

频率可调高性能光电振荡器研究

陈吉欣 陈少勇 师 勇 鄢 勃 徐嘉鑫

(西南电子设备研究所 电子信息控制重点实验室, 四川 成都 610036)

摘要 研究了一种由多个长光纤环构建的频率可调光电振荡器, 多个组合的长光纤环能够降低光电振荡器的相位噪声和提高边模抑制比, 保证了高性能微波信号的产生, 通过高速的微波开关切换带通滤波器组能够产生不同的信号频率输出。在构建的工作于 X 波段的光电振荡器实验中, 实现了频率为 8、9、10、12 GHz 的微波信号输出。对于产生的每个频率信号, 输出功率均大于 10 dBm, 边模抑制比均大于 60 dBc。在频率偏移 10 kHz 处, 相位噪声达到了 -130 dBc/Hz。实验结果与理论分析变化趋势一致, 证明了该方法的正确性。

关键词 光电子学; 光电振荡器; 频率; 相位噪声; 边模抑制比

中图分类号 TN929.1 **文献标识码** A **doi**: 10.3788/AOS201333.0706016

Research on Optoelectronic Oscillator with Switchable Frequency and High Performance

Chen Jixin Chen Shaoyong Shi Yong Yan Bo Xu Jiaxin

(Science and Technology on Electronic Information Control Laboratory, Southwest China Research Institute of Electronic Equipment, Chengdu, Sichuan 610036, China)

Abstract A new optoelectronic oscillator with switchable frequency and high performance, based on multiple long fiber loops, is demonstrated. This oscillator can simultaneously obtain low phase noise and high side mode suppression ratio, and provide different output frequencies by selecting narrow bandpass filters. In the experiment, the optoelectronic oscillator can operate at 8, 9, 10, 12 GHz by switching the filter frequency. For each frequency, the output power higher than 10 dBm and side mode suppression ratio more than 60 dBc can be realized. The phase noise lower than -130 dBc/Hz at 10 kHz offset can be obtained. The experimental results agree with the theoretical analysis, which proves the correctness of the method.

Key words optoelectronics; optoelectronic oscillator; frequency; phase noise; side mode suppression ratio

OCIS codes 250.1500; 060.4080; 230.4910

1 引 言

微波振荡器是现代电子仪器设备的关键部分, 用来提供参考信号和时钟信号, 广泛用于各种电子系统中, 如通信、雷达、导航和仪器测量等领域。振荡器产生信号的质量直接影响系统的性能。与传统的微波振荡器不同, 光电振荡器(OEO)利用光电混合的方法, 采用光纤延迟线作储能元件, 可以实现超低相位噪声的微波信号, 而且产生的微波信号具有相位噪声与频率无关的特点^[1-3]。光电振荡器能够实现低相位噪声的微波信号输出, 是因为利用长光

纤的低损耗特性显著提高了环路的品质因子^[4-6]。一般情况下, 为了实现低相位噪声, 光电振荡器需要采用千米量级以上的长光纤^[5-6]。为了克服长光纤带来的边模振荡, 需要在信号频率附近采用带宽为几十千赫兹的滤波器实现信号滤波, 而在微波频段, 如此窄带的滤波器无法实现。为了解决这个问题, 提出了采用多环结构抑制边模的方法, 但是, 为了提高边模抑制比, 往往需要增加一个短光纤环, 这个短光纤环的长度为几米至几百米, 而且功率分配比很高^[7-8]。由于光电振荡器的相位噪声与光纤长度相

收稿日期: 2013-02-01; **收到修改稿日期**: 2013-03-06

基金项目: 国家十二五预研项目(51302050102)、电子科技集团探索项目(JJ0908)

作者简介: 陈吉欣(1977—), 男, 博士, 高级工程师, 主要从事微波和光信号处理等方面的研究。E-mail: jixinc@163.com

关,增加了短光纤,等效于减小了延时时间,从而降低了相位噪声性能。

除了相位噪声和边模抑制比等性能外,在实际的应用中,光电振荡器需要能够实现不同的频率输出能力。在光电振荡器中,引入可调的信号延时或相位能够实现一定范围的调谐能力^[7-8]。在激光器的波长改变 40 nm 的情况下,通过色散延时的方法实现了最大频率 1.9 MHz 的调谐^[7]。采用调节钇铁石榴石(YIG)微波滤波器的方法能够实现更大范围的频率调谐^[9]。但是,由于 YIG 滤波器的性能限制,这种光电振荡器存在频率调谐速度慢(10 ms 左右)、频率重复性差(±5 MHz)的缺点,无法满足实际的应用需要。

本文研究了一种频率可调的光电振荡器,该振荡器工作于 X 波段(8~12 GHz),不仅具有多频点切换能力,而且同时具有低相位噪声和高边模抑制

比。在该方法中,光电振荡器采用 3 个长光纤环实现了低相位噪声和低边模水平,通过高速微波开关快速切换滤波器组实现了不同频率输出。

2 实现结构及理论分析

频率可调的三环光电振荡器实现结构如图 1 所示。电光转换单元将输入的微波信号转换为光波信号。调制的光波通过 3 个光纤延迟线和光电探测器(PD)后转化为微波信号。微波信号经过合路器、放大器、开关、滤波器、合路器,最后通过耦合器后一部分输出,另一部分反馈回电光转换单元以调制光波。光电振荡器的输出信号频率由微波滤波器决定,通过微波开关实现了 4 个频点的切换。在本实验研究的光电振荡器中,采用了 3 个长光纤环构成组合光纤延迟线。

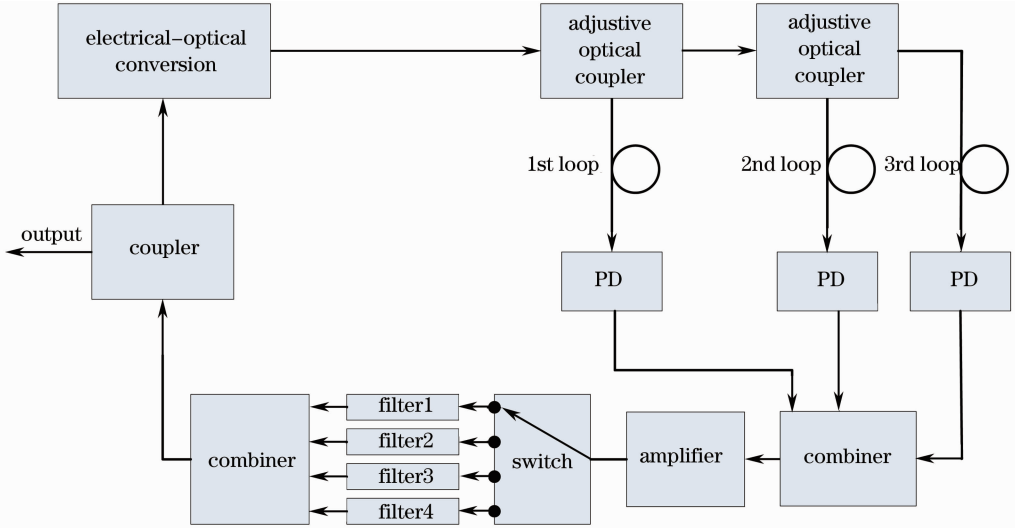


图 1 频率可调的三环光电振荡器

Fig. 1 Schematic of three-loop OEO with switchable frequency

设 3 个光纤环的延迟时间分别为 τ_1 、 τ_2 、 τ_3 , 光电振荡器产生信号的频率 f_{osc} 为

$$f_{osc} = \frac{m}{\tau_1} = \frac{n}{\tau_2} = \frac{l}{\tau_3}, \quad (1)$$

式中 m 、 n 、 l 为正整数。

对于多个光纤环的结构,由于信号是相干叠加的,因此,该系统的传输函数可以表示为

$$T = \sum_{i=1}^k a_i \exp(-j2\pi f\tau_i), \quad (2)$$

式中 k 为光纤环数目, τ_i 为第 i 个光纤环的延时, a_i 为光纤环的相对光功率比,定义为

$$a_i = \frac{P_{opt,i}}{\sum_{q=1}^k P_{opt,q}}, \quad (3)$$

式中 $P_{opt,i}$ 为第 i 个光纤环的光功率。

在光电振荡器中,采用三环结构,(2)式可写为

$$T = a_1 \exp(-j2\pi f\tau_1) + a_2 \exp(-j2\pi f\tau_2) + a_3 \exp(-j2\pi f\tau_3), \quad (4)$$

由于光电振荡器是一个闭环反馈系统,经过循环叠加的传输函数应为

$$T_c = \sum_{j=0}^{\infty} T^j = 1/\{1 - [a_1 \exp(-j2\pi f\tau_1) + a_2 \exp(-j2\pi f\tau_2) + a_3 \exp(-j2\pi f\tau_3)]\}. \quad (5)$$

因此,归一化功率传输函数为^[10]

$$P_c = 1/[1 + a_1^2 + a_2^2 + a_3^2 + 2a_1a_2 \cos(\phi_1 - \phi_2) + 2a_1a_3 \cos(\phi_1 - \phi_3) + 2a_2a_3 \cos(\phi_2 - \phi_3) - 2a_1 \cos \phi_1 - 2a_2 \cos \phi_2 - 2a_3 \cos \phi_3]. \quad (6)$$

在(6)式中, ϕ_i 为每个光纤环对应的相位,表示为

$$\phi_i = 2\pi f\tau_i. \quad (7)$$

在本文构建的光电振荡器中,3个光纤环的长度分别为4000、4167、4210 m,根据(6)式,可以计算在不同功率分配比时,输出功率谱的分布特性,如图2所示。可以看出,采用3个长光纤环,边模抑制比显著提高,理论计算能够达到60 dBc左右;改变3个光纤环的功率分配比,振荡频率不变,振荡边模的位置和功率略有变化。针对不同频率的信号,只要满足(1)式和滤波器的中心频率,就能实现相应的频率输出,为实现频率可变提供了一种途径。

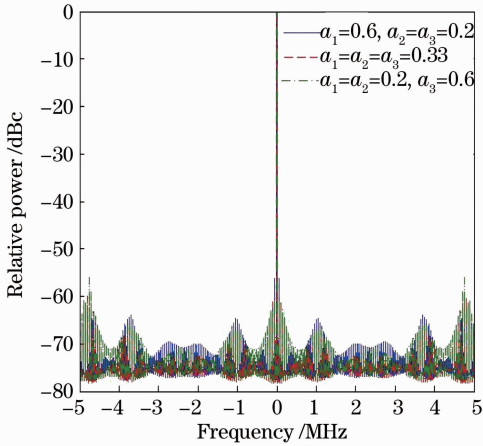


图2 3个光纤环的振荡模式

Fig.2 Oscillating modes of three loops

光电振荡器的相位噪声为^[11]

$$S(f') = \frac{\delta}{(2 - \delta/\tau) - 2\sqrt{1 - \delta/\tau} \cos(2\pi f'\tau)}, \quad (8)$$

式中 f' 为振荡频率的偏移, τ 为环路延时, δ 为振荡器的噪声信号比,表示为

$$\delta = \frac{[4k_B TK_{NF} + 2eI_{ph}R + N_{RIN} I_{ph}^2 R]G_A^2}{P_{osc}}, \quad (9)$$

式中 k_B 为玻尔兹曼常数, T 为温度, e 为电子电荷, K_{NF} 为微波放大器的噪声系数, I_{ph} 是光电探测器光电流, N_{RIN} 为激光器的相对强度噪声, P_{osc} 为振荡器功率, G_A 为放大器增益, R 为光电探测器的输出阻抗。

对于多环结构的振荡器,环路等效延时为^[12]

$$\tau = \sum_{i=1}^k a_i \tau_i. \quad (10)$$

根据(10)式,由于在三环光电振荡器中,每个光纤环长度都大于4000 m,故无论功率分配比如何调整,等效光纤长度一定,大于4000 m,保证了低相位噪声性能。

3 实验研究

构建了X波段频率可调的三环光电振荡器,光纤长度分别为4000、4167、4210 m。光电转换采用直接调制半导体激光器(桂林激光通信研究所GC1006S),其频率响应大于12 GHz,输出功率为6 mW。光电探测器(美国EM4公司EM149)的响应率为0.9 mA/mW,频率响应大于15 GHz。可调光功率分配器(武汉光迅公司MVOPI2)采用1×2结构,调节范围为10 dB,精度优于0.01 dB。微波放大器的频率范围为8~12 GHz,噪声系数为3.5 dB,放大增益为45 dB。微波滤波器组的中心频率分别为8、9、10、12 GHz,3 dB带宽为5 MHz。微波开关为1×4结构,工作频率范围为8~12 GHz,开关切换时间小于70 ns。

在频率不变时,调节两个可调光功率分配器,观察频谱仪的输出信号频谱。在实验中,很容易调整到比较理想的状态,这时,输出信号的频谱变得很干净,边模抑制比较高,而且信号非常稳定。通过控制微波开关的切换状态,能够实现不同频率的信号输出。输出不同频率信号的频谱如图3所示。可以看出,实验产生的信号频率为8、9、10、12 GHz。在每个频率,输出功率分别是12.1、11.9、10.9、10.6 dBm,边模抑制比分别为68、67、63、66 dBc,与理论计算结果一致。在室温条件下,对于不同频率的信号,信号的功率和频率在5 min内没有观察到明显的变化和漂移,证明了3个长环结构的光电振荡器在不同频率工作时具有较好的短期稳定性。通过微波开关反复切换工作频率,频率准确度优于50 kHz。

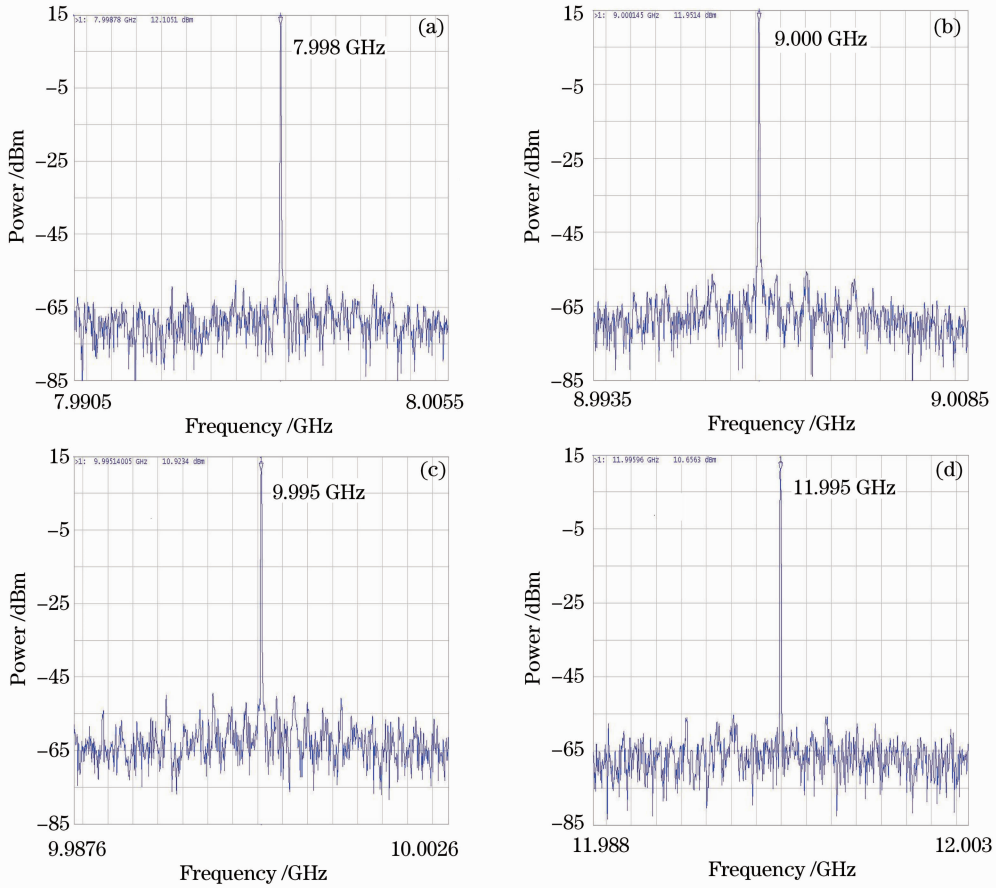


图 3 X 波段光电振荡器输出频谱。(a) 8 GHz; (b) 9 GHz; (c) 10 GHz; (d) 12 GHz

Fig. 3 Output spectra of OEO with four frequency points in X band. (a) 8 GHz; (b) 9 GHz; (c) 10 GHz; (d) 12 GHz

采用 Agilent 相位噪声分析仪 (E5052A) 测量每个频率输出信号的相位噪声分布, 其测量结果如图 4 所示。相位噪声分析仪的测量精度为 2 dB。为了便于比较, 相位噪声的理论计算结果也在图 4

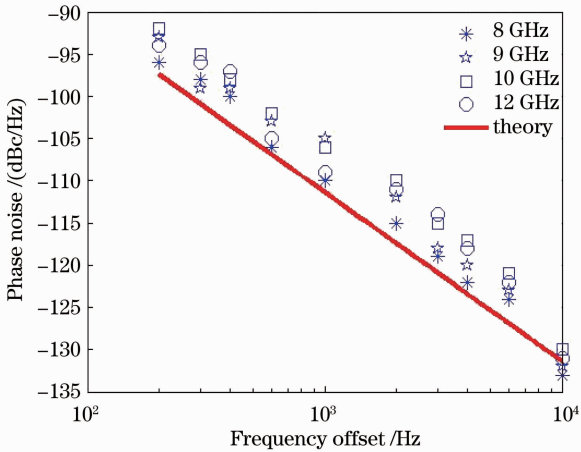


图 4 X 波段 4 个频点的相位噪声测量结果

Fig. 4 Phase noises of OEO with four frequency points in X band

中给出。在同一个频率偏移处, 不同频率的相位噪声最大偏差小于 5 dB。这是由于微波放大器、耦合器、激光器、光电探测器等微波和光电器件的幅度响应受频率波动的影响造成的。在典型频率偏移 10 kHz 处, 8、9、10、12 GHz 的相位噪声分别为 -133, -132, -130, -131 dBc/Hz, 远高于采用长短环结构的双环光电振荡器^[5]。相位噪声测试结果与理论分析基本一致, 存在的差别主要是因为理论分析中没有考虑实际的幅频响应特性以及激光器的相对强度噪声随频率变化的关系。

4 结 论

研究了一种频率可调的高性能光电振荡器, 该光电振荡器利用高速微波开关结合滤波器组实现频率切换, 采用 3 个长光纤环结构实现低相位噪声和低边模水平。在实验系统中, 光电振荡器能够产生频率 8、9、10、12 GHz 的微波信号, 输出功率为 10 dBm, 边模抑制比达到了 60 dBc。对于每个频点, 在频率偏移 10 kHz 处的相位噪声都达到了

-130 dBc/Hz。该光电振荡器具有很高的实用价值,能够应用于通信、雷达和导航等系统中。

参 考 文 献

- 1 X S Yao, L Maleki. High frequency optical subcarrier generator [J]. *Electron Lett*, 1994, 30(18): 1525-1526.
- 2 I Ozdur, M Akbulut, N Hoghooghi, *et al.*. Optoelectronic loop design with 1000 finesse Fabry-Perot etalon [J]. *Opt Lett*, 2010, 35(6): 799-801.
- 3 O Okusaga, E J Adles, E C Levy, *et al.*. Spurious mode reduction in dual injection-locked optoelectronic oscillators [J]. *Opt Express*, 2011, 19(7): 5839-5854.
- 4 X S Yao, L Maleki. Converting light into spectrally pure microwave oscillation [J]. *Opt Lett*, 1996, 21(7): 483-485.
- 5 Jiang Yang, Yu Jinlong, Wang Yaotian, *et al.*. A novel scheme of dual-loop optoelectronic oscillator [J]. *Acta Optica Sinica*, 2007, 27(5): 919-922.
江 阳, 于晋龙, 王耀天, 等. 一种新型双环光电振荡器[J]. *光学学报*, 2007, 27(5): 919-922.
- 6 Hong Jun, Yang Chun, Chong Yuhua, *et al.*. Optimization of phase noise of opto-electronic oscillator through low-biasing technology for modulator [J]. *Acta Optica Sinica*, 2011, 31(8): 0806002.
洪 俊, 杨 春, 崇毓华, 等. 调制器低偏置方案优化光电振荡器相位噪声[J]. *光学学报*, 2011, 31(8): 0806002.
- 7 S Poinsot, H Porte, J P Goedgebuer, *et al.*. Continuous radio-frequency tuning of an optoelectronic oscillator with dispersive feedback [J]. *Opt Lett*, 2002, 27(5): 1300-1302.
- 8 S L Pan, J P Yao. Wideband and frequency-tunable microwave generation using an optoelectronic oscillator incorporating a Fabry-Perot laser diode with external optical injection [J]. *Opt Lett*, 2010, 35(11): 1911-1913.
- 9 S Huang, L Maleki, T Le. A 10 GHz optoelectronic oscillator with continuous frequency tunability and low phase noise [C]. *Proceedings of the 2001 IEEE International Freq Contr Symp and PDA Exhibition*, 2001. 720-727.
- 10 E C Levy, O Okusaga, M Horowitz, *et al.*. Comprehensive computational model of single- and dual-loop optoelectronic oscillators with experimental verification [J]. *Opt Express*, 2010, 18(20): 21461-21476.
- 11 X S Yao, L Maleki. Optoelectronic microwave oscillator [J]. *J Opt Soc Am B*, 1996, 13(8): 1725-1735.
- 12 T Bánky, B Horváth, T Bercei. Optimum configuration of multiloop optoelectronic oscillators [J]. *J Opt Soc Am B*, 2006, 23(7): 1371-1380.

栏目编辑: 王晓瑛