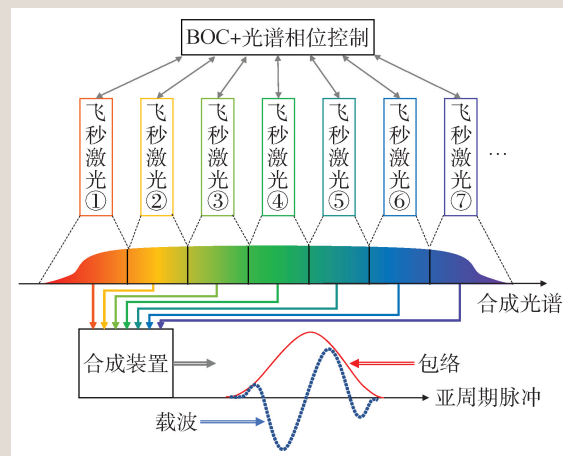


图7 多路激光频域相干合成

### 3.3 光纤超强超短激光的时域相干合成

引言中提及的国际相干放大网络项目(ICAN)，其目的是突破单路飞秒光纤激光的功率输出极

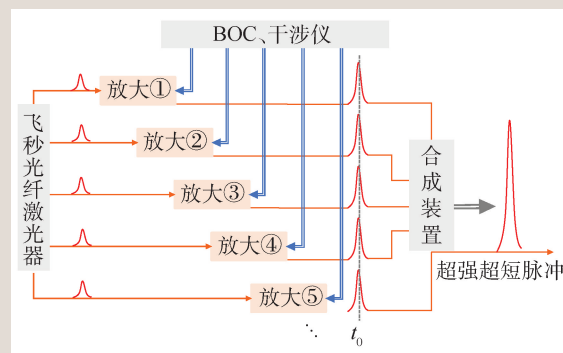


图8 多路激光时域相干合成

限，利用上千束光纤飞秒激光相干合成产生超强超短激光(图8)。为了实现相干合成，上千束激光都来自于同一个种子源，种子源经过相互独立的功率放大后相干叠加输出。为了达到输出高功率、窄脉宽的目标，同样要求所有的飞秒激光束之间高精度的时间同步，该过程类似于用若干骰子搭出最细高的结构，必须保证所有骰子的中心位于垂直地面的同一轴线，像糖葫芦似的摞在一起。如果无法做到高精度同步，就类似这一摞

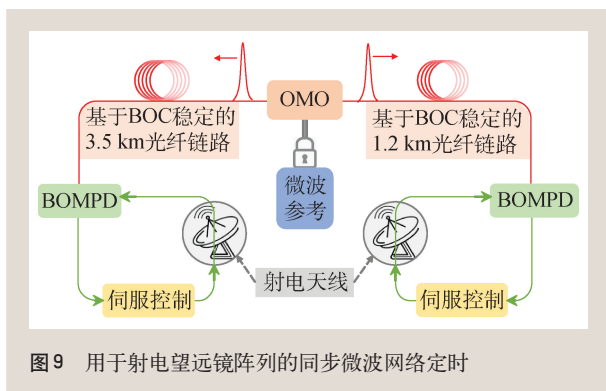


图9 用于射电望远镜阵列的同步微波网络定时

骰子的中心不在一条轴线上，骰子不是直立的一列，而是一堆，不够窄也不够高。由于每一束脉冲的宽度极窄，为了达到最佳时域相干合成效果，飞秒激光脉冲之间的定时精度需要严格控制在阿秒量级，延时控制系统依赖BOC<sup>[46]</sup>、横向剪切干涉仪<sup>[26]</sup>等技术手段提供脉冲之间的时间误差。

### 3.4 望远镜阵列定时同步技术

射电望远镜阵列的工作依赖大尺度的微波同步网络，实现多个射电天线之间极低的相对相位误差<sup>[28]</sup>，从而能够“同时”探测特定的天文事件，以达到合成孔径的效果。在射频域使用电子相位探测器同步这些天线受到50—100 fs的定时精度的限制，这可能成为未来超高分辨率遥远天体成像的潜在障碍。采用飞秒激光器作为OMO，并利用BOMPD或FLOM-PD等光—微波同步控制技术能够显著提升天线的定时精度<sup>[29, 47]</sup>，其技术方案参照图9。参考至微波频率基准上的OMO通过光纤链路向目标天线分发同步信号，利用BOC技术消除光纤链路附加的定时噪声，并利用BOMPD技术精确探测射电天线终端的本地时钟

### 参考文献

- [1] Hentschel M, Kienberger R, Spielmann C *et al.* Nature, 2001, 414: 509
- [2] Gaffney K J, Chapman H N. Science, 2007, 316: 1444
- [3] Young L, Ueda K, Gühr M *et al.* J. Phys. B: At. Mol. Opt. Phys., 2018, 51: 032003
- [4] Schultze M, Fieß M, Karpowicz N *et al.* Science, 2010, 328: 1658
- [5] Locher R, Castiglioni L, Lucchini M *et al.* Optica, 2015, 2: 405
- [6] Nandi S, Plésiat E, Zhong S *et al.* Sci. Adv., 2020, 6(31): eaba7762
- [7] Burt M, Boll R, Lee J W L *et al.* Phys. Rev. A, 2017, 96: 043415

与OMO标准定时信号的相对延时量，由伺服系统校准本地时钟，从而能够使所有的终端天线同步接收观测对象发射的无线电信号。

## 4 总结

在探索微观、强场、远距等自然现象的研究中会用到先进的科学探测装置，比如X射线自由电子激光器、超强超短激光实验装置、射电望远镜阵列等，这些大型装置需要多个激光器、微波源等终端设备严格同步执行工作命令，才能让整个系统在最极限的实验条件下发挥作用。

飞秒激光器的定时稳定性极高，可以成为新一代定时控制系统的阿秒级抖动的OMO。有了OMO作为整体装置的“节拍器”，首先可以通过基于BOC的光—光定时同步技术将终端设备中的激光器同步至OMO定时信号，在XFEL泵浦—探测实验、亚周期脉冲的频域相干合成实验、光纤超强超短激光的时域相干合成实验中发挥作用。其次，基于BOMPD、FLOM-PD等光—微波定时同步技术将终端设备中的微波信号源同步至OMO定时信号，应用在同步XFEL内的电子枪、加速器、电子束压缩器等器件，以及同步射电望远镜阵列各射电天线。另外，OMO与目标设备之间光纤链路的噪声也不容忽视，可以通过BOC的方法补偿链路的附加噪声。阿秒精度的定时控制系统如同人体的中枢神经系统，控制着复杂的科学装置内部各个终端模块的协同运转，使得公里尺度的大科学装置能够游刃有余地观察纳米尺度的微观物理世界、构造极端强场环境、看清遥远的黑洞内发生的天文事件。

- [8] Son S K, Young L, Santra R. Phys. Rev. A, 2011, 83: 033402
- [9] Haynes D C, Wurzer M, Schletter A *et al.* Nature Phys., 2021, 17: 512
- [10] Duris J, Li S, Driver T *et al.* Nature Photon., 2020, 14: 30
- [11] Öström H, Öberg H, Xin H *et al.* Science, 2015, 347: 978
- [12] Calegari F, Ayuso D, Trabattoni A *et al.* Science, 2014, 346: 336
- [13] Corkum P B. Phys. Rev. Lett., 1993, 71: 1994
- [14] Kang H S, Ko I S. Nature Photon., 2020, 14: 7
- [15] 辛明. 中国激光, 2020, 47: 0500007
- [16] Schulz S, Grguraš I, Behrens C *et al.* Nat. Commun., 2015, 6: 1



- [17] Salamin Y I, Hu S X, Hatsagortsyan K Z *et al.* Phys. Rep., 2006, 427:41
- [18] Kiriyama H, Mori M, Pirozhkov A S *et al.* IEEE J. Select. Topics Quantum Electron., 2014, 21: 232
- [19] Perry M D, Mourou G. Science, 1994, 264:917
- [20] 李儒新,冷雨欣,徐至展. 物理, 2015, 44: 509
- [21] 冷雨欣. 中国激光, 2019, 46:0100001
- [22] Mourou G, Tajima T. Science, 2011, 331:41
- [23] Seise E, Klenke A, Limpert J *et al.* Opt. Express, 2010, 18:27827
- [24] Mourou G A, Hulin D, Galvanauskas A. AIP Conf. Proc., 2006, 827, 152
- [25] Mourou G, Brocklesby B, Tajima T *et al.* Nature Photon., 2013, 7:258
- [26] Brocklesby W S, Nilsson J, Schreiber T *et al.* Eur. Phys. J-Spec. Top., 2014, 223: 1189
- [27] Akiyama K, Alberdi A, Alef W *et al.* Astrophys. J. Lett., 2019, 875:L2
- [28] Cliche J F, Shillue B. IEEE Control Syst. Mag., 2006, 26: 19
- [29] Wang W, Kalaydzhyan A, Shafak K *et al.* High Precision Synchronization of a Large-scale Microwave Network over Stabilized Fiber Links. In: Conference on Lasers & Electro-optics. IEEE, 2016, SM4H. 5
- [30] Hsu H P. Schaum's outline of theory and problems of probability, random variables, and random processes. McGraw-Hill, 1997
- [31] Kim J, Kaertner F X. Laser Photonics Rev., 2010, 4:432
- [32] Song Y, Kim C, Jung K *et al.* Opt. Express, 2011, 19:14518
- [33] Kim J, Song Y. Adv. Opt. Photonics, 2016, 8:465
- [34] 皮一涵,王春泽,宋有建等. 红外与激光工程, 2020, 49: 20201058
- [35] Kim J, Kärtner F X, Perrott M H. Opt. Lett., 2004, 29: 2076
- [36] Kim J, Kärtner F X, Ludwig F. Opt. Lett., 2006, 31:3659
- [37] Jung K, Kim J. Opt. Lett., 2012, 37:2958
- [38] Xin M, Şafak K, Kärtner F X. Optica, 2018, 5:1564
- [39] Sigalotti P, Cinquegrana P, Demidovich A *et al.* Ultrafast laser synchronization at the FERMI@Elettra FEL. In: Advances in X-ray Free-electron Lasers II: Instrumentation, 2013, 8778:87780Q
- [40] Chini M, Mashiko H, Wang H *et al.* Opt. Express, 2009, 17: 21459
- [41] Calegari F, Sansone G, Stagira S *et al.* J. Phys. B: At. Mol. Opt. Phys., 2016, 49:062001
- [42] Chini M, Zhao K, Chang Z. Nature Photon., 2014, 8(3): 178
- [43] Hassan M T, Wirth A, Grguraš I *et al.* Rev. Sci. Instrum., 2012, 83:111301
- [44] Huang P, Fang S, Gao Y *et al.* Appl. Phys. Lett., 2019, 115: 031102
- [45] 方少波,魏志义. 光学学报, 2019, 39:0126006
- [46] Tian H, Song Y, Meng F *et al.* Opt. Lett., 2016, 41: 5142
- [47] Xin M, Şafak K, Peng M Y *et al.* Light-Sci. Appl., 2017, 6:e16187



二十年的默默耕耘，风雨兼程，铸就了欧普特人“专心”、“专注”、“专业”的风格和品质，孜孜不倦地对创新和品质的追求，让欧普特具备了全线覆盖低、中、高，超高功率激光光学元件的加工生产和检测能力。伴随中国激光行业的蓬勃发展，欧普特愿与您共同进步，砥砺前行，为中国光电事业的发展进步共同尽一份心力和责任。

精密光学元件	激光器件
<ol style="list-style-type: none"> <li>1. 球面透镜</li> <li>2. 柱面&amp;非球面透镜</li> <li>3. 光学棱镜</li> <li>4. 反射镜(玻璃&amp;金属)</li> <li>5. 光学窗口</li> <li>6. 偏振&amp;消偏元件</li> <li>7. 滤光片</li> <li>8. 光栅</li> </ol>	<ol style="list-style-type: none"> <li>1. 扫描场镜(紫外-红外)</li> <li>2. 线扫镜头</li> <li>3. 紫外远心镜头</li> <li>4. 中继镜</li> <li>5. 扩束镜</li> </ol>

(熔石英基材, 直径50.8mm光学窗口)

(单晶硅基材, 1070nm高反膜)



北京市朝阳区酒仙桥东路1号M7栋东五层

www.goldway.com.cn  
Email: optics@goldway.com.cn

Tel: +86-(0)10-8456 0667  
Fax: +86-(0)10-8456 9901



## 高品质真空互联系统

### 安捷伦清洁真空及泄漏检测全套方案

- 超高真空离子泵
- 吸气剂复合型离子泵
- 钛升华复合型离子泵
- 多通道离子泵控制器
- 超高真空分子泵
- 无油静音前级泵
- 无油氦质谱检漏仪
- 真空阀门及管件
- 多种型号真空计
- 最高 12 通道真空计控制器



安捷伦科技（中国）有限公司真空事业部  
800 820 6778（固定电话拨打）  
400 820 6778（手机拨打）

下载样本或了解更多，请扫描上方二维码，  
或登陆安捷伦官方网站：[www.agilent.com](http://www.agilent.com)  
(点击“产品”选择“真空产品”)。