

基于双环混频光电振荡器的可调谐微波频率梳产生

麻艳娜 黄添添 王文睿 宋开臣

Tunable microwave frequency comb generation based on double-loop mixing-frequency optoelectronic oscillator

Ma Yan-Na Huang Tian-Tian Wang Wen-Rui Song Kai-Chen

引用信息 Citation: [Acta Physica Sinica](#), 67, 238401 (2018) DOI: 10.7498/aps.67.20181582

在线阅读 View online: <http://dx.doi.org/10.7498/aps.67.20181582>

当期内容 View table of contents: <http://wulixb.iphy.ac.cn/CN/Y2018/V67/I23>

---

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

[单次空时域并行欠采样下的频率和到达角联合估计](#)

Joint estimation of frequency and direction of arrival under the single-and-parallel spatial-temporal under-sampling condition

物理学报.2017, 66(18): 188401 <http://dx.doi.org/10.7498/aps.66.188401>

[基于双平行马赫-曾德尔调制器的大动态范围微波光子下变频方法](#)

Dual-parallel Mach-Zehnder modulator based microwave photonic down-conversion link with high dynamic range

物理学报.2017, 66(9): 098401 <http://dx.doi.org/10.7498/aps.66.098401>

[外界条件在电磁脉冲对 GaAs 赝高电子迁移率晶体管损伤过程中的影响](#)

Influence of the external condition on the damage process of the GaAs pseudomorphic high electron mobility transistor induced by the electromagnetic pulse

物理学报.2017, 66(7): 078401 <http://dx.doi.org/10.7498/aps.66.078401>

[GaN 高电子迁移率晶体管强电磁脉冲损伤效应与机理](#)

Damage effects and mechanism of the GaN high electron mobility transistor caused by high electromagnetic pulse

物理学报.2016, 65(3): 038402 <http://dx.doi.org/10.7498/aps.65.038402>

[基于离散粒子群算法的频率选择表面优化设计研究](#)

Study on the optimal design of frequency selective surfaces based on the discrete particle swarm optimization

物理学报.2014, 63(13): 138401 <http://dx.doi.org/10.7498/aps.63.138401>

# 基于双环混频光电振荡器的可调谐微波频率梳产生\*

麻艳娜<sup>1)</sup> 黄添添<sup>1)†</sup> 王文睿<sup>2)</sup> 宋开臣<sup>1)</sup>

1) (浙江大学生物医学工程与仪器科学学院, 杭州 310027)

2) (浙江大学航空航天学院, 杭州 310027)

(2018年8月23日收到; 2018年9月30日收到修改稿)

随着无线通信的速率提升和微蜂窝趋势, 光载微波技术已经成为重要的发展趋势, 而光生多载波系统是光载微波的最重要的技术之一. 本文提出了一种基于双环混频光电振荡器(OEO)的可调谐光载微波频率梳产生方案, 可同时实现多频段微波信号产生, 从而高效低成本地为无线节点提供光生微波载波. 方案采用混频双环OEO系统, 通过工作在增益开关状态的直调激光器, 利用其非线性动态特性产生多频率光载微波频率梳信号, 并采用双路微波滤波器分别滤出两个相邻频率的微波信号, 并利用二者的差频反馈注入直调激光器构成光电谐振. 利用偏振双环结构抑制长谐振腔引起的边模问题, 提高了输出信号的噪声特性. 经过实验分析, 得到了低相噪的多路微波信号, 并最终实现了间隔797.4 MHz的稳定的微波频率梳信号, 一阶载波相位噪声低于 $-101.7$  dBc/Hz@10 kHz,  $-115.2$  dBc/Hz@50 kHz. 因此该方案产生的光载微波频率梳信号具有低噪声的优点, 适用于光载微波通信系统.

**关键词:** 光载微波频率梳, 光电振荡器, 直调激光器, 倍频滤波

**PACS:** 84.40.-x, 84.40.Ua, 42.65.Sf, 84.60.Jt

**DOI:** 10.7498/aps.67.20181582

## 1 引言

光载微波系统是一种将无线通信和光纤通信相结合的系统, 可以低成本地为移动用户提供更高容量、更大带宽和更高机动性的服务. 其中光生微波技术是光载微波系统的关键技术<sup>[1-4]</sup>之一. 由于无线通信系统基本采用多频率载波, 采用单一光电系统同时实现光生多频率的微波载波无疑可以更高效、低成本地解决光载微波系统中的微波载波产生问题, 是光载微波系统较为理想的解决方案.

目前, 国内外均针对光生多载波技术展开了研究, 阶跃恢复二极管<sup>[5-7]</sup>和光频率梳<sup>[8-11]</sup>两种方式均可产生光载微波频率梳, 但前者限于电学带宽且不易于调谐, 后者需要通过外部调制光、锁

模激光器或增益开关垂直腔表面激光器等复杂光学结构产生光载微波频率梳, 而后经过光电转换. 此外, 通过半导体激光器的谐波频率注入锁定和光注入锁定方式产生光载微波频率梳也是常用的方法. Chan等<sup>[12]</sup>采用光电反馈和外部微波调制方式实现了半导体激光器谐波注入锁定, 得到频率间隔328 MHz, 带宽3 GHz的微波频率梳. Juan和Lin<sup>[13]</sup>通过外部光脉冲注入半导体激光器的方式实验产生低噪声、20 GHz带宽的微波频率梳信号, 其中一阶单边带噪声为 $-65$  dBc/Hz@50 kHz. Li等<sup>[14]</sup>首先通过电流调制的半导体激光器产生频率梳源, 然后通过光注入方式提高微波频率梳特性, 产生60 GHz超宽带可调谐微波频率梳, 其中一阶单边带噪声低于 $-93$  dBc/Hz @10 kHz, 各阶单边带噪声均低于 $-86$  dBc/Hz @10 kHz.

\* 国家自然科学基金(批准号: 61675182)资助的课题.

† 通信作者. E-mail: tthuang@zju.edu.cn

本文提出了一种基于双环混频光电振荡器 (optoelectronic oscillator, OEO) 的可调谐微波频率梳产生方案. 该方案在 OEO 的基础上, 采用两个高阶振荡信号混频取二者差频, 注入直调激光器形成光电谐振结构. 系统利用直调激光器的开关增益调制效应, 产生光载微波频率梳信号输出. 由于 OEO 系统产生的微波信号相位噪声低<sup>[15,16]</sup>, 倍频产生的光载微波频率梳信号也具有很高的信噪比. 更重要的是, 通过调节高阶倍频微波滤波器的中心带宽, 可改变激光器调制频率, 最终实现微波频率梳间隔的可调谐. 实验产生了频率间隔 797.4 MHz 的稳定微波频率梳信号, 信号相位噪声均低于 -100 dBc/Hz@10 kHz.

## 2 理论分析

基于双环混频 OEO 的可调谐微波频率梳产生方案原理图如图 1 所示. 实验中, OEO 的光源来自于直调激光器 DML. 激光器经过高功率微波信号调制后生成光生多载波信号源. 该光信号经过两个耦合器分束后, 分为两路分别进行光电转换、微波放大、滤波和再放大, 选取不同频率的倍频微波信号  $f_1$  和  $f_2$ . 两路微波信号经过混频器 M 和低通滤波器 LPF 后, 取差频  $\Delta f$ . 差频信号  $\Delta f$  经过增益调节后重新注入直调激光器进行反馈调制, 形成光电谐振腔. 通过增益调节, 工作于 OEO 系统中的直调激光器可产生低噪声的光载频率梳信号.

实验方案的核心在于激光器的开关增益调制效应. 相比于极化强度的衰减速率, 半导体激光器

的场衰减速率和粒子数反转的衰减速率要小得多, 因此其系统的动力学特性可由场方程和粒子数反转方程表示为<sup>[17,18]</sup>

$$\begin{cases} \frac{d\mathbf{E}}{dt} = \left\{ i\nu - \frac{1}{2}[G(N) - 2\gamma_e] \right\} \mathbf{E}, \\ \frac{dN}{dt} = J - \gamma_N N - G(N)|\mathbf{E}|^2, \end{cases} \quad (1)$$

式中  $\mathbf{E}$  为电场强度,  $N$  为激光器载流子密度,  $\nu$  为无外部扰动情况下的激光器振荡频率,  $G(N)$  为增益函数,  $\gamma_e$  为光子衰减速率,  $\gamma_N$  为粒子数反转衰减速率,  $J$  为抽运电流.

若  $P(t)$  为激光器输出光功率,  $\nu_0$  为激光器输出光频率,  $\varphi(t)$  为激光器光场相位, 则激光器的输出光脉冲的复振幅可以表述为

$$U(t) = \sqrt{P(t)} \exp\{i[2\pi\nu_0 t + \varphi(t)]\}. \quad (2)$$

激光器的输出频率啁啾, 即输出光频率与未被调制的光频率的瞬时偏差为

$$\Delta\nu = \frac{1}{2\pi} \cdot \frac{d\varphi(t)}{dt}. \quad (3)$$

当直调激光器工作于延时光电反馈系统中时, 正弦调制信号与激光器直流偏置相叠加, 实现增益开关, 半导体激光器的注入电流表示为

$$I(t) = I_{\text{bias}} + I_m \sin(2\pi f_m t), \quad (4)$$

式中  $I_{\text{bias}}$  为偏置电流;  $I_m$  为调制电流幅值;  $f_m$  为微波调制信号频率.

因此反馈调制作用引起激光器的输出光强度和光频率改变, 形成激光器的光电反馈混沌系统, 出现光生多载波. 此时激光器产生的电场变为<sup>[19]</sup>

$$E = E_0 \exp - \frac{t^2}{2T_e^2} \exp \left[ -i \left( \nu_0 t + \alpha \sin \left( 2\pi f_m t + \frac{\pi}{2} \right) \right) \right], \quad (5)$$

式中  $E_0$  为电场幅度;  $T_e$  为光脉冲幅度在  $1/e$  处的脉冲宽度;  $\alpha$  为等效调制系数, 与半导体激光器的线宽增强因子直接相关, 与直流光功率成正比, 与调制微波调制信号频率  $f_m$  成反比.

实验系统采用多级放大器结构, 提高了环路增益, 增加了激光器调制功率, 使直调激光器始终被稳定的大功率微波信号调制, 引入明显的啁啾效应. 倍频滤波器的使用也使光生倍频载波信号的功率通过振荡器得到增强.

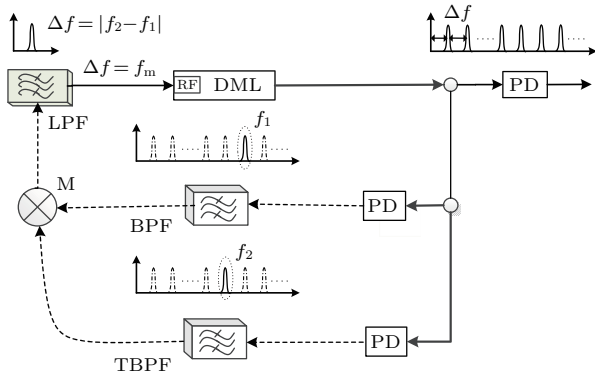


图1 光生微波频率梳实验原理图

Fig. 1. Schematic diagram of optical-borne microwave comb.

### 3 实验系统及测量结果

在 OEO 基本结构的基础上, 实验采用了一个直调激光器 DML、三个 20 GHz 带宽高速光电探测器 PD、多个微波放大器 EA、一个带通滤波器 BPF (中心频率 4 GHz, 带宽 30 MHz)、一个可调滤波器 TBPF (中心频率 2—10 GHz 可调, 带宽 50 MHz)、一个混频器 M 和一个低通滤波器 LPF (DC-2 GHz). 另外, 3 个偏振控制器 PC, 两个偏振分束器 PBS 和两路单模光纤 SMF 构成偏振双环路结构, 如图 2 所示.

直调激光器 DML 经过微波信号调制后的脉冲

信号经光电耦合器 OC1 分为两路, 一路先经过偏振双环路结构, 然后由光耦合器 OC2 分为两路分别通过 PD1, EA1, BPF, EA2 和 PD2, EA3, TBPF, EA4 进行光电转换、微波放大、滤波和再放大, 选择不同频率的倍频微波信号. 两路微波信号经过混频器 M 和低通滤波器 LPF 后, 取差频, 经过 EA5 进行进一步微波放大后反馈调制直调激光器, 形成光电谐振腔. 耦合器 OC1 的另一路经过 PD3 和 EA7 实现光电转换和微波放大, 输出微波频率梳信号. 其中, 偏振控制器 PC、偏振分束/合束器 PBS 和长光纤 SMF 构成的偏振双环结构可以有效抑制起振时长腔谐振引起的边模, 提高输出信号信噪比 [20,21].

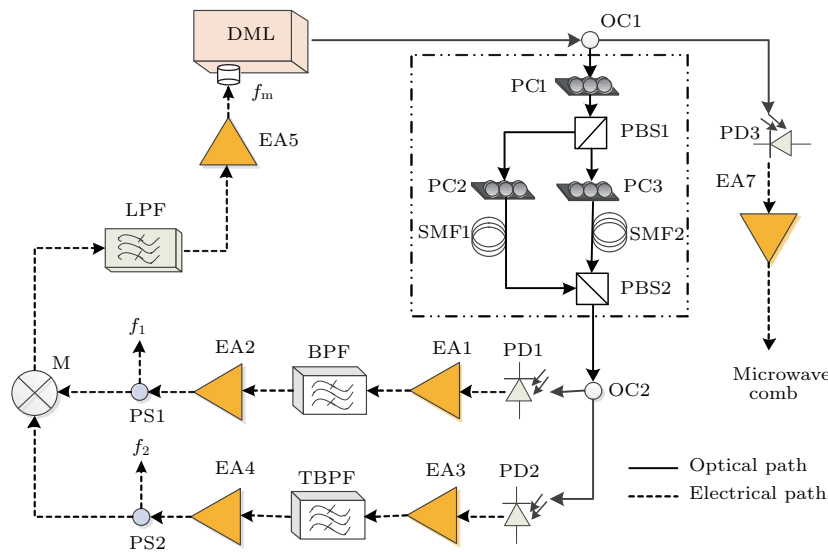


图 2 实验系统搭建图  
Fig. 2. Setup of experimental system.

实验系统工作时, 带通滤波器 BPF 为中心频率 4 GHz 的固定值滤波器, 调节可调滤波器 TBPF 的中心频率至  $f_1$  和  $f_2$  的差频信号  $f_m$  满足起振频率条件: 即直调激光器的调制信号  $f_m$  是该 OEO 系统的基频  $f_0$  的倍频信号, BPF 和 TBPF 两路微波滤波器提取的微波信号  $f_1$  和  $f_2$  是激光器调制信号  $f_m$  的倍频信号. 由于直调激光器的非线性特性, 在微波调制作用下, 直调激光器的输出可作为光生微波频率梳的种源, 经过谐振腔反馈控制后, 可提高载波的输出特性, 实现稳定可靠的微波频率梳信号输出.

在偏振双谐振腔结构中, 只有同时满足双谐振腔的频率才能起振, 因此可有效抑制边模频率. 图 3 即为可调滤波器滤波后的微波频率  $f_2$  输出, 从图中可以看到经过偏振双环路调整后的微波输出

边模抑制比提高为 47 dB.

图 4 为实验系统工作时输出的两路微波信号谱, 其中 (a) 和 (b) 显示了通过带通滤波器 BPF 的微波信号  $f_1$  输出, (c) 和 (d) 显示了通过可调滤波器 TBPF 的微波信号  $f_2$  输出. 由相噪分析可知, 由于 OEO 的低噪声特性, 倍频微波滤波器选取的微波频率也具有良好的相噪性能.

将信号  $f_1$  和  $f_2$  经过混频和低通滤波取差频信号, 放大后重新反馈回到直调激光器进行调制, 增强激光器输出的频率梳性能. 通过耦合器 OC1、光电转换器 PD3 和微波放大器 EA7 可输出谐振腔内光载波上的微波频率梳信号, 如图 5 可见, 频率梳输出信号间隔为 797.4 MHz, 一阶相位噪声达到  $-74.9$  dBc/Hz@1 kHz,  $-101.7$  dBc/Hz@10 kHz,  $-115.2$  dBc/Hz@50 kHz.

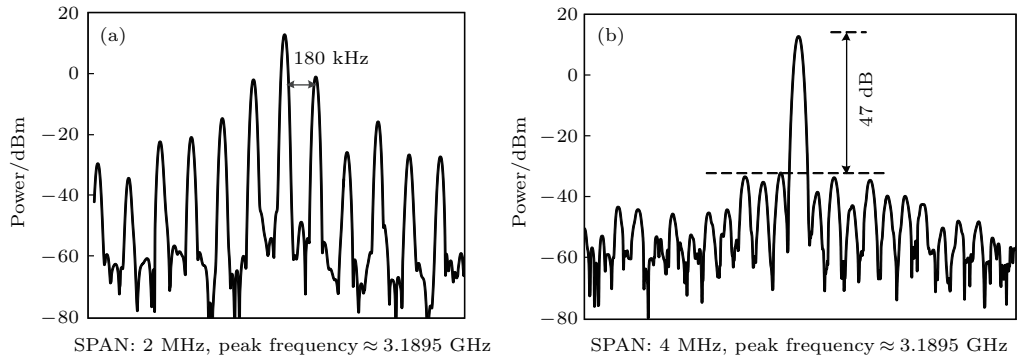


图3 偏振双环路OEO调节结果 (a)调节前的 $f_2$ 电谱输出; (b)调节后的 $f_2$ 电谱输出  
Fig. 3. Adjusting results of polarized dual-loop OEO: (a)  $f_2$  frequency-domain output before adjusting; (b)  $f_2$  frequency-domain output after adjusting.

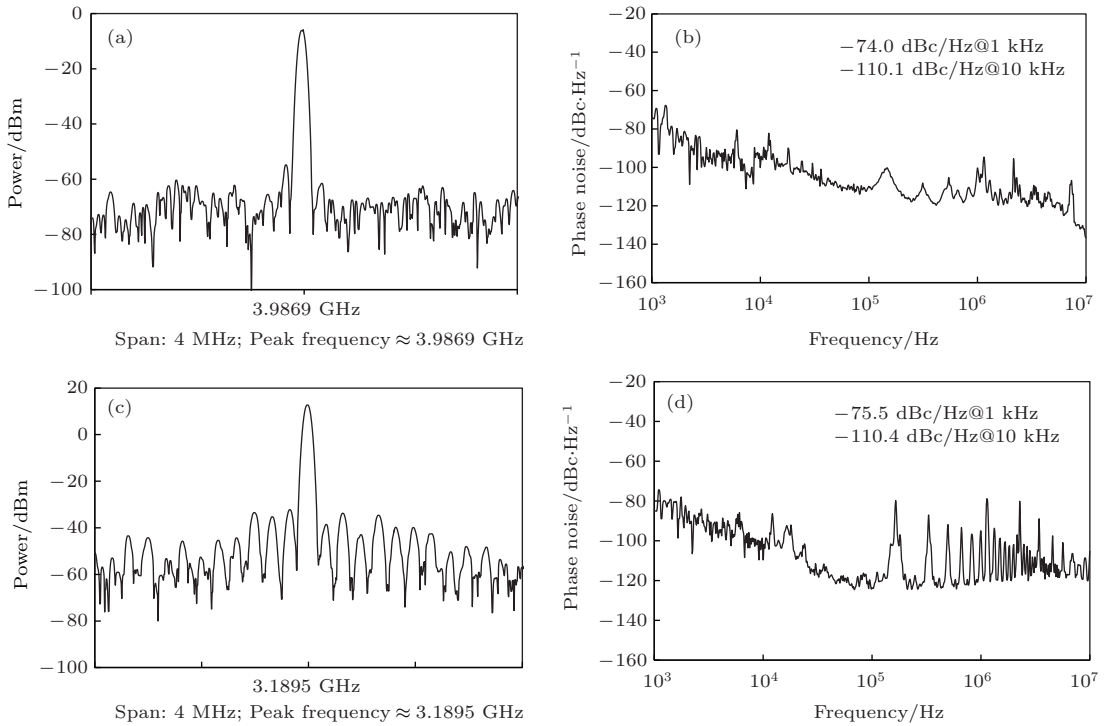


图4 (a)  $f_1$ 微波信号输出功率; (b)  $f_1$ 微波信号相位噪声; (c)  $f_2$ 微波信号输出功率; (d)  $f_2$ 微波信号相位噪声  
Fig. 4. (a) Microwave signal  $f_1$  power output; (b) microwave signal  $f_1$  phase noise; (c) microwave signal  $f_2$  power output; (d) microwave signal  $f_2$  phase noise.

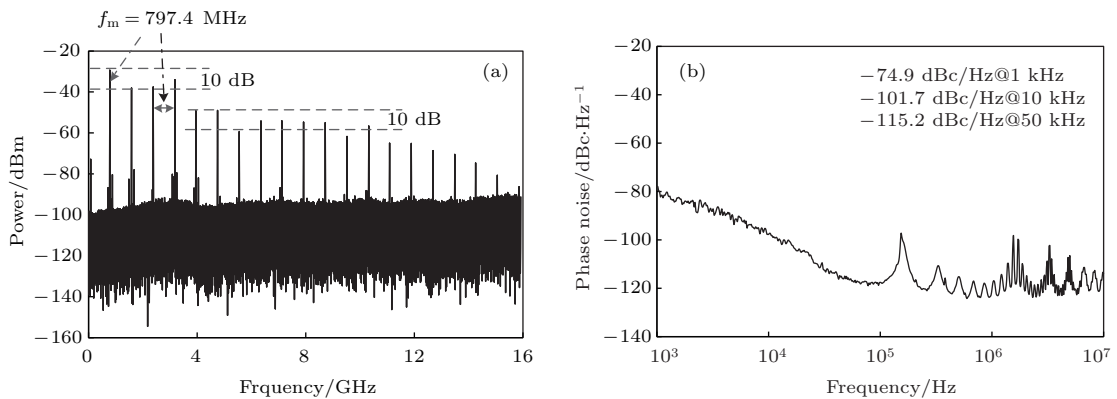


图5 间隔为797.4 MHz的微波频率梳信号 (a)功率输出; (b)相位噪声测量(8点平均)  
Fig. 5. Microwave frequency comb with 797.4 MHz interval: (a) Power output; (b) phase noise measurement (average-8 point).

调节可调微波滤波器的中心频率, 在满足谐振频率条件的情况下, 可实现梳齿间隔可调谐的微波频率梳, 如图 5 (a) 和图 6 所示. 但由于选择  $f_1$  信号的是中心频率 4 GHz 固定滤波器, 且需要满足两路微波滤波器提取的微波信号  $f_1$  和  $f_2$  是光上调制信号  $f_m$  的倍频信号, 因此调节频率点受限. 若两路微波滤波器均为可调滤波器, 则理论上可实现任意间隔的频率梳输出.

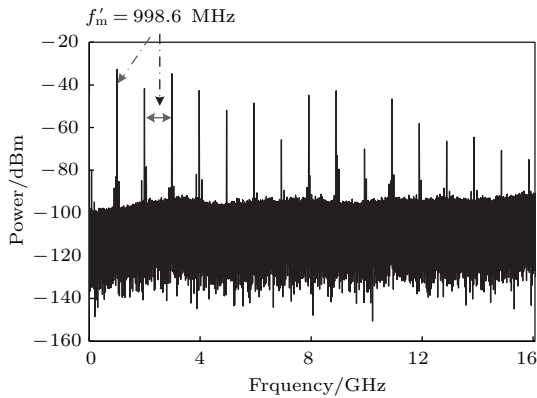


图 6 间隔为 998.6 MHz 的微波频率梳信号功率输出  
Fig. 6. Power output of microwave frequency comb with 998.6 MHz interval.

## 4 结 论

基于直调激光器非线性动态特性, 生成了低相噪的微波频率梳信号. 在实验方案中, 微波信号调制的激光器作为频率梳信号发生的种源, 梳齿间隔即为调制频率. 为了提高微波频率梳信号的性能参数, 采用了两路高阶倍频滤波器滤出的 3.9869 GHz 和 3.1895 GHz 微波信号经过混频取差值进行反馈调制, 提高了高阶倍频信号的转化效率. OEO 的边模抑制则通过偏振双环结构实现. 利用 OEO 的低相噪输出特性, 在频率 797.4 MHz, 功率 21 dBm 调制信号反馈调制下, 最终实验得到一阶相位噪声  $-74.9$  dBc/Hz@1 kHz,  $-101.7$  dBc/Hz@10 kHz,  $-115.2$  dBc/Hz@50 kHz 的微波频率梳信号. 相比于半导体激光器的谐波频率注入锁定和光注入锁定方式, 所得到的相位噪声指标有很大提高, 实现 10 kHz 偏频处的相位噪声优于  $-100$  dBc/Hz. 由于频率梳高阶信号均由一阶 797.4 MHz 通过光上倍频得到, 理论上也具有高信噪比. 其中一阶频率到 4 阶频率的输出功率相差 10 dB 以内, 5 阶频率

和 13 阶频率的输出功率相差 10 dB 以内, 各阶信号的边模抑制比优于 40 dB.

为了进一步提高系统的可调谐特性, 可以将系统内两路微波带通滤波器均换成可调滤波器, 实现调制频率的  $f_m$  的任意可调谐. 同时, 通过调节环路增益和增加高速光电探测器的带宽等手段, 也可进一步提高输出频率梳的功率均衡性和宽带宽特性.

## 参考文献

- [1] Ma J, Li Y 2015 *Opt. Commun.* **334** 22
- [2] Li C Y, Su H S, Chang C H, Lu H H, Wu P Y, Chen C Y, Ying C L 2012 *J. Lightwave Technol.* **30** 298
- [3] Zhang L, Hu X, Cao P, Wang T, Su Y 2011 *Opt. Express* **19** 5196
- [4] Chowdhury A, Chan G K, Chien H C, Yu J, Hsueh Y T 2010 *J. Lightwave Technol.* **28** 2230
- [5] Hagmann M J, Efimov A, Taylor A J, Yarotski D A 2011 *Appl. Phys. Lett.* **99** 011112
- [6] Hagmann M J, Taylor A J, Yarotski D A 2012 *Appl. Phys. Lett.* **101** 241102
- [7] Hagmann M J, Stenger F S, Yarotski D A 2013 *J. Appl. Phys.* **114** 223107
- [8] Weiner A M, Long C M, Leaird D E, Wu R, Supradeepa V R 2010 *Opt. Lett.* **35** 3234
- [9] Wong J H, Lam H Q, Aditya S, Zhou J Q, Li N X, Xue J, Lim P H, Lee K K, Wu K, Shum P P 2012 *J. Lightwave Technol.* **30** 3164
- [10] Shang L, Wen A, Lin G B 2014 *J. Opt.* **16** 035401
- [11] Wang W T, Liu J G, Sun W H, Chen W 2015 *Opt. Commun.* **338** 90
- [12] Chan S C, Xia G Q, Liu J M 2007 *Opt. Lett.* **32** 1917
- [13] Juan Y S, Lin F Y 2009 *Opt. Express* **17** 18596
- [14] Fan L, Xia G Q, Tang X, Deng T, Chen J J, Lin X D, Li Y N, Wu Z M 2017 *IEEE Access* **5** 17764
- [15] Jiang Y, Bai G, Hu L, Li H, Zhou Z, Xu J, Wang S 2013 *IEEE Photonic Tech. L.* **25** 382
- [16] Izutsu M, Sakamoto T, Kawanishi T 2006 *Opt. Lett.* **31** 811
- [17] Buldu J M, Garcia-Ojalvo J, Torrent M C 2004 *IEEE J. Quantum. Elect.* **40** 640
- [18] Wu J, Zhang F, Zuo P, Guo H X, Lin J T 2003 *Chin. J. Lasers* **30** 12 (in Chinese) [伍剑, 张帆, 左鹏, 郭宏翔, 林金桐 2003 中国激光 **30** 12]
- [19] Jia S, Yu J L, Wang J, Wang W R, Wang Z X, Chen B 2015 *Acta Phys. Sin.* **64** 184201 (in Chinese) [贾石, 于晋龙, 王菊, 王文睿, 王子雄, 陈斌 2015 物理学报 **64** 184201]
- [20] Jiang Y, Yu J L, Wang Y T, Zhang L T, Yang E Z 2007 *Acta Opt. Sin.* **27** 919 (in Chinese) [江阳, 于晋龙, 王耀天, 张立台, 杨恩泽 2007 光学学报 **27** 919]
- [21] Jiang Y, Zi Y J, Bai G F, Tian J 2018 *Opt. Lett.* **43** 1774

# Tunable microwave frequency comb generation based on double-loop mixing-frequency optoelectronic oscillator\*

Ma Yan-Na<sup>1)</sup> Huang Tian-Tian<sup>1)†</sup> Wang Wen-Rui<sup>2)</sup> Song Kai-Chen<sup>1)</sup>

1) (College of Biomedical Engineering and Instrument Science, Zhejiang University, Hangzhou 310027, China)

2) (College of Aeronautics and Astronautics, Zhejiang University, Hangzhou 310027, China)

( Received 23 August 2018; revised manuscript received 30 September 2018 )

## Abstract

With the development of wireless communication technology and micro-cell technology, optical-borne microwave technology, specially optical-borne multi-carrier technology has become one of the most important trends for generating high-quality sources. Therefore, the efficient generation of high-quality microwave signals has always been a requirement in wireless communication systems. Due to its low-noise and high-frequency output characteristics, photoelectric oscillator is widely used to generate high-quality microwave frequency sources in communication systems. Combining the advantages of photoelectric oscillator's low-noise output and direct-modulated laser's gain-switching state characteristics, a tunable optical-borne microwave frequency comb scheme based on dual-loop mixing-frequency photoelectric oscillator is proposed in this paper. And a direct-modulated laser operating in a gain-switching state is used to generate the original optical-borne microwave frequency comb signals. The dual-loop adjacent resonant frequencies are separated by two different high-frequency microwave bandpass filters. The beat frequency of adjacent frequencies mentioned above is injected back into laser to form photoelectric resonance, and thus enhancing the generated original optical-borne microwave frequency comb signals. To suppress the side modes caused by long resonant cavity, a polarized dual-loop structure is used in the system, and thus improving the noise characteristics of output signals. After experimental analysis, the dual-loop filtered resonant microwave signals and low-phase-noise microwave comb signals with a frequency interval of 797.4 MHz are all obtained. The microwave output side-mode suppression ratio after polarized dual-loop adjustment is improved to 47 dB. And microwave comb signal's first-order carrier phase noise is lower than  $-101.7$  dBc/Hz at 10 kHz,  $-115.2$  dBc/Hz at 50 kHz. In addition, higher-order carriers all come from the light multiplication of first-order carrier, they share the same low noise characteristics with first-order microwave comb signal. The output power of first-to-fourth, fifth-to-thirteenth order carriers are balanced to 10 dB by photoelectric resonance injection. And their side-mode suppression ratios are all better than 40 dB. Furthermore, theoretically, the comb interval can be adjusted to any frequencies by changing the center frequencies of two high-frequency bandpass microwave filters. Therefore, optical-borne multi-carrier microwave signals are generated efficiently and cost-effectively by this tunable optical-borne microwave frequency comb scheme, and the generated low-noise multi-carrier frequency sources meet the demand of an optical-borne microwave wireless communication system.

**Keywords:** photo-generated microwave comb, optoelectronic oscillator, directly modulated laser, multiple-frequency filtering

**PACS:** 84.40.-x, 84.40.Ua, 42.65.Sf, 84.60.Jt

**DOI:** 10.7498/aps.67.20181582

\* Project supported by the National Natural Science Foundation of China (Grant No. 61675182).

† Corresponding author. E-mail: [tthuang@zju.edu.cn](mailto:tthuang@zju.edu.cn)