

doi:10.3788/gzxb20174604.0423002

光电振荡器中锁相环和注入锁定技术的比较和优化

郑俊超, 金韬, 池灏, 童国川, 朱翔, 来天皓

(浙江大学 信息与电子工程学院, 杭州 310027)

摘 要: 分析比较了基于锁相环技术和基于注入锁定技术的两种光电振荡器的特性, 推导了两种光电振荡器的噪声传递函数, 并进行了实验验证, 得出了这两种技术应用于光电振荡器的相似性和各自的优缺点. 由于光纤对温度的高敏感性, 采用这两种技术的光电振荡器都存在着易失锁的问题, 为解决这一问题, 分别分析了两种光电振荡器输出信号与参考信号间的相位关系, 基于此关系设计了锁定状态监测和反馈系统, 并实验验证了系统的有效性.

关键词: 光电振荡器; 锁相环; 注入锁定; 相位噪声; 失锁

中图分类号: TN929.1

文献标识码: A

文章编号: 1004-4213(2017)04-0423002-6

Comparison and Optimization of Phase Locked Loop and Injection Locking Techniques for Optoelectronic Oscillators

ZHENG Jun-chao, JIN Tao, CHI Hao, TONG Guo-chuan, ZHU Xiang, LAI Tian-hao

(College of Information Science and Electronic Engineering, Zhejiang University, Hangzhou 310027, China)

Abstract: The characteristics of two types of Optoelectronic Oscillators (OEOs) based on phase-locked loop technique and injection-locked technique were analyzed and compared. The noise transfer functions of the two types of OEOs were deduced and verified by experiments. The similarities and the respective merits between the two techniques were discussed. There is a problem of losing lock in the two types of OEOs because the optical fiber has a high sensitivity to temperature. To solve this problem, a locking state monitoring and feedback system was designed according to the phase difference between the output signal and the reference signal. The system was also verified by experiments.

Key words: Optoelectronic oscillator; Phase-locked loop; Injection locked; Phase noise; Losing lock

OCIS Codes: 230.0230; 230.4910; 350.4010

0 引言

光电振荡器(Optoelectronic Oscillator, OEO)可以产生相位噪声低、频谱纯度高的高性能信号, 可以被应用于雷达、通信、仪器系统等诸多领域^[1-3]. 1994年, Yao最早提出了光电振荡器^[4-5], 普通单环OEO产生的信号具有极低的相位噪声, 但是由于长光纤对温度的高敏感性, 导致信号的稳定性不佳. 近二十年来, 研究人员们提出了许多改善OEO性能的结构^[5-10], 如双环OEO^[5]、耦合式OEO^[8]、注入锁定式OEO等. Yao在1996年指出, 可以通过注入锁定技术改善OEO的稳定性, 但未做进一步的分析和验证^[3]. 2002年, Eliyahu提出了基于锁相环的OEO^[6], 并将OEO放入温控箱中, 以保证OEO的稳定工作, 但指出使用锁相环可能会恶化OEO的相噪. 2015年, 天津大学将锁相环技术应用于波分复用双环路OEO^[9], 实现了毫赫兹量级的频率稳定性.

本文分析了用于OEO的锁相环和注入锁定技术的实现原理及各自的相位噪声模型, 给出了优化相位

基金项目: 国家自然科学基金(Nos. 61675180, 61275027, 61575171)资助

第一作者: 郑俊超(1992-), 男, 硕士研究生, 主要研究方向为微波光子学. Email: jczheng@zju.edu.cn

导师(通讯作者): 金韬(1968-), 男, 教授, 博导, 主要研究方向为微波光子学及光通信技术. Email: jint@zju.edu.cn

收稿日期: 2016-10-09; 录用日期: 2016-12-30

<http://www.photon.ac.cn>

噪声的方法,并指出了锁相环 OEO 和注入锁定 OEO 在相位噪声方面各自的优缺点.为了解决这两种技术应用于 OEO 时共同面临的易失锁问题,将 OEO 在锁相和锁定后的输出信号和参考信号间的相位关系作为控制信号,在锁相环和注入锁定的基础上加入了锁定状态监测和反馈系统,使 OEO 保持锁相或锁定状态而不失锁,从而提高了 OEO 的长期稳定性.

1 理论模型

1.1 锁相环 OEO 的噪声模型

一般情况下,锁相环 OEO 的输出噪声由参考源、鉴相器、环路滤波器和 OEO 本身的噪声共同决定.本课题组借鉴锁相环的传输函数来分析锁相环 OEO 的输出相位噪声^[10].带有不同噪声源的锁相环 OEO 的线性模型如图 1,该模型主要包括参考源(Reference)、鉴相器(Phase Detector, PD)、环路滤波器(Loop Filter, LP)和 OEO.

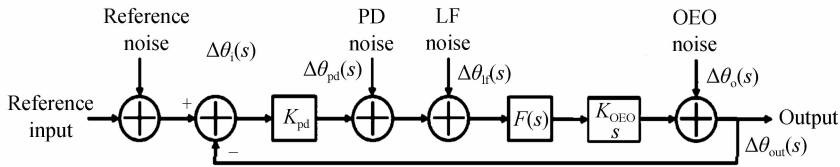


图 1 锁相环 OEO 的噪声传递模型

Fig. 1 Noise transfer model of the phase-locked OEO

由图 1 可得到锁相环环路的开环增益为

$$H(s) = \frac{K_{pd} K_{OEO} F(s)}{s} \quad (1)$$

式中, K_{pd} 是鉴相器的增益, K_{OEO} 是 OEO 的控制灵敏度, $F(s)$ 是环路滤波器的传输函数. 输出信号的噪声可以表示为各个部分的噪声与其闭环传递函数的乘积之和, 即

$$\Delta\theta_{out}(s) = \frac{H(s)}{1+H(s)} \cdot \Delta\theta_i(s) + \frac{H(s)}{[1+H(s)]K_{pd}} \cdot \Delta\theta_{pd}(s) + \frac{H(s)}{[1+H(s)]K_{pd}} \cdot \Delta\theta_{if}(s) + \frac{1}{1+H(s)} \cdot \Delta\theta_o(s) \quad (2)$$

式中, $\Delta\theta_i(s)$ 、 $\Delta\theta_{pd}(s)$ 、 $\Delta\theta_{if}(s)$ 和 $\Delta\theta_o(s)$ 分别表示参考源、鉴相器、环路滤波器和自由运行的 OEO 的噪声扰动. 式(2)表明, 在锁定带宽内, 输出信号相位噪声更多受到参考源、鉴相器和环路滤波器噪声的影响, 在锁定带宽外, 输出信号的相位噪声则更多取决于自由运行的 OEO 本身的相位噪声. 因此, 带宽的设置会极大地影响锁相环 OEO 的相位噪声性能, 设计环路时要综合考虑多种噪声的影响, 然后才能确定锁定带宽.

1.2 注入锁定 OEO 的噪声模型

不同于电注入锁定振荡器的时域噪声分析方法^[12], 本文推导了在 s 域的注入锁定 OEO 的噪声模型. 图 2(a) 是注入锁定的原理框图, 图 2(b) 是图 2(a) 中变量的矢量图.

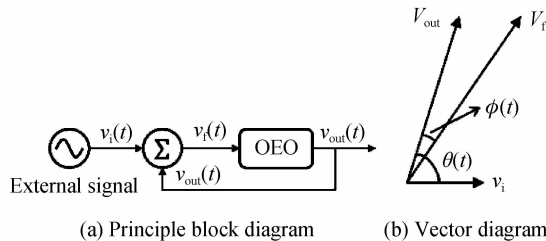


图 2 注入锁定 OEO 原理图

Fig. 2 Schematic diagram of the injection-locked OEO

假设自由运行的 OEO 信号和参考源输出信号分别表示为

$$\begin{cases} v_o(t) = V_o \cos [\omega_o(t) \cdot t + \theta_o(t)] \\ v_i(t) = V_i \sin [\omega_i(t) \cdot t + \theta_i(t)] \end{cases} \quad (3)$$

式中, V_o 、 $\omega_o(t)$ 和 $\theta_o(t)$ 分别是 OEO 信号的幅度、角频率和相位, V_i 、 $\omega_i(t)$ 和 $\theta_i(t)$ 分别是参考源信号的幅度、

角频率和相位.不同于电注入锁定,OEO的频率会受到环境影响而不断变化,将 Adler 的注入锁定方程改写为瞬时形式^[13],即

$$\frac{d\theta(t)}{dt} = \Delta\omega(t) - \frac{\omega_o(t)V_i}{2QV_o} \sin[\theta(t)] \quad (4)$$

式中, $\theta(t)$ 和 $\Delta\omega(t)$ 分别是输出信号和参考源的瞬时相位差和瞬时频率差, Q 是OEO的品质因数.当 $d\theta(t)/dt$ 为零时,OEO完成锁定.由于 $|\sin[\theta(t)]| \leq 1$,可以通过式(4)得到锁定带宽 $\Delta\omega_r$,即

$$\Delta\omega_r = \frac{\omega_o(t)V_i}{2QV_o} \quad (5)$$

如图3,假设自由运行的OEO和参考源的相位受到的扰动分别为 $\Delta\theta_o(t)$ 和 $\Delta\theta_i(t)$,则OEO和参考源的瞬时频率可分别表示为

$$\begin{cases} \omega_i(t) = \omega_i + \frac{d[\Delta\theta_i(t)]}{dt} \\ \omega_o(t) = \omega_o + \frac{d[\Delta\theta_o(t)]}{dt} \end{cases} \quad (6)$$

式中, ω_i 和 ω_o 分别是参考源和自由运行OEO的中心频率.锁定后,输出信号和参考源的相位差在极短时间内可看作常量,设该相位差设为 θ_{ss} ,同时再定义一个误差相位 $\Delta\theta(t)$ 为

$$\Delta\theta(t) = \Delta\theta_{out}(t) - \Delta\theta_i(t) \quad (7)$$

式中, $\Delta\theta_{out}(t)$ 为注入锁定OEO输出信号的相位扰动(如图3),该误差相位的物理意义是输出信号和参考信号相位差的扰动值.

将式(6)和式(7)代入式(5),可得

$$\frac{d[\theta_{ss} + \Delta\theta(t)]}{dt} = \Delta\omega + \frac{d[\Delta\theta_o(t)]}{dt} - \frac{d[\Delta\theta_i(t)]}{dt} - \Delta\omega_r \cdot \sin[\theta_{ss} + \Delta\theta(t)] \quad (8)$$

式中 $\Delta\omega = \omega_o - \omega_i$.

在锁定状态下 $\frac{d\theta_{ss}}{dt} = \Delta\omega - \Delta\omega_r \sin \theta_{ss} = 0$,将式(8)中的正弦函数在 θ_{ss} 处泰勒级数展开并保留前两项,可得

$$\frac{d[\Delta\theta(t)]}{dt} \approx \frac{d[\Delta\theta_o(t)]}{dt} - \frac{d[\Delta\theta_i(t)]}{dt} - \Delta\omega_r \Delta\theta(t) \cos \theta_{ss} \quad (9)$$

将式(7)代入式(9)并转换到s域,可得

$$s[\Delta\theta_{out}(s) - \Delta\theta_i(s)] = s\Delta\theta_o(s) - s\Delta\theta_i(s) - \Delta\omega_r[\Delta\theta_{out}(s) - \Delta\theta_i(s)] \cos \theta_{ss} \quad (10)$$

经变换后,式(10)可以改写为

$$\Delta\theta_{out}(s) = \frac{s}{s+K} \cdot \Delta\theta_o(s) + \frac{K}{s+K} \cdot \Delta\theta_i(s) \quad (11)$$

式中 $K = \Delta\omega_r \cos \theta_{ss}$.

式(11)描述的噪声传递模型可以用图4表示,该模型与一阶锁相环相似.注入锁定OEO的输出信号在锁定带宽内的噪声主要来自参考源,在锁定带宽外的噪声主要来自OEO本身.不同于锁相环技术,注入锁定技术不会引入鉴相器和环路滤波器的噪声.

1.3 失锁和长期稳定性

无论是采用锁相环技术还是注入锁定技术,OEO锁定后,其输出频率均与参考信号相同.OEO的稳定

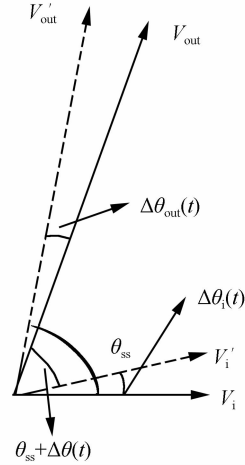


图3 注入锁定OEO噪声模型

Fig. 3 Phase noise model of the injection-locked OEO

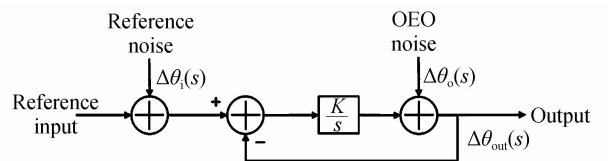


图4 注入锁定OEO的噪声传递模型

Fig. 4 Noise transfer model of the injection-locked OEO

性取决于外部参考信号的稳定性,由于外部参考信号通常由高稳晶振倍频产生,锁定后 OEO 的输出信号的稳定性会远优于自由运行的 OEO. 因此,只要 OEO 始终保持锁定状态而不失锁,就可以认为 OEO 的输出信号是稳定的. 从这个角度来说,一般希望 OEO 的锁定带宽越大越好. 然而,由式(2)和式(11)可知,锁定带宽太大,会恶化输出信号的相位噪声. 一般情况下,锁定带宽不会超过 5 kHz,而对于输出频率为 10 GHz 的 OEO,环境温度每变化 1 °C,频率漂移将超过 80 kHz. 因此,如果锁定带宽是 5 kHz,只要外界温度改变超过 $\pm 0.0625^\circ\text{C}$,OEO 就会失锁. 实际上,即使在温度较稳定的实验室环境中,锁相环 OEO 和注入锁定 OEO 都只能维持锁定状态几分钟,这限制了 OEO 的实际应用. 为了改变这种情况,分别分析了锁相环 OEO 和注入锁定 OEO 输出信号和参考源的相位差关系,并利用这一关系搭建额外的锁定状态监测-反馈回路,从而延长 OEO 的锁定时间.

对于锁相环 OEO,设其输出信号 $v_{\text{out}}(t)$ 为

$$v_{\text{out}}(t) = V_{\text{out}} \cos [\omega_{\text{out}}(t) \cdot t + \theta_{\text{out}}(t)] \quad (12)$$

式中, V_{out} 、 $\omega_{\text{out}}(t)$ 和 $\theta_{\text{out}}(t)$ 分别是输出信号的幅度、角频率和相位. 鉴相器的输出信号经过环路滤波器并由放大倍数为 A 的放大器放大,输出的压控信号 $v_c(t)$ 可近似表示为

$$\begin{cases} v_c(t) \approx \frac{1}{2} \cdot A \cdot K_{\text{pd}} \cdot V_i \cdot V_{\text{out}} \cdot \sin [\theta(t)] \\ \theta(t) = [\omega_i(t) \cdot t + \theta_i(t)] - [\omega_{\text{out}}(t) \cdot t + \theta_{\text{out}}(t)] \end{cases} \quad (13)$$

式中, $\theta(t)$ 代表输出信号和参考源的瞬时相位差. OEO 锁相后,由压控装置补偿自由运行 OEO 和参考源的固有频率差,即

$$\Delta\omega(t) = K_{\text{OEO}} \cdot v_c(t) \quad (14)$$

由式(13)和(14)可得,对于锁相环 OEO,输出信号和参考信号的相位差为

$$\sin [\theta(t)] = \frac{2\Delta\omega(t)}{K_{\text{OEO}}} \cdot A \cdot K_{\text{pd}} \cdot V_i \cdot V_{\text{out}} \quad (15)$$

而对于注入锁定 OEO,该相位差可直接由式(4)得到,即

$$\sin [\theta(t)] = \frac{2\Delta\omega(t)}{\omega_o(t)} \cdot \frac{V_o}{V_i} \cdot Q \quad (16)$$

式(15)和式(16)表明,无论采用锁相环还是注入锁定技术,若 $\Delta\omega(t)$ 为 0,即自由运行的 OEO 和参考源频率相等,则锁定后输出信号和参考源信号的相位差也为 0. 若 $\Delta\omega(t)$ 不为 0,则两者存在相位差,且该相位差随 OEO 本身的漂移而不断变化. 此时若在输出信号和参考信号之间加入鉴相器,鉴相器会输出一个直流信号,该直流信号的正弦值正比于自由运行的 OEO 和参考源信号之间的固有频率差. OEO 锁定后,由于长光纤受温度的影响,自由运行的 OEO 和参考信号之间的固有频率差会不断变化,从而改变鉴相器的输出电压. 因此,只要测得鉴相器输出的直流电压,再通过腔长控制模块调节 OEO 的腔长,就可以保证自由运行的 OEO 和参考信号之间的固有频率差始终处于锁相或锁定带宽以内. 图 5 是利用相位差监测 OEO 锁定状态并实时反馈的结构框图,将参考源分成两路,一路用于锁相或注入锁定,另一路和输出信号鉴相后通过控制模块补偿 OEO 的腔长,使 OEO 不发生失锁现象.

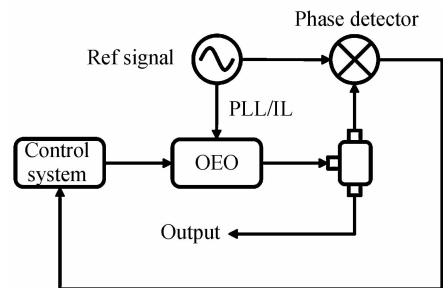


图 5 锁定状态监测-反馈系统框图
Fig. 5 Diagram of locking state monitoring and feedback system

2 实验结果和讨论

本文分别搭建了锁定带宽都为 1.5 kHz 的锁相环 OEO 和注入锁定 OEO, OEO 采用普通单环结构^[5], 其环路长度为 5 km, 输出信号为 10 GHz. 图 6 是锁相环 OEO 和注入锁定 OEO 输出信号的相位噪声测试曲线, 为了方便比较, 也给出了自由运行的 OEO 和外部参考信号的相位噪声曲线. 由图 6(a)、(b) 可见, 对于锁相环 OEO, 相位噪声不受自由运行 OEO 和参考源的固有频率差的影响, 在锁定带宽内, 输出信号相位噪声

受到外部参考信号的影响;在锁定带宽附近,锁相环 OEO 的相噪既劣于自由运行的 OEO,又劣于参考源,这是由鉴相器、环路滤波器引入的噪声造成的;在锁定带宽外,输出信号的相位噪声更多地取决于自由运行的 OEO 本身的相位噪声.图 6(c)、(d)表明,对于注入锁定 OEO,由于没有鉴相器及环路滤波器引入的噪声,信号在锁定带宽附近的相位噪声优于锁相环 OEO.但如果自由运行的 OEO 和参考源频率没有严格对准,即固有频差不为 0,由式(16)可知,此时输出信号和参考源的相位差也不为 0,输出信号在近载波处的相位噪声性能被恶化(见图 6(d)),该现象也可以由式(11)推理得到.

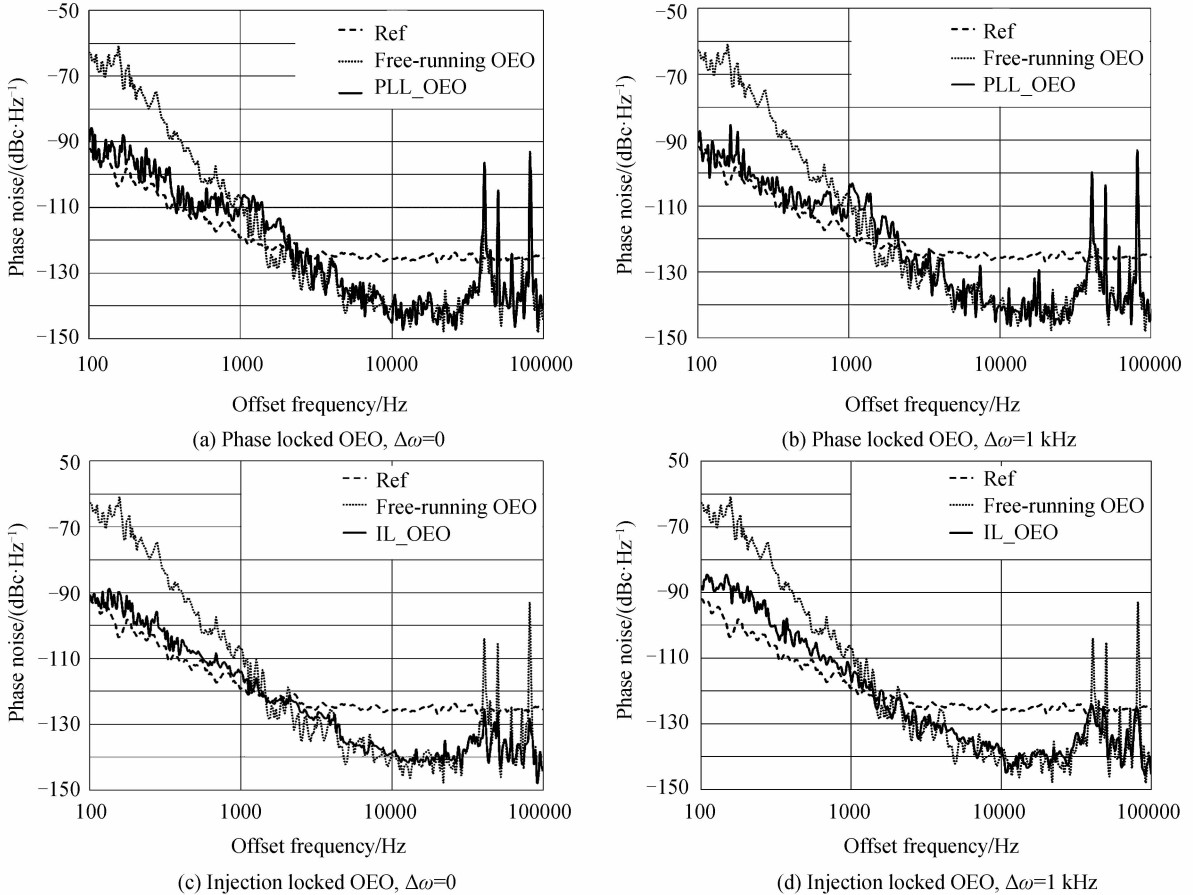


图 6 测得不同固有频差下的锁相环 OEO 和注入锁定 OEO 的相位噪声

Fig. 6 Measured phase noise of phase locked OEO and injection locked OEO under different $\Delta\omega$

无论是锁相环 OEO 还是注入锁定 OEO,最佳的带宽设置位置是外部注入信号源和自由运行 OEO 相位噪声曲线交叉点所在的频率.在本文的系统中,最佳带宽在 1.5 kHz 左右,最终的输出信号的相位噪声在偏离中心频率 100 Hz 的位置降低了 25 dB,而在偏离大于 1.5 kHz 的地方基本没有受到外部信号的影响,等同于自由运行的 OEO 相噪.这里需要指出,一般情况下,外部参考源在近载波处的相位噪声优于自由运行的 OEO,因此,最终的输出信号在近载波处的相位噪声会得到抑制.如果外部源的相位噪声在任何频偏处都劣于自由运行的 OEO,输出信号的相位噪声会被恶化,这种情况下,锁定带宽应该尽可能小.

通过上述比较可知,对于锁相环 OEO 来说,相位噪声表现不会因为 OEO 本身的漂移而改变,但会受到鉴相器、环路滤波器等器件噪声的影响,导致输出信号在接近锁定带宽的附近相位噪声恶化;对于注入锁定 OEO,相位噪声完全取决于自由运行的 OEO 和参考源,但由于 OEO 本身的频率漂移,导致自由运行 OEO 和参考源的频率不一定完全对准,输出信号和参考源的相位差发生改变,可能会导致输出信号的相位噪声性能恶化.

为了验证图 5 提出方案的可行性,按照图 5 所示的框图,以锁相环 OEO 为例,分别观察了加入锁定状态监测-反馈系统和不加入该系统的输出信号的锁定情况.对于不加该系统的锁相环 OEO,在前 2 min 内,OEO 始终处于锁相状态,OEO 的输出频率等于参考源的频率,且稳定性很好.在 2.5 min 左右时,自由运行 OEO 的固有频率漂出锁定带,OEO 失锁,信号频率立刻跳变到锁定带宽以外的位置.失锁后,OEO 的输出

频率不再受到参考源的影响,按照自由状态继续运行,频率在 10 min 内漂移了近 5 kHz. 对于加了锁定状态监测-反馈系统的锁相环 OEO,由于外部反馈的作用,OEO 在 12 h 的测试时间内始终保持锁相状态,其频率稳定性等同于外部参考源. 另外,在加入反馈回路的情况下,测得信号的相位噪声性能等同于图 6(a)中的虚线轨迹,没有受到反馈系统的影响. 同样,我们也测试证明了该监测-反馈系统对于注入锁定 OEO 同样适用.

3 结论

本文分析了基于锁相环和基于注入锁定技术的 OEO 的噪声模型,并进行实验验证. 理论分析和实验结果表明,锁相环 OEO 的噪声不会因为 OEO 本身的频率漂移受到影响,但会受到鉴相器、环路滤波器噪声的影响;而注入锁定 OEO 的噪声会因为 OEO 本身的频率漂移而增加. 实验中得到了相位噪声为 -90 dBc/Hz @100 Hz 和 -140 dBc/Hz@10 kHz 的 10 GHz 射频信号,性能略优于文献[7]和文献[9]中所产生的信号. 另外,对于锁相环和注入锁定 OEO 的失锁问题,理论分析表明,采用两种技术的 OEO 的输出信号和参考信号相位差的正弦值都与自由振荡信号和参考信号之间的固有频差成正比,据此关系提出了锁定状态监测和反馈系统. 实验证实了这种方法可以保证 OEO 稳定锁定 12 h 以上,可以有效提高 OEO 的长期稳定性,对比文献[6]中采用精确控制光纤和滤波器温度的方式,本文提出的方法具有体积更小、实现更简单的优势.

参考文献

- [1] HUO L, DONG Y, LOU C, *et al.* Clock extraction using an optoelectronic oscillator from high-speed NRZ signal and NRZ-to-RZ format transformation[J]. *IEEE Photonics Technology Letters*, 2003, **15**(7): 981-983.
- [2] TSUCHIDA H, SUZUKI M. 40-Gb/s optical clock recovery using an injection-locked optoelectronic oscillator[J]. *IEEE Photonics Technology Letters*, 2005, **17**(1): 211-213.
- [3] YAO X S, MALEKI L. Optoelectronic oscillator for photonic systems[J]. *IEEE Journal of Quantum Electronics*, 1996, **32**(7): 1141-1149.
- [4] YAO X S, MALEKI L. Optoelectronic microwave oscillator[J]. *JOSA B*, 1996, **13**(8): 1725-1735.
- [5] YAO X S, MALEKI L. Multiloop optoelectronic oscillator[J]. *IEEE Journal of Quantum Electronics*, 2000, **36**(1): 79-84.
- [6] ELIYAHU D, SARIRI K, KAMRAN A, *et al.* Improving short and long term frequency stability of the opto-electronic oscillator[C]. Frequency Control Symposium and PDA Exhibition, 2002. IEEE International. IEEE, 2002: 580-583.
- [7] ZHOU Zheng-hua, YANG Chun, CAO Zhe-wei, *et al.* An ultra-low phase noise and highly stable optoelectronic oscillator utilizing IL-PLL[J]. *IEEE Photonics Technology Letters*, 2016, **28**(4): 516-519.
- [8] CAI S, PAN S, ZHU D, *et al.* Coupled frequency-doubling optoelectronic oscillator based on polarization modulation and polarization multiplexing[J]. *Optics Communications*, 2012, **285**(6): 1140-1143.
- [9] JIA S, YU J, WANG J, *et al.* Research of a novel optoelectronic oscillator based on dual-loop structure with different wavelengths[J]. *Acta Physica Sinica*, 2015, **15**: 154-159.
贾石,于晋龙,王菊,等. 基于波长双环路结构的新型光电振荡器的研究[J]. 物理学报,2015,**15**:154-159.
- [10] XU K, WU Z, ZHENG J, *et al.* Long-term stability improvement of tunable optoelectronic oscillator using dynamic feedback compensation[J]. *Optics Express*, 2015, **23**(10): 12935-12941.
- [11] BEST R E. Phase locked loops[M]. McGraw-Hill Professional, 2007.
- [12] CHANG H C, CAO X, VAUGHAN M J, *et al.* Phase noise in externally injection-locked oscillator arrays[J]. *IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques*, 1997, **45**(11): 2035-2042.
- [13] ADLER R. A study of locking phenomena in oscillators[J]. *Proceedings of the IRE*, 1946, **34**(6): 351-357.