

分形激光精密控制研究综述

曾和平^{1,2,3,4}, 吴修齐^{1,2}, 彭俊松^{1,2}

(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.上海量子科学研究中心, 上海 200062;

4.重庆脑与智能科学中心, 重庆 401120)

摘要: 介绍了单通光纤中的孤子分形、矢量孤子碰撞中的分形、自旋波孤子中的分形、呼吸子激光中的分形等激光器中存在的典型分形结构及相关调控方法, 阐述了锁模激光器中分形激光频谱密度高、调谐精度高、能够实现高分辨力飞秒光纤光梳等特点。探讨了提升飞秒光纤光梳分辨率的问题, 指出利用呼吸子激光中的魔鬼阶梯和法里树分形结构, 结合智能调谐手段可提升飞秒光纤光梳的探测分辨率。展望了呼吸子分形光梳在分子光谱、任意光波合成等领域的发展方向, 指出未来通过发展光频域高精度锁定技术、时频相位全息跟踪探测技术、分形频谱关联与相噪分析技术, 并优化理论模型, 有望进一步抑制光梳的噪声, 并突破谱密度极限。

关键词: 分形; 呼吸子; 智能控制; 非线性动力学; 光纤激光器

中图分类号: O43; TB96; TN248

文献标志码: A

文章编号: 1674-5795 (2024) 03-0003-18

Review of research on fractal laser precision control

ZENG Heping^{1,2,3,4}, WU Xiuqi^{1,2}, PENG Junsong^{1,2}

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

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

3.Shanghai Research Center for Quantum Sciences, Shanghai 200062, China;

4.Chongqing Institute for Brain and Intelligence, Chongqing 401120, China)

Abstract: This review introduces typical fractal structures and related control methods present in lasers, such as soliton fractals in single-pass optical fibers, fractals in vector soliton collisions, fractals in spin wave solitons, and fractals in breather lasers. It elucidates the characteristics of fractal lasers in mode-locked lasers, including high spectral density, strong anti-interference capabilities, high tuning precision, and the ability to achieve high-resolution femtosecond fiber combs. The paper discusses the issue of enhancing the resolution of femtosecond fiber combs, pointing out that using devil's staircase and Farey tree fractal structures in breather lasers, combined with intelligent tuning methods, can improve the detection resolution of femtosecond fiber combs. It forecasts the development directions of breather fractal combs in fields such as molecular spectroscopy and arbitrary optical wave synthesis. The paper suggests that by developing high-precision optical frequency domain locking technology, time-frequency phase holographic tracking

收稿日期: 2024-06-03; 修回日期: 2024-06-10

基金项目: 国家自然科学基金项目(11621404, 11561121003, 11727812, 61775059, 12074122, 62022033, 11704123, 62035005); 上海市科技重大专项项目(2019SHZDZX01-ZX05); 上海市基础科学基金创新计划项目(18JC1412000); 上海市自然科学基金项目(23ZR1419000); 中国博士后科学基金项目(2023M741188, 2024T170275)

引用格式: 曾和平, 吴修齐, 彭俊松. 分形激光精密控制研究综述[J]. 计测技术, 2024, 44(3): 3-20.

Citation: ZENG H P, WU X Q, PENG J S. Review of research on fractal laser precision control[J]. Metrology & Measurement Technology, 2024, 44(3): 3-20.



detection technology, fractal spectrum correlation and phase noise analysis technology, and optimizing theoretical models, it is expected to further suppress comb noise and break through the spectral density limits.

Key words: fractals; breathers; intelligent control; nonlinear dynamics; fiber lasers

0 引言

光学频率梳是一种具备超高分辨力和超高精度的测量频率和时间的技术,备受工业和基础研究领域科研工作者的关注。2005年,美国科学家JONES D J和德国科学家HÄNSCH T W因在光学频率梳技术领域取得了重要研究成果^[1-2],被授予了当年的诺贝尔物理学奖。近年来,光学频率梳技术在原子钟测时^[3]、星体测量^[4]、气体探测^[5]、高精度距离测量^[6]、医疗诊断^[7]等领域取得了重要突破。

飞秒光纤激光器是产生光学频率梳的可靠驱动源,光纤激光器通过被动锁模技术结合色散和非线性管理产生飞秒量级的超短脉冲序列^[8],通过锁相技术稳定飞秒脉冲的载波包络相位,从而得到飞秒光梳^[9]。传统的飞秒光纤激光器输出等间隔的孤子脉冲,且每个孤子的参数均相同^[10],因此传统光梳也被称为孤子光梳^[11]。孤子光梳存在分辨力不可调谐的局限性,难以满足多样化的应用需求,而光梳技术的发展与飞秒激光器密切相关,研究飞秒激光器中的新型锁模态对推动光梳技术的发展和具有重要应用具有重要意义^[12-15]。

分形是一种独特且复杂的几何形状,他的特点在于其组成部分与整体在某种程度上具有相似性^[16]。典型的分形结构如图1所示,这些物体超出了传统欧几里得几何学的描述范围。以罗马花椰菜为例,其表面的螺旋结构在多个尺度上重复出现,充分展示了分形几何的自相似性特征。目前,

分形已在许多领域展现出实际应用价值,包括光学^[17-20]、计算机科学^[21]、分子生物学^[22]、材料科学^[23]以及生态学^[24]等。

在非线性科学中,频率锁定现象也表现出分形结构^[25]。频率锁定涉及两个或多个频率之间的相互作用,当系统参数(例如主频的强度)变化时,环绕数(频率之间的比值)会表现出多个稳定状态,形成所谓的锁定平台。当环绕数为有理数时,系统表现为锁定状态;当环绕数为无理数时,系统则表现为非锁定状态。随着系统参数步长减小,平台的数量会增加,这一现象被称为魔鬼阶梯的分形结构^[25]。呼吸子激光在时间或空间上展现出周期性振荡行为^[26],除了重复频率之外,还存在第二个特征频率,即呼吸频率。最近的研究表明,呼吸子激光器中的频率锁定现象也呈现分形结构^[20],利用该分形结构可形成不受激光器腔长限制的密集梳状射频频谱,有望解决提升孤子光纤光梳分辨力的难题。孤子光梳的分辨力与激光器的重复频率成反比,要提升分辨力就必须增加激光器腔长,但增加激光器腔长会导致测量时间和测量带宽受到限制,且长腔激光器易受环境影响、噪声较大,其色散和非线性也难以精确控制。使用分形呼吸子激光器作为光梳驱动源有望打破这一限制,因为光梳谱密度由呼吸频率决定,无需改变腔长即可实现高精度的光梳光谱探测,对推动分子间弱相互作用探测技术研究具有重要意义。分形呼吸子激光器的频谱梳齿间距很密集,梳齿



(a) 分形树
(a) Fractal tree



(b) 罗马花椰菜
(b) Romanesco broccoli



(c) 雪花
(c) Snowflake

图1 典型的分形结构

Fig.1 Typical fractal structure

之间存在紧密的相互作用但能稳定下来, 为开展光梳噪声自抑制机理研究提供了重要平台。

本文介绍激光器中存在的典型分形结构及相关调控方法, 阐述分形物理机制在高分辨力飞秒光纤光频梳和高能量飞秒光纤激光器中的应用, 论述分形呼吸子激光器中的频率自锁定同步动力学, 分析魔鬼阶梯和法理树等复杂分形结构的特点, 最后展望分形激光精密控制技术的发展方向, 有助于相关领域科研工作者全面了解激光器的分形动力学特性, 并为新型锁模光纤激光器的设计提供思路。

1 孤子激光中的分形动力学

1.1 单通光纤中的孤子分形

在光学领域中, 分形已在不稳定腔中被发现, 然而该光学系统是线性的。为探索分形在非线性系统中的应用, 研究人员通过突然改变色散和非线性之间的平衡, 重复地分解脉冲, 从理论上证明了孤子的非线性系统中也存在分形结构^[17]。研究人员利用单通光纤开展实验证实了这一理论^[18], 通过突然改变不同位置处传播介质的色散和非线性效应, 使得孤子脉冲不断分裂, 且每次分裂后产生的结构与初始分裂产生的结构自相似, 整个结构呈现为分形。研究人员将八阶孤子输入到不同色散的非线性光纤中, 观察到单个脉冲分裂为4个几乎相同的双曲正割形脉冲, 不断重复该过程, 单个脉冲会不断分裂为4个几乎相同的双曲正割形脉冲, 孤子演化过程满足康托尔集合的分形结构。

1.2 矢量孤子碰撞中的分形结构

文献[27]通过研究不可积耦合非线性薛定谔方程中两个正交偏振且等幅的矢量孤子的碰撞现象, 证明了分离速度和碰撞速度图中也存在分形结构。在模拟中, 研究人员确认了三种碰撞场景——透射、反射和捕获, 并使用分离速度来定义2个出射脉冲的反向传播速度之差, 在透射碰撞中分离速度为正, 在反射碰撞中分离速度为负, 在捕获碰撞中分离速度为零。

研究人员发现矢量孤子的分形结构和碰撞动力学过程均具有很强的自相似性, 提升数值模拟精度后, 可以进一步放大产生分形。碰撞脉冲首先相互穿过, 达到有限分离, 然后返回, 二次穿

过后分离, 可以观察到除了振荡位置以外, 其他点的相对位置相同。通过对该分形结构的分析, 研究人员认为这种分形动力学由两种振荡主导: ①矢量孤子的两个分量之间的位置分离的振荡; ②矢量孤子的两个分量之间的同相宽度的振荡。矢量孤子碰撞中的分形现象由矢量孤子的平移运动和矢量孤子的内部振荡共振引起。

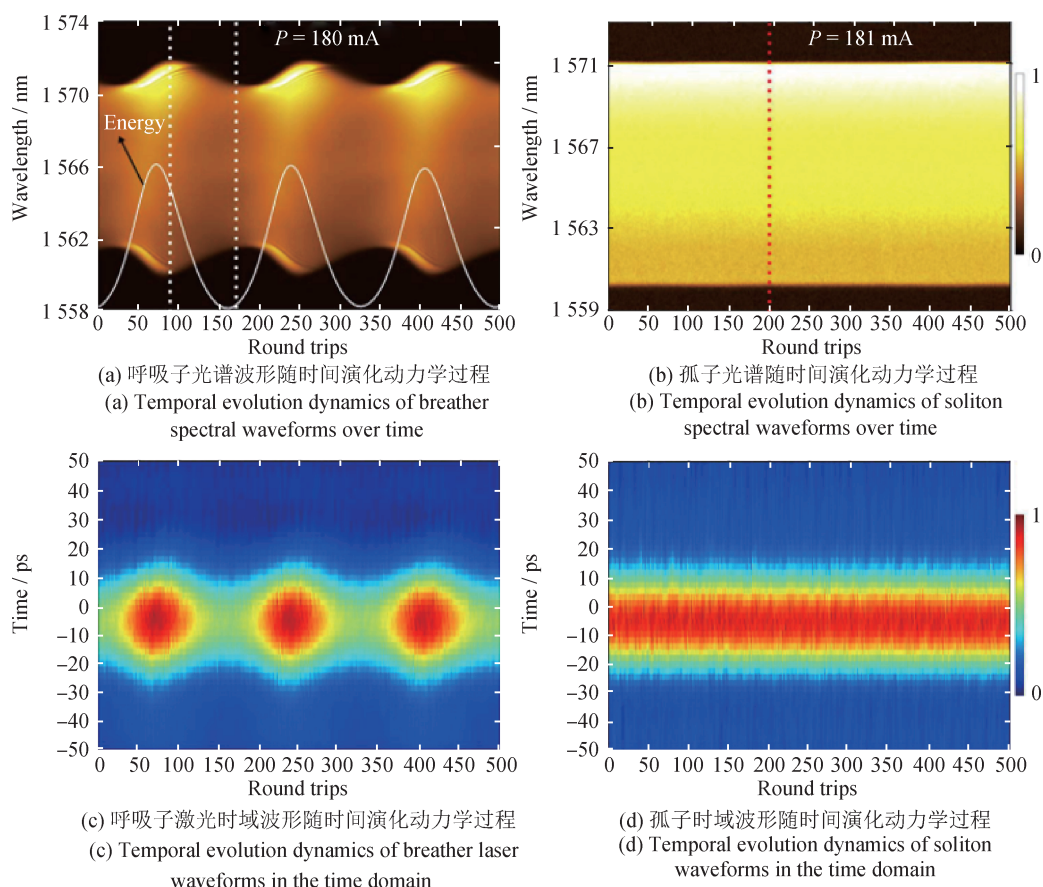
1.3 自旋波孤子中的分形结构

为探究环形腔中的孤子动力学问题, 研究人员利用基于磁性薄膜的主动反馈环系统生成自旋波包络孤子, 并产生了孤子分形结构^[28], 通过展示不同增益下的功率与时间轨迹序列中的分形结构, 证明了完全不同的时间尺度上波包时域的自相似性, 计算结果表明该结构的自相似维度约为0.8。随着环增益的增加, 频域分形结构由大尺度到小尺度构建, 而时域分形结构由小尺度到大尺度构建, 这反映了频率时间傅里叶变换的基本性质。随着增益进一步增加, 有源环中生成的非线性信号开始呈现混沌行为, 导致分形序列的截断。在该实验中, 研究人员还观察到频谱中出现了自相似的梳状结构, 这种梳状结构为推动分形动力学在光频率梳领域中的应用开辟了新的可能性。

2 呼吸子激光中的分形动力学

在非线性动力学领域, 呼吸孤子(简称为呼吸子)与多种物理现象密切相关, 如Fermi-Pasta-Ulam悖论^[29-30]、怪波形成^[31-32]、湍流、调制不稳定现象、奇异点物理^[33]等。除了在基础科学研究中具有重要意义外, 呼吸子激光在实际应用中也具有重要价值。呼吸子激光具有独特的呼吸机制, 在不使用额外脉冲压缩设备的情况下即可生成高能量的超短脉冲。

与孤子不同, 呼吸子在时间或空间上表现出周期性振荡行为, 该振荡行为是非线性薛定谔方程的一种周期解表现。图2为孤子和呼吸子时频特性差异对比。通过调整微腔或光纤激光器的泵浦强度以及失谐参数, 产生呼吸子激光。泵浦电流 $P = 180 \text{ mA}$ 情况下, 激光器处于呼吸子锁模状态, 此时脉冲光谱和时域随着时间均存在周期性的展宽和压缩, 随着升高泵浦电流至 181 mA , 激光器进入稳定孤子锁模, 脉冲光谱和时域均随着时间

图2 孤子和呼吸子时频特性差异^[26]Fig.2 Differences in the temporal and frequency characteristics of solitons and breathers^[26]

宽度和能量不变。

呼吸子激光可作为光梳的驱动源，其频率梳齿间隔远远小于孤子激光，能够有效提升光梳的分辨力，有望实现高分辨力的飞秒光纤光梳^[34]。由于呼吸频率与泵浦功率相关，通过调整激光器输入泵浦功率，即可实现不同分辨力光梳之间的切换^[20]，即1台呼吸子光梳可以实现多台不同精度的孤子光梳的功能，显著降低了控制难度。利用光频梳探测分子指纹信息时，传统方法需要搭建2台重复频差非常小的孤子光梳进行拍频^[35]，探测分辨力和带宽受限于激光器重复频率，而采用呼吸子密集频率梳则有望解决这一问题。

2.1 连续呼吸子和呼吸子分子

实现激光器的呼吸子输出至关重要，研究人员已经发现了两种产生呼吸子激光的方法^[26]，第一种方法是在激光器维持孤子锁模状态时，通过降低泵浦功率产生呼吸子，第二种方法是在激光器输出连续光的情况下，通过调整偏振控制器诱

导产生呼吸子。这两种方法的共性在于，触发呼吸子所需的泵浦功率阈值都明显低于维持稳定锁模所需的泵浦功率阈值。

得益于超快光谱探测技术，研究人员成功测量出了呼吸子在时频上的动态演化。实验数据表明：随着泵浦功率的增加，呼吸子的调制深度逐渐降低，直至转变为稳定的锁模状态。这一现象表明呼吸子的产生与激光器的泵浦阈值密切相关，是存在于稳定锁模与连续光之间的一种中间锁模态，此发现已在激光器净色散 $0.002 \sim 0.14 \text{ ps}^2$ 内得到实验验证^[36]。

此外，研究人员也指出了呼吸子锁模和调Q锁模的明显差异——呼吸子锁模产生的脉冲光谱宽度较宽(约20 nm)，而调Q锁模的光谱宽度通常只有几纳米；呼吸子的调制频率在兆赫兹级别，而调Q锁模的调制频率通常在千赫兹级别。特定的参数设置下，激光器中的孤子相互作用可以形成稳定的多孤子束缚状态，这种状态被称为孤子分子^[37]。

最近的研究表明,呼吸子同样可以形成束缚态,这种特殊态被称为呼吸子分子^[26]。实验中观察到的呼吸子分子表现为两个或多个脉冲在时间和光谱上同步演化,展示出相互之间紧密相位耦合。当脉冲间距为 50 ps 时,呼吸子分子的时频演化动力学表现为两个脉冲幅度的同步变化,如图 3

所示。此外,这些脉冲在光谱上相互作用产生了干涉条纹,直观地展示了脉冲相位的演化过程。上述现象说明呼吸子分子在时间上同步,而且在光谱相位上也相互影响。通过调整激光器的色散参数,可以进一步控制呼吸子分子的脉冲间距,研究人员已在实验中将脉冲间距成功调整至 34 ns。

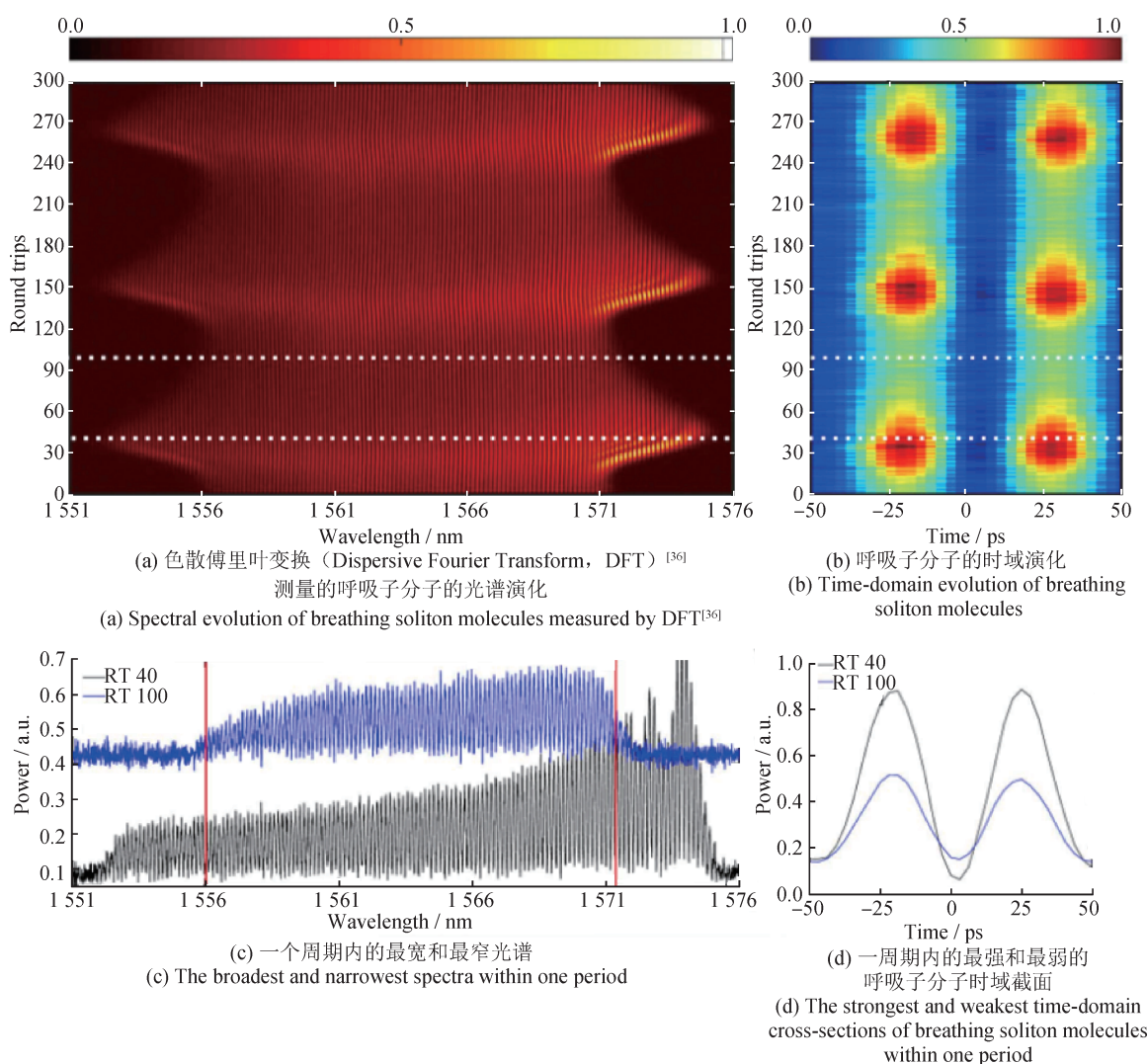


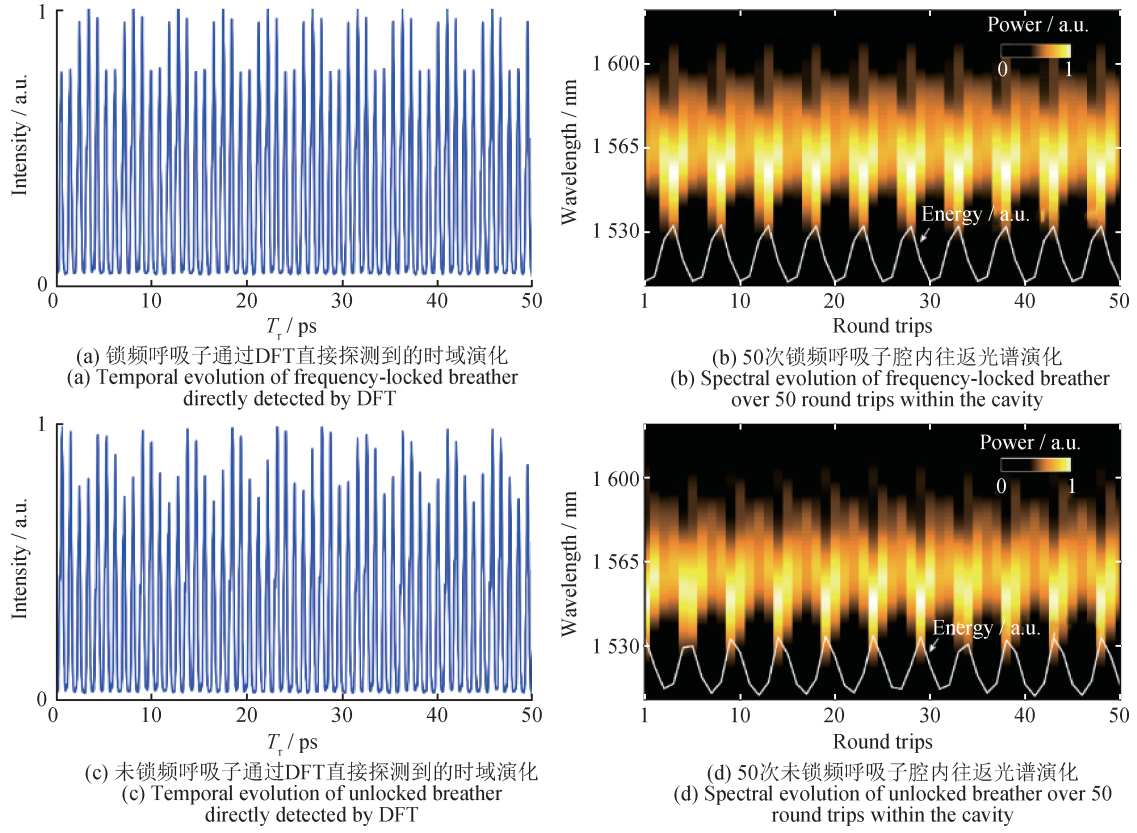
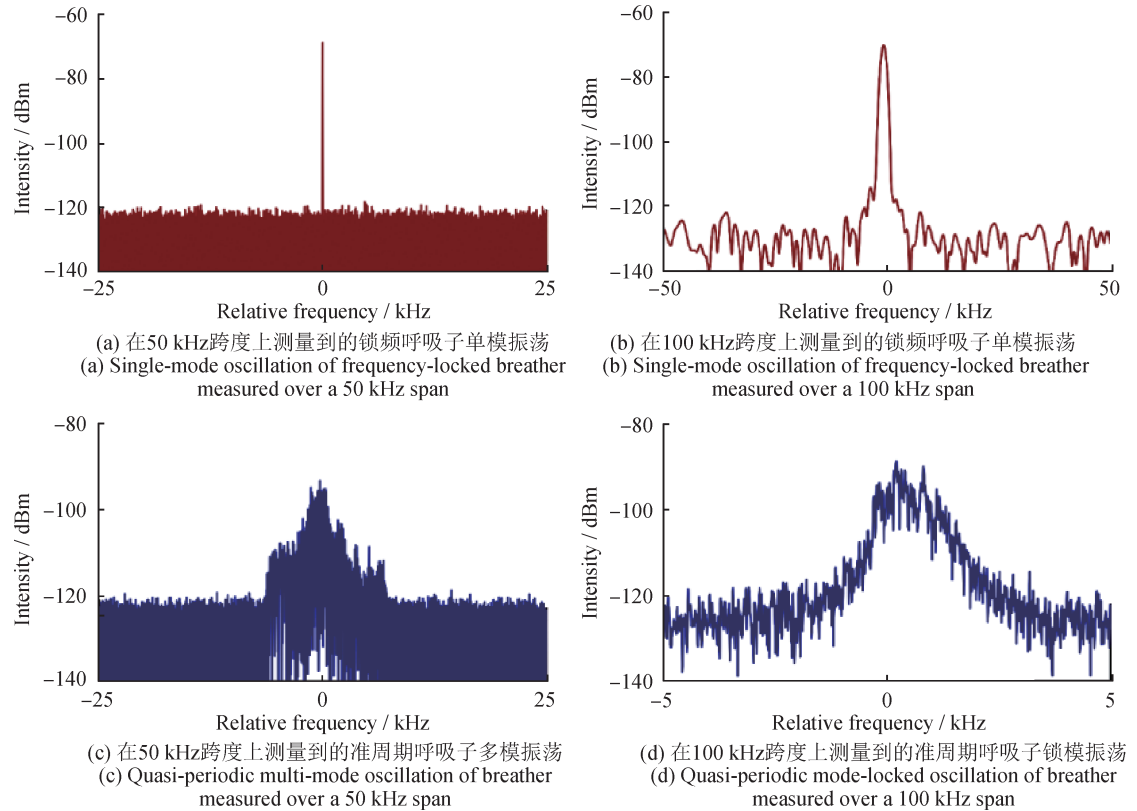
图 3 呼吸子分子动力学^[26]

Fig.3 Breathing soliton molecular dynamics^[26]

2.2 呼吸子激光中的自锁定现象

连续呼吸子是在正色散条件下产生的,其呼吸周期为几十至几百个锁模周期。在单个锁模周期内,呼吸子脉冲大量产生,通常难以实现自锁定。文献[20]研究表明,在激光器的色散值接近 0 ps^2 的条件下,可以通过调整泵浦电流控制激光器输出光场在频率锁定呼吸子和非锁定呼吸子之

间切换。在两种不同呼吸子激光脉冲的腔内往返演化中,频率锁定呼吸子表现出明显的周期性,如图 4 所示,其中 T_r 为往返时间。射频谱可以更直观地体现他们之间的区别,如图 5 所示。在频率锁定状态下,呼吸子显示出窄线宽和高信噪比(Signal-to-Noise Ratio, SNR),这表明其频率非常稳定,而在非锁定状态下,呼吸子的频谱则显示出杂乱

图4 两种不同呼吸子激光脉冲的50次腔内往返演化^[20]Fig.4 50 roundtrip evolutions of two different breather laser pulses within the cavity^[20]图5 锁频和未锁频呼吸子对应的射频频谱测量图^[20]Fig.5 RF spectrum measurements corresponding to frequency-locked and unlocked breathers^[20]

和宽带的频率结构,稳定性明显降低,锁定状态下脉冲的频谱线宽是非锁定状态下呼吸子频谱线宽的1/3 500。

研究人员利用示波器单独记录呼吸频率信号,并通过快速傅里叶变换(Fast Fourier Transform, FFT)对时间轨迹进行分析,得到呼吸频率的线宽约为0.5 Hz。锁频状态下的呼吸频率恰好是基本腔重复频率的1/5,在泵浦功率的一定范围内该比例保持不变。当环绕数为有理数时,就会产生呼吸子的自锁定现象。研究人员还找到了环绕数为2/9和9/41时的频率锁定呼吸子,进一步证实了这种现象的普适性。

2.3 呼吸子激光中的法里树和魔鬼阶梯结构

研究人员通过调节泵浦功率,探索了激光器中呼吸子状态之间的转换,成功证明了不同锁定平台的存在,并利用频谱分析,将呼吸频率与锁定平台相关的有理环绕数明确联系起来。

法里树是以英国地质学家John Farey名字命名的一种0到1之间的所有不可约有理数分阶段构建的数列集合,图6为法里树原理图。设两个相邻分数为 m/n 和 p/q ,则在两个分数之间会产生一个新的分数,计算方法为

$$\frac{m}{n} \oplus \frac{p}{q} = \frac{m+p}{n+q} \quad (1)$$

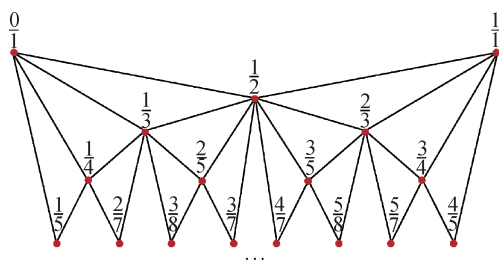


图6 法里树原理图

Fig.6 Schematic diagram of the Farey tree

通过假设来揭示共振层次结构的局部排序,式(1)中每个分数的分母越大,其对应的共振平台就越窄。法里树分数为 m/n 和 p/q 之间分母最小的分数,当 $|np - mq| = 1$ 时,他们被称为区间中最重要的共振。法里树提供了双频共振的定性局部排序,并产生一条曲线,其中包含了无限自相似的平台,每一个平台都与法里树上的有理数对应,这一现象被称为魔鬼阶梯^[38]。

在实验中,随着泵浦电流的变化,呼吸频率 f_r 与激光器重复频率 f_{br} 之间的比值(环绕数)呈现出一系列蓝色阶梯状平台,这些平台的数值符合法里树的结构,因此其具有与魔鬼阶梯相同的分形维数(0.87)。分形维数 D 的计算方法为

$$\sum_i \left(\frac{S_i}{S} \right)^D = 1 \quad (2)$$

式中: S 为两个代表环绕数 m/n 和 p/q 父代阶梯之间的差距(泵浦功率), S_i 为子阶梯 $(m+p)/(n+q)$ 和父代阶梯之间的差距。图7为魔鬼阶梯示意图,展示了呼吸子系统中 D 的具体计算方法。

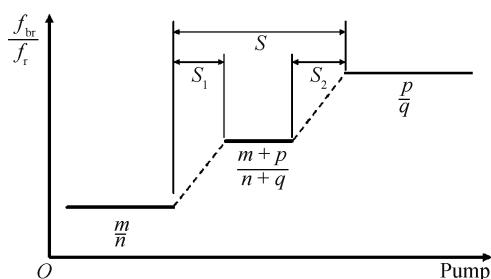
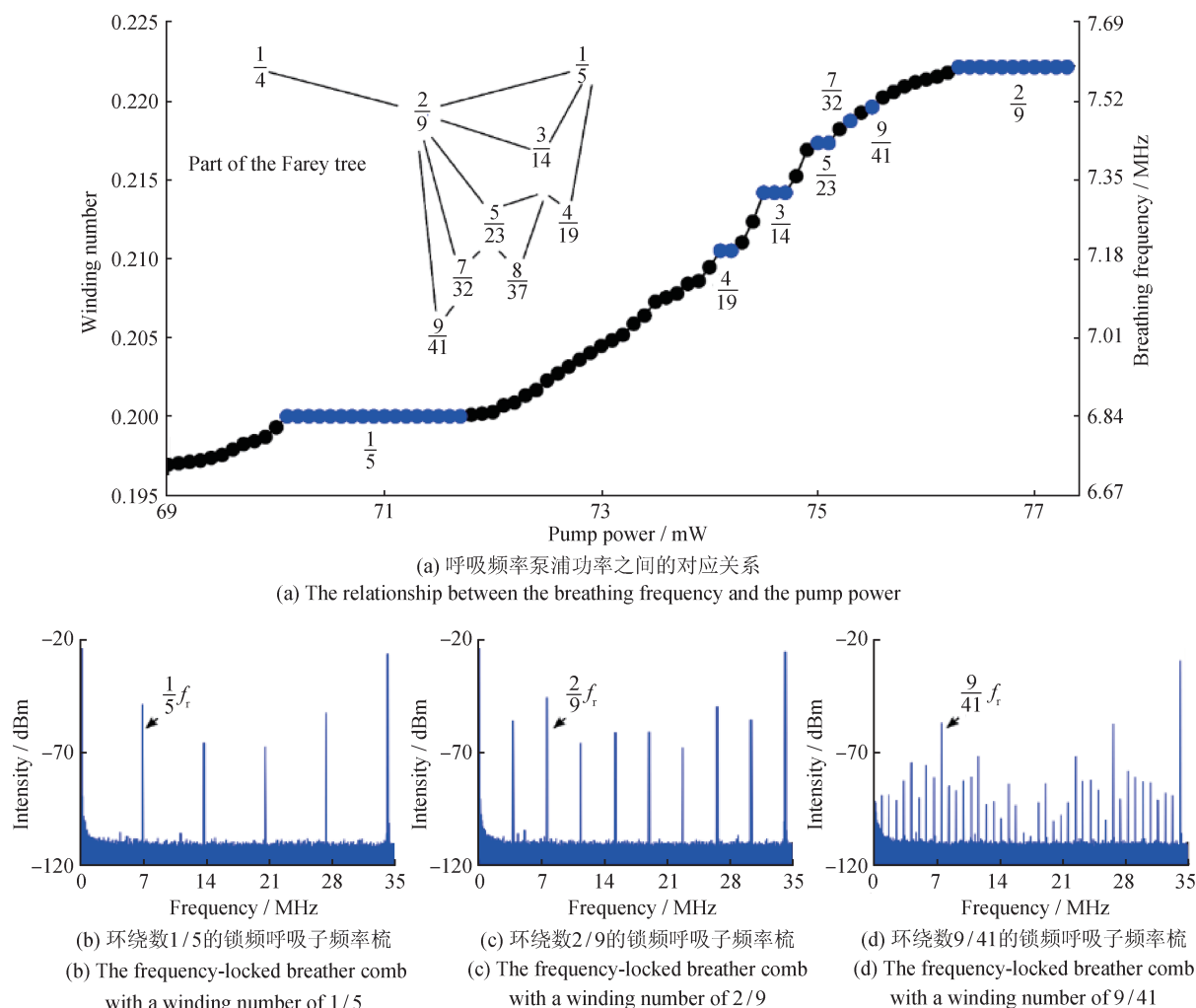


图7 魔鬼阶梯示意图

Fig.7 Schematic diagram of the Devil's staircase

对不同锁定平台射频谱的观察结果显示,频率锁定呼吸子导致了频率梳的产生,这表现为在原本以激光器腔重复频率为基础间隔的频率梳中,填充了新的等距谱线。在某些情况下,分形呼吸子射频谱的密度可以达到稳定单脉冲锁模状态下的41倍,如图8所示。通过这种方式,呼吸子产生的呼吸梳齿将0 Hz到 f_r 之间的频谱等分成 n 份,最大频率为 f_b ,如果 f_b 的梳齿是从低频一侧开始数的第 m 条线,则相应的环绕数定义为 m/n 。研究发现,呼吸子激光的环绕数按照法里树预测的顺序从左到右依次出现。与 m/n 锁频状态相关的步长宽度由 m/n 出现在法里树层次结构中的级别决定,阶梯之间的间隙表现为准周期呼吸振荡。

为探索频率锁定呼吸子的行为及其与魔鬼阶梯分形结构之间的关联,研究人员进行了一系列实验,验证不同偏振情况下呼吸子激光的分形维数。实验得到的分形维数分别为0.906和0.853,该结果与理论上完美的魔鬼阶梯分形维数0.879略有偏差,偏差主要来源于泵浦激光二极管的最小功率增量(0.1 mW)。

图8 法里树和魔鬼阶梯在实验中的测量结果^[20]Fig.8 Experimental measurements of the Farey tree and Devil's staircase^[20]

研究表明,魔鬼阶梯的形成过程是可逆的。通过降低泵浦功率,可以观察到几乎相同的阶梯结构,这表明系统参数的精密控制是生成这种复杂分形结构的关键。实验中能够任意设置外腔调制半导体激光器的调制频率,以便按照法里树的顺序访问不同的锁频状态^[39-43]。这与呼吸子锁模激光器不同,设计外腔调制半导体激光器后才能确定包含法里树结构,因此需要精确调整激光器的参数以引入并控制不同的结构。

为了更深入地研究频率锁定呼吸子的建立过程,研究人员分析呼吸子激光频谱随泵浦功率变化的三维演化图,发现在频率锁定平台位置的呼吸梳齿线宽窄、信噪比高,且频率不受泵浦功率影响;非平台区域的呼吸梳齿则显示出多个频率且信噪比较弱。脉冲射频谱与泵浦功率的频谱时

空强度演化如图9所示,显示了有理环绕数的建立过程。

研究人员通过数值模拟发现随着增益饱和能量的步长从10 pJ降至1 pJ,模型显示出更多的锁定平台,揭示了环绕数分布的分形结构,如图10所示。数值模型成功地复现了法里树 $1/5$ 到 $2/9$ 的呼吸频率转换,并且与实验观察结果高度一致,模拟得到的阶梯间隙也与实验观察到的阶梯间隙相似。通过数值模拟计算得到的分形维数为 0.873 ± 0.09 ,更接近理想的魔鬼阶梯分形维数 0.879 。数值模拟表明,可通过减小增益饱和能量的步长,使分形结构接近理想状态。此外,研究人员使用数值模型测试了色散区间 β_2 为 $-0.009 \sim 0.009 \text{ ps}^2$ 的激光器,证明了频率锁定呼吸子在接近零的色散区间普遍存在。

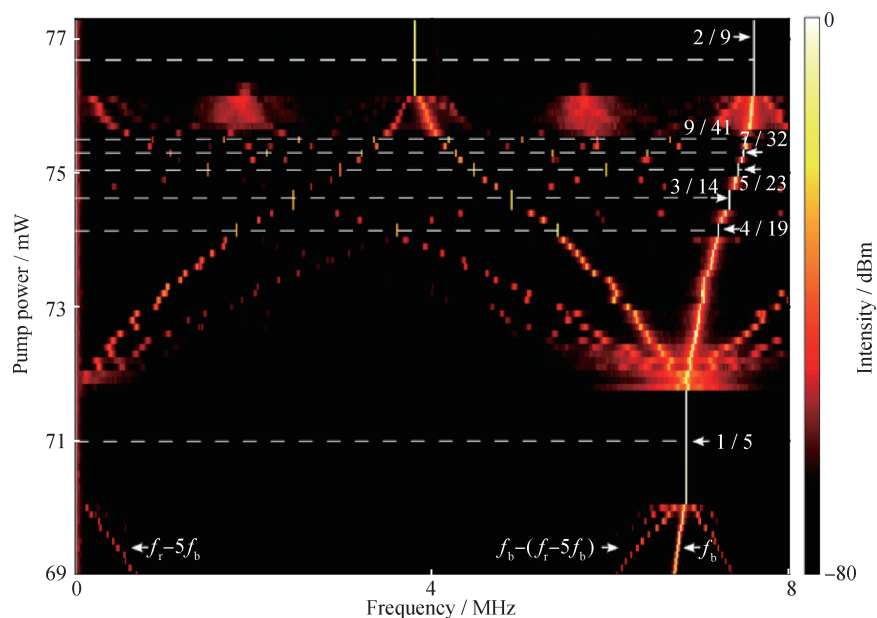
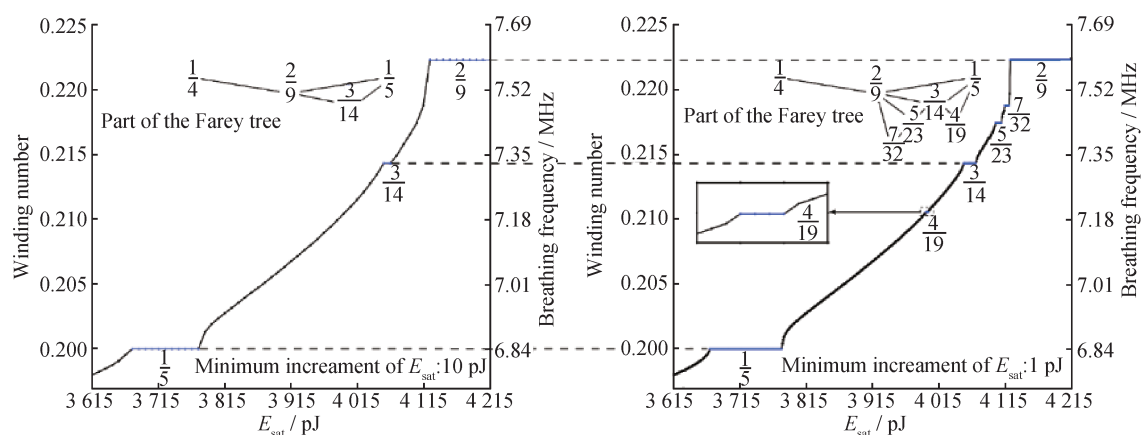
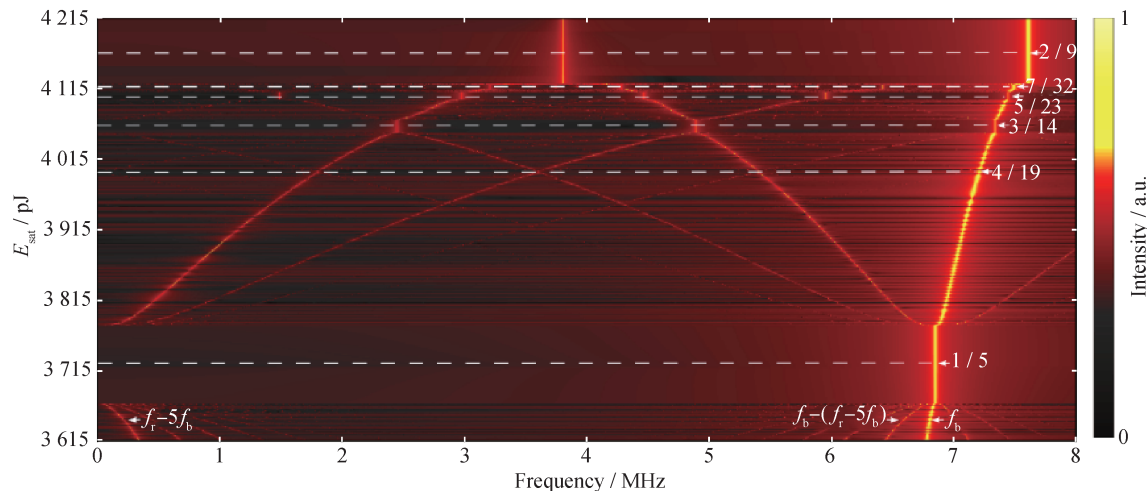
图9 脉冲射频谱与泵浦功率的频谱时空强度演化^[20]

Fig.9 Spectra temporal and spatial intensity evolution of pulse RF spectra with pump power^[20]



(a) 呼吸频率(环绕数)与增益饱和和能量的函数

(a) Breathing frequency (winding number) as a function of gain saturation energy



(b) 射频谱强度随增益饱和和能量的演化图

(b) Evolution of RF spectrum intensity with gain saturation energy

图 10 数值模拟中观察到的法里树和魔鬼阶梯^[20]

Fig.10 Farey tree and Devil's staircase observed in numerical simulations^[20]

混沌是非线性动力系统研究中的重要现象，其特点是系统输出对初始条件极其敏感。在非线性动力学中，倍周期分岔是导致混沌的原因之一，该现象已在超快激光器中得到证实。ZHAO L等人开展实验，首次在被动锁模激光器中观察到了倍周期分岔导致的脉冲串混沌强度涨落现象^[44]。随后，这种典型的混沌孤子路径被发现存在于不同的色散区域^[45]、波段^[46]、新型激光结构，甚至孤子分子的内部动力学中^[47-48]。然而到目前为止，关于超快光纤激光器中呼吸孤子与混沌关系的研究仍非常有限，相关实验涉及极其精细的激光参数调节。有研究表明，短周期和长周期脉冲(呼吸)可以以级联的方式表现出来^[49]。随着探索的深入，研究人员发现了呼吸孤子经历短周期、长周期的切换之后能够进入到混沌状态的清晰路径^[50]。这些有关呼吸孤子与混沌的研究为促进混沌孤子在光通信和存储中的应用开辟了新的可能。

2.4 呼吸子多体同步动力学

同步现象，即多个独立实体行为的协调一致，广泛存在于自然界和人类社会中^[51]。科学界对这一现象的探索可以追溯到17世纪，当时荷兰物理学家HUYGENS C发现，相邻的两个钟摆会在一段时间后同步摆动，即使他们最初的摆动周期略有不同^[52]。

针对同步现象的实验研究中，通常需要使用参数相近的多个谐振器^[53-55]。例如，为了研究2个

激光器的同步，必须严格控制他们的长度差异在微米量级或更小，这通常依赖于精密的电子控制技术。当系统涉及3个或更多谐振器时，实验的复杂性和难度会显著增加。

呼吸子激光器为研究多体同步提供了一个新平台，呼吸子激光具有两个特征频率，这自然构成了一个同步系统。两个谐振器间同步和呼吸子激光器同步示意图如图11所示。从图11中可以看出：当呼吸子两个特征频率同步时，呼吸频率被锁定；当呼吸子两个特征频率非同步时，呼吸频率则未被锁定。研究人员利用标准锁模光纤激光器探索了呼吸子的多体同步动力学^[19]。多个相互作用的呼吸子能够组织为类似于分子束缚态的结构，但这种呼吸子分子复合物的同步性有待进一步研究。

研究人员在实验中证实，当呼吸频率为重复频率的1/4时，两个特征频率会发生锁定现象，该现象不受呼吸子结构的基本成分数量的影响。为了更全面地理解该现象，引入空间光谱测量技术进行研究。在三种呼吸状态的往返分辨光谱中，次谐波(Subharmonic, SUB)区域(同步)光谱在4个腔往返周期内发生周期性变化，并伴随脉冲能量的同步周期性变化；非次谐波(Non-subharmonic, N-SUB)区域(未同步)光谱显示出明显的周期性退化现象，这一区域的能量和光谱分量的变化更加复杂、动态。

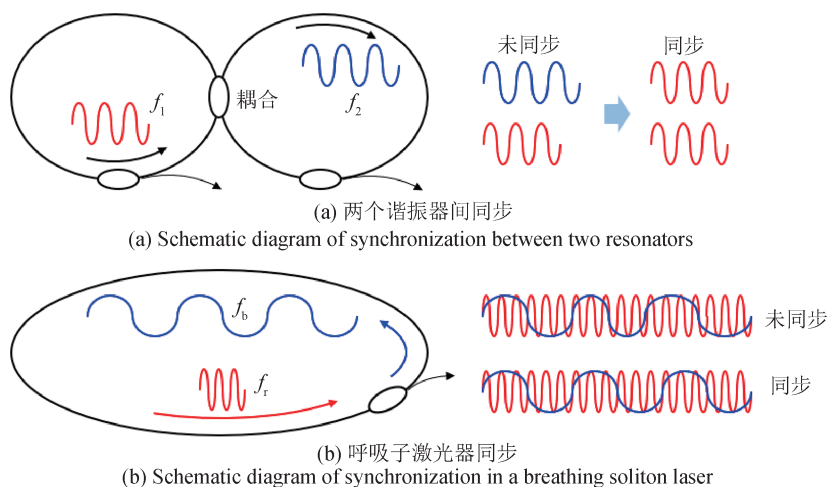


图11 两个谐振器间同步和呼吸子激光器同步示意图

Fig.11 Schematic diagram of synchronization between two resonators and synchronization of breather lasers

此外,调制次谐波(Modulated subharmonic, M-SUB)区域光谱揭示了存在两组周期,其中,长周期约为88个腔往返,而短周期约为4个腔往返。图12展示了 $f_r/4$ 附近的频谱细节,进一步凸显了

这三种状态之间的差异。次谐波状态的特征是频谱 $f_b = f_r/4$ 处,存在单个非常窄的频率分量;在调制次谐波情况下,在 $f_b = f_r/4$ 的两侧观察到一组等间隔的窄边带。

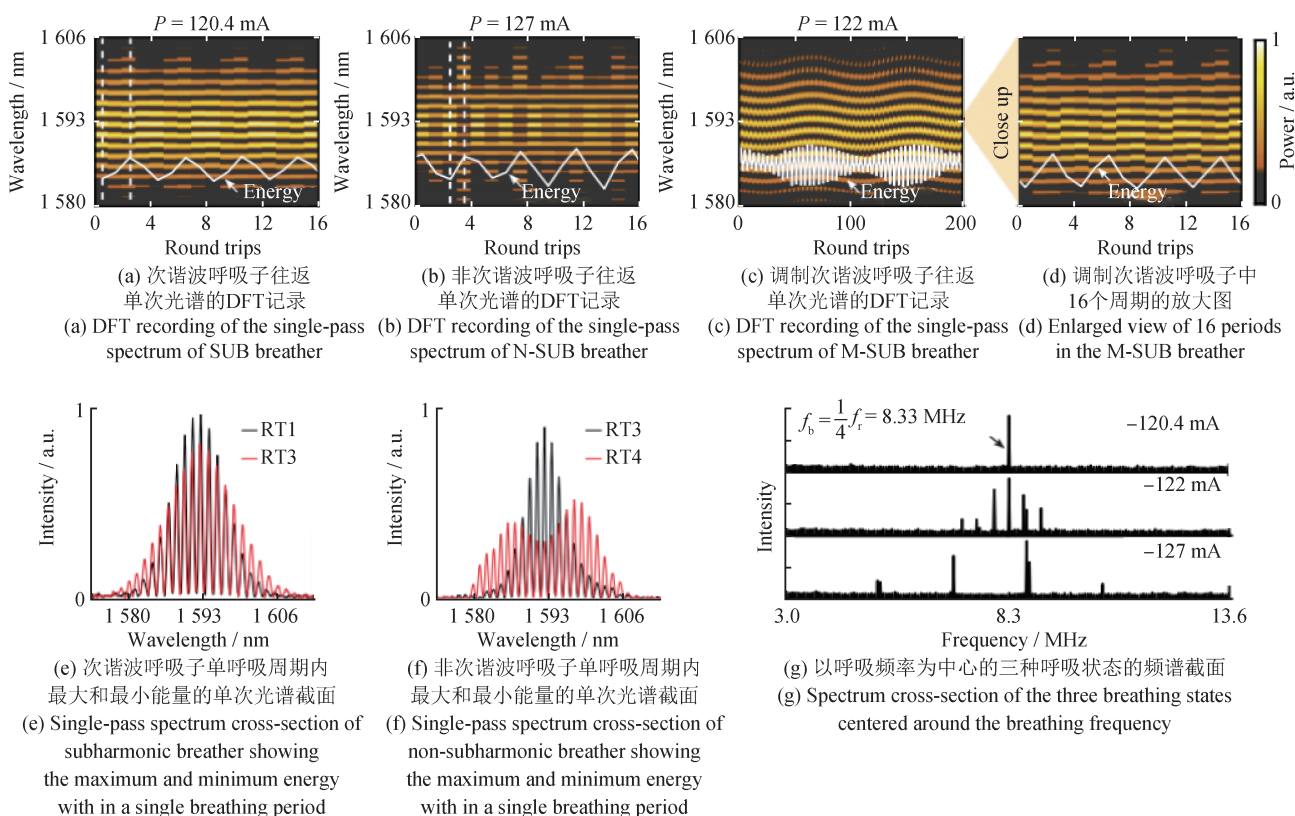


图12 次谐波、非次谐波和调制次谐波呼吸子分子的实验观察^[19]

Fig.12 Experimental observations of subharmonic, non-subharmonic and modulated subharmonic breather molecules^[19]

为了深入理解呼吸子分子的复杂时间动态,研究人员进行了数值模拟,次谐波状态前后脉冲峰值强度的演变显示,两个呼吸子是同步的。而在非次谐波状态中,虽然短脉冲是准周期的,但两个呼吸子之间存在一个恒定的延迟(2个腔往返),通过将这一延迟添加到尾随脉冲中,可以实现两个脉冲的同步演变,表明了呼吸子间的滞后同步特性。调制的次谐波状态也表现出滞后同步的特性,体现了呼吸子分子间复杂的动力学互动。此外,研究人员在三呼吸子的动力学实验中也观察到了类似的滞后同步现象,进一步体现了呼吸子分子复杂交互的普遍性。

3 分形呼吸子激光智能控制

锁模激光器广泛应用于光谱分析、高速光通

信和精密测量等领域,这些应用的成功依赖于锁模激光输出的精准控制和稳定化。使用传统锁模激光器时,需要精确调谐多个参数,例如泵浦功率、系统损耗、色散、非线性特性、光学元件(如波片)的角度等,这使获得特定锁模态成为一项挑战。

在探索特定锁模态,尤其是分形呼吸子等复杂锁模态时,需要消耗大量时间调谐参数,且传统方法难以精确、重复地访问这些锁模态。为解决此问题,研究人员将智能化控制技术应用于锁模激光器领域^[56-57]。2015年,法国的 ANDRAL U 等人首次将遗传算法应用于锁模激光器的智能控制中,通过优化算法自动调整激光器的参数,从而实现更精确、快速的锁模态访问^[58]。遗传算法等智能算法模拟自然选择过程,在广泛的参数空

间中高效寻找最优解,这对于实现复杂锁模态(例如孤子脉冲、类噪声脉冲、呼吸子脉冲等)的精确控制具有重要意义^[59-60]。

通过智能锁模激光技术对各类激光信息进行测量,能够实现激光器的多维度控制。目前,智能锁模激光技术已应用于孤子锁模^[61-63]、光谱智能调控^[64]、时空锁模自调控^[65]、怪波控制^[66]和呼吸子锁模^[20, 67]等领域。智能激光器示意图如图13所示。

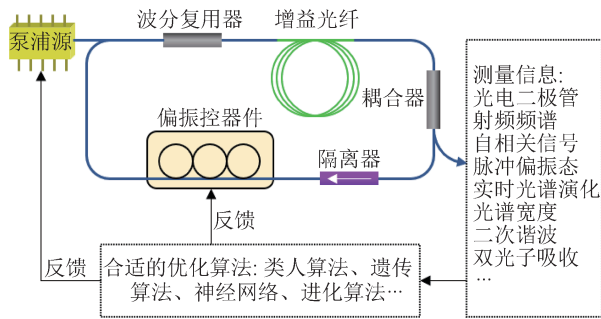


图13 智能激光器示意图

Fig.13 Schematic diagram of an intelligent laser

3.1 遗传算法

在智能锁模技术中,常用的算法包括遗传算法^[58, 67]、类人算法^[63]和神经网络^[68-69]等。其中,遗传算法应用较为广泛,该算法的原理来源于达尔文进化论中的“适者生存”原则。遗传算法模拟自然界的生物进化机制,通过对激光参数的优化来寻找达到预定锁模态的最佳解决方案。在这个过程中,每组激光参数都被视为一个“个体”,并用一串基因序列来表示。算法的核心是适应度函数,这是一个由用户定义的评估函数,用来衡量每个个体的性能优劣。基于适应度进行评分,表现较好的个体将有更大的机会被保留并参与到后代的繁衍中。通过这种机制,遗传算法在每一代中选择并复制适应度高的基因,同时引入新的变异,逐步优化参数配置。这个过程会持续进行,直至达到一定的迭代次数或者适应度达到预设的阈值,最终找到最适合实现目标锁模态的激光参数配置。

在智能锁模激光器的应用中,控制参数(例如施加到电动偏振控制器或液晶波片上的电压组合等),可以视为一个基因序列。首先,计算机随机生成一个初始种群,这个种群由多个“个体”组

成,每个个体代表一组电压值,这些电压值被应用于液晶波片或电动偏振控制器^[58]。随后,数据采集模块从激光器的输出端探测数据,并将数据输入至计算机或其他在线数据处理模块。然后,通过适应度函数评估每个参数组合的性能,计算并分配一个适应度数值,该数值表示参数设置有效达成目标锁模态的程度。完成个体适应度评估后,系统模仿自然选择的“适者生存”原则,执行选择、交叉和变异三个步骤,以产生下一代种群。遗传算法流程图如图14(a)所示。通过“轮盘赌”的方式选择某个个体作为父代,如图14(b)所示,每个个体被选中的概率 Q_n 为

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

式中: V_n 为每个个体的适应度, n 为个体编号。个体被选中的概率随其适应度增加而增加。经过选择之后,将选拔出来的优良个体进行交叉。两两一组划分种群,计算机生成一个随机概率值,当其小于程序预先设置的交叉概率 Q_c 时,从两组之中随机选择一个基因(电压)进行交换,完成基因间的交叉行为,反之则不产生交叉行为。最后,对交叉后的种群进行选择变异,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位二进制数。初始种群的大小决定了遗传算法参数的搜寻范围,如果初始范围过小,参数范围会快速收敛至一个局部最优值,导致无法找到全局最优值;如果初始范围过大,则会导致算法优化时间过长。

3.2 分形呼吸子智能调控

研究人员提出了一种基于遗传算法的方法用于搜索和控制超快光纤激光器中的呼吸子锁模,这种方法有效实现了呼吸子周期、深度以及数量的智能控制^[67]。基于该方法,研究人员通过改进系统调控方式,实现了直接精确定位频率锁定呼吸子,使得遗传算法能够精确地将激光调谐到所需状态^[20]。研究人员构建了一个与分形呼吸子搜寻相关的适应度函数,该函数考虑了锁频呼吸子状态的显著特征——呼吸频率的高信噪比。适应度函数 F_{merit} 如式(4)所示。

$$F_{\text{merit}} = \alpha F_{\text{ml}} + \beta F_{\text{b}} + \gamma F_{\text{SNR}} \quad (4)$$

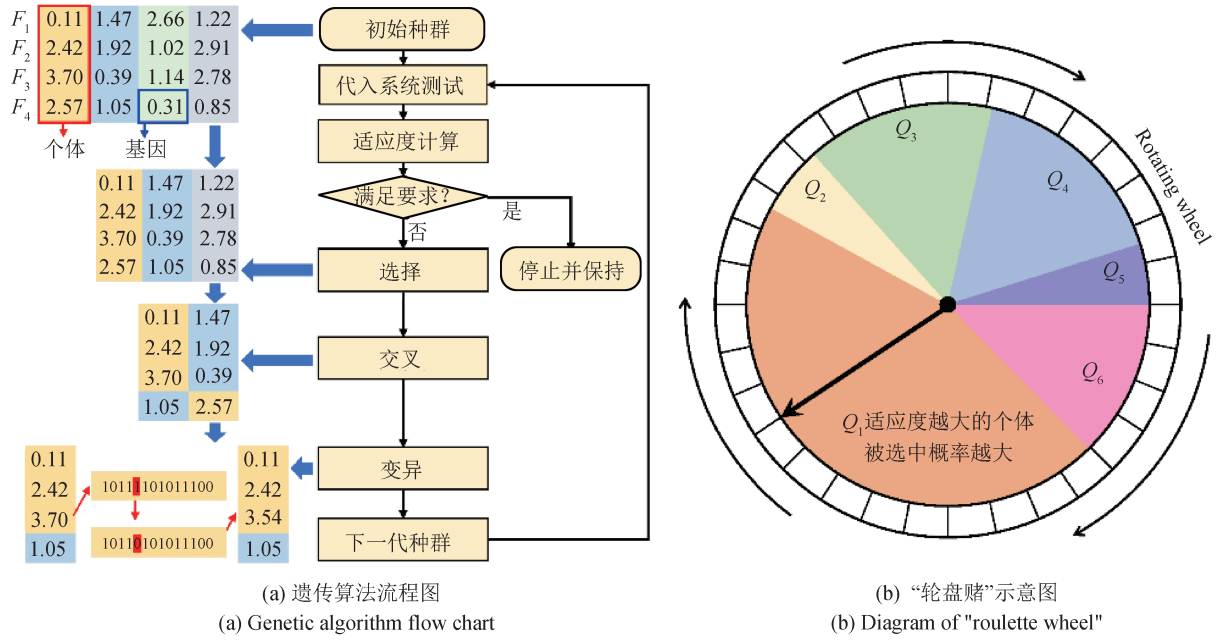


图 14 遗传算法原理图

Fig.14 Schematic diagram of genetic algorithm

式中： α 、 β 、 γ 分别为3个不同适应度的加权比例， F_{ml} 为锁模适应度， F_b 为呼吸适应度， F_{SNR} 为呼吸信噪比。 F_{ml} 与 F_b 的加权和用于确定激光器处于呼吸子锁模。锁模适应度 F_{ml} 可表示为

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

式中： L 为示波器记录的数据点数， I_i 为点 i 处的强度， I_{th} 为噪声不应超过的强度阈值。

为了精确地区分呼吸子锁模态和稳定锁模态，可以利用呼吸子激光的特有频率成分来设计适应度函数。呼吸子激光的射频谱如图15所示，其中， I 为强度， f 为频率。该射频谱不仅包含传统锁模激光器的重复频率 f_r 及其谐波信号（即 f_r 的整数倍信号），而且在这些射频信号两端还有边带，这些边带信号由呼吸频率产生。当激光器处于稳定锁模状态时， f_r 两边没有边带。可根据 f_r 与其边带信号 $f_{\pm 1}$ 的强度比设计适应度函数，这种方法不仅能够识别出呼吸子状态，还能量化其表现的显著性。适应度函数可设定为

$$F_b = \frac{\sum_{f=f_{r-1}}^{f=f_r} I(f) - \sum_{f=f_r-\Delta}^{f=f_r+\Delta} I(f)}{\sum_{f=f_{r-1}}^{f=f_r} I(f)} \quad (6)$$

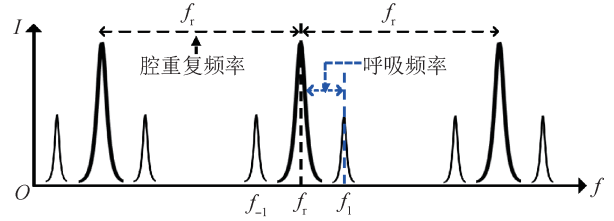


图 15 呼吸子锁模下的射频信号演示图

Fig.15 Demonstration of RF signals under breather mode-locking

式中： $\sum_{f=f_{r-1}}^{f=f_r} I(f)$ 为从 f_{r-1} 到 f_{r+1} 的频率间隔的射频谱强度， $\sum_{f=f_r-\Delta}^{f=f_r+\Delta} I(f)$ 为以 f_r 为中心频率，左右宽度均为 Δ 的射频谱强度， F_b 为边带相对于频率间隔范围 $[f_{r-1}, f_{r+1}]$ 的强度。当 F_b 值接近0时，则意味着 f_r 更强并且没有边带，代表此时激光器处于稳定锁模状态；当 F_b 值远大于0时，则意味着射频谱中存在强边带，代表此时激光谐振腔中存在呼吸子。 F_{SNR} 为区分锁频呼吸子与未锁频呼吸子的适应度函数，通过评估 $\left[f_r + \delta, \frac{3f_r}{2}\right]$ 中最强的呼吸频率，区分锁频和未锁频呼吸子，即

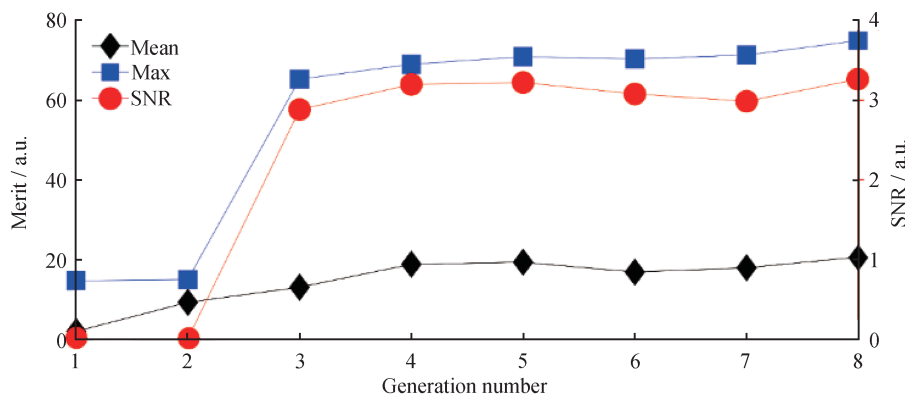
$$F_{SNR} = \max I(f), \quad f \in \left[f_r + \delta, \frac{3f_r}{2}\right] \quad (7)$$

式中： δ 为频移，用于从评估区间中排除基频 f_r ，

$f_r/2$ 为最大可能的呼吸频率。系统通过扫描泵浦电流确认频率锁定呼吸子,如果呼吸频率不随泵浦电流变化,则产生的呼吸子是频率锁定呼吸子。

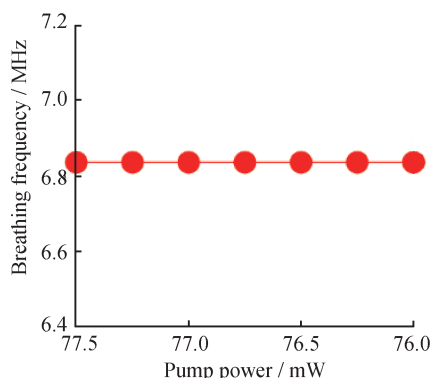
图16为通过遗传算法搜索1/5呼吸子锁模状态的结果,展示了连续几代中种群的最大适应度和平均适应度的演变,以及呼吸频率信噪比的变化。根据图16可以观察到,呼吸频率的信噪比迅速上升,并在第8代达到最大值,这标志着分形呼吸子成功产生。最大适应度的变化趋势与信噪比

的变化趋势相似,体现出锁频状态稳定形成。研究人员通过测试呼吸频率随泵浦功率和偏振调谐的变化,验证了激光器在特定参数下能稳定工作于锁定呼吸子状态。通过多次重复优化过程,验证了适应度函数的可靠性,每次都能达到高信噪比的锁频状态。尽管锁频状态可重现,但无法实现自启动,这意味着如果激光器在锁定状态下被关闭再重新启动,其不会自动回到锁频状态,需要重新运行遗传算法以快速恢复。

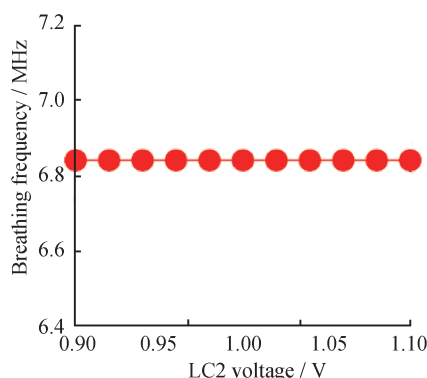


(a) 每代种群的平均(黑色棱形)、最大适应度(蓝色方块)以及呼吸频率信噪比(红色圆圈)的相应演化

(a) The corresponding evolution of the mean (black prisms), maximum fitness (blue squares), and respiration rate signal-to-noise ratio (red circles) for each generation



(b) 随着泵浦功率的呼吸频率变化
(b) Variation of breathing frequency with pump power



(c) 随着偏振的呼吸频率变化
(c) Variation of breathing frequency with polarization

图16 遗传算法结果^[20]

Fig.16 Genetic algorithm results^[20]

适应度函数对于探索呼吸子动态以及研究其他系统(例如微谐振腔、光纤克尔谐振腔、单通光纤系统等)中的分形相关非线性动力学具有重要意义。文献[20]中报道的分形呼吸子显示出更为复杂的演化特性,为探索超快激光的高动态、非平稳运行机制(例如孤子爆炸、非重复性罕见事件、间歇性非线性机制等)提供了新的可能性。

4 总结与展望

综述了锁模光纤激光器中分形激光的产生及其智能调控技术。针对呼吸子锁模机制的研究表明,可以在单个激光器内部生成两个独立的特征频率,实现频率自锁定以及产生法里树-魔鬼阶梯分形结构。将电控技术与遗传算法相结合,实现

了分形呼吸子的自动化生成和定制输出,极大地缩短了产生分形激光的时间,并简化了操作步骤。该方法不仅提高了调谐精度,还实现了不同分形结构的可编程化。

分子光谱测量是飞秒光学频率梳的重要应用领域之一。分子间的弱相互作用探测对光梳的谱密度要求较高,传统光梳的谱采样密度受限于激光器的重复频率,提升谱密度需要增加激光器腔长,这将限制测量带宽和测量时间。此外,如果光梳相邻梳齿间距太近,会产生非线性相互作用,导致噪声增大。利用分形呼吸子激光器作为光梳驱动源,并结合光频梳高精度锁定技术,可在不改变腔长的情况下将光梳精度提升2~3个量级,有望解决分子间弱相互作用测量以及任意光波合成问题。分形呼吸子同步动力学理论模型尚需完善,以更准确地描述噪声特性,结合时频相位全息跟踪探测、相噪分析等技术,深入分析分形光梳噪声机理,进一步推动分形光梳噪声自抑制技术的发展。

自优化的超短脉冲激光器在复杂非线性动力学研究中具有广阔的应用前景。尽管激光器中的分形结构所占的参数空间范围较小,但作为一个复杂的动力学系统,被动锁模光纤激光器的控制仍然充满挑战。智能调控技术已在光学领域的多项研究中证明了其普适性,并展现出解决复杂锁模态智能化搜索难题的潜力。利用智能控制技术可精准调控多种锁模状态,将时间拉伸技术与智能调控技术相结合,能够快速识别锁模激光器内部的超快动力学过程,为研究锁模激光器内部机制提供了新的手段。分形物理与智能调控技术在激光器中的深度融合,将有力推动分子光谱探测、任意光波形合成等领域的发展。

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): 635-639.
- [2] UDEM T, HOLZWARTH R, HÄNSCH T W. Optical frequency metrology[J]. *Nature*, 2002, 416(6877): 233-237.
- [3] BELOY K, BODINE M I, BOTHWELL T, et al. Frequency ratio measurements at 18-digit accuracy using an optical clock network[J]. *Nature*, 2021, 591(7851): 564-569.
- [4] METCALF A J, ANDERSON T, BENDER C F, et al. Stellar spectroscopy in the near-infrared with a laser frequency comb[J]. *Optica*, 2019, 6(2): 233-239.
- [5] GIORGETTA F R, PEISCHL J, HERMAN D I, et al. Open-path dual-comb spectroscopy for multispecies trace gas detection in the 4.5 μm to 5 μm spectral region[J]. *Laser & Photonics Reviews*, 2021, 15 (9). DOI: 10.48550/arXiv.2012.12427.
- [6] CALDWELL E D, SINCLAIR L C, NEWBURY N R, et al. The time-programmable frequency comb and its use in quantum-limited ranging[J]. *Nature*, 2022, 610(7933): 667-673.
- [7] LIANG Q, CHAN Y C, CHANGALA P B, et al. Ultrasensitive multispecies spectroscopic breath analysis for real-time health monitoring and diagnostics[J]. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 2021, 118(40). DOI: 10.48550/arXiv.2103.09221.
- [8] FERMANN M E, HARTL I. Ultrafast fibre lasers[J]. *Nature Photonics*, 2013, 7(11): 868-874.
- [9] 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.
- [10] DULING I N. All-fiber ring soliton laser mode locked with a nonlinear mirror [J]. *Optics Letters*, 1991, 16 (8) : 539-541.
- [11] YI X, YANG Q F, YANG K Y, et al. Soliton frequency comb at microwave rates in a high-Q silica microresonator [J]. *Optica*, 2015, 2(12): 1078-1085.
- [12] KERSE C, KALAYCIOĞLU H, ELAHI P, et al. Ablation-cooled material removal with ultrafast bursts of pulses [J]. *Nature*, 2016, 537(7618): 84-88.
- [13] 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.
- [14] NAKAZAWA M, YOSHIDA M, HIROOKA T. The nyquist laser[J]. *Optica*, 2014, 1(1): 15-22.
- [15] 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.
- [16] MANDELBROT B B, FRAME M. Fractals[J]. *Encyclopedia of Physical Science and Technology*, 1987, 5: 579-593.
- [17] SOLJACIC M, SEGEV M, MENYUK C R. Self-similarity

- and fractals in soliton - supporting systems [J]. *Physical Review E*, 2000, 61(2): R1048–R1051.
- [18] SEARS S, SOLJACIC M, SEGEV M, et al. Cantor set fractals from solitons[J]. *Physical Review Letters*, 2000, 84(9): 1902–1905.
- [19] WU X Q, PENG J S, BOSCOLO S, et al. Synchronization, desynchronization, and intermediate regime of breathing solitons and soliton molecules in a laser cavity [J]. *Physical Review Letters*, 2023, 131(26). DOI: 10.1103/PhysRevLett.131.263802.
- [20] 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(1): 5784–5793.
- [21] BERRY H, GRACIA PÉREZ D, TEMAM O. Chaos in computer performance [J]. *Chaos: an Interdisciplinary Journal of Nonlinear Science*, 2006, 16(1). DOI: 10.1063/1.2159147.
- [22] SKINNER J E, MOLNAR M, VYBIRAL T, et al. Application of chaos theory to biology and medicine[J]. *Integrative Physiological and Behavioral Science*, 1992, 27(1): 39–53.
- [23] SCHAEFER D W. Fractal models and the structure of materials[J]. *MRS Bulletin*, 1988, 13(2): 22–27.
- [24] SUGIHARA G, MAY R M. Applications of fractals in ecology[J]. *Trends in Ecology & Evolution*, 1990, 5(3): 79–86.
- [25] BAK P. The devil's staircase[J]. *Physics Today*, 1986, 39(12): 38–45.
- [26] PENG J S, BOSCOLO S, ZHAO Z H, et al. Breathing dissipative solitons in mode-locked fiber lasers[J]. *Science Advances*, 2019, 5(11). DOI: 10.1126/sciadv.aax1110.
- [27] YANG J, TAN Y. Fractal structure in the collision of vector solitons[J]. *Physical Review Letters*, 2000, 85(17): 3624–3627.
- [28] WU M Z, KALINIKOS B A, CARR L D, et al. Observation of spin-wave soliton fractals in magnetic film active feedback rings [J]. *Physical Review Letters*, 2006, 96(18).
- [29] BAO C, JARAMILLO-VILLEGAS J A, XUAN Y, et al. Observation of Fermi-Pasta-Ulam recurrence induced by breather solitons in an optical microresonator[J]. *Physical Review Letters*, 2016, 117(16).
- [30] MUSSOT A, NAVEAU C, CONFORTI M, et al. Fibre multi-wave mixing combs reveal the broken symmetry of Fermi - Pasta - Ulam recurrence [J]. *Nature Photonics*, 2018, 12(5): 303–308.
- [31] SURET P, KOUSSAIFI R E, TIKAN A, et al. Single-shot observation of optical rogue waves in integrable turbulence using time microscopy[J]. *Nature Communications*, 2016, 7(1). DOI: 10.1038/ncomms13136.
- [32] DUDLEY J M, DIAS F, ERKINTALO M, et al. Instabilities, breathers and rogue waves in optics[J]. *Nature Photonics*, 2014, 8(10): 755–764.
- [33] XIAN T, ZHAN L, WANG W, et al. Subharmonic entrainment breather solitons in ultrafast lasers[J]. *Physical Review Letters*, 2020, 125(16). DOI: 10.1103/PhysRevLett.125.163901.
- [34] LIAO P, ZOU K, BAO C, et al. Chip-scale dual-comb source using a breathing soliton with an increased resolution[C]// *Conference on Lasers and Electro-Optics. IEEE*, 2018.
- [35] PICQUÉ N, HÄNSCH T W. Frequency comb spectroscopy[J]. *Nature Photonics*, 2019, 13(3): 146–157.
- [36] MAHJOUBFAR A, CHURKIN D V, BARLAND S, et al. Time stretch and its applications [J]. *Nature Photonics*, 2017, 11(6): 341–351.
- [37] PENG J, ZENG H. Build-up of dissipative optical soliton molecules via diverse soliton interactions [J]. *Laser & Photonics Reviews*, 2018, 12(8). DOI: 10.1002/lpor.201800009.
- [38] BAK P. Devil's staircase [J]. *Physics Today (United States)*, 1986, 39(12).
- [39] WINFUL H G, CHEN Y C, LIU J M. Frequency locking, quasiperiodicity, and chaos in modulated self-pulsing semiconductor lasers [J]. *Applied Physics Letters*, 1986, 48(10): 616–618.
- [40] BAUMS D, ELSÄSSER W, GÖBEL E O. Farey tree and devil's staircase of a modulated external-cavity semiconductor laser[J]. *Physical Review Letters*, 1989, 63(2): 155–158.
- [41] VARANGIS P, GAVRIELIDES A, ERNEUX T, et al. Frequency entrainment in optically injected semiconductor lasers [J]. *Physical Review Letters*, 1997, 78(12): 23530–2356.
- [42] WÜNSCHE H J, BAUER S, KREISSL J, et al. Synchronization of delay-coupled oscillators: a study of semiconductor lasers [J]. *Physical Review Letters*, 2005, 94(16).
- [43] SHORTISS K, LINGNAU B, DUBOIS F, et al. Har-

- monic frequency locking and tuning of comb frequency spacing through optical injection [J]. *Optics Express*, 2019, 27(25): 36976–36989.
- [44] ZHAO L, TANG D, LIN F, et al. Observation of period-doubling bifurcations in a femtosecond fiber soliton laser with dispersion management cavity [J]. *Optics Express*, 2004, 12(19): 4573–4578.
- [45] ZHAO L M, TANG D Y, LIU A Q. Chaotic dynamics of a passively mode-locked soliton fiber ring laser[J]. *Chaos: an Interdisciplinary Journal of Nonlinear Science*, 2006, 16(1). DOI: 10.1063/1.2173049.
- [46] MÉLO L B, PALACIOS G F, CARELLI P V, et al. Deterministic chaos in an ytterbium-doped mode-locked fiber laser[J]. *Optics Express*, 2018, 26(10): 13686–13692.
- [47] SONG Y, ZOU D, GAT O, et al. Chaotic internal dynamics of dissipative optical soliton molecules [J]. *Laser & Photonics Reviews*, 2023, 17(8). DOI: 10.1002/lpor.202300066.
- [48] ZOU D, LI Z, QIN P, et al. Quantum limited timing jitter of soliton molecules in a mode-locked fiber laser[J]. *Optics Express*, 2021, 29(21): 34590–34599.
- [49] WANG Z Q, COILLET A, HAMDI S, et al. Spectral pulsations of dissipative solitons in ultrafast fiber lasers: period doubling and beyond [J]. *Laser & Photonics Reviews*, 2023, 17(3). DOI: 10.1002/lpor.202200298.
- [50] ZHANG X, ZOU D, LIU R, et al. From breather solitons to chaos in an ultrafast laser: The scenario of cascading short and long-period pulsations [J]. *Chaos, Solitons & Fractals*, 2024, 182.
- [51] PIKOVSKY A, ROSENBLUM M, KURTHS J. Synchronization: a universal concept in nonlinear science [Z]. American Association of Physics Teachers, 2002.
- [52] HUYGENS C. Œuvres complètes de christiaan huygens: correspondance 1664–1665[M]. Martinus Nijhoff, 1893.
- [53] SHIM S B, IMBODEN M, MOHANTY P. Synchronized oscillation in coupled nanomechanical oscillators [J]. *Science*, 2007, 316(5821): 95–99.
- [54] KIM B Y, JANG J K, OKAWACHI Y, et al. Synchronization of nonsoliton Kerr combs[J]. *Science Advances*, 2021, 7(43). DOI: 10.1126/sciadv.abi4362.
- [55] JANG J K, JI X, JOSHI C, et al. Observation of arnold tongues in coupled soliton Kerr frequency combs [J]. *Physical Review Letters*, 2019, 123(15). DOI: 10.1103/PhysRevLett.123.153901.
- [56] GENTY G, SALMELA L, DUDLEY J M, et al. Machine learning and applications in ultrafast photonics [J]. *Nature Photonics*, 2021, 15(2): 91–101.
- [57] MENG F, DUDLEY J M. Toward a self-driving ultrafast fiber laser[J]. *Light: Science & Applications*, 2020, 9: 26–28.
- [58] ANDRAL U, SI FODIL R, AMRANI F, et al. Fiber laser mode locked through an evolutionary algorithm [J]. *Optica*, 2015, 2(4): 275–278.
- [59] WOODWARD R, KELLEHER E. Genetic algorithm - based control of birefringent filtering for self-tuning, self-pulsing fiber lasers [J]. *Optics Letters*, 2017, 42(15): 2952–2955.
- [60] 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(1). DOI: 10.1038/s41598-019-39759-1.
- [61] WOODWARD R, KELLEHER E J. Towards 'smart lasers': self-optimisation of an ultrafast pulse source using a genetic algorithm [J]. *Scientific Reports*, 2016, 6(1). DOI: 10.1038/srep37616.
- [62] 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.
- [63] PU G, YI L, ZHANG L, et al. Intelligent programmable mode-locked fiber laser with a human-like algorithm [J]. *Optica*, 2019, 6(3): 362–369.
- [64] PU G, YI 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: 114–121.
- [65] WEI X, JING J C, SHEN Y, et al. Harnessing a multi-dimensional fibre laser using genetic wavefront shaping [J]. *Light: Science & Applications*, 2020, 9(1).
- [66] WU X Q, ZHANG Y, PENG J S, et al. Control of spectral extreme events in ultrafast fiber lasers by a genetic algorithm [J]. *Laser & Photonics Reviews*, 2024, 18(4). DOI: 10.1002/lpor.202470026.
- [67] 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). DOI: 10.1002/lpor.202100191.
- [68] ZAHAVY T, DIKOPOLTSEV A, MOSS D, et al. Deep learning reconstruction of ultrashort pulses [J]. *Optica*, 2018, 5(5): 666–673.

- [69] VALENSISE C M, GIUSEPPI A, CERULLO G, et al. Deep reinforcement learning control of white-light continuum generation[J]. *Optica*, 2021, 8(2). DOI:10.1364/OPTICA.414634.

(本文编辑: 刘圣晨, 孟薇)



第一作者: 曾和平(1966—), 男, 华东师范大学教授、教育部长江特聘教授、国家杰出青年科学基金获得者、新世纪百千万人才工程国家级领军人物, 先后担任教育部“长江学者”创新团队、国家基金委创新群体、科技部重大研发计划、科技部重大科学仪器、国家基金委科学仪器、国家基金委重点等项目负责人;

兼职 *Optics Letters* 主题编辑、*European Physical Journal D* 编委; 2016年, 因“探明强场分子超快过程的重大贡献以及高功率超短脉冲光纤激光与红外单光子探测的持续技术进步”, 入选美国光学学会会士(OSA Fellow), 2021年获中国物理协会萨本栋应用物理学奖。



作者简介: 吴修齐(1996—), 男, 华东师范大学博士后, 从事飞秒光纤激光器非线性动力学及其智能调控研究。近年在 *Phys. Rev. Lett.*、*Nat. Commun.*、*Laser Photon. Rev.* 等国际学术权威期刊发表论文7篇, 相关工作被评为 Advanced Fiber Laser Conference “Fiber Laser in 2022 Winner”。入选国家资助博士后研究人员计划(B类)、上海市“超级博士后”激励计划、重庆市博士后创新人才支持计划, 获中国博士后科学基金第74批面上资助和第17批特别资助。



作者简介: 彭俊松(1986—), 男, 华东师范大学研究员、博士生导师, 主要从事飞秒激光器动力学、光孤子及非线性光纤光学相关研究。以第一或通讯作者在 *Phys. Rev. Lett.*、*Sci. Adv.*、*Nat. Commun.*、*Laser Photon. Rev.* 等期刊发表多篇学术论文。2021年至今, 任 CLEO (Conference on Lasers and Electro-Optics)

光纤光子学分会委员、上海市非线性科学学会理事等职务。获得国家自然科学基金委优秀青年科学基金、科技部重点研发计划(课题)、上海市青年科技启明星(A类)及欧盟玛丽居里计划等项目的资助。