

CMOS 像素探测器与片上集成神经网络

赵瑞光 , PEREZ PEREZ Luis alejandro, HU-GUO Christine,
Auguste BESSON, HU Yann

Email: ruigunag.zhao@iphc.cnrs.fr

2017 年 10 月 11 日 -13 日
首届全国辐射探测微电子学术年会
中国科学院高能物理研究所

目录

1. 背景介绍

- CMOS 像素探测器
- 人工神经网络

2. 神经网络在亚原子物理实验中应用

- 研究背景
- 研究目标与研究方法
- 可行性研究

3. 研究进展

- 实验步骤
- 实验结果

4. 研究与发展

1. 背景介绍

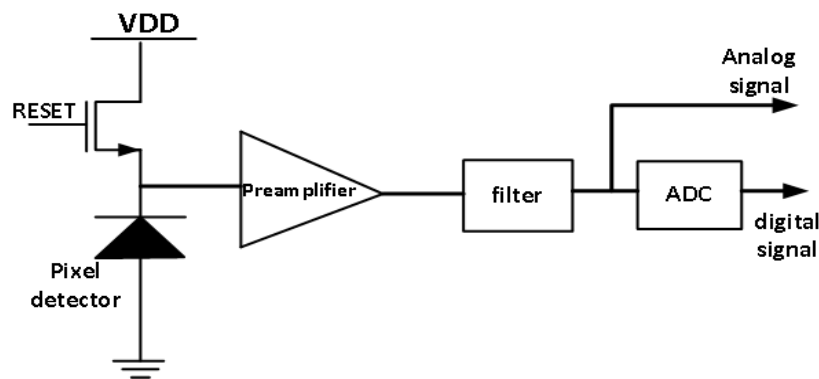
CMOS 像素探测器

CMOS 像素探测器 (CPS)

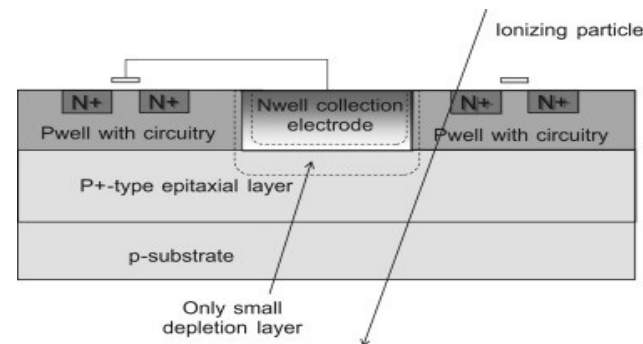
- 单片集成：探测器 (Nwell/Pepi) + 片上信号处理模块 (前置放大器, ADC....)
- 得益于稳定的工艺技术
- 越来越小的特征尺寸

(IPHC): 0.35 μm (以前) $\rightarrow$ 0.18 μm (现在) $\rightarrow$ 65 nm ?
40 nm (现在, 工业用)

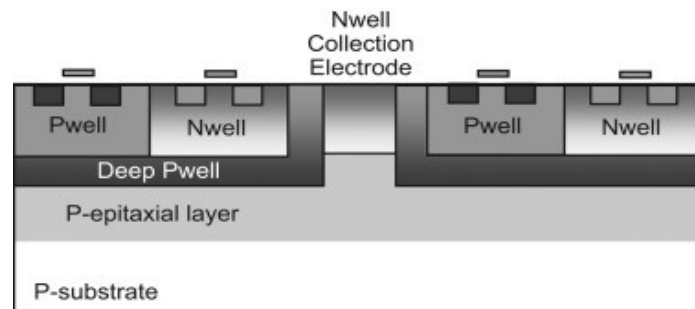
随着工艺技术的快速进步, 越来越多的处理模块可以被集成在 CMOS 像素探测器中。



第一代 CPS: 只有 NMOS 管可以被用在探测器像素单元中 $\rightarrow$ PMOS 管的 N 阱结构会与收集电荷的 N 阱发生竞争, 降低电荷的收集效率。

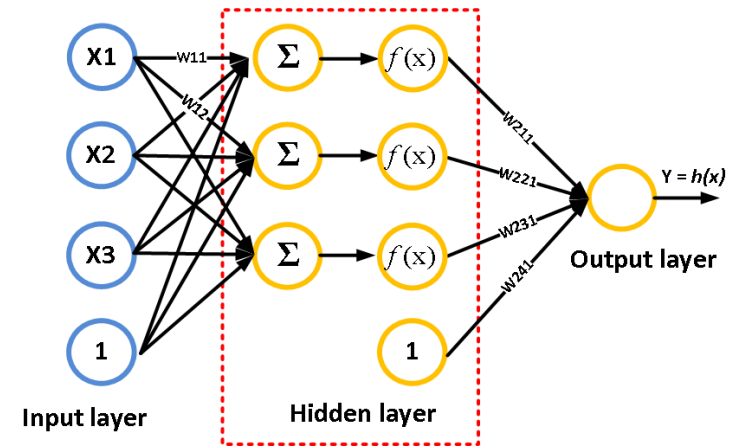
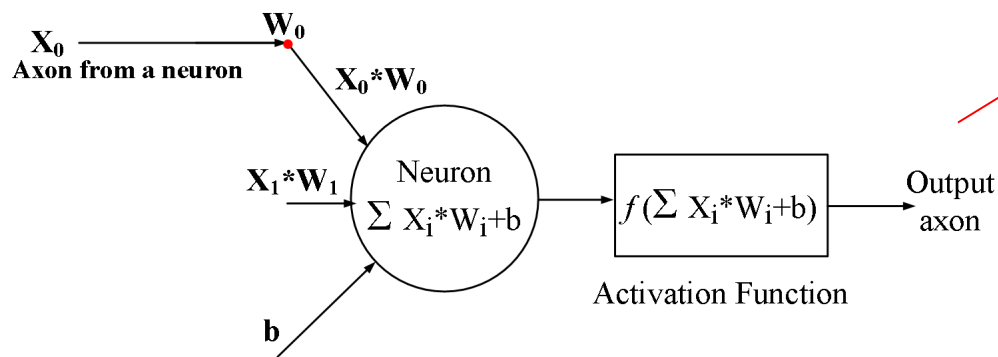
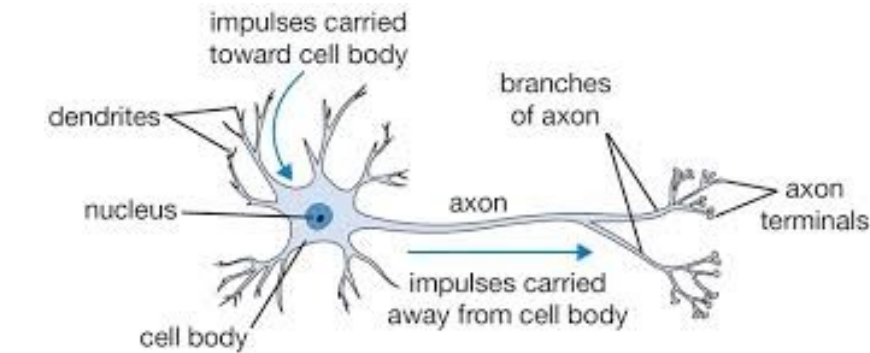


第二代 CPS: 采用深 P 阱工艺, 隔绝 PMOS 管的 N 阱结构吸收电荷 $\rightarrow$ NMOS 结构与 PMOS 管都可以在像素单元中使用。



人工神经网络

人工神经网络模型是模拟大脑中生物神经网络结构设计的一套计算系统。

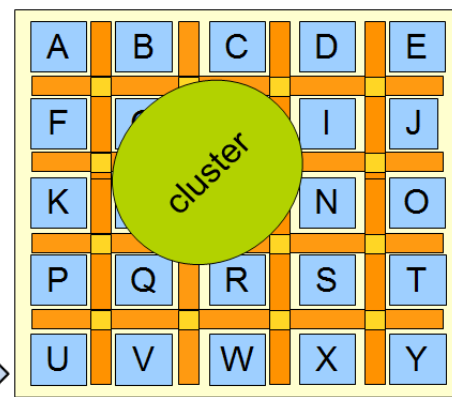
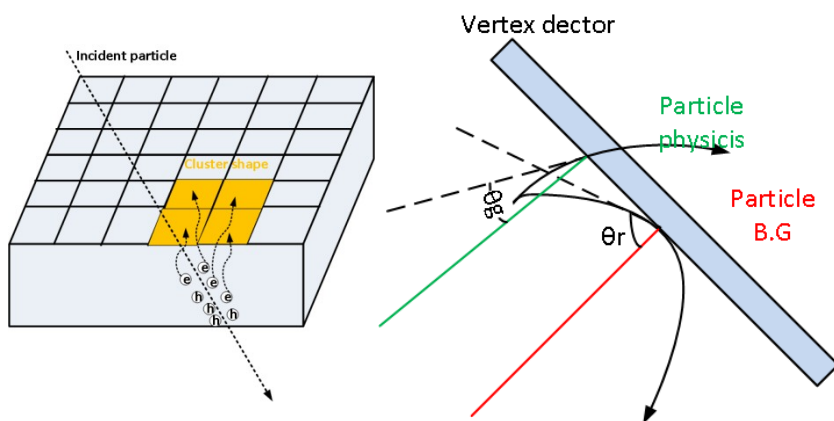


2. 神经网络在亚原子物理实验中应用

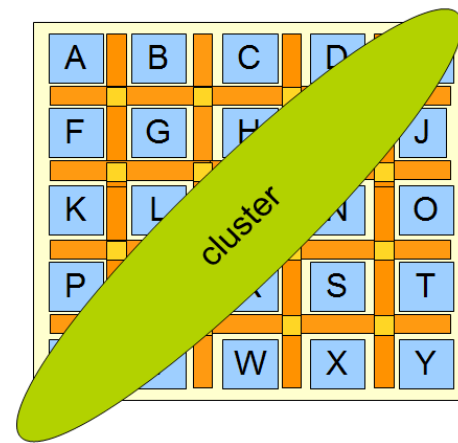
研究背景

在国际线性对撞机 **ILC (International Linear Collider)** 中，存在大量来自于背景噪声的正负电子对。

- 背景噪声将影响探测器的参数分辨率，寻迹效率，降低了系统有效数据的输出带宽
- 背景噪声具有较小的动量 (**10-100 Mev/c**)，在探测器表面形成较大的入射角，导致探测器表面产生长条形的簇 (**cluster**) 。



物理实验有效粒子产生的簇



背景噪声粒子产生的簇

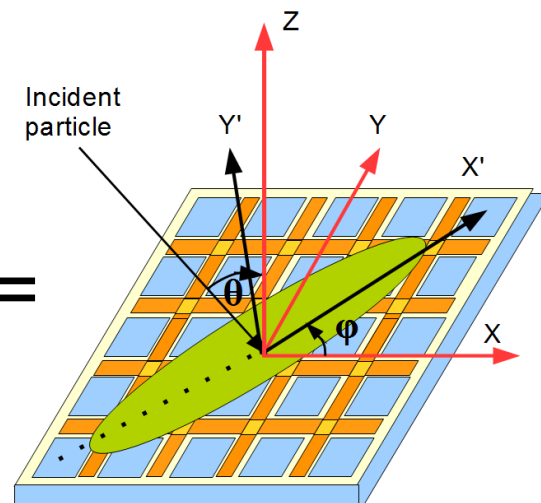
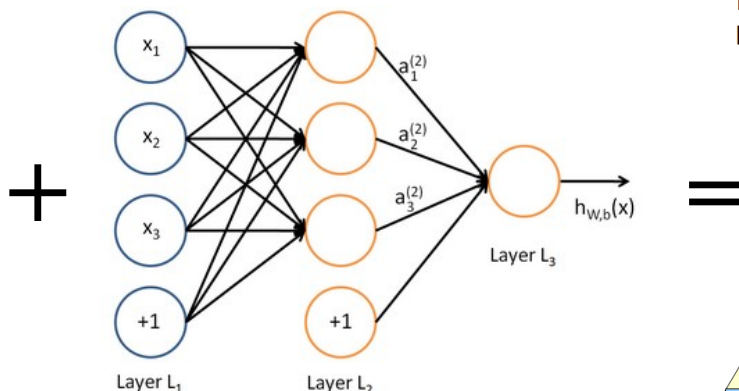
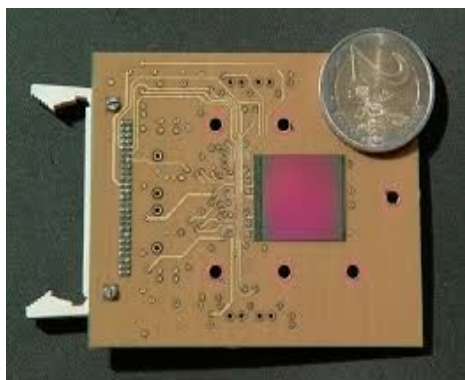
研究目标与研究方法

- 研究目标：
 - 重建入射粒子的入射角信息
 - 区分和去除背景噪声粒子产生的簇
- 研究方法：
 - 使用人工神经网络算法，根据探测器中簇的电荷分布和簇的形状分类两种粒子产生的簇。

可行性研究 (1)

使用 **CMOS** 像素探测器（**MIMOSA18**）和 **FPGA** 开发板验证通过结合 **CPS** 和人工神经网络来重建粒子入射角度的可行性。

- CMOS 像素探测器 + 人工神经网络



CMOS 像素探测器：

- ❑ 探测入射粒子，
- ❑ 定义入射粒子产生的簇的形状和电荷分布

人工神经网络：

- ❑ 根据产生簇的形状和电荷分布重建入射粒子角度
- ❑ 区分入射粒子来源

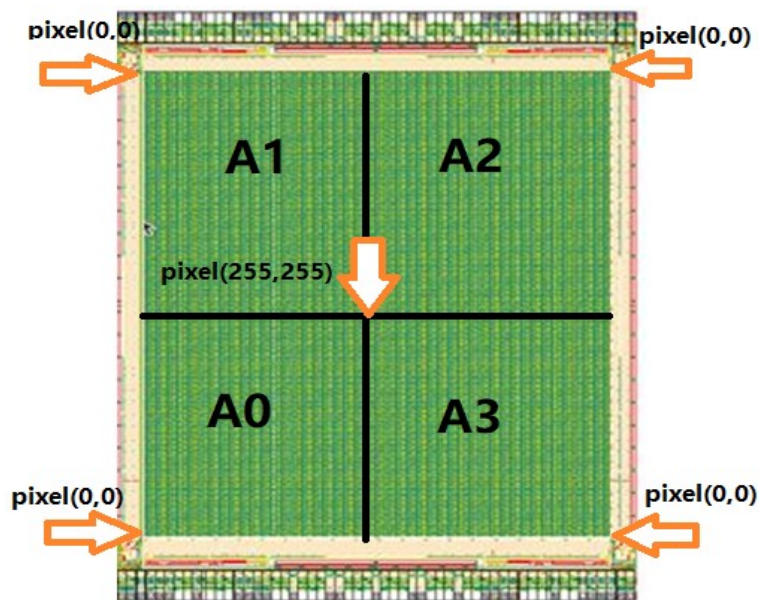
可行性研究 (2)

我们采用 **MIMOSA18** 探测芯片来采集入射粒子的信息。

- 专为亚原子物理实验设计
- 包括模拟信号输出以及离线的数字信号采集系统
- 使用简单，方便测试
- 较小的 **pitch** → 得到精确的簇形状
- 较大的外延层厚度 → 得到充分的电荷

Mimosa 18 detail

- 4 matrixes of 256×256 pixels
- 10 μm pitch
- Active area of $5 \times 5 \text{ mm}^2$
- Standard 14 μm thick epitaxy (20 μm available), 80e-h/ μm .

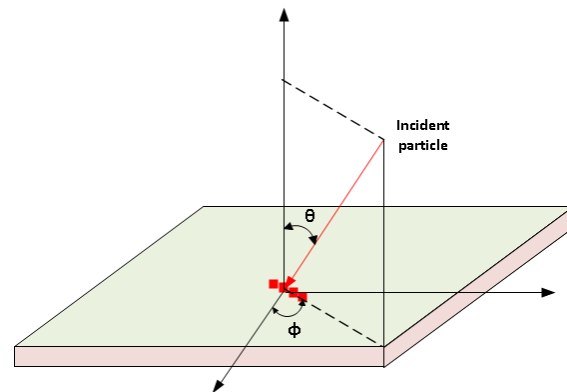
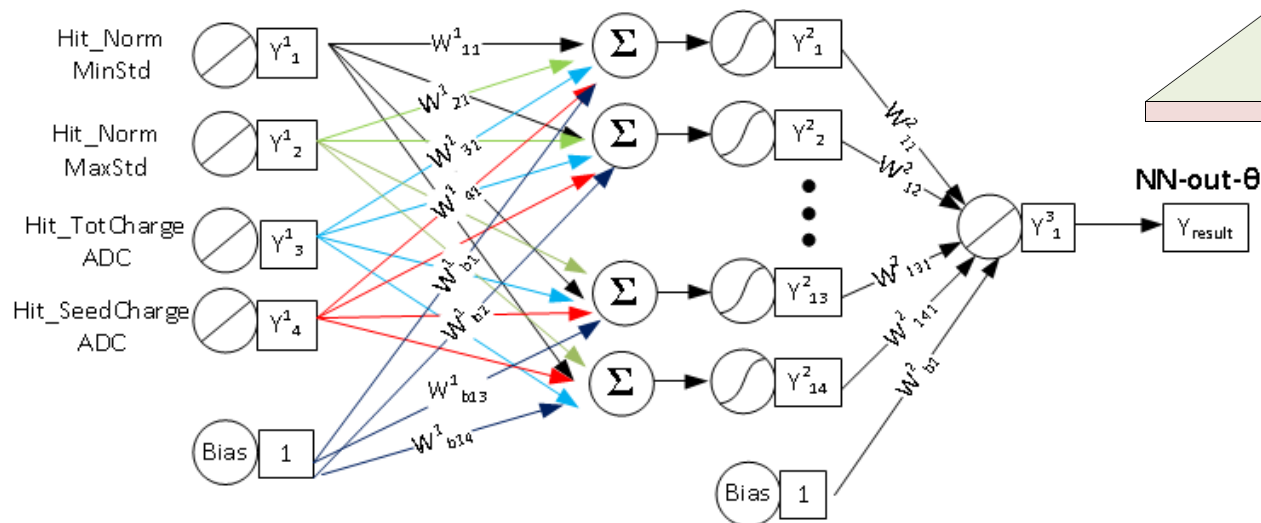


可行性研究 (3)

人工神经网络结构：

➤ 根据簇的形状和电荷分布重建入射角 θ 和 φ 的信息

- 簇的形状
 - 最大和最小标准差 (MaxStd/MinStd) 与入射角 θ 有关
 - 平面主轴夹角与入射方向角 φ 有关
- 簇的电荷
 - 种子像素电荷值 (SeedCharge ADC) 与入射角 θ 有关
 - 簇总电荷值 (TotCharge ADC) 与入射角 θ 有关



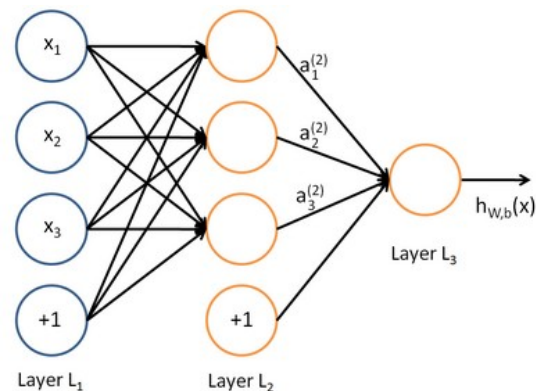
3. 研究进展

实验步骤

1. 训练过程

- 1) 改变粒子入射角度，采集不同角度下 M18 探测器输出的原始数据
- 2) 根据原始数据和入射角度计算整个人工神经网络的参数权值。

工具：[TMVA software \[1\]](#)



2. 回归过程

- 1) 采集 M18 探测器输出的原始数据；
- 2) 通过人工神经网络的权重以及得到的原始数据计算粒子入射的角度。

工具：[FPGA developed in my thesis](#)

实验结果

0	0	0	0	0	0	0
0	7	0	0	0	0	0
0	0	13	14	0	0	0
0	0	34	257	10	0	0
0	0	13	21	0	0	0
0	0	0	0	0	0	0
0	0	0	0	0	0	0

File:RUN_180001_9, $\theta = 15(\text{deg})$

Seed threshold = 12 ADC Noise threshold = 5 ADC

Sampling window: $7 * 7$

0	0	0	0	0	0	0
0	0	0	0	0	0	0
0	0	0	18	11	0	0
0	0	0	30	0	0	0
0	0	0	0	0	0	0
0	0	0	0	0	0	0
0	0	0	0	0	0	0

Frame number is : 4500

#####

Charge is : 257 (XY) position is : 0X33

Charge is : 13 (XY) position is : 0X22

Charge is : 21 (XY) position is : 0X32

Charge is : 34 (XY) position is : 0X23

Charge is : 10 (XY) position is : 0X43

Charge is : 13 (XY) position is : 0X24

Charge is : 14 (XY) position is : 0X34

Charge is : 7 (XY) position is : 0X15

Hit number is: 1

IEEE 754 result is : 0X422EFB07

Float result is : 43.745144

This cluster finish

Charge is : 30 (XY) position is : 0X33

Charge is : 18 (XY) position is : 0X34

Charge is : 11 (XY) position is : 0X44

Hit number is: 2

IEEE 754 result is : 0X4211A72E

Float result is : 36.413261

This cluster finish

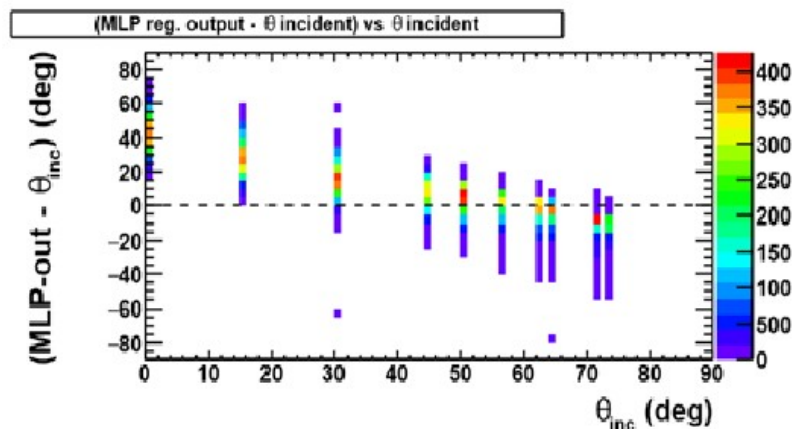
#####

Total cluster of this frame is : 2

This frame finish

实验结果

TMVA 软件离线回归过程结果分析

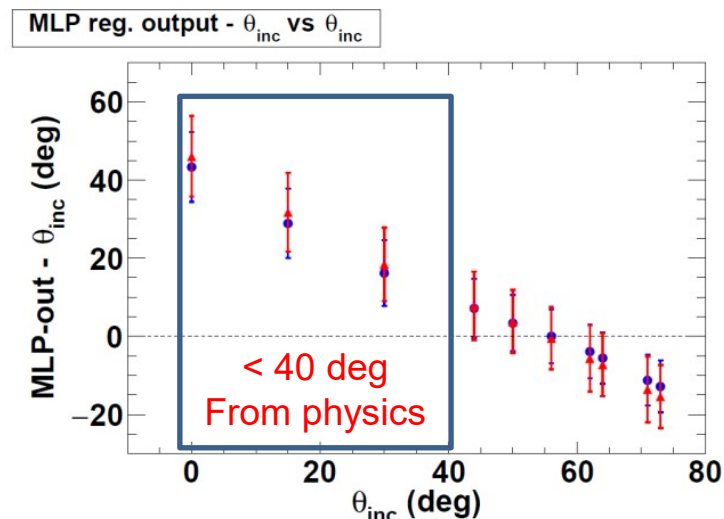


Luis Alejandro, IPHC, 2017

该图显示了通过 TMVA 软件进行的回归过程，Y 轴表示软件分析入射角度 θ 减去真实入射角度，X 轴表示的不同的真实入射角度。

理论上最好的结果应该是一条接近与 X 轴的直线

该图显示了 TMVA 分析结果减去入射角度（蓝色）的平均值以及 FPGA 系统分析结果减去入射角度（红色）的平均值



赵瑞光, Luis Alejandro, IPHC, 2017

Sample Event number in FPGA: 2000-2499

红色 FPGA 系统分析结果与蓝色的 TMVA 软件的分析结果基本相符。

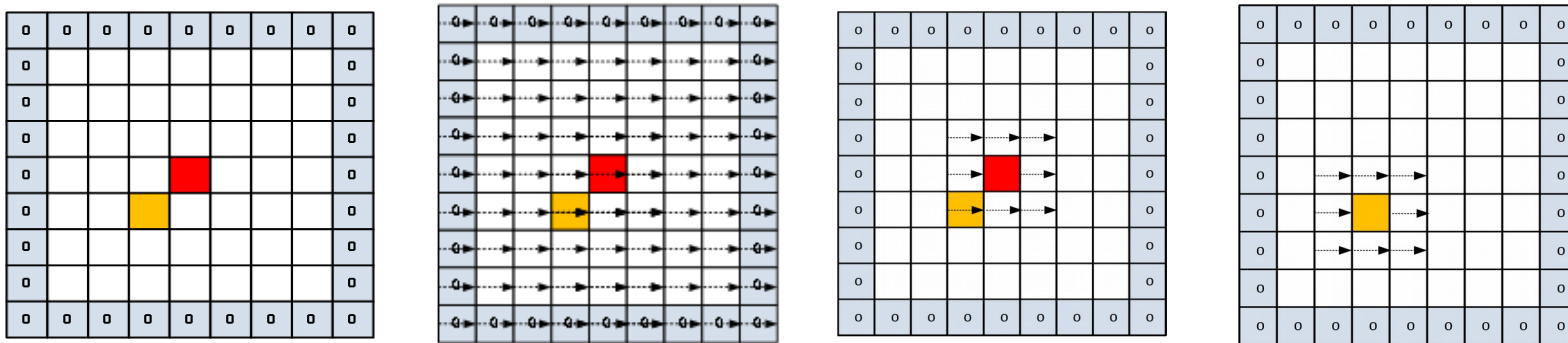
我们需要进行更多的训练，讨论该神经网络结构的性能

4. 研究与发展

研究与发展

1. 基于 M18 探测器与 FPGA 开发板的系统，采集更多的原始数据，确定出最终的精确的神经网络结构和参数。
2. 设计片上集成的神经网络电路，包括繁杂的数学计算，指数函数计算，除法计算等模块
3. 设计确定精确的簇形状算法电路（在 7×7 窗口下，包括如何认定一个簇的精确范围）
 - 1) 采用数字电路即存储整帧像素数据再处理，需要较大存储空间，FPGA 中现

行方案



- 2) 采用模拟电路即像素内确定簇具体形状的，需要较多的比较器等单元模块

研究与发展

- 4.设计探测器部分与神经网络部分的接口电路，采用串行的神经网络计算或者并行的神经网络计算
 - 采用串行神经网络计算，需要的时间根据每帧图像中簇的个数而改变，速度较慢，但是占用面积和资源较小；
 - 采用并行神经网络计算，需要较多的面积和资源，如多套的数学计算电路，多套的数据标准化电路，多套的激活函数电路 ...
- 5.考虑集成探测器与神经网络计算模块时间与面积的平衡

谢谢

参考文献

- [1] arXiv:physics/0703039 [Data Analysis, Statistics and Probability] , CERN-OPEN-2007-007, TMVA version 4.2.0 , October 4, 2013, [http:// tmva.sourceforge.net](http://tmva.sourceforge.net)
- [2] A. Besson ; Towards low occupancy ILD VTX detector in CMOS technology adapted for tracking and vertexing, International Workshop on Future Linear Colliders LCWS2016, Morioka, Japan, 5-9 December 2016.
- [3] A. Besson ; CMOS pixel sensors with on-chip Neural Network : A new horizon for embedded systems, ATTRACT TWD Symposium : Trends, Wishes and Dreams in Detection and Imaging Technologies; Strasbourg, 4-5 November 2016.