

超快光纤激光器锁模方法及脉冲特性分析

郭豪舜 张诚

杭州奥创光子技术有限公司 浙江杭州 310000

【摘要】在精密测量、光纤通信等领域中，超快光纤激光器得到了广泛的应用。随着各行各业的发展，传统的超快激光器已经无法满足多样化的需求，并且其射出的孤子脉冲射频调谐困难，梳齿间距过大，已经逐渐被呼吸子激光器所替代。呼吸子激光器不仅可以解决上述问题，其在超强飞秒脉冲生成和精密光谱测量领域更展现出显著应用潜力。同时，该技术在探究动力学行为及同步现象等基础物理规律方面，具备独特的分析价值。通过研究超快光纤激光器锁模方法以及脉冲特性，能够推动超快光纤激光器在各个领域的广泛应用。

【关键词】超快光纤激光器；锁模方法；脉冲特性

Mode locking method and pulse characteristic analysis of ultrafast fiber laser

Guo Haoshun Zhang Cheng

Hangzhou Aochuang Photon Technology Co., Ltd. Zhejiang Hangzhou 310000

【Abstract】 Ultrafast fiber lasers have been widely used in precision measurement, fiber optic communication and other fields. With the development of various industries, traditional ultrafast lasers are no longer able to meet diverse needs, and the soliton pulses emitted by them are difficult to tune at radio frequency. The comb spacing is too large, and they have gradually been replaced by breather lasers. The breathing sub laser can not only solve the above problems, but also demonstrate significant application potential in the fields of ultra strong femtosecond pulse generation and precision spectral measurement. Meanwhile, this technology has unique analytical value in exploring fundamental physical laws such as dynamic behavior and synchronization phenomena. By studying the mode locking methods and pulse characteristics of ultrafast fiber lasers, we can promote their widespread application in various fields.

【Key words】 ultrafast fiber laser; Locking method; Pulse characteristics

自 20 世纪以来，除了计算机技术，半导体技术等，人类又发明了激光技术并迅速渗透至工业、军事、科研等广泛领域。作为激光领域的关键进展，超短脉冲凭借其极高能量及极短时域特性，已成为当下激光研究的核心方向之一。锁模技术是为了进一步缩短脉宽提高脉冲能量应需而生。该技术能够实现激光器内数万种自由振荡频率的相干锁定，进而产生能量更强的超短脉冲。目前，锁模技术已在光纤激光器体系中得到应用。

一、超快光纤激光器的工作原理

（一）锁模原理

在一台自由运转的激光器中，存在着多个独立振荡且相

位关系不固定的频率模式。目前研究主要集中在单横模激光器的纵模锁定技术上，虽然已实现多横模激光器的纵模锁定，但尚未得到广泛应用。激光器的纵模特性受腔长影响，会因温度波动、机械噪声等因素产生随机变化。不同激光器具有不同的中心波长和带宽特性，例如氦氖激光器与蓝宝石固体激光器就存在明显差异。在没有锁模机制时，受限于增益竞争效应，通常仅能产生连续激光输出。锁模技术的核心在于强制谐振腔内所有纵模相位同步，由此激发出宽光谱辐射。当数万个纵模以相干方式叠加时，时域上便凝聚为超短脉冲，其宽度可压缩至皮秒乃至飞秒级别。此类脉冲具备极高的峰值功率，往往达到兆瓦量级。得益于这些卓越性能，锁模激光器在精密制造与测量、超高分辨成像以及痕量物质探测等前沿领域发挥着关键作用。

（二）锁模方法

激光器锁模技术的产生方法分为主动和被动两种,其中主动锁模需要引入周期性的腔内损耗,通常要借助外部调制器对腔内光进行调制,在此过程中,激光器会在损耗位置输出脉冲,但是由于外部调制器调制带宽是有一定限制的,所以通常这一方法的适用范围也有一定限制。而被动锁模是利用激光腔内无源器件的可饱和吸收特性激光自调制,不会受到外部调制带宽的影响,指与激光器中的脉冲自身能量相关。并且被动锁模的结构更为简洁,其谐振腔损耗调制速率更快,产生的光脉冲非线性特征更显著,脉宽也更窄。实际应用中,需根据具体需求选取主动、被动或混合锁模方案,也可以将二者混合应用。非线性偏振旋转(NPR)是一种被动锁模技术,主要通过偏正和非线性效应实现类饱和吸收功能。在该技术中,脉冲经偏振敏感器件转化为线偏振光,随后通过四分之一波片转变为椭圆偏振光,经过光纤由于两个偏振分量强度不同,受克尔效应影响则会产生不同的非线性相移,最终引起偏振态的转变。非线性放大环形镜是将光放大器拼接成长光纤环路,利用不对称的放大器结构。

二、智能控制在超快光纤激光器锁模中的应用

（一）智能呼吸子锁模激光器实验装置

选择正色散激光器配置的核心考量如下:其一,负色散孤子固有的极窄脉宽可能超出测量设备的分辨能力范围,导致脉冲动态特性的精细捕捉存在困难。其二,负色散孤子伴随的凯利边带会引入与呼吸子行为无关的能量波动噪声,此类额外干扰将加重计算单元的负荷,进而削弱系统整体效能。

激光输出分为两个监测通道:第一通道直接将脉冲信号通过 50GHz 带宽高速探测器输入至 80GHz 采样率示波器,用于实时测量脉冲时空强度演化特性,实现时域动力学表征;第二通道先将脉冲通过 1200ps² 净色散的光纤进行色散傅里叶变换(DFT),再经高速探测器输入示波器,用于实时监测单个脉冲的光谱特性。控制系统采用计算机作为计算核心,配合现场可编程门阵列(FPGA)和 14 位精度数模转换器(DAC)实现精确控制。DAC 输出 0-5V 电压信号驱动 EPC 模块,从而调节激光器偏振状态。EPC 由四个呈 45 度角排列的压电陶瓷构成,每个压电陶瓷独立受控,通过机械

挤压光纤改变其双折射特性,可在庞加莱球上实现任意偏振态调控。与传统手动偏振控制器相比,EPC 具有 0.4ms 的快速响应特性,能够实现激光器内部偏振状态的动态实时调整,这为算法快速锁定目标激光状态提供了重要保障。

（二）呼吸子搜寻的判断标准

本研究采用基于进化算法的智能搜寻方法来实现呼吸子的优化控制。该算法借鉴了自然选择法则。具体实施流程为:将激光器的运行状态视为个体,而施加在电光相位调制器(EPC)上的四个电压参数则构成该个体的基因编码。实验开始时,系统生成随机参数的多个个体构成初始种群。将这些个体的控制信号施加于激光器后,数据采集系统同步记录输出端的响应。计算模块依据预设的评价准则量化分析采集数据,为每个个体赋予表征其性能的适应度分数。完成种群评估后,系统依据适应度分数优选高性能个体。选出的个体通过基因交叉重组与变异操作产生子代种群,从而实现了参数的迭代优化。

三、超快光纤激光器中的智能呼吸耗散孤子

（一）智能锁模技术

近年来随着超快激光器的发展,利用超快激光器产生脉冲成为专业领域的重要研究内容,鉴于激光器内非线性动力学的复杂性,精确实现目标锁模状态需精细调控多个参数,而人工调校易引入偏差且稳定性不足,可将智能控制引入该领域,运用机器学习算法提高参数控制的重复性和稳定性。智能锁模激光器的核心是闭环反馈系统,闭环反馈系统中的采集模块可以记录激光器所输出的数据,获取激光器视频信息,在选择采集模块时应当根据实际要求进行选择。这 1 系统的计算模块可以对数据进行处理分析,并对模块的下一步调整进行优化。所以要选择具有较强计算能力和较快计算速度的装置。系统中的控制模块负责调控激光器的状态,一般会选泵浦控制器,偏振控制器等能够影响激光器状态的设备。由于电子技术的限制,当前计算机模块的处理速度和处理内存往往难以进一步提高,在构建闭环反馈系统时需要根据实验需求来选择更高的计算速度或更大的处理内存。

（二）单脉冲呼吸子的智能产生

实验数据显示,适应度优化曲线清晰地反映了种群最大适应度和平均适应度的演化过程。采用较大初始种群规模的

策略显著提升了收敛速度,仅经过两代演化后,最大适应度即迅速提升并趋于稳定。随后,种群的平均适应度也逐步提高,最终与最大适应度值趋于一致。值得注意的是,在特定进化阶段(第6至第9代),平均适应度呈现波动,归因于基因突变过程中产生的不利变异导致相应电压参数下激光器性能劣化。实验观测发现,处于目标工作模式的激光器展现出如下典型特征:射频频谱在腔重复频率两侧形成对称双边带;激光光谱随脉冲能量周期性涨落而发生相应压缩与展宽;其时域特性亦呈现同步的周期性演变。这些观测结果充分验证了激光器在目标状态下的稳定工作特性。

(三) 单脉冲呼吸子的智能调谐

本研究在激光器内实现了呼吸比参数的智能化调控,借助进化算法成功生成了呼吸比可调的呼吸子。呼吸比表征为单周期内脉冲光谱的最大宽度与最小宽度之比值。实验观测证实,射频频谱中频率边带强度随呼吸比的增大呈现增强趋势,该现象被融入适应度函数的设计,以实现呼吸比的精确控制。在呼吸子特性研究中,振荡周期是一个至关重要的参数,实验数据清晰地展示了呼吸子周期的动态演化过程。在频谱分析方面,由于快速傅里叶变换(FFT)的频谱分辨率受制于采样数据点数与采样频率两大关键参数,系统可识别的呼吸周期范围展现出显著的稳定性,这在实验结果中体现为多个明显的平台区域。尤为值得注意的是,伴随呼吸周期长度的增长,这些平台的宽度呈现逐渐增大的趋势。这一现象源于呼吸周期增大时,相邻周期之间的频率差异相应减小,从而导致系统对较短周期的分辨能力有所降低。

(四) 呼吸子分子及其复合物的智能控制

与光纤激光器中孤子分子的产生机制不同,孤子分子是通过将泵浦功率提升至超越基本锁模阈值而出现,且所含孤子数目与泵浦功率呈正比,呼吸子分子的激发过程则更为复杂。尤其在正色散激光器内,呼吸子因不辐射色散波,使得

多呼吸子复合物的形成更具挑战性。因此,采用进化算法来生成呼吸子分子具有重要的研究价值。本研究通过整合优化程序,将泵浦功率设定在促进激光器多脉冲自启动的区间,并运用呼吸子锁模适应度函数结合脉冲计数技术,有效调控了多种多呼吸子束缚态。实验成功捕获了由双、三及四呼吸子构成的呼吸子分子及其复合物,相应搜寻时间介于2至40分钟之间。根据已有研究,束缚脉冲间强度正比于相位演化函数的斜率,这种准线性相位演化揭示了两个协同演化呼吸子的强度差异相对稳定。通过进化算法还发现了第二类呼吸子分子,其光谱振荡幅度更强,分子内部脉冲间隔缩短至98ps(约为线性相位呼吸子分子的三分之一),同时相对相位动力学展现出显著的振荡特征。此振荡表明邻近呼吸子间持续发生能量转移。实验数据进一步揭示呼吸总能量与相对相位振荡的关联:相位演化函数达到极值点时两呼吸子强度相等,此时总能量达到峰值。当泵浦功率提升至150mW时,实验观测到三个呼吸子间形成的束缚态。利用进化算法成功识别出三种不同类型的三呼吸子结构:2+1型、1+2型和1+1+1型。结果显示,不同复合物中的脉冲间隔存在显著差异,且脉冲间距越近的复合物表现出更强的呼吸现象,这暗示了脉冲间距与呼吸强度之间可能存在关联性。

总结

综上所述,探究超快光纤激光器锁模方法及脉冲特性有利于将这一技术深入应用于各个领域代替传统超快激光器,当前超快光纤激光器在各行业受到了广泛的关注,并且具有良好的发展前景。推进呼吸子激光器的应用能够为各个非线性物理机制的研究提供更加良好的平台,同时也可以完善呼吸子激光器的激光产生机制,对于微纳加工,精密测量等领域的可持续发展具有重要意义。

参考文献

- [1]胡明列,蔡宇.中红外波段超快光纤激光器研究进展[J].中国激光,2020(5).
- [2]张世达,耿乙迦.碲化铋倏逝场锁模器件的超快光纤激光器[J].中国光学,2022(3).
- [3]陆宝乐,陈程林,启蒙,张朝阳,郎嘉靖,白晋涛.被动锁模超短脉冲光纤激光器研究进展(特邀)[J].光子学报,2022(10).

作者简介:郭豪舜,出生年:1990-08,男,汉族,籍贯:陕西西安,职务:工程师,学历:大专,研究方向:工业级超快激光器及其核心器件研发。