利用遗传算法优化的傅里叶域脉冲整形实现定制化超连续谱产生

Mathilde Hary[1,2],Lauri Salmela[1],Piotr Ryczkowski[1],Francesca Gallazzi[1],John M. Dudley[2],和 Goëry Genty[1,*]

[1]坦佩雷大学光子学实验室，芬兰坦佩雷 FI-33104[2]弗朗什-孔泰大学、FEMTO-ST研究所、法国国家科学研究中心 UMR 6174，法国贝桑松 25000[*]goery.genty@tuni.fi

arXiv:2304.00829v1 [physics.optics] 3 Apr 2023

摘要

我们报道了一种超连续谱的光谱定制方法：将飞秒脉冲注入高非线性光纤，并通过遗传算法控制傅里叶域脉冲整形。实验实现了用户可选的光谱增强，波长范围为1550–2000纳米，既可选择目标中心波长，也可将目标带宽设定在1–5纳米范围内。与未经整形的输入脉冲相比，光谱增强因子在1550–1800纳米范围内通常为 ∼5–20；在更长波长处，该因子进一步增大，在2000纳米附近超过160。我们还展示了遗传算法可同时增强多达四个波长的结果。

超连续谱是一种用途广泛的光源，已推动成像、光谱学和传感等诸多应用取得革命性进展 [1,]。超连续谱产生的动力学过程高度非线性且复杂，尤其是在反常色散区，产生的光谱特征与孤子脉冲的逸出、色散波的产生以及光谱干涉有关 [3]。尽管如今产生带宽极宽的超连续谱已是常规操作，但要获得所需的光谱覆盖范围，并使特定波长带内的强度占比较大，则更具挑战性，通常需要耗时的反复试验以及计算量巨大的模拟。

机器学习在实现光源的“智能”控制方面展现出巨大潜力 [4–6]„ 遗传算法（GA）和神经网络等技术已被用于主动控制光纤激光器脉冲的复杂动力学过程和输出特性 [7–12]、腔外脉冲压缩 [13], ，以及由多脉冲序列引发的平面波导中的受控光谱展宽 [14]。本文将遗传算法应用于高非线性光纤（HLNF）中超连续谱产生的系统优化，特别着重于增强在波长范围 1550-2000 纳米内任意选定的 1 纳米和 5 纳米窄带宽上的光谱强度。

我们的方法基于计算机控制的傅里叶域光谱整形，通过调整注入高非线性光纤的数百飞秒脉冲的相位来实现。具体而言，遗传算法对输入脉冲的光谱相位进行优化，以最大化一个或多个所需输出波长处的光谱强度。对于单个目标波长，我们量化了优化所带来的光谱增强与所需中心波长之间的关系，并表明该技术在较长波长（超过 ∼1850 纳米）下效果最佳，增强因子为 10–160。我们还表明，该算法可以通过同时优化三个和四个波长处的光谱密度，适用于多波长增强。我们还描述了算法的演化特性：对于单波长优化，算法经过 ∼20 代即可快速收敛到所需的目标状态；对于多波长情况，则经过 ∼50代收敛。这些结果进一步展示了

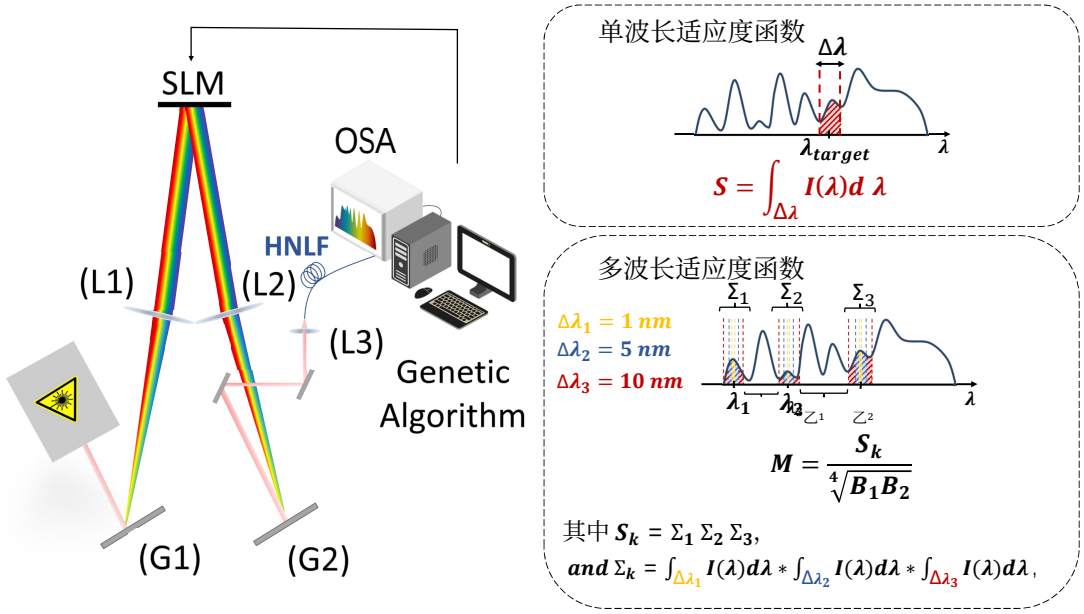


图 1：脉冲整形装置示意图，以及从遗传算法到空间光调制器（SLM）的反馈回路。该装置由相同的光栅（G1、G2，600 线/毫米，$D = 1.46$纳米/毫弧度）和相同的透镜（L1、L2，焦距 f $= 30$ 厘米）组成。脉冲整形器之后收集的光被聚焦到高非线性光纤中。光纤输出耦合至光谱分析仪（OSA），遗传算法通过控制施加到 SLM 上的光谱相位来优化光谱强度特性。图中还标出了用于单波长和多波长优化的适应度函数（详细说明见正文）。

机器学习技术在利用复杂动力学过程实现光子学特定应用方面的强大能力。

SLM 施加的光谱相位由遗传算法控制，以增强高非线性光纤中产生的超连续谱在目标波长带内的光谱强度。请注意，进化算法此前已用于飞秒和纳秒激光脉冲的优化 [15–27]，而我们的方法则专门针对超连续谱特性的优化进行了调整。

该算法对包含 50 个个体的种群进行演化，每个个体由系统的五个参数（基因）定义。SLM 相位函数（施加于光束的色散平面）为：$\phi_{\mathrm{SLM}}(\lambda) = c_1(\lambda - \lambda_0)^2 + c_2(\lambda - \lambda_0)^3 + c_3(\lambda - \lambda_0)^4$, 其中，三个系数（基因）$c_1$，$c_2$，$c_3$ 用于量化直至四阶（四次）的光谱相位贡献，相位图案的中心频率 λ_0 构成第四个基因。此外，还可优化第五个基因，以控制系统的整体通光量，进而控制注入光纤的输入功率。具体做法是在与光栅色散方向正交的方向上向 SLM 施加相位斜坡，并使光束倾斜，例如向上倾斜。角度倾斜会降低光耦合进入光纤的效率 [28]。

从随机选择的基因生成初始种群后，我们为每个个体计算适应度函数 [29]。对于单波长优化，该适应度函数对应于特定目标波长附近、指定带宽范围内的积分光谱强度：$S = \int I(\lambda)\, d\lambda$。随后，使用精英保留策略（5%）、交叉（9%）和变异（8%）等标准方法，选出下一代个体。此过程经过多代迭代，直至收敛且不再出现显著的进一步改进。随后保留“最佳”个体作为算法输出。请注意

为提高执行速度，在优化步骤中，每个个体的适应度函数通过扫描目标波长附近 30 纳米的有限带宽进行计算；只有在收敛后才记录完整光谱。该实现使用 MATLAB 的全局优化工具箱完成，每次波长优化通常需要 25 分钟。

图 2 展示了在 1900 纳米处进行光谱优化的典型结果，以及目标带宽分别为 (a) $\Delta\lambda = 1$ 纳米和 (b) $\Delta\lambda = 5$ 纳米的情况。具体而言，图 2(a) 和 (b) 中，蓝色曲线表示未经过优化（即仅使用未整形脉冲）时高非线性光纤的输出超连续谱，红色和紫色曲线分别表示经过遗传算法优化后的结果。插图以分贝为单位的对数刻度显示了相应的光谱。遗传算法优化结果是在经过 50 代后获得的。比较图 2(a) 和 (b) 可知，尽管优化后的光谱在 1500–1800 纳米范围内有所不同，但在 1900 纳米目标波长附近的强度特性相似（如预期，(b) 中的光谱特征更宽）。

我们针对 1550–2000 纳米范围内的目标波长重复了上述优化过程，波长间隔为 50 纳米（并再次针对 $\Delta\lambda = 1$ 纳米和$\Delta\lambda = 5$ 纳米的带宽进行优化）。为量化此处的优化结果，我们定义光谱强度增强因子 $\eta = S_f/S_i$，其中 S_f 和 S_i 分别表示在目标带宽内积分得到的优化后和未优化光谱强度。图 2(c)绘出了带宽为 $\Delta\lambda = 1$ 纳米（红色）和$\Delta\lambda = 5$ 纳米（蓝色）时，增强因子随目标波长的变化。该算法表现出色：在 1800年之后，增强幅度超过 $\times 20$。两种带宽下的结果呈现出相似的趋势。较长波长处性能提升的原因在于，此处优化的特定光谱特征是一个明显的拉曼频移孤子脉冲，它与更靠近泵浦、调制更明显的光谱特征相互分离。

对于多波长优化，我们需要定义一个更复杂的适应度函数，以优先增强多个不同波长处的光谱特性，

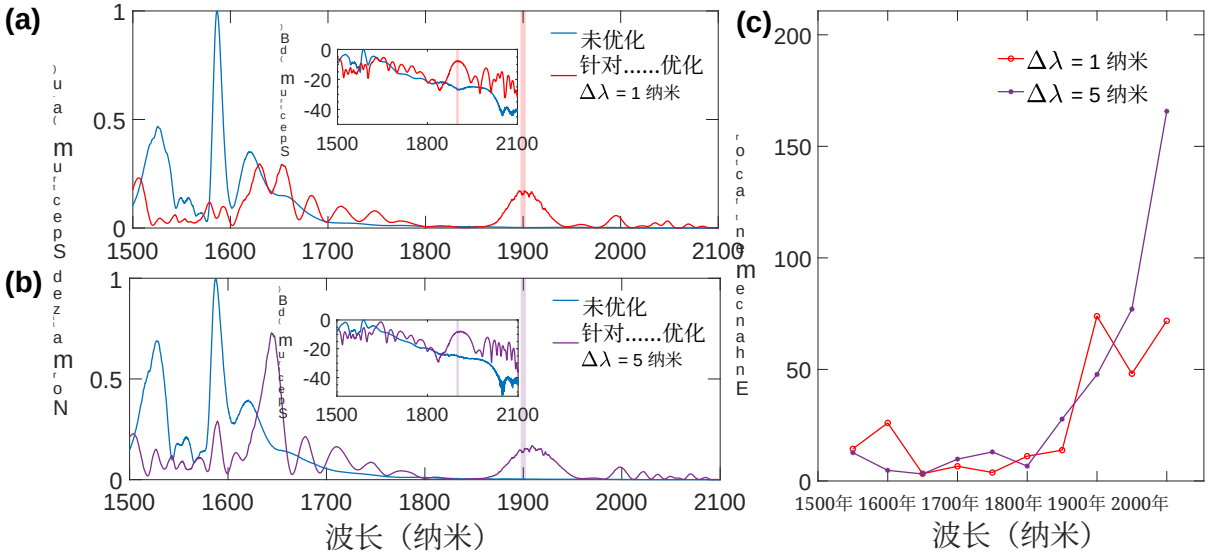


图 2：(a) 和 (b) 中，蓝色曲线表示未经优化的高非线性光纤输出光谱（即由未整形脉冲产生），红色和紫色曲线分别表示通过遗传算法优化后、带宽为$\Delta\lambda = 1$ 纳米和 $\Delta\lambda = 5$ 纳米时的高非线性光纤输出光谱。插图显示了相应的对数刻度光谱。(c) 单波长优化以及带宽为 $\Delta\lambda = 1$纳米（红色）和 $\Delta\lambda = 5$纳米（紫色）时，光谱强度增强因子随波长的变化。光谱均以测量序列中记录到的最大光谱强度为基准进行了归一化。

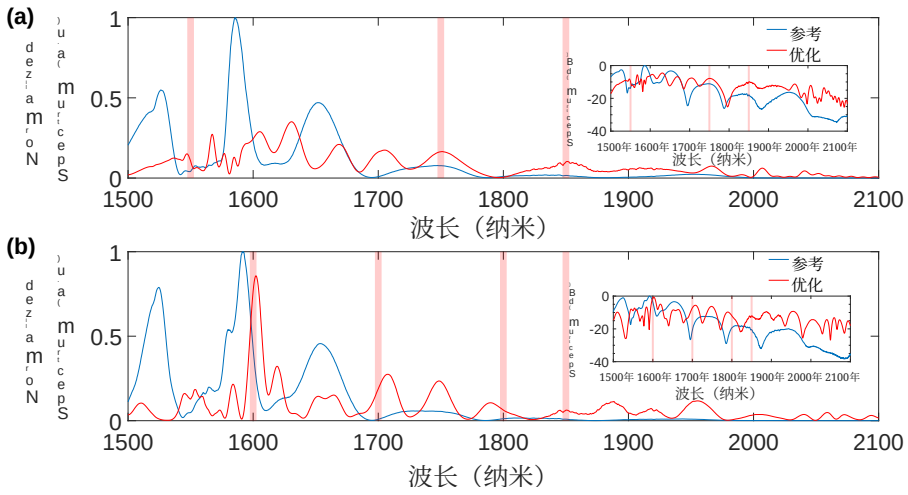


图3：同时优化多个波长：（a）1550纳米、1750纳米和1850纳米处；（b）1600年纳米、1700年纳米、1800年纳米和1850纳米处。两幅图均展示了经遗传算法优化前（蓝色）和优化后（红色）的光谱。请注意，优化前的光谱可能会因泵浦激光功率波动而略有变化。红色矩形标出了优化后的波长带位置。

同时进行优化。遗传算法的固有特性带来了一项挑战：尽管我们优化多个参数，最终却只有一个适应度值。具体而言，我们需要能够明确地促使算法优先生成多个峰（而不是例如生成一个强度极大的峰），同时还需要区分具有凸结构的清晰光谱峰，与例如在目标带宽上面积相同的光谱凹陷。对于寻求在三个波长处进行光谱优化的情况，适应度函数的定义如图1所示，相关定义为：$M = \Sigma_1\Sigma_2\Sigma_3/(B_1B_2)^{1/4}$。在每个目标波长 λ_k 处，分子中的每个 $\Sigma_k = S_k(\Delta\lambda_1)S_k(\Delta\lambda_2)S_k(\Delta\lambda_3)$ 都是对逐渐增大的带宽 $\Delta\lambda_1 = 1$ 纳米、$\Delta\lambda_2 = 5$ 纳米、$\Delta\lambda_3 = 10$ 纳米范围内的积分光谱强度的乘积。通过以这种方式对不同带宽进行积分，我们优先生成凸峰。分母中的每个 B_j 用于量化图1所示目标峰之间波长范围内的能量。要最大化适应度函数，就需要

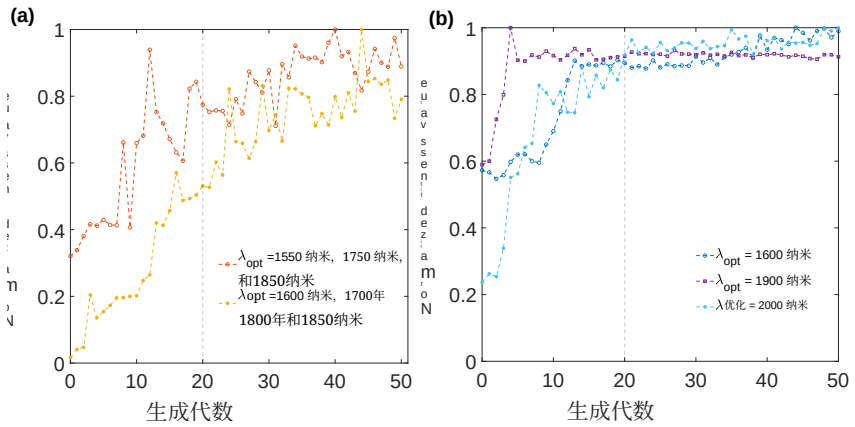


图4：（a）红色和黄色曲线分别表示同时优化三个和四个不同波长时的适应度函数演化。垂直虚线标示了经过20代后的适应度值。（b）展示了针对1600年、1900年和2000年纳米处三个不同波长进行的单波长优化。

最大化所有目标峰中的能量，同时最小化它们之间的能量。经实验证明，分母中的四次方根可获得最佳收敛效果。图3(a)和图3(b)展示了同时针对三个波长（1550 纳米、1750 纳米和1850 纳米）以及四个波长（1600年 纳米、1700年 纳米、1800年 纳米和1850 纳米）进行优化的结果。请注意，这些波长是为便于说明而任意选取的。

图4展示了单波长和多波长遗传算法优化过程的典型结果。具体而言，在50代的过程中，图4(a)绘出了针对三个波长进行优化时种群中50个个体的适应度值（红点），以及针对四个波长进行优化时最佳个体的适应度值（黄点）。此外，为完整起见，图4(b)展示了三种不同情况下（$\lambda = 1600$ nm、 $\lambda = 1900$ nm和 $\lambda = 2000$ nm）单波长优化的适应度值随代数的变化。图中所示的遗传算法演化过程表明，仅优化单个波长时，算法能迅速达到收敛状态。事实上，在这些特定结果中，算法似乎仅经过20代便找到了最优状态，不过，任何具体实验中的演化过程都取决于随机选取的初始基因。尽管如此，进一步测试表明，通常经过10–20代即可进入最优状态。

本文报告的实验表明，超连续谱特征强烈依赖于传输进入高非线性光纤之前施加的输入相位参数。研究表明，使用遗传算法进行自动优化，可以有效提升宽波长范围内指定波长处的光谱强度，且可在不到30分钟内完成。本文的结果在1550–2000纳米范围内得到验证；这一范围受光谱分析仪的技术限制。我们的结果为开发按需生成、针对特定应用定制光谱的光源开辟了新的前景。

资助。 M.H、L.S.、F.G.和G.G.感谢芬兰科学院的资助（资助编号318082、333949；PREIN旗舰项目编号320165）。J.M.D.感谢法国“未来投资”计划的资助，包括ISITE-BFC项目（合同编号ANR-15-IDEX-0003）和EUR项目（ANR-17-EURE-0002）。

参考

[1]J. M. Dudley 和 J. R. Taylor，《光纤中的超连续谱产生》，《光纤中的超连续谱产生》第 9780521514804 卷，第 1–404 页。剑桥大学出版社，2010 年。[2] A. Labruyère、A. Tonello、V. Couderc、G. Huss 和 P. Leproux，“紧凑型超连续谱光源及其生物医学应用”，《光纤技术》，第 18 卷，第 5 期，第 375–378 页，2012 年。[3]J. R. Taylor，《超连续谱产生》，《现代光学百科全书》第 1-5 卷，第 424–434 页。剑桥大学出版社，2018 年。[4] G. Genty、L. Salmela、J. M. Dudley、D. Brunner、A. Kokhanovskiy、S. Kobtsev 和 S. K. Turitsyn，“机器学习及其在超快光子学中的应用”，《自然·光子学》，第 15 卷，第 2 期，第 91–101 页，2021 年。[5] M. Närhi、L. Salmela、J. Toivonen、C. Billet、J. M. Dudley 和 G. Genty，“光纤调制不稳定性中极端事件的机器学习分析”，《自然·通讯》，第 9 卷，第 1 期，2018 年。

[6] L. Salmela、N. Tsipinakis、A. Foi、C. Billet、J. M. Dudley 和 G. Genty，“利用循环神经网络预测光纤光学中的超快非线性动力学”，《自然·机器智能》，第 3 卷，第 4 期，第 344–354 页，2021 年。[7] J. Nathan Kutz、X. Fu 和 S. Brunton，“自调谐光纤激光器：机器学习在光学系统中的应用”，载于《非线性光子学，NP 2014》，2014 年。[8] M. Tianprateep、T. Y. Junji Tada 和 F. Kannari，“利用自适应脉冲整形技术实现微结构光纤中光谱形状可控的超连续谱产生”，《日本应用物理学杂志，第一部分：常规论文、简讯与综述》，第 43 卷，第 12 期，第 8059–8063 页，2004 年。[9] W. Q. Zhang、A. V. Shahraam 和 T. M. Monro，“基于遗传算法的光纤设计方法：实现高相干性、大带宽的超连续谱产生”，Optics Express，第 17 卷，第 21 期，第 19311–19327 页，2009 年。[10] F. R. Arteaga-Sierra、C. Milián、I. Torres-Gómez、M. Torres-Cisneros、G. Moltó 和 A. Ferrando，“利用网格平台上的遗传算法优化基于双孤子的超连续谱光源”，Optics Express，第 22 卷，第 19 期，第 23686–23693 页，2014 年。[11] S. Boscolo 和 C. Finot，“用于光纤非线性脉冲整形的人工神经网络”，《光学与激光技术》，第 131 卷，2020 年。[12] B. S. Vikram、R. Prakash、S. K. Selvaraja 和 V. R. Supradeepa，“通过对电光频率梳进行自适应光谱相位优化，实现增强的非线性光谱展宽和亚皮秒脉冲产生”，Optics Express，第 28 卷，第 8 期，第 11215–11226 页，2020 年。[13] Y. Shen、Y. Wang、H. Chen、K. Luan、M. Tao 和 J. Si，“波长可调的被动锁模中红外 Er3+ 掺杂氟锆酸盐光纤激光器”，Scientific Reports，第 7 卷，第 1 期，2017 年。[14] B. Wetzel、M. Kues、P. Roztocki、C. Reimer、P. . Godin、M. Rowley、B. E. Little、S. T. Chu、E. A. Viktorov、D. J. Moss、A. Pasquazi、M. Peccianti 和 R. Morandotti，“通过片上自适应时域脉冲分束定制超连续谱产生”，《自然·通讯》，第 9 卷，第 1 期，2018 年。[15] C. A. Farfan、J. Epstein 和 D. B. Turner，“利用神经网络算法进行飞秒脉冲压缩”，《光学快报》，第 43 卷，第 20 期，第 5166–5169 页，2018 年。[16] A. Efimov、M. D. Moores、N. M. Beach、J. L. Krause 和 D. H. Reitze，“啁啾脉冲放大器中的脉冲相位自适应控制”，《光学快报》，第 23 卷，第 24 期，第 1915–1917 页，1998 年。[17] J. Tada、T. Kono、A. Suda、H. Mizuno、A. Miyawaki、K. Midorikawa 和 F. Kannari，“用于双光子激发荧光显微术的微结构光纤自适应控制超连续谱脉冲”，《应用光学》，第 46 卷，第 15 期，第 3023–3030 页，2007 年。[18] T. Baumert、T. Brixner、V. Seyfried、M. Strehle 和 G. Gerber，“利用带反馈的进化算法进行飞秒脉冲整形”，《应用物理B：激光与光学》，第 65 卷，第 6 期，第 779–782 页，1997 年。[19] M. Song、S. . Han、J. Park、H. Choi、S. Kim、T. T. Tran、H. D. Kim 和 M. Song，“通过高斯脉冲整形产生平顶超连续谱”，Optics Express，第 29 卷，第 8 期，第 12001–12009 页，2021 年。

[20] K. Kashiwagi、H. Ishizu、Y. Kodama 和 T. Kurokawa，“通过反馈控制优化合成脉冲波形中的背景抑制，以实现平坦展宽超连续谱生成”，*Optics Express*，第 21 卷，第 3 期，第 3001–3009 页，2013 年。[21] U. Andral、R. S. Fodil、F. Amrani、F. Billard、E. Hertz 和 P. Grelu，“通过进化算法实现锁模的光纤激光器”，*Optica*，第 2 卷，第 4 期，第 275–278 页，2015 年。[22] L. Michaeli 和 A. Bahabad，“遗传算法驱动的光子晶体光纤中超连续谱辐射的光谱整形”，*Journal of Optics (United Kingdom)*，第 20 卷，第 5 期，2018 年。[23] F. G. Omenetto、B. P. Luce 和 A. J. Taylor，“用于优化光纤中飞秒传播的遗传算法脉冲整形”，*Journal of the Optical Society of America B:Optical Physics*，第 16 卷，第 11 期，第 2005–2009 页，1999 年。[24] R. I. Woodward 和 E. J. R. Kelleher，“用于自调谐、自脉冲光纤激光器的双折射滤波遗传算法控制”，《光学快报》，第 42 卷，第 15 期，第 2952–2955 页，2017 年。[25] G. Pu、L. Yi、L. Zhang 和 W. Hu，“采用类人算法的智能可编程锁模光纤激光器”，*Optica*，第 6 卷，第 3 期，第 362–369 页，2019 年。[26] C. Lapre、F. Meng、M. Hary、C. Finot、G. Genty 和 J. M. Dudley，“类噪声脉冲光纤激光器宽带运行的遗传算法优化”，***Scientific Reports***，第 13 卷，第 1 期，2023 年。[27] L. Salmela、M. Hary、M. Mabed、A. Foi、J. M. Dudley 和 G. Genty，“作为超连续谱生成非线性动力学积分器的前馈神经网络”，《光学快报》，第 47 卷，第 4 期，第 802–805 页，2022 年。[28] E. Frumker 和 Y. Silberberg，“利用二维纯相位空间光调制器进行相位和振幅脉冲整形”，*Journal of the Optical Society of America B: OpticalPhysics*，第 24 卷，第 12 期，第 2940–2947 页，2007 年。[29] R. L. Haupt 和 S. E. Haupt，实用遗传算法，第 1–253 页。《实用遗传算法》，John Wiley and Sons，2004 年。