

基于全光纤光谱干涉的多路超短脉冲时间同步 单次测量技术

梁彦^{1,2}, 易友建^{2,3}, 朱坪^{2*}, 张栋俊^{2,3}, 李展^{2,3}, 谢兴龙^{2,3**}, 康俊², 杨庆伟², 孙美智²,
梁潇², 朱海东², 郭爱林², 高奇², 欧阳小平², 章冬辉^{2,3}, 李林骏^{2,3}, 朱健强^{1,2,3***}

¹ 上海科技大学物质科学与技术学院, 上海 200120;

² 中国科学院上海光学精密机械研究所, 上海 201800;

³ 中国科学院大学材料与光电研究中心, 北京 100049

摘要 提出一种基于全光纤光谱干涉的多路超短脉冲大动态范围时间同步单次测量方法, 弥补了非线性相关法测量同步状态时测量范围小和示波器测量时分辨率差的不足, 解决了同步测量中空间光路的复杂性和单次实时测量的难题。首先对多路光纤阵列干涉测量进行仿真计算, 然后设计四路脉冲传输的光路并在实验中验证多路同步单次测量方法的可行性, 最后详细分析测量误差的来源和影响。该测量方法的最小同步时间精度为 5.3 fs, 测量范围为 1.055~14.751 ps, 与仿真结果有较好的一致性。该测量方法具有光纤链路易于集成、光谱干涉数据处理速度快、测量信号能量需求低等优势, 在多路超短脉冲激光相干合束系统中具有重要应用前景。

关键词 测量; 同步测量; 超短脉冲; 光谱干涉; 光纤阵列; 单次测量

中图分类号 O436 文献标志码 A

doi: 10.3788/CJL202148.1604003

1 引言

超短超强激光技术在过去 20 年间取得了长足的发展, 基于啁啾脉冲放大或者光参量啁啾脉冲放大技术的大科学激光装置的功率目前维持在数拍瓦的输出水平上。受限于非线性效应、大口径压缩光栅技术、增益带宽限制等因素, 很难进一步提升单束激光的输出功率^[1-4]。为了继续提升激光的输出能力, 基于多路激光的相干合束计划成为最有希望的技术路线之一。2018 年, 诺贝尔物理学奖得主 Gerard Mourou 将一万根单束能量为 1 mJ、重复频率为 10 kHz 的光纤激光合束为 10 J、10 kHz 的脉冲, 并将该脉冲作为“国际相干放大网络(ICAN)”的重要组成部分^[5-6]。但是有效的相干合束对束间同步提出了苛刻的要求^[7-10], 需要满足束间时间同

步抖动亚光波周期量级的条件。

近年来, 科学家们在相干合束的同步测量和控制中进行了许多尝试。2013 年, Chosrowjan 等^[11]通过改变光敏探测器的相对位置, 求解两个脉冲干涉条纹的相位差作为两束光的相对抖动量, 构造负反馈电路实现两束光的同步合束, 实验中的均方根偏差达 $\lambda/25$ 。2014 年, Bagayev 等^[12]结合放大光的慢反馈和种子光的快反馈调节系统, 实现了两束参量放大光的相干合束, 时间抖动控制量最小达到 110 as, 论证了超短超强激光系统中对参量放大光的相干合束可以显著增强激光输出能力。2016 年, Cui 等^[13]构造平衡互相关仪, 控制两束 50 fs 的激光同步在 2 个光波周期的延期内, 然后使用电子能量干涉仪实现对两束光亚周期量级的同步反馈控制和高精度时间同步测量, 时间抖动均方根偏差为 $\lambda/23$ 。

收稿日期: 2020-12-28; 修回日期: 2021-01-30; 录用日期: 2021-02-25

基金项目: 国家自然科学基金(12074399, 12004403, 61705245, 11704392)、中国科学院战略性先导科技专项(XDA25020105, XDA25020306)、中国科学院重点实验室创新基金(CXJJ-2019S015)、上海市青年科技英才扬帆计划(19YF1453500)、上海市科技创新行动计划(19560713700)、上海市软科学研究计划(20692114101)

通信作者: *zhp1990@siom.ac.cn; **xiexl329@mail.shcnc.ac.cn; ***jqzhu@mail.shcnc.ac.cn

这些研究进展的实现大多数基于直接光电探测、光学互相关、时间空间干涉^[14-17],但是这些方法需要保持两束光的时间间隔在相干时间内,限制了飞秒脉冲同步测量范围在 1 ps 以内。而电子示波器的时间分辨率很难达到 10 ps 以下,因此精确测量 1~10 ps 内的脉冲延时难度很大^[18]。此外,对于多路超短脉冲相干合束的在线同步测量,使用上述方法操作起来较为复杂,而且无法做到单次测量。光谱干涉可以测量两束光脉冲的光谱相位差,是一种线性测量方法,利用单次实验数据就可以求解两个干涉脉冲的时间延迟,因此对实验数据的处理速度比非线性测量方法快^[19-21],而且测量范围由光谱仪分辨率决定,可以动态调节,填补了示波器同步法和非线性测量范围的盲区。

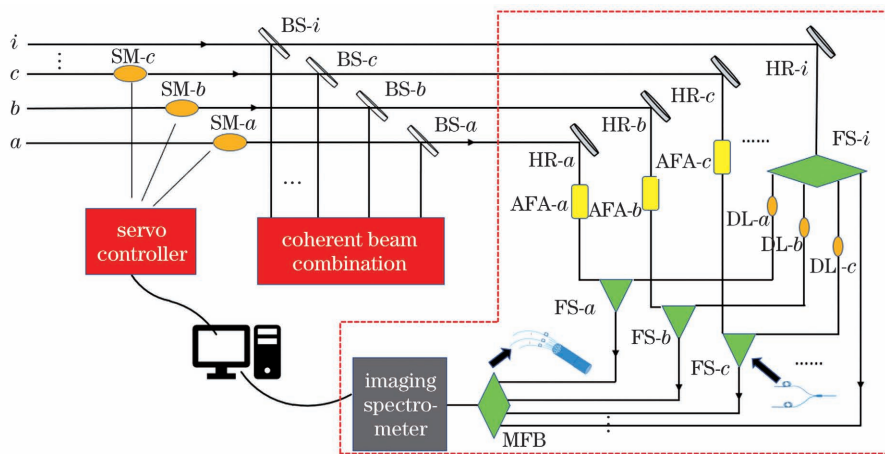
光纤阵列作为一种优秀的光波导阵列,占用空间小、易于集成、抗干扰性好,因此本文提出了一种基于光谱干涉的全光纤同步测量方法。光纤链路经过标定后,所提方法具有将待测激光脉冲从任意位置引导到测量平台的能力,将集成任意路数的光纤合束器输入到一台光谱仪中,最大效率地利用了实验仪器。首先对多路光纤阵列干涉测量进行仿真计算,然后在实验中验证多路同步单次测量方法的可行性,最后详细分析测量误差的来源和影响。所提方法充分发挥了光谱干涉的线性技术优势,弥补了非线性相关法测量同步状态时测量范围小和示波器

测量时分辨率差的不足,在线测量中使用激光脉冲的部分漏光实现测量臂和参考臂干涉信号的获取,数据处理速度较非线性测量方法有显著提升,可以保证数十路空间激光同步测量的单次性和时效性,克服了工程应用中多路激光同步测量中光学元件冗杂、效率低的问题,在多路超短脉冲激光相干合束系统中具有重要应用前景。

2 原理与理论分析

2.1 测量原理

基于全光纤光谱干涉的多路激光脉冲时间同步测量原理如图 1 所示。高功率激光装置的多路脉冲传输到终端,在靶室外将采集到的各路脉冲进入靶球前的部分光作为采样光耦合到光纤中,在第 i 路,使用 $1 \times i$ 路光纤分束器(FS)使信号产生 i 路参考光,每路参考光链路中都含有一个光纤延迟线(DL),用来在光纤中产生相对于测量光的固定延时。把 a 到 $i-1$ 路光纤中的信号作为待测光,每路待测光都接有一只光纤衰减器(AFA),通过调节待测光 and 对应参考光的光强比例,光谱干涉的条纹对比度提升。每一路待测光和对应参考光路中的脉冲共同进入反向放置的 FS,输出干涉信号,合束后的第 $i-1$ 路干涉信号和 1 路参考信号由多路光纤集束器(MFB)导入到成像光谱仪。由于所提同步测量方法需要的能量较少,因此每路脉冲的大部分能量可用于相干合束。



SM: stepping motor; BS: beam splitter; HR: high reflector;
AFA: adjustable fiber attenuator; DL: delay line; FS: fiber splitter; MFB: multipath fiber buncher

图 1 基于全光纤光谱干涉的多路激光脉冲时间同步测量原理图

Fig. 1 Schematic of time synchronization measurement of multiple laser pulses based on all-fiber spectral interferometry

由于光谱干涉的最小测量值必须大于待测量脉冲的脉宽^[19],当两束脉冲的时间间隔小于脉宽时,反解干涉条纹不能精确得到两个脉冲间的相对时间差,测量同步状态较为困难。而且直接求解干涉条

纹数据时,只能得到参考光和信号光的相对时间差,无法获知参考光和信号光的时序前后状态。通过不同参考光链路中的延迟线,引入参考光相对于测量光的固定延迟 $\tau_1, \tau_2, \tau_3, \dots, \tau_{i-1}$,调节 a, b, c, \dots ,

$i-1$ 激光链路的精密平移台 (SM), 当求解光谱仪所记录条纹得到的延时等于 $a, b, c, \dots, i-1$ 路光纤和对应参考光纤的固有延时 $\tau_1, \tau_2, \tau_3, \dots, \tau_{i-1}$ 时, $a, b, c, \dots, i-1$ 路脉冲和 i 路参考脉冲在进入光纤前具有相同的光程。利用光谱干涉测量的线性特性, 实现数据实时采集和处理是可能的, 当伺服电机系统带宽足够高时, 可以用于对光路抖动引起的时延差进行实时反馈控制, 以达到参考脉冲和待测脉冲的时间同步。光谱干涉信号的数学表达式为

$$I(\omega) = I^{dc}(\omega) + I^{ac}(\omega)e^{i\omega\tau} + [I^{ac}(\omega)e^{i\omega\tau}]^* \quad (1)$$

$$I^{dc}(\omega) = E_r^\omega \cdot (E_r^\omega)^* + E_t^\omega \cdot (E_t^\omega)^* \quad (2)$$

$$I^{ac}(\omega) = E_r^\omega (E_t^\omega)^* e^{i[\Phi_r(\omega) - \Phi_t(\omega)]} \quad (3)$$

式中: E_t^ω 和 E_r^ω 分别为待测脉冲和参考脉冲的复振幅; ω 为脉冲的频率; $\Phi_t(\omega)$ 和 $\Phi_r(\omega)$ 分别为待测脉冲和参考脉冲的频域相位; $\tau = \tau_{free} + \tau_{fiber}$, τ_{free} 为两脉冲在空间传输部分的延时差, τ_{fiber} 为两束脉冲在光纤中产生的延时; $I(\omega)$ 为光谱仪探测到的信号; $I^{dc}(\omega)$ 为直流项, 是两个脉冲的光强度和, 不含相位信息; $I^{ac}(\omega)$ 为交流项, 带有与脉冲相关的相位信息。

光谱仪中光谱维度信号疏密程度随 τ 的变化而变化, 对光谱图数据进行处理得到 τ 。数据处理过程: 首先从成像光谱仪谱图数据中提取水平维度的干涉信号数据, 并适当进行降噪处理; 然后对每一行条纹数据进行边带插值, 即通过增加采样点数扩大频谱范围来提高时域分辨率, 有利于提升时间延迟恢复的精度; 最后将处理过的信号从以波长为自变量的函数转换为以角频率为自变量的函数, 并计算其傅里叶逆变换信号, 求得干涉信号的时域波形。从文献[20]可知, 对于时域中的干涉波形, 在直流峰值和交流峰值无混叠的情形下, 交流峰值的横坐标即为两个光谱干涉脉冲的时间差。

2.2 测量参数分析

利用傅里叶变换对和波长与频率的微分关系, 可以计算出光谱分辨率和采样时间长度的关系, 数学表达式为

$$d\lambda = \lambda^2 / c \times \Delta T \quad (4)$$

式中: ΔT 是采样时间长度; $d\lambda$ 是光谱分辨率, λ 是脉冲的中心波长; c 是光速。由(4)式可知 ΔT 与 $d\lambda$ 成反比。从定性的角度看, (4)式表明待测脉冲和参考脉冲的时间差在 $(-\frac{\Delta T}{2}, \frac{\Delta T}{2})$ 这个区间时, 光谱干涉谱图有条纹出现。文献[22]对光谱干涉的讨论

中提到两束脉冲的时间差 τ 与光谱干涉条纹间距 $\Delta\omega$ 的关系, 公式为

$$\Delta\omega = \frac{2 \times \pi}{\tau} \quad (5)$$

$$\Delta\lambda = \frac{\lambda^2}{c \times \tau} \quad (6)$$

(5)式化解得(6)式, 利用(6)式可以预判光谱干涉条纹能解出的 τ_{max} 和 τ_{min} , τ_{max} 为最大时间间隔, τ_{min} 为最小时间间隔。但是直接使用光谱干涉条纹解出的时域波形图的交流峰值对应的 $\pm\tau$ 没有方向性, 而且存在一个 τ_{min} 。当两束脉冲的时间差小于 τ_{min} 时, 不利于多路脉冲和参考光的零同步状态测定, 因此使用固定时间偏置, 通过比较 τ 和 τ_{fiber} , 即可确定两束短脉冲的绝对时间差。

例如, 当 $d\lambda = 0.125 \text{ nm}$, $\lambda = 1053 \text{ nm}$ 时, 假设最小条纹间距 $\Delta\lambda_{min}$ 为 $2 \times d\lambda$, 使用(6)式计算得 $\tau_{max} = 14.784 \text{ ps}$; 对于 200 fs 脉宽的高斯脉冲, 光谱半峰全宽约为 8 nm , 假设在半峰全宽区域内最少有 3 个条纹, 可以精确解出参考光和待测光的时延, 那么最大条纹间距 $\Delta\lambda_{max}$ 为 4 nm , 计算得 $\tau_{min} = 924 \text{ fs}$ 。在此基础上, 对多路脉冲光谱干涉同步测量进行了仿真, 图 2 展示了 12 路待测光和参考光的干涉条纹。仿真中设参考臂相对于待测臂的固定时间延迟 τ_{fiber} 为 7 ps , 对每行干涉信号数据进行处理得到 τ , 记录在二维谱图右侧。经过分析得到: 每行条纹得到的时延 τ 大于 7 ps , 表明参考光在自由空间中的光程大于待测光; τ 小于 7 ps , 表明参考光在自由空间中的光程小于待测光。因此经过偏置后可以计算出待测光和参考光的时间差位于 $(\tau_{fiber} - 14.784 \text{ ps}, \tau_{fiber} - 924 \text{ fs})$, 区间内的正负可以判断待测光和参考光的快慢。

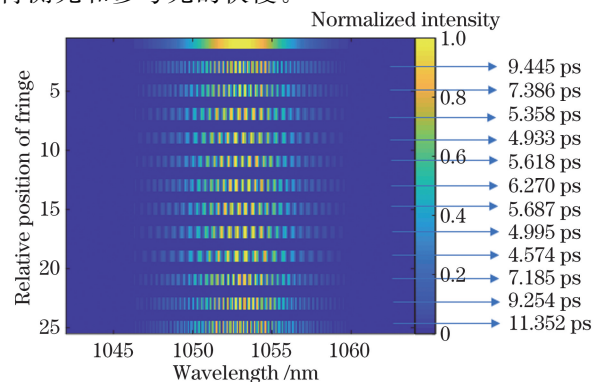


图 2 12 路激光脉冲时间同步测量的全光纤光谱干涉二维谱图

Fig. 2 2D all-fiber spectral interferometry spectrogram measured by 12 laser pulse time synchronization

3 实验结果与讨论

3.1 实验验证

为了验证基于全光纤光谱干涉的多路超短脉冲时间同步单次测量方法的可行性,仅选择三路干涉信号展示多路测量的可能性,以四路飞秒激光的时间同步测量为例进行了验证实验,实验装置如图 3 所示。

1053 nm 波长 200 fs 脉宽的锁模振荡器(High Q-LASER)的输出功率为 260 mW,出射的激光经过 3 块 BS 和 1 块镀银膜 HR 后为四路脉冲。每一

路光都需经过精密延迟台(安装有 Thorlabs 高精度步进电机,NRT100 系列)实现空间光程的动态可调,四束光分别被自聚焦透镜(GL)耦合输入到 a, b, c, d 光纤链路中。使用 1×4 FS 将 d 路光束等强度分割,然后反向使用 1×2 FS,将 a、b、c 路待测光与 d 链路对应的分束脉冲合束,三路干涉信号和一路参考信号通过定制的多路光纤集束器输入到成像光谱仪(SpectraPro HRS-750 系列,Princeton Instruments),其 CCD 像素为 512×2048,实验中设计加工的光纤器件使用了单模光纤(HI780, corning)。

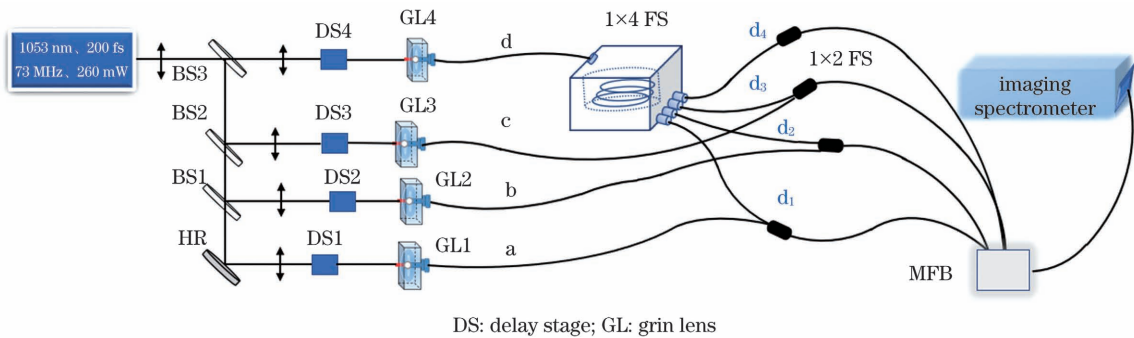


图 3 实验光路

Fig. 3 Experimental light path

图 4 为成像光谱仪采集到的多路光谱信号二维谱图,第 1 行数据为 d_1 路信号的光谱数据,作为参考光谱,第 2~4 行条纹数据分别为 a、b、c 路信号和 d_1 、 d_2 、 d_3 路参考光的干涉信号。图 4 中央二维强度

图中,每条光谱在竖直方向大约占据 20 像素,因此成像光谱仪探测面具有足够的能力记录 20 条干涉链路条纹数据。

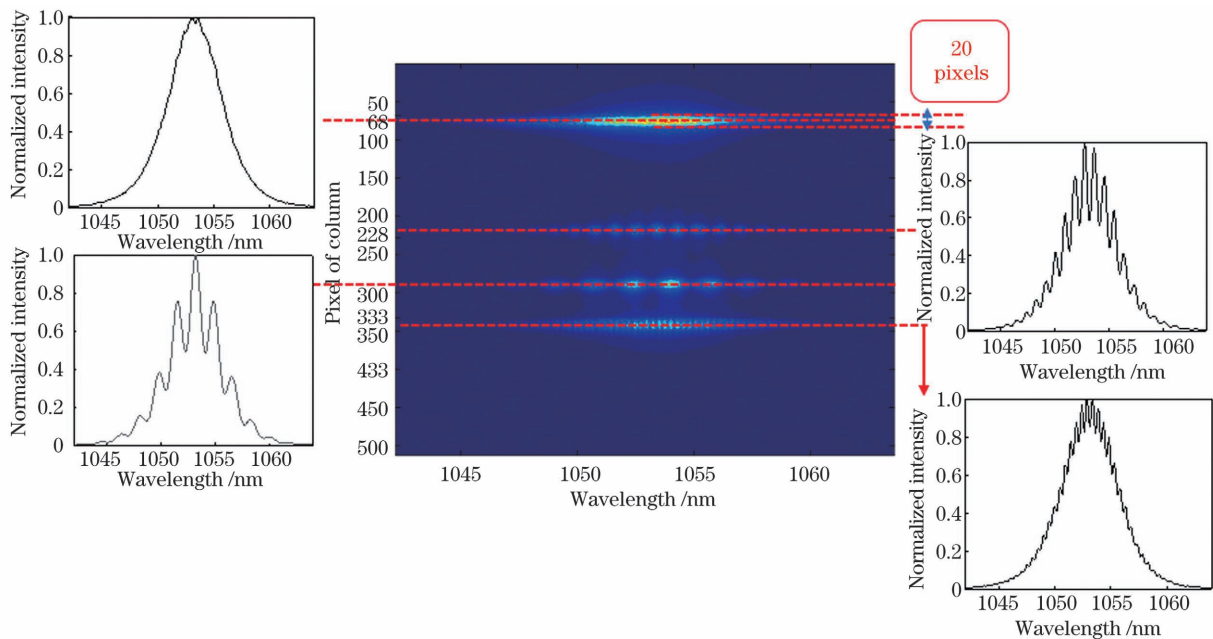


图 4 光谱仪得到的实验谱图

Fig. 4 Experimental spectrogram obtained by spectrometer

3.2 测量范围分析

对所提方法的测量范围进行了实验论证和分析,使用 a、b、c 光路上的 DS1、DS2、DS3 控制参考光和测量光的光程差,使得测量光相对参考光的光程从零开始逐渐增大,对应两束脉冲的光程差从零逐渐增大,直到利用两脉冲的光谱干涉谱图求解得到的时域波形中直流分量和交流分量不会发生混叠,干涉信号和数据恢复结果如图 5(a)、(b)所示,求解得到两个信号的最小延时差为 ± 1.055 ps。继续增大测量臂和参考臂之间的时间差,在成像光谱仪上观测到条纹逐渐变密,直到完全消失,在数据处理中,求解得到两个信号的最大延时差为 ± 14.751 ps,干涉信号

能够有效恢复两个脉冲间的时延差。干涉信号和数据恢复结果如图 5(c)、(d)所示。

虽然图 5(d)在 ± 10.2 ps 和 ± 5 ps 处有峰值,且峰值接近 ± 14.751 ps 处峰值大小,但随着两个脉冲时延差的增大,交流峰值和直流峰值之比呈现指数级的减小。图 5(e)、(f)展示了干涉条纹解出的延时差为 5 ps、10.2 ps 时的时域干涉波形,因此可以确定图 5(d)中位于 ± 10.2 ps 和 ± 5 ps 处的峰值是噪声峰值。

在实验中微调成像光谱仪入口狭缝,能实现光谱仪波长分辨率的变化,实验中光谱干涉条纹可以解出 $1.055 \sim 14.751$ ps 的干涉两臂时间差,若在多

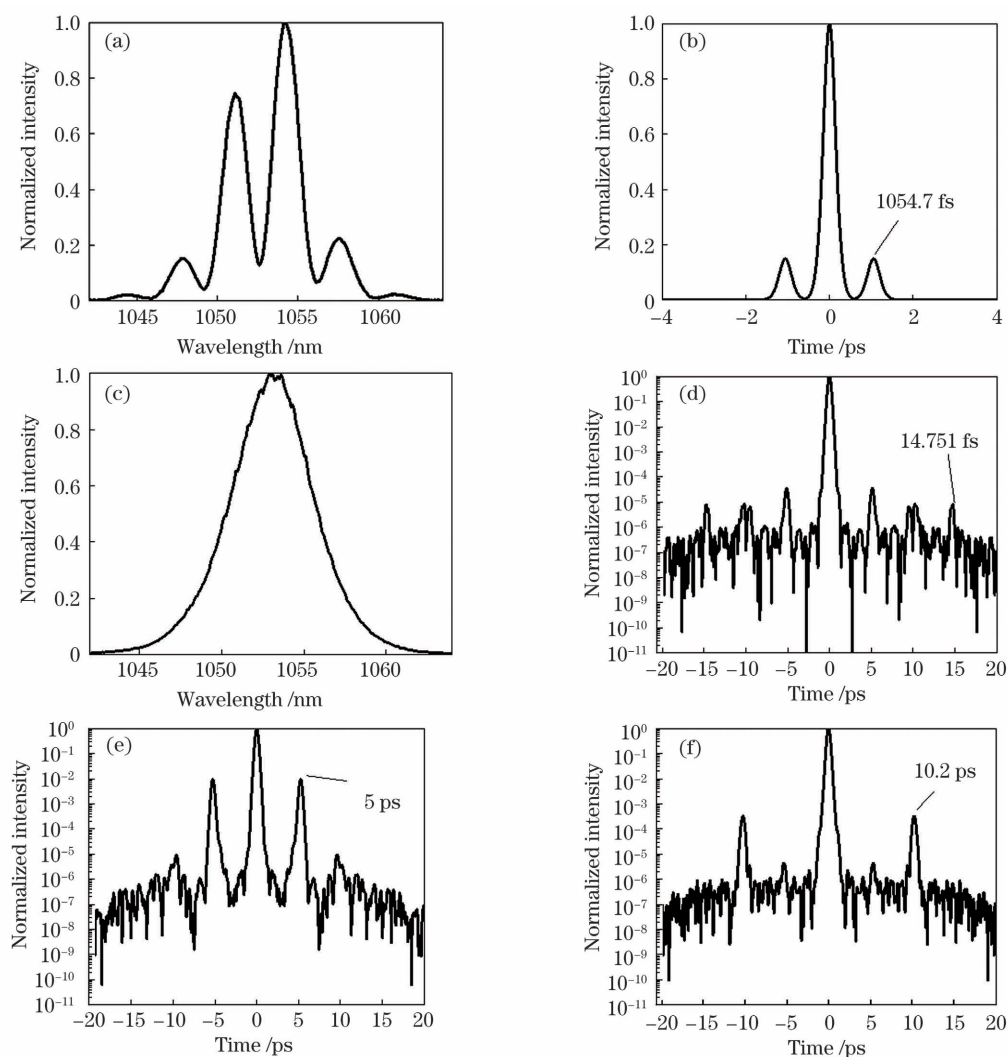


图 5 实验所得测量范围。(a)最小测量值时的光谱干涉波形;(b)最小测量值时的时域波形;(c)最大测量值时的光谱干涉波形;(d)最大测量值时的时域波形;(e) $\tau=5$ ps 的时域波形;(f) $\tau=10.2$ ps 的时域波形

Fig. 5 Range of measurements in the experiment. (a) Spectrum interference waveform of the minimum measured value; (b) temporal waveform of the minimum measured value; (c) spectrum interference waveform of the maximum measured value; (d) temporal waveform of the maximum measured value; (e) temporal waveform at $\tau=5$ ps; (f) temporal waveform at $\tau=10.2$ ps

路脉冲相干合束中通过光纤延时线设置参考光相对于待测光滞后时间 τ_{fiber} , 当光谱干涉条纹解出的时间 τ 满足 $1.055 \text{ ps} < \tau < \tau_{\text{fiber}}$ 时, 参考光传输快于待测光; 若 $\tau_{\text{fiber}} < \tau < 14.751 \text{ ps}$, 则参考光传输慢于待测光; 当 $\tau = \tau_{\text{fiber}}$ 时, 待测光和参考光在进入光纤之前达到了零同步状态。可以求出参考光和待测光的时间差为 $\tau_{\text{fiber}} - 14.751 \text{ ps} \sim \tau_{\text{fiber}} - 1.055 \text{ ps}$ 。实验中存在各种噪声和抖动, 导致测量值 τ_{max} 、 τ_{min} 确定的测量范围与理论范围相比略微收缩, 因此基于全光纤光谱干涉的同步测量范围在理论计算和实验结果之间保持了较好的一致性。

3.3 测量精度分析

为了分析理论模型中提出的测量臂和干涉臂固有时间偏置 $\tau_1, \tau_2, \tau_3, \dots, \tau_{i-1}$ 对所提测量方法的影响, 使用 Thorlabs 步进电机控制两个干涉臂的时间间隔从最小可测量值 τ_{min} 变化到最大可测量值 τ_{max} , 在 7 ps 之前、之后各取 4 个时间间隔 (s_T) 来记录 100 幅干涉谱图, 数据处理后得到的统计结果如图 6 所示。 β 表示通过求解光谱条纹图得到的测量光和参考光的时延差的统计平均值偏离 s_T 的值。在测量范围内, 在两个脉冲 s_T 为 1.103 ps 时, β 约等于 37 fs ; 在两个脉冲 s_T 为 6.139 ps 时, β 达到最小值 3.5 fs 。随着 s_T 继续增大, β 又逐渐变大。

而 γ 代表在每个 s_T 处, 数据处理结果偏离 β 的范围。从图 6 右侧纵坐标看出: 随着 s_T 的增大, γ 范围逐渐缩小, 说明每幅光谱条纹图求解得到的时间延时偏离 s_T 的值趋于 β ; 当 s_T 大于 6.139 ps 小于 7.783 ps 时, γ 的变化范围非常小, 说明测量结果的鲁棒性达到最好状态; 而当 s_T 大于 7.783 ps 小于 τ_{max} 时, γ 变化范围又逐渐增大。

在理论分析阶段, 作者认为固有时延差 τ_{fiber} 有助于测量参考光与待测光的绝对时延, 实验阶段证明, 当 τ_{fiber} 置于可测量范围的中心区域时, 数据处理结果的鲁棒性最好, 统计结果显示测量值偏离真实值的抖动量在 10 fs 以下。因此在全光纤光谱干涉时间同步测量实验中, 利用光纤延迟线调节 τ_{fiber} , 使其等于测量范围的中心值 τ_{center} 。本次实验的 τ_{center} 为 7.37 ps 。调节输入脉冲在空间光路中的精密平移台, 对光谱仪所记录干涉条纹进行求解, 得出的时间延时等于 τ_{fiber} , 此时可以认为在自由空间传输的待测光和参考光实现了零同步, 从图 6 中估测此时的时间同步精度为 5.3 fs 。实验中由于存在气流扰动、光谱仪电流暗噪声、机械振动等因素, 读取的干涉条纹峰值对应的波长或频率值存在不确定

性, 造成了同一 s_T 处的不同时域波形中 τ 值出现抖动的结果。但是不同的偏置点光谱干涉条纹密度不同, 使得提到的干扰因素对测量数据的稳定性影响程度不一样, 因此在不同偏置点处的数据处理精度不同。

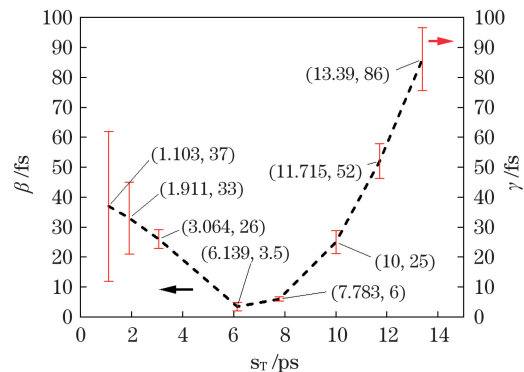


图 6 测量误差和脉冲时间间隔的关系

Fig. 6 Relationship between measurement error and pulse spacing

4 结 论

全光纤光谱干涉时间同步测量方法在设计上结合了光谱干涉和光纤阵列的优势, 通过仿真和实验论证了基于光谱干涉的全光纤时间同步法可以实现单次、多路、大动态范围的实时测量。实验结果和理论分析结果的一致性较好, 利用实验统计结果得到偏置延迟 τ_{fiber} 的最优解。测量范围由光谱干涉条纹间距决定, 理论仿真中使用两干涉臂偏置在大于脉宽的时间间隔上进行测量, 通过实验中的数据证明, 这一固有时间偏置设置在可测量范围的中心区域时可以提升同步测量精度, 因此使用全光纤光谱干涉作为多路短脉冲相干合束的在线同步测量方案, 该方案可以满足超短超强激光装置单次、实时、多路测量的诊断要求。在之后的研究中, 计划使用该方法作为多路激光相干合束同步控制的测量手段。

参 考 文 献

- [1] Perry M D, Pennington D, Stuart B C, et al. Petawatt laser pulses [J]. Optics Letters, 1999, 24 (3): 160-162.
- [2] Zeng X M, Zhou K N, Zuo Y L, et al. Multi-petawatt laser facility fully based on optical parametric chirped-pulse amplification [J]. Optics Letters, 2017, 42(10): 2014-2017.
- [3] Zhu J Q, Xie X L, Sun M Z, et al. Analysis and construction status of SG-II 5 PW laser facility [J]. High Power Laser Science and Engineering, 2018, 6

- (2): 115-127.
- [4] Danson C N, Haefner C, Bromage J, et al. Petawatt and exawatt class lasers worldwide[J]. *High Power Laser Science and Engineering*, 2019, 7(3): 172-225.
- [5] Klenke A, Breilkopf S, Kienel M, et al. 530 W, 1.3 mJ, four-channel coherently combined femtosecond fiber chirped-pulse amplification system[J]. *Optics Letters*, 2013, 38(13): 2283-2285.
- [6] Zhang Z G. Coherent pulse stacking: an innovation beyond the chirped pulse amplification[J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2017, 54(12): 120001. 张志刚. 相干脉冲堆积: 超越啁啾脉冲放大的新技术[J]. *激光与光电子学进展*, 2017, 54(12): 120001.
- [7] Cao J Q, Lu Q S, Hou J, et al. Influence of combining errors in the system for coherent combining of fiber lasers on the far field of output[J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2008, 35(3): 351-358. 曹润秋, 陆启生, 侯静, 等. 光纤激光器相干合成系统中组束误差对远场光场的影响[J]. *中国激光*, 2008, 35(3): 351-358.
- [8] Goodno G D, Shih C, Rothenberg J E. Perturbative analysis of coherent combining efficiency with mismatched lasers[J]. *Optics Express*, 2010, 18(24): 25403-25414.
- [9] Klenke A, Seise E, Limpert J, et al. Basic considerations on coherent combining of ultrashort laser pulses[J]. *Optics Express*, 2011, 19(25): 25379-25387.
- [10] Mu J, Wang X, Zuo Y L, et al. Time synchronization step detection for short pulses using spatial-spectral interference and far field[J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2020, 47(4): 0401003. 母杰, 王道, 左言磊, 等. 基于空谱干涉和远场的分步式短脉冲激光时间同步探测[J]. *中国激光*, 2020, 47(4): 0401003.
- [11] Chosrowjan H, Furuse H, Fujita M, et al. Interferometric phase shift compensation technique for high-power, tiled-aperture coherent beam combination[J]. *Optics Letters*, 2013, 38(8): 1277-1279.
- [12] Bagayev S N, Leshchenko V E, Trunov V I, et al. Coherent combining of femtosecond pulses parametrically amplified in BBO crystals[J]. *Optics Letters*, 2014, 39(6): 1517-1520.
- [13] Cui Y, Gao Y Q, Zhao Z X, et al. High precision and large range timing jitter measurement and control of ultrashort laser pulses[J]. *IEEE Photonics Technology Letters*, 2016, 28(20): 2215-2217.
- [14] Keller U, Li K D, Rodwell M J W, et al. Noise characterization of femtosecond fiber Raman soliton lasers[J]. *IEEE Journal of Quantum Electronics*, 1989, 25(3): 280-288.
- [15] 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.
- [16] Tian J, Wei Z, Wang P, et al. Independently tunable 1.3 W femtosecond Ti:sapphire lasers passively synchronized with attosecond timing jitter and ultrahigh robustness[J]. *Optics Letters*, 2005, 30(16): 2161-2163.
- [17] Shelton R K, Foreman S M, Ma L S, et al. Subfemtosecond timing jitter between two independent, actively synchronized, mode-locked lasers[J]. *Optics Letters*, 2002, 27(5): 312-314.
- [18] Zhu H H, Wang X C, Huang W F, et al. High-precision time-synchronization fiducial system of SG-II high-power laser driver[J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2019, 46(11): 1101011. 朱浩瀚, 汪小超, 黄文发, 等. 神光-II激光装置高精度时间同步时标系统[J]. *中国激光*, 2019, 46(11): 1101011.
- [19] Fittinghoff D N, Bowie J L, Sweetser J N, et al. Measurement of the intensity and phase of ultraweak, ultrashort laser pulses[J]. *Optics Letters*, 1996, 21(12): 884-886.
- [20] Lepetit L, Cheriaux G, Joffre M. Linear techniques of phase measurement by femtosecond spectral interferometry for applications in spectroscopy[J]. *Journal of the Optical Society of America B*, 1995, 12(12): 2467-2474.
- [21] Takeda M, Ina H, Kobayashi S. Fourier-transform method of fringe-pattern analysis for computer-based topography and interferometry[J]. *Journal of the Optical Society of America*, 1982, 72(1): 156-160.
- [22] Walmsley I A, Dorrer C. Characterization of ultrashort electromagnetic pulses[J]. *Advances in Optics and Photonics*, 2009, 1(2): 308-437.

Single-Shot Synchronous Measurement Technique for Multichannel Ultra-Short Pulse Lasers Based on All-Fiber Spectral Interference

Liang Yan^{1,2}, Yi Youjian^{2,3}, Zhu Ping², Zhang Dongjun^{2,3}, Li Zhan^{2,3}, Xie Xinglong^{2,3**}, Kang Jun², Yang Qingwei², Sun Meizhi², Liang Xiao², Zhu Haidong², Guo Ailin², Gao Qi², Ouyang Xiaoping², Zhang Donghui^{2,3}, Li Linjun^{2,3}, Zhu Jianqiang^{1,2,3***}

¹ School of Physical Science and Technology, ShanghaiTech University, Shanghai 200120, China;

² Shanghai Institute of Optics and Fine Mechanics, Chinese Academy of Sciences, Shanghai 201800, China;

³ Center of Materials Science and Optoelectronics Engineering, University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China

Abstract

Objective In the past 20 years, ultra-short ultra-intense laser technology has experienced rapid development. However, the maximum output power of these lasers is limited by nonlinear effects, large diameter compression grating technology, gain bandwidth limitations, and other factors. One of the most promising technologies to further enhance output ability is coherent beam combining. Effective coherent beam combining requires strict inter-beam synchronization. In recent years, many attempts have been made to improve synchronous measurement and control. The research progress of most implementations has been solely based on photoelectric detection, optical balanced cross-correlation, and temporal and spatial interferences. Nevertheless, these methods need to maintain the time interval of the two beams in coherent time, limiting the femtosecond pulse synchronous measurement range within 1 ps. The ability of an electronic oscilloscope to achieve a time resolution less than 10 ps is difficult; therefore, it is more difficult to accurately measure the pulse delay within 1–10 ps. In addition, for online synchronous measurement of a multichannel ultra-short pulse coherent beam combining system, the abovementioned methods are more complicated to implement and cannot achieve a single-shot measurement. In this paper, a single-shot measurement method for a multichannel ultra-short pulse with large dynamic range time synchronization based on all-fiber spectral interference is proposed. This method has a wider measurement range to measure synchronization than the nonlinear correlation method and a larger measurement accuracy than an oscilloscope. Our method improves efficiency in multichannel laser synchronous measurements for engineering applications and has important application potential for multichannel ultra-short pulse laser coherent beam combining systems.

Methods First, theoretical and simulation analyses based on multichannel optical fiber array spectral interferometry were carried out. Predictions of τ_{\min} and τ_{\max} for the designated measurement range were made according to Equation (6). Considering the purpose of synchronous measurements, this study created the concept of fixed time offset. The beneficial effect of this concept is that through the comparison of measured values and fixed offset time, we can determine the absolute time difference between the referenced light and the light to be measured. Moreover, with a fixed offset time, when the measured values were equal to the fixed offset times introduced by optical delay lines on the referenced light fiber paths, the two pulses reached a zero-synchronization state. In our experiment, the feasibility of the single-shot multichannel synchronous measurement method was verified. The experimental optical path was built using the path of a four-channel pulse synchronous measurement as an example (Fig. 3). The three formed interference signals and one beam of reference light were input to the imaging spectrometer using a multipath fiber buncher.

Results and Discussions The spectrogram in the experiments is recorded by an imaging spectrometer, which indicates that the spectrometer has the ability to record 20 signals (Fig. 4). The delay, τ , between the reference and measured beams is obtained through the data processing method described in Section 2.1. This method illustrates that τ_{\max} is equal to 14.751 ps and τ_{\min} is equal to 1.055 ps, which determine the measurable range (Fig. 5). From experimental results, the range that can be measured is slightly less than the theoretical interval, mainly due to airflow disturbances, mechanical vibration, and dark current noise from the spectrometer. For measurement precision of different offset points, the deviation of the statistical mean value of multiple measurement results is obtained from the present value. In Figure 6, it is shown that with the increase of temporal spacing (TS) between

the two pulses, the β value decreases. When TS reaches 6.139 ps, the β value is at its minimum. When TS is greater than 6.139 ps, the β value increases continuously. The measured jitter, γ , is shown on the right vertical coordinate of Figure 6 and it shows the same trend as the β value (Fig. 6). Measurement error is because of uncertainty of the wavelength or frequency spacing of the interference fringe in the spectrogram caused by noise. However, the degree of response of different fixed offset times to noise is different. Therefore, the measurement accuracy is varied at different fixed offset times.

Conclusions This paper demonstrates that the single-shot synchronous measurement technique for a multichannel ultra-short pulse laser based on all-fiber spectral interference is feasible through simulation and experiment. The measuring range is determined by the spectral interference fringe spacing, and the theoretical simulation results show that a fixed time offset is beneficial for the realization of a zero-synchronization state measurement. The optimal solution of the offset time is obtained using experimental statistical results. Experimental data prove that setting the fixed time offset in the center of the measurable range area can improve measurement accuracy. The minimum time synchronization accuracy is 5.3 fs and the measurement range is 1.055–14.751 ps, which are in good agreement with results of the theoretical analysis. The all-fiber spectral interference synchronization measurement method combines the characteristics of spectral interference and optical fiber array in design. The advantages of the method are easy integration of an optical fiber path, fast processing speed of spectral interference data, and low-energy demand of signals. Our method can satisfy the ultra-short ultra-intense laser facility real-time and multichannel measurement diagnosis requirements. The method also makes up for a small measurement range and poor temporal resolution when measuring the synchronization state using the nonlinear correlation method and an oscilloscope, respectively. The complexity of the configuration and difficulty of a single-shot measurement in multichannel synchronous measurements are solved. Therefore, our method has important application prospects in multichannel ultra-short pulse laser coherent beam combining systems.

Key words measurement; synchronous measurement; ultra-short pulse; spectral interference; fiber array; single-shot measurement

OCIS codes 120.3180; 140.7090; 060.2360