
如何优化液态状态机储备池可分性？面向神经形态硬件的时空分类 MDPI JLPEA

作者：writer 来源：科学网

本文原地址：<https://www.iikx.com/news/progress/42367.html>

本文仅供学习交流之用，版权归原作者所有，请勿用于商业用途！

如何优化液态状态机储备池可分性？面向神经形态硬件的时空分类 MDPI

JLPEA。论文标题：Optimizing Reservoir Separability in Liquid State Machines for Spatio-Temporal Classification in Neuromorphic Hardware

论文链接：<https://www.mdpi.com/2079-9268/15/1/4>

期刊名：Journal of Low Power Electronics and Applications

期刊主页：<https://www.mdpi.com/journal/jlpea>

一、引言

神经形态计算依托仿生脉冲神经网络，为时空动态数据的高效处理提供新思路，液态状态机作为储备池计算的经典模型，非常适配神经形态硬件低功耗、实时处理的应用需求。但在实际部署中，储备池可分性不足是制约LSM分类性能的关键瓶颈：现有提升可分性的手段大多依赖启发式调参，泛化能力有限；同时很少研究实现单储备池+多读出模型完成多任务处理，限制了LSM在硬件端的落地。

来自墨西哥瓜纳华托大学、西班牙塞维利亚微电子研究所等机构的研究团队，针对上述痛点开展研究，提出基于储备池可分性优化的液态机?神经形态硬件时空分类方法。该方法采用粒子群优化对储备池参数、神经元动力学、网络连接模式做系统性调优，在提升储备池状态可分性的同时兼顾神经形态硬件的资源约束。

研究分别在NEST仿真软件与SpiNNaker神经形态硬件平台上，对频率识别、多类别模式识别基准任务开展验证。实验结果表明，多目标优化方案整体优于单目标优化；SpiNNaker硬件实现与软件仿真精度无统计学显著差异，硬件端最高分类精度可达99.52%。并且SpiNNaker芯片功耗仅1-5W，对比传统计算系统实现巨大能耗缩减。该方案可无缝迁移至多款主流神经形态硬件，在脑机接口、生物医学信号分析、智能监控等时空信号处理场景具备应用潜力。

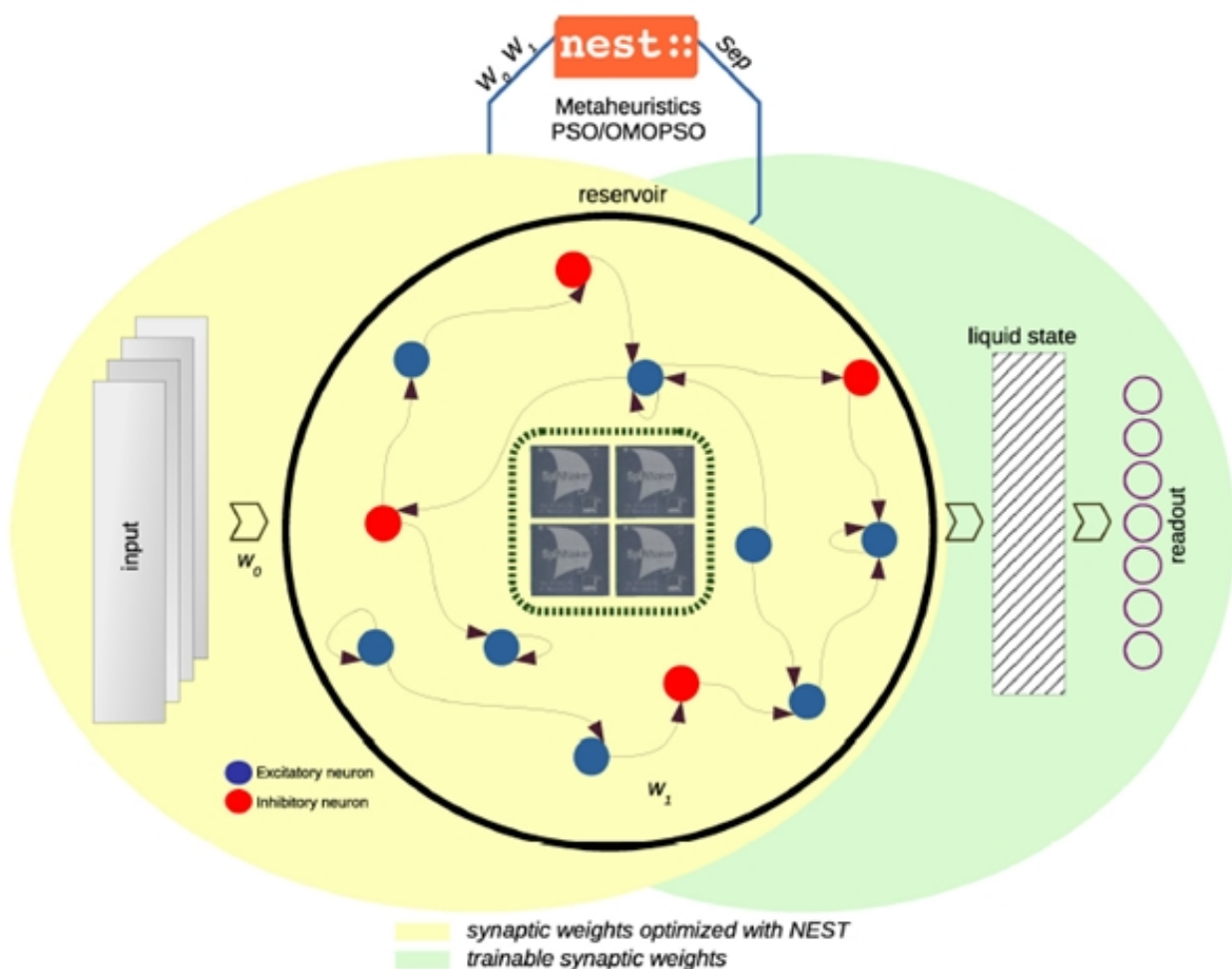


图1 针对液态状态机及其组件调整后的拟议方法示意图

二、研究过程与结果

该工作以提升液态状态机LSM储备池可分性为核心目标，选用粒子群优化 PSO 以及多目标粒子群算法OMOPSO开展参数寻优。由于脉冲神经元输出不可求导，无法使用梯度类算法，元启发式的PSO算法成为合适选择。

研究定义了可分性评价指标，通过类间距离与类内方差的比值衡量储备池区分不同输入样本的能力。优化采取离线模式：先在NEST仿真环境下，使用FR5频率识别、PR4/PR8/PR12 模式识别4套基准数据集完成调参，对储备池神经元动力学、突触权重、网络连接模式进行迭代优化。得到最优网络参数后，借助PyNN接口，将16位定点量化的突触权重迁移部署到 SpiNNaker-3 神经形态硬件板卡。研究同时完成单目标独立任务优化、多目标联合多任务优化两组实验，最后使用非参数统计检验，对比软件仿真与硬件平台的性能差异。

采用单目标PSO对各项任务独立优化时，NEST仿真下精度为81.09% 95.52%，迁移至SpiNNaker硬件后精度达到86.20%-97.70%，优化后储备池可分性得到增强，神经元放电模式更加规整，硬件单芯片功耗仅1-5W，相较传统系统功耗优势突出。使用OMOPSO多目标优化能够用一套储备池同时处理多项任务，综合表现优于单目标方案，在SpiNNaker平台精度最高可达94.42% 99.52%，软硬件性能差距进一步缩小，仅少数任务受多任务均衡约束出现小幅性能损耗，但有效降低

了多任务的整体训练开销。

Wilcoxon统计检验表明，仿真环境与硬件平台的分类精度不存在显著统计学差异，模型可以实现仿真到硬件的稳定迁移，该方案还能够适配Loihi、TrueNorth等其他神经形态硬件，在脑机接口、生物医学信号处理等时空分类场景具备应用价值。

三、研究总结

本研究借助粒子群优化提升液态状态机的储备池可分性，在 NEST 仿真与 SpiNNaker 神经形态硬件完成验证。多目标优化综合性能优于单目标优化，统计检验证实仿真模型迁移至硬件不会产生显著精度下降，SpiNNaker 同时具备突出的低功耗优势。该方案不依赖特定硬件架构，能够移植到 TrueNorth、Loihi 等神经形态平台，在生物医学信号处理、智能监控、脑机接口等时空信号处理场景拥有应用潜力。

Alvarez-Canchila, O.I.; Espinal, A.; Patiño-Saucedo, A.; Rostro-Gonzalez, H. Optimizing Reservoir Separability in Liquid State Machines for Spatio-Temporal Classification in Neuromorphic Hardware. J. Low Power Electron. Appl. 2025, 15, 4. <https://doi.org/10.3390/jlpea15010004>

期刊介绍

主编：Davide Bertozzi, University of Manchester, UK

Journal of Low Power Electronics and Applications (IF 1.7, ISSN 2079-9268) 是一个国际性、经过严格同行评审的开放获取学术期刊。期刊旨在发表低功耗电子方向的创新研究和重要成果。期刊范围涵盖的主题包括但不限于新兴电子器件和工艺技术、模拟、数字和混合信号VLSI电路、架构和系统设计、SoC和嵌入式系统、能量采集和无电池系统、综合和优化工具，以及用于低功耗设计的CAD工具和方法。目前被Scopus、ESCI (Web of Science) 等数据库收录。

2025 Impact Factor : 1.7

2025 CiteScore : 4.6

Time to First Decision : 21.8 Days

Acceptance to Publication : 4.8 Days

来源：Journal of Low Power Electronics and Applications

更多 科学进展 请访问 <https://www.iikx.com/news/progress/>

本文版权归原作者所有，请勿用于商业用途，[爱科学iikx.com](https://www.iikx.com)转发