

doi:10.13756/j.gtxyj.2024.220087.

光电器件研究与应用

李洪达,郑子昂,马洛嘉,等. 基于深度学习的电光调制型可编程光学频率梳[J]. 光通信研究,2024(2):220087.

Li H D, Zheng Z A, Ma L J, et al. Electro-optic Modulation Programmable Optical Frequency Comb based on Deep Learning [J]. Study on Optical Communications, 2024(2):220087.

基于深度学习的电光调制型可编程光学频率梳

李洪达,郑子昂,马洛嘉,马云杰,李培丽

(南京邮电大学 电子与光学工程学院、柔性电子(未来技术)学院,南京 210023)

摘要:【目的】为了满足各种应用领域对高性能光学频率梳(OFC)的需求,特别是在宽带宽、高平坦度、中心波长和谱线间距等参数可以独立调节方面,文章提出了一种基于 2 次耦合射频(RF)信号来驱动单个双驱动马赫—曾德尔调制器(DDMZM)以产生 OFC 的方法。【方法】通过使用单个乘法器来生成 2 次耦合 RF 信号,不仅增加了所产生 OFC 的梳线数量,而且具有结构简单和成本低廉等优点。此外,为了进一步提高 OFC 的优化效率和性能,文章还采用了基于深度学习的逆向设计和分析方法。【结果】研究结果显示,基于构建级联网络的逆向设计能够在不到 1 s 的时间内找到目标 OFC 的对应参数。这种快速参数确定方法不仅可以实现梳线数量、OFC 功率和梳线间隔的可编程性,还能生成具有 1.769 dB 平坦度的 13 线 OFC。文章所提高效率设计方法为 OFC 的快速制备和应用提供了强大的支持。【结论】文章所提方案在 OFC 的生成技术中具有显著优势,特别是在性能、灵活性和优化效率方面表现卓越。文章所提基于 2 次耦合 RF 信号驱动 DDMZM 的 OFC 生成方法,不仅简化了系统结构,降低了成本,还通过深度学习的逆向设计方法大幅提高了设计效率。这些特点使得文章所提方案能够满足广泛的应用需求,尤其适用于需要快速、高效且灵活调节 OFC 参数的场合。

关键词: 光学频率梳;深度学习;逆向设计;平坦度

中图分类号:O433

文献标志码:A

Electro-optic Modulation Programmable Optical Frequency Comb based on Deep Learning

LI Hongda, ZHENG Ziang, MA Luojia, MA Yunjie, LI Peili

(College of Electronic and Optical Engineering & College of Flexible Electronics (Future Technology),
Nanjing University of Posts and Telecommunications, Nanjing 210023, China)

Abstract: 【Objective】To meet the diverse application demands for high-performance Optical Frequency Comb (OFC), especially in terms of independently adjustable parameters like bandwidth, flatness, central wavelength, and spectral line spacing, a method based on secondary coupled Radio Frequency (RF) signals to drive a single Dual Drive Mach-Zehnder Modulator (DDMZM) for OFC generation is proposed. 【Methods】Utilizing a single multiplier to generate the secondary RF coupled signals not only increases the number of comb lines produced by the OFC but also offers the advantages of a simple structure and low cost. Additionally, to further enhance the optimization efficiency and performance of the OFC, a deep learning-based inverse design and analysis approach is adopted. 【Results】The study shows that the inverse design based on the constructed cascaded network can identify the corresponding parameters for the target OFC in less than one second. This rapid parameter determination method enables programmability of the number of comb lines, OFC power, and line spacing. It can also generate a 13-line OFC with a flatness of 1.769 dB. This efficient design method provides robust support for the rapid preparation and application of OFCs. 【Conclusion】The proposed solution in this study demonstrates significant advantages in OFC generation technology, particularly in performance, flexibility, and optimization efficiency. The method of generating OFC through DDMZM driven by secondary coupled RF signals not only simplifies the system structure and reduces costs but also significantly improves design efficiency through the reverse design approach of deep learning. These characteristics make this solution suitable for a wide range of applications, especially in scenarios requiring quick, efficient, and flexible adjustment of OFC parameters.

Key words: OFC; deep learning; inverse design; flatness

0 引 言

光学频率梳(Optical Frequency Comb, OFC)

在光学频率测量^[1-2]、光传感^[3]和雷达^[4]等领域具有广泛应用。目前 OFC 主要有锁模激光器型 OFC^[5]、非线性光纤型 OFC^[6]和电光调制型 OFC^[7-9]。其中,

收稿日期:2023-01-20; 修回日期:2023-02-10; 纸质出版日期:2024-04-10

基金项目:江苏省研究生科研与实践创新计划资助项目(46006CX21277);江苏省大学生创新创业训练计划资助项目(202110293065Y)

作者简介:李洪达(2001—),男,辽宁凌源人。学士,主要研究方向为光谱学和光学频率梳。

通信作者:李培丽,教授。E-mail:lipi@njupt.edu.cn

© Editorial Office of Study on Optical Communications. This is an open access article under the CC BY-NC-ND license.

电光调制型 OFC 产生技术因其梳线数目和间距灵活可调而研究最为广泛;利用单射频(Radio Frequency, RF)源驱动单个调制器^[10-11]产生 OFC 的方案获得的梳线数目有限,为了增加梳线数目,可以采用级联调制器^[12-13]或多 RF 信号^[14-17]驱动的方案,但其结构复杂且成本较高;利用 4 次耦合 RF 信号驱动双驱动马赫—曾德尔调制器(Dual Drive Mach-Zehnder Modulator, DDMZM)产生 OFC^[18],在一定程度上降低了成本,但需对 4 路 RF 信号进行乘法耦合。

在电光调制型 OFC 中,解析法^[19]无法应用于较复杂的 OFC 产生方案,传统的控制变量法^[20]依赖研究者的经验,效率低。将优化算法^[21-22]与 OFC 相结合,可以提高优化效率,但无法应用于优化参数较多的情况。

本文提出了一种基于 2 次耦合 RF 信号驱动 DDMZM 产生 OFC 的方案,仅用 1 个乘法耦合器(Multiplier Coupler, MUL)产生 2 次 RF 耦合信号,实现多 RF 信号的驱动,可以增加 OFC 的梳线数目,结构简单,成本低廉。利用深度学习强大的建模能力和泛化推广能力^[23-25],对 OFC 的工作参数逆向设计,可提高优化效率,获得性能优良的 OFC。本文所提方案构建了级联神经网络,进行了 OFC 工作参数的逆向设计,研究了 OFC 的梳线数目、功率和梳线间距的可编程性。

1 工作原理

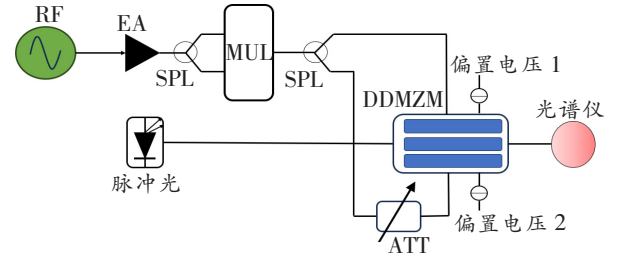
基于 2 次耦合 RF 信号和单个 DDMZM 产生可调谐 OFC 的方案结构如图 1 所示。

RF 信号源输出的正弦信号 $V_{\text{RF}}(t)$ 表示为

$$V_{\text{RF}}(t) = V_{\text{offset}} + V_{\text{RF}} \sin(2\pi f_c t), \quad (1)$$

式中: V_{offset} 、 f_c 和 V_{RF} 分别为 RF 信号源输出的偏压、频率和振幅; t 为时间。

经电放大器(Electric Amplifier, EA)放大后,经电功分器(Splitter, SPL)分为两条支路信号,随后信号通过 MUL 产生 2 次耦合 RF 信号。该 2 次耦



注: ATT 为电衰减器。

图 1 基于 2 次耦合 RF 信号和 DDMZM 生成可调谐 OFC 的示意图

Figure 1 Schematic diagram of generating tunable OFC based on secondary coupled RF signal and DDMZM

合 RF 信号 $V_{\text{multi}}(t)$ 可表示为

$$\begin{aligned} V_{\text{multi}}(t) &= [V_{\text{offset}} + V_{\text{RF}} \sin(2\pi f_c t)]^2 = \\ &= V_{\text{offset}}^2 + 2V_{\text{offset}}V_{\text{RF}} \sin(2\pi f_c t) + \\ &= V_{\text{RF}}^2 \sin^2(2\pi f_c t) = V_{\text{offset}}^2 + \frac{V_{\text{RF}}^2}{2} + \\ &= 2V_{\text{offset}}V_{\text{RF}} \sin(2\pi f_c t) - \frac{1}{2}V_{\text{RF}}^2 \cos(4\pi f_c t). \quad (2) \end{aligned}$$

由式(2)可知, 2 次耦合 RF 信号可以看作是两个频率为 f_c 和 $2f_c$ 的 RF 信号和 1 个直流偏压的叠加,进而实现了多 RF 信号的驱动调制效果。相对于单 RF 信号驱动 DDMZM 产生 OFC,本方案等同于多 RF 信号驱动 DDMZM,因此可以增加 OFC 产生的梳线数目。

该 RF 信号分为两路,一路直接输入 DDMZM 上支臂,另一路经过可调谐 ATT 输入 DDMZM 下支臂。输入到上、下支臂的 RF 信号分别为 $V_1(t)$ 、 $V_2(t)$:

$$V_1(t) = V_{\text{multi}}(t)/2, \quad (3)$$

$$V_2(t) = V_{\text{multi}}(t) \times \exp(-\alpha/20)/2, \quad (4)$$

式中, α 为 ATT 的衰减系数。

将中心频率为 f_0 的连续激光(Continues Wave, CW)信号注入 DDMZM, DDMZM 在该 2 次耦合 RF 信号的驱动下,对 CW 信号进行调制, DDMZM 输出的信号光场 $E_{\text{out}}(t)$ 可表示为

$$\begin{aligned} E_{\text{out}}(t) &= \frac{1}{2}E_{\text{in}}(t) \left\{ \exp \left[\frac{j\pi V_{\text{bias1}} + j\pi V_1(t)}{V_{\pi}} \right] + \exp \left[\frac{j\pi V_{\text{bias2}} + j\pi V_2(t)}{V_{\pi}} \right] \right\} = \\ &= \frac{1}{2}E_{\text{in}}(t) \left\{ \sum_{n=-\infty}^{+\infty} J_n \left(\frac{\pi V_1}{V_{\pi}} \right) \exp \left[j \left(2\pi n f_c + \pi \frac{V_{\text{bias1}}}{V_{\pi}} \right) \right] + \sum_{n=-\infty}^{+\infty} J_n \left(\frac{\pi V_2}{V_{\pi}} \right) \exp \left[j \left(2\pi n f_c + \pi \frac{V_{\text{bias2}}}{V_{\pi}} \right) \right] \right\} = \\ &= \frac{1}{2}E_{\text{in}}(t) \left\{ \exp \left[j \frac{\pi(V_{\text{bias1}} + \frac{1}{2}V_{\text{RF}} + V_{\text{offset}}^2)}{V_{\pi}} \right] \left\{ \sum_{n=-\infty}^{+\infty} J_n(\beta_1) \exp \left[jn \left(4\pi f_c t + \frac{\pi}{2} \right) \right] \right\} \times \right. \end{aligned}$$

$$\left\{ \sum_{m=-\infty}^{+\infty} J_m(\beta_2) \exp \left[j m \left(2\pi f_c t + \frac{3\pi}{2} \right) \right] \right\} + \exp \left[j \frac{\pi(V_{\text{bias}2} + \frac{1}{2}V_{\text{RF}} + V_{\text{offset}}^2)}{V_\pi} \right] \times \left\{ \sum_{n=-\infty}^{+\infty} J_n(\beta_1) \exp \left[j n \left(4\pi f_c t + \frac{\pi}{2} \right) \right] \right\} \left\{ \sum_{m=-\infty}^{+\infty} J_m(\beta_2) \exp \left[j m \left(2\pi f_c t + \frac{3\pi}{2} \right) \right] \right\}, \quad (5)$$

式中： $E_{\text{in}}(t)$ 为 CW 输出的信号； j 为虚数单位； $V_{\text{bias}1}$ 和 $V_{\text{bias}2}$ 分别为上和下支臂偏置电压； V_π 为 DDMZM 半波电压； J_n 和 J_m 分别为 n 和 m 阶的贝塞尔函数展开； β_k 为调制系数； $\beta_1 = \pi V_{\text{RF}} / 2V_\pi$ ， $\beta_2 = \pi V_{\text{RF}} / V_\pi$ 。

由式(5)可知，由于产生的 OFC 可以等效为两个频率分别为 $2f_c$ 和 f_c 的 RF 信号和 1 个偏压共同驱动 DDMZM 调制的叠加，输出的 OFC 频率间隔为 f_c ，因此通过改变 RF 信号的频率可以改变 OFC 的间隔；合理改变 DDMZM 的上下支臂输入信号的大小与上下支臂偏压的关系，可以改善 OFC 的平坦度；改变 ATT 的衰减系数可以使上下臂的输入电压不同，在调制器内产生相位差，发生相干干涉，产生新边带；改变 CW 的功率 P 大小可以改变输出 OFC 的功率。因此，通过合理设置 V_{RF} 、 V_{offset} 、 $V_{\text{bias}1}$ 、 $V_{\text{bias}2}$ 、 α 和 P ，可以改变光在时域上的分布，进而实现对光频域分布的操控，得到梳线间隔可调、梳线数目和功率可编程且平坦度高的 OFC。

为了提高参数设计的工作效率，采用深度学习方法对基于 2 次耦合 RF 信号驱动 DDMZM 的 OFC 产生方案进行逆向设计。首先，构建神经网络，以建立目标 OFC 至系统工作参数的精确映射关系；然后，根据需求设置目标 OFC 的梳线数目、功率和间隔；最后，基于训练好的神经网络，可以由目标 OFC 逆向设计 V_{RF} 、 V_{offset} 、 $V_{\text{bias}1}$ 、 $V_{\text{bias}2}$ 、 α 和 P 。利用此参数产生的 OFC 与目标 OFC 具有高度一致性。

2 级联网络构建

2.1 数据集生成

利用 OptiSystem15.0 软件对提出的基于 2 次耦合 RF 信号驱动 DDMZM 的 OFC 产生方案进行仿真。设置 CW 的中心频率为 193.1 THz，线宽为 10 MHz；RF 源工作频率为 10 GHz；DDMZM 半波电压设为 4 V，消光比为 20 dB。确定系统参数范围： V_{RF} 的范围为 0 ~ 5 V； V_{offset} 的范围为 -0.5 ~ 0.5 V； $V_{\text{bias}1}$ 和 $V_{\text{bias}2}$ 的范围为 -10 ~ 10 V； α 的范围为 0 ~ 10 dB； P 的范围设置为 -10 ~ 10 dBm。系统变量可表示为这 6 个参数的组合，即 $\mathbf{S} = [V_{\text{RF}} \ V_{\text{offset}} \ V_{\text{bias}1} \ V_{\text{bias}2} \ \alpha \ P]$ 。

获取数据集。在相应的参数范围内随机采样，获得了 200 000 组数据。数据集按照 80 : 10 : 10 的比例被分为训练集、验证集和测试集。训练集作为模型拟合的数据样本，用于调节神经网络隐藏层的权重和偏置；验证集用于调整模型的超参数，并对模型的能力进行初步评估；测试集用于评估最终模型的泛化能力。

2.2 单级逆向网络构建

图 2 所示为用于 OFC 逆向设计的单级逆向网络架构图，如图所示，单级逆向网络由 1 个输入层、4 个隐藏层和 1 个输出层构成。输入层有 15 个神经元，表示输出 OFC 的梳线功率值；逆向网络各隐藏层的神经元数目设置为 256；输出层有 6 个神经元，分别对应 6 个系统参数，即 $\mathbf{S} = [V_{\text{RF}} \ V_{\text{offset}} \ V_{\text{bias}1} \ V_{\text{bias}2} \ \alpha \ P]$ 。将目标 OFC 的功率送至输入层，相应的系统参数作为输出量。通过对数据的学习和模型的调优，建立目标 OFC 与系统参数之间的映射关系。

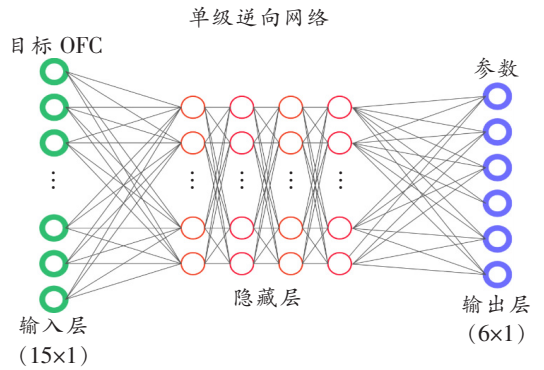


图 2 用于 OFC 逆向设计的单级逆向网络架构图

Figure 2 Single-stage inverse network architecture diagram for OFC inverse design

训练神经网络。训练基于反向传播算法，由信号的正向传播与误差的反向传播两个过程组成，训练损失函数设定为预测系统参数与真实系统参数的均方误差 (Mean Square Error, MSE) M_{SE} ，即 $M_{\text{SE}} =$

$\sqrt{\frac{1}{N-1} \sum_{i=1}^N (y'_i - y_i)^2}$ ，式中： N 为神经网络的输出节点数目； y'_i 和 y_i 分别为节点 i 的预测系统参数和真实系统参数，其训练曲线如图 3 所示。由图可知，开始训练时，训练曲线小幅度下降，迭代第 30 次时

$M_{SE} = 0.82$,之后训练曲线基本保持不变,说明单级逆向网络难以精确拟合目标 OFC 与系统参数之间的对应关系。因为非线性调制造成了光谱至参量的非唯一映射,即对于相同的目标 OFC,可能存在多组完全不同的系统参数,则数据集可能存在输入—输出的非唯一解,进而导致模型难以收敛。

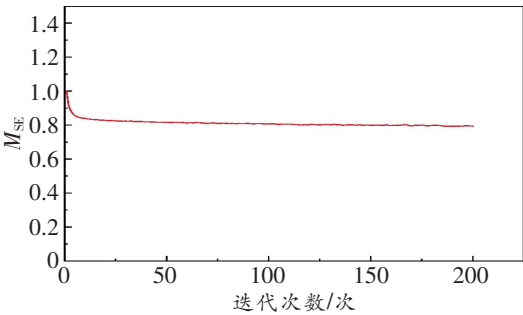


图 3 用于 OFC 逆向设计的单级逆向网络训练曲线

Figure 3 Training curve of a single-stage inverse network for OFC inverse design

2.3 级联网络的构建

采用级联网络进行逆向设计,可以降低光谱多解性对网络的影响^[26]。级联网络的架构如图 4 所示,将一个预训练的正向预测网络级联在逆向网络之后。正向预测网络的输入层有 6 个神经元,分别对应 6 个系统参数;4 层隐藏层的神经元数目设置为 256;输出层有 15 个神经元,表示相应频率下的梳线功率值。训练的正向预测网络可实现系统参数至光谱的映射,将逆向网络的预测参数转换为输出光谱。

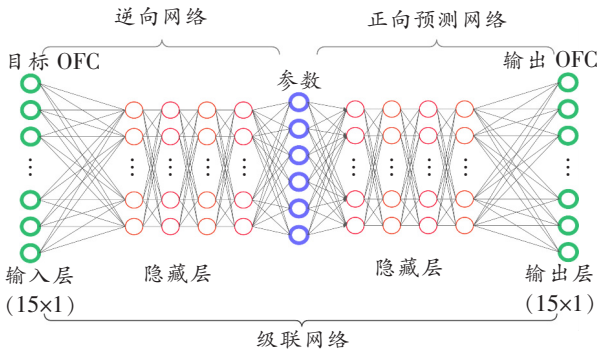


图 4 用于 OFC 逆向设计的级联网络架构图

Figure 4 Diagram of cascading network architecture for OFC inverse design

训练逆向网络。将目标 OFC 的功率输入逆向网络,逆向网络会输出一组对应的系统参数;然后正向预测网络利用这组系统参数进行预测,生成一个光谱;最后将目标 OFC 与生成光谱的 MSE 作为损失函数,反向传播,保持正向网络参量恒定,更新逆

向网络各层的权重和偏置,以此训练逆向网络,拟合目标 OFC 与系统参数之间的映射关系。

级联网络的训练曲线如图 5 所示。由图可知,当迭代次数达到 50 时, M_{SE} 就已下降至 0.034,此后曲线收敛缓慢;迭代次数达到 200 时, M_{SE} 收敛至 0.013 且几乎不再下降。对比单级逆向网络,级联网络的训练曲线收敛效果显著,说明级联网络的拟合程度更高,可以更准确地实现目标 OFC 至系统参数的逆向设计。

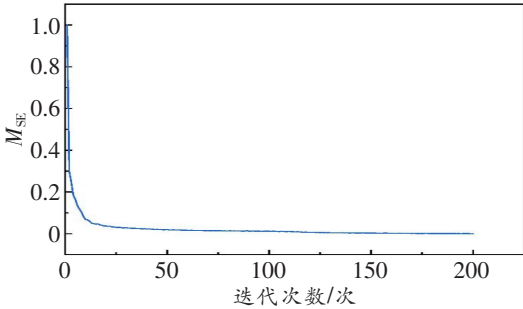


图 5 用于 OFC 逆向设计的级联网络训练曲线

Figure 5 Cascaded network training curve for OFC inverse design

3 分析与讨论

首先,设置目标 OFC,利用构建的级联网络逆向设计出目标 OFC 对应的优化参数集 $\mathbf{S} = [V_{RF} \ V_{offset} \ V_{bias1} \ V_{bias2} \ \alpha \ P]$;然后,为了验证级联网络逆向设计 OFC 的效果,将逆向设计得到的工作参数输入到由 OptiSystem15.0 软件构建的 OFC 产生系统中得到 OFC,并与目标 OFC 的性能进行比较。研究 OFC 梳线数、梳线功率、梳线间隔的可编程特性以及基于级联网络逆向设计 OFC 的设计效率。研究过程中,除特别声明外,RF 信号的频率为 10 GHz,DDMZM 消光比为 20 dB,插入损耗为 5 dB,激光源带宽为 10 MHz,中心频率为 193.1 THz;课题研究使用的计算机中央处理器(Central Processing Unit,CPU)型号为 Intel Core i5-9300H,计算机内存 4 GB,图形处理器(Graphics Processing Unit,GPU)型号为 NVIDIA GeForce GTX1650。

3.1 梳线数目和功率可编程

将目标梳线分别设置为 7、9、11 和 13 根,对应梳线功率 P_i 为 -15、-20、-25 和 -30 dBm,利用构建的级联网络逆向设计得到的 OFC 工作参数如表 1 所示。

表 1 不同目标梳线数和 P_i 下平坦 OFC 对应的工作参数、平坦度及 MSE

Table 1 Flat OFC with different target number of combs and P_i corresponds to operating parameters, MSE and flatness

目标		参数						仿真		
梳线数/根	P_i /dBm	RF 源幅值/V	RF 源偏置/V	调制器偏置 1/V	调制器偏置 2/V	衰减系数/dB	光信号功率/dB	平坦度/dB	M_{SE}	时间/s
7	-15	3.954	0.466	-5.172	-1.116	4.474	6.086	0.665	0.343	0.336
9	-20	4.262	0.408	-4.573	-0.562	3.716	1.900	0.691	0.575	0.329
11	-25	4.728	0.406	-5.519	-1.343	4.344	-3.552	1.310	0.759	0.331
13	-30	4.862	0.350	-2.959	1.189	2.301	-5.402	1.769	0.583	0.328
15	-35	5.112	0.371	-2.961	0.977	1.292	-7.038	3.763	1.475	0.334

利用 OptiSystem15.0 软件对本文所提方案进行仿真验证,其中工作参数设置为基于级联网络逆向设计得到的参数值,仿真得出 DDMZM 输出光场的时域形式如式(5)所示,对应的光谱如图 6 所示,相应的平坦度、 M_{SE} 以及利用级联网络逆向设计出目标 OFC 对应的参数所用时间如表 1 所示。当目标梳线分别为 7、9、11 和 13 根时,获得 OFC 的平坦度均 < 1.8 dB,目标 OFC 功率与系统输出光谱功率的 M_{SE} 均 < 0.8 ,说明逆向设计得到的 OFC 与目标 OFC 基本相符。本文也研究了当目标梳线设置成 15 根时的情况,产生 OFC 的平坦度为 3.763 dB, $M_{SE} = 1.475$,与目标 OFC 有一定差异。由表 1 可知,梳线数与 RF 源电压 V_{RF} 具有较强的关联性,可以通过提高 V_{RF} 得到梳线数更多的平坦 OFC。然而,DDMZM 的调制电压存在上限值,不能无限制的提高 V_{RF} ,本文中 V_{RF} 的范围为 $0 \sim 5$ V。若目标梳线超过 13 根,基于深度学习较强的泛化能力,利用级联网络也能设计出相应的参数,但 V_{RF} 会超出 5 V 的限制范围。因此,基于级联网络,本方案最多能产生梳线数为 13 根的平坦 OFC。另外,由表 1 可知,级联网络逆向设计出目标 OFC 对应的参数所用时间仅约 0.33 s,凸显了基于深度学习的 OFC 逆向设计方法所具备的效率优势。

文献[21]采用 4 次乘法耦合 RF 信号得到了平坦度为 1.88 dB 的 7 线 OFC。而本方案与之对比,不仅能得到 13 根梳线的平坦 OFC,而且级联网络逆向设计出目标 OFC 对应的参数所用时间 < 1 s,参数设计的效率显著提升,无需过多依靠理论和研究经验,解决了传统设计方法耗时长和计算资源耗费大的问题,而且实现了 OFC 梳线数目、梳线功率 P_i 的可编程。

利用训练好的级联网络,可以设计出宽带宽和高平坦度的目标 OFC。基于功率可编程特性,也可逆向设计出各波长功率具有任意性的部分目标光频输出。然而,方案采用的优化参数较少,级联网络难

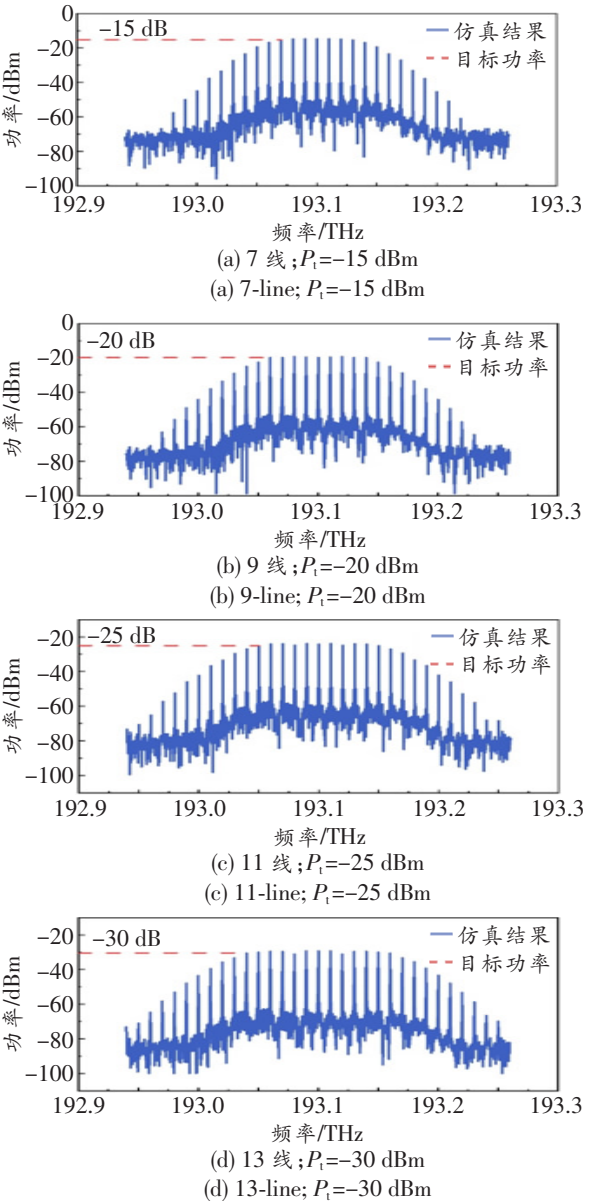


图 6 不同梳线数目和目标功率下产生的 OFC
Figure 6 OFC generated at different number of combs and target power

以实现所有的任意值光谱设计。而且系统输出的 OFC 受限于前文式(5)表述的物理模型,理论上各波长的功率并不是完全相互独立的,因此级联网络

只能准确设计部分任意值光谱。

3.2 梳线间隔可编程

由式(5)可知,产生的 OFC 梳线间隔取决于正弦 RF 信号的频率。因此,以目标梳线数目为 9 根、梳线功率 $P_i = -20\text{ dBm}$ 为例,利用构建的级联网络研究 OFC 梳线间隔的可编程性。基于级联网络逆向设计得到的 9 线平坦 OFC 对应的系统参数值如表 1 所示,将 OFC 产生系统的工作参数设置为逆向设计得到的工作参数值,RF 信号的频率分别设置为 5、10、15 和 20 GHz,得到的光谱如图 7 所示。由图可知,梳线间隔等于 RF 信号的频率,且平坦度分别为 0.723、0.691、0.790 和 0.692 dB,不同频率下的 OFC 平坦度基本相同,与理论相符。因此,基于级联网络逆向设计生成 OFC 的方案,只需改变

RF 信号的频率,无需改变系统参数,就能实现 OFC 梳线间隔的可编程。

4 结束语

本文提出了一种基于 2 次耦合 RF 信号驱动单个 DDMZM 产生 OFC 的方案,并利用深度学习方法对提出的 OFC 进行逆向设计。研究结果表明,基于构建的级联网络逆向设计 OFC,产生的 OFC 具有较好的平坦度,能产生梳线数为 13 的平坦 OFC,并且利用级联网络逆向设计出目标 OFC 对应的参数所用时间 $< 1\text{ s}$,可以快速实现梳线数目、梳线功率和梳线间隔的可编程,这解决了现有 OFC 产生技术中缺乏可编程性的问题。本方案解决了传统设计方法中的耗时和计算资源耗费较大的问题,作为一种有效的设计工具,无需很多光学理论领域的专业知识从而减少了研究人员的设计困难,有望解决产生 OFC 的现有方法中存在的人力、物力和时间成本高、效率低下的问题,在 OFC 产生技术中具有不可比拟的优势。

参考文献:

[1] 秦鹏,王思佳. 基于光学频率梳的高精度距离测量研究进展(特邀)[J]. 光电技术应用,2021,36(5):42—48.
Qin P, Wang S J. Progress in High-precision Distance Measurement based on Optical Frequency Combs(Invited)[J]. Electro-Optic Technology Application,2021, 36(5):42—48.

[2] 牛佳钰. 基于光学频率梳的高精度绝对测距方法研究[D]. 长春:长春理工大学,2021.
Niu J Y. Research on High Precision Absolute Ranging Method of Optical Frequency Comb[D]. Changchun: Changchun University of Science and Technology,2021.

[3] Liu Y, Gao H, Chen Y, et al. Full-duplex WDM-RoF System based on OFC with Dual Frequency Microwave Signal Generation and Wavelength Reuse [J]. Optical Fiber Technology, 2020,58:102252.

[4] Fan Y M, Li P L. Digitally Controlled Microwave Frequency Comb based on Mach-Zehnder Modulator and Pulse Signals [J]. Optical Engineering, 2020,59(4): 046110.

[5] Ma L S, Bi Z, Bartels A, et al. Optical Frequency Synthesis and Comparison with Uncertainty at the 10 (—19) Level[J]. Science, 2004, 303(5665): 1843—1845.

[6] Buscaino B, Zhang M, Loncar M, et al. Design of Ef-

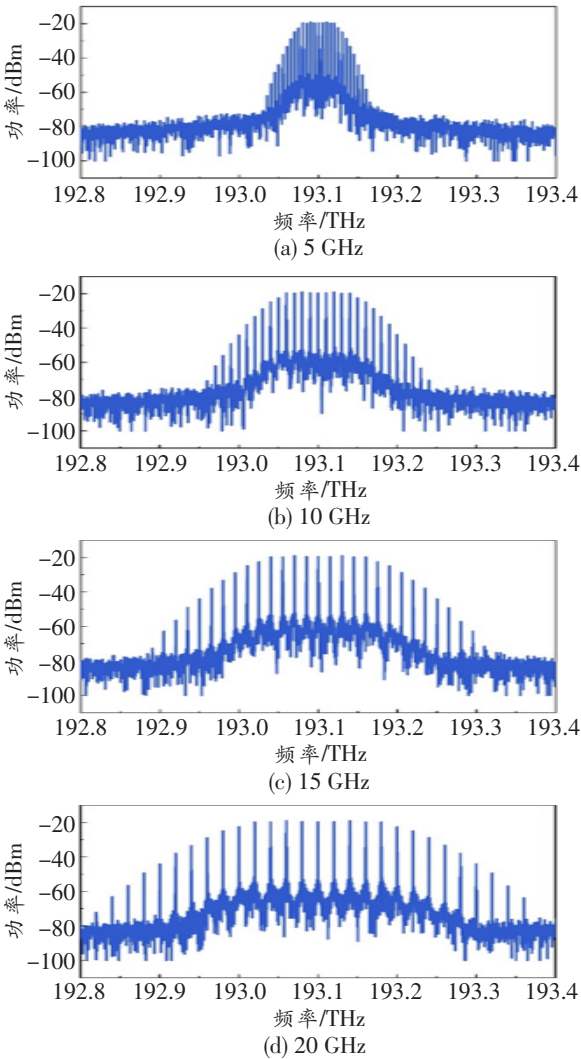


图 7 不同梳线间隔产生的 OFC
($P_i = -20\text{ dBm}$)

Figure 7 OFC generated at different intervals
($P_i = -20\text{ dBm}$)

- efficient Resonator-enhanced Electro-optic Frequency Comb Generators[J]. Journal of Lightwave Technology, 2020, 38(6): 1400—1413.
- [7] Zhang T T, Wu S B. Optical Frequency Comb Generation based on Dual-parallel Mach - Zehnder Modulator and Intensity Modulator with RF Frequency Multiplication Circuit [J]. Photonic Network Communications, 2018, 36(2): 256—262.
- [8] Yang Y, Ma J, Xin X, et al. Optical Frequency Comb Generation Using Two Cascaded Polarization Modulators [J]. Photonic Network Communications, 2016, 32(1): 126—32.
- [9] Lu Y, Xing Y, Dong Y. Equal-amplitude Optical Comb Generation Using Multi-frequency Phase Modulation in Optical Fibers [J]. Chinese Optics Letters, 2010, 8(3): 316—319.
- [10] Sakamoto T, Kawanishi T, Izutsu M. Asymptotic Formalism for Ultraflat Optical Frequency Comb Generation Using a Mach-Zehnder Modulator [J]. Optics Letters, 2007, 32(11): 1515—1517.
- [11] 翟喜梅. 基于外调制器的光学频率梳生成方案及性能分析[D]. 西安: 西安电子科技大学, 2018.
Zhai X M. Generation Scheme and Performance Analysis of Optical Frequency Comb based on External Modulator[D]. Xi'an: Xidian University, 2018.
- [12] 冯素春, 范依依, 陈晓燕, 等. 基于级联电吸收调制器和相位调制器的多载波光源发生器设计[J]. 中国激光, 2016, 43(11): 194—202.
Feng S C, Fan Y Y, Chen X Y, et al. Design of Multi-carrier Optical Source Using Cascaded Electro-absorption Modulator and Phase Modulator[J]. Chinese Journal of Lasers, 2016, 43(11): 194—202.
- [13] 韩一石, 陆敏婷, 郑俊文, 等. 频率间隔可调的平坦多载波光源结构设计[J]. 光子学报, 2018, 47(5): 122—129.
Han Y S, Lu M T, Zheng J W, et al. Design of Flat Multi-carrier Light Source with Adjustable Frequency Spacing[J]. Acta Photonica Sinica, 2018, 47(5): 122—129.
- [14] 林贵斌. 光学频率梳生成及其在 WDM 系统中应用研究[D]. 西安: 西安电子科技大学, 2014.
Lin G B. Research on Optical Frequency Comb Generation and Application in WDM System [D]. Xi'an: Xidian University, 2014.
- [15] Mishra A K, Schmogrow R, Tomkos I, et al. Flexible RF-based Comb Generator[J]. IEEE Photonics Technology Letters, 2013, 25(7): 701—704.
- [16] Zhang A L, He J L. A Dynamic Optical Arbitrary Waveform Generator based on Cross Phase Modulation [J]. Optoelectronics Letters, 2016, 12(2): 101—105.
- [17] Shen J, Wu S, Li D. Ultra-flat Optical Frequency Comb Generation based on Phase Modulation with Simple Digital Driving Signal [J]. Optik, 2019, 198: 163254.
- [18] 谢海伦, 贾可昕, 陈佳文, 等. 基于耦合射频信号和单个马赫—曾德尔调制器的可调光学频率梳[J]. 中国激光, 2020, 47(7): 374—381.
Xie H L, Jia K X, Chen J W, et al. Tunable Optical Frequency Comb based on Coupled Radio Frequency Signal and Single Mach-Zehnder Modulator[J]. Chinese Journal of Lasers, 2020, 47(7): 374—381.
- [19] 董芳. 基于光频梳的奈奎斯特脉冲产生及应用研究[D]. 长春: 长春理工大学, 2021.
Dong F. Application and Generation of Nyquist Pulses based on Optical Frequency Comb [D]. Changchun: Changchun University of Science and Technology, 2021.
- [20] Shang L, Wen A, Lin G, et al. A Flat and Broadband Optical Frequency Comb with Tunable Bandwidth and Frequency Spacing [J]. Optics Communications, 2014, 331: 262—266.
- [21] Pendiuk G F I, Neves P T, Pohl A A P. Use of a Differential Evolution Algorithm for Determining Input Driving Signals in Optical Frequency Combs[J]. OSA Continuum, 2020, 3(8): 2232—2242.
- [22] Pinto T, De Moura U C, Da Ros F, et al. Optimization of Frequency Combs Spectral-flatness Using Evolutionary Algorithm [J]. Optics Express, 2021, 29(15): 23447—23460.
- [23] Xu D, Luo Y, Luo J, et al. Efficient Design of a Dielectric Metasurface with Transfer Learning and Genetic Algorithm [J]. Optical Materials Express, 2021, 11(7): 1852—1862.
- [24] Fan C, Yang B, Liu Y, et al. Using Deep Learning to Automatically Generate Design Starting Points for Free-form Imaging Optical Systems[J]. Applied Optics, 2022, 61(21): 6241—6248.
- [25] Zhang F, Yu H, Fang J, et al. Efficient Generation and Tight Focusing of Radially Polarized Beam from Linearly Polarized Beam with All-dielectric Metasurface [J]. Optics Express, 2016, 24(6): 6656—6664.
- [26] Luo J, Li X, Zhang X Y, et al. Deep-learning-enabled Inverse Engineering of Multi-wavelength Invisibility-to-superscattering Switching with Phase-change Materials [J]. Optics Express, 2021, 29(7): 10527—10537.