

谐波锁模光电振荡器 (特邀)

曾 珍, 张旨遥, 章令杰, 张尚剑, 李和平, 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: 提出了一种主动锁模光电振荡器 (OEO) 方案, 可以实现高阶谐波锁模, 从而产生具有高重复频率的微波脉冲信号。在所提方案中, 通过在 OEO 腔内的电光强度调制器直流偏置端口引入一个正弦驱动信号, 当该正弦信号的频率 f_{bias} 为 OEO 环腔自由光谱范围的整数倍 N 时, 实现基频 ($N = 1$) 或谐波 ($N \geq 2$) 锁模, 输出重复频率为 f_{bias} 的微波脉冲信号。实验中分别实现了 10 阶、50 阶和 100 阶谐波锁模, 输出微波脉冲信号的重复频率分别为 360 kHz、1.8 MHz 和 3.6 MHz。该方案为脉冲多普勒雷达等系统应用提供了一种全新的、具备低相噪潜力的微波脉冲信号产生的技术途径。

关键词: 微波光子学; 光电振荡器; 谐波锁模; 微波脉冲信号产生

中图分类号: TN29 文献标志码: A DOI: 10.3788/IRLA20211053

Harmonically mode-locked optoelectronic oscillator (*Invited*)

Zeng Zhen, Zhang Zhiyao, Zhang Lingjie, Zhang Shangjian, Li Heping, 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 611731, China)

Abstract: An actively mode-locked optoelectronic oscillator (OEO) scheme was proposed to generate high-repetition-rate microwave pulse signals based on high-order harmonic mode locking. In the proposed scheme, the bias port of the electro-optic intensity modulator in the cavity was driven by a sinusoidal signal. The frequency of the sinusoidal signal (f_{bias}) was set to be N times of the free spectral range of the OEO cavity to realize fundamental ($N = 1$) and harmonic ($N \geq 2$) mode locking, where the repetition rate of the generated microwave pulse signal was equal to f_{bias} . In the proof-of-concept experiment, 10th-, 50th- and 100th-order harmonic mode locking were realized, where the repetition rate of the generated microwave pulse signal was 360 kHz, 1.8 MHz and 3.6 MHz, respectively. The proposed actively mode-locked OEO scheme provides a new way to generate low-phase-noise microwave pulse signals for pulse Doppler radar application.

Key words: microwave photonics; optoelectronic oscillator; harmonic mode locking; microwave pulse signal generation

收稿日期: 2021-04-15; 修订日期: 2021-05-15

基金项目: 科技部国家重点研发计划项目 (2019YFB2203800); 国家自然科学基金重大科研仪器研制项目 (61927821); 中央高校基本科研业务费面向重大需求类项目 (ZYGX2020ZB012)

作者简介: 曾珍, 女, 博士生, 主要从事光电振荡器相关方向的研究。

通讯作者: 刘永, 男, 教授, 博士生导师, 主要从事高速光电子、微波光子、光电检测等方面的研究工作。

0 引言

光电振荡器 (OEO) 可以在高频段产生具有低相位噪声的微波信号, 近年来获得了各国研究人员的广泛关注^[1]。在传统 OEO 中, 各个模式从噪声独立起振, 纵模之间具有随机的相位关系, 由于增益竞争效应, 只能产生具有单一频率的微波信号。对于脉冲多普勒雷达等应用, 利用 OEO 产生具有低相位噪声的超短微波脉冲信号更具应用价值。

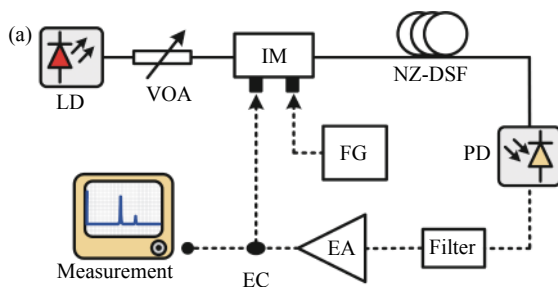
OEO 是一种光电混合的闭合振荡环路, 其结构与环形腔光纤激光器类似。在光纤激光器中, 采用被动或主动锁模技术可以产生超短光脉冲序列^[2-3]。类似地, 将锁模技术引入 OEO 中, 通过对各个纵模实现相位锁定, 打破腔内模式竞争效应的限制, 可以实现超短微波脉冲信号的产生。2011 年, Levy 等人首次提出了基于被动锁模机制的 OEO^[4]。他们在 OEO 腔内中加入饱和射频放大器 (等效于被动锁模激光器中的可饱和吸收体), 产生了载频 650 MHz、5 dB 带宽 440 MHz 的宽带射频脉冲信号。该技术方案的不足之处在于, 射频梳齿的频率间隔由环腔长度决定, 难以实现脉冲信号重复频率的调谐。2021 年, 笔者所在课题组提出了一种基于主动锁模 OEO 的微波脉冲信号产生方案^[5]。通过在 OEO 腔内加入电学幅度调制器, 对环腔内的损耗进行周期性调制, 实现了纵模之间的相位锁定, 产生了重复频率可调谐的超短微波脉冲信号。主动锁模技术的优势在于, 在不改变环腔结构的条件下, 可以通过谐波锁模技术, 获得更大的微波梳齿频率间隔, 即更高的脉冲重复频率。然而, 在该验证系统中, 电学幅度调制器的工作带宽仅为百 kHz 量级, 限制了微波脉冲信号的重复频率。

文中提出了一种能够实现高阶谐波锁模的主动锁模 OEO 方案。通过对 OEO 腔内电光强度调制器的直流偏压点进行周期性调控, 使得环腔中的损耗曲线呈周期性变化, 当调控周期为 OEO 环腔自由光谱范围的整数倍 N 时, 实现基频 ($N = 1$) 或谐波 ($N \geq 2$) 锁模。实验中分别实现了 10 阶、50 阶和 100 阶谐波锁模, 产生的微波脉冲信号重复频率分别为 360 kHz、1.8 MHz 和 3.6 MHz。

1 工作原理

图 1 给出了文中所提出的主动锁模 OEO 系统的

结构及工作原理。主动锁模 OEO 的系统结构与传统 OEO 类似, 其工作原理简述如下: 半导体激光二极管输出窄线宽激光, 由可调谐光衰减器控制进入 OEO 腔内的光功率, 从而实现环腔内增益的精细调节, 保证 OEO 能够进入稳定的锁模状态。直流光进入电光强度调制器 (IM), IM 输出的调制光信号通过一段非零色散位移光纤 (NZ-DSF), 在光电探测器内转换成微波信号, 之后依次经过带通滤波器、低噪声放大器后, 被电耦合器分成两路, 一路用于输出 OEO 的振荡信号, 一路连接至 IM 的射频输入端口, 实现 OEO 闭环。与传统 OEO 不同的是, IM 的偏置端口不再由直流信号驱动, 而是由函数发生器 (FG) 输出的正弦信号进行控制, 该正弦信号实现 OEO 环腔内损耗的周期性调控, 当调控周期为环腔自由光谱范围的整数倍 N 时, 实现主动锁模。



LD: laser diode; VOA: variable optical attenuator; IM: intensity modulator; NZ-DSF: none-zero dispersion shift fiber; PD: photodetector; EA: electronic amplifier; EC: electronic coupler; FG: function generator

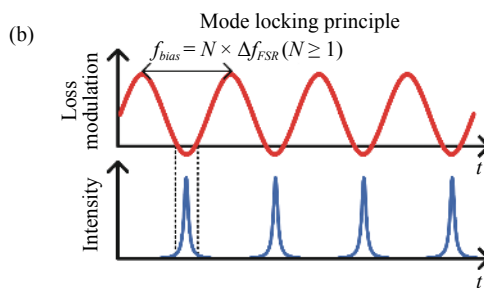


图 1 主动锁模 OEO 系统结构 (a) 及工作原理 (b) 示意图

Fig.1 Schematic diagram of system structure (a) and work principle (b) of the proposed actively mode-locked OEO

为了实现稳定的锁模, 需要通过可调光衰减器控制输入 OEO 环腔的光功率, 并调节 FG 输出的驱动信号电平值, 获得如图 1 所示的周期性损耗变化。当 IM 偏置端口加载的正弦信号频率 f_{bias} 与 OEO 环腔的自由光谱范围 Δf_{FSR} 满足

$$f_{bias} = N \times \Delta f_{FSR} = N \times \frac{c}{nL} \quad (N \geq 1 \text{ 且为整数}) \quad (1)$$

时,腔内的净增益在调制损耗最小值附近大于 0,其余时刻均小于 0,进而产生重复频率 f_{bias} 、周期 $1/f_{bias}$ 的微波脉冲信号。微波脉冲信号的载频由带通滤波器的中心频率决定,脉冲宽度取决于环腔内的净增益谱(主要由带通滤波器的通带宽度决定)。当 $N = 1$ 时,实现基频锁模;当 $N \geq 2$ 时,实现 N 阶谐波锁模。由于在所提方案中采用了控制 IM 的偏置电压来对 OEO 环腔进行损耗调制,相比于使用电学幅度调制器而言^[5],系统结构更加简单,并且可以实现更高阶的谐波锁模,产生重复频率高达数 MHz 的超短微波脉冲信号。

2 实验结果

基于图 1 所示的系统结构,对高阶谐波锁模 OEO 进行了实验验证。实验中,窄线宽激光器的输出中心波长为 1560 nm、功率为 17 dBm,IM 的工作速率为 20 Gb/s,传输光纤为长度 5.5 km 的 NZ-DSF,光电探测器的工作速率为 20 Gb/s、转换效率为 300 V/W,带通滤波器的中心频率为 10 GHz、3 dB 带宽约为 30 MHz,低噪声放大器的工作频段为 1~20 GHz、增益为 25 dB。函数发生器的工作频段为 0~20 MHz,设置其输出为正弦信号,高电平为 4.04 V (对应 IM 的线性偏置点),低电平为 0 V。采用频谱分析仪 (R & S FSU50, 20~50 GHz) 和高速实时示波器 (Tektronix DPO75002 SX, 100 GS/s, 33 GHz) 分别对 OEO 输出的微波脉冲信号频谱和波形进行测量。

OEO 腔内的光纤长度为 5.5 km,对应环腔的自由光谱范围为 36 kHz。将加载在 IM 直流偏置端口的正弦信号频率设置为 360 kHz,实现 10 阶谐波锁模 OEO,其输出频谱如图 2 所示。从图 2 可以看到,OEO 输出了 10 GHz 附近频率间隔为 360 kHz 的微波信号,相较于基频锁模 OEO (频率间隔为 36 kHz),起振模式的频率间隔扩大了 10 倍。需要特别指出的是,由图 2 可以看到在各个振荡的微波梳齿之间,还残留许多功率较高的频率成分,这些频率成分为超模噪声,与主动锁模激光器中的超模噪声具有相似的物理起源^[6-7]。由于在超模噪声中,总会有一组微波信号的频率间隔满足谐波锁模条件,因此超模噪声将同

OEO 输出的振荡信号产生模式竞争,从而影响振荡信号的稳定性。可以通过在谐波锁模 OEO 环腔里引入“Vernier”效应^[6]或者注入锁定技术^[7],实现对超模噪声的有效抑制。除了超模噪声以外,环腔长度的变化也会对锁模状态的稳定性造成影响。为了获得具有低相位噪声的微波脉冲信号,通常需要采用长光纤结构,环境温度的改变会引起较大的 OEO 腔长变化,导致系统失锁,从而影响输出脉冲信号的稳定性。因此,需要通过在主动锁模 OEO 中引入腔长反馈控制^[8],对环腔延迟量进行监控和动态补偿,使系统保持稳定的锁模状态,提高主动锁模 OEO 的长时稳定性。

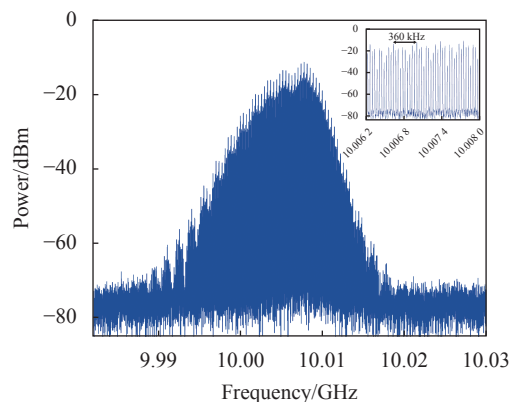


图 2 10 阶谐波锁模 OEO 输出微波信号频谱图

Fig.2 Measured output spectrum of 10th-order harmonically mode-locked OEO

设置函数发生器输出的正弦信号频率分别为 1.8 MHz 和 3.6 MHz,实现了 50 阶和 100 阶谐波锁模 OEO,其输出频谱分别如图 3(a) 和 (b) 所示。从图 3 可以看到,在 50 阶和 100 阶谐波锁模的条件下,振荡信号均出现在 10 GHz 附近,且频率间隔分别为 1.8 MHz 和 3.6 MHz。从实验结果可以看到,相较于采用电学幅度调制器的主动锁模 OEO^[5],所提方案可以产生梳齿间隔为数 MHz 的微波振荡信号,有效地提高了所产生微波脉冲信号的重复频率。需要指出的是,该结构产生微波脉冲信号的重复频率仍受限于 IM 直流偏置端口的响应速率,通过采用级联电光调制器或采用双平行电光调制器,可以进一步提高所产生微波脉冲信号的重复频率。此外,振荡信号的带宽受到 OEO 环腔中带通滤波器带宽的限制,可以通过在 OEO 中采用宽带的带通滤波器进一步扩展振荡信号的频谱宽度。

主动锁模 OEO 产生的一系列等间隔微波频率梳齿在时域内相干叠加,形成微波脉冲序列。图 4 给出了采用高速实时示波器对 10 阶、50 阶和 100 阶谐波锁模 OEO 输出信号的时域波形测量结果。从图 4 可以看到,在 10 阶、50 阶和 100 阶谐波锁模条件下,OEO 分别输出周期为 2.78 μs 、0.56 μs 和 0.28 μs 的微波

脉冲序列,相应的脉冲宽度分别为 0.66 μs 、0.19 μs 和 0.09 μs 。可以通过进一步增大带通滤波器的工作带宽,从而获得脉宽更窄的微波脉冲信号。

在文中所提出的主动锁模 OEO 方案中,带通滤波器的中心频率和 3 dB 带宽均为固定值,因此无法实现振荡信号载频和谱宽的调谐。在下一步研究工作中,可以在 OEO 环腔内引入微波光子滤波结构^[9],从而实现输出微波脉冲信号载频、谱宽以及脉冲宽度的调控,提高系统的调谐性能。此外,文中提出的谐波锁模 OEO 结构简单,可以通过混合集成技术实现激光器、电光调制器、电放大器、带通滤波器等光学和电学器件甚至芯片的高密封装,实现谐波锁模 OEO 的小型化和集成化,从而提升系统的稳定性。

3 结 论

综上所述,文中提出了一种基于主动锁模机制的 OEO 方案,通过采用谐波锁模技术,可以产生高重复频率的微波脉冲信号。与传统 OEO 不同的是,该方案中 IM 的直流偏置端口由频率为 f_{bias} 的正弦信号驱动,当该正弦信号的频率与 OEO 的自由光谱范围满足 N 倍关系 ($N \geq 2$ 且为整数) 时,实现谐波锁模,产生重复频率为 f_{bias} 、脉冲周期为 $1/f_{bias}$ 的微波脉冲序列。谐波锁模 OEO 可以产生高载频、高重频的微波脉冲信号。相较于引入电锁模器件的主动 OEO 方案^[5],文中所提出的方案系统结构更为简单,同时可以实现 MHz 量级的脉冲重复频率。课题组对所提出的谐波锁模 OEO 方案进行了实验验证,在采用长度 5.5 km 的光纤情况下,成功实现了 10 阶、50 阶和 100 阶谐波锁模,输出微波脉冲信号的载波频率为 10 GHz,重复频率分别为 360 kHz、1.8 MHz 和 3.6 MHz。文中提出的谐波锁模 OEO 为脉冲多普勒雷达等系统应用提供了一种全新的、具有低相噪潜力的微波脉冲信号产生技术途径。

参考文献:

[1] Hao Tengfei, Tang Jian, Domenech D, et al. Towards monolithic integration of OEOs: from systems to chips [J]. *Journal of Lightwave Technology*, 2018, 36(19): 4565-4582.
 [2] Matsas V J, Newson T P, Richardson D J, et al. Selfstarting passively mode-locked fiber ring soliton laser exploiting

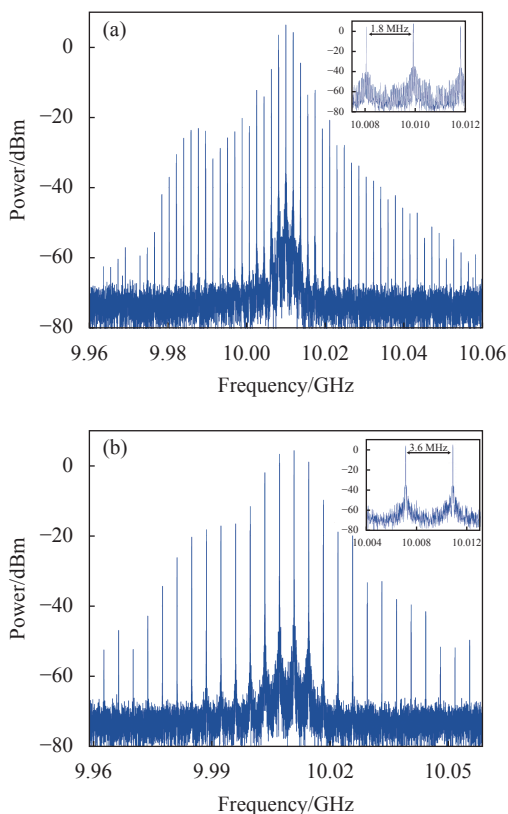


图 3 50 阶和 100 阶谐波锁模 OEO 输出微波信号频谱图

Fig.3 Measured output spectrum of 50th-order and 100th-order harmonically mode-locked OEO

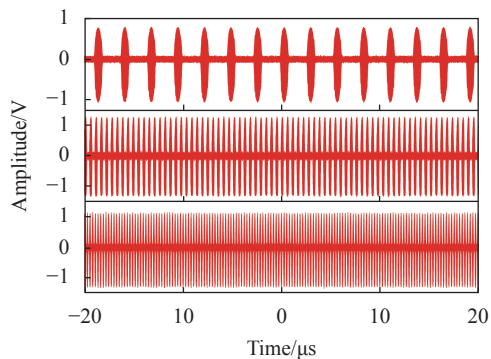


图 4 10 阶(上)、50 阶(中)和 100 阶(下)谐波锁模 OEO 输出微波脉冲信号时域波形

Fig.4 Measured temporal waveforms under 10th-order (the upper), 50th-order (the middle) and 100th-order (the lower) mode locking

- nonlinear polarization rotation [J]. *Electronics Letters*, 1992, 28(15): 1391-1393.
- [3] Li Shenping, Chan K T. Actively mode-locked erbium fiber ring laser using a Fabry-Perot semiconductor modulator as mode locker and tunable filter [J]. *Applied Physics Letters*, 1999, 74(19): 2737-2739.
- [4] Levy E C, Horowitz M. Single-cycle radio-frequency pulse generation by an optoelectronic oscillator [J]. *Optics Express*, 2011, 19(18): 17599-17608.
- [5] Zeng Zhen, Zhang Lingjie, Zhang Yaowen, 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.
- [6] Pottiez O, Deparis O, Kiyon R, et al. Supermode noise of harmonically mode-locked erbium fiber lasers with composite cavity [J]. *IEEE Journal of Quantum Electronics*, 2002, 38(3): 252-259.
- [7] 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.
- [8] Fan Zhiqiang, Qiu Qi, Su Jun, et al. Tunable low-drift spurious-free optoelectronic oscillator based on injection locking and time delay compensation [J]. *Optics Letters*, 2019, 44(3): 535-537.
- [9] Yi Lilin, Wei Wei, Jaouen Y, et al. Polarization-independent rectangular microwave photonic filter based on stimulated Brillouin scattering [J]. *Journal of Lightwave Technology*, 2016, 34(2): 669-675.