

Simulation Analysis and Optimization of Phase Locked Photoelectric Oscillator

Chenyi Cai

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

Received: Aug. 6th, 2018; accepted: Aug. 23rd, 2018; published: Aug. 30th, 2018

Abstract

The phase noise transfer function of the photoelectric oscillator based on injection locking technique and phase-locked loop technique are derived respectively in this paper. The simulation compares the phase noise performance of free running OEO and locked OEO. Due to the high sensitivity of the fiber to temperature, there is a situation in which the lock is easy to lose. This paper proposes an improved injection-locked OEO scheme to improve system frequency stability. Considering the importance of the RF filter in the loop system, an X-band narrowband filter with a bandwidth of 20 MHz is used to improve the overall performance of the phase-locked loop.

Keywords

Optoelectronic Oscillator, Phase Noise, Injection Locked, Phase-Locked Loop, Narrowband Filter

相位锁定光电振荡器的仿真分析与优化

蔡宸怡

南京理工大学, 江苏 南京
Email: 876850148@qq.com

收稿日期: 2018年8月6日; 录用日期: 2018年8月23日; 发布日期: 2018年8月30日

摘要

论文分别推导了基于注入锁定技术和锁相环技术的光电振荡器的相位噪声传递函数, 并仿真比较了自由运行OEO和锁定后OEO的相噪性能。由于光纤对温度的敏感度高, 存在易失锁的情况, 本文提出改进的注入锁定OEO方案提高系统频率稳定性。考虑到环路系统中射频滤波器的重要性, 还设计了X波段窄带滤波器, 带宽20 MHz, 提升锁相环路整体性能。

关键词

光电振荡器, 相位噪声, 注入锁定, 锁相环, 窄带滤波器

Copyright © 2018 by author 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

光通信作为当代通信技术发展的最新成就, 正在逐渐走向广泛应用的道路。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。但是由于长光纤对温度的高度敏感性, 导致射频信号频稳性差, 近几十年来研究员提出许多改善 OEO 性能的方法, 如注入锁定 OEO、双环路 OEO [2]、耦合式 OEO [3]等。2015年, Qu 等人实验了光纤布拉格光栅和法布里珀罗滤波器搭建的新型 OEO, 获得低相噪信号并提高了频率稳定性[4]。2016年 Tae Hyum Kim 等人提出使用光延迟线的 OEO, 利用声光调制器作为储能元件, 证实了可以用很短的环路长度获得较低相位噪声的信号[5]。

本文分析了基于注入锁定技术和锁相环技术的光电振荡器, 给出了各自的相位噪声模型, 为了解决长光纤易受环境温度影响出现的失锁问题, 将 OEO 输出信号和外部参考源信号注入鉴相器, 鉴相器输出的直流电压调节延迟线长度, 使 OEO 保持锁相或锁定状态而不失锁, 提高 OEO 的长期稳定性。

2. 注入锁定

2.1. 自注入锁定

自注入锁定(SIL)是提高振荡器的频率稳定性和降低相位噪声的一种很有效的方法[6]。通过引出部分信号进行延迟再注入回振荡环路中, 可以实现振荡器的自注入锁定。在一定的条件下, 采用自注入锁定技术可以使振荡器获得与延迟量成正比的相噪抑制, 并增大振荡器的等效 Q 值, 有利于减小振荡器的频率波动。

自注入锁定的框图如图 1 所示, 引出的部分振荡信号经过时间延迟 τ_d 后以注入强度 ρ 反馈进入振荡回路, 图中 θ_0 为输出信号的相位, $B = \rho\omega_{3dB}$, $\rho = \sqrt{P_{inj}/P_s}$ 是注入强度, $\omega_{3dB} = \omega_0/2Q$ 是振荡器的 3 dB 带宽。

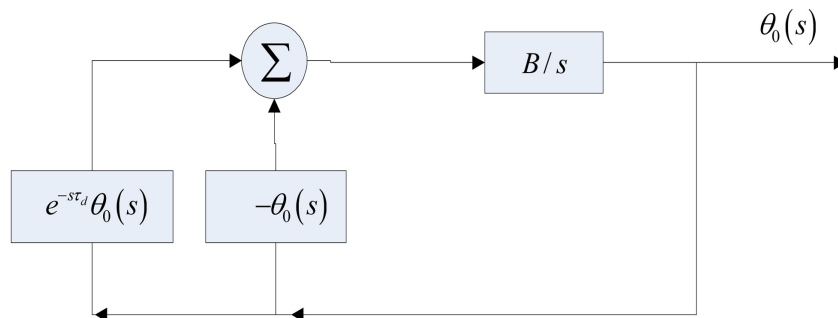


Figure 1. Self-injection locked oscillator block diagram

图 1. 自注入锁定振荡器框图

由剩余噪声 $n_1(s)$ 引起的输出为:

$$\theta_{o1}(s) = -\frac{B}{s}\theta_{o1}(s) + e^{-s\tau_d}\theta_{o1}(s) + \frac{B}{s}n_1(s) \quad (1)$$

由振荡器自身相位噪声 $n_2(s)$ 引起的输出为:

$$\theta_{o2}(s) = -\frac{B}{s}\theta_{o2}(s) + e^{-s\tau_d}\theta_{o2}(s) + n_2(s) \quad (2)$$

θ_o 的功率谱密度可以表示为:

$$S_{sil}(\omega_m) = |H_a(s)|^2 S_{n1}(\omega_m) + |H_b(s)|^2 S_{n2}(\omega_m) \quad (3)$$

其中

$$H_a(s) = \frac{B}{s + B(1 - e^{-s\tau_d})} \quad (4)$$

$$H_b(s) = \frac{s}{s + B(1 - e^{-s\tau_d})} \quad (5)$$

$S_{n1}(f_m)$ 为频偏 f_m 处的剩余噪声:

$$S_{n1}(f_m) = \frac{kTB'F}{2P_s} \left(\frac{f_c}{f_m} + 1 \right) \quad (6)$$

$S_{n2}(f_m)$ 为振荡器在频偏 f_m 处的相位噪声[7]:

$$S_{n2}(f_m) = \frac{\delta}{1 + |G(V_0)|^2 - 2|G(V_0)|\cos(2\pi f_m \tau)} + \frac{\alpha \cdot \delta / f}{1 + |G(V_0)|^2 - 2|G(V_0)|\cos(2\pi f_m \tau)} \quad (7)$$

下面根据公式进行 Matlab 仿真, OEO 的光纤环长选为 150 m, 光纤延迟线分别使用 7 km 和 11 km 来进行自注入锁定。仿真后的结果如图 2 所示, 采用自注入锁定使 OEO 的相位噪声在频偏 10 kHz 处降低了 20 dB 左右, 相位噪声下降速度也比原先略快。且从图中可以看出, 在相同的注入强度下, 光纤延迟线越长, OEO 的相位噪声抑制量越大。

下面仿真环路长度 150 m 的 OEO 采用 11 km 光纤延迟线在不同注入强度 ρ 下的自注入相位噪声曲线图。选取的注入强度系数分别为 $\rho = 0.0178, 0.0562, 0.1778$, 可以清晰的看出在延迟时间 τ_d 相同的条件下, 注入强度 ρ 越大, 相噪抑制就越好, 但是杂散模式噪声的幅值也提高了(图 3)。

2.2. 双自注入锁定

双自注入锁定系统的框图如下图 4 所示, 比起上述的自注入锁定, 它引出的振荡信号被分为两部分, 分别经过 τ_{d1} 和 τ_{d2} 的延时并以相同的注入强度 ρ 反馈会振荡器。假设两个注入之间没有相互作用, 那么双自注入锁定系统的输出是两个注入的叠加。

与自注入锁定的相噪推导公式类似, 且假设两路分配的功率相等。

依然有:

$$S_{sil}(\omega_m) = |H_a(s)|^2 S_{n1}(\omega_m) + |H_b(s)|^2 S_{n2}(\omega_m) \quad (8)$$

其中

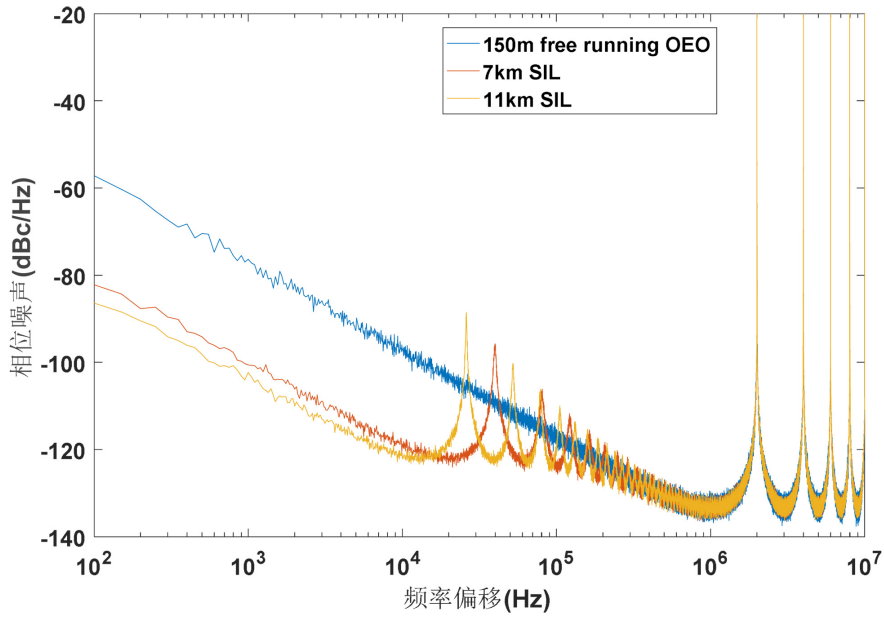


Figure 2. Phase noise simulation of 150 m free running OEO, 7 km SIL OEO and 11 km SIL OEO

图 2. 150 m 环长自由运行 OEO 和 7 km SIL OEO、11 km SIL OEO 的相位噪声仿真

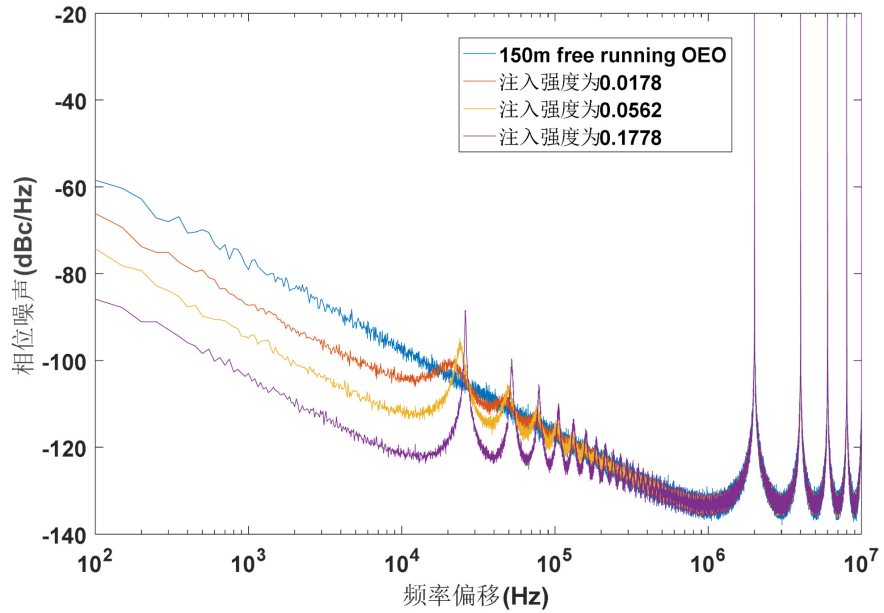


Figure 3. Phase noise simulation of 150 m OEO and 11 km SIL OEO at different injection intensities

图 3. 150 m 环长 OEO 和不同注入强度下 11 km SIL OEO 的相位噪声仿真

$$H_a(s) = \frac{2B}{2s + B(1 - e^{-s\tau_{d1}}) + B(1 - e^{-s\tau_{d2}})} \quad (9)$$

$$H_b(s) = \frac{2s}{2s + B(1 - e^{-s\tau_{d1}}) + B(1 - e^{-s\tau_{d2}})} \quad (10)$$

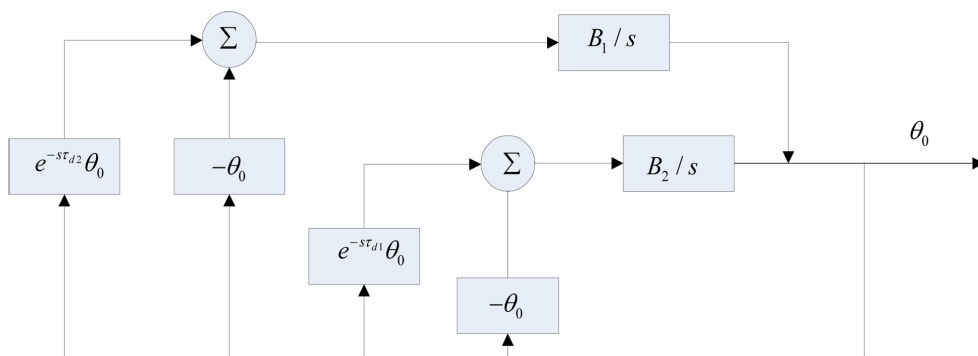


Figure 4. Dual self-injection locked oscillator system block diagram
图 4. 双自注入锁定振荡器系统框图

150 m 环长 OEO 采用 7 km 和 11 km 光纤延迟线进行双自注入锁定, 并单独使用 7 km 和 11 km 的光纤延迟线进行自注入锁定, 通过 matlab 仿真对相噪图进行比较。可以看出在双自注入锁定 OEO 中, 杂散模式的抑制较好。双自注入锁定 OEO 的最好相噪水平决定于其中最长的延迟线的长度以及两个自注入环路的功率分配。本文中两路自注入锁定的功率是相等的, 所以双自注入锁定 OEO 的相噪水平是两段光纤分别进行注入锁定的平均(图 5)。

3. 锁相环光电振荡器

锁相环光电振荡器是一种反馈控制系统, 可以用来提高 OEO 的长期稳定性并降低相位噪声。锁相环光电振荡器包括一个外部参考源(External Signal)、鉴相器(Phase Defector)、环路滤波器(Loop Filter)和 OEO。锁相环 OEO 的 s 域噪声模型如图 6 所示:

由图 6 看出锁相环 OEO 的开环传递函数为:

$$H(s) = \frac{K_{pd}K_{OEO}F(s)}{s} \quad (11)$$

其中, K_{pd} 是鉴相因数, K_{OEO} 是光电振荡器的控制灵敏度, $F(s)$ 是环路滤波器的频响。自由运行的光电振荡器其噪声在锁相环内传输函数为:

$$H_{OEO}(s) = \frac{1}{1+H(s)} \quad (12)$$

同理, 外部参考源的闭环传输函数为:

$$H_{REF}(s) = \frac{H(s)}{1+H(s)} \quad (13)$$

鉴相器和环路滤波器的内部噪声闭环传递函数相等为:

$$H_{PD}(s) = H_{LF}(s) = \frac{H(s)}{1+H(s)} \cdot \frac{1}{K_{pd}} \quad (14)$$

锁相环 OEO 的输出噪声可以表示为:

$$\Delta\theta_{out} = \Delta\theta_{OEO}H_{OEO}(s) + \Delta\theta_{REF}H_{REF}(s) + \Delta\theta_{PD}H_{PD}(s) + \Delta\theta_{LF}H_{LF}(s) \quad (15)$$

其中 $\Delta\theta_{OEO}$ 、 $\Delta\theta_{REF}$ 、 $\Delta\theta_{PD}$ 和 $\Delta\theta_{LF}$ 分别表示自由运行 OEO、参考源、鉴相器和环路滤波器的相位扰动。

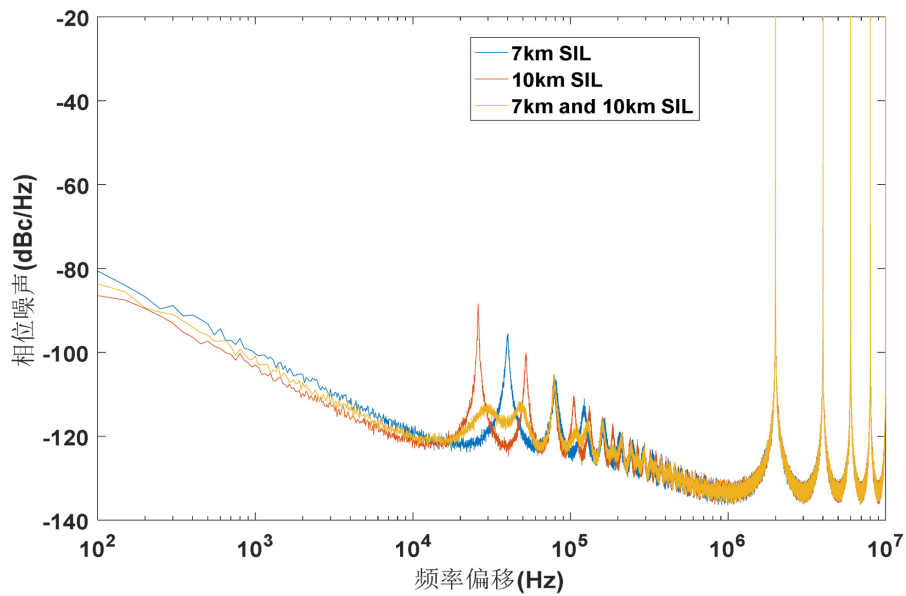


Figure 5. Phase noise comparison between dual self-injection locking and single self-injection-locked OEO

图 5. 双自注入锁定与单自注入锁定 OEO 的相噪对比

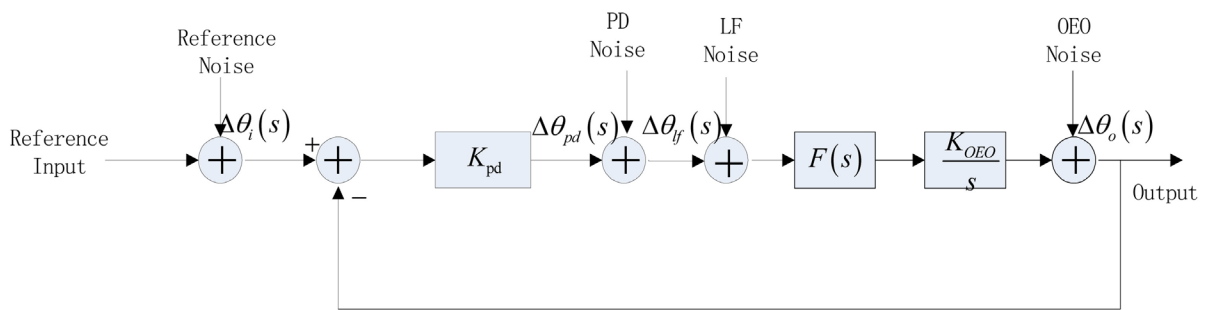


Figure 6. S-domain noise model of phase-locked loop OEO

图 6. 锁相环 OEO 的 s 域噪声模型

上式表明在锁相环 OEO 的锁定带宽内，输出信号的相噪更多的受外部参考源、鉴相器和环路滤波器的影响；在锁定带宽外，则受到自由运行光电振荡器自身的影响。因此环路带宽的选择会极大地影响锁相环 OEO 的相噪，设计滤波器时要综合考虑各个噪声的影响，才能确定锁相带宽。

锁相环 OEO 最终输出信号的相位噪声在 10 kHz 处下降了 25 dB，而在偏离大于 100 kHz 的地方没有受到外部信号的影响，锁相环 OEO 和自由运行的 OEO 基本保持一致(图 7)。

4. 失锁和改进的方法

OEO 锁定后的输出频率与参考频率相同，则 OEO 的频率稳定性由外部参考源的稳定性决定。外部源通常由高稳晶振倍频产生。锁定后稳定性远远优于自由运行的 OEO，则希望 OEO 的锁定带宽能足够的大。但是带宽一味增大会使 OEO 得相噪性能恶化，所以一般情况下锁定带宽不超过 5 kHz，在温度稳定的实验环境下，OEO 很容易失锁，一般只能维持几分钟的锁定时间。为了解决该问题本文搭建了锁定状态检测反馈回路，保证 OEO 频率稳定在锁定频率内。

框图如图 8 所示，射频衰减器的作用是调节注入强度改变锁定带宽。经过放大后的射频信号被分为

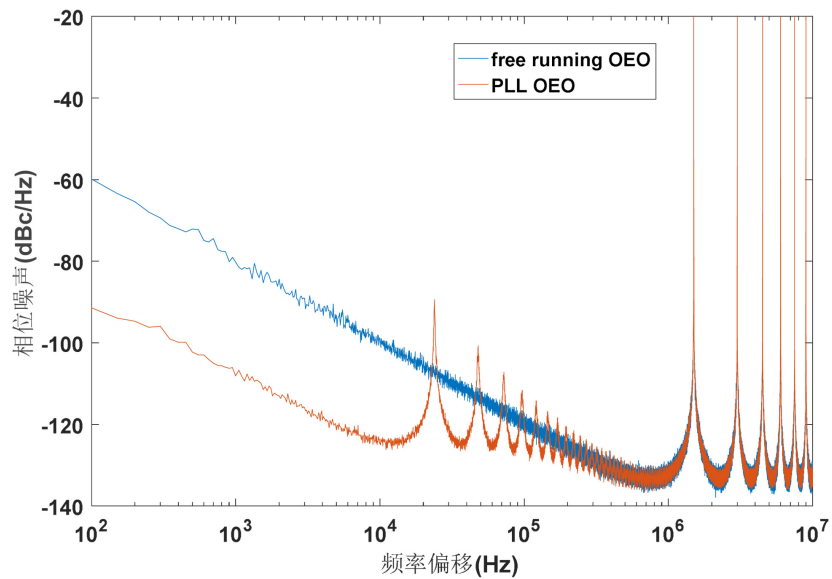


Figure 7. Comparison of phase noise between OEO and phase-locked loop OEO
图 7. 自由运行 OEO 与锁相环 OEO 相噪比较

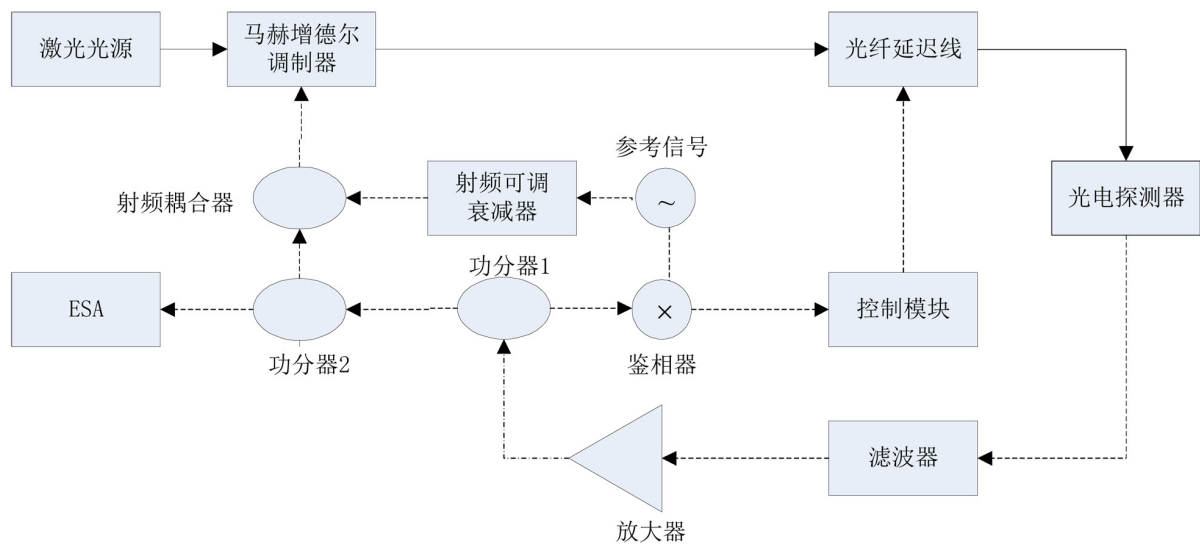


Figure 8. Improved injection-locked photoelectric oscillator structure
图 8. 改进的注入锁定式光电振荡器结构图

了三个部分：第一部分耦合后注入马赫增德尔调制器后形成完整的振荡环路；第二部分经过功分后注入鉴相器，鉴相器会输出一个直流电压，大小正比于 OEO 输出和注入源相位差的正弦函数，控制模块根据直流信号调节延迟线长度，起到监测 OEO 锁定的情况；第三部分信号用于输出。

5. 窄带带通滤波器

利用 ADS 优化工具来设计中心频率 10 GHz 满足要求的窄带滤波器，窄带滤波器电路图如图 9 所示。

该滤波器 3 dB 带宽为 20 MHz，带内衰减小于 3 dB，9.75 GHz 处的衰减为-41.747 dB，10.25 GHz 处的衰减为-41.921 dB，均小于 40 dB；反射系数约为-20 dB。说明该带通滤波器性能良好，满足设计需求(图 10)。

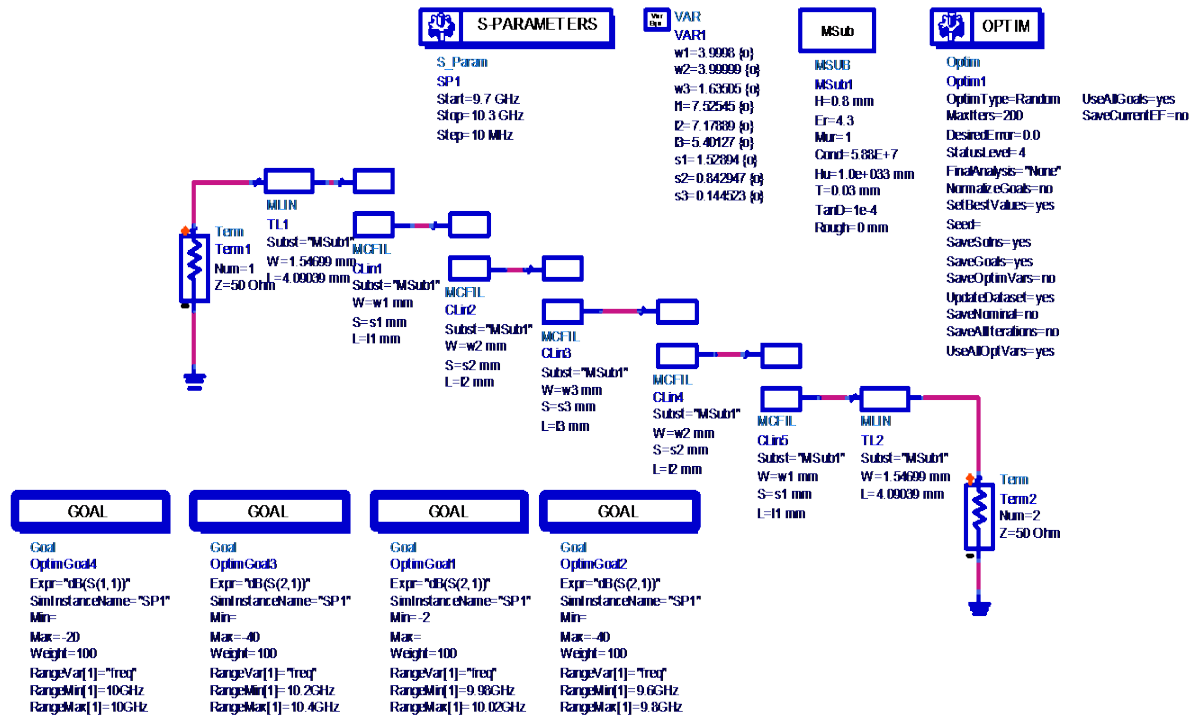


Figure 9. Bandpass filter circuit
 图 9. 带通滤波器电路图

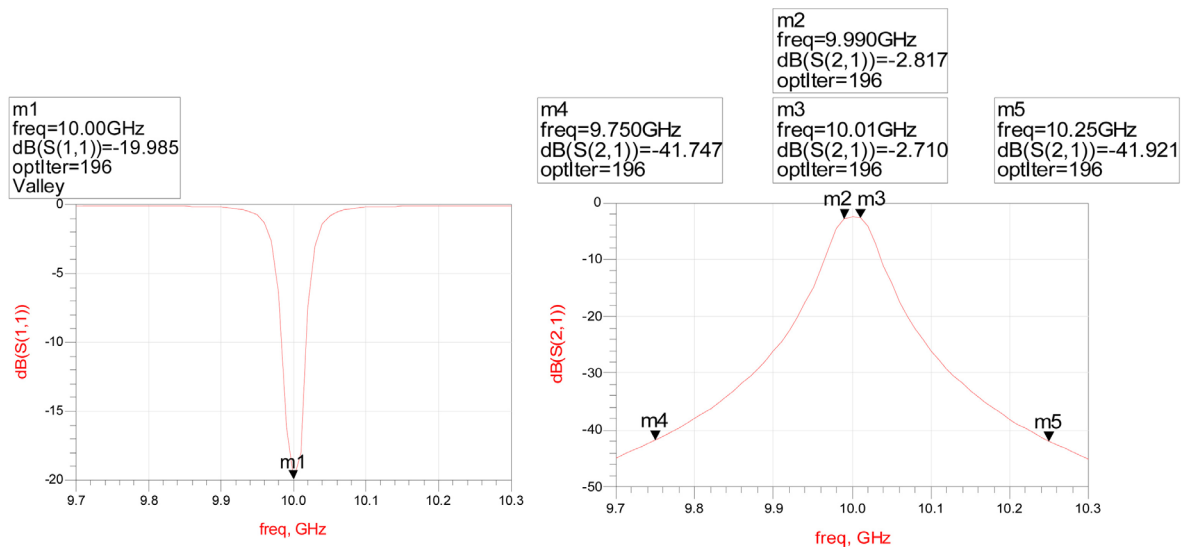


Figure 10. Bandpass filter simulation circuit diagram
 图 10. 带通滤波器仿真电路图

6. 结论

本文分别仿真分析了基于注入锁定技术和锁相环技术的光电振荡器，理论分析和仿真结果表明锁定后的 OEO 比自由运行 OEO 相噪性能优越很多，且延迟线越长、注入强度系数越大则相噪越小。后又针对易失锁的问题提出了改进的注入锁定光电振荡器。保证了自由运行 OEO 和参考信号间的固有频率差始终处于锁相或锁定带宽内，不发生失锁现象。

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] Cai, S., Pan, S., Zhu, D., *et al.* (2012) Coupled Frequency-Doubling Optoelectronic Oscillator Based on Polarization Modulation and Polarization Multiplexing. *Optics Communications*, **285**, 1140-1143. <https://doi.org/10.1016/j.optcom.2011.11.039>
- [4] Qu, S., Jin, T., Chi, H., *et al.* (2015) An Optoelectronic Oscillator Using an FBG and an FBG-Based Fabry-Perot Filter. *Optics Communications*, **342**, 141-143. <https://doi.org/10.1016/j.optcom.2014.12.063>
- [5] Kim, T.H., Lee, S., Lee, C.H., *et al.* (2016) Dual Loop Optoelectronic Oscillator with Acousto-Optic Delay Line. *Journal of the Optical Society of Korea*, **20**, 300-304. <https://doi.org/10.3807/JOSK.2016.20.2.300>
- [6] Ohta, T. and Murakami, K. (1968) Reducing Negative-Resistance Oscillator Noise by Self Injection.
- [7] 杨波. 新型光电振荡器及其在光载射频传输系统中的应用研究[D]: [博士学位论文]. 杭州: 浙江大学, 2013.

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