

基于异步光学采样的电光频率梳时间抖动测量*

马博文¹⁾ 戴雯²⁾ 孟飞³⁾ 陶家宁¹⁾ 武子铃¹⁾石岩青¹⁾ 方占军³⁾ 胡明列¹⁾ 宋有建^{1)†}

1) (精密测试技术及仪器全国重点实验室(天津大学), 天津 300072)

2) (上海无线电设备研究所, 上海 201109)

3) (中国计量科学研究院时间频率计量研究所, 光学频率标准实验室, 北京 100029)

(2024 年 3 月 20 日收到; 2024 年 5 月 19 日收到修改稿)

电光频率梳是一种单频激光器经相位调制构造的光学频率梳, 具有重复频率高、灵活可调等特点, 通过精确的色散控制, 电光频率梳在时域上可以输出超短脉冲激光序列, 其时间抖动特性对于开展精密测量等应用十分重要. 本文提出一种基于双光梳异步光学采样原理测量电光频率梳时间抖动的方案. 建立了时间抖动测量的理论模型并进行数值模拟. 搭建了一台重复频率为 10 GHz、脉冲宽度为 2.6 ps 的电光频率梳, 并开展了时间抖动的测量实验. 测量的直方图分析表明, 电光频率梳的周期抖动为 3.86 fs. 测量装置主体为光纤结构, 且不需要高速光电探测器, 有望对电光频率梳、微环频率梳等新型高重频光学频率梳时间抖动的测量与优化起到关键作用.

关键词: 电光频率梳, 时间抖动, 异步光学采样, 相位噪声**PACS:** 42.65.Re, 05.40.Ca, 42.50.Lc, 42.55.Wd**DOI:** 10.7498/aps.73.20240400

1 引言

光学频率梳是激光科学领域的重大突破. 自光学频率梳被提出并实现以来^[1,2], 特别是近年来随着双光梳技术的快速发展, 光学频率梳已经在各类精密测量领域发挥出了关键作用^[3-5]. 传统被动锁模激光器^[6-8]通过孤子效应产生光学频率梳, 梳齿间隔与腔长一一对应. 与之相比, 电光频率梳是单频激光器经过相位调制产生的, 梳齿间隔由外加射频调制频率决定^[9], 这使得电光频率梳具有多个调节自由度^[10], 在频谱整形^[11]、分子光谱学^[12]、测量与计量^[13]等领域都有着广泛的应用前景.

电光频率梳的噪声特性对于开展精密测量等应用至关重要^[14]. 在频域上, 频率噪声决定每一根

梳齿的线宽, 而在时域上, 梳齿的相干叠加产生的超短脉冲序列存在时间抖动^[15-17], 即脉冲重复频率的相位噪声. 梳齿的频率噪声主要以噪声功率谱密度进行衡量^[18], 或者用梳齿线宽来侧面表征^[19,20], 一般通过低噪声连续波 (CW) 激光器与待测信号进行拍频来测量^[21,22]. 2013 年, Ishizawa 等^[23]引入了可调谐激光器来测量不同梳齿的相位噪声, 2018 年, Lundberg 等^[24]同时测量了多条梳状线的相位噪声. 随着对电光频率梳产生超短脉冲研究的进展, 时间抖动的测量开始被关注^[25]. 一般采用高速光电探测器接收超短脉冲激光序列, 然后通过功率谱分析的方法评价时间抖动^[26-30]. 该测量方式的局限性在于光电检测过程中, 测量分辨率经常受到参考源相位噪声、散粒噪声和热噪声的限制^[16], 且对检测设备有较高要求. 2021 年, He 等^[31]测量

* 国家重点研发计划 (批准号: 2022YFF0706002) 资助的课题.

† 通信作者. E-mail: yjsong@tju.edu.cn

了借助双环光电振荡器结构 (OEO) 产生的频率梳的时间抖动功率谱, 在 10 kHz 偏置频率下, 40 ps 脉冲的单边带 (SSB) 相位噪声为 -118 dBc/Hz @ 10 kHz, 脉冲序列的时间抖动为 391.2 fs [100 Hz, 1 MHz]. 2023 年, Zhai 等 [32] 使用了光学采样示波器对谐振型电光腔频率梳的时间抖动进行了表征, 系统的定时抖动为 100 fs. 对于同样具有高重复频率的微腔光频梳, 也有报道使用了平衡光学互相关方法, 在最高 21.9 GHz 的条件下对孤子微腔的定时抖动进行了测量, 确定了孤子微腔中定时抖动的基本极限 [33].

在 2017 年, 针对具有重复频率差的双光梳锁模激光器, 本研究团队提出了一种利用异步光学采样 (asynchronous optical sampling, ASOPS) 与统计直方图分析相结合的时间抖动测量方法 [34]. 这种方法能够在时间域上线性拉伸超快过程, 因此较慢的探测器件 (约 100 MHz) 也能够方便地测量超短脉冲的时间抖动值. 本文使用 ASOPS 方法对搭建的电光频率梳-光纤锁模光频梳的双光梳结构. 已有的 ASOPS 系统中, 两台光频梳具有相近的重复频率差 (一般为数 kHz). 本方案中, 待测的电光频率梳的重复频率为 10 GHz, 而作为参考的光纤频率梳的重复频率仅为 161 MHz. 本文在理论上推导了针对这种特殊场景的 ASOPS 过程, 并且通过数值模拟进行了方法验证, 最后搭建实验系统进行时间抖动测量, 测量得到的相邻光脉冲的周期抖动为 3.86 fs, 与数值模拟的结果进行比较, 验证了测量的准确性.

2 电光频率梳时间抖动测量的理论分析及数值仿真

2.1 理论分析

使用 ASOPS 方法进行时间抖动测量的理论模型如图 1 所示. 两台激光器被划分为具有重复频率 f_r 的待测激光器 (laser under test, LUT) 和重复频率为 f_{r2} 的本振激光器 (local oscillator, LO). 其中, LUT 所输出的脉冲已经由一段延时光路将单个脉冲转变为脉冲对, 间隔为 t_{delay} , 该过程在图中由蓝色箭头表示. t_{delay} 取值较小, 这是为了缩短时间测量窗口, 从而测量量子噪声所主导的高频时间抖动. 需要特别注意的是, 本次实验所使用的系统中, 待测激光器为重复频率 f_r 为 10 GHz 的电光频率梳, 本振激光器为一台重复频率为 f_{r2} 在 161 MHz 附近的光纤锁模激光器. 理论分析中, 在计算中将其等效为两束重复频率在 10 GHz 量级的双光梳系统, 系统的等效重复频率差定义为

$$\Delta f_{\text{eqv}} = \left(\frac{f_r}{n} - f_{r2} \right) \cdot (n-1), \quad (1)$$

式中 $n = \left\lfloor \frac{f_r}{f_{r2}} \right\rfloor$, 其中半括号表示向下取整, 这意味着 LO 脉冲对 LUT 脉冲的采样是经过 n 个脉冲对的间隔进行的.

接下来考虑两束光脉冲合束后的情况, 首先考虑没有时间抖动的理想状态. 由于两台激光器具有确定的重复频率差, 那么在每经过 n 个脉冲对后, LO 脉冲会对 LUT 脉冲进行采样, 每一次采样的位置略有不同. 在经历过 $N = f_r / \Delta f_{\text{eqv}}$ 次对 LUT

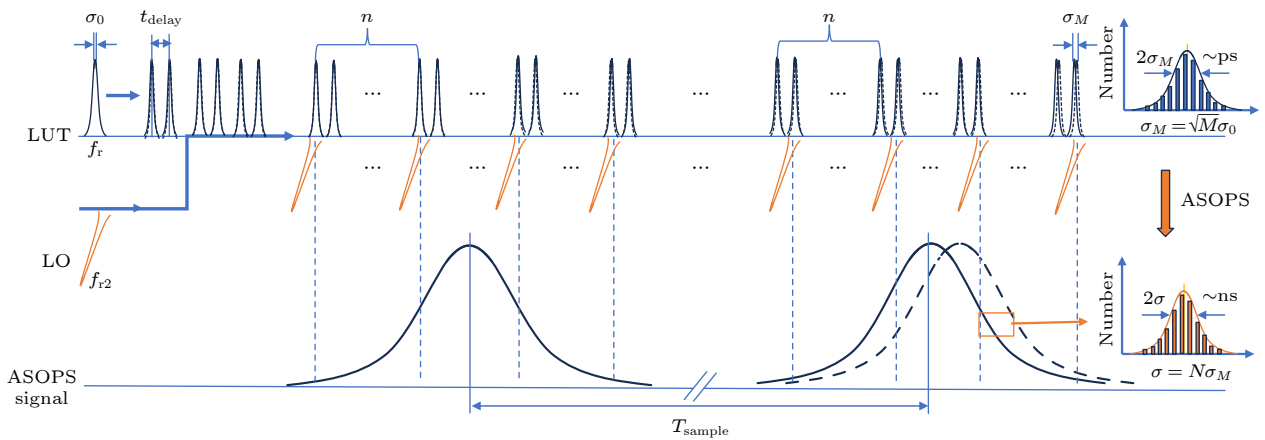


图 1 ASOPS 法测量时域抖动原理图

Fig. 1. Principle diagram of time domain jitter measurement by ASOPS method.

脉冲的采样之后, 可以完成一次对于 LUT 脉冲周期的完整采样, N 即代表 ASOPS 过程在时间尺度上的拉伸倍率. 采样后得到的 ASOPS 信号如图 1 中所示, 这里将放大后的时间尺度上获得的信号相较于前脉冲的时间差记为 T_{sample} , 对应于后一个脉冲位置, 在理想的条件下, T_{sample} 是一个定值, 由所设置的延时光路的距离和激光器决定.

接下来考虑存在时间抖动情况, 此时 T_{sample} 不再是一个定值, 而存在由抖动引入的不确定性. 为了测量 LUT 和 LO 脉冲的相对抖动, 可以认为 LO 的时间抖动很小, 相对于 LUT 可以忽略. 采用光通信系统中周期抖动 (period jitter) 的概念, 即 LUT 的时间抖动为第 i 个脉冲和第 $(i+1)$ 个脉冲的间隔相较于理想脉冲周期的偏差, 对应于方差为 σ_0^2 的正态分布. 此时考虑脉冲对的影响, 在 T_{sample} 的测量时间窗口内, ASOPS 过程中间隔为 t_{delay} 的脉冲对在时间上拉伸, 这期间所经历的脉冲数目 $M = [T_{\text{sample}} \cdot f_r]$, 这将带来一个方差为 $\sigma_M^2 = M\sigma_0^2$ 的随机游走的时间抖动, 其直方统计图如图 1 中蓝色直方图所示. 当具有抖动的 LUT 脉冲被 LO 脉冲采样后, ASOPS 过程会同时放大光学脉冲的时间尺度及其抖动, 即采样得到的 ASOPS 信号的位置将包含抖动信息. 最终, 通过测量得到的 T_{sample} 的值将会满足正态分布的条件, 其标准差 σ 定义为表观周期抖动, 其方差表示为

$$\sigma^2 = N^2 \cdot (M\sigma_0^2) \approx t_{\text{delay}} \cdot \frac{f_r^4}{\Delta f_{\text{eqv}}^3} \cdot \sigma_0^2 = T_{\text{sample}} \cdot \frac{f_r^3}{\Delta f_{\text{eqv}}^2} \cdot \sigma_0^2, \quad (2)$$

由 (2) 式可知, 对 ASOPS 信号进行直方图分析得到的表观周期抖动 σ 即为放大后的脉冲周期抖动 σ_0 . 因此, 结合直方图分析结果、待测激光器的重复频率及等效重复频率差, 就可以实现对高重复频率电光频率梳的抖动测量.

2.2 数值仿真

首先设置生成脉冲宽度 2 ps, 重复频率 $f_r = 10$ GHz (重复周期为 T_r) 的 LUT 脉冲序列, 以及在相同的脉冲形状下生成重复频率与 LUT 具有等效重频差 $\Delta f_{\text{eqv}} = 317200$ Hz, 脉冲宽度 100 fs 的无噪声高斯型 LO 脉冲序列. 然后在 LUT 的每个光脉冲周期中添加标准差为 2 fs 的随机白噪声, 即对于第 p 个脉冲, 其相对于理想脉冲位置会存在累计为 $\sum_{i=1}^p \delta_q$ 的偏移量, 其中, δ_q 是计算机生成的相

邻脉冲之间的周期抖动. 此外, 假设经延时光路产生 LUT 脉冲对的过程不会引入额外的时间抖动, 那么第 p 个脉冲的时刻可以表示为

$$t_{\text{LUT}}(p) = t_{\text{delay}} + p \cdot T_r + \sum_{i=1}^p \delta_q, \quad (3)$$

式中, $p \cdot T_r$ 表示了第 p 个脉冲在时间轴上的理想位置. 时间延时 t_{delay} 设置为 13.33 ns, 在建立脉冲序列模型后, 模拟异步光学采样的过程. 在 ASOPS 过程中, 由于脉冲的时刻位置是由互相关信号的强度最大值所决定的, 因此只需要对于脉冲的包络进行采样. 在实验中, 需要考虑脉冲电场的影响, 因此获取的互相关信号是干涉条纹, 需要通过希尔伯特变换提取脉冲包络, 但是在数值模拟中, 为了简化仿真过程, 忽略了脉冲的电场, 直接通过脉冲包络进行计算. 将每一个脉冲对的前脉冲对齐, 后脉冲由于时间抖动不完全重合, 效果如图 2 所示, 等效为示波器的余辉模式下的测量结果. 通过对后脉冲进行直方图统计分析, 可以直接得到标准差 σ , 根据设置的 f_r , Δf_{eqv} , t_{delay} , 按 (2) 式可以计算得到周期抖动标准差为 2.2 fs, 这与预先设置的随机白噪声值吻合良好.

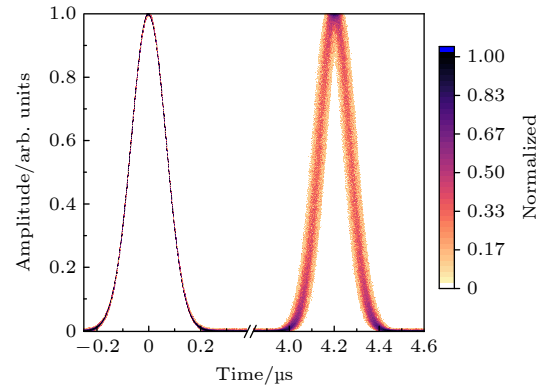


图 2 模拟中带有抖动的 ASOPS 信号的叠加结果

Fig. 2. The superposition of ASOPS signals with jitter in the simulation.

3 实验系统设置

待测的电光频率梳系统和测量时间抖动的装置设置如图 3 所示, 图中红色实线对应光纤光路, 黑色实线对应电路部分, 绿色实线对应空间光路. 待测的电光频率梳系统如图 3(a) 所示, 种子源为一台窄线宽 (< 15 kHz) 的连续波激光器, 通过级联的一个强度调制器 (intensity modulator, IM)

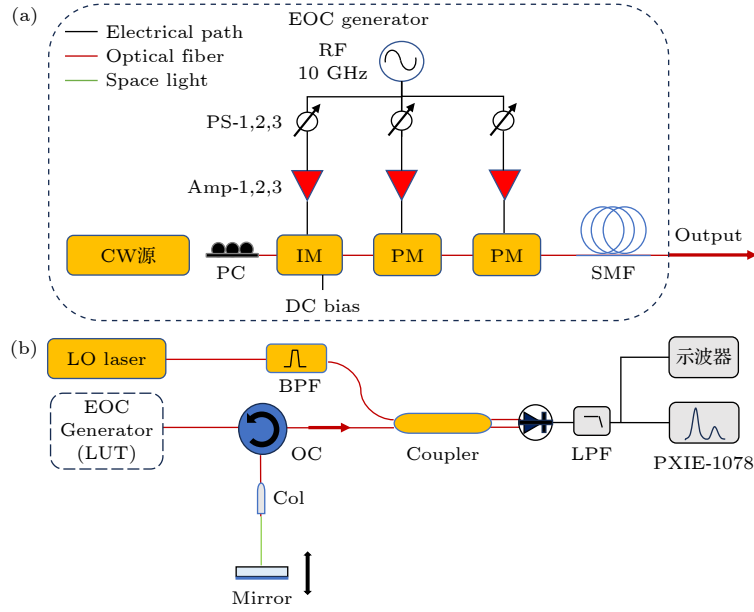


图3 ASOPS法测量待测电光频率梳系统时域抖动实验装置图 (a) 待测的电光频率梳系统示意图, PS, 移相器; PC, 偏振控制器; Amp, 功率放大器; IM, 强度调制器; PM, 相位调制器; DC bias, 直流偏压; SMF, 单模光纤; (b) 电光频率梳时间抖动测量实验装置图, OFC, 光纤锁模光频梳; EOC, 电光频率梳; BPF, 带通滤波器; Coupler, 保偏光纤耦合器; LPF, 低通滤波器; OC, 光学环形器

Fig. 3. Timing jitter test device of electro-optic combs system to be measured by ASOPS method: (a) Schematic diagram of the EOC system to be tested, PS, phase shifter; PC, polarization controller; Amp, power amplifier; IM, intensity modulator; PM, phase modulator; DC bias, DC bias; SMF, single mode fiber; (b) the timing jitter measurement experimental device diagram of electro-optic combs, OFC, optical fiber mode-locked optical frequency combs; EOC, electro-optic frequency combs; BPF, bandpass filter; Coupler, polarization-maintaining fiber coupler; LPF, low pass filter; OC, optical circulator.

和两个相位调制器 (phase modulator, PM) 生成电光频率梳, IM 设置直流偏压 (DC bias) 以工作在线性区域, 产生 50% 良好占空比的平顶脉冲, 两个级联的 PM 用于增大调制深度, 对称地激发更多梳齿. 这 3 个调制器都由一台 10 GHz 的射频信号源驱动, 驱动信号经过一分三功分器进行分路后, 分别通过射频移相器 (phase shifter, PS) 和射频放大器 (amplifier, AMP) 后将调制信号施加在电光调制器上. PS 用于调整所施加的调制信号, 使得调制器施加的啁啾在线性的点上, 从而将平顶脉冲轮廓映射到频谱上. 实验中所使用的 10 GHz 信号源型号为 PLDRO-1000-13-INT, 其在 1 Hz 偏移处的相位噪声为 -110 dBc/Hz, 在 500 kHz 偏移处的相位噪声约为 -120 dBc/Hz. 电光调制后产生的带有啁啾的脉冲经过 900 m 单模光纤压缩后, 进入时间抖动测量光路中.

由于采用全光纤的光路, 时间抖动测量装置的设置十分便捷, 如图 3(b) 所示. 考虑到待测电光频率梳系统的输出在 1542 nm, 而 LO 光纤锁模激光器中心波长在 1574 nm 附近, 在 LO 输出添加以 1542 nm 为中心的 10 nm 光学带通滤波器 (band

path filter, BPF), 用来匹配 LUT 的中心波长. 锁模激光器的重复频率设定在 161 MHz 附近, 在实验中通过 ASOPS 信号的更新时间 $T_{\text{update}} = 1/\Delta f_{\text{eqv}}$ 来计算 Δf_{eqv} . 对于 LUT 的待测脉冲, 通过使用光纤环形器 (optical circulator, OC) 和延时光路的组合来产生脉冲对, 其中延时光路由准直器和对应的目标点反射镜组成. 根据数值模拟结果, 同时考虑到系统的等效重频差较大, 因此测量窗口应很小以降低技术噪声的影响, 在实验中将延时距离设置为 2 mm 附近. 然后将产生的脉冲对与 LO 输出一同进入 2×2 的保偏光纤耦合器中, 在耦合器的输出端, 连接至平衡放大光电探测器 (Thorlabs, PDB425C), 其可以消除直流噪声的影响, 此时由耦合器输出的干涉信号由光信号转化为电信号. 输出的电信号需要先使用低通滤波器进行重复频率信号的过滤, 之后先通过示波器进行观察, 观察到明显的 ASOPS 信号后, 由数据采集处理器 (National Instruments, PXIE-1078) 采集, 通过 LABVIEW 程序完成采集过程, 包括对干涉图的包络计算和峰值处理, 从而完成异步光学采样过程.

4 实验结果与讨论

基于搭建的电光频率梳系统和实验室已有的光纤锁模光频梳系统, 进行测量实验. 实验结果如图 4 所示, 图 4(a), (b) 分别为待测的电光频率梳系统的光谱图像和输出脉冲经过单模光纤压缩后的自相关图像. 电光频率梳光谱在 3 dB 范围内约 2.5 nm, 梳齿数量约 30 个. 电光频率梳输出脉冲使用自相关仪进行测量, 在高斯拟合条件下结果为 2.6 ps. 图 4(c) 给出了一对通过 LABVIEW 程序对干涉图进行包络提取处理后得到的 ASOPS 信号示意图, 在数据处理中, 需要对其脉冲进行高斯拟合, 电脉冲在时间轴上的位置由其峰值点所在位置表示, 脉冲之间的间隔对应于拉伸后的测量时间窗口. 可以看出采集的电脉冲信号信噪比并不是十分理想, 这主要包含两个方面的影响. 一方面, 电光频率梳系统工作重频在 10 GHz, 这意味着其脉冲峰值功率较低, 另一方面, 虽然在光纤激光器

输出端添加了带通滤波器来提高互相关效率, 但脉冲能量仍有较大损失. 通过采集的多组脉冲数据进行统计计算, 每组数据对应约 2000 组脉冲对.

由数据采集卡采集的脉冲进行数据处理后, 得到的直方图统计结果如图 4(d) 所示. 统计得到的表观周期抖动 σ 为 21 ns. 根据 (2) 式, 进行计算, 可以得到脉冲序列的周期抖动值 σ_0 为 3.86 fs. 在实验中设置的窗口条件下, 该抖动值是量子噪声主导下的高频时间抖动, 代表了待测电光频率梳与光纤锁模光梳的相对时间抖动, 在量子极限噪声占据主导的条件下, 典型的光纤光梳的时间抖动一般在 1 fs 左右 [34], 可知待测电光频率梳系统相位噪声值相对较高, 在基于级联电光调制器的电光频率梳系统中, 由于不存在谐振腔结构, 光脉冲序列的时间抖动受到低线宽 CW 激光器的限制较小, 而主要受到微波信号源相位噪声的限制.

根据脉冲周期抖动计算结果, 假设高斯白噪声为主, 则可以反推抖动功率谱, 如图 5 所示. 图 5 的红色曲线对应时间抖动功率谱曲线, 这是参照自

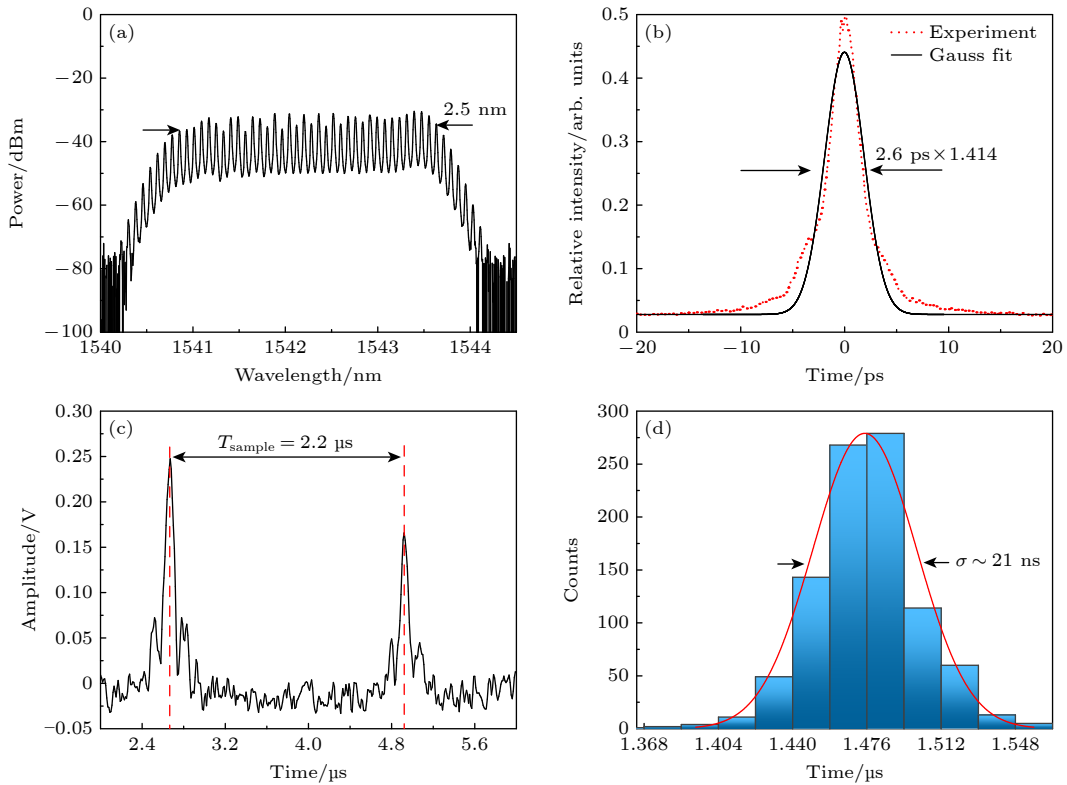


图 4 电光频率梳输出的光谱脉冲和 ASOPS 采集信号示意图 (a) 电光频率梳的输出光谱; (b) 电光频率梳经单模光纤压缩后的输出脉冲的自相关曲线及其高斯拟合曲线; (c) 采集的 ASOPS 信号示意图; (d) 由采集的脉冲对得到的直方图统计结果

Fig. 4. Schematic diagram of spectral pulse output and ASOPS acquisition signal of electro-optic combs: (a) The output spectrum of the electro-optic combs; (b) the autocorrelation curve and Gaussian fitting curve of the output pulse after electro-optic combs compression by single-mode fiber are obtained; (c) schematic diagram of collected ASOPS signals; (d) the statistical results of the histogram obtained from the collected pulses.

由运转的条件所绘制的, 可以观察到时间抖动功率谱呈现 20 dB/decade 的下降趋势. 在 10 GHz 载波条件下, 当偏置频率为 500 kHz 时, 抖动功率谱值约 $0.01 \text{ fs}^2/\text{Hz}$, 对应于 $-107 \text{ dBc}/\text{Hz}$ 的相位噪声. 图 5 的蓝色曲线为时间抖动累计曲线. 对于高重复频率的电光频率梳输出脉冲而言, 考虑量子极限条件下, 其脉冲周期抖动的绝对数值并不高, 但在一定时刻内脉冲数目要远远高于传统光纤锁模激光器, 因此可以观察到其累计抖动量会在低频区域迅速上升. 但是, 考虑到微波信号源的低频相噪特性较好, 对于低于 100 kHz 的傅里叶频率, 累积的时间误差的增速会显著放缓.

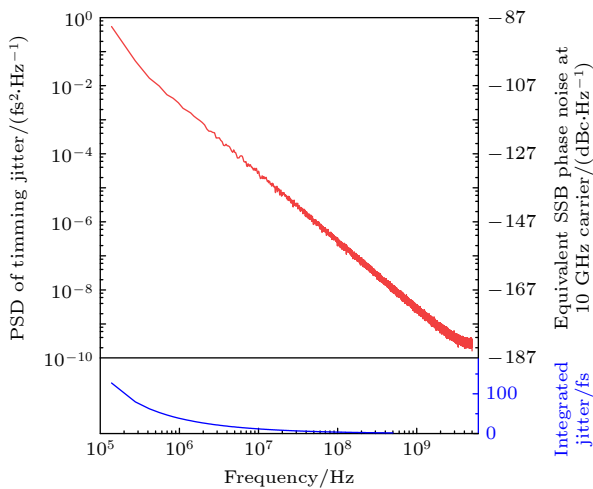


图 5 时间抖动的 PSD 曲线及累计时间抖动曲线示意图
Fig. 5. PSD curve of timing jitter and schematic diagram of cumulative timing jitter curve.

5 结 论

基于实验室搭建的级联调制器的电光频率梳系统, 以一台 161 MHz 重复频率的光纤锁模激光器作为参考基准, 使用异步光学采样方法结合统计直方图分析的方式, 对 10 GHz 重复频率、输出脉冲宽度 2.6 ps 的电光频率梳进行了时间抖动的测量, 根据表观周期抖动的直方图统计结果, 计算得到电光频率梳输出脉冲的周期抖动为 3.86 fs. 这种测量方法不需要高速光电探测器接收电光频率梳的超短脉冲序列, 也不需要使用复杂的电子锁相电路. 只需要低速光电探测器配合常规的数字示波器或数字采集卡, 就可以基于直方图分析对量子极限的时间抖动进行测量, 类似于通信中常用的眼图分析方法. 该方法设置便捷, 使用方便, 有望发展成

实验室环境中对于高重复频率的超短脉冲序列进行周期抖动测量的常规技术, 尤其适用于电光频率梳、微环频率梳等新型光学频率梳光源的时间抖动测量.

参考文献

- [1] Jones D J, Diddams S A, Ranka J K, Stentz A, Windeler R S, Hall J L, Cundiff S T 2000 *Science* **288** 635
- [2] Hansch T W 2006 *Rev. Mod. Phys.* **78** 1297
- [3] Giorgetta F R, Swann W C, Sinclair L C, Baumann E, Coddington I, Newbury N R 2013 *Nat. Photonics* **7** 435
- [4] Liu T Y, Zhang F M, Wu H Z, Li J S, Shi Y Q, Qu X H 2016 *Acta Phys. Sin.* **62** 020601 (in Chinese) [刘亭洋, 张福民, 吴翰钟, 李建双, 石永强, 石永强, 曲兴华 2016 *物理学报* **62** 020601]
- [5] Liang X, Wu T F, Lin J R, Yang L H, Zhu J G 2023 *Nanomanuf. Metrol.* **6** 61
- [6] Ma Q Y, Yu H Y 2023 *Nanomanuf. Metrol.* **6** 36
- [7] Shi J K, Ji R W, Li Y, Liu Y, Zhou W H, 2017 *Acta Phys. Sin.* **66** 134203 (in Chinese) [石俊凯, 纪荣祚, 黎尧, 刘娅, 周维虎 2017 *物理学报* **66** 134203]
- [8] Cui Y D, Zhang Y S, Huang L, Zhang A G, Liu Z M, Kuang C F, Tao C N, Chen D R, Liu X, Malomed B A 2023 *Phys. Rev. Lett.* **130** 153801
- [9] Martín-Mateos P, Jerez B, Acedo P 2015 *Opt. Express* **23** 21149
- [10] Zhang X, Yin K, Zhang J H, Li Y M, Yang J, Zheng X, Jiang T 2020 *Asia Communications and Photonics Conference (ACP)*, Chengdu, China, November 2–5, 2019 p1056
- [11] Xu G, Gelash A, Chabchoub A, Zakharov V, Kibler B 2019 *Phys. Rev. Lett.* **122** 84101
- [12] Durán V, Andrekson P A, Torres-Company V 2016 *Opt. Lett.* **41** 4190
- [13] Zhao X Y, Qu X H, Chen J W, Zheng J H, Wang J D, Zhang F M 2020 *Acta Phys. Sin.* **69** 090601 (in Chinese) [赵显宇, 曲兴华, 陈嘉伟, 郑继辉, 王金栋, 张福民 2020 *物理学报* **69** 090601]
- [14] Zhuang R, Ni K, Wu G H, Hao T, Lu L Z, Li Y, Zhou Q 2023 *Laser Photonics Rev.* **17** 2200353.1
- [15] Kim J, Song Y J 2016 *Adv. Opt. Photonics* **8** 465
- [16] Song Y J, Kim C, Jung K, Kim H, Kim J 2011 *Opt. Express* **19** 14518
- [17] Hou D, Lee C C, Yang Z, Schibli T R 2015 *Opt. Lett.* **40** 2985
- [18] Carlson D R, Hickstein D D, Zhang W, Metcalf A J, Quinlan F, Diddams S A, Papp S B 2018 *Science*. **361** 1358
- [19] Cai Y J, Sohanpal R, Luo Y, Heidt A M, Liu Z X 2023 *APL Photonics* **8** 110802
- [20] Watts R T, Murdoch S G, Barry L P 2016 *IEEE Photonics J.* **8** 1
- [21] Ishizawa A, Nishikawa T, Goto T, Hitachi K, Sogawa T, Gotoh H 2016 *Sci. Rep.* **6** 24621
- [22] Kim J, Richardson D J, Slavik R 2017 *Opt. Lett.* **42** 1536
- [23] Ishizawa A, Nishikawa T, Mizutori A, Takara H, Takada A, Sogawa T, Koga M 2013 *Opt. Express* **21** 29186
- [24] Lundberg L, Mazur M, Fulop A, Torres-company V, Karlsson M, Andrekson P A 2018 *Conference on Lasers and Electro-Optics*, San Jose, May 13–18, 2018 p2369
- [25] Sakamoto T, Kawanishi T, Tsuchiya M 2008 *Opt. Lett.* **33** 890
- [26] Metcalf A J, Quinlan F, Fortier T M, Diddams S A, Weiner

- A M 2015 *Electron. Lett.* **51** 1596
- [27] Xiao S J, Hollberg L, Newbury N R, Diddams S A 2008 *Opt. Express* **16** 8498
- [28] Peng H F, Lei P, Xie X P, Chen Z Y 2021 *Opt. Express* **29** 42435
- [29] Peng H F, Xu Y C, Guo R, Du H Y, Chen J B, Chen Z Y 2018 *Asia Communications and Photonics Conference*, Hangzhou, China, October 26–29, 2018 p364
- [30] Peng H F, Guo R, Du H Y, Xu Y C, Zhang C, Chen J B, Chen Z Y 2018 *International Conference on Information Optics and Photonics*, Beijing, China, July 8–11, 2018 p1269
- [31] He Z W, Li L Z, Zhang J J, Yao J P 2021 *Opt. Express* **29** 33491
- [32] Zhai K P, Wang W T, Zhu S, Wen H S, Zhu N H 2023 *IEEE Photonics J.* **15** 1
- [33] Bao C Y, Suh M G, Shen B Q, Safak K, Dai A, Wang H M, Wu L, Yuan Z Q, Yang Q F, Matsko A B, Kaertner F X, Vahala K J 2021 *Nat. Phys.* **17** 462
- [34] Shi H S, Song Y J, Yu J H, Li R M, Hu M L, Wang C Y 2017 *Opt. Express* **25** 10

Using asynchronous optical sampling to measure timing jitter of electro-optic frequency combs*

Ma Bo-Wen¹⁾ Dai Wen²⁾ Meng Fei³⁾ Tao Jia-Ning¹⁾ Wu Zi-Ling¹⁾
Shi Yan-Qing¹⁾ Fang Zhan-Jun³⁾ Hu Ming-Lie¹⁾ Song You-Jian^{1)†}

1) (State Key Laboratory of Precision Measurement Technology and Instruments, Tianjin University, Tianjin 300072, China)

2) (Shanghai Radio Equipment Research Institute, Shanghai 201109, China)

3) (Laboratory of Optical Frequency Standard, Time and Frequency Metrology Division,
National Institute of Metrology, Beijing 100029, China)

(Received 20 March 2024; revised manuscript received 19 May 2024)

Abstract

Electro-optic frequency combs (EOCs) are optical frequency combs constructed by phase modulation of single frequency lasers. The electro-optic modulated optical frequency combs have shown their unique advantages in many application fields due to their high repetition frequencies, high stabilities and other advantages, especially in precision measurement applications. Through accurate dispersion control, the electro-optical frequency combs can output ultra-short pulse laser sequences in the time domain, and their timing jitter characteristic is very important for precision measurement and other applications. This work presents a scheme to measure the timing jitter of the electro-optic combs directly in the time domain based on the principle of dual-comb asynchronous optical sampling method (ASOPS), which relies on temporal cross-correlation between the high repetition rate electro-optic combs and a low repetition rate passively mode-locked fiber laser. The ASOPS process allows timing jitter measurement in a magnified time scale where the timing jitter at a femtosecond level can be received and visualized by standard low speed electronics. We build a theoretical model for timing jitter measurement, conduct a numerical study to verify the model, and also construct an experimental system to characterize the period jitter of a 10-GHz electro-optic comb.

Firstly, the theoretical model for measuring timing jitter is established. In this work, the basic theory of measuring the timing jitter is discussed by analyzing the histogram directly in time domain through using the obtained ASOPS signal. Subsequently, numerical simulations are conducted to simulate the ASOPS process after establishing a sequence of Gaussian pulse train with quantum limited timing jitter. Another pulse train without timing jitter serves as a local oscillator. Through the square law optical detection after sum-frequency generation between LO and LUT, the ASOPS process can be realized and periodic jitter can be obtained directly through histogram statistical analysis. The simulation result is consistent with the theoretical result

* Project supported by the National Key R&D Program of China (Grant No. 2022YFF0706002).

† Corresponding author. E-mail: yjsong@tju.edu.cn

very well. Finally, an EOC system with cascaded modulators at a repetition rate of 10 GHz is designed and built, and a timing jitter measurement system is designed and built with an all-fiber configuration. The period jitter of 10-GHz EOC is measured by using a 161-MHz mode-locked fiber laser as local oscillator. Histogram analysis shows that the period jitter of the EOC is 3.86 fs.

This measurement technique does not require to use the intricate electrical phase-locked circuits or a high-speed photodetector to receive ultrashort pulses of EOC. Like the eye map analysis method commonly used in telecommunication, the histogram analysis can be used to determine the timing jitter approaching the quantum limit. This approach is easy to set up and operate, and it is anticipated to become a standard method of measuring period jitter of ultrashort pulse with high repetition frequency in a laboratory setting. It will be particularly useful for measuring timing jitters of the sources of novel high repetition rate optical frequency combs, such as micro-resonators and electro-optic frequency combs.

Keywords: electro-optic frequency combs, timing jitter, asynchronous optical sampling, phase noise

PACS: 42.65.Re, 05.40.Ca, 42.50.Lc, 42.55.Wd

DOI: [10.7498/aps.73.20240400](https://doi.org/10.7498/aps.73.20240400)



基于异步光学采样的电光频率梳时间抖动测量

马博文 戴雯 孟飞 陶家宁 武子铃 石岩青 方占军 胡明列 宋有建

Using asynchronous optical sampling to measure timing jitter of electro-optic frequency combs

Ma Bo-Wen Dai Wen Meng Fei Tao Jia-Ning Wu Zi-Ling Shi Yan-Qing Fang Zhan-Jun Hu Ming-Lie Song You-Jian

引用信息 Citation: *Acta Physica Sinica*, 73, 144203 (2024) DOI: 10.7498/aps.73.20240400

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.7498/aps.73.20240400>

当期内容 View table of contents: <http://wulixb.iphy.ac.cn>

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

双光梳非线性异步光学采样测距中关键参数的数值分析

Numerical analyses of key parameters of nonlinear asynchronous optical sampling using dual-comb system

物理学报. 2021, 70(18): 180601 <https://doi.org/10.7498/aps.70.20210565>

基于光学频率梳的超低噪声微波频率产生

Ultra-low noise microwave frequency generation based on optical frequency comb

物理学报. 2021, 70(13): 134204 <https://doi.org/10.7498/aps.70.20201925>

光源相位噪声对高斯玻色采样的影响

Investigation of Gaussian boson sampling under phase noise of the light source

物理学报. 2023, 72(5): 050302 <https://doi.org/10.7498/aps.72.20221766>

一种基于电光调制光频梳光谱干涉的绝对测距方法

Method of measuring absolute distance based on spectral interferometry using an electro-optic comb

物理学报. 2020, 69(9): 090601 <https://doi.org/10.7498/aps.69.20200081>

蓝宝石谐振体内的回音壁模电磁场分布

Electromagnetic field distribution of whispering gallery mode in a sapphire resonator

物理学报. 2022, 71(23): 234101 <https://doi.org/10.7498/aps.71.20221156>

谐振型电光相位调制及光电探测功能器件的研发及应用

Resonant electro-optic phase modulator and photodetector for stabilizing laser frequency and quantum optics

物理学报. 2023, 72(14): 148502 <https://doi.org/10.7498/aps.72.20230485>