

基于光纤光梳的传递振荡器技术研究

杨明哲^{1*}, 孟飞², 林弋戈², 宋有建¹, 方占军², 胡明列¹

¹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;

²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 研究了基于光纤飞秒光学频率梳的传递振荡器技术,介绍了其基本原理,设计并搭建传递振荡器系统,实现了主激光器与从激光器光学频率的相干传递,锁定后系统环内拍频信号的 s 级频率稳定度达 5×10^{-19} 量级。搭建了两套传递振荡器系统,将主激光器的光学频率同时传递至两个独立的从激光器,分析了锁定后两个从激光器拍频信号引入系统中的相位噪声。通过提高拍频信号信噪比、优化信号处理过程、减小外部环境干扰等方法,最终两个从激光器得到的环外拍频信号线宽小于 30 mHz,光学频率传递的 s 级频率稳定度达 1.4×10^{-17} 量级。

关键词 传递振荡器; 光学频率; 飞秒光学频率梳; 锁相环; 直接数字频率合成技术

中图分类号 TN249

文献标志码 A

doi: 10.3788/LOP57.070602

Research on Transfer Oscillator Technology Based on Fiber Optical Frequency Comb

Yang Mingzhe^{1*}, Meng Fei², Lin Yiyi², Song Youjian¹, Fang Zhanjun², Hu Minglie¹

¹Key Laboratory of Opto-Electronic Information Technology of the Ministry of Education, School of Precision Instruments and Opto-Electronics Engineering, Tianjin University, Tianjin 300072, China;

²Laboratory of Optical Frequency Standard, Time and Frequency Metrology Division, National Institute of Metrology, Beijing 100029, China

Abstract Transfer oscillator technology based on femtosecond optical frequency comb is studied, its basic principles are introduced, and the transfer oscillator system is designed and built. The coherent transfer of optical frequency between the master laser and the slave laser is realized. The second-level frequency stability of beat note signal in the system loop reaches the order of 5×10^{-19} . For further evaluation, two sets of transfer oscillator systems are setup to transmit the optical frequency of the master laser to two independent slave lasers at the same time, and the phase noise introduced into the system by the beat note signal of the two slave lasers after locking is analyzed. By improving the signal-to-noise ratio of the beat note signal, optimizing signal processing, and reducing external environmental interference, the two outer beat note signals obtained from the two slave lasers have a line width of less than 30 mHz and the s-level frequency stability of optical frequency transmission reaches the order of 1.4×10^{-17} .

Key words transfer oscillator; optical frequency; femtosecond optical frequency comb; phase locked loop; direct digital synthesis technology

OCIS codes 060.1660; 060.5060; 120.4820; 140.7090

1 引 言

随着激光技术的快速发展,对光钟的研究也更加深入,目前光钟的不确定度最高可达到 10^{-18} 量

级^[1],因具精度高、稳定性好,已成为众多领域的研究热点^[2-7],有望取代铯原子喷泉钟成为复现 s 定义的基准。利用光钟进行相关研究与应用时,需要将光钟输出激光的高稳定、窄线宽特性传递至其他波

收稿日期: 2019-09-09; 修回日期: 2019-11-09; 录用日期: 2019-11-19

基金项目: 国家自然科学基金(91736310)、国家重点研发计划(2016YFF0200200, 2017YFA0304400)、天津市自然科学基金(18JCYBJC16900)、广东省重大科技专项(2018B090944001)

* E-mail: 651029887@qq.com

长,传统方法先将光梳锁定到窄线宽的光钟激光器上,再将位于所需波段的激光器锁定到对应的光梳梳齿上,以实现光学频率的传递^[8-9],如光钟比对及远距离光频传输实验。但这种方法需要使用低噪声或具有高速伺服锁定能力的光梳^[10]才能完成,且在宽谱范围内实现光学频率的传递,对光梳锁定质量的要求也比较高。2002年,德国PTB的Telle等^[11]提出“传递振荡器”(Transfer oscillator)的概念,不使用具有快速伺服能力的光梳,就能实现传递过程中对光梳噪声的免疫,为低噪声高相干性光学频率的传递提供了简便的方法,降低了其对复杂装置的依赖性。其原理是参考激光器(主激光器)和锁定激光器(从激光器)分别与光梳相对应的梳齿进行拍频,经光电探测器得到拍频电信号,再经一系列电学处理去除光梳引入的共模噪声,得到不包含光梳信息的混频电信号,最后用该混频信号对从激光器进行闭环反馈控制,从而实现主从激光器的相位相干锁定。“传递振荡器”在光钟比对、光学频率精确测量、光学频率比值测量、光学频率综合等方面有重要应用。2002年,德国PTB的Stenger等^[12]利用基于克尔棱镜锁模飞秒光梳的“传递振荡器”系统,实现了超精确的绝对光学频率比值测量,在100 s内的相对不确定度达 10^{-18} 量级。2013年,Hagemann等^[13]利用“传递振荡器”实现了s级频率稳定度达 10^{-16} 量级的 $1.5\ \mu\text{m}$ 到698 nm之间的传递,并详细讨论了光梳在传递过程中产生的噪声。2014年,Godun等^[14]利用“传递振荡器”测量了光学频率比值,且72 h内绝对频率的相对不确定度达 6×10^{-16} 量级。2014年,法国巴黎天文台的Nicolodi等^[15],利用传递振荡器技术将相对频率稳定度为

4.5×10^{-16} 的1062 nm主激光器的光学频率传递至1542 nm从激光器,并将从激光器与另一个通过Pound-Drever-Hall(PDH)稳频技术锁定到超稳腔的1542 nm参考激光器进行拍频,拍频信号的s级相对频率稳定度达 3×10^{-18} 量级。不同于Telle等^[11]利用基于掺钛蓝宝石激光器的光梳,该团队利用基于掺铒光纤振荡器的光学频率梳,用一个腔内电光调制器的快速伺服能力将光梳的重复频率紧锁至超稳连续激光器上,得到了很好的效果,但装置较为复杂。

本文研究了基于光纤光梳的“传递振荡器”系统,阐明了“传递振荡器”的工作原理,利用一台商用飞秒光纤光梳,搭建了“传递振荡器”系统,实现了光学频率特性由主激光器向从激光器的传递,分析了频率传递的相对稳定性和系统中的噪声,相比其他系统,装置更简单、可靠性高,且易操作,为今后相关工作提供了参考。

2 基本原理与装置

“传递振荡器”系统的基础是光学频率梳^[16],锁模激光器发出的脉冲在时域上表现为超短光脉冲序列,经傅里叶变换到频域则表现为梳状结构,频域上光梳的任一梳齿频率都可表示为

$$\nu_m = f_{\text{ceo}} + m f_{\text{rep}}, \quad (1)$$

式中, ν_m 为光梳第 m 根梳齿的光学频率, f_{rep} 为光梳输出脉冲的重复频率, f_{ceo} 为光梳的载波包络偏移频率^[17]。光梳的独特性,使其在测距、时频等领域发挥着重要作用^[18-20]。

“传递振荡器”以光梳为“桥梁”,实现主从激光器之间的光学频率传递,其基本原理是利用光梳进行共模噪声的相减,原理图如图1所示。

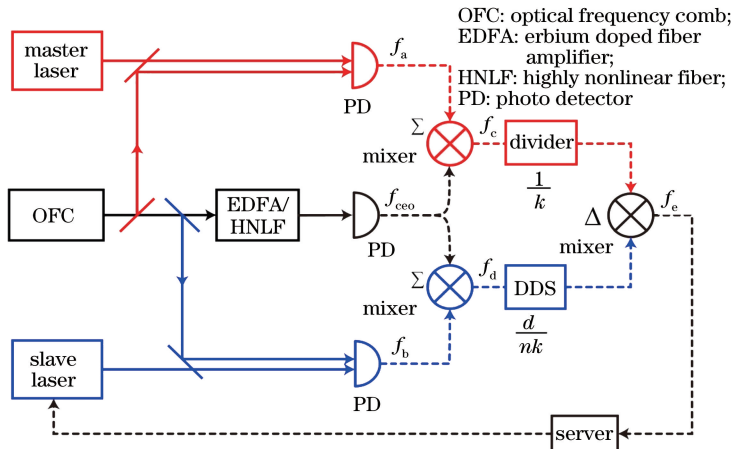


图1 传递振荡器原理图

Fig. 1 Principle of transfer oscillator

主激光和从激光分别与飞秒光梳进行拍频,经高速光电探测器和滤波器后得到两个连续光与光梳相对应梳齿的拍频电信号,分别为 f_a 和 f_b

$$f_a = \nu_a - \nu_d = \nu_a - f_{ceo} - df_{rep}, \quad (2)$$

$$f_b = \nu_b - \nu_n = \nu_b - f_{ceo} - nf_{rep}, \quad (3)$$

式中, ν_a 和 ν_b 分别为主激光频率和从激光频率。 d 和 n 分别为与 ν_a 、 ν_b 相邻的光梳梳齿序号。将 f_a 和 f_b 分别与 f_{ceo} 混频,滤波后得到信号可表示为

$$f_c = f_a + f_{ceo} = \nu_a - df_{rep}, \quad (4)$$

$$f_d = f_b + f_{ceo} = \nu_b - nf_{rep}. \quad (5)$$

混频过程消去了光梳的 f_{ceo} 及其携带的噪声,但还需消去重频噪声 f_{rep} 。信号 f_c 经分频器分频,得到 $\frac{f_c}{k}$, f_d 经直接数字频率合成器(DDS)合成频率

为 $\frac{df_d}{nk}$ 的信号。由于 DDS 通过数字采样分频输入时钟,从而输出所需频率,根据奈奎斯特采样定理,采样的输入时钟信号频率至少大于输出信号频率的

两倍,即

$$f_{out} = \frac{f_{in}}{R}, \quad (6)$$

式中, R 为有理数,且 $R > 2$,而实验中的 $\frac{n}{d}$ 不符合此条件,所以将两路信号同时除以 k ,经分频器与 DDS 得到信号 $\frac{f_c}{k}$ 和 $\frac{df_d}{nk}$ 后再进行混频,可表示为

$$f_e = \frac{f_c}{k} - \frac{df_d}{nk} = \frac{\nu_a}{k} - \frac{d\nu_b}{nk}. \quad (7)$$

由(7)式可以看出,信号 f_e 只与主、从激光器的光频 ν_a 、 ν_b 以及常数 d 、 n 、 k 有关,而与光梳的其他参数无关,即锁定激光器频率对光梳梳齿噪声“免疫”。可利用 f_e 信号通过锁相环路反馈控制从激光器频率,实现光学频率由主激光器到从激光器的传递。

“传递振荡器”系统的实验装置如图 2 所示,包括光路与电路(Transfer box)两部分。

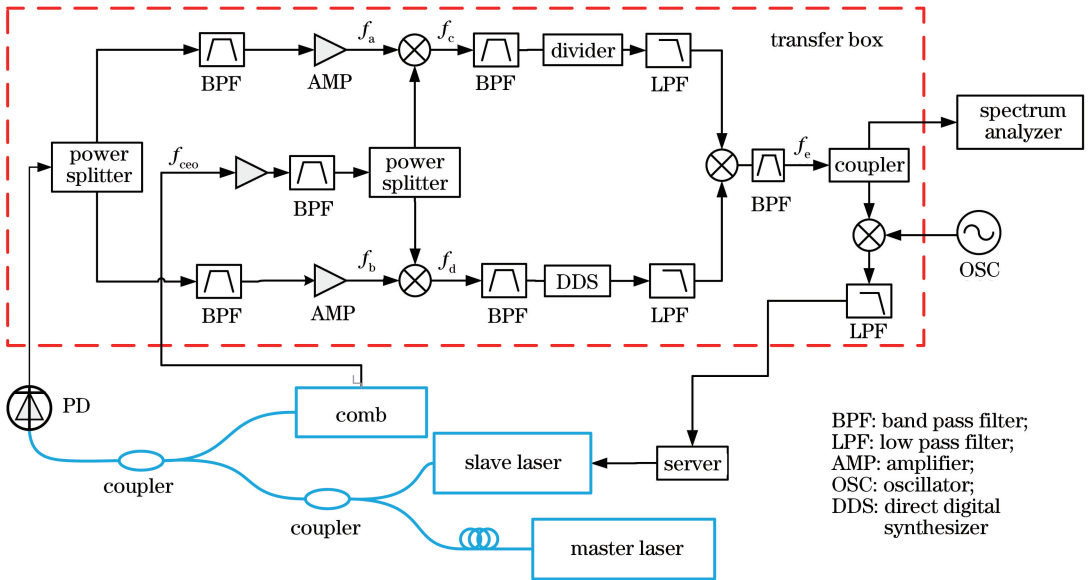


图 2 传递振荡器系统装置图

Fig. 2 System setup diagram of the transfer oscillator

实验使用商用掺铒光纤光梳(Menlo system, FC1550),其 f_{rep} 约为 250 MHz,通过控制压电陶瓷驱动器(PZT)实现重复频率的调节及锁定。 f_{ceo} 由 $f - 2f$ 技术得到,约为 20 MHz,将 f_{rep} 与 f_{ceo} 均锁定到氢钟微波信号源上。因为信号在处理过程中消去了 f_{ceo} ,所以不锁定 f_{ceo} 也能实现整个系统的正常工作; f_{rep} 则由于梳齿序号 n 太大而必须锁定,否则 f_a 和 f_b 会有较大漂移而使系统难以入锁。主激光器采用 Pound-Drever-Hall(PHD)稳频的窄线宽激

光器(Stable laser system),波长约为 1542.39 nm,线宽约为 0.7 Hz,通过 20 m 的单模光纤传输至实验台后线宽有所展宽。参考氢钟的光梳测量得到 $\nu_a \approx 194369022374.3$ kHz,对应的梳齿序号 $d = 777476$;从激光器选用半导体激光器(RIO, Planex),测绘了从激光器在 100 mA 的驱动电流下的温度-波长、温度-功率曲线,温度在 14~37 °C 范围内变化时,输出波长范围为 1542.05~1542.40 nm,输出功率范围为 0.5~12 mW。利用

温度控制器(Thorlabs, TED200C)将从激光器温度固定在 26 °C 左右,其工作在单一模式时的绝对频率 $\nu_b \approx 194379$ GHz,对应的梳齿序数 $n = 777517$,用一台可高速伺服的电流源(ILX Light wave, LDX3620)驱动从激光器作为锁相环路的执行器。主、从激光器发出的连续光经 1:1 光纤耦合器合束后的光再经过 9:1 光纤耦合器与光梳光耦合,耦合器出射光包含主激光与从激光分别与光梳相邻梳齿的拍频信息,再经过一段空间耦合光路耦合进光电探测器(EOT, ET-3000A),为了简化光路和减少器件,重复使用了光电探测器。优化光路后得到信噪比 $R_{SN} \approx 35$ dB 的拍频信号。电学方面,探测器后面的功率分配器及滤波器(Minicircuits),将主、从激光分别与光梳拍频的电信号分离出来,对电信号的整体处理过程及可用的滤波器型号进行分析后,将光梳的重复频率锁定至 249.999929 MHz,使 $f_a \approx 61$ MHz, $f_b \approx -151$ MHz。与 f_{ceo} 混频后分别为 $f_c \approx 81$ MHz, $f_d \approx -131$ MHz,分频系数设置为 10, f_c 经分频器分频, f_d 经 DDS(Analog Devices, AD9959)进行直接数字频率合成,比例系数为 $\frac{d}{10n}$,由 32 位控制字决定,将 DDS 的频率控制字设置为 $[\frac{2^{32}d}{10n}] = [429474081.393] = 429474081$ 。两路信号经混频器混频并滤波后,得到 $f_e \approx 21.2$ MHz。 f_e 与锁定至氢钟的信号发生器产生频率约为 21.2 MHz 的信号后,进行鉴相生成误差信号,经低通滤波后送入伺服控制器(New Focus, LB1005),伺服器输出控制从激光器的驱动电流源从而实现“传递振荡器”系统的锁定。

3 实验与分析

3.1 单台“传递振荡器”系统实验结果与分析

将装置连接好,调节从激光器的温度、驱动电流至预设位置,锁定光梳重复频率至氢钟参考,使同一氢钟参考下的信号发生器输出频率为 21.2 MHz,振幅为 7 dBm 的正弦信号,然后根据示波器(Rigol, DS1074Z)显示的误差信号调节伺服控制器,实现整个系统的锁定,锁定带宽约为 70 kHz。锁定后环内的 f_e 信号如图 3(a)所示,信号变化的峰峰值约为 0.5 MHz。艾伦偏差(Allan deviation)曲线如图 3(b)所示,其横坐标表示平均时间,纵坐标表示信号频率在该平均时间下的相对稳定度。在 1 s 的平均时间内相对频率稳定度达到 5×10^{-19} 量

级,在 1024 s 时下降至 1.7×10^{-20} 量级。利用高速光电探测器(Finisar, XPOV2120R)得到主、从激光器的拍频信号,并用高速频谱分析仪(Ceyear, AV4051H)观察得到的结果如图 3(c)所示,在分辨率带宽已经达到该频谱仪极限 1 Hz 的情况下,信号仍是高斯型曲线,这证明了实际线宽小于 1 Hz。使用相位噪声分析仪(Agilent technologies, E5052B)测绘出该信号的相位噪声功率谱如图 3(d)所示,其中上升曲线为对相位噪声功率谱进行积分的结果,得到的积分剩余相位噪声值为 0.0477 rad。由(1)式~(7)式,得到从激光器的光学频率为

$$\nu_b = \frac{nk}{d} \left(\frac{\nu_a}{k} - f_e \right). \quad (8)$$

为了讨论 DDS(控制字位数为 32)的分辨率对系统不确定度的影响,将 DDS 的频率控制字设为 429474081,实际分频比 $R_{real} = 429474081 \div 2^{32} = 0.09999472671188$,根据“传递振荡器”原理,理想分频比 $R_{ideal} = \frac{d}{nk} = 0.09999472680340$,二者相差 $\Delta R = 9.152 \times 10^{-11}$,引入的频率误差为 $\Delta f = f_d \Delta R = 12$ MHz,带来的相对不确定度为 6×10^{-17} 量级。可以发现这一误差主要影响光学频率的计算,对整个系统的锁定影响不大。对系统锁定的影响主要体现在无法完全消除的光梳重复频率项,DDS 的输出本应为 $f_{out} = \frac{df_{in}}{10n}$,但由于控制字位数的限制,实际上 DDS 的输出为 $f'_{out} = f_d \left(\frac{d}{10n} - \frac{0.393}{2^{32}} \right) = (\nu_b - nf_{rep}) \left(\frac{d}{10n} - \frac{0.393}{2^{32}} \right)$,可以发现实际的 f_e 信号中包含了 $\left(\frac{0.393n}{2^{32}} \right) f_{rep} = 7.1 \times 10^{-5} f_{rep}$,即未消除的重复频率项的系数是 7×10^{-5} 量级,所以未“免疫”的光梳重复频率噪声可以忽略。

3.2 双传递振荡器系统实验结果与分析

传递振荡器系统是一个闭环系统,上节主要对环内的 f_e 信号进行观测,但环内信号主要表征系统锁定的好坏程度,实际应用中还需要看环外的信号,而环外的主从激光器的拍频信号频率太高无法计数。所以本实验使用两套相同的“传递振荡器”装置将主激光器的频率特性同时传递给两个从激光器,可以认为两路传递是不相关且对稳定度的贡献是相等的,通过设置信号发生器的输出频率,使两个从激光器具有约 500 kHz 的频率差,然后观测

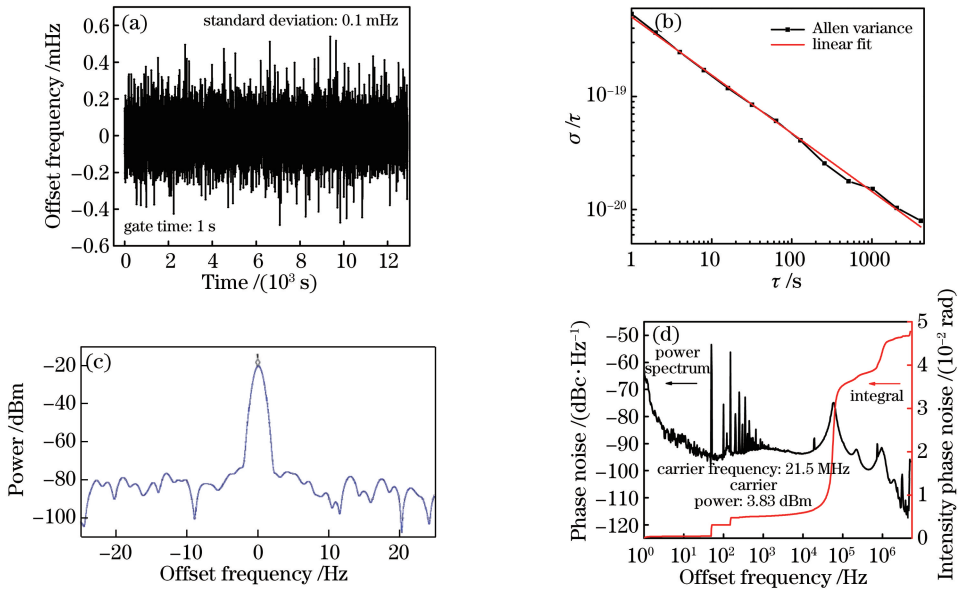


图3 单台传递振荡器系统测量结果。(a) f_c 计数结果;(b) f_c 艾伦偏差曲线;(c)主从激光器拍频线宽;(d) f_c 信号相位噪声
 Fig. 3 Results of single transfer oscillator system. (a) Counting result of f_c ; (b) Allen variance curve of f_c ;
 (c) line width of the beat note between master and slave laser; (d) phase noise of f_c .

两个从激光器环外的拍频信号,完成对本系统传递效果的评估。实验装置如图4所示,信号发生器输出频率分别设定为21.15 MHz和21.2 MHz,即 $\Delta f_c = \frac{d\Delta\nu_b}{nk} = 50$ kHz,两个从激光器的频率差 $\Delta\nu_b = 500026.36$ Hz,实际计数结果如图5(a)所示,符合预期计算结果,且信号变化峰峰值散发到20 mHz,由 f_c 的表达式可知, $\nu_b = \frac{-nk}{d}f_c + C$ (其中 $C = \frac{n}{d}\nu_a, \frac{nk}{d} \approx 10$),环内 f_c 信号的峰峰值散发约0.5 mHz,则 ν_b 的散发应为5 mHz左右,而实际测得的散发约为20 mHz,这是因为将主激光器分

为两路的光纤以及将从激光器合为一路的光纤不共路,引入了不同的振动噪声。测量结果的艾伦偏差曲线如图5(b)所示,1 s的平均时间下相对频率稳定度为 1.4×10^{-17} 量级,并在1000 s时达到 6×10^{-19} 量级。将拍频信号送入动态信号分析仪(Stanford research system, SR785)中进行快速傅里叶变换(FFT),观测拍频信号的线宽,结果如图5(c)所示,纵轴单位中的V为峰值电压Vpk的单位,在分辨率带宽为7.8 mHz的情况下,线宽约为27 mHz。其相位噪声功率谱及积分如图5(d)所示,其中上升曲线为对相位噪声功率谱进行积分的结果,可以发现剩余相位噪声值约为0.43 rad。

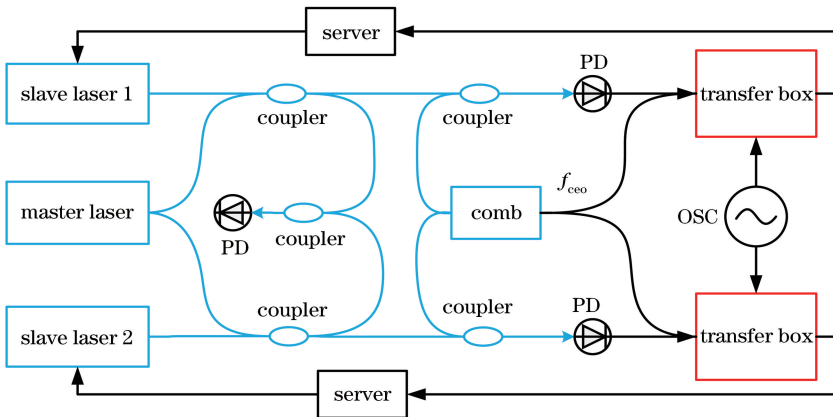


图4 双传递振荡器系统装置示意图
 Fig. 4 Schematic diagram of dual transfer oscillator system

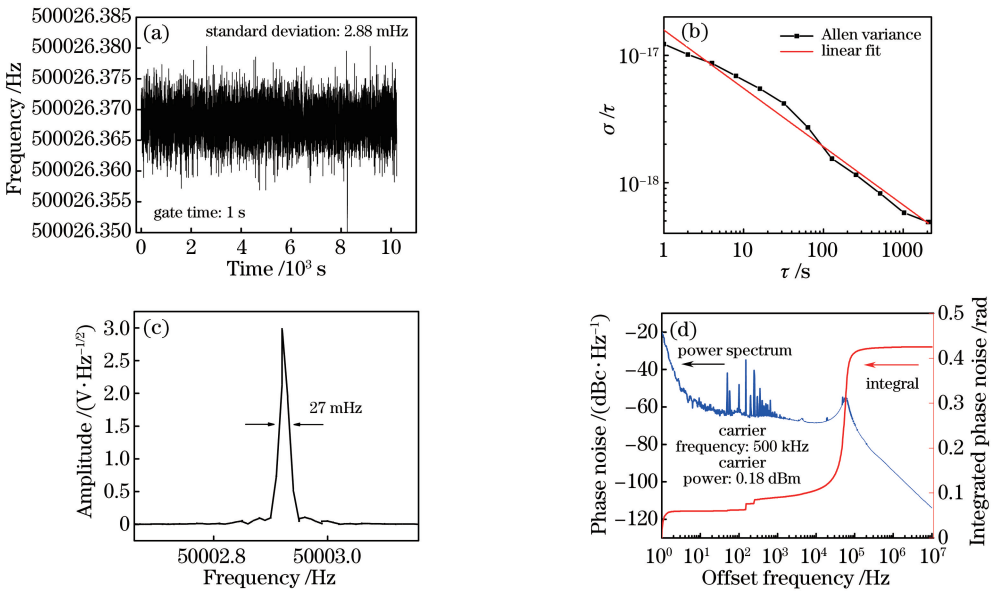


图 5 双传递振荡器系统测量结果。(a) 环外拍频计数结果；(b) 环外拍频艾伦偏差曲线；(c) 环外拍频线宽；(d) 相位噪声功率谱

Fig. 5 Results of dual transfer oscillator system. (a) Counting result of beat note between master and slave laser; (b) Allen variance curve of beat note between master and slave laser; (c) FFT spectrum of the beat note between master laser and slave laser; (d) phase noise power spectrum

3.3 对比实验——偏频锁定

为了更直观地表现“传递振荡器”系统的传递效果,进行了对比实验,在保持原有光纤链路不变的情况下,直接用偏频锁定的方法将两个从激光器分别独立锁定到主激光器上,而不使用“传递振荡器”系统,系统锁定后两从激光器的环外拍频信号计数结果及其相位噪声谱如图 6 所示。图 7 给出了两种情况下两台从激光器的拍频信号的艾伦

偏差曲线。可以看出平均时间小于 8 s 时,“传递振荡器”的结果略差于直接偏频锁定。这是由于系统中存在低频噪声,而 8 s 之后两条曲线近似“贴合”,说明加入“传递振荡器”系统并不引入额外的噪声,即传递效果已不受限于“传递振荡器”部分。而在 10 s 附近艾伦偏差曲线出现“鼓包”则是由于光纤光路受外界的温度、气流等低频噪声影响所致。

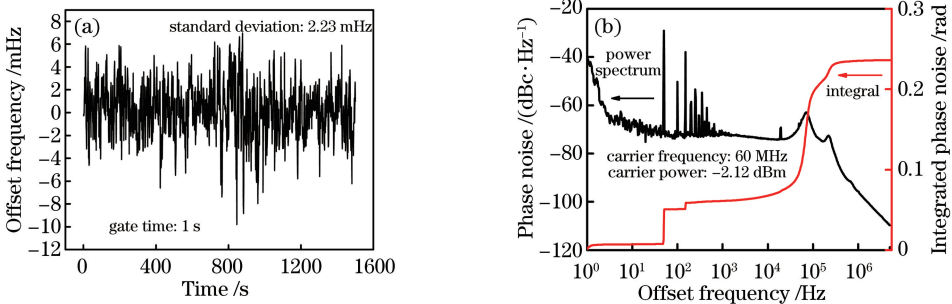


图 6 偏频锁定后从激光器拍频信号的测量结果。(a) 计数结果；(b) 相位噪声

Fig. 6 Measuring results of beat note between slave lasers after offset frequency locking.

(a) Counting result; (b) phase noise

4 结 论

利用一台慢速锁定的掺铒光纤飞秒频率梳搭建了两套“传递振荡器”系统,实现了由主激光器到从激光器的光学频率传递,环内信号 s 级相对频率稳

定度达到 5×10^{-19} 量级,对传递过程中的相位噪声进行了讨论分析。通过两个从激光器的拍频信号对传递效果进行进一步评估,发现光学频率传递的 s 级相对频率稳定度达 1.4×10^{-17} 量级,并通过对比实验证明了传递效果不受限于“传递振荡器”部分。

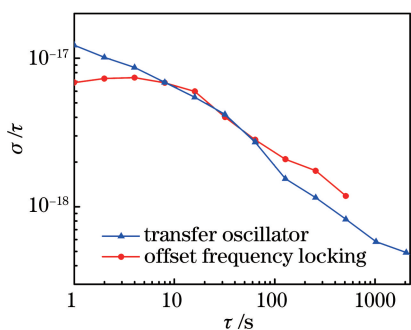


图7 传递振荡器锁定与偏频锁定情况下两个从激光器拍频的艾伦偏差曲线

Fig. 7 Allen variance curve of beat note between two slave lasers in different conditions

为光钟比对提供了技术储备,也为其他光学频率测量和传输的应用提供了新思路。但受实验条件限制,主、从激光器之间的波长差只有约 0.1 nm,而“传递振荡器”可以在光梳光谱范围内任意两波长之间传递。因此,未来将采用波长相差足够大的两个激光器开展实验,同时还需用空间光路代替光纤链路以减少外界环境如温度、气流等带来的噪声。

参 考 文 献

- [1] Ushijima I, Takamoto M, Das M, et al. Cryogenic optical lattice clocks[J]. *Nature Photonics*, 2015, 9(3): 185-189.
- [2] Bondarescu R, Bondarescu M, Hetényi G, et al. Geophysical applicability of atomic clocks: direct continental geoid mapping [J]. *Geophysical Journal International*, 2012, 191(1): 78-82.
- [3] Heß M P, Stringhetti L, Hummelsberger B, et al. The ACES mission: system development and test status [J]. *Acta Astronautica*, 2011, 69(11/12): 929-938.
- [4] Schiller S, Tino G M, Gill P, et al. Einstein gravity Explorer: a medium-class fundamental physics mission [J]. *Experimental Astronomy*, 2009, 23(2): 573-610.
- [5] Fischer M, Kolachevsky N, Zimmermann M, et al. New limits on the drift of fundamental constants from laboratory measurements [J]. *Physical Review Letters*, 2004, 92(23): 230802.
- [6] Bock H, Dach R, Yoon Y, et al. GPS clock correction estimation for near real-time orbit determination applications [J]. *Aerospace Science and Technology*, 2009, 13(7): 415-422.
- [7] Calhoun M, Huang S H, Tjoelker R L. Stable photonic links for frequency and time transfer in the

- deep-space network and antenna arrays [J]. *Proceedings of the IEEE*, 2007, 95(10): 1931-1946.
- [8] Coddington I, Swann W C, Lorini L, et al. Coherent optical link over hundreds of metres and hundreds of terahertz with subfemtosecond timing jitter [J]. *Nature Photonics*, 2007, 1(5): 283-287.
- [9] Hong F L, Musha M, Takamoto M, et al. Measuring the frequency of a Sr optical lattice clock using a 120 km coherent optical transfer [J]. *Optics Letters*, 2009, 34(5): 692-694.
- [10] Iwakuni K, Inaba H, Nakajima Y, et al. Narrow linewidth comb realized with a mode-locked fiber laser using an intra-cavity waveguide electro-optic modulator for high-speed control [J]. *Optics Express*, 2012, 20(13): 13769-13776.
- [11] Telle H R, Lipphardt B, Stenger J. Kerr-lens, mode-locked lasers as transfer oscillators for optical frequency measurements [J]. *Applied Physics B: Lasers and Optics*, 2002, 74(1): 1-6.
- [12] Stenger J, Schnatz H, Tamm C, et al. Ultraprecise measurement of optical frequency ratios [J]. *Physical Review Letters*, 2002, 88(7): 073601.
- [13] Hagemann C, Grebing C, Kessler T, et al. Providing 10^{-16} short-term stability of a 1.5- μm laser to optical clocks [J]. *IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement*, 2013, 62(6): 1556-1562.
- [14] Godun R, Nisbet-Jones P, Jones J, et al. Frequency ratio of two optical clock transitions in $^{171}\text{Yb}^+$ and constraints on the time variation of fundamental constants [J]. *Physical Review Letters*, 2014, 113(21): 210801.
- [15] Nicolodi D, Argence B, Zhang W, et al. Spectral purity transfer between optical wavelengths at the 10^{-18} level [J]. *Nature Photonics*, 2014, 8(3): 219-223.
- [16] Kim J, Song Y J. Ultralow-noise mode-locked fiber lasers and frequency combs: principles, status, and applications [J]. *Advances in Optics and Photonics*, 2016, 8(3): 465-540.
- [17] Yang S, Hao Q, Zeng H P. Repetition rate precision lock of nonlinear amplifying loop mirror passively mode-locked fiber laser [J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2018, 45(8): 0801007.
- 杨松, 郝强, 曾和平. 非线性放大环形镜被动锁模光纤激光器重复频率精确锁定研究 [J]. *中国激光*, 2018, 45(8): 0801007.
- [18] Xu L M, Song Y J, Liang F, et al. All polarization

- maintaining fiber based dual-comb high precision absolute distance measurement system [J]. *Acta Optica Sinica*, 2015, 35(s2): s212001.
- 许立明, 宋有建, 梁飞, 等. 全保偏光纤化的双光梳高精度绝对测距系统[J]. *光学学报*, 2015, 35(s2): s212001.
- [19] Zhao Y H, Qu X H, Zhang F M, et al. Theoretical analysis and application of absolute distance measurements based on electro-optic modulation and optical frequency comb [J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2018, 45(12): 1204002.
- 赵宇航, 曲兴华, 张福民, 等. 基于电光调制光频梳绝对测距的理论及实验分析[J]. *中国激光*, 2018, 45(12): 1204002.
- [20] Zhang H F, Deng H R, Long M L, et al. Time synchronization in laser ranging with multi-receiving telescopes based on fiber-time-frequency transfer[J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2019, 56(1): 011204.
- 张海峰, 邓华荣, 龙明亮, 等. 基于光纤时间频率传递的多望远镜激光测距时间同步研究[J]. *激光与光电子学进展*, 2019, 56(1): 011204.