

doi: 10.3788/gzxb20154410.1023003

基于反馈控制环路提高光电振荡器长期稳定性的方法

任凤鑫, 金韬, 池灏, 童国川, 郑俊超

(浙江大学 信息与电子工程学系, 杭州 310027)

摘 要:提出了一种基于反馈控制环路提高光电振荡器长期稳定性的方法. 该方法用现场可编程门阵列和分频电路测量光电振荡器的信号频率, 用光纤延迟线调节光电振荡器环路长度. 对测量光电振荡器频率的分频方法的精确度进行了理论分析. 基于单环结构的实验证明这种方法在有效提高光电振荡器的长期稳定性的同时不会降低系统的相位噪声性能, 带有反馈控制环路的光电振荡器 7 小时的频率稳定性可以达到 0.8 ppm.

关键词:光电振荡器; 现场可编程门阵列; 光纤延迟线; 长期稳定性; 分频电路

中图分类号: TN751.1

文献标识码: A

文章编号: 1004-4213(2015)10-1023003-5

Long-term Stability Improvement in an Optoelectronic Oscillator Based on a Feedback Control Loop

REN Feng-xin, JIN Tao, CHI Hao, TONG Guo-chuan, ZHENG Jun-chao

(*Optoacoustic Signals Processing Laboratory, College of Information and Electronic Engineering, Zhejiang University, Hangzhou 310027, China*)

Abstract: A method for the long-term stability improvement of an optoelectronic oscillator was proposed, which is based on a feedback control loop. To achieve the long-term stability, the frequency of optoelectronic oscillator is measured with a field programmable gate array and a frequency dividing circuit. Then the length of optoelectronic oscillator loop is adjusted with a fiber delay line. The accuracy of dividing method to measure the frequency of optoelectronic oscillator is discussed in theory. An experiment based on a single loop structure shows that the phase noise performance does not deteriorate while the long-term stability of optoelectronic oscillator is effectively improved, and the frequency stability of optoelectronic oscillator with feedback control loop is ± 0.8 ppm over 7 hours.

Key words: Optoelectronic oscillator; Field programmable gate array; Fiber delay line; Long-term stability; Frequency dividing circuit

OCIS Codes: 230.4910; 250.0250; 060.2320; 060.5625

0 引言

光电振荡器 (Optoelectronic Oscillator, OEO) 产生的信号具有高频谱纯度, 高稳定性和低相位噪声的优点, 将被广泛用于无线通信和雷达系统等. 1996 年, Yao 和 Maleki 提出了第一个单环结构的 OEO^[1]. 长光纤的使用可以提高系统 Q 值, 降低微波信号的相位噪声, 但同时也会使模式间隔变窄, 使 OEO 对外界温度

更加敏感. 近年来, 为了提高 OEO 的性能, 研究者们做了大量的研究, 提出了双环结构, 耦合式结构等新型 OEO^[2-5].

OEO 产生的信号具有极低的相位噪声, 但由于光纤对外界环境的变化非常敏感, 影响到 OEO 输出信号频率的长期稳定性. 提高 OEO 长期稳定性的难点在于如何测量信号频率^[6-9]. 2002 年, Eliyahu 等用控制温度的电阻加热器和锁相环电路来提高 OEO 的长期稳定

基金项目: 国家重点基础研究发展计划 (No. 2012CB315703) 和国家自然科学基金 (Nos. 61275027, 61177003) 资助

第一作者: 任凤鑫 (1990-), 男, 硕士研究生, 主要研究方向为微波光子学. Email: 3090100961@zju.edu.cn

导师 (通讯作者): 金韬 (1968-), 男, 教授, 博导, 主要研究方向为光声信号处理及光通信技术. Email: jint@zju.edu.cn

收稿日期: 2015-05-13; 录用日期: 2015-07-02

性^[6]. 2012年, Tseng 和孙斌分别用频率探测信号和锁模激光器来检测 OEO 频率的变化, 并通过调节光纤延迟来改变 OEO 的输出信号频率^[7-8]. 2015年, Toan 等用矢量网络分析仪测量 OEO 在室温下振荡频率的变化^[9].

本文介绍了一种用于提高 OEO 长期稳定性的反馈控制方法. 首先用分频电路将高频信号降至低频信号, 再由现场可编程门阵列 (Field Programmable Gate Array, FPGA) 检测出分频后信号的频率, 并与标准频率进行比较. 检测出频率偏移后, 用步进电机控制光纤延迟线来改变 OEO 的频率, 从而实现频率的稳定. 基于单环 OEO 的实验验证了这种方法能有效提高 OEO 的长期稳定性.

1 操作原理

1.1 温度对 OEO 频率的影响

温度是影响 OEO 长期稳定性最主要的因素. 单环 OEO 的输出信号频率可以表示为

$$f = \frac{Nc}{nL} \quad (1)$$

式中 c 是光速, N 是所选择的传输峰的序号, n 是光纤的折射系数, L 是 OEO 环路的光纤长度. 信号频率随光纤的折射系数和环路长度的变化可表示为

$$\frac{\Delta f}{f} = -\frac{\Delta n}{n} \quad (2)$$

$$\frac{\Delta f}{f} = -\frac{\Delta L}{L} \quad (3)$$

光纤折射率和光纤长度随温度的变化是影响 OEO 频率漂移的两个主要因素. 当温度变化 ΔT 时, 频率变化量 Δf 为

$$\frac{\Delta f}{f_0} = -\frac{(C_T + C_L)\Delta T + C_T C_L \Delta T^2}{(1 + C_T \Delta T)(1 + C_L \Delta T)} \quad (4)$$

式中 C_T 是光纤折射率的温度系数, C_L 是光纤的线性热膨胀系数. 因为 $C_T \leq 1$, $C_L \leq 1$, 忽略高阶项, 式(4)可以近似写成

$$\frac{\Delta f}{f_0} \approx -(C_T + C_L)\Delta T \quad (5)$$

对于单模光纤^[10], $C_T = 0.811 \times 10^{-5}/^\circ\text{C}$ (1 550 nm), $C_L = 5.5 \times 10^{-7}/^\circ\text{C}$ (1 550 nm). 由式(5)可得 OEO 受外界温度变化产生的频率漂移大约是 8.55 ppm/ $^\circ\text{C}$.

1.2 系统设计

实验系统结构如图 1, 频率稳定 OEO 的结构主要包括激光器、马赫-曾德调制器 (Mach-zehnder Modulator, MZM)、步进电机控制的光纤延迟线、掺铒光纤放大器 (Erbium-doped Optical Fiber Amplifier, EDFA)、光电探测器 (Photoelectric Detector, PD)、射频滤波器、电放大器 (Electric Amplifier, EA)、两个 50:50 的功率分配器、分频整形电路和基于 FPGA 的

控制电路. 反馈系统的作用是测量信号频率并控制光纤延迟线以实现 OEO 的频率稳定.

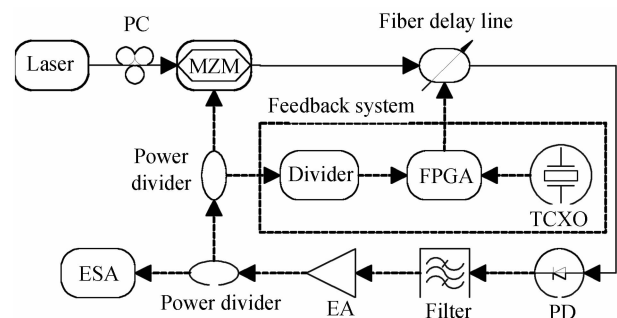


图 1 带有反馈环路的 OEO 原理

Fig. 1 Schematic of the proposed OEO with a feedback loop

因为 OEO 输出的 10 GHz 高频信号不能被 FPGA 直接测量, 设计了将高频信号转换成低频信号的分频电路. 分频电路的分频系数可以根据需要设置为 1/2048, 1/4096 和 1/8192. OEO 的输出信号经过分频后, 降频至 FPGA 可测的 1 MHz 量级. 分频后信号经过电压比较器电路整形后, 输出 TTL 波形的信号, 从而可以被 FPGA 直接测量.

基于 FPGA 的 Nios II 内核, 采用片上可编程系统 (System-on-a-programmable-chip, SOPC) 技术实现高精度频率测量和系统控制^[11], 数据处理和控制信号的生成在 Nios II 内核上用 c 语言实现. 这里用 Altera 公司的 Cyclone IV E 系列 FPGA 芯片, 可测的最高频率可达 100 MHz, 满足要求.

频率测量的原理如图 2. 用温补晶振 (Temperature Compensation Crystal Oscillator, TCXO) 产生参考信号 REF, 温补晶振在 $-40^\circ\text{C} \sim +85^\circ\text{C}$ 的工作范围内稳定度可达 0.02 ppm. FD 是来自分频整形电路的待测信号. 为了提高检测精确度, REF 和 FD 先通过相位重合检测电路, 产生相位重合信号. 相位重合检测电路的作用是确保计数器只在两个信号的上升沿同时发生时开始工作或停止工作, 从而确保一个计数器的脉冲数与另外一个计数器是整数比, 消除频率测量的 ± 1 误差. 工作过程为:

a) 当 Start 变成高电平时, Nios II 将 Out_D 置 1 以等待相位重合信号. 此时 D 触发器输出端是低电平, 两个计数器不计数.

b) 当第一个相位重合脉冲产生时, D 触发器输出高电平, 两个 32 位计数器的使能端置 1, 开始计数.

c) 计数一段时间 t 后, Nios II 将 Out_D 变为低电平, 计数器继续计数, 直到产生下一个相位重合信号.

d) 当相位重合脉冲再次产生时, D 触发器输出低电平, 使两个计数器的使能端清零, 停止计数.

e) Nios II 计算频率值并与稳定值相比较, 输出 control 信号控制可调延迟线改变 OEO 频率. 同时将 Out_reset 清零重置计数器, 准备下一轮计数.

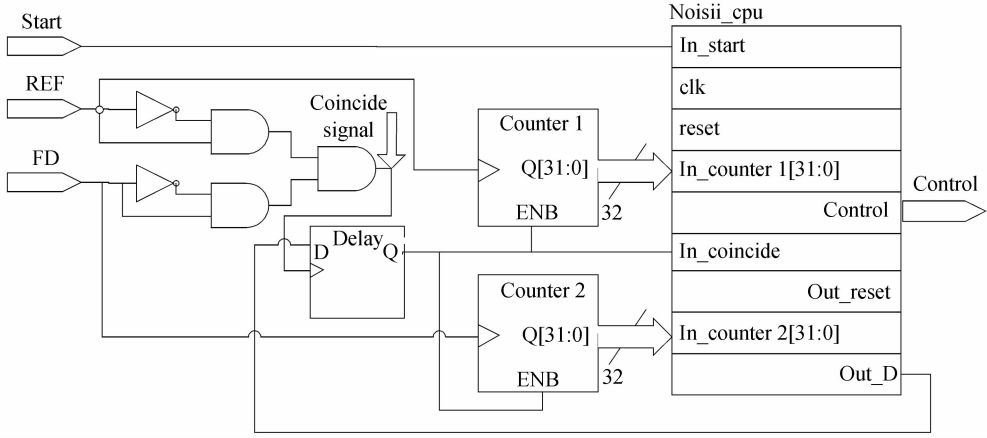


图2 频率测量模型的顶层原理

Fig. 2 Top-level schematic of frequency measurement module

FD 信号的频率表示为

$$f_{FD} = \frac{N_2}{N_1} \times f_{REF} \quad (6)$$

式中 N_1 和 N_2 分别是计数器 1 和 2 的脉冲数, f_{FD} 和 f_{REF} 分别是待测信号和参考信号的频率。

FPGA 将检测到的频率与标准频率比较, 输出控制信号驱动光纤可调延迟线, 改变 OEO 的输出信号频率。

1.3 误差分析

图 3 是频率测量的时序图。图中 f_{REF} 是参考信号的频率值, f_{FD} 和 f'_{FD} 分别是测得的频率值和真实频率值。 t 是计数时间, 有 $t = n_1 / f_{REF}$ 。讨论分频系数是 1/8192 时的测量误差。当 f_{FD} 和 f_{REF} 的上升沿同时发生时, 由于 FPGA 内部的非门存在延时, 相位重合检测电路输出短暂的高电平, 控制计数器的开始和停止。图中 f_{FD} 和 f_{REF} 的上升沿同时发生, 此时测得的频率是准确的。设 FPGA 的非门延迟时间是 Δt , 只要图中 f'_{FD} 和 f_{REF} 的两个上升沿相隔时间小于 Δt , 相位重合检测电路同样会产生相位重合信号, 从而产生测量误差。考虑图 3 所示的最坏情况。设图中 f'_{FD} 是实际的信号, 则由于测量误差, 测得的信号频率是

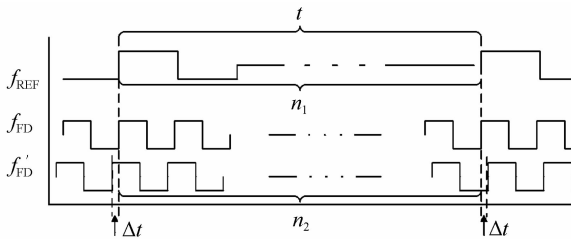


图3 频率测量的时序图

Fig. 3 Sequence diagram for frequency measurement

$$f_{FD} = \frac{n_2}{n_1} f_{REF} \quad (7)$$

考虑两个上升沿的间隔时间 Δt , 则真实的信号频率是

$$f'_{FD} = \frac{n_2}{n_1 + 2\Delta t \cdot f_{REF}} f_{REF} \quad (8)$$

因此频率测量误差为

$$\epsilon = f_{FD} - f'_{FD} = \frac{2\Delta t}{t + 2\Delta t} f_{FD} \quad (9)$$

因为 $\Delta t \ll t$, 因此式(9)可以写成

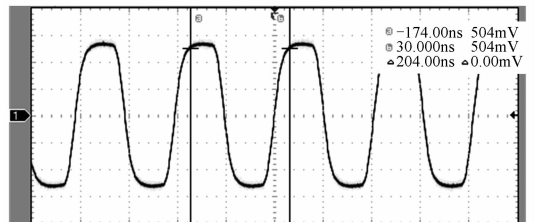
$$\epsilon = \frac{2\Delta t}{t} f_{FD} \quad (10)$$

通过 FPGA 门级仿真可知 Δt 的值约为 3 ns。设分频系数是 1/8192, f_{FD} 的值为 1.22 MHz。测量时间为 1 s 时, 由式(10)得到分频信号的频率测量误差是 7.32×10^{-3} Hz。则在最坏的情况下, OEO 信号的频率测量误差是 59.97 Hz。

2 实验结果和讨论

按照图 1 所示的原理图, 搭建了带有反馈控制电路的单环 OEO。OEO 的环路长度约为 55 m。

实验测得分频电路在输入频率为 4~10 GHz 时, 都有很好的分频效果。图 4(a)、(b)、(c) 分别是分频系数为 1/2048、1/4096 和 1/8192 时, OEO 输出信号经分频电路分频后产生的信号波形。分频电路将 10 GHz 的 OEO 输出信号分别降至 4.88 MHz、2.44 MHz 和 1.22 MHz。分频后的波形均为直流偏置 3.3 V, 峰峰值为 1 V 左右的方波信号。较大的分频系数将获得更好的频率检测精确度。分频后信号经过电压比较器, 整形成 FPGA 可测的 TTL 波形。由于整形电路带宽限制, 采用 1/8192 分频。实验中计数器的计数时间设为


 (a) $N=1/2048$

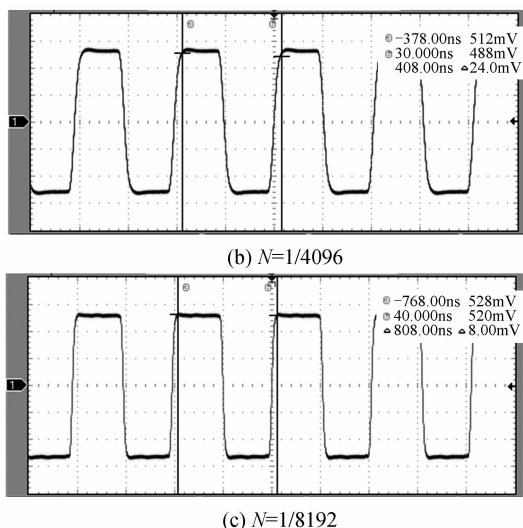
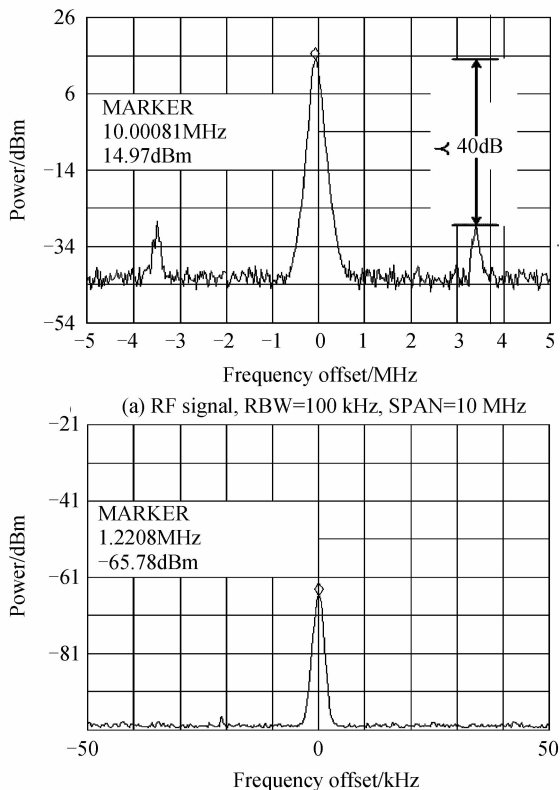


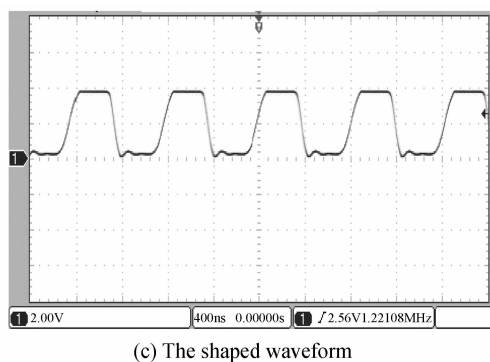
图 4 不同分频系数下分频信号的波形图
Fig. 4 Waveforms of divided signals under different division factors

10 s, 则由式(10)可知 OEO 频率测量误差理论上可降至 5.997 Hz, 可精确测得 OEO 信号频率的偏移.

图 5(a)和图 5(b)分别是 OEO 输出信号和分频电路输出低频信号的功率谱, 图 5(c)是经过比较器电路整形后的待测信号的波形图. 由图可见, 射频信号的中心频率是 10.000 81 GHz, 模式间隔是 3.59 MHz, 边模抑制比大于 40 dB. 分频后信号的频率是 1.220 8 MHz, 与分频理论相符. 进一步的实验表明, 分频后信号的频率稳定性小于 1 Hz/s, 当调节可调延迟线改变 OEO 信



(a) RF signal, RBW=100 kHz, SPAN=10 MHz
(b) Frequency-divided signal, RBW=1kHz, SPAN=100kHz



(c) The shaped waveform

图 5 测得的信号频谱和波形

Fig. 5 Measured spectrum and waveform of the signals
号频率时, 分频后的信号与 OEO 信号呈现很好的线性关系, 可以真实地反映出 OEO 信号的频率变化. 分频后产生的信号幅度很小, 难以直接检测. 将分频信号经过整形电路后产生图 5(c)所示的 TTL 信号, 其频率可由 FPGA 精确测量.

图 6 是实验室条件下测得的带有反馈控制环和不带有反馈控制环路的 OEO 在 20 min 内的频率稳定性. OEO 刚启动时, 由于设备发热, 环境温度升高, 会使 OEO 的频率下降. 因此, 实验中先让 OEO 运行一段时间以避免开机后温度升高对 OEO 的频率造成影响. OEO 的瞬时频率采用混频的测量方法进行测量, 用 FPGA 测出混频信号频率, 并用计算机记录每 1s 的频率数据. 由图 6 可知, 在不加反馈控制时, OEO 的频率在不到 20 min 的时间里漂移了近 3 ppm. 这主要是因为光纤和射频滤波器对温度十分敏感. 同时由于室内温度不稳定, OEO 频率的短期不稳定性约为 647.83 Hz/s. 因此 OEO 在不加反馈控制时, 其稳定性很难达到理想的效果. 加了反馈控制环路后, 通过对比可知 OEO 的稳定性有了明显的提升. 带有反馈控制的 OEO 频率每秒的平均变化量为 722.49 Hz/s, 大于普通单环 OEO. 这是因为频率补偿瞬间 OEO 的频率变化大于正常情况下每秒的频率变化.

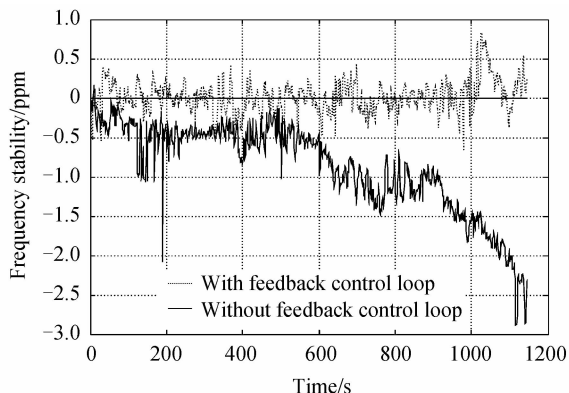


图 6 OEO 频率稳定性

Fig. 6 Frequency stability of OEO

图 7 是在实验室条件下测得的带有反馈控制环路

的 OEO 连续工作 7 h 期间频率的变化. FPGA 检测频率偏移,并控制可调延迟线改变 OEO 的输出频率,从而控制 OEO 频率的稳定. OEO 的信号频率通过每 5 min 记录一次频谱仪上的频率值得到. 测得实验期间实验室温度的变化范围是 18~23 °C, OEO 理论上受温度影响的频率偏移为 85.5 kHz. 从图中可以看出,在不加温控的情况下,反馈控制系统可以将 OEO 输出信号 7 h 的频率变化稳定在 ± 0.8 ppm. 与图 6 的对比证明了这种方法可以有效提高 OEO 的长期稳定性.

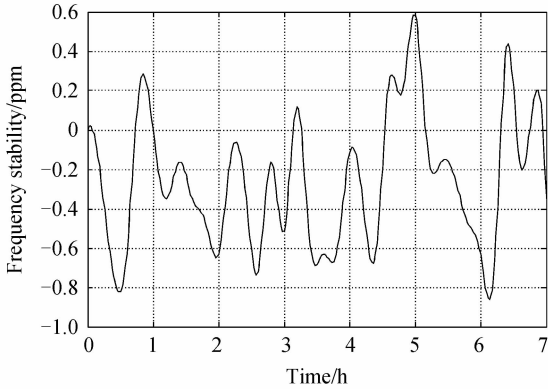


图 7 7h 测得的带有反馈控制环路的 OEO 长期稳定性
Fig. 7 Long term stability of OEO with feedback control loop over 7 hours

为了验证反馈控制环路对 OEO 相位噪声的影响,用频谱仪测量了带有反馈控制环路和不加反馈控制环路的 OEO 的相位噪声,分别如图 8 中虚线和实线所示. 可以看出两种情况下 OEO 在频偏 10 kHz 的相位噪声均为 -100 dBc/Hz,因此这种方法在提高 OEO 长期稳定性的同时不会降低 OEO 的相位噪声性能.

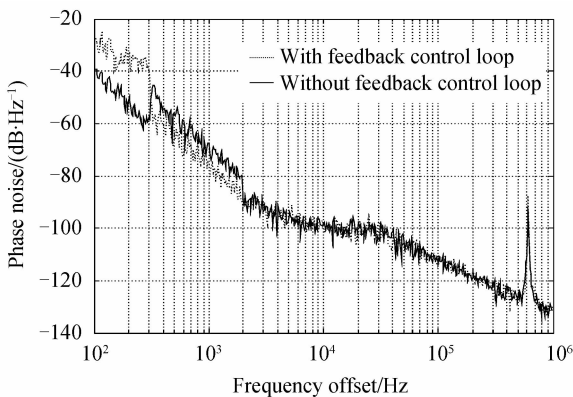


图 8 OEO 的相位噪声
Fig. 8 The phase noise of OEO

实验中用单环结构验证了反馈控制方法的可行性. 这种方法的准确度主要受限于频率检测的准确度和用可调延迟线改变频率时的调节准确度,因此使用性能更好的参考晶振和准确度更高的频率调节方法可

以获得更好的频率稳定性. 该方法也可以用在更长的光纤环路和其他 OEO 结构中,根据式(3)可知,当该方法用于长环的 OEO 系统时,可以获得更高的调节准确度,但是总的频率调节范围会减小.

3 结论

本文介绍了一种基于反馈控制系统提高 OEO 长期稳定性的方法并进行了实验验证. 该系统包括一个由分频整形电路和 FPGA 构成的频率测量系统和用于改变环路长度的光纤延迟线. 考虑到温度对光纤折射率的影响和热胀冷缩效应,给出了 OEO 频率与温度的关系式,并对这种频率测量方法的误差进行了详细的分析. 单环 OEO 的实验证明了这种方法可以有效提高 OEO 的长期稳定性.

参考文献

- [1] YAO X S, MALEKI L. Converting light into spectrally pure microwave oscillation[J]. *Optics Letters*, 1996, **21**(7): 483-485.
- [2] XIEXiao-peng, SUN Tao, PENG Huan-fa, et al. Widely tunable dual-loop optoelectronic oscillator [C]. CLEO: Science and Innovations. Optical Society of America, 2014: STu2G. 2.
- [3] ZHU Dan, PAN Shi-long, BEN De. Tunable frequency-quadrupling dual-loop optoelectronic oscillator[J]. *Photonics Technology Letters*, 2012, **24**(3): 194-196.
- [4] XU Wei, JIN Tao, CHI Hao. Frequency multiplying optoelectronic oscillator based on nonlinearly-coupled double loops[J]. *Optics Express*, 2013, **21**(26): 32516-32523.
- [5] CAI Shu-hong, PAN Shi-long, ZHU Dan, et al. Coupled frequency-doubling optoelectronic oscillator based on polarization modulation and polarization multiplexing [J]. *Optics Communications*, 2012, **285**(6): 1140-1143.
- [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] TSENG Wen-hung, FENG Kai-ming. Enhancing long-term stability of the optoelectronic oscillator with a probe-injected fiber delay monitoring mechanism[J]. *Optics Express*, 2012, **20**(2): 1597-1607.
- [8] SUN Bin. Research of microwave source based on optoelectronic oscillator[D]. Tianjin University, 2012. 孙斌. 基于光电振荡器的微波源研究[D]. 天津大学, 2012.
- [9] PHAM T T, LEDOUX-RAK I, JOURNET B. A new technique to monitor the long-term stability of an optoelectronic oscillator [C]. Photonics Prague 2014. International Society for Optics and Photonics, 2015: 94500C-94500C-9.
- [10] YUAN Li-bo. Effect of temperature and strain on fiber optic refractive index[J]. *Acta Optica Sinica*, 1997, **17**(12): 1713-1717. 苑立波. 温度和应变对光纤折射率的影响[J]. 光学学报, 1997, **17**(12): 1713-1717.
- [11] ZHANG Wen-quan, CUI Shao-hui, QI Jing-li, et al. Design of high precision frequency meter based on SOPC [C]. Instrumentation, Measurement, Computer, Communication and Control, 2011 First International Conference on. IEEE, 2011: 566-569.