

基于 K-means 算法的自动锁模光纤激光器

韩冬冬^{1,2}, 樊泽阳^{1,2}, 任凯利^{1,2}, 郑益朋^{1,2}, 李田甜^{1,2}, 惠战强^{1,2}, 巩稼民^{1,2}

(1. 西安邮电大学 电子工程学院, 陕西 西安 710121;
2. 西安市微波光子与光通信重点实验室, 陕西 西安 710121)

摘要: 研究了一种基于 K-means 算法和非线性偏振旋转谐振技术的自动锁模传统孤子光纤激光器。实验中通过 K-means 算法对电动偏振控制器进行调节, 利用示波器实时采集数据, 并基于脉冲判决算法将脉冲分为基频锁模态和其他状态。当泵浦驱动电流为 230 mA 时, 实现了 1 531 nm、脉宽为 456 fs 的基频传统孤子输出。然后, 通过调节电动偏振控制器遍历激光器输出状态, 并进行脉冲判决分类。最后, 通过 K-means 算法将处于基频锁模态时电动偏振控制器旋转桨的角度按空间坐标系聚类分析。当光纤激光器处于非基频锁模态时, 通过 K-means 算法调节电动偏振控制器, 恢复到基频锁模状态。经过 100 次测试, 从失锁或其他状态调节到基频锁模态点所需平均时间为 0.25 s。该工作为实现高效、便捷的光纤激光器自动锁模提供了新的方案。

关键词: 光纤激光器; 非线性偏振旋转; K-means 算法; 自动锁模

中图分类号: TN242 **文献标志码:** A **DOI:** 10.3788/IRLA20220609

0 引言

超短脉冲激光在光纤通信、精密仪器制造、泵浦探测、光学测量等领域有着重要的应用^[1-4]。被动锁模光纤激光器由于其结构紧凑、效率高、稳定性好以及价格便宜等优点, 是产生超短脉冲激光非常重要的方式。被动锁模技术包含非线性偏振旋转被动锁模 (NPR) 技术、非线性环形镜技术、Mamyshev 技术、半导体可饱和吸收反射镜、单壁碳纳米管、类石墨烯二维材料等^[5-10]。其中, NPR 锁模技术具有损伤阈值高、调制深度大、响应时间短、波长可调等优点, 被人们广泛地应用^[11]。然而, 利用 NPR 技术的锁模光纤激光器, 其工作状态对偏振状态影响敏感, 易受到环境温度和振动的影响^[12]。针对上述影响因素, 目前人们正在寻找一些解决措施。例如, H. Zhao 等人搭建了基于 NPR 技术的全保偏掺镱光纤激光器^[13], 输出了 1 063 nm、重频为 20.87 MHz 的锁模脉冲, 通过使用保偏光纤降低了双折射对激光器的影响, 提高了锁模脉冲的抗干扰能力。X. Wei 等人搭建了一个基于 NPR

技术和 Er³⁺/Yb³⁺共掺磷酸盐光纤的全光纤环形激光器, 并设计了一种光学集成模块, 使环形腔结构更加紧凑, 来进一步缩短腔长, 提高激光器的稳定性^[14]。

目前, 随着计算机硬件的提升, 计算能力大大加强。机器学习算法广泛应用于工程和科学的很多领域, 在分类、模式识别、预测、系统参数优化等方面有着独特的优势及可以开发下一代超快光子技术的潜力^[15]。T. Hellwig 等使用压电式挤压器在激光腔中作为自动偏振控制器件, 通过自动偏振控制器件调节腔内的偏振态, 得到基于 NPR 技术不同偏振状态下的锁模特征分布图^[16], 为自动锁模技术创造了良好的开端。J. Kutz 等将机器学习和自动锁模技术相结合, 并提出“自调谐光纤激光器”的概念^[17]。R. Woodward 等^[18]使用遗传算法优化电动偏振控制器的运动轨迹实现了自动锁模, 由于其使用的适应度函数的复杂性和设备采集较为耗时, 初始锁模时间约为 30 min。2020 年, 蒲国庆等人提出了一种用于 NPR 光纤激光器自动锁模控制的改进的遗传算法, 将算法加载到现

收稿日期: 2022-08-25; 修订日期: 2022-10-21

基金项目: 国家自然科学基金 (61805198, 61875165); 国家自然科学基金重点项目 (61834005);

陕西省自然科学基金 (2022JM-357, 2022JQ-638); 陕西省教育厅项目 (21JK0917)

作者简介: 韩冬冬, 男, 副教授, 硕士生导师, 博士, 主要从事光纤激光器和光纤通信方面的研究。

场可编程门阵列 (FPGA) 中, 缩短了算法对激光器的响应时间, 在 100 次测试中, 激光器调节到基频锁模状态平均消耗的时长为 1.01 s^[19]。

通过在 NPR 结构的被动锁模掺铒光纤激光器中使用运动方式可编程的电动偏振控制器, 可以使激光器自动从非锁模或其他状态调节到基频锁模状态。首先, 通过脉冲判决算法判定当前的脉冲状态, 再经过 K-means 算法将新的旋转桨角度反馈给电动偏振控制器, 以实现基频传统孤子脉冲。基频锁模脉冲的重复频率为 9.847 MHz, 脉冲宽度为 456 fs, 中心波长为 1531 nm。经过实验测试, 从失锁或其他状态调节到基频锁模状态点最快需要 0.11 s, 最慢需要 1.43 s。

1 K-means 算法

K-means 算法是典型的基于距离分割聚类的算法, 易于实现, 对大型数据集分析时聚类效果较好, 而且收敛速度快, 是目前应用最广泛的划分聚类算法之一^[20]。K-means 算法首先需要指定 K 个初始质心, 然后对所有样本进行分类, 逐次更新各聚类中心的值。通过迭代的方法, 最终使类内对象相似性最大, 类间对象相似性最小^[21], 具体流程如图 1 所示。

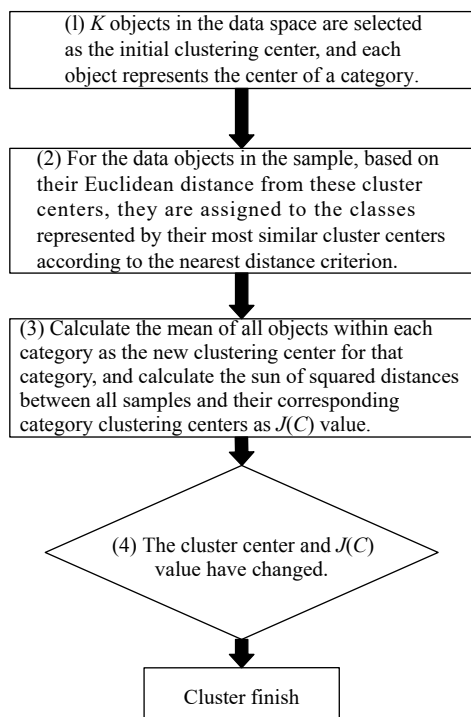


图 1 K-means 聚类算法流程图^[22]

Fig.1 Flow chart of K-means clustering algorithm^[22]

在基于 K-means 算法的自动锁模研究中, 需要提前采集光纤激光器中脉冲输出状态和 EPC 环片对应位置的数据作为训练数据集, 并将这些数据通过脉冲状态判决算法将数据集筛选出基频锁模状态和其他状态。将基频锁模点用 K-means 算法进行聚类分为 K 个区域, 对于 K 值的最优选择采取轮廓系数法来确定, 该方法用于评估聚类的效果, 体现簇间的分离度。轮廓系数 S 的公式如下:

$$S(i) = \frac{b(i) - a(i)}{\max\{a(i), b(i)\}} \quad (1)$$

式中: $a(i)$ 和 $b(i)$ 分别代表样本 i 的簇内不相似度和样本 i 的簇间不相似度, 具体到被动锁模光纤激光器中, 反映了基频锁模点 i 与同簇的其他基频锁模点的平均距离和基频锁模点 i 与最近簇中所有基频锁模点的平均距离。其中, $a(i)$ 和 $b(i)$ 的计算方法如下:

$$a(i) = \frac{1}{n-1} \sum_{j \neq i}^n distance(i, j) \quad (2)$$

$$b(i) = \frac{1}{n-1} \sum_{j \neq i}^n distance(i, j) \quad (3)$$

式中: $b(i)$ 需要遍历其他类簇得到多个值 $\{b1(i), b2(i), b3(i), \dots, bm(i)\}$, 从中选择最小值作为最终的结果; j 代表与样本 i 在同一类内的其他样本点; $distance$ 代表求 i 与 j 的距离。 $S(i)$ 处于 $-1 \sim 1$ 之间, 值越大, 说明同类样本之间距离越近, 不同样本之间距离越远, 聚类效果越好。当系统处于非基频状态时, 通过 K-means 算法直接找到距离当前位置最近的基频锁模区域, 系统直接可以反馈一个锁模区域内的点, EPC 可以直接到达该锁模区域。K-means 算法相比于其他算法可以更快速、准确地找到锁模区域, 使光纤激光器从失锁状态到达锁模状态。

2 实验装置

为了验证 K-means 算法的有效性和鲁棒性, 搭建一个被动锁模光纤激光器, 如图 2 所示。光纤环形腔由 980 nm 半导体激光器作为泵浦源, 一个 980/1550 nm 波分复用器 (WDM)、一个偏振相关隔离器 (PS-ISO)、一个耦合器 (OC)、一段掺铒光纤 (EDF)、一个电动偏振控制器 (EPC) 和一个手动偏振控制器 (MPC), 腔长

约 20.9 m。在环形腔中,通过波分复用器将泵浦光输入到激光器内,使用 5 m 长的掺铒光纤作为增益介质。手动偏振控制器和电动偏振控制器分别在偏振相关隔离器的两侧控制偏振态。偏振相关隔离器保证了激光器单向运转并实现了起偏器的作用。激光器通过 30% 输出耦合器输出到外部,经过高速 InGaAs 光电探测器 (PD) 将光信号转换为电信号,通过示波器测量得出脉冲的数据。计算机通过网线与示波器连接并采集激光器的输出脉冲数据,为 K-means 算法提供反馈,并通过计算机向 EPC 传输新的角度值来改变光纤激光器的偏振状态。实验中,同时使用光谱分析仪和自相关仪实时测量得到锁模脉冲的状态。

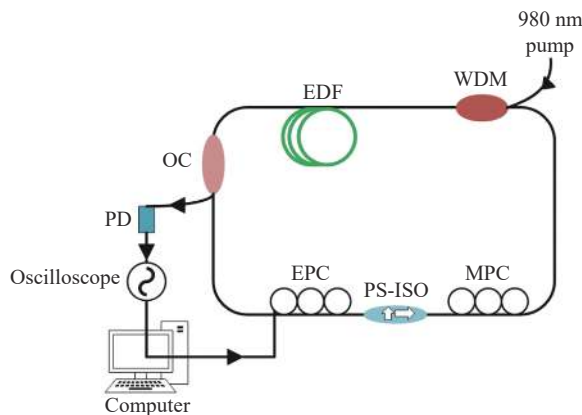


图 2 实验装置图

Fig.2 Experimental setup diagram

EPC 上有三个通过调整角度以改变偏振态的旋转桨, X 旋转桨 ($\lambda/4$ 波片)、Y 旋转桨 ($\lambda/2$ 波片)、Z 旋转桨 ($\lambda/4$ 波片)。每个旋转桨的转动范围是 $0^\circ \sim 170^\circ$ 。EPC 由一条 USB 总线连接计算机,接受计算机的指令调节旋转桨的角度。通过适当调整 EPC 的输入角度能够覆盖庞加莱球上的任意偏振状态,EPC 的特点是可以实现 K-means 算法中调整步长的任意变化。因此,无论光纤激光器中输出偏振态的位置偏离锁模的偏振态多远,都可以直接调整恢复到目标状态。

将通过示波器采集到的脉冲数据输入到计算机,并通过脉冲判决算法确定激光器输出状态。其中,脉冲判决算法的形式如下:

$$\begin{cases} amp_{min} < re\ amp < amp_{max} \\ fre_{min} < re\ fre < fre_{max} \\ 0 \leq re\ fre - ave\ fre \leq fre_{max} - fre_{min} \\ 0 \leq ave\ fre - re\ fre \leq fre_{max} - fre_{min} \end{cases} \quad (4)$$

式中: $re\ amp$ 表示当前脉冲状态下的实时幅值; $re\ fre$ 表示当前状态下的脉冲实时频率; $ave\ fre$ 表示当前的脉冲状态的平均频率; amp_{max} 和 amp_{min} 分别代表误差允许范围内当前脉冲幅值最大值和最小值,分别是当前脉冲平均幅值的 $(1+5\%)$ 倍和 $(1-5\%)$ 倍; fre_{max} 和 fre_{min} 分别代表误差允许范围内的脉冲频率最大值和最小值,分别是基频锁模脉冲平均频率的 $(1+5\%)$ 倍和 $(1-5\%)$ 倍。当输出脉冲满足上述表达式时,被认为此时激光器输出是基频锁模状态。否则,激光器输出将视为其他状态。

3 实验结果与讨论

实验中,调节 MPC 和 EPC 的偏振状态,当泵浦驱动电流约为 230 mA 时,激光器实现基频锁模状态,如图 3 所示。其中,图 3(a) 为基频锁模脉冲的光谱图,可以看出其光谱两边有几对 Kelly 边带存在,3 dB 带宽为 7.3 nm,中心波长为 1531 nm,是典型的传统孤子锁模脉冲光谱。图 3(b) 对应锁模脉冲状态下示波器测量出的脉冲序列,脉冲周期为 101.8 ns,重复频率为 9.847 MHz,与激光器腔长 20.9 m 保持一致,可以看出此时激光器处于基频锁模状态。图 3(c) 为对应的自相关曲线,经过 $sech^2$ 曲线对其进行拟合,可以得到锁模脉冲的宽度为 456 fs,该曲线的半高全宽为 0.96 ps。因此,计算得出对应的时间带宽积为 0.42,接近 $sech^2$ 脉冲时间带宽积极限 0.315。综上,此时激光器处于稳定的基频传统孤子锁模状态。

然后,固定泵浦驱动电流和 MPC,通过遍历 EPC 对光纤激光器的状态进行全扫描。实验中,考虑到光纤激光器中锁模状态的扫描精度以及扫描时间,将旋转桨角度调节步长设置为 5° 。将 EPC 三个旋转桨分别在 $0^\circ \sim 170^\circ$ 之间调节,对光纤激光器的输出状态进行一次遍历扫描,并用脉冲判决算法对数据进行判决分类。图 4 为激光器基频锁模状态与 EPC 三个旋转桨对应角度的三维分布图。如果脉冲满足实时幅值在 amp_{max} 和 amp_{min} 之间、实时频率在 fre_{min} 和 fre_{max}

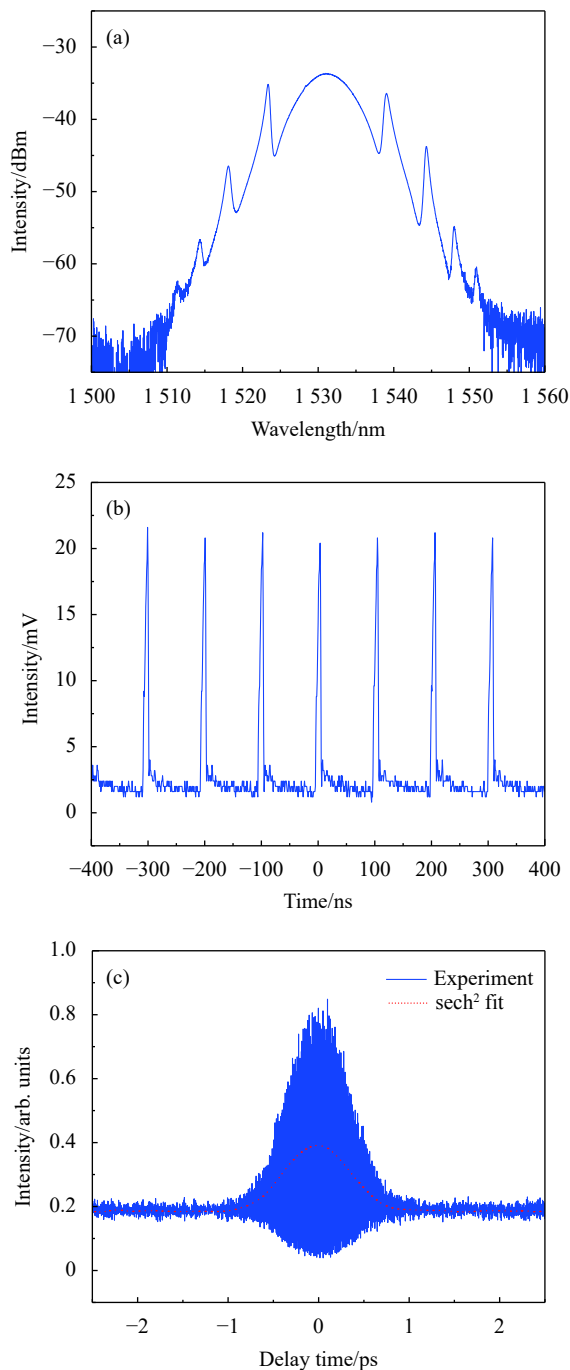


图 3 基频锁模孤子的 (a) 1531 nm 锁模态光谱图; (b) 1531 nm 锁模下的示波器曲线; (c) 1531 nm 锁模下的自相关谱图
Fig.3 (a) 1531 nm mode-locked spectra of the fundamental frequency mode-locked soliton; (b) Oscilloscope curves at 1531 nm mode-locked; (c) Autocorrelation spectra at 1531 nm mode-locked

之间且实时频率和平均频率之差不超过 $fre_{max}-fre_{min}$, 则认为是基频锁模状态。实验中一共找到了 1102 个锁模点, 从图 4 中可以看出, 锁模状态在三维坐标空间呈现团簇状分布, 每一个团簇中点所处的位置都比

较集中。下面将这些锁模点利用 K-means 算法进行聚类分析。

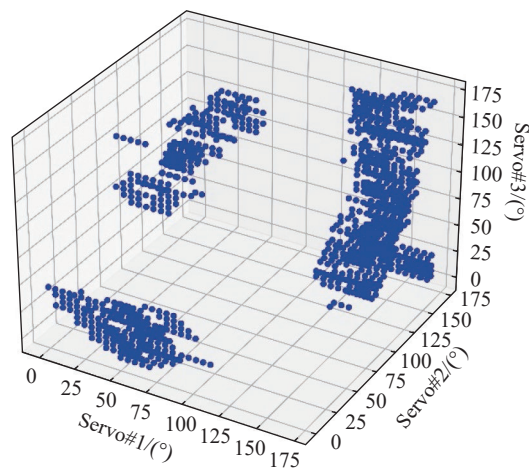


图 4 锁模点分布图
Fig.4 Distribution of clamping points

利用公式 (1) 可以计算出当 K 值取 2~17 时的轮廓系数, 如图 5 所示。可以看出, 随着 K 值的不同, 轮廓系数分布在 0.4120~0.6530 区间, 当 K 为 6 时, 轮廓系数为 0.6530 取得最大值。因此, 当 K 为 6 时分类效果最佳, 也就是将所有锁模点分为六个团簇, 如图 6 所示。从图 6 中可以看出, 当 EPC 的三个旋转桨处于三维空间的某一点时, 可以通过调节剩下的旋转桨使系统处于基频锁模的状态。激光器的输出脉冲通过示波器将读取的数据传输到计算机中, 并由脉冲判决算法判断此时脉冲的状态是否为基频锁模状态, 当判断结果为失锁或其他状态时, 经过 K-means 算法反馈给 EPC 一组旋转桨角度, 改变激光器的偏振态。在整个过程中, 可以使用代码简单地实现对系统状态的监控和自动锁模控制。

为了验证当 EPC 旋转桨处于不同位置时, 算法能否达到使光纤激光器输出的脉冲状态从其他状态到恢复基频锁模的效果, 进行了大量实验。利用代码随机生成一组角度作为每次测试的 EPC 初始角度, 在该角度下光纤激光器的输出脉冲状态从示波器将数据发送到计算机中, 通过脉冲判决算法来判断此时的光纤激光器的输出状态, 并利用算法来调节 EPC 的角度值。在测试中, 首先产生一组 EPC 随机的角度, 经过脉冲判决算法判断当前角度下的脉冲状态, 当脉冲状态是失锁或其他状态时, 使用算法调节 EPC 的

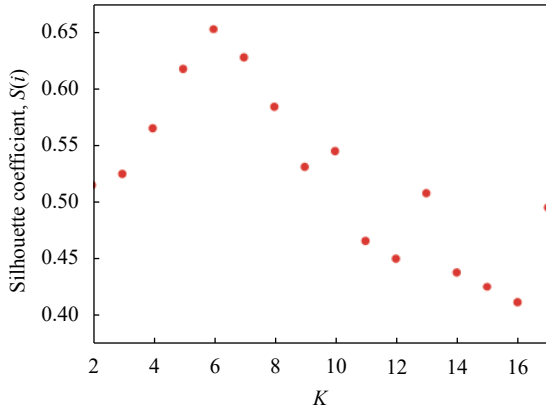


图 5 不同 K 值下的轮廓系数

Fig.5 Contour coefficients at different K values

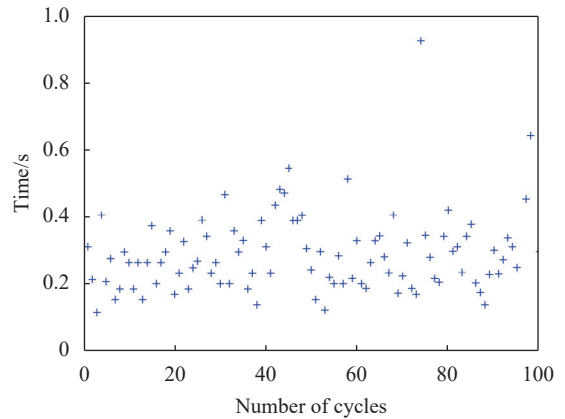


图 7 寻找 100 次基频锁模状态点时长

Fig.7 Time length of finding 100 fundamental frequency mode locking state points

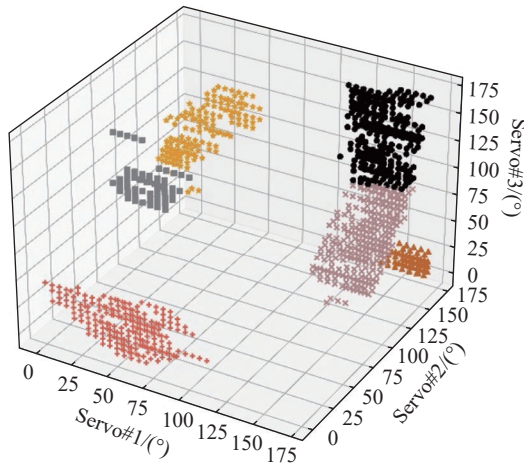


图 6 K-means 聚类分布图

Fig.6 K-means clustering distribution diagram

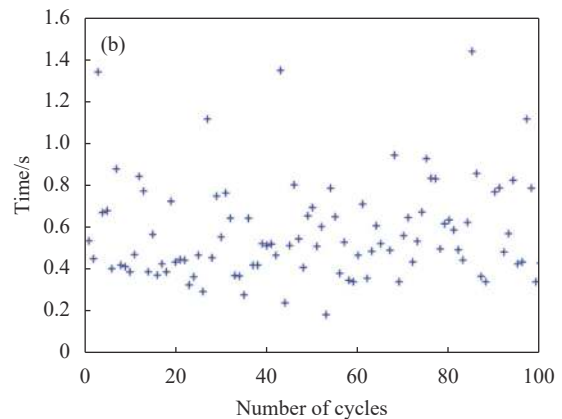
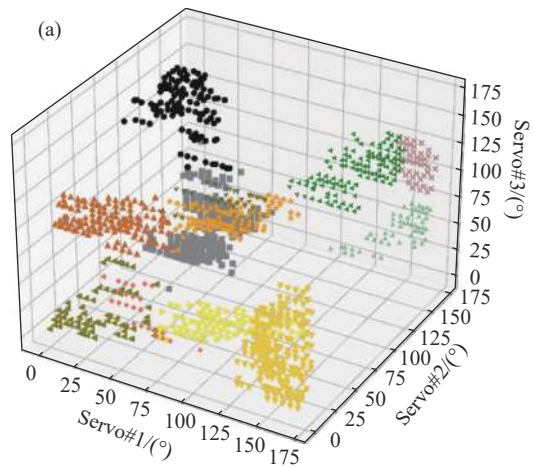


图 8 第二组实验结果。(a) K-means 聚类分布图;(b) 寻找 100 次基频锁模状态点时长

Fig.8 The second group of experimental results. (a) K-means cluster distribution diagram; (b) Find the duration of 100 fundamental frequency mode-locked state points

旋转桨角度,使激光器调节到基频锁模状态。实验中进行了 100 次测试,如图 7 所示,通过 K-means 算法找到的基频锁模点最快需要 0.11 s,最慢需要 0.92 s,平均消耗时间为 0.25 s。K-means 是划分聚类算法,由于提前划分好了聚类模型,为自动锁模光纤激光器快速地从失锁到恢复提供了新的解决方案。

MPC 的状态会影响激光器锁模区域的分布,为了研究算法对不同 MPC 初始位置下的适用性,随机改变 MPC 状态并进行了对比测试,如图 8 所示。基频锁模 K-means 聚类分布如图 8(a) 所示,取 $K=12$,此时轮廓系数为 0.5381,最接近 1。之后验证算法通过 EPC 对锁模状态的恢复效果,100 次测试数据如图 8(b) 所示,寻找基频锁模点的最短时间为 0.18 s,最长时间为 1.43 s,平均时间为 0.57 s。经过两次实验数据对比,文中所提出算法对于不同手动偏振控制器的

初始位置事依然有效,对寻找到锁模点的时间会有一些影响。

K-means 算法相较于之前报道的基于拟人算法^[23]和遗传算法^[19]等算法的自动锁模光纤激光器相比,算法复杂度下降,实现更为简单。在寻找到基频锁模点的平均消耗时间上进行对比,拟人算法进行 10 次测试平均消耗时间为 3.1 s,遗传算法进行 100 次测试平均消耗时间为 1.01 s,K-means 算法经过 100 次测试平均消耗的时间为 0.25 s。K-means 算法在实现的难易程度和寻找到基频锁模的时间上具有一定的优势。此外,实验中使用的脉冲判决算法是通过获得的实时脉冲状态的幅值和频率大小与该激光器自身幅值和基频的可接受波动范围来判定的。该脉冲的判定方式只与激光器输出实时脉冲幅值和频率对比的相对值大小有关。因此,该算法对不同腔长的被动锁模光纤激光器也具有一定的普适性。

4 结 论

文中基于非线性偏振旋转技术搭建了被动锁模光纤激光器,并使用了 K-means 聚类算法调节 EPC,实现了激光器的脉冲从失锁或其他状态到基频锁模状态。当泵浦驱动电流调节至 230 mA 时,获得了中心波长为 1531 nm、3 dB 带宽为 7.3 nm、脉冲宽度为 456 fs、时间带宽积为 0.42 的基频传统锁模孤子。实验中,通过 EPC 遍历采集所有状态下激光器的脉冲输出,并将处于基频锁模状态的点通过 K-means 算法进行聚类分析。当脉冲处于失锁或其他状态时,通过 K-means 算法调节 EPC,使激光器处于基频锁模状态。在 100 次测试中,从失锁或其他状态调节到基频锁模态点平均消耗时长为 0.25 s。在这种高效的自动锁模光纤激光器下,该系统将在科学研究和工程中发挥更重要的作用。

参考文献:

- [1] Pu Guoqing, Zhang Li, Hu Weisheng, et al. Automatic mode-locking fiber lasers: Progress and perspectives [J]. *Science China Information Sciences*, 2020, 63(6): 1-24.
- [2] Su Xin, Yao Ji, Wang Yuning, et al. Ultra-violet picosecond fiber-solid hybrid amplification laser [J]. *Optics and Precision Engineering*, 2020, 28(10): 2122-2128. (in Chinese)
- [3] Sun Yousheng, Duanmu Qingduo, Lin Peng, et al. 1.6 μm band mode-locked fiber laser [J]. *Chinese Optics*, 2021, 14(6): 1387-1394. (in Chinese)
- [4] Xie Jiandong, Yan Liping, Chen Benyong, et al. Automatic offset-frequency locking of external cavity diode laser in wide wavelength range [J]. *Optics and Precision Engineering*, 2021, 29(2): 211-219. (in Chinese)
- [5] Du Juntong, Chang Bing, Li Zhaoyu, et al. Mid-infrared optical frequency combs: Progress and applications (Invited) [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2022, 51(3): 20210969. (in Chinese)
- [6] Lu Shiyu, Hao Qiang, Liu Tingting, et al. All polarization maintaining fiber-based optical comb system with nonlinear loop mirror mode-locking [J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2021, 48(21): 2101002. (in Chinese)
- [7] Zhang Shida, Geng Yijia. Ultrafast fiber laser based on bismuth telluride evanescent field mode-locked device [J]. *Chinese Optics*, 2022, 15(3): 433-442. (in Chinese)
- [8] Yang Simin, Wang Xude, Sun Mengqiu, et al. Wavelength switchable and tunable dissipative soliton mode-locking Yb-doped fiber laser [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2020, 49(10): 20200026. (in Chinese)
- [9] Ma C, Khanolkar A, Zang Y, et al. Ultrabroadband, few-cycle pulses directly from a Mamyshev fiber oscillator [J]. *Photonics Research*, 2020, 8(1): 65-69.
- [10] Hu Minglie, Cai Yu. Research progress on mid-infrared ultrafast fiber laser [J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2020, 47(5): 0500009. (in Chinese)
- [11] Ahmad H, Azmy N F, Norisham N F, et al. Thulium-doped fluoride mode-locked fiber laser based on nonlinear polarization rotation [J]. *Optical and Quantum Electronics*, 2022, 54(2): 1-11.
- [12] Xiao Lin, Wang Tianshu, Ma Wanzhuo, et al. Switching and coexistence of stretched pulse and dissipative soliton in a hybrid mode-locked fiber laser [J]. *Optics Communications*, 2022, 522(9): 128649.
- [13] Zhao Heng, Ma Gaiming, Li Xiangyue, et al. Buildup dynamics in an all-polarization-maintaining Yb-doped fiber laser mode-locked by nonlinear polarization evolution [J]. *Optics Express*, 2020, 28(17): 24550-24559.
- [14] Wei Xiaoming, Xu Shanhuai, Huang Huichang, et al. Compact all-fiber ring femtosecond laser with high fundamental repetition rate [J]. *Optics Express*, 2012, 20(22): 24607-24613.
- [15] Genty G, Salmela L, Dudley J M, et al. Machine learning and applications in ultrafast photonics [J]. *Nature Photonics*, 2021, 15(2): 91-101.
- [16] 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.
- [17] Brunton S L, Fu X, Kutz J N, et al. Self-tuning fiber lasers [J]. *IEEE Journal of Selected Topics in Quantum Electronics*, 2014, 20(5): 464-471.
- [18] Woodward R I, Kelleher E J R. Towards "smart lasers": self-optimization of an ultrafast pulse source using a genetic algorithm [J]. *Scientific Reports*, 2016, 6(1): 37616.
- [19] Pu Guoqing, Yi Lilin, Zhang Li, et al. Genetic algorithm-based fast real-time automatic mode-locked fiber laser [J]. *IEEE Photonics Technology Letters*, 2019, 32(1): 7-10.
- [20] Ahmed M, Seraj R, Islam S M S. The *k-means* algorithm: A comprehensive survey and performance evaluation [J]. *Electronics*, 2020, 9(8): 1295.
- [21] 周爱武, 于亚飞. K-Means聚类算法的研究[J]. 计算机技术与发展, 2011, 21(2): 62-65.
- [22] 王千, 王成, 冯振元, 等. K-means聚类算法研究综述[J]. 电子设计工程, 2012, 20(7): 21-24.
- [23] Pu Guoqing, Yi Lilin, Zhang Li, et al. Intelligent programmable mode-locked fiber laser with a human-like algorithm [J]. *Optica*, 2019, 6(3): 362-369.

Automatic mode-locked fiber laser based on K-means algorithm

Han Dongdong^{1,2}, Fan Zeyang^{1,2}, Ren Kaili^{1,2}, Zheng Yipeng^{1,2}, Li Tiantian^{1,2}, Hui Zhanqiang^{1,2}, Gong Jiamin^{1,2}

(1. School of Electronic Engineering, Xi'an University of Posts and Telecommunications, Xi'an 710121, China;

2. Xi'an Key Laboratory of Microwave Photonics and Optical Communication, Xi'an 710121, China)

Abstract:

Objective Ultrashort pulse laser technology develops rapidly, it has been applied in various fields, such as industrial materials processing, biomedical diagnostics, and terahertz generation. The passive mode-locked fiber lasers have the advantages of high efficiency and low cost, which are usually used to generate ultrashort pulses. The passive mode-locking technology includes many kinds of technologies, among which the nonlinear polarization rotation technology has the advantages of high damage threshold, large modulation depth and short response time, etc. However, the mode-locked fiber laser based on the nonlinear polarization rotation technology is sensitive to the polarization state of laser pulses. The K-means algorithm is a classic algorithm based on distance segmentation and clustering. It is terse and has fast convergence speed when analyzing large data sets. This paper realizes a passive mode-locked erbium-doped fiber laser with nonlinear polarization rotation technology and K-means algorithm, which can automatically find the fundamental frequency mode-locked pulse state.

Methods An electric polarization controller with programmable motion is used to adjust the polarization state of the pulse in a passive mode-locked erbium-doped fiber laser. First, all angles of the electric polarization controller are traversed and the output pulse data at different angles are collected simultaneously. The fundamental frequency mode-locked pulse points are obtained through the pulse decision algorithm. Then, the fundamental frequency mode-locked points are clustered and analyzed using K-means algorithm. When the pulse is out of lock or in other states, a set of rotating paddle angles is fed back to the electric polarization controller through the K-means algorithm. At last, the fundamental frequency mode-locked pulse are exported from the laser.

Results and Discussions By properly adjusting the manual polarization controller and the electric polarization controller, a traditional fundamental frequency mode-locked pulse (Fig.3) is obtained, when the pump current is about 230 mA. The central wavelength of the spectrum is 1 531 nm with the pulse duration and fundamental repetition frequency of 0.96 ps and 9.847 MHz, respectively. 1102 mode-locked points are obtained with the pulse

decision algorithm and displayed in the three-dimensional coordinate space (Fig.4). The classification result is optimum when the K value is set as 6 using the Silhouette Coefficient method (Fig.5). Therefore, the mode-locked points are divided into 6 categories using the K-means clustering algorithm (Fig.6). After 100 tests, the fastest, slowest and average time for finding the fundamental frequency mode-locked point is 0.11 s, 0.92 s, and 0.25 s, respectively (Fig.7). A comparative test is conducted by randomly changing manual polarization controller state, in order to test the applicability of the algorithm (Fig.8).

Conclusions The proposed method can quickly find the fundamental frequency mode-locked pulse points in a mode-locked fiber laser based on nonlinear polarization rotation technology and K-means algorithm. The average time required to adjust from other states to the fundamental mode-locked point is 0.25 s in 100 tests. This method can rapidly realize the output of fundamental frequency mode-locked pulse, and provides a new scheme for realizing efficient and convenient automatic mode-locking of fiber laser.

Key words: fiber laser; nonlinear polarization rotation; K-means algorithm; automatic mode-locking

Funding projects: National Natural Science Foundation of China (61805198, 61875165); Key Program of the National Natural Science Foundation of China (61834005); Natural Science Foundation of Shaanxi Province, China (2022JM-357, 2022JQ-638); Scientific Research Program Funded by Shaanxi Provincial Department of Education (21JK0917)