

激光与光电子学进展

智能技术赋能飞秒激光:表征与控制(特邀)

罗超[†], 义理林^{*†}, 蒲国庆

上海交通大学电子信息与电气工程学院区域光纤通信网与新型光通信系统国家重点实验室, 上海 200240

摘要 飞秒激光在学术领域和工业领域都具有极高的应用价值,对飞秒激光进行准确快速的表征与精确控制对其各种应用至关重要。飞秒脉冲的传统表征方法依赖非线性效应且光路结构复杂,而飞秒脉冲的控制则大多采用开环手动调试,无法实现稳定的最优调控,极大地限制了飞秒激光的应用。近年来,智能技术的出现给飞秒激光研究提供了新范式,结合智能技术,低能量高重复频率飞秒脉冲序列的单帧全域测量与飞秒脉冲的按需智能调控有望成为现实。

关键词 锁模激光器; 飞秒脉冲智能表征; 飞秒脉冲智能调控

中图分类号 TN248 文献标志码 A

DOI: 10.3788/LOP232568

Intelligent Technologies Enhancing Femtosecond Lasers: Characterization and Control (Invited)

Luo Chao[†], Yi Lilin^{*†}, Pu Guoqing

State Key Lab of Advanced Communication Systems and Networks, School of Electronic Information and Electrical Engineering, Shanghai Jiao Tong University, Shanghai 200240, China

Abstract Femtosecond lasers have extremely high application value in both academic and industrial fields. Accurate and rapid characterization, as well as precise control of femtosecond lasers, hold vital position in their diverse applications. Conventional characterization methods for femtosecond pulses rely on nonlinearities thereby involving complex optical setups. The control over femtosecond pulses often relies on open-loop manual tuning, where the stable optimal control is not guaranteed. As a result, the application of femtosecond lasers is greatly limited. In recent years, the emergence of intelligent technologies has provided a new paradigm for femtosecond laser research. Through introducing intelligent technologies properly, the single-shot full-field characterization over the low-energy, high-repetition-rate femtosecond pulse train and the on-demand intelligent control over femtosecond pulses can be expected in the future.

Key words mode-locked lasers; femtosecond pulse characterization; intelligent control over femtosecond pulses

1 引言

飞秒激光具有极高的峰值功率、超窄的脉宽和超宽的光谱,在生物成像^[1-2]、高分辨率原子钟^[3-4]、光频梳光谱学^[5]、激光雷达^[6-7]、材料加工^[8-9]、天文学^[10]等领域具有重要应用价值。不同应用场景对飞秒激光的要求有所不同,这对飞秒激光的精确表征与调控提出了高要求。然而,飞秒脉冲时间尺度小,频域带宽达到了 THz 量级,无法使用电学设备进行直接测量。随后,科学家发现可以利用光学方法对飞秒脉冲进行测量,其想法是将待测飞秒脉冲延时后与自身在晶体里面产

生非线性效应,通过测量晶体输出的非线性信号来表征待测飞秒脉冲,由此发展出了自相关法^[11]、频率分辨的光学开关法(FROG)^[12]和基于相位干涉的直接电场重建(SPIDER)等飞秒脉冲测量方法^[13]。通过传统光学手段进行测量有着不同程度的缺陷,自相关法无法获得脉冲的幅度和相位,仅能大致获取脉冲宽度;FROG 和 SPIDER 均能对飞秒脉冲进行全域测量,即能够测量脉冲的幅度和相位。FROG 采用 Gerchberg-Saxton 迭代算法从 FROG 迹中恢复待测脉冲的幅度与相位。SPIDER 结构复杂,需要光谱仪采集干涉后的光谱用于脉冲重构。因此,FROG 和 SPIDER 均难

收稿日期: 2023-11-27; 修回日期: 2023-12-14; 录用日期: 2023-12-18; 网络首发日期: 2023-12-28

基金项目: 国家自然科学基金(62227821、62025503、62205199)

通信作者: lilinyi@sjtu.edu.cn

[†] 共同第一作者

以实现飞秒脉冲的单帧测量。近年来,研究人员利用时间拉伸-色散傅里叶变换(TS-DFT)技术和时间透镜技术,结合 Gerchberg-Saxton 迭代算法对皮秒脉冲进行了全域测量^[14],与 FROG 类似,同样难以实现飞秒脉冲单帧测量。此外,以上方法均利用了非线性效应,这对待测脉冲的能量提出了高要求。

另一方面,为了满足各种应用场景,对飞秒脉冲的调控同样重要。传统的飞秒脉冲调控大多通过开环的手动调试实现,过于依赖人工经验,难以实现稳定的最优调控。以产生飞秒脉冲的锁模激光器^[15-17]为例,基于偏振控制和克尔非线性^[15-16]的非线性偏振旋转(NPR)被动锁模光纤激光器(MLFL),由于结构简单、动力学状态丰富得到广泛的研究^[18-21],通过偏振的调节即可实现基础锁模状态和多种动力学过程^[20-32]。然而,基于传统手动调节实现 MLFL 中的激光状态是十分困难的,不仅是偏振解空间的局限,还是由于偏振对环境的敏感性^[33-39],导致锁模激光器难以在长期运行中保持稳定。锁模激光器不同状态的切换和激光器固有的各种瞬态不稳定性^[40-43]更是对手动调节的复杂性提出了高要求,这无疑大幅制约了锁模激光器的应用。

近年来,飞秒激光与智能技术结合的交叉领域逐渐成为学术界的研究热点。在飞秒脉冲测量中引入机器学习可以提高测量精度、测量速度与抗环境扰动能力^[44-50]。在飞秒激光智能控制方面,针对上述锁模难启动、易失锁的难题,逐渐发展出基于智能技术的自动锁模(AML)技术^[51-75]。AML 基于闭环反馈的架构,结合智能算法,通过控制锁模激光器内参数(泵浦、电控偏振控制器等),快速自动检索满足需求的目标脉冲状态。

随着算法与控制能力的提升,AML 的思想进一步应用于锁模激光器中一些特殊状态的控制^[76-82],如呼吸孤子、孤子分子、双光梳、时空锁模等。进一步地,在搭建激光器前,基于激光器数值仿真模型,结合智能算法对激光器进行反向设计的研究也开始出现^[83-84]。为了推动飞秒激光领域与智能技术的融合,帮助研究人员更加清晰地了解该方向的发展历程,促进智能激光的飞速发展,本文按时间梳理了近年来智能技术尤其是在飞秒激光表征与控制方面的交叉融合研究,在飞秒脉冲测量手段与智能控制方面进行了系统性概述,并对智能技术赋能飞秒激光这一交叉研究领域进行了展望。

2 飞秒脉冲智能表征

1967 年,Weber^[11]提出自相关法对飞秒脉冲进行测量,最小测量脉宽达到 10 fs。通过获取入射光脉冲的强度自相关,可计算得到脉冲宽度。然而自相关法无法获得准确的脉冲幅度和相位信息,仅能获知大概的脉冲宽度,并且无法测量脉宽低于 10 fs 的脉冲。1993 年,Kane 等^[12]提出了 FROG 方法对脉宽 10 fs 以下脉冲进行测量。FROG 装置与自相关法的装置十分相似,仅在信号探测端添加了能够测量光谱的相机。

通过调整两束光的相对时延,能够获得延时和光谱的二维图像,其被称作 FROG 迹,使用傅里叶变换迭代算法就可以从测量的 FROG 迹中恢复出脉冲的幅度和相位。然而迭代算法耗时比较长,针对这一问题,Krumbügel 等^[85]于 1996 年使用神经网络来替代迭代算法,验证集参数误差在 6.1% 以内。1999 年,Iaconis 等^[13]提出了 SPIDER 方法,同样可以测量飞秒脉冲的幅度和相位。SPIDER 的核心思想是利用非线性晶体来进行频率剪切,然后通过干涉获取输入光脉冲相位信息。与 FROG 不同,SPIDER 的相位恢复算法是确定性的,计算量低。然而,SPIDER 需要的频率剪切技术使得光路非常复杂,调节难度较大。

Zuo 等^[86]提出时域 TIE,利用色散进行菲涅耳变换,仅使用采样示波器采集菲涅耳变换前后的脉冲强度信号,便可对飞秒脉冲的相位进行恢复。测量装置为全光纤式,结构简单无需任何非线性。但通过脉冲强度信息来近似求解相位,脉冲边缘强度较弱的地方无法用于相位恢复,因此存在边缘相位失真的问题。另一方面,基于时域 TIE 的飞秒脉冲表征方法对采样率要求极高,达到 TSa/s 级别,目前只能借助采样示波器,无法实现单帧飞秒脉冲测量。2018 年,Ryczkowski 等^[14]利用 TS-DFT 技术获取脉冲的实时光谱,同时基于四波混频的时间透镜技术获取时域脉冲形状,将实时光谱和时域脉冲形状送入 Gerchberg-Saxton 迭代算法中进行相位恢复,成功对皮秒脉冲进行了全域测量,其结构如图 1 所示。然而,这种方法存在 3 个缺点:结构复杂;利用了非线性效应来实现时间透镜,无法准确测量低能量的脉冲;使用迭代算法恢复脉冲相位,无法针对高重复频率脉冲序列实现单帧全域测量。

随着机器学习的发展,飞秒脉冲测量研究也迎来了新机遇。2018 年,Zahavy 等^[44]结合仿真和实验,第一次将深度学习神经网络引入超短脉冲的重建领域。该方法利用仿真数据训练的深度学习网络,实现了从实验测量的 FROG 迹中快速重构原始脉冲。该方法不仅可以从低信噪比的信号中恢复脉冲,而且对脉冲的重建无需事先了解待测脉冲与测量信号的联系。该网络架构如图 2(a)所示,deep neural network (DNN) 架构包括了几个卷积层,然后是全连接的神经元层,中间有非线性激活。FROG 迹作为输入数据在 3 层滤波器中进行卷积,结果输入采用 ReLU 激活的 3 个全连接层,然后对脉冲的实部和虚部进行重构。图 2(b)、(c)分别为有监督学习和无监督学习的训练过程。有监督时,生成的脉冲信号作为监督 DNN 训练步骤的标签,利用 FROGNet 为这些脉冲创建 FROG 迹,添加白高斯噪声后通过 DNN 向前传播,梯度通过 DNN 反向传播,并通过随机梯度下降(SGD)更新添加到权重中。而无监督训练时,重构脉冲(DNN 的输出)也会通过 FROGNet 前向传播,这样重建的 FROG 迹就能与测量轨迹进行比较,然后计算梯度,并通过 FROGNet

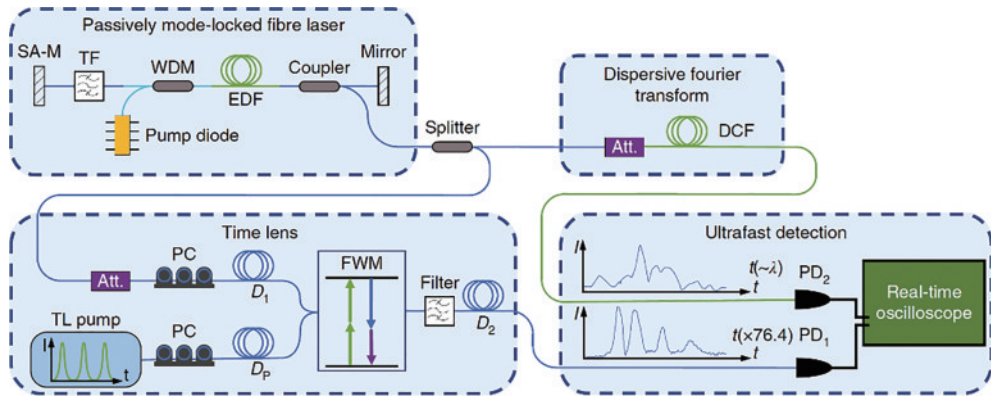


图 1 基于 TS-DFT 和时间透镜的超短脉冲测量装置^[14]

Fig. 1 The experimental setup of ultra-short pulse measurement based on TS-DFT and time-lens^[14]

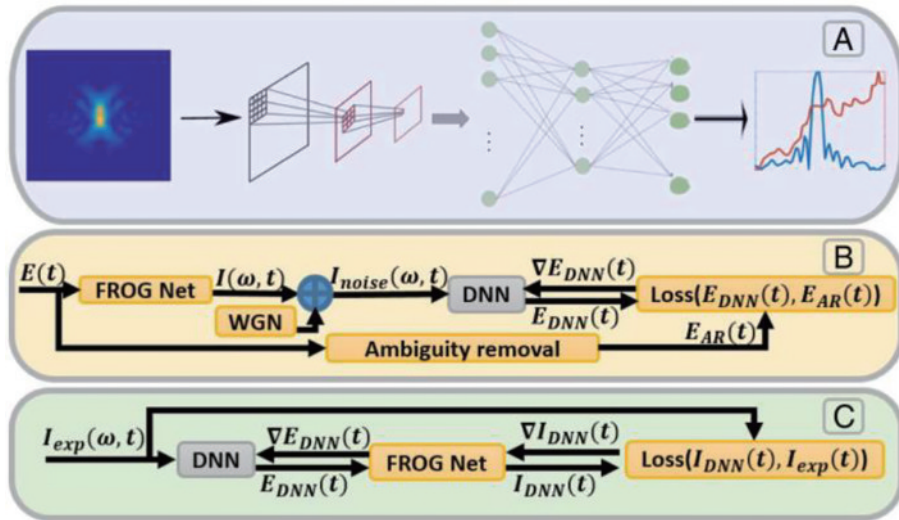


图 2 DNN 架构和有监督/无监督学习流程^[44]。(a) DNN 架构；(b) 有监督学习流程；(c) 无监督学习流程

Fig. 2 DNN architecture and supervised/unsupervised learning processes^[44]. (a) DNN architecture; (b) supervised learning process; (c) unsupervised learning process

反向传播以更新 DNN 的权重。该方案结合深度学习进一步拓展了 FROG 的测试能力。

2019 年, Kokhanovskiy 等^[45]使用机器学习预测 8 字腔锁模激光器的脉冲宽度, 通过搭建双放大结构 8 字腔产生 28~160 ps 宽度的脉冲, 光谱宽度从 0.75 nm 到 12 nm 变化。通常来说光谱宽度与持续时间之间没有直接关系, 然而激光系统具有特定的二阶色散、非线性系数和斯托克斯偏移, 因此特定的激光系统会产生一组特定的脉冲状态。该工作利用 artificial neural network(ANN)对激光系统进行建模, 通过采集 TS-DFT 后的波形数据, 训练网络预测的输出脉宽, 网络包括 3 个隐藏层 (32, 32, 16) 和 13600 个训练集, DFT 后的波形数据包含了信号的光谱宽度和光功率、拉曼脉冲的光谱宽度和光功率等共 8 个参数。通过多次实验对比 ANN、梯度增强网络 (EGB), 以及线性网络的预测结果, 其中, ANN 模型效果最好, 与实际测量的自相关函数误差仅为 4.8%, 基本保证了预测的准确性和稳定性。

2020 年, Chen 等^[49]利用 GaAs 的双光子吸收 (TPA) 效应, 结合全连接神经网络 (NN) 推测激光脉冲的时域宽度。双光子吸收响应可表征为入射光强的二次关系, 由于与二次谐波晶体有相似的灵敏度并且成本更低, 因此在测量光脉冲的自相关曲线方面有相关应用价值。实验装置如图 3 所示, 使用迈克尔孙干涉仪进行光电二极管的自相关测量, 在强度自相关测量中, 脉冲序列通过半波片和 PBS 分成两个强度相同的正交偏振部分, 分别传输至参考臂和扫描臂, 1/4 波片可以用来调节偏振减少干扰。而在干涉自相关测量中, 使用 BS 代替 PBS, 形成干涉测量结构。为了产生强烈的 TPA 效应, 在 PBS (或 BS) 和光电二极管之间放置了一个物镜组, 将激光脉冲聚焦到光电二极管的光敏区域。通过将强度自相关的信息导入基本的 NN 模型中进行训练, 输入数据前馈产生输出数据, 输出误差与目标数据反向传播来修正模型的参数。通过对比传统拟合的 Levenberg-Marquardt (L-M) 方法发现, L-M 和 NN 都可以在脉冲测量中拟合自相关曲线, 然而

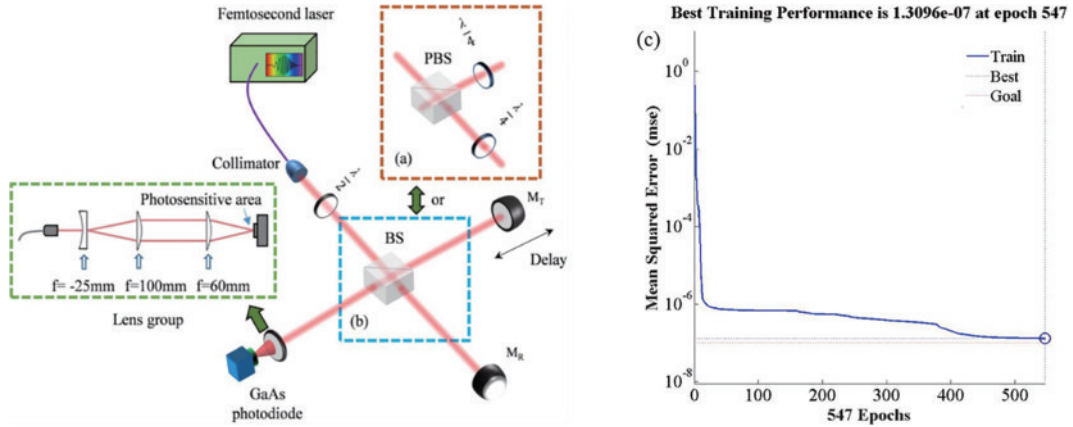


图 3 双光子吸收实验装置^[49]。(a)强度自相关;(b)干涉自相关;(c)训练曲线

Fig. 3 The experimental setup of TPA^[49]. (a) Intensity autocorrelation; (b) interference autocorrelation; (c) the training curve

L-M 需要预先设定拟合函数的类型,因此它对实际信号的形状匹配过于敏感,并且容易被噪声信号误导,使用神经网络的预测方法拟合性更高,实验中最佳训练误差仅为 10^{-7} 。

2022 年,Stanfield 等^[46]利用深度学习重建超短脉冲相位,模拟自相位调制(SPM)引起的非线性光谱变化。训练所用的仿真数据采用初始随机相位和光谱,脉冲宽度从 8.5 fs 到 65 fs,并且在超快激光系统产生的实验数据上进行了验证。在训练过程中发现,简单的二次相位高斯光谱的变化过程易于理解,而复杂脉冲产生的变化难以被人们直观理解,但神经网络却可以恢复其相位特征。对于宽带光谱,根据 SPM 前后的光谱测量结果,采用两个分离的神经网络分别训练,其中一个预测初始脉冲相位而另一个预测初始脉冲幅度。通过与 FROG 实验数据的对比发现,神经网络在预测 SPM 光谱上十分一致,并且时域包络也几乎相同。在商用台式计算机上使用神经网络重建相位的时间小于 10 ms,因此利用该网络模型可以做到实时显示。

同年,本课题组^[47]通过将强度传输方程与残差神经网络相结合,提出基于神经网络的飞秒脉冲单帧测量方案,仿真模型如图 4(a)所示,待测飞秒脉冲首先

通过一根标准单模光纤(SSMF),记为 SSMF1,用于预拉伸飞秒脉冲。经过传输后,飞秒脉冲脉宽被拉伸至纳秒量级,经过 photo detector(PD)后,时域强度可以被示波器或 analog-to-digital converter(ADC)采集。随后,被拉伸的脉冲经过第二段标准单模光纤进行菲涅耳变换,记作 SSMF2。系统中采用的数据采集装置为两个 PD 和两个 ADC,分别采集得到经过第一段和第二段色散光纤后的脉冲强度数据,记为 I_1 、 I_2 。则时域轮廓差异信号的表达式为

$$I_{\text{TPD}} = \frac{1}{\beta_2} \cdot \frac{I_2 - I_1}{L}, \quad (1)$$

式中: β_2 为用于菲涅耳传输的色散光纤的群时延色散参数; L 为该光纤的长度。将时域轮廓差异数据作为神经网络的输入数据,将飞秒脉冲的强度数据作为标签用于训练。随后计算真实的飞秒脉冲强度数据和神经网络预测得到的飞秒脉冲强度数据之间的均方误差(MSE),将其作为损失值训练并更新神经网络的权重参数,优化神经网络性能,实现了脉宽范围从 100 fs 至 1.5 ps 的超短脉冲强度的单帧测量,如图 4(b)~(e)所示。预测脉冲宽度的均方根误差仅为 8.14 fs,相比于全连接网络精确度提升了 3 倍以上。

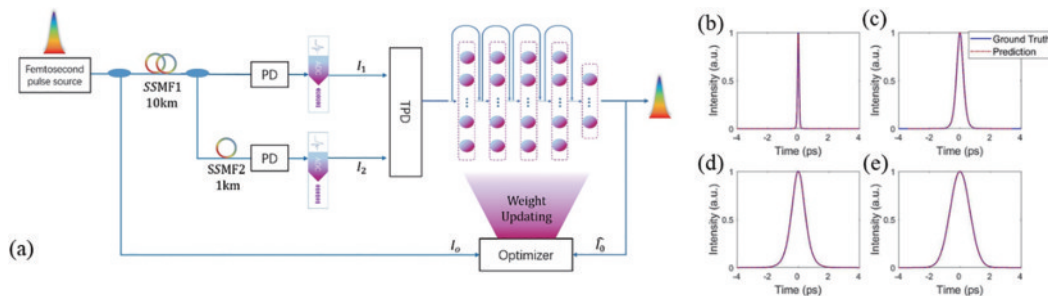


图 4 飞秒脉冲单帧测量方案^[47]。(a)飞秒脉冲强度单帧测量残差网络;(b)~(e)对脉宽为 100 fs、500 fs、1 ps、1.5 ps 的飞秒脉冲时域强度的单次表征

Fig. 4 Single frame measurement scheme for femtosecond pulses^[47]. (a) Residual network for single frame measurement of femtosecond pulse intensity; (b)~(e) single-shot characterization of time-domain intensity of femtosecond pulses with pulse widths of 100 fs, 500 fs, 1 ps, and 1.5 ps

况琪等^[48]也提出了对飞秒脉冲相位测量的方法,结合深度学习的自参考光谱干涉(SRSI),针对一维信号的 Dense-1D-U-Net 神经网络,通过结合经典的编码-解码网络结构、稠密连接、跳跃连接对网络性能进行优化。Dense-1D-U-Net 神经网络如图 5 所示,以一维卷积神经网络的编码-解码结构 U-Net 为框架,将部分卷积层替换为特别设计的稠密连接块。输入数据为 1024 位的光谱干涉条纹,共有 4 个稠密连接

层,中间层被压缩到 64 位但是并未降低信息深度,卷积核的长度为 9,卷积步长为 1。因为输出的相位曲线相比输入要平滑很多,所以加长了卷积核的长度来增加稳定性。相比于使用完美高斯光谱得到训练结果,使用真实相位及模拟加入最高 5 阶的高阶相位的情况下,基于 Dense-1D-U-Net 的深度学习比传统 SRSI 算法要更加优秀,MSE 计算结果要低一到两个数量级。

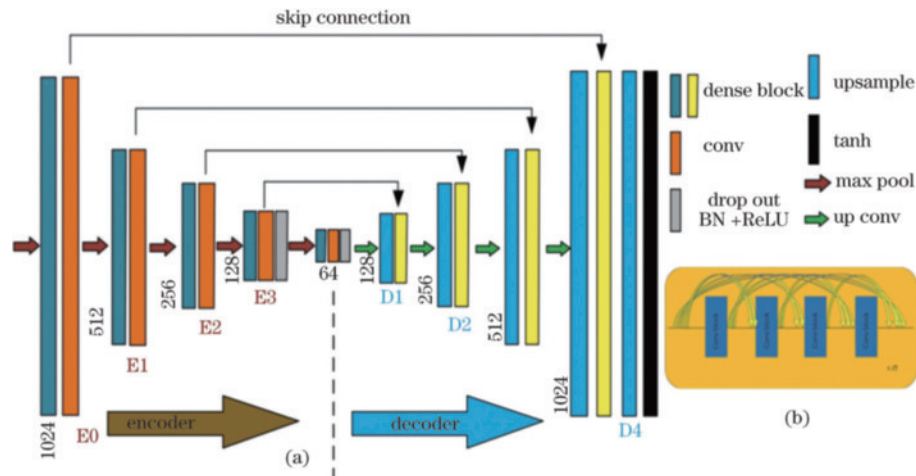


图 5 Dense-1D-U-Net 神经网络^[48]。(a)Dense-1D-U-Net 神经网络整体架构;(b)稠密连接结构

Fig. 5 Dense-1D-U-Net neural network^[48]. (a) The architecture of Dense-1D-U-Net neural network; (b) dense connection structure

同期,Geffert 等^[50]提出了对飞秒激光的原位表征方法。由于飞秒脉冲极宽的光谱,其在与材料接触过程会发生瞬变,因此需要在发生相互作用前对其时间轮廓进行表征。该工作通过强场电离驱动的自相关理论研究了飞秒级近红外激光脉冲的表征,采用第一性原理量子力学计算来模拟稀有气体原子的强场电离,并产生一系列激光参数的自相关模式。将这些模式送入一种称为向量空间牛顿插值箱(VSNIC)的机器学习模型中,训练表征驱动电离的激光场的特性。基于仿真模型,验证了该方法的有效性,对强场自相关模式的脉冲长度和光谱宽度有较好的检测能力。然而,该方法仅针对二阶色散,若要拓展至三阶以上色散,则需要更大的参数空间和更高的计算成本。

综上所述,将智能技术引入飞秒脉冲表征中可以大幅提升性能,包括表征速度、精度与对噪声的抵抗能力等。

3 飞秒脉冲智能控制

3.1 自动锁模技术

根据使用算法的不同,AML 的研究可以分为 3 类。早期的 AML 研究大多基于遍历算法^[51-56],遍历算法效率较低且时常需要人为辅助。随着 AML 领域的不断发展,使用优化算法的智能激光器^[57-68]以及基于机器学习的自调谐激光器^[69-75]也逐渐崭露头角,搜索效率更高、控制效果也更好。

3.1.1 基于遍历算法的 AML

在 AML 的早期阶段,使用最多的是遍历算法,通常包含一个在偏振空间遍历庞加莱球的过程,在参数遍历的过程中搜索判决合适的状态。判决标准通常包括对脉冲的计数^[52-55]和光谱参数的检测^[51,56,87-88]。尽管这种遍历的方法耗时很长,但是可以搜索到多个锁模状态,包括基频锁模(FML)、谐波锁模(HML)、类噪声脉冲^[56]等。其中,一些研究也在努力引进实时性的操作^[52-54],比如使用微控制单元(MCU)或现场可编程门阵列(FPGA)作为控制中心,使用 ADC 获取反馈数据。这种实时采集数据的方式比设备分离的数据获取方式要更加节约时间。

AML 由 Hellwig 等^[51]提出,他们搭建了基于 NPR 的 MLFL,在腔内加入了自动偏振控制器(APC),这是一种压电效应的偏振控制器。通过计算机控制 APC 进行偏振扫描,将偏振态与激光器参数建立映射,实现对锁模状态的快速定位。但缺点在于长时间未更新映射会导致锁模定位失效,因此对环境稳定性要求很高。

2012 年,Shen 等^[52]实现了掺 Yb 光纤的 NPR 自动锁模。腔内的偏振控制单元是电控偏振控制器(EPC),与 APC 类似,这是通过对晶体附加电压,进而改变折射率和偏振态的器件。MCU 通过 digital-to-analog converter(DAC)控制 EPC 电压,并通过脉冲计数的方法进行锁模判决。为了节约时间成本,仅使用

了 EPC 的单个通道电压进行遍历,并尝试通过 MCU 设置一个准确的电压值复现锁模状态。该方案首次提出了反馈的控制方式,但需要手动控制激光器的初始偏振,因而也限制了其发展。

次年, Li 等^[53]使用了两个 EPC 实现了 AML, 重复频率为 6.238 MHz。这里使用 MCU 作为控制中心, 把波形整形为低频方波后再进行锁模判决, 该项方案最快初始锁模时间为 90 s, 大大提升了锁模的效率。然而在算法和硬件方面仍然存在很大提升空间, 对状态搜寻也仅限于 FML 和 HML。

2017 年, Shen 等^[54]进一步改善了之前的激光器设计。实验使用 EPC 的 3 个通道进行逐一扫描, 联合 6 个计数器精确地获取重复频率。该脉冲计数方案可以正确区分 FML 状态与连续波、Q-switched mode-locking (QML) 和多脉冲状态, 并进一步研究了温度的影响。然而该方案的初始锁模时间太长, 并且系统的偏振状态会受到温度以外的因素(如振动、应力等)影响, 因此其快速启动性能并不能保持稳定。

2018 年, 本课题组^[55]实现了包含 FML、二阶 HML、三阶 HML 在内的自动锁模激光器, 使用石墨烯作为起偏器和可饱和吸收体, 重复频率为 6.85 MHz, 简化了反馈电路结构, 只使用一个 ADC 采集数据传到 PC。采用快速遍历算法, 在 4 维参数极化空间中, 建立数据库记录不同电压值对应的脉冲状态, 通过记录不同脉冲状态的电压经验值, 实现不同的脉冲状态的切换。对 FML 的识别为脉冲个数计数, 而对高次谐波的判断, 则是利用快速傅里叶变换 (FFT) 获取频谱信息, 观察发现 n 阶 HML 的第 n 根频谱线幅度最大。

2018 年, Wu 等^[56]基于 NPR 锁模激光器实现了类噪声脉冲和 FML 的识别和锁定。类噪声脉冲与 FML 的差别在于双光子吸收强度的差距, 类噪声脉冲的双

光子吸收强度要大很多, 因此使用 GaAsP 的二极管进行检测反馈可以很好地区分 FML 和类噪声。

3.1.2 基于优化算法的 AML

为了进一步提升 AML 的时间性能, 优化算法被引入 AML 领域, 通过优化路径在巨大的参数空间中定位目标状态的参数值, 以节约搜索所需的时间。遗传算法 (GA)^[89] 是 AML 领域运用最广泛的算法之一, 通过不同目标函数设计, 优化算法可以快速有效实现不同脉冲状态的搜索。

2013 年, Fu 等^[57]在理论仿真的过程中, 创新性地运用了遗传算法对多个 NPR 滤波器进行优化, 其目的是提升单脉冲能量的测量和定位精度, 通过这种方法, 可以有效地增强单脉冲的能量, 进一步规避和抑制多脉冲不稳定性, 从而提升系统的稳定性和准确性。这是首次将遗传算法应用在 AML 的相关研究中。

2015 年, Andral 等^[58]首次在实验中演示了演化算法的作用, 演化算法是 GA 算法的一个分支, 包括基因、个体和种群在内的许多遗传算法术语。实验装置如图 6 所示, 使用两个 EPC 和一个手动偏振控制器用于控制腔内的偏振。每个 EPC 由 3 个电压驱动, GA 的优化过程应用于两个 EPC 共 6 个支路电压, 以自动锁定激光器。首先采用二次谐波 (SHG) 信号强度作为适应度函数, 即在腔输出处的非线性 BBO (β -BaB₂O₄) 晶体中产生的第二谐波信号。FML 状态可以产生强烈的 SHG 信号, 因此通过优化 EPC 的 6 个电压来实现最大 SHG 信号, 使激光器最终优化至锁模状态。然而, QML 状态的存在可能会干扰对 FML 的判决, 因此通过时域波形的 FFT 获得自由空间范围 (FSR) 射频频谱分量, 使用 FSR 强度构建新的适应度函数, 这样就可以过滤 QML 状态。但由于 GA 的复杂性和巨大的六维参数空间, 初始锁定时间太长。

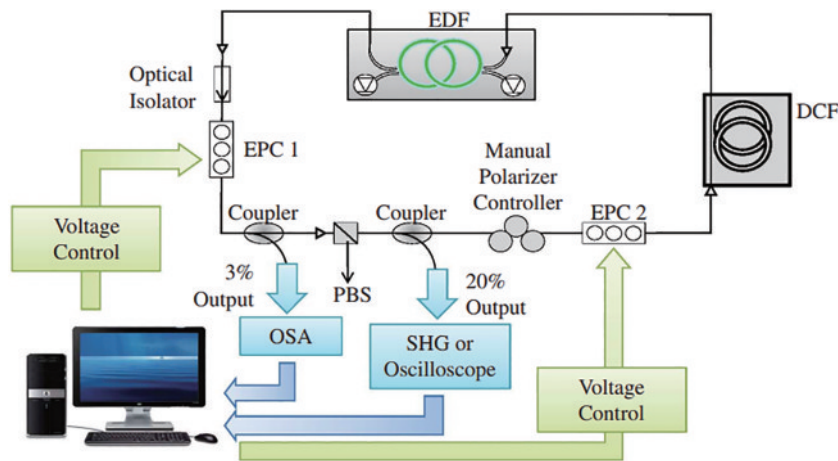


图 6 含计算机控制反馈的光纤激光器示意图^[58]

Fig. 6 The schematic diagram of fiber laser with computer-controlled feedback^[58]

2016 年, Woodward 等^[59]将 GA 算法应用于 8 字形腔中实现了自动锁模, 其内部偏振的调节是由 EPC 控制实现的。该研究创造性提出了复合的适应度函数, 从

时间波形、光谱和电谱中提取 3 个分量的加权和, 优化过程中复合适应度几乎一代又一代地单调增加, 由 GA 搜索的 FML 区域显示出可重复性。该研究进一

步为 GA 在 AML 技术中的应用铺平了道路,然而构成复合适应度的 3 个部分是使用大型设备收集的,包括示波器、光学频谱分析仪和射频频谱分析仪,数据采集的速度慢,加上 GA 的复杂性,初始锁定时间大约在 30 min。次年,该课题组^[68]基于 EPC 双折射滤波和泵浦控制,在 NPR 环形激光器中实现了自调谐 Q-switching(QS)状态的锁定。通过 GA 算法指导 QS 区中心波长和重复频率的自动调谐,中心波长由光谱仪测量反馈,重复频率由时域波形获取。通过对泵浦功率和 EPC 电压的扫描,验证了优化结果的最佳适应度。该方案首次实现泵浦控制,并通过算法控制了光谱的部分参数,不过与之前研究一样,具有成本高、便携性差、初始锁定时间长的缺陷。

2017 年, Winters 等^[60]采用 GA 实现了全正色散 MLFL 的自动锁模,同时利用爬山算法进行失锁恢复。腔内使用了电控偏振控制相关元件结构,4 个液晶相位延迟片来代替可旋转的固定延迟片,而液晶只需要较低的电压进行驱动,因此整个算法运行空间是 4 维的。GA 的适应度函数是测量光谱和目标光谱之间的

决定系数,它揭示了这两个光谱之间的相似性。实验中光谱的中心波长为 1043 nm,光谱宽度为 25 nm。由于激光器在许多情况下都在期望点附近工作,因此可以使用局部优化算法快速找到期望的区。最终通过 GA 算法实现了 90 s 内自动搜索到 FML 状态,并且利用爬山算法做到 30 s 内的失锁恢复。

2018 年, Ryser 等^[61]通过 GA 算法和 EPC 控制在全正色散激光器中实现了 FML、单波长连续光、双波长连续光状态的搜索。通过使用由脉冲振幅抖动和最大强度测量波长与目标波长之间的绝对差异组成的复合适应度函数,实现了强度和波长自调谐的 FML 状态,并通过不同目标值的选取进行多状态的区别与优化。该方案依然使用了大型设备,便携性差,并且通过示波器、射频分析仪和光谱仪进行反馈数据采集是非常耗时的。

2019 年,本课题组^[62]首次实现了实时智能可编程的 MLFL,如图 7 所示。该激光器能够自动锁定 5 种工作模式,包括图 7(b)所示的 FML 状态、二阶 HML 状态、三阶 HML 状态、QS 状态和 QML 状态,具有迄今

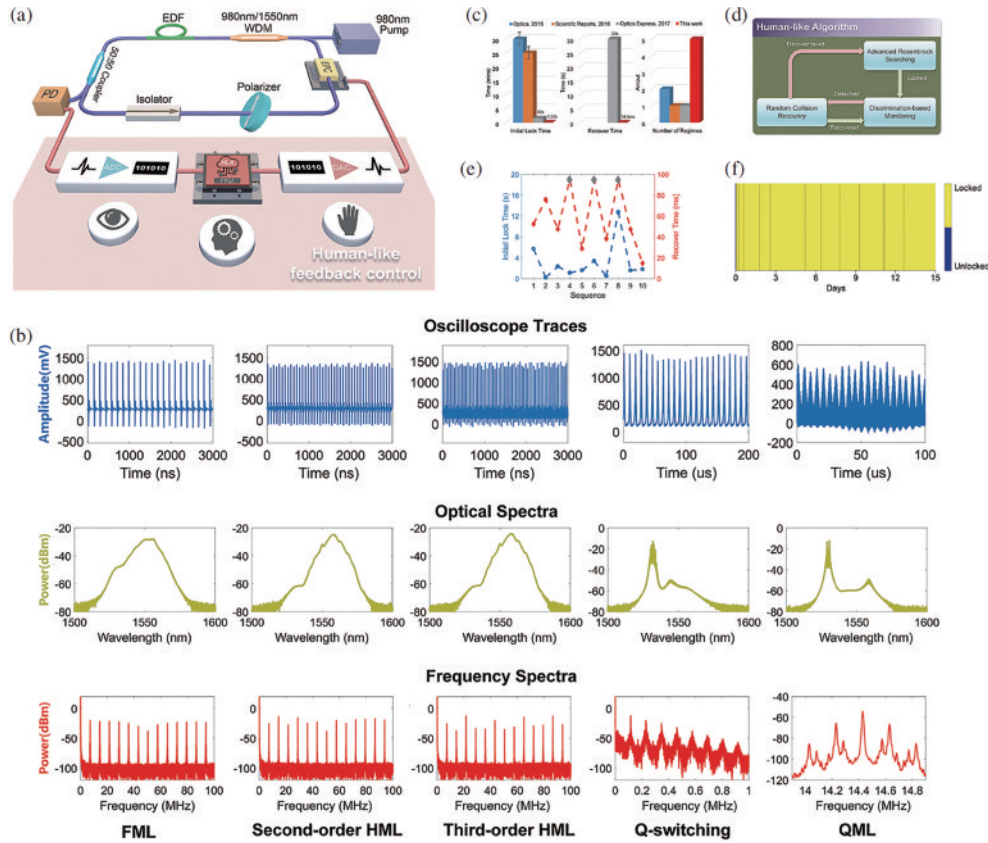


图 7 实时智能 MLFL^[62]。(a) 实验装置图; (b) 状态搜索结果展示, 从左到右分别显示 FML、二阶 HML、三阶 HML、QS 和 QML; (c) 最近的 AML 研究与我们的研究之间的初始锁定时间、恢复时间和体制数量的比较; (d) 类人算法示意图; (e) 连续 10 次实验中, FML 状态在初始锁定 (蓝色虚线) 和恢复 (红色虚线) 上的时间消耗; (f) 连续 15 天的运行记录

Fig. 7 Real-time intelligent MLFL^[62]. (a) The experimental setup; (b) state search results shown from left to right, FML, second-order HML, third-order HML, QS, and QML; (c) comparison of initial lock time, recovery time and number of regimes between recent AML studies and our study; (d) schematic diagram of human-like algorithm; (e) time consumption of FML states on initial lock (blue dotted line) and recovery (red dotted line) in ten consecutive experiments; (f) operation records for 15 consecutive days

为止最丰富的状态数。此外,最短的启动(从连续光状态到 FML 模式)仅耗时 0.22 s,最短的恢复时间仅为 14.8 ms,如图 7(c)所示,具有目前最快的锁模速度。图 7(e)展示了 FML 模式在初始锁定和恢复上的连续 10 次实验的耗时情况,10 次锁定的平均时间仅为 3.1 s,10 次恢复的平均时间仅为 58.9 ms。此外,在没有任何热稳定性或振动保护装置的开放环境中进行了 15 天的连续运行测试,记录如图 7(f)所示。激光器最初在 0.5 s 内达到 FML 模式,然后在 15 天内发生了 12 次失锁,平均恢复时间仅为 31 ms。激光器的优异性能归功于实时电路和类人算法,如图 7(a)所示,电路由一个 ADC、一个 FPGA 和 4 个控制 EPC 的 DAC 组成。与离线实现相比,实时实现具有更小的时间消耗,单轮反馈(ADC 数据采集、FPGA 算法运行和 DAC 控制 EPC)仅耗时 1 ms。另一方面,如图 7(d)所示,类人算法主要由 3 个部分组成:改进的 Rosenbrock 搜索(ARS)算法、随机碰撞恢复(RCR)算法和每个状态的区分函数。类人算法由 ARS 启动,当锁定到目标状态后进入当前状态的持续监测。RCR 尝试将当前状态拉回附近的合适目标状态上,如果恢复成功系统返回到监测模式,否则需要重新启动 ARS 进行搜索。这套算法被称作类人算法,在于算法运行与人工手动锁模的行为逻辑非常一致。针对不同目标状态的搜索,我们建立了一组目标函数和不同状态的判别标准,仅需

低速示波器采集时域波形,无需大型设备,显著降低了成本并提高了可移植性。通过实时电路与类人算法的结合,在耗时和成本上成功解决了 AML 领域中的长期缺陷,对不同状态的灵活编程促进了科研和工业领域的广泛应用。

随后,本实验组^[63]结合判决方法和传统 GA 算法,提出一种改进的 GA 算法,进一步降低了 AML 的耗时。实验设置如图 8(a)所示,与之前方案类似,算法逻辑图如图 8(b)所示,不同状态的适应度函数遵循以前的研究中的目标函数。改进遗传算法的核心思想是在适应度计算期间同时执行判别操作,以判断当前波形是否达到目标状态,当检测到目标状态时,算法立即停止搜索,从而显著减少算法的运行时间(跳过遗传算法中的其余生成计算)。随后激光器进入基于判别操作的监测阶段,当检测到失锁时,将通过再次启动改进的遗传算法自动恢复到目标状态。改进遗传算法与 ARS 之间的耗时比较如图 8(c)所示,这里 FPGA 内部使用了一个时间分辨率为 3 ns 的定时器进行计时,当搜索 FML 时,两种算法的耗时性能几乎相同,而搜索罕见的状态,例如二阶 HML 和 QS 时,由于 GA 强大的全局优化能力,在耗时性能上比 ARS 具有巨大的优势。因此,本研究揭示了初始锁定的最佳耗时性能,依据不同目标函数可以搜索和编程各种锁模状态,同时还可以保证了 MLFL 的成本和可移植性。

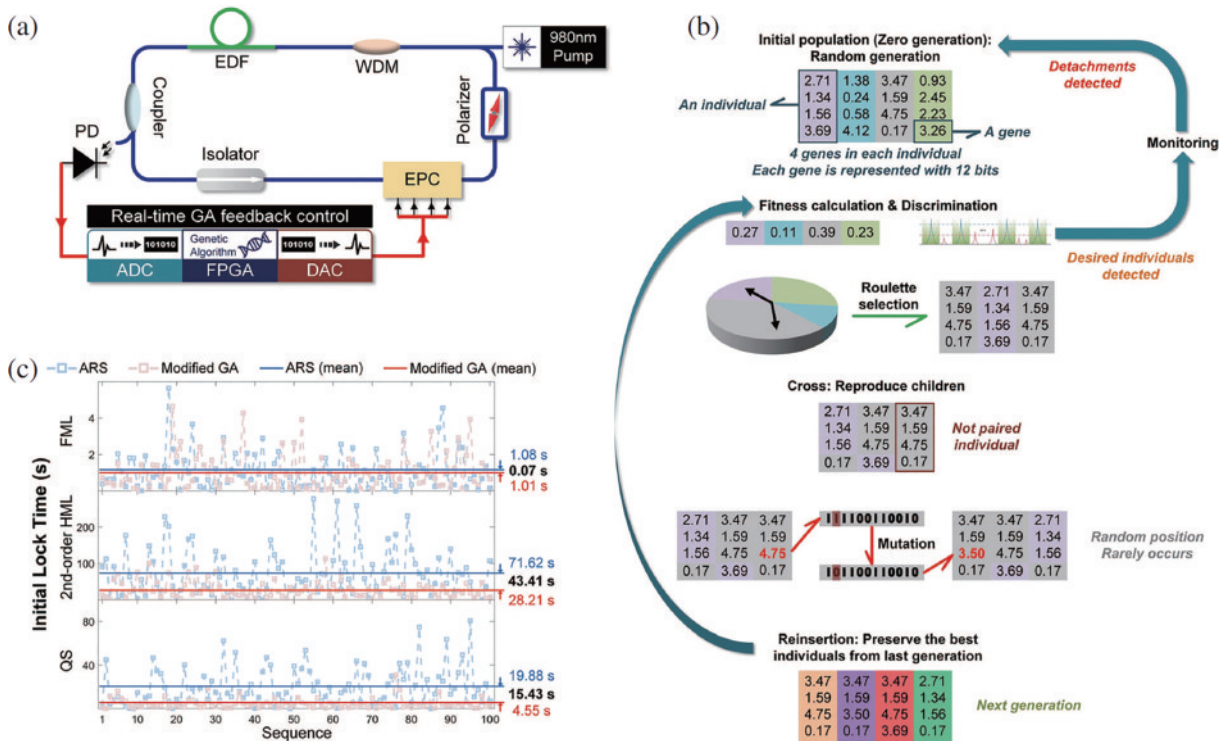


图 8 基于遗传算法的实时 AML^[63]。(a) 装置图; (b) 改进的遗传算法流程图; (c) ARS 和改进的遗传算法之间的耗时性能比较

Fig. 8 Real-time AML based on genetic algorithm^[63]. (a) The experimental setup; (b) The flow chart of modified genetic algorithm; (c) comparison of time-consuming performance between ARS and improved genetic algorithm

进一步地,为了改善获取光谱信息时传统光谱仪带来的时间损耗,本课题组^[90-91]使用 TS-DFT 技术,通过色散介质建立光谱和时域脉冲之间的映射,从而获取实时光谱信息。通过这种方法,基于 NPR 激光器做到了光谱宽度从 10 nm 调谐到 40 nm、分辨率为~1.47 nm (相应的时域脉冲宽度可以控制)、光谱形状可以被编程为双曲割线或三角形的自动锁定,实现了对锁模飞秒脉冲光谱层面的实时智能控制^[64]。

2020 年, Girardot 等^[65]通过 TS-DFT 技术和 GA

算法实现净正色散 MLFL 的自动锁定,如图 9(a)所示,通过示波器同时获取色散前后的波形,将波形数据传输给电脑端,用于目标函数计算,通过 GA 算法优化参数,随后通过设置腔内液晶缓变器的电压控制偏振效果。该方案从时域获取光谱信息,结构简单,对锁模光谱的宽度也有一定的控制效果。其中,针对光谱宽度在优化函数中的权重 α 因子,其取不同值时的优化结果如图 9(b)所示,展示了对光谱宽度从 27 nm 到 39 nm 的控制能力。

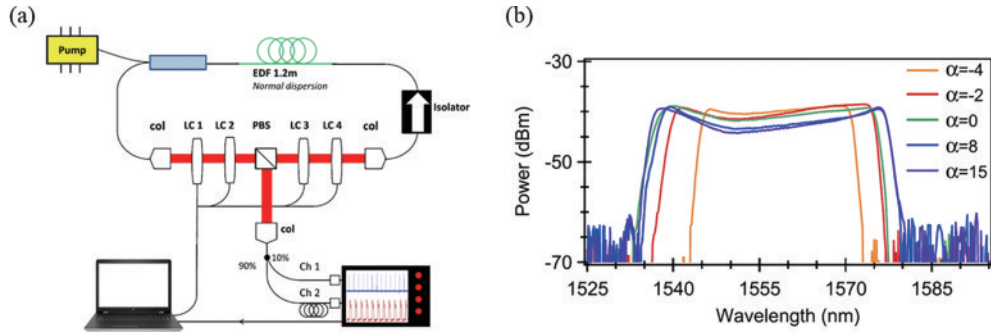


图 9 基于电脑控制的智能激光器^[65]。(a) 实验装置图; (b) 不同 α 因子优化后得到的光谱

Fig. 9 Computer-controlled smart laser^[65]. (a) The experimental setup; (b) comparison between optimal spectra obtained after optimizations for merit functions with different α

2022 年,本课题组^[66]提出了高重复频率激光器实时自动锁模方案,探索低采样率下的成本极限。由于高重复频率脉冲的单周期时间更短,相同采样率下采集到的点数更少,因此需要更高采样率的 ADC,然而高速 ADC 成本昂贵且调试复杂,因此需要考虑其他手段在低采样率下识别高重复频率脉冲。该工作通过 3 种 PD 采集波形,分别是无操作、电信号低通滤波器、光纤色散预展宽,发现色散展宽的效果最好,并利用这种预展宽方式实现了 400 MSA/s 采样率下对 48 MHz

重复频率激光器的自动锁模,实验结构如图 10(a)所示。针对脉冲计数方式提出了可计数阈值范围(CTR),进一步地对比分析了不同采样率、滤波带宽、色散值下的情况,图 10(b)展示了 500 MSA/s 的固定采样率和 10 GHz 的固定带宽下,具有负净色散的孤子激光器(蓝线)和具有近零净色散的拉伸孤子激光器(红线)的预拉伸色散量与 CTR 的变化。图 10(c)展示了 500 MSA/s 的固定采样率下,色散量、CTR 与不同带宽 [10 GHz(蓝线)、3 GHz(浅蓝线)、1.25 GHz(紫线)、200 MHz(黄

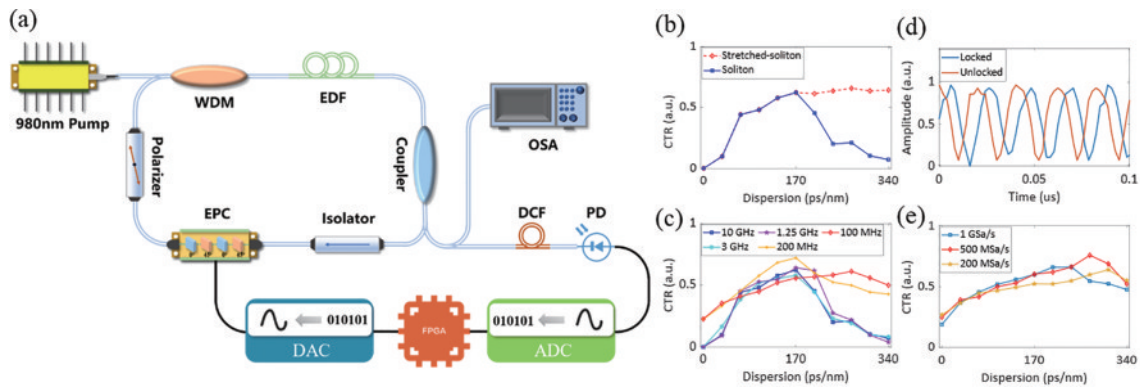


图 10 高重复频率激光器实时自动锁模方案^[66]。(a) 预展宽技术下 48 MHz 自动锁模实验装置; (b) 500 MSA/s 固定采样率下不同净色散激光器的色散量与 CTR 的变化; (c) 500 MSA/s 的固定采样率下,色散量、CTR 与不同带宽之间的关系; (d) 固定采样率和带宽下的归一化波形对比 (e) 100 MHz 的固定带宽下色散量、CTR 与不同采样率之间的关系

Fig. 10 Real-time AML for high repetition rate lasers^[66]. (a) The experimental setup for the pre-stretch technique enabled 48 MHz AML; (b) changes in the dispersion and CTR of lasers with different net dispersion at a fixed sampling rate of 500 MSA/s; (c) relationships between the dispersion, CTR, and different bandwidths at a fixed sampling rate of 500 MSA/s; (d) comparison of normalized waveforms at a fixed sampling rate and bandwidth; (e) relationships between the dispersion, CTR, and different sampling rates at a fixed bandwidth of 100 MHz

线)和 100 MHz(红线)]之间的关系。图 10(d)展示了 500 MSa/s 的固定采样率和 50 MHz 的固定带宽下,基频锁模状态(蓝线)和失锁状态(橙线)之间的归一化波形对比。图 10(e)展示了在 100 MHz 的固定带宽下,色散量、CTR 与不同采样率(包括 1 GSa/s、500 MSa/s 和 200 MSa/s)之间的关系。从实验中可得出最佳色散点位置,并发现最小滤波带宽为 2 倍重复频率,最小采样率为 4 倍重复频率,该结论也与奈奎斯特定律保持一致。

3.1.3 基于机器学习的 AML

随着计算机技术的不断发展,机器学习也越来越多地被应用于 AML 领域^[69-75]。2013 年, Brunton 等^[69]在仿真中使用极值搜索算法(ESC)在基于 NPR 的 MLFL 模型中获得 FML 状态。2014 年,该课题组^[70]使用机器学习和稀疏表示在数值模拟中成功地对 MLFL 中的双折射进行分类。采用机器学习模型作为反馈核心,在训练过程中建立一个库,包含了各种腔体双折射值之间的映射以及施加在波片和偏振器的伺服电压的最优解。对于每个双折射值,进行短环搜索以定位最佳值,再对目标函数的时间序列进行 Gabor 变换,得到当前双折射值的唯一谱图,对谱图进行奇异值分解(SVD)约简后保留前 m 个模式。这 m 个模式表征当前双折射状态,而未知双折射值的 m 模式也可以通过 Gabor 变换和 SVD 约简来获得。在双折射被识别后,通过库很容易获得伺服电压的最优解。进一步地,通过将 ESC 算法与机器学习相结合,该课题组^[71]仿真实现了一种自调谐的光纤激光器。ESC 算法的引入是为了解决环境扰动带来的较小性能变化,而如果受到了较大的扰动,即使在应用最优解之后激光器也无法达到预期运行性能,则会执行另一个短环搜索,通过稀疏分类重新识别当前双折射情况。

2018 年,通过将深度学习^[92]架构与模型预测控制(MPC)^[93]相结合, Sobon 等^[94-95]提出了自调谐激光器的崭新仿真模型^[72]。该方案沿用之前的目标函数来评价激光器的运行状态。研究表明,变分自编码器(VAE)可以学习有意义的潜在结构,由于双折射不能直接测量,这里使用了 VAE 从隐空间表征双折射。随后,系统使用全连接神经网络学习双折射表示与最佳控制输入(波片和偏振器)之间的映射。MPC 在强非线性系统上具有灵活性和鲁棒性^[93],这里使用循环神经网络实现 MPC,通过预测未来的最优控制输入来快速调节激光器当前状态。实验追踪了双折射随时间发生随机变化时系统的性能,使用深度学习方案的目标函数值始终保持在较高水平,意味着激光器始终维持在高能量脉冲状态。

2021 年, Yan 等^[73]针对可饱和吸收的 MLFL,基于深度决定策略梯度(DDPG)方案提出了一种低延迟的深度强化学习算法。算法结构如图 11 所示,共 4 个神经网络,包括两个结构相同的执行网络(黑色)和两个结构

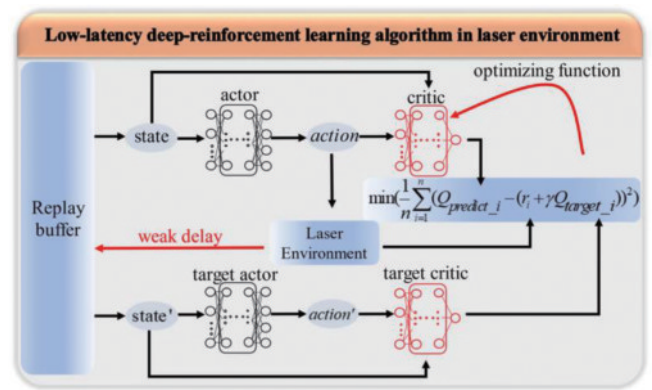


图 11 基于 DDPG 策略的低延迟深度强化学习算法结构^[73]
Fig. 11 The structure of low-latency deep reinforcement learning algorithm based on DDPG strategy^[73]

相同的评价网络(红色)。执行网络由一个三层全连接的网络构建,两个隐藏层的节点数为 256,输入层和输出层分别是状态和动作。算法的功能是根据当前状态推断下一个动作,以确保系统尽快达到目标状态,从激光器状态读取当前激光状态,从而决定下一步给 EPC 的电压值。评价网络也由一个三层全连接的网络构建,其中,两个隐藏层的节点数设置为 256。输入层是状态和要执行的动作,输出层用于评估动作奖励的 Q 值。弱延迟的目的是在当执行动作后,需要让激光的状态稳定 0.5 s 再读取,这样可以更准确地判断激光的偏振状态。通过在实验中恢复环境振动状态下的失锁状态,以及分别建立不同温度下的模型数据库进行测试,平均失锁恢复时间为 1.948 s,并且在不同温度下均可以迅速恢复,验证了模型的有效性和鲁棒性。

2022 年, Li 等^[74]结合深度强化学习和长短期记忆网络,提出了一种基于光谱序列学习的 MLFL 状态搜索和切换模型。该反馈控制模型如图 12(a)所示,包括了锁模深度强化学习(MDRL)和锁模状态预测(MSP)网络,激光器的控制单元包括泵浦和偏振控制器。首先将激光器的泵浦功率设置到一个合适的初始值,通过提取光纤激光器的时序频谱特征,MDRL 可以将偏振控制器调节到最佳位置,使激光器从任意初始状态达到稳定的基本锁模状态。经过 MDRL 搜索后,偏振控制器位置被设置为常数。而从输出频谱来看,使用光谱的简单低维特征很难量化锁模状态之间的差异。因此使用 MSP 网络开始学习从激光输出光谱到泵浦功率的映射,利用训练好的 MSP 网络实现锁模状态切换。实验验证了 MDRL、DDPG 和基因算法在随机 100 种初始状态下的搜索步数,使用 MDRL 算法在 690 ms 内即可获得稳定的锁模状态,比传统方法少了一个数量级,如图 12(b)所示。在 16~30 °C 的环境中,算法的最大搜索步数为 47。泵浦功率预测误差小于 2 mW,确保了在多个工作状态上的精确锁定。

2023 年, Sun 等^[75]提出时域光谱信息联合的深度学习方法,对光纤激光器中的孤子状态进行精确搜索,

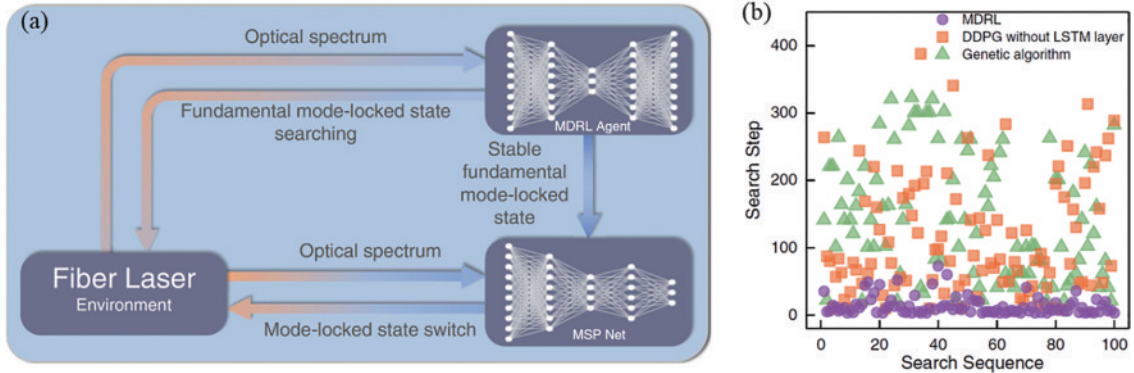


图 12 光谱序列反馈控制方式^[74]。(a)光谱序列反馈控制模型；(b)算法性能对比

Fig. 12 Spectral sequence feedback control method^[74]. (a) Spectral sequence feedback control model; (b) performance comparison of different algorithms

如图 13 所示,以自动偏振控制器的参数作为输入,预测的时域和光谱信息作为输出,训练了一个全连接神经网络(FCNN)来对激光器进行建模,建立偏振与输出状态的非线性映射。在训练完毕后使用反向传播和梯度下降算法进一步优化腔内的偏振设置,并且设置了包含自相关曲线和光谱的损失函数,用来优化和评价搜索过程。其突出特点在于对状态的时域和光谱特征进行联合控制,从白噪声中产生目标脉冲,而避免了之前研究中某些参数的随机性,实验中光谱时域的

MSE 为 3.99×10^{-5} 。此外还提出了一个单层感知器模型来检测锁模脉冲的相位分布,被称为相位感知器算法(PPA),通过迭代相位检索算法数值计算相位分布,具体过程如下:相位检索算法首先根据实验获得的光谱数据引入初始相位来构建光脉冲场,然后比较理论计算的自相关轨迹与实验结果之间的相似性误差,当误差达到目标时,迭代计算过程终止。通过输入实验自相关数据和光谱数据,PPA 能够检索到测量的锁模孤子对应的初始相位分布,与 FROG 的区别在于,

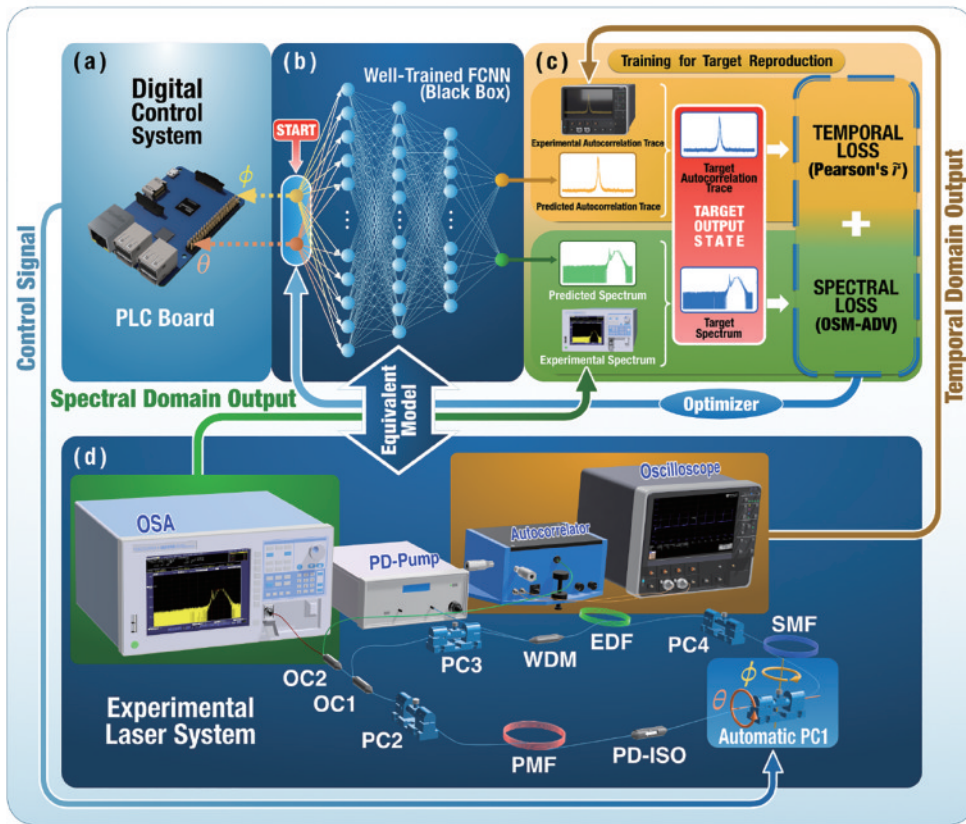


图 13 基于时域光谱信息的深度学习孤子脉冲搜索过程^[75]。(a)数字控制系统；(b) FCNN；(c)实验结果与目标孤子状态之间的匹配优化过程；(d)实验装置

Fig. 13 The soliton searching process of spectrotemporal domain-informed deep learning^[75]. (a) Digital control system; (b) FCNN; (c) matching optimization process between experimental results and target soliton state; (d) experimental setup

PPA 专门用于检索初始光谱相位分布。该研究有助于深入了解锁模脉冲的动态特性,使光通信和非线性光学等应用中脉冲动力学的精确控制成为可能。

3.2 特殊状态调控及激光器反向设计

随着智能控制技术与飞秒激光的结合愈发紧密,通过引入不同的控制量和监测量,设计不同的目标函数,研究人员逐渐实现了对呼吸孤子、孤子分子、双光梳、时空锁模等特殊状态的智能调控。

2021 年, Wu 等^[76]使用进化算法实现了对呼吸孤子状态的自动锁定。呼吸孤子作为锁模激光器中的常见状态之一,表现为光谱宽度与脉宽的周期性振荡。其实验框架如图 14(a)所示,激光器为基于 NPR 锁模的净正色散腔,重复频率为 16.765 MHz,腔内使用

EPC 控制偏振,反馈方面使用示波器采集了 TS-DFT 前后的时域波形,通过电脑处理后,由 FPGA 的 DAC 输出相应电压。图 14(b)为进化算法的优化逻辑,每个个体对应一个激光状态,其基因是四路 EPC 的电压值,通过目标函数计算以及轮盘赌方式[图 14(c)]不断迭代优化,直到满足目标条件。呼吸孤子的振荡频率在目标函数设计中十分关键,具体表现为激光输出射频频谱中的旁带,如图 14(d)所示,实验中可以由示波器采集的波形进行 FFT 获取。该算法可以实现各种呼吸孤子态自动锁定,包括振荡周期和呼吸比可控的单个呼吸孤子和数量可控的呼吸孤子分子复合物。这项工作为探索和优化非线性系统中的复杂动力学开辟了一条新途径。

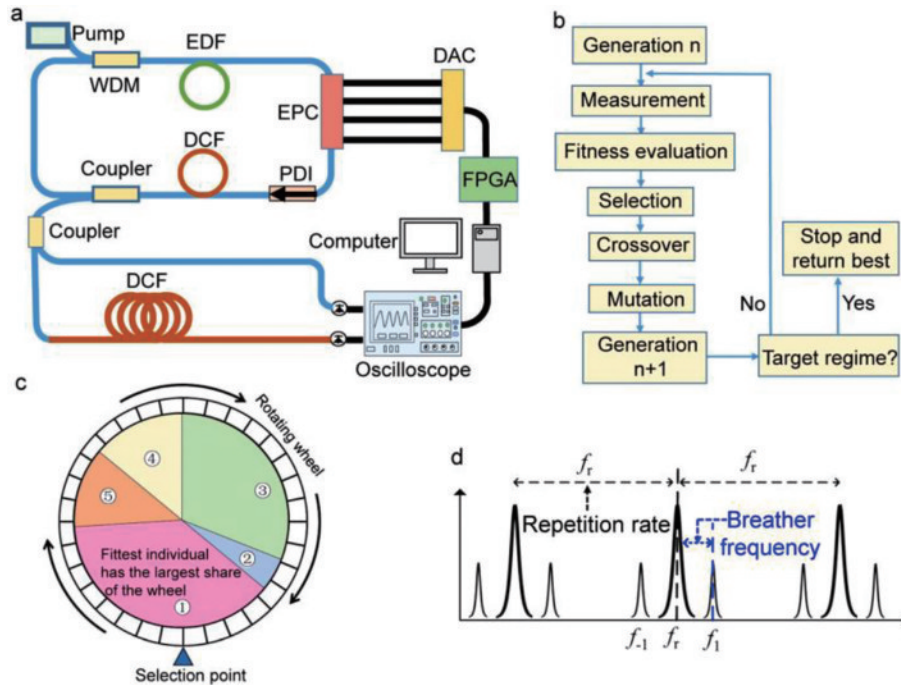


图 14 基于进化算法的呼吸孤子 MLFL 装置^[76]。(a)呼吸孤子 MLFL 装置;(b)进化算法逻辑图;(c)轮盘赌方法示意图;(d)呼吸孤子锁模射频信号示意图

Fig. 14 Breathing soliton MLFL device based on evolutionary algorithm^[76]. (a) Breathing soliton MLFL device; (b) the logic diagram of the evolutionary algorithm; (c) schematic diagram of roulette method; (d) schematic diagram of the breathing soliton RF signal

2020 年, Wei 等^[77]使用 GA 算法对多模光纤 (MMF) 激光器进行波前整形。MMF 激光器在设计 3D 相干光场和揭示潜在的非线性复杂性方面至关重要^[96-100]。这里通过结合波前整形技术和 GA 控制多维光纤激光器,以便可以控制多种激光特性。实验装置如图 15(a)所示, MMF 激光器可以通过时空锁模 (STML) 建立,具有强大的空间和频谱滤波效应,以及高非线性、增益和时空色散^[101]。超短脉冲由 NPR 效应产生,增益介质是双包层的掺 Yb 光纤,并加入了一块多模梯度折射率 (GRIN) 光纤,设计一定的纤芯偏移以激发高阶模式。GRIN 光纤用来降低色度色散,可以在腔内支持数百种横向模式,是 STML 的关键。

腔内主要控制单元为空间光调制器 (SLM),用于波前相位的整形,并添加了半波片和望远镜系统提高 SLM 调制效率, SLM 晶元的排列和相位延迟分布是 GA 算法优化的重点,每个相位分布图对应一个个体,优化的基因为单位像素点的排列。实验结果表明,通过目标函数的合理设计对 SLM 进行调控优化,可以做到对输出功率、模式轮廓、光谱和锁模模式等多个特征的控制,如图 15(b)~(e)所示。这种多维激光器的优化控制技术是获得高性能 3D 激光器的重要步骤,并在探索多维非线性动力学和孤立波方面提供了新的可能性。

2022 年, Liu 等^[78]通过对激光腔内二阶色散和损耗的调节,实现了对孤子分子间隔的控制。孤子分子

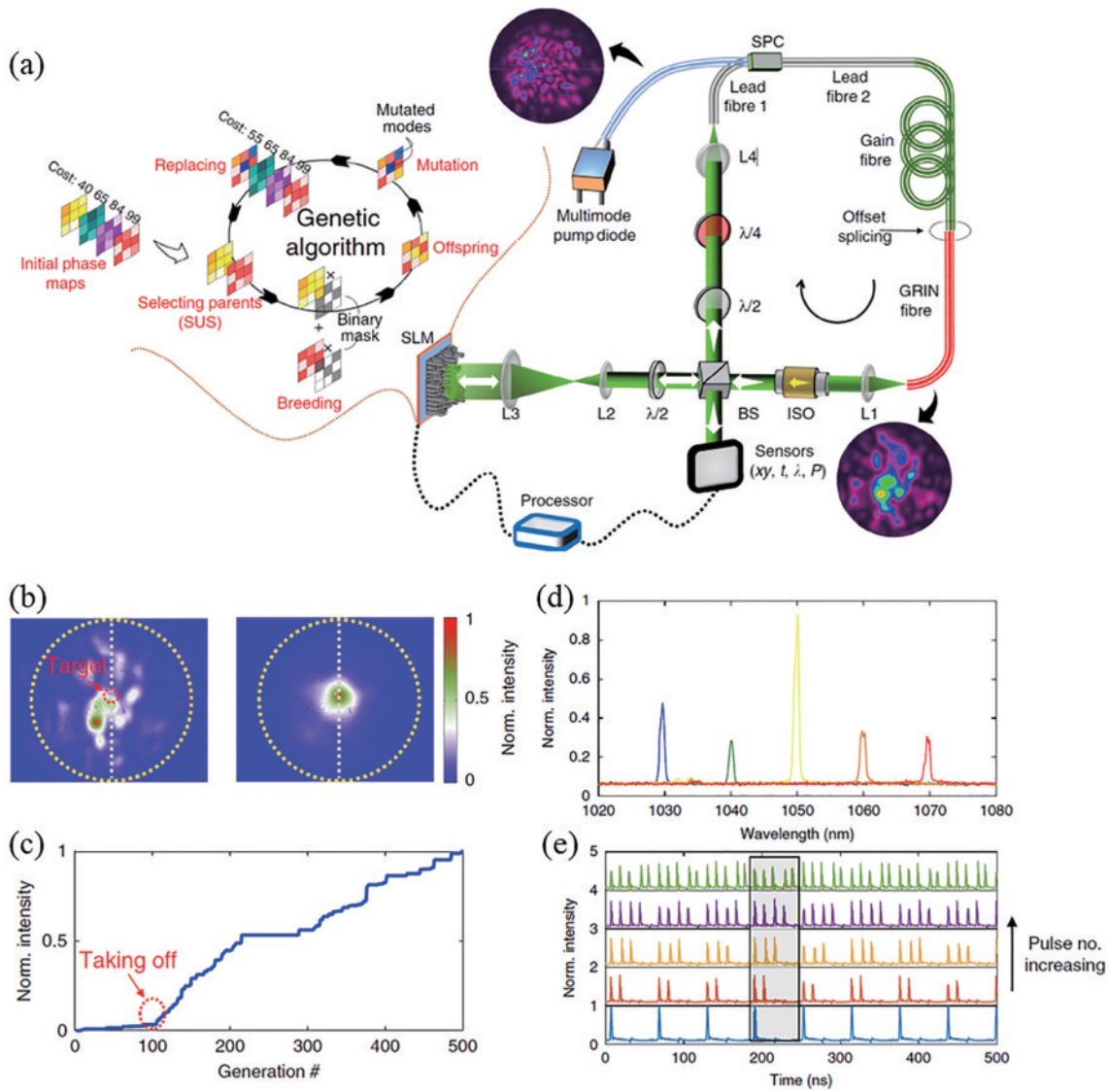


图 15 基于波前整形和遗传算法的时空锁模光纤激光器^[77]。(a)装置图；(b)遗传算法优化模式轮廓；(c)目标区域的强度优化；(d)波长优化调谐；(e)多脉冲产生

Fig. 15 Spatial-temporal mode-locked fiber laser based on wavefront shaping and genetic algorithm^[77]. (a) Device diagram; (b) mode profile after genetic optimization; (c) intensity evolution of the targeted area selected for genetic optimization; (d) wavelength tuning; (e) generation of multiple pulses

是两个孤子脉冲的束缚态形式,常常存在于高能量的 MLFL 中,是非线性光学系统中的基本模式。实验装置如图 16 所示,整体为 NPR 被动锁模腔,除泵浦外主要控制元件为 SLM,用于自定义腔内的色散和损耗,其相应结构包含两个红外光栅和透镜,用于组成 4f 系统,从而在傅里叶变换平面上对脉冲光谱进行整形。由于色散对孤子分子的建立过程有重要影响,因此通过一定的预实验,探索出了孤子分子间隔和 SLM 各晶元参数(损耗、相位)之间的关系,从而做到不同孤子分子的快速切换,实际控制效果为在 3.014~5.478 ps 之间连续可调,分辨率为 0.112 ps。该方案为非线性耗散系统的实验控制提供了新的可调谐自由度,并且在通信、光开关、光存储,以及分子光谱学中具有重要应用价值。其不足之处在于 SLM 的引入导致激光器结

构的复杂性,并且基于环境的预实验设置,在环境扰动之后可能会失去间隔和原有 SLM 参数之间的映射关系,需要重新对齐。

同年,Girardot 等^[79]对 MLFL 中的孤子分子控制展开了新的研究,并提出基于 GA 算法的搜索方式。实验装置如图 17 所示,与上述工作类似,是基于 NPR 的被动锁模,腔内可控元件为 4 个液晶相位控制器以及一个位于傅里叶平面上的 SLM。PC 作为运算核心,接收来自测量设备(示波器、光谱仪、自相关仪)的反馈信息,并且在优化函数中,使用一个参数较少的整体优化函数对 SLM 的所有晶元延迟进行整体控制,避免参数空间过于巨大。实验中实现了孤子分子间隔为 3~8 ps 的自动生成,进一步提升超快激光器的控制能力。略有不足之处在于,检测设备分离以及 SLM 的结

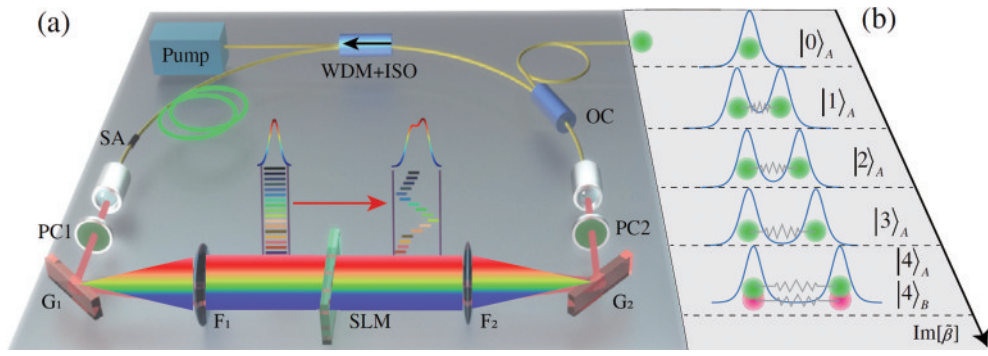


图 16 孤子分子 NPR 锁模激光器^[78]。(a)装置图；(b)孤子分子间隔和光谱滤波参数 β 的关系

Fig. 16 Soliton molecular MLFL based on NPR^[78]. (a) Device diagram; (b) relationship between the soliton molecular spacing and spectral filtering parameter β

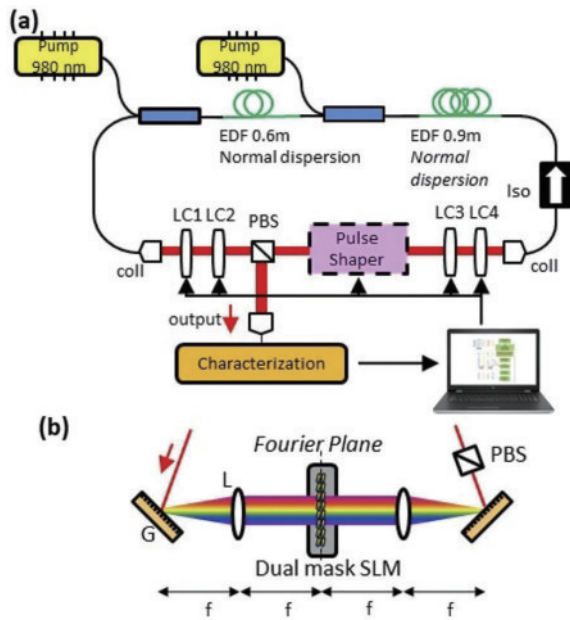


图 17 基于 GA 算法的孤子分子搜索^[79]。(a)激光器装置；(b)基于 SLM 的光谱整形

Fig. 17 Soliton molecular searching based on GA^[79]. (a) The laser setup; (b) spectral shaping based on SLM

构复杂性,并且尽管使用了整体优化函数对参数简化,优化函数的复杂度依然较高。

2023 年, Liu 等^[80]提供了对 MLFL 中孤子分子的相位控制方法。实验装置如图 18(a)所示,基于泵浦电流对激光腔状态控制的有效性^[102],这里通过对泵浦功率的精细调控,在 NPR 锁模腔中实现了 4 种不同相位的孤子分子状态与泵浦电流范围的对应关系,分别为单个孤子(SS)、负相位孤子对(NP)、稳定相位孤子对(SP)、正相位孤子对(PP)。通过对不同状态的孤子分子赋予映射信息,可以实现在切换泵浦电流时连续出现不同状态,进而形成二进制/四进制编码的效果,在光通信、光存储领域具有很高的研究价值。图 18(b)中,通过使用这 4 种不同状态对字符“fiber”进行四进制编码,每个周期在消除 100 μ s 滞后过程后,展示了编码状态的相位信息,演示了利用孤子分子不同相位信息的

编码能力。然而,该方案中泵浦与孤子分子相位的对应关系是基于稳定环境下的,并没有反馈环节,随着环境变化存在关联性下降的风险。

针对 MLFL 中的双波长光频梳状态,本课题组^[81]提出了基于单个谐振腔的双光梳实时智能控制方案,如图 19(a)所示,基于 NPR 锁模腔,利用一段合适长度的 PMF 引入 Lyot 滤波效应,以实现双波长双光梳。腔内加入了两个 EPC 形成 6 维参数空间,用于算法设计的控制反馈。整体系统基于 FPGA 实现实时控制,不仅锁定速度快,而且在失锁后能迅速恢复。该方案创新性提出了记忆辅助智能搜索算法(MAIS),如图 19(b)所示,GA 算法用于初始化程序的启动和搜索,ARS 算法用于失锁的快速恢复,监测阶段使用双阈值计数法,进一步减小了脉冲计数过程中的误判。该算法提出了记忆机制,内部存有一定数量的记忆参数,每组参数对应一组 EPC 控制电压,该记忆参数为之前成功锁定时的经验控制值,并在 GA 和 ARS 算法的初始值选择中起到了十分关键的作用。图 19(c)中,通过合理设计激光腔参数以及优化算法的创新设计,实现了超快速的锁定,平均时间为 2.48 s,并展示了连续 12 h 的超稳定双光梳状态运行[图 19(d)]。

近期,本课题组^[82]提出了对锁模激光器内的孤子分子进行多维实时控制的方案,整体结构如图 20(a)所示,锁模机理为 NPR 被动锁模,控制元件包括泵浦电流和四路 EPC 电压,在输出腔外的反馈信号进入 PD 前,利用一段色散光纤引入 TS-DFT 技术,从而获取光谱信息。在 FPGA 中对孤子分子的干涉型光谱进行特征提取,包括半峰全宽(FWHM)以及 FFT 后的脉冲宽度和相对强度,通过设定目标参数,使用优化算法进行目标搜索,如图 20(b)~(d)所示,实现了脉冲间隔为 2~58 ps 的大范围搜索,以及 0.05 ps 的高精度判决,并且联合子脉冲的相对强度这一维度,实现了二维特征联合搜索。优化算法分为两个阶段,从初始态到锁模状态的 GA 算法优化阶段以及锁模状态到孤子分子的微调优化阶段,其中,对泵浦电流的微调设计为幅度逐渐增加的拟正弦波形,以加快优化速度。通过

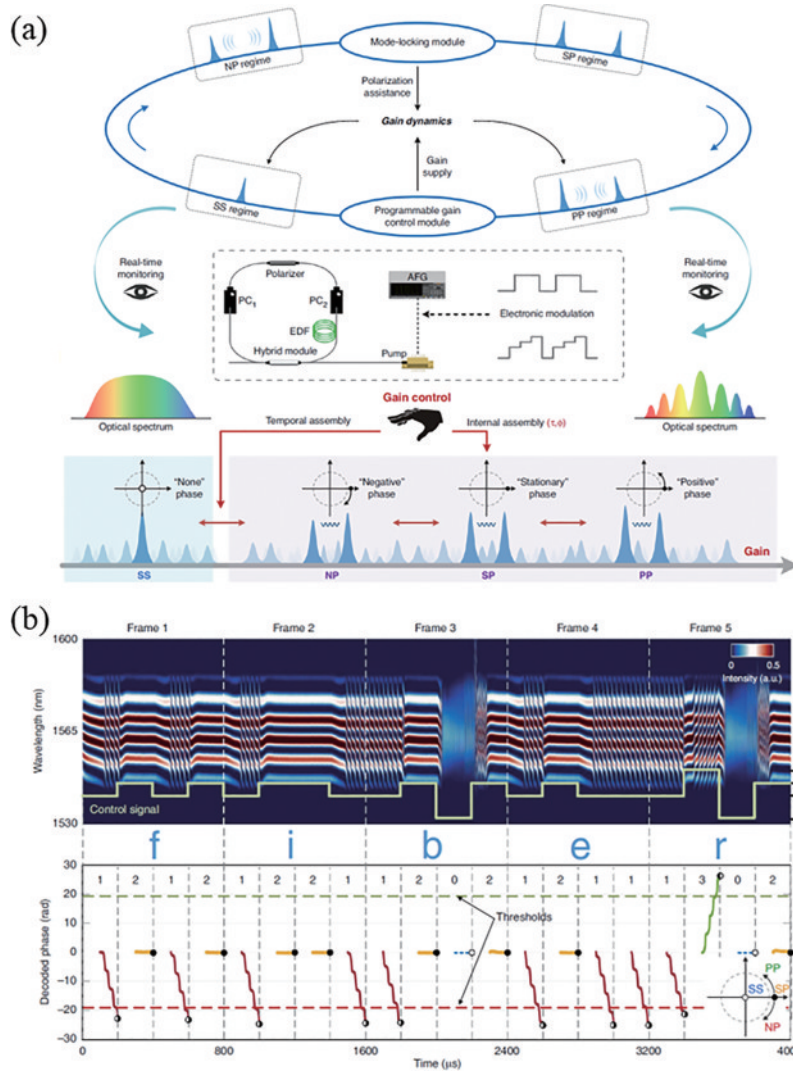


图 18 孤子分子相位控制^[80]。(a)装置图；(b) 相位编码实验演示

Fig. 18 Soliton molecule phase control^[80]. (a) Schematic diagram; (b) the demonstration of phase coding experiment

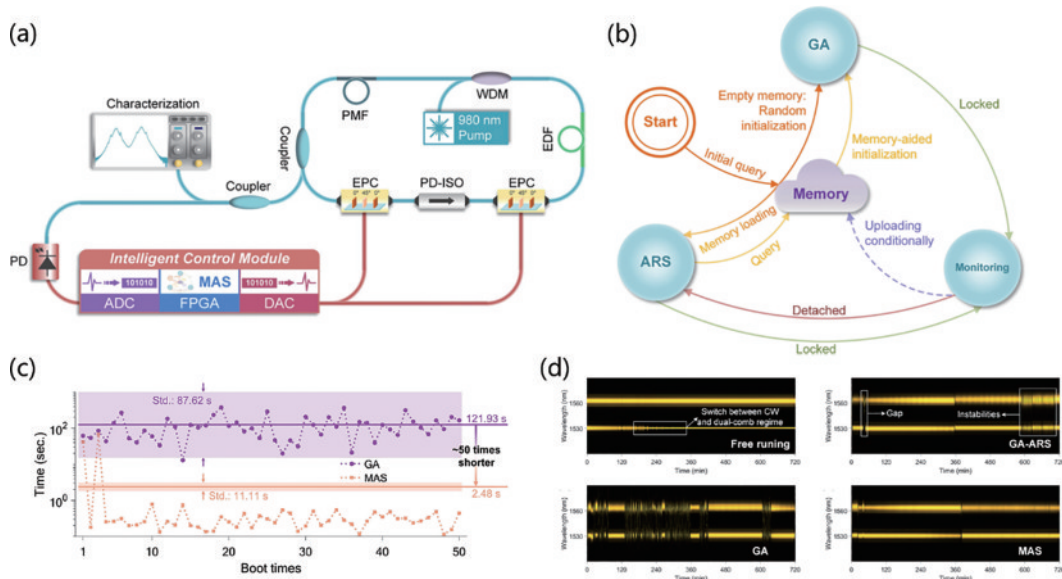


图 19 基于单个谐振腔的双光梳实时智能控制方案^[81]。(a)智能单腔双梳；(b)MAIS原理图；(c)时间性能测试；(d)稳定性测试

Fig. 19 Real-time intelligent control scheme for dual comb based on a single resonant cavity^[81]. (a) Intelligent single-cavity double-comb; (b) the schematic diagram of MAIS; (c) time-consuming performance test; (d) stability test

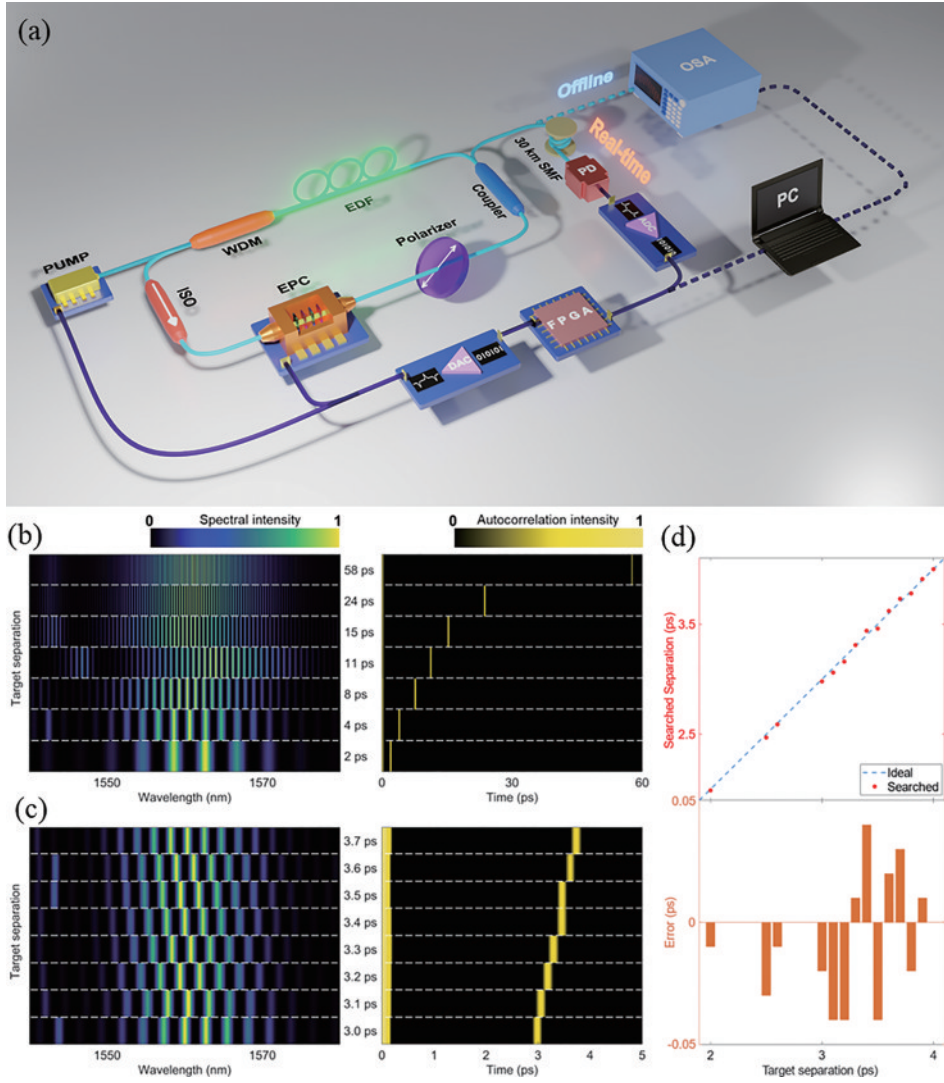


图 20 孤子分子实时多维控制^[82]。(a)孤子分子多维控制装置图；(b)孤子间隔从 2 ps 到 58 ps 的孤子分子光谱(左)及自相关迹(右)；(c)孤子间隔从 3.0 ps 到 3.7 ps 的孤子分子光谱(左)及自相关迹(右),间隔仅为 0.1 ps；(d)目标间隔与搜索间隔(上),目标与搜索值的误差(下)

Fig. 20 Real-time comprehensive control over soliton molecules^[82]. (a) The experimental setup for real-time comprehensive control over soliton molecules; (b) the spectra of soliton molecules (left) with inter-soliton separations ranging from 2 ps to 58 ps, accompanied by the corresponding autocorrelation traces (right); (c) the spectra of soliton molecules (left) with inter-soliton separations ranging from 3.0 ps to 3.7 ps with the interval of merely 0.1 ps, along with the corresponding autocorrelation traces (right); (d) comparison of target separations and searched separations (top), errors between target and searched separations (bottom)

对不同状态的孤子分子进行二进制映射,在实验中成功实现了 30 km 传输模型的搭建和编解码过程,并且基于这项智能可控的孤子分子实验装置,首次观察到了孤子分子光谱周期加倍的动力学现象。这些研究无疑会对激光动力学和光信息领域的研究提供新的灵感。

飞秒激光器数值仿真能够有效指导飞秒激光器的设计与搭建。在给定需要飞秒激光器输出的目标状态后,利用智能优化算法,结合飞秒激光器数值仿真模型可对腔内关键参数进行智能搜索,以保证搭建出的激光器能够输出目标状态,此过程即为飞秒激光器的智能反向设计。

2022年,Feehan等^[83]使用改进的GA和损失函数进行了锁模激光器的反向设计。在以往前人实验中展示过的MLFL中,对其进行数值仿真并发现其对输出脉冲特性的预测具有超高的精度,并且只需少量的先验知识和用户输入,首次展示了锁模光纤激光器的计算机自动化设计方案。该高精度偏振分辨模型的建立基于广义非线性薛定谔方程(GNLSE),并通过GA算法进行优化,优化参数包括泵浦功率、光纤长度、腔内色散管理和偏振控制等。该方案不需要参数空间的先验知识、优化函数梯度或训练过程,通过排除许多常见的简化近似,并考虑到一系列的参数,如增益、体积、光纤器件、光纤色散、模场有效面积,以及所有有损界面

(如光纤熔点)的量子噪声,实现了模拟和实验之间的定量匹配。由 GA 检索到的激光性能特征几乎与实验完全一致,平均误差为 4%,远超过手动搜索参数空间得到的精度。此外,通过压缩输出的脉冲特性,如自相关性、脉冲持续时间、能量、频谱、重复率,以及波长可调谐性等其他特征,都能以非常高的精度重建。该方案对激光器、光纤放大器,以及其他非线性光学器件的研发都具有重要意义。

2023 年, Lucas 等^[84]提出了对微腔反向设计的方案,即通过合理优化谐振腔内的色散构建目标频谱形状,进而对激光器的结构提出要求。通过在控制方程中引入进化算法,能够形成与用户定义的目标频谱结构对应的色散包络,通过使用光子晶体谐振器中选

择双向模式杂化,展示了优化色散轮廓的实现方式。图 21 展示了进化算法的具体步骤,首先通过分步傅里叶变换对 Lugiato-Lefever (LLE) 方程进行积分,计算种群中每个成员的稳态场分布。随后,基于误差函数衡量其优化目标的适应度,对稳态解进行排序,衡量准则是目标频谱的均方根误差或者某些特定谱线的强度。为了确保稳定和低噪声的状态,起伏较大的状态的评价价值较低,算法停止条件为达到最大代数或满足适应度阈值。通过光子晶体谐振器实现色散控制,进而使模式选择和非线性频移的控制成为可能,对未来开发新的波长范围,或产生特定物理学光梳形状提供思路和帮助,为非线性物理提供了新的研究途径。

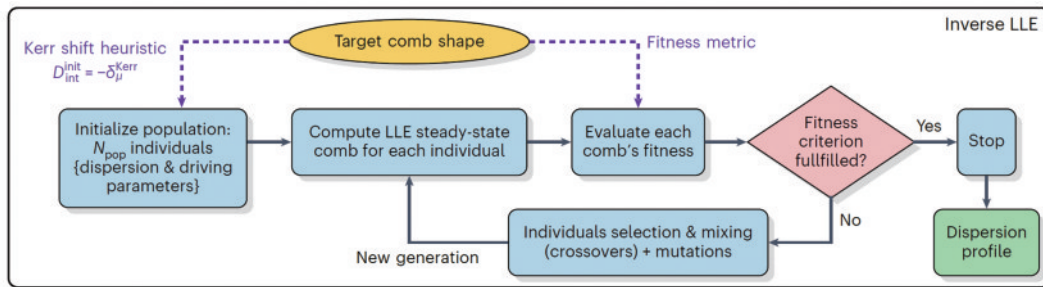


图 21 进化算法的流程图,根据给定的梳状光谱轮廓优化色散和驱动参数^[84]

Fig. 21 The flowchart of the evolutionary algorithm, which optimizes dispersion and driving parameters according to a given comb spectral contour^[84]

4 结束语

智能技术与飞秒激光的有机结合无疑可以助力飞秒激光表征与控制,在飞秒脉冲表征方面,智能技术的引入可以提升测量精度、速度与抗噪声性能,还可以大幅降低测量装置的复杂度。而在飞秒脉冲控制方面,借助智能技术,实现了锁模激光器的快速自启动与稳定运转,还实现了特殊脉冲状态(如呼吸孤子、孤子分子、双光梳、时空锁模等)的智能调控。进一步地,将智能技术与激光器数值仿真模型相结合,实现了激光器反向设计,为激光器搭建提供有效指导。

未来,智能技术势必将持续赋能飞秒激光相关研究。目前几乎所有的飞秒脉冲表征手段都利用了非线性效应,对被测脉冲能量提出了较高的要求。此外,目前的飞秒脉冲表征方法的测量速度有限,难以对 MHz 以上重复频率的飞秒脉冲实现单帧测量。因此,如何将飞秒脉冲测量与智能技术有机结合,实现对低能量高重复频率飞秒脉冲序列的单帧全域测量是未来要攻克的难题。在飞秒脉冲控制上,对脉冲幅度和相位的联合控制需要更快速更精准的调控手段,目前对功率、偏振、色散的控制方式逐渐丰富,将智能控制方法进一步应用于各种状态将处于一个持续发展的态势,尤其是利用智能控制方法来搜索飞秒激光器内小概率发生的极端事件^[103],可以更好地助力飞秒动力学的实验研

究。此外,使用数据驱动方法对飞秒脉冲传输、放大及锁模激光器快速建模的研究开始涌现^[104-108],如何基于 AI 实现快速精准、具有强泛化能力的飞秒激光建模是该领域公认的难题。

综上所述,随着该交叉研究领域研究的不断扩展^[109-110],我们相信会有更多飞秒激光研究中的难题可以借助智能技术解决,智能技术在飞秒激光研究中将变得越来越重要,其研究思路对于其他领域的扩展研究具有重大参考意义。

参 考 文 献

- [1] Redlich M J, Prall B, Canto-Said E, et al. High-pulse-energy multiphoton imaging of neurons and oligodendrocytes in deep murine brain with a fiber laser[J]. Scientific Reports, 2021, 11: 7950.
- [2] Xu C, Wise F W. Recent advances in fibre lasers for nonlinear microscopy[J]. Nature Photonics, 2013, 7(11): 875-882.
- [3] Nemitz N, Ohkubo T, Takamoto M, et al. Frequency ratio of Yb and Sr clocks with 5×10^{-17} uncertainty at 150 seconds averaging time[J]. Nature Photonics, 2016, 10: 258-261.
- [4] Bloom B J, Nicholson T L, Williams J R, et al. An optical lattice clock with accuracy and stability at the 10^{-18} level[J]. Nature, 2014, 506(7486): 71-75.
- [5] Picqué N, Hänsch T W. Frequency comb spectroscopy

- [J]. *Nature Photonics*, 2019, 13(3): 146-157.
- [6] Ghelfi P, Laghezza F, Scotti F, et al. A fully photonics-based coherent radar system[J]. *Nature*, 2014, 507(7492): 341-345.
- [7] Jiang Y S, Karpf S, Jalali B. Time-stretch LiDAR as a spectrally scanned time-of-flight ranging camera[J]. *Nature Photonics*, 2020, 14(1): 14-18.
- [8] Liu X Q, Zhang Y L, Li Q K, et al. Biomimetic sapphire windows enabled by inside-out femtosecond laser deep-scribing[J]. *Photonix*, 2022, 3(1): 1-13.
- [9] Sugioka K, Cheng Y. Ultrafast lasers: reliable tools for advanced materials processing[J]. *Light: Science & Applications*, 2014, 3(4): e149.
- [10] Li C H, Benedick A J, Fendel P, et al. A laser frequency comb that enables radial velocity measurements with a precision of 1 cm s^{-1} [J]. *Nature*, 2008, 452(7187): 610-612.
- [11] Weber H P. Method for pulsewidth measurement of ultrashort light pulses generated by phase & hyphen; Locked lasers using nonlinear optics[J]. *Journal of Applied Physics*, 1967, 38(5): 2231-2234.
- [12] Kane D J, Trebino R. Single-shot measurement of the intensity and phase of an arbitrary ultrashort pulse by using frequency-resolved optical gating[J]. *Optics Letters*, 1993, 18(10): 823-825.
- [13] Iaconis C, Walmsley I A. Self-referencing spectral interferometry for measuring ultrashort optical pulses[J]. *IEEE Journal of Quantum Electronics*, 1999, 35(4): 501-509.
- [14] Ryzkowski P, Närhi M, Billet C, et al. Real-time full-field characterization of transient dissipative soliton dynamics in a mode-locked laser[J]. *Nature Photonics*, 2018, 12(4): 221-227.
- [15] Haus H A. Mode-locking of lasers[J]. *IEEE Journal of Selected Topics in Quantum Electronics*, 2000, 6(6): 1173-1185.
- [16] Kim J, Song Y J. Ultralow-noise mode-locked fiber lasers and frequency combs: principles, status, and applications[J]. *Advances in Optics and Photonics*, 2016, 8(3): 465-540.
- [17] Zhang X, Hu H Y, Li W B, et al. High-repetition-rate ultrashort pulsed fiber ring laser using hybrid mode locking[J]. *Applied Optics*, 2016, 55(28): 7885-7891.
- [18] Fu W, Wright L G, Sidorenko P, et al. Several new directions for ultrafast fiber lasers[J]. *Optics Express*, 2018, 26(8): 9432-9463.
- [19] Meng Y C, Salhi M, Niang A, et al. Mode-locked Er: Yb-doped double-clad fiber laser with 75-nm tuning range [J]. *Optics Letters*, 2015, 40(7): 1153-1156.
- [20] Kang M S, Joly N Y, Russell P J, St. Passive mode-locking of fiber ring laser at the 337th harmonic using gigahertz acoustic core resonances[J]. *Optics Letters*, 2013, 38(4): 561-563.
- [21] Amrani F, Haboucha A, Salhi M, et al. Passively mode-locked erbium-doped double-clad fiber laser operating at the 322nd harmonic[J]. *Optics Letters*, 2009, 34(14): 2120-2122.
- [22] Wang S, Wang Y B, Feng G Y, et al. Harmonically mode-locked Yb: CALGO laser pumped by a single-mode 12 W laser diode[J]. *Optics Express*, 2018, 26(2): 1521-1529.
- [23] Zhang Z X, Mou C B, Yan Z J, et al. Switchable dual-wavelength Q-switched and mode-locked fiber lasers using a large-angle tilted fiber grating[J]. *Optics Express*, 2015, 23(2): 1353-1360.
- [24] Chen Y, Jiang G B, Chen S Q, et al. Mechanically exfoliated black phosphorus as a new saturable absorber for both Q-switching and Mode-locking laser operation [J]. *Optics Express*, 2015, 23(10): 12823-12833.
- [25] Kong L C, Xie G Q, Yuan P, et al. Passive Q-switching and Q-switched mode-locking operations of $2 \mu\text{m}$ Tm: CLNGG laser with MoS_2 saturable absorber mirror[J]. *Photonics Research*, 2015, 3(2): A47-A50.
- [26] DeMaria A J, Stetser D A, Heynau H. Self mode-locking of lasers with saturable absorbers[J]. *Applied Physics Letters*, 1966, 8(7): 174-176.
- [27] Sun S Q, Lin Z X, Li W, et al. Time-stretch probing of ultra-fast soliton dynamics related to Q-switched instabilities in mode-locked fiber laser[J]. *Optics Express*, 2018, 26(16): 20888-20901.
- [28] Lapre C, Billet C, Meng F C, et al. Real-time characterization of spectral instabilities in a mode-locked fibre laser exhibiting soliton-similariton dynamics[J]. *Scientific Reports*, 2019, 9: 13950.
- [29] 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.
- [30] Liu X M, Yao X K, Cui Y D. Real-time observation of the buildup of soliton molecules[J]. *Physical Review Letters*, 2018, 121(2): 023905.
- [31] 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.
- [32] Herink G, Jalali B, Ropers C, et al. Resolving the buildup of femtosecond mode-locking with single-shot spectroscopy at 90 MHz frame rate[J]. *Nature Photonics*, 2016, 10(5): 321-326.
- [33] Imai M, Terasawa Y, Ohtsuka Y. Polarization fluctuation characteristics of a highly birefringent fiber system under forced vibration[J]. *Journal of Lightwave Technology*, 1988, 6(5): 720-727.
- [34] Namihira Y, Wakabayashi H. Real-time measurements of polarization fluctuations in an optical fiber submarine cable in a deep-sea trial using electrooptic LiNbO_3 device [J]. *Journal of Lightwave Technology*, 1989, 7(8): 1201-1206.
- [35] Waddy D S, Lu P, Chen L, et al. Fast state of polarization changes in aerial fiber under different climatic conditions[J]. *IEEE Photonics Technology Letters*, 2001, 13(9): 1035-1037.
- [36] Wuttke J, Krummrich P M, Rosch J. Polarization oscillations in aerial fiber caused by wind and power-line current[J]. *IEEE Photonics Technology Letters*, 2003, 15(6): 882-884.

- [37] Willner A E, Nezam S M R M, Yan L, et al. Monitoring and control of polarization-related impairments in optical fiber systems[J]. *Journal of Lightwave Technology*, 2004, 22(1): 106-125.
- [38] Waddy D S, Chen L, Bao X Y. Polarization effects in aerial fibers[J]. *Optical Fiber Technology*, 2005, 11(1): 1-19.
- [39] Woodward S L, Nelson L E, Schneider C R, et al. Long-term observation of PMD and SOP on installed fiber routes[J]. *IEEE Photonics Technology Letters*, 2014, 26(3): 213-216.
- [40] Dudley J M, Genty G, Mussot A, et al. Rogue waves and analogies in optics and oceanography[J]. *Nature Reviews Physics*, 2019, 1(11): 675-689.
- [41] Namiki S, Ippen E P, Haus H A, et al. Energy rate equations for mode-locked lasers[J]. *Journal of the Optical Society of America B*, 1997, 14(8): 2099-2111.
- [42] Bale B G, Kieu K, Kutz J N, et al. Transition dynamics for multi-pulsing in mode-locked lasers[J]. *Optics Express*, 2009, 17(25): 23137-23146.
- [43] Li F, Wai P K A, Kutz J N. Geometrical description of the onset of multi-pulsing in mode-locked laser cavities [J]. *Journal of the Optical Society of America B*, 2010, 27(10): 2068-2077.
- [44] Zahavy T, Dikopoltsev A, Moss D, et al. Deep learning reconstruction of ultrashort pulses[J]. *Optica*, 2018, 5(5): 666-673.
- [45] Kokhanovskiy A, Bednyakova A, Kuprikov E, et al. Machine learning-based pulse characterization in figure-eight mode-locked lasers[J]. *Optics Letters*, 2019, 44(13): 3410-3413.
- [46] Stanfield M, Ott J, Gardner C, et al. Real-time reconstruction of high energy, ultrafast laser pulses using deep learning[J]. *Scientific Reports*, 2022, 12: 5299.
- [47] Fan C X, Pu G Q, Hu W S, et al. Single-shot characterization of femtosecond pulses by a residual network[C]//2022 Asia Communications and Photonics Conference (ACP), November 5-8, 2022, Shenzhen, China. New York: IEEE Press, 2023: 1744-1746.
- [48] 况琪, 申雄, 徐艺林, 等. Dense-1D-U-Net: 用于自参考光谱干涉飞秒脉冲相位测量[J]. *中国激光*, 2022, 49(9): 0904002.
Kuang Q, Shen X, Xu Y L, et al. Dense-1D-U-net: encoder-decoder networks for self-referenced spectral interferometry[J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2022, 49(9): 0904002.
- [49] Chen J B, Wang M, Xia W. Neural-network-assisted femtosecond laser pulse duration measurement using two-photon absorption[J]. *Chinese Optics Letters*, 2020, 18(12): 121901.
- [50] Geffert O, Kolbasova D, Trabattoni A, et al. In situ characterization of few-femtosecond laser pulses by learning from first-principles calculations[J]. *Optics Letters*, 2022, 47(16): 3992-3995.
- [51] Hellwig T, Walbaum T, Groß P, et al. Automated characterization and alignment of passively mode-locked fiber lasers based on nonlinear polarization rotation[J]. *Applied Physics B*, 2010, 101(3): 565-570.
- [52] Shen X L, Li W X, Yan M, et al. Electronic control of nonlinear-polarization-rotation mode locking in Yb-doped fiber lasers[J]. *Optics Letters*, 2012, 37(16): 3426-3428.
- [53] Li S, Xu J, Chen G L, et al. An automatic mode-locked system for passively mode-locked fiber laser[J]. *Proceedings of SPIE*, 2013, 9043: 904313.
- [54] Shen X L, Hao Q, Zeng H P. Self-tuning mode-locked fiber lasers based on prior collection of polarization settings[J]. *IEEE Photonics Technology Letters*, 2017, 29(20): 1719-1722.
- [55] Pu G Q, Yi L L, Zhang L, et al. Programmable and fast-switchable passively harmonic mode-locking fiber laser [C]//Optical Fiber Communication Conference, March 11-15, 2018, San Diego, California. Washington, DC: OSA, 2018: W2A.9.
- [56] Wu H H, Huang P H, Teng Y H, et al. Automatic generation of noise-like or mode-locked pulses in an ytterbium-doped fiber laser by using two-photon-induced current for feedback[J]. *IEEE Photonics Journal*, 2018, 10(6): 1-8.[LinkOut]
- [57] Fu X, Kutz J N. High-energy mode-locked fiber lasers using multiple transmission filters and a genetic algorithm [J]. *Optics Express*, 2013, 21(5): 6526-6537.
- [58] Andral U, Fodil R S, Amrani F, et al. Fiber laser mode locked through an evolutionary algorithm[J]. *Optica*, 2015, 2(4): 275-278.
- [59] 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.
- [60] 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.
- [61] Ryser M, Bacher C, Lätt C, et al. Self-optimizing additive pulse mode-locked fiber laser: wavelength tuning and selective operation in continuous-wave or mode-locked regime[J]. *Proceedings of SPIE*, 2018, 10512: 105121C.
- [62] 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.
- [63] Pu G Q, Yi L L, Zhang L, et al. Genetic algorithm-based fast real-time automatic mode-locked fiber laser[J]. *IEEE Photonics Technology Letters*, 2020, 32(1): 7-10.
- [64] 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.
- [65] Girardot J, Billard F, Coillet A, et al. Autosetting 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.
- [66] Luo C, Pu G Q, Hu W S, et al. High-repetition-rate real-time automatic mode-locked fibre laser enabled by a pre-stretch technique[J]. *IEEE Photonics Technology*

- Letters, 2022, 34(15): 791-794.
- [67] Ma Q Y, Yu H Y, Zhou Q, et al. A mode-locked fiber laser simulation platform for self-tuning algorithm optimization[J]. Proceedings of SPIE, 2022, 12314: 123140Y.
- [68] 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.
- [69] Brunton S L, Fu X, Kutz J N. Extremum-seeking control of a mode-locked laser[J]. IEEE Journal of Quantum Electronics, 2013, 49(10): 852-861.
- [70] Fu X, Brunton S L, Kutz J N. Classification of birefringence in mode-locked fiber lasers using machine learning and sparse representation[J]. Optics Express, 2014, 22(7): 8585-8597.
- [71] Brunton S L, Fu X, Kutz J N. Self-tuning fiber lasers[J]. IEEE Journal of Selected Topics in Quantum Electronics, 2014, 20(5): 464-471.
- [72] Baumeister T, Brunton S L, Kutz J N. Deep learning and model predictive control for self-tuning mode-locked lasers[J]. Journal of the Optical Society of America B, 2018, 35(3): 617-626.
- [73] 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.
- [74] Li Z, Yang S S, Xiao Q, et al. Deep reinforcement with spectrum series learning control for a mode-locked fiber laser[J]. Photonics Research, 2022, 10(6): 1491.
- [75] Sun J X, Liu Z, Shu Y Q, et al. Reproduction of mode-locked pulses by spectrotemporal domain-informed deep learning[J]. Optics Express, 2023, 31(21): 34100-34111.
- [76] 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.
- [77] 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.
- [78] Liu S L, Cui Y D, Karimi E, et al. On-demand harnessing of photonic soliton molecules[J]. Optica, 2022, 9(2): 240-250.
- [79] Girardot J, Coillet A, Nafa M, et al. On-demand generation of soliton molecules through evolutionary algorithm optimization[J]. Optics Letters, 2021, 47(1): 134-137.
- [80] Liu Y S, Huang S Y, Li Z L, et al. Phase-tailored assembly and encoding of dissipative soliton molecules[J]. Light: Science & Applications, 2023, 12: 123.
- [81] 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.
- [82] Yi L L, Luo C, Pu G Q, et al. Real-time comprehensive control over soliton molecules[EB/OL]. (2023-08-29) [2023-11-12]. <https://doi.org/10.21203/rs.3.rs-3258413/v1>.
- [83] Feehan J S, Yoffe S R, Brunetti E, et al. Computer-automated design of mode-locked fiber lasers[J]. Optics Express, 2022, 30(3): 3455-3473.
- [84] Lucas E, Yu S P, Briles T C, et al. Tailoring microcombs with inverse-designed, meta-dispersion microresonators[J]. Nature Photonics, 2023, 17(11): 943-950.
- [85] Krumbügel M A, Ladera C L, DeLong K W, et al. Direct ultrashort-pulse intensity and phase retrieval by frequency-resolved optical gating and a computational neural network[J]. Optics Letters, 1996, 21(2): 143-145.
- [86] Zuo C, Li J J, Sun J S, et al. Transport of intensity equation: a tutorial[J]. Optics and Lasers in Engineering, 2020, 135: 106187.
- [87] Radnatarov D, Khripunov S, Kobtsev S, et al. Automatic electronic-controlled mode locking self-start in fibre lasers with non-linear polarisation evolution[J]. Optics Express, 2013, 21(18): 20626-20631.
- [88] Olivier M, Gagnon M D, Piché M. Automated mode locking in nonlinear polarization rotation fiber lasers by detection of a discontinuous jump in the polarization state [J]. Optics Express, 2015, 23(5): 6738-6746.
- [89] Holland J H. Genetic algorithms[J]. Scientific American, 1992, 267(1): 66-72.
- [90] Bhushan A S, Coppinger F, Jalali B. Time-stretched analogue-to-digital conversion[J]. Electronics Letters, 1998, 34(9): 839-841.
- [91] Mahjoubfar A, Churkin D V, Barland S, et al. Time stretch and its applications[J]. Nature Photonics, 2017, 11(6): 341-351.
- [92] Goodfellow I, Bengio Y, Courville A. Deep learning[J]. Cambridge: The MIT Press, 2016.
- [93] García C E, Prett D M, Morari M. Model predictive control: theory and practice: a survey[J]. Automatica, 1989, 25(3): 335-348.
- [94] Sobon G, Sotor J, Abramski K M. All-polarization maintaining femtosecond Er-doped fiber laser mode-locked by graphene saturable absorber[J]. Laser Physics Letters, 2012, 9(8): 581-586.
- [95] Szczepanek J, Kardaś T M, Radzewicz C, et al. Ultrafast laser mode-locked using nonlinear polarization evolution in polarization maintaining fibers[J]. Optics Letters, 2017, 42(3): 575-578.
- [96] Bozinovic N, Yue Y, Ren Y X, et al. Terabit-scale orbital angular momentum mode division multiplexing in fibers[J]. Science, 2013, 340(6140): 1545-1548.
- [97] Carpenter J, Eggleton B J, Schröder J. Observation of Eisenbud-Wigner-Smith states as principal modes in multimode fibre[J]. Nature Photonics, 2015, 9(11): 751-757.
- [98] Plöschner M, Tyc T, Čižmár T. Seeing through chaos in multimode fibres[J]. Nature Photonics, 2015, 9(8): 529-535.
- [99] Xiong W, Ambichl P, Bromberg Y, et al. Spatiotemporal control of light transmission through a multimode fiber with strong mode coupling[J]. Physical Review Letters, 2016, 117(5): 053901.
- [100] Tzang O, Caravaca-Aguirre A M, Wagner K, et al. Adaptive wavefront shaping for controlling nonlinear

- multimode interactions in optical fibres[J]. *Nature Photonics*, 2018, 12(6): 368-374.
- [101] Wright L G, Christodoulides D N, Wise F W. Spatiotemporal mode-locking in multimode fiber lasers [J]. *Science*, 2017, 358(6359): 94-97.
- [102] Nimmegern L, Beckh C, Kempf H, et al. Soliton molecules in femtosecond fiber lasers: universal binding mechanism and direct electronic control[J]. *Optica*, 2021, 8(10): 1334-1339.
- [103] Wu X Q, Zhang Y, Peng J S, et al. Control of spectral extreme events in ultrafast fiber lasers by a genetic algorithm[J/OL]. *Laser & Photonics Reviews*: 1-11 [2023-11-12]. <https://onlinelibrary.wiley.com/doi/epdf/10.1002/lpor.202200470>.
- [104] Salmela L, Hary M, Mabeed M, et al. Feed-forward neural network as nonlinear dynamics integrator for supercontinuum generation[J]. *Optics Letters*, 2022, 47(4): 802-805.
- [105] 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.
- [106] 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, 17(6): 2200363.
- [107] Yang H, Zhao H C, Niu Z K, et al. Low-complexity full-field ultrafast nonlinear dynamics prediction by a convolutional feature separation modeling method[J]. *Optics Express*, 2022, 30(24): 43691-43705.
- [108] Chu T, Pu G Q, Yang H, et al. AI-enabled fast and accurate modeling for femtosecond chirped-pulse amplification[C]//2022 Asia Communications and Photonics Conference (ACP), November 5-8, 2022, Shenzhen, China. New York: IEEE Press, 2023: 1899-1902.
- [109] 吴修齐, 彭俊松, 张颖, 等. 智能锁模光纤激光器的原理与研究进展[J]. *中国激光*, 2023, 50(11): 1101006.
Wu X Q, Peng J S, Zhang Y, et al. Principles and research advances of intelligent mode-locked fiber lasers [J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2023, 50(11): 1101006.
- [110] 吴函烁, 蒋敏, 周朴. 人工智能赋能激光: 现状、机遇与挑战[J]. *中国激光*, 2023, 50(11): 1101001.
Wu H S, Jiang M, Zhou P. Artificial intelligence-assisted laser science and technology: status, opportunities, and challenges[J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2023, 50(11): 1101001.