

基于自参考源的高精度时间抖动测量

徐鹏^{1,2}, 刘元山³, 张建国^{1,4*}

(1. 中国科学院西安光学精密机械研究所 瞬态光学与光子技术国家重点实验室, 西安 710119;

2. 中国科学院大学, 北京 100049;

3. 西北工业大学 电子信息学院&光学影像分析与学习中心, 西安 710072;

4. 伦敦南岸大学 工程学院, 英国伦敦 SE1 0AA)

摘要: 时间抖动是衡量光频梳、低相噪激光器、微波光子雷达等低噪系统性能的核心参数, 对其进行精确测量已成为一项具有重要价值的研究工作。传统的直接探测法受限于微波振荡器的本地噪声或光电探测器的噪声, 测量精度较低, 导致在实际应用中无法实现对极低时间抖动参数的高精度测量; 光外差、光学互相关等光学测量方法存在着系统庞杂的缺点, 并且均对参考源和被测源有较高要求。为了有效实现对阿秒级别时间抖动的测量, 本文研究了一种高精度、无参考源的时间抖动测量方法, 主要基于长光纤延迟线技术和光载波干涉技术实现对时间抖动的超高精度测量。该方法在满足较高测量精度的前提下无需两个相似待测源, 极大降低了测量系统的复杂程度。本文优化了测量系统结构, 解释了光纤延迟线体系中伪像峰机理, 并提出了二次差频梳齿模型。系统仿真测得100 MHz重频激光器在其100次谐波点10 GHz处、频偏10 MHz时的噪声基底为 $3.29 \times 10^{-13} \text{ fs}^2/\text{Hz}$ (等同于-211 dBc/Hz), 从10 kHz到10 MHz总的均方根时间抖动为535 as。本实验的研究结果表明此方法在超低时间抖动测量方面具有明显优势, 该方法作为一种便捷、高效的时间抖动测量方法, 可以应用于不同待测源, 例如被动锁模激光器、光频梳、超连续谱等。

关键词: 时间抖动; 锁模激光器; 光纤; 光外差; 频域分析

Ultrahigh-precision Measurement of Timing Jitter Based on Self-reference Source

XU Peng^{1,2}, LIU Yuan-shan³, ZHANG Jian-guo^{1,4*}

(1. *State Key Laboratory of Transient Optics and Photonics, Xi'an Institute of Optics and Precision Mechanics, Chinese Academy of Sciences, Xi'an 710119, China;*

2. *University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China;*

3. *Electronic Information School&Optical Image Analysis and Learning Center, Northwestern Polytechnical University, Xi'an 710072, China;*

4. *London South Bank University, London SE10AA, England)*

**Corresponding author, E-mail: jian-guo-zhang@126.com*

Abstract: Timing jitter is a key parameter of low noise systems which includes optical frequency combs and low-noise laser microwave photon radar systems. Consequently, precisely measuring its values is quite important. The traditional direct detection method is limited by the floor noise of microwave oscillator or photodetector noise, and its accuracy of measurement is relatively low.

Optical measuring methods, such as optical heterodyne and optical cross-correlation methods, are very complicate and have relatively high requirements on both the reference source and measured source. This paper presents a method to measure the timing jitter with high precision and without reference source, which can overcome some deficiencies of traditional methods. Based on the long fiber delay line technology and optical carrier frequency interference, this research tries to realize the ultra-high precision for measuring timing jitter. The results of the simulation system show that the noise base of 10 MHz laser is 3.29×10^{-13} fs²/Hz (equivalent to -211 dBc/Hz), when the frequency deviation is 100 MHz at its 100th power harmonic point 10 GHz, and the total root mean square timing jitter from 10 kHz to 10 MHz is 535 as, which has an obvious advantage for ultra-low timing jitter measurement. This measurement method is a convenient and high-efficiency method which can be applied to different measured sources, such as passively mode-locked lasers, optical frequency combs, and super-continuum spectrum, etc.

Key words: Timing jitter; Mode-locked laser; Optical fiber; Optical heterodyne; Frequency domain analysis

1 引言

时间抖动 (Timing Jitter) 一般指高速信号相对理想时刻位置的时间偏移, 是高速信号和宽带系统核心表征参数之一。精确测量时间抖动在光频梳系统^[1]、光原子钟^[2]、时钟同步网^[3]、超低噪声微波/毫米波信号光学产生与处理^[4]、光子模数转换^[5]、微波光子雷达^[6]、超高速通信系统和超短脉冲技术等领域具有举足轻重的作用。近年信息技术的高速发展推动了微波光子学的蓬勃兴起, 从下一代光子科学大装置: X 射线自由电子激光系统 (X-ray Free-electron Lasers)^[7]、高精度模数转换^[5]、超稳微波信号产生^[4]、到高精度计量^[8]、类地行星搜索^[9]、以及阿秒 (as) 科学^[10], 无不涉及阿秒量级的光信号稳定性测量及相位噪声优化。由此可见, 先进的研发工作已进入了阿秒科学的领域, 如何实现阿秒级别时间抖动的精确测量现已成为一项既具有科学意义又具有工程应用价值的重要研究工作。

目前, 测量超短光脉冲信号时间抖动的方法主要有两种, 一种是传统的基于微波技术单边带相位噪声功率谱密度测量法 (Single-side-band Phase Noise Power Spectral Densities)^[11], 另一种是直接光学时间抖动测量技术, 如光互相关均衡探测

(Balanced Optical Cross-correlation, BOC) 时间抖动测量法^[12]。前一种方法是利用光电探测器将被测光信号转化成电信号, 再利用电带通滤波器和低噪声信号分析仪, 测出高次谐波单边带相位噪声功率密度, 通过公式计算出其等效时间抖动。该方案的优点是系统相对简单、操作方便, 缺点是由于受到光电转换附加噪声、混频器分辨率、频率综合器和锁相电路相位噪声的限制, 即使此种最为精密的测量系统也很难突破 10 fs 时间抖动的精度限制, 低于此数值的时间抖动基本被测量系统本底噪声所淹没。因此, 该方案已无法满足对极低时间抖动进行高精度测量的实际应用要求 (例如, 光频梳系统、

光原子钟、高速高精度光子模-数转换器等)。另一种采用 BOC 技术的方法可直接测量光脉冲序列时间抖动。该方法利用非线性光学过程 (例如二次谐波产生) 在两个光脉冲序列之间直接进行脉冲与脉冲的时间比较, 避免了直接光电转换所引入的额外相位噪声, 显著提高了时间抖动的测量精度。MIT 团队最新报道的采用 BOC 技术测得钛宝石激光器的均方根 (Root Mean Square, RMS) 时间抖动仅为 16.3 as, 时间测量分辨率可达 100 mV/fs^[12]。但是该方案的缺点也很明显, 它并没有摆脱使用两套相似被测系统的束缚, 并且实验系统过于复杂、入射进 BOC 倍频晶体的光需要有较大的峰值功率, 对于低功率信号则要引入额外光放大器, 同时也会引入额外相位噪声, 导致测量值虚高。另外, 复杂的系统结构将会增加该测量系统实现的难度和成本, 也不利于系统的运行维护和将来的工程推广应用。

由于国内目前对于高精度时间抖动测量领域的研究相对匮乏, 大多科研成果仍处于探索阶段, 因此实现一套高精度、系统结构简便、无需参考源的时间抖动测量系统就显得十分重要。针对传统方法测量精度不够、BOC 测量方法需要两套相似待测源、系统操作复杂等实际存在的问题, 本文研究了一种可实现阿秒级别时间抖动进行有效测量的方案。该方法主要基于长光纤延迟线技术和光载波干涉技术实现对时间抖动的超高精度测量。文献[15]中 KIM 团队首次提出了光纤延迟线测抖动系统, 其摆脱了两套相似待测系统, 极大简化了测量系统结构, 降低了测量难度。此外, 该方法对不同的待测源如光频梳、超连续谱、被动锁模激光器等, 存在不同的反馈机制, 确保能够稳定地测得超低时间抖动。但是该方法仍有许多缺点, 如: 测得时间抖动精度较低、系统光纤干涉仪部分损耗过大、噪声理论模型不清晰等。针对这些实际存在的问题, 本文报道了我们对此开展新研究工作所取得的部分结果

以及提出的解决方案，通过仿真研究验证了新设计测量系统的可靠性，同时解释了光纤延迟线体系伪像峰机理，为后续工程上优化系统结构和提升测量精度提供了理论指导。本文还报告了系统结构的优化问题研究，极大降低了系统损耗，完善了光纤延迟体系，并提出了二次差频梳齿模型，使得测量结果更具说服力。仿真结果展示了在 10 GHz 载频上频偏 10 MHz 时噪声基底（Noise Floor）可达 $3.29 \times 10^{-13} \text{ fs}^2/\text{Hz}$ （等同于 -211 dBc/Hz），从 10 kHz 到 10 MHz 总的均方根时间抖动为 535 as（详情将在本文第三章中的有关部分进行介绍）。本文继续研究了不同长度光纤延迟线以及不同带宽的光带通滤波器对于仿真测量结果的影响，根据仿真结果可以在理论上更好的指导后续工程实验中选择核心器件的参数。

2 基本原理

本文所研究的测量系统工作原理框图如图 1 所示，该系统主要分为 4 个部分：待测光源、滤波子系统、光纤干涉仪、信号提取模块。我们采用的方法是外腔光延迟精确锁定与双波长光谱互相关均衡探测技术，该方法可适用于多套测量系统，例如：自由运转的光纤激光器可以通过反馈信号锁定光纤干涉仪长臂光纤的方法实现时间抖动测量；光频梳可通过反馈信号锁定光频梳重复频率的方法实现时间抖动测量，但不同源的反馈算法不同。本文仿真中采用的是 1550 nm 重频 100 MHz 的激光器。

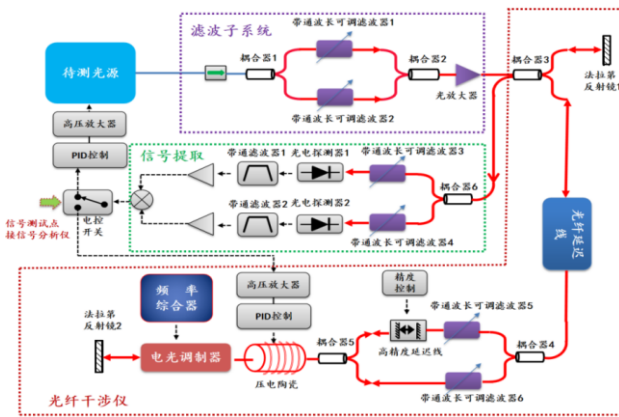


图 1 基于延迟线光外差法时间抖动测量原理图

Fig. 1 Schematic diagram of delay-line-based and optical heterodyne timing jitter measurement methods

基于锁模激光器光频梳的梳齿可以表示为 $f = nf_{rep} + f_{ceo}$ ，其中 n 为模式次数， f_{rep} 为重复频

率， f_{ceo} 为载波包络偏移频率^[13]。如图 2 所示，我们分别取 λ_1 、 λ_2 对应频率梳齿 $f_1 = mf_{rep} + f_{ceo}$ 、 $f_2 = nf_{rep} + f_{ceo}$ ， m 和 n 均为模式次数。将来自待测光源的待测光分成两路分别滤波，带通滤波器 1、2 分别对应 λ_1 、 λ_2 ，合并后进入光纤干涉仪部分。

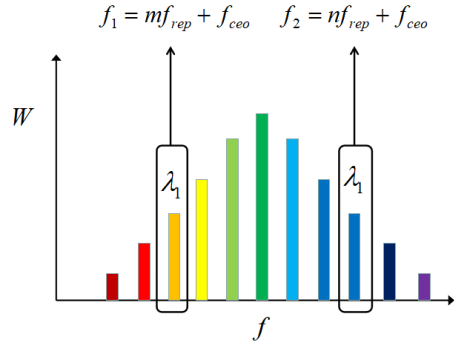


图 2 光频梳模式

Fig. 2 Modes of optical frequency combs

首先将待测光分成两路，一路光信号直接进入信号提取模块作为待测信号，确保系统偏振态相同；另一路光信号通过光纤延迟线，压电陶瓷（Piezoelectric, PZT）、电光调制器等后进入信号提取模块作为参考信号。其中：延迟线长度的选取要保证在相干长度之外以便实现去相关功能^[14]；PZT 是由伺服反馈系统控制（PID Server）和高压放大器（High Voltage Amplifier, HVA）驱动的压电陶瓷，通过改变 PZT 处的光纤长度实现延迟锁相环（Delay Lock Loop, DLL）反馈锁定重频。仿真中，本文采用的激光器是频率稳定系统，因此无需设置反馈环路；电光调制器将信号移至载频 $2f_m$ 处测量，避免零频处噪声基底较大，导致测量效果不佳。

最后，光纤干涉仪输出的待测光与参考光信号合并后进入信号提取部分，由等带宽的光纤滤波器滤波（ λ_1 、 λ_2 ），目的是消除传输时可能引入的杂散光。随后光信号在光电探测（Photodetector, PD）处拍频，产生等间距电信号，再由窄带电滤波器滤出在 $2f_m$ 处的载频信号，其中载频信号即携带抖动信息，最后经混频器混频后所获得的基频电压信号即为误差信号。再将采集得到的电压信号通过传输方程即公式 1 转换为频率噪声功率谱密度（Power Spectral Densities, PSD）、相位噪声功率谱密度及时间抖动^[15]。

$$T(f) = V_{peak} |(1 - \exp(-i \times 2\pi f \tau)) / (i \times f)| [V / \text{Hz}]$$

, (1)

3 仿真过程与结果

仿真原理图如图 3 所示。相较于上述逻辑图，图 3 在系统的结构上进行了进一步优化。首先由于大多数光源（被动锁模光纤激光器）发射功率较低，无法满足后续光纤干涉仪部分的强度损耗（约 15dB），且额外的光、电放大器不仅会增加系统的复杂程度，还会增大系统附加噪声，因此实验中取消了滤波子系统部分，简化了系统结构，改为由干涉仪部分和信号提取部分中两个保偏带通滤波器实现对参考光和待测光中的 λ_1 、 λ_2 两部分滤波。其次结合使用耦合器 1 与耦合器 4，将电光调制器输出的参考光直接与耦合器 1 输出的待测光耦合进信号提取部分，使得参考光信号无需返回耦合器 1，大大减小了参考光的强度损耗（约 15 dB）。最后考虑到参考光与待测光进入耦合器 4 之前存在时间延迟，而仿真中 2 km 延迟光纤会使待测光与参考光中 λ_1 、 λ_2 两部分存在时间差，难以在 PD 处拍频，所以我们在耦合器 1 和耦合器 4 之间增加了一个延迟调控部分，通过改变光纤长度实现待测光与参考光两脉冲同时进入信号提取部分。

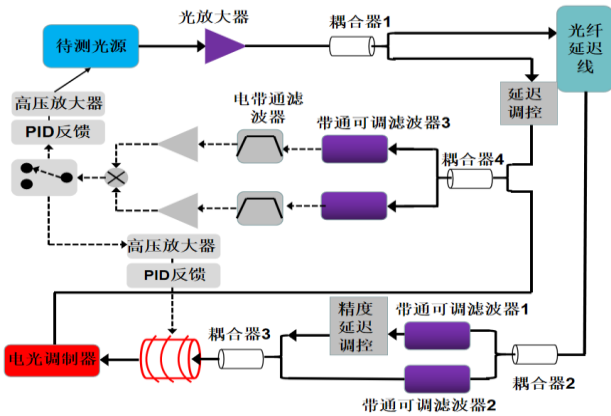
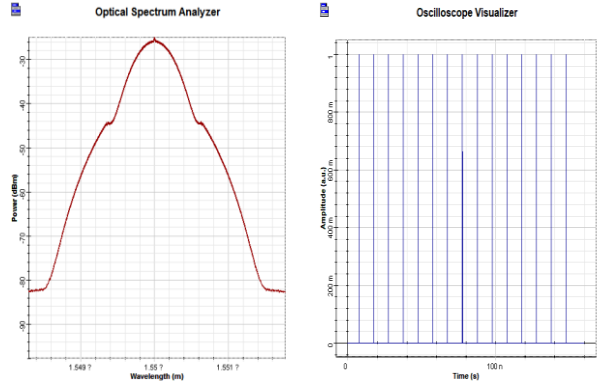


图 3 仿真原理图

Fig. 3 Schematic diagram of the simulation system

本文使用 OptiSystem13.0 软件进行仿真研究，此处仿真考虑的是理想情况，光源部分使用加噪声的脉冲高斯电信号调制连续光激光器代替锁模激光器，获得谱宽 2 nm、脉冲重频为 100 MHz 的周期性光脉冲序列：图 4(a)为仿真得到的光源输出光信号的光谱图、图 4(b)为仿真得到的周期性光脉冲序列的波形图。光滤波器采用带宽为 0.2 nm 高斯光滤波器，延迟调控部分光纤长 2 m。干涉仪长臂中的延迟光纤选择长度 2 km 损耗为 0.2 dB/km 的单模光纤，在 λ_2 部分增加 199.5 ps 的时间延迟，最后将混合光移频 75 MHz（作为载频）。光在 PD 探测前仍由光纤滤波器分别滤波，其强度为 2 mW、0.5 mW，光在 PD 处拍频： $\lambda_1 = \tau(mf_{rep} + f_{ceo} + 2f_m)$ ， $\lambda_2 = \tau(nf_{rep} + f_{ceo} + 2f_m)$ ，其中延迟时间 τ 以载频

$2f_m$ 的形式加权在频率梳齿上，将得到的包含载频的梳齿通过中心频率 150 MHz 带宽 20 MHz 的电高斯带通滤波器进行滤波，滤出载波频率 $2f_m$ 部分后进入混频器进行混频，消掉了公共部分频率 $f_{ceo} + 2f_m$ ，混频器输出的仅为重复频率噪声 $\delta(\tau(n-m)f_{rep})$ ，最后通过带宽为 10MHz 的电低通滤波器后得到在 DC 附近携带抖动信息的电压信号。



(a) 激光器光谱图

(b) 激光器脉冲波形图

(a) Laser spectrogram

(b) Laser pulse waveform

图 4 仿真光源的时域和频域特性图

Fig. 4 The Time-domain and frequency-domain characteristic diagrams of the simulation light source

仿真通过调节精度延迟调控部分改变 λ_1 、 λ_2 之间的时间延迟，使得两包络在时域上重合，再调节延迟调控部分光纤长度改变 λ_1 、 λ_2 与待测光之间的时间延迟，使得待测光脉冲与参考光脉冲在同一时刻进入 PD，获得最佳拍频结果。其中不同重频的光源对应不同的处理方法。注意，当光源重频为 70MHz，载频为 100 MHz 时，其脉冲光拍频信号如图 5 所示。图 5 为混频前其中一路信号，对应 λ_1 部分：a 为 100 MHz 载频信号；b 是 110 MHz 拍频信号，由 3 倍重频 210 MHz 信号与 100 MHz 载频信号差频所得；c 是 70 MHz 和 140 MHz 重频信号。另一路信号对应 λ_2 部分，与图 5 相似，仅拍频信号强度不同。值得注意的是，仿真中经电带通滤波器滤波后出现两个明显的拍频信号，其中额外的 110 MHz 信号是两次拍频结果。由于 100 MHz 信号可以表示为 $f_1 = (m-n)f_{rep}$ ，其中 m 、 n 为拍频产生的载频的模式次数。210 MHz 的 3 倍频信号可以表示为 $f_2 = (x-y)f_{rep}$ ， x 、 y 为拍频产生的倍频信号的模式次数，其 2 次差频得到 110 MHz 信号： $f_3 = [(m-n)-(x-y)]f_{rep}$ 。 f_3 代表二次差频信号如 110 MHz 或 10 MHz，其从理论上更能反应出抖动信息。且参考光在光纤干涉仪中受到环境噪声及声光调制 f_m 等额外噪声的影响，这些附加噪声若未提前消除则在后续放大混频中更不易消除。而 f_3 梳齿

的二次差频可以有效减小这些附加噪声，从而使实验的混频结果更具可信度。

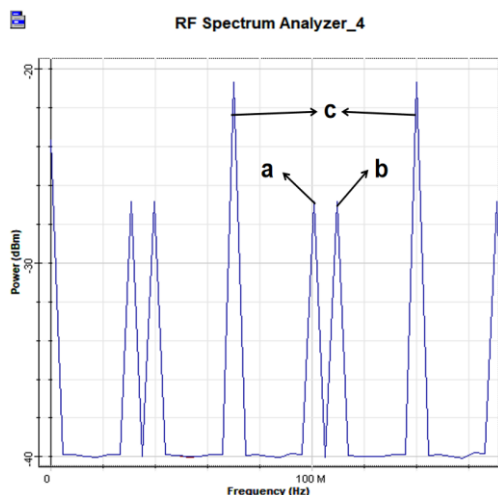
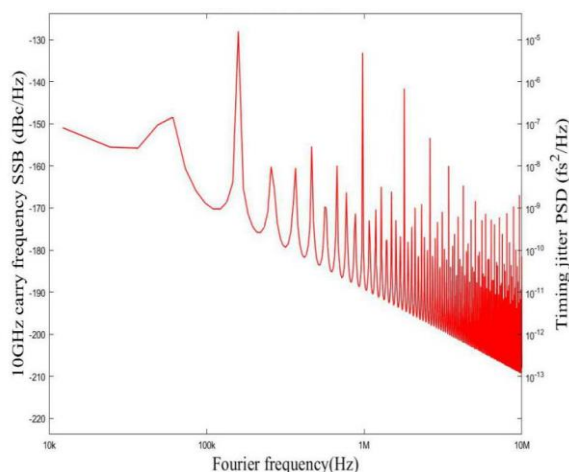


图 5 混频信号的频域展现

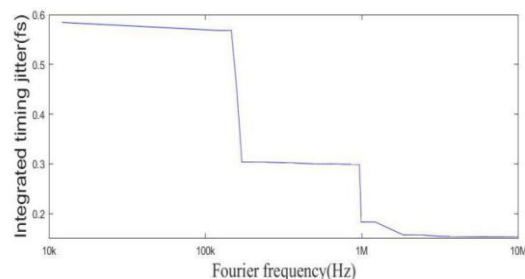
Fig. 5 Frequency-domain representation of mixing signal

仿真测得 10 GHz 载频处的相位噪声如图 6 所示，在频率偏移 10 MHz 处的噪声基底为 $3.29 \times 10^{-13} \text{ fs}^2/\text{Hz}$ (相当于 $-211 \text{ dBc}/\text{Hz}$)，从 10 kHz 到 10 MHz 频率偏移的 RMS 时间抖动仅为 535 as。由于仿真软件 OptiSystem13.0 本身的限制，系统采样率难以精确变化，致使仿真最低频率最终取到 10 kHz。但这并不影响系统对相位噪声及时间抖动的测量，因为实验中低频处的相位噪声会受到环境噪声、自发辐射噪声、PD 的散射粒子噪声以及热噪声等影响 [16]，这些额外噪声限制了低频相位噪声的测量准确性。图 6(a)显示相位噪声 PSD 及时间抖动总体随傅里叶偏移频率逐渐增加而递减，而在频率 $1/\tau$ (100 kHz) 及其谐波处的峰为光纤延迟线系统导致的伪像峰 (无效峰)，会在一定程度上增加测得总的 RMS 时间抖动。图 6(b)也展示出了总的 RMS 时间抖动随偏移频率递增而递减，在 $1/\tau$ 及其谐波处之前下降放缓，但在伪像峰结束后会出现明显的骤降。伪像峰源自于光纤延迟系统传输方程 $T(f)$ ，图 6(c)展示了传输方程曲线图。由于频率噪声 PSD 等于电压噪声 PSD 与传输方程平方的比值，所以相位噪声 PSD 及 RMS 时间抖动曲线均含有伪像峰导致的起伏。



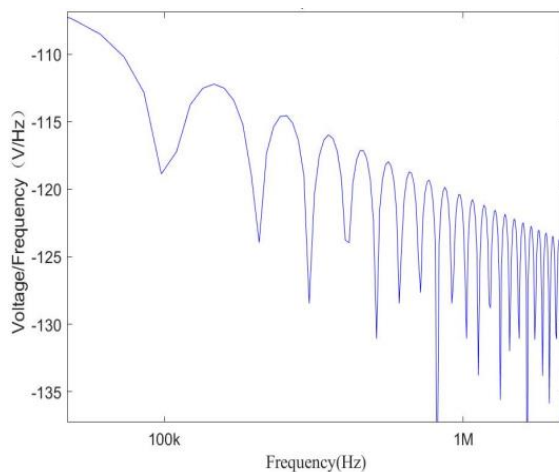
(a) 相位噪声及时间抖动功率谱密度图

(a) Phase noise PSD and timing jitter PSD



(b) 总的均方根时间抖动

(b) Integrated timing jitter PSD



(c) 转化方程

(c) Transfer equation function

图 6 10 GHz 载频下单边带相位噪声功率谱密度及总的 RMS 时间抖动

Fig. 6 Single side-band phase noise power spectral density at 10 GHz carrier frequency and integrated timing jitter

通过改变光纤延迟线长度来验证延迟线长度对于系统测量灵敏度的影响，仿真分别测量了光纤延迟线长度为 60m(a)、100m(b)、160m(c)时的相位噪声。

测得单边带相位噪声PSD如图7所示，当延迟线长度越长，测得的相位噪声及时间抖动值的曲线就越低，积分获得的总的时间抖动就应当越小。这是由于光纤延迟线的延迟时间为 τ ，延迟线越长对应的延迟时间 τ 就越长，且根据传输方程 $T(f)$ (公式1)，系统测量的灵敏度也越大。由于电压噪声 PSD 与 $T(f)^2$ 的比值即为频率噪声 PSD，导致频率噪声 PSD 及相位噪声 PSD 的值就应当越小。但是，由于在 $1/\tau$ 的傅立叶频率及其谐波下，检测灵敏度无效（生成伪像峰），这些伪像峰不是系统的真实噪声，但会在一定程度上增加测得时间抖动的值，当延迟线长度较长以获得较高测量精度的同时，伪像峰出现的位置距离零频点也会越近，在保证频率偏移取值较高时，测量结果就会受伪像峰影响，使测量值虚高，因此无法确定延迟线长度的变化一定会使系统测得总的时间抖动的值越好还是越差。即便如此，在实验搭建该测量系统时，光纤延迟线长度的选择仍至关重要，既要保证大于相干长度（30 m），又要保证能够获得较高的测量精度并尽量避开伪像峰的影响。所以经综合考虑，我们选择了长度为 2 km 的延迟光纤，这可以保证获得较低的相位噪声曲线，并且可以使伪像峰出现在 1 MHz 的频偏之后，方便比较。

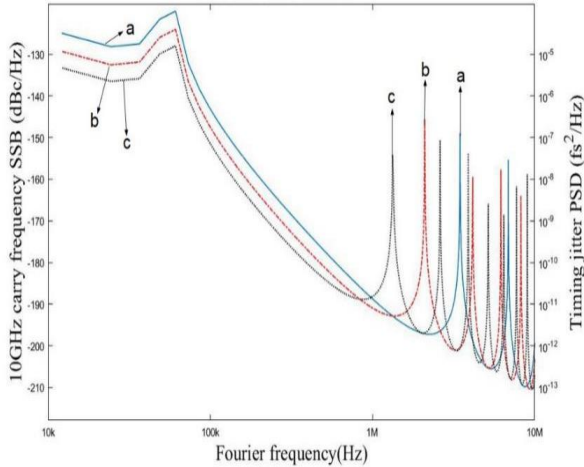
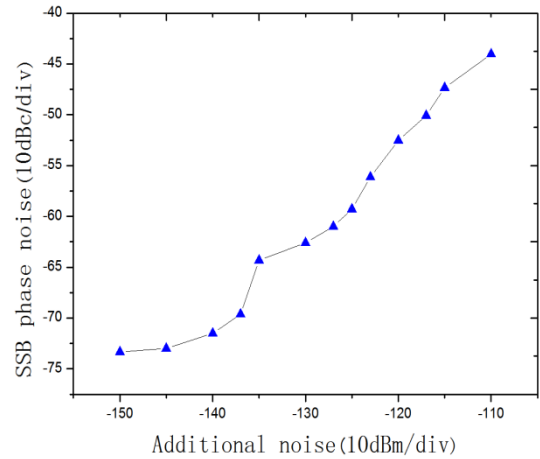


图 7 10GHz 载频下不同长度光纤延迟线单边带相位噪声功率谱密度

Fig. 7 Single side-band phase noise power spectral density of different lengths of fiber delay lines at 10 GHz carrier frequency

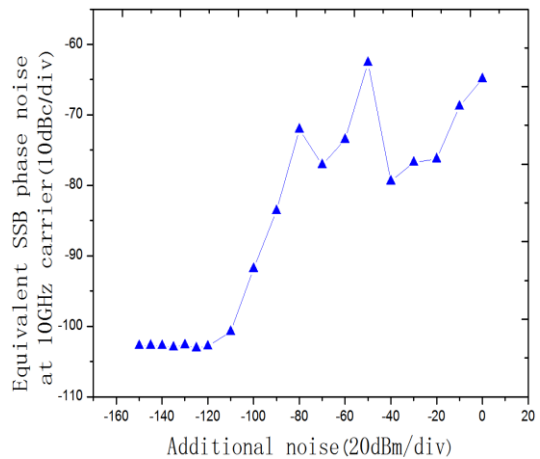
上述仿真结果展示了系统测得的阿秒级别时间抖动，为了验证测量结果的可行性，我们改变光源噪声大小，再测量系统相位噪声的变化情况。我们在光源处加入高斯白噪声模拟真实激光器中的噪声，图 8(a)显示当附加的高斯白噪声从-150 dBm 增

加到-110 dBm 时，系统测得的总相位噪声与在光源处附加的额外噪声成线性递增关系。图 8(b)显示了在 10 GHz 载频处的相位噪声变化曲线，增大测量区间从-150 dBm 到 0 dBm。当附加噪声大于-80 dBm 后噪声功率淹没信号功率，测得单边带相位噪声功率谱密度在-70 dBc/Hz 处震荡。由于当噪声功率远大于信号功率时，光源信号被淹没，且每次光源处加入的高斯白噪声是随机信号，经过系统放大测量后的值存在一个浮动范围。通过分析两图能够清晰地看出系统测得的相位噪声随附加噪声递增而增加，从而证明了测量结果的可靠性。



(a) 总的相位噪声随光源噪声从-150dBm 到-100dBm 的变化图

(a) Total phase noise change with source from -150dBm to -100dBm



(b) 10GHz 载频处的相位噪声随光源噪声从-150 dBm 到 0dBm 的变化图

(b) Phase noise change with source noise curve on 10 GHz carrier frequency from -150 dBm to 0 dBm

图 8 相位噪声随源附加噪声的变化

Fig. 8 Phase noise varies with source additional noise

通过选择不同带宽的光带通滤波器验证滤波器带宽对时间抖动的影响。如图 9 所示，仿真分别测

量了滤波带宽器为 0.1 nm (A)、0.05 nm (B)、0.01 nm (C) 时的相位噪声。非常明显, 滤波器带宽越小相对应的时间抖动 PSD 也越小, 即 $A > B > C$ 。从此可以看出, 在保证信号经光滤波后能获得足够多梳齿的前提下, 实验中采用的滤波器带宽越小, 系统测得的相位噪声 PSD 及时间抖动 PSD 的值即越好。但是, 考虑到实际滤波器的带宽受限与工厂制造水平, 所以在未来的工程应用中尽可能的选择带宽较小、滚降较大的光带通滤波器即可。

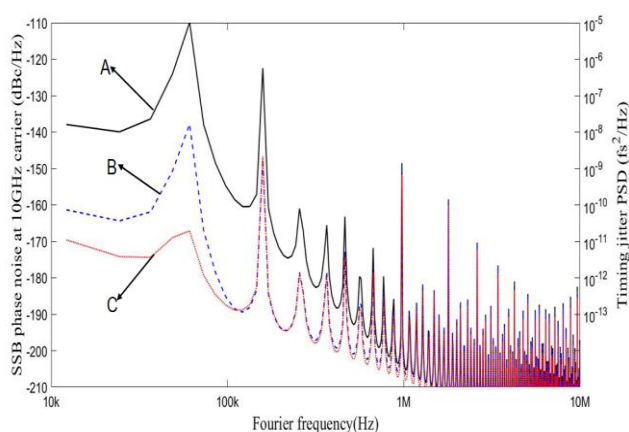


图 9 光滤波器带宽对时间抖动 PSD 的影响

Fig. 9 Comparison of Timing jitter PSD measurement results for different filter bandwidth

系统设计中另一个很关键的部分是处理好系统的色散, 总的色散要保持足够低以保证戈登-豪斯抖

动 (Gordon-Haus) 不会影响到测量^[17]。仿真中 2 km 光纤的总色散约为 33.5 ps/nm, 其戈登-豪斯抖动远低于测量分辨率, 如果色散过高可以在方案中加入色散补偿光纤, 但要注意保持总长度一定。尽管如此, 我们仍不可忽视该方案所带来的最突出的优点: 无需两个相似参考源的情况下仍能测得较高精度的时间抖动, 相较于现在主流的双光源鉴相法具有明显的优势。这样的方法可以直接应用在梳状源的优化上, 无需设置参考源, 可以大大减小系统体积及成本, 并且该方法光纤部分的稳定性可以让系统更加适应严苛的实验环境。

5 结论

本文展示了一种高精度、无参考源的时间抖动测量方案。它使用光纤延迟线技术消除了传统测量方案中对于参考源的严苛需求, 并且增强了系统的可实现性和可操作性, 相较于复杂的 BOC 技术更加简便、高效。此外, 本文优化了理论系统结构, 解释分析了伪像峰的形成机理, 提出了二次差频梳齿模型, 从而为该测量方案的系统实现及其性能评估和将来的工程应用提供了理论支持。仿真结果表明该方法在傅里叶频率 10 kHz-10 MHz 内仍能实现阿秒 (535 as) 级别的时间抖动测量, 且该方案能够真实可靠地反映出噪声信息, 说明实验存在较大提升空间。此测量手段将在微波光子雷达、集成光频梳、光纤光频梳系统、阿秒科学等领域有重要应用, 我们希望仿真结果及后续的实验能够为理解和优化超低光信号时间抖动或噪声测量提供有意义的帮助。

参考文献:

- [1] DEL'HAYE P, SCHLISSER A, ARCIZET O, *et al.*. Optical frequency comb generation from a monolithic microresonator[J]. *Nature*, 2007, 450(7173): 1214-1217.
- [2] LUDLOW A D, BOYD M M, YE J, *et al.* Optical atomic clocks[J]. *Reviews of Modern Physics*, 2015, 87(2): 637.
- [3] HUDSON D D, FOREMAN S M, CUNDIFF S T, *et al.*. Synchronization of mode-locked femtosecond lasers through a fiber link[J]. *Optics letters*, 2006, 31(13): 1951-1953.
- [4] PANT R, MARPAUNG D, KABAKOVA I V, *et al.*. On-chip stimulated Brillouin Scattering for microwave signal processing and generation[J]. *Laser & Photonics Reviews*, 2014, 8(5): 653-666.
- [5] VALLEY G C. Photonic analog-to-digital converters[J]. *Optics express*, 2007, 15(5): 1955-1982.
- [6] GRODENSKY D, KRAVITZ D, ZADOK A. Ultra-wideband microwave-photonic noise radar based on optical waveform generation[J]. *IEEE Photonics technology letters*, 2012, 24(10): 839-841.
- [7] ALLARIA E, APPIO R, BADANO L, *et al.*. Highly coherent and stable pulses from the FERMI seeded free-electron laser in the extreme ultraviolet[J]. *Nature Photonics*, 2012, 6(10): 699-704.
- [8] 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.

- [9] ANGLADA-ESCUDE G, AMADO P J, BARNES J, *et al.*. A terrestrial planet candidate in a temperate orbit around Proxima Centauri[J]. *Nature*, 2016, 536(7617): 437-440.
- [10] CORKUM P B, KRAUSZ F. Attosecond science[J]. *Nature physics*, 2007, 3(6): 381-387.
- [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] T R Schibli, J Kim, O Kuzucu, *et al.*. Attosecond active synchronization of passively mode-locked lasers by balanced cross correlation[J]. *Optics Letters*, 2003, 28(11):947-949.
- [13] JONES R J, THOMANN I, YE J. Precision stabilization of femtosecond lasers to high-finesse optical cavities[J]. *Physical Review A*, 2004, 69(5): 051803.
- [14] 李志刚, 李军, 吴吉祥, 等. 光纤延时技术的特点及应用[J]. *光通信技术*, 2007(06): 62-64.
LI ZHI-GANG, LI JUN, WU JI-XIANG, *et al.*. The characteristics and application of fiber delay technology[J]. *Optical communication technology*, 2007(06):62-64.
- [15] 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(1): 1-9.
- [16] SHIN J, JUNG K, SONG Y, *et al.*. Characterization and analysis of timing jitter in normal-dispersion mode-locked Er-fiber lasers with intra-cavity filtering[J]. *Optics express*, 2015, 23(17): 22898-22906.
- [17] GORDON J P, HAUS H A. Random walk of coherently amplified solitons in optical fiber transmission[J]. *Optics letters*, 1986, 11(10): 665-667.

作者简介: 徐鹏(1994-), 男, 吉林人, 硕士, 现在中国科学院西安光学精密机械研究所攻读硕士学位, 主要从事微波光子学方向研究。E-mail: 15500315973@163.com



刘元山(1975-), 男, 陕西石泉人, 西北工业大学, 教授, 1999年毕业于西北大学获学士学位, 2008年中科院西安光学精密机械研究所获博士学位。主要从事高速通信光源、光纤激光器、高速光取样技术、光信息处理, 光频梳和微波光子学方面的研究。E-mail: liuyuanshan@nwpu.edu.cn



“导师简介”: 张建国(1964-), 男, 博士生导师, 主要从事超宽带光学取样示波器、超快全光信号处理、光纤通信技术、航空光纤数据总线、光纤-毫米波综合通信系统等。近期研究兴趣为微波光子学及其在电信和测量仪器等领域的工程应用。为英国物理学会会士 (IOP Fellow)。E-mail: jian-guo-zhang@126.com

