

文章编号: 1005-5630(2021)01-0076-06

DOI: 10.3969/j.issn.1005-5630.2021.01.012

# 光纤光梳温度反馈控制方法研究

程朝亮<sup>1</sup>, 沈旭玲<sup>2</sup>, 郝强<sup>1</sup>

(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)

**摘要:** 为了解决光学频率梳长时锁定困难的问题, 对光学频率梳重复频率( $f_r$ )与载波相位偏移频率( $f_0$ )的控制方法进行了改进。采用上、下两块半导体制冷片(TEC)对振荡器局部环境进行温度控制, 并微调 TEC 温度将  $f_r$  与  $f_0$  漂移量分别稳定在 10 Hz 和 600 Hz 以内。利用锁相电路反馈控制有效腔长和泵浦光功率对  $f_r$  与  $f_0$  进行了精密锁定。光学频率梳在 170 h 时间内连续锁定,  $f_r$  与  $f_0$  抖动标准偏差分别为 0.83 MHz 和 280 MHz。结果表明, 该方法可以实现光学频率梳的长时锁定, 增强其环境适应能力。

**关键词:** 非线性偏振旋转; 光纤激光器; 载波包络偏移频率; 光学频率梳; 温度控制  
**中图分类号:** TN 249 **文献标志码:** A

## Study on temperature feedback method of optical frequency comb

CHENG Chaoliang<sup>1</sup>, SHEN Xuling<sup>2</sup>, HAO Qiang<sup>1</sup>

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

2. State Key Laboratory of Precision Spectroscopy, East China Normal University, Shanghai 200062, China)

**Abstract:** In order to solve the problem of long-time operation of a fiber-based frequency comb, the control method of locking the repetition rate ( $f_r$ ) and carrier envelope phase offset frequency ( $f_0$ ) of optical frequency comb is improved. Two thermo-electric coolers (TEC), an upper one and an lower one, are used to control the temperature of frequency comb. By adjusting the TEC temperature, the stability of  $f_r$  and  $f_0$  can be confined in the range of 10 and 600 Hz, respectively. Then,  $f_r$  and  $f_0$  were further stabilized by the feed-back control of the optical path and the pump power, respectively. Finally, in 170-hour operation, the standard deviations of  $f_r$  and  $f_0$  were measured as 0.83 and 280 mHz, respectively. The results show that the method can realize the long-term operation of the optical frequency comb and enhance its adaptability to the environment.

**Keywords:** nonlinear polarization rotation; fiber laser; carrier envelope offset frequency; optical frequency comb; temperature control

收稿日期: 2020-05-15

基金项目: 国家重点研发计划(No.2018YFB0407100)

作者简介: 程朝亮(1993—), 男, 硕士研究生, 研究方向为光学频率梳。E-mail: 173740568@st.usst.edu.cn

通信作者: 郝强(1981—), 男, 副教授, 研究方向为超快激光技术。E-mail: 173740568@st.usst.edu.cn

## 引 言

自 1978 年 Hänsch 教授提出光学频率梳(简称“光梳”)概念后<sup>[1]</sup>, 光梳已经取得了巨大的发展。光梳是基于超短脉冲锁模激光器产生的, 其输出脉冲在时域上是等间隔、等振幅的超短脉冲序列, 在频域上是等间隔的梳齿线。相邻梳齿线之间的频率间隔为  $f_r$ , 梳齿整体相对于零频偏移为  $f_0$ , 第  $m$  个光学频率齿满足  $f_m = m \times f_r + f_0$ , 其中  $m$  为梳齿序数。光梳作为连接微波频率与光波频率的桥梁, 相比复杂的微波频率链, 具有结构简单、操作方便的特点。目前, 光梳系统在高分辨率光谱分析、天文光谱校准、精密测距、光钟等<sup>[2-6]</sup> 前沿科学研究中产生了重大影响。

科研人员基于多种不同类型的锁模激光器已经开发出光梳系统。2000 年, Hall 首次实现了钛宝石光梳<sup>[7]</sup>, 但钛宝石光梳存在体积大、结构复杂、不便于移动以及抗环境干扰能力差等缺点。随着超短脉冲技术的发展和光纤制造工艺的进步, 光纤光梳凭借其体积小, 结构简单, 稳定性高等优势, 逐渐成为科研人员替代钛宝石光梳的选择。2004 年, 美国国家标准与技术研究院(NIST)的 Washburn 等首次实现了重复频率和载波包络相位锁定的光纤光梳, 在锁定后重复频率相位噪声小于 1 mrad, 载波包络相位的抖动小于 10 MHz<sup>[8]</sup>。2014 年, NIST 的 Sinclair 等演示了基于半导体可饱和吸收镜锁模的光纤光梳系统, 该系统可以在运动的汽车和振动台上稳定运行<sup>[9]</sup>。2016 年, Kuse 等利用非线性放大环形镜

锁模实现了光纤光梳, 载波包络偏移频率相位噪声低至  $0.2 \text{ rad}^{[10]}$ 。为了实现光纤光梳的长时锁定, 国内多个研究小组采取了不同的方案。2012 年, 曹士英等通过对激光器底板进行严格温控, 实现了光梳 20 h 的连续锁定<sup>[11]</sup>。2015 年, 张颜艳等通过在非线性偏振旋转锁模的振荡器中加入电光调制器(EOM)和压电陶瓷(PZT), 在 3 kHz 的锁定范围内实现重复频率锁定时间超过一周, 但是, 载波包络相位的锁定能力仍需优化<sup>[12]</sup>。

本文设计了基于非线性偏振旋转(NPR)锁模振荡器的光纤光梳。通过两块半导体制冷器(TEC)对光纤振荡器的温度精细控制, 提高了光梳抗环境干扰的能力。通过锁相电路与温控电路的结合, 实现了  $f_r$  与  $f_0$  在 170 h 内的连续锁定, 抖动标准偏差分别为 0.83 MHz 和 280 MHz。

## 1 光学频率梳结构设计

光纤光梳的结构如图 1 所示。主要由振荡器、超短脉冲放大器、脉宽压缩器、光谱展宽器、 $f-2f$ 拍频装置、锁相电路以及温控系统组成。光梳的实现需要将锁模激光器的  $f_r$  与  $f_0$  精密锁定, 由光纤振荡器产生的脉冲光经 CP2 分为两路, 一路进入 PD1 产生  $f_r$  信号, 另外一路输出的超短脉冲放大压缩后, 注入高非线性光纤进行光谱扩展, 得到具有倍频程的超连续谱后, 通过  $f-2f$  装置便能够获得  $f_0$  信号。 $f_r$  的控制主要是通过 PZT 改变腔长实现的, 该方案具有成本低、操作简单的优点。 $f_0$  的控制主要是通过调节泵浦光实现的。锁模振荡器和超短脉冲放大器为

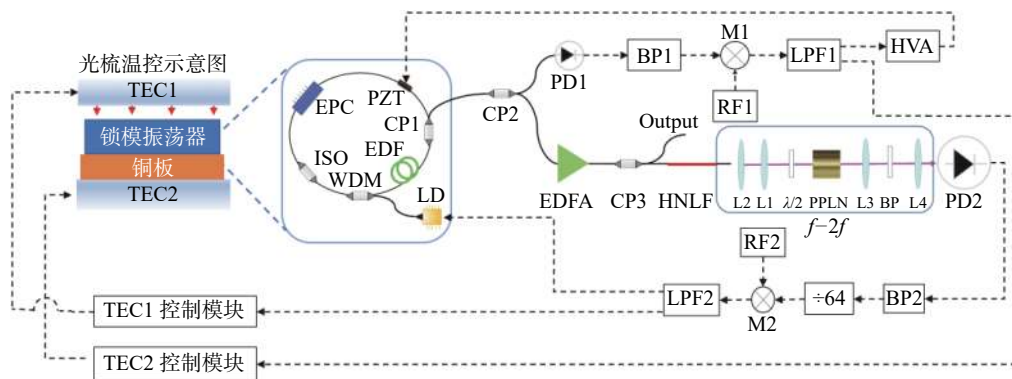


图 1 掺铒光纤光学频率梳结构

Fig. 1 Schematic of Er-doped fiber optical frequency comb

全光纤结构,具有较高的稳定性和抗环境干扰能力。采用的共线型  $f$ - $2f$  装置可以确保基频光与倍频光在空间上始终重合,显著提高了  $f_0$  信号的强度和信噪比。

搭建了基于 NPR 锁模的振荡器,其中包括 976 nm 的半导体激光器(LD)、波分复用器(WDM)、掺铒光纤(EDF)、10% 输出的光纤耦合器(CP1)、电控偏振控制器(EPC)以及偏振相关的隔离器(ISO)。976 nm 的泵浦光由波分复用器耦合进入腔内长度为 50 cm 的增益光纤(EDF-80, OFS),该增益光纤在 1530 nm 处的吸收系数为 80 dB/m,色散参量为  $-48 \text{ ps}/(\text{nm}\cdot\text{km})$ 。电控偏振控制器(MPC-3X, General Photonics)可以通过调节三个轴上的电压控制腔内脉冲偏振态的演化。偏振相关隔离器用于保证脉冲单向传输,同时起到检偏器的作用。当泵光功率超过 80 mW 时,将电控偏振控制器三个轴上的电压调节为 16 V、25 V 和 0 V,可实现稳定的锁模脉冲序列。激光器的重复频率为 102.3 MHz,且光纤耦合器 CP1 输出种子光的平均功率为 2.8 mW、中心波长为 1565 nm。

为了提高光梳系统的可集成性,实验上设计了全保偏光纤链路的光功率放大、脉冲压缩和光谱展宽系统。从振荡器出来的种子光经过光纤分束器 CP2(分束比 10:90)分成两路,10% 端为重复频率监测端,90% 端作为种子光进入光功率放大器 EDFA。种子光经过 EDFA 后平均功率提升至 180 mW。放大后的脉冲由光纤分束器 CP3(分束比 10:90)分为两路:10% 端为应用端,平均功率为 17 mW;90% 端经过脉冲压缩、光谱展宽得到超连续谱。脉宽压缩后采用自相关仪(APE, PulseCheck)对脉宽进行测量,脉宽被压缩为 76 fs。光谱展宽用的高非线性光纤为椭圆纤芯,其非线性系数为  $10.5 \text{ W}^{-1}\cdot\text{km}^{-1}$ ,在 1550 nm 处的色散为  $-2.4 \text{ fs}^2/\text{mm}$ 。展宽后光谱范围 1000~2200 nm。

超连续谱进入共线型  $f$ - $2f$  装置,通过拍频获得  $f_0$  信号。超连续谱通过一个准直透镜 L1 和聚焦透镜 L2 后耦合进入周期极化铌酸锂晶体(PPLN)。为了提高 PPLN 晶体的倍频效率,在聚焦透镜后加入半波片来调节光束的偏振态。超连续谱中 2094 nm 附近的光在 PPLN 晶体中倍

频成 1047 nm,该激光与原有的 1047 nm 部分共线通过窄带滤波片 BP。最后,耦合进入光电探测器 PD2 获取  $f_0$  信号。

对于  $f_r$  的锁定,光电探测器 PD1 探测到的  $f_r$  信号经过带通滤波器 BP1 后进入混频器 M1,与频率为 1.023 GHz 的参考信号 RF1 进行混频,由低通滤波器 LPF1 滤出误差信号,经过高压放大器 HVA 后驱动 PZT,利用 PZT 控制振荡器腔长实现对  $f_r$  的锁定<sup>[13]</sup>。对于  $f_0$  的锁定,光电探测器 PD2 探测到的  $f_0$  信号由带通滤波器 BP2 滤出,先进行 64 分频,再将分频后的信号与 2 MHz 的标准信号 RF2 进行混频,并由低通滤波器 LFP2 滤出误差信号,最后,通过误差信号反馈调节腔内泵浦源功率,实现对  $f_0$  的精密锁定。其中,RF2 与 RF1 参考在同一台铷钟上。

锁模激光器在自由运转状态下,  $f_r$  与  $f_0$  的慢漂主要来自振荡器泵浦光功率波动和环境温度变化。对于环形腔结构的锁模激光器重复频率可以表示为:  $f_r=c/nL$ ,其中  $c$  为光速,  $n$  为振荡器介质的折射率,  $L$  为腔长。可以看出  $f_r$  大小取决于腔长  $L$  和腔内介质折射率  $n$ 。泵浦光变化会改变光纤中的反转粒子数,进而改变该光纤的非线性折射率,从而影响  $f_r$ ; 光纤的折射率和长度都受到温度的影响,而光纤(二氧化硅)的热膨胀系数为  $5.5\times 10^{-7}/^\circ\text{C}$ ,折射率温度系数为  $8.11\times 10^{-6}/^\circ\text{C}$ <sup>[14]</sup>,计算可以得到实验中振荡器的重频温度系数约为  $-860 \text{ Hz}/^\circ\text{C}$ ,其中,光纤折射率  $n$  的变化是引起  $f_r$  变化的主要因素。 $f_0$  是脉冲的载波包络相位在频域上的表现,可以表示为  $f_0=(\Delta\phi/2\pi)\times f_r$ ,其中  $\Delta\phi$  为载波包络相位,其漂移来源于激光振荡器中群速度与相速度的不同。泵浦光功率和环境温度变化会导致光纤群速度与相速度的不同,从而影响  $f_0$  信号频率。

通过对泵浦光进行恒流恒温控制,泵浦光功率的抖动限制在 0.1% 以内。为了抑制由于环境温度变化引起的梳齿漂动,系统对振荡器采取严格的温控措施,并微调 TEC 温度来补偿  $f_r$  与  $f_0$  的慢漂。温控系统中包含两块独立工作 TEC,其控制精度达到了  $0.02 \text{ }^\circ\text{C}$ 。振荡器光纤与一块薄铜片紧密贴合,再将该铜片放置于 TEC2 上。铜片良好的导热效果可以抑制增益光纤等发热区造成的局部热量不均匀现象。TEC1 用来控制振

荡器上方空气温度。TEC 的反馈控制信号由锁相电路提供。其中,  $f_0$  与参考信号 RF2 的误差信号用于控制 TEC1,  $f_r$  与参考信号 RF1 的误差信号用于控制 TEC2。

## 2 测试结果与讨论

### 2.1 长期稳定运转的实现

为了实现  $f_r$  与  $f_0$  的初步稳定, 测试了  $f_r$ 、 $f_0$  与 TEC1、TEC2 温度的关系, 以及  $f_r$  与  $f_0$  在温控系统中的自由漂移情况。通过分析这些数据明确了利用反馈 TEC 温度稳定  $f_r$  与  $f_0$  的机制, 最后通过反馈 TEC 温度实现  $f_r$  与  $f_0$  的初步稳定。

通过将 1 个 TEC 的温度设置为恒温 23 °C, 调节另一个 TEC 的温度, 测得了  $f_r$  与  $f_0$  两个频率与被调节 TEC 温度的变化关系。图 2(a) 中的蓝色曲线为  $f_r$  与 TEC1、TEC2 温度的关系, 红色曲线为  $f_0$  与 TEC1、TEC2 温度的关系。可以

看出,  $f_r$  与  $f_0$  随着 TEC 温度升高均表现为线性降低。相比于 TEC2, TEC1 对  $f_r$  与  $f_0$  的影响相对较弱。当 TEC1 的温度从 18 °C 增加到 25 °C 时,  $f_r$  与  $f_0$  分别降低了 67 Hz 和 24.25 MHz; 而 TEC2 从 22.5 °C 增加到 23.5 °C 时,  $f_r$  与  $f_0$  分别降低了 917 Hz 和 39 MHz。主要原因在于振荡器光路是通过薄铜片直接贴合于 TEC2 上, 而振荡器光路与 TEC1 未直接接触, 是通过空气热传导进行温度控制。此外, 对于  $f_0$  信号来说, 通过反馈 TEC1 可以实现更为精细的调节; 对于  $f_r$  信号来说, 通过反馈 TEC2 可以实现更大范围的调节。 $f_r$  与  $f_0$  自由漂移的情况如图 2(b) 中的红色曲线所示, 在监测的 36 h 内  $f_r$  与  $f_0$  漂移范围分别 60 Hz 和 3 MHz。图 2(b) 中的黑色曲线显示了振荡器在自由运转状态下, 对 TEC1 与 TEC2 进行反馈控制后,  $f_r$  与  $f_0$  信号频率漂移情况。在 36 h 时间内,  $f_r$  与  $f_0$  漂移范围始终分别被控制在  $\pm 5$  Hz 和  $\pm 300$  kHz 范围内。

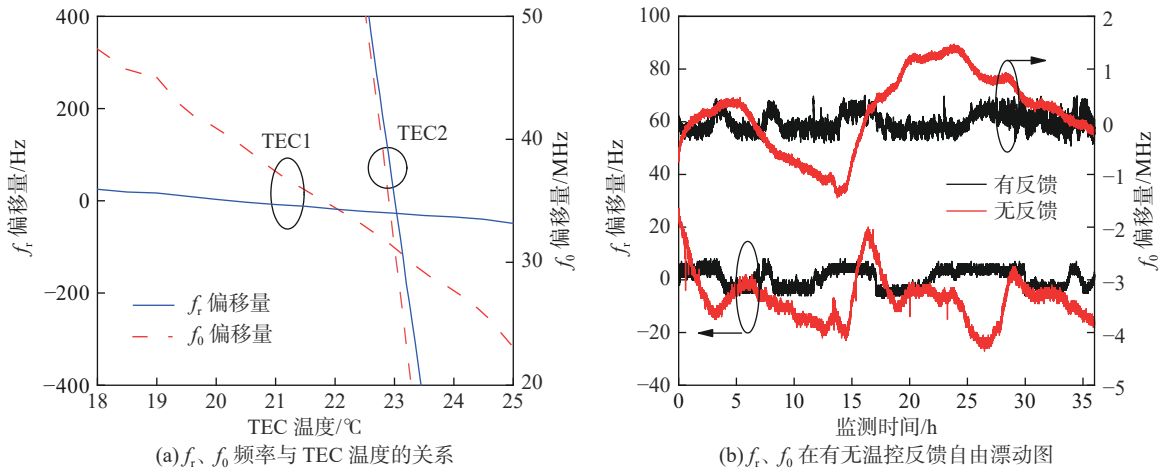


图 2  $f_r$  与  $f_0$  变化曲线

Fig. 2 The change of  $f_r$  and  $f_0$

### 2.2 重复频率与载波包络相位偏移频率的锁定

实验采用高带宽的 PZT 对  $f_r$  进行锁定。带宽更高的 PZT 锁定范围小, 但是其可以响应高频信号。在这里已经利用温控系统对  $f_r$  进行了初步的稳定,  $f_r$  的自由漂移范围被限制在 10 Hz 以内, 不需要使用锁定范围大的 PZT。采用的高带宽 PZT 最大伸缩量为 7  $\mu\text{m}$ 、谐振频率 150 kHz。通过锁相电路和温控系统的配合, 实现了在 170 h

时间内, 重复频率连续锁定, 锁定结果如图 3 所示。图 3(a) 是  $f_r$  锁定后的频率漂移情况, 采用频率计数器 (Tektronix, FCA3103) 对频率进行监测, 其对时间测量可以达到 50 ps 的单个分辨率。 $f_r$  抖动始终保持在 15 MHz 以内, 标准偏差为 0.83 MHz, 没有出现大的抖动, 这是因为使用了高带宽的 PZT 锁定  $f_r$ , 其快速的响应时间可以很好地抑制外界干扰。图 3(b) 是相应的

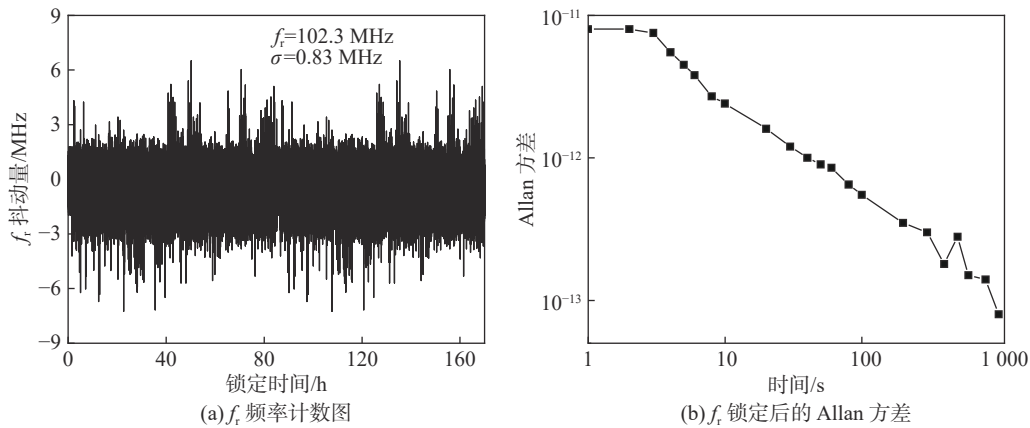


图 3  $f_r$  锁定结果

Fig. 3 Locking result of  $f_r$

Allan 方差, 可以看出, 在 1, 10, 1000 s 的采样时间下 Allan 方差分别为  $8 \times 10^{-12}$ ,  $2 \times 10^{-12}$  和  $9 \times 10^{-14}$ 。

通过  $f-2f$  拍频系统得到自由运转状态下的  $f_0$  信号, 采用频谱分析仪 (Agilent Technologies, N9000A) 对信号进行分析, 该仪器测量频率范围为 9 kHz~7.5 GHz, 最小分辨率可以达到 1 Hz。自由运转的  $f_0$  信号频谱如图 4(a) 中红色曲线所示 (光束宽度 BW=100 Hz), 半高全宽 (FWHM)

为 5 kHz。将 130 MHz 附近的  $f_0$  信号进行 64 分频, 实现了在 1 MHz 的范围内对  $f_0$  信号的精密锁定。图 4(a) 的黑色曲线为  $f_0$  锁定后的频谱图, 锁定后  $f_0$  信号线宽从自由运转状态下的 5 kHz 降到 1 Hz 以下。采用频率计数器 (Tektronix, FCA3103) 对频率进行监测, 采样时间为 1 s, 如图 4(b) 所示, 在 170 h 的监测时间内标准偏差为 280 MHz。

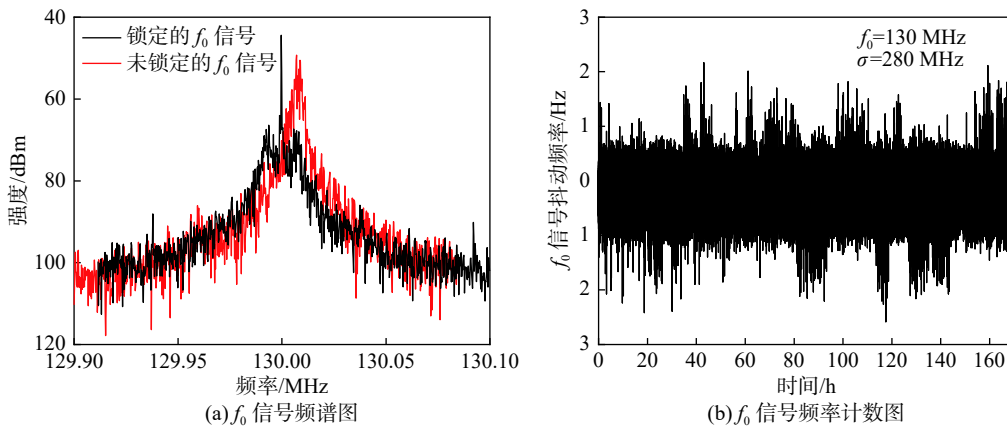


图 4  $f_0$  锁定结果

Fig. 4 Locking result of  $f_0$

### 3 结 论

文章通过精确控温的方式降低了自由运转状态下光梳  $f_r$  和  $f_0$  的漂移, 锁定后  $f_0$  信号线宽从 5 kHz 降低到小于 1 Hz, 频率抖动标准偏差为 280 MHz,  $f_r$  标准差为 0.83 MHz。该光纤光梳系

统在 170 h 测试时间内无失锁现象发生, 为全光纤化光梳提供了一个可行的温控解决方案。

### 参考文献:

[1] ECKSTEIN J N, FERGUSON A I, HÄNSCH T W. High-

- resolution two-photon spectroscopy with picosecond light pulses[J]. *Physical Review Letters*, 1978, 40(13): 847 – 850.
- [ 2 ] NIERING M, HOLZWARTH R, REICHERT J, et al. Measurement of the hydrogen 1S- 2S transition frequency by phase coherent comparison with a microwave cesium fountain clock[J]. *Physical Review Letters*, 2000, 84(24): 5496 – 5499.
- [ 3 ] WILKEN T, CURTO G L, PROBST R A, et al. A spectrograph for exoplanet observations calibrated at the centimetre-per-second level[J]. *Nature*, 2012, 485(7400): 611 – 614.
- [ 4 ] 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.
- [ 5 ] 饶冰洁, 张颜艳, 闫露露, 等. 面向 Li 原子 D1 线频率测量应用的掺铒飞秒光纤光梳系统 [J]. *光子学报*, 2019, 48(1): 114003.
- [ 6 ] HINKLEY N, SHERMAN J A, PHILLIPS N B, et al. An atomic clock with  $10^{-18}$  instability[J]. *Science*, 2013, 341(6151): 1215 – 1218.
- [ 7 ] DIDDAMS S A, JONES D J, YE J, et al. Direct link between microwave and optical frequencies with a 300 THz femtosecond laser comb[J]. *Physical Review Letters*, 2000, 84(22): 5102 – 5105.
- [ 8 ] WASHBURN B R, DIDDAMS S A, NEWBURY N R, et al. Phase-locked, erbium-fiber-laser-based frequency comb in the near infrared[J]. *Optics Letters*, 2004, 29(3): 250 – 252.
- [ 9 ] SINCLAIR L C, CODDINGTON I, SWANN W C, et al. Operation of an optically coherent frequency comb outside the metrology lab[J]. *Optics Express*, 2014, 22(6): 6996 – 7006.
- [ 10 ] KUSE N, JIANG J, LEE C C, et al. All polarization-maintaining Er fiber-based optical frequency combs with nonlinear amplifying loop mirror[J]. *Optics Express*, 2016, 24(3): 3095 – 3102.
- [ 11 ] 曹士英, 孟飞, 林百科, 等. 长时间精密锁定的掺 Er 光纤飞秒光学频率梳 [J]. *物理学报*, 2012, 61(13): 134205.
- [ 12 ] ZHANG Y Y, YAN L L, ZHAO W Y, et al. A long-term frequency-stabilized erbium-fiber-laser-based optical frequency comb with an intra-cavity electro-optic modulator[J]. *Chinese Physics B*, 2015, 24(6): 064209.
- [ 13 ] PENG J L, AHN H, SHU R H, et al. Highly stable, frequency-controlled mode-locked erbium fiber laser comb[J]. *Applied Physics B*, 2007, 86(1): 49 – 53.
- [ 14 ] 苑立波. 温度和应变对光纤折射率的影响 [J]. *光学学报*, 1997, 17(12): 1713 – 1717.

(编辑: 张 磊)