

基于耦合式光电振荡器的注入锁定效应研究

张景凯 李德琦 赵天麒 娄宏博 郑佳伟 刘显著 王天枢

Injection locking effect based on coupled optoelectronic oscillator

ZHANG Jingkai, LI Deqi, ZHAO Tianqi, LOU Hongbo, ZHENG Jiawei, LIU Xianzhu, WANG Tianshu

引用本文:

张景凯, 李德琦, 赵天麒, 等. 基于耦合式光电振荡器的注入锁定效应研究[J]. 应用光学, 2025, 46(1): 62–70. DOI: 10.5768/JAO202546.0101005

ZHANG Jingkai, LI Deqi, ZHAO Tianqi, et al. Injection locking effect based on coupled optoelectronic oscillator[J]. Journal of Applied Optics, 2025, 46(1): 62–70. DOI: 10.5768/JAO202546.0101005

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.5768/JAO202546.0101005>

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

多态增强机抖激光陀螺随机噪声注入技术

Polymorphic enhancement of random noise injection in mechanically dithered laser gyroscopes

应用光学. 2024, 45(6): 1284–1290 <https://doi.org/10.5768/JAO202445.0607001>

高信噪比多波长2 μm 主动锁模光纤激光器

High SNR multi-wavelength 2 μm actively mode-locked fiber laser

应用光学. 2021, 42(1): 194–199 <https://doi.org/10.5768/JAO202142.0108001>

单腔双光梳拍频信号包络提取方法

Beat frequency signal envelope extraction based on single-cavity dual-comb

应用光学. 2023, 44(4): 914–919 <https://doi.org/10.5768/JAO202344.0408001>

用于眼轴长度测量的弱光信号检测系统设计

Design of weak optical signal detection system for measuring eye axial length

应用光学. 2020, 41(5): 898–903 <https://doi.org/10.5768/JAO202041.0501004>

探测器像元尺寸对航空光电系统成像性能影响分析

Influence of detector pixel size on imaging performance of airborne optoelectronic system

应用光学. 2022, 43(4): 583–591 <https://doi.org/10.5768/JAO202243.0401001>

电子倍增器脉冲信号图形化离线分析软件

Graphical offline analysis software of electron multiplier pulse signals

应用光学. 2022, 43(6): 1107–1116 <https://doi.org/10.5768/JAO202243.0604009>



关注微信公众号, 获得更多资讯信息

文章编号: 1002-2082 (2025) 01-0062-09

引用格式: 张景凯, 李德琦, 赵天麒, 等. 基于耦合式光电振荡器的注入锁定效应研究 [J]. 应用光学, 2025, 46(1): 62-70.

ZHANG Jingkai, LI Deqi, ZHAO Tianqi, et al. Injection locking effect based on coupled optoelectronic oscillator[J]. Journal of Applied Optics, 2025, 46(1): 62-70.



在线阅读

基于耦合式光电振荡器的注入锁定效应研究

张景凯^{1,2}, 李德琦^{1,2}, 赵天麒^{1,2}, 姜宏博^{1,3}, 郑佳伟^{1,2}, 刘显著^{1,2}, 王天枢^{1,2}

(1. 长春理工大学 空间光电技术国家与地方联合工程研究中心, 吉林 长春 130022; 2. 长春理工大学 光电工程学院, 吉林 长春 130022; 3. 长春理工大学 电子信息工程学院, 吉林 长春 130022)

摘 要: 提出一种基于注入锁定的耦合光电振荡器 (COEO) 的理论模型。通过将光纤环路和注入锁定效应等效成 2 个级联带通滤波器, 得到注入锁定 COEO 的频率响应, 分析注入锁定效应对 COEO 输出特性的影响。实验中在可调光延迟线帮助下, 通过模拟频率失谐条件, 确定注入锁定条件下 COEO 的动态输出范围, 通过调节信号发生器, 研究不同注入信号强度时注入锁定条件下 COEO 的输出信号质量。当注入信号强度为 -15 dBm 时, 产生的微波信号的边模抑制比为 59 dB, 近载频端的相位噪声为 -124.1 dBc/Hz@10 kHz, 远载频端的杂散模式抑制度为 39.3 dB, 频率漂移控制在 15 mHz 以内。当注入信号强度为 -12 dBm 时, 产生的微波信号的边模抑制比为 66 dB, 近载频端的相位噪声为 -117.6 dBc/Hz@10 kHz, 远载频端的杂散模式抑制度为 41.2 dB, 频率漂移为 10 mHz。

关键词: 耦合式光电振荡器; 注入锁定; 注入信号强度; 单音微波信号; 高信噪比

中图分类号: TN206

文献标志码: A

DOI: 10.5768/JAO202546.0101005

Injection locking effect based on coupled optoelectronic oscillator

ZHANG Jingkai^{1,2}, LI Deqi^{1,2}, ZHAO Tianqi^{1,2}, LOU Hongbo^{1,3}, ZHENG Jiawei^{1,2},
LIU Xianzhu^{1,2}, WANG Tianshu^{1,2}

(1. National and Local Joint Engineering Research Center of Space Photoelectric Technology, Changchun University of Science and Technology, Changchun 130022, China; 2. School of Opto-Electronic Engineering, Changchun University of Science and Technology, Changchun 130022, China; 3. School of Electronic Information Engineering, Changchun University of Science and Technology, Changchun 130022, China)

Abstract: A theoretical model of coupled optoelectronic oscillator (COEO) based on injection locking was proposed. The frequency response of the injection-locked COEO was obtained by viewing the optical fiber loop and the injection-locking effect as two cascaded bandpass filter, and the influence of the injection-locking effect on the output characteristics of the COEO was analyzed. In the experiment, the dynamic output range of the COEO under injection-locked conditions was determined by simulating frequency detuning conditions with the help of a tunable optical delay line. The output signal quality of the COEO under injection-locked conditions was investigated by adjusting the signal generator for different injection signal strengths. Under the conditions of injection signal strength of -15 dBm, the generated side-mode rejection ratios of microwave

收稿日期: 2024-02-19; 修回日期: 2024-03-18

基金项目: 吉林省自然科学基金 (20220508134RC, YDZJ202101ZYTS139, YDZJ202201ZYTS418); 国家自然科学基金青年基金 (62105042)

作者简介: 张景凯 (1999—), 男, 硕士研究生, 主要从事微波光子学研究。E-mail: 2021100304@mails.cust.edu.cn

通信作者: 王天枢 (1975—), 男, 博士, 教授, 主要从事空间激光通信、超快光纤激光器及应用等研究。

E-mail: wangts@cust.edu.cn

signal is 59 dB. The phase noise of the injection-locked COEO at near from the carrier signal is -124.1 dBc/Hz@10 kHz, the spurious mode suppression ratio is 39.3 dB at far from the carrier signal, and the frequency drift is controlled within 15 mHz. When the injected signal strength is -12 dBm, the generated side-mode rejection ratios of microwave signal is 66 dB. The phase noise of the COEO at near from the carrier signal is -117.6 dBc/Hz@10 kHz, the spurious mode suppression ratio is 41.2 dB at far from the carrier signal, and the frequency drift is 10 mHz.

Key words: coupled optoelectronic oscillator; injection locking; injected signal strength; single-tone microwave signal; high signal-to-noise ratio

引言

高频谱纯净度的微波信号被广泛用于通信、仪器测试和雷达系统^[1-3]。通常微波信号是通过电子技术产生的,然而对于传统的电子振荡器如石英振荡器来说,能达到高 Q 值的频率信号范围在10 MHz~100 MHz, GHz范围内的微波信号通常需要通过石英振荡器进行倍频获得,这个过程会受到调谐范围限制和恶化的相位噪声影响。自1990年首次报道光电振荡器(OEO)以来,光电振荡器凭借较高的频谱纯净度、低相位噪声引起研究人员关注^[4-5]。光电振荡器通过一段长光纤或高 Q 值的光学谐振腔进行储能,光电环路内实验装置的带宽决定了输出信号的频率范围,并且信号质量不会随着频率增加而恶化。已经报道的有关光电振荡器有可调谐 OEO^[6-7]、双环 OEO^[8-9]、注入锁定 OEO^[10-11]、奇偶时间对称 OEO^[12]等。

耦合光电振荡器(COEO)^[13]具有光谐振腔和电反馈环路结构,具备能够同时产生高重复频率、高 Q 值、低相位噪声的微波信号和光脉冲的优势,采用掺铒光纤放大器作为光源,电光调制器作为锁模元件,通过环形激光器与光电反馈环路之间的模式匹配实现模式选择。但是,由于光纤环路对于外部环境因素较为敏感,使得光纤环形腔的频率漂移影响 COEO 的输出特性,引起多模振荡和模式跳变的情况经常发生,这对 COEO 的稳定性提出了挑战。为了提升 COEO 的稳定性,人们提出了注入锁定^[13-15]、光电滤波器^[16]、锁相环^[16]、全保偏^[18]等方法降低 COEO 的噪声。其中注入锁定技术是将一个低相位噪声的微波信号注入到 COEO 电反馈环路中,当注入信号的频率接近 COEO 某个振荡频率时,该振荡频率就会被锁定到注入的微波信号上。由于外部微波信号能量的注入,COEO 中被选定的振荡频率初始能量比其他频率模式的高,从而提高了被选定模式的竞争能力,使

得该模式能够获得更高的光增益,其他模式会被逐步抑制。因此,注入锁定因出色的模式抑制能力被引入到 COEO 中,用于提高 COEO 产生微波信号的边模抑制比。2017年,北京邮电大学 Dai^[16]等人提出互注入锁定 COEO 结构,实现了对边模噪声的抑制。2022年, Wang^[15]等人提出基于自注入锁定和外部注入锁定结构,实现了高边模抑制比和低相位噪声的光电振荡器。2023年, Qiu^[16]等人提出在注入锁定和锁相环的帮助下,实现高频谱纯净度、可调谐的单音微波信号的输出。尽管上述有关注入锁定结构 COEO 的研究十分丰富,但是基于 COEO 注入锁定效应的理论模型和输出特性依然需要进一步发展。

本文在 COEO 基础结构上,提出基于注入锁定的 COEO 理论,对注入锁定效应进行了理论分析和实验验证。在仿真过程中,光纤环路和注入锁定效应分别等效为一个带通滤波器,基于注入锁定效应的 COEO 可以看作是2个带通滤波器的级联。通过研究不同注入信号强度下 COEO 的频率响应,分析注入锁定效应对于 COEO 输出特性的影响。实验过程中,通过电耦合器将外部正弦信号与振荡信号共同注入到调制器中,并调节注入信号的频率和强度,实现了高频谱纯净度下的单音信号。通过控制腔内可调光延迟线,保证产生的微波信号在光环路和电反馈环路共同振荡,实现微波信号动态输出。通过对比不同注入信号强度下 COEO 的相位噪声、功率抖动和频率抖动,研究注入锁定效应对 COEO 稳定性的影响。

1 原理

基于注入锁定的 COEO 结构图如图1所示。从图1可看出, COEO 主要由光环路和电反馈环路耦合形成,2个环路通过光电转换元件相互连接,在光纤环路中,980 nm 半导体光源作为光纤环路

的泵浦源;掺铒光纤 (erbium-doped fiber, EDF) 作为增益光纤, 为光纤环路提供光增益; 波分复用器 (wavelength division multiplexer, WDM) 将泵浦源与增益光纤连接起来, 使掺铒光纤被泵浦出 1550 nm 的光; 光隔离器 (optical isolator, ISO) 确保光纤环路内光单向传输; 光可调延时线 (optical tunable time delay line, OTDL) 可以精确调节光纤环路内自由光谱范围; LiNbO₃ 马赫增德尔强度调制器 (Mach-Zehnder modulator, MZM) 控制光信号的强度; 由于 MZM 的偏振敏感性, 偏振控制器 (polarization controller, PC) 用于控制光进入 MZM 的偏振态; 光带通滤波器 (optical bandpass filter, OBPF) 用于选择光纤环路内的增益波长; 光耦合器 (optical coupler, OC) 将光纤环路内的能量按比例提取出来; 光电探测器 (photodetector, PD) 将提取出来的光信号转换成电信号; 低噪声的小信号放大器 (low-noise amplifier, LNA) 可以补偿整体环路的电增益; 带通滤波器 (bandpass filter, BPF) 选择振荡产生的电信号的频率; 电移相器 (phase shifter, PS) 可以改变电信号的相位, 使得光环路和电反馈环路实现精准的相位匹配; 信号发生器 (signal generator, SG) 用于产生外部注入信号; 电功分器 1 (electrical power divider 1, EPD1) 提取电环路内的振荡信号, 电功分器 2 (electrical power divider 2, EPD2) 将振荡信号与外部注入信号耦合在一起, 共同注入到 MZM 中; 频谱仪 (electrical signal analyzer, ESA) 用于观测 EPD1 提取出的部分振荡信号。

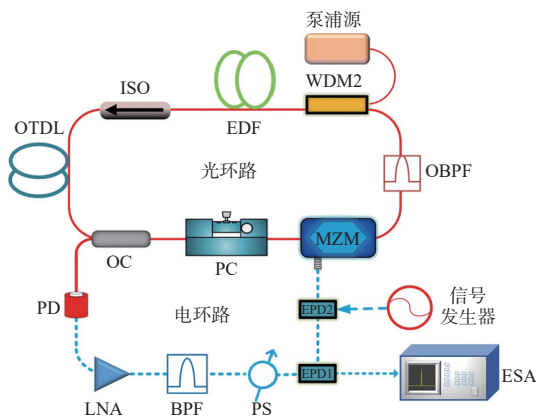


图1 基于注入锁定的 COEO 实验装置图

Fig.1 Experimental device diagram of COEO based on injection locking

理论上, 耦合光电振荡器 (COEO) 环路可以分为激光器和 OEO 环路。激光器中振荡的光信号纵

向模式幅度与相位均是随机的, 多个纵模的光信号在腔内循环, 2 个相邻模式之间的间距表示为

$$f_1 = c/n_1 L_1 \quad (1)$$

式中: n_1 为激光器环路内有效折射率系数; L_1 为激光器内光纤长度; c 为真空中光速。在 OEO 环路中, 由光耦合器输出的光信号被光电探测器转化为电信号, 环路内每个模式的光与其相邻模式的光进行拍频, 得到基频分量的电信号, 相距多个模式的 2 个光拍频会得到谐波分量的电信号。OEO 环路内微波信号的频率间距可表示为

$$f_2 = c/n_2 L_2 \quad (2)$$

式中: n_2 为 OEO 环路内有效折射率系数; L_2 为 OEO 环路有效长度。因为激光器的光纤长度与 OEO 环路的有效长度不同, 所以两者对应的频率模式也不同。OEO 环路内存在多个频率模式, 但只有与激光器纵模相等的频率模式才能在激光器内获得更高的光增益, 从而打破模式竞争在 OEO 环路内振荡。因此, 耦合光电振荡器中的频率模式是从激光器的纵模中选出的。振荡频率可以表示为

$$f = Nc/n_1 L_1 \quad (3)$$

由光纤环路组成的激光器在 COEO 起到了模式选择的作用, 所以光环形腔可以被作为一个高 Q 值的电滤波器^[17]。其频率响应表达式为

$$H(\omega) = \frac{1}{1 - \alpha(e^{-i\omega\tau_L} - 1)} \quad (4)$$

式中: 角频率 $\omega = 2\pi f$, f 为振荡信号的频率; α 为与 Q 值相关的参数, 由光纤环路的腔长, 色散及非线性决定; $\tau_L = 1/f_0$ 为由光纤腔长引起的电信号时延。

根据注入锁定理论, 注入锁定效应原理图如图 2 所示。在 COEO 自由振荡过程中, 优势模式的两侧会存在大量杂散模式, 导致产生的信号边模抑制比较差, 如图 2(a) 所示。当注入信号注入到 COEO 电反馈环路内时, 由于外部注入信号的强度比 COEO 本身的噪声信号功率高, COEO 环路内原有增益竞争平衡状态被打破, 注入信号对应的频率受到的增益会逐渐增加, 而其他模式的增益逐渐降低, 使得其他模式难以振荡, 注入信号的模式成为优势模式, 从而提高了信号的边模抑制比, 如图 2(c) 所示。

由于注入锁定在 COEO 振荡过程中起到了频

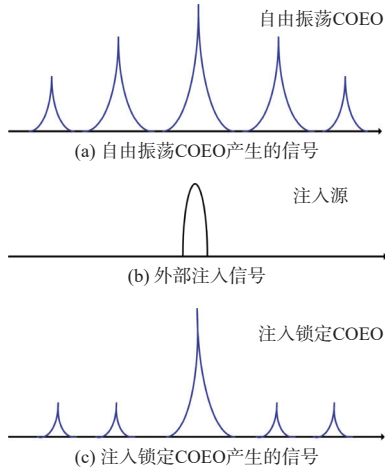


图2 注入锁定效应原理图

Fig. 2 Schematic diagram of injection locking effect

率选择的作用, 将其等效看作洛伦兹型带通滤波器。为了确定带通滤波器的带宽和中心频率, 研究了注入锁定效应的微分方程, 可表示为

$$\frac{d\varphi}{dt} = (\omega_{inj} - \omega_0) - \frac{\omega_0}{Q} \cdot \frac{E_{inj}}{E_{osc}} \sin\varphi \quad (5)$$

式中: φ 为注入信号与 COEO 中注入锁定选中信号的瞬时相位差; E_{inj} 和 E_{osc} 分别为注入信号强度和振荡信号强度; ω_0 为自由振荡信号角频率; ω_{inj} 为注入信号角频率; Q 为系统的品质因子。根据公式 (5), 当系统处于稳定锁定状态时 (即公式 (5) 左边等于 0), 可得到注入锁定范围与 COEO 模式间距、注入信号强度和振荡信号强度的关系, 表达式为

$$\Delta\omega_0 = \frac{f_1}{2} \cdot \frac{E_{inj}}{E_{osc}} \quad (6)$$

根据注入锁定范围, 可以确定滤波器的带宽和中心频率, 并给出滤波器的传递函数, 即:

$$A(\omega - \omega_0) = \frac{1}{1 + \Delta\omega/2i(\omega - \omega_0)} \quad (7)$$

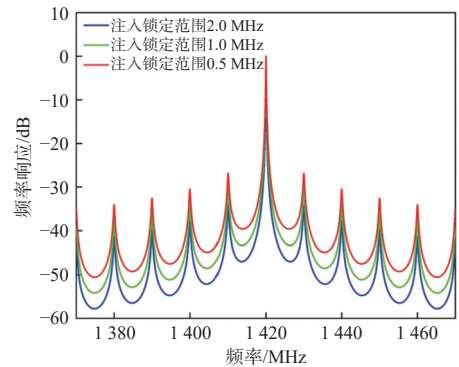
式中: i 为虚部; 滤波器中心频率 $\omega_0 = 2\pi f_{inj}$; 滤波器带宽 $\Delta\omega = 4\pi\Delta f$ 。将公式 (5) 对应的传递函数带入 COEO 频率响应表达式中, 得到注入锁定 COEO 的频率响应为

$$H(\omega) = \frac{A}{1 - \alpha[A(\omega - \omega_0)e^{-i\omega\tau_L} - 1]} \quad (8)$$

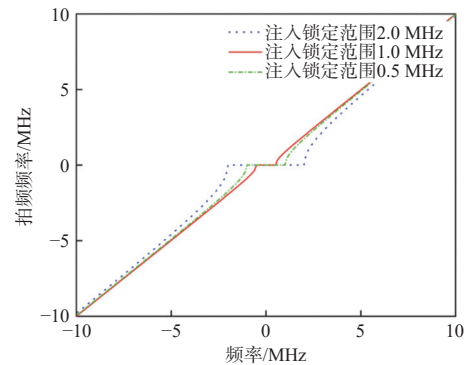
根据公式 (5) 可知, 激光器的频率响应是多个频率共同振荡的函数。根据公式 (8), 注入锁定 COEO 的频率响应是一个滤波器响应函数, 两者并不相关。根据叠加原理, 激光器的光纤环路和注入锁定可以等效成 2 个级联的滤波器, 频率响应可以表示为

$$H(\omega) = \frac{A}{1 - \alpha[A(\omega - \omega_0)e^{-i\omega\tau_L} - 1]} \cdot \frac{1}{1 - \alpha(e^{-i\omega\tau_L} - 1)} \quad (9)$$

为了研究基于注入锁定效应的 COEO 的开环频率响应, 可以使用 Matlab 对公式 (6) 进行仿真。当 $\alpha=23$, 光纤环路总长度 $L=20$ m 时, 对应环路内的延时 $\tau_L=0.1$ μ s。注入信号频率 f 被设定为 1 420 MHz, 注入信号强度和反馈信号强度之比分别设定为 0.1、0.2 和 0.4, 对应频率锁定范围 Δf 分别为 0.5 MHz、1 MHz 和 2 MHz。图 3 给出了基于注入锁定效应的 COEO 的仿真结果, 仿真结果为不同注入锁定范围下频率响应强度的变化。从图 3 可知, 注入锁定范围为 0.5 MHz、1 MHz 和 2 MHz 时, 中心频率 1 420 MHz 两侧频率通带的幅度响应抑制比分别达到 27.3 dB、30.4 dB 和 34.8 dB。仿真结果表明, 随着注入锁定范围的增加, 中心频率两侧频率通带的幅度响应强度逐渐减小, 说明不同的注入信号强度会影响 COEO 的输出特性, 利用注入锁定效应可以实现对杂散频率的抑制, 并且较大的注入锁定范围 (即较大的注入信号强度) 可以进一步提高杂散模式抑制比。



(a) 注入锁定 COEO 的频率响应



(b) 注入锁定 COEO 的拍频频率

图3 注入锁定 COEO 的仿真结果

Fig. 3 Simulation results of injection-locked COEO

由于注入锁定范围与注入信号强度和反馈信号强度相关,为了研究注入锁定效应中动态频率特性,给出了瞬时拍频信号频率表达式,即:

$$f_{\text{beating}} = \sqrt{(f_{\text{inj}} - f)^2 - \Delta f^2} \quad (10)$$

式中: f_{inj} 为注入信号频率; f 为振荡信号频率; Δf 为注入锁定范围。需要注意的是,根据公式(5),当光纤环路发生轻微扰动时,COEO 会发生频率失谐现象。当失谐频率处于锁定范围内时,振荡频率可以被注入信号拉动,锁定到注入信号。当失谐频率超过锁定范围时,会产生新的杂散频率,因此较大的注入锁定范围可以避免环境影响带来的频率失谐。另外,外部注入信号的质量也会影响注入锁定 COEO 的相位噪声表现。COEO 的相位噪声函数是由系统本身的功率谱和外部信号的功率谱共同决定,较大的注入信号强度会引起 COEO 相位噪声恶化。

研究不同注入信号强度下 COEO 的输出特性十分重要。一方面,较大的锁定范围可以获得优异的频率响应表现,避免频率失谐带来的影响;另一方面,较大的锁定范围会引入额外的相位噪声。所以在实验中,需要选定合适的注入信号强度,使 COEO 具有良好的表现。

2 实验结果

COEO 结构图如图 1 所示。图 1 中泵浦光功率为 500 mW, EDF(OFS 980) 长度为 5 m, 电光强度调制器 (IXBLUE 10GHz) 工作带宽为 10 GHz, 插损为 5 dB, 半波电压为 1.4 V, 实验中被设置在正交偏置点; 为了精确调节光纤环路的腔长, 使用的光可调光纤延时线 (VDL-001-35-33-SS-FC/PC) 的调谐范围为 300 ps, 调谐步长为 1 ps; 为了减小光纤环路中自发辐射噪声, 将 3 dB 带宽和插损分别为 1 nm 和 3 dB 的光滤波器加入腔内, 腔内总腔长为 20 m, 最大输出光功率为 5 dBm; 光电探测器 (CONQUER KG-APD-10G) 的工作带宽为 10 GHz, 响应度为 0.8 A/W; 电带通滤波器中心频率为 1.42 GHz, 3 dB 带宽约为 100 MHz; 低噪声放大器 (Connphy CLN-0.01G18G-3030-S) 工作频段为 0.01 GHz~18 GHz、增益为 30 dB; 电移相器 (ARRA 9428A DC-18 GHz) 的调节角度为 90°/1GHz; 信号发生器 (R&S SMF100 A) 的信号频段为 1 GHz~20 GHz, 输出信号 V_{pp} 最高电平为 4 V。采用频谱分析仪 (Keysight,

N9020A) 和示波器 (Keysight DSO-9254A 20 GS/s, 2.5 GHz) 分别对 COEO 输出的微波信号的频谱和波形进行观测。

首先在 COEO 闭环状态下, 研究注入锁定对 COEO 的影响。根据公式 (10) 的仿真结果, 在实验中对频率失谐条件下注入锁定效应进行验证, 研究注入锁定范围内动态频谱输出特性。将注入信号强度设置为 -12 dBm, 对应的注入锁定比为 0.2, 注入锁定范围为 1 MHz。通过控制光纤环路内 OTDL, 使光纤环路的振荡信号频率保持在 1.41 GHz, 然后将注入的射频信号频率输入范围设置为 1.409 GHz~1.411 GHz, 调谐步长为 100 kHz。注入锁定比为 0.2 条件下测量的输出信号频谱图如图 4 所示。实验中因为振荡信号频率保持在 1.41 GHz, 而注入信号的频率在 1.409 GHz~1.411 GHz 范围内变化, 所以在 COEO 中会发生注入信号与振荡信号频率失谐现象。根据图 4 实验结果, 可以观察到随着注入信号频率的变化, COEO 在注入锁定范围内保持稳定的注入锁定状态, 这是因为当频率失谐保持在注入锁定范围内时, 振荡信号的频率会被注入锁定效应拉动, 并锁定到注入信号频率中。实验装置被放置在稳定的实验台上, 避免环境因素引起腔长扰动带来更大范围的频率失谐, 降低注入锁定效果。考虑到注入锁定精度与注入信号和反馈信号的强度相关, 因此在实验中需要精确调节注入信号的强度。

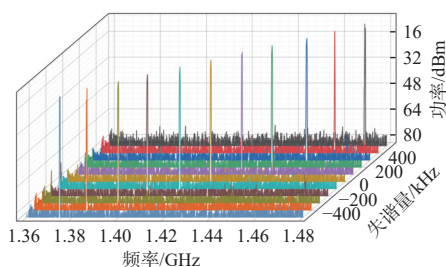


图 4 频率失谐条件下注入锁定 COEO 的输出频谱图

Fig. 4 Measured output spectrum of injection-locked COEO under frequency detuning

接下来测量不同注入信号强度下基于注入锁定的 COEO 的输出特性。频谱仪扫描范围为 100 MHz, 分辨率为 10 kHz, 实验中得到自由运行状态的 COEO 的输出信号中心频率为 1.41 GHz、功率为 -5 dBm, 如图 5(a) 所示。为了实现注入锁定效应, 实验中将不同强度的外部正弦信号 (频率为 1.41 GHz) 通过电功分器注入到 MZM 射频端口

中, 通过电移相器精确调节注入信号的相位, 获得 COEO 的模式锁定状态, 此时输出信号的频谱如图 5(b)~5(e) 所示。当注入信号功率为 -20 dBm, -15 dBm, -12 dBm 和 -9 dBm 时, 产生的单音微波信号的边模抑制比分别为 48 dB, 59 dB, 66 dB 和 75 dB, 相比于自由运行 COEO 输出信号的频谱, 注入锁定效应下 COEO 产生信号的边模抑制比分别提高了 13 dB, 24 dB, 31 dB 和 40 dB。随着注入信号强度的增加, 杂散频率模式的强度逐渐减小, 边模抑制比逐渐提高, 实验结果符合前面仿真结果。较高的注入信号功率有利于提高 COEO 振荡信号的频谱纯净度, 减小了腔内杂散模式噪声。需要注意的是, 由于外部环境引起的腔长抖动可能会影响注入锁定的效果, 所以实验中需要将 COEO 结构放在稳定的实验台上。

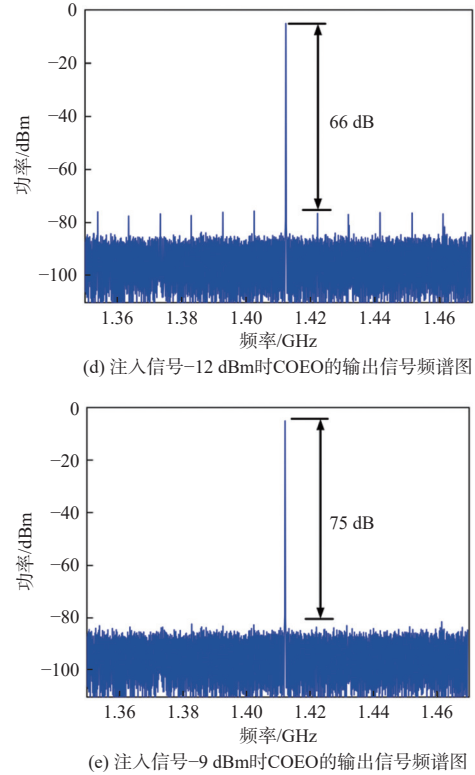
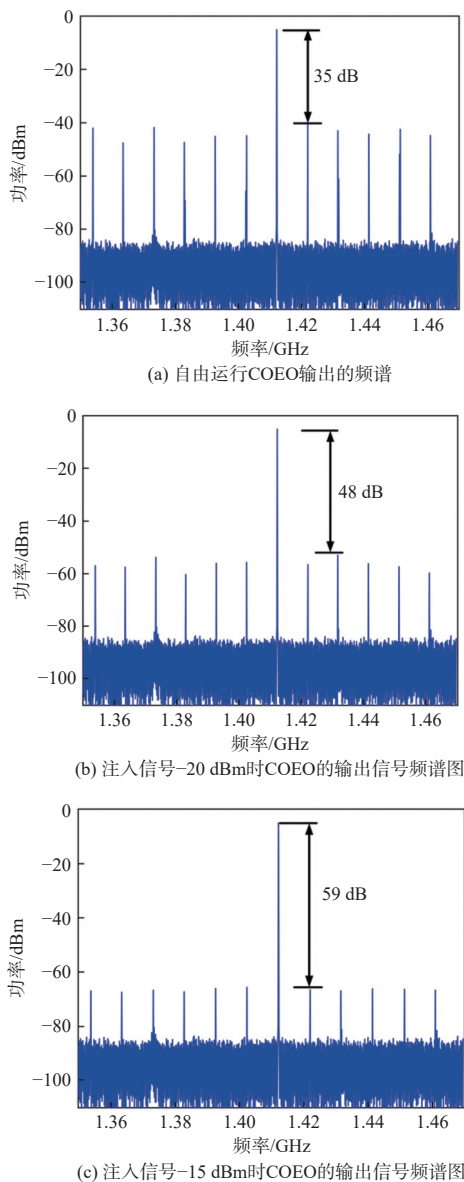


图 5 不同注入信号强度下注入锁定 COEO 的输出频谱
Fig. 5 Measured output spectrum of injection-locked COEO with different injected signal strength

一般来说, 相位噪声的表现反映了系统的短期稳定性。为了进一步研究注入锁定效应对 COEO 稳定性的影响, 将光纤环路长度从 20 m 增加到 200 m, 然后分别测量不同注入信号强度下相位噪声的表现。测量信号中心频率为 1.41 GHz, 注入信号强度分别为 -15 dBm 和 -12 dBm, 测量结果如图 6 所示。从图 6 可以看出, 传统结构 COEO 产生的信号相位噪声为 -114.1 dBc/Hz@10 kHz, 当注入信号强度为 -15 dBm 和 -12 dBm 时, 基于注入锁定的 COEO 相位噪声分别为 -124.1 dBc/Hz@10 kHz 和 -117.6 dBc/Hz@10 kHz。这是由于外部注入信号会影响相位噪声的频率响应, 当注入信号强度增加时, COEO 的相位噪声在 1 kHz~100 kHz 附近性能会进一步恶化。需要注意的是, 注入锁定效应提高了相位噪声中对杂散模式噪声的抑制。COEO 的杂散模式噪声分布在 1 MHz~10 MHz 范围内, 对应光纤环形腔长度为 200 m 时的模式间距。测试结果表明, 基于注入锁定效应的 COEO 在 1 MHz~10 MHz 范围内具有更低的杂散噪声, 当注入信号强度分别为 -15 dBm 和 -12 dBm 时, 杂散模式噪声被抑制到 -120 dBc/Hz 以下, 杂散模式

抑制度分别提高了 39.3 dB 和 41.2 dB。这是由于注入锁定效应减小了 COEO 环路内杂散模式的增益,使得杂散模式难以满足振荡条件。通过对不同注入信号强度下相位噪声进行分析,可以发现注入锁定效应一方面会影响 1 kHz~100 kHz 范围内相位噪声表现,另一方面会提高 1 MHz~10 MHz 范围内的相位噪声表现,因此选取合适的注入信号强度是提升 COEO 稳定性的关键因素。

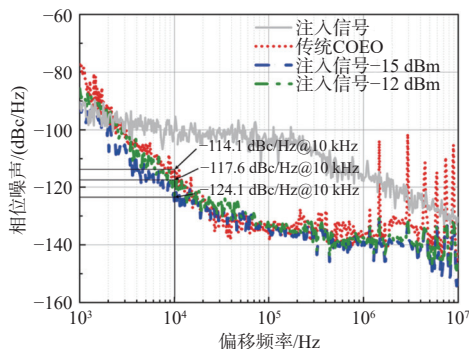
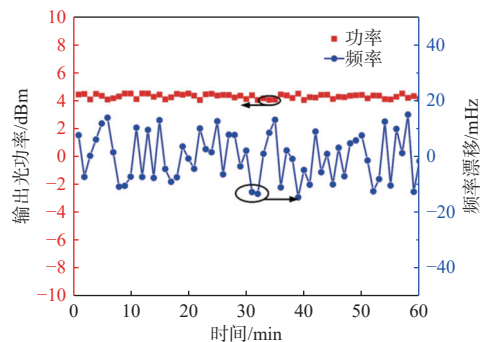


图6 注入信号、传统 COEO、注入信号强度为 -15 dBm 和 -12 dBm 时注入锁定 COEO 的相位噪声

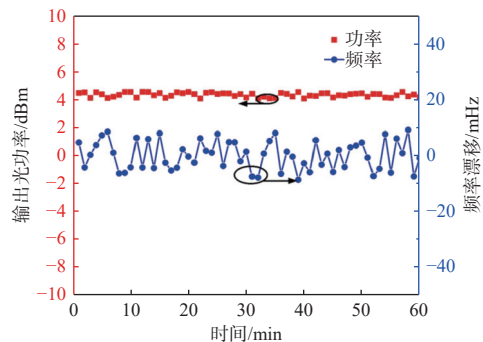
Fig. 6 Measured phase noise of injected signal, traditional COEO, and injected locked COEO under injected strength of -15 dBm and -12 dBm

频率变化和功率变化也在一定程度上反映了系统的稳定性。为了研究注入锁定效应对 COEO 稳定性的影响,分别测试了不同注入信号强度下 COEO 输出的频率变化和功率变化,测试结果如图 7 所示。图 7 中注入信号强度分别设置为 -15 dBm 和 -12 dBm。从图 7 可以看出,在注入外部信号条件下,60 分钟内 COEO 输出光功率稳定在 4 dBm 左右,功率抖动小于 0.5 dBm,微波信号的频率漂移分别为 15 mHz 和 10 mHz。实验结果表明,注入锁定效应可以保证 COEO 具备良好的功率稳定性和频率稳定性。因此,为了保证良好的注入锁定效果,需要增大注入信号的强度,降低 COEO 的频率漂移,从而产生高稳定度的微波信号,可以作为雷达通信中的微波源信号。

另外,我们测量了注入锁定 COEO 的光脉冲输出特性,如图 8 所示。通过对比不同注入信号强度下的光脉冲输出,可以发现当注入信号强度为 -12 dBm 时,COEO 输出光脉冲的整体稳定性更好,抖动更小,符合前面测量的注入锁定 COEO 的频谱特性和频率抖动。



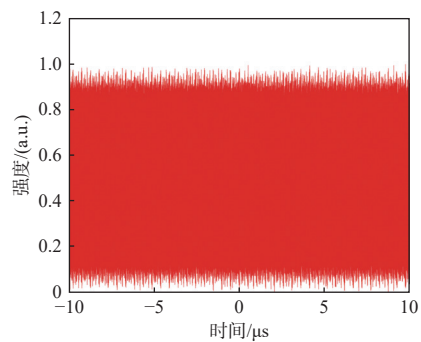
(a) 注入信号 -15 dBm



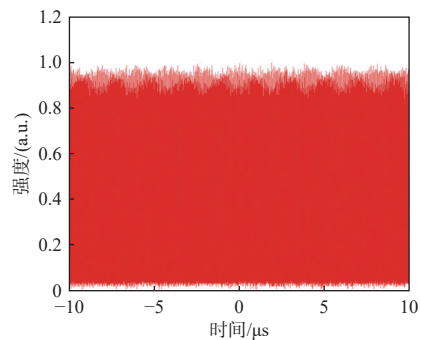
(b) 注入信号 -12 dBm

图7 不同注入信号强度下输出信号的功率变化和频率变化

Fig. 7 Measured power variation and frequency variation of generated signals with different injected signal strength



(a) 注入信号 -15 dBm



(b) 注入信号 -12 dBm

图8 不同注入信号强度下输出的光脉冲波形

Fig. 8 Measured temporal waveform of generated optical pulse with different injected signal strength

在实验过程中, 温度变化或者振动以及对光纤施加应力变化都会导致光相位发生改变, 造成光环路与电环路模式匹配不稳定。因此, 在注入锁定实验中需要加入稳定的参考信号, 有效抑制 COEO 中的杂散模式, 对 COEO 环路的整体稳定起到一定的作用, 同时提高外部信号的功率可以补偿相位不匹配, 提高系统的锁定范围。

3 结论

综上所述, 本文提出了一种基于注入锁定 COEO 的理论模型, 将光纤环路和注入锁定效应等效成 2 个级联的带通滤波器, 得到了注入锁定 COEO 的频率响应, 从理论上分析了注入锁定效应对 COEO 输出特性的影响。实验中在可调光延迟线的帮助下, 通过控制注入信号的调谐范围 1 MHz 和步长 100 kHz, 模拟频率失谐条件, 确定了注入锁定条件下 COEO 的动态输出特性。通过调节信号发生器, 在注入信号强度为 -15 dBm 和 -12 dBm 条件下, 分别得到了高信噪比的 1.41 GHz 单音微波信号, 边模抑制比分别达到 59 dB 和 66 dB。当光纤环路长度进一步增加至 200 m 时, 注入锁定 COEO 在 10 kHz 频率处的相位噪声分别为 -120.1 dBc/Hz 和 -115.6 dBc/Hz, 杂散模式抑制度分别为 39.3 dB 和 41.2 dB, 光功率抖动被控制在 0.5 dBm 以内, 频率漂移分别为 15 MHz 和 10 MHz。本文提出的基于注入锁定 COEO 的理论模型和实验结果, 可以为理解和分析光电振荡器环路内注入锁定效应提供一定的参考, 同时, 本文产生的微波信号具有高稳定性的特点, 能够用于雷达、通信和信号处理等方面。

参考文献:

- [1] KIM J, COX J A, CHEN J, et al. Drift-free femtosecond timing synchronization of remote optical and microwave sources[J]. *Nature Photonics*, 2008, 2(12): 733-736.
- [2] GHELFI P, LAGHEZZA F, SCOTTI F, et al. A fully photonics-based coherent radar system[J]. *Nature*, 2014, 507(7492): 341-345.
- [3] MINASIAN R A, Ultra-wideband and adaptive photonic signal processing of microwave signals[J]. *IEEE Journal of Quantum Electronics*, 2016, 52(1): 1-13.
- [4] YAO X S, MALEKI L. Optoelectronic microwave oscillator[J]. *Journal of the Optical Society of America B*, 1996, 13(8): 1725-1735.
- [5] 范志强, 邱琪, 苏君, 等. 光电振荡器相位噪声和频率稳定性研究进展[J]. *应用光学*, 2017, 38(4): 562-568.
FAN Zhiqiang, QIU Qi, SU Jun, et al. Research progress on phase noise and frequency stability of opto-electronic oscillator[J]. *Journal of Applied Optics*, 2017, 38(4): 562-568.
- [6] PENG H, ZHANG C, XIE X, et al. Tunable DC-60 GHz RF generation utilizing a dual-loop optoelectronic oscillator based on stimulated brillouin scattering[J]. *Journal of Lightwave Technology*, 2015, 33(1): 1.
- [7] XIE X, ZHANG C, SUN T, et al. Wideband tunable optoelectronic oscillator based on a phase modulator and a tunable optical filter[J]. *Optics Letters*, 2013, 38(5): 655-657.
- [8] YAO X S, MALEKI L. Multiloop optoelectronic oscillator[J]. *IEEE Journal of Quantum Electronics*, 2000, 36(1): 79-84.
- [9] YANG J, JIN L Y, YAO T W, et al. An optical domain combined dual-loop optoelectronic oscillator[J]. *IEEE Photonics Technology Letters*, 2007, 19(11): 807-809.
- [10] FLEYER M, SHERMAN A, HOROWITZ M, et al. Wideband-frequency tunable optoelectronic oscillator based on injection locking to an electronic oscillator[J]. *Optics Letters*, 2016, 41(9): 1993-1996.
- [11] WEI M Z, BLASCHE G. Injection-locked dual optoelectronic oscillator with ultra-low phase noise and ultra-low spurious level[J]. *IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques*, 2005, 53(3): 929-933.
- [12] ZHANG J, LI L, WANG G, et al. Parity-time symmetry in wavelength space within a single spatial resonator[J]. *Nature Communications*, 2020, 11(1): 3217.
- [13] 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.
- [14] DAI J, LIU A, LIU J, et al. Supermode noise suppression with mutual injection locking for coupled optoelectronic oscillator[J]. *Optics Express*, 2017, 25(22): 27060-27066.
- [15] WANG Y, LIN C, LI X, et al. Highly improved side mode suppression ratio and a low phase noise optoelectronic oscillator[J]. *Applied Optics*, 2022, 61(15): 4602-4609.
- [16] QIU J, WEI B, YANG L, et al. Finely tunable coupled optoelectronic oscillator based on injection locking and

-
- phase locked loop[J]. [Journal of Lightwave Technology](#), 2023, 41(18): 5863-5869.
- [17] XIAO K, SHEN X, JIN X, et al. Super-mode noise suppression for coupled optoelectronic oscillator with optoelectronic hybrid filter[J]. [Optics Communications](#), 2018, 426: 138-141.
- [18] LIU A, LI X, HUO S, et al. Polarization-insensitive coupled optoelectronic oscillator with low spurious tones and phase noise[J]. [Optics Express](#), 2022, 30(6): 8700-8708.