

doi:10.3788/gzxb20174601.0123002

# 高性能注入锁相光电振荡器

曹哲玮, 杨春, 周正华

(东南大学 电子科学与工程学院, 南京 210096)

**摘 要:**提出一种基于注入锁定和锁相环技术的注入锁相光电振荡器. 利用注入锁定来改善光电振荡器的近载频相噪以及杂散抑制度. 将光电振荡器的输出信号与外注入源进行鉴相, 通过锁相环来提升频率稳定性, 并进一步改善光电振荡器的近载频相噪. 实验结果表明: 注入锁相光电振荡器在电滤波器中心频率为 9.5 GHz、3 dB 带宽为 20 MHz 和光纤环长度为 6 km 的情况下, 实现了输出信号频率为 9.5 GHz 的单模振荡; 当注入锁定带宽为 1.98 kHz 时, 光电振荡器输出信号在 1 kHz 频偏处的相位噪声为  $-125$  dBc/Hz, 在 10 kHz 频偏处的相位噪声为  $-147$  dBc/Hz, 杂散抑制度高于 80 dB, 阿伦偏差接近  $1.37 \times 10^{-11}$  @1s 和  $1.22 \times 10^{-11}$  @1000s.

**关键词:**光电子学; 光电振荡器; 注入锁相; 相噪; 杂散抑制; 阿伦偏差

中图分类号: TN929.1

文献标识码: A

文章编号: 1004-4213(2017)01-0123002-7

## High Performance Optoelectronic Oscillator Based on Injection-locked and Phase-locked Loop Techniques

CAO Zhe-wei, YANG Chun, ZHOU Zheng-hua

(School of Electronic Science and Engineering, Southeast University, Nanjing 210096, China)

**Abstract:** An injection-phase locked optoelectronic oscillator based on injection locking and phase-locked loop techniques was proposed. Utilizing the injection locking to reduce the close-in phase noise and increase the side-mode suppression ratio. Using the phase-locked loop to improve the frequency stability of the optoelectronic oscillator by detecting the phase between the output signal of the optoelectronic oscillator and the external injection source and also to furtherly improve the close-in phase noise performance. The experimental results show that, when the electrical filter's center frequency and 3 dB bandwidth are 9.5 GHz and 20 MHz, single mode oscillation at 9.5 GHz is realized by a 6 km-fiber single loop injection-phase locked optoelectronic oscillator. When the injection locking bandwidth is 1.98 kHz, the phase noises of the optoelectronic oscillator's output signal are about  $-125$  dBc/Hz at 1kHz offset frequency and  $-147$  dBc/Hz at 10kHz offset frequency, the SMSR is higher than 70 dB, and the Allan deviations are about  $1.37 \times 10^{-11}$  @1s and  $1.22 \times 10^{-11}$  @1000s.

**Key words:** Optoelectronics; Optoelectronic oscillator; Injection locked and phase locked loop; Phase noise; Side-mode suppression ratio; Allan deviation

**OCIS Codes:** 230.0250; 230.4910; 060.5625; 140.4780

## 0 引言

高频谱纯度、低相噪的微波和毫米波信号源被广泛应用于电子测量、通信、雷达等领域<sup>[1]</sup>. 高频谱纯度微波、毫米波信号产生的传统方法主要有两种: 一种是在较低频晶振或声表面波振荡器的基础上进行倍频; 另

基金项目: 国防“十二五”预研项目和国家自然科学基金项目(No. 61671148)资助

第一作者: 曹哲玮(1988-), 男, 博士研究生, 主要研究方向为微波光子学和光通信. Email: 230139115@seu.edu.cn

导师(通讯作者): 杨春(1970-), 男, 教授, 博士, 主要研究方向为微波光子学和光通信. Email: yangchun\_seu@163.com

收稿日期: 2016-07-15; 录用日期: 2016-09-13

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

一种是利用高品质因子(Q值)的微波、毫米波谐振腔产生振荡信号,例如介质腔振荡器和蓝宝石振荡器等。然而,介质腔振荡器的相噪不够低。蓝宝石振荡器的相噪很低,但制造难度非常大<sup>[2]</sup>。与上述方法相比,光电振荡器(Optoelectronic Oscillator, OEO)最大的优点在于其谐振腔Q值不随频率的增加而降低(腔损耗基本不变),因此可以在微波以上频段产生极低相噪的振荡信号<sup>[3-4]</sup>,并且可以采用市售器件制作。自从加州理工学院的X. S. Yao等在1994年首次提出OEO以来<sup>[3]</sup>,国内外许多研究机构都开展了OEO的研究<sup>[5-11]</sup>。X. S. Yao等在2000年又提出了COEO(Coupled OEO)<sup>[6]</sup>,将光链路构成有源环形谐振腔,从而构成了与光电谐振环耦合的振荡器,其中,有源光纤环相当于一个Q值倍乘器,这样利用较短的光纤也能构成高Q值振荡器。但COEO中的有源光纤环是一个光谐振腔,光波的频率约为X波段信号的 $10^5$ 倍,因此光纤谐振腔对环路时延扰动的敏感度是光电微波谐振腔的 $10^5$ 倍,这就使得COEO的温度漂移较大。W. M. Zhou等2005年提出了双环注入锁定OEO结构<sup>[7]</sup>,尽管获得了很好的相噪和杂散指标,但其结构复杂,并且链路受环境温度变化和振动的影响较大。1996年,X. S. Yao等公开了参考源注入OEO<sup>[4]</sup>,但并没有用锁相环将谐振频率锁在参考源上。2013年,解放军理工大学用原子钟作为参考源注入OEO,但也没有用锁相环将谐振频率锁在参考源上,其10 GHz输出信号的相噪为 $-76$  dBc/Hz@100Hz和 $-108$  dBc/Hz@10kHz,稳定时间超过4小时,杂散抑制约60 dB<sup>[8]</sup>。仅将参考源注入OEO而不对谐振腔进行锁相控制的问题在于,当OEO的谐振频率漂移时,注入信号不再满足谐振的相位条件,谐振信号的相噪将显著增大<sup>[12]</sup>。

本文利用高稳定的外部参考源注入OEO,并通过锁相环将OEO的谐振频率锁在注入信号频率上,克服了当OEO谐振频率漂移时相噪恶化的问题。基于单光纤环的OEO能够实现单模振荡,获得很高的边模抑制比(Side-Mode Suppression Ratio, SMSR)和极低的相噪,同时具有很好的频率稳定度。

## 1 理论

注入锁定(Injection Locking, IL)振荡器的基本结构如图1,其中 $\omega_0$ 为自由谐振频率, $\omega_1$ 为外注入源的频率, $\omega_L$ 为锁定信号的频率。当振荡器的自由谐振频率和外注入源的频率相同,即 $\Delta\omega = \omega_0 - \omega_1 = 0$ 时,锁定信号的相位噪声最小,此时注入锁定后的振荡器输出信号相位谱为<sup>[10-11]</sup>

$$\varphi_o(s) = \frac{1}{1 + s/\Delta\omega_{\max}} \cdot \varphi_1(s) + \frac{1}{1 + \Delta\omega_{\max}/s} \cdot \varphi_{\text{free}}(s) \quad (1)$$

式中, $\varphi_o(s)$ 、 $\varphi_1(s)$ 、 $\varphi_{\text{free}}(s)$ 分别表示锁定振荡信号、外注入信号和自由振荡信号的相位谱; $s = j\omega$ , $\omega$ 表示距离振荡信号中心频率的频偏; $\Delta\omega_{\max}$ 为锁定带宽,表示为<sup>[13]</sup>

$$\Delta\omega_{\max} = \frac{\omega_0 E_1}{2QE_0} \frac{1}{\sqrt{1 - (E_1/E_0)^2}} \quad (2)$$

式中, $E_1/E_0$ 是外注入源与自由振荡器的幅度比,Q是谐振腔的品质因数。由式(1)可以看出当 $\omega < \Delta\omega_{\max}$ (近载频)时,锁定信号的相噪主要由外注入信号的相噪决定;当 $\omega > \Delta\omega_{\max}$ (远载频),锁定信号的相噪主要由自由振荡信号的相噪决定。

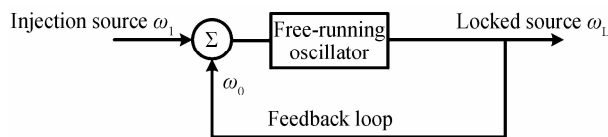


图1 注入锁定模型框图

Fig. 1 Block diagram of the injection-locked model

对于注入锁定型OEO而言,它的谐振腔延时很大,因此腔内存在多个谐振模。假设外注入源的频率与某一个谐振模的频率相同,则这个谐振模振荡的种子信号来源是注入信号与噪声之和,其中注入信号的幅度显著大于噪声的幅度,而其它谐振模振荡的种子信号只来源于噪声。在OEO中,由于MZM的调制非线性导致的小信号抑制效应<sup>[15]</sup>,会使注入谐振模在增益竞争中取得显著优势,当谐振环路因增益压缩进入稳态时,这个注入谐振模的功率接近环路总功率,成为主模;而其它谐振模在增益竞争中处于弱势,幅度远小于主模,成为杂散模。

根据式(2)可以看出当外注入源功率越大,锁定带宽就越大。一般对于单模振荡器来说,锁定带宽越大越

好,这样可以克服谐振腔的自由谐振频率漂移较大时导致失锁的问题.但是对于注入锁定型 OEO 而言,当光纤长度很长(几公里)时,谐振腔内的振荡模式会非常多,自由谱范围(Free Spectral Range, FSR)通常只有几十 kHz,这就需要最大锁定带宽不能太大,否则外注入源频率两侧的模式均会受到牵引,导致不稳定振荡.因此,为了使得只有一个模式被注入锁定,锁定带宽需小于  $FSR/2$ . 假设一个主模自由振荡频率  $f_{osc}$  为 9.5 GHz 的单环 OEO, 光纤长度为 6 km, 则延时  $\tau_d \approx 30 \mu s$ ,  $FSR \approx 33$  kHz, 光纤链路的  $Q = 2\pi f_{osc} \tau_d \approx 1.8 \times 10^6$ ,  $\Delta\omega < 2\pi \cdot (FSR/2)$ ,  $E_1/E_0 < 0.98$ .

然而 OEO 是一种受环境温度变化、振动影响比较大的振荡源<sup>[16-17]</sup>, 当 OEO 中谐振腔受环境扰动时,外注入信号不再满足谐振的相位条件,此时外注入信号的频率与主模的自由振荡频率存在频率差  $\Omega$  ( $\Omega > 0$ ),由注入锁定理论可知锁定信号的相位噪声将会变大<sup>[12]</sup>;当谐振腔受到较大扰动以致于  $\Omega > \Delta\omega_{max}$  时,则会出现失锁现象,此时 OEO 的杂散模功率将会显著增大. 本文研发了一种基于注入锁定 OEO 的锁相环来控制谐振腔的相位恒定,保证外注入源频率与主模自由振荡频率精确对准,确保了 OEO 低相噪、低杂散和高稳定的特性<sup>[10-13]</sup>. 注入锁相 OEO 的原理框图如图 2. 系统主要包括:一个激光器(Laser Diode, LD);一个电光调制器(Mach-Zehnder Modulator, MZM);一段单模光纤(Fiber);一个光电探测器(Photodiode, PD);两个可调衰减器(Attenuator, Att);一个低相噪放大模块(Amplifier, Amp);一个带通滤波器(Bandpass Filter, BPF);一个压控移相器(Voltage Controlled Phase Shifter, VCPS);一个手调移相器(Phase Shifter, PS);两个射频耦合器(Coupler);两个功分器(Power Divider);一个混频器(Mixer);一个低通滤波器(Lowpass Filter, LPF);一个伺服电路(Servo Circuit)和一个外置高稳定参考源(Multiplied Crystal Oscillator, MCO). 为了便于观察和调试,系统的输出信号分出两路分别接至相噪测量系统(Phase Noise Measurement System, PNMS)和频谱仪(Spectrum Analyzer). 实验中高稳定微波源是一个与 OEO 主模振荡频率相同的倍频晶振,这里 MCO 起到两个作用:一是作为同频外注入源,与 OEO 的自由振荡信号一起耦合到调制器中,使 OEO 的主模在锁定带宽内得到注入锁定;二是作为锁相环(Phase Locked Loop, PLL)的外参考源,与 OEO 的输出信号通过混频器鉴相后输入到伺服电路,进而反馈到 VCPS 控制环路相位.

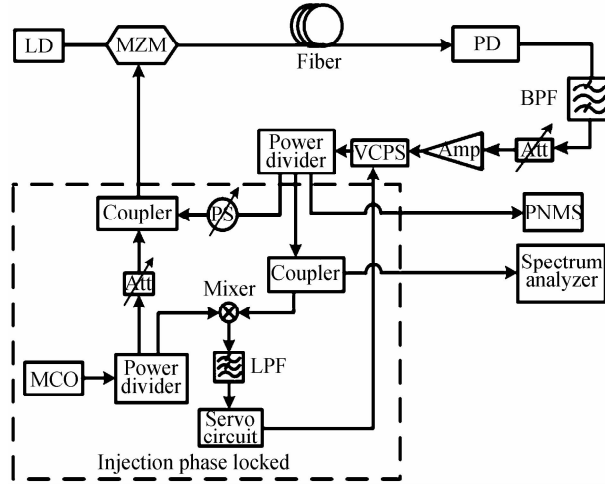


图 2 注入锁相 OEO 框图

Fig. 2 Schematic diagram of the injection-locked and phase-locked (IL-PLL) OEO

参照图 2 构建压控光电振荡器(VC-OEO)的锁相环相位模型,如图 3. 其中,  $\varphi_1$  和  $\varphi_{oc}$  分别是参考源的相位和 OEO 输出信号的相位,  $\varphi_e$  是参考源和 OEO 的相位差,  $k_d$  是混频器的鉴相因子,  $F(s)$  是二阶有源环路滤波的传输函数,  $H_{vc-o eo}$  是压控 OEO 的传输函数. 二阶有源环路滤波输出的  $V_F$  控制 OEO 环内压控移相器的相位变化,压控相位的改变引起 OEO 的频率改变,  $H_{vc-o eo}$  表示为<sup>[12]</sup>

$$H_{vc-o eo}(s) = \frac{\varphi_{oc}}{V_F} = \frac{k_\varphi}{\tau_o s} \quad (3)$$

式中,  $\tau_o$  是环路延时,  $k_\varphi$  是压控移相器的系数.

当锁相环工作在稳态状态下,双平衡混频器两个输入端的相位正交. 根据图 3 的相位模型,可以得出锁相环线性动态方程为

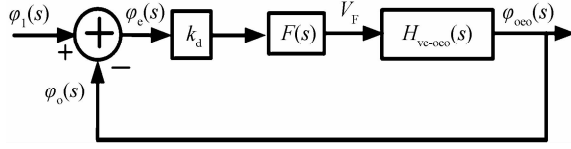


图 3 PLL 的相位模型框图

Fig. 3 A block diagram of the phase model of the PLL

$$\varphi_e(s) = \varphi_1(s) - \varphi_{\text{oeo}}(s) \quad (4)$$

$$\varphi_{\text{oeo}}(s) = k_d F(s) H_{\text{vc-oeo}} \varphi_e(s) \quad (5)$$

将式(5)代入式(4)得

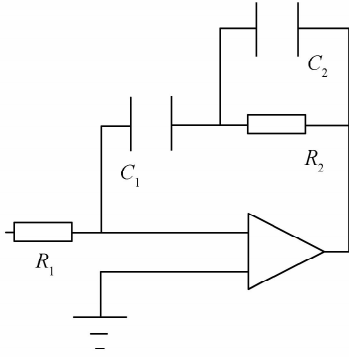
$$\varphi_e(s) = \varphi_1(s) - k_d F(s) H_{\text{vc-oeo}} \varphi_e(s) \quad (6)$$

式中,  $k_d$  是鉴相器的增益系数.

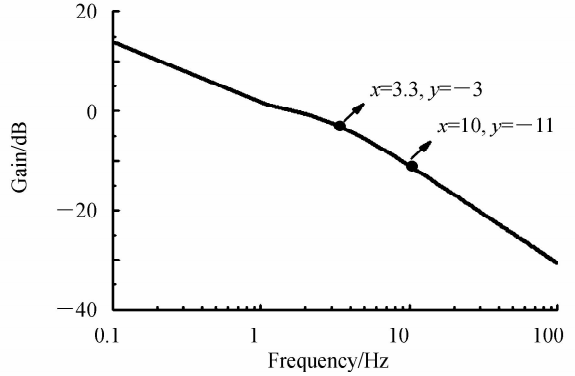
令  $K_p = k_d k_\varphi / \tau_o$ , 根据式(4)~(6)可以得出锁相环的闭环传输函数和误差传输函数为

$$H(s) = \frac{\varphi_{\text{oeo}}(s)}{\varphi_1(s)} = \frac{K_p F(s)}{s + K_p F(s)} \quad (7)$$

$$H_e(s) = \frac{\varphi_e(s)}{\varphi_1(s)} = \frac{s}{s + K_p F(s)} \quad (8)$$



(a) The topology



(b) The power gain curve

图 4 有源环路滤波器的设计

Fig. 4 Design of the active loop filter

本文采用的环路滤波是有源二阶环路滤波的结构,如图 4(a). 图 4(b)是它的对数频率特性,从图中可知,环路滤波的带宽是 3.3 Hz. 如果输入到环路滤波的信号大于 10 Hz,它的衰减将超过 11 dB. 环路滤波器的传输函数为

$$F(s) = \frac{1 + s\tau_2}{s\tau_1(1 + s\tau_3)} \quad (9)$$

式中,  $\tau_1 = R_1 C_1$ ,  $\tau_2 = R_2(C_1 + C_2)$ ,  $\tau_3 = R_2 C_2$ .

将式(9)代入式(7)和式(8),可得

$$H(s) = \frac{K_p(1 + s\tau_2)}{K_p + K_p\tau_2 s + \tau_1 s^2 + \tau_1\tau_3 s^3} \quad (10)$$

$$H_e(s) = \frac{\tau_1 s^2 + \tau_1\tau_3 s^3}{K_p + K_p\tau_2 s + \tau_1 s^2 + \tau_1\tau_3 s^3} \quad (11)$$

从式(10)很容易发现,此锁相环模型具有低通特性,输入信号的高频成分将被滤除掉,不影响 OEO 的远载频的相噪. 在频率阶跃( $\varphi_1 = \Delta\omega/s^2$ )情况下,利用式(11)和拉普拉斯变换终值理论,稳态误差即是相位误差  $\varphi_e(\infty)$  为

$$\varphi_e(\infty) = \lim_{s \rightarrow j\omega, \omega \rightarrow 0} s\varphi_1(s)H_e(s) = 0 \quad (12)$$

从式(12)知,OEO 输出信号的相位能跟踪上微波参考源的相位. 同时,从式(4)和式(5)又可以得到

$$s\varphi_{\text{oeo}}(s) = K[\varphi_1(s) - \varphi_{\text{oeo}}(s)] \quad (13)$$

其中  $K = k_d H_{vc-oeo}(s)F(s)$ , 结合式(1)和式(13)可以推导出注入锁相 OEO 输出信号的相位谱为

$$\varphi'_{oeo}(s) = \frac{\varphi_1(s)}{1 + s/(\Delta\omega_{max} + K)} + \frac{\varphi_{free}(s)}{1 + (\Delta\omega_{max} + K)/s} \quad (14)$$

对比式(1)和式(14)也可以发现 PLL 可以在注入锁定的基础上进一步改善 OEO 的近载频相噪。

## 2 实验

注入锁相 OEO 的实验装置按照图 2 搭建, 其中光纤环长度为 6 km 并放置在一个温控盒中, 温控精度为  $\pm 0.01^\circ\text{C}$ ; BPF 中心频率为 9.5 GHz, 3 dB 带宽约为 20 MHz; VCPS 的移相范围为  $410^\circ$ , 控制电压范围为 0~13V。图 5 为自由振荡 OEO 和注入锁相 OEO 的频谱, 主模中心频率约为 9.5 GHz, 主模峰值功率约为 12 dBm, 同时也可以看出注入锁相 OEO 的杂散抑制度较自由振荡 OEO 提高了接近 40 dB。由于 MCO 输出信号的频率与自由振荡 OEO 的主模频率实际上不可能完全一致, 而主模频率最终会锁定在 MCO 的输出频率上, 因此图 5 中的自由振荡频率和注入锁相之后的频率稍有不同。实验中调节 MCO 输入到 MZM 中的功率约为 6 dBm, 根据式(2)可以计算出  $E_1/E_0 \approx 0.6 < 0.98$ ,  $\Delta f \approx 1.98$  kHz, 因此保证了只有主模信号被锁定在注入信号上。

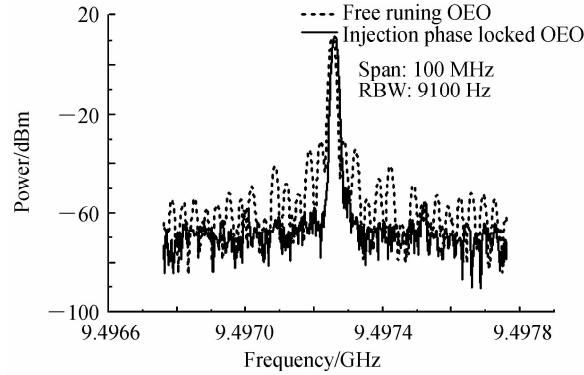


图 5 自由振荡 OEO 和注入锁相 OEO 的频谱

Fig. 5 Spectrums of the free-running OEO and IL-PLL OEO

图 6 为用延时自差法<sup>[18]</sup>测得的 MCO、自由振荡 OEO 和注入锁相 OEO 的单边带相噪, 可以看到自由振荡 OEO 和注入锁相 OEO 的相噪曲线在 2 kHz 附近处相交, 并且注入锁相 OEO 的相噪在频偏低于 2 kHz 范围内得到优化, 而在频偏高于 2 kHz 范围内接近自由振荡 OEO 的相噪, 与理论相符。注入锁相 OEO 在 1 kHz 频偏处的相噪约为  $-125$  dBc/Hz, 在 10 kHz 频偏处的相噪约为  $-147$  dBc/Hz。1 kHz 频偏处的相噪接近 MCO 的相噪, 较自由振荡 OEO 优化了 5 dB 左右, 而在 10 kHz 处的相噪低于 MCO, 接近 15 dB。需要注意的是, 从图 5 中可以发现 OEO 的边模几乎被完全抑制, 因此图 6 中频偏 6 kHz 附近的杂散并非来自于 OEO 的边模, 而是来源于功放的自激振荡, 并通过非线性上变频到载波附近。

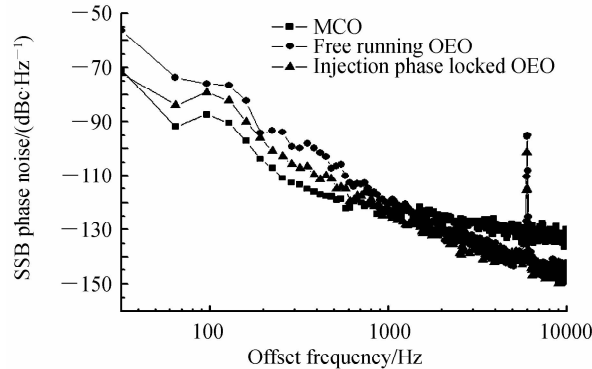


图 6 MCO、自由振荡 OEO 和注入锁相 OEO 的单边带相噪

Fig. 6 SSB phase noises of the MCO, the free-running OEO and the IL-PLL OEO

工程上通常用阿伦偏差来衡量信号源的频率稳定性<sup>[12]</sup>, 因此用频率计 (Agilent 53230A) 分别测量了自

由振荡 OEO、注入锁相 OEO 和参考源的阿伦偏差,并设置不同的平均时间.图 7 为用频率计(Agilent 53230A)测得的阿伦偏差曲线,当平均时间大于 0.1 s 时,自由振荡 OEO 的阿伦偏差急剧上升,说明其长期稳定性变差;当采用注入锁相技术后,OEO 与参考源的阿伦偏差值接近,因此注入锁相技术很好地保证了 OEO 长期频率稳定度.图 8 为 OEO 在实验室环境中连续工作 16 h 的相对频率漂移量(ppm)随时间变化的曲线,曲线总体呈现出正增长趋势.在起初的 2~3 h 内,频率变化速度较快,然后随着时间的增加,频率慢慢趋于平稳,工作 16 h 后的相对频率漂移量趋近于 0.1 ppm.

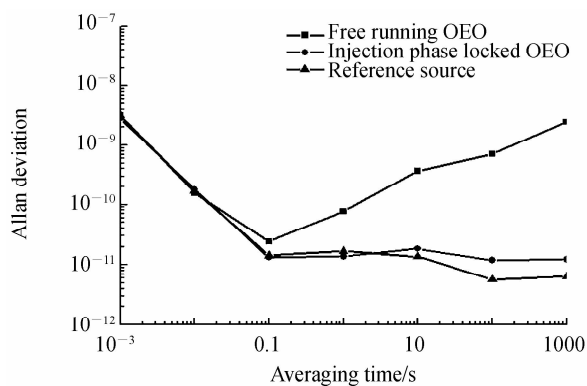


图 7 自由振荡 OEO、注入锁相 OEO 和参考源的阿伦偏差  
Fig. 7 Allan deviations of the free-running OEO, IL-PLL OEO and the reference source

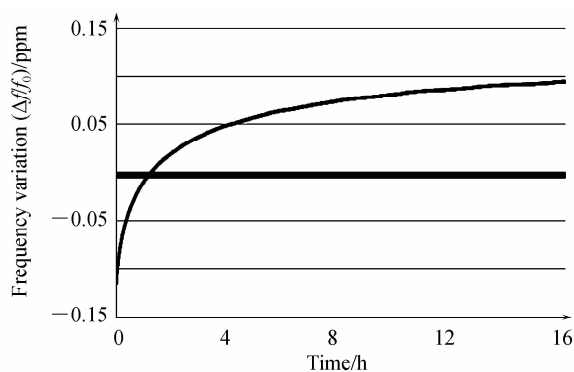


图 8 测量得到的注入锁相 OEO 在 16 h 内的  
频率漂移量( $\Delta f/f_0$ )  
Fig. 8 Measured frequency variation ( $\Delta f/f_0$ ) of the  
IL-PLL OEO in 16 h

### 3 结论

本文通过调节注入源功率控制注入锁定带宽,使 OEO 输出信号的相噪在锁定带宽内得到优化,在锁定带宽外接近于自由振荡 OEO 的相噪,且杂散得到很好的抑制.为了避免谐振腔受外界扰动而导致的谐振频率偏移的问题,将外注入源同时作为一个高稳定参考源,利用 PLL 将 OEO 的输出信号锁定在外部高稳定参考源上,既保证了 OEO 低相噪、低杂散的特性,又使得它具有很好的长期频率稳定度.实验得到 9.5 GHz 注入锁相 OEO 的相噪在 1kHz 频偏处的 SSB 相噪约为  $-125$  dBc/Hz,在 10 kHz 频偏处的 SSB 相噪约为  $-147$  dBc/Hz,杂散抑制制度高于 80 dB,阿伦偏差接近  $1.22 \times 10^{-11}$  @1000s.

**致谢** 感谢洪俊博士在 OEO 的初始研究阶段所作的贡献.同样也要感谢钱澄教授和郭健博士在研制锁相控制电路过程中所提供的帮助.

### 参考文献

- [1] MALEKI L. Sources: the optoelectronic oscillator[J]. *Nature Photonics*, 2011, **5**(12): 728-730.
- [2] CALHOUN M, HUANG S, TJOELKER R L. Stable photonic links for frequency and time transfer in the deep-space network and antenna arrays[C]. *IEEE*, 2007, **95**(10): 1931-1946.
- [3] YAO X S, MALEKI L. High frequency optical subcarrier generator[J]. *Electronics Letters*, 1994, **30**(18): 1525-1526.
- [4] YAO X S, MALEKI L. Optoelectronic microwave oscillator[J]. *Journal of the Optical Society of America 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] YAO X S, DAVIS L, MALEKI L. Coupled optoelectronic oscillators for generating both RF signal and optical pulses [J]. *Journal of Lightwave Technology*, 2000, **18**(1): 73-78.
- [7] ZHOU W, BLASCHE G. Injection-locked dual opto-electronic oscillator with ultra-low phase noise and ultra-low spurious level[R]. Boston Univ Ma Dept of Physics, 2005.
- [8] TENG Yi-chao, WANG De-shuang, ZHANG Bao-fu, *et al.* A high frequency stability and low phase noise optoelectronic oscillator based on electric injection locking of Rb atomic frequency standard [J]. *Journal of Optoelectronics • Laser*, 2013, **24**(12): 2278-2282.
- [9] 滕义超, 王德双, 张宝富, 等. 基于 Rb 原子频标电注入锁定的高频稳低相噪光电振荡器[J]. *光电子 • 激光*, 2013, **24**(12): 2278-2282.
- [9] REN Feng-xin, JIN Tao, CHI Hao, *et al.* Long-term stability improvement in an optoelectronic oscillator based on a feedback control loop[J]. *Acta Photonica Sinica*, 2015, **44**(10): 1023003.

任凤鑫,金韬,池灏,等. 基于反馈控制环路提高光电振荡器长期稳定性的方法[J]. 光子学报, 2015, **44**(10): 1023003.

- [10] 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.
- [11] LEE K H, KIM J Y, CHOI W Y. Injection-locked hybrid optoelectronic oscillators for single-mode oscillation[J]. *IEEE Photonics Technology Letters*, 2008, **20**(19): 1645-1647.
- [12] RUBIOLA E. Phase noise and frequency stability in oscillators[M]. Cambridge University Press, 2009.
- [13] ZHANG Y, HOU D, ZHAO J. Long-term frequency stabilization of an optoelectronic oscillator using phase-locked loop [J]. *IEEE/OSA Journal of Lightwave Technology*, 2014, **32**(13): 2408-2414.
- [14] ADLER R. A study of locking phenomena in oscillators[J]. *Proceedings of the IRE*, 1946, **34**(6): 351-357.
- [15] HOSSEINI S E, BANAI A. Theoretical investigation of the capture effect in intensity-modulation direct-detection microwave photonic links[J]. *Applied Optics*, 2013, **52**(28): 7011-7021.
- [16] ELIYAHU D, SARIRI K, KAMRAN A, *et al.* Improving short and long term frequency stability of the opto-electronic oscillator[C]. IEEE International Frequency Control Symposium and PDA Exhibition, 2002: 580-583.
- [17] TSENG W H, FENG K M. Impact of fiber delay fluctuation on reference injection-locked optoelectronic oscillators[J]. *Optics Letters*, 2012, **37**(17): 3525-3527.
- [18] RUBIOLA E, SALIK E, HUANG S, *et al.* Photonic-delay technique for phase-noise measurement of microwave oscillators[J]. *Journal of the Optical Society of America B*, 2005, **22**(5): 987-997.