

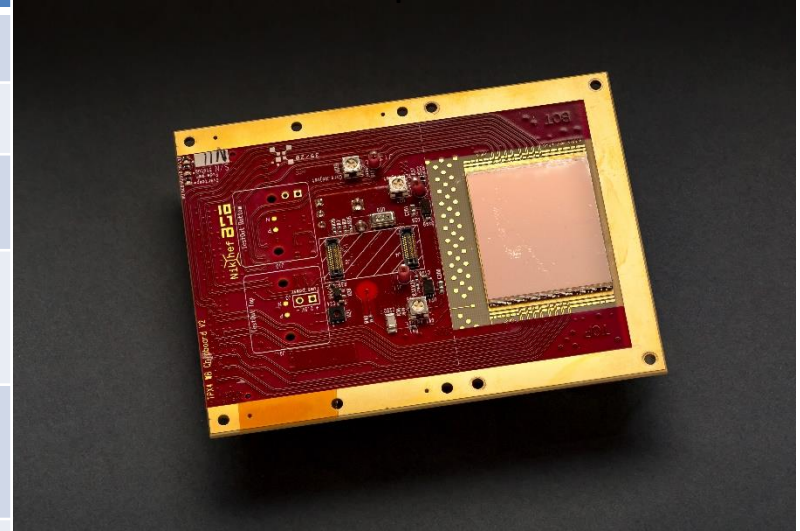


Семинар «Разработка алгоритма кластеризации для пиксельных детекторов для ПЛИС»

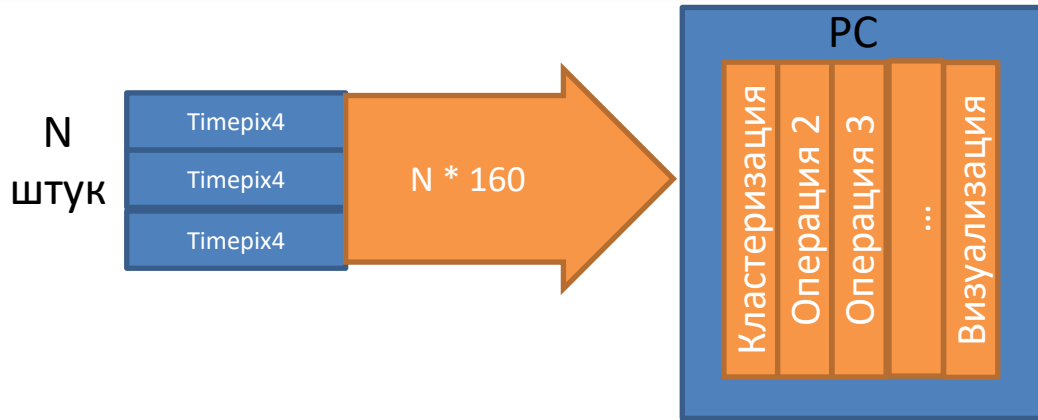
Лапкин Александр Викторович

Характеристика	Timerix 1	Timerix 3	Timerix 4
Размер пикселя	55 мкм	55 мкм	55 мкм
Тех. процесс	250 нм	130 нм	65 нм
Диапазон по x/y	256/256	256/256	512/448
Тип чтения	Покадровый	Покадровый/ Data driven	Покадровый/ Data driven
Скорость счета (M счетов /мм ² /с)	<3200 кадров в сек	0,43	3,58
Поток данных	< 3,2 Gbps	< 5,12 Gbps	< 163,84 Gbps

Timerix 4

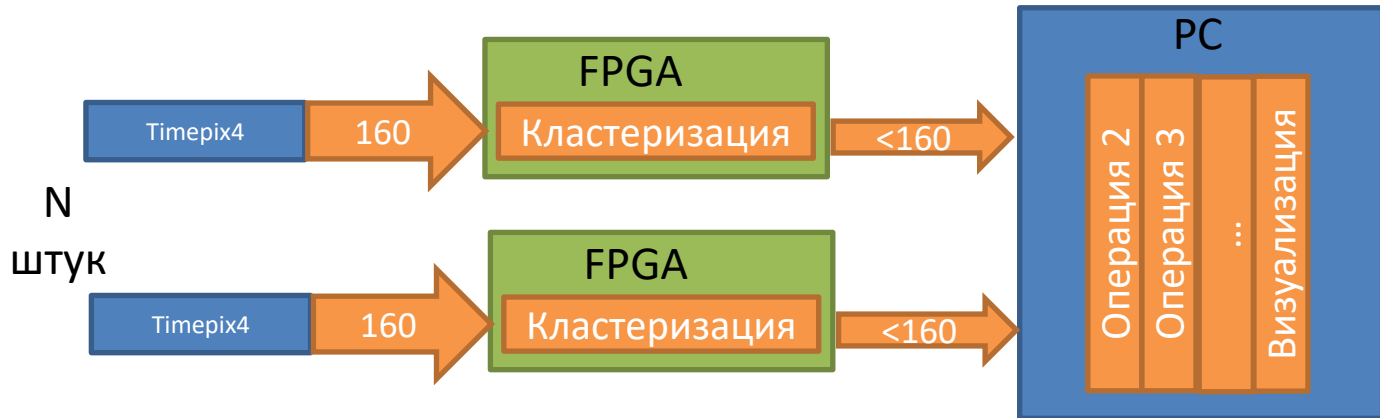


- Timerix – полупроводниковые гибридные пиксельные детекторы
- Разработаны коллаборацией Medirix
- Поток данных от одного Timerix 4 до **163,84 Gbps**

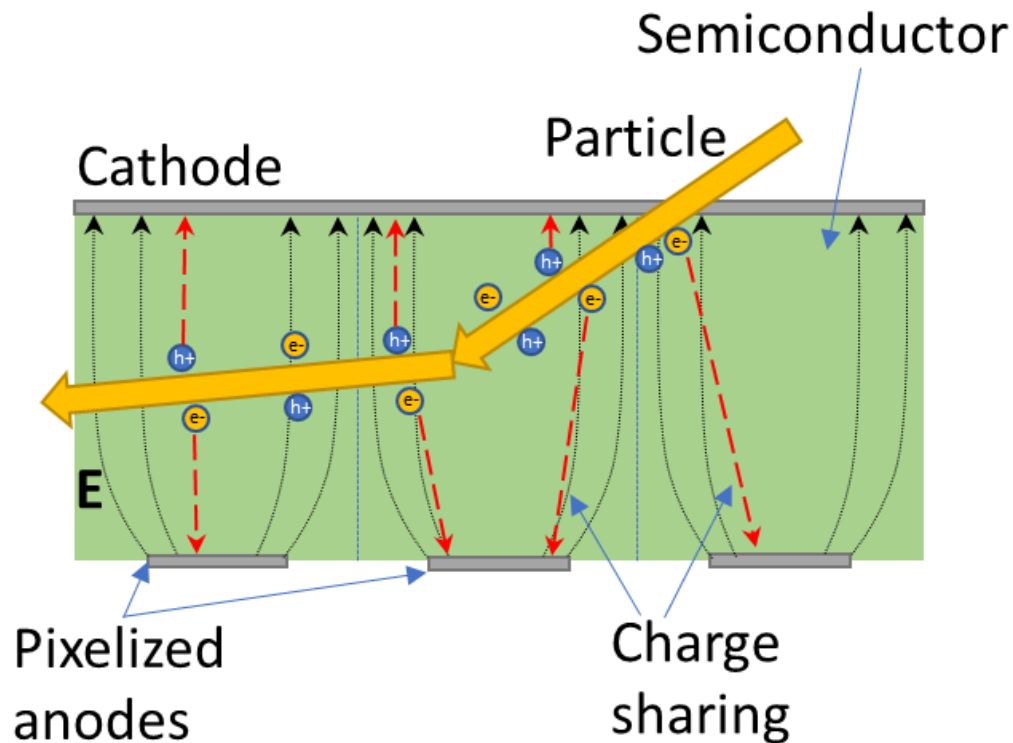


- Долгая обработка
- Требуется много памяти

- Сокращение времени обработки
- Сокращение объема необходимой памяти
- ПЛИС являются основой многих систем считывания

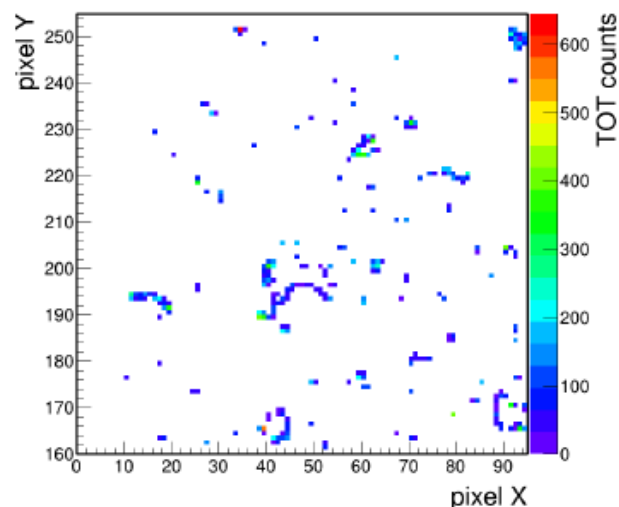
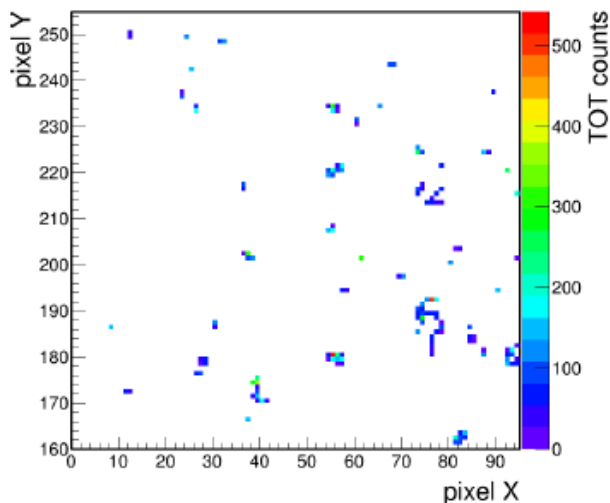


- При взаимодействии частицы и материала сенсора возникают свободные носители заряда.
- Носители заряда наводят сигнал на электроды пикселей
- Разделение заряда – сбор заряда от одной частицы в разных пикселях
- Причины разделения зарядов
 - Взаимодействие частицы с веществом детектора напротив границы пикселей
 - Длинный трек частицы в полупроводнике
 - Диффузия облака носителей заряда
 - Неоднородность электрического поля в полупроводнике (вблизи электродов, вблизи края детектора)
 - Дефекты полупроводника
 - Флуоресценция



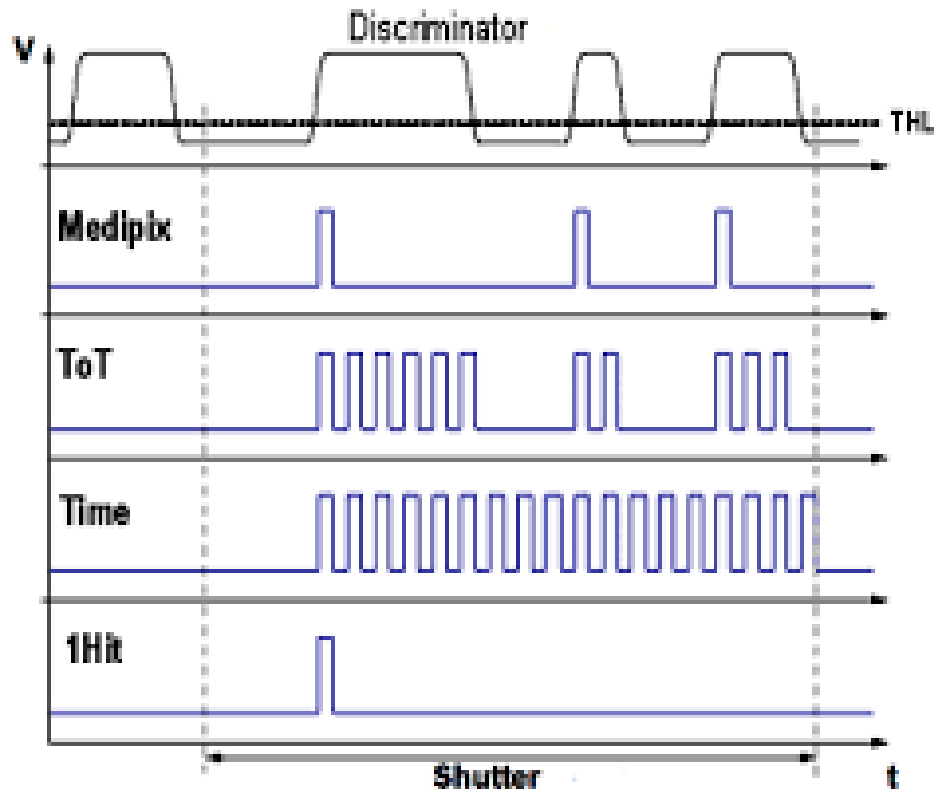
Кластер - группа ненулевых пикселей с общими границами, окруженная со всех сторон пикселями с нулевыми данными. Ненулевые пиксели, имеющие общий угол считаются принадлежащими одному кластеру.

Кластеризация – процесс объединения пикселей от одного события в кластеры и расчет их характеристик

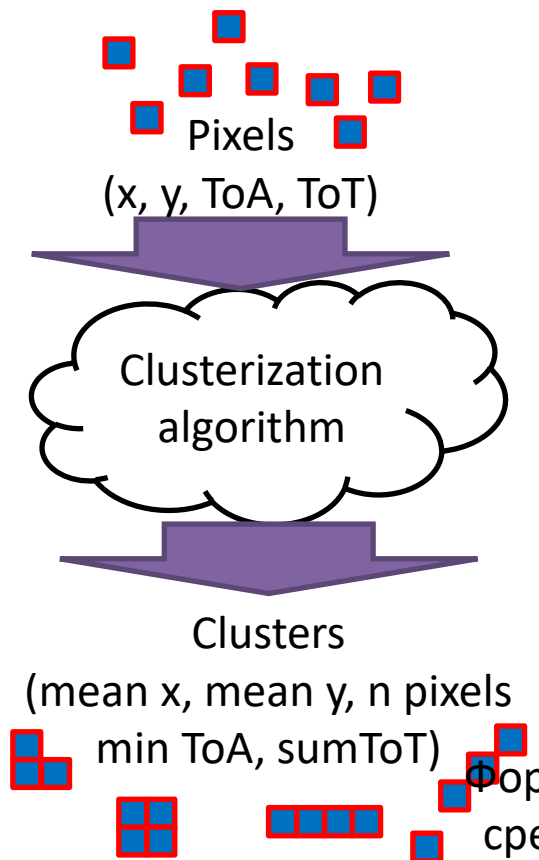


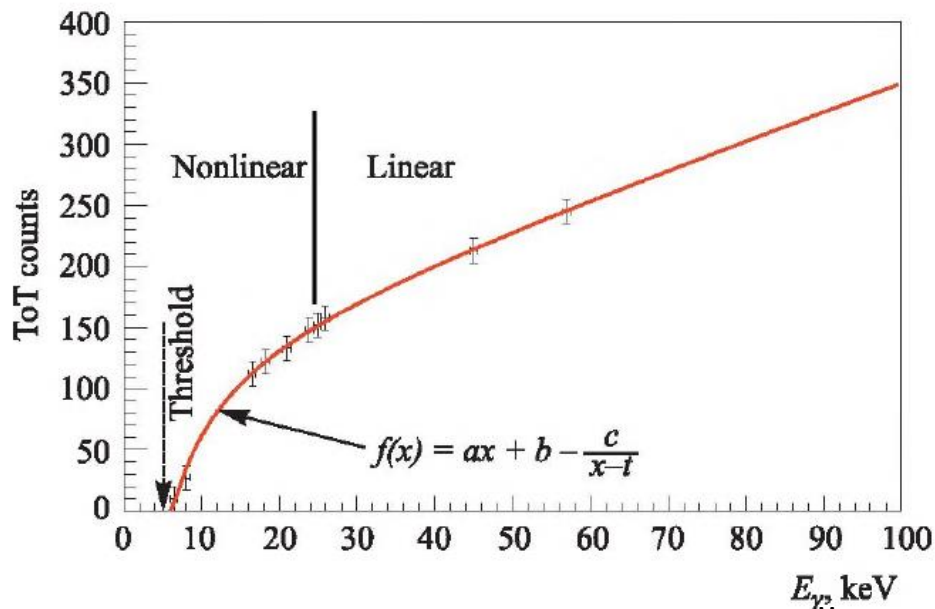
Образец пиксельного полупроводникового – Timerix / Timerix3

- 256x256 пикселей = 65536 пикселей.
- Вывод данных производится покадрово, последовательно
- Пакет пикселя включает:
 - Координаты x, y
 - Длительность сигнала над порогом (Time over Threshold, ToT)
 - Время пересечения сигналом порога детектора (Time of Arrival, ToA, Time на картинке)



- Пиксели, имеющие общий угол, считаются принадлежащими одному кластеру.
- Пакет кластера включает:
 - Данные о положении: средневзвешенные координаты.
 - Данные о суммарной энергии: сумма длительности сигнала над порогом для всех пикселей кластера.
 - Данные о времени прилета частицы: минимальное значение времени прилета по всем пикселям.
 - Данные о числе пикселей в кластере.
- Данные о форме кластера должны использоваться для объединения пикселей в кластеры, но не выводятся.

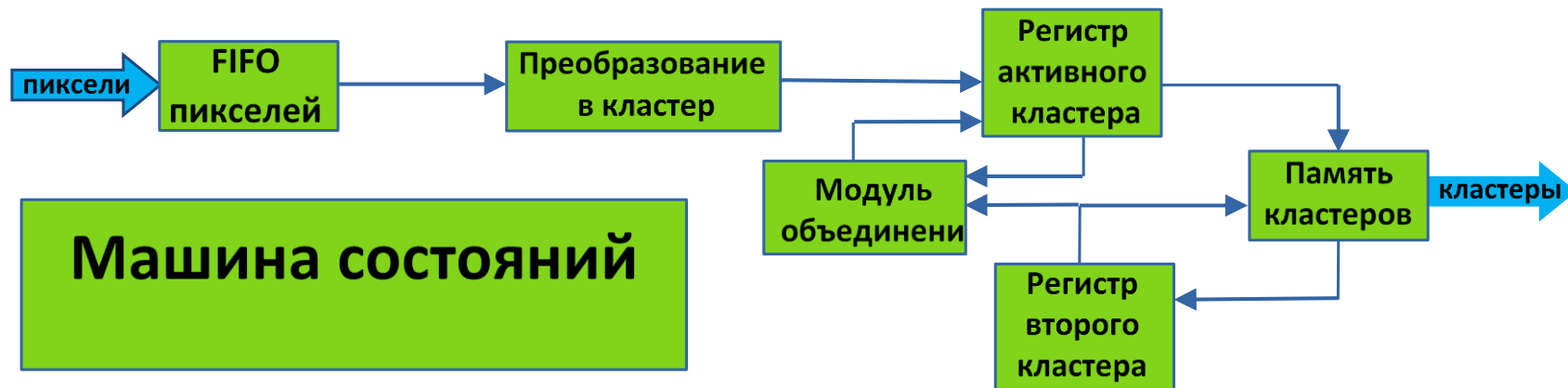




- Зависимость ToT от энергии нелинейная, но имеет линейный участок.
- Здесь она предполагается линейной.
- Возможен расчет энергии по ToT для пикселя перед кластеризацией

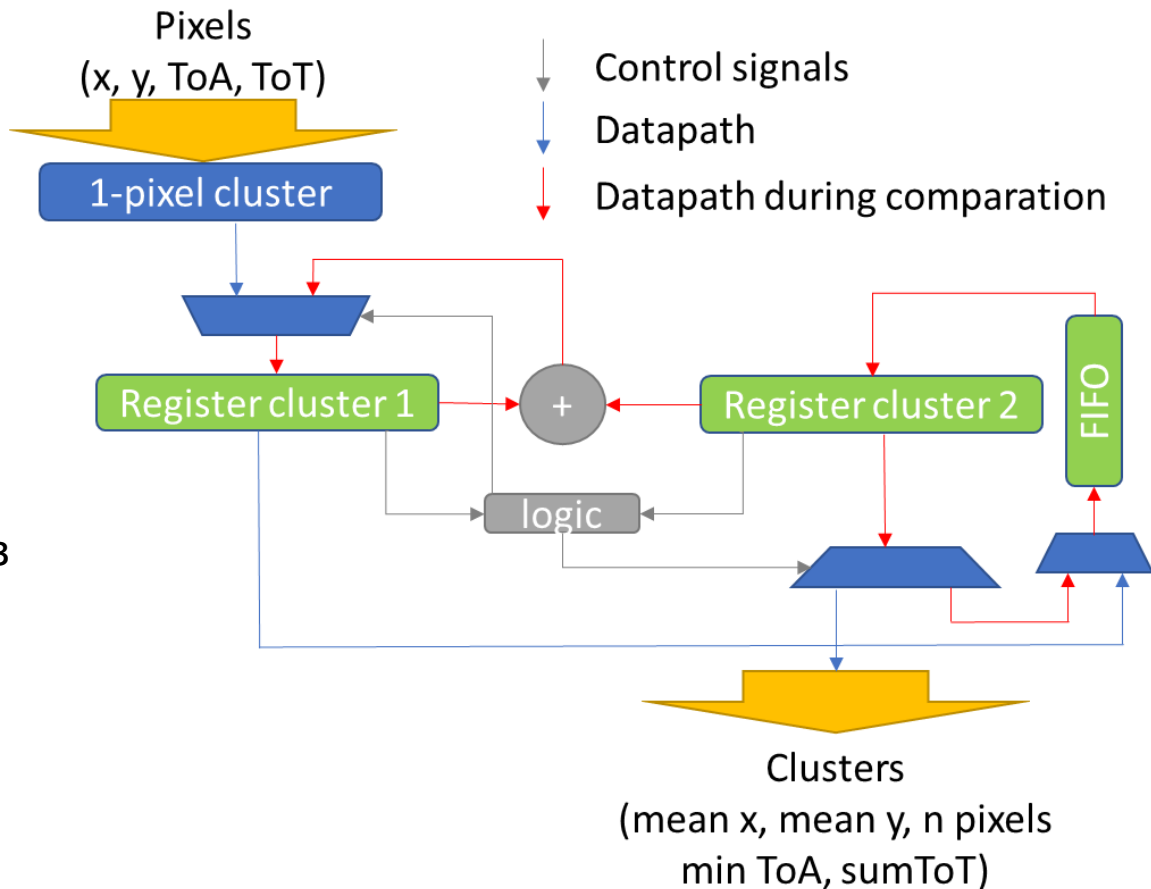
$$\bar{x} = \frac{\sum_{pix} x_{pix} ToT_{pix}}{\sum_{pix} ToT_{pix}}$$

- Координаты рассчитываются как средневзвешенные координаты по ToT (энергии) пикселей
- Используются числа с фиксированной запятой (8, 8)

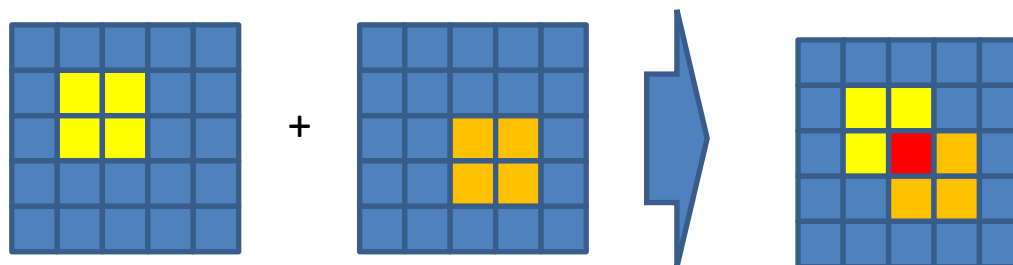


- Попарное сопоставлении кластеров на возможность их слияния.
- Алгоритм работает последовательно несколько тактов с одним пикселем.
- Необходимо FIFO перед модулем кластеризации.
- Работой алгоритма управляет машина состояний

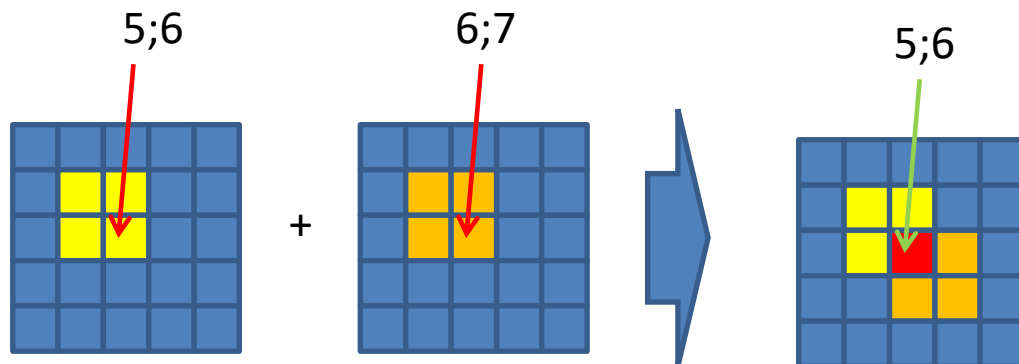
- Пиксель преобразовывается в однопиксельный кластер.
- Однопиксельный (активный) кластер сопоставляется со всеми кластерами из FIFO кластеров
- Если кластеры можно объединить, то они сливаются. Результат записывается на место активного (1) кластера.
- После перебора всех кластеров из FIFO активный кластер записывается в FIFO.
- После окончания пикселей кластеры выводятся из FIFO.



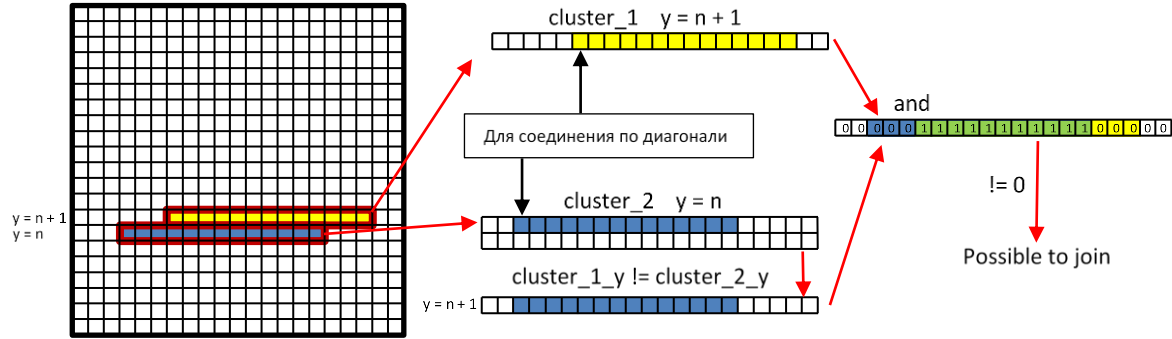
- Для сопоставления кластеров необходима информация о их форме.
- Карта детектора – способ хранения формы кластера.
- Карта детектора – массив бит по числу пикселей.
- Если пиксель (x, y) принадлежит кластеру то биты соответствующие пикселям (x, y) , $(x + 1, y)$, $(x, y + 1)$, $(x + 1, y + 1)$ равны 1.
- Сопоставление – побитовое И между картами. Если есть единицы – кластеры сливаются.
- Карта объединенного кластера – побитовое ИЛИ между картами
- Требуется большой объем памяти (8 кБ). Неприменимо.



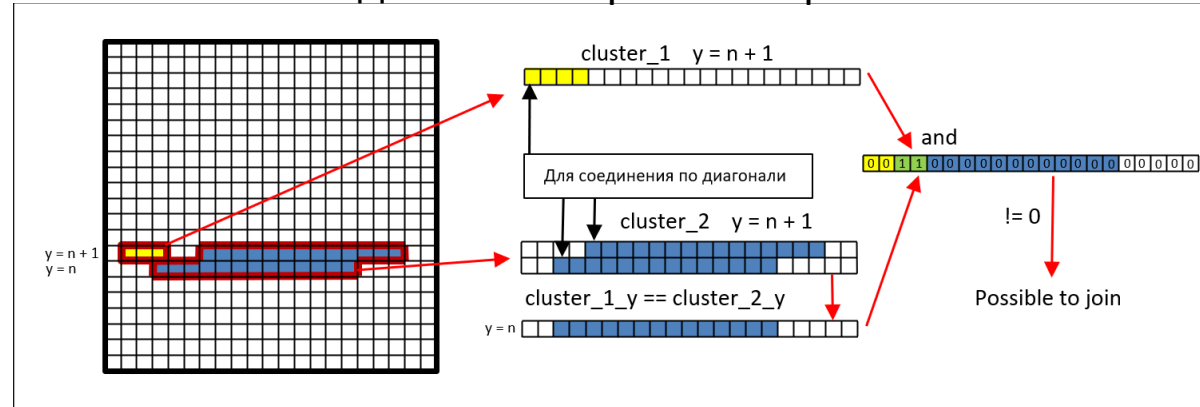
- Частичная карта детектора – массив бит, соответствующий области детектора.
- Необходимы дополнительные координаты карты.
- Перед сопоставлением карт необходимо выравнивание.
- Корректность кластеризации не гарантирована
- Осуществимо на практике



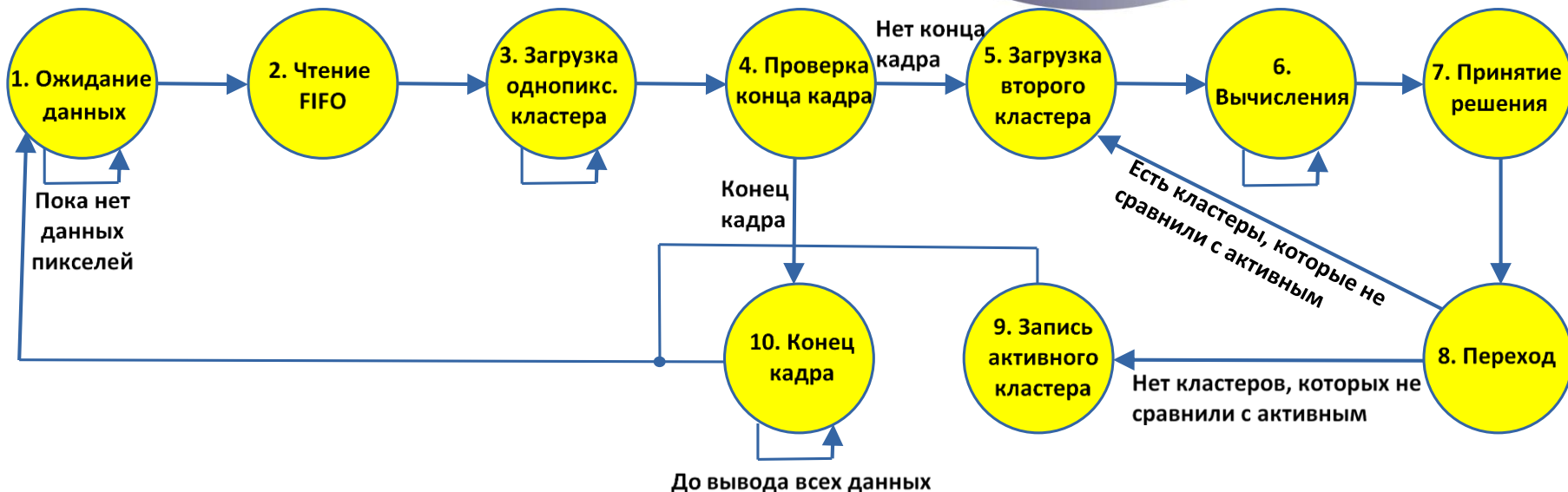
- Использование порядка пикселей позволяет упростить алгоритм
- Пиксели поступают построчно
- Кластеры могут прирастать пикселями только со стороны больших y .
- Частичная карта - две строки (512 бит)
- Появляется критерий вывода.
- Снижаются требования к FIFO кластеров
- При необходимости поступающие пиксели можно сортировать.



Объединение на разных строках

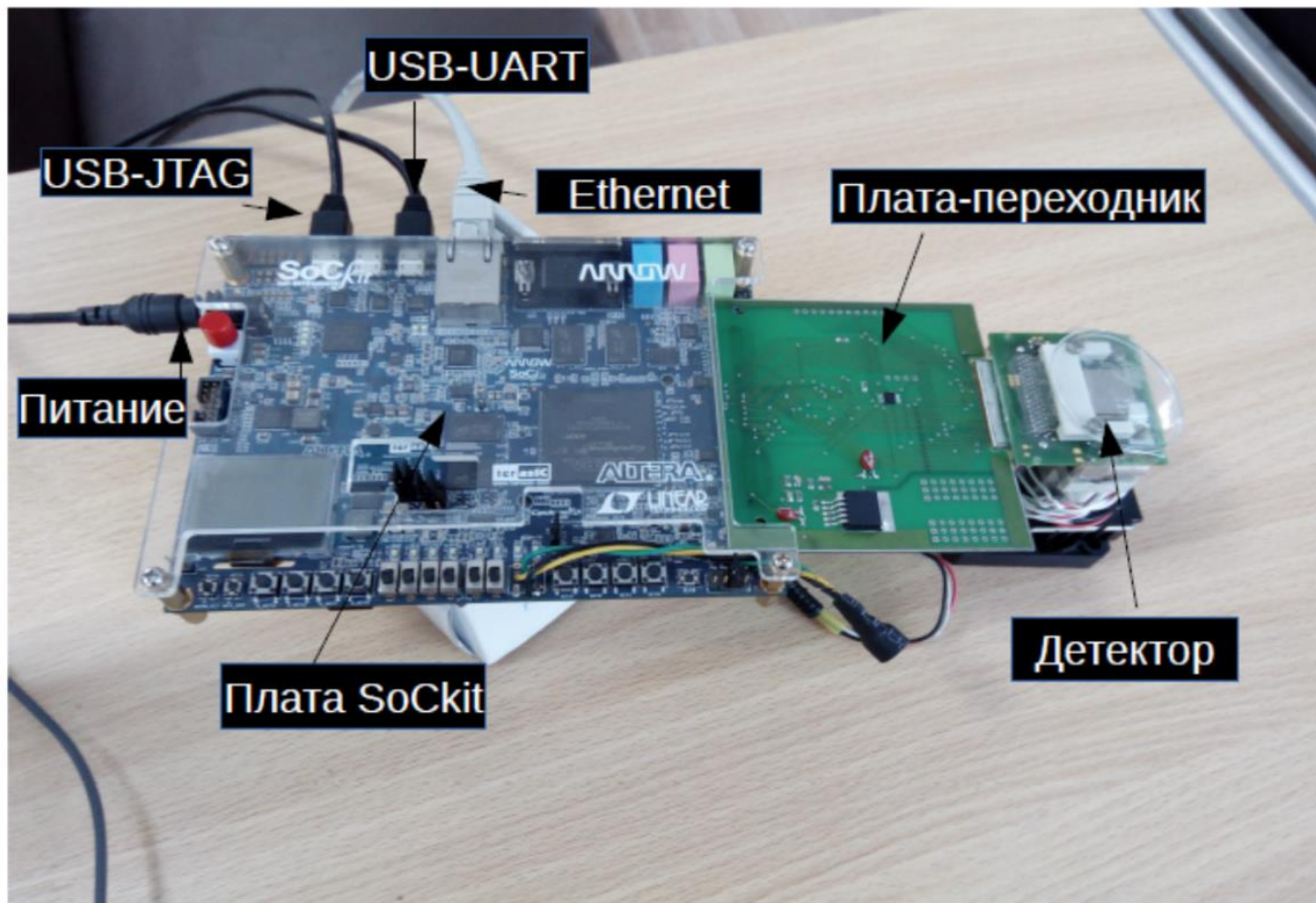


Объединение на одной строке

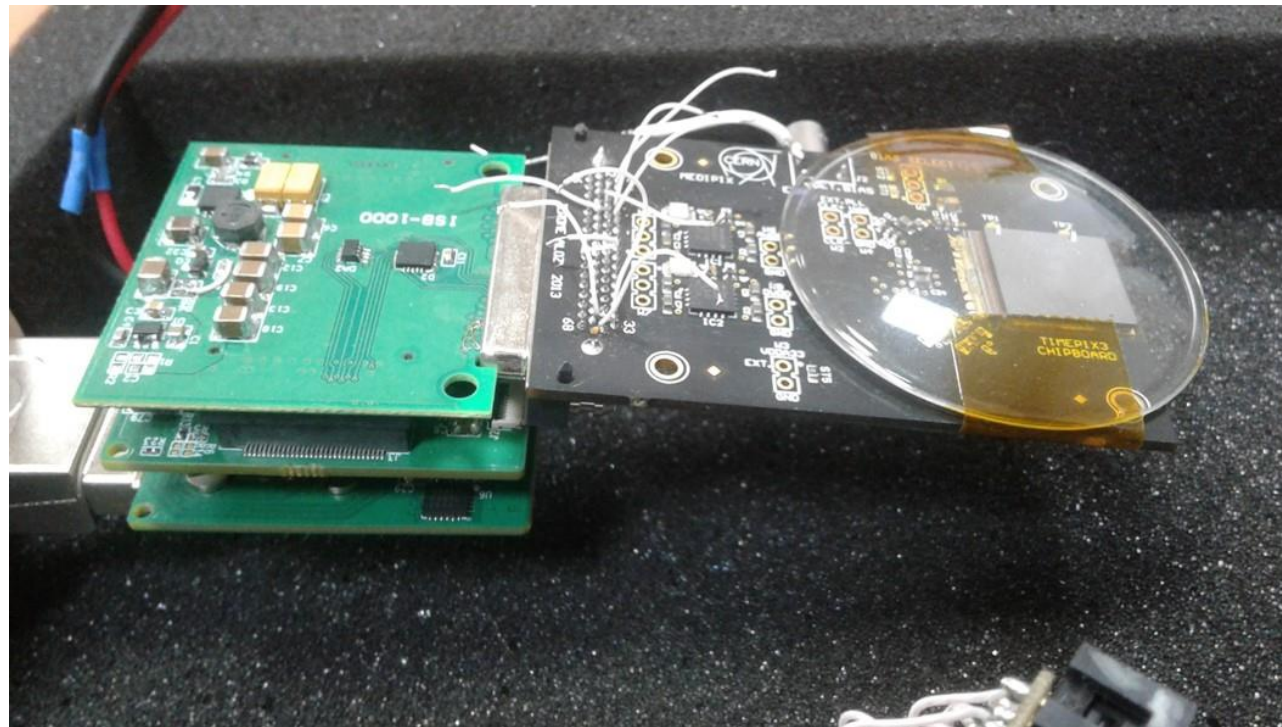


- Схема работы машины состояний, которая управляет работой модуля кластеризации в представленной реализации
- Модуль имеет режим конца кадра.
- Он служит для вывода данных из FIFO кластеров если данные закончились.
- Включение режима конца кадра осуществляется с помощью фиктивного пикселя
- Вычисления проводятся в течении 5 тактов

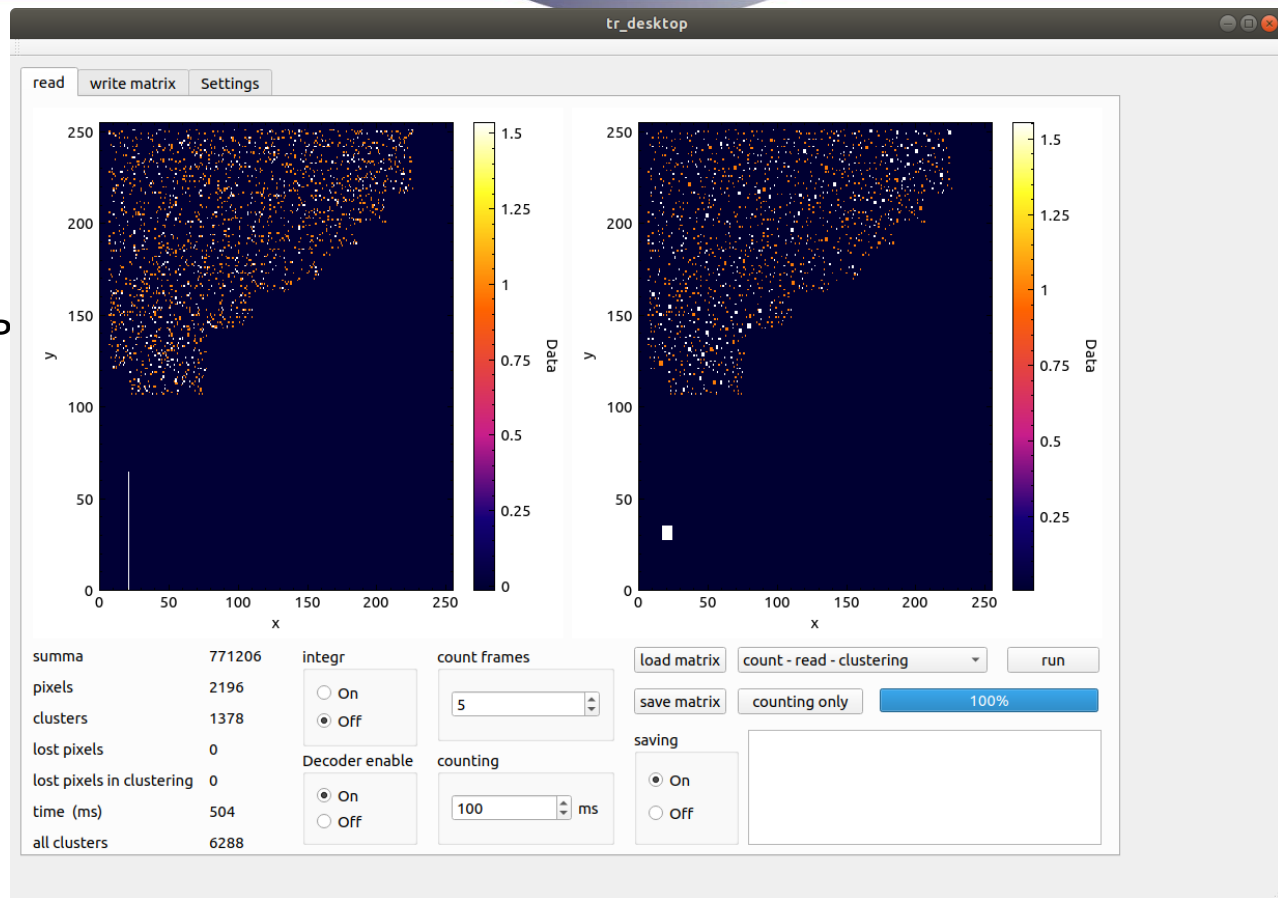
- Отладочная плата Arrow SoCkit с Cyclone V SoC.
- Выводит пиксели и кластеры
- Частота работы 50 МГц.
- Timerix выводит пиксели последовательно построчно в строгом порядке



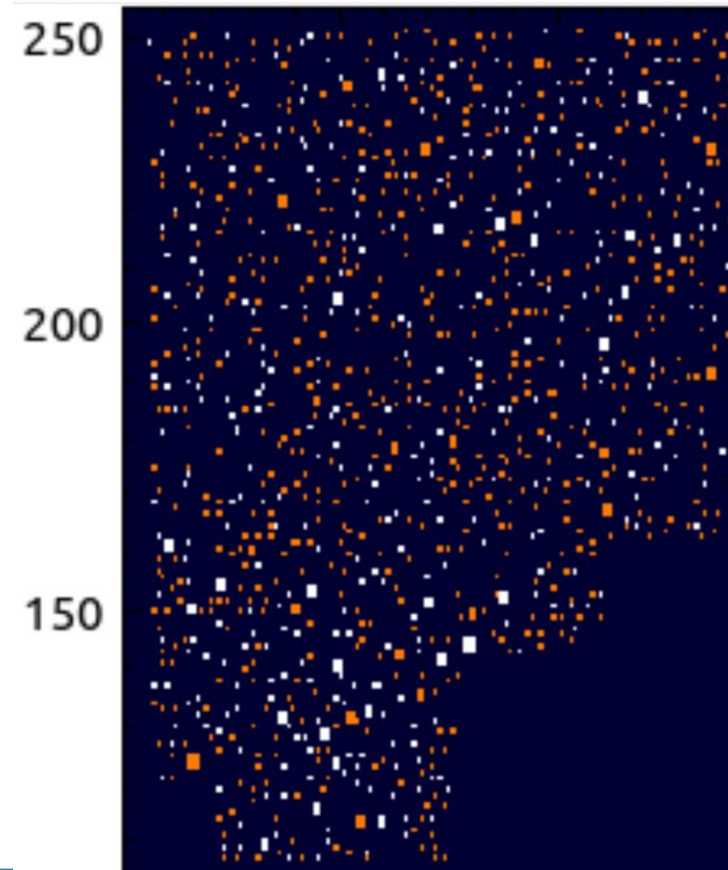
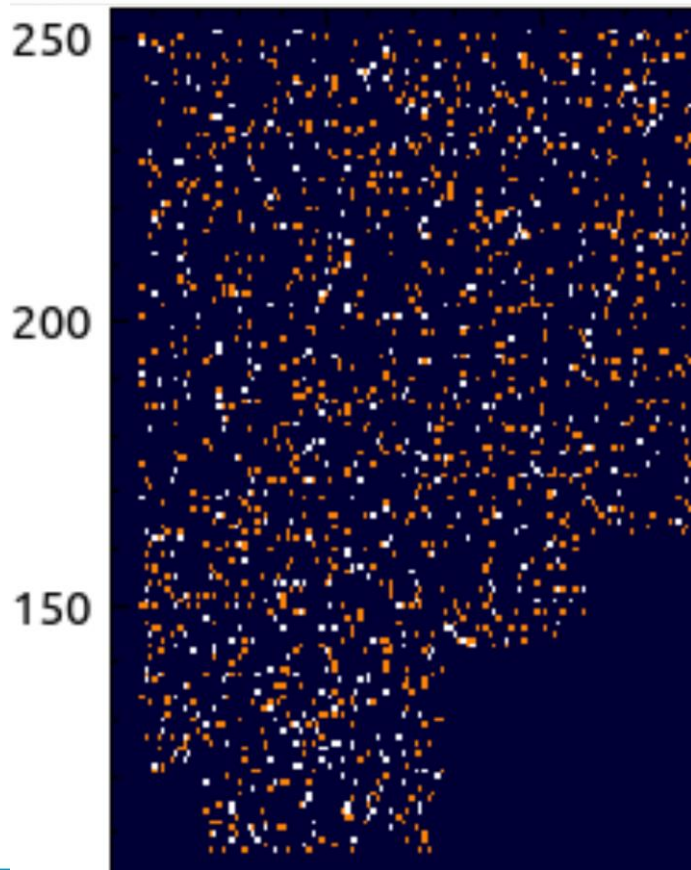
- Разработанная плата с Cyclone V
- Выводит пиксели и кластеры
- Частота работы 100 МГц.
- Timerix имеет 8 выводов
- Timerix не имеет строгого порядка пикселей
- Поток данных в ПЛИС сериализовывался и сортировался
- Кластеризация тестировалась для покадрового чтения.

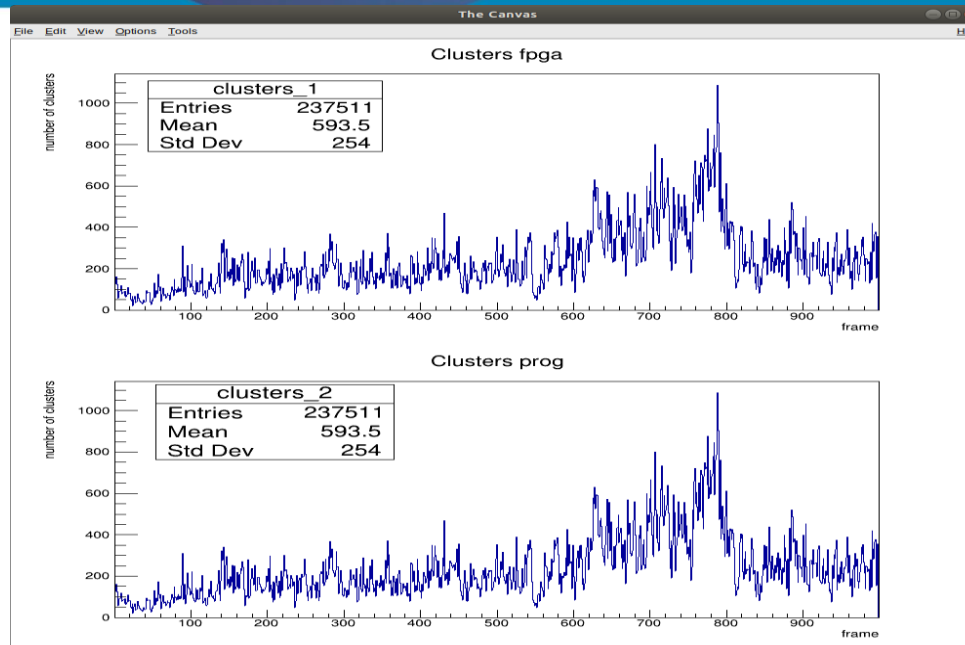
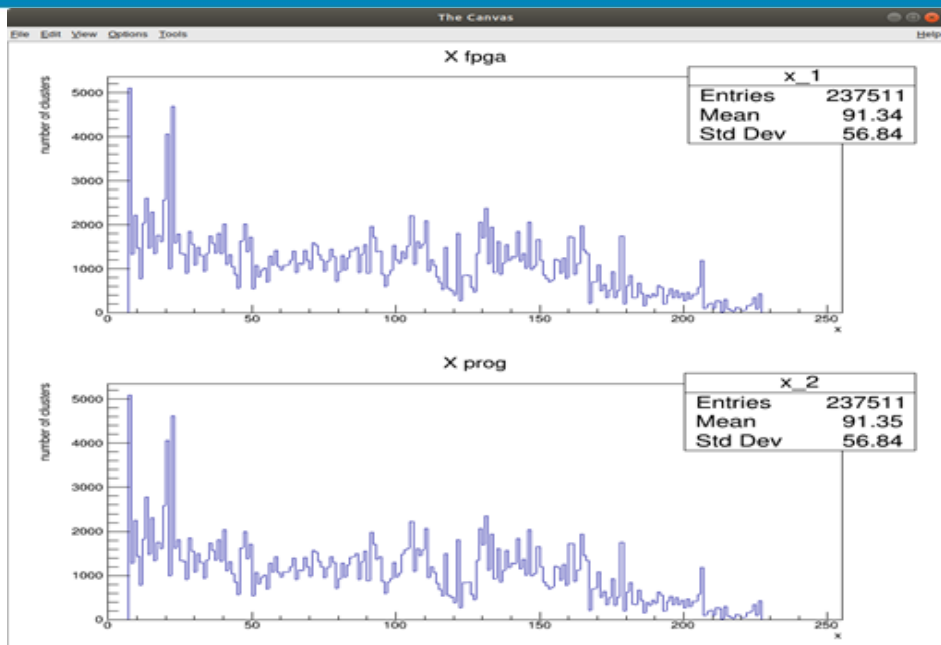


- ПО для Timerix 1 readout
 - Слева – пиксели, справа – кластеры
 - Кластер визуализируется в виде квадрата
 - Площадь квадрата – площадь кластера
 - Цвет кластера – сумма ToT деленная на площадь кластера
 - На кадре – шум.
- Моделирование большой загрузки
- Картинка с поврежденного детектора



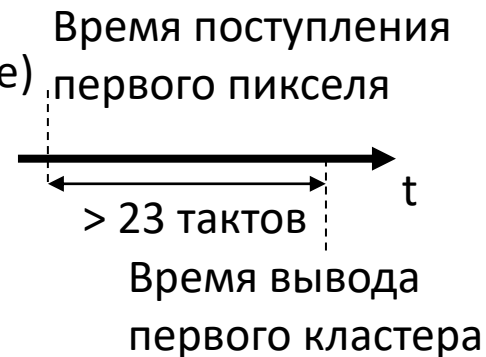
- В большем масштабе





- Была проведена экспериментальная проверка кластеризации.
- Данные – 1000 кадров с шумом.
- Результат сравнивался с программной кластеризацией.
- Отличия только в расчетах средневзвешенных координат.
- Справа – число кластеров в кадре, слева – распределение кластеров по x

- Временные характеристики зависят от загрузки детектора, формы и распределения кластеров
- Общая задержка потока данных не меньше 23 тактов.
- Поток данных на выходе не больше 1 кластера на 10 тактов.
- С увеличением числа кластеров время кластеризации растет как квадрат числа кластеров.
- Время между чтениями пикселей $11 * (n + 1)$, где n – число кластеров в памяти
- Уменьшение потока данных = $\frac{\text{размер_данных_кластера}}{(\text{размер_данных_пикселя} * \text{среднее_число_пикселей_в_кластере})}$



Ресурсы ПЛИС потребляемые
конфигурацией (для Timerix 3 readout) с
модулем кластеризации

Flow Summary	
Flow Status	Successful - Fri Jul 16 15:52:20 2021
Quartus II 64-Bit Version	15.0.0 Build 145 04/22/2015 SJ Full Version
Revision Name	CtrlTimePix3
Top-level Entity Name	CtrlTimePix3
Family	Cyclone V
Device	5CGTFD5C5F23C7
Timing Models	Final
Logic utilization (in ALMs)	12,653 / 29,080 (44 %)
Total registers	24359
Total pins	70 / 268 (26 %)
Total virtual pins	0
Total block memory bits	1,501,592 / 4,567,040 (33 %)
Total DSP Blocks	2 / 150 (1 %)
Total HSSI RX PCSs	4 / 6 (67 %)
Total HSSI PMA RX Deserializers	4 / 6 (67 %)
Total HSSI TX PCSs	4 / 6 (67 %)
Total HSSI PMA TX Serializers	4 / 6 (67 %)
Total PLLs	7 / 12 (58 %)
Total DLLs	0 / 4 (0 %)



- Представлен алгоритм кластеризации на ПЛИС для систем DAQ пиксельных полупроводниковых детекторов.
- Была показана его работоспособность и способы адаптации для различных детекторов.
- Были продемонстрированы результаты экспериментальной проверки применения алгоритма.



Спасибо за внимание!
Вопросы?