

用于模拟光学计算的超材料

(中国科学院物理研究所 汪力 编译自 Matteo Rini. *Physics*, March 29, 2024)

基于超材料的新型架构使用光执行计算任务，是构建可大规模生产、可重新编程的有前途的计算平台。

有别于使用0和1的数字计算，模拟计算机使用连续变量执行计算任务。一个有前景的方向是发展用光而不是电流处理信息的模拟光学计算机。正如宾夕法尼亚大学的Nader Engheta在2024年美国物理学会三月会议上报道的那样，被称为超材料的复合介质为构建模拟光学计算机提供了一个强大的平台，不仅可以大规模生产并与硅电子器件集成，而且具有实时重新编程以执行不同计算任务的能力。基于超材料的模拟光学计算机有朝一日可能会比传统计算机更快、以更低功耗执行某些任务。

在Engheta和合作者于2014年提出的第一个方案中，将电磁波作为输入函数，并通过与超材料的相互作用对其进行操作，使输出波对应于输入的所需数学变换，可以实现一系列数学运算，包括微分、积分和卷积。5年后，Engheta团队在

微波波长进行了实验验证，所涉及的超材料有几个输入和输出端口，通过反馈回路中的波导连接，如图所示。对于给定的输入，设备的输出是Fredholm积分方程的解，该方程广泛用于流体力学、天线设计和量子力学微扰理论等领域。为了确定可完成所需数学计算的超材料结构，研究人员使用了“逆向设计”，这是一种解决优化问题的迭代方法。由此得到的超材料具有不同寻常的“瑞士奶酪”结构：由气孔、聚苯乙烯和微波吸收材料等具有不同介电性质的材料在空间构成非均匀的岛状分布。

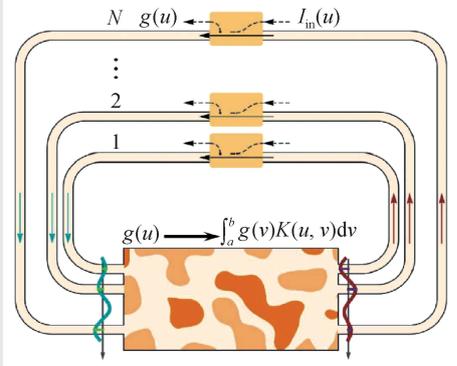
由于微波的波长特征将导致庞大而不切实际的器件尺寸，将类似的概念扩展到光学频率是一种自然的选择。这时，可使用亚波长超材料薄片，即超表面，来操纵通过薄片传输的光。Engheta和他的同事通过逆向设计并制造了一个微米大小

的芯片，利用一组波导将光送入和传出一个包含瑞士奶酪状超材料的平面腔（这种结构的器件可以直接从商业公司订购）。该光学芯片进行的是更简单的数学运算，将矢量乘以矩阵，这是神经网络等人工智能工具中的常用操作。为了完成求解方程等更复杂的任务，需要加入将输出连接到输入的反馈波导，就像在原先微波系统中所

做的那样，这是该团队计划将在下一代芯片中解决的工程挑战。

另一方面，Engheta等正在利用低频下工作的原理验证设备来提高模拟计算机的数学能力。其最新结果增加了一个重要的新功能：可重新配置性，即方程求解器可以重新编程以执行不同的数学运算。该方案由5×5模块的射频(45 MHz)元件阵列组成，如放大器和移相器，可以通过控制每个元件的参数来重新配置该设备。研究人员演示了让他们的机器如何解决两个不同的问题：找到一组多项式的根和进行超材料结构的逆设计。这两个问题都是非静态的，也就是说，它们需要执行一系列步骤，每个步骤都要进行不同的数学运算。Engheta设想，这种可重新配置的功能最终可以转移到硅光子芯片上。一种可能方法是在器件的波导顶部沉积一层具有二维结构的“相变”材料。当加热时，这种材料会改变其折射率，影响光在波导中的传播，从而影响所编码的数学操作。

可编程超材料硅光子学芯片将为模拟光学计算带来福音，它以光速处理信息，所需能量仅为传统数字处理器解决相同任务所需能量的一小部分。Engheta说，“在这里，光穿过波导迷宫，当它出来时，你一次就能得到答案。”此外，这种设备将具有隐私优势，因为它不需要将信息存储到潜在可破解的内存内这一中间步骤。



方程求解方案示意图。执行模拟计算的核心部分由几个波导连接的超材料“瑞士奶酪”块组成