

基于 FLOM-PD 的集成化光频梳重频锁定技术

孟森森^{1,2}, 张万鹏^{1,2}, 陈星^{3,4}, 刘波^{1,2,*}, 林炜^{1,2}, 刘海锋^{1,2}, 蔡岳丰^{1,2}

(1. 南开大学 电子信息与光学工程学院, 天津 300350; 2. 南开大学 天津市光电传感器与传感网络技术重点实验室, 天津 300350;

3. 北京邮电大学 信息光子学与光通信研究院, 北京 100876; 4. 北京邮电大学 信息光子学与光通信国家重点实验室, 北京 100876)

摘要: 为了将光频梳锁定至原子钟以实现光频梳的高精度稳定, 提出了一种集成化重复频率锁定系统方案。利用光纤环路光学-微波鉴相器(FLOM-PD)进行光波和微波之间的直接鉴频鉴相。同时, 开发了精密反馈控制模块, 阐述了其基本原理, 搭建了锁定系统, 通过高精度频率计采集锁定后激光器脉冲重复频率数据。实验结果表明: 该方案锁定后频率短期稳定度和长期稳定度分别达到 $8.71 \times 10^{-12}/s$ 、 $4.95 \times 10^{-14}/1024 s$, 实现了整个系统的集成化。

关键词: 光频梳; 光纤环路光学-微波鉴相器; 频率锁定

中图分类号: TN914 **文献标志码:** A **文章编号:** 1002-5561(2020)11-0052-04

DOI: 10.13921/j.cnki.issn1002-5561.2020.11.012

开放科学(资源服务)标识码(OSID):



Integrated optical frequency comb repetition rate locking technology based on FLOM-PD

MENG Sensen^{1,2}, ZHANG Wanpeng^{1,2}, CHEN Xing^{3,4}, LIU Bo^{1,2*}, LIN Wei^{1,2}, LIU Haifeng^{1,2}, CAI Yuefeng^{1,2}

(1. College of Electronic Information and Optical Engineering, Nankai University, Tianjin 300350, China; 2. Tianjin Key Laboratory of Optoelectronic Sensor and Sensing Network Technology, Nankai University, Tianjin 300350, China; 3. Institute of Information Photonics and Optical Communications, Beijing University of Posts and Telecommunications, Beijing 100876, China; 4. State Key Laboratory of Information Photonics and Optical Communications, Beijing University of Posts and Telecommunications, Beijing 100876, China)

Abstract: In order to lock the optical frequency comb to the atomic clock to achieve high precision and stability of the optical frequency comb, an integrated repetition rate locking system is proposed. Fiber loop optical microwave-phase detector (FLOM-PD) is used for direct frequency and phase discrimination between light wave and microwave. At the same time, the precise feedback control module is developed, its basic principle is described, and the locking system is built. The laser pulse repetition rate data after locking is collected by high-precision frequency meter. The experiment results show that the short-term stability and long-term stability of the system can reach $8.71 \times 10^{-12}/s$ and $4.95 \times 10^{-14}/1024 s$ respectively, which realizes the integration of the whole system.

Key words: optical frequency comb; fiber loop optical-microwave phase detector; frequency locking

0 引言

光频梳又称光学频率梳, 具有重复频率高、脉冲宽度窄等优点^[1], 研究者们发现其能够简单且有效地桥接

收稿日期: 2020-03-30。

基金项目: 国家重点研发计划项目(2018YFB1802302)资助; 国家自然科学基金重大科研仪器研制项目(61727815)资助; 天津市高层次创新创业团队项目资助。

作者简介: 孟森森(1997—), 男, 硕士研究生, 2019年毕业于西安电子科技大学获得工学学士学位, 现就读于南开大学电子信息与光学工程学院光学工程专业, 主要研究方向为光通信和时频传递系统设计及关键技术。参与多项国家项目, 注重面向国家重大需求和战略开展研究工作。

* 通信作者: 刘波 (Email: liubo@nankai.edu.cn)。



微波频率与光学频率^[2-3]。将光学频率梳与原子钟结合, 可以提供高精度的时间频率标准。早期的光梳都是基于钛宝石飞秒激光器和全固态激光器搭建而成, 这2种激光器光路结构复杂、体积庞大需要专门的散热部件, 运行条件严苛且成本较高^[4]。考虑到激光器在诸如散热、小型化及应用场景等方面的问题, 采用近年来发展比较迅速的飞秒锁模光纤激光器作为光学频率梳, 可以极大地缩小系统的体积, 提高系统的便携灵活性及应用场景适用范围。性能优良的激光频率梳, 其重复频率锁定尤为重要。重复频率主要与激光器的几何腔长和腔内折射率有关, 常用的方法是通过控制压电陶瓷(PZT)制动器伸缩量来调整激光器几何

腔长^[5],或者通过电光调制器改变光的折射率从而改变光程^[6],实现重复频率锁定。另外,也可以通过电控偏振控制器^[7]或抽运功率调制非线性折射率^[8]来实现重复频率锁定。然而,无论采用哪种方法,都无法避开鉴频、鉴相环节,如何高效、快速和准确地提取误差信号成为了制约锁定精度和稳定度的关键因素。目前,已报道的频率锁定研究大多是通过锁相环中电学鉴相器实现待测信号与参考信号的比较^[9]。但是,该方法在鉴相前要先通过光电探测器将光信号转化为电信号,然后输入电学鉴相器进行处理,不仅需要高性能的光/电转换仪器,而且也带来了不可消除的转换噪音,增加了系统体积,加大了系统的复杂度,影响了误差信号的提取精度,最终影响系统的锁定结果。

鉴于此,本文基于光纤环路光学-微波鉴相器(FLOM-PD)^[9]提出一种集成化重复频率锁定方案。

1 光频梳重频锁定系统及原理

1.1 FLOM-PD 结构

FLOM-PD 技术由韩国科学技术院的 Jungwon Kim 研究组提出^[9],该技术可以直接进行光学-微波鉴相,具有很高的探测精度,非常适用于重复频率的锁定,其结构如图 1 所示。FLOM-PD 的主体部分是一个光纤 Sagnac 环,环内放置相位调制器和非互易性 $\pi/2$ 移相器。光脉冲由环行器引入光纤环路,微波信号则通过相位调制器对光脉冲进行调制。在 FLOM-PD 中,光纤 Sagnac 环沿相反方向传播的光沿环路一周再次到达耦合器时发生干涉,光纤 Sagnac 环输出的信号输入 BD, 光纤 Sagnac 环输出两端口的光强将随环内 $\Delta\Phi$ 的变化而变化,两端口输出的 2 路光通过 BD 探测,然后输出一个与光学-微波相位信息 θ_e 相关联的电压信号。

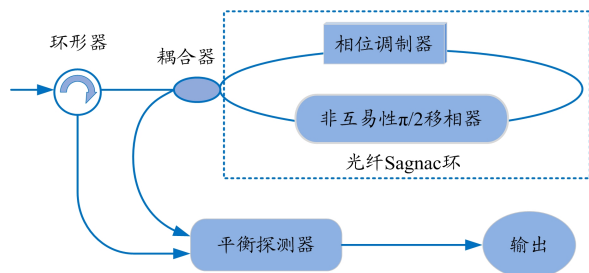


图 1 FLOM-PD 结构

光学-微波鉴相原理示意图如图 2 所示,图中 f_{RF} 是射频频率, f_{rep} 是光频梳重复频率。FLOM-PD 所输出的误差信号含有光学微波相位信息 θ_e , 可以作为控制

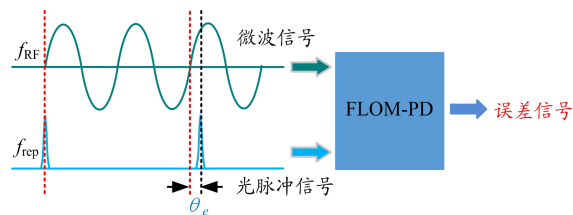


图 2 光学-微波鉴相原理示意图

信号,用于控制 PZT 的位移来改变腔长,进而影响重复频率。与传统的微波混频器相比,FLOM-PD 具有更高的鉴相灵敏度,同时由于鉴相是基于对光纤 Sagnac 环输出的平衡探测,相较于使用高速光电探测器和微波混频器的传统鉴相方法,FLOM-PD 受激光强度噪声和环境变化的影响更小,具有更好的抗干扰能力。相较于 J. Wei 等人^[10]所提出的基于偏振调制的相位探测器而言,FLOM-PD 结构简单,在原理上避免了偏振态因尾纤的影响而造成输入平衡探测器中 2 路光的光强起伏所带来的难以抑制的相位噪声。

1.2 光频梳重频锁定系统

1.2.1 实验系统搭建

本文搭建的飞秒锁模光纤激光器重复频率的锁定系统如图 3 所示。其中,紫色虚线为光路部分,蓝色实线为电路部分。整个系统由锁模激光器(MLL)、FLOM-PD、信号发生器、铷原子钟、光纤分束器(BS)、光电探测器(PD)和精密反馈控制电路组成。从 MLL 输出的激光经过 BS 分成用于监测和控制 2 路光信号:一路输入 PD 中,然后通过高精度频率计检测其重复频率;另一路输入 FLOM-PD。与此同时,以铷原子钟信号作为参考的信号发生器产生的 900 MHz、15 dBm 的信号也输入 FLOM-PD,进行光学-微波鉴相。

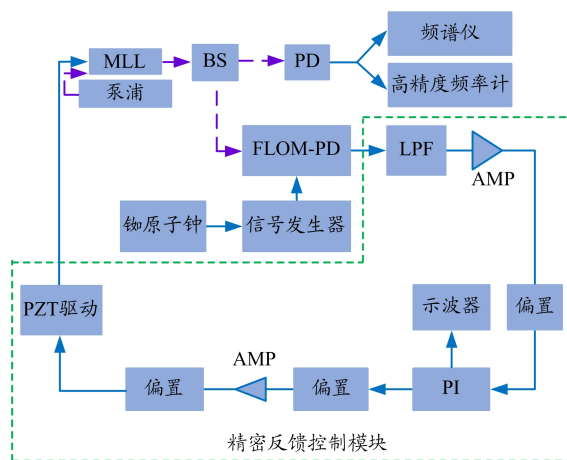


图 3 实验搭建的光频梳重频锁定系统

1.2.2 精密反馈控制模块设计

为实现系统集成化,本文设计了精密反馈控制模块。在闭环反馈控制系统中,该电压信号经过低通滤波(LPF)、电压放大器(AMP)和偏置等环节后,进入比例积分(PI)电路,示波器用于监测 PI 输出。携带光学-微波相位信息的电压信号在 PI 电路中经过一系列变换后输出补偿控制信号;经偏置、放大后作为 PZT 驱动信号,进而通过 PZT 的微小位移改变腔长,控制光频梳重复频率,形成闭环控制,最终实现锁模激光器输出的光脉冲重复频率与铷原子钟基准频率信号精确锁定;通过闭环控制可以获得更高的稳定度。

其中,环路控制部分为自研的 PI 控制器,具有低通滤波、放大和偏置等功能,改善了系统的动态响应特性和稳定性,能够在锁定前找到合适的频率点实现快速锁定。所研制的精密反馈控制模块比商用的 LB1005 等仪器体积更小、集成度更高,其实物如图 4 所示。实验室条件下,是否封装进行电磁屏蔽对其锁定效果影响甚微,可以忽略不计,通常是环路带宽影响锁定时间和噪声抑制效果。小的带宽能有效抑制噪声,通过减小环路带宽值,可以降低相位噪声和基准杂散水平;大的带宽能缩短锁定时间,但对相位噪声抑制变差且增大了基准杂散水平,抑制噪声效果不理想。考虑激光器是一个随着环境变化发生缓慢频率漂移的器件,且环路系统中输出代表相位噪声的误差信号本身很弱,同时还考虑到环路带宽太小往往需要很大的电容,在实际设计中难以实现。根据实验设计需求和现有试验设备,本文采用了 DC-3 kHz 的低通环路滤波实现了很好的相位噪声提取,并且能够有效抑制 FLOM-PD、激光器以及 PZT 的高频噪声。实验中环路控制的输出电压为 0~10 V,高压放大器的输出和输入之比为 15,驱动电压满量程为 150 V,PZT 可在其任意平衡点附近工作。

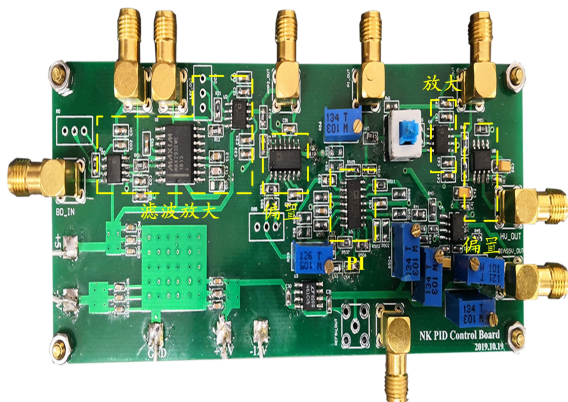


图4 所设计的精密反馈环路控制部分实物图

2 实验结果与分析

实验中所采用的飞秒锁模光纤激光器的重复频率为 100 MHz,以铷钟为参考的信号发生器输出基准信号频率为 900 MHz,将光脉冲的重复频率锁定在微波基准频率上,系统整体框图如图 5 所示。激光器输出分为两部分:一部分直接输入 FLOM-PD 中与微波基准频率鉴相作为环路控制的输入;另一部分经光/电转换后,输入高精度频率计中检测。微波基准频率一部分输入 FLOM-PD,一部分输入高精度频率计,对采集到的微波基准频率同样进行曲线分析,用于对比参照。

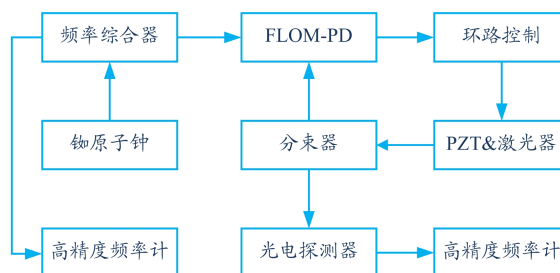


图5 锁定系统整体结构框图

在激光器闭环锁定之前,锁模激光器输出光脉冲重复频率受温度等的影响,变化波动比较大,稳定性非常差。在采用基于 FLOM-PD 的高精度 PI 闭环锁定后,锁模激光器输出光脉冲重复频率稳定度得到了极大的提升。移除频率计原因所引入的坏点,本实验锁定情况下激光器输出光脉冲重频与输入的微波频率基准的时间变化曲线如图 6 所示。其中,红色部分为微波频率基准的抖动情况,黑色部分为光脉冲重复频率的抖动情况。可以看出,锁定情况下已达到与基准频率相当的锁定效果。

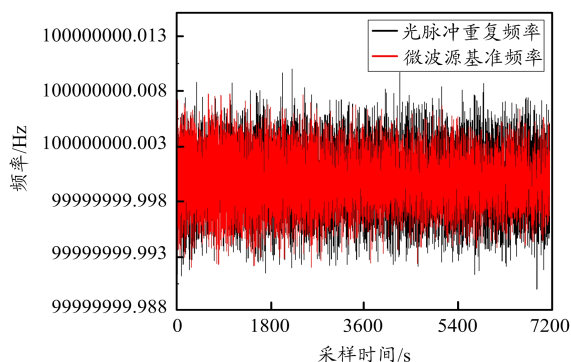


图6 光脉冲重复频率和微波频率基准抖动对比图

对微波基准频率和锁定后的光脉冲重复频率进一步分析,分别计算其 Allan 方差,对比情况如图 7 所示。可以看出,随着时间越长,Allan 方差的值越小,稳

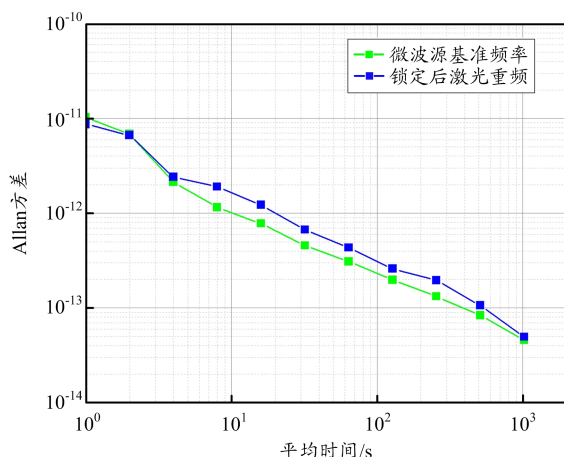


图7 微波频率基准频率和
锁定后激光重复频率的 Allan 方差对比图

定性越好,说明锁定后激光器的长期频率稳定度更好。锁定后激光器输出信号的短期和长期频率稳定度对应的 Allan 方差值分别达到 $8.71 \times 10^{-12}/s$ 和 $4.95 \times 10^{-14}/(1024 s)$ 。无论是短期稳定度还是长期稳定度都与微波基准频率稳定度相当,实验结果更进一步表明了本系统能够实现高精度频率锁定,输出光频梳具有优良的频率稳定度。

本系统的锁定方法相较于使用微波锁相环的锁定方法,避免了电学鉴相器复杂的噪声影响和额外的噪声补偿模块,使得锁定变得较为简单、高效和快速,同时提高了锁定精度,能够实现锁模激光器重复频率与微波信号的长时间、稳定的锁定。

此外,整个系统使用的光纤环路光学-微波鉴相器易于集成,配合开发的集成电路板使得整个锁定系统集成度高,占用空间体积小、稳定性强,安装携带方便。

3 结束语

本文针对飞秒锁模激光器光学频率梳的重复频率锁定,介绍了光学-微波鉴相原理,并基于 FLOM-PD 设计了集成化重频锁定系统,实现了将锁模激光器

的脉冲重复频率锁定至铷原子钟,并对锁定后的信号与微波源信号进行对比,对采集到的重复频率及微波源信号进行 Allan 方差分析。实验结果表明:锁定后重复频率与频率源参考信号的稳定度在同一量级,锁定效果优良。

参考文献:

- [1] KIM J, SONG Y. Ultralow-noise mode-locked fiber lasers and frequency combs: principles, status, and applications[J]. Advances in Optics and Photonics, 2016, 8(3): 465-540.
- [2] JONES D J, DISSAMS S A, RANKA J K, et al. Carrier-envelope phase control of femtosecond mode-locked lasers and direct optical frequency synthesis[J]. Science, 2000, 288(5466): 635-639.
- [3] PENG M Y, KALAYDZHYAN A, KÄRTNER F X. Balanced optical-microwave phase detector for sub-femtosecond optical-RF synchronization [J]. Optics Express, 2014, 22(22): 27102-27111.
- [4] 刘婷婷,郝强,曾和平. 全保偏光纤光学频率梳技术[J]. 激光与光电子学进展, 2018, 55(12): 32-47.
- [5] JASON J R, DIELS J C, JASAPARA J, et al. Stabilization of the frequency, phase, and repetition rate of an ultra-short pulse train to a Fabry-Perot reference cavity [J]. Optics Communication, 2000, 175(4-6): 409-418.
- [6] LE COQ Y, ZHANG W, SANTARELLI G, et al. Investigation of an optical frequency comb with intracavity EOM and optimization of microwave generation [C]//European Frequency and Time Forum, April 23-27, 2012, Gothenburg, USA. Gothenburg: IEEE, 2012: 238-241.
- [7] SHEN X, HE B, ZHAO J, et al. Repetition rate stabilization of an erbium-doped all-fiber laser via opto-mechanical control of the intracavity group velocity[J]. Applied Physics Letters, 2015, 106(3): 1511-1513.
- [8] YANG K, HAO Q, ZENG H. All-optical high-precision repetition rate locking of an Yb-doped fiber laser [J]. IEEE Photonics Technology Letters, 2015, 27(8): 852-855.
- [9] JUNG K, KIM J. Subfemtosecond synchronization of microwave oscillators with mode-locked Er-fiber lasers [J]. Optics letters, 2012, 37(14): 2958-2960.
- [10] WEI J, ZHANG S, KIM J. Compact phase detector for optical-microwave synchronization using polarization modulation[J]. Journal of Light-wave Technology, 2018, 36(19): 4267-4272.