

基于神经网络的高时间分辨ECAL读出电 子学研究

艾鹏程 (汇报人) , 邓智, 王义, 冉鑫驰, 李昱磊, 郎子健

2022年8月10日星期三

中国物理学会高能物理分会第十一届全国会员代表大会暨学术年会

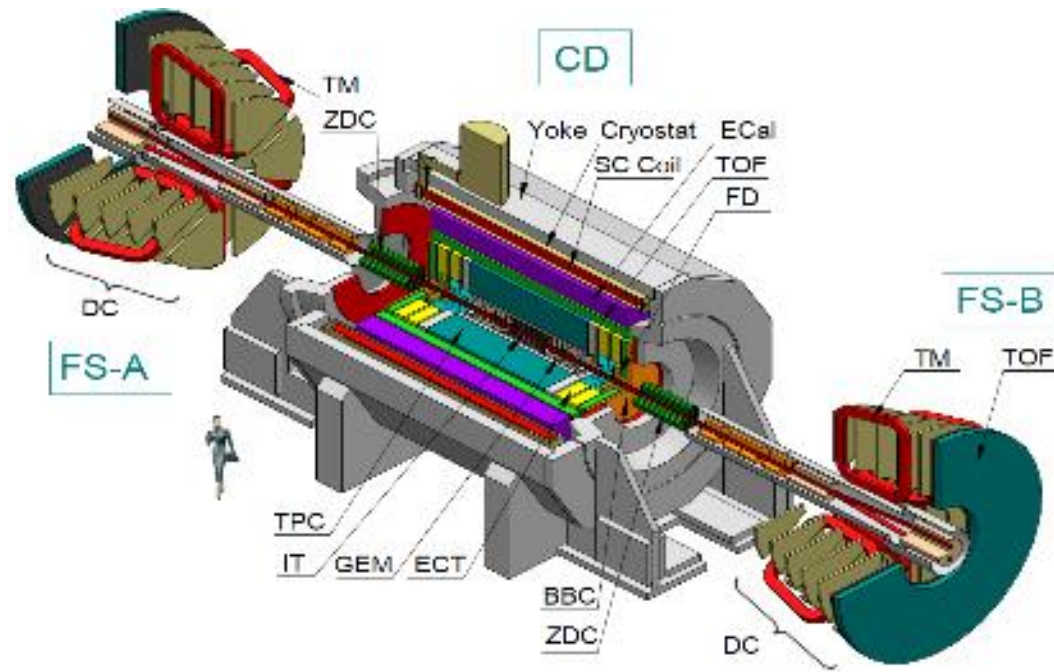
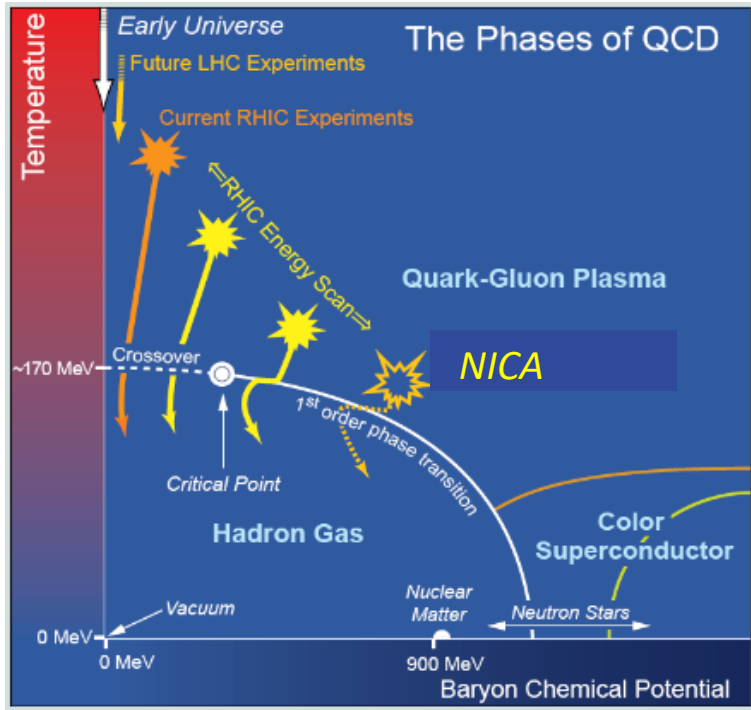


报告内容

- NICA-MPD实验和电磁量能器（ECAL）介绍
- ECAL现有读出电子学系统和神经网络性能的仿真研究
- 基于神经网络的高时间分辨ECAL读出电子学研究进展
- 总结和下一步研究计划



NICA-MPD实验

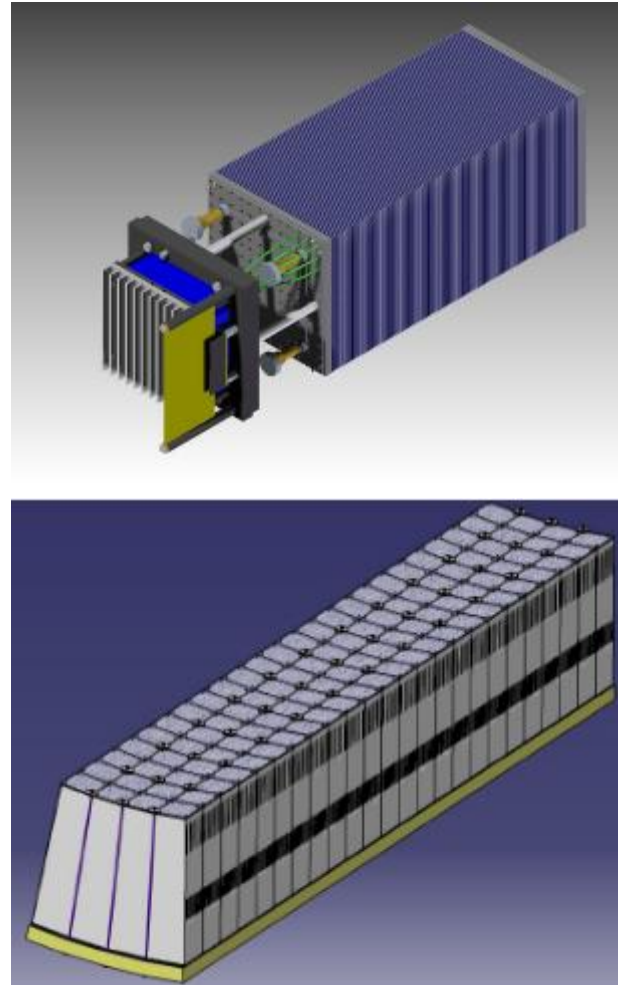
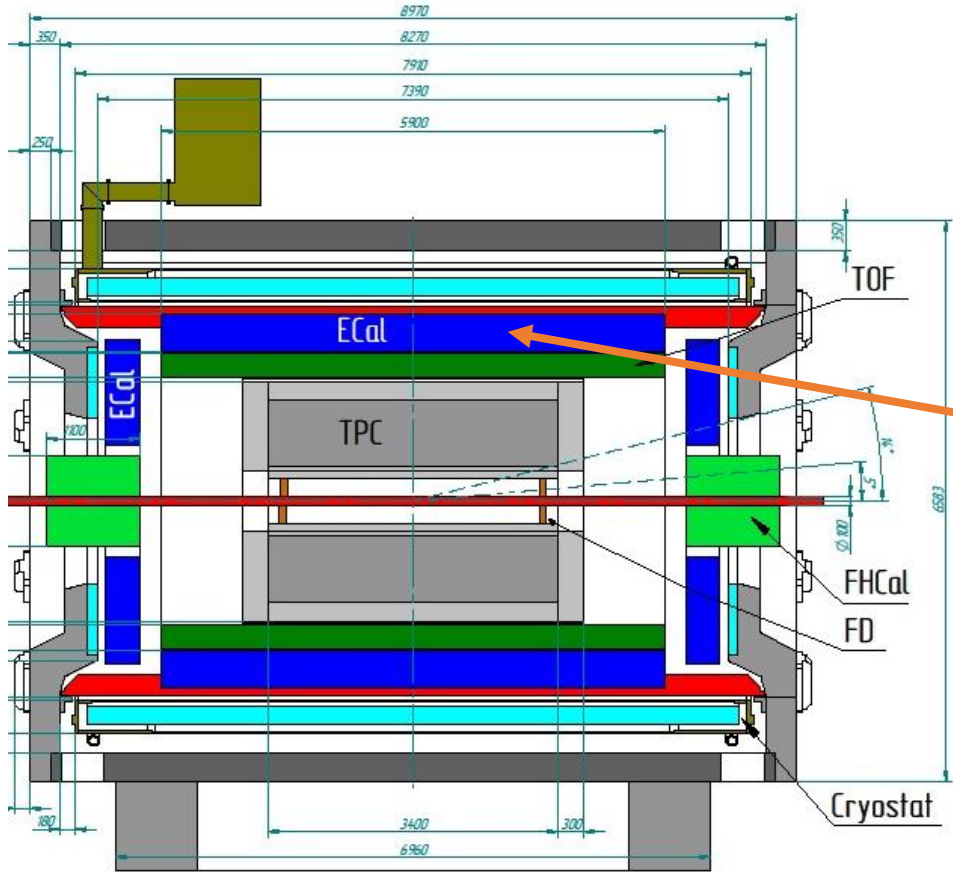


- 主要研究物理内容:
 - 解禁闭, 手性对称恢复, 相变
 - QCD临界点
 - 重子物质

Investigation of **hot and dense baryonic matter** is a challenging task in modern physics. It provides information on the in-medium properties of hadrons and nuclear matter equation of state, allows a search for possible manifestations of the **deconfinement** and/or **chiral symmetry restoration, phase transition, mixed phase and critical end point**, and sheds light on the evolution of the Early Universe and formation of neutron stars.



电磁量能器ECAL



- Tower -> Half Module -> Module -> Sector
- Tower: Shashlik结构, 220层铅 (0.3mm) 和闪烁体 (1.5mm) 交替, 长度 ~35 cm (~12 辐射长度)
- 信号读出: 波长平移光纤 + 硅光电倍增管 (SiPM, MAPD)

ECAL现有读出电子学

探测器主要参数:

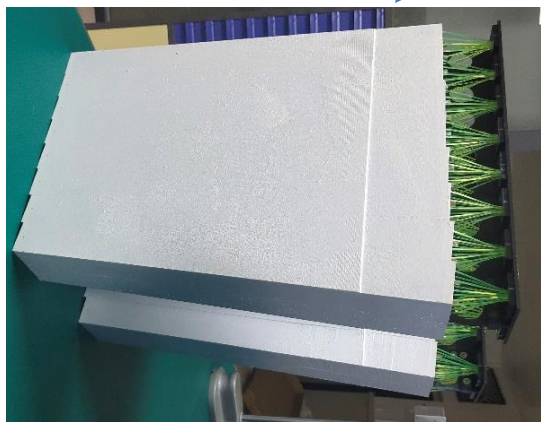
- ❑ 截面积: $40 \times 40 \text{ mm}^2$
- ❑ WLS光纤数: 16根
- ❑ 堆叠层数: 220层
- ❑ 铅片厚度: 0.35 mm
- ❑ 闪烁体厚度: 1.5 mm
- ❑ 辐射长度: $11.8 X_0$

MPPC
S13360-6025PE



SiPM

耦合



Shashlik探测器

SiPM主要参数:

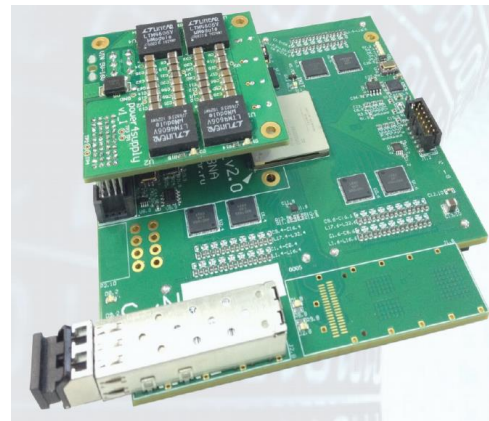
- ❑ 像素尺寸: 25 μm
- ❑ 光敏面积: $6 \times 6 \text{ mm}^2$
- ❑ 像素数量: 57600
- ❑ 填充因子: 47%

焊接



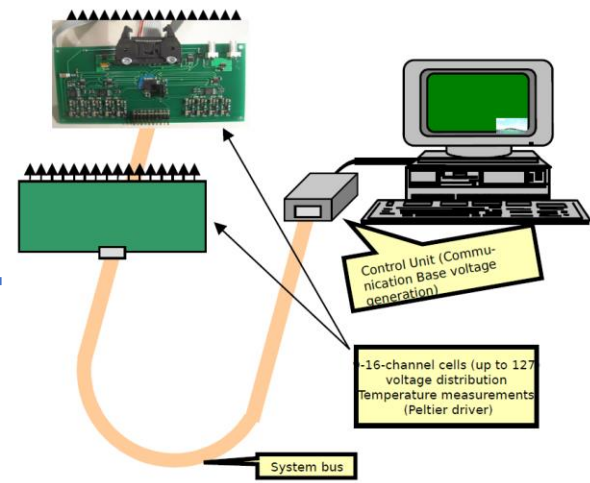
前放板PCB

电缆连接



64路ADC
采样板

提供偏压



高压系统

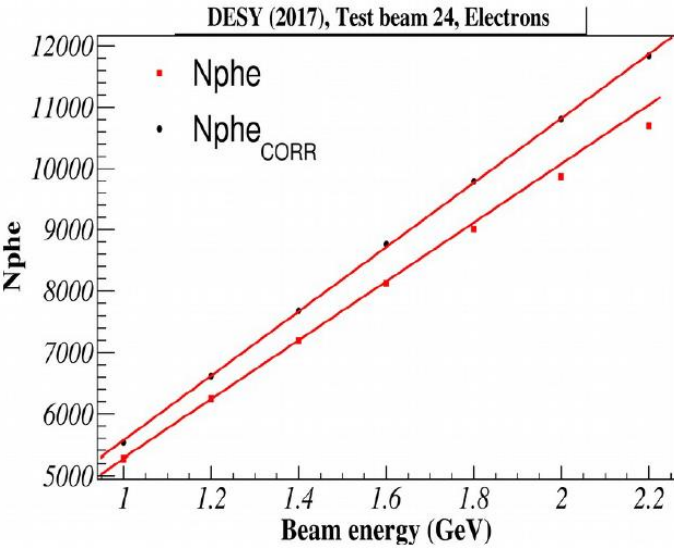
光纤传出 → 事件重建

前端电子学主要参数:

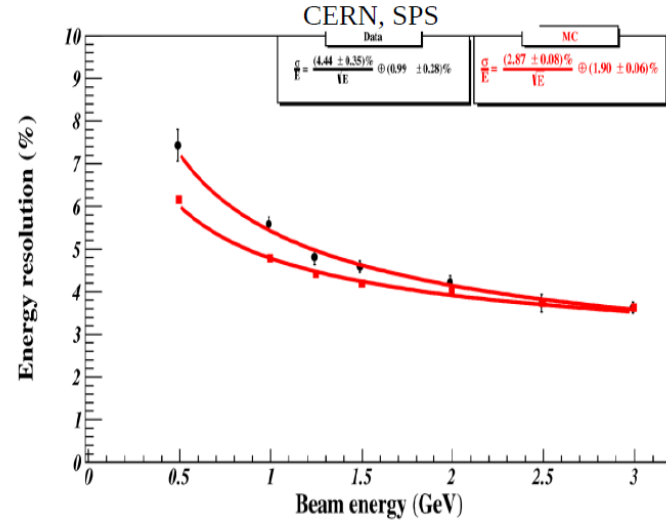
- ❑ 64通道, 12比特, 62.5 M采样率ADC
- ❑ 通过光纤链路进行数据读出、触发和定时
- ❑ 功耗约为250 mW/通道, 需要专门的水冷系统进行散热



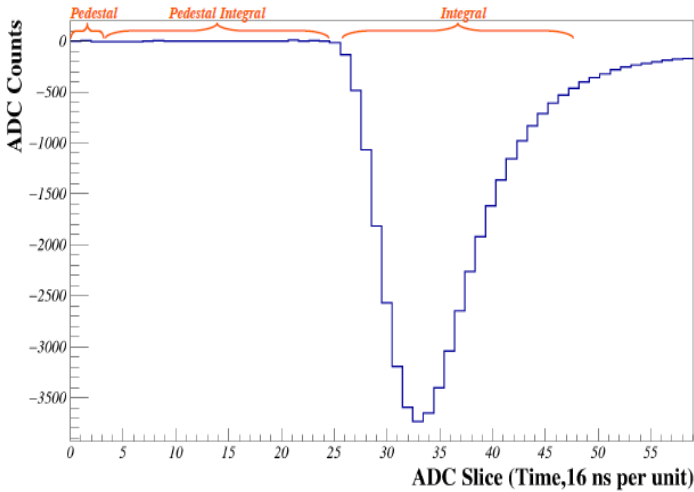
现有探测器和读出电子学的性能



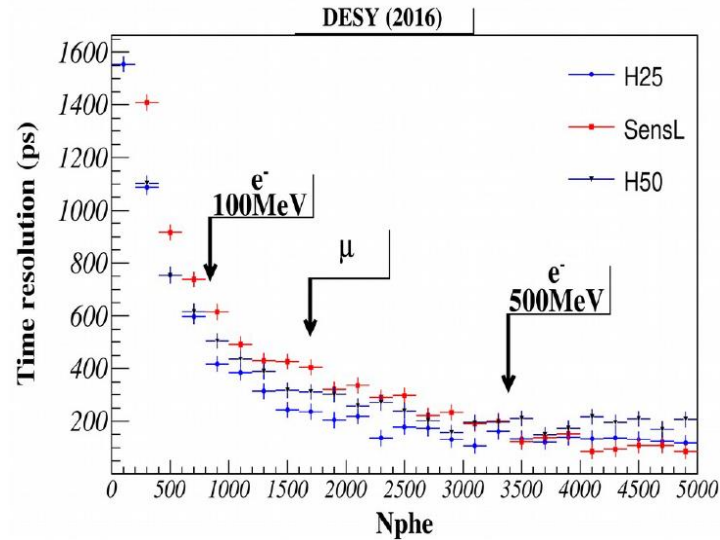
1 GeV电子入射时，可产生5k左右光电子



能量分辨：
1 GeV电子入射时，约为5%



采样点波形
@62.5 MHz



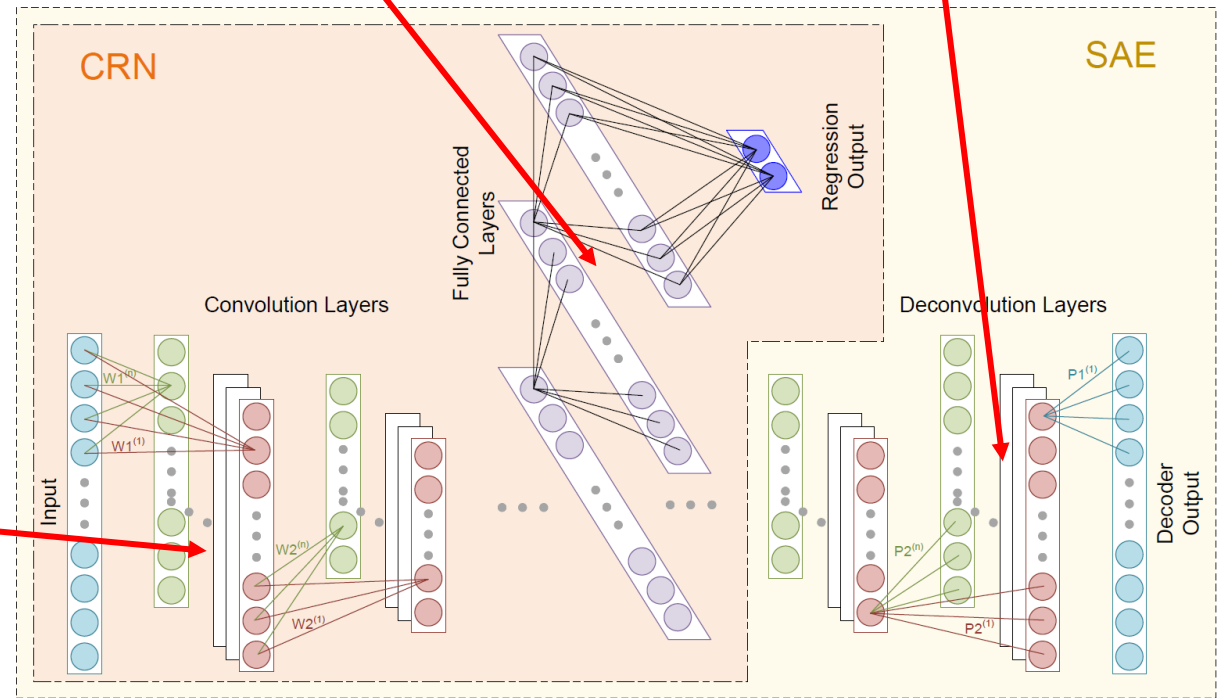
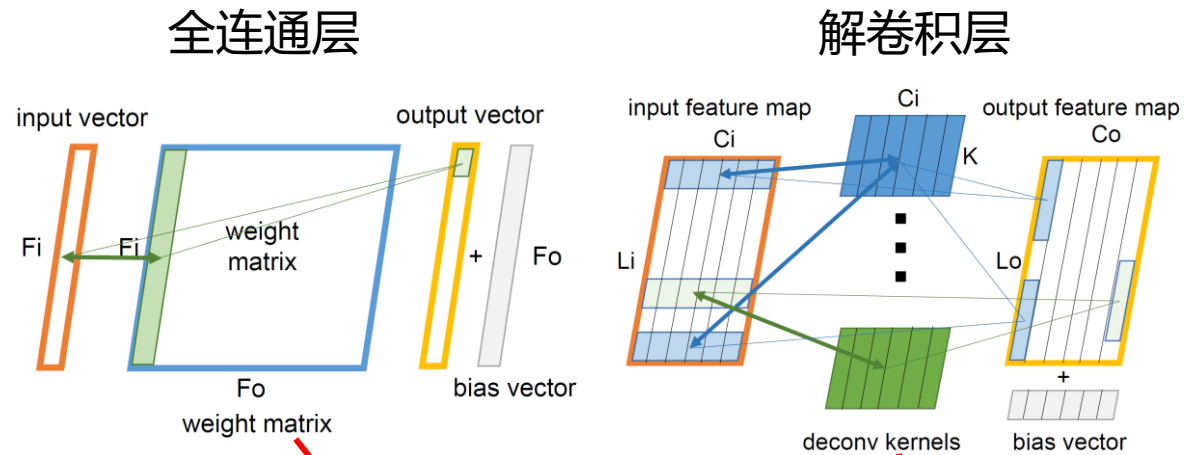
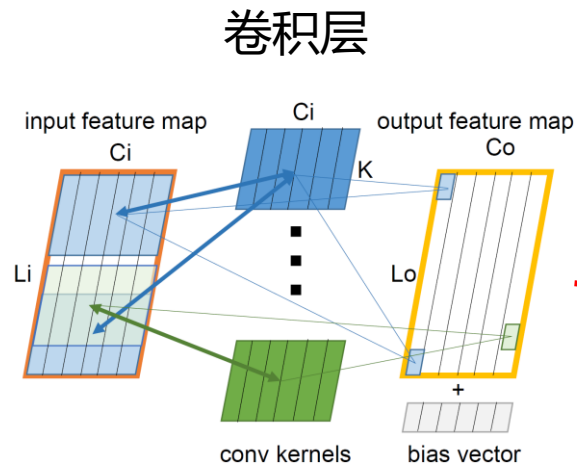
时间分辨：
1 GeV电子入射时，好于200 ps



神经网络用于定时和特征提取

- 神经网络具有良好的非线性拟合能力，应用于基于波形采样的核电子学系统，具有提高时间/能量分辨能力的潜力
- 网络架构：一维脉冲序列的自编码器
- 网络基本单元：一维卷积（Convolution）层，一维解卷积（Deconvolution）层，全连通（Fully-connected）层

与传统算法只利用少数采样点的信息不同，神经网络将**整个采样波形**作为输入，因此能更加充分地利用波形（相对于目标任务的）有益信息。



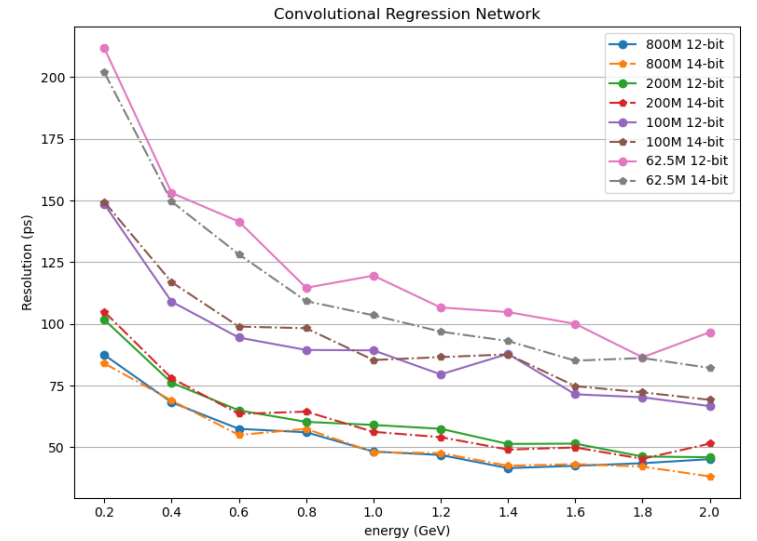
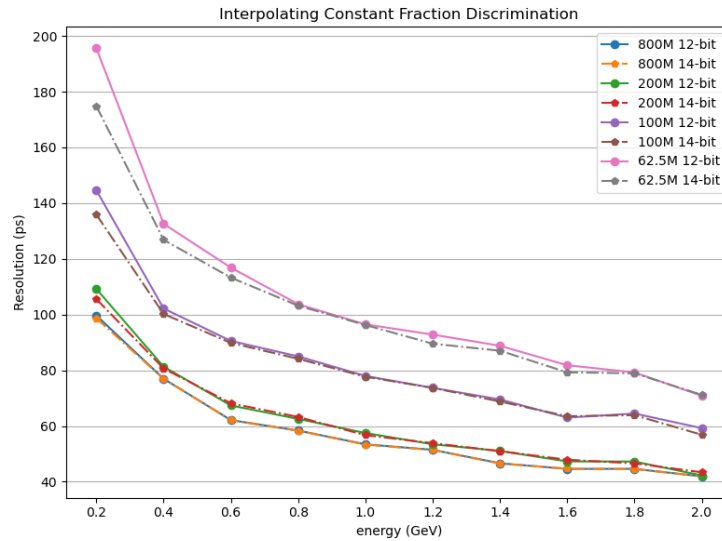
波形采样方法的仿真研究

• 针对NICA-MPD实验电磁量能器产生的**不同能量**的电子学信号：

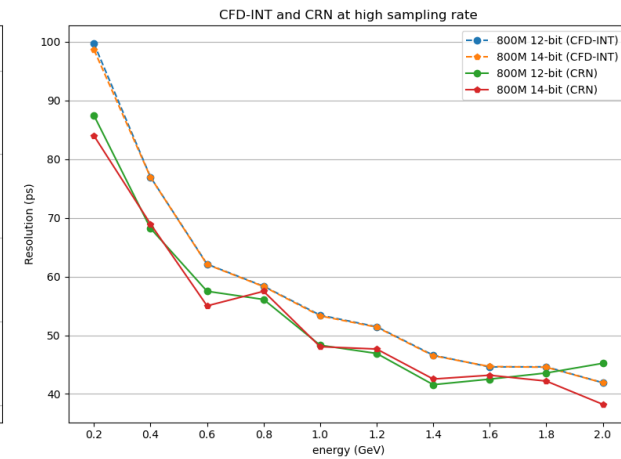
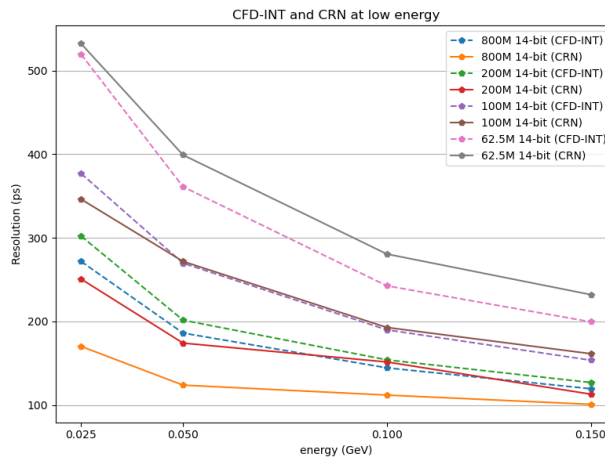
- 应用插值恒比甄别 (CFD-INT) 与神经网络 (CRN) 进行了定时分析
- 改变入射粒子能量，从**200 MeV到2 GeV**
- 改变ADC的采样率 (**62.5 M~800 M**) 以及精度 (**12-bit, 14-bit**)

• 主要结论：

- 使用两种方法，在100 MS/s采样率以上的情况下，定时精度达到150 ps以下，满足实验性能要求
- 在**低信噪比**（入射粒子能量较低）和**高采样率**（800 MS/s）的情况下，神经网络**优于**传统方法



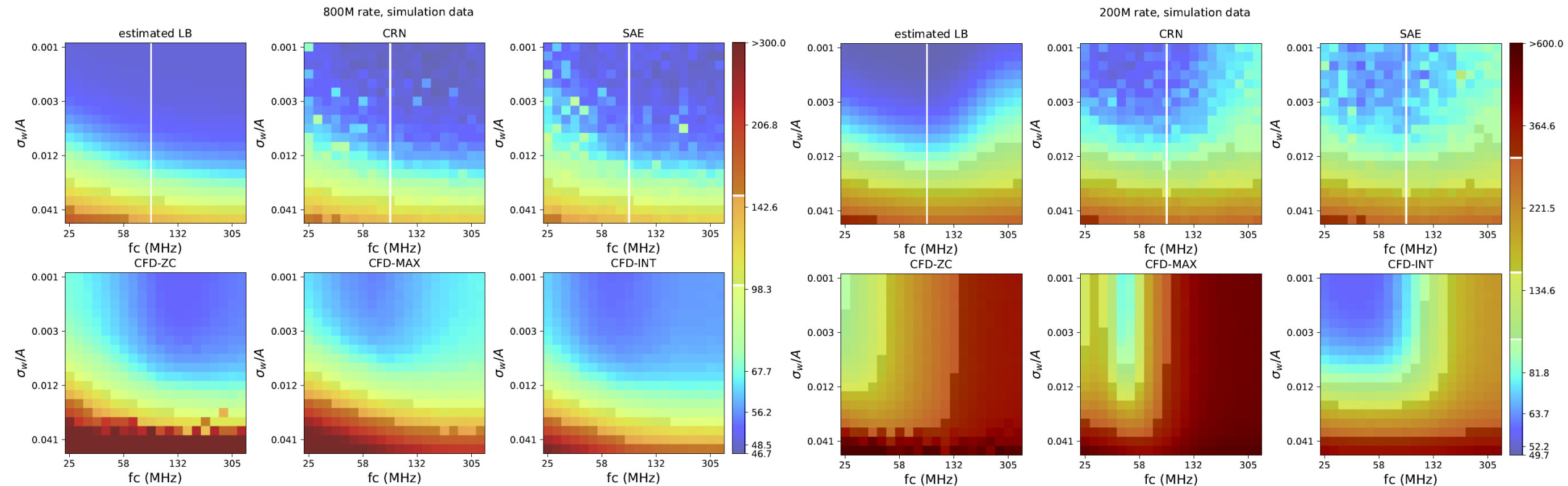
200 MeV到2 GeV入射电子的时间分辨 (左图：插值恒比甄别；右图：神经网络)



低信噪比
和高采样率的情况下，神经网络更优



定时的理论分析和神经网络方法的性能



800 M采样率的情况

200 M采样率的情况

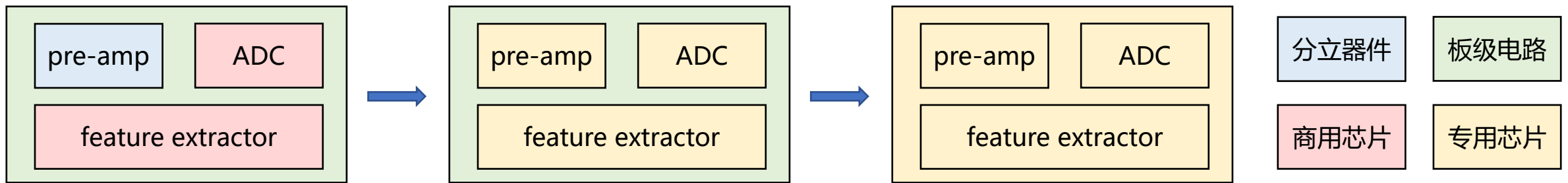
ECAL Shashlik量能器, 1 GeV电子入射, 定时的理论下限和各算法的比较
(左上角: 理论下限; 上中, 上右: 神经网络; 下三: 恒比甄别)

结论: 在一定模拟带宽和噪声水平的情况下, 神经网络与所能达到的理论下限 (Cramer Rao Bound) 具有较好的符合度, 精度和鲁棒性好



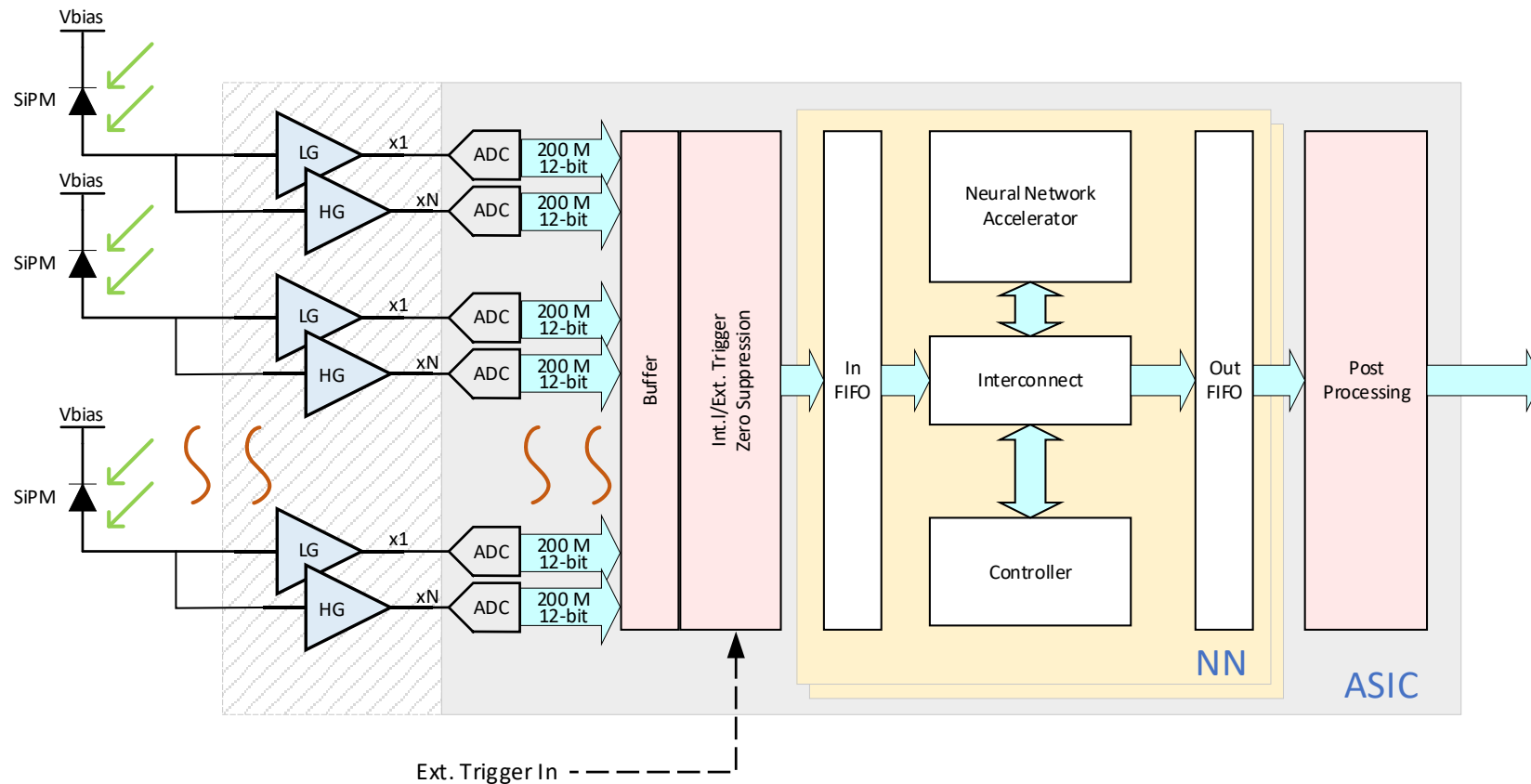
ECAL读出电子学的升级

- 现有系统的局限性：
 - 需要传输每个通道的ADC采样数据，数据带宽要求高，并因此带来高功耗
 - ADC采样率偏低，仍有提高时间和能量分辨的潜力
 - 分立器件使得电子学系统较复杂
- 基于专用集成电路（ASIC）的升级方案：
 - 将前放、ADC和特征提取电路集成到一块芯片中
 - 以神经网络运算器为核心的特征提取电路完成能量、时间等信息的提取
 - 只传输波形的能量、时间等特征数据
- 技术路线：逐一实现 -> 系统集成



V1设计完成

神经网络前端ASIC方案



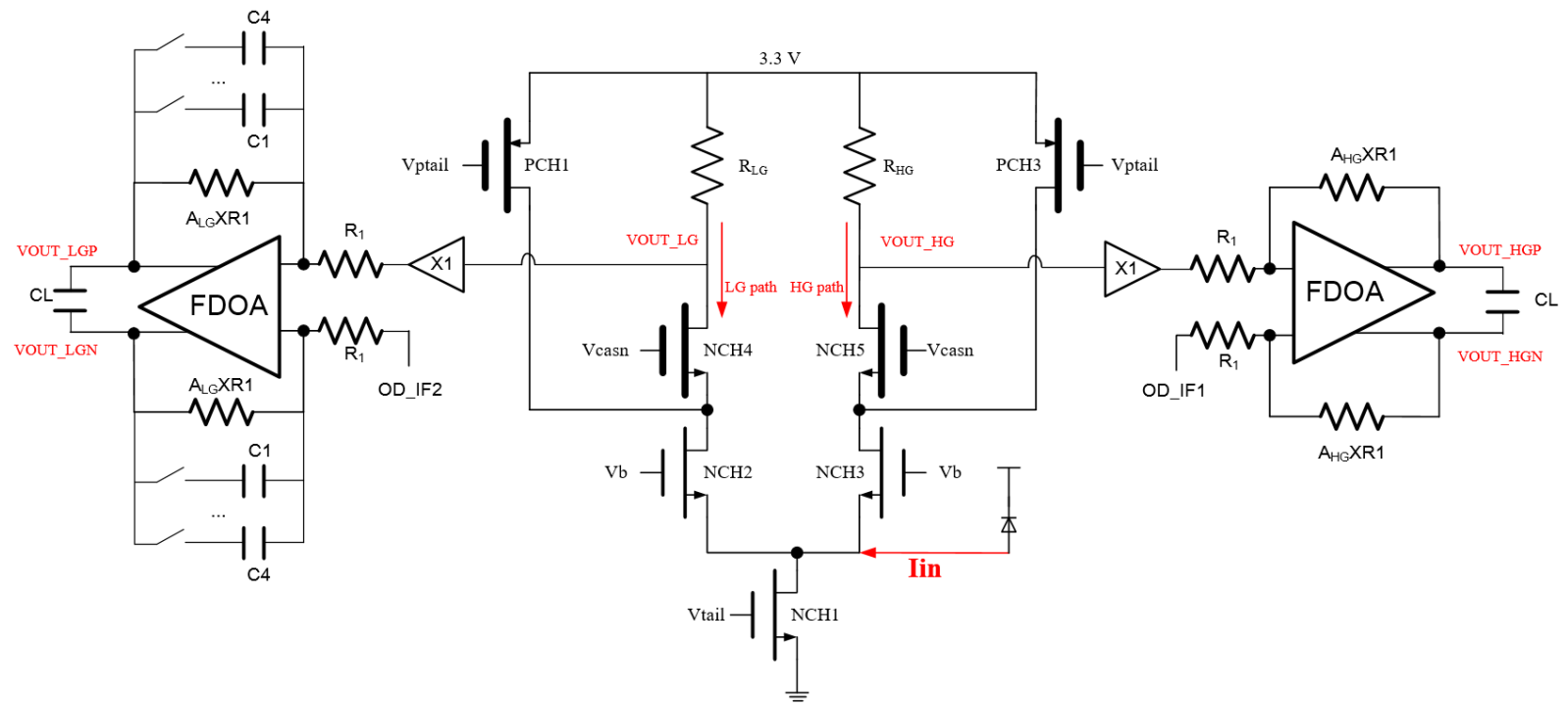
以专用神经网络处理模块为核心的前端ASIC设计方案

- 传感器 (SiPM) 传入信号
- 经过前端放大器 (可集成到芯片内部), 划分为两档, 以覆盖更大动态范围
- 使用模数转换器 (ADC) 进行数字化
- 在内部缓存后, 由内触发 (或外触发) 控制数据流传入专用神经网络处理模块 (NN)
- 神经网络处理模块完成运算和特征提取工作
- 处理结果经过组包后从芯片传出



模拟集成前放电路设计

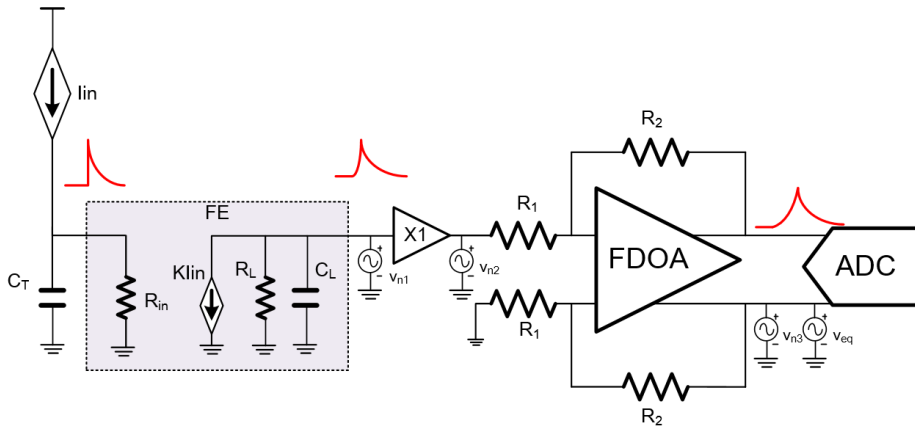
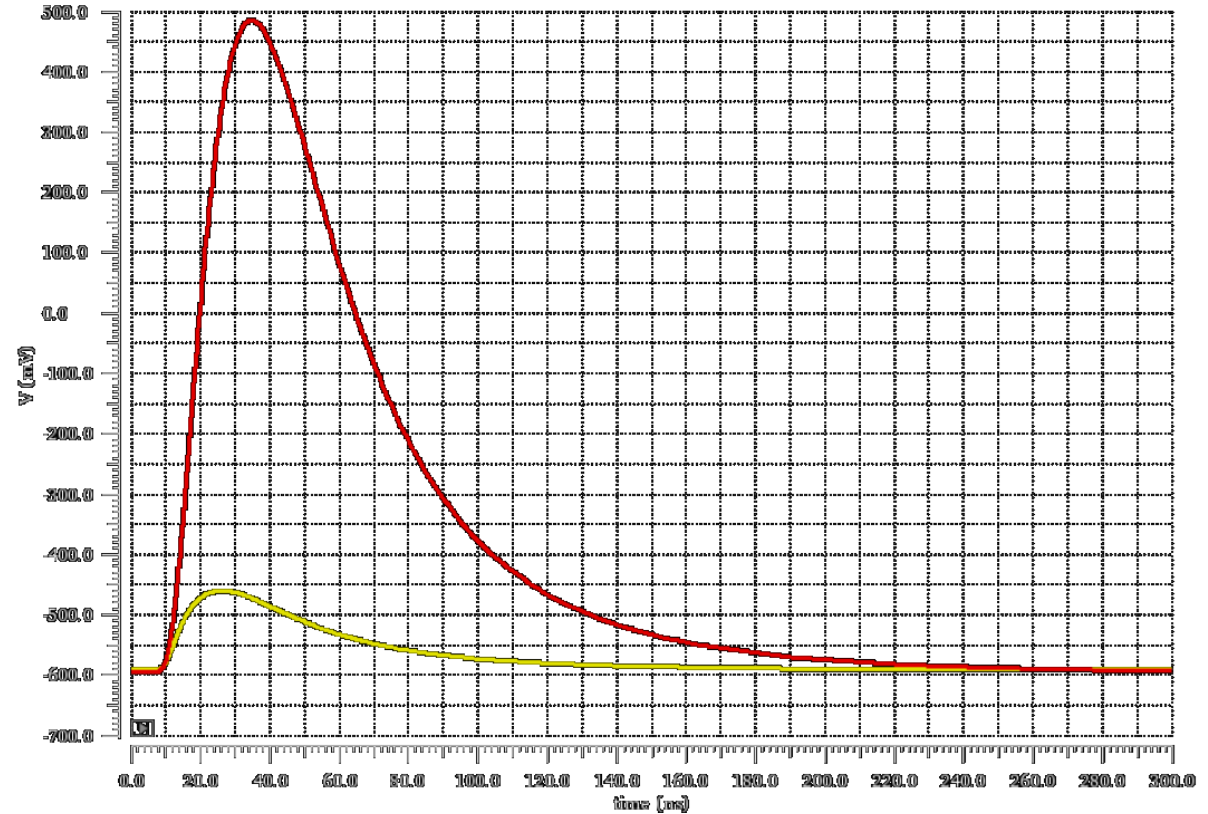
- 输入级：共栅放大器，两路并联的放大器对输入电流分流
 - 低增益：大动态范围
 - 高增益：对小信号高灵敏度
- 输入电流分流后经过两个电阻，转化成电压信号，经过缓冲器，分别驱动一个全差分放大器
- 全差分放大器的作用：
 - 合理调整带宽
 - 提供增益以区分高增益和低增益挡位
 - 单端转差分，与后续ADC接口



模拟前放指标分析和测试结果

指标	数值	
小信号带宽	高增益: 25 MHz	
	低增益: 10 MHz、25 MHz、37 MHz、50 MHz	
大信号带宽	高增益: 15 MHz	
	低增益: 相应可调	
jitter	36 ps RMS @8mA	
动态范围	高增益	0~8.6 mA@tt,27
		0~5 mA@ss,85
	低增益	0~78.1 mA@tt,27
		0~45 mA@ss,85
输出电压范围	$V_{pp} = 1.2 V$	

8 mA注入电流下，高增益和低增益的差分电压仿真波形：

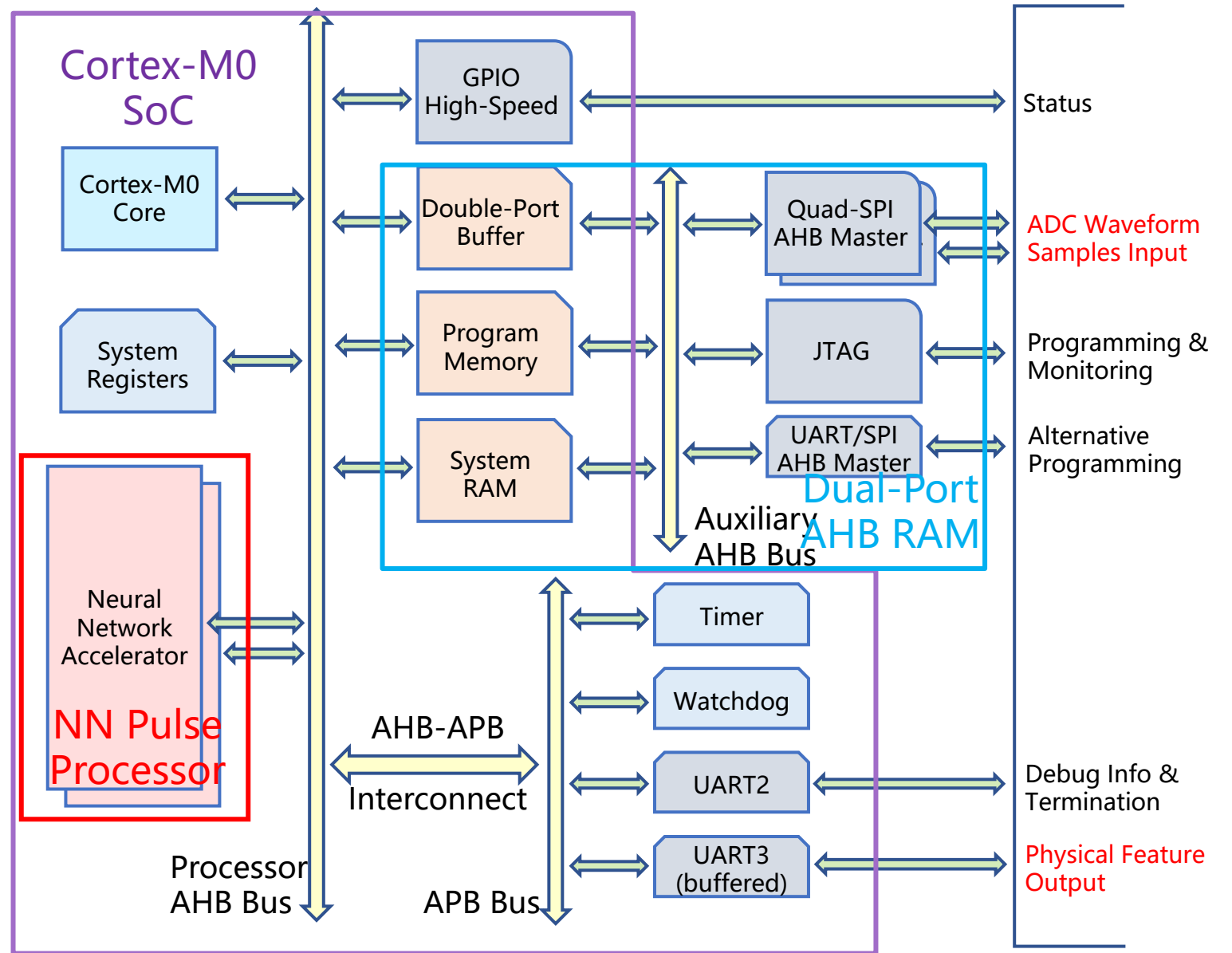


小信号模型



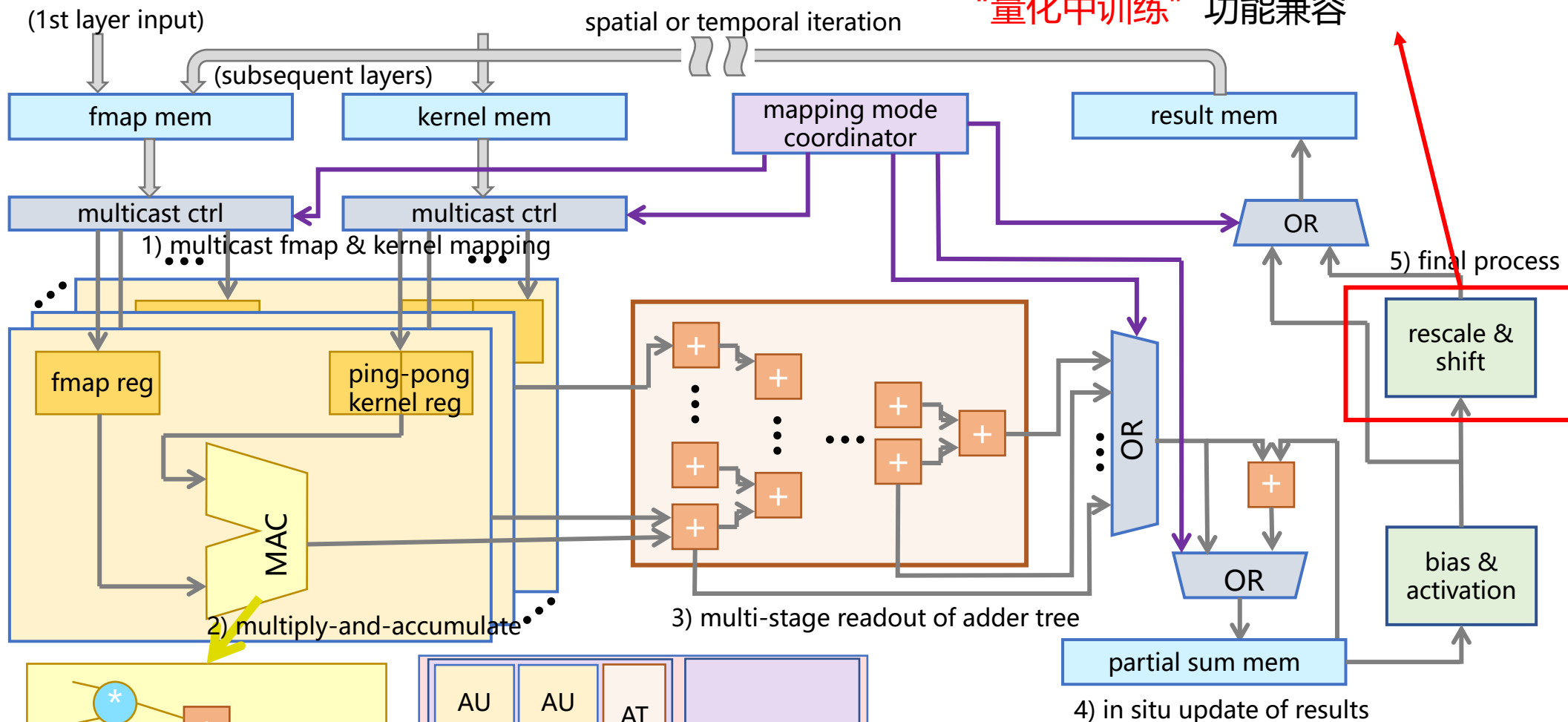
SoC系统结构的设计

- 为了方便NN加速器的数据搬移、数据操纵和控制，我们将神经网络处理模块设计为片上系统（System-on-Chip, SoC）结构
- 微控制器内核：ARM Cortex-M0
- 系统总线：AHB、APB
 - NN加速器作为一个外设挂载在处理器AHB总线下，数据传输通过AHB总线访问完成
- 输入/输出外设：
 - Quad/Normal SPI
 - UART (带缓存/不带缓存)
 - JTAG
 - GPIO

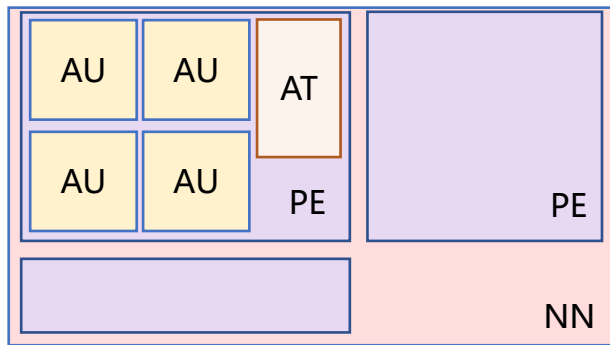
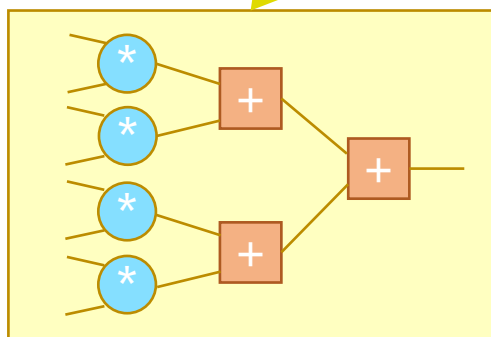


NN加速器架构设计

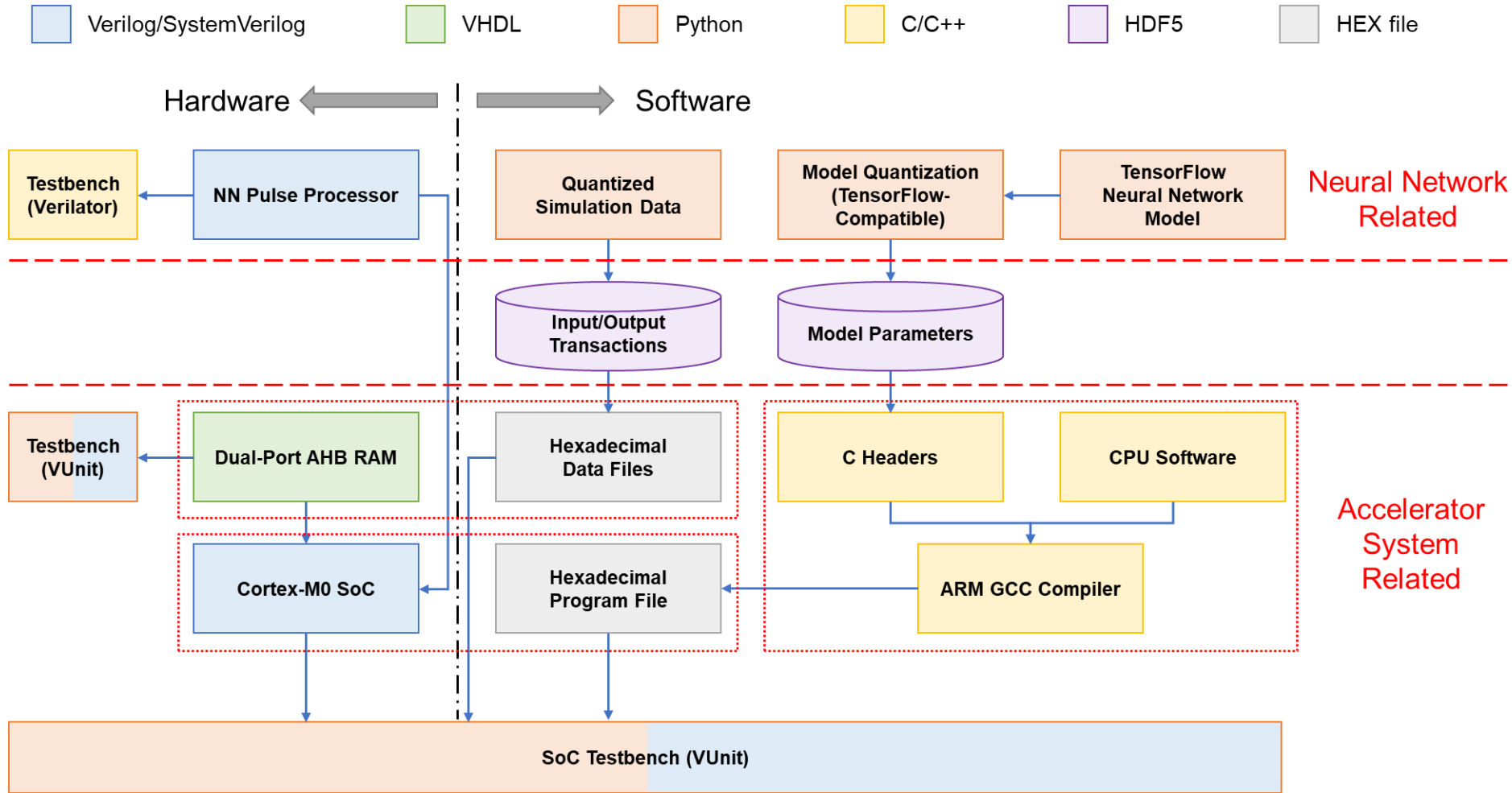
尺度变换和移位模块的引入，使得设计与深度学习框架（如TensorFlow）的“量化中训练”功能兼容



基于模板的
AU-PE-NN
三层拓扑结构



硬件软件综合设计



HDL(Verilog, VHDL):
设计各硬件组件

Verilator & VUnit:
动态功能仿真

Python: 在 TensorFlow 框架下开发神经网络

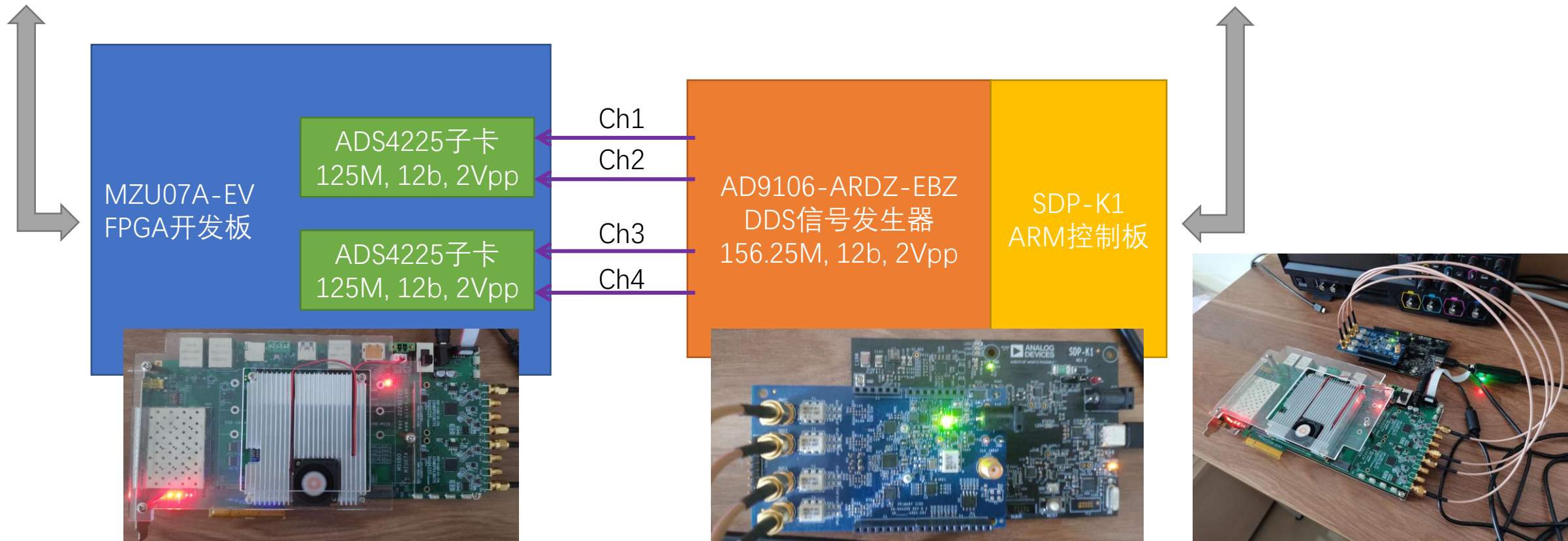
HDF5: 设计文件数据库保存格式

C: 设计 ARM 嵌入式软件

NN加速器测试系统

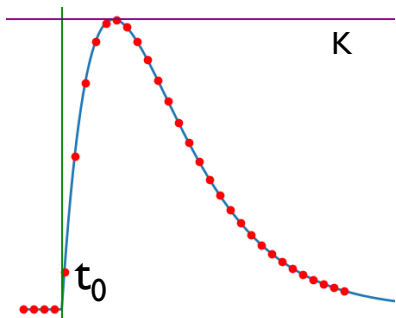
上位机控制软件

1. FPGA固件下载， 在线逻辑分析仪；
2. ARM控制器程序下载；
3. FPGA定时结果输出



测试结果

- 测试波形:



传统方法
(CFD, 积分)

$$s(t) = K \left(\frac{t - t_0}{\tau} \right) e^{-\frac{t-t_0}{\tau}} u(t - t_0)$$

$$\tau = 40 \text{ ns}, \quad K = K_1 K_2$$

$$SNR = 20 \log_{10} \left(\frac{K_1}{\sigma_{base}} \right) = 47.4 \text{ dB}$$

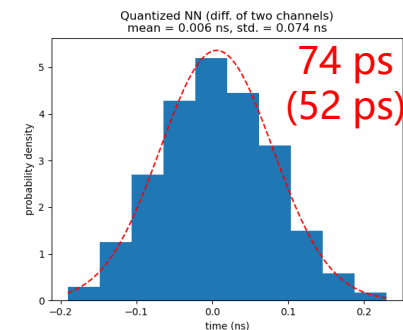
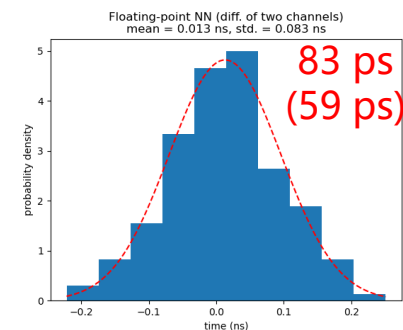
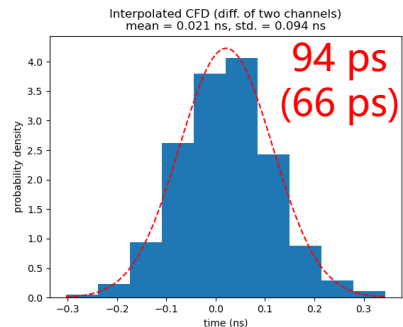
$$K_2 \sim U(0.5, 2.0)$$

浮点数
神经网络

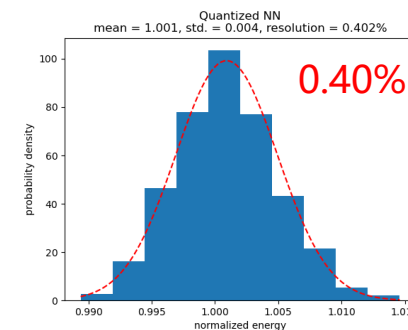
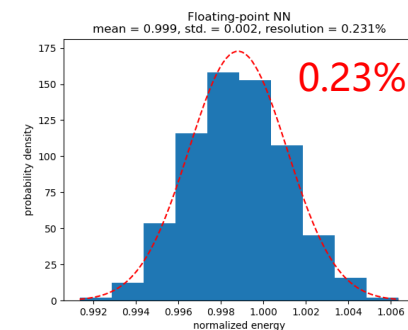
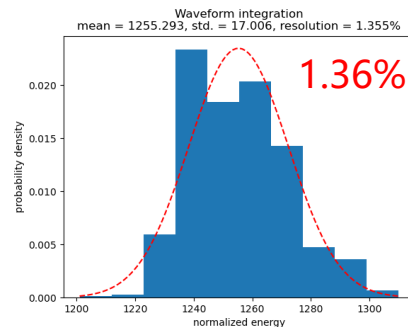
量化
神经网络

- 每事件采样32个点
- 双通道波形数据同步输入

时间



能量



- 运行时统计数据:

- Zynq UltraScale+

Resources (area):	
LUT	2825 + 89540
FF	517 + 75028
BRAM	8.0 + 48.0
URAM	8 + 0
Power:	
Dynamic	(0.371 + 0.541) W
Static	0.594 W
Performance @ 100 MHz:	
Internal inf.	113.8 us
Throughput	8.3k events/sec



总结和下一步研究计划

- 研究了神经网络在信号特征提取上的**性能和潜力**
- 设计了用于脉冲处理特定任务的**神经网络架构**
- 提出了基于NN加速器的前端电子学**系统原型**
- 开发了挂载NN加速器的**片上系统**
- 完成了**FPGA平台上的系统验证**

下一步计划:

- 在核探测器信号流中评估整个系统的性能
- 设计优化, ASIC版图设计, 使用28/65 nm先进工艺流片



谢谢!

Q & A



Backup



波形采样方法的仿真研究

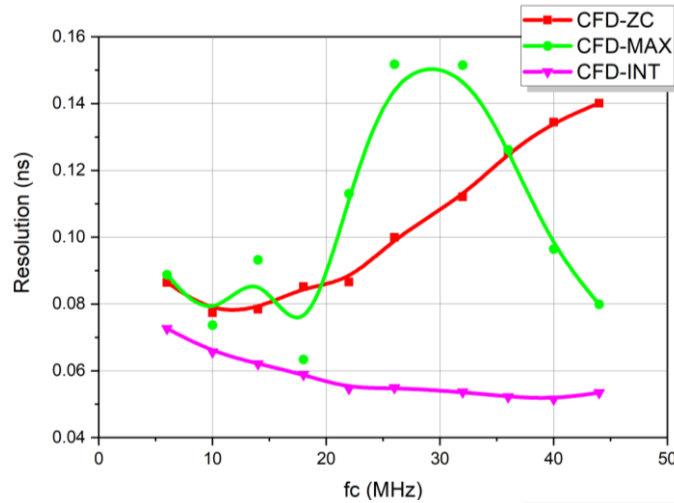
• 针对ECAL电子学信号，为了评估传统定时方法的性能，我们使用了三种恒比甄别算法进行比较：

- 过零恒比甄别 (CFD-ZC)
- 最大值 (数字) 恒比甄别 (CFD-MAX)
- 插值恒比甄别 (CFD-INT)

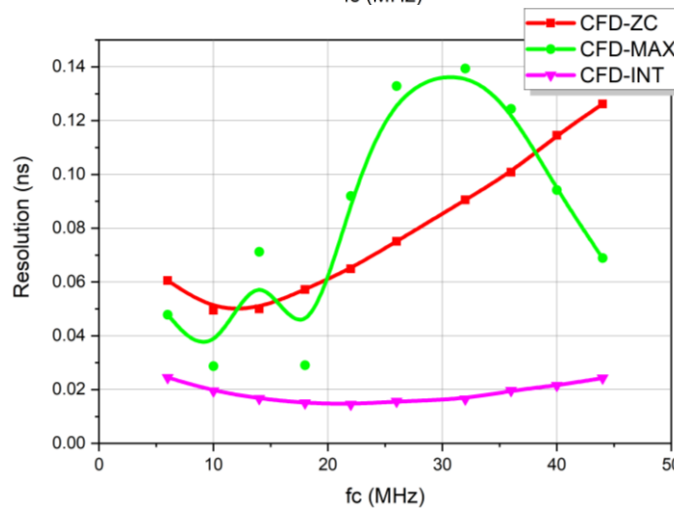
• 对Geant4探测器仿真波形和函数标准波形的分析结果：

- **CFD-INT**具有最优的定时分辨，CFD-MAX和CFD-ZC次之
- 200 M, 12-bit时的定时分辨好于100 M, 10-bit
- 理想情况下 (低噪声水平/入射粒子能量高), **100 M, 10-bit** ADC仍有希望达到**150 ps**时间分辨的要求

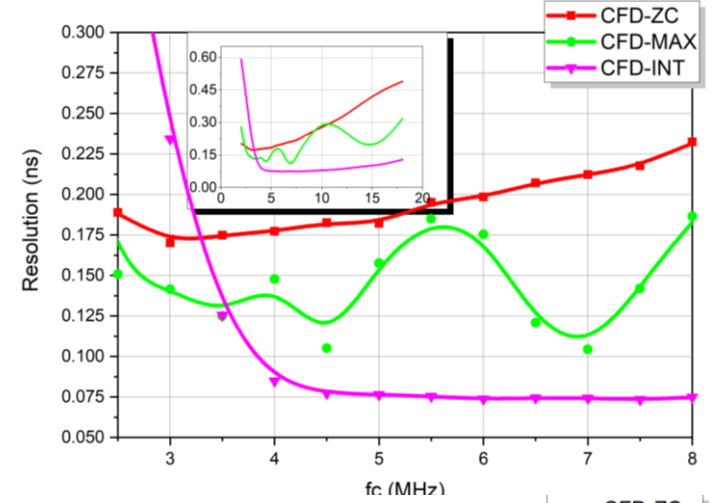
1 GeV电子仿真波形



函数标准仿真波形



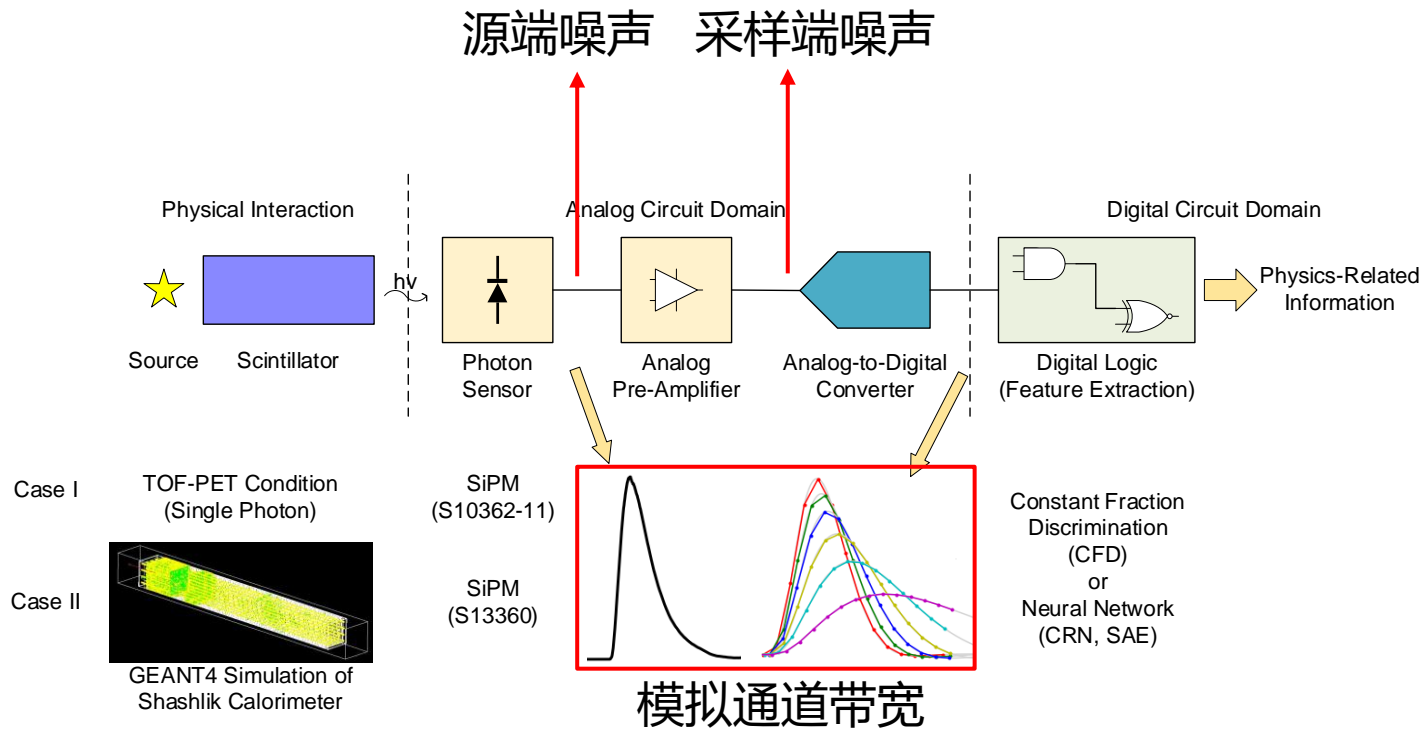
200 M, 12-bit ADC定时分辨



100 M, 10-bit ADC定时分辨



定时系统的过程模拟和数学建模



定时系统的非理想特性:

源端噪声: 来源于光电器件端的噪声, 受模拟通道调制 (低频特征)

采样端噪声: 叠加在采样点上的高斯白噪声

模拟通道带宽: 模拟前置放大器的带宽和寄生参数对信号的影响

Fisher信息矩阵: $J_T \triangleq J_D + J_P$

$$J_D = -E \left[\nabla_{\Theta} \left(\left\{ \nabla_{\Theta} \ln p_{r|\theta}(R|\Theta) \right\}^T \right) \right]$$

$$J_P = -E \left[\nabla_{\Theta} \left(\left\{ \nabla_{\Theta} \ln p_{\theta}(\Theta) \right\}^T \right) \right]$$

信号建模: $s(t) \triangleq s(t; \Theta) \triangleq s(t; \Theta_{\text{int}}, \Theta_{\text{ext}})$

$$J_{Dij} = \left(\frac{\partial \mu_R}{\partial \Theta_i} \right)^T \cdot \Sigma_R^{-1} \cdot \frac{\partial \mu_R}{\partial \Theta_j} \quad J_P = \begin{pmatrix} \Sigma_{\Theta_{\text{int}}}^{-1} & 0 \\ 0 & 0 \end{pmatrix}$$

具体到ECAL的电子学信号:

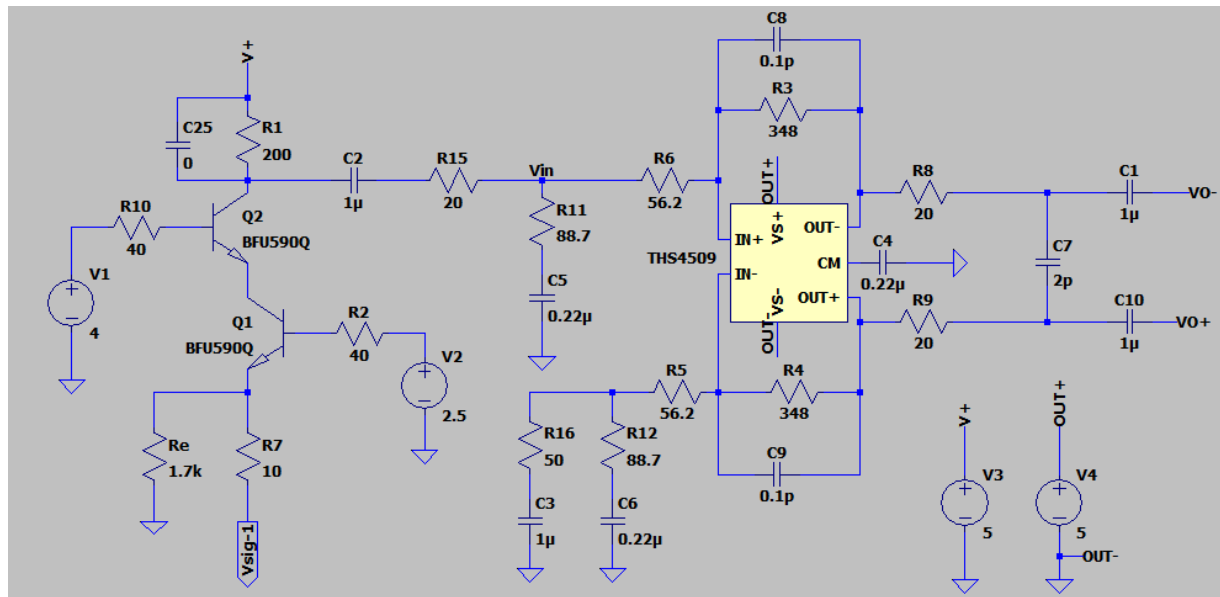
$$s_{\text{origin}}(t; \Theta_{\text{int}}, \Theta_{\text{ext}}) = \kappa \cdot f_{\text{gamma}} \left(\frac{t - \tau - \eta}{\beta}, \alpha \right)$$

$$\Theta_{\text{int}} = \{\alpha, \tau, \beta, \kappa\}, \quad \Theta_{\text{ext}} = \{\eta\}$$

$$R|\Theta = (R_1, R_2, \dots, R_N|\Theta) \sim \mathcal{N}(\mu_R, \Sigma_R)$$

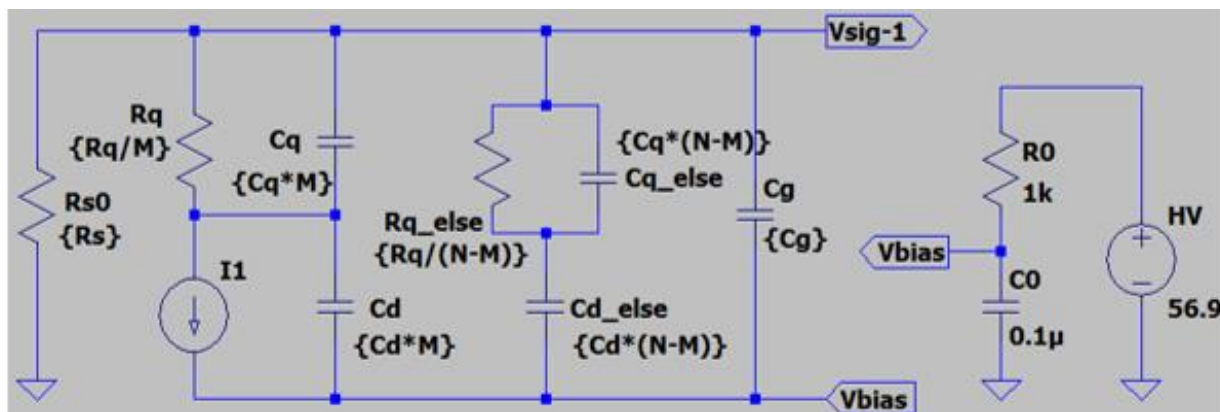
$$\mu_R = (s(0), s(\Delta), \dots, s((N-1)\Delta))$$

分立元件前放电路



SiPM的快前放读出设计

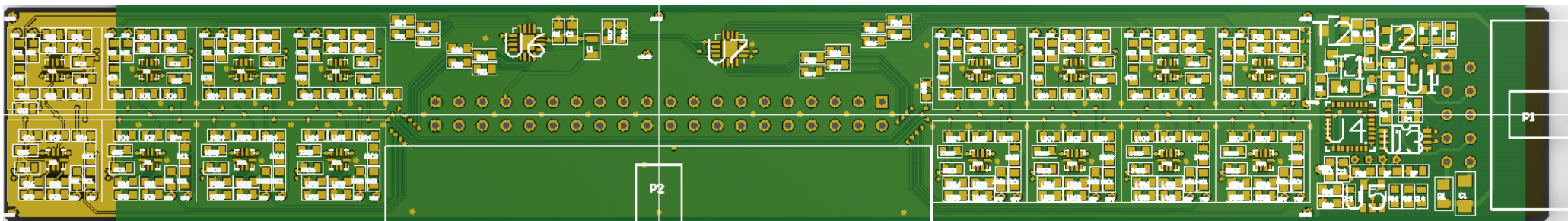
- 基于共基电路的跨阻放大器架构
- Q1、Q2构成两极共基电路
- 方便实现对晶体管工作电位的微调
- 减少集电极电阻对于探测器电容的依赖性



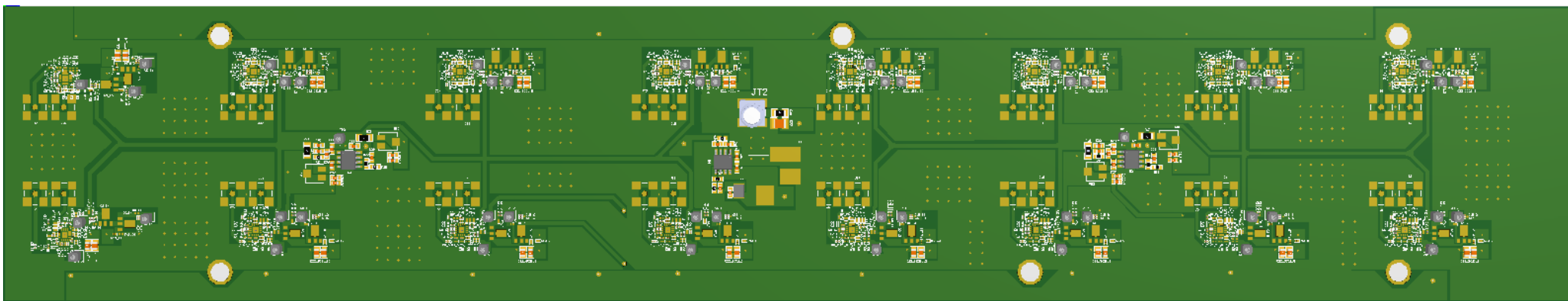
多个单元同时激发时的等效电路模型

- LTspice XVII电路仿真软件进行了模拟
- 连接至一个20 Ω 负载电阻 R_s 时，前放输出信号规整至接近750 mV单路输出幅度和接近1.5 V的差模输出幅度

ECAL前放板的设计

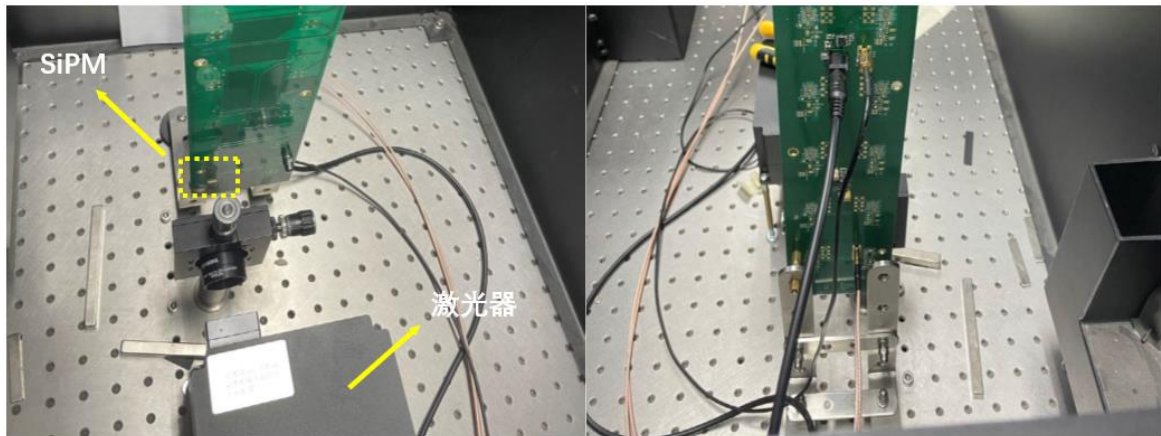


俄方设计的前放板PCB

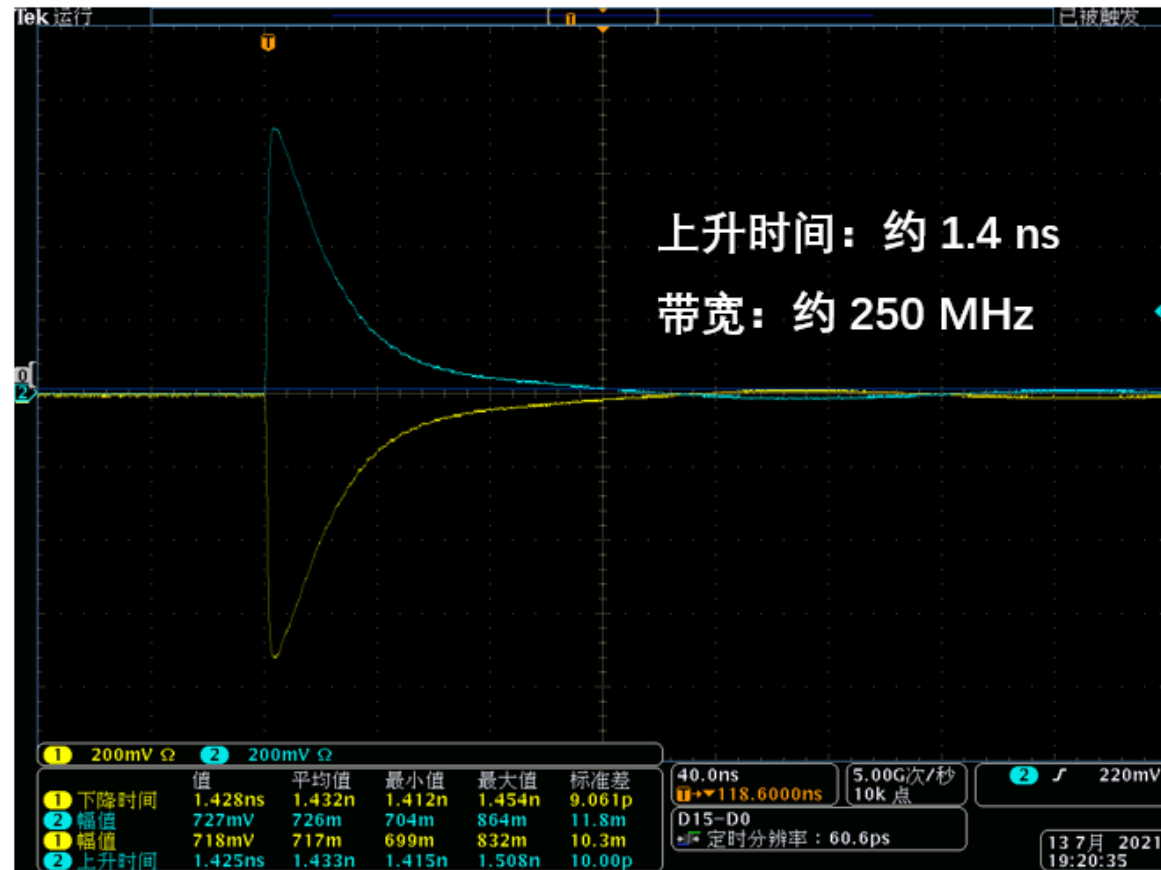


清华自行设计的前放板PCB

前放电路的测试

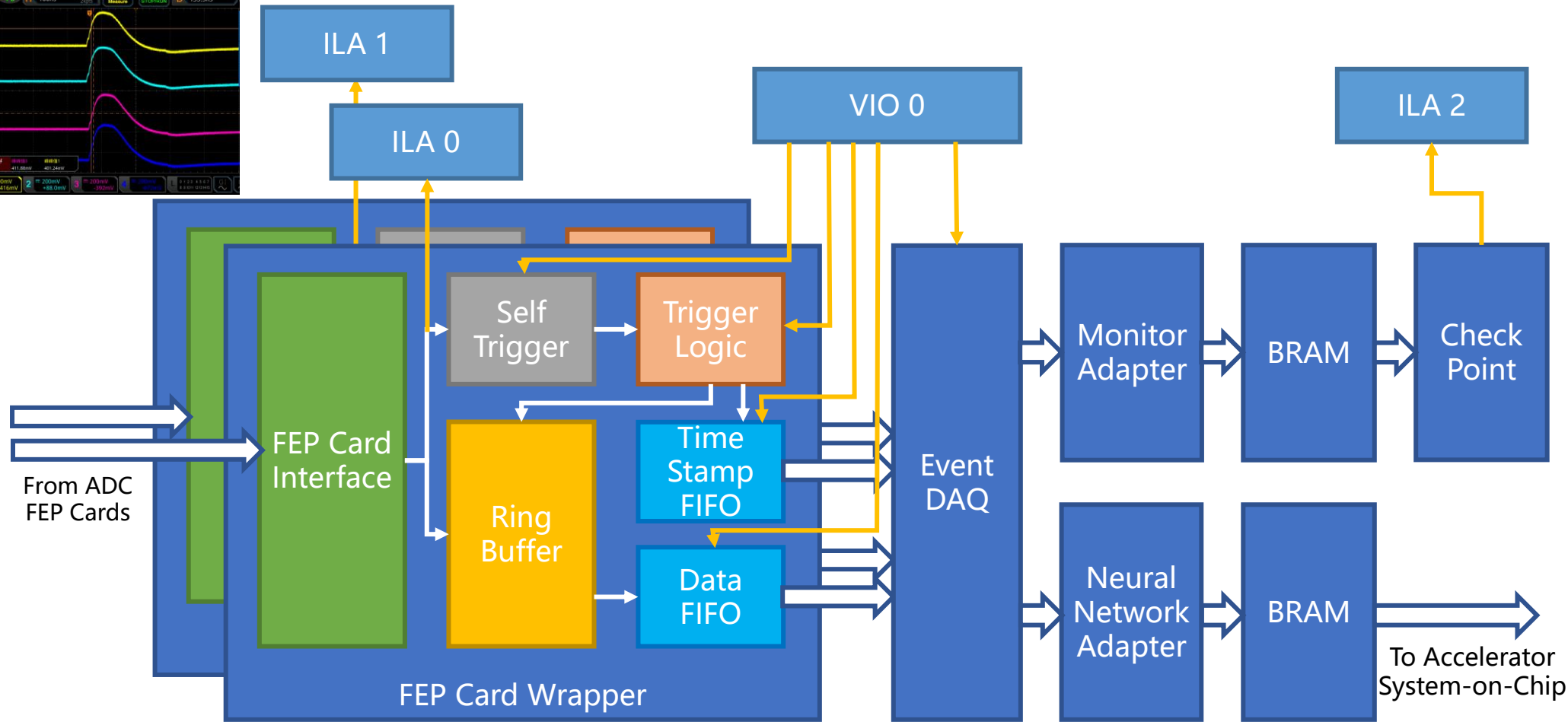


- 固定SiPM前放板与激光器于光学平台上
- 激光束与SiPM探测器入射窗在同一水平高度
- 皮秒激光器从SiPM探测器正面入射窗注入作为输入信号源 (532 nm绿光激光器)



幅值 > 700 mV, 基线噪声 RMS < 10 mV

NN加速器数据获取数字逻辑



ILA:
Integrated
Logic
Analyzer

VIO:
Virtual
Input/Output