光电器件

DOI：10.16818/j.issn1001－5868.2024030603

基于光电混合反馈控制的光电振荡器稳频研究

蒋雨舟*，彭于镔，庾财斌
（重庆光电技术研究所，重庆 400060）

摘　要： 光电振荡器具有输出信号相位噪声低、频率可调的优点，已成为军民应用领域的研究热点。然而，目前光电振荡器存在输出信号频率不稳定的核心问题，这限制了其在工程中的应用和推广。基于此，文章研究了光电振荡器频率漂移机理，提出了一种基于光电混合反馈控制的光电振荡器频率稳定方法，该方法在保证光电振荡器低相噪的情况下可同时实现光电振荡器特定振荡频率的稳定输出。实验测试得到光电振荡器的稳定度达到了 5.6×10^{-12}/天，这可以满足工程中对频率稳定的应用需求。

关键词： 光电振荡器；光电混合；反馈控制；频率稳定
中图分类号： TN911.74　**文章编号：** 1001－5868(2024)03－0384－04

Frequency Stability of Optoelectronics Based on Optoelectronic Hybrid Feedback Control

JIANG Yuzhou, PENG Yubin, YU Caibin
(Chongqing Optoelectronics Research Institute, Chongqing 400060, CHN)

Abstract: Optoelectronic oscillators have been extensively investigated for military and civilian applications owing to their low phase noise and adjustable frequency. However, they exhibit unstable output-signal frequencies, which limits their application and widespread use in engineering. Hence, this study investigates the frequency-drift mechanism of optoelectronic oscillators and proposes a frequency-stabilization method for optoelectronic oscillators based on photoelectric hybrid feedback control. This method can realize a stable output under a specific oscillation frequency of a photoelectric oscillator while ensuring low phase noise from the optoelectronic oscillator. Experimental test results show that the stability of the photoelectric oscillator can reach 5.6×10^{-12} daily, which satisfies the application requirement for frequency stabilization in engineering.

Key words: optoelectronic oscillator; optoelectronic hybrid; feedback control; frequency stability

0　引言

光电振荡器，作为一种采用光电结合方式的新型微波频率源，具有体积小、功耗低和大带宽可调谐的优点[1-5]，并且光电振荡器产生的微波信号的相位噪声与频率无关，这使得其在高频微波信号产生的应用上具有极大的优势[6-9]。利用光纤传输损耗低、大带宽的特点，能够轻易实现高品质因数的光电谐振腔，从而有望获得低相位噪声的振荡信号。随着新一代武器装备性能的不断提升，对频率源的性能要求也越来越高，正是由于光电振荡器的突出优良特性，使得其在军事装备中具有十分重要的应用价值。在光电振荡器中，由于使用的长光纤的折射率和长度会受外界环境温度变化导致整个光电振荡器

收稿日期：2024－03－06.
基金项目：重庆市博士后科学基金项目(CSTC2019jcyj-bshx0103).
* **通信作者：**蒋雨舟

的延时时间发生变化，进而导致光电振荡器输出信号的频率发生漂移。目前，光电振荡器的稳定性是限制其应用的关键问题。为提高光电振荡器的频率稳定性，许多基于温度控制和锁相环的方法被用于稳定光电振荡器输出信号的频率[10-12]。但基于温控的方法存在稳频速度慢、精度差的问题，而基于锁相环的方法则受限于有限的调节范围，这两类方法均难以有效解决光电振荡器的稳定性问题。

本文研究了一种基于光电混合反馈控制的稳频方法，实时补偿外界环境导致振荡环路的有效长度变化，具有大范围、快速、高精度频率稳定控制的优点，为光电振荡器在恶劣环境下的长期稳定工作提供了解决办法。实验测试得到光电振荡器的稳定度达到了 5.6×10^{-12}/天，可以满足工程中对频率稳定的应用需求。

1　研究内容

光电振荡器稳频架构框图如图 1 所示，该架构由激光器、电光强度调制器、光延时调控模块、长光纤、高精度温控箱、光电探测器、电移相器、微波放大器、滤波器、电分路器、电合路器、高精度频率注入锁定模块、高稳定参考源、高精度鉴频模块组成。

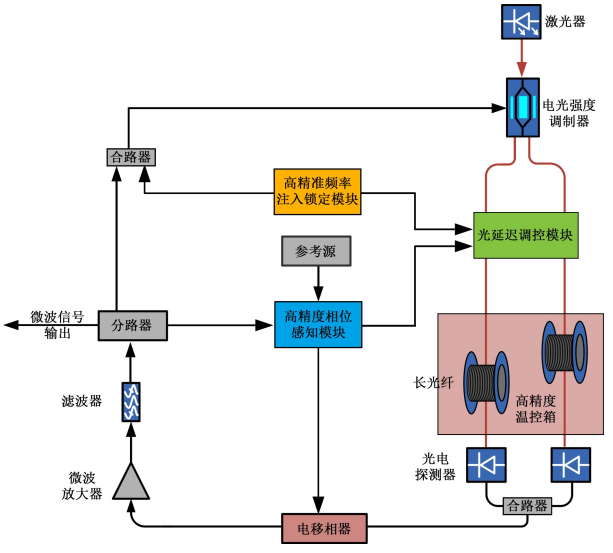


图 1　光电振荡器稳频架构框图

其中，激光器输出光载波信号进入电光强度调制器进行电光转换，调制的光信号由光延时调控模块和长光纤进行长时间储能后由光电探测器还原为电信号，电信号再经过电移相器移相、微波放大器放大补偿、窄带滤波器滤除杂波信号后由电分路器和电合路器进行信号分配后再输入到电光强度调制器中，形成振荡环路。

由 OEO 的振荡机理可知环腔的振荡频率 f_{OEO} 与环腔时延量 τ 应满足如下关系：

$$f_{\mathrm{OEO}}=k/\tau,k=0,1,2,\cdots \tag{1}$$

式中，环腔时延量 τ 由 OEO 环腔有效长度决定。当外界环境温度变化而导致长光纤有效长度变化时，会改变环腔的时延量，进而导致 OEO 的振荡频率发生改变，如下式：

$$f'_{\mathrm{OEO}}=k/(\tau+\Delta\tau),k=0,1,2,\cdots \tag{2}$$

对于一个长 10 km 的单环结构 OEO，对应的总延时约为 50 μs，当环腔延时量变化 1 ps 时，对应的频率漂移可以由下式得到：

$$\Delta f_{\mathrm{OEO}}=\frac{\Delta\tau}{\tau}f_{\mathrm{OEO}} \tag{3}$$

由式(3)可知，当 OEO 振荡频率为 10 GHz 时，环腔延时量变化 1 ps 对应的频率漂移为 200 Hz。

由于光电振荡器系统构成中含有长光纤，它作为高 Q 值元件对环境温度的变化非常敏感，影响到 OEO 输出信号频率的长期稳定性。下面将对光纤的温度敏感性进行理论分析。根据式(1)，OEO 振荡频率与光纤参数的关系为：

$$f_{\mathrm{OEO}}=\frac{k}{\tau}=k\frac{c}{NL} \tag{4}$$

式中，k 是整数，N 和 L 分别代表光纤的有效折射率和长度。N 和 L 这两个量通常与温度变化有关。因此，环境温度变化对 OEO 的振荡频率有很大的影响。将式(4)对温度求导，可得：

$$\frac{\Delta f_{\mathrm{OEO}}}{f_{\mathrm{OEO}}}=-\Delta T\frac{1}{L}\frac{\partial L}{\partial T}-\Delta T\frac{1}{N}\frac{\partial N}{\partial T} \tag{5}$$

式中，Δf_{OEO} 表示频率的变化，ΔT 表示温度的变化。式(5)表示温度变化引起频率的变化由两部分组成，一部分是由光纤长度变化而引起频率变化，由公式右边第一项表示；另一部分是由光纤的折射率变化而引起频率变化，由公式右边第二项表示。光纤长度随温度的变化比光纤折射率随温度的变化小两个数量级。因此，式(5)中右边第 1 项的值可以忽略，OEO 频率漂移主要取决于光纤折射率的温度特性。普通单模光纤的温度折射率系数约为 1×10^{-5}/℃，有效折射率约为 1.47，对于 10 GHz 信号，温度变化 1 ℃，频率漂移就达到了 68 kHz。当环境温度变化 20 ℃时，OEO 的频率漂移会达 1.6 MHz，难以满足工程应用对频率稳定度的需求。

针对光纤振荡环路的延时补偿方法，主要有使

用可调光延时线以及使用电移相器两种。目前商用的可调光延时线的延时范围可达 10 000 ps，延时精度最高可达 10 fs；电移相器的移相范围为 360°，移相精度可达 0.8×10^{-3}°。对于 10 km 光纤长度输出 10 GHz 的 OEO 而言，可调光延时线对应的频率调谐范围为 2 MHz，频率调谐精度为 2 Hz。移相器对应的频率调谐范围为 20 kHz，频率调谐精度为 0.045 Hz。由上述分析可知，可调光延时线虽然移频范围大，但是移频精度差；移相器虽然移频精度高，但是移频范围小。两者都无法满足 OEO 对大范围、高精度的延时补偿要求。针对上述问题，实验首先对长光纤进行了主动温度控制，温度控制精度约为 0.1 ℃，这样可以减少外界环境温度变化对长光纤的影响，实现光电振荡器输出频率的初步稳定控制。然后再采用光电混合反馈控制技术，该技术结合了光学延时调控和电学移相的方式，光学延时调控实现大范围慢速的频率调谐，电学移相实现高精度快速频率调谐，两者优势互补，最终实现了对光电振荡器输出信号频率的大范围、高精度、快速调谐控制。

2 实验测试

根据图 1 的架构框图进行实验链路的搭建。链路中的光纤长度为 10 km，高精度温控箱单独加电实现对长光纤的温度控制，其温度控制精度为 0.3 ℃，根据前面的理论分析，温控箱可实现对 OEO 约为 20.4 kHz 的频率稳定控制。高精度频率注入锁定模块与电合路器相连提供振荡环路起振信号，OEO 的起振输出信号通过电分路器分出一部分信号与高稳定参考源输出的信号在高精度鉴频模块中进行比较，当两个信号的频率不相等时，高精度鉴频模块输出反馈控制信号至电移相器中，所选择的电移相器的移相范围为 180°，对应 OEO 的频率调谐范围是 10 kHz。移相器工作时，当移相量接近移相器的量程时，输出反馈信号控制光延时调控模块进行延时补偿，从而使电移相器又重新具备有效的移相范围，光延迟调控模块的延时范围为 1 000 ps，对应的 OEO 频率范围是 200 kHz。在温控箱的初步温度控制条件下，电移相器和光延时调控模块共同完成 OEO 的大范围、高精度、快速频率调谐控制，实时控制振荡环路中与高稳定参考源的输出信号一致，进而完成光电振荡器的高稳定频率信号输出。

基于上述的 OEO 稳频方案，实验对 OEO 的频率稳定性进行了测量，OEO 的输出端连接频率计，设置频率每隔 6 s 记录一次信号频率值。在室温条件下，对不加稳频控制时的 OEO 输出信号频率进行测量记录，记录结果如图 2 所示。可以看出，OEO 开机后，各光电器件运行后产生热量导致 OEO 的输出频率向低频方向漂移，并且由于采用的是双环结构，当频率漂移到一定程度后还会出现跳模。随着运行时间的延长，OEO 最终达到了较为稳定的状态。

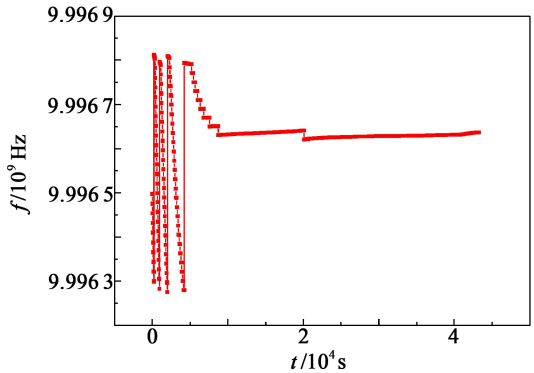


图 2 OEO 不加稳频控制时的输出信号频率漂移情况

图 3 是 OEO 加稳频控制后的频率稳定性测试结果，可以看出，OEO 的频率被锁定在一个特定参考频率上，利用阿伦方差公式，计算得到 OEO 的频率稳定度为 5.6×10^{-12}/天。

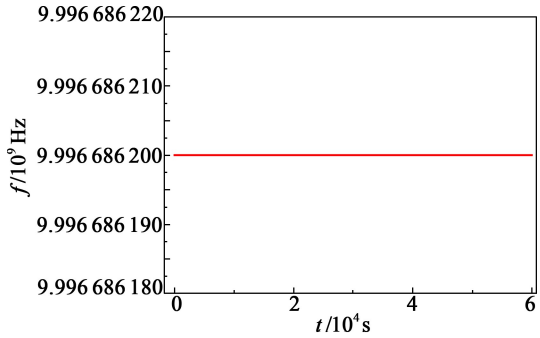


图 3 OEO 加稳频控制后的输出信号频率漂移情况

3 结论

本文研究了光电振荡器的频率漂移影响因素，针对光电振荡器在实际工程应用中因环境温度变化所致的频率偏移问题，本文基于反馈控制原理，提出了光电混合稳频的创新方法，利用光学延时调控实现大范围慢速的频率调谐，电学移相实现高精度快速频率调谐，实现对光电振荡器输出信号频率的大范围、高精度、快速调谐控制。

参考文献：

[1] Maleki L. The optoelectronic oscillator[J]. Nature Photonics, 2011, 5(12): 728-730.

[2] 霍沙沙，李晓琼，刘安妮，等. 低相噪启钥式耦合微波光电振荡器研究[J]. 半导体光电，2022，43(1)：79-83.
Huo Shasha, Li Xiaoqiong, Liu Anni, et al. Turnkey coupled optoelectronic microwave oscillator with low phase noise[J]. Semiconductor Optoelectronics, 2022, 43(1): 79-83.

[3] 张　羽，高　阳，孙力军. 加性噪声对微波光电振荡器相位噪声的影响[J]. 半导体光电，2014，34(3)：490-493.
Zhang Yu, Gao Yang, Sun Lijun. Influences of additive noise on phase noise of microwave optoelectronic oscillators[J]. Semiconductor Optoelectronics, 2014, 34(3): 490-493.

[4] 滕义超，张宝富，李得龙，等. 降低光电振荡器相位噪声的方法研究[J]. 半导体光电，2014，35(2)：171-175.
Teng Yichao, Zhang Baofu, Li Delong, et al. Research on phase noise reduction of optoelectronic oscillators[J]. Semiconductor Optoelectronics, 2014, 35(2): 171-175.

[5] 陈吉欣，惠　洋，鄢　勃，等. 长光纤环高性能光电振荡器研究[J]. 光学学报，2013，33(1)：95-99.
Chen Jixin, Hui Yang, Yan Bo, et al. Research on long fiber loop optoelectronic oscillator of high performance[J]. Acta Optica Sinica, 2013, 33(1): 95-99.

[6] 杨　博，梁允峰，孟联文，等. 频率源对雷达测速精度影响分析[J]. 宇航学报，2018，39(3)：319-325.
Yang Bo, Liang Yunfeng, Meng Lianwen, et al. Analysis of the effects of frequency source on the velocity measuring precision of radar[J]. J. of Astronautics, 2018, 39(3): 319-325.

[7] 杨　俊，许　强. 频率源的相位噪声对雷达系统性能的影响[J]. 舰船电子对抗，2016，39(1)：58-61.
Yang Jun, Xu Qiang. Influence of phase noise of frequency source on radar system performance[J]. Shipboard Electronic Countermeasure, 2016, 39(1): 58-61.

[8] 王新浪，蔡　杰，季　帅，等. 频率源相位噪声对雷达改善因子的影响[J]. 现代导航，2020，5：367-371.
Wang Xinlang, Cai Jie, Ji Shuai, et al. Influence of phase noise of frequency source on radar improvement factor[J]. Modern Navigation, 2020, 5: 367-371.

[9] 董　哲，陈汗龙，欧阳文，等. 卫星导航系统星载钟时域频率稳定度探讨[J]. 现代导航，2022(4)：251-257.
Dong Zhe, Chen Hanlong, Ouyang Wen, et al. Discussion on time-domain frequency stability of on-board clock in satellite navigation system[J]. Modern Navigation, 2022(4): 251-257.

[10] 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)：160-165.
Tong Guochuan, Zhou Jinhai, 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): 160-165.

[11] 孙　斌，于晋龙，王　菊. *K* 波段高稳光电振荡器[J]. 中国激光，2012，39(3)：172-176.
Sun Bin, Yu Jinlong, Wang Ju. *K*-band and high stability optoelectronic oscillator[J]. Chinese J. of Lasers, 2012, 39(3): 172-176.

[12] 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.
Fu Rongrong, Zhu Yanhong, Jin Xiaofeng. Frequency stabilization of an optoelectronic oscillator based on phase-locked loop[J]. J. of Spacecraft TT&C Technology, 2017, 36(1): 67-71.

作者简介：

蒋雨舟(1991—)，男，重庆市人，硕士研究生，主要研究方向为光电信息技术。