

doi:10.3788/gzxb20184701.0123001

基于自相位锁定技术提升光电振荡器的稳定性

来天皓, 金韬, 周金海, 池灏, 童国川, 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:提出了一种基于自相位锁定技术提升光电振荡器稳定性的方法.通过监测光电振荡器环路中自身相位的变化来反馈控制光可调延迟线,提升光电振荡器输出频率稳定性.采用噪声模型进行了理论分析,并进行了实验验证.结果表明,带有反馈控制回路的自相位锁定光电振荡器在 4 000 s 内的频率漂移量小于 0.9 ppm,其稳定性较自由运行的光电振荡器有了大幅度的提升.

关键词:光电振荡器;自相位锁定;稳定性;相位噪声;反馈控制

中图分类号:TN929.1

文献标识码:A

文章编号:1004-4213(2018)01-0123001-5

Improving of Stability of Optoelectronic Oscillator Based on Self-phase-locked Technique

LAI Tian-hao, JIN Tao, ZHOU Jin-hai, CHI Hao, TONG Guo-chuan,

ZHU Xiang, LI Dong, ZUO Lu-lu

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

Abstract: A method is proposed for improving the stability of an Optoelectronic Oscillator (OEO) based on self-phase-locked technique. The output frequency stability of the OEO is improved by controlling an Optical Tunable Delay Line (OTDL) according to the phase change of the OEO loop. The principle and noise transfer model are analyzed theoretically and verified experimentally. The experimental results show that the self-phase-locked OEO with a feedback control loop has a frequency drift within 0.9 ppm in 4 000 s, and its stability is greatly improved.

Key words: Optoelectronic oscillator; Self-phase-locked; Stability; Phase noise; Feedback control

OCIS Codes: 230.4910; 230.0230; 250.0250; 350.0350

0 引言

光电振荡器(Optoelectronic oscillator, OEO)是一种能产生高频谱纯度和低相位噪声的信号发生装置,在通信、雷达、电子对抗等领域将有广泛的应用.世界上首台单环路结构的 OEO 是由加州大学喷气动力实验室姚晓天博士等人提出的^[1],OEO 与传统电振荡器相比最大的区别在于它采用了光纤作为储能元件构成谐振腔^[2].光纤低损耗、大容量的特性,大大提高了 OEO 系统的品质因数,但也同时存在着一些问题.光纤受外界环境因素的影响较大,温度、压力等因素的变化都会导致 OEO 输出频率的变化,从而影响 OEO 输出信号的稳定性.

为了解决这一问题,研究者们做了大量的工作.在早期,研究人员着重采用消除环境因素影响的方法.例如,将光纤放入一个温度恒定的泡沫箱内^[3],避免外界环境变化对光纤产生影响.此外,还可以采用对温度不

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

第一作者:来天皓(1993-),男,硕士研究生,主要研究方向为微波光子学. Email: laitianhao@zju.edu.cn

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

收稿日期:2017-08-28;录用日期:2017-10-23

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

的输出频率都发生了微小的变化.假设光纤长度的变化量为 ΔL ,由此导致的环路延迟增量为 $\Delta\tau$,此时,OEO 的输出频率改变为 f_1 ,分别表示为

$$f_1 = \frac{k}{\tau + \Delta\tau} \quad (1)$$

$$\Delta\tau = \frac{n\Delta L}{c} \quad (2)$$

式中, k 为整数,表示不同的振荡模式, n 表示光纤的折射率, c 表示光速.由于延时的变化,图 1 中 A、B 两点之间传输的信号将增加相位偏差 $\Delta\theta$,表示为

$$\Delta\theta = 2\pi \left(\frac{n(L + \Delta L)/c}{1/f_1} - \frac{nL/c}{1/f_0} \right) \quad (3)$$

将式(1)、(2)代入式(3)可得到

$$\Delta\theta = 2\pi \frac{kn\Delta L\tau_1}{\tau(c\tau + n\Delta L)} \quad (4)$$

式(4)表明,相位偏差 $\Delta\theta$ 与光纤长度的变化量 ΔL 相关,而混频器中频输出端的电压大小与其本振端和射频端之间相位偏差 $\Delta\theta$ 的正弦值成正相关.因此,混频器中频输出端的电压大小可以反映出 OEO 环路中光纤长度的变化.根据电压的变化来反馈控制光可调延迟线的延迟量,就可以保证输出频率的稳定,达到提升 OEO 稳定性的目的.采用这种稳定方案,对于 OEO 本身的振荡频率没有要求,可以应用于可调谐的 OEO.与此同时,也适用于文献中已报道的其它结构的 OEO,如双环路 OEO^[13]、耦合式 OEO^[14]、光域耦合式 OEO^[15]等.

1.3 自相位锁定 OEO 的噪声模型

图 2 是自相位锁定 OEO 的噪声模型.该模型主要包括双平衡混频器、OEO 和反馈回路,其中,OEO 可以被看作是一个压控振荡器.由于 OEO 输出信号是由噪声经过多次反馈放大而产生的自激振荡,因此,整个系统没有外部输入信号.图 2 中, $\Phi_{\text{mixer}}(s)$ 、 $\Phi_{\text{OEO}}(s)$ 和 $\Phi_f(s)$ 分别表示混频器引入的噪声、OEO 环路引入的噪声和反馈回路引入的噪声.由于混频器是一种无源器件,因此它引入的噪声非常小,可以忽略不计.通常情况下,反馈回路的增益要远小于 OEO 环路的增益,因此,OEO 环路的噪声是系统的主要噪声来源,输出信号的噪声可以被近似表示为

$$\Phi(s) \approx \Phi_{\text{OEO}}(s) \cdot H_{\text{OEO}}(s) \quad (5)$$

式中, $H_{\text{OEO}}(s)$ 为 OEO 环路的传递函数,表示为

$$H_{\text{OEO}}(s) = \frac{K_{\text{OEO}}F(s)}{s + K_dK_{\text{OEO}} - K_dK_{\text{OEO}}K_fF(s) - K_{\text{OEO}}F(s)e^{-s\tau}} \quad (6)$$

式中, K_d 是混频器的增益, K_{OEO} 是 OEO 环路的增益, K_f 是反馈回路的增益, $F(s)$ 是 OEO 环路的传递函数.

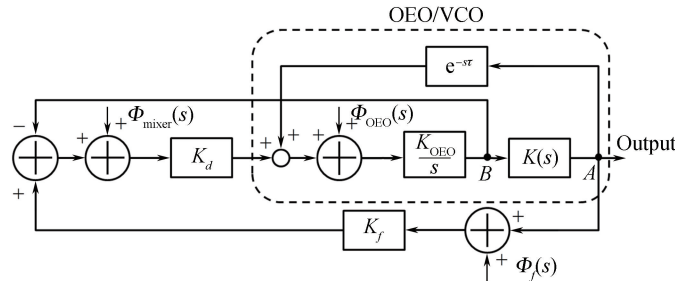


图 2 自相位锁定 OEO 噪声模型

Fig.2 Noise transfer model of the self-phase-locked OEO

2 实验结果和讨论

根据图 1 的系统框图,搭建了带有反馈控制回路的自相位锁定 OEO.实验系统中,激光器采用 1550 nm 分布反馈式激光器,功率为 50 mW;MZM 带宽为 10 GHz,半波电压为 5 V,通过偏置控制模块使其稳定工作在正交点;控制系统包含了一个 16 位的模数转换模块,用于采集混频器输出的电压信号;测量仪器采用

R&S FSW67 频谱仪,其内部参考信号的频率稳定度高于 0.1 ppm.为了保证测量过程中不发生跳模现象,同时保证系统的单模运行,OEO 环路的光纤长度大约为 50 m.

测试环境为实验室环境,且不进行温度控制.在实验过程中,首先断开反馈回路,让 OEO 自由运行.为了避免器件预热期间,频率的不稳定影响测试结果,实验中先让 OEO 自由运行 30 分钟后再开始记录数据.利用频谱仪的频率计数器功能,每秒钟记录 1 次 OEO 的输出频率,一共记录 4 000 次.记录完毕之后,闭合反馈回路,控制系统开始工作,根据采集的混频器输出电压变化量反馈控制延迟线的延迟量,同时用相同的方法记录 OEO 的输出频率.图 3 是实验结果对比图.从图 3 中可以看出,自由运行 OEO 的频率(虚线所示)在 4 000 s 时间内发生了明显的漂移,相比 0 时刻的偏移量大约有 22 ppm,而带有反馈的自相位锁定 OEO 的频率(实线所示)在 4 000 s 时间内相对稳定,频率变化在 ± 0.9 ppm 之内.实验结果表明,带有反馈回路的自相位锁定 OEO 的稳定性较自由运行的 OEO 有较大改善.采用该方案对 OEO 进行稳定控制后,仍存在微小的频率漂移现象,这是由于反馈回路之外器件的不稳定导致的.这些器件受温度的影响比光纤小,不会对 OEO 的长期稳定性造成较大的影响,如果选用对环境不敏感器件或者对这些器件进行温度控制,可进一步提高系统的频率稳定性.

分别计算上述两组实验中测量数据的艾伦方差,结果如图 4 所示.由图可见,随着时间的推移,自由运行 OEO 的艾伦方差近似线性递增,而自相位锁定 OEO 的艾伦方差在 100 s 之内与自由运行的 OEO 相似,但在 100 s 之后逐渐变小并趋向一个稳定值,这说明经过一段时间后,自相位锁定 OEO 的频率漂移量将逐渐稳定,其长期稳定性得到了大幅提升.从艾伦方差曲线中发现,自相位锁定 OEO 在 1 s 采样时间处的稳定性会有所下降,这主要是受光可调延迟线的调节精度的限制,如果采用更高精度的延迟量调节方法,这种情况可以有一定程度的改善.

为了测量该方案对 OEO 相位噪声的影响,采用频谱仪分别测量了自相位锁定 OEO 和自由运行 OEO 的相位噪声,单次测量的结果分别如图 5 中浅色实线和深色点划线所示.从图中可以看出,两条相位噪声曲线在大于 200 Hz 频偏处的部分基本重合;而在 100~200 Hz 频偏处,由于受频谱仪近载端相位噪声测量精度的限制和噪声特性的影响,单次测量结果存在较大的误差和随机性,实验中多次测量结果显示两者的最大差异小于 10 dB.

在实验中,为了保证 OEO 的单模运行以及运行模式的稳定,仅演示了较短光纤作为光储能器件的情况.如果采用更长的光纤及更低噪声的器件,OEO 的相位噪声将得到改善,但这不是本文的研究重点.

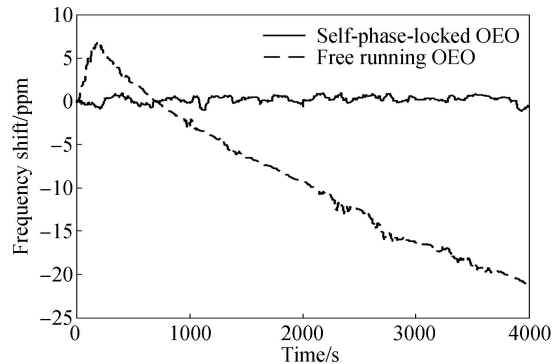


图 3 自相位锁定和自由运行 OEO 的频率稳定性曲线
Fig.3 Frequency stability of the self-phase-locked OEO and the free running OEO

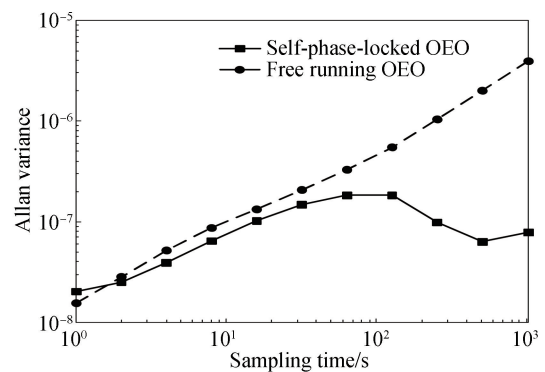


图 4 自相位锁定和自由运行 OEO 的艾伦方差曲线
Fig.4 Allan deviation of the self-phase-locked OEO and the free running OEO

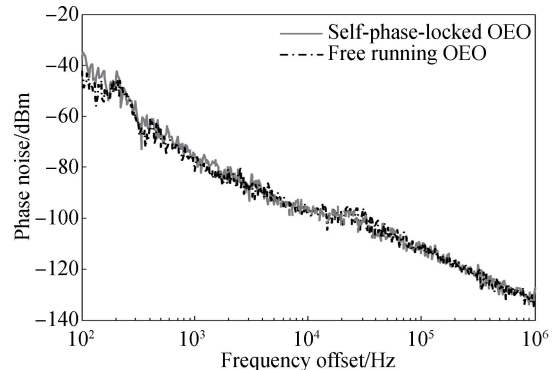


图 5 自相位锁定和自由运行 OEO 的相位噪声
Fig.5 Phase noise spectra of the self-phase-locked OEO and the free running OEO

3 结论

本文提出了一种基于自相位锁定技术提升 OEO 稳定性的方法,分析了这种方法的原理和噪声模型,设计了反馈回路并搭建了实验验证系统.实验结果表明,采用这种方法可以大幅度提升 OEO 的稳定性,并且不需要对器件进行温度控制,也不需要借助外部参考源,是一种简单、可行的方法,适用于可调谐的 OEO.

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] YAO X S, MALEKI L, ELIYAHU D. Progress in the opto-electronic oscillator-a ten year anniversary review[C]. *Microwave Symposium Digest, 2004 IEEE MTT-S International*, IEEE, 2004, **1**: 287-290.
- [3] 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.
- [4] KABA M, LI H W, DARYOUSH A S, *et al.* Improving thermal stability of opto-electronic oscillators[J]. *IEEE Microwave Magazine*, 2006, **7**(4): 38-47.
- [5] JIA S, YU J, WANG J, *et al.* A novel optoelectronic oscillator based on wavelength multiplexing[J]. *IEEE Photonics Technology Letters*, 2015, **27**(2): 213-216.
- [6] 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.
- [7] HONG J, LIU A, WANG X, *et al.* New kind of injection-locked oscillator and its corresponding long-term stability control[J]. *Applied optics*, 2015, **54**(27): 8187-8191.
- [8] ZHOU Z, YANG C, CAO Z, *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.
- [9] ZHENG J, JIN T, CHI H, *et al.* Improving the performance of the injection-locked optoelectronic oscillator by using an extra feedback loop[J]. *Optical Engineering*, 2017, **56**(1): 016108-016108.
- [10] 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.
- [11] 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.
- [12] BUI D T, JOURNET B. Improving the operation of optoelectronic oscillator by stabilizing the electrooptic modulator[C]. *Advanced Technologies for Communications (ATC), 2011 International Conference on*. IEEE, 2011: 148-151.
- [13] YAO X S, MALEKI L. Multiloop optoelectronic oscillator[J]. *IEEE Journal of Quantum Electronics*, 2000, **36**(1): 79-84.
- [14] YAO X S, MALEKI L. Coupled opto-electronic oscillator: U.S. Patent 5, 929, 430[P]. 1999-7-27.
- [15] JIANG Y, YU J, WANG Y, *et al.* An optical domain combined dual-loop optoelectronic oscillator[J]. *IEEE Photonics Technology Letters*, 2007, **19**(11): 807-809.