

自由运转多纵模掺铒光纤激光器动态输出数值研究

唐凯 王俊杰 马明祥 徐攀* 胡正良

国防科技大学海洋科学与工程研究院, 湖南长沙 410073

摘要 掺铒光纤激光器(EDFL)从频域的角度可以分为单纵模(SLM)掺铒光纤激光器与多纵模(MLM)掺铒光纤激光器。MLM-EDFL属于复杂的高维动力学系统,比SLM-EDFL拥有更多的自由度与更复杂的激光动力学特性。为理论研究分析MLM-EDFL的频域动态特性,建立了关于EDFL多模激光频域动力学模型,模型中将MLM-EDFL的各个模式光场强度及其享有的增益粒子数分别作为独立的物理参量来处理,并考虑由于增益介质中铒离子对的猝灭效应而对模型引入额外的自由度;所建多模激光频域动力学模型可有效描述频域内多个模式的个体行为及集群行为,在数值研究中重现了激光频域高维动力系统所特有的多模动态特性。

关键词 激光器; 光纤激光器; 离子猝灭效应; 多模系统; 频率动态

中图分类号 TN248

文献标识码 A

doi: 10.3788/LOP53.011403

Numerical Analysis for Dynamical Output in Free-Running Multi-Longitudinal Mode Erbium Doped Fiber Laser

Tang Kai Wang Junjie Ma Mingxiang Xu Pan Hu Zhengliang

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

Abstract Erbium doped fiber laser (EDFL) is divided into multi-longitudinal mode (MLM) laser and single-longitudinal mode (SLM) laser according to the frequency domain. The multi-longitudinal mode laser is hard to understand in the field of optical complex systems. Actually, fiber lasers belong to a type of optical complex system with large degree of freedom, hundreds and thousands of longitudinal modes can typically coexist, exhibiting such nonlinear mode dynamics as complex mode hopping and high-dimensional chaos. However, most of the theoretical models and experimental tools for analyzing fiber lasers dynamics only focus on the collective behavior of dense longitudinal modes, omitting the dynamics individual modes, frequency-domain dynamic model for multi-mode fiber lasers is established, in which the quenching effect in ion pairs and the cross coupling mechanism among modes are considered. The multi-mode laser models can effectively describe the individual behavior and clustering behavior of a large number of modes, and reproduce theoretically the multi-mode dynamics of high-dimensional dynamical system in frequency domain.

Key words lasers; fiber laser; ion quenching process; multi-mode system; frequency-domain dynamics

OCIS codes 140.3510; 140.3560; 140.3500

1 引言

光纤激光器在光纤通信、光纤传感、军事国防、生物医学等领域应用广泛,因而受到人们的普遍关注^[1-4]。光纤激光器主要采用掺杂稀土元素的光纤作为增益介质,抽运光在纤芯内造成掺杂离子能级的粒子数反转,通过适当引入正反馈回路构成谐振腔,便可形成激光振荡。一般而言,环形腔光纤激光器与长直腔光纤激光器的谐振腔较长,具有较小纵模间隔与密集纵模结构等特点^[5],导致在激光增益带宽或损耗带宽内寄居大量的本征模式,即光纤激光器在频域内拥有极大的自由度,从频域角度看光纤激光器本质上属于大自由度系统^[5-6]。

收稿日期: 2015-08-12; 收到修改稿日期: 2015-08-28; 网络出版日期: 2015-12-23

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

*通信联系人。E-mail: hbpanpan@163.com

自由运转的长直腔或环形腔光纤激光器往往输出非稳定的密集多纵模^[7-9]。每个振荡模式均可作为描述激光系统行为的一个自由度。然而,对多纵模掺铒光纤激光器(MLM-EDFL)频域动态的实验观测及理论仿真,主要处于对低自由度动态特性的研究层面,对光纤激光器频域内大自由度动力学特性研究还正处于起步阶段^[7-8]。目前的研究方法是将 MLM-EDFL 这一大自由度非线性系统的动态行为在频域内作降维处理^[9],该处理方式只考虑谐振腔内单个或两个模式群落的整体的总光强动力学行为,而忽略了模式群落内部的纵模结构演变过程、以及大量密集模式之间的竞争与协同行为。

本文基于光纤激光器增益介质中离子对的猝灭效应在掺铒光纤激光器(EDFL)输出非稳定动态特征中起到的角色与作用,将离子对猝灭效应考虑在内,建立了关于 EDFL 的多纵模激光动力学方程。分别对自由运转的双纵模 EDFL 与 MLM-EDFL 频域内的模式动力学行为进行了具体的数值仿真,分别分析讨论了离子对浓度及抽运系数对模式动态演化规律的影响,进而探索在自由运转条件下掺铒光纤激光器产生非稳定、多状态动态输出的潜在机制。

2 理论模型

光纤激光器中,作为增益介质的掺铒光纤中的铒离子可分为两部分,即孤立离子与离子对(离子团簇),激光光场与这两种状态的离子系统都会发生作用^[7,9]。增益介质中铒离子浓度的增加,离子间的平均距离会减小,导致离子间的相互作用增强^[7-8]。在建立描述光纤激光器非稳定动态输出的动力学模型时,孤立离子由二能级系统描述,而离子对由三能级系统描述^[9-10]。通过简化处理,离子对能级结构可看作两个二能级孤立离子的叠加组合成一个三能级系统^[8-9]。对于 MLM-EDFL 而言,纵模间隔(FSR)一般在数十兆赫兹量级,可同时有上百个纵模参与起振^[5]。自由运转的 MLM-EDFL 可看作一个高维动力学系统,为理论研究多模激光的动力学特性,需要建立相应的多模激光动力学速率方程。考虑到在激光场中有多个模式起振,同时也将增益介质中基于离子对猝灭效应的饱和吸收机制考虑在内。在真实的 MLM-EDFL 系统中,每个模式在光场中的损耗往往具有一定差异,理论分析中为简化处理,近似认为所有模式背景损耗相同,即所有模式的光子寿命相同。另外,对于具有密集纵模结构的 EDFL,由于纵模间隔较小,不同模式间的受到抽运作用差异性甚低,模式之间的交叉耦合与协同行为十分复杂。综合考虑,建立 EDFL 的多模激光速率方程如下:

$$\frac{\partial d_j}{\partial t} = \gamma_i \Lambda - a_2(1 + d_i) - 2d_i \left(I_i + \sum_{j \neq i}^n \beta_j I_j \right), \quad (1)$$

$$\frac{\partial d_+}{\partial t} = a_2(1 - d_+) - a_{22}(d_+ + d_-)/2 + y \sum_{i=1}^n I_i(2 - 3d_+), \quad (2)$$

$$\frac{\partial d_-}{\partial t} = \Lambda - a_2(1 - d_-) - a_{22}(d_+ + d_-)/2 - y \sum_{i=1}^n I_i d_-, \quad (3)$$

$$\frac{\partial I_i}{\partial t} = \left[-1 + A(1 - 2x) \left(d_i + \sum_{j \neq i}^n \beta_j d_j \right) + Axyd_- \right] I_i, \quad (4)$$

式中 I_i 表示第 i 个激光模式的光强, d_i 表示第 i 个激光模式对应孤立离子的能级粒子数反转; d_+ 与 d_- 描述了离子对能级粒子数反转的动态行为, Λ ($\Lambda = r \cdot \Lambda_{th}$, 其中 r 表示抽运倍率, Λ_{th} 表示抽运阈值) 表示抽运速率, 光子的归一化速率表示为 τ_i , 增益介质中的离子总浓度为 N_0 , 离子对所占的比例为 x , $A = \sigma_i N_0 \tau_i$, $a_i = \tau_i / \tau_i$, $y = \sigma_{ij} / \sigma_i$, 其中 σ_{ij} 为对于受激铒离子对的吸收交叉项, σ_i 是孤立离子的吸收交叉项。由于 EDFL 属于均匀加宽激光器, 振荡模式之间存在一定程度交叉耦合与模式竞争, β_j 表示多个模式之间的交叉耦合系数, γ_i 表示体现在多个模式之间的受到抽运作用各向异性因子; 在整个激光场中参与起振的模式总数为 n , 则速率方程组中包含的方程个数为 $2n+2$ 。在 n 个模式当中, 由于模式之间的相互竞争会存在一个优势模式, 该模式对应的抽运阈值最低且易于起振, 将优势模式设置为 mode1(I_1)。

3 仿真分析

根据以上激光速率方程, 从讨论输出双模式入手, 采用四阶自适应步长 Runge-Kutta 算法对其激光动力学特性进行了数值仿真, 理论分析了铒离子对浓度 x 与抽运速率 Λ 对两个模式光强动态特性的影响。仿真参量取值为 $\Lambda_{th} = 11.035$ mV, $\tau_2 = 10$ ms, $\tau_1 = 200$ ns, $\tau_{12} = 10$ ms, $\tau_{22} = 2$ μ s, $y = 0.3$, $\sigma_1 = 1.6 \times 10^{-10}$ cm³·s⁻¹, $N_0 = 5 \times 10^{18}$ cm⁻³,

$\beta=0.5, \gamma=0.88$ 。

图1表示在保持抽运速率 Λ 不变时,双模式中的mode1光强时序极大值随离子对浓度 x 变化的分岔图,图1(a)与(b)对应的抽运系数分别为 $r=2.5$ 和 $r=4$ 。如图1所示,随 x 在4%~14%范围内逐渐增加,mode1光强动态演化路径依次为:连续波(CW)→1倍周期态(1P)→2倍周期态(2P)→5倍周期态(5P)→3倍周期态(3P)→混沌态。图1(a)中的嵌入小图表示3倍周期态时mode1的脉冲光强时序,其中较强的两个脉冲峰值十分接近;这里指出,该图中3倍周期态窗口内($x=0.1$ 附近)较粗的上轨迹线是由相距很近的两条轨迹线叠加组成,并且窗口内存在十分狭窄的阵发混沌带。图1(b)中随 x 在4%~14%范围内逐渐增加,mode1光强动态演化路径依次为: CW→1P→2P→准周期态(QP)→混沌态→QP→3P。相比而言,图1(b)的混沌窗口远比图1(a)的混沌窗口窄许多,这是由较高的抽运速率所致;在高抽运条件下,铟离子对对激励光的吸收趋于饱和状态,从而削弱对mode1的光强调制,使模式难以进入混沌态;仿真过程中还发现,当进一步提高抽运速率时mode1的光强时序均为连续信号。无论mode1处于CW、QP、周期态或混沌态,由于存在相互耦合作用影响,另一个模式mode2也是处于对应的同样状态,只是具体细节不同。

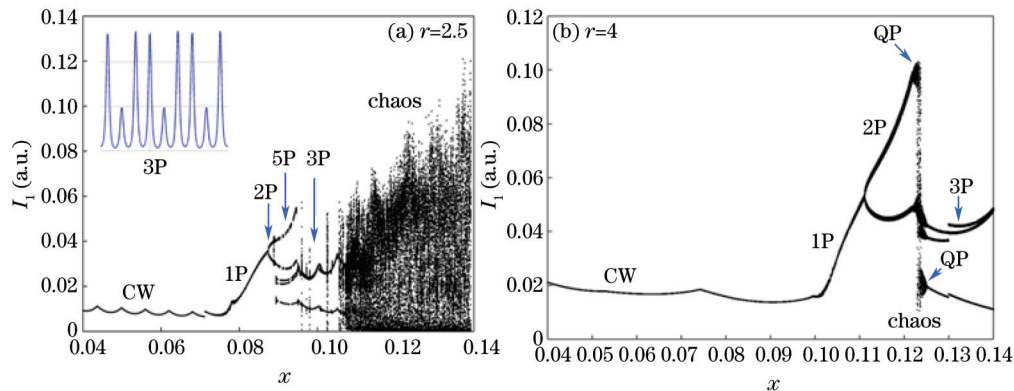


图1 mode1随离子对浓度变化分岔图

Fig.1 Bifurcation diagram of mode1 for increasing ion concentration

当离子对浓度 x 高达一定水平($x=8.2\%$)时,mode1与mode2在适当的抽运速率下会呈现自脉冲现象(包

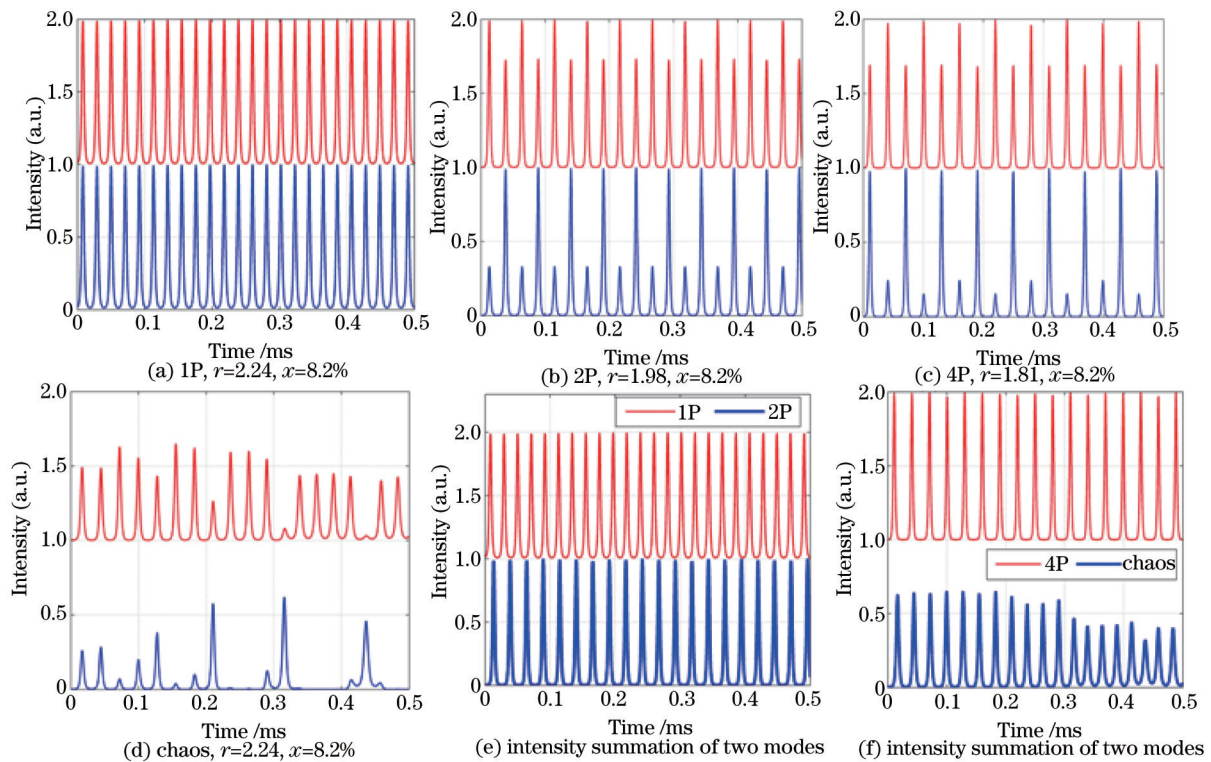


图2 不同抽运下两模式强度时序

Fig.2 Time evolution of two mode at different pumping rates

括周期、非周期脉冲)。数值研究时保持 x 不变,改变抽运速率,发现两个模式会通过倍周期分岔、阵发、准周期等途径从周期态进入混沌状态,并可得到与图 1 相似的分岔图。图 2 (a)~(d)分别表示 mode1 与 mode2 稳态运转的归一化光强时序,描述了 mode1 与 mode2 在抽运系数 r 从 2.24 降至 1.73 过程中经倍周期分岔途径进入混沌,由图 2[(a)~(d)上部分为 mode1,下部分为 mode2]可知,在 1 倍周期态时 mode1 与 mode2 处于同相脉冲状态,而在 2、4 倍周期态时 mode1 与 mode2 分别互为反相动态。如图 2 (e)、(f)所示,当 mode1 与 mode2 处于 1、2 与 4 倍周期态时,两个模式之和却呈现单周期脉冲,而混沌态时两个模式光强之和呈现不规则的非周期脉冲;即在 mode1 与 mode2 分别输出多周期脉冲时,两个模式通过相互耦合与协同使得总光强输出单周期脉冲。

根据相空间重构、关联维数计算等方法^[11-13],对 mode2 光强演化动态进行非线性时序分析,结果如图 3 所示。图 3(a1)~(a4)表示 mode2 处于 1、2、4 倍周期态及混沌态时的状态空间轨迹,横纵坐标分别为 I_2 、 d_2 时序的归一化值;而图 3(b1)~(b4)分别表示相应的相对强度噪声谱(RIN)。如图所示,当 mode2 处于 1、2、4 倍周期态时,状态空间内的极限环个数也分别为 1、2、4;同时,在相应的 RIN 谱级中分别存在 1、2 及 4 分频。另一方面,当 mode2 处于混沌态时,状态空间轨迹表现为奇异吸引子,RIN 谱级则具有连续性宽带的频谱特性。

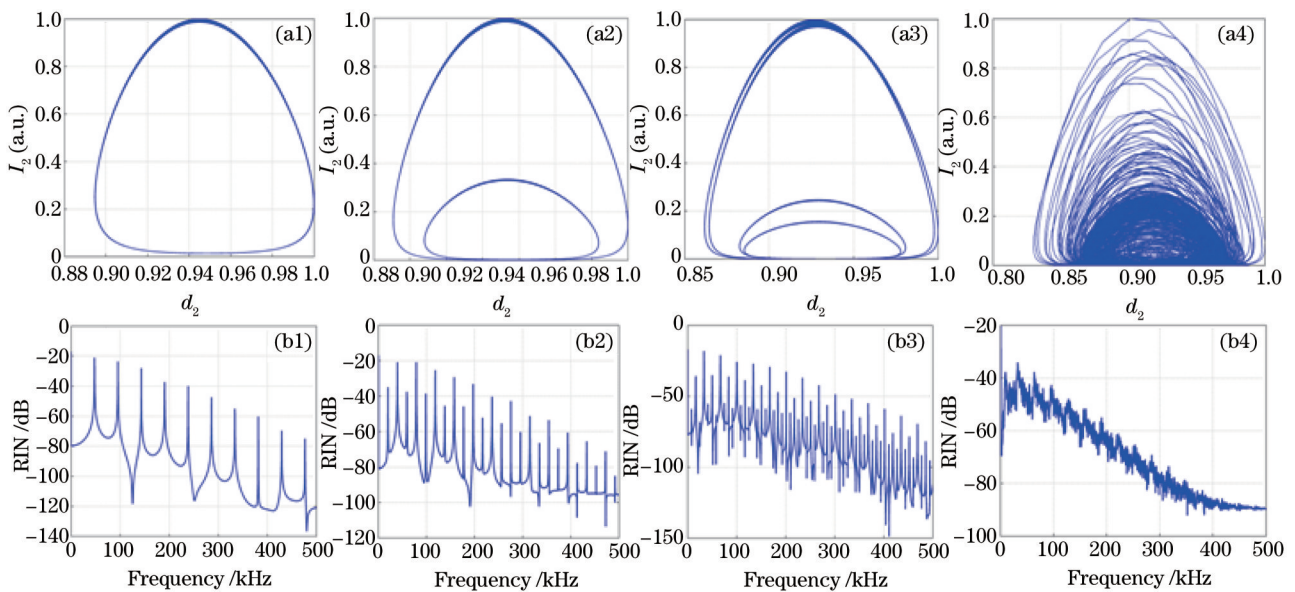


图 3 Mode 2 强度不同输出下的状态空间与相对强度噪声谱

Fig.3 State diagram and RIN spectrum for different outputs of mode 2

图 4(a)表示混沌态下 mode2 光强时序的递归图,图中左上角与右下角分别表示考虑嵌入时延与嵌入维数与非嵌入两种情况。非嵌入时递归图具有复杂的空间图样,而嵌入后递归图中出现一系列与对角线平行的短斜线,表明其状态空间的吸引子中存在非稳定的周期轨道。采用改进的 GP 算法^[13]计算了混沌态下 mode2 光强时序的关联积分与关联维数,随嵌入维数增加关联积分曲线的斜率趋于饱和,在图 4(b)中斜率曲线呈现明显的平台区(无标度区),计算得到的关联维数为 2.85。上述数值仿真表明,自由运转的双模 EDFL 系统在一定抽运水平下产生模式光强自脉冲或自发混沌现象。自发混沌的物理机制体现为增益介质

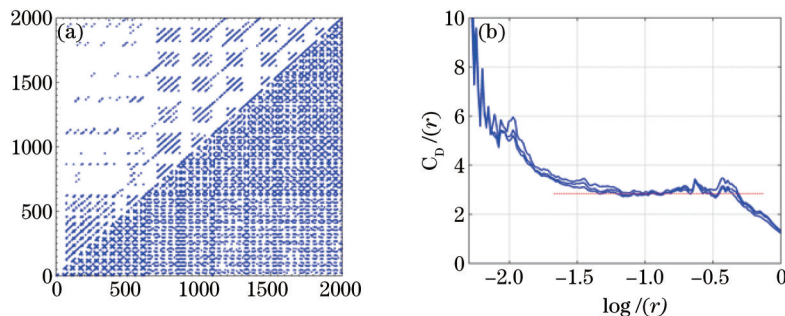


图 4 mode 2 非线性时间序列分析

Fig.4 Nonlinear time series analysis for mode 2

内基于铷离子对猝灭效应的自组织饱和吸收作用,这种饱和吸收作用对每个起振模式进行光强调制,相当于在双模 EDFL 速率方程中引入一个自由度。

对 MLM-EDFL(考虑光场中存在 5 个模式情况)的激光动力学特性进行数值仿真。每两个模式之间的交叉耦合系数均设置为 0.4;除了优势模式 mode1($\gamma_1=1$),由于纵模间隔较小其他四个模式的抽运各向异性因子均设置为 0.95;即 $\beta_i=0.4, \gamma_i=0.95(i \neq 1)$;其他参量取值与双模仿真中其他参数的设置相同。

仿真发现当离子对浓度高达一定水平时($x=9\%$),mode1~mode5 在适当的抽运速率下会呈现自脉冲现象(包括周期、非周期脉冲);改变抽运速率 r 或离子对浓度 x ,mode1~mode5 会通过阵发、倍周期分岔、准周期等途径进入混沌。图 5 描述了 mode1~mode5 分别同时处于 3 倍周期态($x=9\%, r=2.5$)。由图 5(a)可知,mode2~mode4 一起处于同相状态,mode1 与 mode2~mode4 的脉冲时序分别构成反相动态;即当 mode1 输出强脉冲时,mode2~mode4 同步输出弱脉冲,反之,mode2~mode4 则同步输出强脉冲。基于模式间的反相动态,五纵模 EDFL 总输出光强呈准周期脉冲态,每个脉冲的能量大小相当,如图 5(b)和(c)所示,mode1, mode2 的状态空间均处于 3 倍周期态,然而这 5 个模式整体行为的状态空间轨迹则由 3 个大小相同的极限环大部重叠在一起组成,形似一个加粗的单极限环,如图 5(d)所示(其中 $I_{\text{total}}=\sum I_i, d_{\text{total}}=\sum d_i$),这种情况与总输出光强呈单周期脉冲态相一致。保持抽运系数 $r=2.5$ 不变,当离子对浓度 x 进一步增加,mode1~mode5 分别由图 4(a)所示的三倍周期态经过阵发途径进入混沌,多模混沌的仿真结果如图 6 所示($x=12\%, r=2.5$)。图 6 中

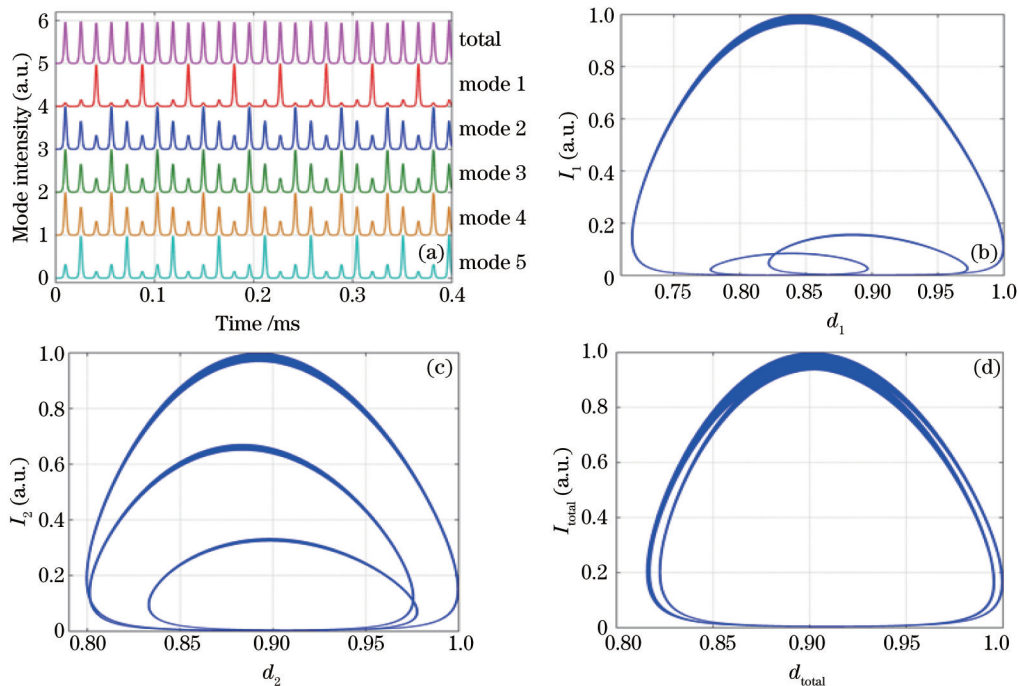


图 5 多模时序与部分模式的状态空间图

Fig.5 Multi-mode time series and state diagrams for partial modes

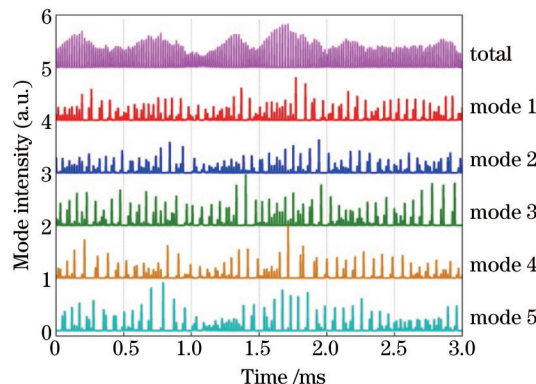


图 6 多模非稳定强度时间序列

Fig.6 Multi-mode unstable intensity time series

从上至下依次为混沌态下的总光强时序以及 mode1~mode5 的光强时序,各模式强度时序呈现一定的随机性与不规则性,总光强时序则呈现具有幅度包络调制的准单周期脉冲。

分别对混沌态下 mode1~mode5 光强以及总光强的动力学特性进行非线性时序分析^[11-13],计算得到 mode1~mode5 光强时序的关联(分数)维数分别约为 3.7、4.4、3.82、4.2 及 3.9,单个纵模的状态空间中存在奇异吸引子结构,光强时序引入高维嵌入前后的递归图,在非嵌入时递归图中具有复杂的空间图样,而嵌入后递归图中出现一系列与对角线平行的短斜线,表明单个纵模状态空间中存在非稳定的周期轨道。非线性时序分析结果再次证明各个单个纵模的光强时序均具有混沌特性,即当前的五纵模 EDFL 可看作一个多自由度超混沌系统。

五纵模 EDFL 总输出光场,与单个模式相比,模式总光强的状态空间轨迹结构更加密集复杂,呈奇异吸引子形状。同样,高维嵌入后递归图内出现一系列与对角线平行的短斜线,表明总输出光场的相空间中依然存在非稳定的周期轨道,这是混沌信号的典型特征。另外,随嵌入维数增加总光强时序关联积分曲线的斜率趋于饱和^[13],计算得到分数型关联维数为 5.1。根据分析结果可知,在当前条件下,没有外界调制的自由运转五纵模 EDFL 总输出光强时序具有高维混沌特性,mode1~mode5 两两模式之间具有一定的交叉耦合,模式之间仍具有一定的相关性,并不是彼此独立的。

根据以上 EDFL 的多模激光速率方程,自由运转光纤激光器中复杂的模式动态变化主要取决于纵模间的耦合作用与增益介质中的反转粒子的相互作用,在光场中每一个纵模获得相应的能量来维持自身的起振,这一动态变化破坏了光场中单个纵模的损耗增益平衡,导致了纵模之间的相互竞争。激光增益带宽或损耗带宽内寄居大量密集的本征纵模结构且纵模之间的各向异性参数甚低,使得输出的整个模式动态与单个纵模之间的相互作用紧密相关。

4 结 论

基于光纤激光器增益介质中离子对猝灭效应的饱和吸收机制,自由运转的 MLM-EDFL(无外界调制)在一定抽运水平下产生模式光强自脉冲或自发混沌现象;这种饱和和吸收作用作为潜在的产生激光混沌态输出的机制,对每个激射模式进行光强调制,这相当于在 MLM-EDFL 速率方程中引入一个自由度,从而给光纤激光器自脉冲、混沌态的输出创造条件。仿真结果表明,自由运转的 MLM-EDFL 系统在一定抽运水平下会产生模式光强自脉冲或自发混沌现象。当各个模式在一定条件下均进入光强混沌态时,即每个模式光强都是混沌的,同时激光器的总输出光强亦处于混沌态;从频域角度看,可以将当前的 MLM-EDFL 可看作一个高维超混沌激光系统。

参 考 文 献

- 1 Wang Yuncai. Generation and applications of chaotic laser[J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2009, 46(4): 13-18.
王云才. 混沌激光的产生与应用[J]. *激光与光电子学进展*, 2009, 46(4): 13-18.
- 2 Meng Fei, Cao Shiyong, Zhao Guangzhen, *et al.*. Application of an Er: doped fiber comb for Sr lattice clock[J]. *Chinese J Lasers*, 2015, 42(7): 0702012.
孟 飞, 曹士英, 赵光贞, 等. 掺铒光纤光梳在锶晶格钟中的应用研究[J]. *中国激光*, 2015, 42(7): 0702012.
- 3 Xu Pan. Study on Mode Instabilities and Synergetic Properties of Self-Organized Feedback Fiber Ring Laser[D]. Changsha: National University of Defense of Technology, 2013: 11-18.
徐 攀. 自组织反馈光纤环形激光器模式非稳定性及协同学特性研究[D]. 长沙: 国防科技大学, 2013: 11-18.
- 4 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.
- 5 Feng Suchun, Ren Wenhua, Chen Manyu, *et al.*. Multi-wavelength fiber laser employing twin-core fiber filter and nonlinear polarization rotation[J]. *Chinese J Lasers*, 2014, 41(6): 0605006.
冯素春, 任文华, 陈曼雅, 等. 基于双芯光纤滤波器和非线性偏振旋转效应的多波长光纤激光器[J]. *中国激光*, 2014, 41(6): 0605006.
- 6 D Brunner, X Porte, M C Soriano, *et al.*. Real-time frequency dynamics and high-resolution spectra of a semiconductor laser with delayed feedback[J]. *Scientific Reports*, 2012, 2: 732.
- 7 Wang Jishun, Yu Yongqin, Ou Zhilong, *et al.*. Multi-wavelength fiber ring laser based on Mach-Zehnder interferometer of

- dispersion compensation fiber connection point[J]. Chinese J Lasers, 2014, 41(s1): s105002.
- 王继顺, 于永芹, 欧志龙, 等. 基于色散补偿光纤马赫-曾德尔干涉的多波长光纤环形激光器[J]. 中国激光, 2014, 41(s1): s105002.
- 8 F Sanchez, G Stephan. General analysis of instabilities in erbium-doped fiber lasers[J]. Physical Review E, 1996, 53(3): 2110-2122.
- 9 F Sanchez, P Le Boudec, P L François, *et al.*. Effects of ion pairs on the dynamics of erbium-doped fiber lasers[J]. Physical Review A, 1993, 48(3): 2220-2229.
- 10 Pei Xin, Xiang Wanghua, Tan Li, *et al.*. Effect of Yb:Er codoping on suppressing self-pulsing in Er-doped fiber laser[J]. Acta Optica Sinica, 2004, 24(1): 94-98.
- 裴新, 向望华, 谭莉, 等. Yb:Er共掺杂对掺铒光纤激光器中自脉冲行为的抑制作用[J]. 光学学报, 2004, 24(1): 94-98.
- 11 A M Fraser, H L Swinney. Independent coordinates for strange attractors from mutual information[J]. Physical Review A, 1986, 33(2): 1134.
- 12 A M Fraser. Information and entropy in strange attractors[J]. Information Theory on IEEE Transactions, 1989, 35(2): 245-262.
- 13 P Grassberger, I Procaccia. Characterization of strange attractors[J]. Physical review Letters, 1983, 50(5): 346-349.

栏目编辑: 宋梅梅