

doi:10.3788/gzxb20184711.1123001

基于中频相位锁定技术的宽带调谐光电振荡器稳定性研究

童国川, 周金海, 金韬, 池灏, 朱翔, 李冬, 左路路

(浙江大学 信息与电子工程学院, 杭州 310027)

摘 要:提出了一种基于中频相位锁定技术提升宽带调谐光电振荡器长期稳定性的方法.该方法通过外部可调本振源对光电振荡器射频信号进行下变频操作,产生中频信号,该中频信号与光电振荡器的起振频率无关.将该中频信号锁相在稳定的参考源上,能够提升宽带调谐光电振荡器的长期稳定性,同时分析了锁相环对光电振荡器相位噪声性能的影响.实验结果显示,光电振荡器的频率调谐范围可达 5~15 GHz,10 kHz 频偏处的相位噪声为 -121.2 dBc/Hz,频率稳定性达到 $6.9 \times 10^{-11}/10^3$ s,表明该方法能够显著提升宽带调谐光电振荡器的稳定性.

关键词:微波光子学;光电振荡器;锁相环;稳定性;相位噪声

中图分类号:TN929.1

文献标识码:A

文章编号:1004-4213(2018)11-1123001-6

Frequency Stabilization of a Wideband Tunable Optoelectronic Oscillator Based on Intermediate Frequency Phase-locked Technique

TONG Guo-chuan, ZHOU Jin-hai, JIN Tao, CHI Hao, ZHU Xiang, LI Dong, ZUO Lu-lu
(College of Information Science and Electronic Engineering, Zhejiang University, Hangzhou 310027, China)

Abstract: A scheme for improving the long-term stability of a wideband tunable optoelectronic oscillator based on intermediate frequency phase-locked loop technique is proposed. In the scheme, an external tunable local oscillator is used to down-convert the RF signal of the optoelectronic oscillator to generate an intermediate frequency signal, which is independent of the oscillating frequency of the optoelectronic oscillator. Phase-locking of the intermediate frequency signal to a stable reference source can improve the long-term stability of the wideband tunable optoelectronic oscillator. The impact of the phase-locked loop on the phase noise performance of the optoelectronic oscillator is also analyzed. Experimental results show that the frequency tuning range of the optoelectronic oscillator is 5~15 GHz, the phase noise is -121.2 dBc/Hz at 10 kHz offset and the long-term stability is $6.9 \times 10^{-11}/10^3$ s. It indicates that the proposed method can significantly improve the long-term stability of a wideband tunable optoelectronic oscillator.

Key words: Microwave photonics; Optoelectronic oscillator; Phase-locked loop; Stability; Phase noise

OCIS Codes: 230.0230; 250.0250; 350.0350

0 引言

光电振荡器(Optoelectronic Oscillator, OEO)于1994年由美国喷气动力实验室(JPL)提出,是一种能产生高频谱纯度信号的新型信号源,广泛应用于无线通信系统.雷达系统以及先进仪器设备中^[1-3].光电振荡器要实现工程应用,必须要同时具备极低的相位噪声和良好的长期稳定性.过去几十年,为了进一步提升

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

第一作者:童国川(1990-),男,博士研究生,主要研究方向为微波光子学. Email: tgc2013@zju.edu.cn

通讯作者:周金海(1964-),男,实验师,主要研究方向为微波光子学及智能传感技术. Email: zhoughj@zju.edu.cn

收稿日期:2018-05-21;录用日期:2018-08-20

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

OEO 的性能,研究者提出了很多方案,如双环 OEO^[4]、耦合式 OEO^[5]以及基于高 Q 值回音廊壁谐振腔的 OEO^[6].

另一方面,由于 OEO 内部长光纤链路的温度敏感性,往往会导致自由运行的 OEO 输出频率不稳定.采用注入锁定技术^[7]和锁相环技术^[8]可以有效实现单一频率 OEO 的长期稳定工作.注入锁定技术是将外部超稳频率源注入到 OEO 中,通过频率牵引效应,将 OEO 的输出频率锁定在外部参考源的频率处,采用这种方式不仅提高了 OEO 系统的稳定性,而且降低了 OEO 近载端的相位噪声^[9].锁相环技术通过对输出信号进行分频、鉴相,获得误差信号,然后基于该误差信号设计外部反馈电路对 OEO 进行补偿,使得 OEO 的输出频率能够保持长期稳定^[10].传统的锁相、锁定技术都是针对单一频率的 OEO 实现稳频操作,而宽带调谐 OEO 的输出频率可变^[11-14],因此,传统 OEO 稳频技术并不适用于可调谐 OEO.由于高质量的可调谐信号源有广泛的应用,因此解决可调谐 OEO 的长期稳定性问题迫在眉睫.考虑到 OEO 的不稳定性主要是由长光纤的温度敏感性引入的,有研究人员提出了采用外部信号校准的方案,将一个校准信号注入到 OEO 中来监控 OEO 长光纤链路的抖动情况,然后与初始信号进行相位比较,得到误差信号并基于该误差信号对激光器的波长进行控制,实现对链路延时抖动的补偿.该方案能够有效提升可调谐 OEO 的长期稳定性,但是无法消除由射频链路引入的相位抖动^[15].另外一种方案是通过超稳定输出的光频率梳来同步可调谐 OEO 的输出^[16],将可调谐 OEO 的输出锁定在光频率梳的任一谐波上,实现不同频率信号的锁相.不过,该方案中高稳定光频率梳的产生十分复杂,且成本较高.

近几年,基于中频滤波和频率转换实现 OEO 的技术受到关注.由于中频滤波器带宽较窄,具有比射频滤波器更好的选频性能,该技术最早用来实现 OEO 输出信号的杂散抑制^[17].后来有研究学者提出将其改进成一种新型的窄带可调谐 OEO^[18],通过调节环长,实现了 15 MHz 的窄带信号调谐输出,同时采用光相位调制器和光纤 Sagnac 干涉仪取代传统的光强度调制器,解决由于光强度调制器偏置点漂移而导致的 OEO 频率不稳定的问题,但是对于 OEO 中来自长光纤链路和射频链路所引起的频率漂移问题并没有得到很好地解决.

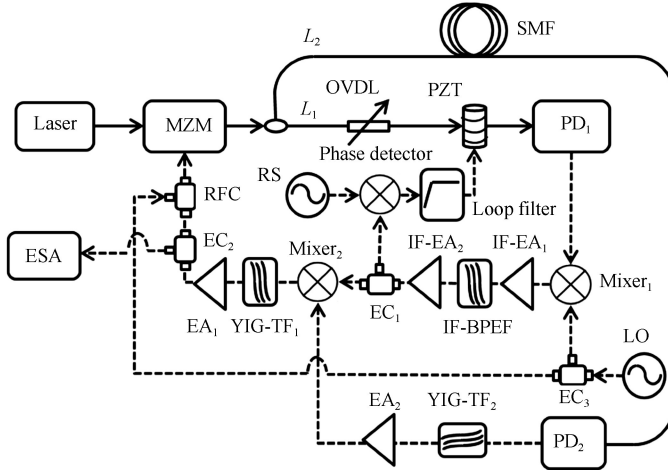
本文提出了基于中频锁相环(Intermediate Frequency Phase-locked Loop, IF-PLL)技术来解决可调谐光电振荡器的长期稳定性问题.直接从频率转换链路中提取出中频信号,该中频信号同时包含了 OEO 光链路和射频链路中的相位抖动信息,并直接与外部参考源进行鉴频鉴相,提取出误差信号,然后使用该误差信号驱动 OEO 中的压电陶瓷,实现实时反馈.相比于传统锁相环技术,该技术避免使用复杂的分频电路,且不受 OEO 起振频率的影响,可以实现对宽带调谐 OEO 的锁相.同时,通过使用电控可调滤波器作为镜频抑制滤波器,提出了一套宽带调谐的方案.对该方案进行实验验证,并进一步分析该方案对 OEO 相位噪声的影响.

1 操作原理

1.1 基于中频锁相环的宽带调谐 OEO 的系统设计

基于中频锁相环的宽带调谐 OEO 的系统框图如图 1 所示.系统主要包括 OEO 环路、延时匹配环路两个部分.OEO 环路主要由激光器、马赫-曾德调制器 MZM、可调延迟线、压电陶瓷、长光纤、光电探测器 PD、上下变频器、中频滤波器、中频放大器、射频滤波器、射频放大器和射频功分器等器件构成.激光器产生的连续光波注入到 MZM 中进行调制,输出的调制光通过光纤耦合器一分为二进入两段光纤,长度为 L_1 的光纤作为 OEO 光链路,长度为 L_2 的光纤作为延迟匹配环路的一部分.在 OEO 链路中,使用光可调延迟线和压电陶瓷作为 OEO 的延迟补偿装置,分别提供大量程和高精度的延迟补偿.所有的光信号经过 PD 拍频得到电信号.在射频链路中,混频器 1 实现下变频,混频器 2 实现上变频,两者之间构成中频链路,中频链路中由中频滤波器对下变频后的 OEO 信号进行模式选择.由于中频滤波器可以提供窄至几十 kHz 的选频带宽,因此能够使 OEO 的输出信号具有很高的边模抑制比.中频信号通过电功分器 EC_1 一分为二,一部分中频信号用于中频锁相,另一部分中频信号通过混频器 2 实现上变频,然后利用 YIG-TF₁ 抑制上变频之后产生的镜频信号.在该方案中,OEO 的宽带调谐通过调节外部本振源的输出频率来实现,同时调节 YIG-TF₁ 的通频带对不同频率的镜频信号进行抑制,选出所需的上变频信号.外部本振源为常用的商用可调信号源.由 EC_3 将本振输出信号一分为二,一部分直接连接混频器 1 的本振口,作为下变频器的本振信号源,另一部分通过电

合路器输入到 OEO 的射频链路,对光载波进行调制,再经过长度为 L_2 的延迟匹配环路进行延迟,延迟匹配环路的主要作用是对窄带滤波器引入的群延时进行补偿,能够抑制外部源引入的相位噪声^[16],然后重新经过光电转化.选频.放大,最后输入到混频器 2 的本振口,作为上变频器的本振源.整个 OEO 的信号从 EC₂ 输出.



LD: laser diode, MZM: Mach-Zehnder modulator, OC: optical coupler, OVDL: optical variable delay line, SMF: single mode fiber, PD: photodetector, PZT: piezo-electric transducer, EC: electrical coupler, IF-EA: intermediate frequency electric amplifier, IF-EBPF: intermediate frequency electric band pass filter, YIG-TF: yttrium iron garnet tunable filter, RFC: radio frequency combiner, RS: reference source, LO: local oscillator, RS: reference signal, ESA: electrical spectrum analyzer

图 1 基于中频锁相环的宽带调谐 OEO 系统框图

Fig.1 Schematic diagram of the TOEO based on IF-PLL

在 OEO 的中频锁相环中,可以将 OEO 看作一个压控振荡器(Voltage Controlled Oscillator, VCO),通过对光可调延迟线和压电陶瓷的控制实现 OEO 输出频率的调整.锁相环的参考信号来自于外部参考晶振,其具有很高的长期稳定性.经由 EC₁ 分出的一部分中频信号携带了 OEO 链路的相位抖动信息,经过与外部参考源进行鉴频鉴相,提取出误差信号,然后对误差信号进行低通滤波.放大再反馈驱动压电陶瓷,实现可调谐 OEO 的相位锁定.

1.2 基于中频锁相可调谐 OEO 的噪声模型

图 2 描述了加入中频锁相环之后 OEO 输出信号的噪声模型.锁相 OEO 输出信号的相位噪声主要有三个来源,分别是 OEO 本身的噪声源.外部参考晶振的噪声以及外部本振信号源的噪声,分别建立对应的噪声模型,对其进行描述.

由图 2 可得,本振信号的相位噪声 $\varphi_{LO}(s)$ 和外部参考源的相位噪声源 $\varphi_{ref}(s)$ 对 OEO 输出信号相位的影响可以表示为

$$\varphi_{out1}(s) = \varphi_{ref}(s) \frac{H(s)B(s)}{1+H(s)B(s)} + \varphi_{LO}(s) \left[e^{-s\tau_d} - \frac{B(s)}{1+H(s)B(s)} \right] \quad (1)$$

式中, τ_d 是匹配环路的延时, $B(s)$ 是中频滤波器的传输函数,可近似表示为

$$B(s) \simeq e^{-s\tau_{IF}} \quad (2)$$

式中, τ_{IF} 是中频滤波器的群时延.

锁相环的开环响应可以表示为

$$H(s) = K_d \cdot F(s) \cdot K_{VCO}/s \quad (3)$$

式中, K_d 是鉴相器的增益, $F(s)$ 是环路滤波器的传输函数, K_{VCO} 是压控振荡器的增益系数.

从式(2)和式(3)可以进一步推出

$$\begin{cases} \lim_{s=j\omega, \omega \rightarrow 0} B(s) = 1 \\ \lim_{s=j\omega, \omega \rightarrow 0} H(s) = \infty \end{cases} \quad (4)$$

将式(4)代入式(1),化简后得到

$$\varphi_{out1}(s) = \frac{H(s)}{1+H(s)} [\varphi_{ref}(s) + \varphi_{LO}(s)] \quad (5)$$

由此可见,中频锁相环路对于来自参考源和本振源的相位噪声具有低通响应.

对于来自 OEO 本身的相位噪声的影响,可以建立模型

$$\varphi_{out2}(s) = \varphi_{OEO}(s) \frac{B(s)}{1 + H(s)B(s)} \quad (6)$$

式中, $\varphi_{OEO}(s)$ 表示自由运行的 OEO 的相位噪声,中频锁相之后,整个系统对于该部分相位噪声具有高通滤波的频率响应.经过中频锁相之后,OEO 输出信号的相位噪声水平由 $\varphi_{out1}(s)$ 和 $\varphi_{out2}(s)$ 共同决定. $\varphi_{out1}(s)$ 取决于外部参考源和本振信号的相位噪声水平, $\varphi_{out2}(s)$ 则是由自由运行 OEO 的相位噪声 $\varphi_{OEO}(s)$ 决定. $\varphi_{OEO}(s)$ 取决于 OEO 内部的激光器.放大器以及 PD 的噪声水平.

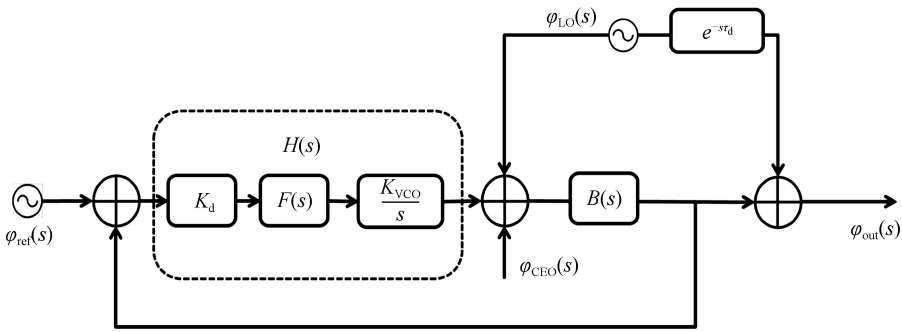


图 2 基于中频锁相技术的 OEO 噪声模型
Fig.2 Noise transfer model of the OEO based on IF-PLL

2 实验结果和讨论

根据图 1 的系统框图,搭建了基于中频锁相技术的光电振荡器.实验系统中,激光器采用分布反馈式激光器,中心波长为 1 550.13 nm,功率为 50 mW;MZM 的 3 dB 带宽为 15 GHz,半波电压为 5 V;PD 的 3 dB 带宽为 15 GHz,响应度为 0.8 A/W;中频滤波器的中心频率为 100 MHz,3 dB 带宽为 20 kHz,两个中频放大器的带宽为 50~500 MHz,分别能够提供 30 dB 的增益;射频放大器的带宽为 1~20 GHz,能够提供 30 dB 的增益;微波信号发生器(KEYSIGHT E8267D)作为本振信号源,100 MHz 的恒温晶振作为外部参考源.

首先,测试了 OEO 的宽带可调谐性能.由于实验室没有 YIG 可调滤波器,实验中使用 4 个具有不同中心频率的射频滤波器模拟电控可调滤波器在不同电压控制下所对应的不同通带,然后调整本振信号源的输出.值得注意的是,本振源的输出频率应该等于射频滤波器的中心频率减去中频滤波器的中心频率.经过上变频器之后,射频滤波器能够选出目标频率并且抑制镜像频率.实验结果通过频谱仪进行记录,测试结果见图 3.起振信号的频率分别为 5 GHz.7.8 GHz.10 GHz 和 14.2 GHz.由于 PD 的响应范围有限,最大输出频率

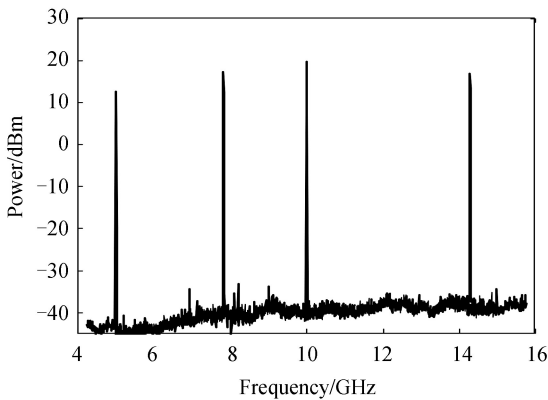


图 3 OEO 在不同频率处起振结果,起振范围 5~15 GHz,分辨率 5 MHz

Fig.3 Oscillation results of OEO at different frequencies, in the region of 5 to 15 GHz, resolution bandwidth is 5 MHz

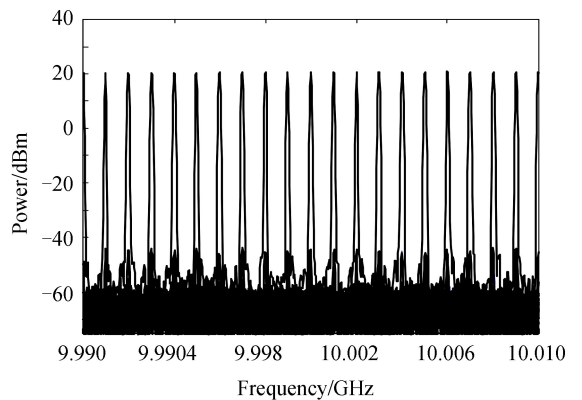


图 4 OEO 在不同频率处起振结果,步进 1 MHz,分辨率 50 kHz

Fig.4 Oscillation results of OEO at different frequencies, tuning step is 1 MHz, resolution bandwidth is 50 kHz

只能在 15 GHz 之内。

精细调谐能力也是可调谐信号源的重要特征.中频滤波器具有出色的选频能力,通过步进调整本振源的输出,可以实现对 OEO 输出信号的精细调谐.图 4 呈现了步进 1 MHz,调谐范围 20 MHz 的输出频谱.精细调谐范围与外部射频滤波器的带宽相等。

图 5 显示了可调谐 OEO 在锁相状态下和非锁相状态下的相位噪声表现.点画线表示的是外部本振源的相位噪声水平,虚线表示的是不加锁相环时 OEO 输出信号的相位噪声水平.由于使用了延时匹配环路,因此在中频滤波器带宽内,由本振源引入的相位噪声被抑制,在 10 kHz 频偏处,相位噪声从 -109 dBc/Hz 下降到 -121.2 dBc/Hz,降低了 12.2 dB.实线表示的是加上锁相环的 OEO 相位噪声表现.可以发现,除了在近载端相位噪声有略微恶化,整体相位噪声水平与自由运行的 OEO 相位噪声水平几乎一致.这是因为,加上锁相环之后,在锁相环路带宽之内总相位噪声主要是由参考源和本振源的相位噪声决定,而在锁相环路带宽之外,则是由 OEO 本身相位噪声决定.实验中使用的本振源相位噪声水平较差,在锁相之后,会导致 OEO 输出信号的近载端相位噪声出现略微的恶化。

为了评估 OEO 的频率稳定性,将 OEO 系统在实验室室温环境下连续运行超过 4 h,室内环境温度变化范围在 3°C 以内,分别测量了自由运行 OEO、相位锁定 OEO 以及参考源的艾伦方差.计算的结果如图 6 所示.从图中可知,自由运行的 OEO 在 1 s 采样时间的艾伦方差为 2.6×10^{-8} ,1 000 s 采样时间的艾伦方差为 6.5×10^{-7} ,具有较差的长期稳定性表现.而加入中频锁相环之后,OEO 在 1 s 采样时间的艾伦方差为 2.1×10^{-11} ,1 000 s 采样时间的艾伦方差为 6.9×10^{-11} .相比之下,加入中频锁相环之后,艾伦方差参数减小了 4 个数量级,表明 OEO 在长期稳定性方面有了显著提升.在不同的温度条件下,如果温度波动更加剧烈,但总体波动范围变化不大,对于自由运行的 OEO,其短时艾伦方差参数将会变差,长期艾伦方差参数变化不大,即 OEO 短期稳定性将会恶化,长期稳定性保持不变.如果温度波动范围变大,则 OEO 的长期稳定性变差.至于经过锁相之后的 OEO 频率稳定性,则取决于外部参考晶振的温度稳定性.一般情况下,外部参考晶振的温度稳定性较好,所以锁相之后的 OEO 稳定性受温度影响变化不大。

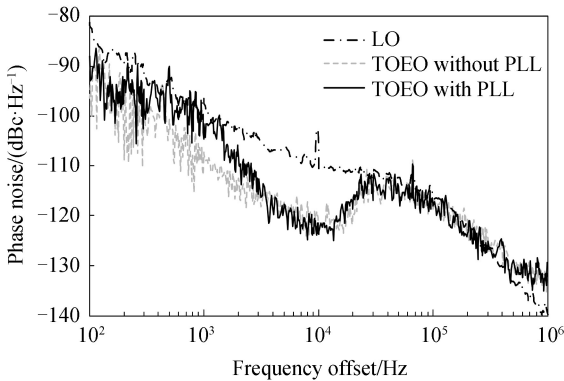


图 5 OEO 相位噪声曲线

Fig.5 Phase noise spectra of the OEO

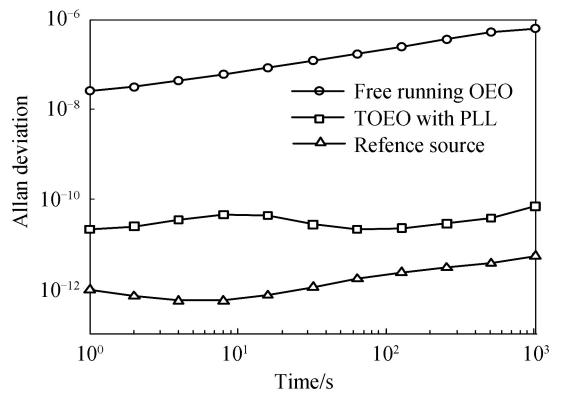


图 6 OEO 艾伦方差曲线

Fig.6 Allan deviation of the OEO

3 结论

本文提出了一种基于中频相位锁定技术提升宽带调谐 OEO 稳定性的方法,分析了这种方法的原理和引入的相位噪声,设计锁相环模块并搭建了实验验证系统.实验测试结果表明,OEO 的调谐范围可达 5~15 GHz.经过延时匹配之后,其相位噪声实现 12.2 dB 的降低.同时,采用中频锁相之后,从艾伦方差参数上看,OEO 的长期稳定性提升了 4 个数量级,大幅度提升可调谐 OEO 的稳定性,并且与 OEO 的输出频率无关,该方案具有很好的工程应用前景。

参考文献

- [1] YAO X S, MALEKI L. Optoelectronic oscillator for photonic systems[J]. *IEEE Journal of Quantum Electronics*, 1996, 32(7): 1141-1149.
- [2] JIANG Y, YU J L, et al. An optical domain combined dual-loop optoelectronic oscillator [J]. *IEEE Photonics Technology Letters*, 2007, 19(11): 807-809.

- [3] MEI Y, JIN T, CHI H, *et al.* Optoelectronic oscillator with phase-shifted fiber Bragg grating [J]. *Optics Communications*, 2014, **319**: 117-120.
- [4] YAO X S, MALEKI L. Multiloop optoelectronic oscillator[J]. *IEEE Journal of Quantum Electronics*, 2000, **36**(1): 79-84.
- [5] SALIK E, YU N, MALEKI L. An ultralow phase noise coupled optoelectronic oscillator[J]. *IEEE Photonics Technology Letters*, 2007, **19**(6): 444-446.
- [6] MALEKI L. Sources: the optoelectronic oscillator[J]. *Nature Photonics*, 2011, **5**(12): 728.
- [7] ZHOU Z H, YANG C, CAO Z W, *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] ZHANG Y, HOU D, ZHAO J. Long-term frequency stabilization of an optoelectronic oscillator using phase-locked loop [J]. *Journal of Lightwave Technology*, 2014, **32**(13): 2408-2414.
- [9] ZHENG Jun-chao, JIN Tao, CHI Hao, *et al.* Comparison and optimization of phase locked loop and injection locking techniques for optoelectronic oscillators[J]. *Acta Photonica Sinica*, 2017, **46**(4): 0423002.
郑俊超, 金韬, 池灏, 等. 光电振荡器中锁相环和注入锁定技术的比较和优化[J]. 光子学报, 2017, **46**(4): 0423002.
- [10] FU Rong-rong, ZHU Yan-hong, JIN Xiao-feng. Frequency stabilization of an optoelectronic oscillator based on phase-locked loop[J]. *Journal of Spacecraft TT&C Technology*, 2017, **36**(1):67-71.
傅蓉蓉, 祝艳宏, 金晓峰. 基于锁相环的光电振荡器频率稳定化研究[J]. 飞行器测控学报, 2017, **36**(1):67-71.
- [11] ZHU D, PAN S, BEN D. Tunable frequency-quadrupling dual-loop optoelectronic oscillator [J]. *IEEE Photonics Technology Letters*, 2012, **24**(3): 194-196.
- [12] YANG B, JIN X, CHEN Y, *et al.* A tunable optoelectronic oscillator based on a dispersion-induced microwave photonic filter[J]. *IEEE Photonics Technology Letters*, 2013, **25**(10): 921-924.
- [13] TANG Z, PAN S, ZHU D, *et al.* Tunable optoelectronic oscillator based on a polarization modulator and a chirped FBG [J]. *IEEE Photonics Technology Letters*, 2012, **24**(17): 1487-1489.
- [14] LI W, YAO J. An optically tunable optoelectronic oscillator[J]. *Journal of Lightwave Technology*, 2010, **28**(18): 2640-2645.
- [15] 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.
- [16] HOU D, XIE X P, ZHANG Y L, *et al.* Highly stable wideband microwave extraction by synchronizing widely tunable optoelectronic oscillator with optical frequency comb[J]. *Scientific reports*, 2013, **3**: 3509.
- [17] MIZUMA M, TSURU M, KAMEYAMA S, *et al.* RF-down and RF-up converting optoelectronic oscillator for spurious suppression[C]. Microwave Symposium Digest (MTT), 2012 IEEE MTT-S International. IEEE, 2012: 1-3.
- [18] HOSSEINI S E, BANAI A, KARTNER F X. Tunable low-jitter low-drift spurious-free transposed-frequency optoelectronic oscillator[J]. *IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques*, 2017, **65**(7): 2625-2635.

Foundation item: The National Natural Science Foundation of China (Nos. 61675180, 61575171)

引用格式: TONG Guo-chuan, ZHOU Jin-hai, JIN Tao, *et al.* Frequency Stabilization of a Wideband Tunable Optoelectronic Oscillator Based on Intermediate Frequency Phase-locked Technique[J]. *Acta Photonica Sinica*, 2018, **47**(11): 1123001

童国川, 周金海, 金韬, 等. 基于中频相位锁定技术的宽带调谐光电振荡器稳定性研究[J]. 光子学报, 2018, **47**(11): 1123001