

光频链接的双光梳气体吸收光谱测量

张伟鹏 杨宏雷 陈馨怡 尉昊赞 李岩

Optical frequency linked dual-comb absorption spectrum measurement

Zhang Wei-Peng Yang Hong-Lei Chen Xin-Yi Wei Hao-Yun Li Yan

引用信息 Citation: *Acta Physica Sinica*, 67, 090701 (2018) DOI: 10.7498/aps.67.20180150

在线阅读 View online: <http://dx.doi.org/10.7498/aps.67.20180150>

当期内容 View table of contents: <http://wulixb.iphy.ac.cn/CN/Y2018/V67/I9>

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

[中波红外微型静态傅里叶变换光谱仪的设计与分析](#)

Design and analysis of medium wave infrared miniature static Fourier transform spectrometer

物理学报.2018, 67(6): 060702 <http://dx.doi.org/10.7498/aps.67.20172599>

[准直系统热光学效应对静态傅里叶变换红外光谱仪光谱复原的影响研究](#)

Influence on the recovered spectrum caused by thermal optics effect of the collimation lens used in static Fourier transform infrared spectrometer

物理学报.2015, 64(13): 130703 <http://dx.doi.org/10.7498/aps.64.130703>

[时空联合调制成像光谱仪前置成像系统分析与设计](#)

Design and analysis for the front imaging optical system of the spatiotemporal mixed modulated Fourier transform imaging spectrometer

物理学报.2014, 63(10): 100701 <http://dx.doi.org/10.7498/aps.63.100701>

[空间调制傅里叶变换光谱仪分束器色散特性研究](#)

Study on chromatic dispersion of beam splitter in spatially modulated Fourier transform spectrometer

物理学报.2012, 61(14): 140702 <http://dx.doi.org/10.7498/aps.61.140702>

[窄带傅里叶变换光谱仪中平稳高斯噪声的理论分析](#)

Theoretical analysis on stationary Gaussian random noise in narrowband Fourier transform spectrometer

物理学报.2012, 61(7): 070704 <http://dx.doi.org/10.7498/aps.61.070704>

光频链接的双光梳气体吸收光谱测量*

张伟鹏¹⁾ 杨宏雷²⁾ 陈馨怡¹⁾ 尉昊赞^{1)†} 李岩¹⁾

1) (清华大学精密仪器系, 精密测试技术及仪器国家重点实验室, 北京 100084)

2) (北京无线电计量测试研究所, 计量与校准技术重点实验室, 北京 100854)

(2018年1月20日收到; 2018年2月8日收到修改稿)

双光梳光谱技术以其无运动部件快速采样、高分辨率探测等优势成为宽带激光光谱测量中的热点技术. 但受限于常用微波锁定双光梳光源间的噪声特性, 双光梳光谱技术仍难以发挥其探测潜能. 本文报道一种光频域互相链接的双光梳光谱探测方案. 通过将两台激光器的偏置频率同时锁定到一个窄线宽激光器上, 既免去了结构复杂且成本高昂的非线性自参考系统, 又将双光梳间的共同参考点设置到了光频范围, 抑制了双光梳光谱采样抖动, 实现光谱探测性能的提升. $^{13}\text{C}_2\text{H}_2$ 的 $\nu_1 + \nu_3$ P 支光谱数据测量数据分析结果表明: 谱线位置与文献结果符合良好, 光谱分辨率为 0.086 cm^{-1} , 信噪比 $> 200 : 1$ (62.5 ms, 100 幅平均), 相应的秒均噪声等效吸收系数达 $6.0 \times 10^{-6} \text{ cm}^{-1} \cdot \text{Hz}^{-1/2}$. 该工作为双光梳光谱测量的实际应用提供了一种高精度、低成本、易于实现的解决方案.

关键词: 光谱测量, 傅里叶变换光谱, 光学频率梳

PACS: 07.57.Ty, 29.30.-h, 42.62.Eh

DOI: 10.7498/aps.67.20180150

1 引言

伴随着光学频率梳这一稳定的宽带激光光源的出现, 众多与光学频率测量相关的技术应用得到了革新和发展^[1-5], 其中在高精度光谱测量方向发展出了双光梳光谱^[6-16]、宽带腔增强直接光频梳光谱^[17-20]、宽带腔衰荡光谱^[21-24]等多种极具特色的宽带激光光谱探测技术, 突破了原有激光光谱技术窄带探测的限制, 使得激光光谱具备了同时实现宽光谱、高灵敏度和高分辨率探测的能力^[12], 并展示出在多组分同时探测分析(如疾病诊断、大气监测、燃烧诊断和安全防卫等)中的巨大潜力. 其中, 双光梳光谱探测方法以两台重复频率稍有不同的光频梳作为光源, 实现快速异步光学扫描和多外差干涉探测, 并通过对于干涉信号的傅里叶变换和频谱信号的频率映射获得待测光谱数据. 该方法具有傅里叶光谱探测方法的特征, 但又充分利用了光频

梳的时域和频域特性, 无需任何机械扫描部件就可以实现宽带、高分辨率、高灵敏度快速探测, 极具探测优势. 然而, 在初期实践中, 受限于光频梳纵模的频率稳定性, 探测分辨率仅达到 1 cm^{-1} 左右, 距双光梳光谱的探测潜力甚远^[14]. 为了提升探测性能, 研究者为提高双光梳光源的绝对频率稳定度方面开展了卓有成效的实践, 成功演示了一些基于高稳定性光梳光源的双光梳光谱系统, 测得了十分清晰的精细光谱数据^[6,8], 分辨率甚至达到光频梳纵模间隔. 但这类系统锁定环节多而且复杂, 实现难度大, 因此, 近年来发展出了多种提高双光梳互相干性^[10]或补偿双光梳光源间相对相位波动和时间抖动^[9,10]的双光梳光谱探测方案. 这类方案既能获得较好的探测性能, 又降低了系统的实现难度, 非常有潜力带动双光梳光谱走向实用.

本文在对双光梳光谱探测性能评估^[15,16]分析的基础上, 研制光学频率参考稳定的飞秒光学频率梳光源, 实现了一种光频链接的双光梳光谱探测系

* 国家重大科学仪器设备开发专项(批准号: 2013YQ47067502)和国家自然科学基金(批准号: 61775114)资助的课题.

† 通信作者. E-mail: luckiwei@mail.tsinghua.edu.cn

统. 该系统中, 两台光频梳以同一台窄线宽激光器为媒介进行光频锁定控制, 避免了复杂的自参考系统, 在简化系统实现的同时, 提升了双光梳光源间的相干性, 实现了光谱分辨率相较于传统射频锁定双光梳系统一个数量级的提升. 通过该系统, 获得了高质量的乙炔 ($^{13}\text{C}_2\text{H}_2$) 光谱, 并与文献 [25] 报道的光谱数据进行了比对和评估, 验证了系统的探测性能.

2 原理及实验装置

2.1 光频链接双光梳系统原理

一台光频梳输出的频率梳齿可表示为 $N \times f_{\text{rep}} + f_{\text{ceo}}$, 其中 f_{rep} , f_{ceo} 分别称为光频梳的重复频率和偏置频率, N 为对应的纵模数. 对于射频锁定的光频梳, 通过直接测量相邻梳齿间的拍频得到 f_{rep} , 通过 $1f-2f$ 非线性自参考系统得到其 f_{ceo} [26], 再通过反馈控制光频梳的谐振腔腔长和抽运电流分别控制其重复频率和偏置频率锁定至标准的射频频率基准, 最终实现光频梳的完全锁定. 该锁定方式中, 两台光频梳虽然有溯源至射频频率基准的相对稳定的偏置频率和重复频率, 但是光频输出信号所对应的 N 值达到 10^6 量级, 这意味着重复频率的不稳定性在光频段被显著放大, 造成在实际测量中双光梳之间的频差表现出较大的高频抖动, 互相干性退化. 之前的仿真和实验研究表明 [15,16], 使用这类双光梳光源, 直接测得的光谱线位置抖动达到 0.2 cm^{-1} 左右, 难以实现优于 1 cm^{-1} 光谱分辨率的高性能探测. 为了减小两台光学频率梳对应纵模频率差的相对抖动, 提高光谱探测性能, 本文实践一种光频链接的双光梳光谱探测方案, 通过引入一台布拉格光栅稳定的窄线宽参考激光器作为光学频段的频率参考, 增强两台光频梳间的相对稳定性. 该系统中, 两台光频梳均通过调制其各自的抽运电流与该窄线宽激光器进行锁定, 其各自的重复频率仍通过调制谐振腔长的方式与射频频率基准锁定. 此时, 光频梳输出的梳齿频率可以表示为 $N_1 \times f_{\text{rep}} + f_{\text{L}} + f_{\text{beat}}$. 这里 f_{L} 和 f_{beat} 分别为参考激光器的频率和光频梳与参考激光器的拍频, N_1 为以激光参考点为基准的偏移纵模数. 对比射频锁定方案, f_{ceo} 取值由一个射频频率增加到一个很大的光频频率 $f_{\text{L}} + f_{\text{beat}}$, 对应 N_1 的取值比 N 减小 2 个量级. 这使得在测量光谱段内由重复频率不稳定导致

的双光梳互相干性下降的情况得到很大程度的改善. 仿真分析表明 [15], 该方案比起完全射频锁定的方式, 光谱分辨率可提高一个数量级. 同时, 本方案无需较为复杂的 $1f-2f$ 非线性自参考系统, 使得该双光梳光谱测量系统成本降低, 更易于实现.

基于上述方案, 搭建了如图 1 所示的双光梳光谱测量系统. 通过同一个窄线宽参考激光器 (RIO, RIO0195-3-16-4) 和铷钟频率基准 (Symmetricom, 8040C) 实现两台光频梳的完全锁定并同步. 两台光频梳的输出光各自通过一个半波片使其偏振方向一致, 后经由一个分束棱镜合束入射进待测气体池 (Triad Technology, TT-CH13-100T-G-Q). 在光入射至气体池前, 使用一个与待测光谱范围对应的带通滤光片进行光谱选择, 以便在充分利用探测器动态范围的情况下, 增强光谱数据的信噪比. 出射的带有吸收信息的双光梳多外差拍频信号被光电探测器接收并由基于现场可编程门阵列 (FPGA) 的数据采集卡 (NI, PXIe-7965R FPGA, 16-bit 5762R digitizer) 所采集. 对采集得到的信号进行傅里叶变换以及光学频率映射, 即得到待测气体的吸收光谱特性.

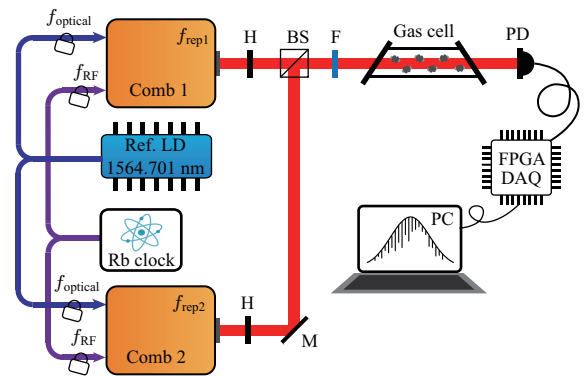


图 1 双光梳光谱测量系统原理图 (Comb 1 和 Comb 2 为自制光频梳, H 为半波片, BS 为分束立方体, F 为光学滤光片, PD 为光电探测器, M 为平面反射镜)

Fig. 1. Schematic of the dual-comb spectrometer (Comb 1 and Comb 2, homemade optical frequency combs; H, half wave plate; BS, beam splitter; F, optical filter; PD, photodetector; M, mirror).

2.2 光频参考光频梳光源

光频参考光频梳光源是实现双光梳光谱探测的基础. 图 2 展示了其内部原理结构. 该光频梳基于一个由饱和吸收体和非线性偏振旋转构成的混合锁模飞秒脉冲激光器. 该混合锁模方式既保证了自启动的锁模特性又具有较宽的输出光谱. 特别

地, 在该激光器谐振腔内集成的一个大行程电动光学时延线提供超过 5.5 cm 的运动行程, 可使光源在重复频率 98 MHz 的附近拥有接近 1.8 MHz 的重复频率调整范围. 这样大的调整范围使得在制作并集成第二台光学频率梳时, 调整并获得与第一台光频梳接近的重复频率这一过程得到很大程度的简化. 锁模后, 每台光源拥有超过 30 mW (耦合效率约 85%) 的输出功率, 并被分成三路分别用于光学频率锁定和光谱探测应用. 不同于常规微波锁定光频梳, 本方案将用于锁定的两路光中的一路和稳频窄线宽激光器耦合获得光学拍频, 通过该拍频产生误差信号对光频梳的抽运电流调制以实现位于光频域上的偏置频率点的高精度锁定; 同时, 利用相邻梳齿间的拍频信号, 通过对谐振腔内光纤拉伸器的调控, 实现光频梳重复频率的高速锁定. 该光纤拉伸器包含一个共烧式长行程压电陶瓷 (PZT), 提供 17.4 μm 的大运动行程, 用于对光纤谐振腔进行补偿. 该自制光频梳被安置在一个配备有 TEC 制冷片和 PID 控制器的主动温控盒内以避免温度的长期漂移及空气的扰动, 减小引入的谐振腔长变化, 以保证每次开机稳定地输出光谱与输出功率.

上述调制抽运电流和压电陶瓷的两组锁相电路使用类似的实现方案, 如图 3 所示. 首先位于 10 MHz 附近的光学拍频被光电二极管探测并通过带通滤波器 (BBP-10.7+, 9.5—11.5 MHz, Mini-Circuits) 以提高拍频信号的信噪比. 之后通过功率分配器分出一路信号用于监视锁定的拍频, 另一路通过一个放大器增加信号功率后送入鉴频鉴相器, 与从信号发生器生成的标准信号进行鉴频鉴相生

成误差信号. 对于谐振腔长调制, 输出的慢环误差信号经高压放大器放大后反馈给光纤拉伸器内的压电陶瓷; 对于抽运电流调制, 则使用高带宽误差

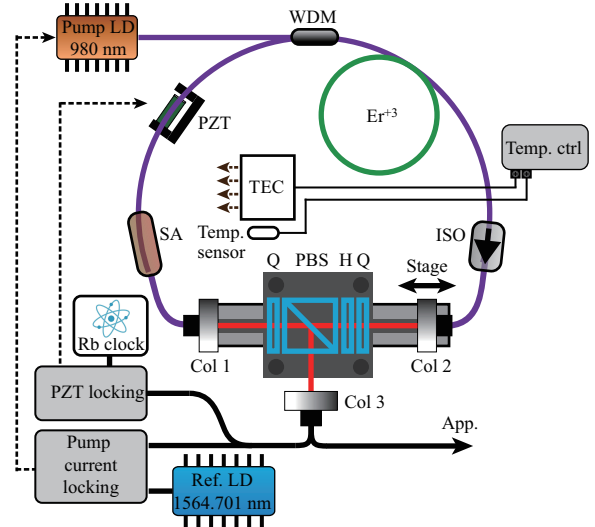


图 2 光频参考混合锁模飞秒光学频率梳结构 (Pump LD 为抽运激光二极管; WDM 为波分复用器; Er^{+3} 表示掺铒光纤; Temp. ctrl 为温度控制器; PZT 为压电陶瓷晶体; TEC 为热电制冷器; Temp. sensor 为温度传感器; SA 为饱和吸收体; ISO 为隔离器; COL 1, 2, 3 为光纤准直耦合器; Q 为四分之一波片; PBS 为偏振分束立方; H 为半波片; Ref. LD 为参考窄线宽激光器; App. 表示实验应用)

Fig. 2. Schematic of the hybrid mode-locking optical frequency comb with optical reference stabilization (Pump LD, pump laser diode; WDM, wave division multiplier; Er^{+3} , Er doped optical fiber; Temp. ctrl, temperature control; PZT, piezo crystal; TEC, thermal electrical cooler; Temp. sensor, temperature sensor; SA, saturable absorber; ISO, isolator; Col 1, 2, 3, collimator; Q, quarter wave plate; PBS, polarization beam splitter; H, have wave plate; Ref. LD, reference narrow line-width laser diode; App., experiment application).

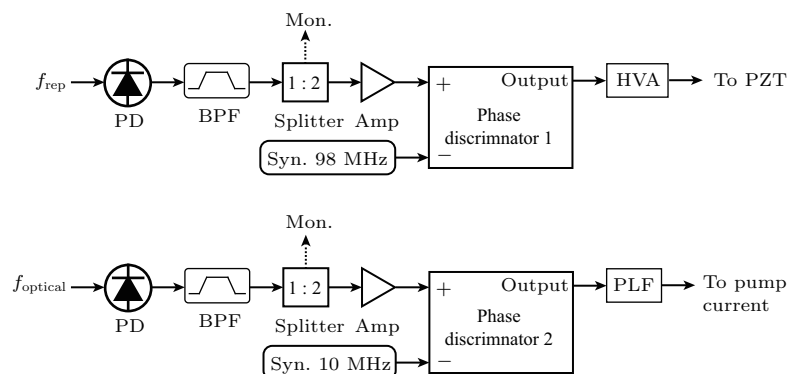


图 3 锁相环电路原理结构 (BPF 为带通滤波器, Amp 为射频放大器, HVA 为高压放大器, PLF 为相位超前电路, Syn. 为信号发生器, Mon. 为监视端口) (a) 压电陶瓷锁相环; (b) 抽运电流锁相环

Fig. 3. Schematic of the phase lock loop (PLL) used for comb stabilization (BPF, band pass filter; Amp, amplifier; HVA, high voltage amplifier; PLF, phase-lead filter; Syn., frequency synthesizer; Mon., monitor port): (a) Phase lock loop of the PZT; (b) phase lock loop of the pump current.

信号,并经过一个相位超前补偿电路之后再反馈给抽运激光器控制器的电流调制端口以提高伺服反馈带宽.

3 光频梳光源性能评估

为验证激光器的输出特性,使用宽带光电探测器(New focus, 1434)和高速示波器(Agilent, DSOS254A)获得了时域脉冲信号,如图4(a)所示,周期脉冲时间间隔约为10 ns. 将此信号送入频谱仪(Agilent, N9010A)中,可得到脉冲重复频率的基频和高次谐波,放大基频频段,并设置仪器分辨率和视频分辨率均为3 Hz,可看到重复频率约为98.791 MHz,信噪比达到70 dB,如图4(b)所示. 使用自相关仪(APE, PulseCheck50)测量了输出脉宽, sech^2 拟合脉冲宽度为175 fs,如图4(c)所示. 锁模后典型的输出光谱如图4(d)所示. 进一步对激光器近两周的输出光谱和平均功率测试,显示输出光谱一致性良好,光功率变化小于3%,体现出了激光器很好的长期相对稳定性.

抽运电流调制环的锁定性能对于建立良好的

光频链接至关重要. 但实际锁相环中,由于铷离子较长的上能级寿命以及谐振腔较慢的响应带来了额外的低通滤波效应,导致调制控制带宽受限. 直接利用图3方案,锁定环最大调制带宽仅为14.8 kHz,如图5(b)所示. 为获得更大的控制带宽,在实验中加入了一个传递函数如图5(a)所示的相位超前电路,抵消由低通滤波效应造成的相位滞后问题,并采用高速的抽运驱动器进一步提高控制带宽. 使用上述改进措施后,控制带宽显著增加到94.8 kHz,如图5(b)所示,且其1 Hz—1 MHz的积分相位噪声积分值为0.755 rad,体现出了很好的锁定性能.

为检验相位超前补偿的抽运电流锁相环路的长期稳定性,我们对锁定拍频进行了时长为3000 s(门时间为1 s)的监测. 图6(a)所示为压电陶瓷控制环路锁定频率误差. 测量得锁定频率标准差和1 s平均Allan标准差均为5.0 mHz,对应于10 MHz本振信号的1 s平均相对Allan标准差为 5.0×10^{-11} ,512 s平均Allan标准差为 4.9×10^{-12} . 图6(b)中相对Allan标准差曲线呈 $\tau^{-1/2}$, τ 为积分时间,结果表明相位锁定效果良好.

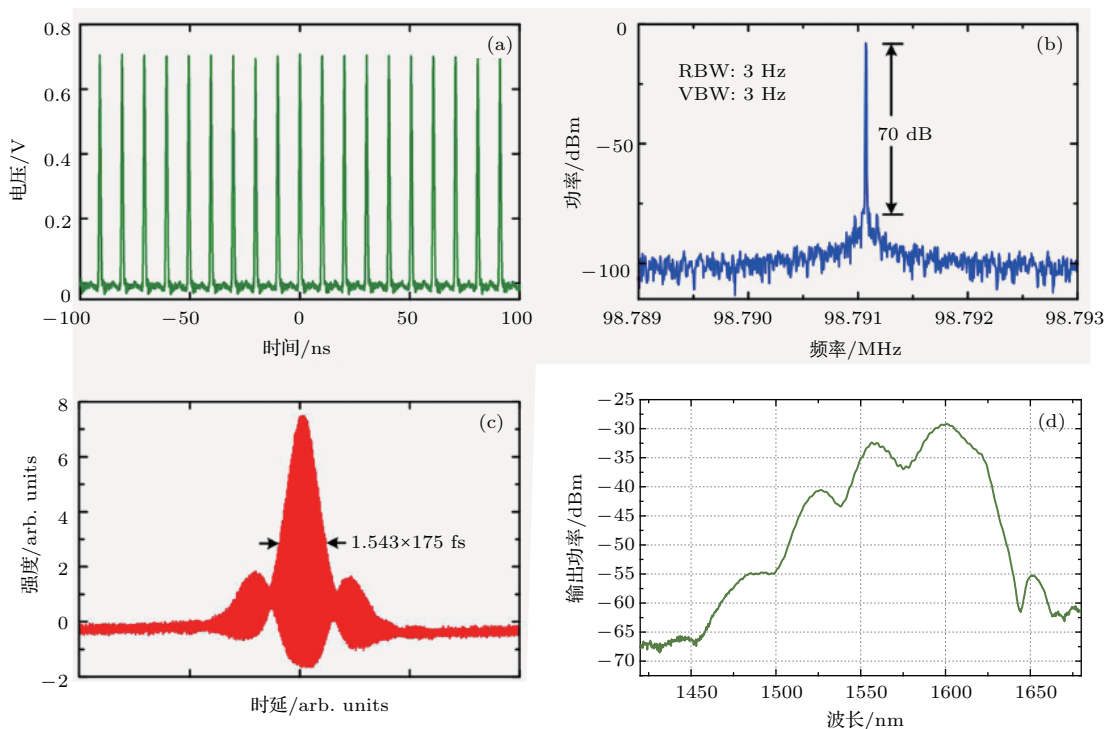


图4 输出锁模激光性能 (a) 时域脉冲; (b) 脉冲重复频率频谱(RBW表示分析带宽,VBW表示显示带宽); (c) 脉冲自相关信号; (d) 输出光谱

Fig. 4. Output performance when mode-locked: (a) Output pulse in time domain; (b) radio frequency spectrum of repetition rate (RBW, resolution bandwidth; VBW, video bandwidth); (c) autocorrelation of the output pulse; (d) output spectrum.

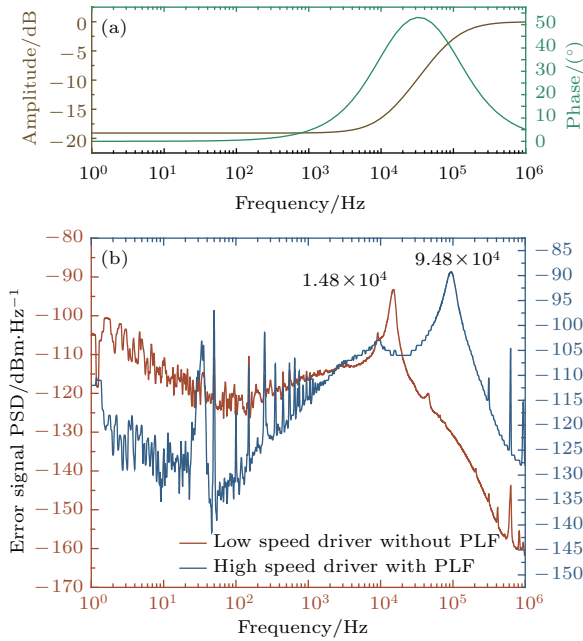


图5 (a) 相位超前电路传递函数; (b) 抽运电流锁定误差信号的功率谱密度

Fig. 5. (a) Transfer function of the designed phase-lead filter; (b) power spectrum density of the in-loop error signal in the pump-locking loop.

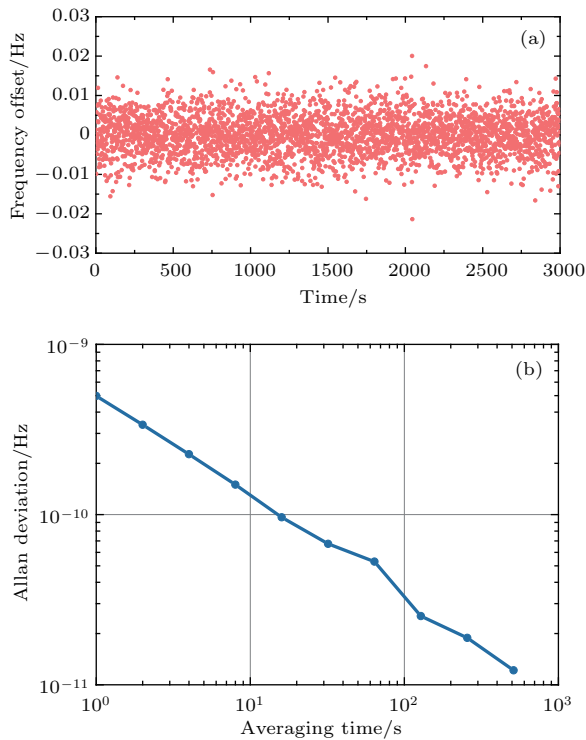


图6 抽运电流锁定长期稳定性 (a) 频率计测量的频率偏离; (b) 由 (a) 导出的相对 Allan 方差

Fig. 6. Long-term stability of the locked beat note in the pump-locking loop: (a) Counted frequency offset with a gate time of 1 s; (b) relative Allan deviation derived from (a).

4 光谱测量性能评估

在完成两台光频梳光源的搭建后, 我们构建了如图 1 所示的双光梳光谱测量系统. 两台光频梳的重复频率被设定在 98.790 MHz 附近, 并且两台之间具有 1.600 kHz 的重复频率差. 所用重复频率参数通过一台与铷原子频率基准同步的双通道信号发生器生成, 且两个通道之间通过信号发生器内部的锁相环实现相位同步. 用于光学频率参考的窄线宽激光器标称线宽小于 2 kHz, 中心波长为 1564.701 nm, 对应的频率为 191.5973 THz. 我们使用的光学带通滤光片的半高全宽为 12 nm, 中心波长为 1540 nm. 测量中, 干涉数据以 250 MS/s 的采样率采集, 结合干涉图边缘数据信噪比, 选取单帧干涉数据时长为 24 μ s. 图 7 显示了一个典型的双光梳光谱探测时域干涉信号, 其中的右插图展示了中心增强部分 300 个采样点的干涉数据, 左插图展示了干涉图边缘部分 300 个采样点. 从图 7 能够看出中心增强信号清晰未饱和, 边缘信号周期性调制明显, 具有一定的信噪比. 接下来, 采集数据补零到 2^{16} 个采样点 (对应 260 μ s) 后经过三角窗调制, 通过快速傅里叶变换获得映射到射频域的吸收光谱. 结合实验参数配置条件, 相应光频域光谱位置可以通过 (1) 式求得:

$$\nu = (\nu_{\text{cw}} + f_b) + \frac{f_{\text{rep1}}}{\Delta f_{\text{rep}}} (f_{\text{rep1}} - f_{\text{RF}} - 2f_b), \quad (1)$$

其中 ν_{cw} 为窄线宽激光器的频率, f_b 为光频梳与窄线宽激光器之间的拍频, f_{rep1} 为第一台光频梳的重复频率, Δf_{rep} 为两台光频梳的重复频率差, f_{RF} 对应傅里叶变换后的射频信号. 由实验条件可得插零变换后的光谱数据点间隔为 0.0078 cm^{-1} .

映射到光频域的光谱数据如图 8 (a) 所示, 该图展示了 $^{13}\text{C}_2\text{H}_2$ 分子的 $\nu_1 + \nu_3$ 振转能级的 P 分支谱线, 图中光谱包络由双光梳光源输出特性决定. 进行基线拟合以及光谱的归一化得到透过率曲线, 如图 8 (b) 所示. 这一跨度为 55 cm^{-1} 的光谱数据清晰地展现了 $^{13}\text{C}_2\text{H}_2$ 分子的 $\nu_1 + \nu_3$ 振转能级 P(2) 至 P(22) 的谱线. 图 8 (c) 展示了对谱线 P(10) 强度拟合的结果, 显示测得谱线半高全宽优于 0.13 cm^{-1} . 事实上, 双光梳光谱系统的光谱分辨率可由采样时间 T 、重复频率 f_{rep1} 和重复频率差 Δf_{rep} 利用 (2) 式计算所得:

$$RES = k \times \frac{f_{rep1}}{T \cdot \Delta f_{rep}}, \quad (2)$$

其中 k 为切趾函数引入的分辨率增宽因子。类比于傅里叶变换光谱仪, 当不考虑切趾, 即 $k = 1$ 时, 光谱分辨率为 0.086 cm^{-1} ; 考虑实际计算时在补零后

引入了一个三角窗, 对应引入一个 $k \approx 1.43$ 的增宽因子, 使得切趾后光谱分辨率约为 0.12 cm^{-1} 。比较图 8(c) 所示结果不难发现, 两者符合良好; 实际谱线由于包含有谱线自身展宽的影响, 其半高全宽稍宽于评估也是不难理解的。为考查双光梳光谱谱

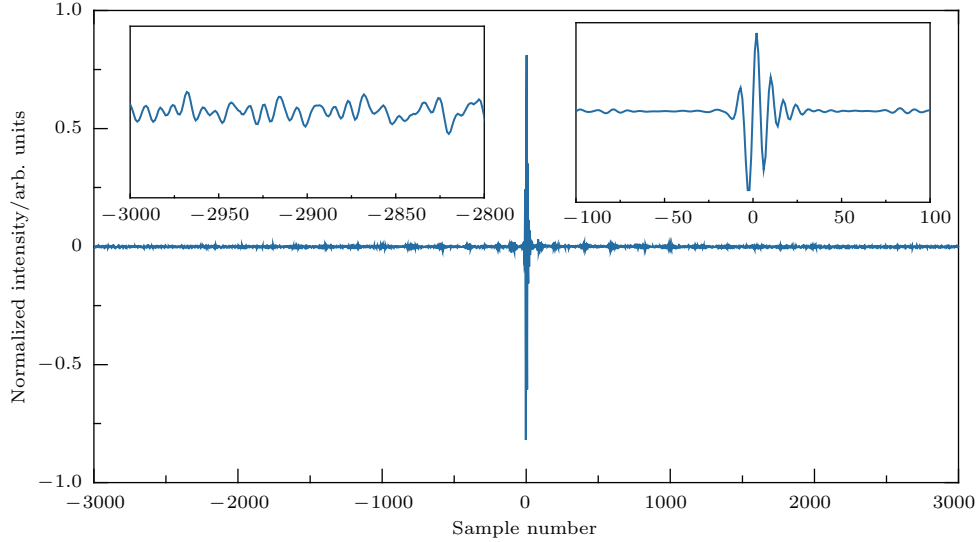


图7 双光梳时域干涉信号(采样率 250 MHz)

Fig. 7. Dual-comb interference signal in time domain.

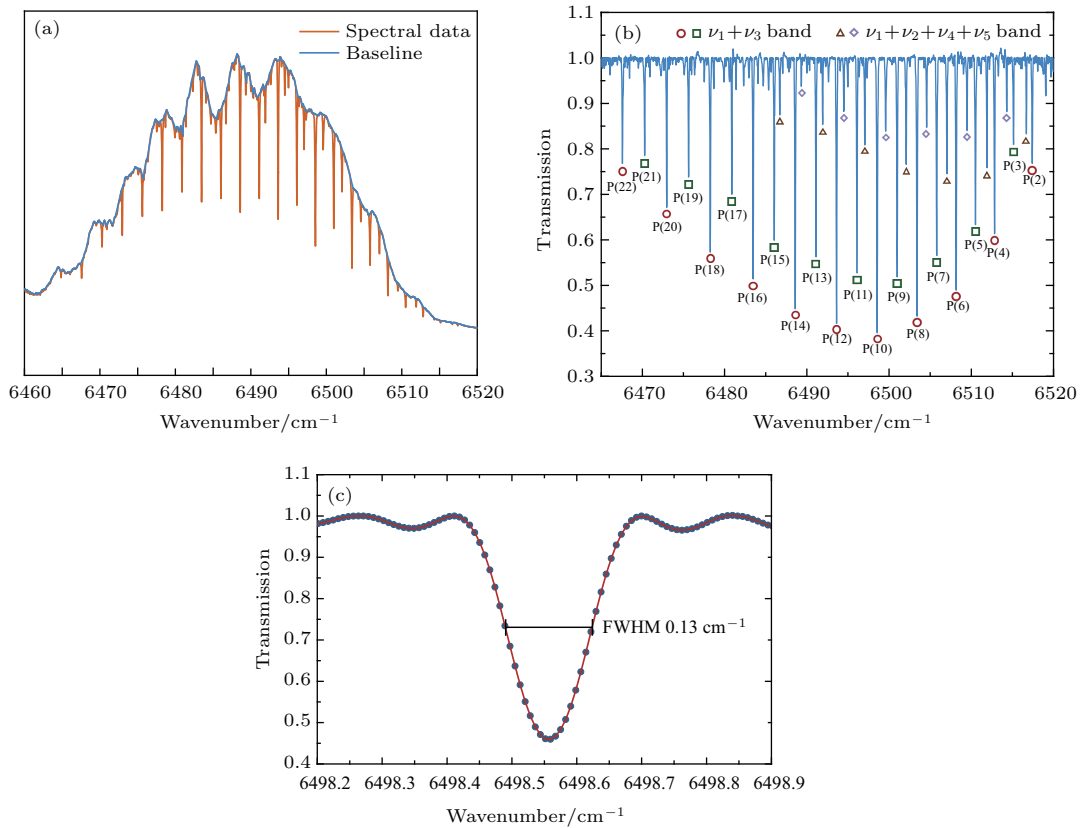


图8 $^{13}\text{C}_2\text{H}_2$ 分子的 $\nu_1 + \nu_3$ 振转能级 P 分支谱线 (a) 吸收光谱数据; (b) 透过率曲线; (c) P(10) 谱线的拟合结果

Fig. 8. Obtained optical spectra data of $\nu_1 + \nu_3$ of $^{13}\text{C}_2\text{H}_2$ molecular: (a) Absorption spectrum; (b) transmission curve; (c) curve fit of P(10) line.

线位置的准确性, 将所测得的 $\nu_1 + \nu_3$ 振转能级 P(2) 至 P(22) 谱线位置与文献 [25] 的结果进行了比对, 表 1 列出了测量比对结果, 可以看出, 最大偏差为 0.006 cm^{-1} , 小于上述光谱数据点间隔 0.0078 cm^{-1} , 该结果表明本系统具有较高的光谱测量位置准确度.

表 1 测量结果与文献数据对比

Table 1. Comparison between the measured data and the reference.

谱线	文献数据/ cm^{-1}	本实验数据/ cm^{-1}	偏差/ cm^{-1}
P(22)	6467.576536999	6467.573	0.003
P(21)	6470.281734062	6470.285	-0.003
P(20)	6472.964476485	6472.966	-0.002
P(19)	6475.624768856	6475.624	0.001
P(18)	6478.262614602	6478.266	-0.003
P(17)	6480.878014223	6480.876	0.002
P(16)	6483.470954643	6483.472	-0.001
P(15)	6486.041499847	6486.043	-0.002
P(14)	6488.589536652	6488.592	-0.002
P(13)	6491.115108389	6491.117	-0.002
P(12)	6493.618192036	6493.619	-0.001
P(11)	6496.098766354	6496.097	0.002
P(10)	6498.556625414	6498.560	-0.003
P(9)	6500.992383171	6500.991	0.001
P(8)	6503.405404121	6503.407	-0.002
P(7)	6505.795977162	6505.792	0.004
P(6)	6508.164208144	6508.161	0.003
P(5)	6510.510273317	6510.507	0.003
P(4)	6512.834418413	6512.837	-0.003
P(3)	6515.136938178	6515.136	0.001
P(2)	6517.418131459	6517.412	0.006

为了进一步展示本系统的探测性能, 图 9 给出了单次测量和 100 次平均的测量结果, 可以看到, 通过多次测量平均, 探测过程的随机噪声被大大抑制, 100 幅平均光谱数据的信噪比在测量范围内达到 220. 需要特别指出的是, 双光梳光谱的一大优势即在于快速测量, 在本系统实验中, 每秒测量光谱数可以达到 1600 幅, 同等分辨率条件下, 要比傅里叶光谱仪快 3—4 个量级. 利用 (3) 式 [27] 可以计

算出秒均噪声等效吸收系数:

$$NEA = (L \times SNR)^{-1} \sqrt{\frac{T}{M}}. \quad (3)$$

该指标表征了在单位积分时间下光谱仪的噪声水平, 能够反映光谱仪的测量灵敏度. 这里 SNR 为测量结果信噪比, M 为有效的光谱分辨单元数, T 为总的测量时间, L 为吸收光程. 本系统实验中, 上述 100 幅测量时间为 62.5 ms, 有效光谱分辨单元数为 640, 所用样品池吸收长度为 7.5 cm, 因而, 对应的秒均噪声等效吸收系数可达到 $6.0 \times 10^{-6} \text{ cm}^{-1} \cdot \text{Hz}^{-1/2}$.

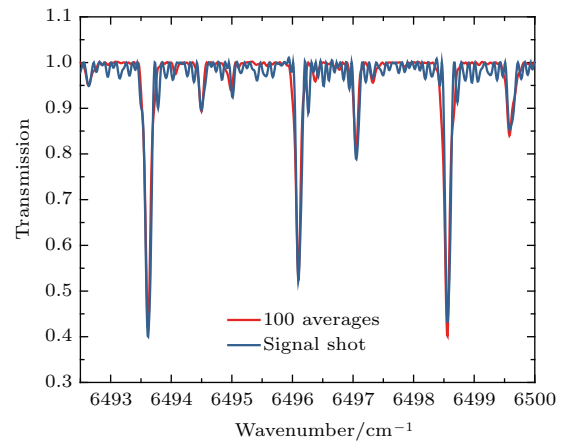


图 9 单次测量和 100 次测量平均透过率结果对比

Fig. 9. Comparison between the single-shot and 100-times averaged transmission.

从 (3) 式不难看出, 除增大吸收光程外, 提高秒均噪声等效吸收系数可以通过提高探测光谱信噪比和增大探测带宽来实现. 在本系统中, 信噪比仍主要受限于双光梳光源间的相对频率抖动、探测器线性度和数据采集卡的量化位数. 虽然两台光梳共用了同一个光学频率参考, 并且通过抽运电流调制实现了小于 1 Hz 的光学相位锁定性能, 但重复频率抖动造成的射频映射频率的不稳定性仍存在. 根据相位噪声测量原理, 相位噪声功率密度随谐波次数呈平方规律递增, 即 $S_\phi(n \cdot f) = n^2 \cdot S_\phi(f)$, 其中, S_ϕ 为相位噪声功率密度, n 为谐波次数, f 为基频 [28]. 因此, 通过锁定激光重复频率高次谐波, 可以有效地降低重复频率锁定噪声, 获得更好的性能. 此外, 当前光频梳的输出光谱带宽较为有限, 通过光学放大以及非线性光谱展宽技术拓宽输出光谱, 可以进一步提高该双光梳光谱仪的性能.

5 结 论

本文提出了一种光频链接的双光梳光谱探测方案. 借助一台窄线宽激光器的链接, 提高了两台光频梳间的互相干特性. 在免去复杂的自参考系统的情况下, 获得了较好的光谱测量性能. 对于 $^{13}\text{C}_2\text{H}_2$ 样品的测试结果显示, 系统光谱分辨率达 0.086 cm^{-1} (切趾后光谱分辨率约为 0.12 cm^{-1}). 在所探测 $\nu_1 + \nu_3$ 振转能级的P支范围内, 恢复的光谱线位置与文献数据符合良好, 偏差小于光谱数据最小间隔. 对62.5 ms时间内测量得到的100幅光谱数据分析得到平均信噪比达到220, 相应的秒均噪声等效吸收系数达到 $6.0 \times 10^{-6}\text{ cm}^{-1}\cdot\text{Hz}^{-1/2}$. 该工作开拓了一种易于实现, 且具有高光谱分辨率、高灵敏度的双光梳光谱探测解决方案, 该系统性能可满足大气成分遥感探测等应用需求, 为双光梳光谱系统的实际应用部署增添了途径.

参考文献

- [1] Newbury N 2011 *Nat. Photon.* **5** 186
- [2] Coddington I, Swann W, Newbury N 2009 *Nat. Photon.* **3** 351
- [3] Giorgetta F, Swann W, Sinclair S, Baumann E, Coddington I, Newbury N 2013 *Nat. Photon.* **7** 434
- [4] Lomsadze B, Cundiff S 2017 *Sci. Rep.* **7** 14018
- [5] Meng F, Cao S Y, Cai Y, Wang G Z, Cao J P, Li T C, Fang Z J 2011 *Acta Phys. Sin.* **60** 100601 (in Chinese) [孟飞, 曹士英, 蔡岳, 王贵重, 曹建平, 李天初, 方占军 2011 物理学报 **60** 100601]
- [6] Coddington I, Swan W, Newbury N 2008 *Phys. Rev. Lett.* **100** 013902
- [7] Bernhardt B, Ozawa A, Jacquet P, Jacquy M, Kobayashi Y, Udem T, Holzwarth R, Guelachvili G, Hänsch T, Picqué N 2009 *Nat. Photon.* **4** 55
- [8] Baumann E, Giorgetta F, Swann W, Zolot A, Coddington I, Newbury N 2011 *Phys. Rev. A* **84** 062513
- [9] Ideguchi T, Poisson A, Guelachvili G, Picqué N, Hänsch T 2014 *Nat. Commun.* **5** 3375
- [10] Cassinero M, Gambetta A, Coluccelli N, Laporta P, Galzerano G 2014 *Appl. Phys. Lett.* **104** 231102
- [11] Okubo S, Iwakuni K, Inaba H, Hosaka K, Onae A, Sasada H, Hong F 2015 *Appl. Phys. Express* **8** 082402
- [12] Coddington I, Newbury N, Swann W 2016 *Optica* **3** 414
- [13] Yang H, Wei H, Zhang H, Chen K, Li Y, Smolski V, Vodopyanov K 2016 *Appl. Opt.* **55** 6321
- [14] Yang H L, Wei H Y, Li Y, Ren L B, Zhang H Y 2014 *Spectroscopy and Spectral Analysis* **34** 335 (in Chinese) [杨宏雷, 尉昊赟, 李岩, 任利兵, 张弘元 2014 光谱学与光谱分析 **34** 335]
- [15] Yang H, Wu X, Zhang H, Zhao S, Yang L, Wei H, Li Y 2016 *Appl. Opt.* **55** D29
- [16] Yang H, Wei H, Li Y 2016 *Chin. Phys. B* **25** 044207
- [17] Thorpe J, Ye J 2008 *Appl. Phys. B* **91** 397
- [18] Adler F, Thorpe J, Kevin C 2010 *Ann. Rev. Anal. Chem.* **3** 175
- [19] Foltynowicz A, Masłowski P, Fleisher A, Bjork B, Ye J 2012 *Appl. Phys. B* **110** 163
- [20] Khodabakhsh A, Alrahman C, Foltynowicz A 2014 *Opt. Lett.* **39** 5034
- [21] Hodges T, Layer P, Miller W 2004 *Rev. Sci. Instrum.* **75** 849
- [22] Mondelain D, Sala T, Kassi S, Romanini D, Marangoni M, Campargue A 2015 *J. Quant. Spectrosc. Radiat. Transfer.* **154** 35
- [23] Ball S, Povey I, Norton E, Jones R 2011 *Chem. Phys. Lett.* **342** 113
- [24] Thorpe M, Moll K, Jones R, Safdi B, Ye J 2006 *Science* **311** 1595
- [25] Edwards C, Margolis H, Barwood G, Lea S, Gill P, Rowley W 2005 *Appl. Phys. B* **80** 977
- [26] Jones D, Diddams S, Ranka J, Stentz A, Windeler R, Hall J, Cundiff S 2000 *Science* **288** 635
- [27] Foltynowicz A, Masłowski P, Ban T, Adler F, Cossel K, Briles T, Ye J 2011 *Faraday Discuss.* **150** 23
- [28] Rubiola E 2009 *Phase Noise and Frequency Stability in Oscillators* (Cambridge: Cambridge University Press) pp29–30

Optical frequency linked dual-comb absorption spectrum measurement*

Zhang Wei-Peng¹⁾ Yang Hong-Lei²⁾ Chen Xin-Yi¹⁾ Wei Hao-Yun^{1)†} Li Yan¹⁾

1) (Department of Precision Instruments, Tsinghua University, Beijing 100084, China)

2) (Science and Technology on Metrology and Calibration Laboratory, Beijing Institute of Radio Metrology and Measurement, Beijing 100854, China)

(Received 20 January 2018; revised manuscript received 8 February 2018)

Abstract

Dual-comb spectroscopy is becoming a highlighted topic in broadband spectrum measurement techniques because of two outstanding advantages. One is its highly stable output frequency, which leads to an appealing resolution, and the other is the omitting of moving parts, which helps achieve extreme fast sampling rate. Utilizing the traditional radio frequency linked combs, however, obstructs the dual-comb spectroscopy reaching satisfied performance because the phase noise of the radio frequency standard causes the dual-comb mutual coherence to severely degrade. Specifically, traditional frequency comb stabilizes the carrier envelope offset at a radio frequency by a self-reference system, and the order number of each output comb tooth is over a hundred thousand. Thus, the phase noise of the radio frequency reference is significantly multiplied in output optical frequency by the same order of magnitude as the tooth order number. In this paper, we demonstrate an optical frequency linked dual-comb spectrometer where the two combs are locked to a common narrow linewidth laser. In this configuration, the two combs are synchronized at an identical optical frequency, which means that the carrier envelope offset of the two combs are changed to an optical frequency and the order number of the output comb teeth are reduced by two orders of magnitude. Therefore, not only the complex and costly self-reference system can be removed but also the phase noise of the optical frequency of each comb tooth is effectively reduced, which leads to lower mutual frequency jitters and better mutual coherence. To prove the performance, we measure the $\nu_1 + \nu_3$ P branch of $^{13}\text{C}_2\text{H}_2$ molecular and the results accord well with the reported line positions and reveals a spectral resolution of 0.086 cm^{-1} . The average signal-to-noise ratio exceeds 200 : 1 (62.5 ms, 100 times on average) and the noise equivalent coefficient is $6.0 \times 10^{-6} \text{ cm}^{-1} \cdot \text{Hz}^{-1/2}$. This work provides a solution for pragmatic dual-comb spectroscopy with high resolution and low-cost configuration.

Keywords: spectroscopy measurement, Fourier transform spectroscopy, optical frequency comb

PACS: 07.57.Ty, 29.30.-h, 42.62.Eh

DOI: 10.7498/aps.67.20180150

* Project supported by the National Key Scientific Instrument and Equipment Development Projects of China (Grant No. 2013YQ47067502) and the National Natural Science Foundation of China (Grant No. 61775114).

† Corresponding author. E-mail: luckiwei@mail.tsinghua.edu.cn