

基于直调激光器和全光锁模产生微波频率梳*

旷港¹⁾ 白光富^{1)†} 李源芬¹⁾ 徐树¹⁾ 黄道开¹⁾ 吴庆哲²⁾ 陈跃刚¹⁾

1) (贵州大学物理学院, 贵阳 550025)

2) (贵州大学大数据与信息工程学院, 贵阳 550025)

(2025年9月8日收到; 2025年10月27日收到修改稿)

本文提出并验证了一种基于直调激光器与全光锁模产生微波频率梳的方案. 理论分析表明, 通过调节光纤环形腔的参数, 可对直调激光器不同动力学态下的模式实现谐波锁模或有理数谐波锁模, 从而获得梳间距可调节的频率梳. 在此基础上进行实验验证, 直调激光器在不同频率与幅度的正弦信号的调制下, 可以激发出多种典型动力学态, 这些动力学态可在环形激光器腔内实现全光锁模, 产生频率梳. 在平坦度为 ± 5 dB的标准下, 不同动力学态作为种子信号, 可获得带宽为 13, 15, 19.5, 19.8 和 22 GHz 的频率梳; 通过直调激光器与全光锁模的有效结合, 梳间距的连续可调谐范围可达 200 MHz—3 GHz; 生成的所有微波频率梳一阶梳线的单边带相位噪声测量值均低于 -100 dBc/Hz@10 kHz. 理论分析和实验结果表明, 该方案调制信号的参数调节灵活, 且所生成的微波频率梳在平坦性、带宽及调谐性方面均表现出显著优势.

关键词: 直调激光器, 动力学态, 全光锁模, 微波频率梳**DOI:** 10.7498/aps.75.20251232**CSTR:** 32037.14.aps.75.20251232

1 引言

微波频率梳 (MFC) 由一系列频率间隔相等、相位高度相干的离散频率分量构成. MFC 具有丰富的离散梳齿频率分量, 各分量具有稳定的相位关系, 在光纤传感^[1,2] 中将梳齿频移映射为微扰量, 实现高灵敏度分布式测量; 在雷达^[3] 中以超低相噪本振与步进频尺协同完成毫米级测距与高精度测速; 在无线通信^[4] 中作为宽带多载波源, 显著提升数据速率与系统容量; 在精密计量^[5] 中可以用于超高精度频率与时间溯源. 因此高性能 MFC 的生成技术是这些重要应用的关键. 可以通过电域或者光域方式产生 MFC. 电域方式主要利用电子器件的非线性特性来生成 MFC^[2,6,7], 但受限于电子器件

带宽, 导致所产生的 MFC 带宽较窄, 难以满足高频宽带应用的需求. 光域方式通过微波光子技术产生 MFC, 凭借带宽大、低损耗、低相位噪声及抗电磁干扰等优势, 为 MFC 的生成提供了更具吸引力的解决方案.

光域方式产生 MFC 主要包括光学外调制^[8,9]、光电振荡器 (OEO)^[10-15]、光注入半导体激光器^[16-19] 和直调激光器 (DML)^[20]. 光学外调制方法是通过连续光进行强度调制或相位调制, 从而生成一系列等间隔的频率分量. Gao 等^[9] 基于光外差法产生多频微波源, 通过对光载波强度调制与受激布里渊散射拍频, 在带宽为 9 GHz 的范围内生成了 20 个梳齿的 MFC, 但仅有一半梳线满足平坦性为 ± 10 dB 的标准, 平坦性和梳线数量受到限制, 且生成的 MFC 存在大量杂散信号. 在基于 OEO 的方法中,

* 贵州省科技计划 (批准号: 黔科合基础-ZK[2024] 重点 001)、国家重点研发计划 (批准号: 2021YFB2206300)、国家自然科学基金 (批准号: 61965004) 和贵州大学引进人才科研项目 (批准号: 贵大人基合字 [2018-14]) 资助的课题.

† 通信作者. E-mail: baiguangfu123@163.com

利用 OEO 环路的共振特性抑制噪声和锁模, 产生稳定且间距相同的频率分量. 但由于受到电带通滤波器 (EBPF) 带宽和频响不均匀限制, 产生的 MFC 平坦性并不理想. Yang 等^[11]采用主动锁模 OEO, 通过谐波模式锁定, 在 5—9 GHz 的频段内获得梳间距相同的梳线, 但梳齿幅度明显不平坦; Tang 等^[13]提出一种新颖的双频主动锁模 OEO, 通过双频锁模, 获得了 73 条频率稳定的梳线, 但当平坦性为 ± 10 dB 时, 带宽仅为 50 MHz. 基于半导体激光器的方案是利用半导体激光器丰富的非线性特性来实现 MFC 的产生, 其优势在于结构简单, 不需要额外的调制器, 易于集成. Chan 等^[14]用光电反馈半导体激光器产生 MFC, 在 3 GHz 带宽范围内有幅度不均匀的梳齿分量产生, 梳齿间距为 0.33 GHz. 为了摆脱反馈回路中电子器件的带宽限制, Juan 等^[16]通过重复脉冲信号注入半导体激光器, 得到了 ± 5 dB 功率平坦度下带宽为 20 GHz 的 MFC, 然而梳间距被外部种子信号锁定在 1.2 GHz, 调谐性受到限制. Gao 等^[20]利用 DML 的周期性弛豫振荡产生可调 MFC, 在 ± 2 dB 功率平坦度下, 特定频段内带宽可达 15 GHz, 调谐范围为 0.5—3 GHz, 但其低阶分量会严重影响 MFC 的平坦性. 该方法仅局限于通过非线性调制的单一动力学态来产生 MFC, 对系统调制参数具有较高的要求, 限制了其应用范围.

本文提出了一种基于 DML 与全光锁模产生 MFC 的方案, 并对该方案进行理论分析与实验验证. DML 输出的不同动力学态作为种子信号进入环形激光器 (FRL), 与环内的连续光在半导体光放大器 (SOA) 发生交叉增益调制 (XGM), 通过光纤环形腔可对直调激光器不同动力学态下的模式实现谐波锁模或有理数谐波锁模, 从而获得梳间距可调谐的 MFC. 在平坦度为 ± 5 dB 的标准下, 5 种动力学态产生的 MFC 对应带宽分别为 13, 15, 19.5, 19.8 和 22 GHz; 在 200 MHz—3 GHz 范围内实现连续可调; 所生成的 MFC 在一阶梳线的单边带相位噪声测量值均低于 -100 dBc/Hz@10 kHz. 相比于已报道的基于 DML 产生 MFC 的方案, 该方案的调制信号具有很高的灵活性, 无论是连续周期信号还是周期脉冲, 种子信号均可通过锁模生成 MFC, 并且所生成的 MFC 在频谱平坦性、带宽范围及调谐性方面均表现出显著优势, 拓宽了 MFC 在相关领域的应用范围.

2 实验结构装置与工作原理

图 1 是基于 DML 和全光锁模产生 MFC 的结构示意图. 该结构包括种子信号产生和全光锁模两个模块, 种子信号产生模块由射频信号源 (RF)、直调激光器 (DML) 和光可变衰减器 (VOA1) 组成; 全光锁模模块是由环形器 (Cir)、偏振控制器 (PC1, PC2)、半导体光放大器 (SOA)、光延迟线 (ODL)、可调光滤波器 (TOF)、掺铒光纤放大器 (EDFA)、光耦合器 (OC)、光可变衰减器 (VOA2) 和光隔离器 (ISO) 组成的光反馈环路. 种子信号产生模块中, 射频信号源输出的正弦信号直接调制 DML, 注入的载流子与有源层中发射的光子之间的耦合特性会影响 DML 的动力学^[21], 通过改变 DML 的调制信号可以使其激发不同的动力学态从而得到不同的种子信号. 全光锁模模块中, 反馈回路是一个典型的 FRL. 当腔内的激光达到阈值条件时, FRL 会生成一组等间隔的腔模, 相邻腔模之间的频率间隔为 $f_{\text{FSR}} = c/(nL)$, 其中 c 代表真空中的光速, n 代表腔内的有效折射率, L 代表环形腔的长度. DML 产生的种子信号与 FRL 产生的连续光在 SOA 中发生 XGM, 种子信号被调制到连

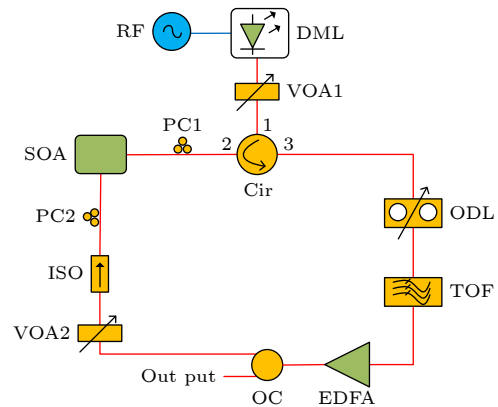


图 1 基于 DML 与全光锁模产生可调谐 MFC 的结构图 (RF, 射频信号源; DML, 直调激光器; VOA, 可变光衰减器; Cir, 光环行器; PC, 偏振控制器; SOA, 半导体光放大器; ODL, 光延迟线; TOF, 可调光滤波器; EDFA, 掺铒光纤放大器; OC, 光耦合器; ISO, 光隔离器)

Fig. 1. Schematic of tunable MFCs generated by DML and all-optical mode-locking. RF, radio frequency source; DML, directly modulated laser; VOA, variable optical attenuator; Cir, optical circulator; PC, polarization controller; SOA, semiconductor optical amplifier; ODL, optical delay line; TOF, tunable optical filter; EDFA, erbium-doped fiber amplifier; OC, optical coupler; ISO, optical isolator.

续光上以顺时针方向进行振荡. 种子信号会持续调制腔模, 根据调制信号 f_m 和 f_{FSR} 之间的关系, 可以实现全光锁模, 其中包括谐波锁模或有理数谐波锁模^[22-24].

在谐波锁模情况下, f_m 是 f_{FSR} 的 n 倍 (n 为整数), $a_q^{(k)}$ 是当光走过第 k 圈时, 第 q 模式的振幅, 其中 q 和 k 均为整数, 调制因子为

$$M [1 - \cos(2\pi f_m t)], \quad (1)$$

其中 M 为调制深度, $a_q^{(k)}$ 可以表示为^[22]

$$a_q^{(k+1)} = a_q^{(k)} + g \left[1 - \frac{(2\pi q f_{\text{FSR}})^2}{\Omega_g^2} \right] a_q^{(k)} - l a_q^{(k)} + \frac{M}{2} (a_{q+n}^{(k)} - 2a_q^{(k)} + a_{q-n}^{(k)}), \quad (2)$$

其中 g 为增益常数, l 为损耗常数, Ω_g 为增益带宽. 当振荡带宽足够宽时, 可得到稳态解为

$$a(t) = \frac{\sqrt{2\pi}}{\tau} A \exp\left(\frac{-t^2}{2\tau^2}\right), \quad (3)$$

其中 A 是常数, $\tau = (2g/M)^{1/4} [1/(2\pi f_m \Omega_g)]^{1/2}$. 方程 (3) 表明, 锁模使系统产生脉冲序列. 在方程 (2) 中, 当 q 被替换为 $q+1, q+2, \dots, q+n-1$, 方程的形式保持不变. 因此, 腔内存在 n 组模式, 在时域中, n 个脉冲同时在长度为 L 的腔内循环. 因此, 产生的重复频率被重新定义为

$$f_p = n f_{\text{FSR}} = f_m. \quad (4)$$

对于有理数谐波锁模, f_m 为 $(n + \frac{1}{P})$ 倍的 f_{FSR} , 其中 P 为整数. 在这种情况下, 方程 (2) 可表示为

$$a_q^{(k+1)} = a_q^{(k)} + g \left[1 - \frac{(2\pi q f_{\text{FSR}})^2}{\Omega_g^2} \right] a_q^{(k)} - l a_q^{(k)} + \frac{M}{2} (a_{q+n+1/p}^{(k)} - 2a_q^{(k)} + a_{q-n-1/p}^{(k)}), \quad (5)$$

由于 $(q \pm n \pm \frac{1}{p})$ 阶的模式不能在长度为 L 的环形腔中存在, 把腔长等效替代为 pL , 方程 (5) 被改写:

$$a_{q'}^{(k+1)} = a_{q'}^{(k)} + g \left[1 - \frac{(2\pi q' f_{\text{FSR}})^2}{\Omega_g^2} \right] a_{q'}^{(k)} - l a_{q'}^{(k)} + \frac{M}{2} (a_{q'+np+1}^{(k)} - 2a_{q'}^{(k)} + a_{q'-np-1}^{(k)}), \quad (6)$$

其中, q' 阶模式能被耦合成 $(q' + np + 1)$ 和 $(q' - np - 1)$ 阶模式. 与方程 (2) 相比, 此时有 $(np + 1)$ 组模式存在于环形腔内. 这意味着 $(np + 1)$ 个脉冲同时在长度为 L 的腔体内产生, 因此重复频率可表

示为

$$f_p = (np + 1) f_{\text{FSR}} = p f_m. \quad (7)$$

方程 (4) 和方程 (7) 表明通过调制实现了谐波锁模和有理数谐波锁模, 产生 MFC.

3 实验结果与讨论

基于图 1 所示实验结构开展实验. DML(Beijing Wave Optics, DML-1550-20-10-FA) 的偏置电流为 13 mA ($1.86 I_{\text{th}}$, I_{th} 为阈值电流), 此时其弛豫振荡频率为 8.9 GHz; 射频信号源 (Keysight, E8257D) 输出的正弦信号激发 DML 产生不同的动力学态; SOA(CIP, SOA-XN-OEC-1550 04015) 的偏置电流为 150 mA, 工作温度由温控平台维持在 25 °C; 系统中的两个 PC 和两个 ATT 分别调节两束光的偏振态和光功率以保证 XGM 的效果; 腔内的 ISO 确保光调制之后的信号光能沿顺时针方向运行; ODL, TOF 和 EDFA 分别起到匹配纵模相位、滤除噪声和补偿损耗的作用; 利用 ESA(Agilent Technologies, N9010A) 和 OSC(Agilent Technologies, 86100D) 对输出结果进行观测与分析.

3.1 谐波锁模验证

图 2 展示了全光锁模的实验结果. 实验中设置 RF 的频率和功率分别为 3 GHz, 18 dBm, 此时 MFC 相邻梳线间隔较大, 便于清晰地观察锁模效果. 图 2(a) 为 FLR 独立工作状态下的频谱, 腔内产生了自由光谱范围 (f_{FSR}) 为 6.3 MHz 的大量腔模, 所对应的腔长为 32 m. 调节 PCs, ATTs 优化种子信号与腔模的 XGM 效果. 调节 ODL 使得 $f_m = 476 f_{\text{FSR}}$ 时, 形成了图 2(b) 所示的谐波锁模, 产生梳间距为 $f_m = 3$ GHz 的 MFC. 进一步调节 ODL, 使 f_m 变为 f_{FSR} 的 $(476 + 1/2)$ 倍, 即可产生二阶有理数谐波锁模, 其中二倍频 ($2 f_m$) 的梳线的幅度明显高于其相邻梳线, 且所有满足 $2 f_m$ 整数倍的梳线也高于各自相邻的梳线, 如图 2(c) 所示. 这种幅度差异是由于在锁模过程中, 特定倍频的梳线在模式竞争中占优势. 类似地, 图 2(d) 展示了三阶有理数谐波锁模, 也呈现出了相同的规律, 即 $3 f_m$ 的整数倍梳线的幅度显著高于相邻梳线. 这表明该结构可以通过谐波锁模或有理数谐波锁模产生 MFC.

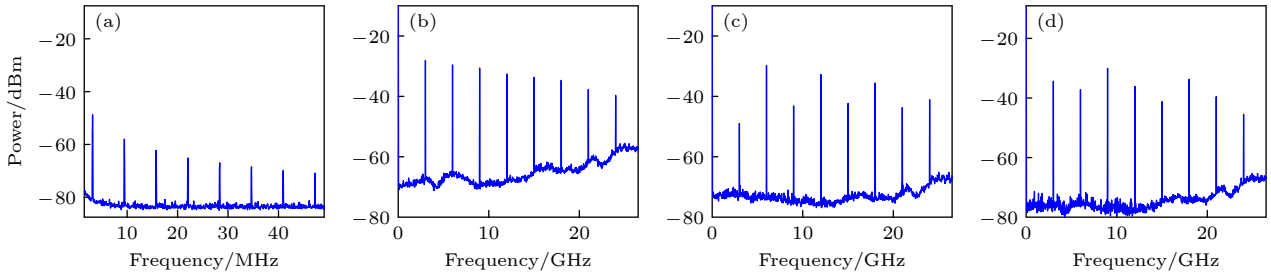


图2 全光锁模的实验验证 (a) 测量FRL的自由光谱范围(FSR); (b) 谐波锁模; (c) 二阶有理数谐波锁模; (d) 三阶有理数谐波锁模

Fig. 2. Experimental verification of all-optical mode-locking: (a) The measured free spectral range (FSR) of the FRL; (b) Harmonic mode-locking; (c) second-order rational harmonic mode-locking; (d) third-order rational harmonic mode-locking.

3.2 不同动力学态作为种子信号产生MFC

图3展示了不同动力学态作为种子信号产生的MFC. 第1列和第2列分别为种子信号的时域波形与频谱; 第3列和第4列分别为系统全光锁模输出的时域波形与频谱. 当RF的频率为1 GHz, 功率为0 dBm时, DML的输出波形如图3(a1)所示, 其具有规律性和对称性, 这表明此时DML输出的信号为正弦信号(SS), 处于线性调制区域^[20]. 其频谱如图3(a2)所示, 此时产生的频率分量仅集中在6—12 GHz的频段附近, 但与一阶分量相比其功率较低. 该种子信号进入全光锁模模块, 通过全光锁模可得到比较稳定的脉冲, 如图3(a3)所示, 相应的频谱如图3(a4), 在 ± 5 dBm的平坦度标准下, MFC的带宽为13 GHz.

RF的频率为1.5 GHz, 功率为1.1 dBm时, DML产生的种子信号为带次谐波的连续周期信号(CPSSH), 如图3(b1)所示. 每个调制周期都发生了弛豫振荡, 产生的次谐波导致波形不对称, 表明此时已为非线性调制^[21]. 对应的频谱为图3(b2), 此时高阶分量对应的功率同样较低. 经过锁模之后得到较稳定的脉冲, 频率分量增多, 最终得到的MFC带宽为15 GHz, 如图3(b3), (b4)所示.

RF的频率为1.8 GHz, 功率为3.4 dBm时, 种子信号为带两个次谐波的连续周期信号(CPS2SH), 如图3(c1)所示. 此时, 调制深度增大使DML的非线性效应显著增强, 在一个连续周期里出现了两个弛豫振荡峰, 即一个周期里含有两个次谐波. 图3(c2)为CPS2SH的频谱图. 经过锁模之后得到的脉冲与频谱如图3(c3), (c4)所示, 与锁模前相比, 通过锁模后不仅产生了大量的高频分量, 而且整体频率分量的幅度均得到提升, 最终产生了带宽

为19.8 GHz的MFC.

当RF的频率为1.5 GHz, 功率为5.8 dBm时, 此时DML输出的是周期脉冲. 如图3(d1)所示, DML输出的波形单个周期内呈现多峰脉冲, 这一现象与Hemery等的实验结果一致^[25]. 此时的非线性效应相较于产生连续周期信号时更为显著, 种子信号为带有两个次谐波的周期脉冲(PP2SH). 图3(d2)为对应的频谱, 非线性效应的增强导致信号的高阶分量明显增多. 图3(d3), (d4)展示了最终锁模得到的MFC的波形和频谱, 其带宽为19.5 GHz.

当RF的频率为2 GHz, 功率为18 dBm时, 种子信号为带次谐波的周期脉冲(PPSH), 此时DML的非线性效应更为明显, 具体表现为次谐波与基波波峰的幅度差距增大, 如图3(e1)所示. 在频域中可以看到此时DML产生的种子信号的高阶分量最多, 该信号可以看作MFC, 但低频梳线的幅度远高于高频梳线. 相比之下, 锁模后的MFC整体平坦性得到显著提升, 如图3(e4)所示, 最终产生的MFC带宽为22 GHz.

对比图3中不同种子信号的波形与频谱, 结果表明随着调制信号幅度的增大, DML会呈现出不同的非线性动力学特性, 在时域上表现为次谐波的生成与变化; 在频域上则体现为高阶频率分量的增大. 对比不同种子信号产生的MFC时域波形与频谱结果可以得出, 种子信号产生模块可以产生不同的动力学态作为种子信号, 无论是连续周期信号还是周期脉冲, 均可通过全光锁模得到一组脉冲序列, 生成梳间距为调制频率的高性能MFC. 这表明本方案可适用于不同的调制信号, 降低了DML的调制参数要求, 能适应不同的应用环境.

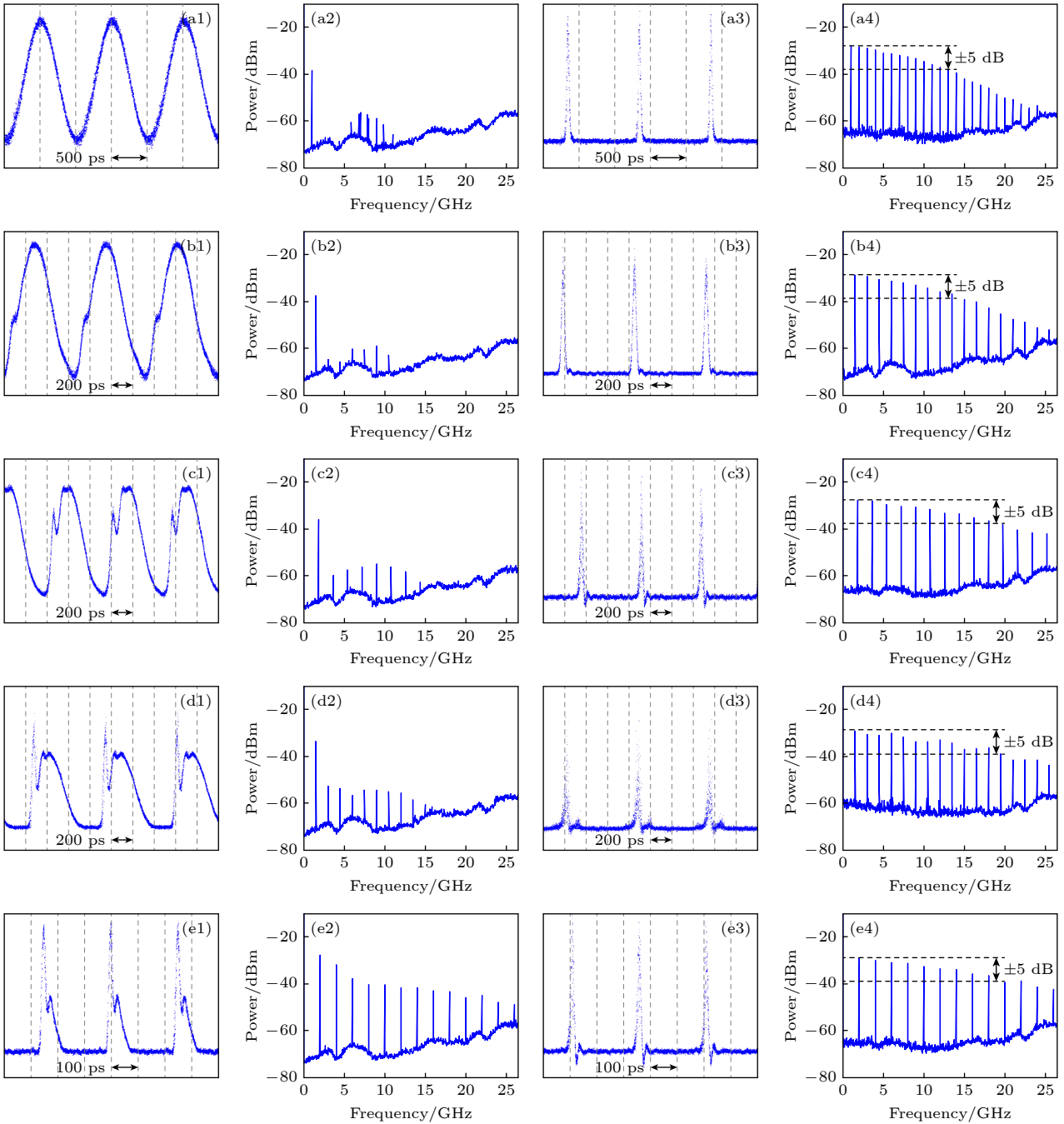


图3 不同动力学态作为种子信号产生MFC (a) SS; (b) CPSSH; (c) CPS2SH; (d) PP2SH; (e) PPSH. 第1列为DML输出的时间序列, 第2列为DML输出的频谱, 第3列为系统输出的时间序列, 第4列为系统输出的频谱

Fig. 3. The MFCs generated by using different dynamical states as the seed signals: (a) SS; (b) CPSSH; (c) CPS2SH; (d) PP2SH; (e) PPSH. Column 1 represents the time series at the DML output; column 2 represents corresponding frequency spectrum at the DML output; column 3 represents the time series at the system output; column 4 represents corresponding frequency spectrum at the system output.

3.3 调谐性

将种子信号设定为PPSH, 改变RF频率可以对MFC的梳间距进行调谐, 当RF从200 MHz逐渐变化到3 GHz时, MFC的梳间距变化情况如图4所示. 由于所使用的频谱仪的带宽限制(全带宽为26.49 GHz), RF的频率太高会导致MFC的

梳线数目太少, 所以最高的RF频率设置为3 GHz; 当RF频率小于100 MHz时, 实验测得MFC的带宽均不足3 GHz, 而带宽小于3 GHz的MFC已在OEO中被广泛研究. 鉴于本文旨在探究生成大带宽的MFC, 故将最小RF频率设定为200 MHz. 当种子信号为其他动力学态时, 由于参数范围的限

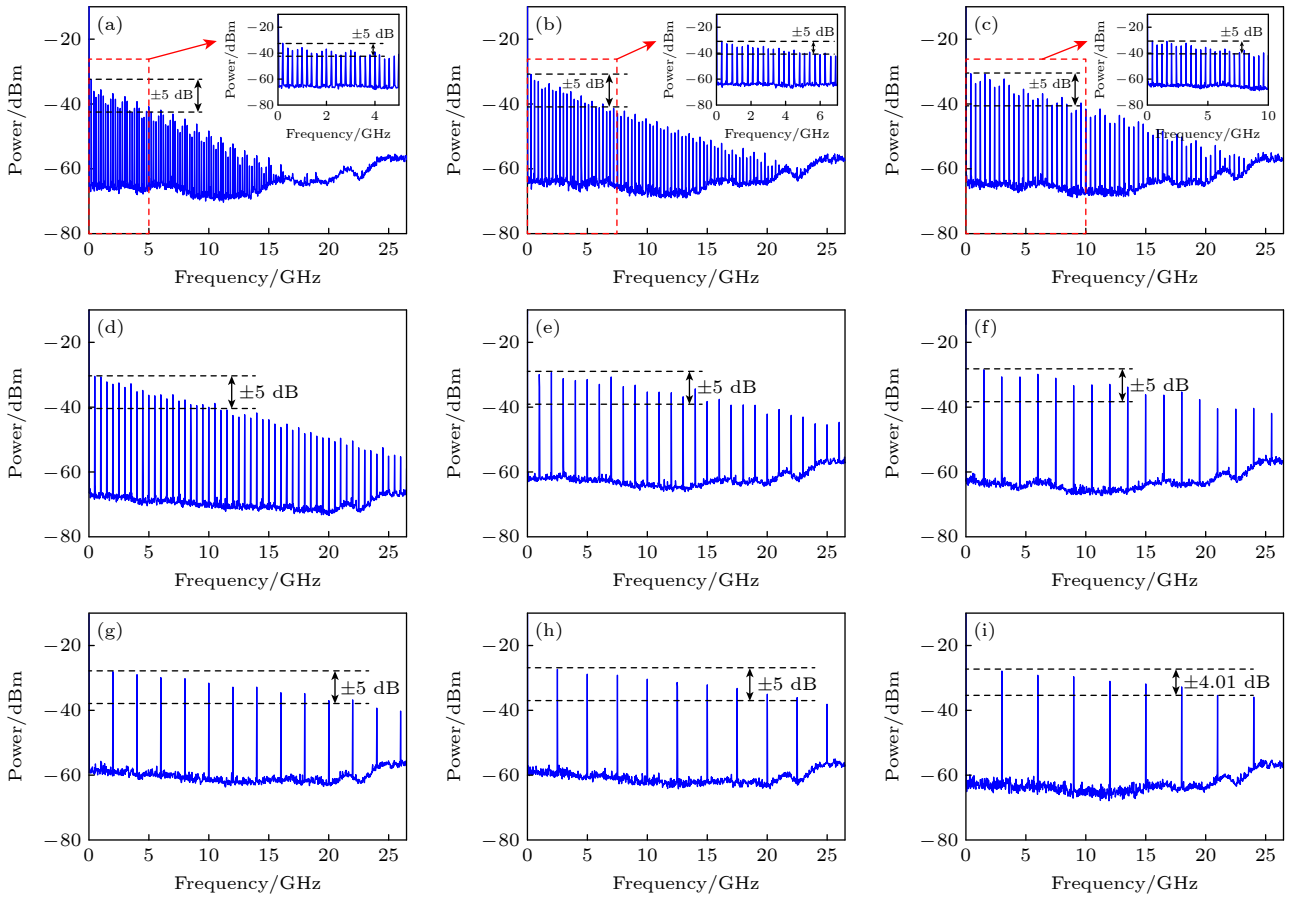


图4 不同RF信号产生的MFC的频谱 (a) 200 MHz, 插图为0—5 GHz放大图; (b) 300 MHz, 插图为0—7 GHz放大图; (c) 400 MHz, 插图为0—10 GHz放大图; (d) 500 MHz; (e) 1 GHz; (f) 1.5 GHz; (g) 2 GHz; (h) 2.5 GHz; (i) 3 GHz

Fig. 4. Spectra of MFCs generated by different RF signals: (a) 200 MHz, the illustration is an enlarged view from 0 to 5 GHz; (b) 300 MHz, the illustration is an enlarged view from 0 to 7 GHz; (c) 400 MHz, the illustration is an enlarged view from 0 to 10 GHz; (d) 500 MHz; (e) 1 GHz; (f) 1.5 GHz; (g) 2 GHz; (h) 2.5 GHz; (i) 3 GHz.

制, 单个动力学态产生的MFC调谐范围会小于上述结果, 但通过不同动力学态的组合, MFC的调谐性至少可以覆盖200 MHz—3 GHz. Gao等^[20]提出的方案中, 当RF较小时, DML无法有效激发弛豫振荡和非线性效应作用, 高阶分量的幅度迅速衰减, 导致产生的MFC性能较差, 所以调谐范围仅为0.5—3 GHz. 相比之下, 本方案的调谐范围增大到200 MHz—3 GHz, 这是因为在FRL的锁模作用下, 此方案在线性调制下也能直接输出较多频率分量.

3.4 相位噪声与稳定性

由于MFC存在梳间距的差异, 统一分析所有MFC一阶梳线的相位噪声与稳定性. 图5(a)为不同动力学态作为种子信号产生的MFC的相位噪声, 在10 kHz偏移处的相位噪声均低于-100 dBc/Hz, 所有动力学态产生的MFC均保持低噪声水平.

Zhao等^[19]提出了一种基于集成互耦合分布式反馈激光器产生MFC的全光方案, 其测得的一阶梳线相位噪声为-101.11 dBc/Hz@10 kHz, 与本方案结果相当. 然而, 该结构在 ± 5 dBm的功率标准下, 未能将一阶梳线纳入带宽计算范围. 相比之下, 本方案得益于FRL的振荡回路, 使振荡模式能够在腔内维持稳定地振荡, 从而保证所产生MFC各梳线功率保持在相近水平, 因此, 可以直接从一阶梳线计算MFC的有效带宽. 此外, 在10 min内, 对不同动力学态产生的MFC稳定性进行了测量, 限于篇幅, 本文仅展示了具有代表性的线性和非线性两种动力学态——SS和PPSH为种子信号时, 所生成的MFC一阶梳齿的实验结果, 如图5(b)所示. 可以看到, 以峰值功率下降10 dB为准计算频率漂移时, MFC的漂移范围分别为5.45 Hz和2.75 Hz. 由于功率抖动在图中难以直接体现, 实验测得两者的最大功率抖动分别为0.49 dB和0.15 dB.

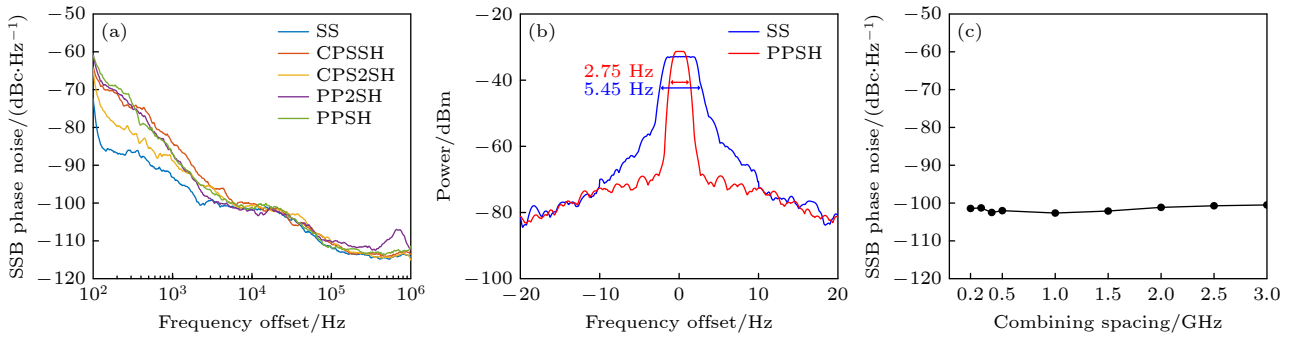


图 5 MFC 的相位噪声与稳定性 (a) 不同动力学态产生的 MFC 的相位噪声; (b) 动力学态为 SS 与 PPSH 时, 产生的 MFC 的一阶梳线的稳定性; (c) 种子信号为 PPSH 时, 不同梳间距的 MFC 在 10 kHz 偏移处的一阶梳线相位噪声

Fig. 5. The phase noise diagram of MFCs: (a) Phase noise of MFCs generated under different dynamical states; (b) the stability of the first comb line of the MFCs when the dynamical states are SS and PPSH; (c) phase noise of the first comb line at a 10 kHz offset for MFCs with various comb spacings when the seed signal is PPSH.

结果表明, 该结构具有良好的频率与功率稳定性. 该系统较好的稳定性得益于系统的全光锁模机制. 对比两者的稳定性可以发现, PPSH 状态下的系统更加稳定, 这是因为当种子信号为 PPSH 时, 调制 DML 的调制深度较深, 激光器获得更大的注入电流, 受激辐射过程占主导作用, 使系统进入更稳定的输出状态, 载流子噪声扰动得到有效抑制, 从而使生成的 MFC 在较长时间内保持较小的频率漂移和功率抖动. 最后, 考察不同梳间距在一阶梳线的相位噪声, 图 5(c) 展示了种子信号为 PPSH 时, 相位噪声随 MFC 梳间距 (200 MHz—3 GHz) 的变化, 变化趋势维持在约 -101 dBc/Hz@10 kHz 的水平. 其他种子信号也有类似的结果, 限于篇幅, 这里不展示. Gao 等^[20]提出的方案中, 当 RF 频率小于 0.7 GHz 时, MFC 的相位噪声与其他梳间距的 MFC 的相位噪声存在较大差异. 相比之下, 本方案由于锁模机制和 FRL 构成的光反馈回路的作用, 使 MFC 的各纵模在模式竞争中占优并在腔内维持稳定的振荡, 有效抑制了相位噪声的积累. 使得本方案在实现多梳间距输出的同时, 各梳间距对应的 MFC 仍表现出良好的相位噪声一致性.

4 结 论

本文提出了一种基于 DML 与全光锁模产生 MFC 的方案, 在理论分析的基础上并对该方案进行实验验证. 通过改变调制 DML 的 RF 信号参数, 可获得多种动力学态作为产生 MFC 的种子信号, 通过全光锁模均可产生 MFC. 使用 5 种典型动力学态作为种子信号, 经过全光锁模可产生平坦性

为 ± 5 dB, 带宽分别为 13, 15, 19.5, 19.8 和 22 GHz 的 MFC, 其在 200 MHz—3 GHz 范围内可以连续调谐, 一阶梳线的单边带相位噪声测量值均低于 -100 dBc/Hz@10 kHz. 实验结果表明, 该方案能适应多种调制信号, 所生成的 MFC 在频谱平坦性、带宽范围及调谐性方面均表现出显著优势, 且不需要额外的调制器, 为 MFC 的实际应用提供了更强的灵活性, 进一步拓宽了 MFC 在相关领域的应用范围.

参考文献

- [1] Xu Z W, Shu X W 2019 *J. Lightwave Technol.* **37** 3503
- [2] Shin J, Ryu Y, Miri M A, Shim S B, Choi H, Alù A, Suh J, Cha J 2022 *Nano Lett.* **22** 5459
- [3] Zhang L H, Liu Z K, Liu B, Zhang Z Y, Guo G C, Ding D S, Shi B S 2022 *Phys. Rev. Appl.* **18** 014033
- [4] Liu Q H, Mei J X, Wang J D, Zhang F M, Qu X H 2024 *Acta Phys. Sin.* **73** 044204 (in Chinese) [刘琪华, 梅佳雪, 王金栋, 张福民, 曲兴华 2024 *物理学报* **73** 044204]
- [5] Picqué N, Hänsch T W 2019 *Nat. Photonics* **13** 146
- [6] Wang S P, Chen Z, Li T F 2021 *Chin. Phys. B* **30** 048501
- [7] Wu S S, Liu Y L, Liu Q C, Wang S P, Chen Z, Li T F 2022 *Phys. Rev. Lett.* **128** 153901
- [8] Wu D X, Xue X X, Li S Y, Zheng X P, Xiao X D, Zha Y, Zhou B K 2017 *Opt. Express* **25** 14516
- [9] Gao S, Gao Y, He S 2010 *Electron. Lett.* **46** 236
- [10] Ma Y N, Huang T T, Wang W R, Song K C 2018 *Acta Phys. Sin.* **67** 238401 (in Chinese) [麻艳娜, 黄添添, 王文睿, 宋开臣 2018 *物理学报* **67** 238401]
- [11] Yang B, Zhao H Y, Cao Z Z, Yang S, Zhai Y R, Ou J, Chi H 2020 *Opt. Express* **28** 33220
- [12] Wang Z Y, Wu R H, Li B, Guo J P, Liu H Z 2023 *Opt. Laser Technol.* **162** 109253
- [13] Tang H Y, Kong Z X, Li F P, Chen X Y, Li M, Zhu N H, Li W 2024 *J. Lightwave Technol.* **42** 5522
- [14] Chan S C, Xia G Q, Liu J M 2007 *Opt. Lett.* **32** 1917
- [15] Zhou P, Zhang R H, Zhu J, Li N Q 2022 *Acta Phys. Sin.* **71** 214204 (in Chinese) [周沛, 张仁恒, 朱尖, 李念强 2022 *物理学*

- 报 71 214204]
- [16] Juan Y S, Lin F Y 2009 *Opt. Lett.* **34** 1636
- [17] Zhuang J P, Li X Z, Li S S, Chan S C 2016 *Opt. Lett.* **41** 5764
- [18] Li Y N, Fan L, Xia G Q, Wu Z M 2017 *IEEE Photonics J.* **9** 5502607
- [19] Zhao W, Mao Y F, Li Y B, Chen G C, Lu D, Kan Q, Zhao L J 2020 *IEEE Photonics Technol. Lett.* **32** 1407
- [20] Gao T C, Zhang Y L, Li J C, Li S H, Zhang Z Y, Zhang S J, Liu Y 2024 *Opt. Laser Technol.* **170** 110295
- [21] Ahmed M, El-Lafi A 2008 *Opt. Laser Technol.* **40** 809
- [22] Das P, Kaechele W, Theimer J P, Pirich A R 1997 *Photonic Process. Technol. Appl.* **3075** 21
- [23] Wu C, Dutta N K 2000 *IEEE J. Quantum Electron.* **36** 145
- [24] Zi Y J, Jiang Y, Ma C, Bai G F, Jia Z R, Wu T W, Huang F Q 2015 *IEEE Photonics J.* **7** 1501309
- [25] Hemery E, Chusseau L, Lourtioz J M 1990 *IEEE J. Quantum Electron.* **26** 633

Generation of microwave frequency combs based on directly modulated laser and all-optical mode-locking*

KUANG Gang¹⁾ BAI Guangfu^{1)†} LI Yuanfen¹⁾ XU Shu¹⁾ HUANG Daokai¹⁾
WU Qingzhe²⁾ CHEN Yuegang¹⁾

¹⁾ (College of Physics, Guizhou University, Guiyang 550025, China)

²⁾ (College of Big Data and Information Engineering, Guizhou University, Guiyang 550025, China)

(Received 8 September 2025; revised manuscript received 27 October 2025)

Abstract

In this paper, a novel scheme is proposed and experimentally demonstrated. It is based on a directly modulated laser (DML) and all-optical mode-locking for generating tunable microwave frequency combs (MFCs). Theoretical analysis reveals that harmonic or rational harmonic mode-locking can be achieved by adjusting the parameters of the fiber ring cavity, which enables the generation of MFCs with adjustable comb spacing. Based on this, experimental verification shows that the DML can be driven to exhibit various typical dynamical states under sinusoidal modulation with different frequencies and amplitudes. These states serve as seeding signals that subsequently undergo all-optical mode-locking within the ring laser cavity, resulting in the generation of MFCs. The bandwidths of the MFCs are 13, 15, 19.5, 19.8, and 22 GHz, respectively, all of which satisfy the ± 5 dB flatness criterion. A continuously tunable comb-spacing range of 200 MHz to 3 GHz is attained through the effective combination of the DML and all-optical mode-locking. The single-sideband (SSB) phase noise of the first comb line remains below -100 dBc/Hz at a 10 kHz offset. Theoretical analysis and experimental results demonstrate that the modulated signals of the proposed scheme support flexible parameter tuning over a wide range. Furthermore, the generated MFCs have remarkable advantages in flatness, bandwidth, and tunability.

Keywords: directly modulated laser, dynamic states, all-optical mode-locking, microwave frequency comb

DOI: [10.7498/aps.75.20251232](https://doi.org/10.7498/aps.75.20251232)

CSTR: [32037.14.aps.75.20251232](https://cstr.cn/32037.14.aps.75.20251232)

* Project supported by the Scientific and Technological Project of Guizhou Province, China (Grant No. Qian Ke He Ji Chu-ZK[2024]-Key Project-001), the National Key Research and Development Program of China (Grant No. 2021YFB2206300), the National Natural Science Foundation of China (Grant No. 61965004), and the Introduction Talent Research Start-up Fund of Guizhou University, China (Grant No. Guida Ren Ji He Zi [2018-14]).

† Corresponding author. E-mail: baiguangfu123@163.com