

基于干涉仪动态相移的光纤激光器跳模检测方法

马明祥 胡正良 徐攀 王伟 胡永明

(国防科学技术大学光电科学与工程学院, 湖南长沙 410073)

摘要 针对已有方法在单频光纤激光器跳模检测中存在的不足, 提出一种基于非平衡光纤 Michelson 干涉仪动态相移的跳模检测方法。使用干涉仪将激光器跳模时的光频突变转换为相位工作点的突变, 并通过同步监测相位工作点的正余弦函数两路信号来跟踪与判断它的动态相移, 成功实现了对超窄线宽掺铒光纤环形激光器偶发的随机跳模以及由开机瞬态热效应触发的连续多次跳模的测量与分析。结果表明, 该方法检测灵敏度高, 跳模判据实时直观, 并能测量跳模前后可能发生的频漂, 为评价单频光纤激光器的模式稳定能提供有效的测试手段。

关键词 激光器; 跳模; 跳模检测; 非平衡光纤干涉仪; 频率漂移

中图分类号 TN248 文献标识码 A doi: 10.3788/CJL201239.0602013

Mode Hopping Detection for Fiber Laser Based on Dynamic Phase Changes in Interferometer

Ma Mingxiang Hu Zhengliang Xu Pan Wang Wei Hu Yongming

(College of Optoelectronic Science and Engineering, National University of Defense Technology, Changsha, Hunan 410073, China)

Abstract In order to solve the problems in mode hopping detection for single-frequency fiber lasers, a method is put forward based on the dynamic phase changes in an unbalanced Michelson fiber-optic interferometer. Steep frequency changes in mode hopping process are transformed to steep phase changes in the working point of the interferometer, and the changes are obtained accurately by tracking simultaneously both the sine and cosine functions of the working point in time domain. Various mode hops in an ultra-narrow linewidth erbium-doped fiber ring laser, including occasional hops and thermally-induced serial hops the moment the laser is switched on, have been detected successfully with this method. The results show that this method has a high testing sensitivity, and makes real-time and apparent criterions for identifying mode hops. Besides, possible frequency drift between two serial mode hops can also be measured by use of this method, which plays an effective role in evaluating the lasing mode stabilities of single-frequency fiber lasers.

Key words lasers; mode hopping; detecting mode hopping; unbalanced fiber-optic interferometer; frequency drift

OCIS codes 140.3510; 030.4070; 140.3500

1 引 言

随机跳模作为一种内在干扰, 通常直接导致单频光纤激光器的输出光谱发生突变, 并且跳模过程中的模式竞争又为激光光源及光学系统引入各类干扰和噪声。在实际应用中, 跳模已成为高功率单频

光纤激光器严重的制约因素^[1,2], 同时严重影响超窄线宽单频光纤激光器的高相干性与低相位噪声等性能^[3~5]。因此, 对光纤激光器跳模现象进行深入的检测与研究是十分必要的, 这对评价单频光纤激光器的性能具有重要意义。

收稿日期: 2012-01-05; 收到修改稿日期: 2012-03-05

基金项目: 国家自然科学基金(60908004)资助课题。

作者简介: 马明祥(1985—), 男, 博士研究生, 主要从事光纤传感、光纤激光器方面的研究。

E-mail: guodongmamx@163.com

导师简介: 胡永明(1960—), 男, 教授, 博士生导师, 主要从事光纤信息技术、光纤光栅技术方面的研究。

E-mail: huyongming_nudt@hotmail.com

在测试光纤激光器的基本性能时,研究人员常会遇到跳模现象的干扰^[1~9]。文献[2,8]报道了通过频谱仪观测到光纤激光器跳模过程经光电转换产生的拍频信号,但无法从时域上有效跟踪整个跳模过程。文献[3,4]报道了光纤激光器在跳模时因模式竞争而发生相干坍塌,进而导致基于干涉仪的相干探测与相位载波(PGC)解调技术^[10]无法正常运行。同时跳模还给解调系统引入虚假的相位信号,以此作为检测跳模的判据;但在跳模过程中,由于激光器处于多模竞争状态,使 PGC 解调过程发生偏差,导致整个跳模过程和跳模前后的一段时间内所解调出的相位信号都无法反映真实的相位信息,也无法有效测量由跳模前后可能发生的频率漂移所导致的相位工作点变化。另外,使用 Fabry-Pérot 扫描干涉仪仅能检测几种典型的跳模现象^[4],并且无法连续测量整个跳模过程,容易造成误判。

为了对跳模进行准确有效的测量与分析,必须要有效辨别激光器跳模前后两个不同的工作纵模,捕捉跳模过程的相关细节,并能区分跳模与频率漂移。本文针对这一要求提出一种新的光纤激光器跳模检测方法,使用非平衡光纤 Michelson 干涉仪将光纤激光器跳模时的光频突变转换为干涉仪相位工作点的突变,通过同步测量与计算相位工作点的正余弦函数两路信号来跟踪与判断它的动态相移,对超窄线宽掺铒光纤环形激光器的跳模和频率漂移现象进行了实时有效的测量与分析。

2 跳模检测原理

对于单频光纤环形激光器而言,稳定工作时输

出模式满足腔内谐振条件

$$v_1 = q_1 \frac{c}{nl} = q_1 \frac{c}{L}, \quad (1)$$

式中 c 为真空中光速, n 为光纤折射率, l 为激光器谐振腔几何长度, $L = nl$ 为谐振腔光学长度, q_1 为模阶数。若激光器发生跳模,则跳模后输出模式表示为

$$v_2 = q_2 \frac{c}{nl} = q_2 \frac{c}{L}. \quad (2)$$

跳模一般表现为模阶数的变化,即由 q_1 跳变为 q_2 , 导致输出频率的突变;而频率漂移是由谐振腔光学长度 L 的连续变化所致,模阶数保持不变。因此,对于一种跳模检测方法而言,为准确判断跳模,必须能有效辨别跳模前后两个不同的工作模式。

将激光器输出光引入一个采用相位载波外调制技术^[10]的非平衡光纤 Michelson 干涉仪,当工作在稳定的单纵模状态时干涉仪输出干涉光强的表达式为

$$V = A + B \cos(C \cos \omega_0 t + \varphi_s + \varphi_0 + \varphi_n), \quad (3)$$

式中 A 、 B 为与输入光功率成正比的常量, B 还与干涉仪相干度有关; C 、 ω_0 分别为 PGC 调制引入的动态相移幅值与调制角频率; φ_s 为外界信号引起的相位变化; φ_0 为干涉仪的初始相位差; φ_n 为各种噪声(主要包括光源噪声、温度漂移、机械振动等)引起的相位随机变化。当外界信号被屏蔽时,将(3)式中 φ_s 略除; φ_n 是一个缓慢变量,在短时间内可当作常量处理。若将 $\varphi_0 + \varphi_n$ 定义为干涉仪的相位工作点 $\varphi(t)$, 则(3)式改写为

$$V = A + B \cos[C \cos \omega_0 t + \varphi(t)]. \quad (4)$$

将(4)式用第一类贝塞尔函数展开,得到

$$I = A + B \left\{ \left[J_0(C) + 2 \sum_{k=1}^{\infty} (-1)^k J_{2k}(C) \cos 2k\omega_0 t \right] \cos \varphi(t) - \left[2 \sum_{k=0}^{\infty} (-1)^k J_{2k+1}(C) \cos(2k+1)\omega_0 t \right] \sin \varphi(t) \right\}, \quad (5)$$

式中 $J_k(C)$ 为第一类 k 阶贝塞尔函数。由(5)式可知,经过调制后的干涉信号包括直流分量、基频 ω_0 和 ω_0 的无穷项高次倍频。将(5)式分别乘以 $\cos \omega_0 t$ 和 $\cos 2\omega_0 t$ 得到

$$A \cos \omega_0 t + B J_0(C) \cos \omega_0 t \cos \varphi(t) + B \sum_{k=1}^{\infty} (-1)^k J_{2k}(C) [\cos(2k+1)\omega_0 t + \cos(2k-1)\omega_0 t] \cos \varphi(t) - B \sum_{k=0}^{\infty} (-1)^k J_{2k+1}(C) [\cos 2(k+1)\omega_0 t + \cos 2k\omega_0 t] \sin \varphi(t), \quad (6)$$

$$A \cos 2\omega_0 t + B J_0(C) \cos 2\omega_0 t \cos \varphi(t) + B \sum_{k=1}^{\infty} (-1)^k J_{2k}(C) [\cos(2k+2)\omega_0 t + \cos(2k-2)\omega_0 t] \cos \varphi(t) - B \sum_{k=0}^{\infty} (-1)^k J_{2k+1}(C) [\cos(2k+3)\omega_0 t + \cos(2k-1)\omega_0 t] \sin \varphi(t). \quad (7)$$

因为调制频率远大于被测信号频率,所以(6)、(7)式经低通滤波后可滤除所有含 ω_0 及其倍频项^[10],得到 $-BJ_1(C)\sin\varphi(t)$ 与 $-BJ_2(C)\cos\varphi(t)$ 。然后,通过PGC解调技术计算出 B 与 C 的值,进而得到 $\sin\varphi(t)$ 与 $\cos\varphi(t)$ 。

此时,相位工作点 $\varphi(t)$ 的波动主要是由激光器自身输出频率的变化所致,包括频率漂移与模式跳变。例如,当激光器工作模式由模式 v_1 跳变为模式 v_2 时,经过干涉仪产生的相移突变量为

$$\delta\varphi(t) = \varphi_2(t) - \varphi_1(t) = \frac{4\pi nl'}{c}(v_2 - v_1), \quad (8)$$

式中 l' 为干涉仪臂差。

综上所述,可以通过监测相位工作点 $\varphi(t)$ 的动态相移来检测跳模。跳模导致的相位工作点突变由 $\varphi(t)$ 对应的正余弦值波动来呈现;跳模发生前,当相位工作点 $\varphi(t)$ 处于 $k\pi$ 附近时,对于 $\sin\varphi(t)$, $\varphi(t)$ 处于灵敏区;而当 $\varphi(t)$ 处于 $(k+1/2)\pi$ 附近时,对于 $\cos\varphi(t)$, $\varphi(t)$ 则处于灵敏区。因此,通过同步监测 $\sin\varphi(t)$ 与 $\cos\varphi(t)$ 两路信号可直接跟踪 $\varphi(t)$ 的变化趋势,并能避免 $\varphi(t)$ 处于 $\sin\varphi(t)$ 或 $\cos\varphi(t)$ 的非灵敏区而造成的相位信号衰落,从而为检测跳模提供有利判据。

3 实验装置及结果分析

实验中搭建了基于非平衡光纤 Michelson 干涉仪的跳模测试系统,对跳模现象进行了测量与分析。测试系统框图如图 1 所示,待测光源为一超窄线宽掺铒光纤环形激光器^[11],激光器输出光经隔离器(ISO)后进入光纤 Michelson 干涉仪。干涉仪两臂的反射端面采用法拉第旋镜(FRM)以消除偏振态随机变化导致的信号衰落;其中一臂的部分光纤被缠绕在相位调制器压电陶瓷(PZT)上,并通过对 PZT 施加余弦调制电压引入 PGC 外调制;将干涉仪整体放入声屏蔽罐中以屏蔽外界振动和声信号。干涉仪输出经光电转换,进行频率为 100 kHz 的模/数(A/D)采样。其中,干涉仪的臂差 l' 为 0.5 m, environmental isolation housing

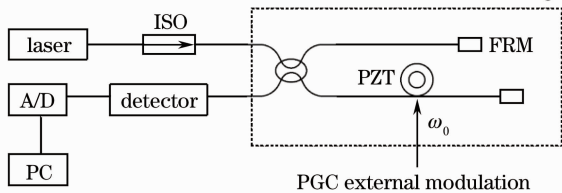


图 1 跳模测试系统框图

Fig. 1 Schematic diagram to measure mode hopping

PGC 调制角频率 ω_0 设置为 12.5 kHz,通过调节 PZT 的调制电压将 PGC 调制深度 C 值设置为 2.4。最后,主要根据(3)~(7)式用 VC++ 结合 Matlab 编写实时的数据采集、解调程序,计算出 $\sin\varphi(t)$ 与 $\cos\varphi(t)$ 随时间的变化关系,为跟踪相移、检测跳模提供判断依据。

实验中首先将待测的掺铒光纤环形激光器也放入声屏蔽罐中,以尽量降低外界干扰对激光器的不利影响,然后调整抽运^[11]使激光器工作在稳定的单纵模状态。测试发现,在一段时间内激光器通常可以保持稳定的单纵模输出,但随着激光器长时间连续工作,跳模概率相对增加,偶发跳模可能随机发生。图 2 为系统测得的一次偶发跳模现象。

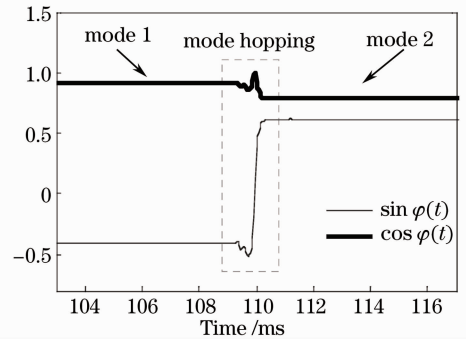


图 2 偶发的单次跳模现象

Fig. 2 Single occasional mode hop

由图 2 可知,在 109.2 ms 之前, $\sin\varphi(t)$ 与 $\cos\varphi(t)$ 的值基本保持不变,表明激光器一直工作在稳定的单纵模状态(mode 1),对应的相位工作点 $\varphi_1(t) = -0.42 + 2k_1\pi$;在 109.2 ~ 110.4 ms,跳模开始发生并伴随着复杂的模式竞争,如图 2 中虚线框内所示,对应的“等效相位工作点”因模式竞争而起伏波动;在 110.4 ms 之后,激光器跳变至另一稳定的单纵模状态(mode 2),对应的相位工作点为 $\varphi_2(t) = 0.66 + 2k_2\pi$;整个跳模过程持续约 1.2 ms,分别导致相位工作点 $\varphi(t)$ 、 $\sin\varphi(t)$ 以及 $\cos\varphi(t)$ 产生快速突变。其中, k_1, k_2 均为整数。

实际上,能够为上述偶发跳模现象创造条件的因素有多种,包括抽运强度波动、谐振腔失稳、外界噪声与振动、腔内热效应、光纤器件性能下降等,这些因素均可以独自引发跳模,也可能相互交叉共同导致跳模,致使跳模过程与方式往往复杂多变^[3~5,11]。

图 3 为系统在掺铒光纤环形激光器启动瞬间测得的连续多次跳模现象,图 3(a)、(b)分别表示 $\sin\varphi(t)$ 与 $\cos\varphi(t)$ 在连续多次跳模过程中随时间

的变化关系。如图 3 所示,激光器在刚启动后的 4.33 s 内共连续发生 16 次跳模,跳模周期随时间呈逐渐增大趋势,临时稳态单纵模的平均连续工作时间不到 270 ms。图 2 与图 3 的结果表明,同一次跳模所导致 $\sin \varphi(t)$ 与 $\cos \varphi(t)$ 的突变程度与方式显然不同,通过同步监测 $\sin \varphi(t)$ 与 $\cos \varphi(t)$ 可以相互补充跳模信息,有利于对跳模的准确判断。实验中多次测量发现,激光器从启动至达到稳定的单纵模输出之前,其工作模式通常会在不同的纵模之间频繁竞争与切换,并且每次启动后所达到的稳态激光纵模的模阶数不一定相同。

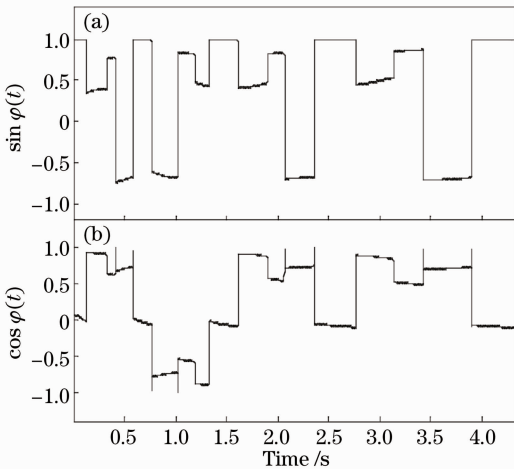


图 3 激光器启动瞬间触发的连续多次跳模现象
Fig. 3 Induced serial mode hops at the very moment when the laser was switched on

根据图 3 中 $\sin \varphi(t)$ 与 $\cos \varphi(t)$ 随时间的变化曲线可知,在连续两次跳模之间,激光器工作在临时稳定的单纵模状态,同时输出光频不断漂移。这是由于激光器启动瞬间光纤内部的瞬态热效应对谐振腔光学长度与输出光频产生了热调谐。

图 4 为图 3 中连续两次跳模的局部放大图。根据图 4 可知,连续两次跳模分别发生在 2.763 s 与 3.129 s 附近,如虚线框内所示,在 2.765~3.129 s,虽然激光器工作在单纵模状态,但 $\sin \varphi(t)$ 与 $\cos \varphi(t)$ 因频率漂移而连续单向变化,与跳模导致的相移突变有本质区别。根据 $\sin \varphi(t)$ 与 $\cos \varphi(t)$ 的变化趋势计算出这两次跳模之间相位工作点的连续漂移量 $\delta\varphi(t) = 0.1$ rad,对应的频漂量为 3.3 MHz,频漂速率约 9 MHz/s,输出光频随谐振腔微弱的热膨胀而向减小方向漂移。

4 结 论

对基于非平衡光纤 Michelson 干涉仪动态相移

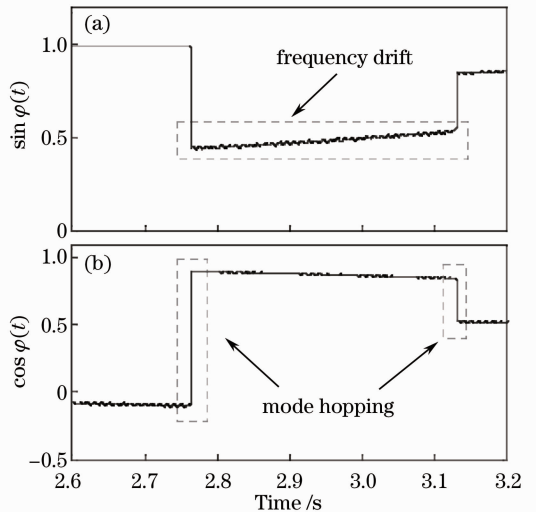


图 4 连续两次跳模之间的频率单向漂移现象
Fig. 4 Unidirectional frequency drift between two serial mode hops

的跳模检测方法进行了理论分析与实验研究。实验结果表明,该方法不仅能实时有效判断跳模,尤其适合检测连续发生的跳模现象,捕捉跳模的起始与结束时刻、持续时间、跳模的动态过程等细节,还能测量跳模前后可能发生的频率漂移;另外,系统通过同步监测 $\sin \varphi(t)$ 与 $\cos \varphi(t)$ 两路信号来跟踪与判断相位工作点 $\varphi(t)$ 的动态相移,可以互相补充跳模信息,提升检测灵敏度,从而尽量避免误判。本文建立的跳模检测实验系统,在检测效果方面比直接测量激光器的输出光谱更简单可靠,能够为评价单频光纤激光器的模式稳定性提供有效的测试手段。

参 考 文 献

- 1 A. Polynkin, P. Ploynkin, M. Mansuripur *et al.*. Single-frequency fiber laser with 1 W output power at 1.5 μm [J]. *Opt. Express*, 2005, **13**(8): 3179~3184
- 2 X. X. Yang, L. Zhan, Q. S. Shen *et al.*. High-power single-longitudinal-mode fiber laser with a ring Fabry-perot resonator and a saturable absorber[J]. *IEEE Photon. Technol. Lett.*, 2008, **20**(11): 879~881
- 3 Liang Xun. Investigation of Noise Analysis and Suppression Technologies in Fiber Optic Hydrophone System[D]. Changsha: National University of Defense Technology, 2008. 58~67
梁 迅. 光纤水听器系统噪声分析及抑制技术研究[D]. 长沙: 国防科学技术大学, 2008. 58~67
- 4 Liang Xun, Yao Qiong, Hu Yongming *et al.*. Real-time mode hopping detection on narrow line-width laser source based on unbalanced fiber interferometer[J]. *Acta Optica Sinica*, 2009, **29**(2): 437~442
梁 迅, 姚 琼, 胡永明等. 基于非平衡光纤干涉仪的窄线宽激光光源跳模实时测试方法[J]. *光学学报*, 2009, **29**(2): 437~442
- 5 Ma Mingxiang, Xu Pan, Hu Zhengliang *et al.*. Research on mode mopping detection based on the visibility change of fiber Mach-Zehnder interferometer [J]. *Semiconductor Optoelectronics*, 2011, **32**(1): 123~127

- 马明祥, 徐攀, 胡正良等. 基于光纤 M-Z 干涉仪相干度变化的跳模检测研究[J]. 半导体光电, 2011, **32**(1): 123~127
- 6 Y. Cheng, J. T. Kringlebotn, W. H. Loh *et al.*. Stable single-frequency traveling-wave fiber loop laser with integral saturable-absorber-based tracking narrow-band filter[J]. *Opt. Lett.*, 1995, **20**(8): 875~877
- 7 Zhang Xin, Chen Wei, Liu Yu *et al.*. Single longitudinal mode fiber laser with multiple ring cavities and its frequency stabilization[J]. *Chinese J. Lasers*, 2007, **34**(1): 48~52
- 张欣, 陈伟, 刘宇等. 单纵模多环形腔掺铒光纤激光器及其稳定性[J]. 中国激光, 2007, **34**(1): 48~52
- 8 Yu Benli, Qian Jingren, Luo Jiatong *et al.*. Stable single-frequency fiber ring laser with line-width less than 0.5 kHz[J]. *Chinese J. Quantum Electronics*, 2001, **18**(4): 345~348
- 俞本立, 钱景仁, 罗家童等. 线宽小于 0.5 kHz 稳态的单频光纤环形腔激光器[J]. 量子电子学报, 2001, **18**(4): 345~348
- 9 Z. Meng, G. Stewart, G. Whitenett. Stable single-mode operation of a narrow-linewidth, linearly polarized, erbium-fiber ring laser using a saturable absorber [J]. *J. Lightwave Technol.*, 2006, **24**(5): 2179~2183
- 10 A. Dandridge, A. B. Tveten, T. G. Giallorenzi. Homodyne demodulation scheme for fiber optic sensors using phase generated carrier[J]. *IEEE J. Quantum Electron.*, 1982, **QE-18**(10): 1647~1653
- 11 Ma Mingxiang, Yang Huayong, Xu Pan *et al.*. Investigation on characteristics of mode hopping in ultra-narrow linewidth erbium-doped fiber ring laser under pump modulation[J]. *Acta Optica Sinica*, 2012, **32**(3): 0314002
- 马明祥, 杨华勇, 徐攀等. 抽运调制条件下超窄线宽掺铒光纤环形激光器的跳模特性研究[J]. 光学学报, 2012, **32**(3): 0314002

栏目编辑: 宋梅梅