

doi: 10.11823/j.issn.1674-5795.2022.05.11

基于光纤延迟线的时间抖动测量系统

余泓漪, 吴言, 田昊晨, 宋有建*, 胡明列

(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, 天津 300072)

摘要: 对飞秒激光器时间抖动的准确测量是推动其高精度应用的重要前提。为实现时间抖动的高精度、无参考测量,设计并搭建了一套基于光纤延迟线的测量系统。基于非对称迈克尔逊干涉仪的结构,在其中一臂引入一段长光纤延迟线鉴别时间误差,提高时间抖动测量精度。测量了一台实验室自制的重复频率为 82 MHz 的锁模光纤激光器的时间抖动功率谱,其在 100 Hz~10 kHz 的积分范围内 RMS 时间抖动为 10.1 fs。

关键词: 飞秒激光器; 时间抖动; 光纤延迟线

中图分类号: TB96 **文献标识码:** A **文章编号:** 1674-5795(2022)05-0103-05

Timing jitter measurement system based on fiber delay line

YU Hongyi, WU Yan, TIAN Haochen, SONG Youjian*, HU Minglie

(Key Laboratory of Opto-electronic Information Science and Technology of Ministry of Education,
School of Precision Instruments and Opto-electronics Engineering, Tianjin University, Tianjin 300072, China)

Abstract: Accurate measurement of the timing jitter of femtosecond laser is an important prerequisite to promote its high-precision application. In order to achieve high-precision and no-reference measurement of timing jitter, a measurement system based on fiber delay line was designed and built. Based on the structure of asymmetric Michelson interferometer, a long fiber delay line is added into one arm to identify the time error and improve the measurement accuracy of timing jitter. The timing jitter power spectrum of a lab-made mode-locked fiber laser with a repetition rate of 82 MHz was measured, and the RMS timing jitter was 10.1 fs in the integrated range of 100 Hz to 10 kHz.

Key words: femtosecond laser; timing jitter; fiber delay line

0 引言

飞秒激光器^[1-3]的输出脉冲序列具有极高的分辨率和极低的时间抖动,其量子极限的时间抖动可达低于 1 fs 的水平^[4]。近年来,超低抖动的飞秒锁模激光器在许多高精度应用方面引发广泛关注,如大科学装置同步^[5]、飞行时间测距^[6]、高速数模转换^[7]、时钟分配网络^[8]和低相位噪声微波产生^[9]等。这些应用的基本前提是对飞秒激光器时

间抖动的精确测量,但是飞秒激光器过低的时间抖动远远超过现有的无线电测量手段的分辨率极限,为时间抖动的精确测量带来了较大挑战。

1986 年, Von Der Linde 利用高速光电探测器分析锁模激光器的输出脉冲序列,首次实现了对主动锁模激光器的时间抖动测量^[10]。为得到更加准确的低频范围的时间抖动,21 世纪初,相位鉴别法^[11]、光学互相关法^[12]被相继应用于激光器的时间抖动测量。2003 年, Schibli T R 等人在光学互

收稿日期: 2022-10-26; 修回日期: 2022-11-03

基金项目: 广东省重点领域研发计划项目(2018B090944001)

引用格式: 余泓漪, 吴言, 田昊晨, 等. 基于光纤延迟线的时间抖动测量系统 [J]. 计测技术, 2022, 42 (5): 103-107.

Citation: YU H Y, WU Y, TIAN H C, et al. Timing jitter measurement system based on fiber delay line [J]. Metrology and measurement technology, 2022, 42 (5): 103-107.



相关法的基础上提出了平衡光学互相关法^[13],使用两台激光器,一台为待测激光器,另一台则作为参考,利用非线性 and 频效应在时域上直接测量激光器的时间抖动,突破了射频技术的极限,实现了阿秒量级的时间抖动测量,该方法是近年来常用的时间抖动测量手段之一^[14]。另一种高分辨力的测量方法是由Hou D等人于2015年提出的光外差干涉法^[15],该方法利用两台激光器的高频、低频成分分别作拍,消除了载波包络偏移的影响。该方法仍然需要一个时间抖动与待测激光器相近或更低的锁模激光器作为参考,这不仅限制了测量分辨力,且许多激光实验室较难满足其要求。2017年,K. Jung等人针对Menlo Systems的商用激光器,提出一种基于光纤延迟线的时间抖动测量原理,使其无需外部参考,结构简单易用^[16]。此后,田昊辰等人在此基础上搭建了一套基于非对称光纤延迟线干涉仪和 $f-2f$ 干涉仪的综合测量系统^[17]。

本文基于一段长200 m的单模光纤延迟线设计并搭建了一套无需参考激光器的时间抖动测量系统,实现了对一台自制的全保偏光纤“9”字腔锁模激光器时间抖动功率谱的测量,测得其在100 Hz~10 kHz的积分范围内时间抖动的均方根值为10.1 fs。

1 基于光纤延迟线的时间抖动测量原理

理想的飞秒激光器输出脉冲序列在时域上是一系列等时间间隔的超短脉冲,而实际上对于自由运转的光纤飞秒激光器而言,其输出脉冲序列无限制地发散并随机游走,脉冲包络会在理想时刻附近波动,如图1所示。这种脉冲包络的抖动即定义为激光器的时间抖动。

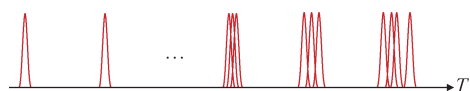


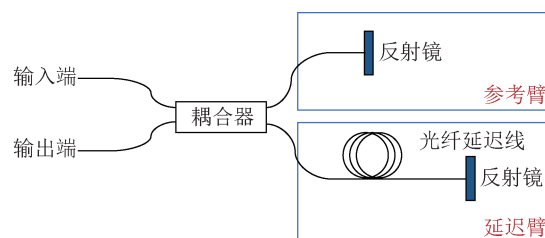
图1 飞秒激光器的时间抖动

Fig.1 Timing jitter of femtosecond laser

将激光器输出脉冲序列的时域波形做傅里叶变换得到离散的频谱,可看作是一个光学频率梳^[18]。每个频率对应着一个梳齿,第 m 根梳齿的频率为 $mf_{\text{rep}} + f_{\text{ceo}}$ 。其中, f_{rep} 为激光器的重复频率, f_{ceo} 为载波包络偏移频率。激光器的时间抖动在频域上表现为重复频率的波动。

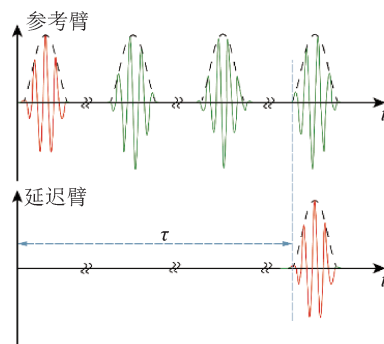
图2为基于光纤延迟线的时间抖动测量原理

图,图2(a)为测量系统的主体,即一个非对称的光纤迈克尔逊干涉仪,由一个 2×2 耦合器和反射镜组成,其中带有百米长光纤延迟线的一臂称作干涉仪的延迟臂,另一臂则称作参考臂。时间抖动在干涉仪中得到积累,被放大 τ 倍,如图2(b)所示,可得探测灵敏度与延迟时间成正比。待测激光器的输出脉冲序列经耦合器进入干涉仪后,脉冲能量被分为两部分,一部分作为参考光输入到参考臂后直接经反射镜反射,原路返回;另一部分则作为延迟光,先经过光纤延迟线后再经反射镜反射。参考光和延迟光在干涉仪输出端相遇。通过调整干涉仪光纤链路长度使得参考光与延迟光在干涉仪中传输的光程差是激光器腔长的整数倍,从而在干涉仪输出端获得拍频信号,其携带着绝对频率噪声。



(a) 非对称迈克尔逊干涉仪

(a) Asymmetric Michelson interferometer



(b) 参考光与延迟光的时域波形

(b) Reference and delay pulse in time domain

图2 基于光纤延迟线的时间抖动测量原理图

Fig.2 Schematic diagram of timing jitter measurement based on fiber delay line

光纤延迟线提供的时间延迟为 τ ,系统测量灵敏度与 τ 成正比。而在傅里叶频率为 $\frac{1}{\tau}$ 及其谐波处频率噪声的探测是无效的,测得的功率谱在 $\frac{1}{\tau}$ 及其谐波处会有多个尖峰,这并不是真实的噪声,而只是伪像峰。因此延迟线长度的选择需平衡测

量精度与灵敏度无效点^[5, 16, 19]。

此外, 飞秒激光器输出脉冲序列在传输过程中, 其电场与包络的峰值会呈现出周期性不重合的现象, 称作载波包络偏移 (Carrier Envelop Offset, CEO)。这是激光器中的非零净色散使得脉冲序列的群速度和相速度不同而导致的。实验中为消除载波包络偏移对结果的影响, 可利用窄带滤波器获得两个频段的光, 通过两者的共模抑制得到重复频率的噪声信号, 即激光器的时间抖动。

2 测量系统结构

基于光纤延迟线的时间抖动测量系统装置如图3所示。待测激光器经一级掺铒光纤放大器 (Er³⁺-Doped Fiber Amplifier, EDFA) 放大后, 由两个窄带宽的密集波分复用器 (Dense Wavelength Division Multiplexer, DWDM) 滤出两波长 λ_1 和 λ_2 , 再合束后功率大幅衰减, 因此需经过二级 EDFA 以满足系统后续器件的功率要求。放大后的脉冲输入到一个由 2×2 耦合器组成的非对称光纤迈克尔逊干涉仪。耦合器的分光比为 4:6, 60% 的能量进入干涉仪的延迟臂, 40% 的能量进入干涉仪的参考臂。参考光进入干涉仪后, 经过一个可调衰减器后, 由法拉第旋转镜反射, 原路返回。延迟光经过一段 200 m 长的光纤延迟线后, 进入延迟控制单元, 再经声光移频器和压电换能器后, 最终由法拉第旋转镜反射, 原路返回。参考光与延迟光在干涉仪的输出端相遇, 通过调节干涉仪延迟臂光纤链路的长度使两脉冲在干涉仪中传输

的光程差是激光器腔长的整数倍, 以在干涉仪输出端获得参考光与延迟光的拍频信号, 其携带着绝对频率噪声。对于 λ_1 , 绝对频率噪声记为 δ_1 , $\delta_1 = \tau (mf_{\text{rep}} + f_{\text{ceo}} + 2f_m)$, 对于 λ_2 , 绝对频率噪声记为 δ_2 , $\delta_2 = \tau (nf_{\text{rep}} + f_{\text{ceo}} + 2f_m)$, 其中, f_m 为声光移频器的载波频率。

干涉仪延迟臂中的延迟控制单元由两个 DWDM 和一个手动可调的光纤延迟线构成, 其调节范围为 250 ps。实验中使用的光纤均为单模光纤, 色散的存在导致脉冲的两波长成分在延迟臂较长的光纤链路中传输时会在时域上分离, 因此通过延迟控制单元中手动延迟线的延迟量, 补偿延迟臂中两波长成分间的光程差, 从而令两波长成分同时在干涉仪输出端输出。声光移频器的载波频率 f_m 为 50 MHz, 因此往返两次经过声光移频器后, 延迟光的光频获得 100 MHz 的频移, 其目的在于实现光学外差探测, 避免探测系统中的低频噪声对频率噪声探测产生影响。

干涉仪输出端的拍频信号通过 DWDM 将两波长成分分离, 分别由光电探测器转换为电学信号后, 再通过中心频率为 100 MHz 的带通滤波器滤除激光器重频, 仅有拍频信号进入电学放大器得到放大。两波长成分的拍频信号进入混频器后, 通过共模抑制消除载波包络偏移噪声, 最终在混频器输出端获得重复频率噪声的准 DC 信号。该信号一部分直接输出用于时间抖动测量, 另一部分则通过比例积分伺服系统反馈到干涉仪延迟臂中的压电换能器以实现激光器重复频率的锁定。

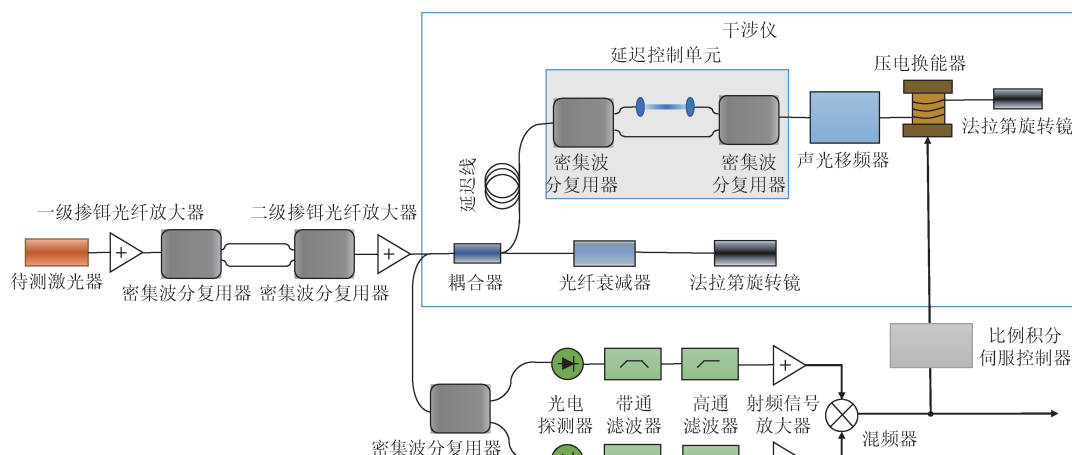


图3 基于光纤延迟线的时间抖动测量装置图

Fig.3 Diagram of the timing jitter measurement device based on fiber delay line

3 测量结果

本研究所使用的待测激光器是一台实验室自行搭建的“9”字腔激光器,特征参数包括:待测激光器的重复频率 f_{rep} 为82 MHz;待测激光器的中心波长 λ_c 为1567 nm;待测激光器光谱的3 dB带宽 ω_{th} 为16 nm;待测激光器输出脉冲序列的平均功率 V_{avg} 为0.9 mW;待测激光器腔长的可调节范围 ΔL 为12.5 nm。测量系统中,所有DWDM的滤波带宽均为1 nm,分光波长均为1537 nm和1566 nm。待测激光器经滤波放大后,进入干涉仪的脉冲平均功率为7.5 mW。

在时间抖动测量系统的输出端,利用示波器和快速傅里叶分析仪(Fast Fourier Transform Analyzer, FFT)观测混频器的输出信号。该信号携带着 $(m-n)f_{\text{rep}}$ 重复频率的噪声,其中 m, n 分别为 λ_1, λ_2 两波长对应的光学梳齿数。实验中所选取的两波长分别为1537.4 nm和1566.31 nm,通过计算可得两者对应的光学梳齿的模式数之差 $(m-n)$ 为 4.39×10^4 。

混频器输出的误差信号在时域上是一个准DC信号,在频域上利用快速傅里叶分析仪测量并储存其在100 Hz~100 kHz频率范围内的功率谱密度。需要注意的是,FFT测得的功率谱密度是电压噪声功率谱,通过传递函数转换后,可得到对应的频率噪声功率谱,如图4所示。传递函数为

$$T_F(f) = V_{\text{peak}} \frac{1 - \exp(-i2\pi f\tau)}{if} \quad (1)$$

式中: V_{peak} 为鉴相信号的振幅, V。

激光器的重复频率噪声在时域表现为时间抖

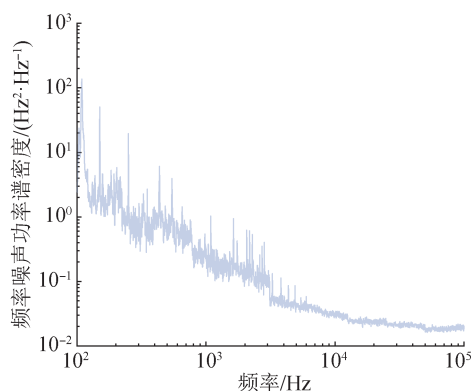


图4 $(m-n)f_{\text{rep}}$ 频率噪声功率谱密度

Fig.4 Frequency noise power spectral density of $(m-n)f_{\text{rep}}$

动,二者可以通过公式(2)互相转换。

$$(2\pi\nu_0)^2 S_i(f) = \frac{\nu_0}{f} S_f(f) \quad (2)$$

式中: ν_0 为激光中心频率, Hz; $S_i(f)$ 为时间抖动功率谱密度, Hz^2/Hz ; $S_f(f)$ 为频率噪声 PSD, s^2/Hz 。将频率噪声功率谱转换为时间抖动功率谱,并将其从太赫兹频率 $(m-n)f_{\text{rep}}$ 转换到重复频率 f_{rep} ,进而得到激光器的时间抖动功率谱密度,如图5所示。其中,蓝色曲线代表待测激光器的时间抖动功率谱密度,橙色曲线代表积分时间抖动。

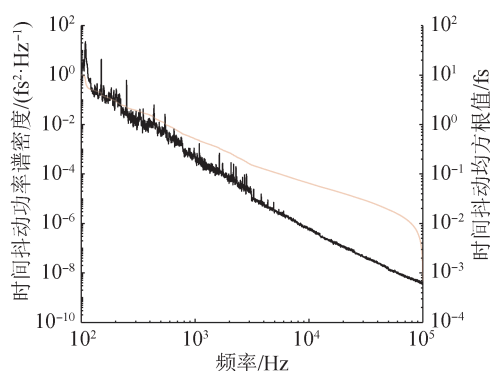


图5 待测激光器的时间抖动

Fig.5 Timing jitter of the measured laser

对时间抖动功率谱密度积分再开方可得,在傅里叶频率100 Hz~100 kHz的积分范围内,待测激光器时间抖动的均方根值为10.1 fs。

4 结论

基于光纤延迟线设计并搭建了一套时间抖动测量系统,并且利用腔外压电换能器的延迟锁相环结构实现了激光器重复频率的锁定与时间抖动的精确测量。最终得到待测激光器在傅里叶频率100 Hz~100 kHz的积分范围内,RMS时间抖动为10.1 fs。该系统相比于现阶段常用的测量方法而言无需参考激光器,结构更加简单,在飞秒激光器时间抖动的高精度测量方面具有较大潜力。

参考文献

- [1] 国佳帅,武腾飞,梁志国,等. 163 fs被动锁模掺 Er^{3+} 光纤激光器[J]. 计测技术, 2015, 35(4): 27-29. GUO J S, WU T F, LIANG Z G, et al. 163 fs Passively mode-locked Er^{3+} -doped fiber ring laser[J]. Metrology and measurement technology, 2015, 35(4): 27-29. (in Chinese)

- [2] PI Y, TIAN H, LI R, et al. Timing jitter and intensity noise characterization of a 122 MHz all-PM nalm mode-locked fiber laser[J]. IEEE photonics technology letters, 2021, 33(24): 1439-1442.
- [3] 张志涛, 梁雅军, 张铁犁, 等. 飞秒光学频率梳在计量领域的应用[J]. 宇航计测技术, 2022, 42(4): 1-8. ZHANG Z T, LIANG Y J, ZHANG T L, et al. Review on application of femtosecond optical frequency comb in metrology[J]. Journal of astronautic metrology and measurement, 2022, 42(4): 1-8. (in Chinese)
- [4] SONG Y, ZHOU F, TIAN H, et al. Attosecond timing jitter within a temporal soliton molecule[J]. Optica, 2020, 7(11): 1531-1534.
- [5] KIM J, COX J A, CHEN J, et al. Drift-free femtosecond timing synchronization of remote optical and microwave sources[J]. Nature photonics, 2008, 2(12): 733-736.
- [6] SHI H, SONG Y, LIANG F, et al. Effect of timing jitter on time-of-flight distance measurements using dual femtosecond lasers[J]. Optics express, 2015, 23(11): 14057-14069.
- [7] VALLEY G. Photonic analog-to-digital converters[J]. Optics express, 2007, 15: 1955-1982.
- [8] KEELER G A, NELSON B E, AGARWAL D, et al. The benefits of ultrashort optical pulses in optically interconnected systems[J]. IEEE journal of selected topics in quantum electronics, 2003, 9(2): 477-485.
- [9] JUNG K, SHIN J, KIM J. Ultralow phase noise microwave generation from mode-locked Er-fiber lasers with sub-femtosecond integrated timing jitter[J]. IEEE photonics journal, 2013, 5(3): 5500906.
- [10] VON DER LINDE D. Characterization of the noise in continuously operating mode-locked lasers[J]. Applied physics B, 1986, 39(4): 201-217.
- [11] SCOTT R P, LANGROCK C, KOLNER B H. High-dynamic-range laser amplitude and phase noise measurement techniques[J]. IEEE journal of selected topics in quantum electronics, 2001, 7(4): 641-655.
- [12] 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.
- [13] 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.
- [14] 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.
- [15] 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.
- [16] 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: 40917.
- [17] 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.
- [18] 冯梁森, 李维, 陈少武, 等. 微腔光频梳的应用研究进展[J]. 计测技术, 2022, 42(2): 13-23. FENG L S, LI W, CHEN S W, et al. Progress in application research of microresonator frequency comb[J]. Metrology and measurement technology, 2022, 42(2): 13-23. (in Chinese)
- [19] RUBIOLA E, SALIK E, HUANG S, et al. Photonic-delay technique for phase-noise measurement of microwave oscillators[J]. Journal of the optical society of America B, 2005, 22(5): 987-997.

(本文编辑:田艳玲)



第一作者: 余泓漪 (2000—), 硕士研究生, 主要研究方向为超短脉冲激光技术。



通讯作者: 宋有建 (1981—), 英才副教授, OPTICA 和 IEEE 的高级会员, 从事超短脉冲激光技术及精密测量应用研究。