

智能锁模光纤激光器的原理与研究进展

吴修齐¹, 彭俊松^{1,2*}, 张颖¹, 曾和平^{1,2,3**}¹华东师范大学精密光谱科学与技术国家重点实验室, 上海 200062;²华东师范大学重庆研究院, 重庆 401120;³济南量子技术研究院, 山东 济南 250101

摘要 近年来,智能光子学领域取得了蓬勃发展。其中,机器学习算法与超快光学的结合展现出了巨大潜力,不仅给超快光学系统带来了新功能,也极大地提升了系统的性能。特别地,机器学习已在锁模激光器中获得了广泛应用。本文着重介绍机器学习算法及控制系统在超快光纤激光器中的应用,包括产生和操控孤子锁模脉冲、时空锁模脉冲、呼吸子脉冲以及分形呼吸子。

关键词 激光器; 锁模; 孤子; 呼吸子; 智能

中图分类号 O436 **文献标志码** A

DOI: 10.3788/CJL230702

1 引言

1960年,西奥多·梅曼发明了激光,激光给人类社会的发展带来了变革性影响。梅曼发明激光短短几年后,研究人员就报道了激光领域的第一个标志性成果——锁模激光。锁模就是将激光器内成千上万的纵模同时锁定,从而产生飞秒量级的超短脉冲。锁模激光器已在光学频率梳^[1-5]、精密制造^[6]、光纤通信^[7-8]和激光雷达^[9]等领域获得了广泛应用。

除了被广泛地用作超短脉冲光源之外,锁模光纤激光器还被作为一个便捷的桌面化非线性系统在基础科学领域发挥着重要作用。例如,它为复杂非线性波的动力学研究提供了理想的平台^[10]。事实上,锁模光纤激光器是一个复杂的非线性耗散系统,其内部存在大量的非线性动力学现象:除了输出稳定的飞秒脉冲外,还会呈现出一系列的复杂锁模态,包括呼吸子锁模^[11]、怪波^[12]、类噪声锁模^[13]、孤子爆炸^[14-17]以及孤子相互作用产生的自组织模式(如孤子分子^[18-21]、孤子晶体^[22-23]、孤子复合物^[24]和超分子结构^[25]等),甚至是混沌态^[26]。研究这些锁模态有助于理解飞秒光纤激光器中的非线性动力学特性,同时,由于飞秒光纤激光器是一个普适的非线性耗散系统,对其动力学进行研究也有助于理解其他相关领域(如玻色爱因斯坦凝聚、微腔、海洋学等)的复杂动力学。这些

系统和锁模激光器的内在动力学均是由非线性薛定谔方程统一描述的,因此它们之间的动力学具有相似性。

由于锁模激光器中存在众多的锁模区,长期以来,如何控制激光器的参数进而访问特定的锁模态是一个颇具挑战性的难题。以最常用的基于非线性偏振旋转锁模技术的飞秒光纤激光器为例,其在数学上是一个多维参量空间,实验上需要调谐至少7个参量(泵浦、损耗、色散、非线性和三个波片的角度)才能遍历整个参量空间。锁模态与这些参量之间缺乏一个确定的函数关系,因此需要一个漫长的试错过程来获得想要的锁模态。此外,即使获得了目标锁模态,其重复性也是一个问题。而且,激光锁模区的参量空间通常极小,实验上很难精确控制。

最近,智能化锁模激光器取得了重大突破,可以解决锁模态的精确控制难题。2015年,法国Grelu教授课题组^[27]首次将遗传算法应用于锁模激光器的智能控制中,实现了孤子脉冲和类噪声脉冲的智能化控制。随后,智能锁模激光器获得了高速发展^[27-41]。本文将回顾智能锁模光纤激光器的原理及其主要研究进展,主要介绍遗传算法、类人算法及人工神经网络算法,以及这些算法在孤子、呼吸子和时空锁模智能化控制中的应用。

收稿日期: 2023-04-11; 修回日期: 2023-05-22; 录用日期: 2023-05-24; 网络首发日期: 2023-06-03

基金项目: 国家自然科学基金(62022033, 12074122, 11704123, 61775059, 62022033, 12074122)、上海市市级科技重大专项子项目(2019SHZDZX01-ZX05)、上海市青年科技启明星计划、National Key Laboratory Foundation of China (6142411196307)、Sustainedly Supported Foundation by National Key Laboratory of Science and Technology on Space Microwave under Grant (2022-WD-KY-SYS-DN-04)、上海市自然科学基金(23ZR1419000)

通信作者: *jspeng@lps.ecnu.edu.cn; **hpzeng@phy.ecnu.edu.cn

2 智能锁模算法

2.1 遗传算法

智能锁模激光器可以实现参数的自优化,进而获得目标锁模态,不再需要手动调节激光器参数。其核心就是运用相关算法,有效地调节激光器的参数,直至激光器输出目标锁模态。目前应用最广泛的是遗传算法,该算法是在达尔文进化论“适者生存”理念启发下提出的。遗传算法基于生物进化的概念,为设定的控制目标(目标锁模态)搜寻最合适的“个体”,此处“个体”对应的是一组激光参数。一组激光参数对应单个个体的基因序列。每个个体的优劣由用户定义的适应度函数来评估,进而获得一个适应度数值,适应度高的基因将进行多次繁衍直至系统获得最大适应度值。

在智能锁模激光器中,激光器的控制参数(例如施加到电动偏振控制器^[34]或者液晶波片^[27]上的一组电压)即是一个基因序列。首先,计算机随机产生一个初始种群,该种群包含多个个体,即多组电压值,将其输入到液晶波片或者偏振控制器后,数据采集模块从激光器输出端探测数据并输入计算机(或者其他在线数据处理模块),然后根据适应度函数计算其适应度数值。系统对个体评价完成后,模仿“适者生存”进

行选择、交叉、变异三个步骤产生下一代新种群。整个遗传算法流程图如图 1(a)所示。值得注意的是,选择某个个体作为父代的方式是通过“轮盘赌”来实现的[如图 1(b)所示],每个个体被选中的概率 Q_n 为

$$Q_n = V_n / \sum_{n=1}^{n=N} V_n, n = 1, 2, 3, \dots, \quad (1)$$

式中: V_n 为每个个体的适应度; n 为个体编号。因此,个体被选中的概率随着适应度的增加而增大。经过选择之后,将选出的优良个体进行交叉,然后将种群分为两两一组,计算机随机产生概率数值,当其小于程序预先设置的交叉概率 Q_c 时,两组中的一组从基因序列中随机选择一个基因(电压)进行交换,反之不产生交叉行为。最后,对交叉后的种群进行选择变异,此处为了方便程序处理,将每个个体的基因(电压值 0~5 V)转换为 14 位二进制。变异过程如图 1(a)所示,计算机随机产生概率数值,当其小于程序预先设置的变异率 Q_m 时,随机选择基因中的一位进行变异,即在 0 和 1 之间变换。完成变异后产生下一代群体。不断重复此过程,直到种群中出现满足要求的个体。需要注意的是,初始种群的大小决定了遗传算法参数的搜寻范围。若初始范围过小,参数范围会快速收敛到一个局部最优值,导致无法找到全局最优值;若初始范围过大,则会导致算法优化的时间过长。

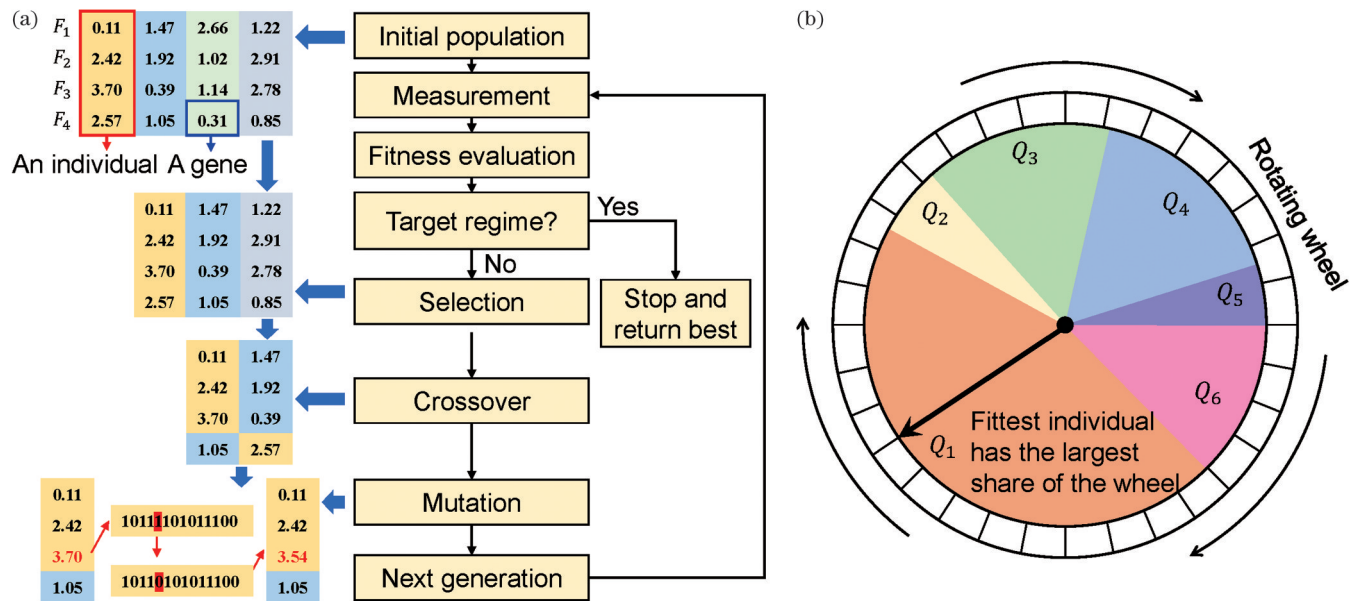


图 1 遗传算法原理说明。(a)遗传算法流程图;(b)“轮盘赌”示意图

Fig. 1 Principle of genetic algorithm. (a) Genetic algorithm flowchart; (b) schematic of the “roulette wheel” selection

2.2 类人算法

遗传算法虽然应用广泛,但其显著的缺点是运算时间较长。2019年,一种可以实现快速锁模的算法——类人算法被提出^[34]。该算法模仿人的逻辑来调节偏振控制器从而实现锁模。具体流程如下:系统随机生成电动偏振控制器的控制参数(一组电压值),然后通过优化后的 Rosenbrock 搜索算法,模拟人的控制

步骤,先将其中一个参数向固定方向进行调整,如果脉冲幅度有所增加,则继续向该方向调节参数,否则向反方向调节参数,直到找到该参数在所有变化方向中使脉冲幅度最高的那个值;然后改变另一个控制参数,重复操作,直到锁模或超出预设的调整次数,进入监测阶段或退出。在监测阶段,通过脉冲计数进行锁模判断,如果出现失锁情况,则采用随机碰撞算法模仿人对激

光器进行微调,即以小于之前搜索算法的步进量进行随机尝试,直到恢复锁模或超出尝试次数,回到监测状态或重新进入 Rosenbrock 搜索算法。该算法不仅可以实现快速锁模,还可以在激光器失锁后迅速恢复到锁模态。

2.3 人工神经网络算法

近年来,各种深度神经网络作为一种新兴的数据分析和处理技术,为处理复杂且对干扰敏感的光纤激光器系统提供了良好的工具。人工神经网络是一种模仿生物神经网络结构和功能的数学模型,通常用于估计或逼近函数^[42]。人工神经网络通常由输入层、隐藏

层和输出层组成,每层由许多处理元素组成,称为神经元或节点。图 2 是人工神经网络结构图,根据其拓连接结构,可以将其分为前馈类和循环类。其中:前馈神经网络是全连接网络(FCNN),每一层的节点都与最后一层的所有节点相连;循环神经网络(RNN)主要用于处理序列数据,其特点在于会记住过去的信息并将其应用于当前的输出。主流的 RNN,如长短期记忆人工神经网络(LSTM),目前已被广泛用于光纤中脉冲演化的预测^[41,43-44]。对于智能激光器,利用神经网络在不同状态下建立数据库进而训练模型,能够实现激光器的稳定控制和快速恢复^[45]。

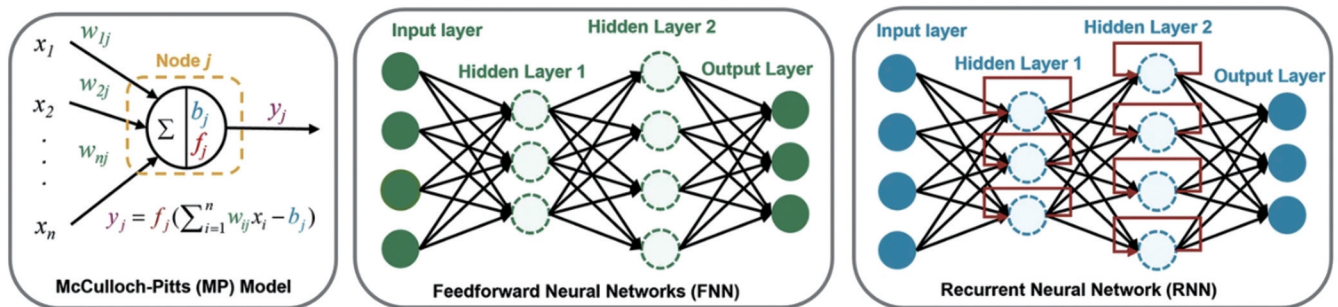


图 2 人工神经网络结构^[40]

Fig. 2 Architectures of artificial neural network^[40]

3 智能锁模激光器的研究进展

目前,智能锁模激光器中应用的算法大都是遗传算法。遗传算法的最大优势在于,只要目标锁模态可以被适应度函数量化,那么该算法通过模仿生物进化过程一般都可以获得目标锁模态。该算法已经被应用于孤子锁模^[27]、时空锁模^[36]和呼吸子锁模^[37]。下面将介绍相关进展。

3.1 孤子锁模

孤子是传输时脉宽等参数保持不变的一种波包。利用孤子效应可以在激光器中产生稳定的超短脉冲激光。通信波段光纤中天然地包含了产生孤子所需的两个物理效应——反常色散和克尔效应,因此,光纤激光器是产生孤子、研究孤子物理的一个非常便捷的平台。激光器产生孤子的一个标志是脉冲光谱上出现凯利边带。现有的遗传算法尽管可以实现锁模,但是需要精确的适应度函数来区分孤子锁模区和其他锁模区。如果适应度函数特异性不明显,遗传算法可能会产生多种锁模态。例如,如果适应度函数由强度自相关信号定义,而孤子锁模和调 Q 锁模均会产生强度自相关信号,系统就无法分辨这两种激光状态,因此激光器会输出孤子或者调 Q 锁模脉冲,如图 3(b)、(c)所示。一个常用的适应度函数是锁模脉冲的重复频率。但是受限于示波器时域分辨率,该适应度函数无法分辨单孤子、多脉冲和类噪声锁模。因此,对于孤子锁模而言,如何设计合适的适应度函数并提升探测端的分辨能力仍旧是一个充满挑战的

难题。

2015 年,Andral 等^[27]利用进化算法首次在被动锁模光纤激光器中实现了智能锁模。实验装置图如图 3(a)所示,首先基于激光输出处非线性晶体 BaB₂O₄(BBO)产生的二次谐波(SHG)信号强度设计适应度函数。利用适应度数值优化电动偏振控制器(EPC)上的 6 个电压,使信号强度增加,进而实现激光器锁模。然而,基于 SHG 的适应度函数过于简单,难以保证每次优化均能成功,并且无法规避调 Q 锁模,如图 3(c)所示。为了解决这个问题,结合时域信号的傅里叶变换(FFT)获取的自由光谱范围(FSR,在公式中记为 F_{SR})的频谱分量强度设计了新的适应度函数,其中使用新适应度函数的进化算法的收敛过程如图 3(d)所示,该适应度函数可确保每次锁模均为传统锁模。2016 年,Andral 等^[29]基于相同的智能激光器设置,使用进化算法实现了传统锁模和谐波锁模的自动锁定。 n 次谐波锁模的适应度函数为

$$M = \frac{A(nF_{SR})}{\sum_{i=1}^{n-1} A(iF_{SR}) + \sum_{i=n+1}^{2n-1} A(iF_{SR})} + C, \quad (2)$$

式中: A 为射频频谱分量的幅度; C 为本底噪声阶数的常数,用于限制噪声扰动。这些研究对于智能激光器的推广和应用具有重要意义,但受限于进化算法以及激光器时域和光谱信息的缺失,优化时间较长(约 0.5 h),并且无法控制脉冲的参数(如光谱形状和带

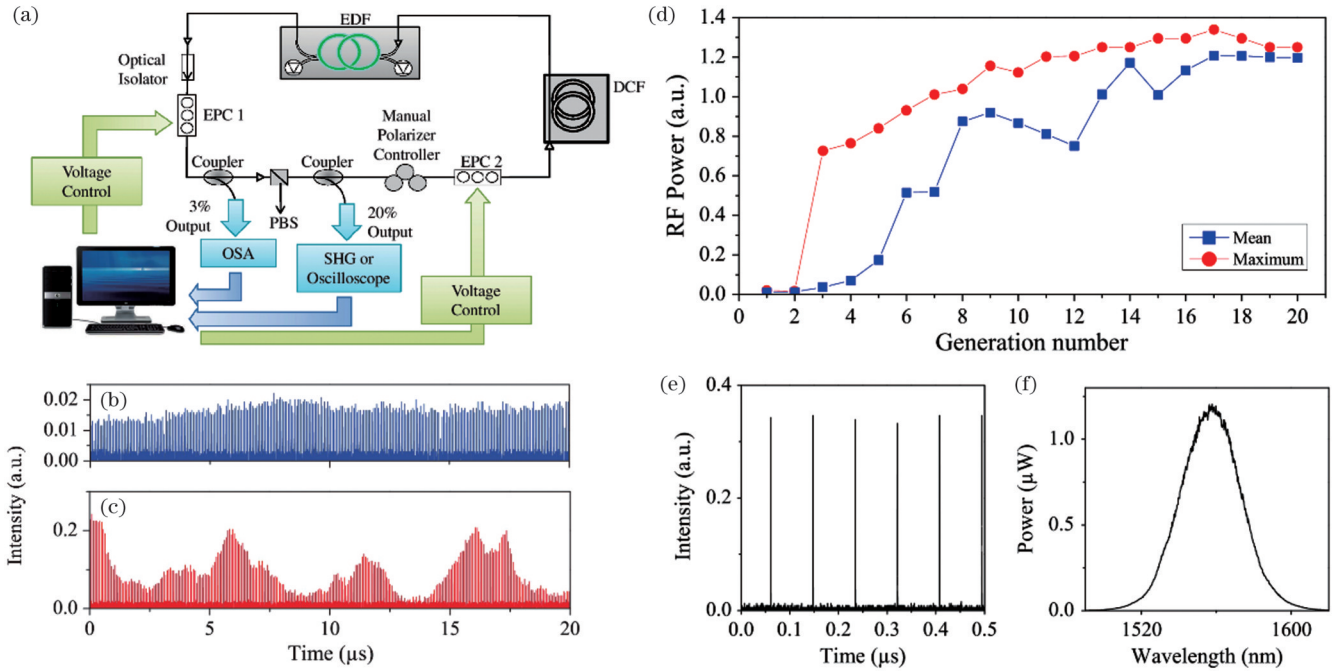


图 3 进化算法实现智能锁模^[27]。(a)通过进化算法实现非线性偏振偏转(NPR)锁模激光器的实验装置图;(b)(c)利用信号强度设计进化算法适应度发现的锁模(b)和调Q锁模(c)状态;(d)利用射频频分量强度定义的适应度函数平均值和最佳值的演化;(e)(f)通过进化算法发现的锁模状态的时间脉冲序列和光谱

Fig. 3 Evolutionary algorithm to implement smart mode-locking^[27]. (a) Experimental setup for locking an NPR-based MLFL through an evolutionary algorithm; (b)(c) mode-locked (b) and unstable Q-switched mode-locked regime (c) found during the run of the evolutionary algorithm fitness designed with signal intensity; (d) evolution of the average and best values of fitness function defined with radio frequency (RF) component intensity; (e)(f) temporal pulse train (e) and the optical spectrum (f) of the fundamental mode-locking regime found by the evolutionary algorithm

宽等)。

2017年,Winters等^[31]实现了对全正色散光纤激光器的自动锁模。实验装置如图4(a)所示,激光器的偏振控制通过两个由电压控制的液晶相位延迟器和一个固定的四分之一波片实现,只要液晶相位延迟器的范围能够达到 2π ,该系统就可以实现对偏振态的任意控制。该团队首先扫描并记录了该激光器的所有参数点以及对应的锁模光谱,如图4(c)所示。在使用遗传算法自动锁模过程中,通过已有光谱和实测光谱的确定性系数 $R^{2[46]}$ 可以得到两者的相似度,从而得到参数区间;在失锁时,结合爬山算法能够快速恢复锁模。最终,该方法能够在90s内实现锁模,激光器失锁后在30s内能够恢复锁模。该研究通过预设数据库,进一步缩短了激光器的锁模时间和恢复时间。

2019年,Pu等^[34]首次实现了基于类人算法的锁模激光器,实验装置如图5(a)所示。该平台参考人手动调节激光器的逻辑,利用电控器件和测量系统模仿人的手、眼和大脑。实时电路模块由一个模数转换器(ADC)、一个现场可编程逻辑门阵列(FPGA)和4个数模转换器(DAC)组成。Pu等利用该平台完成了激光器基频锁模、二阶谐波锁模、三阶谐波锁模、调Q和调Q锁模的自动锁定[如图5(d)所示],

并实现了迄今为止最短的激光器启动时间(0.22 s)以及较短的锁模恢复时间(14.8 ms)。类人算法流程图如图5(c)所示,包括Rosenbrock搜索算法、随机碰撞恢复算法以及不同锁模模式的辨别方法。Rosenbrock搜索算法用于锁定所需的锁模状态,类人算法基于对锁模状态的监测决定是否实时随机碰撞。随机碰撞算法用于在激光器失锁后调节激光参数恢复到锁模状态,如果恢复成功,则类人算法回到监测模式;否则,重新启动Rosenbrock搜索算法。该研究对不同锁模状态提出了不同的适应度函数,分别为

$$\begin{cases} O_{\text{FML}} = \frac{1}{C} \sum_{i=1}^C A_i \\ O_{\text{HML}} = \frac{2L_n + L_{2n} + L_{3n}}{\sum_{i=1}^M L_i} \\ O_{\text{QS\&QML}} = \frac{\sum F_{\text{if}}}{\sum_{i=1}^N F_i} \end{cases}, \quad (3)$$

其中, O_{FML} 为基频锁模的适应度函数, A_i 表示脉冲幅度, C 表示脉冲计数的数值,因此 O_{FML} 为脉冲振幅的平均值。 O_{HML} 为谐波锁模的适应度函数, L_n, L_{2n}, L_{3n} 分别表示 n (基频)、 $2n$ (二次谐波)、 $3n$ (三次谐波)的射频频谱线强度, L_i 表示第 i 根射频频谱线的强度。由于调Q

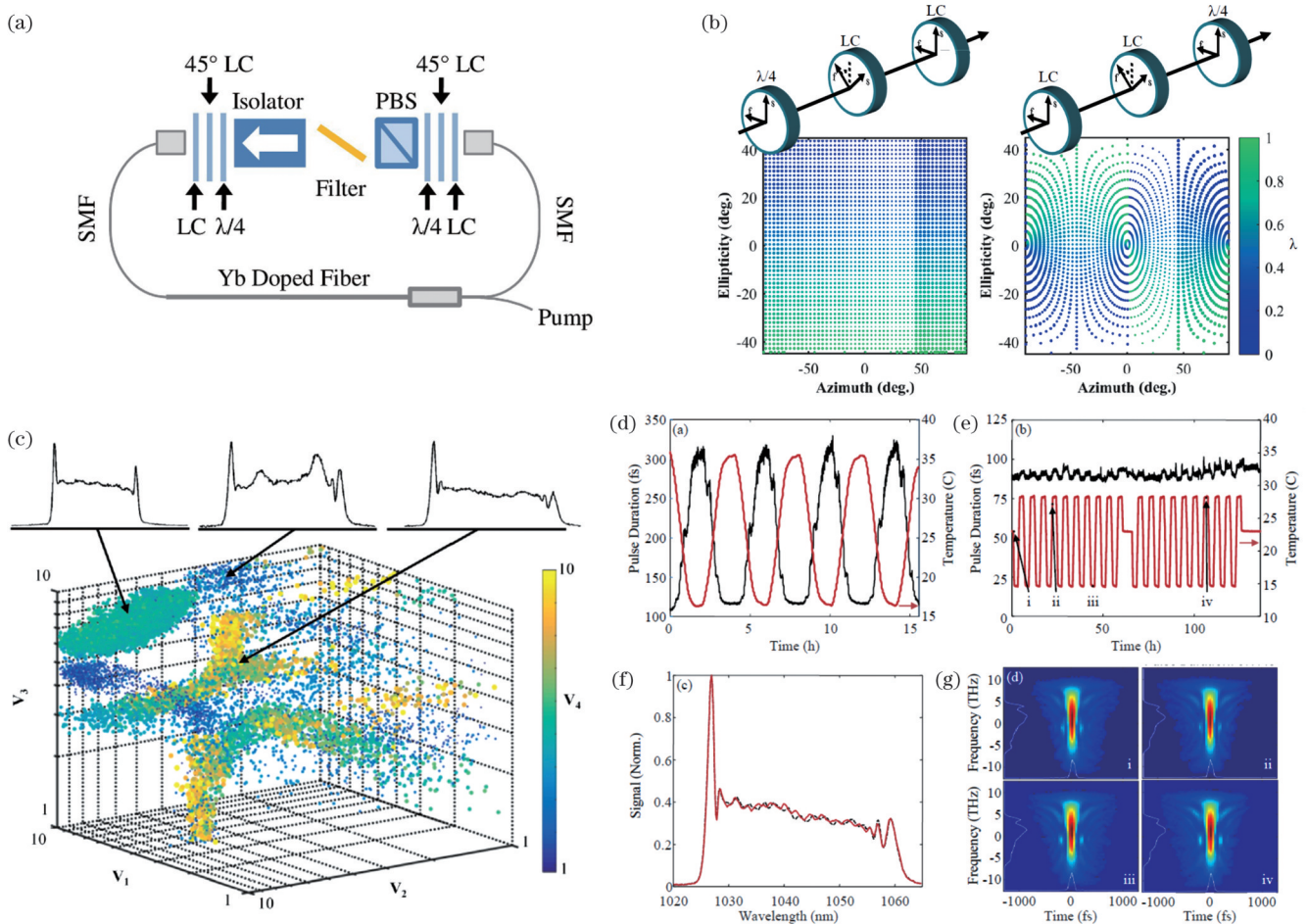


图 4 全正色散光纤激光器的智能控制^[31]。(a)基于液晶的全正色散光纤激光器示意图;(b)液晶相位延迟器的两种配置图,显示前向(左图)和反向(右图)传播方向;(c)通过扫描所有可用电压找到的锁模状态,展示了几个操作点的光谱(4个控制值中的3个表示空间位置,另一个表示标记颜色);(d)(e)标准谐振腔(d)和液晶控制的谐振腔(e)中作为环境温度函数的脉冲持续时间;(f)通过遗传算法从随机起点使用目标光谱(虚线)恢复的实际锁模光谱(实线);(g)在温度循环运行期间测量的频率分辨光学开关(FROG)轨迹,数字i~iv对应(e)中标识的时间和温度,光谱以白色插入

Fig. 4 Intelligent control of all-normal dispersion(ANDi) fiber laser^[31]. (a) Schematic of an all-normal dispersion fiber laser with liquid crystal (LC); (b) diagram of the two configurations of the LC phase retarder showing the forward (left) and backward (right) propagation directions; (c) mode-locked states found through a scan over all available voltages, showing spectra for several operating points (three control values represent spatial position and the fourth value represents the color of the marker); (d)(e) pulse duration as a function of environmental temperature in a standard oscillator (d) and an LC stabilized oscillator (e); (f) spectrum of the mode-locked ANDi laser (solid) recovered by genetic algorithm from a random starting point using a target spectrum (dashed); (g) measured FROG traces measured during the temperature cycling run with the numbers i - iv corresponding to the time and temperatures indicated in Fig. (e), where the spectral is inset in white along the appropriate axes

频率集中在低频区域,于是设计 $O_{QS&QML}$ 为调 Q 和调 Q 锁模的适应度函数,其中, F_{if} 表示低频频谱分量的幅度, F_i 表示第 i 根低频频谱分量的幅度。调 Q 频率较小,因此通过时域信号的傅里叶变换能够实现调 Q 和调 Q 锁模的区分。

2021年, Yan 等^[45] 针对自动锁模光纤激光器提出了一种低延迟的深度强化学习算法。该算法结构如图 6(b)所示,包括两个 actor 深度神经网络和两个 critic 深度神经网络,它们均由三层全连接的神经网络构成, actor 网络用于修改腔内激光偏振状态(对应 EPC 的输入电压), critic 网络用于评估执行的操作对

系统的影响,通过输出的 Q 值来评价激光器当前的状态。两种网络通过反向传播的方法进行训练。如图 6(a)所示,该系统计算机与 EPC 控制单元/激光输出监测装置之间的数据通过无线网络传输,这意味着可以实现远程自动锁模控制,标志着智能激光器算力大幅提升。Yan 等对该智能光纤激光器进行了振动测试,结果显示:振动后最快的锁模恢复时间为 0.472 s,平均恢复时间为 1.948 s,如图 6(d)所示。由于各终端均采用无线传输,更有利于一台计算机控制多个激光器系统,这对于激光器级联系统的调试和控制具有重要意义。

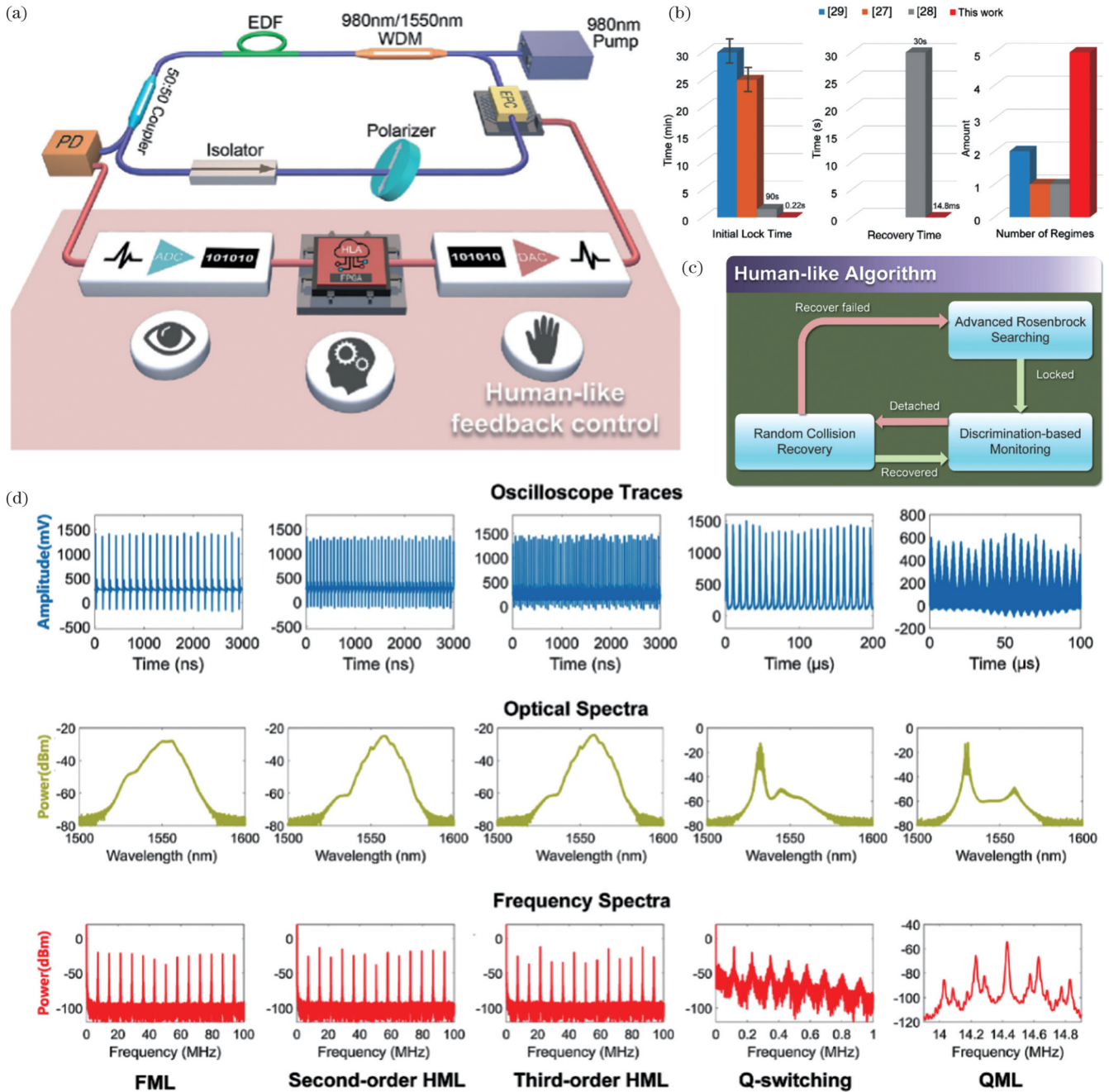


图 5 基于类人算法的智能可编程激光器^[34]。(a)智能锁模光纤激光器实验装置图;(b)类人算法与其他智能锁模算法初始锁定时
间、恢复时间和锁模状态数量的对比;(c)类人算法示意图;(d)锁模运行方式,从左到右依次为基频锁模、二阶谐波锁模、三阶
谐波锁模、调 Q、调 Q 锁模

Fig. 5 Intelligent programmable laser based on human-like algorithm^[34]. (a) Experiment setup of intelligent mode-locked fiber
laser; (b) comparison over initial lock time, recovery time and the number of mode-locking regimes between human-like
algorithm and recent automatic mode-locking algorithms; (c) schematic of human-like algorithm; (d) operation regimes, from left
to right respectively shows the fundamental mode-locking, the second-order harmonic mode-locking, the third-order harmonic
mode-locking, the Q-switch, and the Q-switch mode-locking operation regimes

3.2 锁模激光器的光谱智能调控

很多应用需要对超短脉冲的光谱进行调控。虽然可以通过在腔内加入滤波器的方法实现对光谱的控制,但这一方案降低了激光器的集成度,增加了成本,而且滤波器本身的损耗较大,导致激光器的转换效率较低。事实上,锁模激光器通过调节自身参数也可以

使光谱在一定范围内调谐。特别地,对于非线性偏振旋转锁模来说,由于腔内天然地存在一个 Lopt 滤波器(基于双折射效应和起偏器的原理设计),调节偏振控制器可以实现对滤波器特性的改变,进而可以在一定程度上调节锁模脉冲的光谱。然而,由于手动调节偏振控制器存在调谐精度低、重复性差等缺点,该方案在

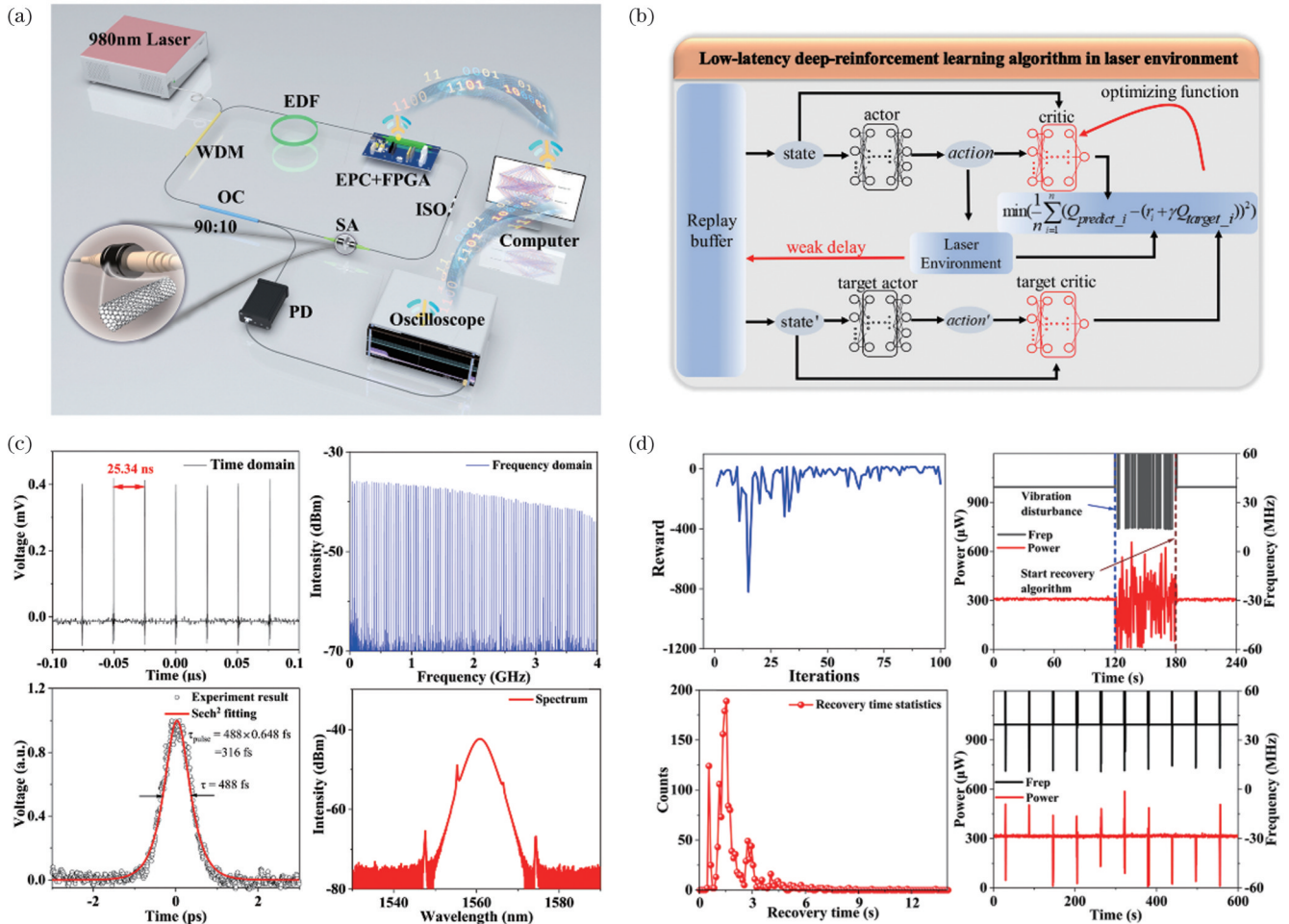


图 6 基于深度学习算法的智能光纤激光器^[45]。(a)深度学习超高速光纤激光器的实验装置图;(b)基于深度确定性梯度策略的低延迟深度强化学习算法结构;(c)搜寻到基频锁模状态时激光器的输出表征;(d)激光器振动失锁后算法恢复效果图,包括最后 100 轮稳定锁模计算模型训练迭代中奖励值的收敛曲线(左上),振动后激光器重复频率和输出功率的变化(右上),1500 次振动实验的恢复时间统计(左下),在每分钟振动 1.5 s 并一直运行锁模恢复算法条件下系统在 10 min 内输出功率的变化(右下)

Fig. 6 Intelligent fiber laser based on deep learning algorithm^[45]. (a) Experimental setup of deep learning ultrafast fiber laser; (b) structure of the low-latency deep-reinforcement learning algorithm based on deep deterministic gradient strategy in the laser environment; (c) characterization of the output when the laser is in the fundamental mode-locking state; (d) effect diagram of algorithm recovery after the laser loses mode-locked state due to motor vibration, including the convergence curves of the reward values in the last 100 training iterations of the stable mode-locking computational model (top left), the repetition frequency and power change of the laser output during the process of applying vibration to the laser (top right), the recovery time statistics of 1500 vibration tests (down left), the output power change of the system within 10 min under the condition of vibrating for 1.5 s per minute and running the mode-locked recovery algorithm all of the time (down right)

实际应用时不具备吸引力。智能控制技术可以很好地解决手动调节带来的相关问题。

2020 年, Pu 等^[35]利用遗传算法实现了对脉冲光谱和脉冲形状的智能控制。图 7(a)为实验装置图,通过结合高速 ADC 和时间拉伸色散傅里叶变换(TS-DFT),得到了快速演化的脉冲光谱;将光谱宽度作为适应度函数,实现了对脉冲谱宽的大范围调谐(10~40 nm),如图 7(d)所示。此外还实现了光谱形状的智能调谐,图 7(b)、(c)展示了三角形谱和双曲正弦割谱,此时只要将光谱形状考虑进适应度函数即可。光谱形

状适应度函数为当前脉冲和目标脉冲之间的归一化均方差。当判断当前光谱达到目标时,算法立即退出,通过避免剩余计算大大减少了算法的运行时间。将该研究方法与其他超快探测技术结合,可以进一步控制锁模激光器的其他参数,如脉冲相位信息和时域波形等。

3.3 时空锁模自调控

锁模通常是指激光器内纵模的锁定,光纤激光器中横模一般只有基模一个模式,不需要锁定。如果激光器内同时存在大量横模和纵模(例如多模

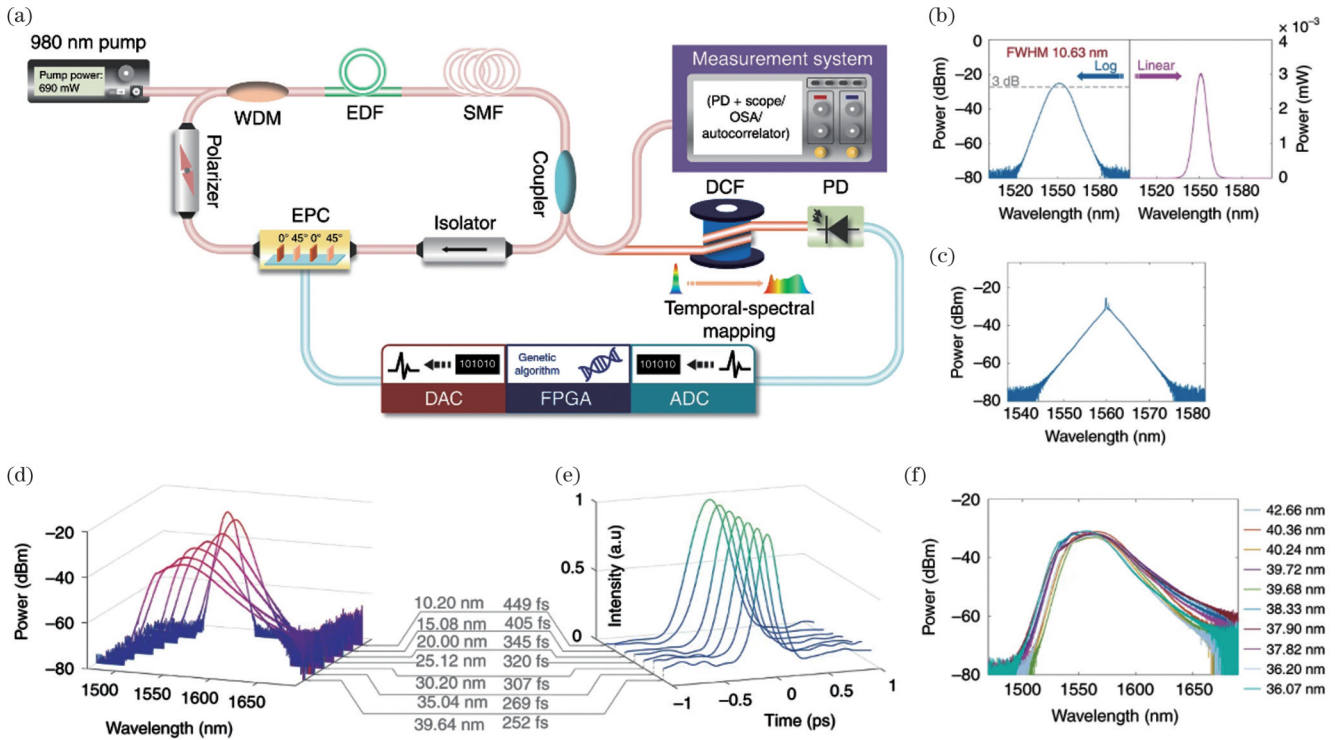


图 7 光谱宽度和形状可编程光纤激光器^[35]。(a)实验装置示意图;(b)(c)光谱形状编程:双曲正割谱(b),三角形谱(c);(d)~(f) 10~40 nm 的光谱宽度控制,包括光谱(d)、自相关轨迹(e)和最大光谱宽度(半峰全宽 FWHM)的可重复性测试(f)

Fig. 7 Spectral width and shape programmable fiber lasers^[35]. (a) Experiment setup diagram; (b)(c) spectral shape programming: the hyperbolic secant spectrum (b), the triangular spectrum (c); (d)~(f) spectral width programming from 10 to 40 nm, showing the spectra (d), autocorrelation traces (e), and the repeatability test for the maximum spectral FWHM (f)

光纤构成的谐振腔),由于不同横模的群速度不同,很难产生超短脉冲。2017年,Wright等^[47]通过多模光纤激光器内加上一个空间滤波器,实现了多模激光器中横纵模的同时锁定,因此称之为“时空锁模”。时空锁模不仅可以突破锁模激光器横向模式的限制,同时由于其是多模光纤,芯径较大,因此产生的脉冲能量也远大于单模光纤。时空锁模激光近几年获得了国内外的极大关注^[48-53]。然而,多模激光器的参量空间随着模式的增加几乎呈几何式增加,人工调谐已很难满足需求,极大地限制了时空锁模技术的发展^[48]。2020年,Wei等^[36]利用智能化控制技术很好地解决了这一问题。图8(a)是基于波前整形的遗传算法多模激光器示意图,多模激光器中超短脉冲的产生由非线性偏振演化锁模实现,其中一段多模渐变折射率(GRIN)光纤与增益光纤熔接(纤芯偏移)用于激发高阶模式,是实现时空锁模的关键。GRIN光纤的输出由透镜准直并耦合到自由空间,经过保偏隔离器、分束器后进入波前整形单元,其中波前整形单元由半波片、透镜和快速相位空间光调制器组成。最终,输出光通过 CCD 相机、光电二极管、光谱仪和功率计检测多维信号(包括横截面空间、时间、光波长和光功率,这些参数是适应度函数的组成部分),进而通过遗传算法评估得到多

模激光器每个维度上的参数并成功进行控制。将时域光场的傅里叶变换信号(射频信号)作为适应度函数(锁模后会产生由腔长决定的重复频率信号及其谐波),系统通过遗传算法迭代最终实现了时空锁模。此外,该研究结果显示:在连续光状态下,利用遗传算法可以实现对光场的多维度调控,包括增加光功率(约 2 倍)、模式自清洁以及波长切换和扫描。如图 8(b)所示,在大约 300 代遗传后,输出光功率增加了约 2 倍,而时间仅需 4 min。从图 8(c)可以看出,经过算法优化后,光谱从双波长变成了单波长。通过将适应度函数设置为目标区域的平均强度 $\langle I(x_0, y_0) \rangle$ 能够实现对多模光斑的轮廓清洁,如图 8(d)、(e)所示,优化之后的模式轮廓[图 8(e)]相比优化之前[图 8(d)]更加清晰,最终的模式呈现为高斯分布。

3.4 呼吸子超快激光器的智能调控

3.4.1 呼吸子智能控制

近些年来,呼吸子超快激光取得了快速发展^[11,37,41,54-64]。传统锁模激光器输出的是一系列等同的超短脉冲(孤子脉冲),呼吸子激光器输出的脉冲参数如能量、光谱、脉宽等会随时间周期性变化,因此被称为“呼吸子”(或者脉动孤子)。变化周期则被称为“呼吸周期”,对应的频率被称为“呼吸频率”。呼吸频率亦

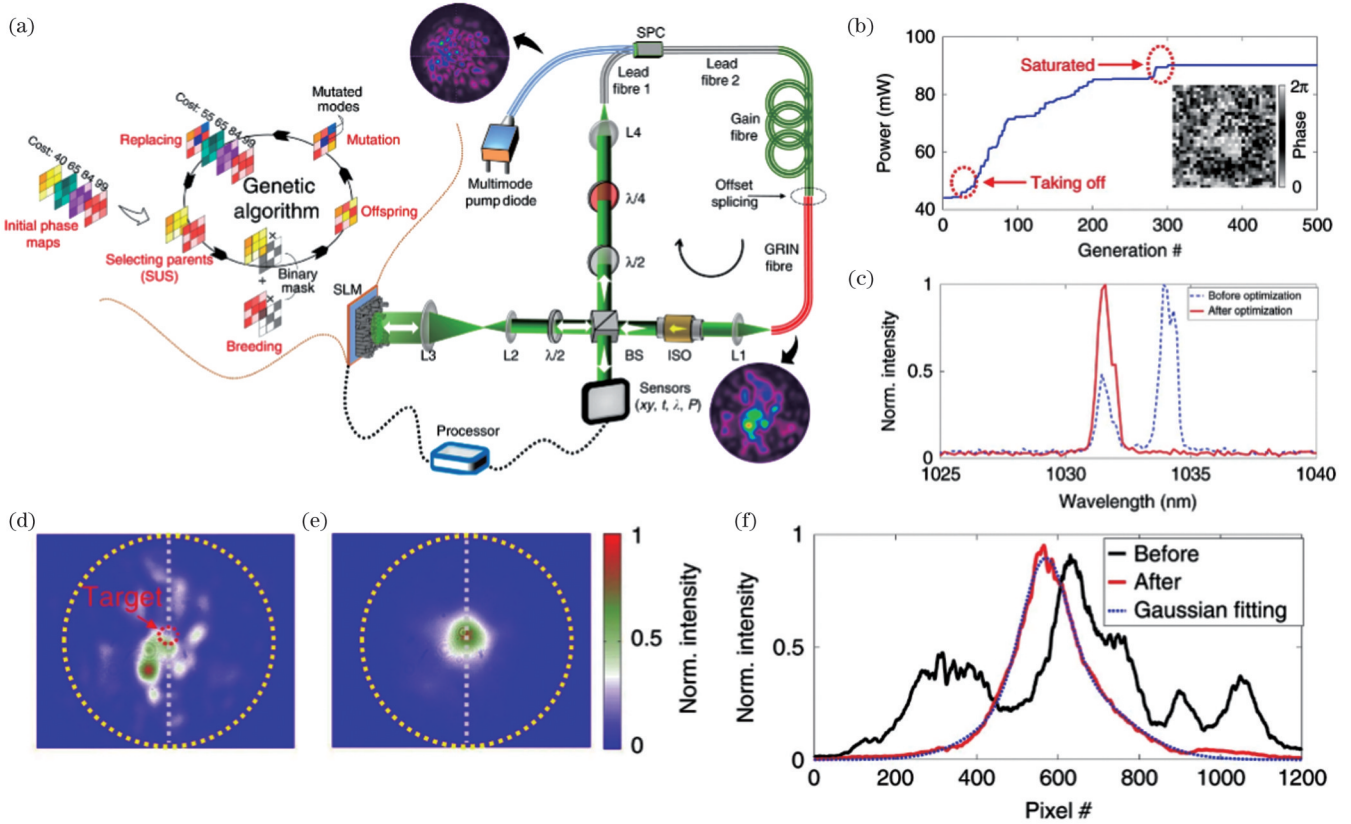


图 8 多模智能激光器^[36]。(a)基于波前整形的遗传算法多模激光器示意图;(b)功率随遗传代数增加而增大,插图是在空间光调制器上显示的最佳相位图;(c)光功率增强前后的光谱;(d)~(f)在准连续光状态下利用遗传算法对多模模式进行轮廓清洁,其中(d)是算法优化前的模式轮廓,(e)是算法优化后的模式轮廓,(f)是算法优化前后的模式截面对比

Fig. 8 Multimode intelligent fiber laser^[36]. (a) Schematic diagram of a genetic multimode fiber laser using wavefront shaping; (b) power increases with the increase of generation number, where the inset shows the optimal phase map displayed on the spatial light modulator (SLM); (c) optical spectra before and after optical power enhancement; (d)–(f) mode profile cleaning of the genetic multimode fibre laser working in the quasi-CW state, where the Fig. 8(d) is mode profile before genetic optimization, Fig. 8(e) is mode profile after genetic optimization, and Fig. 8(f) is mode profile comparison before and after genetic optimization

被称为“特征频率”,因为它是呼吸子特有的频率成分。呼吸子激光的射频频谱如图 9 所示,该射频频谱包含传统锁模激光器的重复频率(f_r)及其谐波信号(f_r 和 f_r 的整数倍信号),而且在这些射频信号两端还有边带,这些边带信号就是呼吸频率产生的。图 9 中,呼吸频率 $f_b = |f_{\pm 1} - f_r|$ 。可以将呼吸频率作为识别信号,耦合进遗传算法的适应度函数中。首先,需要构建一个适应度函数来区分呼吸子锁模和稳定锁模(光纤激光器中的稳定锁模态通常是孤子锁模)。当激光器处于稳

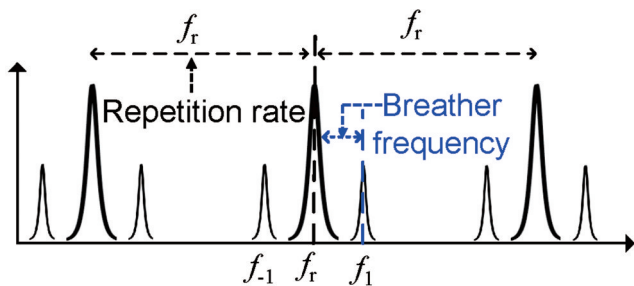


图 9 呼吸子锁模的射频信号演示图

Fig. 9 Sketch of RF signal under breather mode locking

定锁模状态时, f_r 两边没有边带。因此,利用位于 f_r 中心带与位于 $f_{\pm 1}$ 边带之间的频率强度比,可以设计一个区分呼吸子和稳定锁模的适应度函数。该适应度函数表达式为

$$C_b = \frac{\sum_{f=f_r}^{f=f_r} I(f) - \sum_{f=f_r-\Delta}^{f=f_r+\Delta} I(f)}{\sum_{f=f_{-1}}^{f=f_{+1}} I(f)}, \quad (4)$$

式中: $\sum_{f=f_r}^{f=f_r} I(f)$ 是从 f_r 到 f_r 的频率间隔的射频频谱强度; $\sum_{f=f_r-\Delta}^{f=f_r+\Delta} I(f)$ 是以 f_r 为中心频率左右宽度各为 Δ 的频率间隔的射频频谱强度。因为这两个量之间的差异与边带 $f_{\pm 1}$ 处的强度有关,所以 C_b 表示边带相对于频率范围在 $[f_{-1}, f_{+1}]$ 内的频率的相对强度。当 C_b 等于 0 时,意味着 f_r 很强并且没有边带,表示此时的激光器处于稳定锁模状态;当 C_b 远大于 0 时,则意味着射频频谱中存在强边带,表示激光谐振腔中可能存在呼吸子。射频频谱通过对示波器采集的时域数据进行处理后获得,选择 $381.44 \text{ kHz}(f_r \pm 190.72 \text{ kHz})$ 范围用于呼吸子适应度的计算。

如图 10 所示,在实验中发现弛豫振荡和类噪声脉冲的射频频谱上也存在与呼吸子相似的边带。因此仅使用式(4)时,无法保证激光器中产生的是呼吸子。为了排除这些可能性,构建了与稳定锁模相关的适应度函数^[34],该函数利用了锁模脉冲比其他状态具有更高平均强度的特征。

$$C_{ml} = \frac{\sum_{i=1}^L I_i}{L}, I_i = \begin{cases} I_i, & (I_i \geq I_{th}) \\ 0, & (I_i < I_{th}) \end{cases} \quad (5)$$

式中: L 为示波器记录的数据点数,实验中 $L = 2^{24}$ (约等于激光器重复周期的 2700 倍); I_i 为点 i 处的强度; I_{th} 为噪声不应超过的强度阈值,可以通过实验测量进行人为设置; C_{ml} 代表了脉冲强度的平均值。因此,可以

将呼吸子锁模区的复合适应度函数定义为 C_{ml} 和 C_b 的加权和,即

$$F_{merit} = \alpha \times C_{ml} + \beta \times C_b \quad (6)$$

式(6)中两个分量的权重需要根据具体的实验情况进行确定,实验中设置 $\alpha = 40000, \beta = 10$ 。

为了确保激光器处于单脉冲状态,需要对脉冲数量 N 进行计算。计算公式为

$$N = \text{floor}\left(\frac{N_{\text{peak}}}{T_{sa} \times f_r}\right) \quad (7)$$

式中: T_{sa} 为采样时间; N_{peak} 表示采样数据的峰值数量,即采样间隔内的脉冲数量; f_r 是重复频率。可以通过 $N = 1$ 的判断语句检查激光器是否处于单脉冲呼吸子锁模状态。

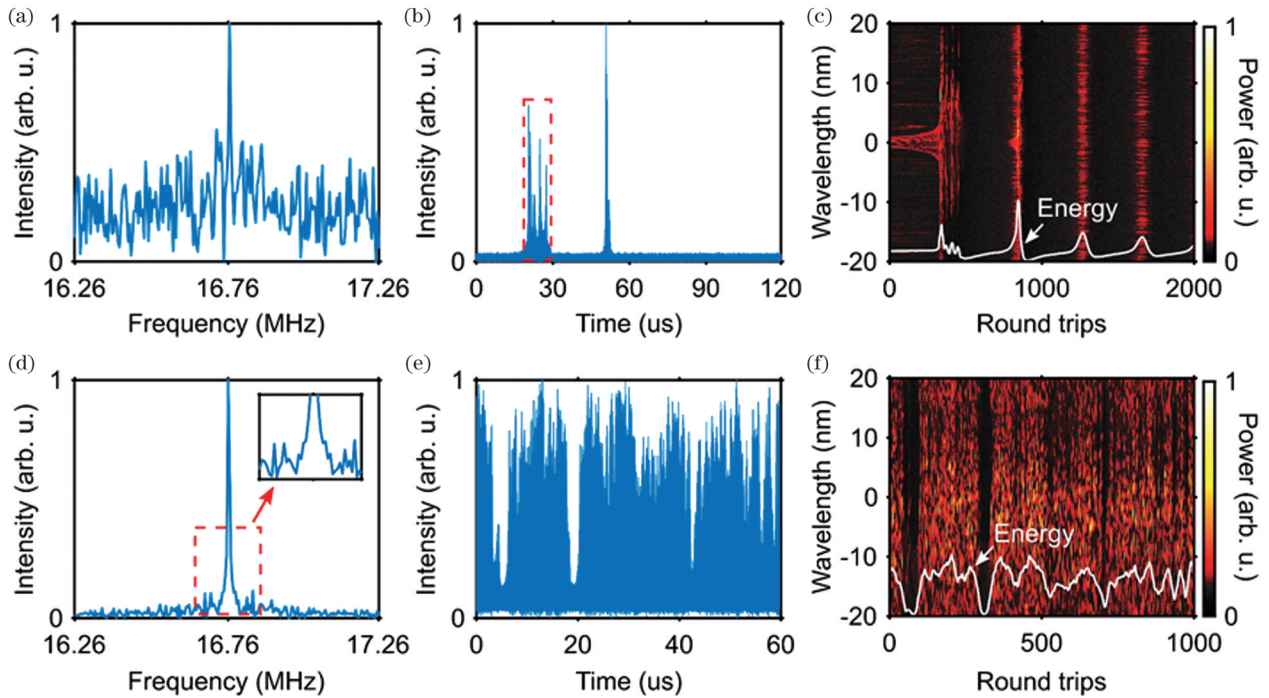


图 10 弛豫振荡和类噪声脉冲动力学^[37]。(a)~(c)弛豫振荡演化动力学:(a)对弛豫振荡时间强度信号进行 FFT 获得的射频频谱;(b)示波器捕捉的弛豫振荡相应的时域轨迹;(c)弛豫振荡在 2000 个周期内的 DFT (dispersive Fourier transformation) 光谱演化过程,白色曲线表示能量演变。(d)~(f)类噪声脉冲演化动力学:(d)对弛豫振荡时间强度信号进行快速傅里叶变换获得的射频频谱,插图显示了边带的放大;(e)示波器捕捉的类噪声相应的时域轨迹;(f)类噪声脉冲在 1000 个周期内的 DFT 光谱演化过程

Fig. 10 Dynamics of relaxation oscillation and noise-like pulse^[37]. (a)–(c) Dynamics of relaxation oscillation: (a) RF spectrum extracted by fast Fourier transform (FFT) of the relaxation oscillation temporal intensity signal, featuring many sidebands around the fundamental repetition frequency; (b) corresponding time trace of relaxation oscillation captured by the oscilloscope; (c) DFT optical spectrum evolution of the relaxation oscillation over 2000 cavity periods, where the white curve represents the energy evolution. (d)–(f) Dynamics of noise-like pulse emission: (d) RF spectrum of the output extracted by FFT of the temporal intensity signal, where the inset shows a magnified version of the sidebands; (e) corresponding time trace captured by the oscilloscope; (f) evolution of DFT optical spectrum roundtrip by roundtrip obtained by DFT, revealing the typical noisy

综上,对单呼吸子锁模的搜索可通过三部分优化程序实现:1) 对每个个体的适应度值 C_{ml} 进行测试和排序,这样能够排除那些适应度较低的弛豫振荡现象。同时,通过检查脉冲的最大峰值强度来排除类噪声锁模,如果最大峰值强度非常高,则重新开始搜寻。2) 采

用脉冲计数方式确认激光器处于单脉冲锁模状态。3) 通过式(6)给出的复合适应度函数对个体进行评价。当满足呼吸子适应度值时,退出搜寻并维持当前锁模态。式(6)是呼吸子锁模控制的核心部分,对其进行调整可以实现对呼吸子状态的精确控制,例如对振

荡周期或者呼吸比的精确控制。此外,在不同的泵浦功率下结合脉冲计数可以对呼吸子个数进行控制。

由于锁模激光器中的呼吸子比孤子的参量空间小^[65],可通过实际测试设置初始种群大小为 100,后续种群大小保持为 50。通常情况下,为了保留尽可能多的优良个体的基因,变异概率不宜设置得过大。此处设置交叉概率 Q_c 为 60%,变异概率 Q_m 为 2%。实验中,闭环反馈系统评估一代种群的适应度大小大约需要 3.3 min。

图 11 为实验结果,其中展示了适应度优化曲线的示例,它表明了每代种群的最大和平均适应度的演变。可以发现相对较大的初始种群规模能够促进向最佳状

态的快速收敛,如图 11(a)中所示,仅两代(即 6 min)之后,最大适应度迅速增大并收敛到最优值,之后种群的平均适应度也逐渐增加并收敛到几乎相同的值。第 6 代和第 9 代之间的平均适应度的波动是突变过程导致的,主要原因是突变过程中出现了较差的基因,导致该组电压值控制下的激光器适应度较低。最佳状态的光谱和时域特征如图 11(c)~(d)中。通过以下特征能够证实激光器在目标状态下(呼吸子)工作:1) 射频频谱在腔重复频率周围出现两个对称的边带,如图 11(b)所示;2) 激光器的光谱伴随着脉冲能量变换产生周期性的压缩和展宽,并且在时域上存在与光谱同步的周期性变化,如图 11(c)、(d)所示。

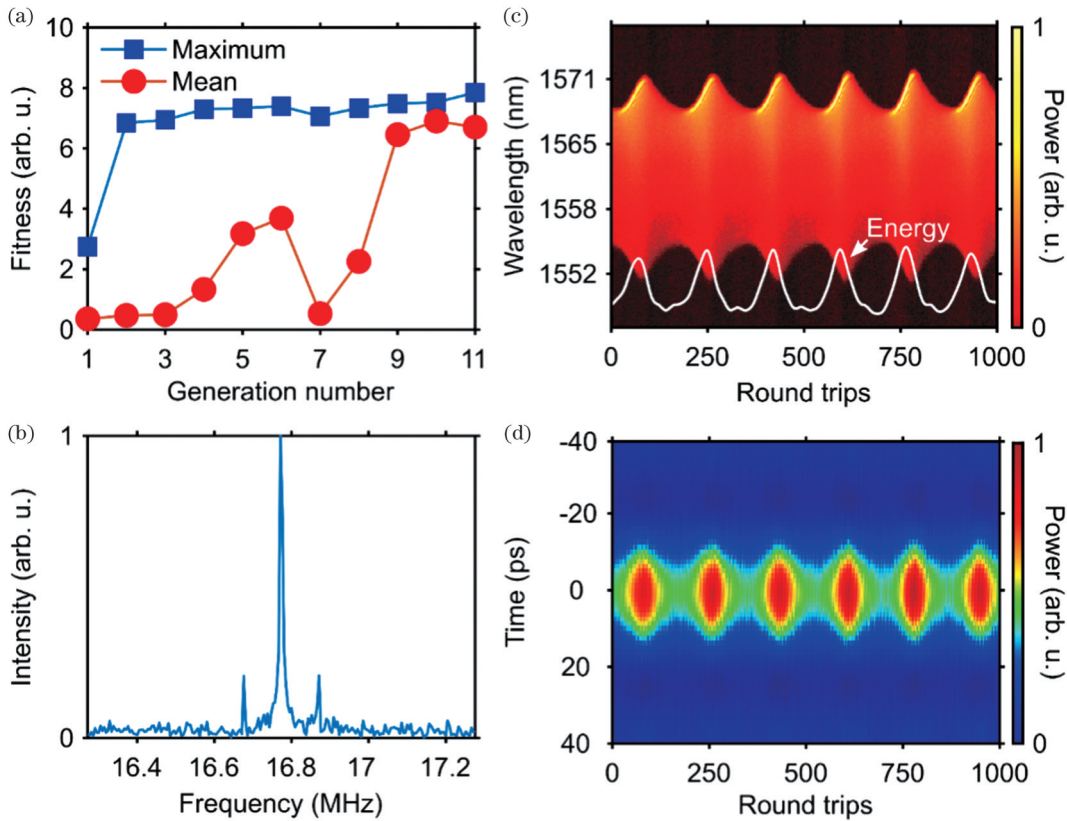


图 11 单呼吸子智能搜寻实验结果^[37]。(a)连续几代的平均(红色圆圈)和最大(蓝色方块)适应度值的演化。(b)~(d)优化状态的特征:(b)通过对光电二极管的信号进行 FFT 获得的射频频谱;(c)多次腔内往返的光谱(DFT 方法测量),白色曲线代表能量演化;(d)在连续腔内演化中脉冲时域强度的变化

Fig. 11 Experimental results of the intelligent search for single breathers^[37]. (a) Evolution of the average (red circles) and maximum (blue squares) fitness function value over successive generations, for the merit function given in equation (6). (b)~(d) Characteristics of the optimized state: (b) RF spectrum obtained by FFT of the signal from the photodiode; (c) dispersive Fourier transform recording of single-shot spectra over consecutive cavity round trips (RTs), where the white curve represents the energy evolution; (d) temporal evolution of the intensity relative to the average RT time over consecutive RTs

3.4.1.1 呼吸比控制

呼吸比定义为一个周期内脉冲光谱的最大和最小宽度之比(类似于调制深度)。呼吸比越高,脉冲射频频谱的呼吸频率强度越大。因此,优化呼吸比的关键在于控制射频频谱中重复频率和呼吸频率的峰值强度之比。呼吸比由式(4)中的适应度 C_b 定义。 C_b 值越大,

表示呼吸比越大。优化呼吸比的适应度函数可以定义为

$$F_{br} = \alpha \times C_{ml} + \beta \times (C_{const} - |C_b - C_{set}|), \quad (8)$$

式中: C_{ml} 由式(5)给出; C_{const} 为常数; $|C_b - C_{set}|$ 表示实际测量的呼吸比 C_b 与设置目标呼吸比 C_{set} 之间的差值。以式(8)的形式构造的适应度函数能够确保呼吸

比越接近目标, F_{br} 值越大。参数 α 和 β 与式 (6) 采用的值相同 ($\alpha = 40000, \beta = 10$)。

呼吸比控制的实验结果如图 12 所示。图 12 中列出了三种具有不同呼吸比的呼吸子光谱和时域演化动力学, 这些呼吸子通过在适应度函数中设置相应的值来产生。图中展示的分别是在腔内发现的最弱呼吸子 [呼吸比为 1.076, 如图 12(a) 所示]、最强呼吸子 [呼吸比为 1.816, 如图 12(g) 所示] 以及中等强度呼吸子 [呼

吸比为 1.471, 如图 12(d) 所示]。图 12(c)、(f)、(i) 为三种呼吸子单个呼吸周期中最大和最小光谱宽度的截面图, 可以发现增益光纤的增益带宽饱和限制了光谱的最大宽度, 增大呼吸比是通过减小最窄光谱的宽度而不是通过增加最宽光谱的宽度实现的。此外, 通过一系列实验确认了 1.816 是单呼吸子锁模激光器中可以获得的最大呼吸比, 当试图通过调节激光器参数增加呼吸比至 1.816 以上时, 激光器失锁。

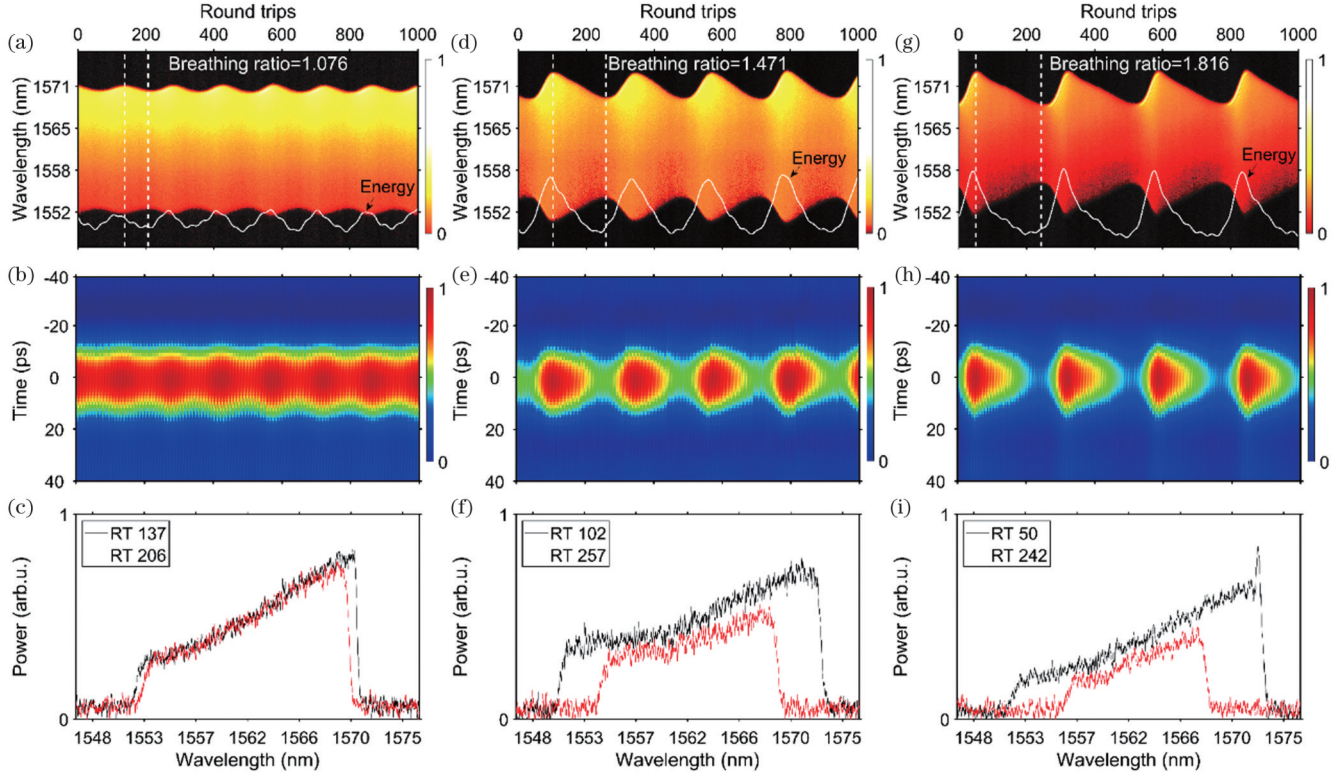


图 12 呼吸比智能控制^[37]。(a)~(c)呼吸比为 1.076 的呼吸子动力学;(d)~(f)呼吸比为 1.471 的呼吸子动力学;(g)~(i)呼吸比为 1.816 的呼吸子动力学;(a)(d)(g)多次腔内往返光谱(DFT 方法测量);(b)(e)(h)多次腔内往返时域记录;(c)(f)(i)单个呼吸周期内最宽和最窄谱宽的单次光谱截面

Fig. 12 Intelligent control of breathing ratio^[37]. (a)–(c) Dynamics of breathers with small breathing ratio of 1.076; (d)–(f) dynamics of breathers with moderate breathing ratio of 1.471; (g)–(i) dynamics of breathers with large breathing ratio of 1.816; (a)(d)(g) dispersive Fourier transform recording of single-shot spectra over consecutive cavity round trips (RTs); (b)(e)(h) temporal evolution of the intensity relative to the average RT time over consecutive RTs; (c)(f)(i) single-shot spectra at the RT numbers of maximal and minimal spectrum extents within a period

3.4.1.2 呼吸周期控制

呼吸子的呼吸周期可以通过对脉冲输出的射频谱进行计算得到 ($1/|f_{\pm 1} - f_r|$)。腔重复频率 f_r 是固定的, 通过控制特征边带频率 $f_{\pm 1}$ 可以控制呼吸周期。控制呼吸周期的关键在于构建一个适应度函数, 呼吸周期越接近目标值, 该函数值就越高。控制呼吸周期的适应度函数由两部分组成: 一部分为式 (6), 它保证激光器工作在呼吸子锁模状态; 另一部分是一个新的适应度函数 C_{bp} , 它考虑了目标边带频率 $f_{\pm 1}$ 的位置。如果 $f_{\pm 1}$ 的峰值高度为频谱区间 $(f_{\pm 1} - \Delta_1, f_{\pm 1} + \Delta_1)$ 局部最大值, 则特征边带位于目标频率 $f_{\pm 1}$ 处。需要注意的是,

为避免频谱范围包括腔重复频率 f_r, Δ_1 需小于 $|f_r - f_{\pm 1}|$ 。 C_{bp} 可以写成

$$C_{bp} = \frac{I(f_1) / \sum_{f=f_1-\Delta_1}^{f=f_1+\Delta_1} I(f) + I(f_{-1}) / \sum_{f=f_{-1}-\Delta_1}^{f=f_{-1}+\Delta_1} I(f)}{2}, \quad (9)$$

式中: $I(f_1) / \sum_{f=f_1-\Delta_1}^{f=f_1+\Delta_1} I(f)$ 和 $I(f_{-1}) / \sum_{f=f_{-1}-\Delta_1}^{f=f_{-1}+\Delta_1} I(f)$ 分别表示目标频率 $f_{\pm 1}$ 在频率间隔 $(f_{\pm 1} - \Delta_1, f_{\pm 1} + \Delta_1)$ 内的相对强度。因此, 控制呼吸周期的适应度函数可以表示成

$$F_{bp} = \alpha \times C_{ml} + \beta \times C_b + \gamma \times C_{bp}. \quad (10)$$

式 (10) 中, 等式右边的呼吸子锁模部分与式 (6) 相同,

同时增加了呼吸周期适应度函数 C_{bp} 。通过实验测试, 将参数 α 、 β 和 γ 分别设置为 40000、10 和 5。

图 13 展示了三种具有不同振荡周期的呼吸子的

光谱及其时域演化。遗传算法搜寻的最大和最小呼吸周期分别为 251 圈和 103 圈。这些结果证明了设计的适应度函数能够有效控制呼吸周期。

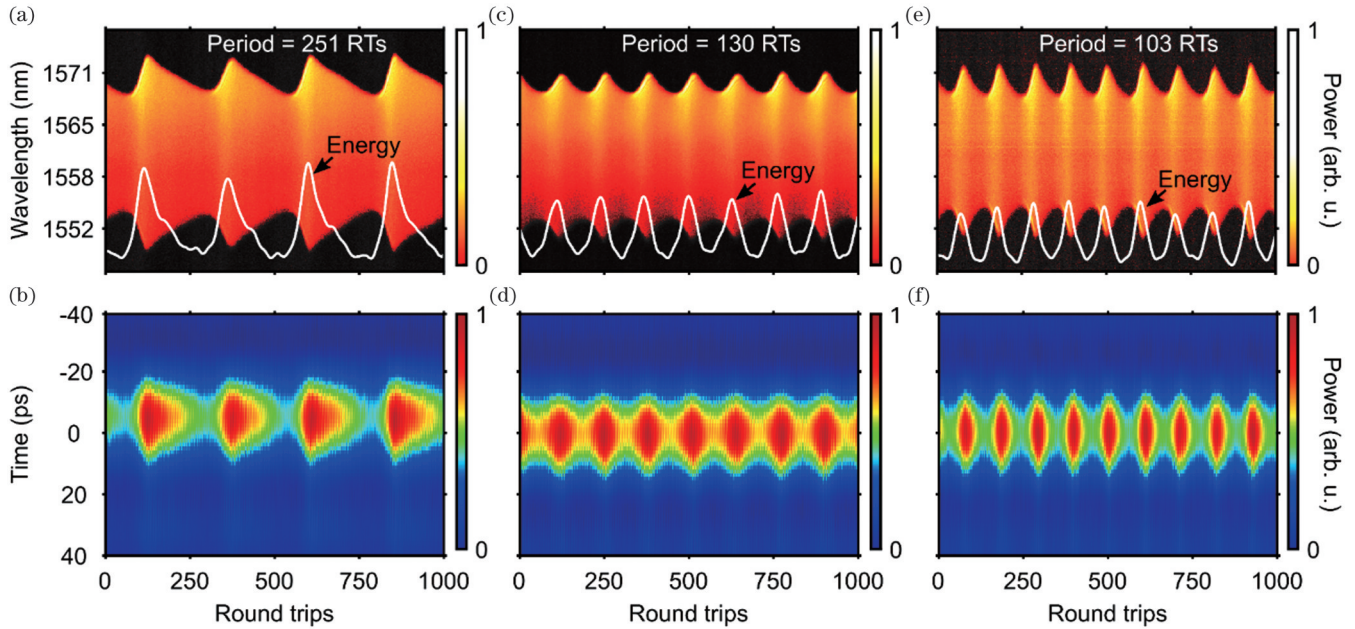


图 13 具有可调振荡周期的呼吸子的基因算法优化结果^[37]。(a)(b)振荡周期大的呼吸子的动力学;(c)(d)振荡周期中等的呼吸子的动力学;(e)(f)振荡周期小的呼吸子的动力学;(a)(c)(e)多次腔内往返光谱(DFT方法测量);(b)(d)(f)在连续腔内演化的脉冲时域强度的变化

Fig. 13 Genetic algorithm optimization results for breathing solitons with a tunable oscillation period^[37]. (a)(b) Dynamics of breathers with large oscillation period; (c)(d) dynamics of breathers with moderate oscillation period; (e)(f) dynamics of breathers with small oscillation period; (a)(c)(e) dispersive Fourier transform recording of single-shot spectra over consecutive RTs; (b)(d)(f) temporal evolution of the intensity relative to the average RT time over consecutive RTs

3.4.1.3 呼吸子分子复合物产生

与大多数多孤子结构类似^[19-20,24,66], 激光器中的呼吸子也存在相互作用, 并在特定的腔参数范围内能够形成多呼吸子束缚态^[11,55], 将其称为“呼吸子分子”。孤子分子在光纤激光器中产生的方法是将泵浦功率增大到单孤子锁模状态所需功率以上, 分子内的孤子数量和泵浦功率成正比^[19,24]。然而, 呼吸子分子的激发过程相比于孤子分子更加复杂。此外, 因为在正色散激光器中的呼吸子不会产生色散波, 所以在正色散光纤激光器中产生多呼吸子复合物更加困难^[11]。因此, 利用遗传算法产生呼吸子分子是非常有意义的。增加泵浦功率, 结合优化程序, 利用式(6)和式(7)中给出的呼吸子锁模适应度函数和脉冲计数方法, 实现了对呼吸子个数的精确控制。在搜寻双呼吸子、三呼吸子和四呼吸子组成的呼吸子分子及其复合物过程中, 搜寻时间最短的为 2 min, 最长的为 40 min。搜索双呼吸子时, 式(6)中的参数 α 和 β 设置为 40000 和 10, 搜索三呼吸子和四呼吸子时参数 α 和 β 设置为 4000 和 10。

图 14 展示了基于遗传算法的由双呼吸子构成的呼吸子分子的搜寻结果, 其中图 14(a)、(e)是由色散

傅里叶变换法测得的实时光谱, 由于光谱条纹过于密集, 产生了摩尔条纹; 图 14(b)、(f)给出了光谱的放大图。图 14(c)、(g)分别是图 14(a)、(e)的傅里叶变换(一阶场自相关), 由该自相关信号可以得到脉冲的间距, 两者分别为 268 ps 和 98 ps。图 14(d)展示了呼吸子分子中两个呼吸子之间的相对相位 ϕ_{21} 随着时间延长产生近似线性增加的演化。由于相位演化函数的斜率与两个束缚脉冲之间的强度成正比^[19-20,67], 图 14(d)中所示的准线性相位演化表明了两个同步演化呼吸子之间的强度差几乎固定, 其中尾随的呼吸子比前导的呼吸子强度更高。通过遗传算法搜寻到的第二类呼吸子分子如图 14(e)所示, 在这种状态下, 观察到了更强的光谱呼吸, 并且脉冲间隔为 98 ps, 减小为线性相位呼吸子分子间隔(298 ps)的 1/3 左右, 且相对相位的动力学具有了明显的振荡行为。这表明两个呼吸子距离接近后不断地交换能量。图 14(d)、(h)展示了呼吸子总能量和相对相位的关系, 在相位的极值处, 两个呼吸子具有相同的强度, 因此总能量最高。

当泵浦功率增大到 150 mW 时, 结合遗传算法可以获得三呼吸子的束缚态(呼吸子分子复合物)。三呼

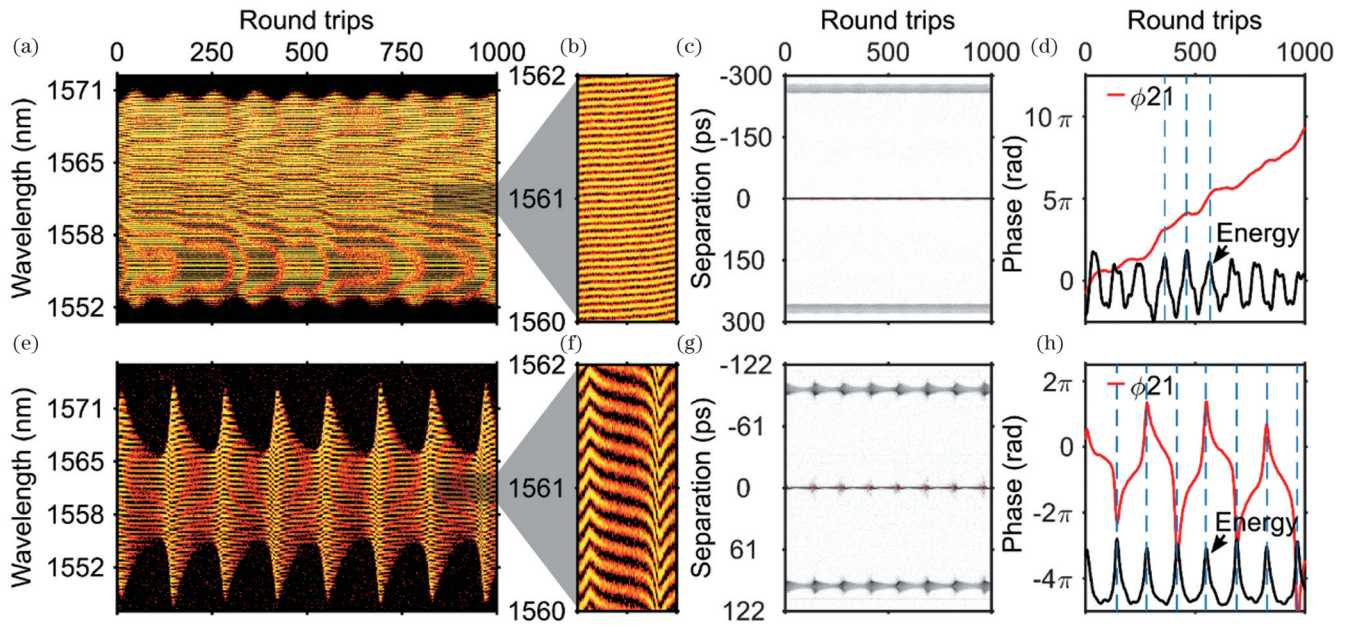


图 14 基于遗传算法的呼吸子分子优化结果^[37]。(a)~(d)增加型相位呼吸子分子动力学；(e)~(h)振荡型相位呼吸子分子动力学；(a)(e)多次腔内往返光谱(DFT方法测量),其中(a)中摩尔干涉条纹出现的根源在于光谱调制过于密集；(b)(f)DFT记录的光谱数据的特写；(c)(g)多次腔内往返光谱的一阶自相关轨迹演化；(d)(h)两个呼吸子分子之间的相对相位差(红色曲线)和分子总能量(黑色曲线)随时间的变化

Fig. 14 Typical genetic algorithm optimization results for breather molecules^[37]. (a)–(d) Dynamic of “increasing-phase” breather molecule; (e)–(h) dynamic of “oscillating-phase” breather molecule; (a)(e) dispersive Fourier transform (DFT) recording of single-shot spectra over consecutive cavity RTs, over-dense spectral modulation causes a Moiré interference pattern in Fig. 14(a); (b)(f) close-up view of the DFT recorded spectral data; (c)(g) evolution of the first-order single-shot autocorrelation trace over consecutive RTs; (d)(h) evolution of the relative phase difference between the two breathers (red curve) and the total energy of the molecule (black curve) as a function of the time

吸子的束缚态包括三种不同类型的三呼吸子,分别是 $2+1$ 、 $1+2$ 以及 $1+1+1$ 结构。特别地, $1+1+1$ 型呼吸子分子复合物由三个几乎等间距的呼吸子组成。在所有的呼吸子复合物中,基于DFT的单次光谱测量和时空强度演化动力学都明确地表明光谱的周期性变化伴随着脉冲能量的同步变化。

当泵浦功率设置为 170 mW 时,利用遗传算法可以实现四呼吸子束缚态的产生。四呼吸子束缚态的类型包括 $1+3$ 、 $3+1$ 和 $2+2$ 结构,其中有两种间距差别很大的 $1+3$ 结构呼吸子分子复合物,而且间距较小的呼吸子的呼吸比更大,这也说明脉冲距离与呼吸比之间存在着潜在的联系。

3.4.2 分形呼吸子智能控制

上一节所述的呼吸子超快激光是在正常色散条件下产生的,不具备分形特性。最近发现:当激光器色散趋近于零时,将会产生分形呼吸子^[54]。本节将介绍分形呼吸子及其智能控制。

1975年,数学家 Benoit Mandelbrot 首次提出“分形”一词,并由此诞生了一门新的学科——分形几何学。Mandelbrot 将分形定义为“局部和整体以某种方式相似的形体”。分形在自然界中的一个典型例子是西兰花,西兰花的每一个分支与整体的形状都是相似

的。虽然分形最初只是一个数学概念,但其已在众多系统中被观察到,如材料学、生物学、神经学、电路、网络、地理等。2000年,光孤子和分形之间的联系在理论上被建立起来^[68]。由于光孤子较为稳定,将其“分形”为多个分支需要对传输介质(例如光纤)的物理性质进行多次改变,而且需要在多个位置对光孤子进行探测。这些条件在实验上很难实现,相关实验几乎无法开展。最近的相关工作表明:当激光器工作在近零色散区时,产生的呼吸子具有分形特性^[54]。研究发现,通过控制激光器的泵浦电流,激光器输出光场可以在频率锁定和未锁定呼吸子这两类呼吸子之间切换,如图 15 所示。频率锁定呼吸子的呼吸频率稳定性比未锁定呼吸子的高 3500 倍左右,如图 16 所示。此外,呼吸频率与激光器重复频率的比值(环绕数)会随着泵浦功率的变化出现一系列平台,如图 17 所示。这些平台对应的数值呈现出了经典的分形结构——法里树,如图 17 中的插图所示。该分形结构被称为“魔鬼阶梯”是因为其分形维度值(0.87)和魔鬼阶梯的分形维度值一致。维度的计算方法详见文献^[54]。

人工寻找频率锁定呼吸子需要一定的经验且耗时费力,而利用智能控制系统可以实现频率锁定呼吸

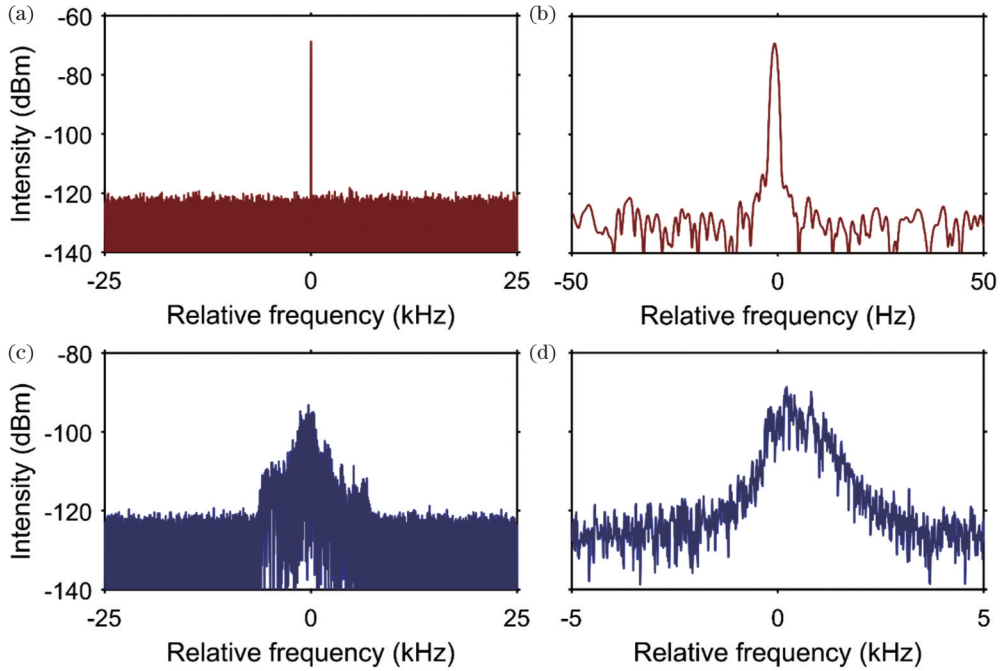


图 15 锁频和未锁频呼吸子对应的射频谱测量图(参考频率为基频的 1/5)^[54]。(a)(b)在 50 kHz 和 100 Hz 跨度上测量到的锁频呼吸子的单模振荡;(c)(d)在 50 kHz 和 10 kHz 跨度上测量到的未锁频呼吸子的多模振荡

Fig. 15 RF spectral measurements of frequency-locked and frequency-unlocked breathers (the reference frequency is one-fifth of the fundamental repetition frequency)^[54]. (a)(b) Single-mode oscillation of frequency-locked breather measured over spans of 50 kHz and 100 Hz, respectively; (c)(d) multi-mode oscillation of frequency-unlocked breathers measured over 50 kHz and 10 kHz spans, respectively

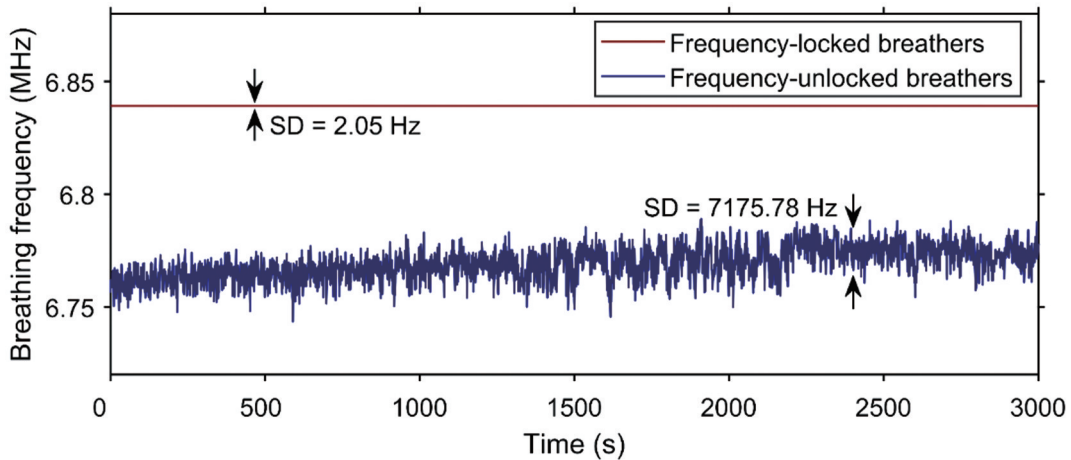


图 16 通过频率计数器测量的锁定呼吸子与未锁定呼吸子频率随时间的变化,前者的稳定性是后者的 3500 倍左右,其中 SD 表示为标准差^[54]

Fig. 16 Change in breathing frequency over time for the frequency-locked and frequency-unlocked breathers, as measured with a cymometer. The former is 3500 times more stable than the latter, and SD means standard deviation^[54]

子的快速搜寻。如图 18 所示,智能系统需要精确调整 4 个参数,包括泵浦电流和三个液晶相位延迟器的电压。3.4 节介绍了一种基于遗传算法来搜索和控制超快光纤激光器中呼吸子锁模的算法,但是该算法无法区分频率锁定和非锁定呼吸子,因此需要对其进行一定的修改。在该实验中,研究人员开发了直接精确定位锁频呼吸子的方法。为此,需要构建一个新的适应度函数。该函数考虑了锁频呼吸子的显著特征,即

呼吸频率的高信噪比(图 15)。构建的适应度函数为

$$F_{\text{merit}} = \alpha \times F_{\text{ml}} + \beta \times F_{\text{b}} + \gamma \times F_{\text{snr}}, \quad (11)$$

其中

$$F_{\text{snr}} = \max I(f), f \in [f_r + \delta, 3f_r/2], \quad (12)$$

式中: F_{ml} 和 F_{b} 分别为锁模适应度和呼吸适应度,两者的加权用于确保激光器处于呼吸子锁模; F_{snr} 是一种新的适应度函数,用于评估 $[f_r + \delta, 3f_r/2]$ 中最强的呼吸

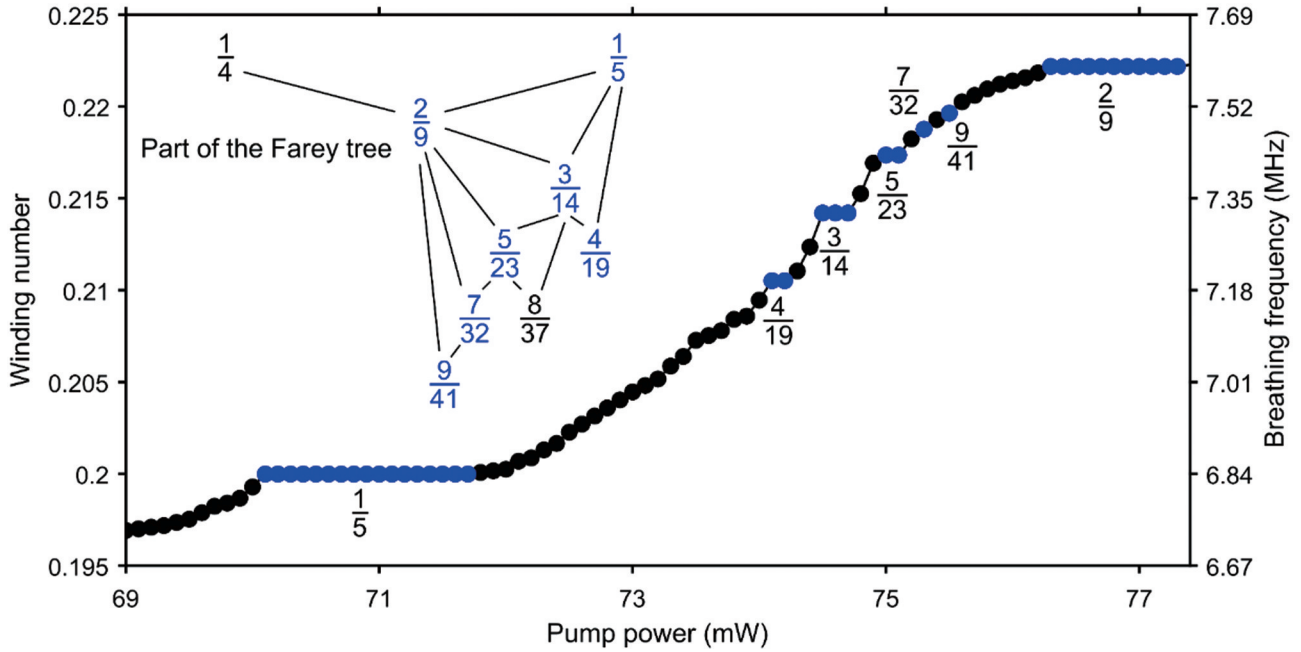


图 17 呼吸频率/环绕数随泵浦功率的改变出现一系列平台。平台对应的环绕数构成了法里树,如插图所示。环绕数是指呼吸频率(呼吸子演化周期的倒数)与激光器重复频率(由激光器长度决定)的比值;环绕数等于 $1/5$ 表示呼吸频率是激光器重复频率的 $1/5$ ^[54]

Fig. 17 Breathing frequency/winding number with pump power in a series of plateaus. The plateaus corresponding winding number forms the Farey tree, as shown in the inset. The winding number refers to the ratio of breathing frequency (f_b) and repetition frequency f_r ; the winding number equal to $1/5$ means that f_b/f_r equal to $1/5$ ^[54]

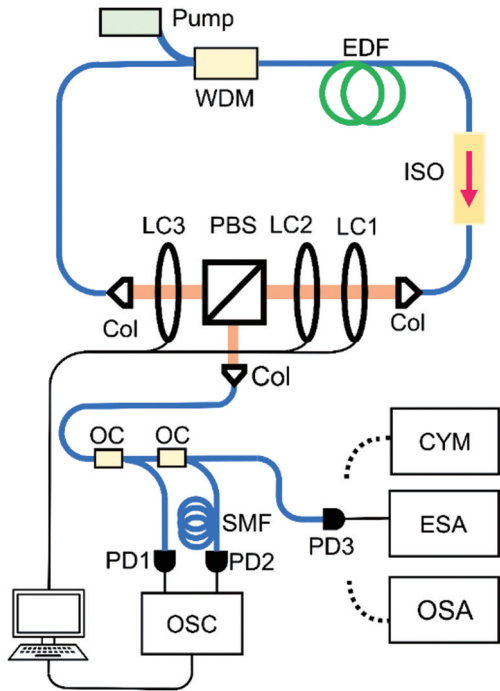


图 18 基于液晶相位延迟器偏振控制的智能激光器实验装置^[54]
Fig. 18 Experiment setup of the intelligent laser with polarization control based on liquid crystal phase delayers^[54]

频率,进而区分锁频和未锁频呼吸子,其中的频移 δ 被用于从评估区间排除基频 f_r ; $f_r/2$ 表示最大可能的呼吸频率。等式中三个分量的权重通过实验确定 ($\alpha =$

$2000, \beta = 200, \gamma = 200$)。此外,系统还将通过扫描泵浦电流对频率锁定呼吸子进行再次确认。如果呼吸频率不随泵浦电流变化,则说明产生的呼吸子是频率锁定呼吸子。

图 19(a)展示了搜寻频率锁定呼吸子的优化曲线,该曲线描绘了种群在连续几代中的最大和平均适应度的演变,以及呼吸频率信噪比的演变。从图中可以看出呼吸频率信噪比迅速增大,并在第 8 代收敛到最大值,表明了激光器锁频呼吸子模式的建立。最大适应度也有类似的演化。图 19(b)、(c)展示了呼吸频率在泵浦功率和偏振调谐下的稳定性,进一步证实了激光器工作在锁频呼吸子区间。锁频呼吸子无法自启动,即:在锁频呼吸子状态下,如果关闭激光器的泵浦源,然后再次打开,激光器无法回到锁频呼吸子状态。运行遗传算法后,激光器会重新恢复到该状态。

4 结束语

本文回顾了智能控制在被动锁模光纤激光器中的应用。基于智能控制技术,可以实现对锁模态的自动化产生和控制,不需要手动调谐,缩短了激光器的调谐时间,提升了调谐的精度以及锁模态的可重复性。此外,这种自优化的超短脉冲激光器在某些特殊环境下也具有一定的应用前景。尽管被动锁模光纤激光器是一个非常复杂的动力学系统,但是通过遗传算法成功实现了对多种锁模态的精准调控,这说明该算法具

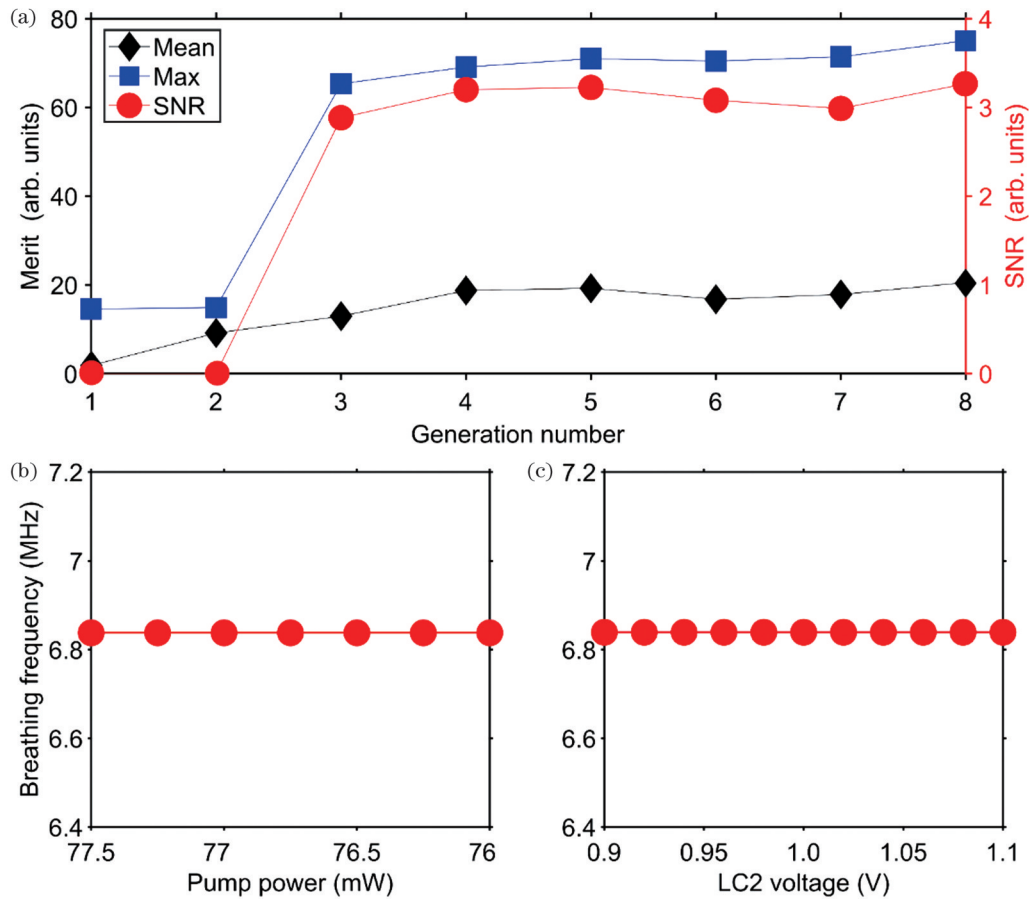


图 19 机器学习的结果^[54]。(a)每代种群的平均和最大适应度的演化,以及呼吸频率信噪比 SNR 的相应演化;(b)(c)呼吸频率不随泵浦功率和偏振(通过改变液晶 LC2 上的电压)而变化,最优状态(锁频呼吸子)持续稳定存在

Fig. 19 Machine-learning results^[54]. (a) Evolution of the mean and best fitness function value of the individuals for each generation, as well as the corresponding evolution of the SNR (signal-to-noise ratio) of the breathing frequency; (b)(c) breathing frequency is constant with the variation of pump power and polarization, showing stable optimal state (locked-frequency breather)

有普适性。包括遗传算法在内的一系列智能算法也有望应用于其他更为复杂的锁模态的智能化控制。此外,当前智能控制技术的重点在于控制激光器,实现激光器的自动调节。智能控制技术能否对激光物理产生影响是一个开放性问题。

参 考 文 献

- [1] Jones D J, Diddams S A, Ranka J K, et al. Carrier-envelope phase control of femtosecond mode-locked lasers and direct optical frequency synthesis[J]. *Science*, 2000, 288(5466): 635-640.
- [2] Udem T, Holzwarth R, Hänsch T W. Optical frequency metrology[J]. *Nature*, 2002, 416(6877): 233-237.
- [3] Droste S, Ycas G, Washburn B R, et al. Optical frequency comb generation based on erbium fiber lasers[J]. *Nanophotonics*, 2016, 5(2): 196-213.
- [4] Kerse C, Kalaycıoğlu H, Elahi P, et al. Ablation-cooled material removal with ultrafast bursts of pulses[J]. *Nature*, 2016, 537(7618): 84-88.
- [5] Nakazawa M, Yoshida M, Hirooka T. The Nyquist laser[J]. *Optica*, 2014, 1(1): 15-22.
- [6] Öktem B, Pavlov I, Ilday S, et al. Nonlinear laser lithography for indefinitely large-area nanostructuring with femtosecond pulses[J]. *Nature Photonics*, 2013, 7(11): 897-901.
- [7] Arumugam M. Optical fiber communication: an overview[J]. *Pramana*, 2001, 57(5): 849-869.
- [8] Keiser G. Optical fiber communications[M]. New York: McGraw-Hill, 2000.
- [9] Fermann M E, Hartl I. Ultrafast fiber laser technology[J]. *IEEE Journal of Selected Topics in Quantum Electronics*, 2009, 15(1): 191-206.
- [10] Grelu P, Akhmediev N. Dissipative solitons for mode-locked lasers[J]. *Nature Photonics*, 2012, 6(2): 84-92.
- [11] Peng J S, Boscolo S, Zhao Z H, et al. Breathing dissipative solitons in mode-locked fiber lasers[J]. *Science Advances*, 2019, 5(11): eaax1110.
- [12] Lecaplain C, Grelu P, Soto-Crespo J M, et al. Dissipative rogue waves generated by chaotic pulse bunching in a mode-locked laser[J]. *Physical Review Letters*, 2012, 108(23): 233901.
- [13] Meng F C, Lapre C, Billet C, et al. Intracavity incoherent supercontinuum dynamics and rogue waves in a broadband dissipative soliton laser[J]. *Nature Communications*, 2021, 12: 5567.
- [14] Soto-Crespo J M, Akhmediev N, Ankiewicz A. Pulsating, creeping, and erupting solitons in dissipative systems[J]. *Physical Review Letters*, 2000, 85(14): 2937-2940.
- [15] Cundiff S T, Soto-Crespo J M, Akhmediev N. Experimental evidence for soliton explosions[J]. *Physical Review Letters*, 2002, 88(7): 073903.
- [16] Runge A F J, Broderick N G R, Erkintalo M. Observation of soliton explosions in a passively mode-locked fiber laser[J]. *Optica*, 2015, 2(1): 36-39.
- [17] Peng J S, Zeng H P. Soliton collision induced explosions in a mode

- locked fibre laser[J]. *Communications Physics*, 2019, 2: 34.
- [18] Grelu P, Belhache F, Gutton F, et al. Phase-locked soliton pairs in a stretched-pulse fiber laser[J]. *Optics Letters*, 2002, 27(11): 966-968.
- [19] Krupa K, Nithyanandan K, Andral U, et al. Real-time observation of internal motion within ultrafast dissipative optical soliton molecules[J]. *Physical Review Letters*, 2017, 118(24): 243901.
- [20] Herink G, Kurtz F, Jalali B, et al. Real-time spectral interferometry probes the internal dynamics of femtosecond soliton molecules[J]. *Science*, 2017, 356(6333): 50-54.
- [21] Peng J S, Sorokina M, Sugavanam S, et al. Real-time observation of dissipative soliton formation in nonlinear polarization rotation mode-locked fibre lasers[J]. *Communications Physics*, 2018, 1: 20.
- [22] Cole D C, Lamb E S, Del'Haye P, et al. Soliton crystals in Kerr resonators[J]. *Nature Photonics*, 2017, 11(10): 671-676.
- [23] Karpov M, Pfeiffer M H P, Guo H R, et al. Dynamics of soliton crystals in optical microresonators[J]. *Nature Physics*, 2019, 15(10): 1071-1077.
- [24] Wang Z Q, Nithyanandan K, Coillet A, et al. Optical soliton molecular complexes in a passively mode-locked fibre laser[J]. *Nature Communications*, 2019, 10: 830.
- [25] He W, Pang M, Yeh D H, et al. Formation of optical supramolecular structures in a fibre laser by tailoring long-range soliton interactions[J]. *Nature Communications*, 2019, 10: 5756.
- [26] Zou D F, Song Y J, Gat O, et al. Synchronization of the internal dynamics of optical soliton molecules[J]. *Optica*, 2022, 9(11): 1307-1313.
- [27] Andral U, Si Fodil R, Amrani F, et al. Fiber laser mode locked through an evolutionary algorithm[J]. *Optica*, 2015, 2(4): 275-278.
- [28] Genty G, Salmela L, Dudley J M, et al. Machine learning and applications in ultrafast photonics[J]. *Nature Photonics*, 2021, 15(2): 91-101.
- [29] Andral U, Buguet J, Si Fodil R, et al. Toward an autotuning mode-locked fiber laser cavity[J]. *Journal of the Optical Society of America B*, 2016, 33(5): 825-833.
- [30] Woodward R I, Kelleher E J R. Towards 'smart lasers': self-optimisation of an ultrafast pulse source using a genetic algorithm[J]. *Scientific Reports*, 2016, 6: 37616.
- [31] Winters D G, Kirchner M S, Backus S J, et al. Electronic initiation and optimization of nonlinear polarization evolution mode-locking in a fiber laser[J]. *Optics Express*, 2017, 25(26): 33216-33225.
- [32] Woodward R I, Kelleher E J R. Genetic algorithm-based control of birefringent filtering for self-tuning, self-pulsing fiber lasers[J]. *Optics Letters*, 2017, 42(15): 2952-2955.
- [33] Kokhanovskiy A, Ivanenko A, Kobtsev S, et al. Machine learning methods for control of fibre lasers with double gain nonlinear loop mirror[J]. *Scientific Reports*, 2019, 9: 2916.
- [34] Pu G Q, Yi L L, Zhang L, et al. Intelligent programmable mode-locked fiber laser with a human-like algorithm[J]. *Optica*, 2019, 6(3): 362-369.
- [35] Pu G Q, Yi L L, Zhang L, et al. Intelligent control of mode-locked femtosecond pulses by time-stretch-assisted real-time spectral analysis[J]. *Light: Science & Applications*, 2020, 9: 13.
- [36] Wei X M, Jing J C, Shen Y C, et al. Harnessing a multi-dimensional fibre laser using genetic wavefront shaping[J]. *Light: Science & Applications*, 2020, 9: 149.
- [37] Wu X Q, Peng J S, Boscolo S, et al. Intelligent breathing soliton generation in ultrafast fiber lasers[J]. *Laser & Photonics Reviews*, 2022, 16(2): 2100191.
- [38] Pu G Q, Liu R M, Luo C, et al. Intelligent single-cavity dual-comb source with fast locking[J]. *Journal of Lightwave Technology*, 2023, 41(2): 593-598.
- [39] Girardot J, Billard F, Coillet A, et al. Autotuning mode-locked laser using an evolutionary algorithm and time-stretch spectral characterization[J]. *IEEE Journal of Selected Topics in Quantum Electronics*, 2020, 26(5): 1100108.
- [40] Jiang M, Wu H S, An Y, et al. Fiber laser development enabled by machine learning: review and prospect[J]. *Photonix*, 2022, 3(1): 1-27.
- [41] Pu G Q, Liu R M, Yang H, et al. Fast predicting the complex nonlinear dynamics of mode-locked fiber laser by a recurrent neural network with prior information feeding[J]. *Laser & Photonics Reviews*, 2023: 2200363.
- [42] Shalev-Shwartz S, Ben-David S. Understanding machine learning: from theory to algorithms[M]. Cambridge: Cambridge University Press, 2014.
- [43] Salmela L, Tsipinakis N, Foi A, et al. Predicting ultrafast nonlinear dynamics in fibre optics with a recurrent neural network[J]. *Nature Machine Intelligence*, 2021, 3(4): 344-354.
- [44] He J Y, Li C Y, Wang P, et al. Soliton molecule dynamics evolution prediction based on LSTM neural networks[J]. *IEEE Photonics Technology Letters*, 2022, 34(3): 193-196.
- [45] Yan Q Q, Deng Q H, Zhang J, et al. Low-latency deep-reinforcement learning algorithm for ultrafast fiber lasers[J]. *Photonics Research*, 2021, 9(8): 1493-1501.
- [46] Devore J L. Probability and statistics for engineering and the sciences[J]. *Biometrics*, 1991, 47(4): 1638.
- [47] Wright L G, Christodoulides D N, Wise F W. Spatiotemporal mode-locking in multimode fiber lasers[J]. *Science*, 2017, 358(6359): 94-97.
- [48] Ding Y H, Xiao X S, Liu K W, et al. Spatiotemporal mode-locking in lasers with large modal dispersion[J]. *Physical Review Letters*, 2021, 126(9): 093901.
- [49] Gao C X, Cao B, Ding Y H, et al. All-step-index-fiber spatiotemporally mode-locked laser[J]. *Optica*, 2023, 10(3): 356-363.
- [50] Wright L G, Sidorenko P, Pourbeyram H, et al. Mechanisms of spatiotemporal mode-locking[J]. *Nature Physics*, 2020, 16(5): 565-570.
- [51] Long J G, Gao Y X, Lin W, et al. Switchable and spacing tunable dual-wavelength spatiotemporal mode-locked fiber laser[J]. *Optics Letters*, 2021, 46(3): 588-591.
- [52] Jing J C, Wei X M, Wang L V. Spatio-temporal-spectral imaging of non-repeatable dissipative soliton dynamics[J]. *Nature Communications*, 2020, 11: 2059.
- [53] Teğin U, Kakkava E, Rahmani B, et al. Spatiotemporal self-similar fiber laser[J]. *Optica*, 2019, 6(11): 1412-1415.
- [54] Wu X Q, Zhang Y, Peng J S, et al. Farey tree and devil's staircase of frequency-locked breathers in ultrafast lasers[J]. *Nature Communications*, 2022, 13: 5784.
- [55] Peng J S, Zhao Z H, Boscolo S, et al. Breather molecular complexes in a passively mode-locked fiber laser[J]. *Laser & Photonics Reviews*, 2021, 15(7): 2000132.
- [56] Peng J S, Zeng H P. Triple-state dissipative soliton laser via ultrafast self-parametric amplification[J]. *Physical Review Applied*, 2019, 11(4): 044068.
- [57] Peng J S, Zeng H P. Experimental observations of breathing dissipative soliton explosions[J]. *Physical Review Applied*, 2019, 12(3): 034052.
- [58] Du Y Q, Xu Z W, Shu X W. Spatio-spectral dynamics of the pulsating dissipative solitons in a normal-dispersion fiber laser[J]. *Optics Letters*, 2018, 43(15): 3602-3605.
- [59] Xian T H, Zhan L, Wang W C, et al. Subharmonic entrainment breather solitons in ultrafast lasers[J]. *Physical Review Letters*, 2020, 125(16): 163901.
- [60] Liu M, Wei Z W, Li H, et al. Invisible soliton pulsation: visualizing the "invisible" soliton pulsation in an ultrafast laser[J]. *Laser & Photonics Reviews*, 2020, 14(4): 2070023.
- [61] Wang Z Q, Coillet A, Hamdi S, et al. Spectral pulsations of dissipative solitons in ultrafast fiber lasers: period doubling and beyond[EB/OL]. (2022-04-28)[2023-02-05]. <https://arxiv.org/abs/2204.13476>.
- [62] Krupa K, Kardaš T M, Stepanenko Y. Real-time observation of

- double-hopf bifurcation in an ultrafast all-PM fiber laser[J]. *Laser & Photonics Reviews*, 2022, 16(10): 2100646.
- [63] Cui Y D, Zhang Y S, Huang L, et al. Dichromatic “breather molecules” in a mode-locked fiber laser[J]. *Physical Review Letters*, 2023, 130(15): 153801.
- [64] Du Y Q, He Z W, Gao Q, et al. Emergent phenomena of vector solitons induced by the linear coupling[J]. *Laser & Photonics Reviews*, 2023: 2300076.
- [65] Chang W, Soto-Crespo J M, Vouzas P, et al. Extreme amplitude spikes in a laser model described by the complex Ginzburg-Landau equation[J]. *Optics Letters*, 2015, 40(13): 2949-2952.
- [66] Peng J S, Zeng H P. Build-up of dissipative optical soliton molecules via diverse soliton interactions[J]. *Laser & Photonics Reviews*, 2018, 12(8): 1800009.
- [67] Soto-Crespo J M, Akhmediev N N. Multisoliton regime of pulse generation by lasers passively mode locked with a slow saturable absorber[J]. *Journal of the Optical Society of America B*, 1999, 16(4): 674-677.
- [68] Sears S, Soljacic M, Segev M, et al. Cantor set fractals from solitons[J]. *Physical Review Letters*, 2000, 84(9): 1902-1905.

Principles and Research Advances of Intelligent Mode-Locked Fiber Lasers

Wu Xiuqi¹, Peng Junsong^{1,2*}, Zhang Ying¹, Zeng Heping^{1,2,3**}

¹State Key Laboratory of Precision Spectroscopy, East China Normal University, Shanghai 200062, China;

²Chongqing Institute of East China Normal University, Chongqing 401120, China;

³Jinan Institute of Quantum Technology, Jinan 250101, Shandong, China

Abstract

Significance The invention of laser technology has had a transformative impact on society. Mode-locked fiber lasers have been widely used in research and industry, and they play an important role in basic science as a convenient nonlinear system. A mode-locked fiber laser is a complex nonlinear dissipative system with a large number of internal nonlinear dynamical phenomena that, in addition to outputting stable femtosecond pulses, exhibits a series of complex mode-locked states, including the breather locked mode, strange waves, noise-like locked modes, soliton explosions, and self-organized modes arising from soliton interactions, such as soliton molecules, soliton crystals, soliton complexes, and supramolecular structures. Even chaotic states have recently been discovered in mode-locked lasers. The study of these mode-locked states helps to understand the nonlinear dynamical properties of femtosecond fiber lasers. Additionally, because the femtosecond fiber laser is a universal nonlinear dissipative system, studying its dynamics can clarify the complex dynamics in related fields, such as Bose-Einstein condensation, microcavities, and oceanography. The intrinsic dynamics of these systems and the mode-locked laser are described uniformly by the nonlinear Schrödinger equation and thus have similarities.

Owing to the presence of numerous mode-locked regions in mode-locked lasers, it has long been a challenging problem to control the parameters of the laser and thus access specific mode-locked states. For example, the most commonly used femtosecond fiber laser based on the nonlinear polarization rotational mode-locking technique is mathematically a multidimensional parametric space and experimentally requires tuning of at least seven parameters (pump, loss, dispersion, nonlinearity, and angles of the three waveplates) to traverse the entire parametric space. Because of the lack of a definite functional relationship between the mode-locking state and these parameters, a long trial-and-error process is needed to obtain the desired mode-locking state. In addition, even if the target locked mode is obtained, its repeatability is a problem.

Recently, a major breakthrough was made in intelligent mode-locked lasers, which can resolve the difficulty of precise control of mode-locked states. In 2015, Prof. Grelu's group in France applied a genetic algorithm to the intelligent control of mode-locked lasers for the first time and realized the intelligent control of soliton pulses and noise-like pulses. Subsequently, the development of intelligent mode-locked lasers has accelerated. Hence, it is necessary to summarize the existing studies to rationally guide subsequent research in this area.

Progress The principle of the commonly used smart locking algorithms and recent scientific research results are summarized. First, the principles of the genetic algorithm, human-like algorithm, and artificial neural network are explained, and a schematic (Fig. 1) and architecture diagram (Fig. 2) are presented. Then, recent scientific achievements in smart mode-locked lasers are described, including the first implementation of a soliton-locked mode in smart lasers by Andral *et al.* at the Université de Bourgogne, France (Fig. 3); the development of genetic algorithms for soliton-locked mode recovery by Winters *et al.* at Kapteyn-Murnane Laboratories, USA (Fig. 4); the development of the first smart programmable mode-locked laser by Pu *et al.* at Shanghai Jiao Tong University (Fig. 5); and the development of the first smart programmable mode-locked laser using deep learning for intelligent mode-locking recovery by Yan *et al.* at the National University of Defense Technology (Fig. 6). Subsequently, the realization of programmable control of the spectral width and spectral shape by Pu *et al.* of Shanghai Jiao Tong University (Fig. 7) and the intelligent control of spatiotemporal mode-locking by Wei *et al.* of South China University of Technology (Fig. 8) are elaborated. The intelligent regulation of the breather ultrafast laser is summarized, starting with the design of an adaptation function based on the radiofrequency signal of the breather locked mode (Fig. 9), in which the relaxation oscillation dynamics and noise-like pulse dynamics in the laser are excluded (Fig. 10). Then, experimental results of the genetic algorithm (Fig. 11) are discussed, along with the control of the breather breathing ratio, the

breathing period, and the number of pulses (Figs. 12–14). Finally, the work related to the intelligent control of fractal respiratory subsets is briefly described. The differences in the spectra and stability of frequency-locked and non-frequency-locked breathers are examined (Figs. 15 and 16), the evolutionary dynamics of fractal breathers are specified (Fig. 17), and the intelligent search for fractal breathers is implemented using a smart laser based on a liquid-crystal phase delay (Figs. 18 and 19).

Conclusions and Prospects This paper reviews the application of intelligent-control technology in passively mode-locked fiber lasers. Using intelligent-control technology, the automatic generation and control of the mode-locked state can be realized without manual tuning, which reduces the tuning time of the laser and improves the tuning accuracy as well as the repeatability of the mode-locked state. This self-optimizing ultrashort pulse laser has promising applications in certain environments. Although the passive mode-locked fiber laser is a complex dynamical system, the successful achievement of accurate tuning of multiple mode-locked states by genetic algorithms indicates the universality of these algorithms. A series of intelligent algorithms, including genetic algorithms, are expected to be applied to the intelligent control of more complex mode-locked states. The current intelligent-control technology focuses on controlling lasers and achieving automatic laser tuning. Whether intelligent-control techniques can have an impact on laser physics remains an open question.

Key words lasers; mode-locking; solitons; breathers; intelligence