

自适应双光梳光谱原理分析与实现

杨力¹, 沈旭玲^{2,3*}, 杨康文¹, 郝强¹, 曾和平^{1,2}

¹上海理工大学光电信息与计算机工程学院, 上海 200093;

²华东师范大学精密光谱科学与技术国家重点实验室, 上海 200062;

³中国科学院上海光学精密机械研究所强场激光物理国家重点实验室, 上海 201800

摘要 采用自适应双光梳光谱检测方法对乙炔(C₂H₂)气体在 $\nu_1 + \nu_3$ 吸收带部分的 P 支谱线进行测量, 并通过与 HITRAN 相应数据库的对比, 验证了该方法的准确性。从采样定理出发, 分析了自适应主动补偿技术的工作机理, 并讨论了其高阶信号和带宽的特性。使用非线性光纤对光梳进行 200 nm 范围的超连续谱展宽, 拓展了其宽谱特性。时域信号单次采样时长为 600 μ s, 光谱分辨率达 1.09 GHz, 光谱更新频率为 180 Hz。自适应补偿技术有效解决了自然室温条件下梳齿快漂引起的光谱抖动问题。同时, 光梳振荡源重复频率锁定后均方差抖动控制为 7.01 MHz, 锁定光梳振荡源的重复频率和反馈调节控制连续激光的中心频率, 可有效抑制光梳梳齿的慢漂现象, 使双光梳光谱测量系统的稳定运行时间由几分钟提升至半小时量级, 增强了自适应双光梳系统的长期稳定性和实用性。

关键词 激光光学; 光谱分析; 自适应双光梳光谱; 载波包络相位; 重复频率

中图分类号 O439

文献标识码 A

doi: 10.3788/AOS201838.0514002

Analysis and Realization of Adaptive Dual-Comb Spectroscopy

Yang Li¹, Shen Xuling^{2,3}, Yang Kangwen¹, Hao Qiang¹, Zeng Heping^{1,2}

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

²State Key Laboratory of Precision Spectroscopy Science and Technology, East China Normal University, Shanghai, 200062, China;

³State Key Laboratory of High Field Laser Physics, Shanghai Institute of Optics and Fine Mechanics, Chinese Academy of Sciences, Shanghai 201800, China

Abstract In this paper, partial P branch lines in the $\nu_1 + \nu_3$ absorption band of the acetylene are measured by the adaptive dual-comb spectroscopy sampling technique. The validity of the method is verified by comparison of the measured results with the standard absorption lines in HITRAN database. The mechanism of adaptive sampling technique based on the sampling theorem is analyzed. High-order features and bandwidth characteristics of the adaptive sampling techniques are further discussed. In the experiment setup, 200 nm super continuums are generated in nonlinear fiber, and then the wide spectra are extended. Partial absorption lines of the acetylene are retrieved from a 600 μ s pulse signal in time domain with 1.09 GHz spectral resolution at a refresh rate of 180 Hz. The fast instabilities between combs are well compensated by the adaptive sampling technique under a room temperature environment. Meanwhile, with a 7.01 MHz stabilization accuracy of repetition rates, we suppress slow drifts effectively by further stabilizing the repetition rates of combs and tuning the center frequency of continuous-wave lasers. In this way, the stable running time of the dual-comb adaptive sampling system is increased from only a few minutes to more than half an hour, and thus the long-term stability and practicability of adaptive dual-comb spectroscopy are enhanced.

收稿日期: 2017-10-31; 收到修改稿日期: 2017-12-19

基金项目: 国家重大科学仪器设备开发专项(2012YQ150092)、国家自然科学基金(11704253, 11434005, 11504235)、中国博士后基金(2015M581634)、上海市青年科技英才“扬帆计划”(17YF1413100)

作者简介: 杨力(1992—), 男, 硕士研究生, 主要从事双光梳方面的研究。E-mail: yangli_usst@163.com

导师简介: 郝强(1981—), 男, 博士, 副教授, 硕士生导师, 主要从事超快激光技术的研究。E-mail: qianghao@usst.edu.cn

*通信联系人。E-mail: xlshen@lps.ecnu.edu.cn

Key words laser optics; spectrum analysis; adaptive dual-comb spectroscopy; carrier envelope phase; repetition rate
OCIS codes 140.4050; 070.4790; 300.1030

1 引 言

飞秒光学频率梳(简称“光梳”),以其频谱宽、脉宽窄和频率稳定等特性,为超快、超高分辨率的光谱检测提供了新的技术手段^[1-2],在精密光频测量^[3-4]、绝对距离测量^[5-11]和高分辨光谱仪^[12]等领域具有广阔的应用前景。在光频梳的应用中,科研人员起初通过采用腔衰荡的测量方法增加有效吸收距离,以提高灵敏度^[13]。随后,为解决干涉臂移动引起的振动干扰问题,双光梳光谱测量方法应运而生^[14-19]。Keilmann等^[20]提出了基于双光梳技术的傅里叶变换红外光谱测量方案。Baumann等^[21]通过采用3.4 μm 波段的中红外双光梳系统,首次测得了 CH_4 分子的吸收谱,相比傅里叶红外光谱仪的分辨率提高了10倍。一般双光梳光谱测量系统的重复频率和载波相位均需锁定在微波频标或稳频激光上。其中,载波相位信号探测与锁相电路加大了系统复杂度,导致长期稳定性欠佳。Ideguchi等^[12]提出并验证了基于自适应补偿的双光梳光谱实时检测方案。在该方案中,射频(RF)电路模块产生的补偿信号,实时补偿双光梳脉冲的相对时间抖动和载波相位抖动,从而线性恢复拍频光谱信号在频域的傅里叶变换谱图。该实验较好地补偿双光梳梳齿拍频快漂问题,且光谱分辨率达到了1.1 GHz,而单次测量时间仅为467 μs 。然而,由于双光梳振荡器处于自由运转状态,其梳齿拍频信号仍存在慢漂干扰。当拍频信号受慢漂干扰而超出电学处理模块的工作带宽时,自适应双光梳光谱测量系统将无法工作。

本文对自适应补偿方法进行了详细的理论分析,从信号表达式开始进行射频处理推导,并结合采样定理讨论了自适应双光梳主动补偿技术的基本机理。同时在分析过程中,研究了该技术的相关特性,以便于系统参数的设定及改进。双光梳振荡器采用电控偏振控制器(EPC)进行智能锁模监测和快速自锁模调节控制,使得系统光梳振荡源锁模状态便于管理与控制,提高了系统智能运行能力^[22-23]。实验采用高非线性光纤(HNLF)对双光梳振荡源进行光谱超连续展宽,拓展了其宽谱特性,使光谱覆盖部分 C_2H_2 的吸收谱;采用两台连续激光器作为中间媒介,分别与双光梳振荡器进行拍频,提取自适应主动补偿射频信号。为了将拍频信号控制在射频模块带宽内,对双光

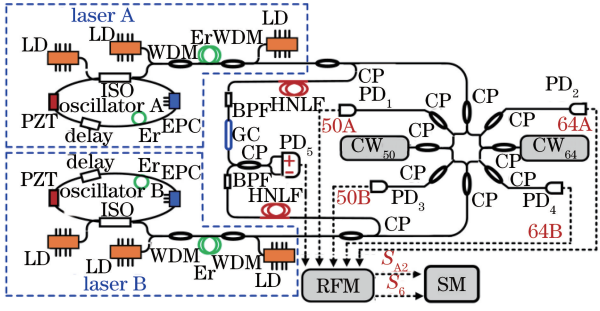
梳振荡器的重复频率进行了锁定控制,其重复频率的均方差抖动小于7 MHz,从而有效控制由重复频率参量引起的梳齿慢漂,减缓双光梳系统拍频信号向带宽外的漂移。同时,还将连续激光器的输出光频跟随锁定在拍频信号上,进一步有效缓解双光梳系统梳齿慢漂情况,并对拍频信号频率进行实时监测,将系统稳定运行时间提高至半小时量级。实验对一个标准大气压下 C_2H_2 在 $\nu_1 + \nu_3$ 吸收带部分P支谱线进行测量,快速有效地采集到600 μs 时间段的光谱拍频信号,并经过快速傅里叶变换(FFT)得到频谱图,最终与HITRAN光谱库中相应波段标准吸收谱线的位置和强度进行比对,以验证该方法的准确性。

2 自适应双光梳光谱检测装置及补偿原理

2.1 实验装置

自适应双光梳光谱检测方法原理如图1所示。实验中用到的脉冲激光器采用NPR(Nonlinear Polarization Rotation)锁模机理,依靠EPC实现对脉冲激光器锁模状态的智能调节与监测。两台连续激光器 CW_{50} 和 CW_{64} (RIO-0175, RIO ORION Corp)的中心波长分别为1550 nm和1564 nm,线宽均小于10 kHz。选用型号为PDB410C的平衡探测器对两台脉冲光激光器光谱拍频信号进行探测,其响应光谱范围为800~1700 nm;采用型号为FPD310的光电探测器对脉冲光和连续光的拍频信号 S_{50A} 、 S_{50B} 、 S_{64A} 、 S_{64B} 进行探测,以便对自适应补偿信号进行提取,其响应光谱范围为850~1650 nm。5路信号经过自适应补偿模块后最终进入信号采集模块。

两台脉冲激光器光谱如图2中红色和蓝色所示,其波长分别覆盖1525~1590 nm和1540~1573 nm,功率分别为73 mW和87 mW。激光器A的输出光谱虽然覆盖到了 C_2H_2 吸收光谱区,但光谱在该区域的吸收较弱,激光器B的输出光谱并未覆盖至该光谱区域。因此,分别采用两段长为10 cm的高非线性光纤将两台脉冲激光器光谱的主要能量线性转移到 C_2H_2 的吸收光谱区。在自相位调制的作用下,两台脉冲激光器的光谱都向目标波段展宽,光谱范围达200 nm,如图2中黑色谱线所示。随后分别经过中心波长为1530 nm、带宽为20 nm的带通滤波器,滤波



LD: laser diode at 980 nm; ISO: isolator; WDM: wavelength division multiplexer; PZT: piezoelectric ceramics; delay: delay line based on a step motor; Er: Erbium-doped fiber; S: signal; EPC: electronic polarization controller; CW₅₀: continuous wave laser with central wavelength of 1550 nm; CW₆₄: continuous wave laser with central wavelength of 1564 nm; HNLF: high nonlinear fiber; GC: gas cell; CP: fiber coupler; PD₁, PD₂, PD₃, PD₄: photodiode; PD: balanced detector; BP: bandpass filter; RFM: radio frequency module; SM: signal acquisition module

图 1 自适应双光梳光谱分析系统原理图

Fig. 1 Schematic diagram of adaptive dual-comb spectroscopy analysis system

后的光谱如图 2 绿色所示。由于自相位调制产生的新频率成分符合光梳梳齿特征,该新频率成分仍满足自适应补偿条件。最后,采用平衡探测方式获取 C₂H₂ 吸收光谱信号。即将两路脉冲光信号经过分束比为 50:50 的光纤耦合器合束。其中,一路合束信号接入平衡探测器正相差分输入端,另一路合束信号通过长为 10 cm 的气体池(气体压强为一个标准大气压)后,接入平衡探测器反相差分输入端。

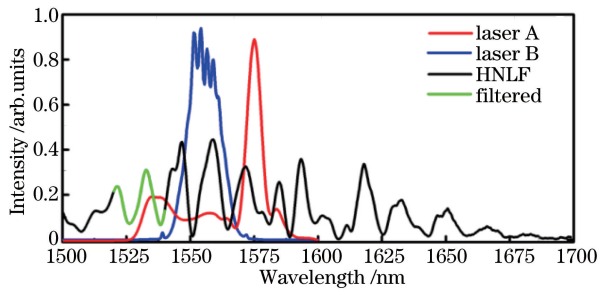


图 2 脉冲激光器输出光谱及非线性展宽

Fig. 2 Output spectrum and nonlinear broadening of two pulse lasers

2.2 自适应补偿原理

实验采用自由运行的脉冲激光器,光谱拍频的频率梳齿均为自由漂移状态。在满足采样条件($f_2 \gg 2f_1$)的情况下,如果采用频率为 f_2 的采样时钟对频率为 f_1 的成分进行采样,其频率成分恢复可表示为

$$F = \frac{1}{T} = \frac{1}{(N-1) \times \tau} = \frac{1}{(f_2/f_1) \times \frac{1}{\tau}} \times \frac{1}{\tau} = \frac{f_1}{f_2} \times f_0, \quad (1)$$

式中: f_0 为数据处理时选取的固定时钟值,当 f_1 和 f_2 均为固定值时,可取 $f_0 = f_2$; N 为频率为 f_1 的信号在一个完整周期内的采样点数; τ 为采样时间间隔。从(1)式可以看出, f_1 与 f_2 均为变量时,一般情况下采样结果也为变量,不利于光谱检测。而当 f_1 与 f_2 满足一定线性关系时,(1)式在数学形式上有可能为固定值,其频率恢复值与采样时钟和待采信号频率无关。利用该采样定理特性,接下来将结合自适应双光梳光谱测量系统,对采样光谱信号和采样时钟作射频处理,使采样光谱信号频率恢复值为固定常数。

自适应补偿机理主要由自适应信号的提取和梳齿快漂补偿组成。首先,两台连续激光器中心频率和两台脉冲激光器(laser A 和 laser B)的梳齿在频域上的信号位置关系如图 3(a)所示。为防止在目标光谱区域内两光梳拍频信号大小出现混淆现象,调整了两台脉冲激光器的重复频率差,使图 3(a)中光谱重合区域相邻梳齿对拍频的大小满足单调趋势,拍频信号有效的频率范围为 $0 \sim f_r/2$,其中 f_r 为激光器的重复频率,两光梳相邻梳齿序号之差为定值,即

$$\begin{cases} n_2 - n_1 = m_2 - m_1 = n_0 \\ n_3 - n_2 = m_3 - m_2 = k \end{cases}, \quad (2)$$

式中: n_1, n_2, m_1, m_2 分别为处于连续激光器光频左侧(频率较小方向)光梳最近的梳齿序号; n_3 和 m_3 为 laser A 和 laser B 光谱重合区域的第一根梳齿序号; n_0 和 k 为相应的两梳齿序号差。

光谱重合区域需落在 C₂H₂ 的吸收谱范围(1510 ~ 1540 nm)内,以产生有效拍频信号。图 3(a)中,两台脉冲激光器的梳齿可分别表示为

$$f_{rA} = n \times f_A + f_{ceoA}, \quad (3)$$

$$f_{rB} = m \times f_B + f_{ceoB}, \quad (4)$$

式中: n, m 为正整数; f_A, f_B 分别为 laser A 和 laser B 的重复频率; f_{ceoA}, f_{ceoB} 分别为 laser A 和 laser B 载波相位信号抖动。根据(3)式和(4)式,目标光谱区域拍频信号(其中不相邻的梳齿拍频产生的高频信号由滤波器滤除,此处不予考虑)可表示为

$$\begin{cases} S_{beat1} = n_3 \times f_A - m_3 \times f_B + \Delta f_{ceo} \\ S_{beat2} = (n_3 + 1) \times f_A - \\ \quad (m_3 + 1) \times f_B + \Delta f_{ceo} \\ \vdots \\ S_{beat(N+1)} = (n_3 + N) \times f_A - \\ \quad (m_3 + N) \times f_B + \Delta f_{ceo} \end{cases}, \quad (5)$$

式中: N 为光谱重合区域重复频率间隔数; Δf_{ceo} 为

两脉冲激光器载波相位之差。(5)式中存在的 Δf_{ceo} 抖动项,将通过自适应补偿信号 S_{A1} 来消除 Δf_{ceo} 项。如图 3(b)所示,为方便表述,实验中两连续光和两脉冲光相互间的拍频信号依次记为 $S_{50A}, S_{50B}, S_{64A}, S_{64B}$;频率值依次选定为 10, 20, 10, 25 MHz。结合(3)式和(4)式,4 个拍频信号可分别表示为

$$S_{50A} = f_{50} - (n_2 \times f_A + f_{\text{ceoA}}), \quad (6)$$

$$S_{50B} = f_{50} - (m_2 \times f_B + f_{\text{ceoB}}), \quad (7)$$

$$S_{64A} = f_{64} - (n_1 \times f_A + f_{\text{ceoA}}), \quad (8)$$

$$S_{64B} = f_{64} - (m_1 \times f_B + f_{\text{ceoB}}), \quad (9)$$

式中: f_{50} 和 f_{64} 为两个连续激光器(波长分别为 1550 nm 和 1564 nm)的光频。根据图 3(b)所示,对四路拍频信号进行射频处理。在射频信号处理过程中,需要对上述拍频信号进行适当的移频处理,以使射频信号处理满足射频滤波器的带宽范围和光谱拍频信号区域的单调性。同时使信号具有较宽裕的频率调节空间,抑制非有效信号成分,增加信号隔离度,提高信噪比。对(7)式进行 10 MHz 移频,对(9)式进行 15 MHz 移频,分别记为 S_{50B2} 和 S_{64B2} ,移频后为

$$S_{50B2} = f_{50} - (m_2 \times f_B + f_{\text{ceoB}}) + f_{10M}, \quad (10)$$

$$S_{64B2} = f_{64} - (m_1 \times f_B + f_{\text{ceoB}}) + f_{15M}. \quad (11)$$

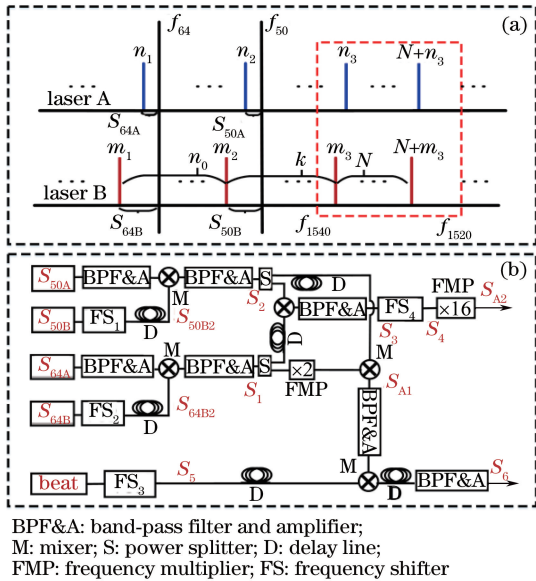


图 3 (a) 两台脉冲激光器的梳齿和两台连续激光器中心频率在频域上的信号位置示意图; (b) 射频信号处理原理图

Fig. 3 (a) Signal positions between comb lines of pulsed lasers and central frequency of CW lasers in frequency domain; (b) RF signal processing principle

将(8)式与(11)式以及(6)式与(10)式分别进行混频相减,消去连续激光器频率成分影响,得到 S_1, S_2 ,可表示为

$$S_1 = n_1 \times f_A - m_1 \times f_B + \Delta f_{\text{ceo}} + f_{15M}, \quad (12)$$

$$S_2 = n_2 \times f_A - m_2 \times f_B + \Delta f_{\text{ceo}} + f_{10M}. \quad (13)$$

将 S_1, S_2 进行 $2S_1 - S_2$ 处理,得出表达式 S_{A1} ,频率为 40 MHz,可表示为

$$S_{A1} = (2 \times n_1 - n_2) \times f_A - (2 \times m_1 - m_2) \times f_B + \Delta f_{\text{ceo}} + f_{20M}. \quad (14)$$

(14)式亦可表示为 $M \times S_1 - (M-1) \times S_2$ 的形式,用以提高该项射频频率,其中 M 为正整数。综合平衡频率混淆风险和信噪比参数,(14)式中取 $M=2$ 。当 M 值较小时,(14)式射频频率过小,导致出现频率混淆。当 M 值较大时,提高倍频阶数会使 S_{A1} 信噪比降低。对(5)式移频并与(14)式相减得到信号 S_6 ,将光谱拍频信号中载波相位抖动成分 Δf_{ceo} 消除,具体表达式为

$$\begin{cases} S_{6_beat1} = (2 \times n_0 + k) \times \Delta f \\ S_{6_beat2} = (2 \times n_0 + k + 1) \times \Delta f \\ \vdots \\ S_{6_beat(N+1)} = (2 \times n_0 + k + N) \times \Delta f \end{cases}, \quad (15)$$

式中: Δf 为 laser A 和 laser B 重复频率之差。至此,通过对射频信号的处理,对拍频信号中载波相位抖动进行主动有效补偿,仅留下与重复频率差有关的抖动项。接下来,将提取自适应采样时钟信号。将(12)式和(13)式混频得到信号 S_3 ,频率为 10 MHz,可表示为

$$S_3 = S_1 - S_2 = (m_2 - m_1) \times f_B - (n_2 - n_1) \times f_A + f_{5M}, \quad (16)$$

式中: f_{5M} 为固定频率偏置。将(16)式消除频率偏置项后,进行 16 倍频,最终得到 S_{A2} ,其射频值为 80 MHz。合(2)式, S_{A2} 可表示为

$$S_{A2} = 16 \times n_0 \times \Delta f. \quad (17)$$

用 S_{A2} 对拍频信号 S_6 采样,结合采样定理,经简化整理拍频信号可表示为

$$\begin{cases} S'_{6_beat1} = (2 \times n_0 + k) \times f_0 / (16 \times n_0) \\ S'_{6_beat2} = (2 \times n_0 + k + 1) \times f_0 / (16 \times n_0) \\ \vdots \\ S'_{6_beat(N+1)} = (2 \times n_0 + k + N) \times f_0 / (16 \times n_0) \end{cases}, \quad (18)$$

式中: n_0, k, N, f_0 均为常量。可见各频率成分中不存在抖动量,即采样得到的结果可恢复为稳定频谱信息。在自适应补偿技术分析过程中,通过对光谱拍频信号的主动射频信号处理补偿,有效抑制了双光梳系统带宽内的梳齿漂移对光谱信号的影响,较好地解决了梳齿快漂带来的抖动变化问题。然而,射频处理模块的带宽仅为 4 MHz,因此,双光梳梳

齿的慢漂限制了系统长期工作的稳定性,实验采取了有效措施以提高慢漂引起的稳定性。

3 实验结果和分析

自适应补偿方法虽然可有效补偿自由运转飞秒激光器光梳的快漂抖动,但自适应补偿信号 S_{A1} 和 S_{A2} 的射频信号因受两方面因素的影响始终存在慢漂。一是来自连续激光器中心光频率的慢漂;二是来自自由运行光梳振荡器输出脉冲梳齿的慢漂。根据连续激光器产品特性,其正常工作时光频慢漂量在 MHz/h 量级,相对于光梳振荡器梳齿的慢漂可以忽略。自由运行光梳振荡器输出脉冲梳齿的频率慢漂主要来自抽运功率和环境温度的变化。对光梳振荡源的泵光进行恒流恒温控制,光功率的抖动限制在 1%,其对应引入的梳齿慢漂影响也可以忽略。实验中对重复频率锁定,排除了因重复频率方面抖动引入的梳齿慢漂。当环境温度变化时, f_{ceo} 会随环境温度变化而发生慢漂,成为射频信号慢漂的唯一主要来源。通过反馈控制连续激光器中心波长的方法补偿 f_{ceo} 慢漂带来的影响,以使连续激光器跟随光梳梳齿来维持相应射频信号在处理电路带宽内稳定输出自适应补偿信号,从而间接地从源头抑制了梳齿的慢漂。

为减弱梳齿的慢漂特性,采用压电陶瓷精调及步进电机粗调相结合的方式实现对重复频率慢漂的长期稳定控制。通过对压电陶瓷精调及步进电机粗调,将两台脉冲激光器的重复频率 f_A 和 f_B 分别锁定在 66.140000 MHz 和 66.140180 MHz,重复频率差为 180 Hz。两台脉冲振荡器的重复频率锁定情况如图 4(a)所示,均方差皆为 7 mHz 左右。毛刺部分是由电机在粗补偿时引入的扰动造成的。尽管如此,重复频率的最大变化量仍不超过 80 mHz,相应的梳齿抖动量远小于 1 MHz,满足自适应补偿系统带宽需求。此外,还反馈控制了连续激光器电压,改变其中心光频位置,从而补偿 f_{ceo} 的慢漂,这在一定程度上延长了系统稳定工作时间。图 4(b)为连续激光器中心光频与控制电压的关系,频率随电压的变化率达 100 MHz/V。对系统中连续激光器的中心频率反馈后,系统可持续正常工作,图 4(c)展示了半小时内连续激光器和脉冲激光器的 4 个拍频信号稳定情况。由图可知,系统的稳定运行时间由初始的几分钟提升到半小时以上,提高了系统实用性。当环境温度变化引起 f_{ceo} 变化较大时, f_{ceo} 变化量超出连续激光器的反馈能力或者拍频信号 S_{64B} 超出滤

波器带宽范围,对系统工作状态造成了影响。因此,若引入环境温度稳定控制系统,可增强连续激光器反馈能力,有望进一步延长系统稳定运行时间。

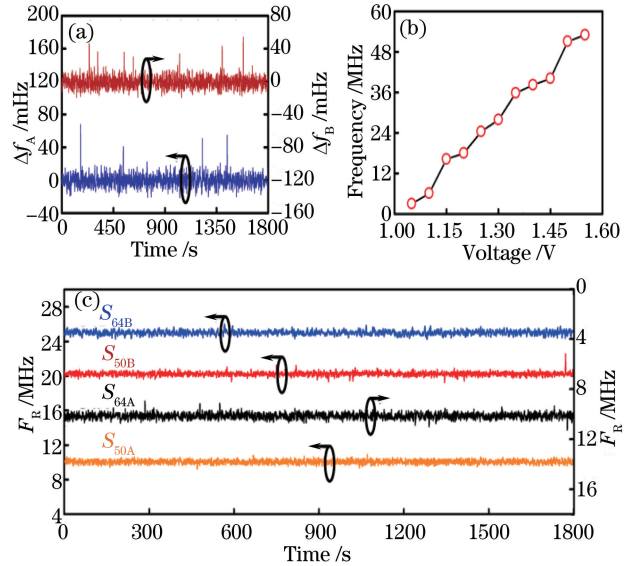


图 4 光梳梳齿慢漂。(a)光梳重复频率锁定情况;(b)连续激光器中心光频与控制电压的关系;(c)拍频信号稳定情况

Fig. 4 Slow drifts of comb line. (a) Stabilization of repetition rates; (b) central frequency shift of the CW laser versus the control voltage; (c) beat frequency signal stability

将光谱信号的采样时钟设定为 80 MHz,采样点数为 48000。图 5(a)为光谱拍频信号单次采样结果,采样时间为 $600 \mu\text{s}$ 。从时域上看,信号包络主要集中在 $290 \sim 330 \mu\text{s}$ 。取 1000 组图 5(a)中时域信号经 FFT 处理并平均后可得到图 5(b)所示的 C_2H_2 透射谱,时域信号采样总时间为 3 s,平均后频域信号信噪比达 350。HITRAN 数据库中 C_2H_2 在 $6498 \sim 6550 \text{ cm}^{-1}$ 的透过谱如图 5(c)中红色谱线所示,实验中 C_2H_2 在该范围内的透射谱如图 5(c)中蓝色谱线所示,通过实验和 HITRAN 数据库中 C_2H_2 在 $\nu_1 + \nu_3$ 吸收带 P(4)~P(22)的吸收情况作对比, C_2H_2 吸收峰的位置和细节信息与 HITRAN 数据库相吻合,验证了自适应双光梳实验原理的准确性。

实验对自适应采样相比于固定时钟采样的优越性作了验证,图 6 中蓝色谱线为单次采样光谱信息,红色谱线为 1000 组采样信息的平均。采用固定时钟对自由运转激光器的原始光谱拍频信号采样如图 6(a)所示,可见在固定采样频率下,信号频率存在抖动。经过平均处理后, C_2H_2 吸收频谱信息几乎全部丢失。当采用自适应补偿方法采样时,如图 6(b)所示,平均后信噪比达 350,且完整保留了原

始光谱信息,可见采用自适应双光梳的方法可以实现对变化光谱信号采样的目的。

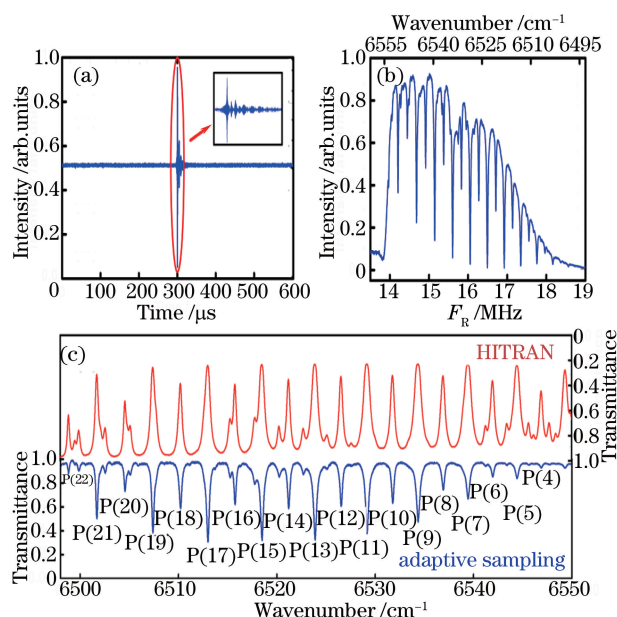


图 5 (a)时域采样信号,插图为局部放大图;(b)时域信号 FFT 处理;(c)实验中 C_2H_2 透射谱和 HITRAN 数据库对比

Fig. 5 (a) Time domain sampling signal, the illustration is a partial magnification; (b) time domain signal FFT processing; (c) comparison of acetylene transmission spectrum and HITRAN database in experiment

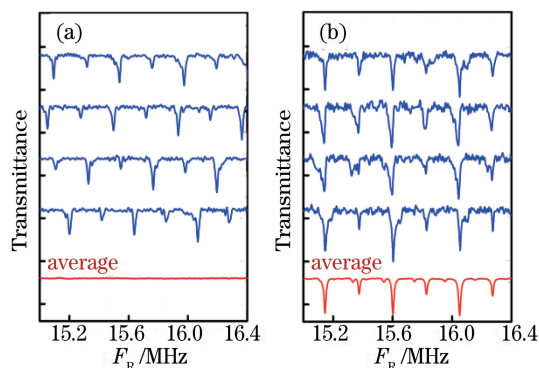


图 6 (a) 固定采样时钟下光谱信号;

(b) 自适应时钟下光谱信号

Fig. 6 (a) Signals sampled with fixed clock;

(b) signals sampled with adaptive clock

4 结 论

详细阐述了以采样定理为基础的自适应双光梳光谱测量系统的工作机理及实现方法,同时测量了 C_2H_2 吸收光谱,单次测量时间为 $600 \mu s$,信噪比为 10。多次测量平均后信噪比可提升至 350,有效降低了测量噪声的影响。该双光梳系统通过自适应技术补偿了光梳梳齿快漂抖动,避免了对重复频率和

载波包络相位同时精密锁定的难题。为解决光梳梳齿慢漂带来的困扰,对双光梳振荡器的重复频率进行了粗锁定,同时还将连续激光器中心光频锁定在拍频信号上,从而维持连续激光器和脉冲激光器的拍频信号稳定在相应滤波器带宽范围之内,保证系统稳定工作。后续还需解决环境温度变化影响双光梳振荡器的问题,可采用全保偏光纤搭建全部光纤链路,这有望进一步提高系统稳定性,实现系统的长期稳定运行。

参 考 文 献

- [1] 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, 尉昊赞, 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.
- [2] 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, 尉昊赞, 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.
- [3] Yi L, Yuan J, Qi X H, *et al.* A diode laser spectrometer at 634 nm and absolute frequency measurements using optical frequency comb[J]. Chinese Physics B, 2009, 18(4): 1409-1412.
- [4] Meng F, Cao S Y, Cai Y, *et al.* Study of the femtosecond fiber comb and absolute optical frequency measurement [J]. Acta Physica Sinica, 2011, 60(10): 125-131.
孟飞, 曹士英, 蔡岳, 等. 光纤飞秒光学频率梳的研制及绝对光学频率测量[J]. 物理学报, 2011, 60(10): 125-131.
- [5] Wang G C, Wei C H, Yan S H. Wavelength selection and non-ambiguity range analysis for optical-comb-referenced multi-wavelength absolute distance measurement[J]. Acta Optica Sinica, 2014, 34(4): 0412002.
王国超, 魏春华, 颜树华. 光梳多波长绝对测距的波长选择及非模糊度量程分析[J]. 光学学报, 2014, 34(4): 0412002.
- [6] Wang G C, Yan S H, Yang J, *et al.* Theoretical modeling analysis for precise space ranging based on cross-correlation of femtosecond optical frequency comb [J]. Acta Optica Sinica, 2015, 35(4): 0412002.
王国超, 颜树华, 杨俊, 等. 基于飞秒光梳互相关的

- 空间精密测距理论模型分析[J]. 光学学报, 2015, 35(4): 0412002.
- [7] Wang G C, Tan L H, Yan S H, *et al.* Synchronous phase demodulation for real-time absolute distance measurement based on optical comb multi-wavelength interferometry[J]. Acta Optica Sinica, 2017, 37(1): 0112003.
王国超, 谭立龙, 颜树华, 等. 基于光梳多波长干涉实时绝对测距的同步相位解调[J]. 光学学报, 2017, 37(1): 0112003.
- [8] 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.
- [9] Wu X J, Wei H Y, Zhang H Y, *et al.* Absolute distance measurement using frequency-sweeping heterodyne interferometer calibrated by an optical frequency comb[J]. Applied Optics, 2013, 52(10): 2042-2048.
- [10] Stenger J, Tamm C, Haverkamp N, *et al.* Absolute frequency measurement of the 435.5-nm 171Yb^{+} -clock transition with a Kerr-lens mode-locked femtosecond laser[J]. Optics Letters, 2001, 26(20): 1589-1591.
- [11] Udem T, Reichert J, Holzwarth R, *et al.* Accurate measurement of large optical frequency differences with a mode-locked laser[J]. Optics Letters, 1999, 24(13): 881-883.
- [12] Ideguchi T, Poisson A, Guelachvili G, *et al.* Adaptive real-time dual-comb spectroscopy[J]. Nature Communications, 2014, 5(2): 3375.
- [13] Scherer J J, Paul J B, O'Keefe A, *et al.* Cavity ringdown laser absorption spectroscopy: history, development, and application to pulsed molecular beams[J]. Chemical Reviews, 1997, 97(1): 25-51.
- [14] Ideguchi T, Poisson A, Guelachvili G, *et al.* Adaptive dual-comb spectroscopy in the green region [J]. Optics Letters, 2012, 37(23): 4847-4849.
- [15] Roy J, Deschênes J D, Potvin S, *et al.* Continuous real-time correction and averaging for frequency comb interferometry[J]. Optics Express, 2012, 20(20): 21932-21939.
- [16] Zhang Z W, Gardiner T, Reid D T. Mid-infrared dual-comb spectroscopy with an optical parametric oscillator[J]. Optics Letters, 2013, 38(16): 3148-3150.
- [17] Schliesser A, Picqué N, Hänsch T W. Mid-infrared frequency combs[J]. Nature Photonics, 2012, 6(7): 440-449.
- [18] Zhu F, Mohamed T, Strohaber J, *et al.* Real-time dual frequency comb spectroscopy in the near infrared [J]. Applied Physics Letters, 2013, 102(12): 121116.
- [19] Yang H L, Wei H Y, Zhang H Y, *et al.* Performance estimation of dual-comb spectroscopy in different frequency-control schemes[J]. Applied Optics, 2016, 55(23): 6321-6330.
- [20] Keilmann F, Gohle C, Holzwarth R. Time-domain mid-infrared frequency-comb spectrometer[J]. Optics Letters, 2004, 29(13): 1542-1544.
- [21] Baumann E, Giorgetta F R, Swann W C, *et al.* Spectroscopy of the methane ν_3 band with an accurate mid-infrared coherent dual-comb spectrometer [J]. Physical Review A. 2011, 84(6): 14717-14719.
- [22] Yan M, Li W X, Yang K W, *et al.* High-power Yb-fiber comb with feed-forward control of nonlinear-polarization-rotation mode-locking and large-mode-area fiber amplification[J]. Optics Letters, 2012, 37(9): 1511-1513.
- [23] Shen X L, Hao Q, Zeng H P. Self-tuning mode-locked fiber lasers based on prior collection of polarization settings[J]. IEEE Photonics Technology Letters, 2017, 29(20): 1719-1722.