

doi: 10.11823/j.issn.1674-5795.2023.03.13

100 km 光纤链路中小于 100 fs 分辨力的双光梳钟差测量实验研究

吴云峰^{1,2}, 孟飞^{2,3}, 阿布都维力·阿布力克木², 宋晏蓉¹, 张志刚^{2*}

(1.北京工业大学 理学部 信息光子研究所, 北京 100124;

2.北京大学 电子学院 区域光网络与新型光通信系统国家重点实验室, 北京 100871;

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)

摘要: 为了解决远距离光纤链路两端测量钟差限制在 ps 量级的问题, 运用线性光学采样法测量钟差的基本理论, 利用双光梳线性光学采样法完成了 100 km 光纤链路两端的钟差测量实验研究。通过梳齿压缩和色散补偿技术实现了光梳梳齿线宽和远距离光纤链路净色散量的优化, 突破了高精度读取干涉花样中心时刻的难点, 最终实现了高分辨力的钟差测量。通过时间间隔计数器与线性光学采样法测量光纤链路时延对比实验和 100 km 光纤链路钟差测量实验证明: 基于线性光学采样法测量的钟差小于 100 fs, 能够有效满足高精度时间同步系统的要求。本研究为促进精密导航、高速通信和精准授时等领域的发展起到重要作用。

关键词: 高分辨力钟差测量; 双光梳; 线性光学采样

中图分类号: TB939

文献标志码: A

文章编号: 1674-5795(2023)03-0136-08

Experimental study on clock-offset measurement of sub 100 femtosecond resolution over 100 km fiber link with dual-comb system

WU Yunfeng^{1,2}, MENG Fei^{2,3}, ABUDUWEILI Abulikemu²,SONG Yanrong¹, ZHANG Zhigang^{2*}

(1.Institute of Information Photonics Technology, Faculty of Sciences, Beijing University of Technology,

Beijing 100124, China; 2.State Key Laboratory of Advanced Optical Communication Systems and Networks,

School of Electronics, Peking University, Beijing 100871, China; 3.Laboratory of Optical Frequency Standard,

Time and Frequency Metrology Division, National Institute of Metrology, Beijing 100029, China)

Abstract: In order to solve the problem that the clock-offset measurement over a long fiber link is limited to picosecond level, we have completed the experimental study on clock-offset measurement over a 100 km fiber link based on dual-comb linear optical sampling method. The net dispersion of long-distance fiber link and the line width of comb teeth are optimized by using dispersion compensation and comb compression technology. The central time of interferograms can be accurately obtained, and the clock-offset is measured with higher resolution. The time delays over fiber link measured with time interval counter and dual-comb linear optical sampling method are com-

收稿日期: 2022-12-08; 修回日期: 2023-02-11

基金项目: 国家自然科学基金 (61761136002, 61575004)

引用格式: 吴云峰, 孟飞, 阿布都维力·阿布力克木, 等. 100 km 光纤链路中小于 100 fs 分辨力的双光梳钟差测量实验研究[J]. 计测技术, 2023, 43 (3): 136-143.

Citation: WU Y F, MENG F, ABUDUWEILI A, et al. Experimental study on clock-offset measurement of sub 100 femtosecond resolution over 100 km fiber link with dual-comb system[J]. Metrology & Measurement Technology, 2023, 43(3): 136-143.



pared, and the clock-offset over a 100 km fiber link is measured. The experimental results demonstrate that the clock-offset measured based on the linear optical sampling method is less than 100 fs. High resolution clock-offset measurement is the key technology of long distances time synchronization. High precision time synchronization technology has important applications in accurate navigation, high speed communication and timing system.

Key words: high resolution clock-offset measurement; dual-comb; linear optical sampling

0 引言

时间同步技术是对空间上存在一定距离的两个点或多个点的时钟进行同步, 以实现高精度协同工作。高精度的时间同步系统将推动远程量子通信^[1]、基本物理量测量^[2-3]、引力波和暗物质^[4]探测等多个科学领域的发展。提高时间同步精度的关键是提高各个时钟之间钟差测量的分辨力。

早期的钟差测量主要使用电子学的时间间隔计数器 (Time Interval Counter, TIC), 但受电脉冲上升沿的限制, 钟差分辨力仅为皮秒量级^[5]。为进一步提高钟差分辨力至飞秒量级, 美国国家标准与技术研究院的科研人员提出了使用双光梳系统进行钟差测量。双光梳系统由两台重复频率差值很小的飞秒光学频率梳组成^[6-7], 通过高精度自由扫描脉冲序列实现精密测量, 应用于高精度测距、高分辨力光谱分析和相干成像^[8-10]。利用双光梳系统测量钟差的方法包括线性光学采样法 (Linear Optical Sampling, LOS) 和非线性光学采样法。其中, 线性光学采样法已经被多次应用于远距离时间频率传递系统中。2013年, 研究人员在长度为 2 km 的自由空间链路时频传递系统中, 首次实现了稳定度为飞秒量级的时间传递^[11]。2022年, 我国科研人员利用线性光学采样法将自由空间链路长度增加至 113 km^[12], 时间传递稳定度为飞秒量级, 频率传递万秒稳定度低于 4×10^{-19} 。

目前, 国内外研究团队基于线性光学采样法进行钟差测量时, 大多使用自由空间作为信号传输链路, 这对传输路线选择和双光梳系统的输出功率均提出了较高的要求^[13]。因此, 本课题组在光纤链路中研究了基于线性光学采样的钟差测量方案 (该项研究为国内首次), 并在 114 km 的光纤链路中实现了亚皮秒量级的钟差测量^[14]; 随后, 利用相对线宽为 0.35 Hz 的高相干性光梳作为信号源^[15], 并在改进了色散补偿后, 实现了 100 km 光

纤中飞秒量级分辨力的钟差测量^[16]。

本文将对基于线性光学采样法测量钟差的原理进行介绍, 并对测量过程中如何提高分辨力展开理论分析和实验验证, 为推动远距离光纤链路高分辨力时间传递技术发展起到重要作用。

1 线性光学采样与时间间隔计数器的测量精度对比

传统的时间间隔计数器测量时差是通过记录远端传输至本地的电信号脉冲数量和脉冲之间的时间间隔后, 再计算两地时差; 而线性光学采样测量时间是利用双光梳系统作为信号源^[11], 远端信号光梳产生的飞秒脉冲经链路传输至本地后与本地本振光梳产生的飞秒脉冲进行干涉, 从干涉花样中提取所需的时间信息后再计算两地时差。为了直观地对比时间间隔计数器与线性光学采样的测量精度, 分别用两种方法同时测量 100 km 光纤链路的时延 (包括渡越时间), 测试示意图如图 1 所示。图 1 上部分为利用时间间隔计数器测量链路时延的系统。分布反馈激光器 (Distributed Feedback Laser, DFB laser) 输出的窄线宽激光经过电光调制器调制后产生秒脉冲 (1/s) 信号, 随后光脉冲信号经过 100 km 光纤链路后, 经光电探测器探

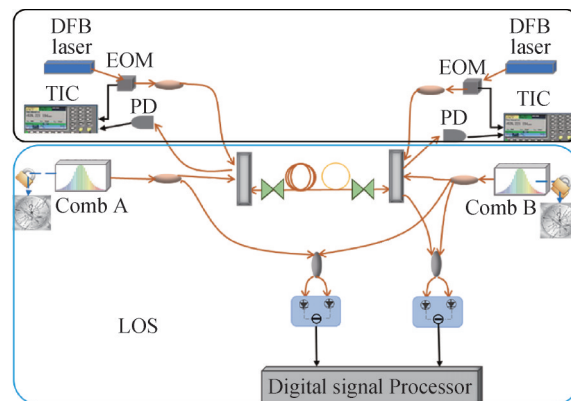


图1 利用时间间隔计数器与线性光学采样测量链路时延

Fig.1 Measurement of delay time of 100 km fiber link by TIC and LOS

测后再由TIC进行计数,测量出链路的时延。图1下部分为利用线性光学采样法测量链路时延的系统,该实验使用的光梳A和光梳B分别为重复频率为100.001, 100 MHz的掺铒光纤激光器,两台光梳仅锁定了重复频率至铷钟频率。光梳A产生的脉冲通过密集波分复用器进行滤波后,分成C33和C34两个通道传输至另一端,与光梳B进行线性光学采样。其中,C33通道的信号经过100 km光纤链路传输后与光梳B进行干涉,C34通道的信号与光梳B直接进行干涉。使用光电平衡探测器对两路信号进行探测,两个LOS图样中心时刻的时间差即为链路时延。

为了更明显地观测链路时延的变化,测试前使用热风枪对100 km光纤加热60 s,光纤最高温度为29 °C,随后让光纤自然散热降至室温。实验结果如图2所示。图中蓝色曲线为TIC测量的链路时延,红色曲线为LOS测量的链路时延。在前60 s光纤加热过程中,光纤变长,链路时间逐渐增加。加热结束后,光纤逐渐恢复原长,链路时延均匀减小。利用TIC测量的时延结果抖动为 ± 40 ps,抖动的方差为20 ps左右,并且时间分辨力为ps量级。利用LOS测量的时延结果抖动为 ± 4 ps,抖动的方差为2 ps左右,并且时间分辨力为亚皮秒量级。该实验结果表明线性光学采样法相较时间间隔计数器测量法具有更高的测量稳定性和时间分辨力,更适用于精密时钟差的测量。

2 线性光学采样法测量钟差理论研究

为了更精准地测量两个站点的钟差,并将分辨力提高至飞秒量级,对基于线性光学采样法测量钟差进行理论及部分实验研究,推导线性光学采样法的钟差计算公式并分析相应的理论误差。

2.1 基于线性光学采样法的钟差计算公式

基于光纤链路的线性光纤采样法测量钟差实验方案如图3所示。利用双光梳干涉,采集3个

$$\Delta t_{MN} = \frac{\Delta f_r}{2f_r^2} [f_r \cdot t_{AX} - f_r \cdot t_{BX} + (1 + \frac{\Delta f_r}{f_r})^{-1} \cdot (f_r \cdot t_{AX} - f_r \cdot t_{XB} - p_{XB} + p_{AX})] + (2f_r)^{-1} \cdot [p_{XB} + p_{BX} - 2 \cdot p_{BX}] \quad (1)$$

$$p_{AX} = \text{round}[\Delta f_r \cdot t_{AX}] \quad (2)$$

$$p_{XB} = \text{round}[\Delta f_r \cdot (t_{XB} - t_{AX}) - (\Delta f_r + f_r) \cdot T_{\text{link}}] \quad (3)$$

$$p_{BX} = \text{round}[\Delta f_r \cdot (t_{BX} - (\frac{f_r}{f_r + \Delta f_r}) \cdot t_{AX}) + (\Delta f_r + f_r) \cdot T_{\text{link}} + (\frac{f_r}{f_r + \Delta f_r}) \cdot p_{AX}] \quad (4)$$

式中: f_r 为光梳B的重复频率,Hz; $f_r + \Delta f_r$ 为光梳A的重复频率,Hz; t_{AX} 为光梳A与光梳X的LOS图

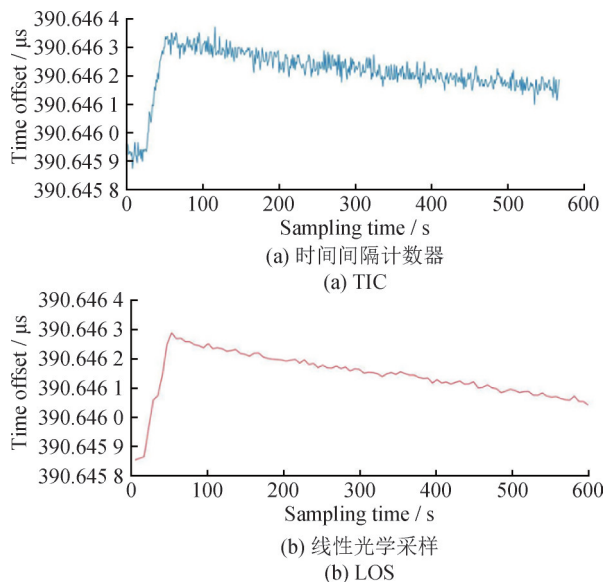


图2 不同测量方法测量100 km光纤链路时延结果

Fig.2 Results of delay time measured by different methods over 100 km fiber link

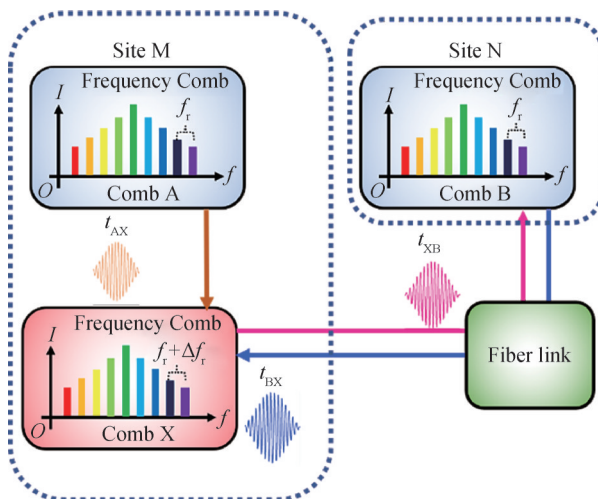


图3 线性光学采样法钟差测量方案示意图

Fig.3 Illustration of plan to measure clock-offset with linear optical sampling method

LOS图样并分别记录中心时刻。

根据异步线性采样法的原理,两站之间的时间差 Δt_{MN} 的计算式为

样中心时刻(作为站点M的本地参考时刻),s; t_{BX} 为光梳B的脉冲信号经过光纤链路后传输至站点M

与光梳X的LOS图样中心时刻(作为站点N传输至站点M的到达时刻), s ; t_{XB} 为光梳X的脉冲信号经过光纤链路后传输至站点N与光梳B的LOS图样中心时刻(作为站点M传输至站点N的到达时刻), s ; T_{link} 为光在100 km光纤链路中传输所需的时间, s ; 为了计算钟差, 还需要定义额外的物理量 p_i , 例如 p_{AX} 为LOS图样AX强度最大位置的对应的某种序数, 其物理含义为光梳A与光梳X发射的两个脉冲相位差满足 $p_{AX} \cdot 2\pi$, 因此 p_{AX} 为整数。

2.2 线性光学采样法测量钟差的理论误差分析

根据式(1)可知, 钟差的计算误差主要来源于: ①双光梳系统的时域放大比例因子(取决于双光梳的重复频率和重频差); ②LOS图样对应的中心时刻, 即 t_{AX} , t_{BX} , t_{XB} ; ③序数 p_{AX} , p_{BX} , p_{XB} 。其中序数 p_{AX} , p_{BX} , p_{XB} 必须为整数, 因此可以认为他们不引入误差。

若能够提高光梳的重复频率并且减小两台激光器的重频差, 则可以提高双光梳时域放大比例因子, 进而提高对应的钟差分辨力。若要实现飞秒量级的高钟差分辨力, 应提高LOS图样的稳定性和清晰度。两台光梳不仅要锁定光梳的重复频率, 也要锁定其初始频率, 两台光梳需要同时满足不同光梳间相对梳齿的高相干性, 以及单台光梳的窄线宽、低噪声等特性。

在钟差计算过程中, 最主要的误差来自三个LOS图样对应的中心时刻(t_{AX} , t_{BX} , t_{XB})。对于重复频率为100 MHz, 重频差为1 kHz的两台光梳, 假设中心时刻的误差为1 ns, 则对应的钟差计算误差为10 fs。最直接的提高中心时刻准确度的方法是提高LOS图样的对称性和清晰度。虽然光纤链路相较空间链路大大降低了传输损耗, 但是光纤链路的色散会对线性光学采样造成影响。图4为不同色散条件下理论模拟的LOS图样, 图4(a)为没有任何色散作用的LOS图样; 图4(b)为在仅有二阶色散(群延迟色散 $GDD \approx 1 \text{ ps}^2$)作用时的LOS图样, 图样展宽并未影响图样对称性, 仍然可以进行准确的高斯拟合, 但是读取的中心时刻准确性要低于未受色散影响的LOS图样; 图4(c)为二阶色散和三阶色散(群延迟色散 $GDD \approx 1 \text{ ps}^2$, 三阶色散 $TOD \approx 0.1 \text{ ps}^3$)同时作用时的LOS图样, 不仅无法完成高斯拟合, 而且读取的中心时刻存在较大误差, 严重影响后续的钟差计算准确性。

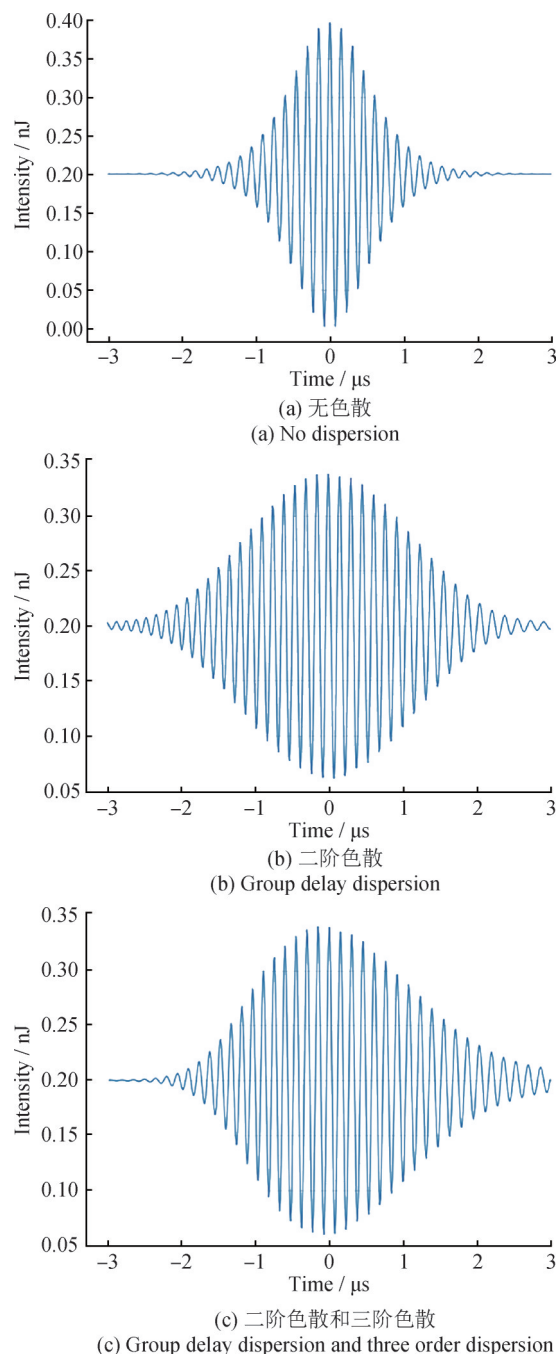


图4 不同色散条件下理论模拟LOS图样

Fig.4 Theoretical simulation LOS interferograms under different dispersion conditions

通过实验研究光纤色散对LOS图样的影响。图5(a)为无色散补偿的100 km光纤链路获得的LOS图样, 光纤链路的总二阶色散量约为 -2300 ps^2 , 最终得到的LOS图样不对称且存在较多的“毛刺”, 基于该图样很难读取准确的中心时刻, 因为必须对长光纤链路进行色散补偿。使用长为12.5 km的色散补偿光纤(Dispersion Compensating

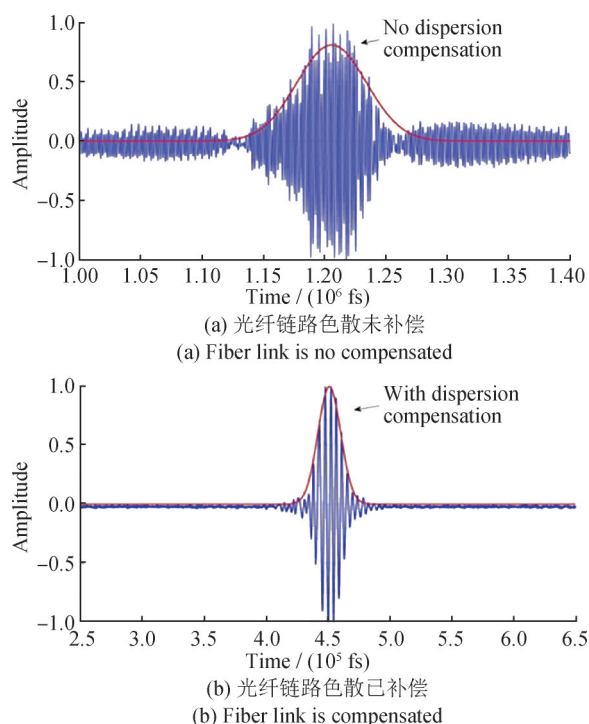


图5 色散补偿对长光纤链路LOS图样的影响
Fig.5 Effect of dispersion compensation on LOS interferograms over 100 km fiber link

Fiber, DCF) 对链路进行了色散补偿, 链路长度总计 113 km, 净二阶色散量为 -150 ps^2 ; 图 5 (b) 为经过色散补偿后的 LOS 图样, 该图样对称、清晰、信噪比高, 能够精确获得 LOS 图样的中心时刻。

3 100 km 光纤链路钟差测量实验系统

基于以上分析设计的 100 km 光纤链路钟差测量实验系统如图 6 所示。光梳 A 和光梳 X 的重复频

率分别为 200 MHz 和 200 MHz + 632 Hz, 同时分别锁定至 1 542 nm 和 1 560 nm 两台不同波长的窄线宽连续光激光器, 组成高相干性的双光梳系统。单台光梳梳齿线宽小于 5 Hz, 两台光梳的相对线宽小于 0.35 Hz。为模拟站点 M 和站点 N 之间的远距离时间传递系统, 并排除两个站点激光频率梳的不确定性, 将双光梳系统中的光梳 A 使用耦合器分为光梳 A 和光梳 B。两个站点之间使用一根色散补偿后的 100 km 光纤作为传递链路。在 50 km 处增加掺铒光纤放大器 (Erbium-Doped Fiber Amplifier, EDFA), 提高两个站点的接收信号功率。密集波分复用器 (Dense Wavelength Division Multiplexer, DWDM) 将光谱宽度限制在 100 GHz (0.8 nm), 通过 C33 和 C44 通道实现单根光纤中时间信号的双向传递。使用平衡探测器 (Balanced Photodetector, BPD) 将三个 LOS 图样转化为电信号后, 分别使用高速示波器的三路通道同时进行信号采集。采集后的信号经过希尔伯特变换和高斯拟合后, 读取强度最大的对应中心时刻。

为了实现飞秒分辨力的钟差测量, 相较于第 1 节的基于线性光学采样测量光纤链路时延的实验装置, 实验系统主要进行了两部分改进: ①两台光梳的重复频率提高至 200 MHz, 重复频率差缩小至 632 Hz, 对应的双光梳时域放大因子提高了 3 倍以上, 同时锁定激光器的重复频率和初始频率, 大大提高了双光梳的稳定性。②更加精密的色散补偿, 将链路二阶净色散量从 -150 ps^2 减小至 12 ps^2 , 单模光纤和 DCF 光纤共计 100 km。

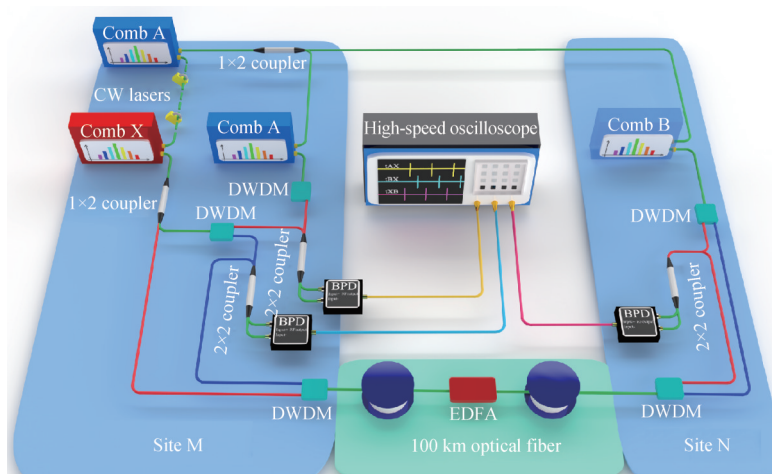


图6 钟差测量实验系统

Fig.6 Schematic of clock-offset measurement experimental system

4 钟差测量实验结果

首先测试 100 km 光纤链路前后线性采样波形。将两个有重频差的光梳直接进行线性光学采样，其 LOS 图样如图 7 (a) 所示；然后将一个光梳通过 100 km 光纤链路传递后再与另一个光梳进行线性光学采样，其 LOS 图样如图 7 (b) 所示；两个 LOS 图样清晰对称，尽管存在未能补偿的高阶色散，但是中心脉冲的脉冲宽度几乎不变，高斯拟合的拟合优度接近 1。结果表明：100 km 光纤的净色散量接近 0，链路不仅没有使脉冲展宽，而且保证了远距离传输对干涉图样对称性没有任何影响，能够更精准地读取拟合后包络强度最大位置所对应的中心时刻，提高钟差测量的分辨力。

将实验装置按图 6 所示搭建好后，使用高速示波器对三个 LOS 信号进行同步采样，采集数据如图 8 所示。图 8 (a) 为任意时刻 5 ms 范围内的三路

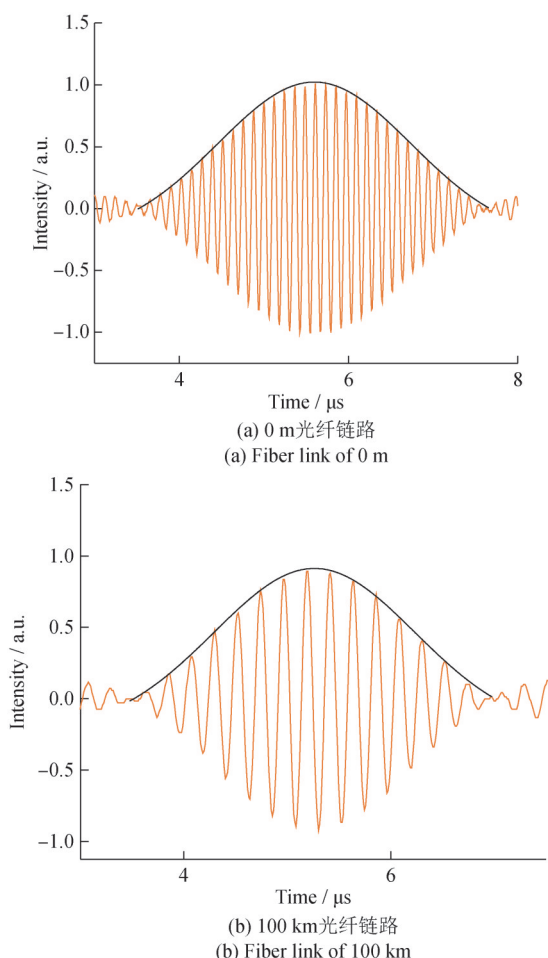


图 7 光梳 X 通过不同长度链路 与光梳 A 干涉的 LOS 图样
Fig.7 LOS interferograms of comb X with comb A over different length fiber link

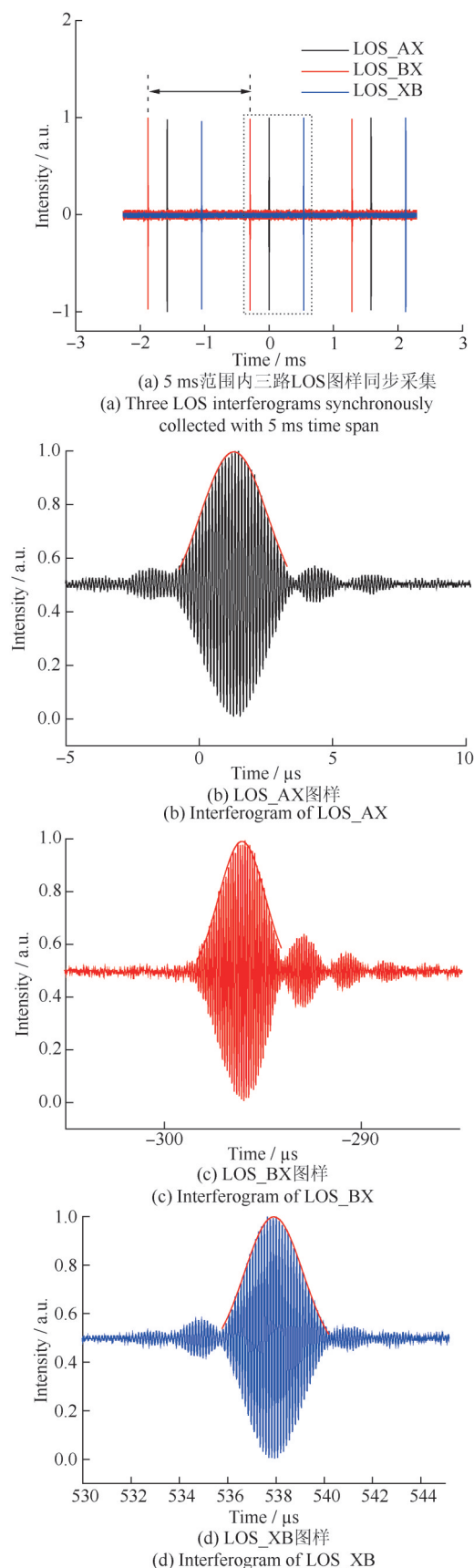


图 8 三路 LOS 干涉图样
Fig.8 Three LOS interferograms

LOS脉冲,每一路的重复频率为 $1/\Delta f_r$,任取一个周期范围内的三个LOS图样,如图8(b)至图8(d)所示。每个LOS图样中的拖尾部分是由实验系统中未能补偿的少量高阶色散所产生的,但是只需选对称部分的数据进行高斯拟合,即可准确读取中心时刻位置。包络拟合的精度决定了最终计算钟差的分辨力。

由高斯拟合获取的三个中心时刻,代入式(1)~式(4)计算后,获得的绝对钟差为数百皮秒。经多次计算后发现绝对钟差的变化(钟差分辨力)为飞秒量级,这说明实验系统存在额外的时间差,因此需要进行修正。

为确定该时间差的来源,分别对0, 10, 50, 60 km的链路开展实验,并进行钟差 t_{link} 的测量和计算,最终结果如表1所示。

表1 链路长度对应的绝对钟差

Tab.1 Absolute clock-offset corresponding to different length of fiber link

链路长度 L/km	钟差 $t_{\text{link}}/\text{ps}$
0	355.606
10	358.132
50	362.548
60	363.980

根据表1可知,采集到的数据直接代入式(1)~式(4)中计算的钟差 t_{link} 与链路长度 L 呈一次函数关系,因此,站点M和站点N的真实钟差 Δt_{MN} 的计算公式中应增加一个修正项,即

$$\Delta t_{\text{MN}} = t_{\text{link}}(L) - t_{\text{link}}(0) - 0.135 \cdot L \quad (5)$$

式中: $t_{\text{link}}(L)$ 为链路长度为 L 时,利用采集数据和式(1)~式(4)获得的钟差,ps; $t_{\text{link}}(0)$ 为链路长度为0 km时的钟差,是实验装置中器件尾纤引入的额外时间差,ps; L 为链路长度,km。链路长度每增加1 m,会增加0.135 fs时间差。利用修正后的公式,即可计算得到准确的钟差 Δt_{MN} 。

以图7(a)采集的数据为一组,在8 h内随机记录80组数据,如图9所示, Δt_{AB} 为测量得到的钟差结果。计算得出系统的平均钟差为-21 fs(理论时间差为0 fs)。该实验结果表明:基于线性光学采样法测量钟差的分辨力达到fs量级,相较双向时钟对比法的测量分辨力(ps量级)有较大提升。

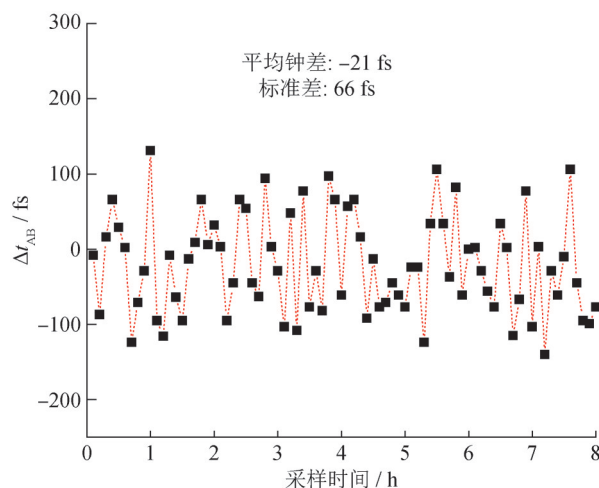


图9 8 h内随机测量80组钟差数据结果

Fig.9 Results of 80 groups of clock-offset data randomly measured within 8 h

5 结论

首先,介绍了使用传统的时间间隔计数器和线性光学采样法测量100 km光纤链路的时延测量结果,证明了线性光学采样法的测量结果更稳定、分辨力更高;随后,推导出了基于线性光学采样法测量光纤链路两端钟差的计算公式,并对测量误差进行了分析。利用自主研发的双光梳系统开展了基于线性光学采样法的钟差测量研究,使用梳齿相对线宽仅为0.35 Hz的双光梳系统作为信号源,采用长度为100 km且经色散补偿后的光纤作为传递链路,进行了钟差测量实验。通过提高光梳的相干性和精准的链路色散补偿,获得了清晰对称的干涉图样。最终,在8 h内随机测量了80组钟差,其平均值为-21 fs,标准差为66 fs。这是首次利用光纤链路实现了飞秒量级的钟差测量,为后续远距离高精度同步系统研制提供了技术基础。

参考文献

- [1] SHELKOVNIKOV A, BUTCHER R J, CHARDONNET C, et al. Stability of the proton-to-electron mass ratio [J]. Physical Review Letters, 2008, 100(15): 150801.
- [2] MEHLSTÄUBLER T E, GROSCHE G, LISDAT C, et al. Atomic clocks for geodesy [J]. Reports on Progress in Physics, 2018, 81(6): 64401.
- [3] KOLKOWITZ S, PIKOVSKI I, LANGEILLIER N, et al. Gravitational wave detection with optical lattice atomic clocks [J]. Physical Review D, 2016, 94(12): 124043.

- [4] DEREVIANKO A, POSPELOV M. Hunting for topological dark matter with atomic clocks[J]. *Nature Physics*, 2014, 10(12): 933 – 936.
- [5] LOPEZ O, KANJ A, POTTIE P E, et al. Simultaneous remote transfer of accurate timing and optical frequency over a public fiber network[J]. *Applied Physics B*, 2013, 110(1): 3 – 6.
- [6] 张志刚. 天文光梳技术现状与分析[J]. *计测技术*, 2022, 42(5): 23 – 29.
ZHANG Z G. Advances and analysis of astrocomb technology[J]. *Metrology & Measurement Technology*, 2022, 42(5): 23 – 29. (in Chinese)
- [7] 夏传青, 武腾飞, 曹士英, 等. 基于光频梳的乙炔稳频 1542 nm 激光波长测量研究[J]. *计测技术*, 2022, 42(4): 83 – 88.
XIA C Q, WU T F, CAO S Y, et al. Wavelength measurement of acetylene stabilized laser at 1542 nm using optical frequency combs[J]. *Metrology & Measurement Technology*, 2022, 42(4): 83 – 88. (in Chinese)
- [8] 马骏逸, 韩海年, 魏志义, 等. 全固态飞秒光学频率梳研究进展及展望[J]. *计测技术*, 2022, 42(5): 3 – 12.
MA J Y, HAN H N, WEI Z Y, et al. Research progress and prospect of all-solid-state femtosecond optical frequency comb[J]. *Metrology & Measurement Technology*, 2022, 42(5): 3 – 12. (in Chinese)
- [9] 夏传青, 武腾飞, 曹士英, 等. 基于光频梳的乙炔稳频 1542 nm 激光波长测量研究[J]. *计测技术*, 2022, 42(4): 83 – 88.
XIA C Q, WU T F, CAO S Y, et al. Wavelength measurement of acetylene stabilized laser at 1542 nm using optical frequency combs[J]. *Metrology & Measurement Technology*, 2022, 42(4): 83 – 88. (in Chinese)
- [10] WANG C, DENG Z J, GU C L, et al. Line-scan spectrum-encoded imaging by dual-comb interferometry[J]. *Optics Letters*, 2018, 43(7): 1606 – 1609.
- [11] 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.
- [12] SHEN Q, GUAN J Y, REN J G, et al. Free-space dissemination of time and frequency with 10^{-19} instability over 113 km[J]. *Nature*, 2022: 1 – 6.
- [13] SINCLAIR L C, BERGERON H, SWANN W C, et al. Femtosecond optical two-way time-frequency transfer in the presence of motion[J]. *Physical Review A*, 2019, 99(2): 23844.
- [14] ABUDUWEILI A, CHEN X, CHEN Z Y, et al. Sub-ps resolution clock-offset measurement over a 114 km fiber link using linear optical sampling[J]. *Optics Express*, 2020, 28(26): 39400 – 39412.
- [15] 崔佳华, 林百科, 孟飞, 等. 相位锁定至超窄线宽激光的高相干性双光梳研究[J]. *红外与毫米波学报*, 2020, 39(1): 25 – 31.
CUI J H, LIN B K, MENG F, et al. High coherence dual-comb based on phase locking to ultra-narrow linewidth lasers[J]. *Journal of Infrared, Millimeter and Terahertz Waves*, 2020, 39(1): 25 – 31. (in Chinese)
- [16] WU Y F, MENG F, SONG Y R, et al. Sub-100 femtosecond resolution of clock-offset measurement over a 100 km fiber link with dual-comb sampling[C]. *CLEO*, 2022, JW3B. 117.

(本文编辑: 刘圣晨)

第一作者: 吴云峰 (1995—), 男, 博士研究生, 主要研究方向为飞秒激光技术。



通讯作者: 张志刚 (1955—), 教授, 主要研究领域为高重复频率光纤飞秒激光器的频率梳技术、光纤远距离频率传输和时间同步技术、时域脉冲相干合成技术等。1982 年与 1984 年在北京工业大学分获理学学士和硕士学位, 1992 年在澳大利亚 MONASH 大学获理学博士学位。教育部首批“长江学者奖励计划特聘教授”。历任北京工业大学讲师、日本国财团法人产业创造研究所客员研究员、日本国经济产业省新能源产业技术综合研究机构 NEDOFellow、天津大学教授。曾在麻省理工学院、法国傅立叶大学、日本国北海道大学、电气通信大学做过访问教授。曾获教育部和国家科技进步奖。目前主持国家自然科学基金重点项目、联合基金重点支持项目及国际合作项目。

