

基于双环结构的谐波锁模光电振荡器仿真模型

吴懿霖, 曾 珍, 章令杰, 张旨遥, 刘 永

(电子科技大学光电科学与工程学院电子薄膜与集成器件国家重点实验室, 四川成都 611731)

摘要: 本文提出了一种基于偏压调制的双环谐波锁模光电振荡器仿真模型. 该模型包括了利用电光调制器偏压调制实现的模式锁定、采用微波信号与滤波器冲激响应卷积实现的模式选择, 以及基于双环信号相干叠加的超模噪声抑制. 采用改进的脉冲跟踪法实现了双环信号的同步演化仿真. 基于提出的模型仿真了谐波锁模状态下的输出微波脉冲信号的波形、频谱、超模噪声抑制和相位噪声特性, 仿真结果与实验结果相符. 该仿真模型可用于设计基于偏压调制的双环谐波锁模光电振荡器, 以及研究双环腔内的动力学过程, 有助于获得高超模噪声抑制比的微波信号.

关键词: 光电振荡器; 谐波锁模; 双环结构; 超模噪声

中图分类号: TN753.2; TN782

文献标识码: A

文章编号: 0372-2112(2022)04-0789-07

电子学报 URL: <http://www.ejournal.org.cn>

DOI: 10.12263/DZXB.20211022

Simulation Model for Harmonically Mode-Locked Optoelectronic Oscillator Based on A Dual-Loop Architecture

WU Yi-lin, ZENG Zhen, ZHANG Ling-jie, ZHANG Zhi-yao, Liu Yong

(State Key Laboratory of Electronic Thin Films and Integrated Devices, School of Optoelectronic Science and Engineering, University of Electronic Science and Technology of China, Chengdu, Sichuan 611731, China)

Abstract: A simulation model is proposed for a harmonically mode-locked optoelectronic oscillator(OEO) based on a dual-loop architecture and bias modulation. The model includes bias modulation of the electro-optic modulator for mode locking, convolution of microwave signals and filter impulse response for mode selection, and time-domain interference of signals in two cavities for super-mode noise suppression. Numerical simulation is carried out based on the improved pulse tracking method to realize synchronous pulse evolution in two cavities. Through using this model, the waveform, the electrical spectra, the super-mode noise suppression and the phase noise characteristics of the generated microwave pulse trains under harmonic mode locking are numerically simulated, where the simulation results fit in with the experimental results. The proposed model can be used to design a harmonically mode-locked OEO based on a dual-loop architecture and bias modulation, and study the dynamic process in the dual-loop cavity, which is conducive to achieve microwave signals with super-mode noise suppression ratio.

Key words: optoelectronic oscillator; harmonic mode locking; dual-loop architecture; super-mode noise

1 引言

光电振荡器(OptoElectronic Oscillator, OEO)是一种光电混合的正反馈环腔,可以在宽频段范围内产生低相位噪声微波信号,有望突破电子瓶颈对现有微波振荡源性能的限制^[1,2].近年来,为了满足现代雷达系统与无线通信系统对高重复频率、低时间抖动微波脉冲信号的迫切需求,主动锁模技术被引入OEO中^[3].在OEO腔内引入周期性的损耗调制,锁定每个模式之间

的相位,可以产生高质量的微波脉冲串.采用谐波锁模方式,可以在环腔长度不变的情况下提高微波脉冲串的重叠频率.

谐波锁模状态下的OEO往往存在严重的超模噪声,造成微波脉冲串的时域抖动.超模噪声在频谱中反映为相邻2个振荡主模式之间独立振荡的能量较弱的模式(N 阶谐波锁模OEO存在 $N-1$ 组独立振荡的超模噪声),其产生原因是在模式锁定的前期过程中,部分

收稿日期:2021-08-01;修回日期:2022-01-27;责任编辑:孙瑶

基金项目:科技部国家重点研发计划(No.2019YFB2203800);国家自然科学基金重大科研仪器研制项目(No.61927821);中央高校基本科研业务费面向重大需求类项目(No.ZYGX2020ZB012)

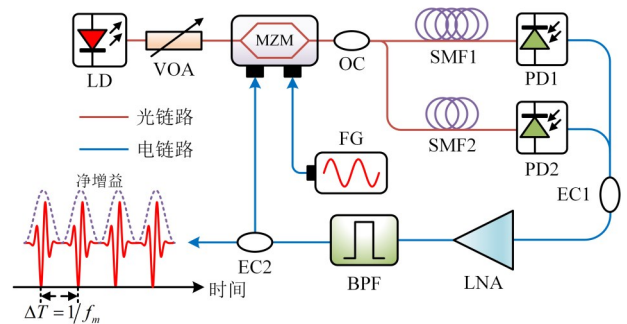
落在净增益谱内的边模的相位也被锁定^[3]. 采用多环路结构可以有效地抑制谐波锁模状态下的超模噪声. 该结构具有多个长度不同的反馈环路, 利用游标效应抑制超模噪声成分, 保证每个环路共有的模式稳定起振, 该过程可等效于展宽环腔的自由光谱范围(Free Spectral Range, FSR). 基于多环路结构的 OEO 已经被多次报道, 利用光域耦合或电域耦合的方式, 可产生高边模抑制比的微波信号^[4-6]. 相较于单环主动锁模 OEO, 基于多环路结构的谐波锁模 OEO 的信号动力学过程更为复杂, 影响输出微波脉冲的波形与相位噪声特性的环腔参数更多. 因此, 建立基于多环路结构谐波锁模 OEO 的理论模型对于研究腔内脉冲动力学与优化脉冲参数有重要意义. 本研究团队前期已经建立了单环主动锁模 OEO 的理论模型, 可以模拟腔内微波信号产生的动力学过程, 并获得输出脉冲信号的相位噪声特性^[7]. 但该模型无法模拟双环 OEO. Levy 等人^[8]建立了双环注入锁定 OEO 的计算模型, 采用耦合方程实现了双环信号的同步演化, 仿真获得的相位噪声、杂散水平、频率锁定范围与实验一致. 然而, 双环注入锁定 OEO 的两个环腔只通过耦合器相干, 而常规的双环结构中两个环腔的信号会在电光调制器等非线性器件内发生叠加干涉, 因此, 该模型无法被用于常规的双环 OEO.

本文提出了基于偏压调制的双环谐波锁模 OEO 仿真模型. 该模型包括了周期性调控电光调制器的直流偏置实现的模式锁定过程、微波脉冲与滤波器时域冲击响应的卷积实现的模式选择过程, 以及双环信号相干叠加实现的超模噪声抑制过程. 采用改进的脉冲跟踪法实现了双环信号的同步演化仿真, 计算了输出微波脉冲信号的波形、频谱、超模噪声抑制特性和相位噪声特性, 数值仿真结果与实验结果相符, 验证了双环路结构用于抑制超模噪声的可行性.

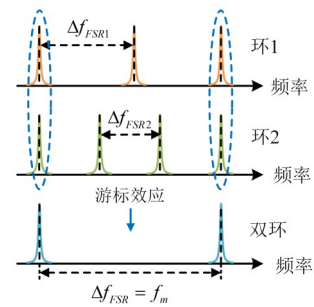
2 理论模型

图 1 为基于偏压调制的双环谐波锁模 OEO 的系统框图, 其工作原理如下. 系统中使用一个窄线宽激光器, 通过光学可调谐衰减器对激光器输出光信号功率进行调节, 从而控制 OEO 环腔内的增益, 以获得稳定的锁模状态. 光信号经过马赫曾德尔调制器(Mach-Zehnder Modulator, MZM)被 OEO 环腔反馈的微波信号强度调制. 强度调制后的光信号被光耦合器分为 2 个支路, 分别通过 2 段长度不一致的单模光纤, 再分别被 2 个光电探测器转换为微波信号. 2 路微波信号被电耦合器耦合为一路, 依次通过低噪声放大器和带通滤波器进行放大、滤波处理. 接着, 微波信号通过另一个电耦合器分为 2 路, 一路作为 OEO 的输出信号, 另一路反馈至 MZM 的射频输入端口实现 OEO 闭环. 与单模振荡的

双环 OEO 不同的是, 双环谐波锁模 OEO 中的 MZM 偏压控制信号不是直流信号, 而是一个由函数发生器产生的正弦波信号, 以实现对其光信号的周期性损耗调制. 如果该正弦波频率 f_m 等于腔内 FSR (Δf_{FSR}) 的整数倍, 即 $f_m = N \times \Delta f_{\text{FSR}}$ (N 为正整数), 那么 OEO 工作在主动锁模状态下^[4]. 图 1 中的缩写分别表示: LD (Laser Diode); VOA (Variable Optical Attenuator); MZM (Mach-Zehnder Modulator); OC (Optical Coupler); FG (Function Generator); SMF (Single Mode Fiber); PD (PhotoDetector); LNA (Low-Noise Amplifier); BPF (BandPass Filter); EC (Electric Coupler).



(a) 基于偏压调制的双环谐波锁模 OEO 系统框图



(b) 双环 OEO 结构游标卡尺效应原理

图 1 系统框图

对于单环主动锁模 OEO, 在 N 阶谐波锁模的状态下, 除了振荡主模式通过损耗调制可以稳定起振外, 相邻 2 个主模式之间还存在 $N-1$ 个能量微弱且不稳定的模式, 形成超模噪声. 超模噪声的存在会直接影响产生微波脉冲信号的性能. 在 OEO 环腔中采用双环结构, 利用游标效应可使得只有同时满足 2 个环路振荡条件的模式才能稳定起振, 其余模式被抑制, 达到抑制超模噪声的目的. 双环结构 OEO 环腔的等效 FSR 可以表示为

$$\Delta f_{\text{FSR}}^{\text{DL}} = n_1 \times \Delta f_{\text{FSR}1} = n_2 \times \Delta f_{\text{FSR}2} \quad (1)$$

其中, n_1 与 n_2 为正整数, $\Delta f_{\text{FSR}1}$ 与 $\Delta f_{\text{FSR}2}$ 分别为 2 个环路的 FSR. 设置注入正弦波频率 $f_m = \Delta f_{\text{FSR}}^{\text{DL}}$, 可控制振荡主

模式起振,2个环腔分别工作在 n_1 阶与 n_2 阶谐波锁模状态,全部超模噪声均被抑制,可产生重复频率为 f_m 的微波脉冲串.

从理论角度分析,对于双环OEO中的任意一个单环,假设注入MZM射频输入端口的微波信号为 $V_{in}(t)$.假设带通滤波器与低噪声放大器均为线性器件,经过开环演化,由带通滤波器输出的微波信号 $V_{out}(t)$ 可表示为

$$V_{out}(t) = \left\{ V_{ph} \left[1 + \eta \cos(V_{mod}) \right] + n_A(t) \right\} * h(t) \quad (2)$$

其中 $V_{mod} = \pi V_{in}(t)/V_{\pi}^{AC} + \pi V_{DC}(t)/V_{\pi}^{DC}$ 为调制电压; V_{π}^{DC} 和 V_{π}^{AC} 分别为MZM的射频端口和偏压端口半波电压; $V_{DC}(t)$ 为注入MZM偏压端口的信号; $n_A(t)$ 为环腔内有源器件产生的噪声;*为卷积运算符; $h(t)$ 为带通滤波器的冲激响应; η 是由MZM的消光比 $(1+\eta)/(1-\eta)$ 决定

$$A_{out}(t) = \left[-2\eta V_{ph} \sin(\pi V_{DC}(t)/V_{\pi}^{DC}) J_1 \left(\pi \left| A_{in}(t) \right| / V_{\pi}^{AC} \right) \exp(j\varphi_{in}(t)) + n_A(t) \right] * s(t) \quad (4)$$

其中 $A_{out}(t) = \left| V_{out}(t) \right| \exp(j\varphi_{out}(t))$ 表示为 V_{out} 的复振幅; $J_1(x)$ 表示为第一类1阶Bessel函数; $s(t) = h(t) \exp(j2\pi f_c t)$ 是滤波器的基带响应.该主动锁模结构的开环小信号增益系数可表示为

$$G_s = \lim_{A_{in} \rightarrow 0} \left| \frac{A_{out}(t)}{A_{in}(t)} \right| \quad (5)$$

$$= \frac{\pi \eta V_{ph}}{V_{\pi}^{AC}} \sin(\pi V_{DC}(t)/V_{\pi}^{DC})$$

从式(5)中可以发现,向MZM的偏压端口注入信号 $V_{DC}(t)$ 等价于在环腔中实现了以 $\sin(\pi V_{DC}(t)/V_{\pi}^{DC})$ 形式变化的周期性损耗调制.若注入MZM的偏压信号 $V_{DC}(t) = V_{\pi}^{DC}/2$,即MZM工作在正交偏置点时,小信号增益系数 $G_s = \pi V_{ph}/V_{\pi}^{AC}$,OEO将从主动锁模状态退化为单模振荡状态.

双环OEO结构的输入 $V_{in}(t)$ 与输出 $V_{out}(t)$ 除了满足开环的变换关系,还应满足闭环的延时反馈关系.不同于单环OEO的简单延时关系 $V_{in}(t) = V_{out}(t-\tau)$ (其中 τ 为环腔周期),双环结构由于2个环路的光纤延时不一样,其反馈关系应满足

$$V_{in}(t) = \gamma_1 V_{out}(t-n_1\tau) + \gamma_2 V_{out}(t-n_2\tau) \quad (6)$$

其中 $\tau = 1/\Delta f_{FSR}^{DL}$ 是由双环等效FSR定义的延时量; $n_1\tau$ 与 $n_2\tau$ 分别为双环的环腔周期; γ_1 与 γ_2 是双环的耦合输出系数,由环腔中的光耦合器和电耦合器决定.式(6)的物理意义是,注入MZM的信号 $V_{in}(t)$ 分别进入2个支路,分别延时 $n_1\tau$ 与 $n_2\tau$ 后,再按照 γ_1 与 γ_2 的能量耦合关

的参数; $V_{ph} = (G_A \sigma_{att} P_0 \rho R e^{-\alpha L})/2$ 是经过放大器放大后的信号电压,其中 G_A 为低噪声放大器放大倍数, σ_{att} 是光波经过可调光衰减器和MZM的透过率,包含可调衰减器的功率衰减和MZM的插入损耗, P_0 是激光器的输出光功率, ρ 和 R 分别为光电探测器的响应度与输出阻抗, α 和 L 分别为光纤的衰减系数和长度.为了简化计算,令输入信号 $V_{in}(t)$ 满足

$$V_{in}(t) = A_{in}(t) \exp(-j2\pi f_c t) \quad (3)$$

$$= \left| A_{in}(t) \right| \exp(-j2\pi f_c t + j\varphi_{in}(t))$$

其中 $\varphi_{in}(t)$ 是 $V_{in}(t)$ 随时间缓慢变化的相位; $A_{in}(t) = \left| V_{in}(t) \right| \exp(j\varphi_{in}(t))$ 表示为 $V_{in}(t)$ 的复振幅; f_c 为信号中心频率.将式(3)代入式(2),利用Bessel展开式,由于环腔中的高阶谐波被带通滤波器滤除,式(2)可简化为

系反馈回MZM.该反馈关系同样适用于 $A_{out}(t)$ 与 $A_{in}(t)$,结合式(4)就可以描述双环内的动力学过程.因此,双环锁模OEO的小信号增益系数可定义为

$$G_s = \gamma_1 G_{s1} + \gamma_2 G_{s2}$$

$$= \frac{\pi \eta (\gamma_1 V_{ph1} + \gamma_2 V_{ph2})}{V_{\pi}^{AC}} \sin(\pi V_{DC}(t)/V_{\pi}^{DC}) \quad (7)$$

3 计算方法

基于上述的理论模型,本文采用改进的脉冲跟踪法来模拟双环谐波锁模OEO从噪声起振的信号演化过程.标准的脉冲跟踪法以白噪声作为初始输入,在腔内反复演化,达到最终的稳定状态.而本文采用的改进脉冲跟踪法大体上与单环主动锁模OEO相似^[7],将仿真时间窗口由环腔延时 τ 扩大到 $p\tau$ (p 为正整数),每次循环的脉冲被储存于一个长序列中,对该序列做快速傅里叶变换获得的输出频谱更精细,频谱分辨率提高到标准脉冲跟踪法的 p 倍,因此有效地保留了信号的相位噪声信息,同时,在时域中计算一个环腔延时长度范围内跟踪脉冲的演化,其中带通滤波过程通过脉冲与滤波器的时域冲激响应实现.与单环OEO仿真的不同之处在于,双环OEO的环腔延时采用等效FSR定义的延时量 $\tau = 1/\Delta f_{FSR}^{DL}$,2个环路的环腔周期分别为 $n_1\tau$ 与 $n_2\tau$.跟踪脉冲一次延时演化的算法流程如图2所示,与单环主动锁模OEO的算法流程相近^[7].令 $n = \max(n_1, n_2)$,仿真第 M 圈的输入信号为 $A_{in}(t)$ ($M\tau - (n+1)\tau < t < M\tau$),包含 $n+1$ 个跟踪脉冲.通过式(4)的开环运算与式(6)的延时运算可得到经过延时 τ 的脉冲

$A_{in}(t)$ ($M\tau < t < (M+1)\tau$). 模型将滤波器的群时延 τ_{in} 考虑在内, 则 2 个环路的链路延时分别为 $\tau_1 = n_1\tau - \tau_{in}$ 与 $\tau_2 = n_2\tau - \tau_{in}$. 由于滤波器群时延的影响, 跟踪脉冲与滤波冲激响应的一次卷积运算无法得到完整的输出波形, 因此将带通滤波运算拆分为 2 次卷积运算, 第一次卷积后的不完整输出脉冲经过双环链路的演化后, 与输入脉冲组合在一起再次卷积得到完整的输出脉冲. 跟踪脉冲进入稳定状态后, 循环 p 圈的 $A_{in}(t)$ 被储存在

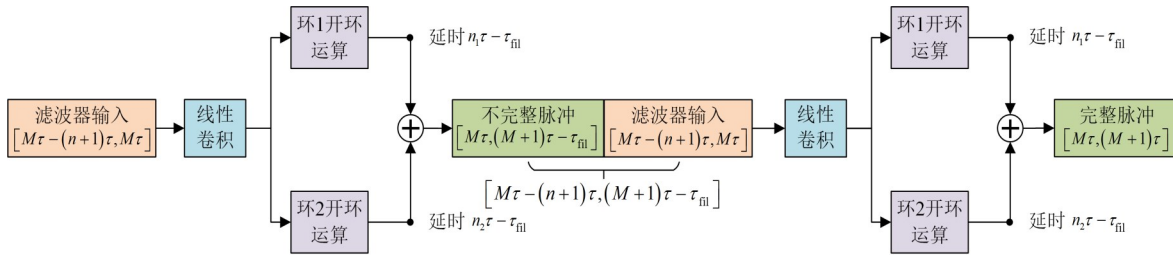


图2 脉冲跟踪一次延时演化的计算流程

4 仿真结果与分析

采用上述的理论模型和计算方法, 本文利用 MATLAB 软件对基于偏压调制的双环谐波锁模 OEO 进行了数值仿真. 设定 2 个环腔的光纤长度分别为 $L_1 = 2.01$ km 与 $L_2 = 1$ km, 损耗系数为 $\alpha = 0.058$ km⁻¹ (0.25 dB/km). 激光器中心波长为 1550 nm, 输出功率为 30 mW. 滤波器设定为高斯型, 中心波长为 4 GHz, 3 dB 带宽为 70 MHz, 群时延为 0.05 μ s. 环腔时间延迟 τ 为 5.05 μ s, 环腔噪声的功率谱密度设为 -160 dBm/Hz. 其余环腔内的器件参数如表 1 所示. 加载在 MZM 偏压端口的正弦信号设为 $V_{dc} = V_m(\sin(2\pi f_m t) + 1)$, 其中 $V_m = V_{\pi}^{DC}/2 = 2.1$ V, $f_m = 198.02$ kHz, 工作在 2 阶谐波锁模状态. 环腔小信号增益系数的时域最大值为 1.008. 一个延时 τ 内采样点数设为 80000, 仿真带宽为 16 GHz.

表 1 环腔内的器件参数设置

物理量	数值	物理量	数值
V_{π}^{DC}	4.2 V	γ_1	0.5
V_{π}^{AC}	4.2 V	γ_2	0.3
R	50 Ω	η	0.5
ρ	0.8 A/W	σ_{att}	0.806

基于上述参数, 仿真从噪声起振, 到 2000 圈左右实现稳定输出. 输出微波脉冲串波形如图 3 所示, 脉冲峰值为 0.33 V, 脉宽为 0.27 μ s, 重复频率为 198.02 kHz, 载波频率约为 4.0 GHz.

为了获得输出频谱, 一个延时内的采样点数被降

长序列 $F_{out}(t)$ 中, 双环锁模 OEO 的输出频谱可由 $F_{out}(t)$ 的傅里叶变换得到, 表示为

$$F_{out}(t) \exp(j2\pi f_c t) \xrightarrow{FT} FT(f) \quad (8)$$

因此, 输出脉冲串的相位噪声可由信号单边带功率谱得到, 如式 (9) 所示:

$$L_{gr}(f_{offset}) = \frac{|FT(f_{offset})|^2}{2p\tau \sum_f |FT(f)|^2} \quad (9)$$

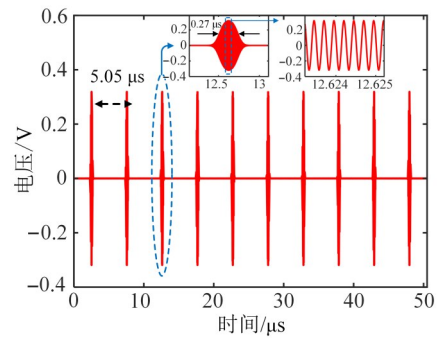


图3 输出微波脉冲串时域波形及其细节

至 1000 以减小计算量, 对最后 4000 圈输出的信号进行傅里叶变换来获得输出频谱, 频率分辨率为 49.51 Hz. 输出频谱如图 4(a) 和 (b) 所示, 振荡信号的 3 dB 带宽为 3.75 MHz, 模式间距为 198.02 kHz. 其中, 振荡信号的 3 dB 带宽小于滤波器的带宽, 主要原因是腔内的模式竞争与较低的小信号增益系数限制了信号带宽的扩展. 值得注意的是, 在图 4(a) 中输出频谱存在着一些凹陷, 原因是微波脉冲的形状不是与滤波器形状匹配的高斯脉冲, 而更接近于超高斯脉冲的形状^[7]. 在图 4(b) 中, 可以观察到相邻 2 个振荡主模式间存在极其微弱的超模噪声成分, 超模噪声抑制比为 107.3 dB. 图 4(c) 和 (d) 展示了光纤长度为 2.01 km 的单环 2 阶谐波锁模 OEO 输出频谱的仿真结果, 可以看到超模噪声抑制比为 17.8 dB, 超模噪声成分能量很高. 该仿真结果证明了双环结构可以对超模噪声具有良好的抑制作用. 实际上, 超模噪声的产生和抑制过程可以在时域上做出解释. 单环结构中 N 阶谐波锁模产生超模噪声的原因

是,一个环腔周期 τ 内的 N 个脉冲各自独立地从噪声起振,彼此间的相位关系由随机噪声决定,不能建立起一致的相位关系. 因此输出脉冲信号的相干时间间隔仍等于环腔周期,其频谱的模式间距仍为 $1/\tau$,而没有扩展 N 倍. 相邻 2 个振荡主模式之间存在的超模噪声成分就是时域上 N 个脉冲间随机相位的贡献. 而双环结构通过不同的延时结构使一个环腔周期内的不同脉冲相互叠加干涉,如式(6)所示,最终使所有脉冲建立起一致相干的相位关系,对应于频域超模噪声成分经过不同长度光纤延时产生不同相移,最后叠加相干相消. 图 5 分别展示了单环与双环 2 阶谐波锁模的输出脉冲串的自相关结果,可以看到,单环的自相关结果在 $\pm 5.05 \mu\text{s}$, $\pm 15.15 \mu\text{s}$ 等半整数倍环腔周期处的能量值明显低于双环结果,这证明了单环结构的相邻 2 个脉冲的相位关系不一致,而双环结构通过锁定了每个脉冲的相位抑制超模噪声.

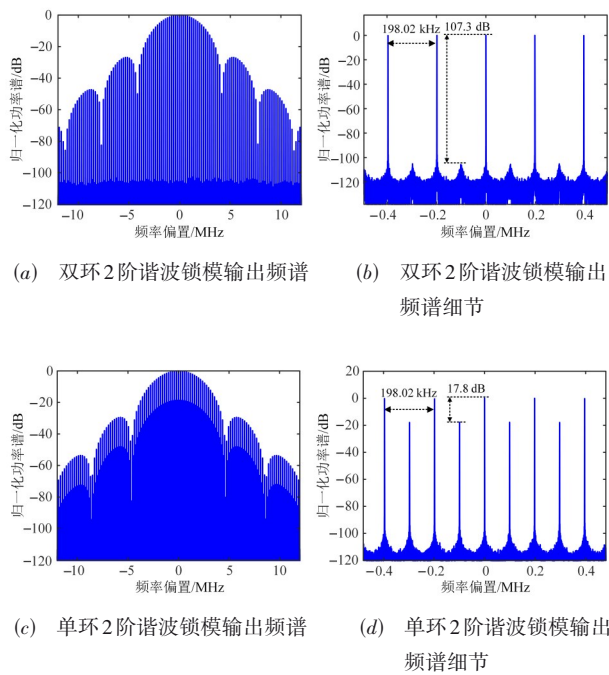


图 4 2 阶谐波锁模输出频谱

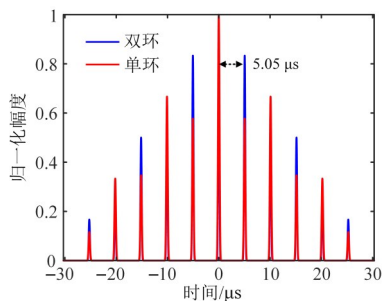


图 5 单环与双环二阶谐波锁模结构的脉冲串自相关结果

为了进一步证明双环结构的超模噪声抑制作用,将双环光纤长度分别设置为 $L_1 = 8.07 \text{ km}$ 与 $L_2 = 1 \text{ km}$. 图 6(a)和(b)展示了双环 8 阶谐波锁模 OEO 的输出频谱,相邻 2 个振荡模式间有 7 组微弱的超模噪声存在,超模噪声抑制比为 93.7 dB;图 6(c)和(d)展示了光纤长度为 8.07 km 的单环 8 阶谐波锁模 OEO 的输出频谱,超模噪声抑制比为 28.7 dB.

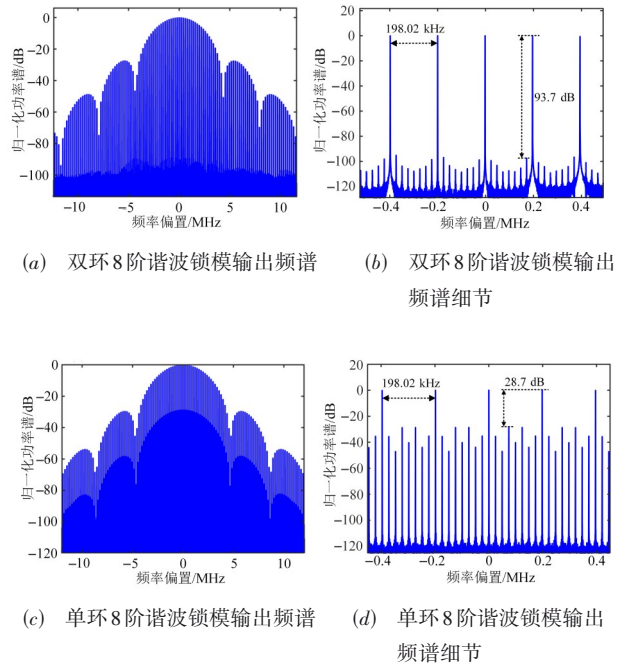


图 6 8 阶谐波锁模输出频谱

根据已获得的输出频谱,可以通过单边带功率谱分析双环谐波锁模 OEO 的相位噪声特性. 需要指出的是,利用光纤长度为 1 km 的基频锁模 OEO 结构也可以产生重复频率为 198.02 kHz 的微波脉冲串信号,且无超模噪声干扰,相比之下采用双环谐波锁模结构的优势在于具有更低的相位噪声. 图 7 展示了双环光纤长度为 2.01 km 与 1 km 的双环 2 阶谐波锁模 OEO 与光纤长度为 1 km 的单环基频锁模 OEO 的单边带功率谱计算结果. 从中可以看到,双环结构的相位噪声明显低于单

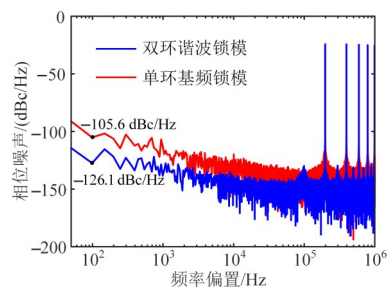


图 7 双环 2 阶谐波锁模结构与单环基频锁模结构的单边带功率谱

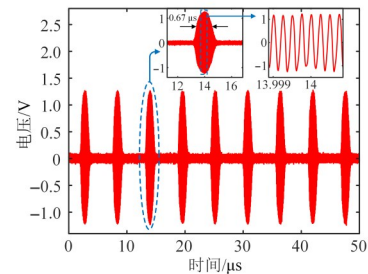
环结构,并且在 100 Hz 频率偏置处相较于单环 OEO 降低了 20.5 dB. 这是由于双环 OEO 中的长环结构对 OEO 相位噪声有贡献,双环结构相较于短环获得了更高的品质因数^[9]. 因此,双环谐波锁模 OEO 不仅能产生具有高重复频率与高超模噪声抑制比的微波脉冲串信号,而且其相位噪声得到很大程度的优化,有望被应用于高测速精度的脉冲多普勒雷达中.

5 实验结果

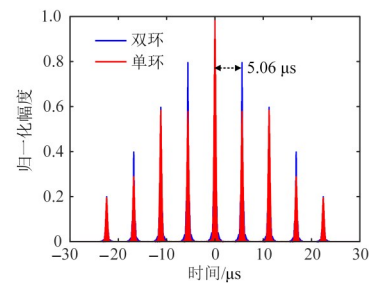
搭建了如图 1 所示的双环结构系统,对 2 阶谐波锁模 OEO 进行了实验验证. 实验中,窄线宽激光器的中心波长为 1560 nm、功率为 17 dBm, MZM 的工作速率为 20 Gb/s. OEO 的双环分别采用长度为 2.2 km 和 1.1 km 的单模光纤. 光电探测器的工作速率为 20 Gb/s,转换效率为 300 V/W,低噪声放大器的工作频段为 1~20 GHz、增益为 25 dB. 带通滤波器的中心频率为 4 GHz,3 dB 带宽约为 70 MHz,函数发生器的工作频段为 0~20 MHz,设置其输出为正弦信号,频率为 179 kHz,高电平为 4.04 V(对应 MZM 的线性偏置点),低电平为 0 V. 采用高速实时示波器(Tektronix DPO75002SX, 100 GS/s, 33 GHz)和频谱分析仪(R&S FSU50, 20~50 GHz)分别测量 OEO 输出的微波脉冲串的波形和频谱.

图 8 展示了基于双环结构的 2 阶谐波锁模 OEO 的输出频谱,振荡信号的 3 dB 带宽为 2.05 MHz,模式间距为 178.57 kHz. 从图 8 中可以看出,相邻 2 个振荡主模式之间的超模噪声非常微弱,超模噪声抑制比为 58.4 dB,频谱测量结果与仿真结果图 4 相符. 值得注意的是,实验中的双环超模噪声抑制比小于仿真结果,原因是实验中 2 个环腔的长度未完全匹配,劣化了双环的游标卡尺效应. 输出微波脉冲串的时域波形如图 9(a)所示,与仿真结果图 3 相符. 微波脉冲的峰值为 1.30 V,脉宽为 0.67 μs ,重复频率为 178.57 kHz,中心载波频率约为 4.0 GHz. 图 9(b)展示了双环结构产生的微波脉冲串与光纤长度为 2.2 km 的单环 2 阶谐波锁模 OEO 的输出脉冲串的自相关结果,实验结果与仿真结果图 5 相符. 可以看到,单环的自相关结果在 $\pm 5.60 \mu\text{s}$ 和

$\pm 16.80 \mu\text{s}$ 等半整数倍环腔周期处的能量值明显低于双环结果. 这说明双环结构的每个脉冲的相位关系锁定,而单环结构的相邻 2 个脉冲的相位关系不一致. 实验证明,双环结构不仅可以有效地抑制谐波锁模 OEO 的超模噪声,而且可以保证脉冲之间的相干性.



(a) 实验测量的双环 2 阶谐波锁模结构的微波脉冲时域波形及细节



(b) 双环与单环 2 阶谐波锁模脉冲串的自相关结果

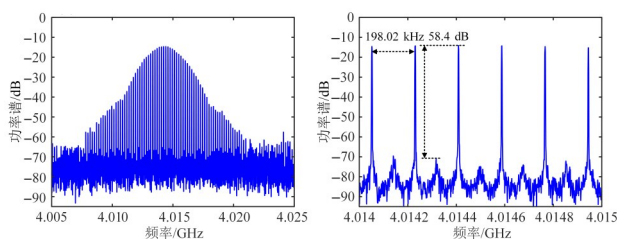
图 9 输出微波脉冲串

6 总结

本文提出了一个基于偏压调制的双环谐波锁模 OEO 的仿真模型,该模型揭示了基于游标效应的双环信号时域相干实现的超模噪声抑制过程. 本文采用了改进的脉冲跟踪法,实现了双环信号的同步演化仿真,计算了输出微波脉冲串的波形、频谱、超模噪声抑制特性与相位噪声特性,仿真结果与实验结果相符,验证了双环结构抑制超模噪声的可行性. 该仿真模型可被用于设计基于偏压调制的双环谐波锁模 OEO,以及研究双环腔内的动力学过程.

参考文献

- [1] YAO X S, Maleki L. Optoelectronic microwave oscillator [J]. Journal of the Optical Society of America B, 1996, 13 (8): 1725-1735.
- [2] HAO T F, TANG J, DOMENECH D, et al. Toward monolithic integration of OEOs: From systems to chips[J]. Jour-



(a) 频谱

(b) 细节

图 8 实验测量的双环 2 阶谐波锁模结构输出频谱

nal of Lightwave Technology, 2018, 36(19): 4565-4582.

- [3] ZENG Z, ZHANG L J, ZHANG Y W, et al. Microwave pulse generation via employing an electric signal modulator to achieve time-domain mode locking in an optoelectronic oscillator[J]. Optics Letters, 2021, 46(9): 2107-2110.
- [4] JIANG Y, YU J L, WANG Y T, et al. An optical domain combined dual-loop optoelectronic oscillator[J]. IEEE Photonics Technology Letters, 2007, 19(11): 807-809.
- [5] SHUMAKHER E, EISENSTEIN G. A novel multiloop optoelectronic oscillator[J]. IEEE Photonics Technology Letters, 2008, 20(22): 1881-1883.
- [6] GARCÍA S, GASULLA I. Multi-cavity optoelectronic oscillators using multicore fibers[J]. Optics Express, 2015, 23(3): 2403-2415.
- [7] WU Y L, ZENG Z, ZHANG L J, et al. Modeling an actively mode-locked optoelectronic oscillator based on electric amplitude modulation[J]. Optics Express, 2021, 29(15): 23835-23846.
- [8] LEVY E C, OKUSAGA O, HOROWITZ M, et al. Comprehensive computational model of single- and dual-loop optoelectronic oscillators with experimental verification[J]. Optics Express, 2010, 18(20): 21461-21476.
- [9] ELIYAHU D, MALEKI L. Low phase noise and spurious level in multi-loop opto-electronic oscillators[C]//Proceedings of the 2003 IEEE International Frequency Control Symposium and PDA Exhibition Jointly with the 17th European Frequency and Time Forum. New York: IEEE, 2003: 405-410.

作者简介



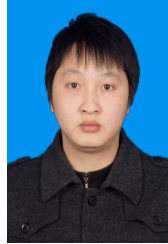
吴懿霖 男,2000年出生,四川德阳人.电子科技大学光电科学与工程学院本科生.主要研究方向为微波光子学.
E-mail: wuyilin@std.uestc.edu.cn



曾珍 女,1994年出生,四川广元人.电子科技大学光电科学与工程学院博士研究生.主要研究方向为微波光子滤波器和光电振荡器.
E-mail: zengzhen94@std.uestc.edu.cn



章令杰 男,1993年出生,浙江嵊州人.电子科技大学光电科学与工程学院博士研究生.主要研究方向为微波光子学.
E-mail: zhanglingjie1993@std.uestc.edu.cn



张旨遥(通讯作者) 男,1983年出生,四川井研人.电子科技大学光电科学与工程学院教授.主要研究方向为光电子技术.
E-mail: zhangzhiyao@uestc.edu.cn



刘永 男,1970年出生,四川富顺人.电子科技大学光电科学与工程学院教授,博士生导师.主要研究方向为光电子技术和微波光子技术.
E-mail: YongLiu@uestc.edu.cn