

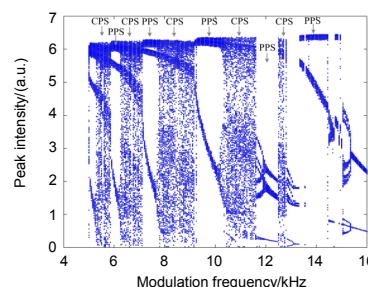


DOI: 10.12086/oe.2018.180041

调制型光纤环形激光器多纵模动态输出实验研究

唐凯,肖岩平,刘海,夏征义*,李峰,王程

军事科学院后勤科学与技术研究所,北京 100166



摘要: 针对光纤环形激光器输出所表现出的复杂多纵模振荡现象,在实验研究中,采用光学外差并结合射频频谱仪的探测方法,对两种外加调制工作状态下光纤环形激光器的模式动态输出进行了实时测量与时频分析。通过对光纤环形激光器系统输出的总光强信息与探测范围内获取到的多纵模动态特性进行同步提取与时频分析,将光纤环形激光器输出动态特性的研究范畴从总光强表现出的低维混沌特性扩展到多纵模具有的高维混沌信息。根据实验结果分析多纵模强度随时间的演化行为与总光强输出的内在关联,以及掺铒光纤环形激光器输出在外部调制状态下的内在动力学特性。

关键词: 光纤环形激光器;多纵模检测;混沌特性分析;频率动态

中图分类号: TN248

文献标志码: A

引用格式: 唐凯,肖岩平,刘海,等. 调制型光纤环形激光器多纵模动态输出实验研究[J]. 光电工程, 2018, 45(10): 180041

Experimental observation for multi-mode dynamic output of fiber ring laser based on modulation condition

Tang Kai, Xiao Yanping, Liu Hai, Xia Zhengyi*, Li Feng, Wang Cheng

Institute of Logistics Science and Engineering, Academy of Military Science, Beijing 100166, China

Abstract: In order to detect and analyze the complex multi-mode dynamics of fiber ring laser (FRL), in this experiment, based on the heterodyne detection method together with radio-frequency spectrum, the output of FRL intensities on two kinds of modulation condition are synchronously detected and analyzed. From the low dimension to high dimension chaos, the total intensity and multi-mode characters can be synchronously acquired. These experimental results show the relationships between real-time intensity and frequency evolution behaviors about single mode and total mode. Moreover, according to experimental results, the chaotic characteristics and inner relationships of erbium-doped fiber ring laser (EDFRL) output mode dynamic can be analyzed.

Keywords: fiber ring laser; multi-mode detection; chaotic characteristic analysis; frequency dynamic

Citation: Tang K, Xiao Y P, Liu H, *et al.* Experimental observation for multi-mode dynamic output of fiber ring laser based on modulation condition[J]. *Opto-Electronic Engineering*, 2018, 45(10): 180041

收稿日期: 2018-01-23; 收到修改稿日期: 2018-03-27

基金项目: 国家自然科学基金青年科学基金资助项目(11404402)

作者简介: 唐凯(1990-),男,硕士研究生,主要从事光纤传感、物联网技术方面的研究。E-mail: tangkai0713@126.com

通信作者: 夏征义(1975-),男,硕士研究生,主要从事物联网技术方面的研究。E-mail: zhy_xia@sohu.com

1 引言

激光器作为常用的有源光学器件,其中以掺杂稀土元素作为增益介质的光纤激光器,具有阈值低、转换效率高、输出调谐范围宽、相位噪声低等特点,在光纤传感网络、物联网等领域有着广泛的应用^[1-3]。多纵模激光器通常输出非稳定的密集多纵模,利用输出各纵模之间的拍频进行传感,根据各纵模拍频的变化可以进行环境温度或应变感知^[4]。在光纤保密通信领域,相对于采用迭代算法生成具有一定周期、快速的伪随机码的方法,利用多纵模光纤激光器动力学机制,将其输出的多纵模随机现象作为物理熵源,产生出无法预测、非周期的物理随机码,更能保证科学计算的准确性与保密系统的安全性^[5]。

长期以来,对激光动力学行为的研究主要集中在时域输出光强特性、偏振动态等范畴,却忽视了从频域角度对激光动力系统的考察。仅考虑低维光强动态的传统动力学模型及光学观测手段本质上是对频域高维激光系统作强制降维,是一种粗粒化的处理方法,忽略了模式群落内部各个模式光强的演变动态以及模式间的竞争与协同行为,从而忽视乃至丢失大量的系统自由度,不足以涵盖真实激光系统中复杂的动力学特征,导致诸如多模激光非稳定性、跳模及多模混沌等一大类问题无法有效解决^[5-6]。从频域角度,激光器在谐振腔内存在大量的本征模式,拥有极大的自由度,从而形成一个高维空间,并可呈现复杂的频域动力学特性。掺铒光纤环形激光器(erbium-doped fiber ring laser, EDFRL)由于自身结构紧凑、简单,改变 EDFRL 的结构以及外部控制参数,其模式输出会表现出丰富的动态特性,因而受到广泛的理论分析与实验研究^[4-6]。通过对抽运光源进行直接调制或者采用耦合环结构等方法^[5,7-8],可以增加 EDFRL 系统的自由度,实现模式的混沌态输出。以往报道多侧重于对该类激光器输出总光强所表现的混沌特性进行研究^[9-10],EDFRL 本质上为密集型多波长光纤激光器^[2-3],谐振腔内可同时存在上百乃至上千个模式参与起振。

自由运转的 EDFRL 在一定的抽运水平下,可呈现出例如模式光强自脉冲、模式间反相动态以及随机多模振荡等^[3],引入外部调制的 EDFRL 由于增加了系统的自由度,会表现出更加复杂的非线性动力学特征。为了测量调制状态下 EDFRL 的输出总光强以及多纵模模式动态特性,进而研究采用 EDFRL 频域内的多个输出模式作为光子熵源^[3],搭建了实验系统,对其抽

运引入正弦电压信号进行外部调制,采用光学外差并结合射频频谱仪的探测技术^[11],精确获取到探测器输出光谱范围内间隔为兆赫兹量级的模式群落的动态输出,实现了对 EDFRL 输出的总光强以及模式群落中部分单纵模同步检测,当两种调制状态下系统输出总光强为混沌态时,密集多纵模振荡中的部分模式在强度上呈现高维混沌或随机特征等非线性动力学特征。

2 实验原理及系统搭建

参考光源为一输出稳定的单纵模激光器,输出频率充当标准频率,其光场可以表示为

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

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。待测激光器在多模振荡条件下,光场可以表示为多个纵模光场的线性叠加:

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

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。输出多纵模的待测激光器与参考光源拍频并经过光电转换后的光强信号可以表示为

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

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。式(3)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。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模式的输出动态。

基于光学外差的探测方法,设计并搭建了两台频差很近的光纤环形激光器系统,图 1(a)为待测光纤环形激光器(erbium-doped fiber ring laser, EDFRL1),采用环形腔结合线型光纤布拉格光栅(fiber bragg grating, FBG)的结构,其中增益介质为 1.9 m 的掺铒光纤(CoractiveER-35-7-PM EDF),整个环形腔的腔长为 12.3 m,计算出对应的纵模间隔为 16.821 MHz。参考光源(EDFRL2)基本结构与 EDFRL1 相同,增益介质为 1.9 m 的掺铒光纤(CoractiveER-35-7-PM EDF),在输出端增加了长为 3 m 的长飞 A 型低掺保偏掺铒光纤作为

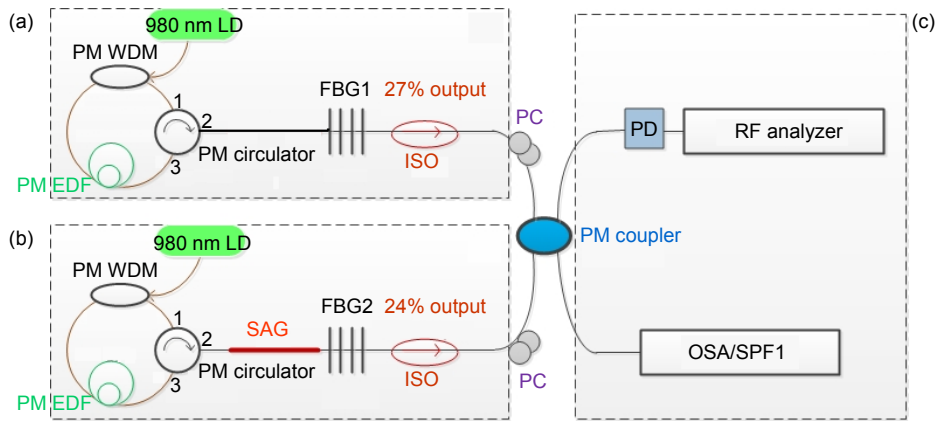


图 1 激光器模式动态测量实验装置图

Fig. 1 Schematic of the experimental setup for laser mode dynamics

饱和吸收体(saturable absorber grating, SAG),使其可以工作在稳定的单纵模输出状态,整个环形腔的腔长为 10.3 m,对应的纵模间隔为 20.087 MHz。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,对应的峰值反射率分别为 0.73 与 0.76, 3 dB 带宽均为 0.12 nm。

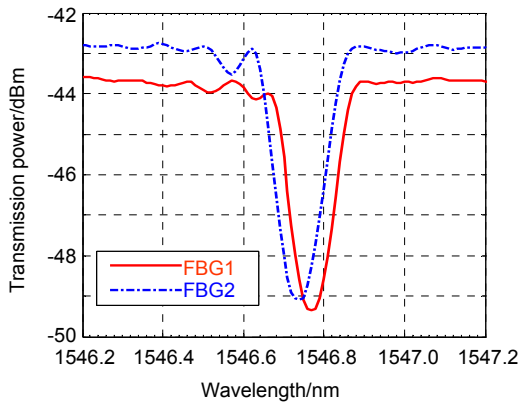


图 2 FBG1 与 FBG2 的透射谱

Fig. 2 Transmission spectrum of FBG1 and FBG2

根据测量到的 EDFRL1 输出斜率效率(图 3(a)所示),对 EDFRL1 的抽运源的驱动电流施加一个正弦电压信号,等效于对其输出功率进行调制。引入正弦电压调制后,抽运的输出功率项变成了 $P=P_0(1+m\sin\omega t)=P_0+\Delta P\sin\omega t$,其中 m 为调制系数,也称调制深度, ω 为调制频率。调制系数 $m=\Delta P/P_0$, m 的变化范围为 0 到 1,所以最大调制功率 $P_{\max}=P_0+\Delta P=2P_0$,最小调制功率 $P_{\min}=0$ 。根据测量得到 980 nm LD 斜率效率(图 3(b)所示),拟合出对应的 $P_{\text{out}}-I_{\text{pump}}$ 关系曲线,大致服从 $P_{\text{out}}=0.48I_{\text{pump}}-5.9$ 。

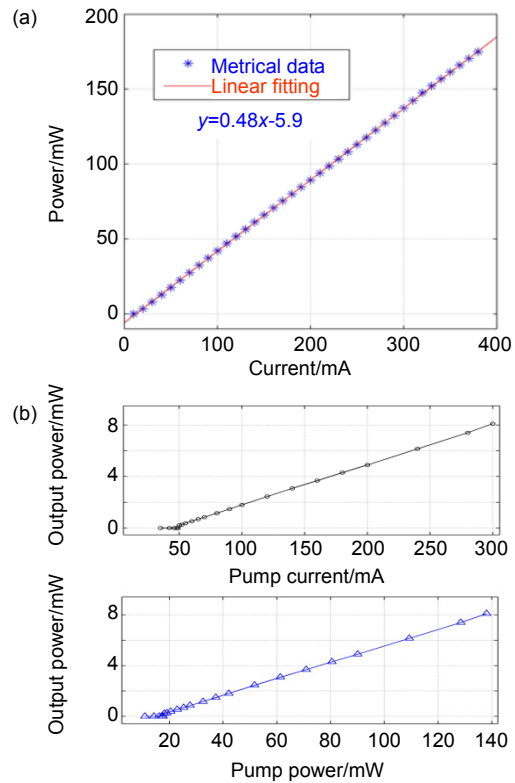


图 3 斜率效率图。(a) EDFRL1; (b) 980 nm LD

Fig. 3 Slope efficiency figure. (a) EDFRL1; (b) 980 nm LD

3 实验结果

3.1 频率调制实验

EDFRL1 的抽运源 980 nm LD 的输入驱动电流与输出功率呈线性正相关,在不同的抽运水平下总光强随外部调制输出的动态演化表现形式相似。抽运功率在 4 倍阈值时,即 $P_0=4P_{\text{th}}$,在该抽运下所能调制的抽运电流 $I_{\max}=(P_{\max}+5.9)/0.48=207.3$ mA。对应的抽运电

流改变量为 $\Delta I = I_{\max} - I_0 = 97.5 \text{ mA}$ 。根据探测器响应参数 ($\text{mA/V} = 200$) 可得最大调制幅度为 $\Delta I \times 200 = 0.4875 \text{ V}$ 。

频率调制实验中保持调制深度 $m = 0.85$ (即调制幅度为 0.414 V)，通过改变施加在 EDFRL1 的 980 nm LD 上的正余弦电压信号，频率在 1 kHz 到 40 kHz 范围内进行变化，监测激光器输出总光强的动态输出。对总光强信息采用了寻找输出强度峰值的算法，得到图 4 所示的总光强输出随抽运调制频率变化的分岔图。

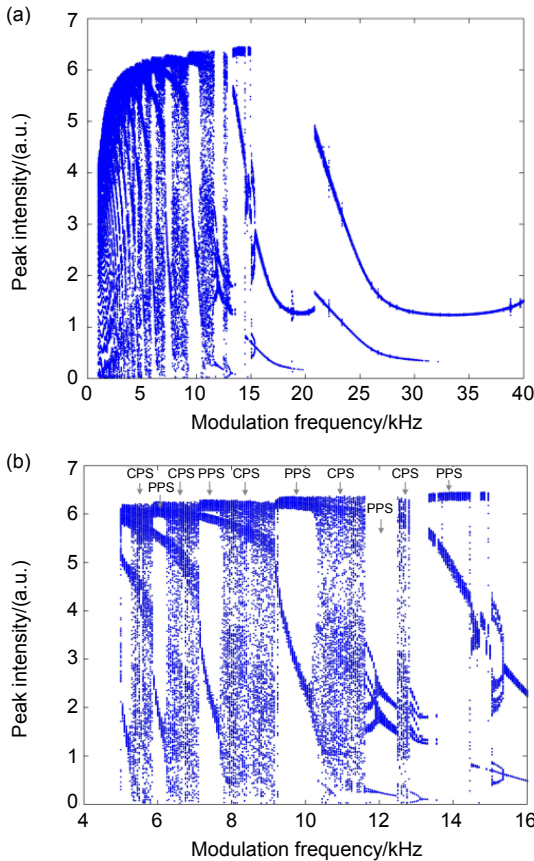


图 4 输出总光强随调制频率变化的分岔图。

(a) $1 \text{ kHz} \sim 40 \text{ kHz}$; (b) $4 \text{ kHz} \sim 16 \text{ kHz}$

Fig. 4 Bifurcation of total intensity with frequency modulation. (a) $1 \text{ kHz} \sim 40 \text{ kHz}$; (b) $4 \text{ kHz} \sim 16 \text{ kHz}$

结合图 4 所示，在调制频率从 4 kHz 到 16 kHz 范围内总光强分岔图的局部放大图中，可以清晰地观察到在频率变化范围内激光器总光强输出的动态变化特性以及输出多周期态和混沌态的具体路径，得到在 5.5 kHz 到 5.9 kHz ， 6.3 kHz 到 7.3 kHz ， 7.9 kHz 到 9 kHz 以及 10.7 kHz 到 11.3 kHz 的调制频率范围内，激光器的总光强输出峰值是混沌态，激光器总光强的输出主要通过阵发与反倍周期分岔两种途径在周期态 (periodic pulse state, PPS) 与混沌态 (chaotic pulse state, CPS) 之间进行切换 (这样的切换是可逆的)。随着调制

频率的持续增大，当超过 15.4 kHz 时，混沌态输出区域消失，激光器的总光强输出逐渐稳定到双周期至单周期状态。

图 5 显示了调制频率从 10 kHz 到 10.8 kHz 范围内局部频率的总光强强度时域演化图与相对强度噪声 (relative intensity noise, RIN) 谱图，总光强强度输出与分岔图观察到的结果相一致。此外，当总光强输出为周期态时，RIN 谱图显示对应频率下谐波分量的谱线，

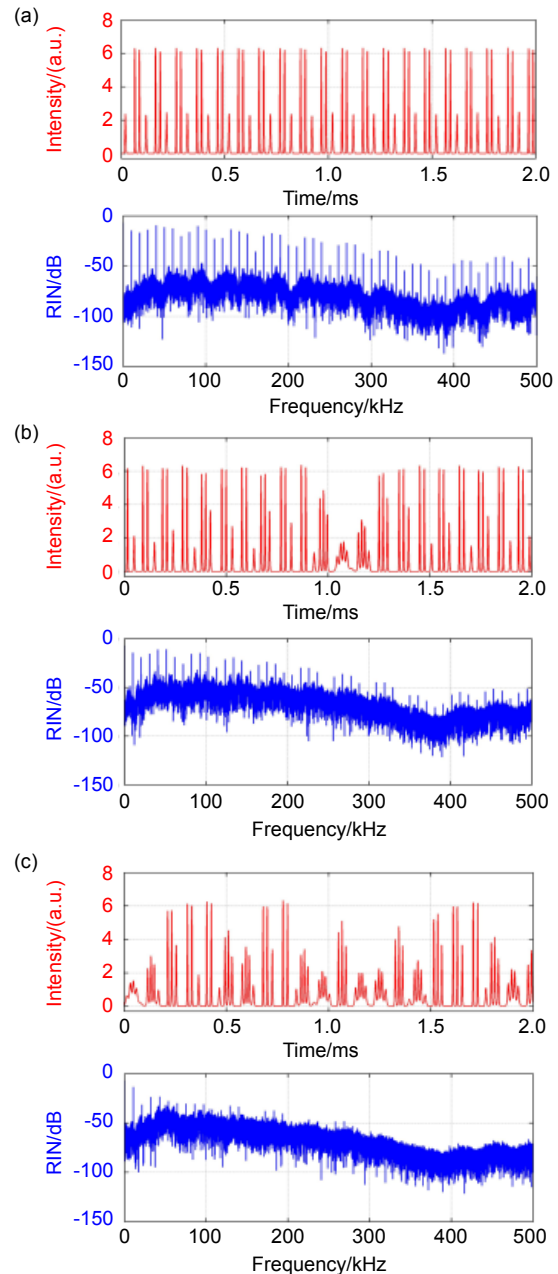


图 5 频率调制总光强与相对强度噪声谱。(a) 三倍周期态; (b) 阵发态; (c) 混沌态

Fig. 5 Total intensity and relative intensity noise (RIN) spectrum. (a) Triple periodic state; (b) Popping state; (c) Chaotic state

而调制频率在 10.8 kHz 处，总光强输出为混沌态时，其 RIN 谱图呈现出平坦性，这也符合混沌态的表现特性^[7,9-10]。

3.2 强度调制实验

强度调制实验中同样对 EDFRL1 抽运的驱动电流引入正弦电压信号作为调制项，将抽运偏置设置在 4 倍阈值($P_0=4P_{th}$)处，固定调制频率为 12 kHz，通过改变电压幅度，得到调制深度从 0 到 1 范围内变化的总光强峰值强度分岔图，如图 6 所示。随着调制深度的逐步增大，总光强时域的初始输出由单周期状态逐步演化为不稳定的三周期以及多周期状态，当调制系数 m 超过 0.83 时，总光强输出混沌态，如图 7 所示。整个幅度调制实验过程可以看到，EDFRL1 的总光强进入混沌态输出的路径是倍周期分岔。

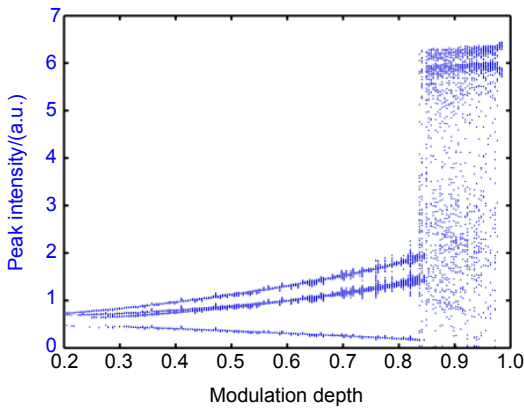


图 6 输出总光强随调制强度变化的分岔图
Fig. 6 Bifurcation of total intensity with intensity modulation

结合总光强强度分岔图也可以看到，调制深度为 $m=0.82$ (抽运调制幅度为 429 mV)时，总光强输出为 3 倍周期态。当调制深度 m 达到 0.85(抽运调制幅度为 460 mV)时，总光强输出为混沌态。

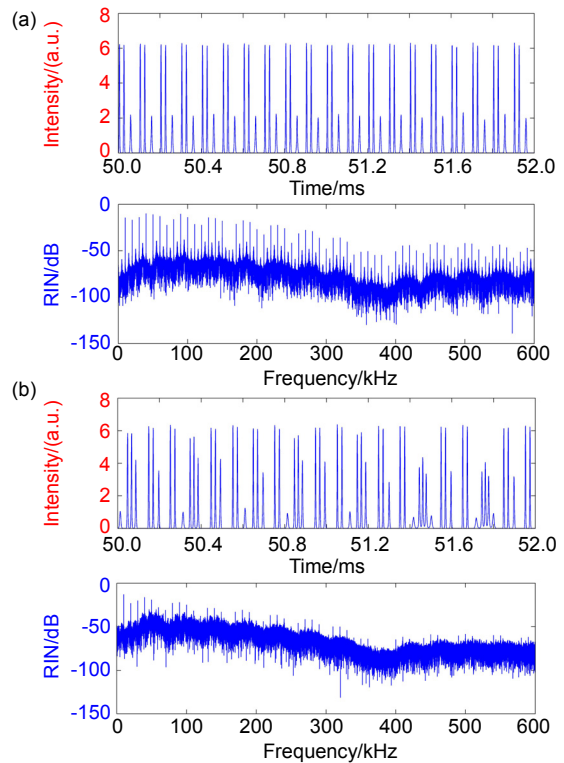
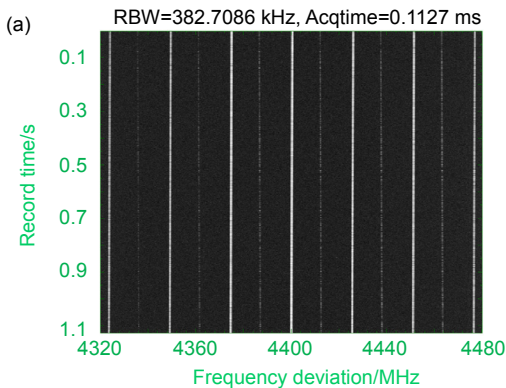


图 7 频率调制总光强与相对强度噪声谱。(a) 三周期; (b) 混沌态
Fig. 7 Total intensity and relative intensity noise (RIN) spectrum. (a) Triple periodic state; (b) Chaotic state

3.3 多纵模动态输出提取

基于光学外差探测方法并结合射频频谱分析仪，获取到 EDFRL1 输出模式群落中部分单纵模强度的时域演化图。

在频率调制状态下，保持调制幅度不变，当调制频率为 10.8 kHz，即 EDFRL1 总光强输出为混沌态时，获取到输出模式群落中起振强烈的部分模式的时频动态演化特性，如图 8 所示。在强度调制状态下，保持

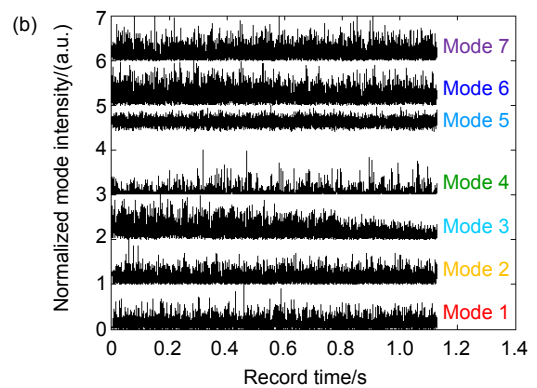


图 8 频率调制混沌态部分多模时频瀑布图与时域强度信息图。(a) 模式时频瀑布图; (b) 强度二维图
Fig. 8 Multi-mode oscillation with frequency modulation and mode intensity time series. (a) Mode time-frequency fall graph; (b) Mode intensity two dimension graph

调制频率不变,当调制深度达到 0.94(抽运调制幅度为 460 mV),EDFRL1 的总光强输出为混沌态时,模式群落中部分单纵模强度的时域演化图如图 9 所示。

4 数据分析

在调制频率为 10.8 kHz 处总光强输出为混沌态时,实时获取到从 4.32 GHz 到 4.48 GHz 的 160 MHz 范围内(分辨率带宽和单帧采样时间如瀑布图题目所示)的多纵模振荡,同时提取其中振荡强烈的 7 个模式的强度时间序列,通过相空间重构的方法^[12-13],基于互相关法^[12]得到单个模式强度时序的嵌入时延 T ,采用 CAO 方法^[12]得到嵌入维数 D 以及关联维数的最大

似然估计 $D_{\text{takens}}^{[13]}$,如表 1 所示。强度调制状态下抽运调制深度 m 为 0.94 时总光强输出为混沌态,提取 4.49 GHz 到 4.65 GHz 范围内的 6 个单纵模的时间强度序列,经过相空间重构以后,计算出的有关参数如表 2 所示。

抽运频率调制状态下 EDFRL 增益介质中的离子对经过外部调制而产生饱和吸收作用,总光强通过阵发与叉型分岔两种途径在周期态(PPS)与混沌态(CPS)之间进行切换。激光器输出的模式群落中,计算得到模式强度时序的嵌入时延普遍比较高,激光器系统输出的多纵模具有一定的差异,有些纵模混沌特征明显,而有些纵模的关联维数最大似然估计不收敛,表现出

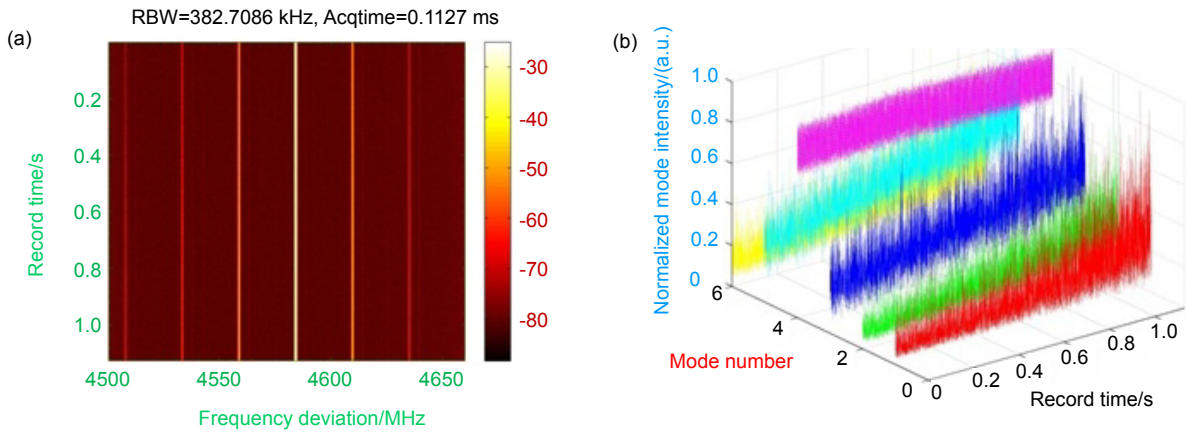


图 9 强度调制混沌态部分多模时频瀑布图与时域强度信息图。(a) 模式时频瀑布图; (b) 强度三维图
Fig. 9 Multi-mode oscillation with intensity modulation and mode intensity time series. (a) Mode time-frequency fall graph; (b) Mode intensity three dimension graph

表 1 调频实验混沌态下多纵模相空间重构参数

Table 1 Multi-mode phase space reconstruction parameters with frequency modulation

	Mode1	Mode2	Mode3	Mode4	Mode5	Mode6	Mode7	Total mode
T	8	8	9	11	10	9	8	9
D	6	8	7	6	5	7	8	4
D_{takens}	3.6±0.2	3.7±0.1	3.2±0.2	Not convergent	Not convergent	Not convergent	4.6±0.1	2.8±0.1

表 2 调幅实验混沌态下多纵模相空间重构参数

Table 2 Multi-mode phase space reconstruction parameters with intensity modulation

	Mode1	Mode2	Mode3	Mode4	Mode5	Mode6	Total mode
T	19	14	11	8	15	16	8
D	9	10	8	9	10	10	6
D_{takens}	Not convergent	2.5±0.1	3.3±0.2	Not convergent	2.6±0.2	Not convergent	2.1±0.1

类随机的特性。随着总光强输出在调制频率为 10.8 kHz 处输出混沌态,部分单个纵模的最大似然估计 D_{takens} 明显变大(最大为 4.6 ± 0.1),表明此时激光器输出多纵模高维度的混沌状态^[12-13]。对抽运电压幅度进行调制,当电压幅度超过一定范围时,即调制深度 m 达到 0.85 以后,对系统来说增益介质中离子对猝灭效应显著,引起谐振腔内自组织饱和吸收的作用^[13-14],对激光光强形成内部调制,使得总光强输出为混沌态,提取的部分单个纵模强度的时间序列具有较高的关联维数。强度调制状态下不同的纵模所表现的特征有差异,此时激光器输出的多纵模混沌态也是高维的。

EDFRL 的模式输出行为由内部复杂的非线性关系所支配,模式间复杂而相互依赖的过程,共同表现出自组织行为。在抽运作用下,模式间同时相互放大、传递能量形成反馈,总光强表现出的周期分岔与不稳定的三周期行为,展现了 EDFRL 系统逐渐远离平衡的具体路径,各模式呈现出包括混沌在内的动力学行为,系统和外界构成的整体熵增加。对抽运引入调制增加了激光器系统内部的复杂性,相邻纵模间由于间隔相对较小(为兆赫兹量级),产生的交叉耦合作用较强,导致描述纵模强度时序的状态参量有很大的相关性,表现在经过相空间重构得到的 3 个描述参量有所关联。所有起振的纵模共同经过增益介质中上能级反转粒子的作用,但该作用由于纵模间存在的复杂模式竞争、交叉耦合以及系统内部的自组织作用^[12,14],不可能将光场中的能量均衡、稳定地分配给各个纵模,使得各个单纵模强度时间序列相空间重构以后关联维数的最大似然估计等状态参量不尽相同。

5 结论

采用改变抽运调制频率与调制深度两种方法,实现了 EDFRL 的时域混沌输出,获取到调制状态下的 EDFRL 系统输出的模式动态特性以及总光强输出进入混沌态的具体路径,利用基于光学外差的频域测量方法对 EDFRL 总光强输出混沌态的多模动态特性展开测量分析,测量发现混沌 EDFRL 长期处于宽带密集型多纵模结构,瞬时光谱与纵模结构处于复杂的动态变化之中。通过进一步提高频域分辨率,测得模式群落中部分纵模的瞬时谱线线形随时间剧烈变化,当 EDFRL 总输出光强为低维混沌信号时,频域内各个模式作为局部变量,出现频率调制及谱线加宽,并且瞬时谱线线形随时间剧烈变化;同时,在强度上具有高

维混沌特性或者随机特性,即 EDFRL 的纵模结构由若干混沌模式与随机模式组成,所有模式的总光强呈现为时域混沌信号。

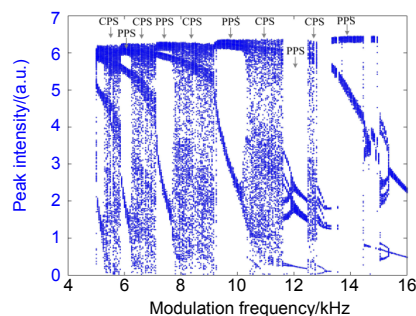
参考文献

- [1] Otsuka K. *Nonlinear Dynamics in Optical Complex Systems*[M]. Tokyo: KTK Scientific Publishers, 1999.
- [2] Liang X. Investigation of noise analysis and suppression technologies in fiber optic hydrophone system[D]. Changsha: National university of Defense Technology, 2008: 55-70. 梁迅. 光纤水听器系统噪声分析及抑制技术研究[D]. 长沙: 国防科技大学, 2008: 55-70.
- [3] Ma M X. Study on frequency-domain dynamics and evolution characteristics of erbium-doped fiber ring laser[D]. Changsha: National University of Defense Technology, 2015: 44-54. 马明祥. 掺铒光纤环形激光器频域动力学特性及演化规律研究[D]. 长沙: 国防科技大学, 2015: 44-54.
- [4] Yin Z W, Gao L, Liu S C, et al. Fiber ring laser sensor for temperature measurement[J]. *Journal of Lightwave Technology*, 2010, **28**(23): 3403-3408.
- [5] Krüger T S, Rech P C. Dynamics of an erbium-doped fiber dual-ring laser[J]. *The European Physical Journal D*, 2012, **66**(1): 12.
- [6] Franz A L, Roy R, Shaw L B, et al. Effect of multiple time delays on intensity fluctuation dynamics in fiber ring lasers[J]. *Physical Review E*, 2008, **78**(1 Pt 2): 016208.
- [7] Brunel M, Özkul C, Sanchez F. Dynamics of a laser with a reverse saturable absorber[J]. *Applied Physics B*, 1999, **68**(1): 39-44.
- [8] Ma M X, Hu Z L, Xu P, et al. Mode hopping detection for fiber laser based on dynamic phase changes in interferometer[J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2012, **39**(6): 0602013. 马明祥, 胡正良, 徐攀, 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.
- [9] Krüger T S, Rech P C. Dynamics of an erbium-doped fiber dual-ring laser[J]. *The European Physical Journal D*, 2012, **66**(1): 12.
- [10] Brunner D, Porte X, Soriano M C, et al. Real-time frequency dynamics and high-resolution spectra of a semiconductor laser with delayed feedback[J]. *Scientific Reports*, 2012, **2**: 732.
- [11] Tang K, Wang J J, Ma M X, et al. Experimental study on mode hopping detection of fiber ring laser based on heterodyne detection[J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2015, **42**(S1): 102003. 唐凯, 王俊杰, 马明祥, 等. 基于光学外差的光纤环形激光器跳模检测实验研究[J]. 中国激光, 2015, **42**(S1): 102003.
- [12] So P, Ott E, Schiff S J, et al. Detecting unstable periodic orbits in chaotic experimental data[J]. *Physical Review Letters*, 1996, **76**(25): 4705-4708.
- [13] Pendry J B. Negative refraction makes a perfect lens[J]. *Physical Review Letters*, 2000, **85**(18): 3966-3969.
- [14] Tang K, Wang J J, Ma M X, et al. Numerical analysis for dynamical output in free-running multi-longitudinal mode erbium doped fiber laser[J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2016, **53**(1): 011403. 唐凯, 王俊杰, 马明祥, 等. 自由运转多纵模掺铒光纤激光器动态输出数值研究[J]. 激光与光电子学进展, 2016, **53**(1): 011403.

Experimental observation for multi-mode dynamic output of fiber ring laser based on modulation condition

Tang Kai, Xiao Yanping, Liu Hai, Xia Zhengyi*, Li Feng, Wang Cheng

Institute of Logistics Science and Engineering, Academy of Military Science, Beijing 100166, China



Bifurcation of total intensity with frequency modulation

Overview: Aiming at the phenomena of complex multimode dynamics occurring in practical applications of fiber ring laser (FRLs), this thesis has put forward an improved real-time multichannel frequency-domain monitoring method, which breaks up frequency-domain limitations of traditional measuring tools for laser dynamics. This breakthrough promotes the understanding and analysis on nonlinear dynamics of FRLs from a low dimension to higher, also revealing the complicated correlation between the individual behavior and the collective behavior of dense longitudinal modes and corresponding inherent physics.

The frequency-domain dynamics of laser is a hard problem in the field of optical complex systems. Actually, FRLs belong to a type of optical complex system with large degree of freedom, exhibiting such nonlinear mode dynamics as complex mode hopping, high-dimensional chaos. This thesis adopts erbium doped fiber ring laser (EDFRL) as the research object.

Based on both optical heterodyne and joint time-frequency analysis, a novel frequency-domain method for monitoring multimode dynamics of fiber lasers is proposed. This method has a frequency resolution of kHz-magnitude, and can be used to extract simultaneously the nonlinear time series of multi parameters, i.e., frequency and intensity for dense modes of EDFRL. Experimentally, the frequency-domain dynamics of modulated EDFRL is measured and analyzed, which reveals the complex interaction and evolutionary law between the individual behavior and the clustering behavior of modes. The EDFRL with a FBG as wavelength selector is usually considered as a typical single-wavelength laser. However, hundreds of intrinsic modes coexist within the reflective band of FBG and present unsteady multi-longitudinal-mode (MLM) oscillations under autonomous conditions. With the help of optical heterodyne and joint time-frequency analysis method, the fruitful local dynamical phenomenon of the dense modes generated by this kind of EDFRLs are clearly obtained for the first time, which demonstrates that the individual mode shows a typical chaotic behavior whereas the total modes clustering behaves steadily.

A modulated chaotic EDFRL is a typically low-dimensional dynamical system, into which an additional freedom is introduced to realize chaos output. Similarly, this system contains a large number of dense longitudinal modes. Moreover, the dynamics and evolution of these modes in frequency domain are still unclear when the total output of the system is chaotic. By improving the frequency resolution of optical heterodyne and joint time-frequency analysis, the temporal evolution of the frequency, spectrum and intensity of a single mode in chaotic EDFRL are extracted respectively. It is found that when the total intensity exhibits low-dimensional chaos, the frequency modulation and spectral broadening phenomena occur for a single mode in frequency domain, and the mode intensity is characterized by high-dimensional chaos or random fluctuation.

Citation: Tang K, Xiao Y P, Liu H, *et al.* Experimental observation for multi-mode dynamic output of fiber ring laser based on modulation condition[J]. *Opto-Electronic Engineering*, 2018, 45(10): 180041

Supported by National Natural Science Foundation for Youth Scientists of China (11404402)

* E-mail: zhy_xia@sohu.com