

СЕКЦИЯ 14: МОНИТОРИНГ В УПРАВЛЕНИИ РАЗВИТИЕМ КРУПНОМАСШТАБНЫХ СИСТЕМ

ФРАКТАЛЬНАЯ НЕЙРОМОРФНАЯ АРХИТЕКТУРА РАСПОЗНАВАНИЯ ОБРАЗОВ ДЛЯ ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЙ ФИЗИКИ

Алюшин А.В.

*Национальный исследовательский ядерный университет «МИФИ»,
Россия, г. Москва, Каширское шоссе, д. 31
avalyushin@mail.ru,*

Архангельский В.Г.

*Федеральное государственное автономное научное учреждение "ЦИТус",
Россия, г. Москва, Пресненский Вал, д. 19, стр. 1
citis@arkhang.ru*

Аннотация: Предложена фрактальная нейроморфная архитектура с повторяющимися функциональными и структурными свойствами своих элементов на всех уровнях внутренней иерархии. Структура ориентирована на поиск редких полезных событий, "пирамидальную" обработку больших объемов экспериментальных данных в реальном масштабе времени с минимальной временной задержкой.

Ключевые слова: нейроморфная структура, физический эксперимент, реальный масштаб времени.

Введение

Поиск редких полезных событий с априори неизвестным полным набором характеристических параметров является одним из видов интеллектуальной обработки больших объемов информации. В случае быстропротекающих физических процессов крупномасштабных систем экспериментальной физики данный вид обработки данных, также как и мониторинг необходимых условий протекания ядерных реакций запланированного типа, скорость принятия решения имеет принципиальное значение. Предложена фрактальная нейроморфная архитектура с повторяющимися функциональными и структурными свойствами своих элементов на всех уровнях внутренней иерархии. Структура ориентирована на "пирамидальную" обработку больших объемов экспериментальных данных в реальном масштабе времени с минимальной временной задержкой. Проанализированы возможности современного технологического базиса по имплементации предложенного архитектурного решения.

1 Тенденции развития DAQ ядерного физического эксперимента

Основными тенденциями развития физического эксперимента являются:

- расширение исследуемого спектра энергетического взаимодействия как в сторону более высоких энергий, например в исследовании космических лучей, коллайдерных экспериментах, так и в сторону более слабых, например исследование светового излучения слабой интенсивности в тепловом диапазоне, исследование частиц со слабой ионизирующей способностью, исследование однофотонных событий;
- исследование все более тонких свойств материи со все более низкой вероятностью наблюдения полезного события;
- рост числа типов и масштабов детекторов элементарных физических событий в различных энергетических спектрах;
- совершенствование детекторов ядерных событий, увеличение их пространственно-временного разрешения, чувствительности, селективности, эффективности.

При этом, архитектура планируемого современного эксперимента, сложность и масштабность используемых детекторов и соответствующих систем сбора и обработки экспериментальных данных (DAQ -Data Acquisition, DAP - Data Processing) определяются пространственно-временным размером исследуемого физического события, его скоростью и частотой возникновения, доступными технологиями.

1.1 Основные функции систем DAQ и DAP

Основными составляющими DAQ и DAP являются следующие подсистемы: триггерная, сбора и хранения, мониторинга и управления. Триггерная подсистема отвечает за предварительное "качественное" распознавание полезного события и запуск основной полномасштабной системы сбора и хранения данных. По существу, триггерная система является выделенной частью DAQ, оптимизированной на получение сверхскоростной оценки происходящего события по критерию полезности с использованием некоторых быстро доступных признаков. Повышение точности принятия решения триггером достигается за счет увеличения временного окна анализа текущего события, перехода к многоуровневой структуре триггера и последовательно/параллельного сбора данных с распределенных в пространстве групп детекторов, работающих на различных физических принципах.

Подсистема сбора и хранения обеспечивает считывание данных со всех аналоговых и цифровых детекторов системы, преобразование их в единый стандартизированный формат, передачу в выделенную структуру хранения данных. Длительность считывания массива данных определяет мертвое время DAQ, в течении которого активность триггера блокируется. При этом восстановление зафиксированного события в едином пространстве и времени (кластеризация данных от различных пространственных групп детекторов с различным временем фиксации события и различным временем задержки передачи данных по линиям связи) имплементируется либо на этапе стандартизации и форматирования в on-line режиме, либо после сохранения всей "сырой" информации в базе данных в режиме off-line. Дальнейшая обработка записанных событий заключается в их дополнительной расширенной верификации, восстановлении треков и параметров исходного события, фильтрации по известным и новым предполагаемым признакам для поиска неизвестных ранее классов событий (типов взаимодействия, субатомных частиц).

Подсистема мониторинга и управления обеспечивает общее поддержание условий эксперимента в заранее заданных границах, осуществляет периодическую проверку, калибровку и адаптацию элементов всей системы, в частности параметров фильтрации триггерной подсистемы для эффективного поиска полезных событий, характеристик каждого детектора. Данная подсистема имплементируется в виде отдельной распределенной архитектуры и характеризуется наивысшим приоритетом, отсутствием "мертвого" времени при функционировании.

1.2 Масштабируемость детекторов систем физического эксперимента

Взаимодействие ядерных частиц с веществом детектора оставляет информационный след в виде треков ионизации атомов детектора, распределения возбужденных атомов при локальном взаимодействии. При этом детекторы на основе кристалла сцинтиллятора и светочувствительного сенсора обладают высоким пространственным и временным разрешением за счет оптической связи кристалла с сенсором и использования света в качестве промежуточного носителя информации (прямолинейное распространение с высокой скоростью $v=3 \cdot 10^8$ м/с для вакуума). Для масштабируемых детекторных систем светочувствительные сенсоры на основе кремниевого фотоумножителя (SiPM - Silicon Photo Multiplier, MPPC - Multi-Pixel photon Counter) имеют ряд существенных преимуществ по сравнению с другими светочувствительными устройствами типа лавинных фотодиодов (APD - Avalanche Photo Diode), PIN diode, вакуумных фотоумножителей (PMT):

- высокий коэффициент усиления, возможность детектирования единичных фотонов спектра 250-1100 нм, низкая чувствительность к внешнему магнитному полю;
- высокое быстродействие, широкий динамический диапазон, высокое отношение сигнал/шум;
- высокая эффективность регистрации (высокий квантовый выход PDE);
- малые геометрические размеры (например 1×1 мм², 3×3 мм², 6×6 мм²), возможность плотной компоновки при масштабировании;
- совместимость со стандартным CMOS технологическим процессом, возможность интеграции сенсоров и элементов DAQ и DAP в единой твердотельной полупроводниковой структуре.

Данный вид сенсоров является основой широкого спектра детекторов, например нейтронного и Черенковского излучений, calorиметров, регистраторов гамма-квантов для ядерной медицины.

В табл. 1 представлены основные параметры светочувствительных сенсоров на основе технологии SiPM [1]. Каждый сенсор представляет собой матрицу светочувствительных пикселей, работающих параллельно. Соответственно динамический диапазон сенсора DR определяется как $DR = 20 \log$.

Покрывание всего регистрационного поля физического эксперимента достигается за счет соответствующего масштабирования:

- применения кристаллов сенсоров максимального размера ($6 \times 6 \text{ мм}^2$) с получением максимального динамического диапазона, наибольшей эффективности PDE, но при пониженных шумовых и скоростных характеристиках;
- применения кристаллов сенсоров минимального размера ($1 \times 1 \text{ мм}^2$) с получением минимальных временных задержек и уровня шумов, но при снижении величины DR и значения PDE;
- применения 2D матриц SiPM на одном носителе;
- объединения 2D матриц в 2D пространственную структуру под топологические требования эксперимента;
- переходом к обработке данных на уровне отдельного пикселя в 2D матрице светочувствительного сенсора.

Таблица 1. Параметры современных сенсоров SiPM производства Hamamatsu

Сенсор	Размер активной зона, мм	Длина волны, нм	Число пикселей, N	Шаг пикселя, мкм	Темновой счет	Коэффициент усиления	PDE	DR, дБ
S13360-6075CS	6,0x6,0	270-900	6 400	75	2000	$4,0 \times 10^6$	50	76
S13370-6050CN	6,0x6,0	120-900	14 400	50	4	$2,55 \times 10^6$	35	83
S13360-6025CS	6,0x6,0	270-900	57 600	25	1600	$7,0 \times 10^6$	25	95
S14160-3010PS	3,0x3,0	290-900	90 000	10	700	$3,6 \times 10^5$	18	99

Параметры 2D матриц SiPM с наибольшим пространственным покрытием некоторых ведущих производителей представлены в табл. 2 [1-4].

Таблица 2. Параметры современных матриц кремниевых SiPM

Матрица	Производитель	Пиксель, мм	Микро-ячейка, мкм	Интерфейс	Число контактов
8x8J	SensL	6x6, 4x4, 3x3	20/35	параллельный	64
8x8C	SensL	6x6/ 1x1	35	параллельный	160/144
12x12	SensL	3x3	35	параллельный	320
8x8WL	KETEK	3x3	25/35/47	параллельный	160
8x8WB	KETEK	3x3/1x1	25	параллельный	66
8x8J 50,4x50,4мм ²	ON Semiconductor	6,07x6,07	35	параллельный	160:64-fast, 64-standart,
12x12C 50,2x50,2мм ²	ON Semiconductor	3x3	35	параллельный	320:144-fast, 144-standart,

Основу большинства 2D матриц составляют сенсоры с размером пикселя в диапазоне 20-35 мкм, что гарантирует достаточно высокий динамический диапазон при высоком значении PDE.

1.3 Скорость реакции детекторов SiPM

Наибольшим быстродействием обладают сенсоры с малыми геометрическими размерами ($1 \times 1 \text{ мм}^2$, $3 \times 3 \text{ мм}^2$) за счет снижения общей емкости полупроводниковой структуры. Однако изготовление сцинтилляционных кристаллов с сечением менее $3 \times 3 \text{ мм}^2$ сопряжено с рядом технологических трудностей, также увеличивается роль краевых эффектов. Параметры быстродействующих сенсоров SensL представлены в табл. 3 [2]. Время восстановления сенсора может быть значительно снижено до 5-20 нс за счет применения низкоомной нагрузки (1 Ом).

Таблица 3. Параметры современных пиксельных элементов SiPM производства SensL

Сенсор	PDE, %	Коэф. усиления	Скорость темного счета, кГц	Время нарастания, нс	Ширина импульса, нс	Время восстановления, нс
10035C	31-41	3×10^6	30	0.3	0.6	180
30035C	31-41	6×10^6	300	0.6	1.5	180
30050C	35-47	3×10^6	300	0.6	1.5	350
60035C	31-41	3×10^6	1200	1.0	3.2	210

Высокое быстродействие SiPM и соответствующих сцинтилляторов (см. табл. 4) является необходимым условием работы детекторной системы в режиме высокого пространственного разрешения - TOF (Time Of Flight). В этом режиме фиксируется временная разница Δt детектирования одного события разнесенными в пространстве сенсорами (например, двух гамма-квантов с энергией 511 кэВ для ПЭТ). Соответственно, разница расстояний от детекторов до точки вылета зафиксированных частиц составляет $\Delta L = \Delta t * v$.

Таблица 4. Параметры современных пиксельных сцинтилляторов

Сцинтиллятор	Световой выход, %	Плотность, г/см ³	Время восста-я, нс	Производительность, соб/с	Область применения
NaI	100	3.67	230	<4.35*10 ⁶	X-ray
GAGG	140	6.63	88	<11.36*10 ⁶	HEP
CsI	120	4.53	1050	<0.95*10 ⁶	X-ray
LFS	85	7.35	33	<30.3*10 ⁶	PET, HEP
LYSO	80	7.25	41	<24.4*10 ⁶	PET, HEP
CWO	40	7.68	5000	<0.2*10 ⁶	X-ray КТ
BGO	12	7.13	300	<3.33*10 ⁶	PET, HEP
PWO	1.3	8.20	10	<100*10 ⁶	HEP
LXe (Liquid Xenon)	30000ф-н /511кэВ гамма-квант	2.98	<10	>100*10 ⁶	PET, HEP

Например, современная SiPM детекторная система Yamamatsu для ПЭТ [5] на основе LFS или LYSO характеризуется временным разрешением (CRT - Coincidence Resolving Time) в 280 пс. Применение более быстрых сцинтилляторов, например, на основе LXe [6], позволяет получить CRT на уровне 70-100 пс. Соответствующее пространственное разрешение имеет оценку в 3-5мм.

При этом вся система DAQ и DAP располагается в конструкции из нескольких PCB в непосредственной близости от 2D матриц SiPM. Производительность - 1*10⁶ соб/с.

1.4 Интеллектуальность DAQ и DAP

Масштабирование детекторной системы, ее пространственного и временного разрешения, а также повышение достоверности распознавания наблюдаемого физического события, приводит к необходимости дополнительной интеллектуальной обработки данных на всех уровнях DAC и DAP. Необходимо учитывать:

- температурную нестабильность и разброс параметров как элементов матриц детекторов, так и элементов DAQ;
- эффекты оптической взаимосвязи пикселей сенсоров SiPM (cross-talk), автогенерацию импульсов после регистрации события (afterpulsing), генерацию темновых импульсов;
- краевые топологические эффекты - мертвые зоны между пикселями сенсора, между сенсорами, матрицами сенсоров;
- временную мертвую зону чувствительности, наложение выходных импульсов в пиксельной матрице, насыщение.

Кроме того, актуальной является задача восстановления потерянных данных, адаптации DAQ под событие с полным поглощением/рассеиванием ядерных частиц, все более избирательной фильтрации и точного распознавания редких событий, более точной временной привязки к событиям в триггерной системе:

- точная временная привязка события за счет учета траекторий движения вторичных фотонов в кристалле сцинтиллятора (требуется распознавание траекторий и реконструкция точки поглощения гамма-кванта);
- калибровка пикселей по светочувствительности и временной задержке;
- реконструкция траектории движения при Комптоновском рассеивании (повышение контрастности и снижение шума, повышение эффективности регистрации);
- временная привязка без реконструкции траектории за счет отсчета не по первому фотону, а по усредненному времени регистрации группы фотонов. При этом высокое временное разрешение (CRT=70-100 пс) достигается даже для PDE >20%.

Указанные особенности относятся также и к другим типам детекторов, например, к пропорциональным камерам, полосковым сенсорам, дрейфовым камерам, калориметрам и другим.

1.5 Аналоговая и цифровая формы представления данных

Выходные сигналы всех пикселей в стандартном фотосенсоре соединены параллельно. С этой точки зрения данный тип SiPM следует рассматривать как аналоговый. При высоких уровнях засветки аналогового SiPM (aSiPM) (см. рис. 1) в значительной степени начинают проявляться эффекты насыщения фотосенсоров и наложения выходных импульсов во времени. Обработка выходного сигнала SiPM осуществляется за счет аналогового интегрирования с определением суммарного заряда события. При малых уровнях засветки aSiPM данные эффекты маловероятны, каждое событие обрабатывается в DAQ в цифровом виде. Энергия события определяется за счет цифрового суммирования отдельных выходных импульсов активных пикселей.

Таким образом, цифровая обработка данных с высоким отношением сигнал/шум и высокой линейностью реализуется в DAQ на основе aSiPM при низко интенсивной и разнесенной во времени активации пикселей в матрице aSiPM.

Обработка данных с цифровым качеством при высоком уровне засветки реализуется в цифровых фотоприемниках dSiPM - матрице одно пиксельных фотоприемников с соответствующей системой DAQ для каждого пикселя (рис. 4). Интеграция начальных уровней DAQ и DAP для отдельной матрицы SiPM с пикселями самой матрицы фотоприемника приводит к появлению сверх результата:

- высокое быстродействие за счет малой емкости одного пикселя, коротких локальных связей;
- низкий уровень темновых импульсов, широкий динамический диапазон;
- сверхвысокое быстродействие за счет малого времени восстановления (управляемый цифровой перезаряд пикселя), возможность выборки каждого пикселя для контроля и тестирования, отключения.

Однако, имплементация dSiPM в рамках стандартных CMOS технологий даже с минимальным объемом цифровой обработки данных приводит к существенному снижению величины PDE.

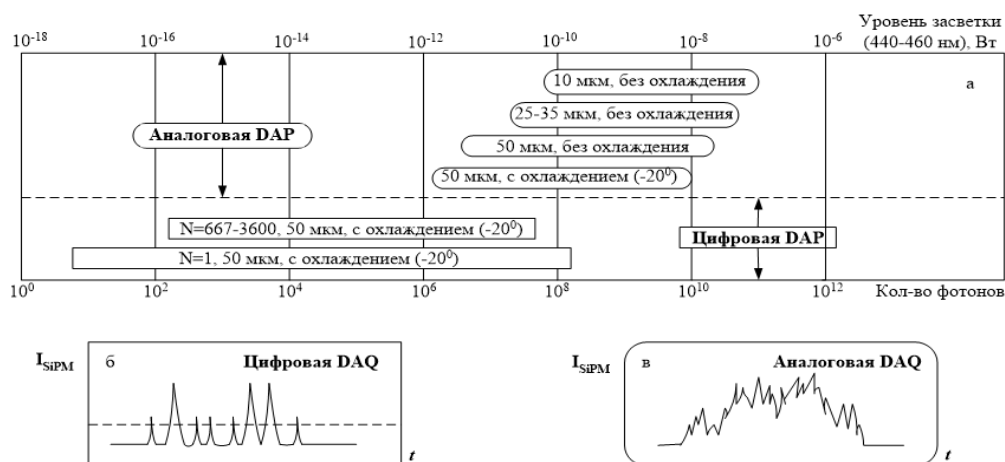


Рис. 1. Аналоговая и цифровая формы представления данных в DAQ в зависимости от уровня засветки aSiPM

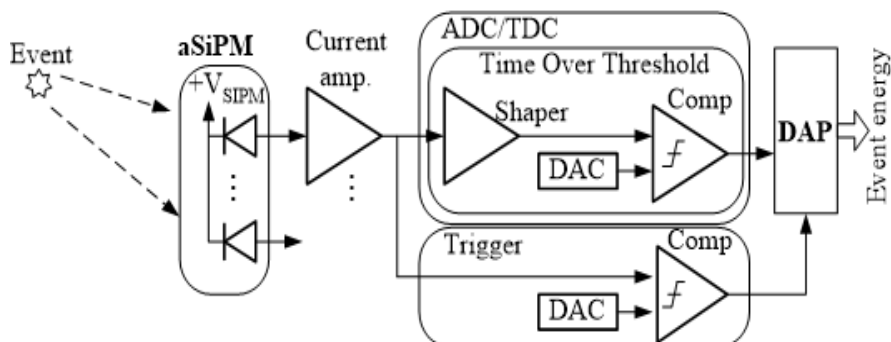


Рис. 2. Аналоговая обработка в DAQ и DAP

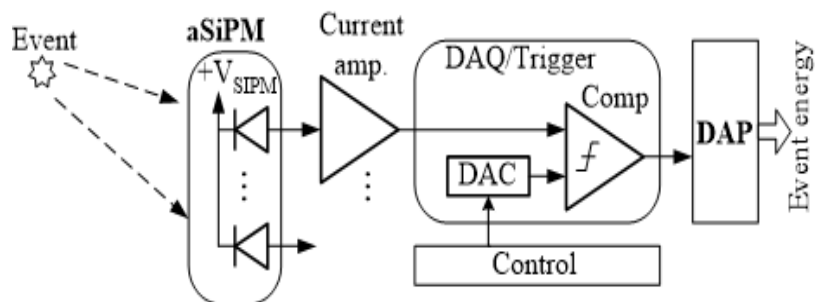


Рис. 3. Цифровая обработка в DAQ и DAP

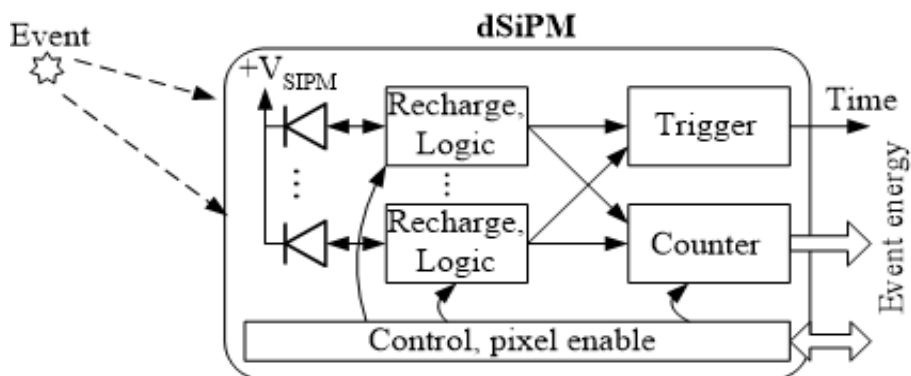


Рис. 4. Цифровая обработка в dSiPM

Таким образом, современной тенденцией развития детекторных систем физического эксперимента является повышение чувствительности, эффективности регистрации полезных событий, пространственного и временного разрешения за счет интеллектуализации процесса считывания и обработки данных на всех уровнях, в частности:

- "дисперсии" нижнего уровня обработки данных в DAQ и DAP до уровня "дисперсии" пикселей в фотодатчике;
- интеграции "мелкодисперсных" функций DAQ и DAP с функцией преобразования информации в пиксельной структуре.

2 Фрактальная нейроморфная архитектура

2.1 Нейроморфная обработка данных в DAQ и DAP

Нейронные сети широко применяются для интеллектуальной обработки больших массивов экспериментальных данных (data mining полезных событий), верификации гипотез. В частности для:

- off-line распознавания многочисленных наложенных треков заряженных частиц, анализа структуры события, кластеризации, детальной реконструкции событий;
- on-line повышения эффективности триггера, быстрого распознавания полезных событий, повышение отношения полезное событие / фоновые события;
- on-line преобразования и анализа данных при считывании данных сенсоров и восстановлении событий в подсистемах DAQ и DAP.

Возможность совмещения функций обработки данных в триггерной системе с подсистемами DAQ и DAP в значительной степени определяется производительностью и временной задержкой последних.

В работе предлагается единый нейроморфный подход для реализации интеллектуальной обработки данных в DAQ, DAP и триггерной подсистемах с поэтапным устранением избыточной информации. На первом этапе обработки данных на уровне отдельного фотосенсора анализируется пространственно-временное 2D изображение текущего зарегистрированного события (см. рис. 5). К-слойная нейроморфная структура (НС) с N входными нейронами $Ne_1, \dots, Ne_N$ анализирует входные аналоговые/цифровые сигналы от каждого светочувствительного пикселя $P_1, \dots, P_N$. Выходной сигнал нейрона YNe_j определяется как

$$YNe_j = F(\sum_{i=1}^N (w_{ij} XNe_i)), \quad (1)$$

где XNe_i - входной сигнал i нейрона, F - функция активации нейрона, $i = 1, \dots, N$.

В частности, распознавание событий с определенной энергией реализуется как

$$YNe_j = F\left(\int_0^T \left(\sum_{i=1}^N (w_{ij} XSiPM_i)\right) d\tau\right). \quad (2)$$

Отклик нейрона при распознавании одновременных событий описывается в виде

$$YNe_j = F\left(\text{AND}(XNe_1, \dots, XNe_N)\right). \quad (3)$$

Сигналы выходного слоя нейронов отражают информацию о временных и энергетических характеристиках наблюдаемого события, структуре 2D изображения, его соответствии определенным правилам и физическим законам в импульсном позиционном коде. В качестве правил, например, выступает условие соответствия определенному временному и энергетическому окну, определенному типу изображения, априорные знания о физических законах. Данные правила хранятся в виде значений весовых коэффициентов синаптических связей нейросети. В частности, весовые коэффициенты первого слоя нейросети $w_{11}, \dots, w_{NN}$ сохраняют информацию о необходимых калибровках соответствующих пикселей по временной задержке и светочувствительности для повышения точности временного и энергетического разрешения.

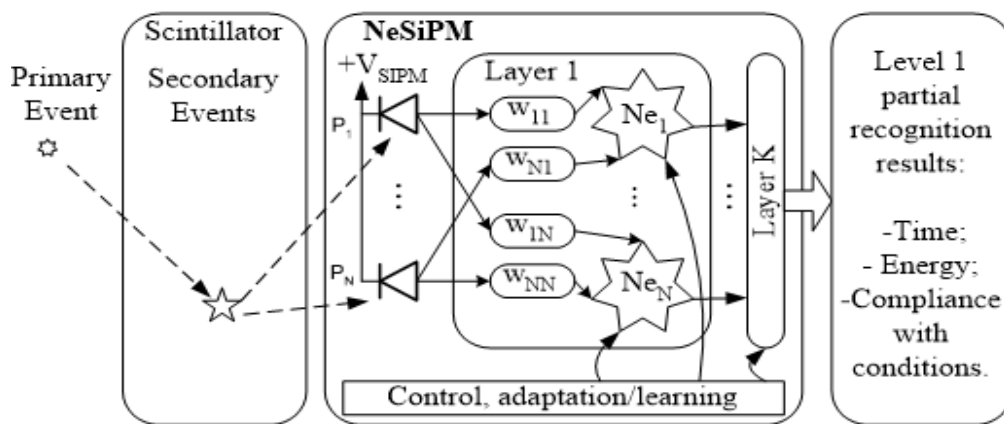


Рис. 5. Структура нейроморфного SiPM

Быстрая классификация 2D изображений в светочувствительном сенсоре реализуется на основе трафаретов. В частности, по проекциям в виде бит-векторной классификации [7].

2.2 Фрактальная архитектура DAC и DAP

В соответствии с единым нейроморфным подходом поэтапное повышение точности распознавания полезных событий реализуется при последовательной все более полной реконструкции процесса взаимодействия вторичных факторов наблюдаемого явления с веществом детекторной системы. Например, в НС при обработке данных второго уровня появляется возможность анализа вторичных факторов на основе рассеяния Комптона. Зарегистрированное событие распознается как полезное если его суммарная энергия в определенном временном окне по всем ближайшим NeSiPM соответствует установленному энергетическому уровню.

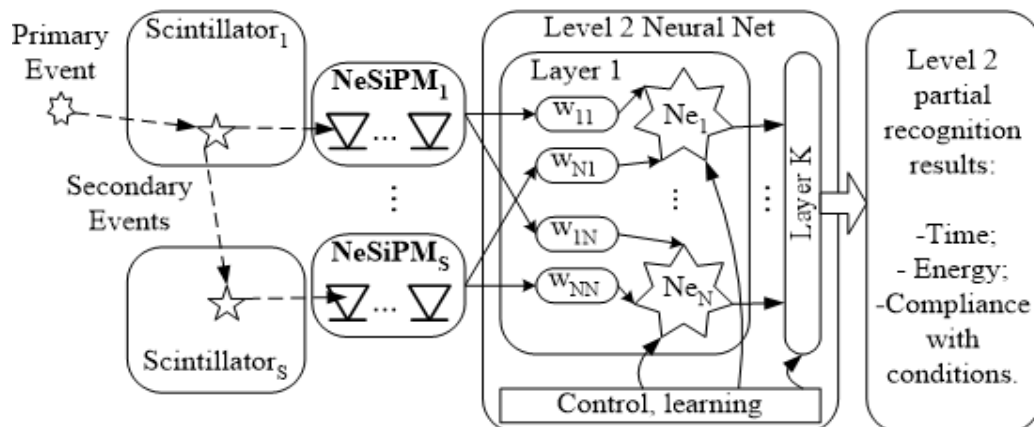


Рис.6. Распознавание события на основе рассеяния Комптона

Данное свойство НС представляется особенно важным для повышения чувствительности и эффективности регистрации полезных событий, так как вероятность Комптоновского рассеяния возрастает при уменьшении геометрических размеров сцинтиллятора из-за краевых эффектов.

Кроме того, временная реконструкция событий вторичных факторов позволяет также повысить пространственное разрешение детекторной системы за счет снижения влияния мертвых зон между SiPM и матрицами на их основе (см. рис. 7). Краевой эффект работы сцинтилляционного детектора заключается в регистрации одним SiPM нескольких потоков фотонов вторичного события L_1 и L_2 , распространяющихся в различных направлениях из общей точки вылета, причем один из потоков L_2 претерпевает отражение от близкорасположенного края сцинтиллятора. Регистрация потоков L_1 и L_{21} одним NeSiPM₁ приводит к нелинейным искажениям при восстановлении координат вторичного события. Анализ времени регистрации фотонов L_1 и L_{21} в НС второго уровня позволяет реконструировать траекторию распространения фотонов $L_2 + L_{21}$ и определить точные пространственные координаты вторичного события.

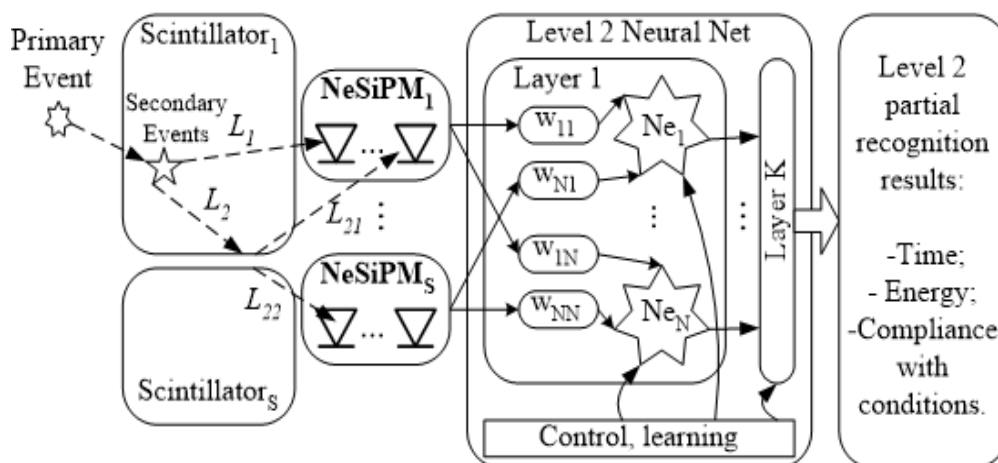


Рис. 7. Распознавание краевого события

Краевые эффекты детекторной системы более высоких уровней анализируются на соответствующих уровнях НС. В частности, осуществляется реконструкция событий по данным от детекторных систем, работающих на различных физических принципах. При этом, общая архитектура НС характеризуется повторяющимися функциональными и структурными свойствами своих элементов на всех уровнях внутренней иерархии. Нейроморфная сеть на каждом уровне выполняет однотипные преобразования для все более обобщенного представления регистрируемого события, его все более точной реконструкции в пространственных, временных и "энергетических" координатах.

Предложенная архитектура нейроморфной фрактальной системы (НФС) распознавания образов хорошо согласуется со структурой детекторных систем современного ядерного эксперимента, систем современной ядерной медицины - ПЭТ и гамма-камер.

Например, при распознавании треков субатомных частиц в CMS детекторе (Compact Muon Solenoid detector) коллайдерного эксперимента [8,9]. 3D структуру одного многослойного пиксельного детектора i CMS, состоящую из N 2D пиксельных матриц, можно интерпретировать как обобщенную 2D структуру, образованную за счет мультиплицирования одного 2D сенсора (слоя). При этом каждому 2D сенсору ставится в соответствие НС первого уровня, осуществляющая:

- определение энергии и времени события в каждом слое;
- соответствие определенному топологическому трафарету;
- определение 2D координат классифицированного трафарета.
- Нейроморфная сеть второго уровня восстанавливает 3D траекторию частицы и соотносит ее с 3D трафаретом второго уровня в виде бит-векторного представления $A_Y[1], \dots, A_Y[M], A_X[1], \dots, A_X[M]$, где $A_X[j], A_Y[j]$ - координаты трафаретов предыдущего уровня; $j=1, \dots, M$ - индекс слоя детектора. Отфильтрованные события поступают на дальнейшую обработку на следующих уровнях НС. Масштабность НС определяется числом пикселей детектора ($81 \cdot 10^6$ [8,9]). Требуемое быстродействие составляет $160 \cdot 10^6$ Гц при интенсивности событий в $40 \cdot 10^6$ соб./с. Оценка времени задержки DAQ и DAP при конвейерной однокаскадной реализации составляет 6,25 нс.

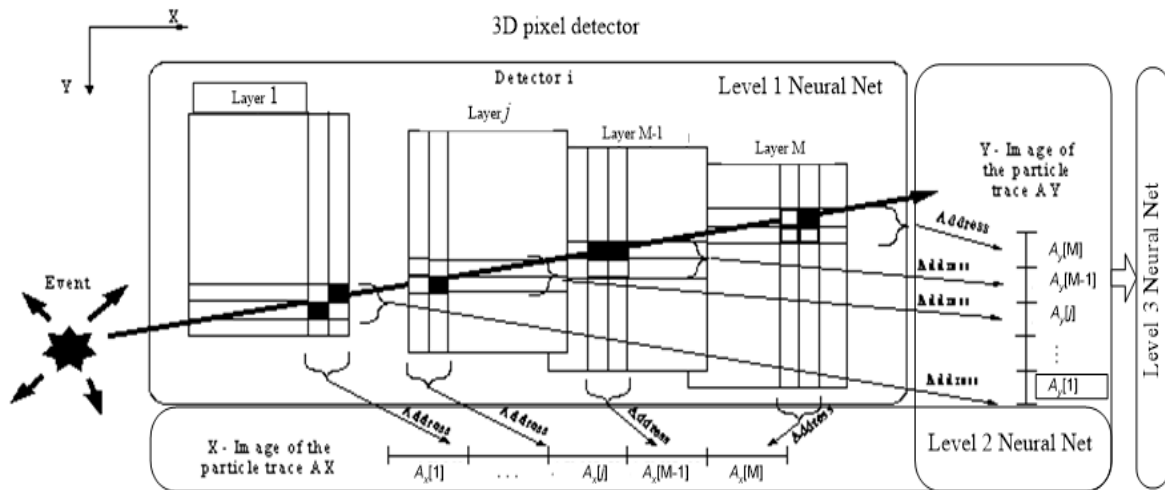


Рис. 8. Классификация события в многоуровневом 3D детекторе на основе 2D матриц

Дальнейшая реконструкция событий в гетерогенной детекторной системе 1, ..., Z (см. рис 9) и их классификация по всей совокупности доступных физических признаков реализуется в верхних уровнях нейроморфной архитектуры.

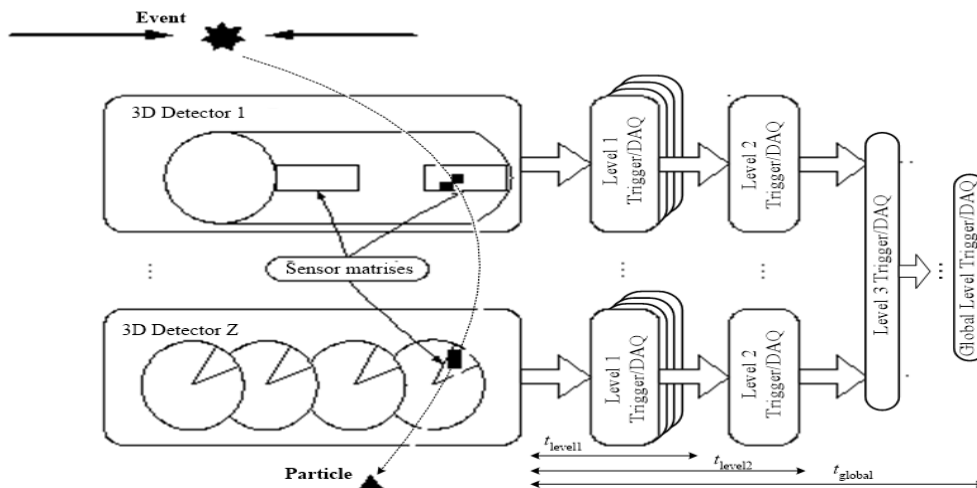


Рис.9. Классификация события в гетерогенном 3D детекторе на основе 2D матриц

Общий поток данных детекторной системы составляет $320 \cdot 10^{12}$ бит/с, требуемая эффективность распознавания - одно полезное событие (Higgs) на $100 \cdot 10^{12}$ зарегистрированных. Максимальная задержка t_{global} составляет менее 3500 нс.

2.3 Современный микроэлектронный технологический базис

Рассматриваемая нейроморфная архитектура ориентирования на имплементацию с использованием гибридной технологии совмещения мемристивных элементов (синаптические связи нейрона $w_{11}, \dots, w_{NN}$) и аналого-цифровых ПЛИС (CMOS аналого-цифровые нейроны $Ne_1, \dots, Ne_N$, подсистема контроля и управления) [10]. При этом сама древовидная фрактальная архитектура с интенсивной обработкой данных на нижних уровнях ее внутренней иерархии эффективно компилируется на 3D микроэлектронные структуры с аналогичной "пирамидальной" компоновкой высоко интегрированных функциональных узлов и широкополосных каналов связи у основания "пирамиды". Например, технология SSI (Stacked Silicon Interconnect) характеризуется возможностью 3D интеграции 2D гомогенных или гетерогенных твердотельных систем с организацией широкополосных связей с малой временной задержкой между ними как в 2D плоскости кристаллов, так и в 3D объеме при помощи сквозных микроконтактов через Si подложку (см. рис. 10).

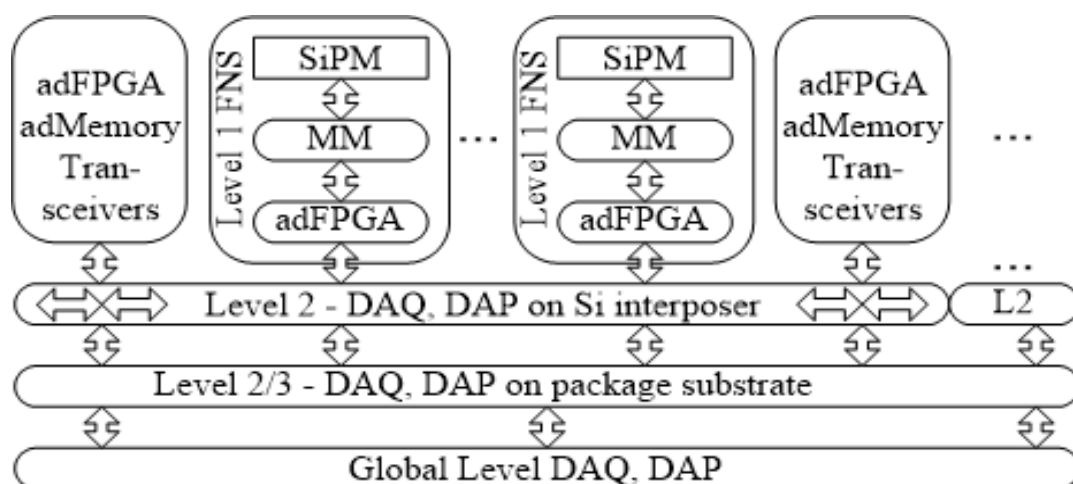


Рис.10. 3D интеграция твердотельных гетерогенных систем DAQ и DAP

Параметры серийных цифровых и аналого-цифровых быстродействующих 3D систем для DAC и DAP представлены в табл. 5 [11,12].

Локальная связь у основания информационной "пирамиды" основывается на скоростных локальных связях между функциональными элементами ПЛИС (с полосой пропускания 500 - 1000 Mbps, временной задержкой в 0.1 - 1 нс), универсальных шинах I/O. Связь между кристаллами ПЛИС в пределах каждого уровня или между уровнями обеспечивается транзисторами GTY и GTM, осуществляющие быструю регистровую передачу параллельных данных (16/20/32/40/64/80/128/160 бит) по однобитовому дифференциальному каналу. Кроме того, обмен данными на верхних уровнях осуществляется по 600G Interlaken каналам (12x56,42G; 24x28,21G; 24x12,5G) с регистровой разрядностью в 512-2048 бит, сети Ethernet с суммарной пропускной способностью до 8x600G (VP1402).

В случае имплементации фрактальной нейроморфной системы в цифровом виде на основе серийных ПЛИС и ASIC дополнительно доступны для использования ряд высокопроизводительных технологий DAQ и DAP на основе ACAP(Adaptive Compute Acceleration Platform), AI и DSP ядер, APU (Application Processing Unit), RPU (Real time Processing Unit), интерфейсов PCI4 (PCI v.3x16), AXI, DDR4. Каждый AI процессор ориентирован на обработку скалярных (32 бит) и векторных (512 бит) переменных, имеет встроенную память в 16КБ.

Рассмотренные SSI структуры являются "конструктором", а сама технология допускает как специализацию изготавливаемой 3D структуры по составу аналого-цифровых функциональных узлов, так и необходимое масштабирование. Имплементация фрактальной нейроморфной архитектуры в аналого-цифровом базисе подразумевает заказное изготовление ASIC и модулей на их основе с включением мемристормых матриц и SiPM.

В настоящее время исследуется аппаратный прототип фрактальной нейроморфной архитектуры ограниченной размерности, имплементированный как в цифровом, так и в аналого-цифровом базисах. Реализована фрактальная нейроморфная трехуровневая структура, адаптированная для распознавания элементарных частиц.

Таблица 5. Параметры современных 3D аналого-цифровых систем

Параметр\Система	VU57P (Virtex Ultra Scale+)	ZU49DR (Zynq Ultra Scale + RFSoc)	VC1902 (Versal Architecture)	VP1802 (Versal Architecture)
Структура	FPGA + HBM	FPGA + ADC + DAC	ACAP	ACAP
DAQ/DAP LEVEL	1-2	1-2	>2-3	>2-3
Кол-во логических ячеек	2 851 800	930 300	1 968 400	7 351 960
LUT/RAM, Mb	11 303 680/ 36,7	425 280/ 13,0	899 840/ 27,5	3 360 896/ 103,0
BRAM/Memory, Mb	2 016/ 70,9	1080/ 38,0	967/34,0	4 941/ 174,0
URAM/Memory, Mb	960/ 270	80/ 22,5	463	2 549/ 717
HBM, GB	16	-	130,2	-
HP I/O	624	312	648	648
DSP blocks	9 024	4 272	1 968	14 352

Параметр\Система	VU57P (Virtex Ultra Scale+)	ZU49DR (Zynq Ultra Scale + RFSoc)	VC1902 (Versal Architecture)	VP1802 (Versal Architecture)
GTY transceivers 32,75 Gb/s	32	16	44	28
GTM transceivers 58,00 Gb/s	32	-	-	140 (70x112Gbps)
Ethernet	10x100G	2x100G	4xMultirate	7x600G
Interlaken	4x150G	1x150G	-	3x600G
ADC 14bit/ Rate, Gsps	-	16/ 2,5	-	-
ADC DUC 14bit/ Rate, Gsps	-	16/ 10,0	-	-
AI Engines	-	-	400	-
AI Mem Blocks/Memory, Mb	-	-	3 200/ 100	-
APU + RPU	-	4xARM Cortex-A53 + 2xArm Cortex-R5F	2xARM Cortex-A72 + 2x Arm Cortex-R5F	-

Заключение

Современные детекторные системы физического эксперимента характеризуются значимой неопределенностью в достижении предельных параметров - высокой чувствительности, эффективности регистрации и пространственно-временного разрешения. Данная неопределенность в значительной степени устраняется в пиксельных светочувствительных сенсорах при "дисперсии" нижнего уровня обработки данных в DAQ и DAP до уровня "дисперсии" пикселей в фотодатчике и интеграции "мелкодисперсных" функций DAQ и DAP с функцией преобразования информации в пиксельной структуре. При этом интеллектуальная обработка экспериментальных данных (data mining) по поиску и распознаванию редких полезных событий из off-line режима распространяется и на on-line режим на всех уровнях триггерной подсистемы, DAQ и DAP.

Предлагаемая фрактальная нейроморфная архитектура характеризуется все более точным распознаванием наблюдаемого события по мере распространения и интеграции во внутренних слоях НФС пространственно-временной и энергетической информации от распределенной сети пикселей и сенсоров на их основе. Кроме того, используется быстрая классификация 2D изображений на основе трафаретов. В частности, по проекциям в виде бит-векторной древовидной классификации.

Данная архитектура ориентирована на имплементацию на основе современных гибридных технологий 3D совмещения светочувствительных сенсоров, нейроморфных систем на основе мемристивных элементов и аналого-цифровых ПЛИС.

Литература

1. MPPCs for precision measurement. Hamamatsu. Aug. 2016. [Online]. Available: www.Hamamatsu.com
2. SiPM arrays. SensL. [Online]. Available: www.sensl.com
3. Product data sheet. SiPM - silicon multiplier. Ketek. Feb. 2021. [Online]. Available: www.ketek.com
4. Silicon photomultiplier (SiPM) high fill-factor arrays. On semiconductor. Jan. 2019. [Online]. Available: www.onsemi.com
5. MPPC module for PET. Technical note. Hamamatsu. Jan. 2017. [Online]. Available: www.Hamamatsu.com
6. Gomez-Cadenas J.J., Benlloch-Rodriguez J.M., Ferrario P., Monrabal F., Rodriguez J., Toledo J.F. Investigation of the coincidence resolving time performance of a PET scanner based on liquid xenon: a Monte Carlo study. arxiv:1604.04106v4 [physics.ins-det] 17 Sep 2016.
7. Arkhangelsky V.G., Alyushin S.A., Alyushin A.V. Bit-vector pattern matching systems on the basis of analog-digital field reprogrammable arrays. 2020 IEEE Conf. of Russian Young Researchers in Electrical and Computer Engineering (ElConRus), St. Petersburg and Moscow, Russia, 2020, pp. 1767-1772, DOI: 10.1109/ElConRus49466.2020.9039 146.
8. Kiriakos H. CMS pixel detector. Noise calibrations. [Online]. Available: http://quarknet.fnal.gov/fnal-uc/quarknet-summer-research/QNET2013/project_files/CMSPixelDetector.pdf
9. Armstrong A., Behn W. Compact muon solenoid detector (CMS) & the token bit manager (TBM). [Online]. Available: <https://www.phys.ksu.edu/reu2014/alarm92/CMS%20HEP%20Presentation.pdf>
10. Alyushin S.A., Arkhangelsky V.G., Alyushin A.V. Memristive element with multiple internal state variables functional model for computer based analysis and hardware emulation of pulsed neural adaptive networks. 2020 IEEE Conf. of Russian Young Researchers in Electrical and Computer Engineering (ElConRus), St. Petersburg and Moscow, Russia, 2020, pp. 1755-1759, DOI: 10.1109/ElConRus49466.2020.9038918.
11. UltraScale architecture and product data sheet: overview. Xilinx, DS890. March 16, 2021, [Online]. Available: www.xilinx.com.
12. Versal architecture and product data sheet: overview. Xilinx. DS950. April 26, 2021, [Online]. Available: www.xilinx.com