

文章编号: 1005-5630(2023)01-0038-07

DOI: 10.3969/j.issn.1005-5630.2023.001.006

# 耦合式光电振荡器的动态腔长稳定控制

景 鑫, 麻艳娜, 谷付星

(上海理工大学 光电信息与计算机工程学院, 上海 200093)

**摘要:** 提出了一种基于耦合式光电振荡器的动态腔长长时稳定控制方案, 当光谐振腔腔长变化时, 通过同相正交(in-phase/quadrature, I/Q)混频器测量光谐振腔内选定两点的谐振相位变化量, 反馈控制光电再生腔的光延迟线进行再生腔长跟随补偿, 实现可变腔长的耦合式光电振荡器的锁模控制输出, 从而将变化的谐振腔腔长转化为变化的谐振频率进行精密测量。经过系统实验, 当谐振腔长变化时, 振荡器可实时锁定输出可变的微波信号, 并保持边模抑制比优于 47.26 dB, 1 h 内功率抖动小于 0.28 dB, 锁定相位误差抖动在 $\pm 1.5^\circ$ 以内。

**关键词:** 耦合式光电振荡器; 再生锁模; 腔长控制; I/Q 混频

**中图分类号:** TN 929.1 **文献标志码:** A

## Stable control of dynamic cavity length in coupled optoelectronic oscillator

JING Xin, MA Yanna, GU Fuxing

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

**Abstract:** A long-term stability control scheme of the dynamic cavity length based on coupled optoelectronic oscillator is proposed. When the cavity length of the optical resonator changes, the resonant phase variation of two selected positions in the optical resonator is measured by the IQ mixer, and the optical delay line in the regeneration cavity is feedback-controlled to following compensation of the regeneration cavity length, and the controlled mode-locked output of the coupled optoelectronic oscillator with variable cavity length is realized, to convert the changing cavity length into the changing resonator frequency for measurement. After systematic experiments, the optoelectronic oscillator can output a variable locked microwave signal, and keep the side mode suppression ratio better than 47.26 dB, the power jitter less than 0.28 dB, and the lock phase error jitter within  $\pm 1.5^\circ$  within 1 hour.

**Keywords:** coupled optoelectronic oscillator; regenerative mode-locking; cavity length

收稿日期: 2022-03-31

基金项目: 国家自然科学基金优秀青年科学基金(62122054)

第一作者: 景 鑫(1997—), 男, 硕士研究生, 研究方向为光电子技术。E-mail: 192380305@st.usst.edu.cn

通信作者: 麻艳娜(1990—), 女, 博士, 研究方向为光纤传感、纳米光子学。E-mail: mayanna@usst.edu.cn

谷付星(1983—), 男, 教授, 研究方向为微纳光纤精密测量。E-mail: gufuxing@usst.edu.cn

control; in-phase/quadrature mixing

## 引 言

光电振荡器(optoelectronic oscillator, OEO)可产生高稳定性和高频率范围的微波信号,而被广泛应用于大容量光通信<sup>[1-2]</sup>、超宽带信号处理<sup>[3]</sup>、高速光电采样<sup>[4]</sup>和传感检测<sup>[5]</sup>等领域。与其他OEO结构相比,耦合式光电振荡器(coupled optoelectronic oscillator, COEO)同时具有光谐振腔和再生锁模腔双腔结构,除了可输出高重复频率、高Q值、低相位噪声的微波信号<sup>[6-7]</sup>,也可以产生高质量的光脉冲信号。然而,由于光电器件对外界环境因素,如温度变化和机械振动等较为敏感,这对其稳定性控制提出了很高的挑战<sup>[8-9]</sup>。

OEO的稳定性研究主要集中在谐振腔的短期和长期稳定性控制。其中引起短期不稳定性的因素主要为偏振态扰动噪声和超模噪声。采用全保偏光环路结构<sup>[10]</sup>可有效抑制偏振态扰动噪声,但保偏器件较高的成本限制了其实际应用的推广;采用双环路谐振腔<sup>[11-12]</sup>等结构,可有效地抑制OEO超模噪声和链路延时引起的杂散效应,但在提升锁模输出稳定性的同时也增加了系统器件制备的难度和结构复杂度。COEO作为一种复合腔双环路结构<sup>[13]</sup>,通过提取光谐振腔振荡信号,并经光电转换后,再生注入光谐振腔内调制器的电调制口,相对于光域双环路OEO,COEO结构更易实现。

长期不稳定性则主要是由环境温度变化和机械振动等因素导致的调制器调制频率与腔长失配<sup>[14]</sup>。为了实现谐振腔的长期稳定控制,通常采用注入锁定锁相环(injection locked phase-locked loop, ILPLL)等反馈控制方案<sup>[15-18]</sup>,通过将具有高频率稳定性的晶振倍频后引入OEO环路中,在降噪的同时提高振荡频率的稳定度,实现10 kHz频率偏移处相位噪声为-114 dBc/Hz的微波信号输出,可被广泛应用于光通信等领域。为了进一步提高输出微波信号质量,全保偏结构<sup>[19]</sup>也被用于基于ILPLL的腔长控制方案中,进一步增加了系统的成本与复杂性。此外,光电谐振腔也可用于精密测量领域,将变化的谐

振腔长转换为变化的微波谐振频率进行测量。对于动态的谐振腔腔长,则需要一种可以实时锁定可变谐振频率的控制方案。

因此本文在COEO基本结构的基础上,提出了一种实时的动态腔长锁定控制方案。通过同相正交(in-phase/quadrature, I/Q)混频器采集腔内因谐振腔长变化引起的相位抖动信号,并反馈控制再生锁模腔的光学延迟线(optical delay line, ODL),保持再生锁模腔腔长始终跟随光学谐振腔的腔长变化而变化,保证谐振微波信号始终满足光谐振腔和再生锁模腔的共同谐振条件。实现对变化的谐振腔腔长的实时跟随锁定,产生随目标测量信号实时变化的高质量微波信号输出,在实时距离测量和角速度传感等领域具有实际的应用价值。

## 1 基本原理

### 1.1 再生信号注入锁定原理

OEO的稳定工作主要依赖于谐振信号与腔长的严格匹配,而在实际工作过程中,由于温度等因素的影响,腔长会发生一定程度的漂移,从而降低系统的稳定性。为了解决OEO工作过程中腔长与谐振频率的匹配问题,研究人员提出了多种方案,其中较为典型的是基于再生信号注入原理的COEO结构,如图1所示,其中实线和虚线分别代表实验光路和实验电路。

其中光谐振腔作为主振荡器,包括掺铒光纤放大器(erbium doped fiber amplifier, EDFA)、光带通滤波器(optical band pass filter, OBPF)、光耦合器(optical coupler, OC)、偏振控制器(polarization controller, PC)、强度调制器(intensity modulator, IM)以及光隔离器(isolators, ISO)。其中,EDFA提供系统增益,OBPF抑制光纤环路中的自发辐射噪声,IM为锁模器件,PC调节光信号的偏振态,ISO保持光信号单向传输。光电再生腔作为从振荡器,包括光电探测器(photoelectric detector, PD),电带通滤波器

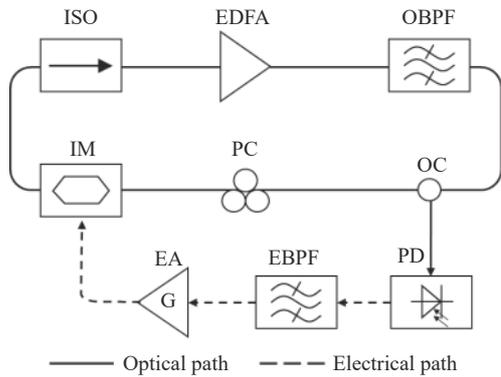


图 1 耦合式光电振荡器原理图

Fig. 1 Schematic diagram of coupled optoelectronic oscillator

(electronic band pass filter, EBPF), 电放大器 (electric amplifier, EA)。光谐振腔内的振荡频率经 OC 耦合输出, 注入光电再生腔, 在腔内首先经过 PD 进行光电转换, 而后将得到的电信号经过 EBPF 选频得到目标工作频率, 经过 EA 放大后重新注入光谐振腔的 IM 参与光腔谐振, 建立再生注入锁定正反馈过程。

再生微波信号注入的 COEO 结构, 同样可采用 Adler 的注入原理<sup>[20-21]</sup>, 其模型为

$$\frac{d\delta(t)}{dt} = \Delta\omega(t) - \frac{\omega_0}{2Q} \frac{V_i}{V_0} \sin[\delta(t)] \quad (1)$$

式中:  $\delta(t)$  为注入信号与光谐振腔振荡信号的瞬时相位差;  $\Delta\omega(t)$  为注入信号与自由振荡信号的频率差;  $\omega_0$  为光谐振腔的自由振荡频率;  $Q$  为谐振腔品质因数;  $V_i$  为光电再生腔注入调制器

的信号幅度;  $V_0$  为光谐振腔振荡信号幅度。正弦函数值域范围为 -1 至 1, 化简上式, 可得系统注入锁定范围为

$$\Delta\omega(t) \leq \frac{\omega_0}{2Q} \frac{V_i}{V_0} \quad (2)$$

因此当外界环境变化引起 COEO 双腔的腔长发生相对抖动时, 在锁定范围内由于从振荡器的再生注入效应, 仍然可以维持振荡模式, 但输出信号噪声增加<sup>[22]</sup>。而当抖动进一步增加至超出注入牵引范围时, 系统会产生脉冲输出抖动, 频域上表现为输出电谱峰值功率的抖动, 时域上则表现为输出脉冲相位的抖动, 严重时会导致系统失锁。

### 1.2 COEO 的光电再生腔动态腔长控制原理

本文中光电再生腔的腔长控制通过 I/Q 混频反馈控制延迟线实现。其中 I/Q 混频器将调制器前后耦合输出的信号分别作为其射频 (ratio frequency, RF) 输入信号和本振 (local-oscillator, LO) 信号, 在内部进行功率分配、移相和混频后, 输出两路正交的相位差信号。和单路混频器相比, I/Q 混频输出的两路同相、正交分量信号通过反正切运算可以直接反映混频器两路输入信号的相位差<sup>[23]</sup>, 避免腔内功率抖动对测量结果的影响。图 2 为通过 I/Q 混频器检测 COEO 系统时域上的相位抖动, 维持系统锁模状态的原理图。

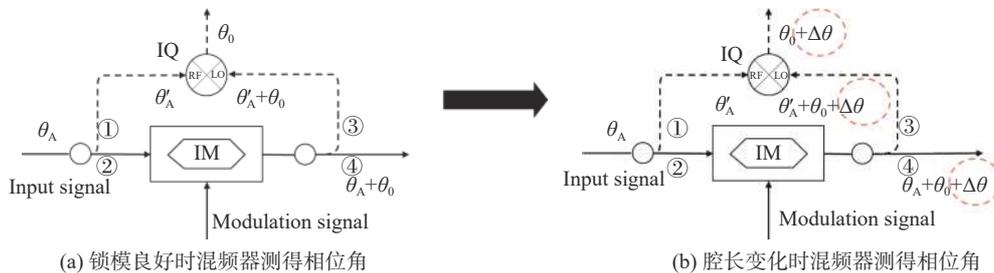


图 2 I/Q 混频器测得的调制器前后信号相位差原理图

Fig. 2 Diagram of I/Q mixer detecting signal phase difference before and after the modulator

如图 2(a) 所示, 谐波锁模良好时, 初相位为  $\theta_A$  的光信号通过光耦合器后分为两路, 支路 ① 经过光电转换及电信号处理, 叠加了传输链路的延时后信号相位为  $\theta'_A$ , 并从 RF 端输入 I/Q 混频器; 支路 ② 通过 IM 后再经光耦合器分为两

路, 其中支路 ③ 经过与支路 ① 相同的传输链路后, 得到相位为  $\theta'_A + \theta_0$  的信号, 并从 LO 端输入 I/Q 混频器; 支路 ④ 上相位为  $\theta_A + \theta_0$  的信号输入光谐振腔环路; IQ 混频器检测信号提取支路 ① 和 ③ 的相位延时, 得到相位差  $\theta_0$ 。

如图 2(b)所示, 在环境因素扰动下, 光谐振腔与光电再生腔的腔长发生相对变化后, 设经过 IM 后支路③和④上的信号叠加了  $\Delta\theta$  的相位延时, 而支路①和③中传输链路的固有延时不变, IQ 混频器 RF 输入端的信号相位仍为  $\theta'_A$ , 而 LO 输入端的信号相位变为  $\theta'_A + \theta_0 + \Delta\theta$ , 经过 IQ 混频器检测后可以得到相位差  $\theta_0 + \Delta\theta$ 。同锁模良好时相比, 此时 IQ 混频器测得的相位差变化了  $\Delta\theta$ , 该相位差误差信号对应于双腔腔长相对变化量。利用该误差信号控制光电再生腔内的 ODL, 对 COEO 腔长抖动进行补偿, 保持 IM 前后的脉冲相位差恒定, 实现 COEO 稳定的锁模输出。

## 2 实 验

COEO 系统的动态腔长控制方案原理如图 3 所示, 系统包含 COEO 光谐振腔和光电再生腔两部分, 其中实线和虚线分别代表实验光路和实验电路。图中光谐振腔由掺铒光纤放大器 (EDFA), 光滤波器 (OBPF), 90:10 光耦合器 OC1、OC2, 偏振控制器 (PC), 强度调制器 (IM) 和光隔离器 (ISO) 组成。光电再生腔由光学延迟线 (ODL), 光电探测器 PD1, 低噪声微波电放大器 EA1、EA2, 微波功率分配器 PWD1、PWD2, 电带通滤波器 EBPF1 和移相器 (PS) 组成。此外, 还有一条经过 IM 的时钟信号相位提取支路, 包含光电探测器 PD2, 电放大器 EA3、EA4, 电带通滤波器 EBPF2。其中 EDFA 模块最大增益为 30 dB, 饱和输出功率 15 dBm; OBPF 中心波长为 1550 nm, 3 dB 带宽 2 nm; IM 的工作波长为 1530~1610 nm, 3 dB 带宽为 12 GHz; 光可调延迟线 ODL-100 精度为 0.0016 ps; 光电探测器 PP-10GC57 的 3 dB 带宽为 11 GHz; 射频带通滤波器 K&L5C50 中心频率 7.564 GHz, 通带范围 30 MHz; 电放大器 GWLNA001130-30 的 3 dB 带宽 13 GHz, 增益 30 dB, 移相器通带范围 6~18 GHz。为了保证一致性, 两路信号所用 PD、EA 和 EBPF 等器件的参数型号批次均相同。而控制信号采集反馈电路包含一个 I/Q 混频器、控制电路及步进电机等。I/Q 混频器的通带范围为 2~12.4 GHz, 控制

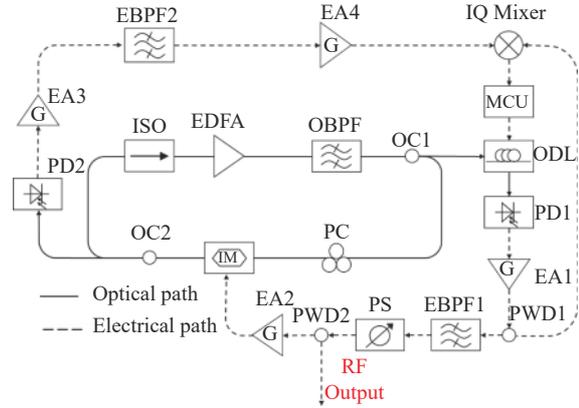


图 3 耦合式光电振荡器再生锁模腔腔长控制实验原理图

Fig. 3 Schematic diagram of the cavity length control experiment of the regenerative mode-locked cavity of the coupled photoelectric oscillator

电路的采样精度为 0.8 mV, 最高采样率为 1 MHz; 步进电机 28PG1100-004 的基本步距角为  $0.6^\circ$ 。

光信号在光谐振腔内首先经过 EDFA 进行光放大, 再经过 OBPF 抑制环路中的自发辐射噪声, 经过 OC1 后分为两路, 10% 端输入再生锁模腔, 90% 端经过 PC 调节光的偏振态后, 输入 IM 进行调制, 再输入 OC2, 其中 10% 端输入 PD2 进行光电转换, 90% 端经过 ISO 保持传输方向后, 重新输入 EDFA 形成环形光谐振腔。通过输入调制器的 RF 信号对光信号进行强度调制, 不同振荡模式间经过相干叠加, 在时域上形成锁模光脉冲。

IM 前端的光脉冲经 OC1 耦合输出, 经过可调 ODL, 而后通过 PD1 进行光电转换, 产生的电信号通过第一级 EA1 放大后分为两路, 一路输入腔长反馈控制回路, 另一路则经过 EBPF1 滤波选取目标频率, 而后通过手动 PS 调节适当的信号相位, 再一次经过 EA2 放大后注入 IM 的调制端口, 使得注入信号相位与光谐振腔振荡信号一致, 实现再生信号的注入锁定, 得到稳定振荡输出的 COEO 系统。

当系统腔长发生抖动时, 采用 COEO 的动态腔长反馈控制系统, 其两路输入信号分别为 IM 前端和后端的信号耦合输出。IM 前端的信号由再生回路的 PWD1 分出; IM 后端的信号同样通过 OC2 耦合输出, 经过 PD2 转换为电信号, 再经过 EA3、EBPF2 和 EA4 实现与再生锁模腔

相同的放大、滤波再放大过程,生成的电信号同 PWD1 分出的信号一同输入 I/Q 混频器进行误差检测,将 RF 信号时域上的相位抖动通过 I/Q 混频器鉴相转换为两路相位差信号。反馈控制部分采用 STM32F103ZET6 控制电路,由微控制单元(micro controller unit, MCU)内部集成的 12 位逐次比较型 ADC 采集混频器输出信号,通过比例积分微分(proportional integral derivative, PID)算法计算得到补偿值,输出脉冲宽度调制(pulse width modulation, PWM)信号驱动步进电机,反馈控制 ODL 改变光电再生腔腔长。通过控制进入 I/Q 混频器的电信号相位恒定,即控制调制器前后端光脉冲相位恒定,实现再生注入锁定控制。输出控制 ODL 的 PWM 信号执行梯形加减速算法,以减小高速启动/急停带来的机械振动对再生锁模腔腔长的影响。

系统工作时,双腔腔长随环境温度或者 Sagnac 效应等因素发生相对变化,此时 I/Q 混频器检测到两路输入信号的相位差,并输入控制器反馈控制再生腔的光延迟线,始终保持再生腔的腔长跟随光谱振腔的腔长变化,保证二者起振模式的对准。系统的输出 RF 信号通过 Keysight N9020A 电谱分析仪进行测试。

### 3 结果分析

采用 LabVIEW 编写基于电谱分析仪的自动测试程序,在相同的实验条件下连续 1 h 测试 COEO 的 RF 输出信号,频谱仪扫频宽度(SPAN)设为 100 kHz,分辨率带宽(RBW)为 1 kHz,数据采集间隔为 0.5 s。测试过程中通过控制环境温度由 23.4 °C 降低至 20.4 °C,模拟 COEO 腔长变化的实验条件(在实际应用中,也适用于 Sagnac 效应等其他因素引起的腔长变化)。

图 4(a)为开启光电谐振腔腔长控制前后的 RF 信号长期功率变化,在未开启再生注入环路的动态腔长控制前,系统工作极不稳定,连续工作 20 min 后即发生频繁的跳模,此时输出功率抖动最高达 50 dB,且跳模后难以建立稳定的振荡模式(黑色线);而在开启动态腔长控制后,系统连续工作 1 h 未发生模式跳变,输出功率抖

动最大值小于 0.28 dB,表明输出的 RF 信号功率稳定(红色线)。图 4(b)为开启腔长控制前后截取的 5 min 短时 RF 信号功率变化,开启腔长控制后,电谱分析仪采集的 600 个短时功率数值抖动方差为  $7.10 \times 10^{-4}$ ,而未开启腔长控制时功率抖动方差为  $1.19 \times 10^{-3}$ 。在短期工作状态下,开启动态腔长控制后,系统输出 RF 信号的功率抖动降低了 40.34%。

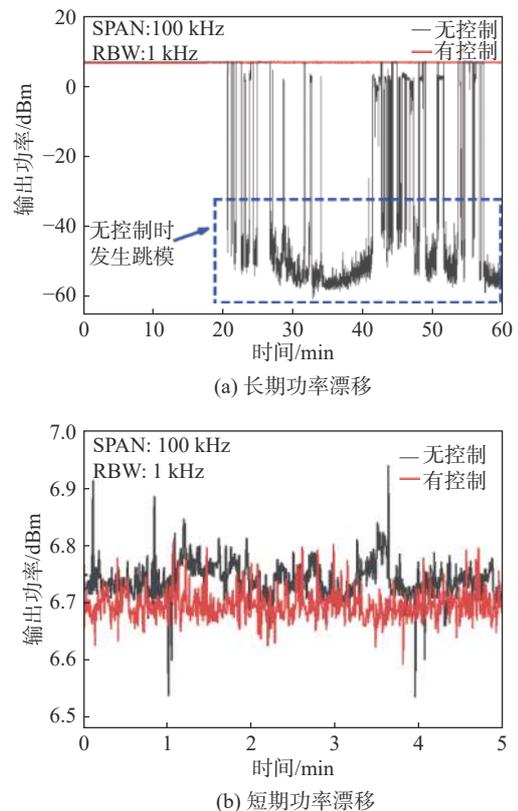


图 4 腔长控制前后输出 RF 信号功率漂移  
Fig. 4 The output RF signal power drift before and after cavity length control

为了进一步验证系统经再生信号注入锁定的输出效果,在动态腔长控制情况下对 COEO 的 RF 信号输出频谱进行了测量,如图 5 所示。电谱分析仪 SPAN 设为 20 MHz, RBW 设为 100 kHz,可以看到此时纵模间隔约 5.20 MHz,纵模抑制比为 47.26 dB。综合开启 COEO 动态腔长控制前后系统的工作状态可以得出,通过控制光电谐振腔的腔长与光腔腔长相匹配,可将系统实时锁定在动态变化的腔长上,抑制超模竞争的影响,输出频率随目标腔长变化且功率稳定的 RF 信号。

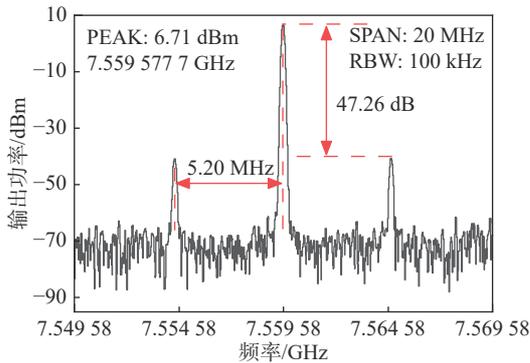
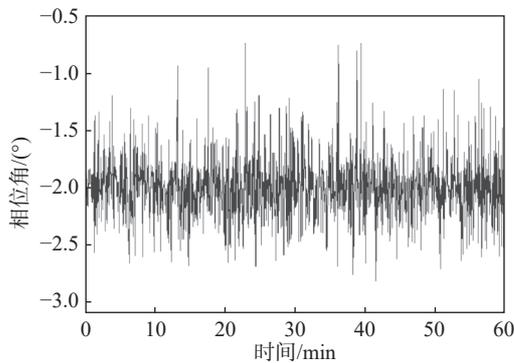


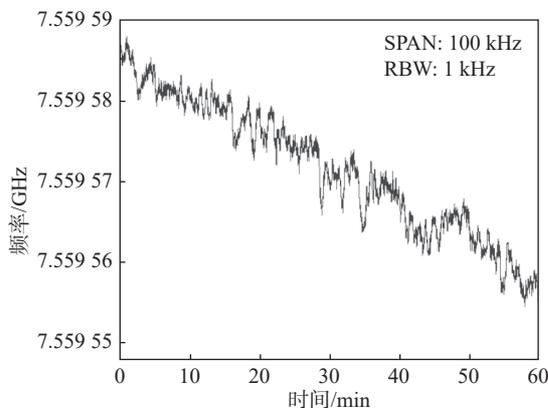
图 5 输出 RF 信号频谱

Fig. 5 Spectrogram of output RF signal

图 6 是从控制角度进一步验证了系统的控制效果。图 6(a) 为腔长稳定控制过程中控制器采集计算得到的相位角抖动变化值, 连续采集 1 h, 数据点间隔 2.5 s, PID 算法设定相位角锁定值  $2.0^\circ$ , 测试过程中相位角在  $2.0^\circ \pm 1.5^\circ$  范围内波动, 而未经控制的系统因跳模难以测得有效的相位变化。图 6(b) 为 1 h 实验过程中 COEO 系



(a) IQ 混频器输出相位角漂移



(b) 输出 RF 信号频率漂移

图 6 COEO 系统的动态腔长控制效果

Fig. 6 Dynamic cavity length control effect of the COEO system

统的谐振 RF 信号频率变化, 在温度变化模拟的长期不稳定性因素影响下, 输出信号产生 30 kHz 的频移, 连续测试下系统频率变化相对平滑, 未发生频率/起振模式跳变。虽然实验过程中光谱谐振腔长发生明显漂移, 但通过本文设计的基于 I/Q 混频器的动态腔长控制单元, 可实现光电再生腔长跟随光谱谐振腔的腔长变化而变化, 二者保持实时的同步和稳定。

## 4 结 论

本文提出了一种基于 I/Q 混频原理的 COEO 动态腔长锁定控制方案, 方案通过 IQ 混频器检测因腔长变化产生的相位抖动, 并反馈控制再生锁模腔的延时量, 使得再生腔的腔长实时跟随光谱谐振腔的腔长变化而变化, 实现了随腔长变化的动态谐振微波信号锁定输出。在锁定控制过程中, 振荡器的边模抑制比为 47.26 dB, 1 h 内功率抖动小于 0.28 dB。该动态的 COEO 谐振腔长锁定控制系统, 可实现将变化的谐振腔长转换为变化的微波谐振频率进行测量, 在距离和角速度等精密测量领域具有广泛的应用前景。

## 参考文献:

- [1] 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): 108 – 113.
- [2] CHEN D, FU H, HE S. Novel microwave photonic filter based on a mode-locked fiber laser[J]. *Laser Physics Letters*, 2007, 4(8): 597 – 600.
- [3] MA Y N, JING X, GU F X. Stable and tunable optoelectronic oscillator with external stimulated brillouin beat note injection[J]. *IEEE Photonics Technology Letters*, 2021, 33(19): 1085 – 1088.
- [4] HUANG J, LAN X W, WEI T, et al. Radio frequency interrogated actively mode-locked fiber ring laser for sensing application[J]. *Optics Letters*, 2012, 37(4): 494 – 496.
- [5] YE L Y, MA Y N, WANG W R, et al. High-sensitivity angular velocity measurement based on bidirectional coupled optoelectronic oscillator[J]. *Optics*

- Communications, 2019, 440: 201 – 206.
- [ 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 ] 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 ] WILLIAMS C, QUINLAN F, DELFYETT P J. Injection-locked mode-locked laser with long-term stabilization and high power-per-combine[J]. *IEEE Photonics Technology Letters*, 2009, 21(2): 94 – 96.
- [ 9 ] TAKADA A, IMAJUKU W. Linewidth narrowing and optical phase control of mode-locked semiconductor ring laser employing optical injection locking[J]. *IEEE Photonics Technology Letters*, 1997, 9(10): 1328 – 1330.
- [10] TAKARA H, KAWANISHI S, SARUWATARI M, et al. Generation of highly stable 20 GHz transform-limited optical pulses from actively mode-locked Er<sup>3+</sup>-doped fibre lasers with an all-polarisation maintaining ring cavity[J]. *Electronics Letters*, 1992, 28(22): 2095 – 2096.
- [11] ONODERA N. Supermode beat suppression in harmonically mode-locked erbium-doped fibre ring lasers with composite cavity structure[J]. *Electronics Letters*, 1997, 33(11): 962 – 963.
- [12] 麻艳娜, 黄添添, 王文睿, 等. 基于双环混频光电振荡器的可调谐微波频率梳产生 [J]. *物理学报*, 2018, 67(23): 238401.
- [13] YAO X S, MALEKI L, DAVIS L. Coupled optoelectronic oscillators[C]//Proceedings of the 1998 IEEE International Frequency Control Symposium. Pasadena: IEEE, 1998: 540 – 544.
- [14] 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.
- [15] SHAN X, CLELAND D, ELLIS A. Stabilising Er fibre soliton laser with pulse phase locking[J]. *Electronics Letters*, 1992, 28(2): 182 – 184.
- [16] 魏正武. 基于自再生锁模光纤激光器的光脉冲信号产生研究 [D]. 南京: 南京航空航天大学, 2016.
- [17] YU Y, YU J L, WANG Z X, et al. High stability frequency transfer over a 35 km fiber link based on injection-locked OEO[C]//2018 Conference on Lasers and Electro-Optics Pacific Rim (CLEO-PR). Hong Kong, China: IEEE, 2018.
- [18] 蔡宸怡. 基于注入锁定的光电振荡器研究 [D]. 南京: 南京理工大学, 2019.
- [19] 汤轲, 于晋龙, 王菊, 等. 再生锁模光纤激光器的双腔稳定控制 [J]. *激光与光电子学进展*, 2018, 55(5): 051402.
- [20] 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.
- [21] ADLER R. A study of locking phenomena in oscillators[J]. *Proceedings of the IEEE*, 1973, 61(10): 1380 – 1385.
- [22] 高博. 基于 PZT 的主动锁模光纤激光器腔长控制技术研究 [D]. 长春: 吉林大学, 2009.
- [23] WANG Z N, ZHANG L, WANG S, et al. Coherent  $\Phi$ -OTDR based on I/Q demodulation and homodyne detection[J]. *Optics Express*, 2016, 24(2): 853 – 858.

(编辑: 张 磊)