全光纤 M-Z干涉仪激光器鉴频系统

贾豫东 欧 攀 张春熹 王纪强

(北京航空航天大学 仪器科学与光电工程学院, 北京 100191)

摘 要: 研究了不等臂 M-Z干涉仪鉴频的基本原理,对采用三角波调制改变干涉仪臂长获得鉴频信号的过程进行了定量分析. 在此基础上,仿真计算了线性改变干涉仪臂长和频率漂移对鉴频信号输出的影响,采用 $LiNbO_3$ 相位调制器取代 PZT(Piezo-Electric Transducer)调制方式,设计实现了鉴频实验装置,获得的实验结果与理论和仿真结果吻合. 对驱动信号和环境扰动对该方案的影响进行了实验验证和理论分析,与 PZT调制方式相比,无需高精度温控装置,系统工作稳定可靠,信号调制动态范围可以从 PZT调制方式下的几十 Hz扩大到 GHz 同时可以在该方案中采用 lock-in确定相位 频率响应度,从而测定激光器的频率波动范围.

关 键 词: 激光器; 不等臂 M-Z干涉仪; 鉴频; 相位调制器

中图分类号: TN 248

文献标识码: A **文 章 编 号**: 1001-5965(2009)12-1421-04

Laser frequency discriminator using all fiber unbalanced-arm Mach-Zehnder interferometer technique

Jia Yudong Ou Pan Zhang Chunxi Wang Jiqiang

(School of Instrument Science and Opto-electronics Engineering, Beijing University of Aeronautics and Astronautics, Beijing 100191, China)

Abstract: An improved laser frequency discriminator using all fiber unbalanced-arm Mach-Zehnder interferometer technique was studied in detail. The acquisition technique of frequency error signal through utilizing triangular wave to modulate the an arm of interferometer was analyzed quantitatively. The piezo-electric transducer (PZT)-type frequency modulator was replaced with $LiNbO_3$ phase modulator. The interferometer output signal was calculated through emulator. An experimental setup to validate the theoretical analysis was constructed. The result was agreement with simulation result. The modulation signal and environment perturbations were evaluated through experiment. The result shows the system stability is improved greatly, and the modulation dynamic range is extended from Hz to GHz. The phase to frequency responsibility was measured by applying lock-in amplifier, and the peak to peak frequency fluctuation of measured laser can be calculated according to the phase to frequency responsibility.

Key words: laser; unbalanced-arm Mach-Zehnder interferometer; frequency discriminator; phase modulator

稳频激光器在计量学、光谱学、地球物理学及光通信等领域有着广泛的应用,要求激光器具有接近于通用射频振荡器那样的绝对频率稳定度和振荡谱线宽度,因此频率稳定一直是激光器研究领域的热点之一. 早在 1960年激光器刚一问世,就有人考虑它的频率稳定问题. 激光稳频技术是激光物理学、光谱学和电子学高度结合的产物,是随着激光器的发展而发展的. 激光稳频工作的初期,注意力集中在参数稳定、工作状态和周围工作环境的稳定方面,但收效不大,其稳定度仅为 10^{-8}

收稿日期: 2008-11-03

作者简介: 贾豫东 (1975 -),男,甘肃庆阳人,博士生, jyd_blueeye@126.com.

数量级. 20世纪 60年代中期提出了主动稳频技术,采用闭环伺服回路稳定激光器频率,光频稳定进入了一个新阶段,激光频率稳定度很快达到了 10^{-11}～10^{-12}. 同时随着研究工作的深入,发现了更多的可资利用的物理现象. 截止 20世纪 90年代,激光器稳频技术出现了很多方案,已见报道的就有大约 10种左右[1].

目前大多数稳定激光器输出频率的方案都使用反馈技术. 在各类方案中,若振荡频率相对于基准频率发生偏离,就会产生一个误差信号,此信号反过来控制激光器的某个参量 (一般是激光器的腔长),使振荡频率回到基准频率[2]. 所以激光器稳频技术的关键就在于鉴频技术和误差信号检测方法. 在众多稳频技术中,双光束干涉稳频技术因为鉴频精确度取决于光程差的高稳定性,在体光学装置中很难达到,因此早期没有得到广泛的应用. 但随着光纤技术的广泛应用,由于通过光纤延时线配合严密的封装可以很容易实现稳定光程差的干涉仪,所以这种稳频技术也得到了很大的发展[3-5].

本文在研究不等臂 M-Z干涉仪鉴频技术的基础上,对文献[2-3]中使用的 Michelson干涉仪和 PZT(Piezo-Electric Transducer)臂长调制实验方案进行了改进,改用 M-Z干涉仪鉴频,配合 PM(Phase Modulator)实现信号调制,结果显示,鉴频精确度和稳定度均得到了很大提高.

1 实验装置及原理

实验装置如图 1所示. 激光器为 1 550 nm单频可调谐窄线宽光纤激光器,具有 PZT调谐功能,调谐范围 60 pm;同时具有温度调谐功能,20～50℃范围内,波长调谐范围可达 1 000 pm;耦合器 1～耦合器 3均为双入双出,分光比为 50∶50; PM采用 $LiNbO_3$相位调制器,插损为 2.9 dB;光电探测器为插拔式 InGaAs PIN探测器,带尾纤,响应度为 0.9 A/W;放大器为高精度低噪声放大器;信号发生器为调制信号源,经放大器放大后驱动相位调制,同时送入 lock-in作为参考信号.

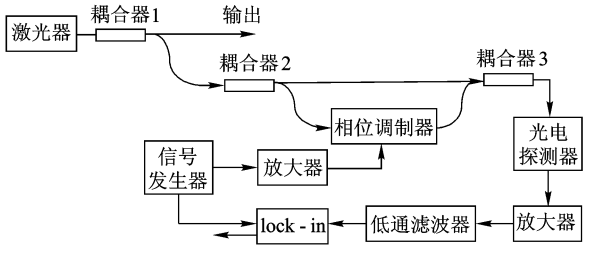


图 1 全光纤 M-Z干涉仪鉴频实验装置组成框图

激光器输出光经耦合器 1分光后进入由耦合器 1、耦合器 2和 PM组成的不等臂 M-Z干涉仪中,则两光束间的位相差为

$$\delta = \frac{2\pi}{\lambda_0} nh \tag{1}$$

式中, n为光纤折射率; λ_0为中心波长; h为两臂总光程差. 光电探测器中产生的光电流信号为[6]

$$I \propto (1 + \cos\delta) \tag{2}$$

δ由 3部分决定: ①PM导致的相位变化 ϕ_m; ②M-Z干涉仪本身的臂差 d导致的相位差 ϕ_d; ③频率变化导致相位变化 ϕ_λ.

ϕ_m受驱动信号幅度线性确定,设 2π调制电压为 V,驱动信号为三角波,角速度为 ω_m,则 PM导致的相位变化函数可表示为

$$\phi_m \propto V\omega_m t \tag{3}$$

$$\phi_d = \frac{2\pi}{\lambda_0} nd \tag{4}$$

$$\phi_\lambda = -\frac{2\pi nd\Delta f}{c} \tag{5}$$

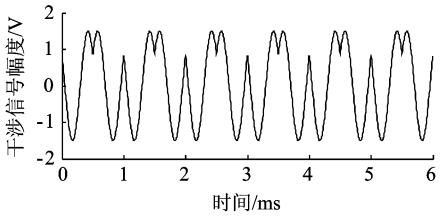
综上则有

$$I = A\left[1 + \cos\left(\omega_m t + \frac{2\pi nd}{\lambda_0} - \frac{2\pi nd\Delta f}{c}\right)\right] \tag{6}$$

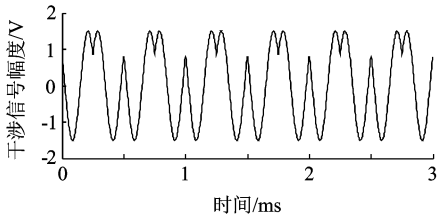
2 仿真及实验分析

由式(6)可以看出, PM相位调制量对干涉信号相位的变化无影响,仅提供调制信号的角速度; d在不考虑光纤长度及 n随外界环境漂移的情况下,仅提供初始相位;激光器频率的波动反映为干涉信号中的相位扰动,则采用相位鉴别的方法即可得到频率波动导致的频率误差信号,起到鉴频的作用.

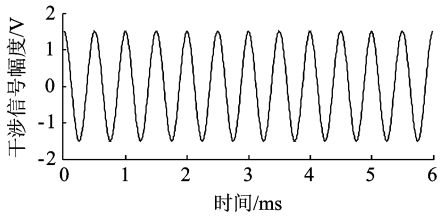
从图 2a、图 2b的仿真结果可以看出,设定 d为 900 mm,光频率波动范围 $\Delta\nu$设定为 0,调制信号频率 f由 1 kHz增加到 2 kHz,横坐标零点处的干涉信号初始相位角没有发生任何改变,干涉信号频率与 f同步;由图 2a、图 2c、图 2d可知,当设定 $\Delta\nu$为 0, f为 1 kHz时,干涉信号的初始相位随 d的变化而变化,但在 d固定不变的情况,频率和相位均无变化;由图 2e、图 2f可知,当 $\Delta\nu$不为零时,干涉信号的相位发生了变化,且 $\Delta\nu$变化越剧烈,相应的相邻两个周期的相位变化也越大;图 2g为相位调制器驱动信号,为三角波线性调制, f为 1 kHz,为了与后面实验结果对照,按照 $LiNbO_3$相位调制器提供的技术参数设定调制信号的峰峰值 V_{pp}为 7.4 V, f设定为 1 kHz



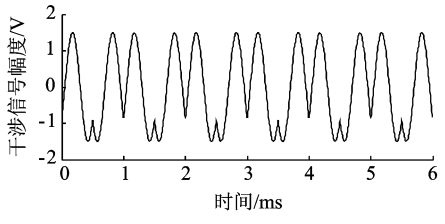
a　f = 1 *kHz*, d = 900 *mm*, $\Delta\nu = 0$



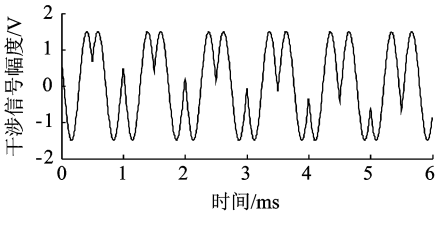
b　f = 2 *kHz*, d = 900 *mm*, $\Delta\nu = 0$



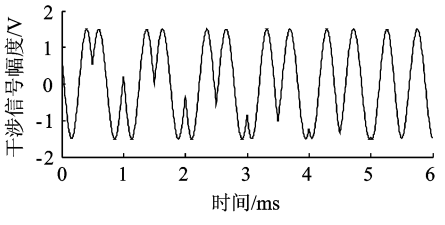
c　f = 1 *kHz*, d = 0, $\Delta\nu = 0$



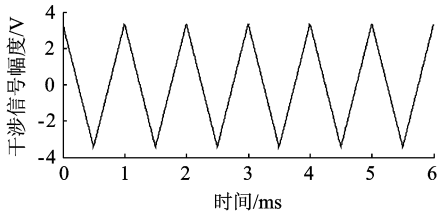
d　f = 1 *kHz*, d = 1 800 *mm*, $\Delta\nu = 0$



e　f = 1 *kHz*, d = 900 *mm*, $\Delta\nu = 150\,MHz$



f　f = 1 *kHz*, d = 900 *mm*, $\Delta\nu = 300\,MHz$



g　三角波调制信号, f = 1 *kHz*, V_{pp} = 7. 4 *V*

图 2　干涉信号仿真计算结果

图 3为采用图 1所示实验装置,进行三角波线性调制,然后对 M-Z干涉仪输出信号进行光电转换、滤波放大后得到的一个随机抽取的实际观测信号波形. 可以看出,跟有频率波动的仿真结果图 2e、图 2f极为吻合,干涉信号的频率与 *f*保持一致,而每个周期的信号相位因为频率波动的缘故,明显不同.

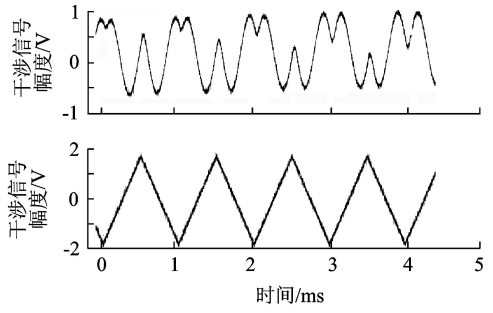


图 3　干涉信号实验测量结果

上面的理论分析均是在忽略驱动信号稳定度和干涉仪臂长的理想情况下讨论的. 本方案采用的驱动信号温度频率漂移参数为 250 ×10^{-6}/℃,供电电压频率漂移参数为 0. 05% /V,且在后续的鉴相过程中,因为鉴相基准信号和调制信号同源,故由于驱动信号导致的干涉信号频率波动被削弱,影响很小,可忽略不计.

在 PZT调试方式下,外部环境对干涉仪的影响是很大的,为了衡量外部扰动对本方案鉴频效果的影响,改变工作环境温度,对检测到的 lock-in输出电平进行对比,同时采用 lock-in提供的误差信号驱动激光器的 PZT调谐装置进行稳频,结果如图 4所示,两种温度环境下以及稳频前后均没有明显的波动变化,可以稳定工作.

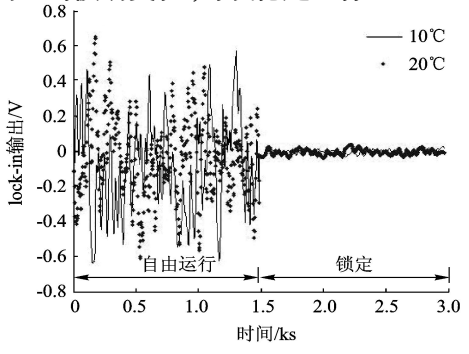


图 4　不同温度下 lock-in输出

在 33～39. 33℃范围内改变激光器工作温度,输出波长改变 0. 1 nm,采用 lock-in放大器测量相应的相位改变量 Φ_λ,可以得到系统的相位-频率响应度为 0. 008 6(°)/MHz lock-in放大器测量到的被测激光器 25℃工作温度下自由运行状

态相位峰峰值为 ±5.2°,可得该激光器频率在±604.65 MHz范围内波动.可用上述方法实现在实验室条件下对激光器频率稳定性的简单测量.

对稳频后的激光器的输出光,采用延时自外差法上移频 55 MHz测量其线宽[7-8],延时线长度为 25 km,图 5即为得到的外差电信号的谱型,可以看出,线宽稳频后激光器线宽大约为 10 kHz,输出光没有频率调制.

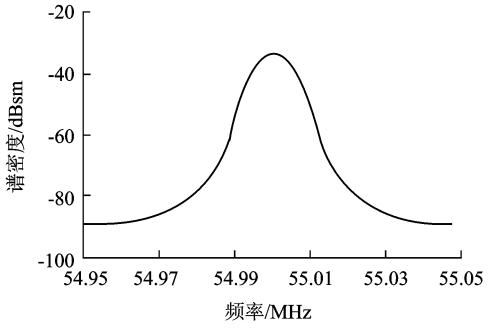


图 5 延时自外差法线宽测试结果

3 结 论

对基于全光纤 M-Z干涉仪的激光器鉴频系统的基本原理做了分析推导,在文献[2-3]中的方案基础上设计了一个新型的鉴频装置,通过理论计算仿真和实验结果对比,证明了该方案的可行性.同时,对驱动信号和环境扰动对本方案的影响进行了实验监测,证明对该系统无需温控装置即可在温差 10℃的室温环境下稳定工作.同时采用 lock-in确定了相位-频率稳定度,并得到了被测激光器的波动范围.因为稳频激光器的线宽均很窄,相干长度可以达到几 km,因此,该方案的全光纤结构可以很方便的得到更长臂差的干涉仪来提高鉴频灵敏度.同时,由于 $LiNbO_3$相位调制器的使用,信号调制动态范围可以扩大到 GHz范围.

参考文献 (References)

[1] 雷仕湛. 激光技术手册[M]. 北京:科学出版社, 1992: 262-271
Lei Shizhan. Laser technology handbook[M]. Beijing: Science Press, 1992: 262-271 (in Chinese)

[2] 欧攀,贾豫东,张春熹,等. 窄线宽单频单偏振环行腔掺铒光纤激光器[J]. 北京航空航天大学学报, 2008, 34(11): 1258-1260
Ou Pan, Jia Yudong, Zhang Chunxi, et al. Narrow-linewidth single-polarization Er-doped fiber ring laser[J]. Journal of Beijing University of Aeronautics and Astronautics, 2008, 34(11): 1258-1260 (in Chinese)

[3] Gorju G, Jucha A, Jain A, et al. Active stabilization of a rapidly chirped laser by an optoelectronic digital servo-loop control [J]. Optics Letters, 2007, 32(5): 484-486

[4] Chung W H, Tam H Y, Demokan M S, et al. Frequency stabilization of DBR fiber grating laser using interferometric technique [J]. IEEE Photonics Technology Letters, 2001, 13(9): 951-953

[5] Greiner C, Boggs B, Wang T, et al. Laser frequency stabilization by means of optical self-heterodyne beat-frequency control [J]. Optics Letters, 1998, 23(16): 1280-1282

[6] 廖延彪. 光纤光学[M]. 北京:清华大学出版社, 2000: 173-191
Liao Yanbiao. Fiber optics[M]. Beijing: Tsinghua University Press, 2000: 173-191 (in Chinese)

[7] 贾豫东,欧攀,杨远洪,等. 短光纤延时自外差法测量窄线宽激光器线宽[J]. 北京航空航天大学学报, 2008, 34(5): 568-571
Jia Yudong, Ou Pan, Yang Yuanhong, et al. Short fibre delayed self-heterodyne interferometer for ultranarrow laser linewidth measurement[J]. Journal of Beijing University of Aeronautics and Astronautics, 2008, 34(5): 568-571 (in Chinese)

[8] Richter L E, Mandelberg H I, Kruger M S, et al. Linewidth determination from self-heterodyne measurements with subcoherence delay times[J]. IEEE Journal of Quantum Electronics, 1986, 22(11): 2070-2074

(编 辑:刘登敏)