

# 基于压电陶瓷传感器以及多级温度反馈的小型化自适应双光梳

陈旭<sup>1</sup>, 金相宇<sup>1</sup>, 王庆婷<sup>1</sup>, 陆诗雨<sup>1</sup>, 郝强<sup>1</sup>, 王杰<sup>4</sup>, 聂鸿宇<sup>5</sup>, 闫明<sup>2</sup>, 杨康文<sup>1\*</sup>, 曾和平<sup>1,2,3</sup>

<sup>1</sup>上海理工大学光电信息与计算机工程学院, 上海 200093;

<sup>2</sup>华东师范大学重庆研究院, 重庆 401121;

<sup>3</sup>济南量子技术研究院, 山东 济南 250101;

<sup>4</sup>国网四川省电力公司电力科学研究院, 四川 成都 610041;

<sup>5</sup>国网四川省电力公司检修公司, 四川 成都 610041

**摘要** 研制了一种小型化的自适应双光梳系统。双光梳的种子源为两台重复频率均为 77.2 MHz 左右的掺铒光纤振荡器, 重复频率差为 180 Hz, 经过两级掺铒光纤放大后注入高非线性光纤进行光谱展宽, 展宽后光谱覆盖范围为 1200~1700 nm。为了补偿两台振荡器之间的拍频信号中所包含的载波包络偏移频率差和重复频率差的不稳定性, 利用两台中心波长分别为 1550 nm 和 1564 nm 的连续激光器和两台光纤振荡器进行拍频, 可得到四路拍频信号。对四路拍频信号引入了压电陶瓷传感器电压反馈和多级温度反馈, 最终获得了稳定的拍频信号, 拍频信号的标准差为 0.19 MHz。所研制的自适应双光梳系统样机尺寸为 80 cm×67 cm×8 cm, 整体质量小于 30 kg, 为其在室外更广泛的应用提供了解决方案。

**关键词** 自适应双光梳; 掺铒光纤激光器; 小型化; 多级反馈

中图分类号 O433

文献标志码 A

doi: 10.3788/AOS202141.1036001

## A Miniaturized Adaptive Dual-Comb Based on Piezoelectric Transducer and Multi-stage Temperature Feedback

Chen Xu<sup>1</sup>, Jin Xiangyu<sup>1</sup>, Wang Qingting<sup>1</sup>, Lu Shiyu<sup>1</sup>, Hao Qiang<sup>1</sup>,  
Wang Jie<sup>4</sup>, Nie Hongyu<sup>5</sup>, Yan Ming<sup>2</sup>, Yang Kangwen<sup>1\*</sup>, Zeng Heping<sup>1,2,3</sup>

<sup>1</sup> School of Optical-Electrical and Computer Engineering, University of Shanghai for Science and Technology, Shanghai 200093, China;

<sup>2</sup> Chongqing Institute of East China Normal University, Chongqing 401121, China;

<sup>3</sup> Jinan Institute of Quantum Technology, Jinan, Shandong 250101, China;

<sup>4</sup> Power Science Research Institute of State Grid Sichuan Electric Power Company, Chengdu, Sichuan 610041, China;

<sup>5</sup> Maintenance Company of State Grid Sichuan Electric Power Company, Chengdu, Sichuan 610041, China

**Abstract** In this paper, we developed a miniaturized adaptive dual-comb system. Two erbium-doped fiber oscillators with repetition frequency of about 77.2 MHz and frequency difference of 180 Hz were used as the seed source of the dual-comb. Their output pulses were injected into a highly nonlinear fiber for spectral broadening after passing through two-stage erbium-doped fiber amplifiers. As a result, the spectral coverage range was extended to 1200–1700 nm. Furthermore, we applied two continuous lasers centered at 1550 nm and 1564 nm and two fiber

收稿日期: 2021-01-14; 修回日期: 2021-03-01; 录用日期: 2021-03-10

基金项目: 国家自然科学基金(11974248)、国家电网有限公司科技项目(52199920002S)

\* E-mail: kangwenyang@yeah.net

oscillators to beating and thus obtained four beat signals. This aimed to compensate for the instability of differences in carrier-envelope offset frequency and repetition frequency. Piezoelectric transducer voltage feedback and multi-stage temperature feedback were introduced to the above signals to achieve their stability. As such, the standard deviation of the beat signals was 0.19 MHz. The developed adaptive dual-comb system has a size of 80 cm × 67 cm × 8 cm and overall weight less than 30 kg, which provides a solution for a wider range of outdoor applications.

**Key words** adaptive dual-comb; erbium-doped fiber laser; miniaturization; multi-stage feedback

**OCIS codes** 140.7090; 140.3510; 300.6170; 300.6320

双光梳光谱技术具有测量速度快、分辨率高、信噪比高等优点,在高精度光谱测定<sup>[1-2]</sup>、高分辨相位测量<sup>[3]</sup>、时频传递<sup>[4]</sup>、天文观测<sup>[5-6]</sup>、超精密测距<sup>[7]</sup>、大气监测<sup>[8-9]</sup>、生物成像<sup>[10]</sup>等方面都有着广泛的应用。双光梳光谱技术主要使用两台具有微小重复频率差异的光梳,在频域上表现为两把“梳尺”进行多外差拍频,将处于光频范围的携带分子吸收光谱信息的梳齿下转换到射频梳齿上,从而显著降低光谱信号的探测难度,同时在时域上产生互相关式的干涉图样<sup>[11-16]</sup>。2020年,清华大学的卢敏健等<sup>[17]</sup>详细地分析并总结了双光梳技术在各种非线性光谱中的优势及光谱技术的技术特点、研究现状和发展趋势。自从2002年 Schiller<sup>[18]</sup>首次提出双光梳光谱技术(dual-comb spectroscopy, DCS)的概念以来,双光梳光谱技术在光谱分析与测量领域大放异彩。2004年,德国的 Keilmann 等<sup>[19]</sup>首次利用两台重复频率略有不同的钛宝石飞秒脉冲激光器搭建了一台傅里叶变换光谱仪,其利用相干脉冲序列之间的异步光取样进行光谱分析,实现了对三氯乙烯(C<sub>2</sub>HCl<sub>3</sub>)样品的光谱测量,该实验证明了双光梳光谱技术的有效性。2008年,加拿大 Laval 大学的 Giaccari 等<sup>[20]</sup>基于锁模光纤脉冲激光器,提出一种补偿由激光频率不稳定引起的拍频信号变化的新方法,通过监测两种已知光频率下的拍频信号来提取激光器的相互波动,并据此对干涉图进行完全校正,这是自适应方案的首次使用。2014年, Ideguchi 等<sup>[21]</sup>提出了自适应双光梳,不直接锁定脉冲激光器的重复频率和载波包络偏移频率(carrier-envelope offset frequency),而通过自适应电路获取自适应补偿信号,消除光梳梳齿抖动和载波包络偏移带来的影响,光谱分辨率达到了 100 MHz,单次测量时间仅为 467 μs,这是双光梳首次避开 f-2f 自参考技术的一次成功应用。2018年,杨力等<sup>[22]</sup>在 Ideguchi 等<sup>[21]</sup>工作的基础上进一步对自适应补偿原理进行完善,通过高非线性光纤对双光梳的工作波段进行拓展,与此同时,通过引入反馈系统对光梳的重复频

率以及连续激光器的中心光频进行反馈,使双光梳系统能够保持长期稳定。为了使光梳系统具有更优秀的便携性以便在室外环境下应用,国内外科研人员对光梳的小型化进行了较多研究。2014年,北京大学量子电子学研究所的戴少阳等<sup>[23]</sup>研制了一种基于掺铒光纤的小型化光学频率梳系统,实现了光纤光梳重复频率的长期精密锁定。2017年,美国国家标准与技术研究所应用物理系的 Cossel 等<sup>[24]</sup>将一台高精度的双光梳光谱仪放置在直升机上,并在室外环境下进行大气分子测量,发现吸收光谱覆盖了 CO<sub>2</sub>、H<sub>2</sub>O 等吸收波段。2019年,中国科学院西安光学精密机械研究所的 Cai 等<sup>[25]</sup>搭建了一台结构紧凑、性能稳定且重复频率锁定的全保偏飞秒光纤激光系统,该系统的体积小于 1.5 m<sup>3</sup>,质量为 1.3 kg,在超低噪声微波产生和室外环境下的高精度测距方面具有较高的潜在应用价值。2020年,科罗拉多大学博尔德分校物理系的 Ycas 等<sup>[26]</sup>将一台小型而紧凑的中红外双光梳光谱仪用于室外的光谱测量,证明了该系统具有稳定的测量能力。到目前为止,尚未有自适应双光梳小型化的相关报道。对于双光梳系统的振荡器,目前主要基于非线性偏振旋转(nonlinear polarization rotation, NPR)、可饱和吸收(saturable absorber, SA)、非线性放大环形镜(nonlinear amplification loop mirror, NALM)这三种效应进行锁模。基于 NPR 锁模的脉冲激光器采用了非保偏光纤,导致锁模极易受到环境的影响。基于可饱和吸收效应锁模的光纤激光器结构简单,更便于集成。近年来,快速发展的新型硫化物(Ag<sub>2</sub>S、SnS/CdS)和金属氧化物(Cu<sub>2</sub>O)等纳米材料作为光纤激光器的可饱和吸收体,在提高光纤激光器稳定性的同时,可输出飞秒量级的超短脉冲,未来有望将该结构的激光器用于双光梳光源<sup>[27-30]</sup>。

本文采取自适应补偿方案,通过提取自适应补偿信号来补偿拍频信号中的载波包络偏移频率差抖动和脉冲激光器重复频率差抖动,并基于此方案来实现自适应双光梳系统小型化。在小型化过程中对

连续激光器引入了中心光频反馈机制;对脉冲激光器引入了压电陶瓷传感器(piezoelectric transducer, PZT)电压反馈和多级温度反馈机制;对系统的散热引入了循环水冷系统,最终实现四路拍频信号能够始终维持在滤波器的带宽范围内,为下一步的自适应补偿信号的稳定获取、拍频信号的有效补偿以及得到稳定的待测分子吸收光谱和时域干涉图样打下坚实的基础。此外,在此基础上将两台脉冲激光器、两台连续激光器以及相关的光路、电路部分全部集成在金属机箱中,使小型化后的双光梳系统具有更优秀的移动性和便携性。

自适应补偿信号以及探测分子光谱信息的获取都需要两台具有微小重复频率差的脉冲激光器和两台连续激光器的配合。实验中采用的连续激光器的中心波长分别为 1550 nm 和 1564 nm(分别记为 CW 50 和 CW 64),线宽均小于 10 kHz,最大输出功率可达 20 mW。搭建的两台基于非线性放大环形镜结构进行锁模的全光纤掺铒脉冲激光器如图 1 所示,其具体的光路结构与本课题组之前采用的结构<sup>[31]</sup>一致。输出种子光的重复频率均为 77.2 MHz 左右,重复频率差为 180 Hz,平均功率为 1.6 mW,经过两级掺铒光纤放大器将种子光平均功率均放大至 170 mW,随后由输出比为 3:7 的光纤耦合器分为

两束,其中 30%的输出端口功率为 50 mW,接入到集成的光耦合滤波模块(OCHM,内部主要由 1550 nm 和 1564 nm 的光纤耦合器以及窄带滤波器构成)中;70%的输出端口功率为 118 mW,注入到高非线性光纤中进行超连续谱展宽。脉冲激光器 A(Laser A)和脉冲激光器 B(Laser B)的振荡器的出射光谱、两级放大后的脉宽以及超连续谱展宽后的光谱如图 2 所示,A 振荡器光谱的中心波长为 1561 nm,半峰全宽为 5.82 nm,经过两级放大后的脉宽为 98 fs,经过高非线性光纤展宽后的光谱覆盖范围为 1200~1700 nm;B 振荡器的光谱中心波长为 1566 nm,半峰全宽为 7.33 nm,经过两级放大后的脉宽为 76 fs,经过高非线性光纤展宽后的光谱覆盖范围为 1180~1700 nm。这种基于 NALM 结构的全光纤激光器具有体积小、稳定性强、结构紧凑等优点,为小型化自适应双光梳长期稳定以及能够在室外环境中的更广泛应用提供了更多可能性。在光耦合滤波模块中,连续激光器 CW 50、CW 64 和脉冲激光器 Laser A、Laser B 之间进行两两拍频,脉冲光的功率在 50 mW 左右,连续光的功率在 15 mW 左右,最终从光耦合滤波模块中输出的光功率为 5 mW 左右,将该信号接入光电探测器中进行探测可得到对应的电信号,分别记为 50 A、50 B、64 A、64 B。

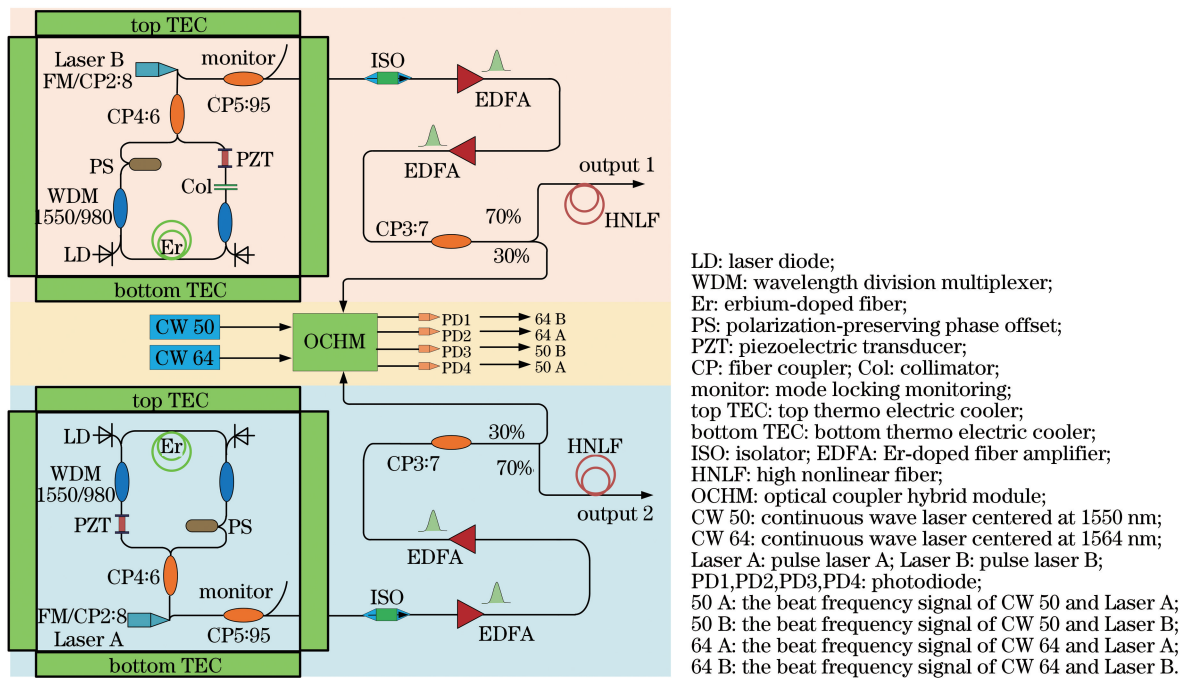


图 1 自适应双光梳光路图

Fig. 1 Optical path diagram of adaptive dual-comb



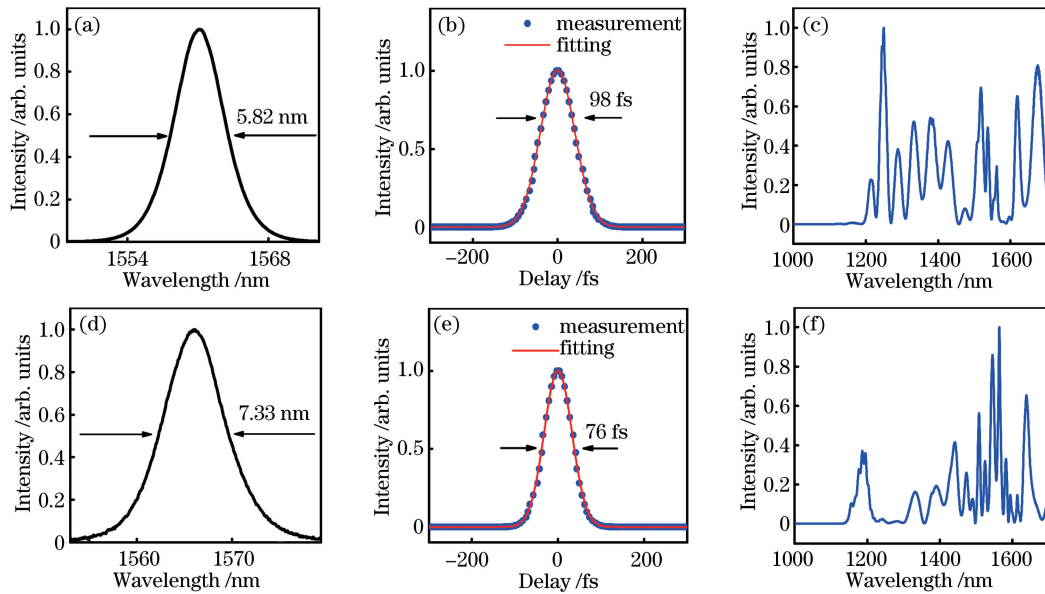


图 2 两台脉冲激光器的输出特性和超连续谱。(a)振荡器 A 的光谱;(b)脉冲激光器 A 两级放大后的脉宽;(c)脉冲激光器 A 超连续谱;(d)振荡器 B 的光谱;(e)脉冲激光器 B 两级放大后的脉宽;(f)脉冲激光器 B 超连续谱  
Fig. 2 Output characteristics and supercontinuum of two pulsed lasers. (a) Spectrum of oscillator A; (b) pulse width after two-stage amplification of pulsed laser A; (c) supercontinuum of pulsed laser A; (d) spectrum of oscillator B; (e) pulse width after two-stage amplification of pulsed laser B; (f) supercontinuum of pulsed laser B

为了使脉冲激光器和连续激光器的拍频信号能够稳定在滤波器的带宽内,引入了脉冲激光器重复频率反馈机制和连续激光器中心光频反馈机制。通过两种机制的共同作用,使拍频信号保持相对稳定。本文的拍频信号均是指连续激光器中心光频与其左侧紧挨着的脉冲“梳齿”的外差拍频。

脉冲激光器的重复频率反馈机制包括 PZT 电压( $V_{PZT}$ )反馈和两级温度反馈。以脉冲激光器 A 为例,PZT 粘附在谐振腔的光纤上,通过改变 PZT 的电压来控制谐振腔的腔长,进而改变脉冲激光器

的重复频率,具体的 PZT 电压变化量与脉冲激光器重复频率变化量的关系如图 3(a)所示。此外,谐振腔被封闭在保温效果良好且易散热的立方体金属盒中,其顶部和底部都粘贴了热电制冷片(thermoelectric cooler, TEC),分别记为 top TEC 和 bottom TEC,根据光纤的热胀冷缩原理,通过改变 TEC 的温度就可以改变脉冲激光器的重复频率。从图 3(b)所示的 TEC 温度变化量与脉冲激光器重复频率变化量的关系可以看出,底部 TEC 的温度每变化  $0.1\text{ }^{\circ}\text{C}$ ,重复频率变化  $70\text{ Hz}$  左右;顶部 TEC

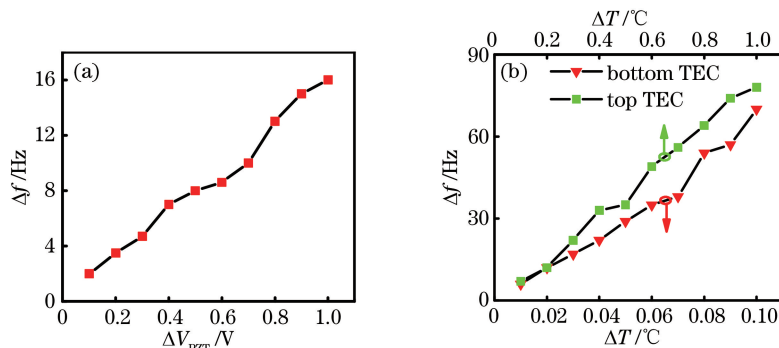


图 3 重复频率随电压、温度的变化关系。(a)  $V_{PZT}$  变化量( $\Delta V_{PZT}$ )与脉冲激光器重复频率变化量( $\Delta f$ )的关系;(b)顶部 TEC、底部 TEC 温度变化量( $\Delta T$ )和脉冲激光器重复频率变化量( $\Delta f$ )的关系

Fig. 3 Relationships of repetition frequency with voltage and temperature. (a) Relationship between  $V_{PZT}$  variation ( $\Delta V_{PZT}$ ) and repetition frequency variation ( $\Delta f$ ) of pulsed laser; (b) relationship between the temperature variation ( $\Delta T$ ) of top TEC and bottom TEC and frequency variation of pulsed laser



的温度每变化  $0.1\text{ }^{\circ}\text{C}$ , 重复频率变化  $7\text{ Hz}$  左右, 故脉冲激光器的重复频率对底部 TEC 温度变化的影响更加“剧烈”。其中, 脉冲激光器的重复频率由频率计数器 (FCA3100, Tektronix) 测得。在整个脉冲激光器重复频率反馈机制中, 将 PZT 电压反馈作为第一级反馈, 将谐振腔顶部 TEC 温度反馈作为第二级反馈, 将谐振腔底部 TEC 温度反馈作为第三级反馈。

脉冲激光器的重复频率反馈过程如图 4 所示。以拍频信号超过其设定上限为例, 首先通过降低 PZT 的驱动电压使谐振腔变短, 光梳的重复频率也随之变大, 进而使拍频信号减小。当 PZT 的驱动电压低于设定的最小值时, 顶部 TEC 的温度开始降低, 导致谐振腔变短, 重复频率增大, 拍频信号减小。当顶部 TEC 温度低于设定的最小值时, 底部 TEC 温度开始降低, 同样导致拍频信号减小。

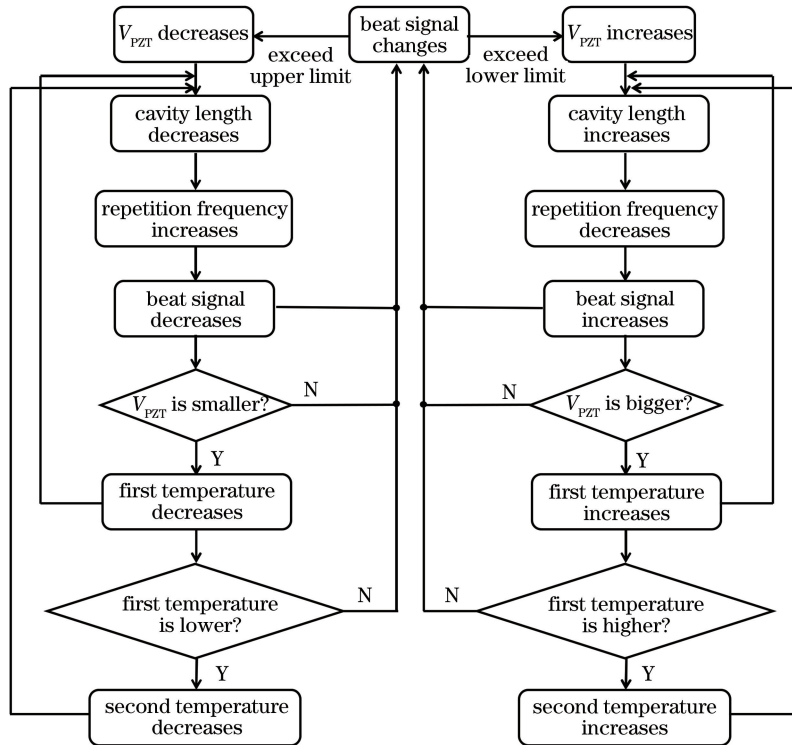


图 4 脉冲激光器的重复频率反馈机制流程图

Fig. 4 Flow chart of repetition frequency feedback mechanism of pulsed laser

连续激光器中心光频反馈通过升高或降低连续激光器的调制电压使其中心光频左移或右移, 拍频信号也会减小或增大。其中 50 A、50 B 均是通过脉冲激光器的重复频率反馈机制进行锁定, 64 A 则是通过连续激光器中心光频反馈机制进行锁定, 当 50 A、50 B、64 A 全部锁定后, 64 B 也会同时被锁定。

图 5 展示了拍频信号 (beat signal) 中心频率、PZT 电压 ( $V_{\text{PZT}}$ ) 反馈和一级温度 (top TEC) 反馈之间的先后触发关系。图 5(a) 所示为拍频信号超过其上限  $20.2\text{ MHz}$  和低于其下限  $19.8\text{ MHz}$  时触发  $V_{\text{PZT}}$  反馈的过程, 其中  $V_{\text{PZT}}$  和拍频信号值均是每  $100\text{ ms}$  记录一次。在图 5(a) 中 A 点位置拍频信号低于设定的下限而触发  $V_{\text{PZT}}$  反馈, 在  $V_{\text{PZT}}$  曲线上与其对应的  $V_{\text{PZT}}$  值相对于上一时刻升高; 在图 5(a)

中 B 点位置拍频信号超过设定的上限而触发  $V_{\text{PZT}}$  反馈, 在  $V_{\text{PZT}}$  曲线上与其对应的  $V_{\text{PZT}}$  值相对于上一时刻下降; 在图 5(a) 中 C 点位置拍频信号在设定的上限和下限之间, 则对应的  $V_{\text{PZT}}$  值相对于上一时刻保持不变。图 5(b) 所示为  $V_{\text{PZT}}$  超过其上限  $0.9\text{ V}$  和低于其下限  $0.7\text{ V}$  时触发一级温度反馈的过程, 其中  $V_{\text{PZT}}$  的值每  $100\text{ ms}$  记录一次, 一级温度的值每  $1\text{ s}$  记录一次。在  $V_{\text{PZT}}$  曲线上的 D 到 E 区间中,  $V_{\text{PZT}}$  的值高于设定的上限而触发一级温度反馈, 在一级温度曲线上与其对应的区间中, 温度呈阶梯式上升; 在  $V_{\text{PZT}}$  曲线上的 E 到 F 区间中,  $V_{\text{PZT}}$  的值在设定的范围内, 在一级温度曲线上与其对应的区间中温度保持不变; 在  $V_{\text{PZT}}$  曲线上的 F 到 G 区间中,  $V_{\text{PZT}}$  的值低于设定的下限而触发一级温度反馈, 在一级温度曲线上与其对应的区间中温度呈阶

梯式下降。一级温度反馈中温度呈阶梯式下降和上升的原因是温度属于慢反馈,两次温度发生变化的

间隔要远大于 PZT 反馈的时间间隔,本实验中将温度反馈时间间隔设置为 2 s,且间隔时间可调。

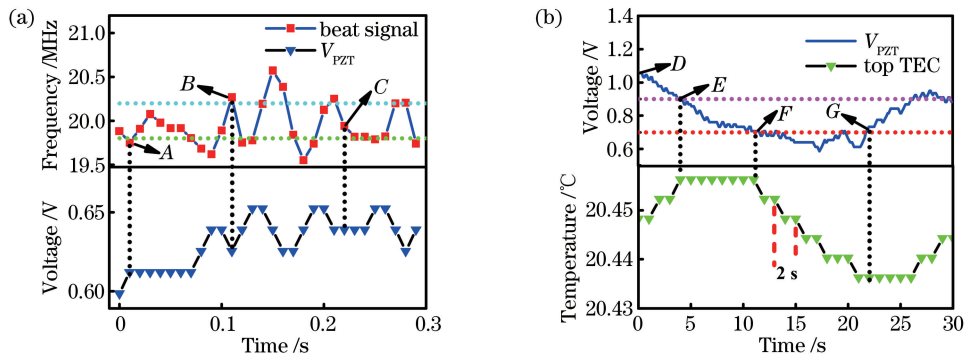


图 5 反馈过程中各参量的变化关系。(a) PZT 电压随拍频信号的变化;(b)一级温度反馈随 PZT 电压的变化

Fig. 5 Each parameter change in the feedback process. (a) PZT voltage changed with beat signal;

(b) the first temperature feedback changed with PZT voltage

图 6 为拍频信号和脉冲激光器的重复频率随时间变化图以及自适应双光梳小型化后的实物图。从图 6(a)可以看到,拍频信号 50 B 在 PZT 和多级温度反馈的共同作用下可以在 2 h 左右保持稳定,其中所用的带通滤波器的中心频率为 20 MHz,滤波带宽为 5 MHz。实际测得的拍频信号平均值为 20.00 MHz,最小值为 19.23 MHz,最大值为 20.77 MHz,标准差为 0.19 MHz。与此同时,用频率计数器(FCA3100, Tektronix)测量脉冲激光器 B

的重复频率,其平均值为 77.262820 MHz,标准差为 0.91 Hz,具体如图 6(b)所示。该自适应双光梳小型化后的样机如图 6(c)所示,其中包括两台锁模脉冲激光器、两台连续激光器、集成式光耦合滤波模块、温控模块,以及放大滤波电路等,最终样机机箱的长、宽、高分别为 80 cm、67 cm、8 cm,满足了结构紧凑、系统小型化等要求,为未来自适应双光梳系统在更加复杂的室外环境下应用提供了新的技术方案。

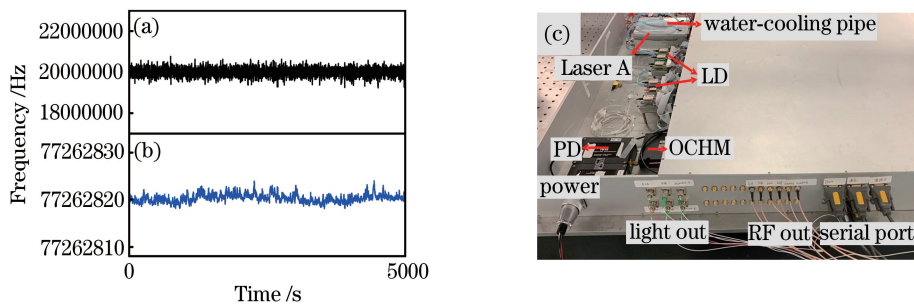


图 6 实验结果及小型化自适应双光梳实物图。(a)拍频信号 50 B 随时间的变化关系;

(b)振荡器 B 的重复频率随时间的变化关系;(c)小型化自适应双光梳实物图

Fig. 6 Experimental results and picture of miniaturized adaptive dual-comb. (a) Change relationship between beat signal

50 B and time; (b) change relationship between repetition frequency of oscillator B and time; (c) photo of miniaturized

adaptive dual-comb

本文详细阐述了自适应双光梳在小型化过程中的系统结构及其工作原理,最终获得脉冲激光器和连续激光器的拍频信号,并将相应的光路、电路、温控,以及水冷系统全部集成到样机机箱中。后续的工作将对这四路拍频信号做进一步的自适应电路处理,获得可以补偿两台光梳拍频信号中的载波包络偏移频率差抖动和重复频率差抖动的自适应补偿信号,这样就可以得到稳定的待测分子的光谱信息和

时域干涉图样。将自适应双光梳组成部分全部集成到样机的机箱中,有望实现系统的小型化并增强其便携性能,能够在更加复杂的室外环境下使用。

参 考 文 献

[1] Guay P, Genest J, Fleisher A J, et al. Precision spectroscopy of  $H^{13}CN$  using a free-running, all-fiber dual electro-optic frequency comb system[J]. Optics Letters, 2018, 43(6): 1407-1410.

- [2] Holzwarth R, Udem T, Hansch T W, et al. Optical frequency synthesizer for precision spectroscopy[J]. *Physical Review Letters*, 2000, 85(11): 2264-2267.
- [3] Ge J M, Yan M, Tan Q G, et al. Theoretical analysis of real-time high-resolution phase measurement method based on optical combs[J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2020, 47(11): 1104005. 葛锦蔓, 闫明, 谭庆贵, 等. 基于光梳的实时高分辨相位测量方法理论分析[J]. *中国激光*, 2020, 47(11): 1104005.
- [4] Predehl K, Grosche G, Raupach S M, et al. A 920-kilometer optical fiber link for frequency metrology at the 19th decimal place [J]. *Science*, 2012, 336(6080): 441-444.
- [5] Steinmetz T, Wilken T, Hauck C A, et al. Laser frequency combs for astronomical observations [J]. *Science*, 2008, 321(5894): 1335-1337.
- [6] Wu Y J, Ye H Q, Han J, et al. Astronomical laser frequency comb for high resolution spectrograph of a 2.16-m telescope[J]. *Acta Optica Sinica*, 2016, 36(6): 0614001. 吴元杰, 叶慧琪, 韩建, 等. 2.16 m 望远镜高分辨率光谱仪的天文光学频率梳[J]. *光学学报*, 2016, 36(6): 0614001.
- [7] Cui P F, Yang L H, Lin J R, et al. Application of femtosecond optical frequency comb in precise absolute distance measurement [J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2018, 55(12): 120011. 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[J]. *激光与光电子学进展*, 2018, 55(12): 120011.
- [8] Rieker G B, Giorgetta F R, Swann W C, et al. Frequency-comb-based remote sensing of greenhouse gases over kilometer air paths[J]. *Optica*, 2014, 1(5): 290-298.
- [9] Coburn S, Alden C B, Wright R, et al. Regional trace-gas source attribution using a field-deployed dual frequency comb spectrometer[J]. *Optica*, 2018, 5(4): 320-327.
- [10] Chen K, Wu T, Chen T, et al. Spectral focusing dual-comb coherent anti-stokes Raman spectroscopic imaging[J]. *Optics Letters*, 2017, 42(18): 3634-3637.
- [11] Coddington I, Swann W C, Newbury N R, et al. Coherent multi heterodyne spectroscopy using stabilized optical frequency combs [J]. *Physical Review Letters*, 2008, 100(1): 013902.
- [12] Deschênes J D, Giaccari P, Genest J, et al. Optical referencing technique with CW lasers as intermediate oscillators for continuous full delay range frequency comb interferometry[J]. *Optics Express*, 2010, 18(22): 23358-23370.
- [13] Lu Q, Shi L, Mao Q H, et al. Research advances in dual-comb spectroscopy [J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2018, 45(4): 0400001. 路桥, 时雷, 毛庆和, 等. 双光梳光谱技术研究进展[J]. *中国激光*, 2018, 45(4): 0400001.
- [14] Yang H L, Wei H Y, Li Y, et al. Technique progress of high-precision gas absorption spectroscopy with femtosecond optical frequency comb[J]. *Spectroscopy and Spectral Analysis*, 2014, 34(2): 335-339. 杨宏雷, 尉昊贇, 李岩, 等. 飞秒光学频率梳高精度气体吸收光谱技术进展[J]. *光谱学与光谱分析*, 2014, 34(2): 335-339.
- [15] Wu X J, Li Y, Wei H Y, et al. Femtosecond optical frequency combs for precision measurement applications[J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2012, 49(3): 030001. 吴学健, 李岩, 尉昊贇, 等. 飞秒光学频率梳在精密测量中的应用[J]. *激光与光电子学进展*, 2012, 49(3): 030001.
- [16] Zhang Z G. Advances in high repetition rate femtosecond fiber lasers [J]. *Acta Optica Sinica*, 2011, 31(9): 0900130. 张志刚. 高重复频率飞秒光纤激光技术进展[J]. *光学学报*, 2011, 31(9): 0900130.
- [17] Lu M J, Wu T, Li Y, et al. Dual-comb nonlinear spectroscopy[J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2020, 58(1): 0100001. 卢敏健, 武韬, 李岩, 等. 双光梳非线性光谱[J]. *激光与光电子学进展*, 2020, 58(1): 0100001.
- [18] Schiller S. Spectrometry with frequency combs[J]. *Optics Letters*, 2002, 27(9): 766-768.
- [19] Keilmann F, Gohle C, Holzwarth R, et al. Time-domain mid-infrared frequency-comb spectrometer [J]. *Optics Letters*, 2004, 29(13): 1542-1544.
- [20] Giaccari P, Deschênes J D, Saucier P, et al. Active Fourier-transform spectroscopy combining the direct RF beating of two fiber-based mode-locked lasers with a novel referencing method[J]. *Optics Express*, 2008, 16(6): 4347-4365.
- [21] Ideguchi T, Poisson A, Guelachvili G, et al. Adaptive real-time dual-comb spectroscopy [J]. *Nature Communications*, 2014, 5: 3375.
- [22] Yang L, Shen X L, Yang K W, et al. Analysis and realization of adaptive dual-comb spectroscopy [J]. *Acta Optica Sinica*, 2018, 38(5): 0514002. 杨力, 沈旭玲, 杨康文, 等. 自适应双光梳光谱原理分析与实现[J]. *光学学报*, 2018, 38(5): 0514002.
- [23] Dai S Y, Zhou D W, Xia W, et al. Research on a miniaturized erbium-doped fiber optical frequency



- comb [C] // Summary of the Report of the 16th National Quantum Optics Conference, Yanji, Jilin, China. Beijing: Chinese Physical Society, 2014: 79.
- 戴少阳, 周大伟, 夏巍, 等. 一种小型化的掺铒光纤光学频率梳的研究 [C] // 第十六届全国量子光学学术报告会论文集. 中国吉林延吉. 北京: 中国物理学会, 2014: 79.
- [24] Cossel K C, Waxman E M, Giorgetta F R, et al. Open-path dual-comb spectroscopy to an airborne retroreflector [J]. *Optica*, 2017, 4(7): 724-728.
- [25] Cai Y J, Pan R, Zhang T, et al. Compact, robust, and repetition-rate-locked all-polarization-maintaining femtosecond fiber laser system [J]. *Optical Engineering*, 2019, 58(4): 046108.
- [26] Ycas G, Giorgetta F R, Friedlein J T, et al. Compact mid-infrared dual-comb spectrometer for outdoor spectroscopy [J]. *Optics Express*, 2020, 28(10): 14740-14752.
- [27] Li X H, Feng J J, Mao W J, et al. Emerging uniform  $\text{Cu}_2\text{O}$  nanocubes for 251st harmonic ultrashort pulse generation [J]. *Journal of Materials Chemistry C*, 2020, 8(41): 14386-14392.
- [28] Zhao Y, Wang W, Li X H, et al. Functional porous MOF-derived  $\text{CuO}$  octahedra for harmonic soliton molecule pulses generation [J]. *ACS Photonics*, 2020, 7(9): 2440-2447.
- [29] Feng J J, Li X H, Zhu G Q, et al. Emerging high-performance  $\text{SnS}/\text{CdS}$  nanoflower heterojunction for ultrafast photonics [J]. *ACS Applied Materials & Interfaces*, 2020, 12(38): 43098-43105.
- [30] Feng J J, Li X H, Shi Z J, et al. Silver sulfide nanosheets: 2D ductile transition metal chalcogenides (TMCs): novel high-performance  $\text{Ag}_2\text{S}$  nanosheets for ultrafast photonics (advanced optical materials 6/2020) [J]. *Advanced Optical Materials*, 2020, 8(6): 2070023.
- [31] Yan P P, Gong H, Ye F, et al. All polarization-maintaining erbium-doped fiber based optical comb [J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2020, 47(1): 0115001.
- 鄢朋朋, 贡航, 叶飞, 等. 全保偏掺铒光纤光梳 [J]. *中国激光*, 2020, 47(1): 0115001.