

Simulation Analysis of Ultra-Low Phase Noise Source Based on Dual-Loop Photonic Microwave

Chenyi Cai, Hongxia Guo

Nanjing University of Science and Technology, Nanjing Jiangsu
Email: 876850148@qq.com

Received: Jun. 4th, 2018; accepted: Jun. 20th, 2018; published: Jun. 28th, 2018

Abstract

The paper uses the dual-loop opto-oscillator structure to solve the contradiction between the single-mode output of the single-ring structural optoelectronic oscillator and the high-Q. The system consists of a dual-ring OEO system consisting of an MZM modulator, a radio frequency filter, a polarization beam splitter, a polarization combiner, two different-length single-mode fibers, a photodetector, and a radio frequency amplifier. The splitting and combining scheme of PBS and PBC can ensure the polarization orthogonality of the light field in the double ring and greatly reduce the phase noise introduced by the interference beat frequency. In the article, two different fiber length simulation experiments were used to obtain high-quality microwave signals with tunable frequencies in the X-band, and a good phase noise was achieved.

Keywords

Optoelectronic Oscillator, Dual Loop, Phase Noise, Frequency Stability

基于双环路光子微波超低相位噪声源的仿真分析

蔡宸怡, 郭红霞

南京理工大学, 江苏 南京
Email: 876850148@qq.com

收稿日期: 2018年6月4日; 录用日期: 2018年6月20日; 发布日期: 2018年6月28日

摘要

论文利用双环路光电振荡器结构来解决单环结构光电振荡器单模输出与高 Q 值的矛盾, 双环OEO系统由MZM调制器、射频滤波器、偏振分束器、偏振合路器、两段不同长度的单模光纤、光电探测器和射频放大器等器件组成。PBS加PBC的分光合路方案能保证双环中光场的偏振正交性, 大大降低了干涉拍频引入的相位噪声。文章中采用两种不同光纤长度仿真实验获得X波段内频率可调谐的高质量微波信号, 得到了很好的相位噪声效果。

关键词

光电振荡器, 波长双回路, 相位噪声, 稳定性

Copyright © 2018 by authors and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

1. 引言

随着现代光电信息技术在航空航天、雷达通信、电子对抗等领域的广泛应用, 微波光子技术利用光子技术的优势实现了微波技术领域的相关应用。OEO作为一种新型的微波信号发生器能产生频率从几赫兹到上百吉赫兹、 Q 值高达 10^{10} 、低相噪的高品质信号并具有可调谐性和光、电两种输出, 是一种非常理想的信号发生装置。1982年德国科研人员A Neyer和E Voges首次提出了光电混合的光电振荡器的概念和构想[1], 并进行了初步的实验分析。2000年Yao等又提出了多环路光电振荡器方案[2], 利用两段长度不同的光纤带来的游标效应使系统输出微波信号保持低相噪水平的同时扩大振荡频率间隔。

光电振荡器一般是由激光器、电光调制器、光放大器、光纤、光电探测器、微波滤波器和微波放大器共同构成的正反馈回路。光电振荡器的边模是由高 Q 值光纤环腔造成的, 振荡谐振腔内的光纤越长, 作为储能的光纤环形腔滤波 Q 值就越高。

2. 双环路光电振荡器理论分析

2.1. 双环路光电振荡器数学模型分析

所提出的双环光电振荡器模型如图1所示[3]。光源输出的光经过PC1调整光的偏振态, 使它与调制器的工作主轴方向一致, 以获得最大调制。MZM对光场进行调制后通过偏振分束器进入长度分别为 L_1 和 L_2 的光纤进行延迟, 再经过偏振合路器合并后经PD转换为电信号, 并被放大滤波后形成闭合的反馈回路。双环OEO实现单模振荡的原理为: 两个不同长度的光纤环路具有不同的纵模间隔 Δf_1 和 Δf_2 , 最终起振的模式间隔为 Δf_1 和 Δf_2 的最小公倍数, 保证了高边模抑制比的单模振荡。

当断开一路时, 其结构与普通的单环光电振荡器相同。只有同时满足两套模式的频率才能获得足够的增益而起振, 因此最后得到的微波信号的基频为两个环路基频的公倍数。当两个路光纤的长度选择合适时, 双环路的模式间隔可以和微波滤波器的带宽相匹配, 则可以滤出单一的起振频率, 有效的抑制边模。

2.2. 双环路光电振荡器仿真分析

本文仿真在X波段中心频率为10 GHz相位噪声来对比单环路与双环路光电振荡器。在普通单环光

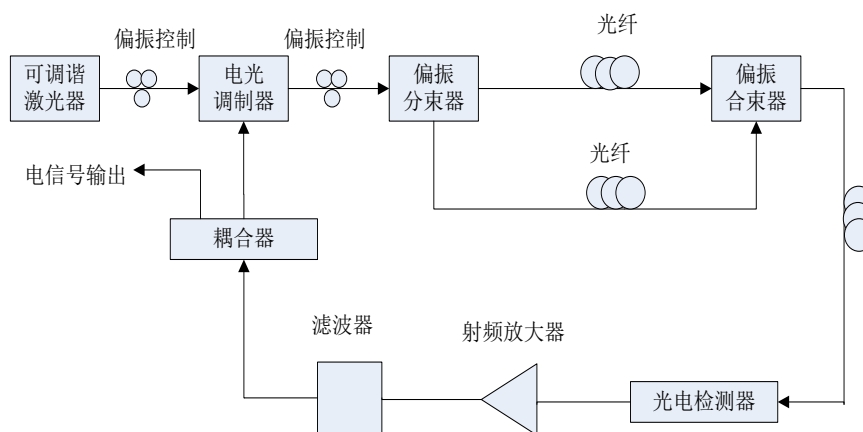


Figure 1. Dual-loop photoelectric oscillator based on PBS and PBC

图 1. 基于 PBS 和 PBC 双环路光电振荡器

电振荡器中, 取单模光纤长 2 km。半导体激光器发出波长为 1550 nm 的激光, 通过偏振控制器控制光场偏振态使其在 MZM 中达到最佳调节效果。调制输出信号经过长光纤后被 PIN 光电探测器转换为电信号再经过电滤波器完成滤波, 得到单环振荡的频谱图如图 2 所示。

若增加一个环路, 则振荡频率间隔增大, 如图 3 所示。

2.3. 相位噪声仿真图

单环路光电振荡器改变光纤的长度可以改变相位噪声, 由 $Q = 2\pi\tau f$ 得增加光纤的长度可以提高品质因数降低相噪, 分别设置光纤长度为 3 km、10 km 仿真得出相位噪声如图 4。

由图 4、图 5 看出在同样以 10 GHz 为中心频率的单环路系统中, 环腔中光纤的长度 L 决定了环腔的品质因数, 从而决定了 OEO 的输出相噪。光纤长度 L 越长, 环腔 Q 值越高, 输出的相位噪声越小。

3. 光可调滤波器的双环路可调谐结构

近年来人们已经不满足于利用光电振荡器产生某一个单一的频率, 而希望能够成为大频率范围、小调谐步进的频率可调谐信号发生源[4] [5]。

基于光可调滤波器的双环路结构如图 6 所示[6], 激光器发出的连续光经过相位调制器调制, 调节可调光滤波器的中心频率和带宽, 从调制后的光信号中仅滤出光载波和一个一阶边带, 相位调制转换成了强度调制, 微波光子滤波器形成了。回路中的有源器件产生的不同频率成分的噪声, 只有那些满足振荡条件并处在微波光子滤波器中心频率附近的噪声才能在环路循环中放大, 最终形成稳定信号。

假设激光器发出的光信号是 $E\cos(\omega_0 t)$, 经过偏振控制器 1 后耦合进相位调制器。如果反馈信号为 $V\cos(\omega t)$, 经反馈信号调制输出。由于是噪声起振, 满足小信号条件, 那么输出信号可以表示为:

$$E_{out1} \approx E_{-1} \cos\left(\omega_0 - \omega - \frac{\pi}{2}\right)t + E_0 \cos \omega_0 t + E_{+1} \cos\left(\omega_0 + \omega + \frac{\pi}{2}\right)t \quad (1)$$

其中, 主要的三个谐波分量 $\omega_0 - \omega$ 、 ω_0 、 $\omega_0 + \omega$ 分别代表-1 阶边带、光载波、+1 阶边带, 而 E_{-1} 、 E_0 、 E_{+1} 分别为三个谐波分量的幅值。

形成的微波光子滤波器 $F_1(\omega)$ 的中心频率为可调谐光滤波器带宽的一半, 带宽为可调谐光滤波器的中心频率和光载波频率的差值。所以, 通过调节可调谐光滤波器的带宽来调谐可调谐微波光子滤波器的中心频率, 通过调节可调谐光滤波器的波长或激光源的波长来调谐微波光子滤波器的带宽, 进而调谐光电

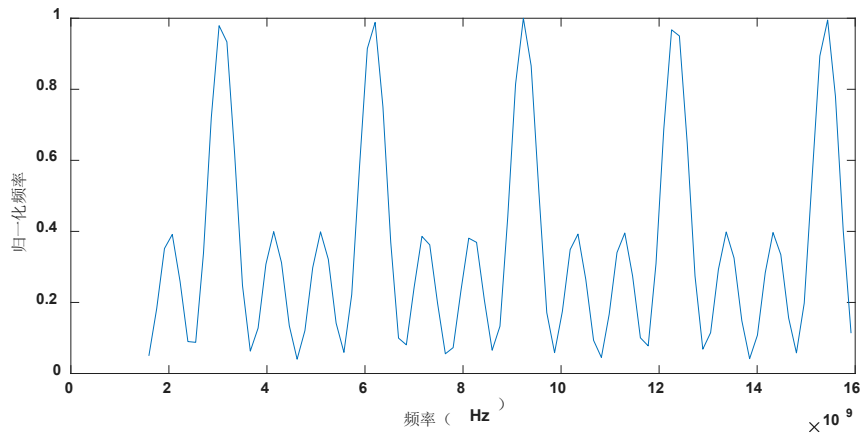


Figure 2. Single-loop optoelectronic oscillator resonance
图 2. 单环 OEO 振荡图

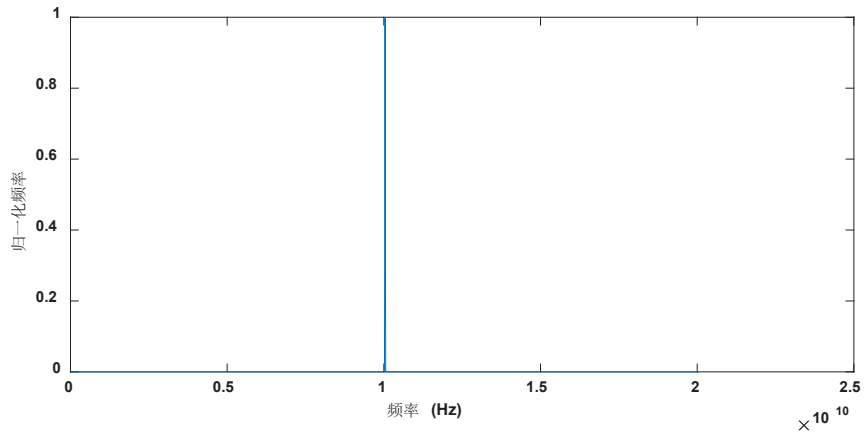


Figure 3. Dual-loop optoelectronic oscillator resonance
图 3. 双环路 OEO 振荡图

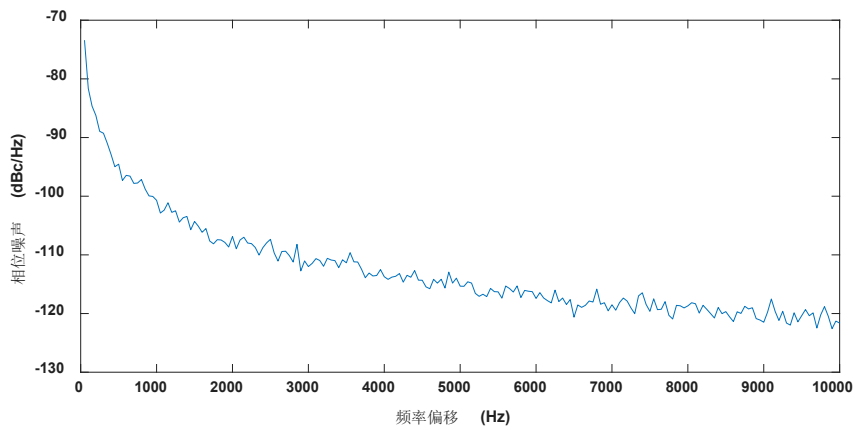


Figure 4. Phase noise at 3 km
图 4. L = 3 km 相位噪声

振荡器的输出频率[7]。

但是系统中形成的微波光子滤波器的 3 dB 带宽较大而导致单模振荡输出信号的边模抑制比不够理想,

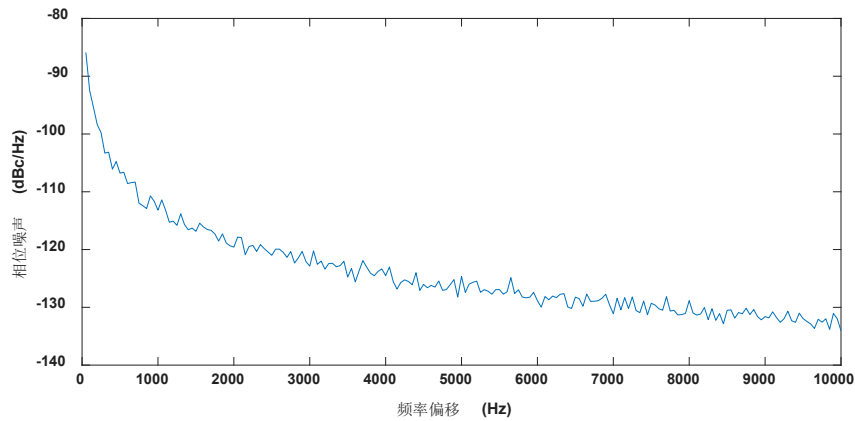


Figure 5. Phase noise at 10 km
图 5. L = 10 km 相位噪声

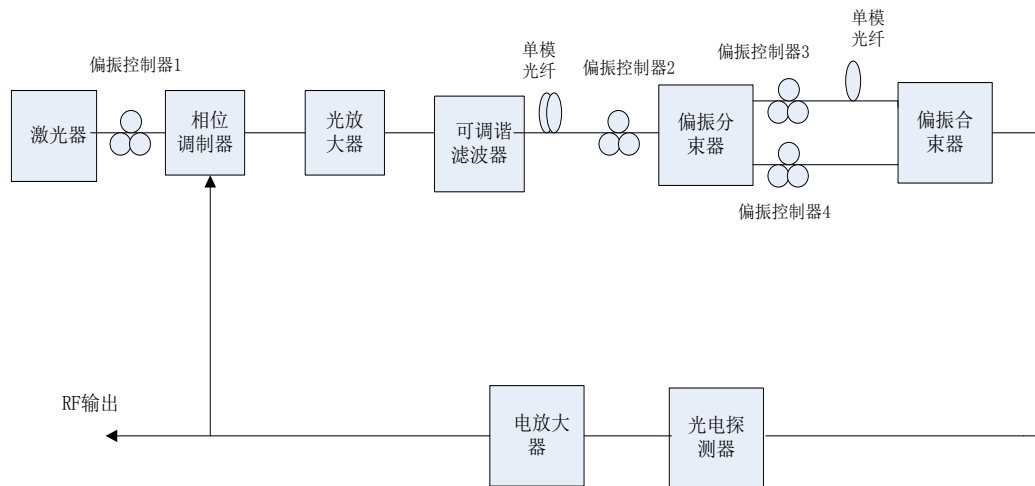


Figure 6. Optical tunable filter dual-loop tunable optoelectronic oscillator
图 6. 光可调谐滤波器的双环路可调谐光电振荡器

因此考虑用双环路结构来解决这个问题。将可调谐光滤波器输出的光信号经过 PC2 和 PBS 分成偏振方向相互垂直、光功率相等的两部分，一部分直接连接到 PBC，另一部分经过一段一定长度的单模光纤进入 PBC，PC3 和 PC4 用来保证两束光信号在传输过程中的偏振态不变。

这样相当于形成了两个不同频率响应特性的梳状滤波器， τ_1 ， τ_2 是两段不同长度的单模光纤形成的时间延迟。那么它的频率响应可以被描述如下：

$$\frac{\Delta f}{f} = -\frac{\Delta n}{n} = -\frac{\Delta L}{L} \quad (2)$$

假设两路环长分别为 650 m 和 550 m，通过仿真得到仅有任意一条光纤环形成梳状滤波器的两个滤波器共同作用时的频率响应曲线(图 7)。

4. 结论

本文重点研究一种基于 PBS 和 PBC 结合的双环路光电振荡器结构，实验中的微波信号中心频率为 10 GHz，效果良好，相位噪声有明显降低，保证了输出信号的质量，使输出信号具有良好的边模抑制

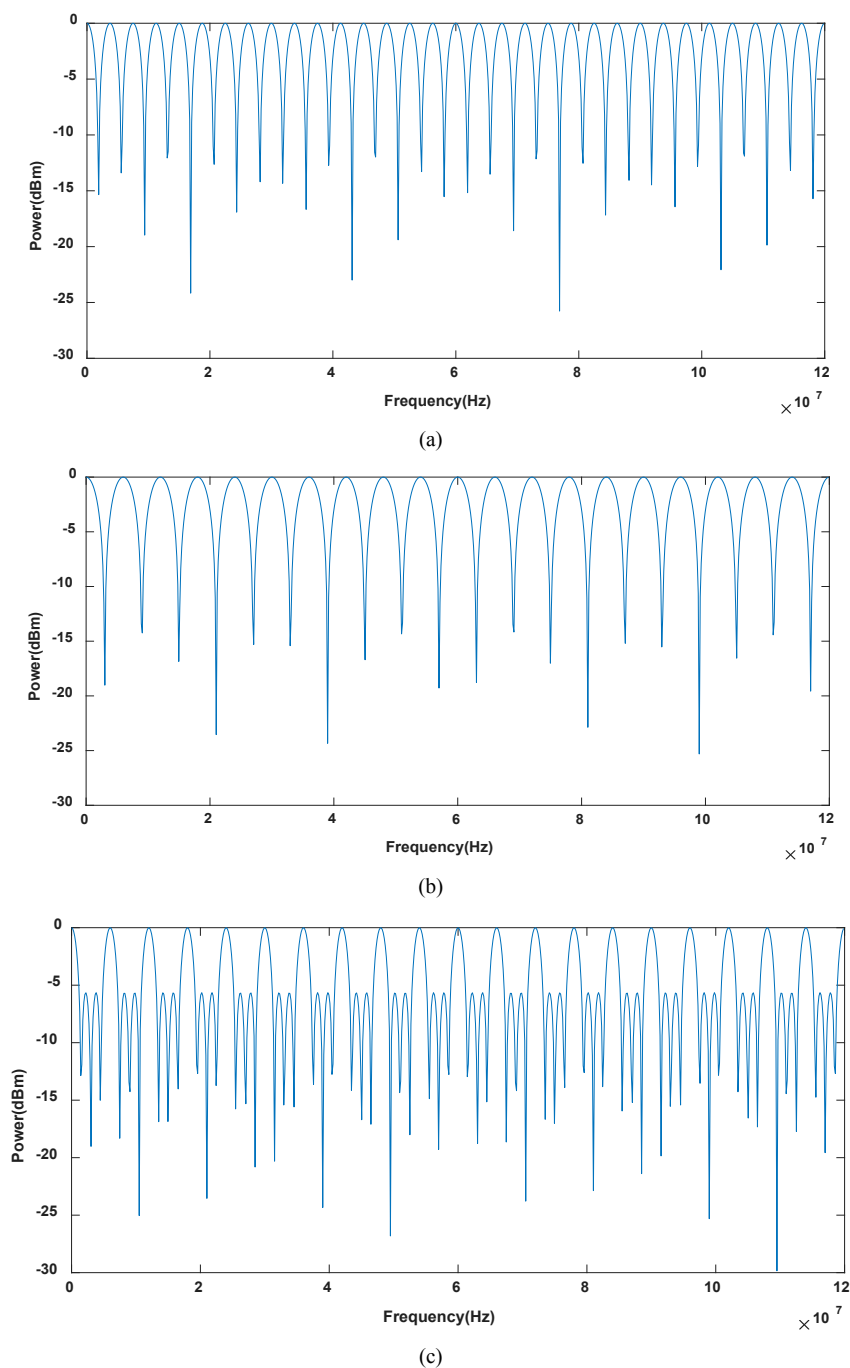


Figure 7. Double-loop structure formed by the filter frequency response at 650 m, 550 m and dual-loop. (a) 650 m; (b) 550 m; (c) Dual-loop
图 7. 双环路结构形成的滤波器频率响应曲线图。(a) 650 m; (b) 550 m; (c) 双环

比和相位噪声。改变光纤长度仿真得出环腔中光纤的长度 L 决定了环腔的品质因数，从而决定了 OEO 的输出相噪。光纤长度 L 越长，环腔 Q 值越高，输出的相位噪声越小。

参考文献

- [1] Neyer, A. and Voges, E. (1982) Dynamics of Electrooptic Bistable Devices with Delayed Feedback. *IEEE Journal of*

-
- Quantum Electronics*, **18**, 2009-2015. <https://doi.org/10.1109/JQE.1982.1071487>
- [2] Yao, X.S. and Maleki, L. (2000) Multiloop Optoelectronic Oscillator. *IEEE Journal of Quantum Electronics*, **36**, 79-84. <https://doi.org/10.1109/3.817641>
- [3] 魏志虎. 光电振荡器和微波光子滤波器研究[D]: [博士学位论文]. 南京: 解放军理工大学, 2013.
- [4] Li, W., Li, M. and Yao, J. (2012) A Narrow-Passband and Frequency-Tunable Microwave Photonic Filter Based on Phase-Modulation to Intensity-Modulation Conversion Using a Phase-Shifted Fiber Bragg Grating. *IEEE Transactions on Microwave Theory & Techniques*, **60**, 1287-1296. <https://doi.org/10.1109/TMTT.2012.2187678>
- [5] Li, W., Kong, F. and Yao, J. (2013) Arbitrary Microwave Waveform Generation Based on a Tunable Optoelectronic Oscillator. *Journal of Lightwave Technology*, **31**, 3780-3786. <https://doi.org/10.1109/JLT.2013.2287122>
- [6] Oh, C.K., Kim, T.Y., Baek, S.H., *et al.* (2006) A Novel Photonics Microwave Notch Filter with Negative Coefficient Based on cross Polarization Modulation in a Highly Nonlinear Fiber. SPIE, UK, 1-8. <https://doi.org/10.1117/12.688513>
- [7] 靳胜才. 可调谐微波光子带通滤波器的研究[D]: [硕士学位论文]. 天津: 天津理工大学, 2011: 1-60.

知网检索的两种方式:

1. 打开知网页面 <http://kns.cnki.net/kns/brief/result.aspx?dbPrefix=WWJD>
下拉列表框选择: [ISSN], 输入期刊 ISSN: 2164-5450, 即可查询
2. 打开知网首页 <http://cnki.net/>
左侧“国际文献总库”进入, 输入文章标题, 即可查询

投稿请点击: <http://www.hanspub.org/Submission.aspx>

期刊邮箱: oe@hanspub.org