

再生锁模光纤激光器的双腔稳定控制

汤轲¹, 于晋龙¹, 王菊¹, 王文睿^{2*}, 马闯¹, 杨恩泽¹¹天津大学电气自动化与信息工程学院光纤通信实验室, 天津 300072;²浙江大学航空航天学院, 浙江 杭州 310007

摘要 提出了一种再生锁模光纤激光器的双腔稳定控制方案,利用锁相环检测光谐振腔腔长变化引起的微波频率漂移,并用压电陶瓷光纤拉伸器进行反馈补偿。利用光电再生腔中的混频器比较两个同频微波信号的相位,得到光电再生腔的腔长变化,并用电移相器反馈补偿光电再生腔的腔长变化。本研究中再生锁模激光器输出了重复频率为 10 GHz、脉冲宽度为 16.6 ps 的光脉冲。光电再生腔输出了重复频率为 10 GHz 的微波信号,其边模抑制比为 40 dB,相位噪声为 -127 dBc/Hz,70 min 内的频率漂移小于 1 Hz。与现有的再生锁模方案相比,本方案实现了光谐振腔腔长和光电再生腔腔长的同时控制,输出的微波信号频率稳定度高,光脉冲质量好,可实现激光器的长时间稳定工作。

关键词 激光器;再生锁模;腔长控制;压电陶瓷;频率稳定性

中图分类号 TN24 文献标识码 A

doi: 10.3788/LOP55.051402

Stable Control of Dual-Cavity in Regenerative Mode-Locking Fiber Laser

Tang Ke¹, Yu Jinlong¹, Wang Ju¹, Wang Wenrui², Ma Chuang¹, Yang Enze¹

¹Laboratory of Optical Fiber Communication, School of Electrical and Information Engineering, Tianjin University, Tianjin 300072, China;

²School of Aeronautics and Astronautics, Zhejiang University, Hangzhou, Zhejiang 310007, China

Abstract A dual-cavity stable control scheme for regenerative mode-locking fiber laser is proposed. The scheme uses phase-locked loop to detect the microwave frequency drift caused by cavity length change of resonant cavity and realizes feedback compensation with piezoelectric ceramic. We use a microwave mixer to compare the phases of two microwave signals with the same frequency in photoelectric regenerative chamber. Cavity change is obtained and compensated by phase shifter. In this study, the regenerative mode-locking fiber laser outputs optical pulses with repetition frequency of 10 GHz and pulse width of 16.6 ps. The optoelectronic regenerative cavity outputs microwave signal with repetition frequency of 10 GHz, side-mode suppression ratio of 40 dB, phase noise of -127 dBc/Hz and the frequency shift smaller than 1 Hz in 70 min. Compared with the present regenerative mode-locking scheme, the proposed scheme can control cavity lengths of optical resonator and optoelectronic regenerative cavity simultaneously, and can output microwave signal with stable frequency and high quality pulse. The regenerative mode-locking fiber laser can work stably for a long time.

Key words lasers; regenerative mode-locking; cavity length control; piezoelectric ceramic; frequency stability

OCIS codes 140.4050; 140.3560; 250.4110; 250.0040

收稿日期: 2017-10-20; 收到修改稿日期: 2017-11-22

基金项目: 国家自然科学基金(61427817)

作者简介: 汤轲(1992—),男,硕士研究生,主要从事光电子技术方面的研究。E-mail: tk19921001@tju.edu.cn

导师简介: 于晋龙(1969—),男,博士,教授,博士生导师,主要从事光纤通信、光电子技术和微波光子学方面的研究。

E-mail: yujinlong@tju.edu.cn

* 通信联系人。E-mail: wangwenrui@zju.edu.cn

1 引言

高重复速率的光窄脉冲在相干光通信中有着巨大的应用前景^[1-2]。在精密仪器与测量中,常用再生锁模光纤激光器产生光窄脉冲。再生锁模光纤激光器借助光谐振腔和光电再生回路的耦合,可以同时产生低相位噪声的微波信号和低时间抖动的光脉冲信号。但是,温度变化和机械振动会引起光谐振腔和光电再生腔的腔长变化,使得输出光脉冲的重复频率和微波信号频率产生漂移,严重时甚至会产生跳模和谐振腔不起振的问题。

目前,关于主动锁模光纤激光器的腔长控制的研究较多,腔长控制可采用检测弛豫振荡反馈控制光延迟线^[3]和拍频反馈调制电移相器^[4]等手段。2009年,高博^[5]提出了主动锁模光纤激光器,该激光器利用混频器提取的混频误差信号控制压电陶瓷光纤拉伸器(PZT),以补偿腔长。

目前关于再生锁模激光器的腔长控制技术的研究较少。2008年,Quinlan等^[6]利用相位调制器和标准具来提取正比于光频率偏移的误差信号,并用PZT反馈调节腔长,以达到稳定光频率的目的。借助两个可调光滤波器提取的光谱两端的光信号来反馈控制光电再生腔的腔长,从而稳定光脉冲的重复频率。但是,该方法的腔长控制是粗略的,10 min内输出微波信号的频率漂移为350 Hz,难以满足应用需求。

由此可见,主动锁模光纤激光器的腔长控制技术已经相当成熟,而关于再生锁模光纤激光器的双腔控制的报道较少,因此迫切需要对其进行系统的研究。

2 基本原理

如图1所示,再生锁模光纤激光器由光谐振腔

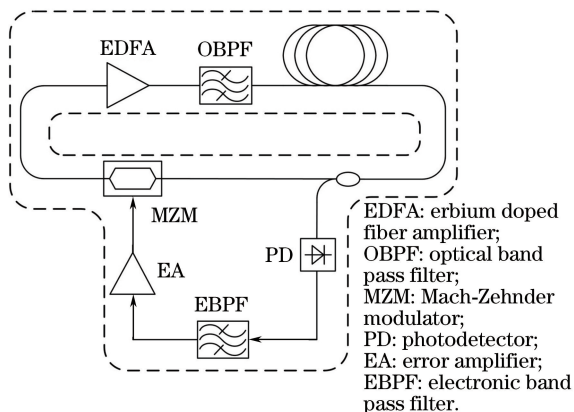


图1 再生锁模光纤激光器的原理图

Fig. 1 Schematic of regenerative mode-locking fiber laser

和光电再生腔^[7]耦合而成。光谐振腔用内部的虚线表示,光电再生腔用外部的虚线表示。搭建一个10 GHz的再生锁模光纤激光器,并控制其光谐振腔和光电再生腔的长度不变,该激光器输出微波信号的频率漂移小于1 Hz。

2.1 光谐振腔和光电再生腔的腔长漂移

再生锁模光纤激光器的腔长变化包括光谐振腔的腔长变化和两个腔腔长的相对变化。光谐振腔的腔长决定了起振激光信号的纵模间隔^[8],从而决定了谐波锁定状态下输出微波信号的频率。当光谐振腔的腔长发生变化时,微波信号频率随之发生变化,从而使得输出电信号不稳定。再生锁模光纤激光器的光谐振腔和光电再生腔分别决定了一套基模,当两个腔的长度保持相对不变时,两套基模中的一个模式对准,系统可以产生稳定振荡。在两个腔的腔长发生相对变化的情况下,如果两套基模的失配保持在一定范围内,由于光电再生腔信号的注入牵引效应,系统仍然可以产生振荡,但此时失配量将导致相位噪声。若两套基模失配程度加剧,基模之间的偏差超过了注入牵引的范围,则边模抢夺起振模式的增益会导致跳模现象。

再生锁模光纤激光器系统中,光谐振腔的光信号转换成电信号后,通过调制器重新注入到光谐振腔中。这种注入方式^[9]可以看作是将一个频率为 ω_i 的信号注入到一个自由振荡频率为 ω_o 的光谐振腔中。根据Adler的电注入^[10]模型理论,结合再生锁模的基本原理,可得

$$\frac{d\theta(t)}{dt} = \Delta\omega(t) - \frac{\omega_o}{2Q} \frac{V_i}{V_o} \sin[\theta(t)], \quad (1)$$

式中: $\theta(t)$ 为注入信号与自由振荡信号的瞬时频差, Q 为光谐振腔的品质因数, V_i 为注入信号的幅度, V_o 为自由振荡信号的幅度, $\Delta\omega(t)$ 为注入信号与自由振荡信号的频率差。将 $|\sin[\theta(t)]| \leq 1$ 代入(1)式中,可得系统的注入牵引范围为

$$\Delta\omega_r = \frac{\omega_o}{2Q} \frac{V_i}{V_o}, \quad (2)$$

只有注入信号与自由振荡信号的频率差小于此范围,系统才能实现注入牵引。根据噪声传递原理以及注入牵引条件,可得再生锁模输出微波信号的 s 域相位噪声传递数学模型为

$$\Delta\theta_{\text{out}}(s) = \frac{s}{s+K} \Delta\theta_o(s) + \frac{K}{s+K} \Delta\theta_i(s), \quad (3)$$

式中: $\Delta\theta_{\text{out}}(s)$ 为输出微波信号的相位噪声, $\Delta\theta_o(s)$ 为光谐振腔的相位噪声, $\Delta\theta_i(s)$ 为注入信号的相位

噪声, K 为由系统决定的一个常数。(3)式表明,再生锁模的带外相位噪声主要由光谐振腔的相位噪声决定,带内相位噪声主要由光电再生腔的相位噪声决定。

2.2 光谐振腔和光电再生腔的腔长控制

图2为光谐振腔和光电再生腔的控制原理示意图。在光谐振腔中,光振荡信号的纵模间隔由腔长决定,光谐振腔出射的光信号经过光电转换、滤波后,形成的微波信号又是纵模间隔的谐波,因此微波信号的频率中包含光谐振腔腔长的变化信息。如图2所示,利用这一信号进行频率检测可以反馈补偿光谐振腔的腔长。因此,可以得出控制输出微波频率不变等价于控制光谐振腔腔长不变,也等价于控制光脉冲的重复频率不变的结论。光电再生腔的腔长变化是通过比较调制器两端信号的相位来检测

的。图2中,从光电再生腔提取的微波信号包含了进入调制器前的光脉冲的相位信息,而调制器输出的光电再生微波信号也包含光脉冲的相位信息,通过比较两者的相位差可以得到光电再生腔的腔长变化量。令光谐振腔的腔长控制和光电再生腔的腔长控制同时进行,两套基模完全对准时主模稳定起振,两套基模轻微失配时利用注入牵引效应维持振荡。施加控制的直接效果是输出微波的频率保持不变,微波主模振荡稳定,不发生跳模。施加控制的最终效果是光脉冲的重复频率不变,腔损耗最低处对准光脉冲中心,使得脉冲最窄。光谐振腔和光电再生腔并不独立,两个腔的腔长存在公共部分,本质上是一个耦合控制问题。因此,必须在光谐振腔腔长不变^[11]的情况下控制光电再生腔,以达到解耦合的目的。

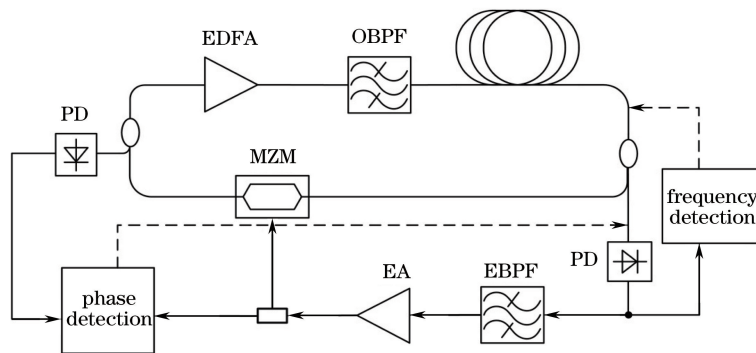


图2 光谐振腔和光电再生腔的控制原理

Fig. 2 Control scheme of laser cavity and optoelectronic regenerative cavity

对于长度为 L 的光谐振腔来说,激光谐振的模式间隔 f (基模频率)与腔长 L 的关系为

$$f = \frac{c}{nL}, \quad (4)$$

式中: c 为光在真空中的传播速度, n 为光在光纤中的折射率。而腔长 L 的改变量 ΔL 与纵模间隔 f 的改变量 Δf 满足

$$\frac{\Delta f}{f} = \frac{\Delta L}{L}. \quad (5)$$

本研究的目的是将输出微波频率变化量控制在 1 Hz 以内,而光谐振腔的目标腔长约为 350 m,基模间隔约为 428.6 kHz,将其代入(5)式,求得腔长 L 的变化量在 $0.0349 \mu\text{m}$ 以内。

控制部分的执行器有压电陶瓷光纤拉伸器(PZT)、光延迟线(ODL)和移相器(PS),衡量执行器的3个指标是精度、执行速率和量程。腔长的变化是短期快速变化和长期慢速变化叠加的结果^[5]。腔长的短期快速变化由机械振动引起,频率高但幅度

小。利用干涉法已测得 350 m 光纤的腔长短期快速变化的频率在 5 kHz 以下,腔长的最大变化量在 $500 \mu\text{m}$ 以下。本研究中光谐振腔的腔长短期快速变化由 PZT 补偿。PZT 的最大拉伸量为 $1700 \mu\text{m}$,高压驱动的带宽为 10 kHz,动态范围为 50 dB,对应于 $0.017 \mu\text{m}$ 的精度。由此可得,PZT 的量程大于腔长短期快速变化的最大值,执行速率大于短期快速变化的最大频率,精度优于目标控制精度,所以 PZT 可以补偿光谐振腔腔长的短期快速变化。而对光电再生腔的控制来说,执行器为移相器。选用的微波移相器的执行速率(50 MHz)远大于腔长短期快速变化的频率(5 kHz),移相范围(410°)大于脉冲的一个周期,移相精度为 0.001° ,满足系统要求。所以选用的移相器可以补偿光电再生腔的腔长变化。

光谐振腔腔长的长期慢速变化由温度的长期大范围漂移引起,其变化频率小于 0.5 Hz 但波动范围极大。光纤的温度形变系数为 10^{-5} ,实验中的系统温度变化小于 10°C ,350 m 光纤的最大腔长变化量

为 35 mm, 仅使用 PZT 无法补偿如此大范围的腔长变化。实验中使用延迟线补偿腔长的长期慢速变化。所用延迟线的最大移动范围为 50 mm, 最大移动速度为 1000 $\mu\text{m/s}$, 执行速率为 1 Hz。当温度变化 0.29 $^{\circ}\text{C}$, 可得单次延迟线的最大移动量为 1000 μm 。延迟线的量程(50 mm)大于腔长最大变化量(35 mm), 1 Hz 的执行速率大于长期慢速变化的频率 0.5 Hz, 单次移动量满足系统需求。所以, 所用延迟线能够补偿腔长的长期慢速变化。在实际应用中, 如果环境温度变化较大, 可以通过增加整机温度控制系统, 将温度变化控制在 10 $^{\circ}\text{C}$ 以内。这个温控系统较容易实现。

通过串联使用 PZT 和光延迟线, 由 PZT 补偿短期快速腔长变化, 光延迟线补偿长期慢速腔长变化, 最终达到高精度、大范围腔长补偿的目的。

3 实验

实验中再生锁模光纤激光器的结构如图 3 所

示, 包括光谐振腔、光电再生腔和腔长控制 3 个部分。与 Quinlan 等^[6,12]采用的方法不同, 为避免偏振态扰动的影响, 系统采用全保偏的器件。

图 3 为整个实验系统的原理图, 电信号链路用虚线绘制, 光路用实线绘制。光谐振腔中的光场由保偏 EDFA 自发辐射光子产生, 经 OBPF 滤波后, 依次经过 100 m 光纤、30:70 的保偏光耦合器、MZM、保偏 PZT 以及 ODL, 最后返回 EDFA 形成有增益、有反馈的回路, 产生的激光由耦合器 30% 的出口进入光电再生腔。进入光电再生腔的光信号通过 90:10 的耦合器后, 10% 的一路产生光脉冲输出, 90% 的一路进入光电再生腔。其中 EDFA 的增益为 30 dB, 饱和输出功率为 15 dBm, OBPF 带宽为 3 nm, ODL 的移相范围为 167 ps。

光电再生腔包括 MZM、PD、移相器(PS)和带通滤波器(BPF)。其中 BPF 的中心频率为 10 GHz, 带宽为 20 MHz。EA 的增益为 30 dB, 饱和输出功率为 30 dBm, 进入 MZM 的功率为 12 dBm。

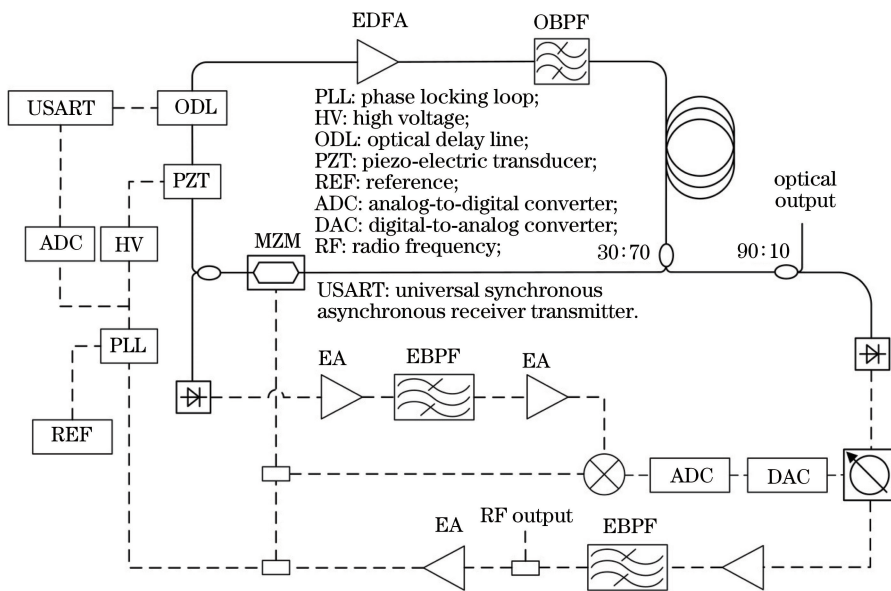


图 3 实验原理图

Fig. 3 Schematic of experiment

如图 3 所示, 光电再生腔中的再生电信号^[13]通过电耦合器输出, 以 6 dBm 的功率进入 PLL 中, 并与输入的 50 MHz 晶振信号进行鉴频鉴相。以 PLL 的环路滤波输出误差电压驱动压电陶瓷, 用产生的 ± 200 V 高压信号驱动 PZT 拉伸和收缩光纤, 从而补偿光谐振腔腔长的短期快速变化。ODL 与 PZT 串联工作, ODL 补偿腔长的长期慢速变化。

光谐振腔中 MZM 的输出光信号通过光耦合器耦合后, 进入 PD 以产生一定频率的微波信号, 对微

波信号进行放大和滤波。调制器输入端的光信号通过耦合器、PD、放大器、滤波器后也产生一个微波电信号。两路微波电信号的频率相同, 将这两路信号送入混频器进行鉴相, 得到两者的相位差信号。相位差信号进入单片机(MCU)的片内 ADC 中进行模数转换, 根据数值实时计算补偿值。单片机中的片内 DAC 将补偿值转化为电压值, DAC 驱动 PS 在光电再生腔内产生相移, 使得输入混频器的 2 个微波信号的相位差恒定, 从而使 MZM 两端信号的相

位差保持恒定,达到控制光电再生腔的目的。

系统开机时,先令光谐振腔的腔长控制部分工作,使输出微波信号频率保持不变。再调整移相器使光电再生腔与光谐振腔达到最佳匹配,最后开启光电再生腔的腔长控制。

4 结 果

图 4 是使用 Agilent 光示波器 86100A 测得的 10 GHz 锁模光脉冲序列,从图中可以看出脉冲宽度为 16.6 ps。

图 5 是用 MS9710C 光谱仪测得的光谱图,其中谱线间隔为 10 GHz,谱宽为 3 nm。

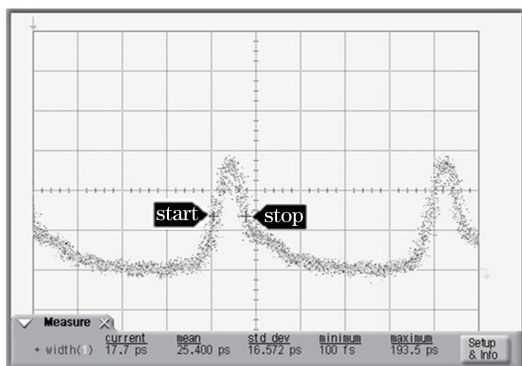


图 4 输出光脉冲时域波形

Fig. 4 Time domain waveform of output light pulse

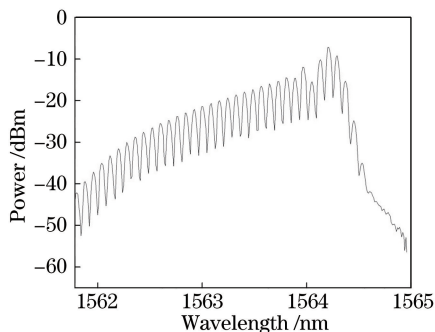


图 5 输出光信号光谱图

Fig. 5 Spectrum of output optical signal

图 6 是用罗德施瓦茨的相位噪声分析仪 FSWP26 测得的微波信号的单边带(SSB)信号相位噪声,从图中可以看出,1 kHz 频率偏移处的相位噪声为 -99 dBc/Hz,10 kHz 处 SSB 信号的相位噪声为 -127 dBc/Hz,100 kHz 处的相位噪声为 -149 dBc/Hz。

图 7 是用 Keysight 电谱仪 N9030A 测得的微波信号频谱图,谱宽为 800 kHz,分辨率带宽(RBW)为 1 kHz,显示带宽(VBW)为 1 kHz,边模抑制比为 40 dB。

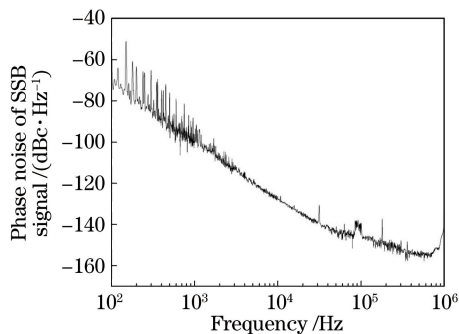


图 6 输出微波信号的相位噪声

Fig. 6 Phase noise of output microwave signal

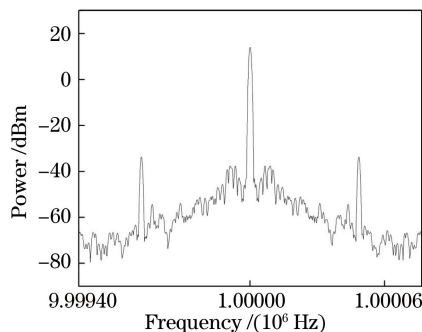


图 7 输出微波信号的频谱图

Fig. 7 Spectrum of output microwave signal

图 8 是不加腔长控制的再生锁模光纤激光器的频率漂移数据,频谱仪设置为最大值保持模式(Max Hold),显示范围(SPAN)设为 10 kHz, RBW 设为 100 Hz, VBW 设为 100 Hz,测量时间为 30 s。从图 8 可以看出,不加腔长控制的再生锁模系统在 30 s 内的频率漂移量达到 3.8 kHz。图 9 为施加双腔控制以后的测试数据。图 9(a)为 70 min 内系统输出微波信号的频率漂移,每个数据点间隔 1 min,图中 $f=10$ GHz。由于频谱仪的最小分辨率为 1 Hz,图 9(a)表明频率漂移小于 1 Hz,对应的频率稳定度在 10^{-10} 左右。可见,施加双腔控制的再生锁模激光器系统输出的微波信号的频率十分稳定。图 9(b)为

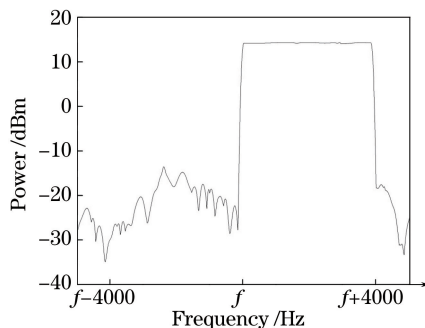


图 8 自由振荡 30 s 内的频率漂移

Fig. 8 Frequency drift in 30 s for free-running

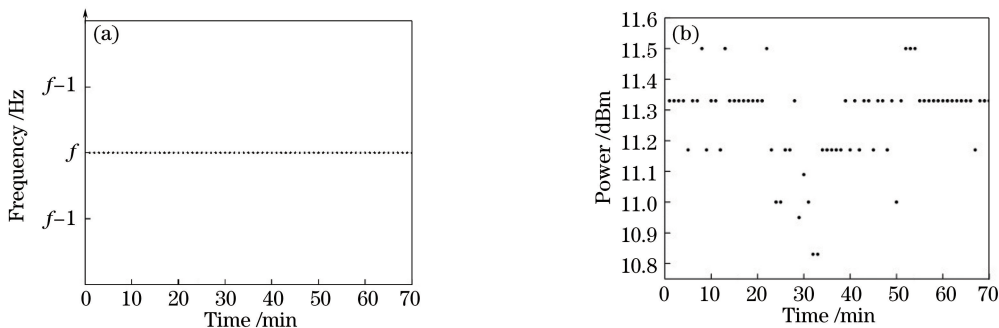


图9 再生锁模的稳定性测试数据。(a) 70 min 内的频率漂移;(b) 70 min 内的功率漂移

Fig. 9 Stability test data of regenerative mode-locking. (a) Frequency drift in 70 min; (b) power drift in 70 min

70 min 内 10 GHz 信号的功率漂移,每次测量间隔为 1 min。由图可知,输出功率在 0.7 dB 内随机波动,输出信号功率稳定度较高。以上测量已经将电谱仪与锁相环系统的晶振进行了同步。

5 结 论

提出了一种再生锁模光纤激光器的双腔稳定控制方法,检测微波频率的变化会产生误差信号,从而反馈控制光谐振腔的腔长,检测同频微波信号的相位差,以反馈控制光电再生腔的腔长,从而实现了光谐振腔和光电再生腔的同时控制。利用此方法得到了 10 GHz 重复频率的光窄脉冲信号以及低相位噪声的 10 GHz 微波信号,并且 70 min 内的频率漂移小于 1 Hz。实验表明此控制方法可以实现再生锁模光纤激光器的长期稳定工作。

参 考 文 献

- [1] Zhang H Z, Dong Z. Laser linewidth tolerance of pre-equalization technology in coherent optical communication [J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2017, 54(3): 030605.
张惠忠,董泽.相干光通信中预均衡技术的激光器线宽容忍度[J].*激光与光电子学进展*, 2017, 54(3): 030605.
- [2] Ke X Z, Zhang Y. Propagation properties of partially coherent array beams in free space optics system [J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2016, 53(10): 100601.
柯熙政,张雅.无线光通信系统中部分相干阵列光束的传输特性研究[J].*激光与光电子学进展*, 2016, 53(10): 100601.
- [3] Takara H, Kawanishi S, Saruwatari M. Stabilisation of a mode locked Er-doped fibre laser by suppressing the relaxation oscillation frequency component [J]. *Electronics Letters*, 1995, 31(4): 292-293.
- [4] Nakazawa M, Yoshida E, Kimura Y. Ultrastable harmonically and regeneratively modelocked polarisation-maintaining erbium fibre ring laser [J]. *Electronics Letters*, 1994, 30(19): 1603-1605.
- [5] Gao B. Study on cavity control technology of actively mode-locked fiber laser based on PZT [D]. Changchun: Jilin University, 2009: 25-57.
高博.基于PZT的主动锁模光纤激光器腔长控制技术[D].长春:吉林大学,2009:25-57.
- [6] Quinlan F, Williams C, Ozharar S, *et al.* Self-stabilization of the optical frequencies and the pulse repetition rate in a coupled optoelectronic oscillator [J]. *Journal of Lightwave Technology*, 2008, 26(15): 2571-2577.
- [7] Li Y, Ji R Y, Shi J K, *et al.* Bidirectional hybrid mode-locking erbium-doped fiber laser [J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2016, 43(12): 1201002.
黎尧,纪荣祎,石俊凯,等.双向运转混合锁模掺铒光纤激光器[J].*中国激光*, 2016, 43(12): 1201002.
- [8] Xu W, Jin T, Chi H. Theoretical and experimental research of coupled optoelectronic oscillators [J]. *Laser Technology*, 2014, 38(5): 579-585.
徐伟,金韬,池灏.耦合式光电振荡器的理论与实验研究[J].*激光技术*, 2014, 38(5): 579-585.
- [9] Zheng J C, Jin T, Chi H, *et al.* Comparison and optimization of phase locked loop and injection locking techniques for optoelectronic oscillators [J]. *Acta Photonica Sinica*, 2017, 46(4): 0423002.
郑俊超,金韬,池灏,等.光电振荡器中锁相环和注入锁定技术的比较和优化[J].*光子学报*, 2017, 46(4): 0423002.
- [10] Adler R. A study of locking phenomena in oscillators [J]. *Proceedings of the IEEE*, 1973, 61(10): 1380-1385.
- [11] Luo J, Yang S, Hao Q, *et al.* Precise locking the repetition rate of a SESAM mode-locking all polarization maintaining fiber laser [J]. *Acta Optica*

- Sinica, 2017, 37(2): 0206003.
- 罗浆, 杨松, 郝强, 等. SESAM 锁模全保偏光纤激光器重复频率的精确锁定 [J]. 光学学报, 2017, 37(2): 0206003.
- [12] Yao X S, Davis L, Maleki L. Coupled optoelectronic oscillators for generating both RF signal and optical pulses [J]. Journal of Lightwave Technology, 2000, 18(1): 73-78.
- [13] Lee J, Koo J, Jhon Y M, *et al.* Femtosecond harmonic mode-locking of a fiber laser based on a bulk-structured Bi(2)Te(3) topological insulator [J]. Optics Express, 2015, 23(5): 6359-6369.