

### 基于端到端优化的可编程微波光子滤波器

林蔚 陈慧彬 郭红英

#### Programmable microwave photonic filter based on end-to-end optimization

LIN Wei, CHEN Hui-bin, GUO Hong-ying

引用本文:

林蔚, 陈慧彬, 郭红英. 基于端到端优化的可编程微波光子滤波器[J]. 中国光学, 优先发表. doi: 10.37188/CO.2026-0008

LIN Wei, CHEN Hui-bin, GUO Hong-ying. Programmable microwave photonic filter based on end-to-end optimization[J]. *Chinese Optics*, In press. doi: 10.37188/CO.2026-0008

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.37188/CO.2026-0008>

### 您可能感兴趣的其他文章

#### Articles you may be interested in

#### 基于马赫曾德尔调制器的倍频因子和输出相位可调的微波光子移相器

Microwave photonic RF frequency multiplying phase shifter with tunable multiplication factor and a full 360-deg tunable range  
中国光学 (中英文). 2023, 16(4): 948 <https://doi.org/10.37188/CO.EN.2022-0019>

#### 同带泵浦的Tm:CYA调Q锁模激光器

Tm:CYA Q-switched mode-locked laser realized by tandem-pumping  
中国光学 (中英文). 2024, 17(4): 764 <https://doi.org/10.37188/CO.2023-0162>

#### 基于声光锁模全固态660 nm激光器

All-solid-state acousto-optic mode-locked laser operating at 660 nm  
中国光学 (中英文). 2024, 17(1): 238 <https://doi.org/10.37188/CO.EN-2023-0013>

#### 全圆锥入射下基于一维共振波导光栅的入射角调谐滤波器

Incident angle-tuned filter based on 1D resonant waveguide grating in full conical mounting  
中国光学 (中英文). 2024, 17(2): 493 <https://doi.org/10.37188/CO.EN-2023-0030>

#### 类H型结构的太赫兹带阻滤波器

Terahertz band-stop filter with H-type structure  
中国光学 (中英文). 2024, 17(4): 757 <https://doi.org/10.37188/CO.2023-0179>

#### 可提升被动锁模光纤激光器计算效率的分步傅里叶全局误差局部能量法

SSFM-global-error-local-energy method for improving computational efficiency of passively mode-locked fiber laser  
中国光学 (中英文). 2023, 16(3): 733 <https://doi.org/10.37188/CO.EN.2022-0016>

文章编号 2097-1842(xxxx)x-0001-07

## 基于端到端优化的可编程微波光子滤波器

林蔚<sup>1</sup>, 陈慧彬<sup>2,3\*</sup>, 郭红英<sup>1</sup>

(1. 漳州职业技术学院 电子信息学院, 福建 漳州 363000;

2. 泉州师范学院 光电工程系, 福建 泉州 362000;

3. 福建省先进微纳光子技术与器件重点实验室, 福建 泉州 362000)

**摘要:** 基于加权时延结构的微波光子滤波器同时利用了光学器件和射频器件的优势, 具有可重构、低成本、大带宽的特性, 在微波频段提供了灵活高效的信号处理能力。然而, 由于加权时延结构的复杂性, 系统中分立的光电器件均会对不同波长上的权重抽头产生干扰, 如: 光频率梳的包络和增益竞争、EDFA 的增益不均匀性和非线性、调制器受限的滤波带宽。这些因素均会导致抽头的权重偏离理想值, 从而导致微波滤波器的畸变。本文提出了一种端到端优化的方式, 通过将微波光子滤波器作为一个黑盒系统, 通过实时监控系统最后输出的光谱形状(即每个 tap 的权重值), 计算并反馈波长的抽头分布与理想抽头之间的差值, 用于实时调整波长整形器的滤波系数, 使得输出的光谱权重始终保持在设计的状态。通过这种端到端优化的方法, 我们实现了 0.05 dB 的光谱重构精度, 并且完成了带外抑制比高达 47 dB 的射频低通滤波器。

**关键词:** 光子射频滤波器; 微波光子学; 锁模激光器

中图分类号: TP394.1; TH691.9 文献标志码: A doi: 10.37188/CO.2026-0008 CSTR: 32171.14.CO.2026-0008

## Programmable microwave photonic filter based on end-to-end optimization

LIN Wei<sup>1</sup>, CHEN Hui-bin<sup>2,3\*</sup>, GUO Hong-ying<sup>1</sup>

(1. School of Electronic Information, Zhangzhou Institute of Technology, Zhangzhou, 363000, China;

2. College of Physics and Information Engineering, Quanzhou Normal University, Quanzhou 362000, China;

3. Fujian Provincial Key Laboratory for Advanced Micro-nano Photonics Technology and Devices, Quanzhou 362000, China)

\* Corresponding author, E-mail: chenhuibin@qztc.edu.cn

**Abstract:** The microwave photonic filter based on weighted delay structure simultaneously leverages the advantages of photonic and radio-frequency components, featuring reconfigurability, low cost, and wide bandwidth, providing flexible and efficient signal processing capabilities in the microwave band. However, due to the complexity of the weighted delay structure, discrete optoelectronic components in the system can interfere with the weighted taps at different wavelengths—such as the envelope and gain competition of optical frequency combs, the gain non-uniformity and nonlinearity of EDFA, and the limited filtering bandwidth of modulators. These factors cause deviations in the weighted taps from their designed values, leading to distortions.

收稿日期: xxxx-xx-xx; 修订日期: xxxx-xx-xx

基金项目: 国家自然科学基金(No. 61705119)

Supported by the National Natural Science Foundation of China (No. 61705119)

tion in the microwave filter. This paper proposes an end-to-end optimization approach by treating the microwave photonic filter as a black-box system. By monitoring the spectral shape (i.e., the weight values of each tap) of the final output in real time, the difference between the wavelength taps and the ideal taps is calculated and feedbacked to adjust the filtering coefficients of the waveshaper in real time, ensuring the output spectral weights remain in the designed state. Through this end-to-end optimization approach, we achieved a spectral reconstruction accuracy of 0.05dB and completed an RF low-pass filter with an out-of-band rejection ratio of up to 47dB.

**Key words:** photonic RF filters; microwave photonics; mode-locked laser.

## 1 引言

微波光子滤波器同时利用了光学器件和射频器件的优势,在微波频段提供了灵活高效的信号处理能力。相比于传统的微波信号处理器,具有可重构、低成本、大带宽、可调谐性等优势<sup>[1-5]</sup>。许多关键功能已经实现,例如依赖于射频时延的功能,包括相控阵天线、微波光子射频滤波器、模数转换或数模转换以及任意波形生成<sup>[6-12]</sup>。其他功能包括射频频谱仪、高保真微波信号生成等等<sup>[13-15]</sup>。其中,光子射频滤波器是最基本且最常用的组件之一,可在微波域提供灵活高效的信号处理能力。通过将微波信号转换为光信号,它们可以利用光学系统的大带宽和低损耗特性。光子射频滤波器展现出广泛的应用前景,涵盖信号滤波、均衡和噪声抑制等领域。它们可以被设计成具有可重构特性,从而能够根据系统的具体需求进行动态调整。

实现光子射频滤波器的基本方法是基于加权时延结构的横向滤波器<sup>[16-17]</sup>。在这种方法中,射频信号被调制到多个子光载波上,从而转换到光域,多个子光载波通过功率生成加权且逐渐延迟的信号副本。然后使用光电探测将这些副本加和。调整横向滤波器的抽头权重以实现射频传递函数。横向滤波器的灵活性使其成为实现高级自适应和动态射频滤波器的理想选择。由于能够实时调整抽头权重,它们可以轻松适应不断变化的射频滤波需求。传统上,人们使用激光器阵列或布拉格光栅阵列来提供所需的抽头<sup>[18-20]</sup>。然而,这些方法存在局限性,例如由于可用抽头数量有限而导致复杂性增加和性能下降。一种新兴的、备受关注的方法是利用集成光学克尔频率梳光

源。这些光源提供了一种新颖而强大的方法,能够提供高度相干的多波长通道,并精确控制频率间隔。最近,基于 49 GHz 间隔的频率梳光源,已经实现了高达 80 个抽头的光子射频滤波器<sup>[21]</sup>。然而,这需要高功耗的泵浦激光器和复杂的克尔微腔。此外,半导体锁模激光器是产生多波长光源的首选方法。通常通过在激光腔内集成可饱和吸收体来实现。由于光功率较低,还需要额外的光放大器。通过以上这些方案,能够实现多种类型的微波光子滤波器。

然而,由于光子射频滤波系统的复杂性,系统中的各器件均会对加载在各波长上的权重抽头产生干扰,如:光频率梳的包络和增益竞争、EDFA 的增益不均匀性和非线性、EOM 的滤波特性,并且这些器件特性产生的干扰无法被精准地建模。这些因素均会导致抽头权重偏离理想的值,从而导致射频滤波器的畸变。

为了解决这个问题,本文提出了一种端到端优化的方式,通过将光子射频滤波系统作为一个黑盒系统,只关注最后输出的光谱形状。通过实时监控被滤波后的光谱(即每个 tap 的权重值),计算机计算并反馈光谱抽头分布于理想抽头之间的差值,用于实时调整 WSS(wavelength selective switch, 波长选择开关)的滤波系数,使得输出的光谱始终保持在理想的状态。通过这种端到端优化的方法,我们实现了 0.05 dB 的光谱重构精度,并且完成了带外抑制比高达 47 dB 的射频高通滤波器。

## 2 原理与实验架构

光子射频滤波器基于经典的横向滤波器结构,在信号处理任务中有着广泛的应用。采用光

子技术实现射频滤波器的关键优势在于,它可以克服传统电子信号处理系统中常见的电带宽瓶颈<sup>[23]</sup>。光子技术的工作频率远高于其电子对应技术,因此能够处理带宽显著提升的信号。光子射频滤波器的脉冲响应可表示为:

$$P(t) = \sum_{n=0}^{N-1} h(n)\delta(t-n\Delta t) \quad , \quad (1)$$

其中  $N$  为抽头数量,  $h(n)$  ( $n = 0, 1, 2, \dots, N-1$ ) 表示第  $n$  个抽头的抽头权重,  $\Delta t$  为相邻抽头之间的时间延迟。输出射频信号  $s(t)$  可通过将输入射频信号  $g(t)$  与式(1)所示的冲激响应进行卷积运算得到:

$$s(t) = g(t) \times P(t) = \sum_{n=0}^{N-1} h(n)g(t-n\Delta t) \quad , \quad (2)$$

其中,  $\times$  在这里表示两个信号进行卷积计算,  $g(t)$  为输入射频信号。对式(1)进行傅里叶变换后,可得光子射频滤波器的理想频谱传输函数:

$$H(\omega) = \sum_{n=0}^{N-1} h(n)e^{-j\omega n\Delta t} \quad , \quad (3)$$

其中  $\omega$  为输入射频信号的角频率。滤波器的奈奎斯特频率由  $f_{\text{Nyquist}} = 1/2T$  给出,其中  $T$  为采样周期。通过在每个波长通道上应用计算得到的抽头系数  $h(n)$ ,可以实现具有任意光谱传递函数的可编程光子射频滤波器。这种可编程性使得信号处理更加灵活多样,从而使光子射频滤波器适用于各种需要精确控制频率响应的射频应用。理论上,当原始光谱是绝对平坦的,且系统中的其他器件对不同的波长的响应是完全一致的且没有非线性增益,抽头系数  $h(n)$  即是 WSS 需要加载的滤波系数  $w(n)$ 。

然而很明显,系统中的响应并非理想情况。其中,EDFA 对不同的波长增益不同,且对不同功率的光信号有着不同的增益系数。此外调制器也在一定范围内有滤波带宽的限制。因此我们实际滤波时需要考虑这些影响因素,可得光子射频滤波器的实际频谱传输函数:

$$H(\omega) = \sum_{n=0}^{N-1} f(a(n)) * w(n)e^{-j\omega n\Delta t} \quad , \quad (4)$$

其中,  $a(n)$  为光频率梳的原始包络函数,  $f()$  为系

统中各器件对每个波长的综合影响函数,包括了 EDFA 的非线性响应和线性滤波响应,导致滤波后的响应  $f()$  已经不同于滤波前的响应  $f()$ ,且由于系统的复杂性难以被实际求解或探测,使得设计好的最优滤波系数  $w(n)$  加载在系统之后,随即不再是最优的滤波系数,存在由于系统非线性响应导致的偏差。为了准确获得所需加载在 WSS 上的滤波系数  $w(n)$ ,我们设计了一种端到端优化的反馈链路。通过监控输出光谱的包络,实时反馈并且修正 WSS 的滤波系数,当理论滤波 taps 与实际滤波 taps 之间的差值小于 0.05 dB,我们即判定退出迭代。并且继续实时监控其滤波状态,修正由于环境和锁模频梳的模式竞争导致的偏差。具体原理如公式(5)所示:

$$w(n)_{i+1} = [h(n) - f(a(n)) * w(n)_i] + w(n)_i \quad , \quad (5)$$

这里我们用定制的半导体锁模激光器,作为横向滤波器的光学频率梳源,如图 1 展示了该激光器在锁模状态下的光谱,显示了能够提供超过 80 根可用的且边模抑制比超过 25 dB 的波长。图 2 展示了基于该锁模频率梳的光子射频滤波器系统。不同于以往的光子射频滤波器将波长整形器放在 EDFA 和调制器之前<sup>[21, 24-25]</sup>,我们这里将波长整形器 WSS 放在所有可能对不同波长存在不同响应的器件之后,方便进行端到端的整形优化。首先,光频率梳经掺铒光纤放大器(EDFA)放大。接下来,通过电光强度调制器将射频信号调制到光谱上。这一步骤生成了射频输入波形的光学表示,有效地将信号转换到光域。为了引入波长相关的延迟,调制后的信号通过约 4.31 km 的标准单模光纤(SMF)传输。该 SMF 的色散约为 17.4 ps/nm/km,这对应于相邻波长之间的时间延迟  $\Delta t = 25$  ps,从而使横向滤波器的带宽(即奈奎斯特频率的一半)约为 20 GHz<sup>[19]</sup>。然后,利用波长选择开关 WSS 对频率梳的光谱进行整形,以获得预设的抽头权重。除此之外,当光信号经过 WSS 后,我们增加了一路用示波器进行光谱监控的光路,进行反馈和校正 WSS 的滤波系数。最后,加权和延迟后的光信号通过 PD 检测并转换回射频信号。这种光电转换使得射频滤波器能够根据设计的抽头权重和波长相关的延迟提供所需的射频滤波响应,从而使射频滤波器能够执行精确的射频信号处理。

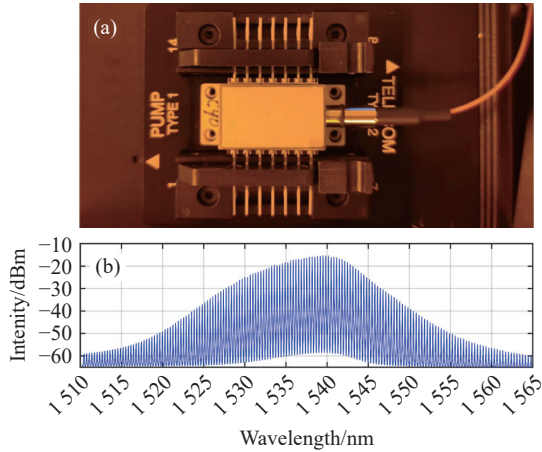


图 1 (a) 半导体锁模激光器; (b) 锁模激光器的频率梳  
Fig. 1 (a) Customized semiconductor mode-locked laser; (b) The frequency comb of the mode-locked laser

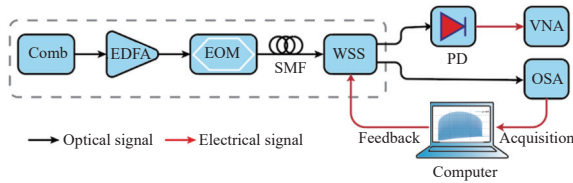


图 2 光子射频滤波器的实验装置。EDFA: 掺铒光纤放大器。EOM: 电光调制器。SMF: 单模光纤。WSS: 波长选择开关 PD: 光电探测器。VNA: 矢量网络分析仪。OSA: 光谱分析仪。

Fig. 2 Experimental setup of the photonic RF filter. EDFA: erbium-doped fiber amplifier. EOM: Electro-optic modulator. SMF: single-mode fiber. WSS: wavelength selective switch PD: photodetector. VNA: vector network analyzer. OSA: optical spectrum analyzer.

利用以上搭建的系统和我们提出的端到端优化的方法,对经过整个系统的光频率梳,进行矩形窗的整形。整形结果如图 3 所示,经过一次优化,我们将理论计算的滤波系数加载到 WSS 上,被整形后的光谱包络大致呈矩形,但明显有 4.4 dB 的不平坦度,这主要是因为 EDFA 的增益非线性和光路上其他器件对不同波长的响应不一致引起的。

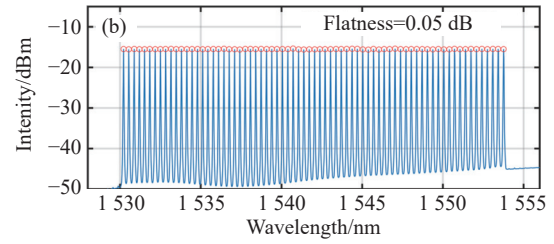
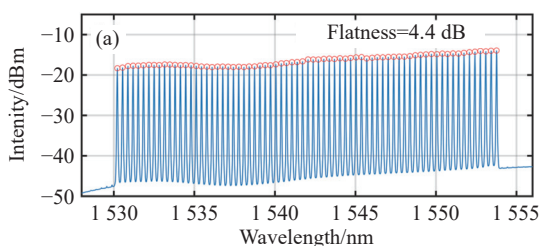


图 3 (a) 经过一次迭代优化的光谱; (b) 经过四次迭代优化的光谱

Fig. 3 (a) Spectrum optimized through one iteration; (b) Spectrum optimized through four iterations

接着我们计算得到的光谱于理想光谱的权重差值,将权重差值反馈到 WSS 的滤波权重上,经过四轮的优化迭代,得到如图 3(b) 所示的完美矩形窗光谱,不平坦度为 0.05 dB。

### 3 实验结果

基于以上的端到端优化方法,我们实现了两种低通光子射频滤波器的构建。首先,为了实现一种 sinc 滤波器,根据傅里叶变换的原理,需要加一种矩形的窗函数,即令不同抽头  $h_{sinc}(n)=1$ 。实验中,我们使用波形整形器对频率梳的光谱进行平坦化处理。选取不同的抽头数(即波长数量),并测量和比较了相应的光谱,如图 4 所示,展示了四个不同波长数量的矩形光谱,每个光谱均经过了 4-5 轮的端到端优化和实时反馈控制,确保波形准确度在 0.05 dB 以内。

图 5 展示了使用矢量网络分析仪 (VNA) 对该矩形光谱的射频响应进行测量和表征的结果,结果表明,得到的射频响应是非常标准的 sinc 滤波器。3 dB 带宽是表征滤波器的重要参数,实验结果表明,随着光谱的抽头数从 10 个增加到 72 个, sinc 滤波器的带宽从 4 GHz 减小到 0.5 GHz,表明可以通过使用更多的波长数量作为抽头,以显著提高该射频滤波器的滤波精细度和选择性。这在信号处理领域的抗混叠、插值、采样率转换等需要高精度低通的场景具有重要的应用。

以上的 sinc 射频滤波器虽然能实现精细的滤波,但是由于有较强且连续的旁瓣,在进行弱信号检测时,会有较大的干扰。为了解决这个问题,我们通过加高斯窗函数的方式,对旁瓣进行抑制以获得高带外抑制比的射频低通滤波器,所需加载的抽头权重如公式(6)所示:

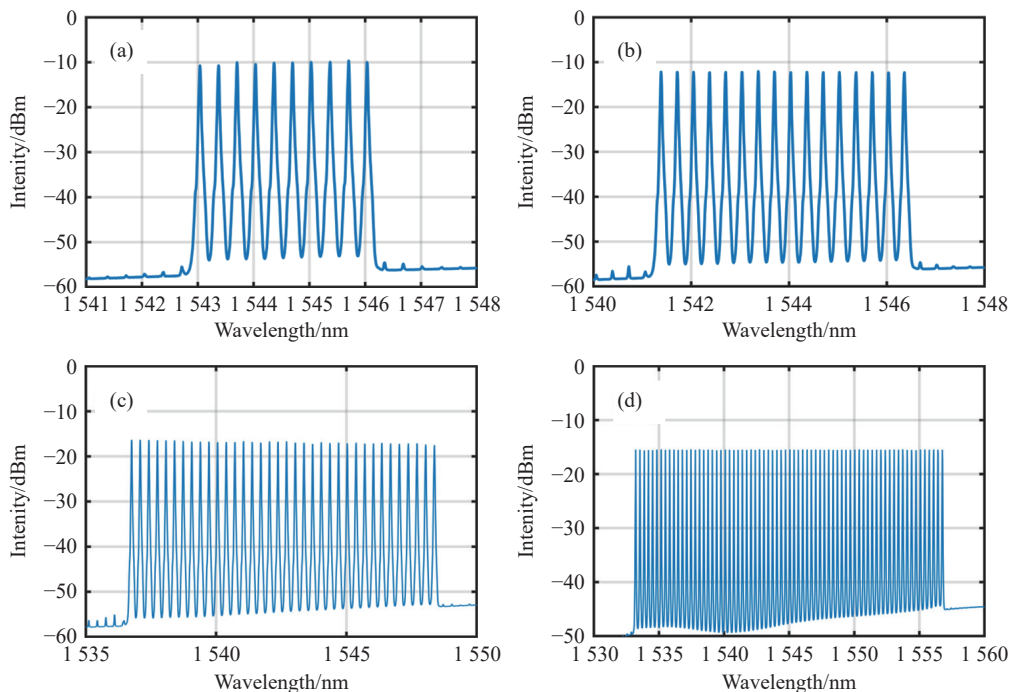


图 4 对应于不同抽头数的形状梳的光谱。(a)10 个抽头; (b)16 个抽头; (c)36 个抽头; (d)72 个抽头;

Fig. 4 Optical spectra of the shaped comb corresponding to different tap numbers. (a) 10 taps; (b) 16 taps; (c) 36 taps; (d) 72 taps;

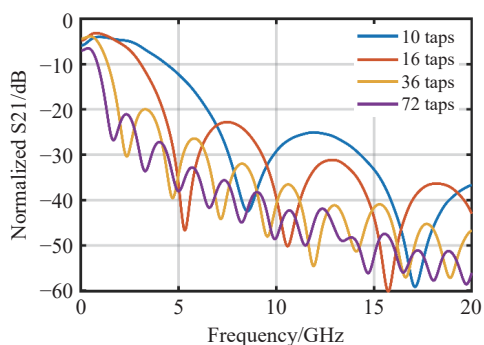


图 5 具有不同抽头数的 sinc 型光子射频滤波器

Fig. 5 Sinc-style photonic RF filters with different tap numbers.

$$h_{Gauss}(n) = h_{sinc}(n)e^{-\frac{(n-36)^2}{2\sigma^2}} \quad (6)$$

如图 6 所示, 展示了 72 根波长在不同均方根系数( $\sigma$ )下, 经过加高斯函数窗的频率梳光谱如图

所示, 每个光谱均经过了 4-5 轮的端到端优化和实时反馈控制, 确保波形准确度在 0.05 dB 以内, 表现出了完美的高斯型包络。

图 7 展示了使用矢量网络分析仪 (VNA) 对该矩形光谱的射频响应进行测量和表征的结果, 结果表明, 得到的射频响应是几乎被完美切趾的低通滤波器, 原本 sinc 滤波器的旁瓣几乎完全消失, 并且该射频低通滤波器的带外抑制比高达 47dB。这里由于在均方根系数较小时, 高斯包络回截掉部分波长数量, 所以也会影响射频低通滤波器的带宽。因此, 通过调整抽头波长的数量和高斯高斯窗函数的系数, 可以实现高带外抑制比, 且带宽可调的射频低通滤波器, 即可以同时实现高频率分辨率和抗干扰的能力, 这在射频雷达和通信领域均有广泛应用。

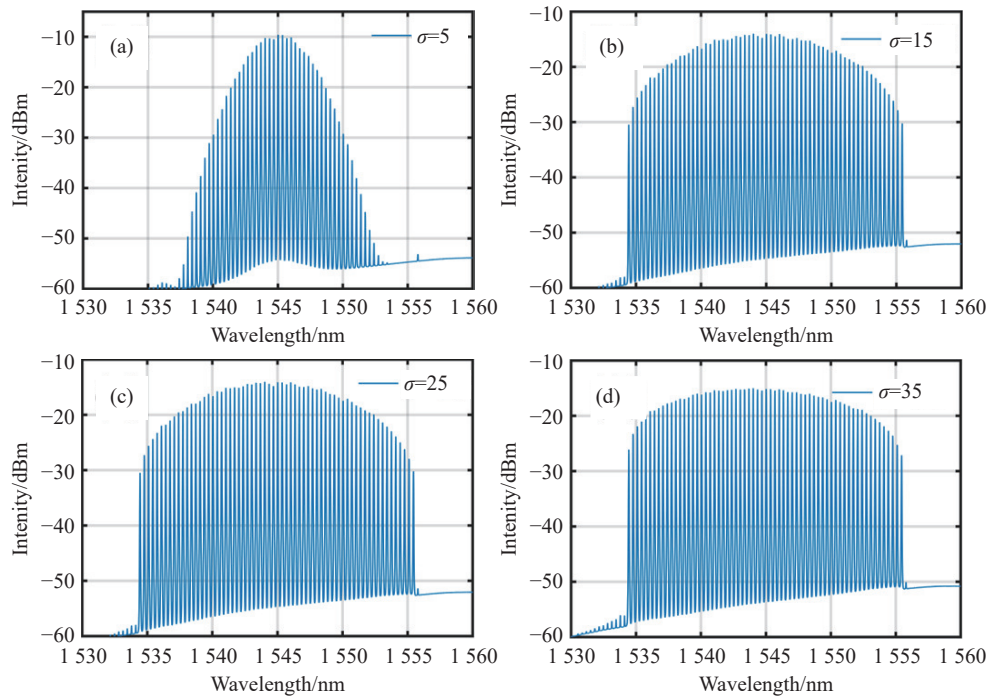


图 6 高斯切趾 sinc 滤波器对应的光谱. (a)  $\sigma=5$ , (a)  $\sigma=15$ , (a)  $\sigma=25$ , (a)  $\sigma=35$ .

Fig. 6 Optical spectra of the Gaussian-apodized sinc filter. (a)  $\sigma=5$ , (a)  $\sigma=15$ , (a)  $\sigma=25$ , (a)  $\sigma=35$ .

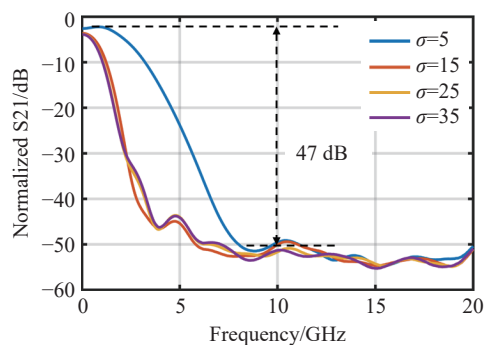


图 7 具有不同系数的高斯切趾型光子射频滤波器

Fig. 7 Gaussian-apodized photonic RF filters with different coefficient.

## 4 结 论

总之, 本文提出了一种端到端优化的方式, 通过将微波光子滤波器作为一个黑盒系统, 通过实时监控最后输出的光谱形状 (即每个 tap 的权重值), 计算并反馈波长的抽头分布与理想抽头之间的差值, 用于实时调整波长整形器的滤波系数, 使得输出的光谱权重始终保持在设计的状态。通过这种端到端优化的方法, 我们实现了 0.05dB 的光谱重构精度, 并且完成了带外抑制比高达 47dB 的射频低通滤波器。

## 参考文献:

- [1] CAPMANY J, ORTEGA B, PASTOR D. A tutorial on microwave photonic filters[J]. *Journal of Lightwave Technology*, 2006, 24(1): 201-229.
- [2] YAO J P. Microwave photonics[J]. *Journal of Lightwave Technology*, 2009, 27(3): 314-335.
- [3] CAPMANY J, NOVAK D. Microwave photonics combines two worlds[J]. *Nature Photonics*, 2007, 1(6): 319-330.
- [4] SEEDS A J, WILLIAMS K J. Microwave photonics[J]. *Journal of Lightwave Technology*, 2006, 24(12): 4628-4641.
- [5] MARPAUNG D, ROELOFFZEN C, HEIDEMAN R, et al.. Integrated microwave photonics[J]. *Laser & Photonics Reviews*, 2013, 7(4): 506-538.
- [6] MA C, CHEN H, YE X W, et al.. Ultra-high resolution microwave photonic radar with post-bandwidth synthesis[J]. *Chinese Optics Letters*, 2020, 18(7): 072501.
- [7] XU X Y, WU J Y, NGUYEN T G, et al.. Photonic microwave true time delays for phased array antennas using a 49 GHz FSR integrated optical micro-comb source [Invited] [J]. *Photonics Research*, 2018, 6(5): B30-B36.

- [8] SHU H W, CHANG L, TAO Y SH, *et al.*. Microcomb-driven silicon photonic systems[J]. *Nature*, 2022, 605(7910): 457-463.
- [9] KIM J, PARK M J, PERROTT M H, *et al.*. Photonic subsampling analog-to-digital conversion of microwave signals at 40-GHz with higher than 7-ENOB resolution[J]. *Optics Express*, 2008, 16(21): 16509-16515.
- [10] YAO J P. Photonic generation of microwave arbitrary waveforms[J]. *Optics Communications*, 2011, 284: 3723-3736.
- [11] . ZHANG W P, LEDERMAN J C, DE LIMA T F, *et al.* . A system-on-chip microwave photonic processor solves dynamic RF interference in real time with picosecond latency[J]. *Light: Science & Applications*, 2024, 13: 14.
- [12] . XU SH F, ZOU X T, MA B W, *et al.*. Deep-learning-powered photonic analog-to-digital conversion[J]. *Light: Science & Applications*, 2019, 8(1): 66.
- [13] PELUSI M, LUAN F, VO T D, *et al.*. Photonic-chip-based radio-frequency spectrum analyser with terahertz bandwidth[J]. *Nature Photonics*, 2009, 3: 139-143.
- [14] ZOU X H, ZOU F, CAO Z ZH, *et al.*. A multifunctional photonic integrated circuit for diverse microwave signal generation, transmission, and processing[J]. *Laser & Photonics Reviews*, 2019, 13(6): 1800240.
- [15] HERVÁS J, RICCHIUTI A L, LI W, *et al.*. Microwave photonics for optical sensors[J]. *IEEE Journal of Selected Topics in Quantum Electronics*, 2017, 23(2): 5602013.
- [16] XU X Y, WU J Y, NGUYEN T G, *et al.*. Advanced RF and microwave functions based on an integrated optical frequency comb source[J]. *Optics Express*, 2018, 26(3): 2569-2583.
- [17] ZHU ZH J, CHI H, JIN T, *et al.*. All-positive-coefficient microwave photonic filter with rectangular response[J]. *Optics Letters*, 2017, 42(15): 3012-3015.
- [18] POLO V, VIDAL B, CORRAL J L, *et al.*. Novel tunable photonic microwave filter based on laser arrays and N/spl times/N AWG-based delay lines[J]. *IEEE Photonics Technology Letters*, 2003, 15(4): 584-586.
- [19] LIU D, NGO N Q, TJIN S C. Microwave photonic bandpass filter using a multiwavelength semiconductor-optical-amplifier ring laser[J]. *Optical Engineering*, 2007, 46(5): 054401.
- [20] XU X Y, TAN M X, WU J Y, *et al.*. Advanced adaptive photonic RF filters with 80 taps based on an integrated optical micro-comb source[J]. *Journal of Lightwave Technology*, 2019, 37(4): 1288-1295.
- [21] XU X Y, TAN M X, WU J Y, *et al.*. Microcomb-based photonic RF signal processing[J]. *IEEE Photonics Technology Letters*, 2019, 31(23): 1854-1857.
- [22] WU J Y, XU X Y, NGUYEN T G, *et al.*. RF photonics: an optical Microcombs' perspective[J]. *IEEE Journal of Selected Topics in Quantum Electronics*, 2018, 24(4): 6101020.
- [23] LI M, LI W ZH, YAO J P. Tunable optoelectronic oscillator incorporating a high-Q spectrum-sliced photonic microwave transversal filter[J]. *IEEE Photonics Technology Letters*, 2012, 24(14): 1251-1253.
- [24] WU J CH, XIE Y W, HONG SH H, *et al.*. Programmable multichannel-parallel microwave photonic processor on silicon[J]. *Laser & Photonics Reviews*, 2026, 20(1): e00378.
- [25] XU X Y, TAN M X, CORCORAN B, *et al.*. 11 TOPS photonic convolutional accelerator for optical neural networks[J]. *Nature*, 2021, 589(7840): 44-51.

#### 作者简介:



林 蔚(1973—), 女, 福建漳州人, 2010年于四川大学获得四川大学电子与通信工程领域工程硕士学位, 现任漳州职业技术学院正高, 主要从事微波光子学、电子信息、嵌入式物联网应用的研究。E-mail: [200551000057@jmu.edu.cn](mailto:200551000057@jmu.edu.cn)

[jmu.edu.cn](mailto:200551000057@jmu.edu.cn)



陈慧彬(1985—), 女, 福建宁德人, 2016年于中国科学院大学获得凝聚态物理专业理学博士学位, 现任泉州师范学院副教授, 硕士生导师。主要从事固体激光器、半导体激光器、光神经网络的研究。E-mail: [chenhuibin@qztc.edu.cn](mailto:chenhuibin@qztc.edu.cn)

[qztc.edu.cn](mailto:chenhuibin@qztc.edu.cn)