

基于光学外差的光纤环形激光器 跳模检测实验研究

唐 凯^{1,2} 王俊杰^{1,2} 马明祥^{1,2} 徐 攀^{1,2} 胡正良^{1,2}

¹国防科技大学海洋科学与工程研究院,湖南 长沙 410073

²国防科技大学光电科学与工程学院,湖南 长沙 410073

摘要 检测光纤环形激光器输出模式的动态特性是实验与工程应用的难题之一。在不同抽运强度以及长时间运转条件下,激光器会输出复杂的模式动态现象。受限于实验手段,目前的实时测量系统局限于仅获取激光器的输出强度信息而无法准确获取更多的模式动态特性。基于这一点,报道了采用光学外差的测量方法,搭建相应的实验装置测得待测光纤环形激光器与参考光源的拍频信号。实验中可实时获取包括跳模以及频率漂移在内的模式动态时频瀑布图,并提取各模式强度的时间序列,进而能够检测光纤环形激光器输出模式动态特性以及分析模式光强,为控制光纤环形激光器输出以及探究其内在频率动力学特性提供重要的测量手段。

关键词 激光器;光学外差;光纤环形激光器;跳模检测;频率动态

中图分类号 TN248

文献标识码 A

doi: 10.3788/CJL201542.s102003

Experimental Study on Mode Hopping Detection of Fiber Ring Laser Based on Heterodyne Detection

Tang Kai^{1,2} Wang Junjie^{1,2} Ma Mingxiang^{1,2} Xu Pan^{1,2} Hu Zhengliang^{1,2}

¹Academy of Ocean Science and Engineering, National University of Defense Technology, Changsha, Hunan 410073, China

²College of Optoelectronics Science and Engineering, National University of Defense Technology, Changsha, Hunan 410073, China

Abstract Detection for mode dynamics of fiber ring laser is a key problem for experiments and applications. On the condition of the different pumping intensity and long-time operation laser can appear complex mode dynamic phenomenon. Output of the intensity can be obtained easily based on the current experimental condition, but more exact mode dynamic characteristic is still difficult to be obtained. One type of mode hopping detection for fiber ring laser based on optic heterodyne is set up. Real-time mode hopping and frequency drift of fiber ring laser is detected. Time-frequency fall graph of mode characteristic and the mode intensity time series can be acquired. According to the experimental results, the output of fiber ring laser mode dynamics is detected and analysis for mode intensity can be obtained. This method plays an imperative role in laser control systems and frequency dynamics analysis.

Key words Lasers; optic heterodyne; fiber ring laser; mode hopping detection; frequency dynamic

OCIS codes 140.3510; 140.3560; 030.4070; 140.3500

1 引 言

光纤激光器具有高相干性、窄线宽、低噪声、高速调制等特性,在相干探测、相干通信、激光雷达等领域具有重要应用^[1-2],但在某些结构及参数下,容易出现多种跳模、多纵模振荡等模式动态现象,从而严重影响其实际应用。实时检测光纤激光器跳模信息是提高激光器输出稳定性以及分析激光器频率非线性动力学特性的基

收稿日期: 2015-01-01; 收到修改稿日期: 2015-02-16

基金项目: 国家自然科学基金(11404402)。

作者简介: 唐凯(1990—),男,硕士研究生,主要从事光纤传感、光纤激光器方面的研究。E-mail: tangkai0713@126.com

导师简介: 胡正良(1975—),男,副教授,硕士生导师,主要从事光纤信息技术、光纤光栅技术方面的研究。E-mail: zhengliang_hu@163.com(通信联系人)

本前提^[1-6]。

目前,文献中常使用法布里-珀罗(F-P)腔扫描干涉仪进行激光器跳模检测,该方法由于有限的扫描频率,仅可检测简单的跳模现象,无法完整获取跳模过程中各个模式随时间的演化过程,而且容易造成误判^[2-4]。本课题组发展了基于干涉仪动态相移的跳模检测技术^[5-6],该方法将光纤环形激光器跳模时的频率突变转换为干涉仪相位工作点的突变,可实现对激光器跳模过程进行实时检测,但需要调制压电陶瓷(PZT)引入相位载波并对输出信号进行相干载波(PGC)解调,该过程会对解调出的相位信号引入附加相位误差,仍然无法有效分辨多纵模振荡现象进而获取各模式的实时动态信息。2012年,Daniel Brunner等^[7]报道了采用光学外差法对外腔反馈半导体激光器的输出频率动态进行探测并获取了高分辨率的频谱信息。迄今为止,对光纤环形激光器的跳模、频率漂移等模式动态特性研究尚不充分,这是深入理解该类激光器复杂模式动态现象的内在机理,进而提高激光器输出稳定性的一大障碍。

本文设计并搭建了基于光学外差法的跳模及多纵模振荡检测系统,该装置能够实时检测光纤环形激光器输出模式结构的变化和任意形式的跳模现象,无失真测量跳模持续时间,频率间隔与方向以及频率漂移等以往的技术难以获取到的信息,而且可以同步提取160MHz带宽内多个模式强度的时间序列,为揭示激光器跳模的成因和机理以及高维混沌激光等系统模式动态特性的研究提供实验手段。

2 实验原理以及系统搭建

光学外差法测量待测光纤环形激光器的输出模式结构需要一台中心波长相近的参考光源与其进行拍频得到模式动态信息^[7],参考光源为一输出稳定的单纵模激光器,其频率充当标准频率,输出光场表示为

$$E_0 = A_0(t) \cos[2\pi f_0 t + \varphi_0(t)] \quad (1)$$

式中 $A_0(t)$, f_0 , $\varphi_0(t)$ 分别表示参考光场的振幅、频率与相位。待测激光器在模式失稳的条件下,会产生模式跳变、多模振荡等动态现象,待测光场可以表示为多个纵模光场的线性叠加:

$$E'_1 = \sum_{i=1}^n E_i = \sum_{i=1}^n A_i(t) \cos[2\pi f_i t + \varphi_i(t)], \quad (2)$$

式中 $A_i(t)$, f_i , $\varphi_i(t)$ 分别为第 i 个纵模光场的振幅、频率与相位; n 为模式总数。输出失稳的待测激光器与参考光源产生拍频并经过光电转换后的光强信号可以表示为

$$\begin{aligned} I_{\text{beat}} &= \left(\sum_{i=1}^n E_i + E_0 \right)^2 = \\ &= I_0 + \sum_{i=1}^n I_i + 2 \sum_{i \neq j}^n \sqrt{I_i I_j} \cos(2\pi \Delta f_{ij} t + \Delta \bar{\omega}_{ij}) + \\ &= 2 \sum_i^n \sqrt{I_i I_0} \cos(2\pi \Delta f_{i0} t + \Delta \bar{\omega}_{i0}), \end{aligned} \quad (3)$$

式中 I_i 表示待测光模式 i 的光强; $\Delta f_{ij} = f_i - f_j (i \neq j)$ 表示待测光模式 i 与模式 j 之间的频差; $\Delta f_{i0} = f_i - f_0$ 表示待测光模式 i 与参考光的频差。(3)式等号右侧的第三项代表待测光模式内部之间的自拍频信号,第四项代表参考光与待测光的拍频信号。

由(3)式可知,获取到的拍频信号由待测激光器与参考光源的频率与幅度共同决定,要求 $\Delta f_{i0(i=1, \dots, n)}$ 的绝对值在高速光电探测器响应带宽之内,同时拍频信号强度要大于频谱仪的本底噪声。通过射频频谱仪可测量并提取拍频信号的时频特性,进而分析待测激光器输出模式结构的变化与强度信息。

设计并搭建了两台频差很小的光纤环形激光器,如图1(a),(b)所示,图1(a)为待测激光器(EDFRL1),采用环形腔+线型光纤布拉格光栅(FBG)的结构,其中增益介质为1.9m的掺铒光纤(EDF),饱和吸收体(SAG)为长度为1.8m的藤仓型低掺保偏掺铒光纤(PMEDF),整个环形腔的腔长为12.3m,对应的纵模间隔为16.821MHz;图1(b)为参考光源(EDFRL2),其基本结构与待测激光器相同,增益介质为长1.9m的掺铒光纤(CoractiveER-35-7-PMEDF),SAG为3m的长飞A型低掺PMEDF,整个环形腔的腔长为10.3m,对应的纵模间隔为20.087MHz。通过采用不同的抽运强度和控制运转时间,参考光源与待测激光器分别工作在单纵模稳定状态与跳模、多纵模振荡等非稳定状态。

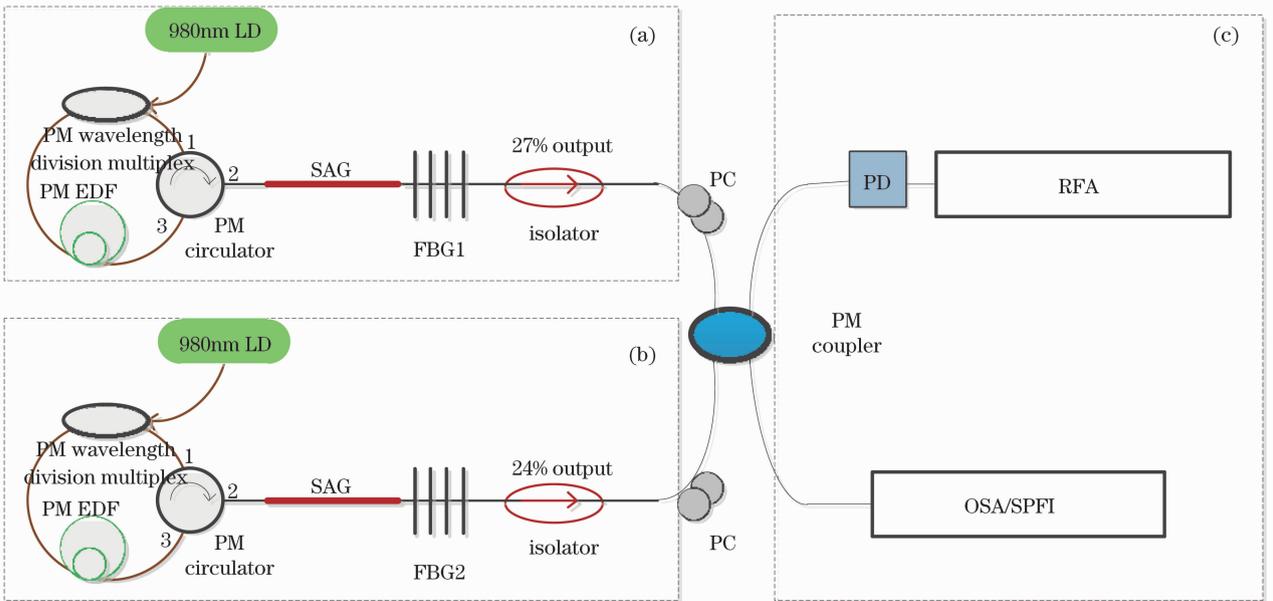


图 1 激光器模式动态测量实验装置示意图

Fig. 1 Schematic of experimental setup for laser mode dynamics

两台激光器的输出中心波长由 FBG1 与 FBG2 决定, FBG1 与 FBG2 的透射谱测量结果如图 2 所示, 中心波长分别为 1546.767 nm 与 1546.732 nm, 相差 35 pm, 可知 EDFRL1 与 EDFRL2 在单纵模运转时对应的频率差在 4.39 GHz 附近。FBG1 与 FBG2 对应的峰值反射率分别为 0.73 与 0.76, 3dB 带宽均为 0.12 nm。参考光源在合适的抽运强度以及测量时间内可以保持稳定的单纵模输出以作为标准频率。两台激光器输出经过偏振控制器(PC)保证以相同的偏振态进入 3dB 耦合器进行耦合, 合束后的拍频信号分为两路, 一路信号用光谱分析仪(OSA, 波长分辨率为 0.01 nm)进行谱分析与扫描干涉仪(SPI)自由程与精度分别为 1.5 GHz 与 200)对合束后的纵模结构进行检测, 另一路经过一个高速探测器(PD, New focus-Model-1544B, 响应带宽为 12 GHz)进行光电转换后, 进入射频频谱分析仪(RFA, Agilent-N9020A, 响应带宽为 10 Hz 至 13.6 GHz, 频谱的分辨率带宽为 3 MHz)进行输出模式检测。

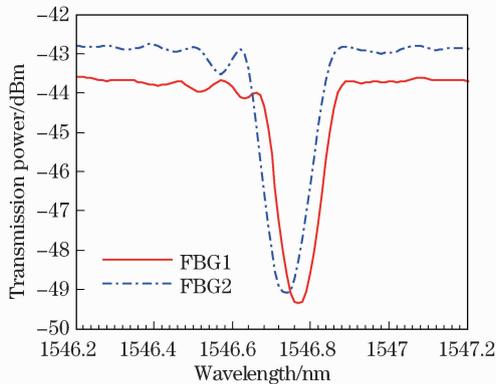


图 2 FBG1 与 FBG2 的透射谱

Fig. 2 Transmission spectra of FBG1 and FBG2

采用光谱仪及扫描干涉仪的测量结果表明 EDFRL1 与 EDFRL2 均工作在单纵模状态, 如图 3 所示, 它们的输出波长分别为 1546.828nm 与 1546.793nm, 两者之差仍为 35pm, 对应的频率之差为 4.39GHz, 位于 PD 与 RFA 的探测带宽之内。EDFRL1 与 EDFRL2 的激射波长分别与图 2 中 FBG1 与 FBG2 的中心波长相比有所漂移, 这是由 FBG1 与 FBG2 的中心波长随着环境温度的升高向长波段移动约 61pm 所致^[8]。

利用 RFA 对经过光电转换后的拍频信号进行频谱分析, 得到的拍频信号的噪声功率谱, 如图 4 所示。该谱线的峰值功率为 -27.1 dBm, 表明拍频信号的强度信息。图中的一条独立谱线代表拍频信号的频率成

分,谱线频率位于 4.413 GHz,表明 EDFRL1 与 EDFRL2 之间的拍频为 4.413 GHz,证明两台激光器均处于单纵模状态。这与图 3(a)中利用 OSA 测得的频差为 4.39 GHz 相近,显然,光学外差法更适合用于测量两台波长相近的 EDFRL 的频差,测量精度取决于频谱分析仪的分辨率带宽。

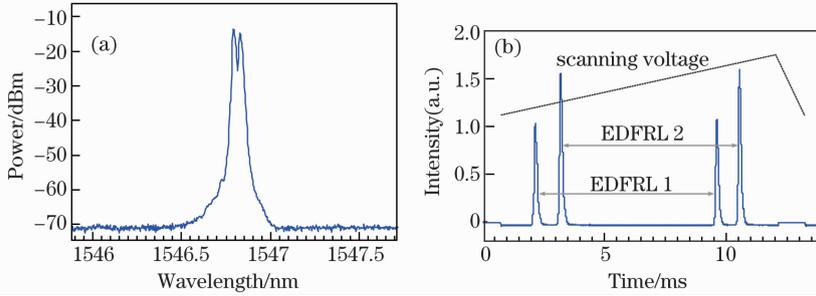


图 3 (a) 合束光谱 3(b) 纵模结构

Fig. 3 (a) Combining beam spectrum; (b) Longitudinal mode structure

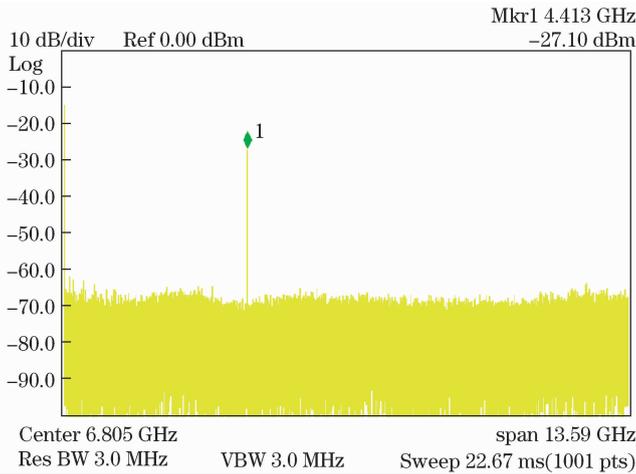


图 4 单纵模运转时外差信号的频谱

Fig. 4 Frequency spectrum of in heterodyne signal single longitudinal mode

3 结果与讨论

3.1 单纵模偶发跳模检测

实验时,将两台激光器分别放入声屏蔽盒中以尽量降低外界扰动对激光器的输出影响。调整抽运强度使待测激光器工作在单纵模状态下,随着运转时间的增加,激光器偶发跳模概率相应加大。

图 5(a)表示在检测时间内的一个偶发跳模现象。根据时频瀑布图(分辨率带宽为 239.1929 kHz,单帧采样时间为 0.22204 ms)可以直观准确地检测出激光器在 1.128~1.132 s 完成了输出由位于 4.399 GHz 处的单纵模 mode1 向位于频率减小的位于 4.382 GHz 处的单纵模 mode2 跳变,实测跳模间隔为 0.017 GHz,符合待测环形激光器理论计算值。图 5(b)为提取出来的拍频光强信号经过光电转换以后的归一化强度时间序列,其中的虚线框内表明激光器输出模式在 4 ms 内发生了模式跳变并伴随着强度振荡。干涉相移法跳模检测^[5,9]只能够对单纵模的之间的跳变进行准确检测,而对激光器跳模过程中出现的瞬态多纵模振荡,检测结果会因为对输出信号解调失真而造成误判。

3.2 多纵模跳模检测

增加待测激光器的抽运电流到 146.6 mA 并增加观测时间,可以获取到激光器输出多模单模相互交替的瞬态跳变。图 6(a)为时频瀑布图(分辨率带宽为 382.7086 kHz,单帧采样时间为 30.0008 ms),显示检测到的输出模式由单纵模运转到短时多纵模振荡,再向单纵模运转跳变的过程。在观测时间的前 7.512 s 激光器维持中心频率在 2.496 GHz 附近处不稳定的单纵模运转。在 7.512~10.936 s 之间激光器输出主要包括 6 个模式在内的多纵模振荡,之后再由多纵模跳变到一个主模式输出。在整个动态过程中,时频瀑布图显

示模式结构整体向频率增大的方向发生轻微的频率漂移。在 10.936 s 以后,各个模式的强度全部集中到中心频率位于 2.486 GHz 附近的一个模式上,并且该模式由于激光器的谐振腔长时间运转条件下的热膨胀效应^[8],在 2.483~2.488 GHz 范围内出现轻微的频率漂移。导致光纤环形激光器发生跳模的因素有很多,包括抽运强度的波动,反转粒子数的振荡,外界环境噪声以及实验平台的振动引起谐振腔抖动等,在这些因素单独或共同作用下,激光器的谐振腔内由饱和吸收体结构形成的动态光栅无法进行输出模式控制,破坏了选模机制,从而导致了模式的跳变^[8,10]。跳模过程中存在长达 3.424 s 时间的多纵模过渡区,过渡区时间远大于激光器的腔内光子寿命,但接近动态光栅的建立时间,表明此时间段内,动态光栅被破坏,其边模抑制比无法抑制由于激光中心频率漂移导致的模式损耗波动,从而触发和诱导模式状态突变。

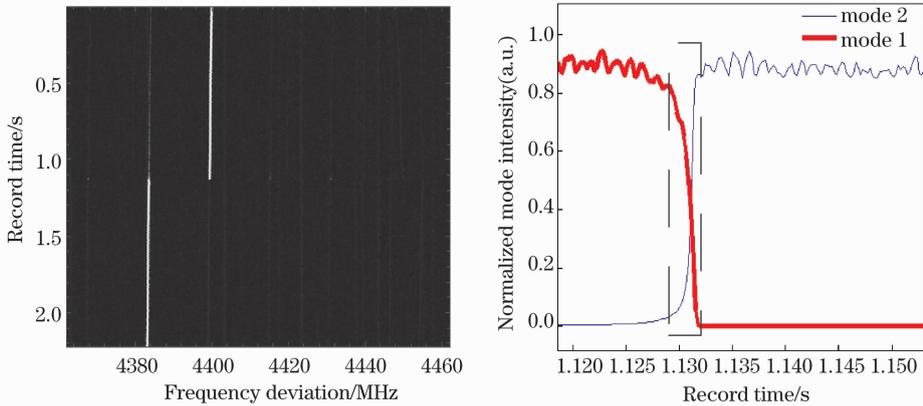


图 5 (a) 偶发跳模现象; (b) 偶发跳模强度变化局部图

Fig. 5 (a) Hap mode hopping phenomenon; (b) hap mode hopping intensity transformation in local image

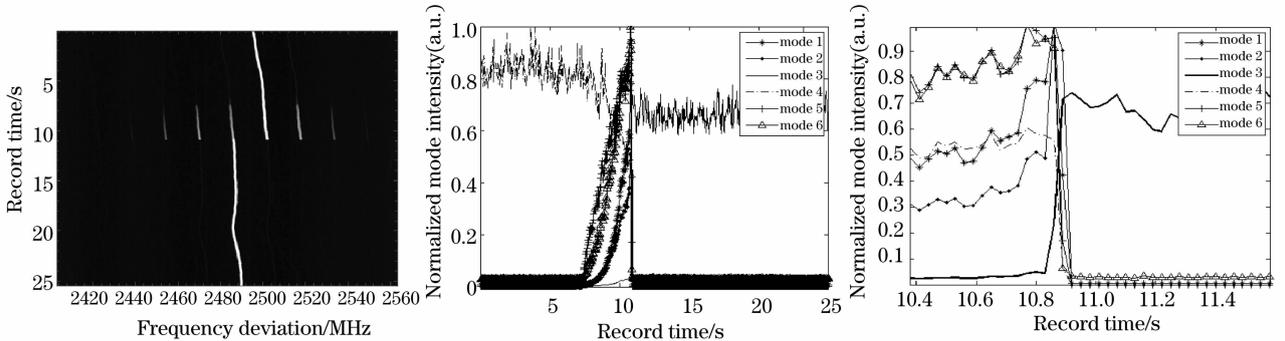


图 6 (a) 跳模时频瀑布图; (b) 跳模时间序列; (c) 多模向单模跳变强度变化局部图

Fig. 6 Mode hopping time-frequency fall graph; (b) mode hopping time series;

(c) multi-mode to single mode hopping intensity local image

3.3 复杂多纵模振荡动态测量

光纤环形激光器在不同的抽运强度以及运转时间下,会输出单纵模运转,多纵模振荡,模式跳变以及频率漂移等一系列复杂的动态现象,图 7(a)为激光器在抽运电流为 219.6 mA 下经 FP 腔扫描干涉仪输出的多模振荡现象,由图只能判断出激光器输出多纵模振荡的总体状态,至于各个模式强度随时间的变化将无法获得。根据图 7(b)显示的测量结果,光学外差法跳模检测能够实时获取光纤环形激光器模式结构变化过程中出现的多模振荡过程,包括参与模式的数目,强度,持续时间以及各个模式随时间的演化规律,这些结果是前两种方法^[3,5,9]所无法测量得到的。

图 7(b)的时频瀑布图(分辨率带宽为 382.7086 kHz,单帧采样时间为 0.1127 ms)显示了在观测时间内,激光器在 4.320~4.480GHz 的 160 MHz 带宽内的主要有 7 个振荡模式。可以提取其中任意一个模式强度的时间序列进行分析,图 8 提取了中心频率分别在 4.324(mode1),4.349(mode2),4.375(mode3),4.401(mode4),4.426(mode5),4.451(mode6),4.474GHz(mode7)处的 7 个主要模式的归一化强度的时间序列。在提取到的 7 个模式强度的时间序列中,来自同一系统的这 7 个模式归一化强度的时间序列表现出

不同的特性, mode5 的归一化强度整体较大, mode4 的归一化强度振荡明显, 其他模式的归一化强度特征也不是完全相同。这些单个模式强度所表现出来的不同的振荡特性将在今后的研究中通过非线性检验、相空间重构、计算关联维数等方法来对其强度时间序列的混沌特性以及各模式之间的内在关联展开深入的分析。

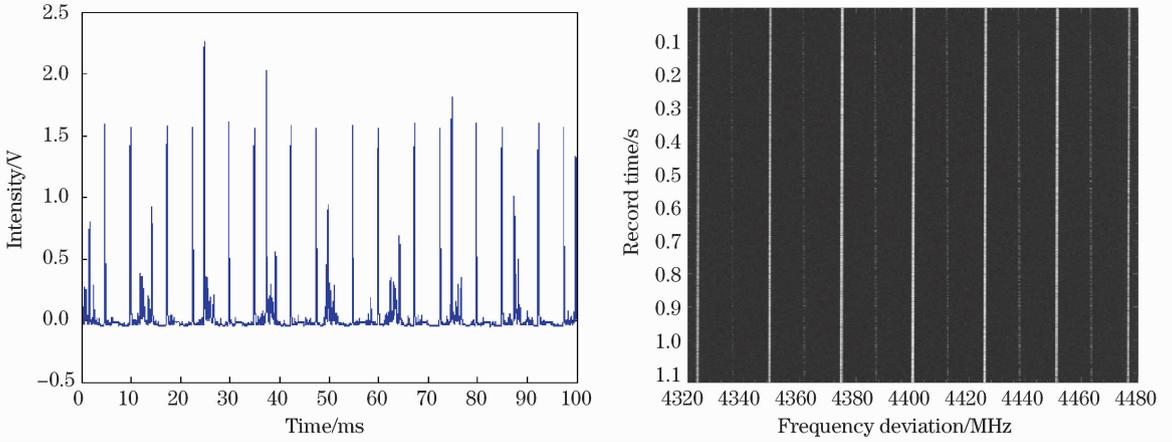


图 7 (a)多模振荡 FP 腔扫描图;(b)外差探测获取多模振荡图

Fig. 7 (a) Multi-mode oscillation scanning graph using FP cavity; (b) multi-mode oscillation map using heterodyne detection

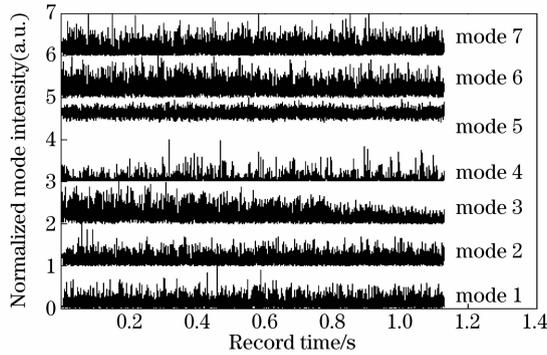


图 8 模式时间序列

Fig. 8 Mode intensity time series

4 结 论

基于光学外差法对光纤环形激光器输出的模式结构的变化进行了实验研究与讨论。实验结果表明, 搭建的基于光学外差方法的测量系统在检测激光器模式结构方面比干涉仪动态相移法和 FP 腔扫描干涉仪法更加精确直观, 可以准确获取光纤环形激光器输出不同纵模结构之间的跳变, 频率漂移等现象在内的模式动态信息。输出结果采用时频瀑布图显示, 不仅能够有效检测激光器输出模式跳变的方向与持续时间, 同时可提取各个模式强度的时间序列信息, 这为今后进一步对光纤环形激光器输出模式强度的时间序列进行非线性分析提供了有效的实验方法。

参 考 文 献

- 1 Liang Xun. Investigation of noise analysis and suppression technologies in fiber optic hydrophone system[D]. Changsha: National University of Defense of Technology, 2008: 55-70.
梁 迅. 光纤水听器系统噪声分析与抑制技术研究[D]. 长沙: 国防科技大学, 2008: 55-70.
- 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 R Lang, K Kobayashi. External optical feedback effects on semiconductor injection-laser properties[J]. IEEE Quantum Electron, 1980, 16(3): 347-355.
- 4 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.
- 5 Ma Mingxiang, Xu Pan, Hu Yongming, *et al.*. Mode hopping detection for fiber laser based on dynamic phase changes in interferometer[J]. Chinese J Lasers, 2012, 39(6): 0602013.
- 马明祥,徐攀,胡永明,等. 基于干涉仪动态相移的光纤激光器跳模检测方法[J]. 中国激光, 2012, 39(6): 0602013.
- 6 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.
- 7 Daniel Brunner, Xavier Porte, Ingo Fischer, *et al.*. Real-time frequency dynamics and high-resolution spectra of a semiconductor laser with delayed feedback[J]. Scientific Reports, 2012, 2: 732.
- 8 Qiao Xueguang, Jia Zhen'an, Fu Haiwei, *et al.*. Theory and experiment about in-fiber Bragg grating temperature sensing [J]. Acta Physica Sinica, 2004, 53(2): 494—497.
- 乔学光,贾振安,傅海威,等. 光纤光栅温度传感理论与实验[J]. 物理学报, 2004, 53(2): 494—497.
- 9 Ma Mingxiang, Hu Zhengliang, Xu Pan, *et al.*. Detecting mode hopping in single-longitudinal-mode fiber ring lasers based on unbalanced fiber Michelson interferometer[J]. Applied Optics, 2012, 51(30): 7420—7425.
- 10 Pan Xu, Zhengliang Hu, Mingxiang Ma, *et al.*. Mapping the optical frequency stability of the single-longitudinal-mode erbium-doped fiber ring lasers with saturable absorber[J]. Optics & Laser Technology, 2013, 49: 337—342.

栏目编辑: 宋梅梅