微波光子技术及应用专题

DOI：10.16818/j.issn1001－5868.2022011102

微波光子网络的可重构与智能化

姚雨含，董建绩*

（华中科技大学 武汉光电国家研究中心，武汉 430074）

摘　要： 高性能的光子模拟处理芯片是微波光子处理系统的核心部件，文章通过优化光波导网络结构，实现了一种超宽带可重构的光子模拟运算芯片，通过配置拓扑网络结构实现了多种运算功能的任意切换以及同种功能的运算阶数可调谐。同时，研究了具有自配置能力的光学矩阵计算芯片，以及用于图像处理的片上光子卷积加速器。最后，对微波光子系统与人工智能的交叉融合进行了展望。

关键词： 微波光子网络；可重构光学回路；人工智能

中图分类号： TN927.2　**文章编号：** 1001－5868(2022)01－0031－08

Reconfiguration and Intellectualization of Microwave Photonic Networks

YAO Yuhan, DONG Jianji

(Wuhan National Laboratory for Optoelectronics, Huazhong University of Science and Technology, Wuhan 430074, CHN)

Abstract: High-performance photonic analog processing chip is the core component of microwave photonics processing system. In this paper, an ultra-wideband reconfigurable photonic analog computing chip was realized by optimizing the optical waveguide network structure, which can realize arbitrary switching and tuning of various analog signal processing functions by configuring topological networks. The optical matrix computing chip with self-configuration capability and the on-chip photonic convolution accelerator for image processing were also studied. Finally, prospects of cross research between microwave photonics and artificial intelligence were provided.

Key words: microwave photonics networks; reconfigurable photonic circuits; artificial intelligence

0　引言

微波光子学将微波信号转换到光域，使用光学装置和技术来产生、操纵、传播和检测高速射频信号，利用光子的优势完成时、空、频等多维处理，可以突破传统电子技术在功耗及速率等方面的瓶颈，天然具有大带宽、低损耗、抗电磁干扰、多信道并行处理的优势，已经广泛应用于通信、传感、航空航天、国防军事等领域[1-7]。

随着信息技术的不断发展，5G通信、物联网、自动驾驶、深度学习、虚拟现实、元宇宙等新兴领域不断涌现，各产业对网络容量的需求急剧增加，这对通信系统的传输带宽、速率都提出了更高的要求。传统的微波光子系统通常面向特定的应用场景，普适性差，并且对越大规模系统的调控也就愈加复杂。近年来，可编程集成光子回路的出现对于实现系统多个功能间的切换与可调成为可能，这样可以极大地增加系统的灵活性、降低成本并增加器件的通用性[8-13]。此外，智能化的光学器件飞速发展，光学神经网络、类脑光子技术等新兴方向在微波光子领域同样具有重要的借鉴意义[14-18]。

本文将围绕可重构的微波光子网络展开，主要

收稿日期：2022－01－11.

基金项目：国家重点研发计划项目(2018YFB2201901)；国家自然科学基金项目(62075075).

* **通信作者：**董建绩　**E-mail：**jjdong@hust.edu.cn

介绍了一种超宽带可编程的多功能微波光子网络，同时展示了如何用智能化的算法来配置复杂网络，以及光子网络服务于人工智能领域的新场景。

1 基于 MZI 网络的可重构微积分光计算芯片

光子辅助信号处理方案具有高速、宽带和更大的调谐范围，在最近几年得到了深入的研究。这些信号处理器包括微波光子滤波器[19-22]、光子时域微分器积分器[23-27]、希尔伯特变换器[28]、微波混频器[29]和微波移相器[30-31]等。光子时域微分、积分、希尔伯特变换是用于高阶计算和信号处理电路中的基本信号处理模块，早期采用各种光纤光栅实现对系统传递函数的设计和调控，进而完成定制化的光学运算。但随着光子集成技术的飞速发展，光子模拟信号运算器件总体上朝着集成化、小型化、规模化和低能耗方向发展，采用片上集成光波导器件是实现高性能光子模拟运算的必由之路[32-38]。同时，定制化的光子回路只能面向特定功能，实现的功能有限。近年来，拓扑光子网络的出现引领了新的方向，借助二维集成光子网络，通过可编程的控制信号来提供多种功能，其在实现高密度、高复杂度的集成可编程光子学方面展现出巨大的潜力[39-40]。

本文提出了一种基于马赫-曾德尔干涉仪(Mach-Zehnder Interferometer，MZI)的通用波导拓扑网络模型，其可以实现光子运算功能的切换并突破处理带宽的限制。

1.1 拓扑网络模型及原理

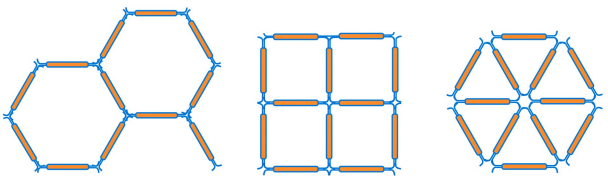
1.1.1 基本单元

拓扑网络中有很多因素决定了网络的性质，基本单元、网络节点和网络结构是其中三个重要的元素，在基本单元的选择上，通常希望它是一个互易、可逆、无损耗的 2×2 光学耦合器，这里我们选择 2×2 的 MZI 作为基本单元，每个 MZI 由两个 2×2 的多模干涉耦合器(Multimode Interference，MMI)和两个干涉臂组成，两臂上分别有独立控制的热电极，通过硅的热光效应，可以实现对光的幅度和相位的二维调制[41]。2×2 MZI 的传递函数可以写为

$$H = \mathrm{j}\mathrm{e}^{\mathrm{j}\Delta}\begin{pmatrix}\sin\theta & \cos\theta\\ \cos\theta & -\sin\theta\end{pmatrix}\gamma \tag{1}$$

其中，θ 值决定 MZI 的分光比，Δ 值决定 MZI 的相移量，当 θ 值为 0 时，MZI 单元处于交叉状态，当 θ 值为 $\pi/2$ 时，MZI 单元处于直通状态，当 θ 值介于两者之间时，MZI 单元则会以特定分光比进行分光。通过调节 MZI 两臂的热电极，可以改变 MZI 中光流动的方向和相位。依据上述原理，利用该基本单元可以实现任意分光比，任意相移的光信号控制。

常见的网络结构有四边形拓扑、六边形拓扑和三角形拓扑，如图 1 所示[42]。其中，六边形器件在功耗、重构性上表现都比较优秀，因此受到许多学者的推崇。四边形结构的传播方向容易与传统的传输网络兼容，也是一种被广泛应用的结构，相比之下，三角形结构在重构多样性上存在一定的局限性。基本单元长度(Basic Unit Length，BUL)是描述结构与功能的重要单位，表示一个 MZI 的光学路径长度，BUL 越小，网络的光学路径越短，器件的自由光谱范围(Free Spectrum Range，FSR)越大。但是 BUL 的长度压缩存在一个极限，因此，网络结构的可重构性和性能存在一定的权衡关系。



(a) 六边形拓扑 (b) 四边形拓扑 (c) 三角形拓扑

图 1 三种不同类型的拓扑结构示意图

对于一个信号处理器来说，其 FSR 直接决定了最大信号处理带宽。两者之间的关系可以表示为 $\Delta\nu_{\mathrm{FSR}} = c/(L_{\mathrm{neff}} \cdot n_{\mathrm{g}})$，其中 n_{g} 为群折射率，L_{neff} 为 MZI 的两臂差或微环环长。通过计算可得知，当 MZI 两臂差或微环环长小于 2 mm 时，工作带宽可以达到 40 GHz 以上。这里，我们以 40 GHz 的处理带宽作为首要指标，对比了用六边形、四边形、三角形这三种拓扑结构分别构建 MZI 和微环结构时所需要的单元数，并计算了实现 FSR 的变换步长和最大 FSR，如表 1 所示。其中，n 代表了不同拓扑结构构建的回路中两臂差/环长的基本单元长度，以四边形网络为例，构建的 MZI 回路两臂差可以分别为 2BUL，4BUL，8BUL 等。可实现 FSR 的变换步长则体现了网格的空间调谐分辨率，即通过一次回路重构可变换的最小处理带宽。可以看出，六边形网络的重构性最高，因为其实现每种功能的 FSR 步长都是最小的。但是由于六边形网络构建微环需要的最小边长为 6BUL，使得其构建微环时实现的最高

FSR 为 29 GHz。因此，为了追求更高的 FSR，以实现更大的信号处理带宽，我们选择四边形网络构建最优网络拓扑结构作为可重构光子模拟处理芯片的基本网络形式。

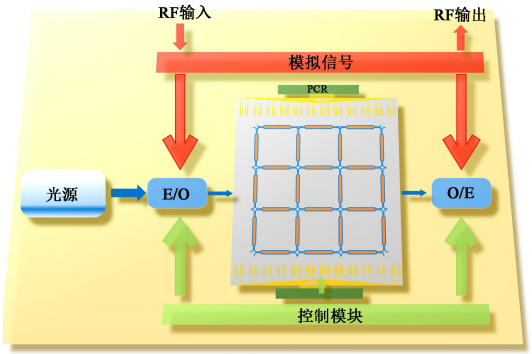
表 1　不同拓扑结构构建 MZI 和微环的参数对比

臂差/环长*	四边形	三角形	六边形
MZI	{2,4n}	3n	2n
微环	4n	3n	{6,10+2n}
可实现的 FSR 变换步长/GHz			
MZI	44	59	22
微环	44	59	22
可实现的最高 FSR/GHz			
MZI	88	59	88
微环	44	59	29

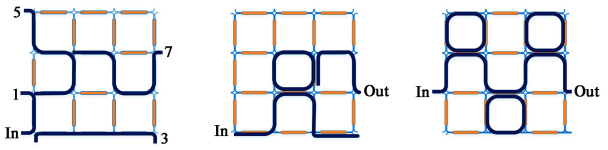
* $n\in N\{1,2,3,\cdots\}$，单位为 BUL，{}表示集合。

1.1.2　工作原理

基于这样的拓扑网络，可以重构多种光学回路，实现诸多功能，图 2(a)展示了这一构想。通过电光转换模块，模拟射频信号被加载到光载波上并输入拓扑芯片进行信号处理，芯片通过通用控制模块进行配置。输出信号经过光电转换模块进行输出。光子拓扑网络可以完成诸多模拟信号领域的运算，图 2(b)～(d)展示了三种典型应用，分别为微波光子波束成形、微波频率测量和微波光子滤波。我们所关注的微积分等模拟运算则可以通过利用网络构建最基本的 MZI 或微环来实现，不同功能对应的网络配置方式如图 3 所示。图 3(a)中展示了一个非平衡的 MZI 结构，其两臂之差为 2BUL，根据目前的工艺水平，这里认为每个单元长度约为 0.5 mm，因此这个 MZI 的 FSR 为 80 GHz。根据对应的光谱响应，此回路可以实现一个处理带宽为 40 GHz 的光学时域微分器。图 3(b)展示了一个全通型微环结构，其腔长为 4BUL，因此微环的 FSR 为 40 GHz。根据微环的相移特性，可以实现信号的希尔伯特变换。图 3(c)则展示了一个上传-下载微环，形成一个高 Q 微腔，因此其下载端的传输谱恰好是一个积分器的谱。

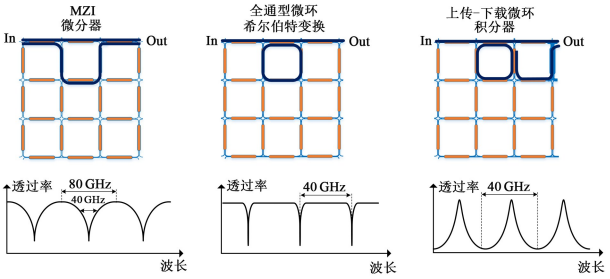


(a)　工作原理示意图



(b)　微波光子波束成形　　(c)　微波频率测量　　(d)　微波光子滤波

图 2　基于四边形拓扑网络的可重构模拟信号运算芯片

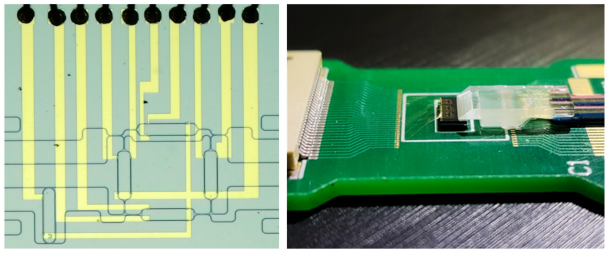


(a)　微分器　　(b)　希尔伯特变换　　(c)　积分器

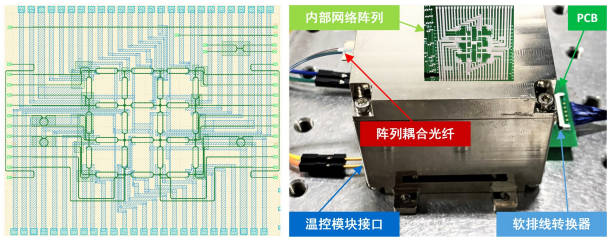
图 3　网络配置方式

1.2　光子模拟运算芯片

根据上述原理，我们已经在硅基(Silicon-On-Insulator，SOI)平台上由简到繁分别制作了 1×1 和 3×3 网络的可重构芯片，如图 4 所示。芯片上电极通过引线键合的方式连接到印刷电路板(Printed Circuit Board，PCB)，通过排线经软排线转接器连接到阵列电源进行调控，通过电脑设定不同的电压值，可以构建不同的光学网络回路，完成不同的信号运算功能，所有的光学输入输出使用垂直耦合的标准阵列光纤实现。对于 3×3 规模网络加装了温控模块，贴合在 PCB 板下方进行有效散热。



(a)　1×1 网络芯片的显微镜图　　(b)　芯片封装后照片

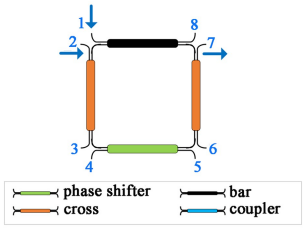


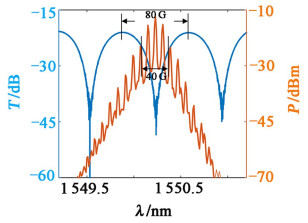
(c)　3×3 网络芯片的版图　　(d)　芯片封装后照片

图 4　硅基 1×1 和 3×3 可重构芯片

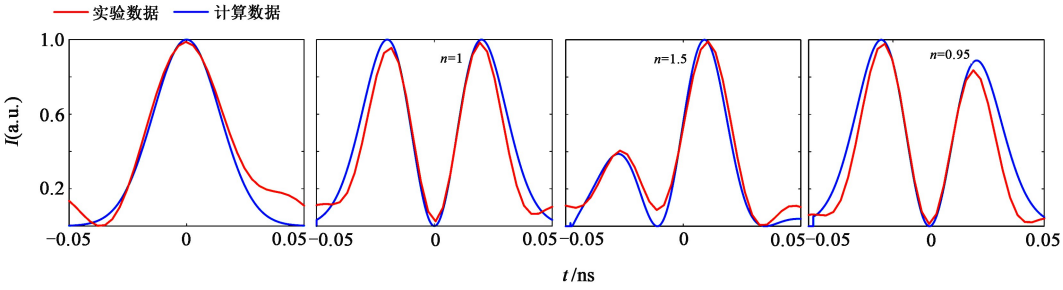
1.2.1 光子时域微分器

光学微分器可以通过构建一个 MZI 来实现，调节 MZI 结构两臂的分光比，MZI 的幅度响应和相位跳变也会改变，因此可以调节分数阶微分器的阶数。图 5(a)展示了微分器的等效网络配置，图 5(b)展示了微分器光谱(蓝线)和光源光谱(红线)，MZI 的 FSR 为 80 GHz，根据拟合结果，信号处理带宽约为 40 GHz。输入信号是一个半高全宽为 33 ps 的高斯脉冲，脉冲周期为 100 ps，如图 5(c)所示。然后，通过改变网络中 MZI 结构的分光比来调整其消光比，进而调整微分的阶数，从而得到了三个不同阶数的微分器。图 5(d)～(f)展示了 1 阶、1.5 阶、0.95 阶微分的结果，信号处理误差均小于 9%。





(a) 网络配置 (b) 微分器光谱(蓝线)和光源光谱(红线)

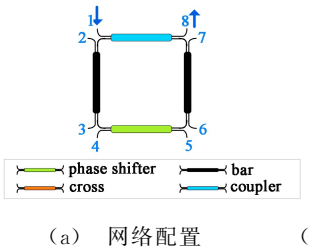


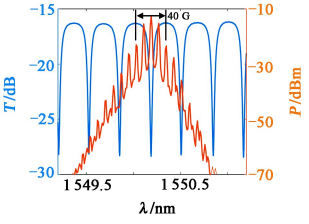
(c) 原始高斯脉冲 (d) 1 阶微分 (e) 1.5 阶微分 (f) 0.95 阶微分

图 5 时域微分器

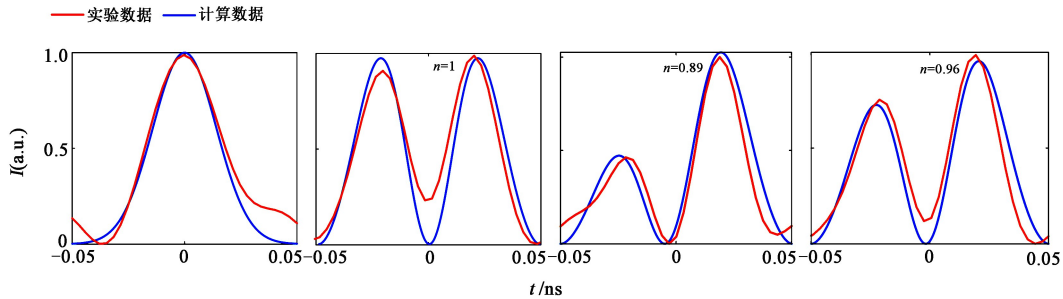
1.2.2 希尔伯特变换器

希尔伯特变换是一种对信号频谱的相位处理，在光学移相器、光学单边带调制、频谱测量等领域都具有重要的应用意义。希尔伯特变换对于正频率(角频率大于中心角频率)的信号有一个－90°的相移，对于负频率(角频率小于角频率)的信号有一个＋90°的相移。这与临界耦合微环的相移特性是吻合的。理想的希尔伯特变换的强度响应为全通的，





(a) 网络配置 (b) 微分器光谱(蓝线)和光源光谱(红线)



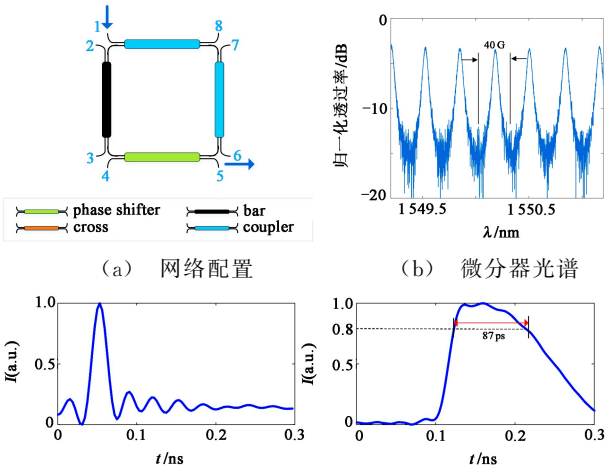
(c) 原始高斯脉冲 (d) 1 阶变换 (e) 0.89 阶变换 (f) 0.96 阶变换

图 6 希尔伯特变换

然而这在硬件上是难以实现的。通常与微分器类似，具有一个 V 形的陷波响应。因此，希尔伯特变换陷波滤波器（微环）的带宽越窄，变换的误差越小。图 6(a)展示了希尔伯特变换的网络配置，图 6(b)分别是希尔伯特变换光谱（蓝线）和光源光谱（红线），测量得到的微环 Q 值约为 25 833，处理带宽为微环的 FSR 40 GHz。这里的输入依然是半高全宽为 33 ps 的高斯脉冲，其时域波形如图 6(c)所示。经过 1 阶、0.89 阶、0.96 阶希尔伯特变换后的信号如图 6(d)～(f)所示，处理误差均小于 10%。

1.2.3　光子时域积分器

光学积分器是一种重要的光学计算器。它可以用于微分方程求解、光学存储、光学计数、光子模数转换等领域。光学滤波器的频谱响应是一个窄带的带通滤波器，通常通过高 Q 微腔来实现，Q 值越高，其积分窗口时间越长，越接近理想的积分器。使用脉宽为 44 fs 的锁模激光器作为超短脉冲光源，实现了一个 87 ps 的积分窗口，如图 7 所示。



(a)　网络配置　　(b)　微分器光谱

(c)　输入信号波形　　(d)　积分输出信号波形

图 7　时域积分器

本工作展示了可重构网络的信号处理功能，以 2×2 的 MZI 为光波导网络的基本单元，可以完成三种模拟光计算（微分、希尔伯特、积分）的切换，并且可以实现同功能的阶数调谐。更重要的是，该方案提供了一种四边形拓扑网络结构作为可重构光子模拟处理芯片的基本网络形式，基于该形式，还可以实现更多的微波光子应用，诸如微波波束成形、微波频率测量等。该信号处理芯片的可编程重构能力有助于提升光子芯片的环境生存能力，提高频谱利用效率，节省网络资源，实现光通信网络系统的智能化。

2　基于 MZI 网络的自配置光学矩阵运算芯片

自配置的光子器件被认为是可编程的光子网络发展的演化和发展趋势，对于可重构的光拓扑网络，由于涉及的电极众多，芯片上会存在一定程度的热串扰，同时监控芯片的实时状态并进行调控的难度也在增加。随着芯片规模的扩张，需要配置的参数数量也将成几何级增加，因此，一种智能化的可自配置的光学网络以及网络配置算法是必要的。

近年来，光学神经网络得到了飞速发展，将神经网络学习的思路和传统的光学可编程器件相结合，将有潜力实现智能化的、自配置的可编程光子器件。我们依然采用基于 MMI 的 3 dB 耦合器作为网络的基本单元，其中，最小单元 2×2 MZI 的传递函数可以表示为一个标准的旋转矩阵，而任意的酉变换矩阵可以通过 MZI 阵列的配置来实现，因此，MZI 网络阵列可以用来实现光学矩阵运算[43]。

本课题组在网络的智能化方面，提出了一种基于梯度下降算法的光学矩阵计算处理器，使用如图 8 的结构来构建任意 4×4 矩阵的格式。图中的部分(1)是四个并列的 MZI，控制分光，其传递矩阵可以写作一个特征值在对角线上的对角矩阵。部分(2)和部分(4)是前面构建的酉矩阵，用于实现奇异值分解。部分(3)则是奇异值变换中的对角矩阵，用于实现功率分配。

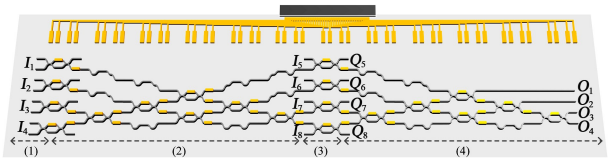
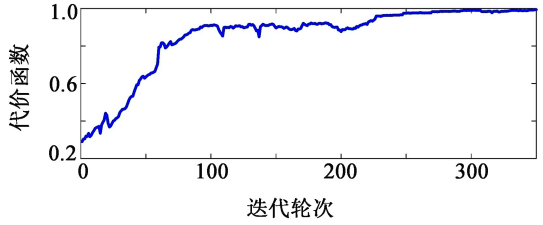


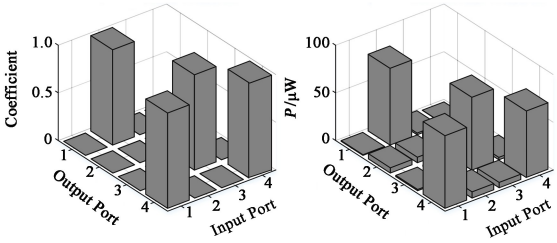
图 8　基于 MZI 网络的片上光学矩阵处理器的基本结构

该光学矩阵计算处理器能够进行基本矩阵计算，包括 $\boldsymbol{XB}=\boldsymbol{C}$，$\boldsymbol{AB}=\boldsymbol{X}$，$\boldsymbol{AX}=\boldsymbol{C}$，其中 $\boldsymbol{A}$，$\boldsymbol{B}$，$\boldsymbol{C}$ 为已知矩阵，$\boldsymbol{X}$ 为待解矩阵。图 9 展示了对方程 $\boldsymbol{XB}=\boldsymbol{C}$ 的求解过程，芯片的初始加载矩阵是完全随机的，所有移相器都在[0，2π)范围内随机取值。可以看到，初始情况下，代价函数(Cost Function，CF)约为 0.3，距离目标矩阵还很远。随着迭代次数的增加，用于评价此时矩阵加载情况的 CF 在训练过程中逐渐增加，最终非常接近理论最大值 1。对比训练后理论输出矩阵和实验输出矩阵，两者一致度很高。封装好后的芯片如图 10(a)所示，进一步地

验证了基于该芯片的光学 PageRank 算法的应用[44-45]。它提供了一种光学方法来实现矩阵计算和 PageRank 算法，实验结果表明具有人工智能算法的芯片在速度、可重构性、扩展性方面的优势极大。

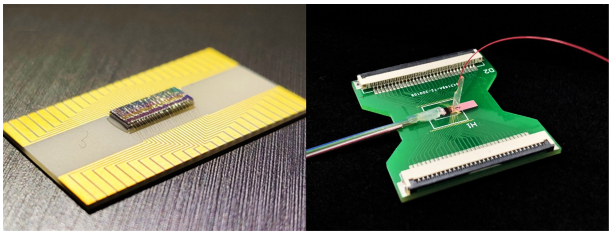


(a) 代价函数随着迭代轮次的变化情况



(b) 目标矩阵的柱状图 (c) 实验测量的传输矩阵柱状图

图 9 $\boldsymbol{XB}=\boldsymbol{C}$ 的求解过程



(a) 自配置矩阵运算芯片 (b) 4×4 微环阵列光学矩阵计算器

图 10 矩阵芯片及矩阵计算器实物图

3 基于微环阵列的光学矩阵运算芯片

前面已经介绍了两种以 MZI 为基本单元的网络结构，除了 MZI，微环作为结构紧凑的谐振器件，尺寸更小并且调谐功耗更低，是作为大规模集成阵列基本单元的另一个选择。微环是一种波长敏感的谐振器件，通过控制不同微环在不同波长上谐振，可以实现并行的矩阵运算。微环阵列的缺陷在于它是非相干网络，在光学计算上，没有相位信息，只有强度信息，不能直接进行复数运算。

本课题组以微环为基本单元提出了一种通用光学矩阵计算器，系统架构如图 11 所示。其中，电学控制模块负责所有电信号的收发，包括输入矢量的原始电信号、探测器(Photodetector，PD)阵列探测到的输出电信号以及所有数据的处理。在信号运算部分，输入是一个 $n\times1$ 的向量 $\boldsymbol{I}=[i_1,i_2,\cdots,i_n]^{\mathrm{T}}$，由一组包含不同波长 $\lambda_1,\lambda_2\cdots\lambda_n$ 的激光光源组成，在图中用不同的颜色表示不同的波长。这里使用 n 个强度调制器来分别调制这 n 个激光光源，由此构成输入向量。在片上，光源被分成相等的 n 份，然后被分别输入每一行。芯片上每一行都有 n 个微环，微环的谐振峰恰好分别对准输入的 n 个光源波长处，形成一一对应的运算关系。每个微环都只对应输入波长的其中一个，不会对其他波长的输入产生影响。每一行微环的公共直通端和公共下载端被一个平衡探测器同时探测，其差分结果构成输出向量的其中一个元素 o_i，n 行微环的输出组成输出向量 $\boldsymbol{O}=[o_1,o_2,\cdots,o_n]^{\mathrm{T}}$，可以写为 $O_{n\times1}=\boldsymbol{X}_{n\times n}\boldsymbol{I}_{n\times1}$。

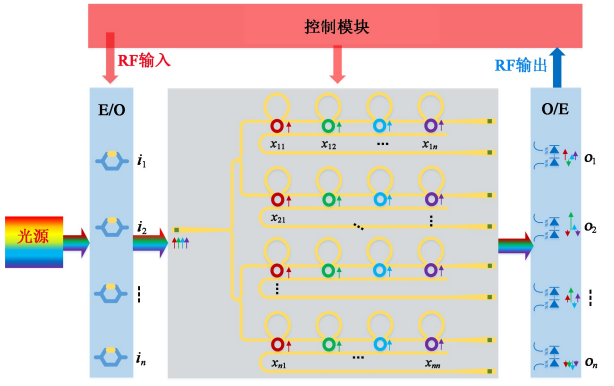


图 11 以微环为基本单元的矩阵运算器的系统示意图

图 10(b)展示了封装好的 4×4 微环阵列矩阵计算器，采用该微环阵列网络并借助于矩阵分块的方法，可以实现扩展到全实数域、全复数域以及更高维度的矩阵运算。同时基于该系统，还可以实现矩阵乘法、信号变换、图像处理等方面的应用。图 12 展示了矩阵计算器执行卷积运算的原理。首先，在数据预处理阶段，需要将输入图像重新排列为三个

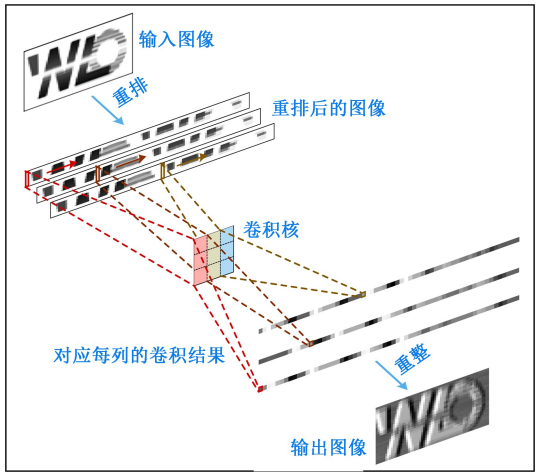


图 12 图像处理卷积运算的原理

输入图像矩阵，元素恰好分别对应 3×3 大小的卷积核的每一列，在一个实验中卷积核是固定的。随着原始图像的串行输入，卷积核会在原始图像上平移，由此可以得到一组串行的输出矩阵，其值为输入原始图像和卷积核的向量积。最后，按照拆分的规则对图像像素进行还原，就可以得到处理后的图像。图 13 展示了图像处理实验的结果，采用四种不同的卷积核，可以执行不同的图像处理函数，实现包括动态模糊、锐化、边缘提取等图像处理功能。可用于人工智能硬件加速的片上光子卷积加速器为波导网络提供了全新的应用场景。

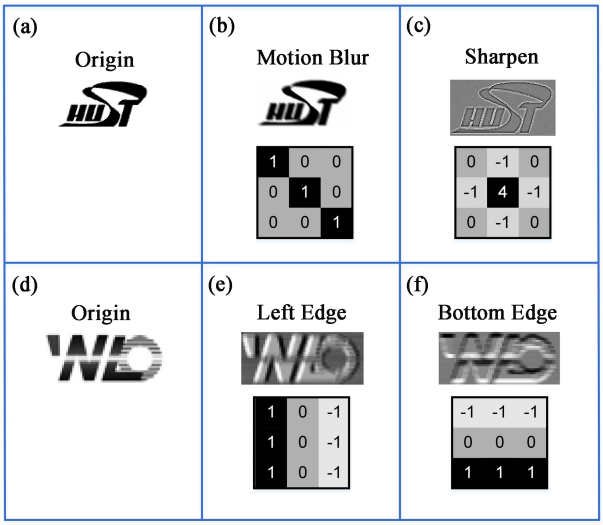


图 13　不同卷积核图像处理卷积运算的结果。(a)原始图像，(b)动态模糊，(c)锐化，(d)原始图像，(e)左边缘提取，(f)下边缘提取

4　展望

可重构的集成微波光子网络在光通信、光计算和人工智能领域都存在巨大的应用前景，未来微波光子的发展将进一步与人工智能技术交叉融合，一方面是对于功能可重构的微波光子集成芯片，可以利用人工智能算法来进一步优化信号处理功能、运算速率或实现自主学习，另一方面也可以利用光子网络取代传统电子计算来加速实现卷积神经网络、衍射神经网络等人工智能领域的应用。

参考文献：

[1] Zhu B, Tang J, Zhang W, et al. Broadband instantaneous multi-frequency measurement based on a Fourier domain mode-locked laser[J]. IEEE Trans. on Microwave Theory and Techniques, 2021, 69(10): 4576-4583.

[2] Capmany J, Novak D. Microwave photonics combines two worlds[J]. Nature Photonics, 2007, 1(6): 319-330.

[3] Marpaung D, Roeloffzen C, Heideman R, et al. Integrated microwave photonics[J]. Laser & Photonics Reviews, 2013, 7(4): 506-538.

[4] Fandiño J S, Muñoz P, Doménech D, et al. A monolithic integrated photonic microwave filter[J]. Nature Photonics, 2016, 11(2): 124-129.

[5] Zou X, Lu B, Pan W, et al. Photonics for microwave measurements[J]. Laser & Photonics Reviews, 2016, 10(5): 711-734.

[6] Pan S, Zhang Y. Microwave photonic radars [J]. J. of Lightwave Technol., 2020, 38(19): 5450-5484.

[7] Serafino G, Maresca S, Porzi C, et al. Microwave photonics for remote sensing: From basic concepts to high-level functionalities[J]. J. of Lightwave Technol., 2020, 38(19): 5339-5355.

[8] Zhuang L, Roeloffzen C G H, Hoekman M, et al. Programmable photonic signal processor chip for radiofrequency applications[J]. Optica, 2015, 2(10): 854.

[9] Liu W, Li M, Guzzon R S, et al. A fully reconfigurable photonic integrated signal processor[J]. Nature Photonics, 2016, 10(3): 190-195.

[10] Pérez D, Gasulla I, Crudgington L, et al. Multipurpose silicon photonics signal processor core [J]. Nature Communications, 2017, 8(1): 1925.

[11] Bogaerts W, Perez D, Capmany J, et al. Programmable photonic circuits[J]. Nature, 2020, 586(7828): 207-216.

[12] Perez-Lopez D, Lopez A, DasMahapatra P, et al. Multipurpose self-configuration of programmable photonic circuits[J]. Nature Communications, 2020, 11(1): 6359.

[13] Zhang W, Yao J. Photonic integrated field-programmable disk array signal processor[J]. Nature Communications, 2020, 11(1): 406.

[14] Toole R, Tait A N, Ferreira de Lima T, et al. Photonic implementation of spike-timing-dependent plasticity and learning algorithms of biological neural systems[J]. J. of Lightwave Technol., 2016, 34(2): 470-476.

[15] Harris N C, Steinbrecher G R, Prabhu M, et al. Quantum transport simulations in a programmable nanophotonic processor[J]. Nature Photonics, 2017, 11(7): 447-452.

[16] Shen Y, Harris N C, Skirlo S, et al. Deep learning with coherent nanophotonic circuits[J]. Nature Photonics, 2017, 11(7): 441-446.

[17] Feldmann J, Youngblood N, Wright C D, et al. All-optical spiking neurosynaptic networks with self-learning capabilities [J]. Nature, 2019, 569(7755): 208-214.

[18] Inagaki T, Inaba K, Leleu T, et al. Collective and synchronous dynamics of photonic spiking neurons [J]. Nature Communications, 2021, 12(1): 2325.

[19] Xie Y, Geng Z, Zhuang L, et al. Programmable optical processor chips: toward photonic RF filters with DSP-level

flexibility and MHz-band selectivity[J]. Nanophotonics, 2017, 7(2): 421-454.

[20] Qiu H, Zhang X, Zhou F, et al. A continuously tunable sub-gigahertz microwave photonic bandpass filter based on an ultra-high-*Q* silicon microring resonator[J]. J. of Lightwave Technol., 2018, 36(19): 4312-4318.

[21] Jiang H, Marpaung D, Pagani M, et al. Wide-range, high-precision multiple microwave frequency measurement using a chip-based photonic Brillouin filter[J]. Optica, 2016, 3(1): 30.

[22] Zhang J, Gao L, Yao J. Tunable optoelectronic oscillator incorporating a single passband microwave photonic filter[J]. IEEE Photon. Technol. Lett., 2014, 26(4): 326-329.

[23] Ferrera M, Park Y, Razzari L, et al. On-chip CMOS-compatible all-optical integrator [J]. Nature Communications, 2010, 1(3): 29.

[24] Li M, Yao J. Multichannel arbitrary-order photonic temporal differentiator for wavelength-division-multiplexed signal processing using a single fiber Bragg grating[J]. J. of Lightwave Technol., 2011, 29(17): 2506-2511.

[25] Xu X, Wu J, Shoeiby M, et al. Reconfigurable broadband microwave photonic intensity differentiator based on an integrated optical frequency comb source [J]. APL Photonics, 2017, 2(9): 096104.

[26] Zhu T, Zhou Y, Lou Y, et al. Plasmonic computing of spatial differentiation[J]. Nature Communications, 2017, 8: 15391.

[27] Tan M, Xu X, Corcoran B, et al. RF and microwave fractional differentiator based on photonics[J]. IEEE Trans. on Circuits and Systems II: Express Briefs, 2020, 67(11): 2767-2771.

[28] Tan M, Mitchell A, Moss D J, et al. Microwave and RF photonic fractional Hilbert transformer based on a 50 GHz Kerr micro-comb[J]. J. of Lightwave Technol., 2019, 37(24): 6097-6104.

[29] Tang Z, Pan S. A filter-free photonic microwave single sideband mixer [J]. IEEE Microwave and Wireless Components Lett., 2016, 26(1): 67-69.

[30] Perez-Lopez D, Gutierrez A M, Sanchez E, et al. Integrated photonic tunable basic units using dual-drive directional couplers[J]. Opt. Express, 2019, 27(26): 38071-38086.

[31] Wang M, Ribero A, Xing Y, et al. Tolerant, broadband tunable 2×2 coupler circuit[J]. Opt. Express, 2020, 28(4): 5555-5566.

[32] Teng M, Fathpour S, Safian R, et al. Miniaturized silicon photonics devices for integrated optical signal processors[J]. J. of Lightwave Technol., 2020, 38(1): 6-17.

[33] Zou X, Zou F, Cao Z, et al. A multifunctional photonic integrated circuit for diverse microwave signal generation, transmission, and processing [J]. Laser & Photonics Reviews, 2019, 13(6): 1800240.

[34] Marpaung D, Yao J, Capmany J. Integrated microwave photonics[J]. Nature Photonics, 2019, 13(2): 80-90.

[35] Zhang W, Yao J. Silicon photonic integrated optoelectronic oscillator for frequency-tunable microwave generation[J]. J. of Lightwave Technol., 2018, 36(19): 4655-4663.

[36] Spencer D T, Drake T, Briles T C, et al. An optical-frequency synthesizer using integrated photonics[J]. Nature, 2018, 557(7703): 81-85.

[37] Dai D, Yin Y, Yu L, et al. Silicon-plus photonics[J]. Frontiers of Optoelectronics, 2016, 9(3): 436-449.

[38] Bogaerts W, Li Y, Pathak S, et al. Integrated design for integrated photonics: From the physical to the circuit level and back[J]. Proc. of SPIE, 2013, 8781: 2.

[39] Capmany J, Pérez D. Programmable Integrated Photonics for Quantum Systems[M]. Oxford: Oxford University Press, 2020.

[40] Harris N C, Carolan J, Bunandar D, et al. Linear programmable nanophotonic processors[J]. Optica, 2018, 5(12): 1623.

[41] Thomson D J, Hu Y, Reed G T, et al. Low loss MMI couplers for high performance MZI modulators[J]. IEEE Photon. Technol. Lett., 2010, 22(20): 1485-1487.

[42] Perez D, Gasulla I, Capmany J, et al. Reconfigurable lattice mesh designs for programmable photonic processors[J]. Opt. Express, 2016, 24(11): 12093-12106.

[43] Reck M, Zeilinger A, Bernstein H J, et al. Experimental realization of any discrete unitary operator[J]. Phys. Rev. Lett., 1994, 73(1): 58-61.

[44] Zhou H, Zhao Y, Wang X, et al. Self-configuring and reconfigurable silicon photonic signal processor[J]. ACS Photonics, 2020, 7(3): 792-799.

[45] Zhou H, Zhao Y, Xu G, et al. Chip-scale optical matrix computation for pagerank algorithm[J]. IEEE J. Sel. Top. Quantum Electron., 2020, 26(2): 1-10.

作者简介：

姚雨含(1994—)，女，河北省石家庄市人，光学工程专业博士研究生，主要从事硅基微波光子学研究；

董建绩(1979—)，男，博士，教授，博士生导师，从事光计算芯片、集成微波光子学的研究；2008 至 2010 年在剑桥大学从事博士后研究；2020 年爱思唯尔中国高被引学者；2021 年获得湖北省自然科学一等奖；已在 Nature Communications 等国际权威期刊发表学术论文 100 余篇，撰写英文书籍章节 1 篇，主持国家自然科学基金项目 6 项、重点研发计划课题 1 项；担任期刊《Frontier of Optoelectronics》执行主编和《IET Optoelectronics》副主编。