

相位锁定至超窄线宽激光的高相干性双光梳研究

崔佳华¹, 林百科^{2,3}, 孟飞^{2,4*}, 曹士英², 杨明哲¹, 林弋戈², 宋有建¹, 胡明列¹,
方占军²

(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;

3. 清华大学精密仪器系, 北京 100084;

4. 北京大学电子学系 先进光通信系统与网络国家重点实验室, 北京 100871)

摘要: 研究并实现了一种相位锁定至超窄线宽激光的双光梳系统。实验通过将两台重复频率约为 200 MHz、重复频率差约为 17 kHz 的掺铒锁模激光器的对应梳齿, 同时分别锁定到两台不同波长(1542 nm 和 1560 nm)的窄线宽连续激光器上, 实现了相位相干且稳定度高的双光梳。锁定后单台光梳的梳齿线宽均低于 5 Hz(受限测试条件), 两台光梳的相对线宽小于 0.35 Hz。该双光梳系统对于高精度光谱分析、时频传递, 尤其是绝对距离测量等领域具有重要的应用价值。

关键词: 窄线宽光频梳; 双光梳; 相位锁定; 相干性

中图分类号: TN249 **文献标识码:** A

High coherence dual-comb based on phase locking to ultra-narrow linewidth lasers

CUI Jia-Hua¹, LIN Bai-Ke^{2,3}, MENG Fei^{2,4*}, CAO Shi-Ying², YANG Ming-Zhe¹, LIN Yi-Ge², SONG
You-Jian¹, HU Ming-Lie¹, FANG Zhan-Jun²

(1. Key Laboratory of Opto-electronic Information Technology of the Ministry of Education, School of Precision Instruments and Opto-electronics Engineering, Tianjin University, Tianjin 300072, China;

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

3. Department of Precision Instrument, Tsinghua University, Beijing 100084, China;

4. State Key Laboratory of Advanced Optical Communication Systems and Networks, Department of Electronics, Peking University, Beijing 100871, China)

Abstract: A dual-comb system based on phase locking to ultra-narrow linewidth lasers is studied and implemented in this paper. Two Erbium-doped mode-locked lasers with repetition rates of about 200 MHz and repetition rate difference of about 17 kHz were simultaneously locked to two narrow-linewidth continuous wave lasers at 1 542 nm and 1 560 nm, respectively. Hence, dual-comb with high coherence and stability is achieved. After phase locking, the comb linewidth of a single comb is less than 5 Hz (limited by test condition), and the relative linewidth of two combs is less than 0.35 Hz. The dual comb system has important application value in high precision spectral analysis, time-frequency transmission, and especially absolute distance measurement.

Key words: narrow linewidth optical frequency comb, dual-comb, phase locking, coherency

PACS: 42. 55. Wd, 42. 25. Kb, 06. 30. Ft

收稿日期: 2019- 07- 16, 修回日期: 2019- 10- 11

Received date: 2019- 07- 16, Revised date: 2019- 10- 11

基金项目: 国家重点研发计划(2016YFF0200201, 2017YFA0304404); 国家自然科学基金(91736310); 天津市自然科学基金(18JCYBJC16900)

Foundation items: Supported by the National Key R&D Program of China (2016YFF0200201, 2017YFA0304404); the National Natural Science Foundation of China (91736310); the Natural Science Foundation of Tianjin (18JCYBJC16900)

作者简介(Biography): 崔佳华(1993-), 男, 河北唐山人, 硕士研究生, 主要研究领域为飞秒激光技术及其应用. E-mail: cuijiahua@tju. edu. cn

* 通讯作者(Corresponding author): E-mail: mfei@nim. ac. cn

引言

飞秒光学频率梳 (Optical Frequency Comb, OFC)^[1-2]输出的光脉冲在时间域上表现为具有飞秒量级时间宽度的周期性超短脉冲序列,在光谱域上对应为具有相等频率间隔且相位相干的多条单色谱线。飞秒光学频率梳具有脉冲宽度窄、光谱范围宽、重复频率稳定性高等优良的时、频域特性,因此,其被广泛应用于时间频率标准^[3]、精确距离测量^[4]、高分辨率光谱分析^[5-6]、微波信号合成^[7]以及光谱编码成像^[8]等研究领域。在测距领域,飞秒光学频率梳既可以利用其时域的超窄脉宽特性,使用飞行时间法来实现大尺度范围内的测量;也可以运用其宽频域的优势,利用多条相干谱线干涉测量来提高精度。特别是近些年发展起来的双光梳绝对距离测量方案^[9-11],不仅结合了飞行时间法大量程和干涉法高精度的测量优势,同时还具有极快的测量速度,真正把几何量测量的三大要素——量程、精度和速度三者完美结合在一起。然而,双光梳测距系统要实现亚微米及以下的高分辨率,需要同时满足其不同光梳间相对梳齿的高相干性,以及单台光梳梳齿的窄线宽、低噪声等特性。其中,保持不同光梳间的高相干性,即达到尽可能窄的相对梳齿线宽,则可在测量时获得尽可能长的相干时间,进而得到尽量多的可以进行相干平均的干涉图样。实验中一般要求相对线宽小于 $\Delta f_r/N_A$,其中 Δf_r 为两台光梳的重复频率差, N_A 为相干平均干涉图样的数目^[12]。此外,Coddington I等人曾在双光梳光谱实验中阐述,具有高相干性的双光梳可以实现kHz量级的光谱分辨率,远高于传统的傅里叶变换光谱仪^[5]。而保持梳齿的窄线宽特性是为了避免干涉图样的射频频谱纵模之间发生混叠,破坏光频梳齿和射频梳齿之间的一一对应关系^[12]。因此,在双光梳干涉测距等实验中,普通两台光梳的简单组合无法达到超高精度的要求,必须研究一种同时具备梳齿低噪声特性以及相对梳齿窄线宽特性的双光梳系统才能完成。

国外开展高相干性双光梳的研究较早。2009年,美国的Coddington I等人利用相位锁定至窄线宽激光的方案实现了低噪声、高相干性的双光梳系统,并进行了干涉测距的研究^[13]。实验中两台光梳间的相对线宽约为0.3 Hz^[12]。2015年,日本的Okubo S等人利用两台腔内具有高速伺服电光调制器 (Electro-optical Modulator, EOM)的倍频程光梳实现

了用于光谱测量的双光梳系统,其中双光梳的绝对线宽和相对线宽均达到亚赫兹水平^[14]。相比之下,国内开展双光梳的相关研究起步较晚。2014年魏志义等人介绍了双光梳光谱仪与传统傅里叶光谱仪的区别,分析了几种典型的双光梳光谱测量装置^[15]。2017年中国计量院利用“双波长的双梳锁模激光器^[16]”同时输出的两个锁模脉冲序列进行了双光梳测距实验^[17]。该工作中,虽然两个锁模脉冲序列都产生于相同的激光谐振腔,但其差模噪声仍然较大,且梳齿绝对线宽较宽,因此限制了测距精度提升至亚微米水平。为了减小双光梳的相对线宽,2018年清华大学的朱泽斌等人借助一台传递激光器 (1 565 nm),在只使用一台具有快速伺服能力光梳的条件下,实现了具有高相干性的双光梳系统。光梳梳齿在距离传递激光器波长15 nm之外 (1 550 nm),其测试的相对线宽结果达到1 Hz^[18]。但是实验中并未对光梳梳齿的绝对线宽进行压窄,梳齿稳定度仅达到了微波参考信号的稳定度。

为了满足上述高精度干涉测距对双光梳系统的要求,将两台重复频率均为200 MHz左右,重频差约为17 kHz的光梳的一对梳齿分别同时锁定到两台不同波长的窄线宽连续激光器上来实现相位相干且低噪声的双光梳系统。相位锁定之后,两台光梳的梳齿线宽均低于5 Hz,相对线宽约为0.35 Hz。该系统建立了两套具有相同紧凑结构,且具备光梳梳齿窄锁能力的掺铒光纤光梳。装置使用激光器腔外的声光调制器 (Acousto-optical Modulator, AOM)作为快速伺服元件,配合泵浦电流反馈实现光梳梳齿窄锁,技术路线更加容易实现。同时,装置中还省掉了探测 f_0 信号的 $f - 2f$ 干涉仪及相关放大、扩谱等光学单元,但同样实现了在约20 nm光谱范围内的高相干度,并具有进一步扩展的潜力。目前在国内的双光梳研究领域,还尚未有类似性能系统的研究进行过报道。

1 实验原理与实验装置

1.1 基本原理

介绍的窄线宽高相干性双光梳的相位锁定原理如图1所示。为理解方便,定义两台飞秒光学频率梳分别为信号光梳 (Signal)和本振光梳 (Local Oscillator)。实验中,将两台光学频率梳的一对梳齿分别与1 542 nm (f_{CW2})和1 560 nm (f_{CW1})的窄线宽连续激光器进行拍频,并将拍频锁定到固定微波频率

上。其中,将光梳与 1 542 nm 激光(f_{CW2})拍频得到的误差信号通过伺服单元反馈至腔外 AOM 和腔内 PZT 上;同时将光梳与 1 560 nm 激光(f_{CW1})拍频得到的误差信号,通过伺服单元反馈至泵浦激光器的驱动电流上。通过这样的方式,实现对光梳两个自由度的控制,即达到锁窄光梳梳齿的目的。为了测量锁定后两台光梳梳齿的绝对线宽和相对线宽,实验引入另一台测试用窄线宽连续激光器(图 1 中的 f_{test}),分别与两台锁定后光梳的梳齿进行拍频,得到的拍频信号 f_{beat5} 和 f_{beat6} ,使用频谱仪直接测量两个拍频信号的线宽即可认为是两台光梳梳齿的绝对线宽。除此之外,实验还将两个拍频信号 f_{beat5} 和 f_{beat6} 进行混频,得到二者的差频信号 $f_{relative}$,通过测量差频信号的线宽以此来表征两台光梳的相对线宽^[18]。

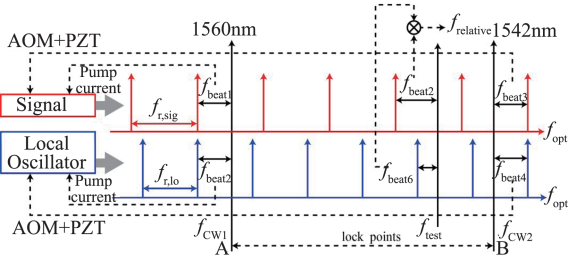


图 1 双光梳相位锁定的频域示意图

Fig. 1 Frequency domain diagram of phase locking for dual-comb. (PZT: Piezoelectric Transducer)

在双光梳相位锁定时,为了保证不同干涉周期的干涉条纹的形状完全相同以及重频与重频差之比是正整数,应当严格控制两台光梳在 1 542 nm 和 1 560 nm 窄线宽激光处的各自拍频信号对应完全相等,即图中的拍频 $f_{beat1} = f_{beat2}$ 以及 $f_{beat3} = f_{beat4}$,则可以确定信号光梳与本振光梳在拍频位置附近的对应梳齿频率(即图 1 中的锁定点 A 和 B)完全相等。

对于锁定点 A 处的频率,可得

$$f_{0, sig} + mf_{r, sig} + f_{beat1} = f_{0, lo} + nf_{r, lo} + f_{beat2}, \quad (1)$$

其中,正整数 m 和 n 分别表示信号光梳和本振光梳所对应的光梳梳齿序数; $f_{0, sig}$ 和 $f_{r, sig}$ 分别为信号光梳的载波包络偏移频率和重复频率; $f_{0, lo}$ 和 $f_{r, lo}$ 分别为本振光梳的载波包络偏移频率和重复频率。

对于锁定点 B 处的频率,可得

$$f_{0, sig} + (m + K)f_{r, sig} - f_{beat3} = f_{0, lo} + (n + K + 1)f_{r, lo} - f_{beat4}, \quad (2)$$

其中,正整数 K 为信号光梳在两窄线宽激光之间所夹的光梳梳齿数目。

通过求解式(1)和式(2),可以得到

$$Kf_{r, sig} = (K + 1)f_{r, lo}, \quad (3)$$

定义两台光梳的重频差为 $\Delta f_r = f_{r, sig} - f_{r, lo}$,并将式(3)带入式(1)或式(2)求解,可以得到两台光梳的载波包络偏移频率之差为

$$\Delta f_o = f_{0, sig} - f_{0, lo} = [nK - m(K + 1)]\Delta f_r, \quad (4)$$

定义 $k = nK - m(K + 1)$,由于 m 、 n 和 K 都是正整数,因此 Δf_o 始终为 Δf_r 的整数倍。

只有做到此种锁定方式,在将双光梳用于干涉测距等应用时,才可以进行时域干涉叠加,因为根据双光梳干涉测距的基本原理,双光梳干涉后的信号强度可以表示为^[17]

$$I(i\Delta f) = 2 \sum_i A_m B_n \cos [2\pi(i\Delta f_r + \Delta f_o)t], \quad (5)$$

由此可得,干涉采样信号的相位可表示为

$$\varphi(t) = 2\pi(i\Delta f_r + \Delta f_o)t = 2\pi(i + k)\Delta f_r t, \quad (6)$$

因此,经过一个光学干涉周期 T_{update} 后,相应的相位变化量为 $\varphi(t) = (i + k)2\pi$,始终为 2π 的整数倍。由此可见,不同干涉周期采样信号的初始相位具有一致性,也即是说不同周期的干涉条纹形状是完全相同的,这样可以直接将干涉图样在时域上进行相干叠加,从而大大简化了数据运算量。因此,对于双光梳系统而言,这种锁定方式才具有现实意义。

1.2 实验装置

实验自行搭建了两台结构相同的掺铒锁模光纤激光器^[19],分别作为双光梳系统中的信号光梳和本振光梳。两台激光器全部为非线性偏振旋转(Nonlinear Polarization Evolution, NPE)锁模机制的环形腔结构,腔内的光纤准直器安装在一维位移平台上,以实现激光器重复频率的大范围调节,其位移量约为 ± 5 mm,同时将增益光纤粘合在 PZT 上,以拉伸光纤来微调重复频率。结合两种调节方式,激光器可以对重复频率进行 1 MHz 以内的精密调节。两台激光器的泵浦激光器输出功率均为 750 mW 左右,使用激光电流源驱动,两台激光器输出功率分别为 77.4 mW 和 58.1 mW,输出的 3 dB 光谱宽度分别为 39.14 nm 和 55.76 nm,可以满足相位锁定装置的实验要求。同时,为了降低外界温度变化对重复频率的影响,实验还对激光器底板的温度进行了控制。

两台光梳使用了相同的方法及参考光源进行相位锁定。参考光源中一台连续激光器为 RIO 公司的低噪声窄线宽集成外腔半导体激光器(Orion™, RIO0175-5-44-3),其线宽为 5 kHz,中心波长为 1

542.1856 nm。另一台参考光源为Toptica Photonics公司的连续可调谐半导体激光器(CTL-1550),线宽约为10 kHz,波长调节范围为1520~1630 nm,实验中固定该激光器中心波长为1560.6635 nm。为了使两台连续激光器获得窄线宽特性,实验采用PDH方法^[20]将他们锁定于同一个高Q值光学参考腔上(Advanced Thin Films,腔体长度为50 mm)。其中,参考腔的腔体采用立方体结构,并锁紧在真空支撑系统上。此设计使腔体对外界振动不敏感,为以后制作成为可移动搬运的参考激光系统提供了技术基础。参考腔的精细度大于500 000,腔体温度控制在ULE(Ultra Low Expansion)玻璃材料的零膨胀点附近,约为59℃。腔体被置于真空度约为 2.4×10^{-6} Pa的真空室内,并使用精密被动隔振平台(minusK, 250BM-1)进行振动的进一步隔离。

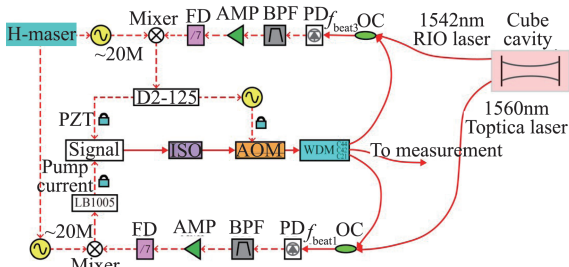


图2 单台光梳的相位锁定实验装置图。(实线表示光学链路,虚线表示电学链路)

Fig. 2 Experimental setup of phase locking for one of the dual comb. Solid lines represent optical links and dotted lines represent electrical links. (ISO: isolator; WDM: wavelength division multiplexer; PD: photodetector; BPF: band pass filter; AMP: amplifier; FD: frequency divider; OC: 50/50 optical fiber coupler)

单台光梳的相位锁定装置(以信号光梳为例)如图2所示。实验建立了两套锁定环路来精密控制光学频率梳的两个自由度。其中第一个锁定环路是将波长为1542.1856 nm的RIO激光器与本振光梳该波长附近的对应梳齿进行拍频,得到的拍频信号经过滤波、放大及分频等步骤后,再与氢钟同步的微波参考信号混频,由此产生的误差信号通过高速伺服控制器(Vescent Photonics, D2-125)反馈于激光器腔外的AOM,来快速伺服控制载波频率;同时通过其辅助输出口提取缓慢变化分量来调节激光器腔内PZT驱动电压,控制重复频率的漂移。另一个锁定环路结构基本相同,中心波长为1560.6635 nm的Toptica激光器与本振光梳的对应

梳齿拍频,混频后获得其误差信号经过高速伺服器(New Focus, LB1005)控制泵浦激光器的驱动电流,来伺服光梳的重复频率。

2 实验结果与分析

在光梳实现相位锁定后,实验分别监测了光梳两个不同锁定环路的环内拍频信号频谱,图3显示的是本振光梳的锁定结果,信号光梳的锁定结果与之相似,这里没有重复给出。从图3(a)可以看出,对于AOM锁定环路,闭环带宽约为120 kHz(靠近载波的边带来源于泵浦电流锁定环路),从图3(b)的详细情况可以得知,泵浦电流锁定环路的闭环带宽大约为10 kHz。图3中插图显示的是各信号载波在频谱分析仪(R&S, FSH8)分辨率带宽极限(RBW=1 Hz, Span=100 Hz)下的频谱。

实验使用信号源分析仪(Agilent Technologies, E5052B)测量了两台光梳相位锁定后环内拍频信号

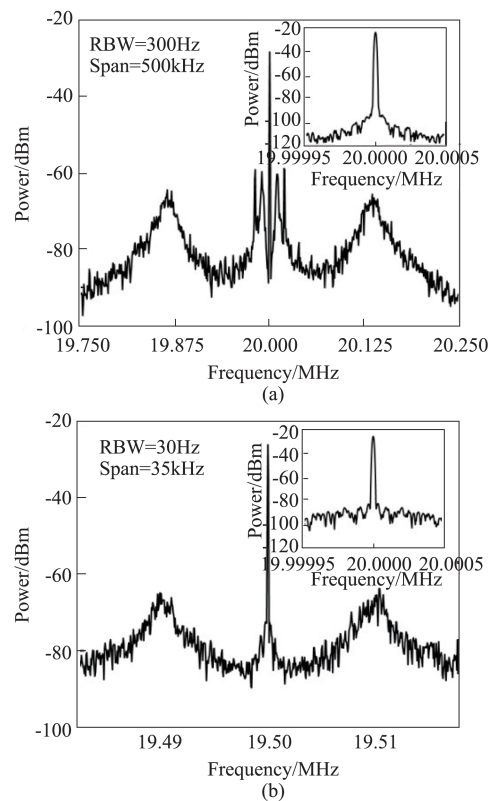


图3 本振光梳的相位锁定结果,插图为放大后的结果(a) AOM和PZT锁定环路环内拍频信号的频谱图,(b)泵浦电流锁定环路环内拍频信号的频谱图

Fig.3 Phase locking results for local oscillator laser. The inset shows a magnified view. (RBW: resolution bandwidth) (a) spectrum of beat signal for AOM and PZT locking loop, (b) spectrum of beat signal for bump current locking loop

的相位噪声功率谱,并计算了积分剩余相位噪声值,如图4所示。经过相位锁定之后,两个锁定环路内拍频信号的相位噪声都得到了显著抑制,经计算可得,信号光梳AOM锁定环路和泵浦电流锁定环路剩余相位噪声分别为73.3 mrad和69.9 mrad(从1 Hz到5 MHz积分);相应的,本振光梳的积分剩余相位噪声分别为54.4 mrad和54 mrad。实验中,为了有效地增加锁定环路的捕获范围,使锁定的结果更加稳固^[21],每个环路中都对拍频信号进行了7分频处理,使得探测到的相位噪声较分频前减小。实验同时测量了分频器之前,直接拍频信号的积分剩余相位噪声,分别为0.280 rad和0.298 rad。实验结果表明,环路均已实现相位的良好锁定。

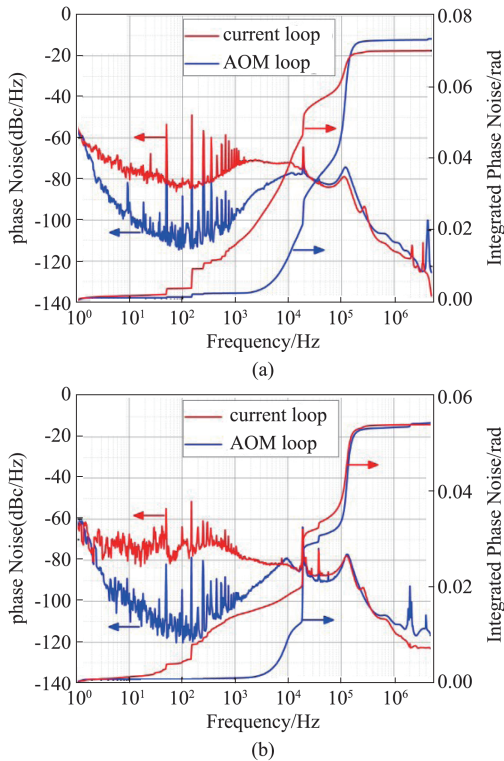


图4 AOM锁定环路(蓝色)和泵浦电流锁定环路(红色)拍频信号的相位噪声功率谱和剩余相位噪声(a)信号光梳,(b)本振光梳

Fig.4 Phase noise power spectrum and residual phase noise of beat signals for AOM locking loop (blue) and bump current locking loop (red)(a) signal laser, (b) local oscillator laser

实验验证了相位锁定后两台光梳的绝对线宽。实验利用另外一台商用单频窄线宽连续激光器(Stable Laser Systems公司,典型线宽1 Hz,简记为SLS激光器),与两台光梳分别进行拍频,得到的环外拍频信号 f_{beat5} 和 f_{beat6} ,即可认为是两台光梳各自的

梳齿绝对线宽,如图5(a)所示,两个拍频信号都约为5 Hz。值得注意的是,测试用SLS激光器输出的超稳激光经过了20 m没有进行光纤噪声消除的链路后才与两台光梳进行拍频测量,认为5 Hz的测量结果已经受限于测量系统,但此测量结果也已满足实际测距实验对光梳梳齿噪声的要求。另外,由于该SLS激光器波长与RIO激光器的工作波长相距较近,只有不到0.2 nm的差距,为了验证梳齿线宽是由两个环路同时锁定时才压缩得到的,实验中将以1560 nm激光为参考的泵浦电流锁定环路开环,在只保持AOM和PZT锁定的情况下测量了光梳的梳齿线宽,此时 f_{beat5} 和 f_{beat6} 将近20 Hz,且存在较大的频率抖动。因此,可以确定只有当两个锁定环路同时实现相位锁定时,才能将光梳梳齿线宽压缩。

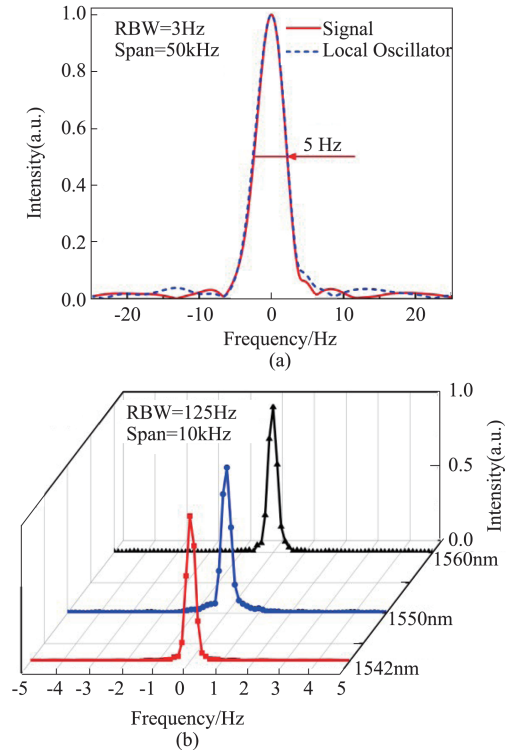


图5 拍频信号的频谱图(a)信号光梳和本振光梳分别与SLS激光器的拍频信号,(b)利用不同波长的连续激光器测量的两台光梳的相对线宽

Fig.5 Spectrum of beat signals (a) beat signals of signal laser and local oscillator laser with SLS laser respectively, (b) relative linewidth of dual comb measured by continuous lasers with different wavelength

为了验证双光梳在两个参考光频之间的光谱域内都具有极窄的相对线宽,除了利用上述SLS激光器以外,实验中又使用了另外两台单频激光器,

分别是 1 550 nm 附近的半导体激光器(Thorlabs, Single Frequency Laser SFL1550)以及 1 560 nm 附近的光纤激光器(NKT, Koheras Adjustik), 来测量各自波长处的相对线宽, 具体的做法同前 1.1 节所述。实验采用 FFT 频谱分析仪(Stanford Research Systems, SR785)进行测量, 实验结果如图 5(b)所示。在分辨率带宽为 125 mHz 的情况下, 三个测量相对线宽的结果均约为 0.35 Hz, 且三条曲线线型相似, 因此可以推断在 1 542 nm 到 1 560 nm 的光谱范围内, 两台光梳都具有极窄的相对线宽特性。0.35 Hz 的相对线宽对应的相干时间为 2.85 s, 对于当前的实验系统, 单个干涉采样信号的采样周期约为 58 μ s, 因此总计可以获得约 49 100 个相干的干涉采样信号, 当 364 个干涉采样信号进行时域相干叠加后, 采样信号的信噪比从 SNR=18.5 dB 提高到 SNR=31 dB。以上实验结果均表明, 采用梳齿相位锁定至超窄线宽激光器的双光梳系统方案, 单台光梳可以获得赫兹量级的梳齿线宽, 双光梳可以获得亚赫兹量级相对线宽的高相干特性, 均足以满足双光梳干涉测距等精密实验需求。

为了评价相位锁定后双光梳的长期稳定性, 实验通过参考到氢钟的频率计数器(Agilent, 53220A)同时测量了两台光梳的重复频率 $f_{r, sig}$ 和 $f_{r, lo}$ 在 50 分钟内的变化情况, 如图 6 所示, 其中信号光梳的重复频率 $f_{r, sig}$ 高于本振光梳的重复频率 $f_{r, lo}$ 。图 6 中间的曲线是根据两台光梳重复频率通过混频器后得到的重频差 Δf_r 的变化情况, 其 1 s 平均时间下的 Allan 偏差为 0.048 mHz, 优于目前已报道的可直接输出双光梳的光纤激光器^[22]的最好结果。同时, 从图 6 可以发现, 两台光梳的重复频率 $f_{r, sig}$ 和 $f_{r, lo}$ 具有轻微的同向漂移, 漂移速率约为 1.058 μ Hz/s, 这是由于用来锁定光梳的两台连续激光器的频率跟随超稳腔腔长漂移而变化造成的, 并且由于漂移为同向, 所以重频的差值基本稳定。实验测得, 在 50 分钟内重复频率漂移的变化量仅为 5 mHz, 相对于双光梳测距中的测距不确定度为 2.5×10^{-11} , 如此小的漂移变化在双光梳测距中可以忽略不计。

3 结语

报道了一种高相干性的双光梳光源, 其中的两台光梳分别利用超稳激光器进行相位锁定, 在压缩梳齿线宽的同时实现了两台光梳的高相干性。锁定后单台光梳的梳齿线宽均低于 5 Hz, 两台光梳的

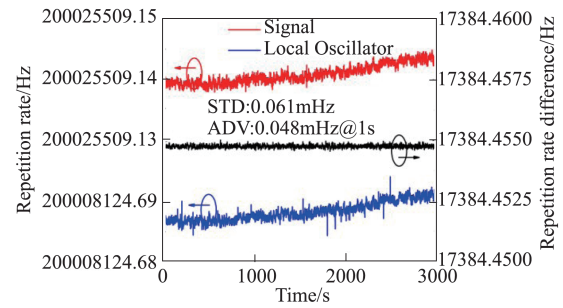


图 6 1s 采样时间下相位锁定后两台光梳的重复频率 $f_{r, sig}$ 和 $f_{r, lo}$ 以及重频差 Δf_r 的变化情况

Fig. 6 Temporal variation of the repetition rates ($f_{r, sig}$ and $f_{r, lo}$) and the repetition rate difference (Δf_r) after phase locking with sampling time of 1 s. (STD: Standard deviation, ADV: Allan deviation)

相对线宽为 0.35 Hz。实验还同时测量了相位锁定后环内信号的相位噪声功率谱, 通过积分计算得出两台光梳的剩余相位噪声均小于 0.3 rad。此双光梳系统稳定性良好, 两光梳的重复频率漂移速率在 50 分钟内均为 1.058 μ Hz/s, 重频差的 Allan 偏差为 0.048 mHz。因此, 该双光梳光源足以满足双光梳干涉距离测量中低噪声高精度的实际需求, 同时对于双光梳光谱分析, 双光梳时间频率传递等应用也具有重要的实用价值。

References

- [1] Hänsch, T W. Nobel Lecture: Passion for precision[J]. *Review of Modern Physics*, 2006, **78**(4): 1297-1309.
- [2] Hall J L. Nobel Lecture: Defining and measuring optical frequencies[J]. *Reviews of Modern Physics*, 2006, **78**(4): 1279-1295.
- [3] MENG Fei, CAO Shi-Ying, ZHAO Guang-Zhan, et al. Application of an Er: doped fiber comb for Sr lattice clock[J]. *Chinese Journal of Lasers* (孟飞, 曹士英, 赵光贞, 等. 掺铒光纤光梳在锶晶格钟中的应用研究. *中国激光*), 2015, **42**(7): 0702012
- [4] CUI Peng-Fei, YANG Ling-Hui, LIN Jia-Rui, et al. Application of femtosecond optical frequency comb in precise absolute distance measurement[J]. *Laser & Optoelectronics Progress* (崔鹏飞, 杨凌辉, 林嘉睿, 等. 飞秒光学频率梳在精密绝对测距中的应用. *激光与光电子学进展*), 2018, **55**(12): 120011.
- [5] Coddington I, Newbury N, Swann W. Dual-comb spectroscopy[J]. *Optica*, 2016, **3**(4): 414-426.
- [6] LU Qiao, SHI Lei, MAO Qing-He. Research advances in dual-comb spectroscopy[J]. *Chinese Journal of Lasers* (路桥, 时雷, 毛庆和. 双光梳光谱技术研究进展. *中国激光*), 2018, **45**(4): 0400001.
- [7] Brochard P, Schilt S, Südmeyer T. Ultra-low noise microwave generation with a free-running optical frequency comb transfer oscillator[J]. *Optics Letters*, 2018, **43**(19):

- 4651–4654.
- [8] 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.
- [9] Liu T A, Newbury N R, Coddington I. Sub-micron absolute distance measurements in sub-millisecond times with dual free-running femtosecond Er fiber-lasers[J]. *Optics Express*, 2011, **19**(19): 18501–18509.
- [10] Li Y, Shi J K, Wang Y Q, *et al.* Phase distortion correction in dual-comb ranging system[J]. *Measurement Science and Technology*, 2017, **28**(7): 075201.
- [11] XU Li-Ming, SONG You-Jian, LIANG Fei, *et al.* All polarization maintaining fiber based dual-comb high precision absolute distance measurement system[J]. *Acta Optica Sinica* (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. *光学学报*), 2015, **35**(s2): s212001.
- [12] Coddington I, Swann W C, Newbury N R. Coherent dual-comb spectroscopy at high signal-to-noise ratio[J]. *Physical Review A*, 2010, **82**(4): 043817.
- [13] Coddington I, Swann W C, Nenadovic L, *et al.* Rapid and precise absolute distance measurements at long range[J]. *Nature Photonics*, 2009, **3**(6): 351–356.
- [14] Okubo S, Iwakuni K, Inaba H, *et al.* Ultra-broadband dual-comb spectroscopy across 1.0 – 1.9 μm [J]. *Applied Physics Express*, 2015, **8**(8): 082402.
- [15] YU Zi-Jiao, HAN Hai-Nian, WEI Zhi-Yi. Progress in dual-comb spectroscopy[J]. *Physics* (于子蛟, 韩海年, 魏志义. 双光梳光谱学研究进展. *物理*), 2014, **43**(7): 460–467.
- [16] Zhao X, Zheng Z, Liu L, *et al.* Switchable, dual-wavelength passively mode-locked ultrafast fiber laser based on a single-wall carbon nanotube modelocked and intracavity loss tuning[J]. *Optics Express*, 2011, **19**(2): 1168–1173.
- [17] Lin B, Zhao X, He M Z, *et al.* Dual-comb absolute distance measurement based on a dual-wavelength passively mode-locked laser[J]. *IEEE Photonics Journal*, 2017, **9**(6): 1–8.
- [18] Zhu Z B, Xu G Y, Ni K, *et al.* Improving the accuracy of a dual-comb interferometer by suppressing the relative linewidth[J]. *Measurement Science and Technology*, 2018, **29**(4): 045007.
- [19] LIU Huan, GONG Ma-Li, CAO Shi-Ying, *et al.* A 303 MHz fundamental repetition rate femtosecond Er: fiber ring laser[J]. *Acta Physica Sinica* (刘欢, 巩马理, 曹士英, 等. 303 MHz 高重复频率掺 Er 光纤飞秒激光器. *物理学报*), 2015, **64**(11): 114210.
- [20] Li Y, Lin Y G, Wang Q, *et al.* An improved strontium lattice clock with 10–16 level laser frequency stabilization[J]. *Chinese Optics Letters*, 2018, **16**(5): 051402.
- [21] Ma Y X, Xu B, Ishii H, *et al.* Low-noise 750 MHz spaced ytterbium fiber frequency combs[J]. *Optics Letters*, 2018, **43**(17): 4136–4139.
- [22] Nakajima Y, Hata Y, Minoshima K. High-coherence ultra-broadband bidirectional dual-comb fiber laser[J]. *Optics Express*, 2019, **27**(5): 5931–5944.