

激光与光电子学进展

双光纤光梳同源锁定方法的研究

王杰¹, 刘睿^{1*}, 廖文龙¹, 谢茜¹, 张宗喜¹, 冯运¹, 闫明^{2**}, 曾和平²¹国网四川省电力公司电力科学研究院, 四川 成都 610041;²华东师范大学重庆研究院, 重庆 401121

摘要 针对高分辨双光梳光谱技术对光梳相干性的严苛要求,提出了一种双光梳同源锁频的方法。该方法将两台光纤光梳锁定在一台相位调制连续激光器的两个频率边带上,使双光梳具有相同的光学参考标准,因此无需复杂的相位修正电路和超稳光学腔,可获得高时频相干性,相干时间长达 1 s。经过实验验证,该方法获得了梳齿可分辨的双光梳频谱信号。

关键词 相干; 高分辨光谱; 光纤激光器

中图分类号 O433 **文献标志码** A

doi: 10.3788/LOP202158.2336001

Homologous Locking Method of Dual-Fiber Optical Comb

Wang Jie¹, Liu Rui^{1*}, Liao Wenlong¹, Xie Qian¹, Zhang Zhongxi¹, Feng Yun¹,Yan Ming^{2**}, Zeng Heping²¹Power Science Research Institute of State Grid, Sichuan Electric Power Company, Chengdu, Sichuan 610041, China;²Chongqing Institute of East China Normal University, Chongqing 401121, China

Abstract In order to meet the requirement of high-resolution dual-comb spectroscopy for the mutual coherence of optical combs, a method of dual-comb homologous frequency stabilization is proposed, that is, two optical fiber combs are locked on two frequency sidebands of the same phase modulated continuous wave laser. This method makes the two combs have the same optical reference, so there is no need for complex phase correction circuit and ultra-stable optical cavities. The coherence time is greater than 1 s. After experimental verification, this method obtains the comb-line-resolved dual-comb spectrum signal.

Key words coherence; high-resolution spectroscopy; fiber laser

OCIS codes 030.1640; 300.6320; 060.3510

高分辨光谱测量技术在分子光谱物理、化学分析、气体遥感等领域发挥着重要作用^[1]。光学频率梳(即光梳)的诞生引发了光谱测量领域的技术革命。光梳是由大量等间距散分布在宽带光谱范围内的光学频率纵模(梳齿)组成。频域上,第 n 根梳齿的频率可以表示为 $f_0 + n \cdot f_r$, 其中 f_0 为光梳的

起始频率,即载波包络零频, f_r 为梳齿间距,即光梳脉冲的重复频率。双光梳光谱技术(DCS)利用两台梳齿间距相差微小量 Δf 的异步光梳在一个高速光电探测器上进行拍频,产生了一组射频梳,其第 n 根齿的频率可以相应地表示为 $|f_{01} - f_{02}| + n \cdot \Delta f$, 其中下标 1 和 2 用于区别两台光梳。射频梳的强度与

收稿日期: 2021-10-11; 修回日期: 2021-10-13; 录用日期: 2021-10-25

基金项目: 国家电网有限公司科技项目(52199920002S)

通信作者: *450913517@qq.com; **myan@lps.ecnu.edu.cn

相位由两台光梳的光场和探测器的响应曲线决定,并且可以通过成熟的射频设备进行精确测量。

作为一种基于光场干涉效应的宽带傅里叶变换光谱技术,DCS无需光学色散或机械扫描,便可实现光频率成分的拾取,兼具了测量时间短、光谱宽、分辨率高及精度高的优势。2004年,Keilmann等^[2]首次提出了这一技术,实现了快速(100 μ s)宽带红外光谱测量。随后该技术在分子光谱^[3]和大气遥感^[4]等诸多领域展现了其不可替代的技术优势。然而,DCS对两台光梳之间的相对相干性要求极高^[1],通常要求两台光梳梳齿间的频率抖动 δf 远小于重复频率差 Δf (Δf 一般取值在1 kHz以内)。这对光纤光梳是个技术挑战。光纤光梳具有集成便携、操作方便,且成本低廉等优势,但光纤容易受环境扰动和噪声影响。在传统方案中,光纤光梳的 f_0 和 f_r 锁定在射频源上。受限于射频信号的稳定度,传统方法无法满足DCS测量的要求。2008年,Coddington等^[5]将异步光梳锁定在两台光学腔稳频的连续波(CW)激光器上,首次实现了梳齿可分辨的DCS。为了避免复杂的光学系统,2014年Ideguchi等^[6]提出了自适应方案,将光梳与两台窄线宽CW激光器之间的相位提取后,通过电学相位补偿与修正的方式实现了梳齿可分辨的光谱测量。但该方法依赖于复杂的电路设计,对CW激光器的稳定性要求高,且不适用于绝对频率的测量。2018年,Chen等^[7]提出了前馈式DCS方案,利用声光频移器(AOFS)对噪声的宽带抑制作用,将DCS的相干时间推进至1000 s。但AOFS会引入空间色散效应,影响光束的空间质量,由此限制了其在遥感等领域的应用^[4]。更值得一提的是,现有的宽谱DCS技术为了获得秒量级以上的相干时间^[4,8],通常需要两台稳频CW激光器作为两个控制维度的频率参考。稳频CW激光器对环境扰动敏感,且价格高昂,因此降低了DCS系统的实用性。

本文提出一种同源的异步光纤光梳稳频方法。其原理如图1(a)所示。同样将一台光纤光梳的两根梳齿[图1(a)中第 m 与 n 根梳齿($m > n$)]锁定在两束CW激光上(CW1与CW2);不同的是,这两束CW光取自同一台参考光源[图1(b)],因此具有极佳的时频相干性。图1(c)为实验装置示意图。实验利用一个电光调制器(EOM)对一束种子激光(CW seed)进行相位调制,产生了一系列频率间隔为25 GHz的边带。通过两个光纤光栅滤波器

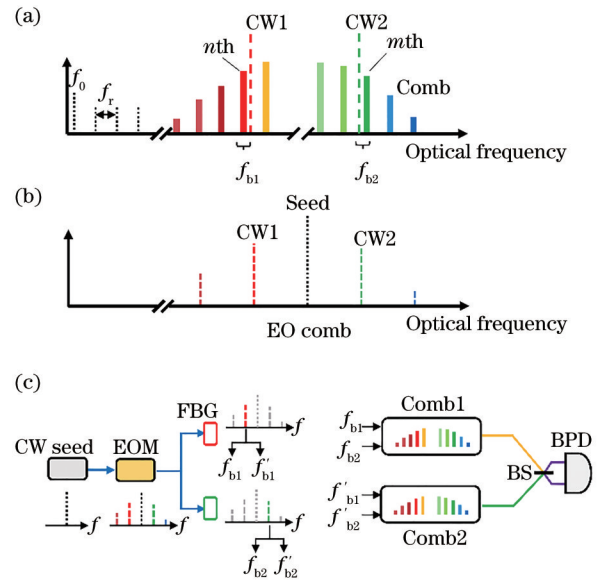


图1 同源异步光纤光梳稳频方法。(a)光学频率梳示意图;(b)电光调制CW激光器产生边带谱;(c)实验装置图
Fig. 1 Frequency stabilization method of homologous asynchronous fiber optical comb. (a) Diagram of optical frequency comb; (b) sidebands generated by electro-optical modulation of a CW laser; (c) experimental scheme

(FBG,带宽10 GHz,约0.1 nm)选取了波长分别为1565 nm和1545 nm的两根调制边带,即图2(a)中CW1和CW2。光梳1(光梳2)与两束CW光的拍频信号分别为 f_{b1} 和 f_{b2} (f'_{b1} 和 f'_{b2})。前者被用于反馈控制光梳的泵浦光功率,后者则被用于控制光梳腔长。由此,两台光梳被锁定在了同一台种子光源上,且保持了良好的相对相干性。该种子光的线宽仅为0.1 kHz(E15, NKT photonics, 丹麦),秒稳定度优于 10^{-11} ,因此可用于分子谱线绝对频率的测量。

图2(b)为两台光梳的光谱(点线表示光梳1,实线为光梳2)。光梳的参数为: $f_{r1}=100.3$ MHz, $f_{r2}=f_{r1}+\Delta f$,其中 $\Delta f=50$ Hz, $f_{o1}=f_{o2}=10$ MHz。在对比实验中,按传统方式,将每台光梳各自的 f_0 和 f_r 锁定在一个10 MHz的铷钟源上(秒稳定度为 10^{-10}),并进行了DCS测量。测量中[图1(c)],两台光梳经过50/50合束器(BS)后合束,再由一个平衡探测器(BPD)进行探测。图3(a)为单次测量结果,频谱分辨率(RBW)为10 kHz,测量时间约为0.1 ms。图中18 MHz附近的包络即为DCS拍频信号,对应于图2(b)中两光梳光谱的重叠区域。图3(b)为测量时间1 ms,频谱分辨率为1 kHz的测量结果。图3(b)中

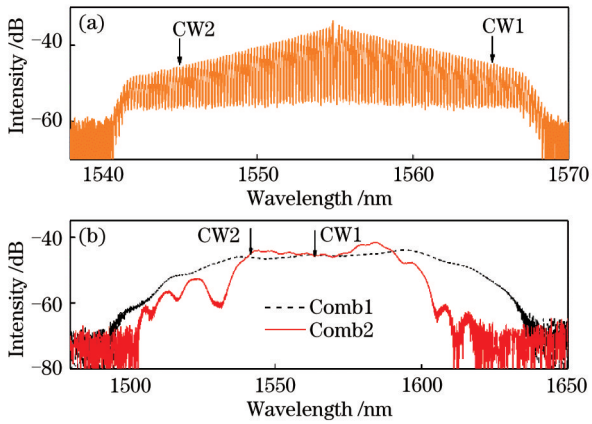


图2 实验结果。(a)电光调制光源光谱图;(b)光纤光梳输出光谱

Fig. 2 Experimental results. (a) Spectrum of electro-optical modulated light source; (b) output spectra of fiber combs

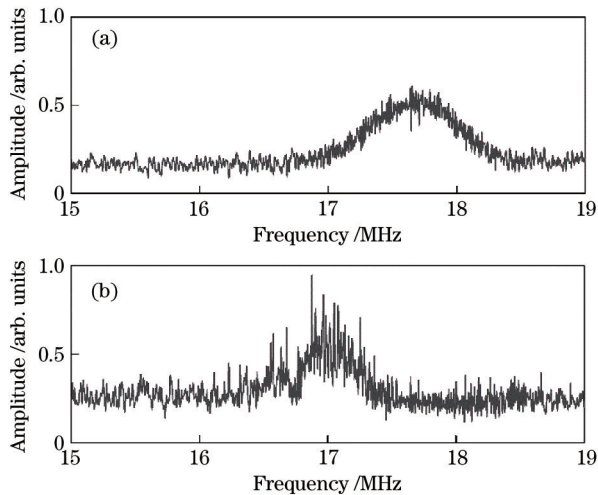


图3 传统方式锁定的双光梳拍频测量结果。(a)频谱分辨率 10 kHz;(b) 频谱分辨率 1 kHz

Fig. 3 Beat frequency measurement results of dual-comb locked in traditional way. (a) Frequency resolution of 10 kHz; (b) frequency resolution of 1 kHz.

频谱出现了个别齿状信号,但信噪比差,且包络中心对比图3(a)出现了频移。其原因是两台光梳间相对的 f_0 和 f_r 存在较大不确定性和频率漂移量,反映出传统锁频方式下异步光梳间的相干性差。

图4为同源稳频的双光梳拍频测量结果。测量时间为1.7 s,频谱分辨率为1 Hz。图4(a)展现了稳定的DCS频谱,其全谱宽度为4.5 MHz,对应光谱宽度为9 THz(转换系数 $f_{r1}/\Delta f=2\times 10^6$)^[7]或73.2 nm(中心波长为1560 nm),与光谱仪结果[图2(b)]一致。图中20.3 MHz附近的尖峰源自数据采集卡(采样频率为80 MS/s)对光梳重复频率信

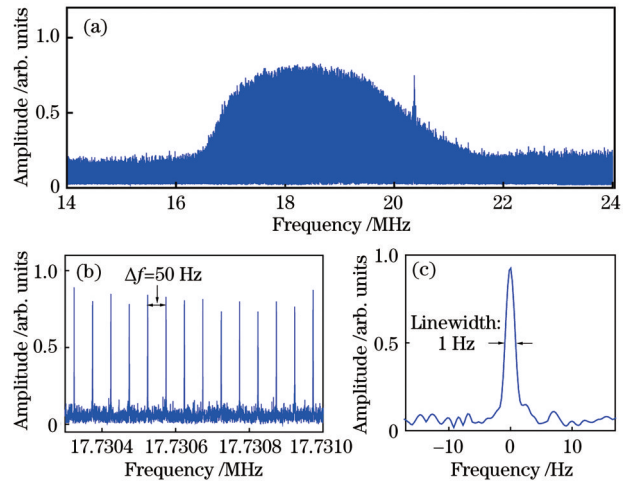


图4 同源稳频的双光梳拍频测量结果。(a)同源锁定后的双光梳频谱;(b)局部放大图;(c)单根拍频梳齿

Fig. 4 Homologous frequency stabilized dual-comb beat frequency measurement results. (a) Dual-comb spectrum after homologous locking; (b) partial enlarged view; (c) single beat frequency comb line

号采样过程中的混叠误差^[6]。图4(b)为局部放大结果,其中独立分布的拍频梳齿清晰可见。图4(c)给出了单根拍频梳齿的细节,其线宽为1 Hz,达到了时频傅里叶极限^[6],说明双光梳相干时间超过1 s,较图3结果提升了3个量级,证明了同源稳频方法的有效性。

本文方法仅利用一台窄线宽CW激光器作为频率参考实现了双光梳相对频率与相位的锁定,且无需复杂的相位修正电路或超稳光学腔,因此具有系统相对简单、操作便捷等优势。本课题组下一步将在该系统基础上,开展宽谱带、高分辨分子光谱技术的应用研究,包括其在电力设备运行安全与故障特征气体的多组分检测中的应用等。

参 考 文 献

- [1] Weichman M L, Changala P B, Ye J, et al. Broadband molecular spectroscopy with optical frequency combs[J]. Journal of Molecular Spectroscopy, 2019, 355: 66-78.
- [2] Keilmann F, Gohle C, Holzwarth R. Time-domain mid-infrared frequency-comb spectrometer[J]. Optics Letters, 2004, 29(13): 1542-1544.
- [3] Baumann E, Giorgetta F R, Swann W C, et al. Spectroscopy of the methane ν_3 band with an accurate midinfrared coherent dual-comb spectrometer[J]. Physical Review A, 2011, 84(6): 062513.
- [4] Giorgetta F R, Peischl J, Herman D I, et al. Open-path dual-comb spectroscopy for multispecies trace

- gas detection in the 4.5–5 μm spectral region[J]. *Laser & Photonics Reviews*, 2021, 15(9): 2000583.
- [5] Coddington I, Swann W C, Newbury N R. Coherent multiheterodyne spectroscopy using stabilized optical frequency combs[J]. *Physical Review Letters*, 2008, 100(1): 013902.
- [6] Ideguchi T, Poisson A, Guelachvili G, et al. Adaptive real-time dual-comb spectroscopy[J]. *Nature Communications*, 2014, 5: 3375.
- [7] Chen Z, Yan M, Hänsch T W, et al. A phase-stable dual-comb interferometer[J]. *Nature Communications*, 2018, 9(1): 3035.
- [8] Chen Z, Hänsch T W, Picqué N. Mid-infrared feed-forward dual-comb spectroscopy[J]. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, 2019, 116(9): 3454-3459.