

基于电增益环腔选频特性的小型光电振荡器

滕义超, 张宝富, 吴传信, 庞中晓

(解放军理工大学 通信工程学院, 江苏 南京 210007)

摘要: 为了进一步提高光电振荡器的实用性, 提出了一种基于耦合型电增益环腔的小型化光电振荡器。利用电功分器和放大器构成电增益环腔, 其梳状滤波效应可以有效对光电振荡器进行模式选择, 结合直接调制半导体激光器, 单模光纤和光电探测器, 有效实现了小型化光电振荡器。理论上分析了电增益环腔的基本原理, 并且通过仿真进行了验证。实验中获得中心频率为 12.624 GHz 的微波信号, 其相位噪声为 $-102 \text{ dBc/Hz}@10 \text{ kHz}$ 。该方案在结构简单的条件下可以得到质量较高的射频信号, 可以作为光电振荡器实用化的一种解决方法。

关键词: 光电振荡器; 环形谐振腔; 小型化; 腔长控制

中图分类号: TN929.1 **文献标志码:** A **DOI:** 10.3788/IRLA201645.0520008

Novel mini optoelectronic oscillator based on electrical gain ring resonator cavity

Teng Yichao, Zhang Baofu, Wu Chuanxin, Pang Zhongxiao

(Collage of Communication Engineering, PLA University of Science and Technology, Nanjing 210007, China)

Abstract: In order to improve the application of optoelectronic oscillator, a kind of embedded electrical gain ring resonator mini optoelectronic oscillator structure was introduced in this paper. The demonstrated principle of the electrical gain ring resonator optoelectronic oscillator was using the electrical splitter and amplifier realizing a ring resonator cavity which was equal to a filter comb to select the right mode of the optoelectronic oscillator, combined with directly modulated DFB laser, simple mode fiber and photo-detector, a mini optoelectronic oscillator structure was realized. The principle of the electrical gain ring resonator was analyzed and verified by the simulation. In the experiment, a high quality RF signal with the center frequency of 12.624 GHz was realized, the phase noise of the generated signal was -102 dBc/Hz at 10 kHz offset. The proposed scheme can generate higher quality RF signal with a simple structure, it can be a solution to the practical application of optoelectronic oscillator.

Key words: optoelectronic oscillator; ring resonator; miniaturization; cavity length control

收稿日期: 2015-09-15; 修订日期: 2015-10-20

基金项目: 国家自然科学基金(61371121)

作者简介: 滕义超(1989-), 男, 硕士生, 主要从事微波光子学方面的研究。Email: tengyichao11@163.com

导师简介: 张宝富(1965-), 男, 教授, 硕士, 主要从事光通信方面的研究。Email: zhangbaofu@163.com

0 引言

高频谱纯度、低相位噪声的信号源被广泛应用于雷达、通信和仪器测量等领域^[1-4],光电振荡器(OEO)可以产生频率在几百兆赫兹到几百吉赫兹范围内的高频谱纯度、低相位噪声信号^[5-7],满足各领域对于信号源的需求。

但由于 OEO 需要外调制器,偏振控制器,电放大器等器件,决定了 OEO 的体积过大,同时过多的器件也导致目前大多数 OEO 系统不够稳定,系统性能随着外界环境的变化而变化。目前国外研究团队已经对光电振荡器的实用化、小型化,提高系统的稳定性进行了研究。2010 年法国研究团队利用 CaF₂ 的特殊性质,构成了微型光学谐振腔^[8],实现了 OEO 的小型化;近年以来,美国 OEwaves 公司以及相关研究团队基于回廊腔结构进行研究,提出了性能更加稳定,趋于实用化,小型化的 OEO^[9-12]。但这几种 OEO 内部结构十分复杂,对所使用的材料的特性要求非常高,针对现有的状况,还很难实现光电振荡器的小型化。同时在这几种 OEO 结构中,都使用了电滤波器,增加了系统的复杂程度。

针对上述问题,文中采用了一种利用电增益环腔的方案有效地实现将电放大器和电滤波器结合到一起,引入直接调制半导体激光器有效地降低了光电振荡器的体积;在光电振荡器环路中没有引入电滤波器,减小了外界环境对系统的影响。通过控制电谐振腔的长度,可以改变光电振荡器的输出频率。在不使用电滤波器的前提下,降低了电放大器的增益级数,减小了电放大器引入的噪声,有效改善了光电振荡器的相位噪声性能。

1 电增益环腔原理

系统实现的基本结构如图 1 所示,DM DFB 为直接调制半导体激光器,VOA 为机械可调光衰减器,OC 为光分路器,PD 为光电检测组件,EPS 为电功分器,Amp 为电放大器,OSA 为安利 MS9710A 型光谱仪,ESA 为罗德-施瓦茨(Rohde-Schwarz)FSV 型频谱仪。直接调制激光器在经过射频信号调制后发出连续的光波,通过光可调衰减器和光电探测器转化为微波信号。微波信号经过电合路器、放大器,通过功分器后一部分输出进入直调半导体激光器,另一部分反馈回电合路器中,形成电增益环腔,微波输出的频率由谐振腔的腔

长,即环路内的电缆线长度决定^[13-15]。

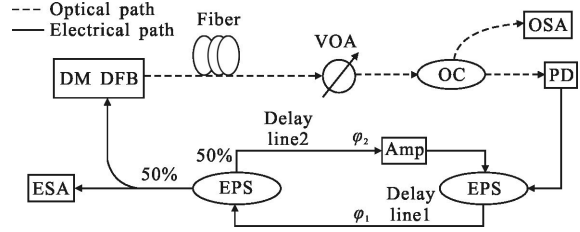


图 1 具有电增益环腔的光电振荡器结构图

Fig.1 Structure of electrical gain ring resonator OEO

电增益环腔模型框图如图 2 所示,假设任意取 OEO 产生一条多纵模信号,表达式为 $V_0 = v_0 e^{-i(2\pi f t + \theta)}$,其中 v_0 为信号的幅度, f 为信号的频率, θ 为信号的初始相位,经过环路的下半部分,由于环路延迟效应,射频信号变成公式(1),其中 φ_1 为环路延迟引起的相位变化:

$$V_1 = v_0 e^{-i(2\pi f t + \theta + \varphi_1)} \quad (1)$$

功分器将射频信号的功率分成两份,直接调制激光器接收到的射频信号为:

$$P_{out1} = \frac{1}{2} P_1 = \frac{V_1^2}{2R} = \frac{v_0^2 e^{-2i(2\pi f t + \theta + \varphi_1)}}{2R} = \frac{e^{-2i\varphi_1}}{2} \cdot P_0 \quad (2)$$

式中: P_1 为环路内射频信号功率; R 为阻抗。

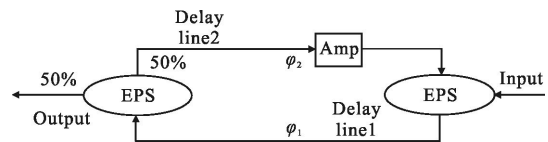


图 2 电增益环腔模型框图

Fig.2 Model of electrical gain ring resonator cavity

功分器将另一份功率反馈给电合路器,设 G 为电放大器的电压增益,环路上半部分延迟引起的相位变化为 φ_2 ,则反馈给电合路器的信号变成:

$$V_1 = \frac{\sqrt{2}}{2} G v_0 e^{-i(2\pi f t + \theta + \varphi_1 + \varphi_2)} = \frac{\sqrt{2}}{2} e^{-i\varphi_2} \cdot v_0 e^{-i(2\pi f t + \theta)} \quad (3)$$

再次进入电增益环腔内振荡,送入直接调制激光器的射频信号为:

$$P_{out2} = \left(\frac{e^{-2i\varphi_1}}{2} \right) \cdot G_p e^{-i\varphi_2} \cdot P_0 \quad (4)$$

式中: G_p 为电放大器的功率增益。再次反馈给电合路器的信号为:

$$V_2 = \left(\frac{\sqrt{2}}{2} e^{-2i\varphi_1} \right)^2 \cdot (G e^{-i\varphi_2}) \cdot v_0 e^{-i(2\pi f t + \theta)} \quad (5)$$

根据上面的分析可得:当在环腔振荡 n 次后,送入直接调制激光器的射频信号为:

$$P_{out} = \sum_{i=1}^n P_{out} = \sum_{i=1}^n \left(\frac{e^{-2i\varphi_1}}{2} \right)^n \cdot (G_p e^{-i\varphi_2})^{n-1} \cdot P_0 \quad (6)$$

根据公式(6),可以通过仿真得到图 3。从图 3(a)可以得出:电增益环腔形成了多纵模谐振,通过计算,可以得到模式间隔为 175 MHz。从图 3(b)可以得出电增益环腔在 10.586 GHz 处等效电滤波器的 3 dB 带宽为 6 MHz, 10 dB 带宽为 36 MHz。这样在没有引入电滤波器的前提下,利用电增益环腔有效地等效窄带电滤波器,从而有效地抑制了边模,与普通结构光电振荡器相比,没有引入额外的噪声,提高了输出微波信号的质量。

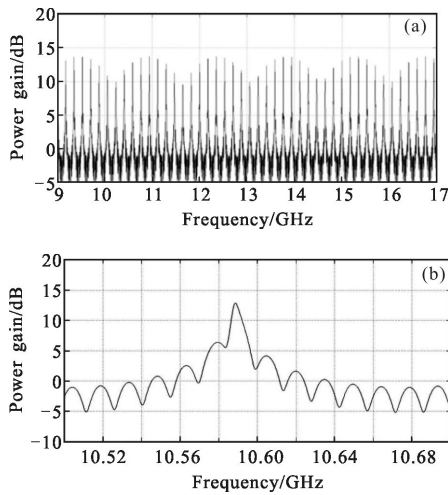


图 3 电增益环腔仿真

Fig.3 Simulation of electrical gain ring resonator cavity

在取延迟线 2 长度为 0.5 m、增加延迟线长度 1 mm 时,电增益环腔中心频率变化了 14 MHz,如图 4 所示。控制电谐振腔的长度,可以改变环形谐振腔选

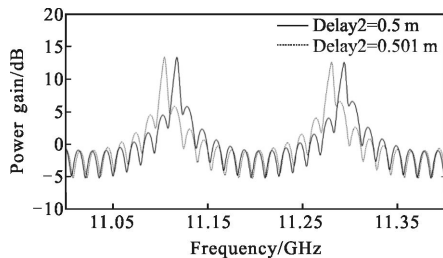


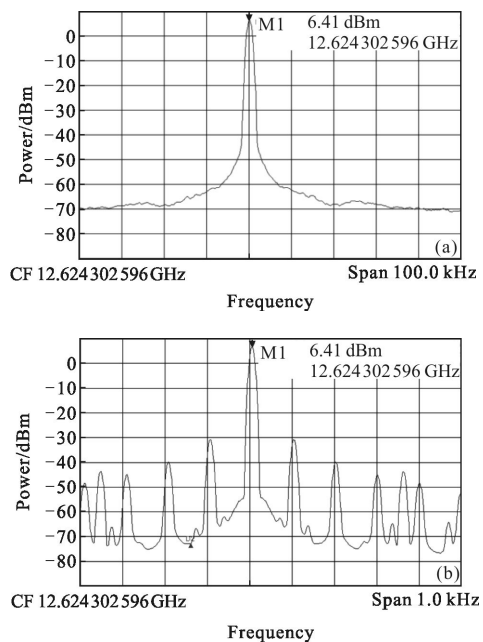
图 4 电增益环腔腔长变化仿真

Fig.4 Variation simulation of electrical gain ring resonator cavity length

择的频率,从而改变光电振荡器的输出频率。

2 实验

实验中,激光器采用直接调制半导体激光器,波长为 1550.7 nm,没有引入外调制器;光纤长度为 2 km;电放大器的增益区间为 9~17 GHz;光电探测组件采用 18Gb/s 宽带接收机;电功分器的功率分配比为 50:50,工作频率为 2~18 GHz,插入损耗为 3.5 dB。直接调制激光器在经过射频信号调制后发出连续的光波,通过光可调衰减器和光电探测器转化为微波信号。微波信号经过电合路器、放大器,通过功分器后一部分输出进入直调半导体激光器,另一部分反馈回电合路器中,形成电增益环腔,利用电增益环腔等效电滤波器的效应,选出光电振荡器产生的最强的模式,得到纯净的射频信号。利用罗德-施瓦茨(Rohde-Schwarz)FSV30 型频谱仪可以得到射频信号的频谱,图 5(a)为测试范围 100 kHz,分辨率为 1 kHz 时的频谱,可以看出:信号有很高的谱纯度,证明在无外加电滤波器的条件下,利用电增益环腔可以实现光电振荡器起振。图 5(b)为测试范围 1 MHz,分辨率为 10 kHz 时的频谱,可以算出该光电振荡器的边模抑制比为 38 dB,由于实验中没有加入其他增大系统复杂性的器件,所以输出的射频信号有较大的边模;图 5(c)为测试范围为 10 MHz,分辨率为 100 kHz 时的频谱,图 5(d)为测试范围为 10 GHz,分辨率为 100 kHz



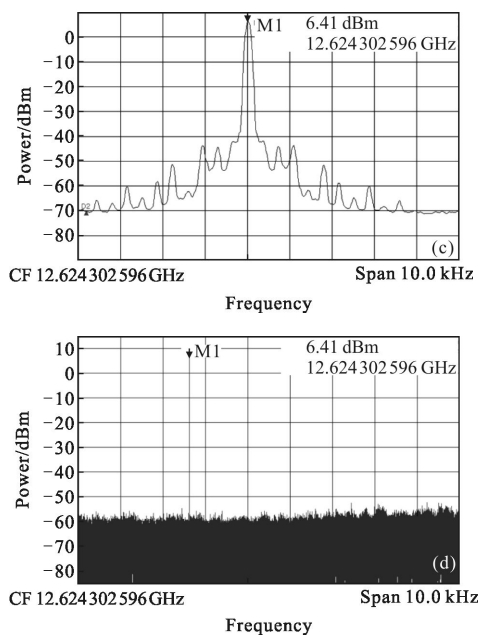


图 5 产生射频信号频谱图

Fig.5 Spectrum of RF signal generated by OEO

时的频谱,可以看出:光电振荡器输出了一种唯一的模式,该模式由电增益环腔决定,增益最大的模式会被选出。

图 6 是实验测得该系统输出频率 12.62 G 的微波信号的相位噪声图,相位噪声为 $-102\text{dBc}/\text{Hz}@10\text{kHz}$,获得了较稳定的微波信号。

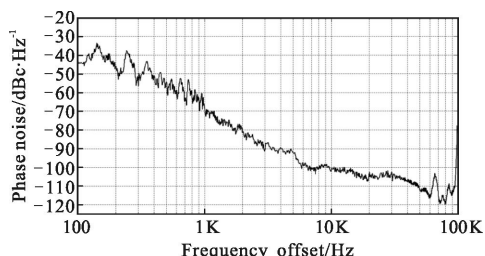


图 6 产生射频信号相位噪声

Fig.6 Phase noise of RF signal generated by OEO

3 结论

设计了一种基于电增益环腔的光电振荡器,利用功分器和电放大器构成电增益环腔结构,在光电振荡器没有引入光滤波器和电滤波器的情况下,提高了光电振荡器的性能。在此基础上,使用直接调制半导体激光器,没有使用外调制器,减小了光电振荡器的体积,并且,还可以通过更换环路中的电放大器、优化电环腔长度等方法,获得不同频点、相位噪声更低的微波信号。

参考文献:

- [1] Yao X S, Maleki L, Eliyahu D. Progress in the opto-electronic oscillator—a ten year anniversary review [C]// Microwave Symposium Digest, 2004 IEEE MTT—S International. IEEE, 2004, 1: 287–290.
- [2] Levy E C, Horowitz M, Menyuk C R. Modeling optoelectronic oscillators[J]. *JOSA B*, 2009, 26(1): 148–159.
- [3] Yao X S, Maleki L. Optoelectronic microwave oscillator[J]. *JOSA B*, 1996, 13(8): 1725–1735.
- [4] Yao X S, Maleki L. Multiloop optoelectronic oscillator[J]. *Quantum Electronics, IEEE Journal of*, 2000, 36(1): 79–84.
- [5] 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.
- [6] Zhu Jigui, Guo Tinghang, Zhang Tao. Thermally-induced error of the length measurement method based on optoelectronic oscillators[J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2014, 43(1): 254–259. (in Chinese)
- [7] 郝继贵, 郭庭航, 张涛. 基于光电振荡器的长度测量方法温度误差[J]. *红外与激光工程*, 2014, 43(1): 254–259.
- [8] Levy E C, Horowitz M, Menyuk C R. Modeling optoelectronic oscillators[J]. *J OPT SOC AM A*, 2009, 26(1): 148–159.
- [9] Salzenstein P, Volyanskiy K, Tavernier H, et al. Investigation in compact optoelectronic oscillator with mini-disk resonator [C]//EFTF-2010 24th European Frequency and Time Forum, IEEE, 2010: 1–7.
- [10] Maleki L. Sources: The optoelectronic oscillator [J]. *Nature Photonics*, 2011, 5(12): 728–730.
- [11] Danny Eliyahu, David Seidel, Lute Maleki. RF amplitude and phase-noise reduction of an optical link and an optoelectronic oscillator [J]. *IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques*, 2008, 56(2): 449–456.
- [12] Grudin I S, Yu Nan, Maleki L, et al. Generation of optical frequency combs with a CaF_2 resonator [J]. *Optics Letters*, 2009, 34(7): 878–880.
- [13] Ilchenko V S, Bennett A M, Santini, et al. Whispering gallery mode diamond resonator[J]. *Optics Letters*, 2013, 38(21): 4320–4323.
- [14] Lee Kwang-Hyun, Kim Jae-Young, Choi Woo-Young, et al. A 30-GHz self-injection-locked oscillator having a long optical delay line for phase-noise reduction [J]. *IEEE Photonics Tech Letters*, 2007, 19(23): 1982–1984.
- [15] Lee Kwang-Hyun, Kim Jae-Young, Choi Woo-Young, et al. Low-cost optoelectronic self-injection-locked oscillators [J]. *IEEE Photonics Tech Letters*, 2008, 20(13): 1151–1153.
- [16] Chang H C. Phase noise in self-injection-locked oscillators[J]. *IEEE Trans Microw Theory Tech*, 2003, 51(9): 1994–1999.