

ОБРАБОТКА СИГНАЛОВ, РЕГИСТРИРУЕМЫХ В КАЛОРИМЕТРАХ

Н.М.Никитюк

Объединенный институт ядерных исследований, Дубна

Описано современное состояние методики регистрации и обработки электрических и световых сигналов, регистрируемых в калориметрах. Приведено описание функциональных схем и алгоритмов работы специализированных процессоров, применяемых для вычисления энерговыделения высокоэнергетических частиц, регистрируемых с помощью калориметров. Рассмотрены также вопросы применения нейронных сетей, используемых для выработки быстрого триггерного сигнала, распознавания событий с кластерами, а также событий с целью идентификации струй частиц. Приведены примеры применения цифровых сигнальных и волновых матричных процессоров для построения многоуровневых систем обработки данных в спектрометрах физики высоких энергий, содержащих калориметры. Рассмотрены примеры построения полностью программируемых триггерных систем первого уровня, разрабатываемых для экспериментов на вновь создаваемых коллайдерах с периодом встречи пучков 16 нс. Показано, что с целью быстрого распознавания и регистрации кластеров в некоторых частных случаях можно применить метод синдромного кодирования.

Modern state of methods of the registration and processing of electrical and light signals registered in calorimeters is described. The functional schemes and algorithms of the operation of special purpose processors used for calculation of yield energy by high energy particles are given. The questions of using the neural networks for triggering, for recognition of events with clusters and for identification of jets are considered. The examples of using digital and wave matrix processors for the construction of multilevel data processing systems in high energy physics spectrometers, having calorimeters, are given. The examples of the full programmable first-level triggers constructed for the experiments on new colliders having 16 ns time crossing are considered. It is shown that the method of syndrome coding can be used in some special cases.

ВВЕДЕНИЕ

Весьма распространенными инструментами в физике высоких и сверхвысоких энергий являются спектрометры полного поглощения — калориметры, с помощью которых измеряется энергия, а иногда и координаты частиц (годоскопические калориметры). Кроме того, в определенных условиях такие детекторы используются также для идентификации частиц, а в перспективе — и для регистрации струй частиц [1, 2]. Это связано с тем, что существует много физических проблем, ко-

торые можно решить на создаваемых коллайдерах и которые могут изучаться путем наблюдения в конечном состоянии именно струй частиц, представляющих собой продукты взаимодействия кварков и глюонов.

Принцип работы калориметра относительно прост. В процессе поглощения высокоэнергетичных частиц образуются вторичные частицы, которые взаимодействуют с веществом детектора (рис.1) [3]. В результате этого поглощения часть или вся энергия частиц превращается в тепловую энергию. Отсюда и такое название.

Однако повышение температуры измерить очень трудно, поэтому в экспериментах измеряют не температуру, а сигналы (в основном электрические и световые), возникающие в результате взаимодействия частиц с размещенными в объеме калориметра специальными счетчиками частиц (детекторами калориметра).

Следует отметить, что в разработку и развитие калориметров решающий вклад был внесен советскими физиками. Так, первый спектрометр полного поглощения был использован на советском спутнике Земли для регистрации адронов в космических лучах [4]. Существенным этапом в развитии спектрометров полного поглощения явилось создание годоскопического калориметра [5]. Координаты частиц здесь определяются путем измерения энерговыделения от электромагнитного или адронного ливня в поперечном сечении калориметра. В [5] рассмотрены характеристики годоскопических адронных и фотонных калориметров при сверхвысоких энергиях (>10 ТэВ). Отмечается, что в области энергий порядка нескольких ТэВ эти детекторы способны измерять с высокой точностью энергию и координаты частиц, а также массы нестабильных частиц. Тот факт, что калориметры стали базовыми детекторами в современной физике, связан с рядом их положительных качеств [6]:

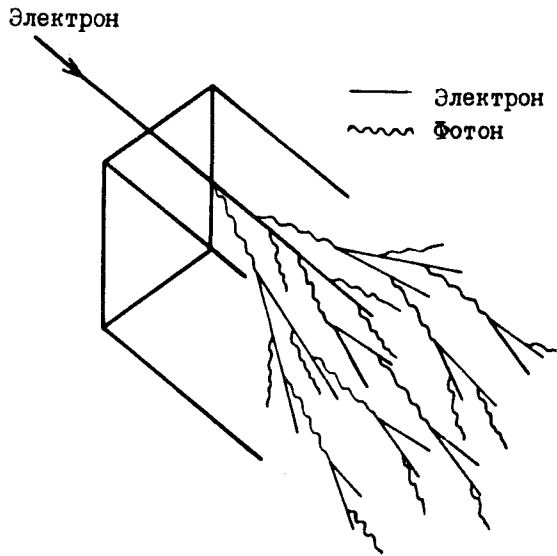


Рис. 1. Пример развития электронно-фотонного каскада [3]

— Можно измерять энергию частиц в диапазоне от нескольких МэВ до максимально достижимой на современных и вновь создаваемых ускорителях. Относительное энергетическое разрешение увеличивается с ростом энергии как $\sigma/E = \text{const}/E^{1/2}$. Очень важно, что при фиксированном энергетическом разрешении длина магнитного спектрометра увеличивается линейно с ростом энергии, в то время как размеры калориметра увеличиваются по логарифмическому закону.

— С помощью калориметров можно детектировать нейтральные частицы, как первичные, так и образующиеся среди вторичных частиц ливня, содержащихся в ливне.

— Точность измерения координат оси ливня частиц повышается с ростом энергии и может быть лучше 1 мм. Особенно перспективными являются прецизионные калориметры, создаваемые на основе как сцинтилляционных волоконно-оптических световодов (СВОС), так и кремниевых пластин.

— Измеряются как продольные, так и поперечные составляющие импульсов частиц. Это облегчает кинематический анализ событий с помощью ЭВМ.

— Сигналы, получаемые на выходах ячеек калориметра, как правило, имеют малую длительность (порядка 10 нс и менее в сцинтилляционных калориметрах), поэтому имеется возможность создавать калориметрические триггеры с целью селективного отбора событий.

— При использовании ячеистых калориметров отпадает необходимость в использовании магнитов для определения импульсов частиц.

В нашу задачу не входит подробное описание физики процессов и широкого многообразия типов и конструкций калориметров. Этим вопросам посвящен ряд обзоров. Например, в [7] дан анализ механизмов абсорбции частиц, проходящих сквозь вещество детектора в широком диапазоне энергий, приведены характеристики ливня, рассмотрены проблемы компенсации сигналов (отношение сигналов от электромагнитного и адронного ливней e/h должно приближаться к единице), обсуждаются вопросы координатного и углового разрешения калориметров, системы считывания и регистрации сигналов. Обзор [8] полностью посвящен описанию процессов и характеристик адронных калориметров. В нем кратко рассмотрены последние достижения методики адронных калориметров и используемых способов считывания и обработки сигналов. В обзоре [9] описаны свойства электрон-фотонных калориметров. Детально рассмотрены вопросы формирования электромагнитного ливня и его структуры, общие принципы калориметрии и т.д. Во второй части обзора [10] описаны свойства материалов, используемых для создания калориметров.

Цель данного обзора состоит в том, чтобы в доступной для физика-экспериментатора форме изложить современное состояние применяемых в электронных методах физики высоких энергий способов формирования, регистрации и распознавания кластеров, возникающих в ливнях со сложной геометрией, например, при регистрации адронных струй. В будущих экспериментах на таких коллайдерах, как LHC, ставится задача включения данных, регистрируемых в калориметрах, в триггерные системы первого уровня. Это довольно трудная задача, требующая использования для идентификации кластеров сверхбыстрых процессорных систем, выполняющих десятки миллиардов операций в секунду. Эти и другие вопросы, связанные с регистрацией и обработкой сигналов, регистрируемых в калориметрах, требуют специального рассмотрения. Обзор состоит из введения, девяти разделов и заключения. Во введении рассматриваются постановка задачи и перспективы развития калориметров как детекторов для экспериментов по физике высоких и сверхвысоких энергий. В первом разделе приводятся некоторые соотношения, относящиеся к измерениям параметров кластеров. Во втором разделе обсуждаются вопросы получения сигналов в калориметрах и методы их регистрации. Третий раздел посвящен описанию систем контроля и мониторинга калориметров. В 4 разделе рассматриваются вопросы создания регистрирующей электроники. В пятом разделе подробно описаны наиболее интересные триггерные системы, используемые в проводимых экспериментах. В частности, рассмотрены наиболее типичные схемы аналоговых и цифровых процессоров. Особое внимание уделено весьма перспективному направлению в развитии триггерных систем для калориметров — нейронным процессорам и нейронным сетям. Шестой раздел посвящен вопросам применения в триггерных системах калориметров сигнальных процессоров, систолических и волновых матричных вычислительных систем. Перспективы применения таких систем в калориметре, создаваемом для экспериментов на сверхпроводящем суперколлайдере, описаны в седьмом разделе обзора. В восьмом разделе рассмотрены быстрые алгоритмы, применяемые для создания счетчиков кластеров. И, наконец, девятый раздел посвящен описанию специальных методов шифрации кластеров на основе метода синдромного кодирования.

1. ОСНОВНЫЕ ПОНЯТИЯ, ОТНОСЯЩИЕСЯ К КАЛОРИМЕТРАМ

Прежде всего следует отметить, что при создании адронного калориметра используется тот же подход, что и в случае электромагнитного годоскопического γ -спектрометра [5]. Адронный ливень отличается от

электромагнитного как большими поперечными размерами, так и значительными флуктуациями из-за коррелированных процессов, определяющих число ливневых частиц. Отсюда и возникает проблема отношения e/h в комбинированных калориметрах, регистрирующих как адроны, так и гамма-кванты или электроны. Основными единицами длины, используемыми для описания размеров электромагнитных ливней, является радиационная длина X_0 , характеризующая продольные размеры и радиус Мольера ρ_M , определяющий развитие ливня в поперечном направлении. Радиационная длина определяется как расстояние, на котором электрон, энергия которого превышает критическую за счет радиационных потерь уменьшает свою энергию в e раз (e — основание натуральных логарифмов). Величина ρ_M определяется как отношение X_0/ϵ_c , где ϵ_c — энергия электрона, при которой потери на радиацию и ионизацию одинаковы (критическая энергия). При этом используются приближенные выражения [6,7], которые мало зависят от свойств материала:

$$X_0 = 180A/Z^2 (g/cm^2) \quad \text{и} \quad \rho_M = 7A/Z (g/cm^2),$$

где Z — номер элемента, g — плотность вещества и A — атомная масса. Экспериментальные данные показывают, что продольный и поперечный размеры адронного ливня определяются ядерной длиной взаимодействия λ_{int} . Следует отметить, что в настоящее время сложилась тенденция создания комбинированных калориметров с целью регистрации ливней обоих типов. Стандартным путем для определения позиции частицы, создающей ливень, является метод определения координат центра «тяжести» X и Y выделившейся энергии в различных ячейках калориметра с координатами X_i и Y_i и энергывыделением в ячейке E_i :

$$\bar{X} = \frac{\sum_i X_i E_i}{\sum_i E_i}.$$

Кроме того, измеряются следующие параметры ливня [6]:

- 1) Координата максимума ливня X_{max} , порождаемого частицей с энергией E (в ед. рад. длины X_0):

$$X_{\max} = \ln E/\varepsilon_c - 1,0,$$

где ε_c — критическая энергия электронов.

2) Общая продольная глубина D , после которой уже нет увеличения детектируемого сигнала (в единицах X_0):

$$D = X_{\max} + 4 \lambda_{\text{att}},$$

где λ_{att} определяется экспоненциальным спадом ливня после максимума.

3) Поперечные размеры ливня, характеризующиеся среднеквадратичной величиной энерговыделения относительно оси ливня в месте прохождения электронов через критическую энергию (в ед. рад. длины).

В зависимости от фазового состояния рабочего вещества используемых в калориметре счетчиков вторичных частиц получили распространение следующие виды калориметров: 1) калориметры с твердым веществом счетчиков (сцинтиллятор, свинцовое стекло, полупроводник); 2) газонаполненные калориметры (в качестве счетчиков используются дрейфовые и гейгеровские трубки, проволочные камеры); 3) жидкостные калориметры (жидкий сцинтиллятор, сжиженные благородные газы). Выделяют также гомогенные и гетерогенные калориметры. В гомогенном калориметре рабочее вещество счетчиков вторичных частиц является одновременно веществом, в котором происходят все основные процессы взаимодействия первичных и вторичных частиц, приводящие к формированию адронного или электромагнитного ливня. В этом случае энергия первичной частицы выделяется непосредственно в рабочем объеме калориметрических счетчиков.

В гетерогенном калориметре ливень развивается в основном в нечувствительном к частицам объеме (например, в металлических пластинах). Счетчики частиц обычно равномерно расположены в специальных полостях внутри нечувствительного вещества, где выделяется незначительная доля энергии ливня (например, счетчики располагаются в промежутках между металлическими пластинами). Если гетерогенный калориметр состоит из большого числа регистрирующих счетчиков, каждый из которых окружен необходимым для развития ливня веществом (или содержит его внутри себя), то такой ячеистый калориметр приближается по своим свойствам к гомогенному, и далее эти типы калориметров мы разделять не будем.

Широкое разнообразие веществ и детекторов, применяемых в калориметрах, геометрии самих калориметров и типов задач, которые они решают, накладывает определенные требования на регистрирующую

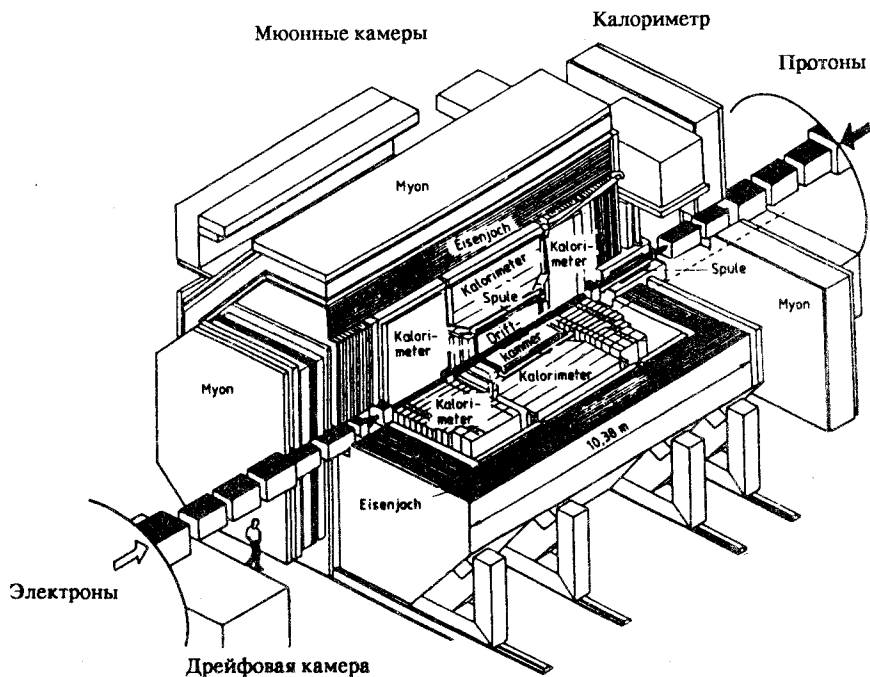


Рис. 2. Общий вид установки ZEUS

электронику и системы предварительного отбора событий. Чаще всего калориметры входят в состав крупных физических установок. На рис.2 в качестве примера приведен общий вид установки ZEUS [2], в которой калориметр расположен недалеко от ионопровода вслед за цилиндрической дрейфовой камерой. Причем ближе к ионопроводу располагаются обычно калориметры с высокой дискретностью регистрирующих частицы ячеек. Давно используются и создаются проекты установок, которые содержат несколько калориметров, имеющих различную конструкцию.

2. НЕКОТОРЫЕ МЕТОДЫ ПОЛУЧЕНИЯ СИГНАЛОВ В КАЛОРИМЕТРАХ

2.1. Применение СВОС. Использование пластиковых сцинтиллирующих волоконных оптических световодов (СВОС), размещенных в свинцовых матрицах (рис.3) [11], позволяет создавать электромагнитные калориметры с рекордной плотностью вещества и хорошим энерги-

ческим и пространственным разрешением. В табл.1 приведены параметры некоторых таких калориметров (см. [12] и соответствующие ссылки).

В современных сцинтилляционных калориметрах нередко в качестве световодов используются шифтеры — переизлучатели света [13]. Основное преимущество шифтеров перед обычными световодами заключается в том, что они захватывают и транспортируют к ФЭУ максимум света. Это обусловлено тем, что

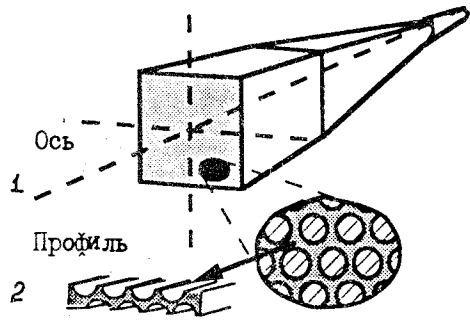


Рис. 3. Модуль калориметра, включающий СВОС, матрицу из свинца и ФЭУ: 1 — ось модуля; 2 — часть профиля модуля

сцинтилляционное излучение (голубого цвета), распространяясь вдоль шифтера, преобразуется в излучение с большей длиной волны, обычно зеленого или желтого цвета, которое имеет лучшие условия для транспортировки по оптическому световоду и эффективно собирается даже на ФЭУ с малой площадью фотокатода. На рис.4 показан принцип действия шифтера [2]. Ионизирующая частица возбуждает в сцинтилляторе световое излучение с длиной волны λ_1 , которое переизлучается с помощью

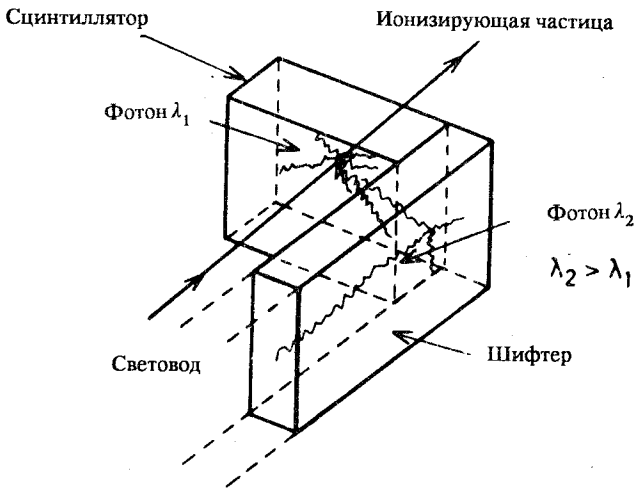


Рис. 4. Пояснение принципа действия шифтера

шифтера в световое излучение с гораздо большей длиной волны λ_2 . Известны также СВОС, которые одновременно выполняют и функции шифтеров [14].

Таблица 1. Общие параметры существующих или планируемых СВОС-калориметров

Детектор	Прототип	Omega	NA38	DELPHI	
				прототип	детектор
Год запуска	1982	1984	1986	1986	1989
Диаметр, мм	0,9	1	1	1	1
Рад. длина, см	1,1/1,6	1,1	0,85	1,3	1,3
Чтение	ФЭУ	ФЭУ	ФЭУ	ФЭУ	Фототриод
σ_E/E	9,8% / $E^{1/2}$	10% / $E^{1/2}$	20% / $E^{1/2}$	12% / $E^{1/2}$	
Энергия пучка, ГэВ	0,04—1	0,5—50	1—1,35	10—50	

2.2. Считывание сигналов от сцинтилляционных калориметров. В силу известных ценных качеств, а также вследствие широких перспектив развития, связанных с регистрацией более коротких сигналов и повышением разрешающей способности, наиболее широкое применение находят сцинтилляционные калориметры. Пожалуй, этим можно объяснить то большое внимание, которое уделяется проблеме считывания и передаче световых сигналов. В настоящее время используются следующие элементы считывания световых сигналов: 1) ФЭУ различных модификаций; 2) фотодиоды (вакуумные и полупроводниковые); 3) фототриоды; 4) ПЗС-матрицы.

Применение ФЭУ. Обычные ФЭУ, благодаря широко известным положительным качествам, остаются наиболее популярными приборами, применяемыми в калориметрах. Однако известна установка (DELPHI), в которой вместо обычных ФЭУ используются фототриоды [15], имеющие малые продольные размеры — порядка 60—75 мм вместе с предусилителем и делителем напряжения. Получено пространственное разрешение 4,4 мм при низком уровне шумов. В [16] описан модуль электромагнитного калориметра с продольным расположением сцинтиллятора и с фототриодным считыванием. Отмечается, что калориметры нового поколения типа «спагетти» в сочетании с фотодиодным или фототриодным считыванием могут удовлетворять требованиям, предъявляемым к установкам на коллайдерах. Весьма перспективными приборами можно считать мультианодные ФЭУ, у которых размеры анодных сегментов адекватны размерам СВОС. Подобная система считывания,

используемая в калориметре, описана в [17]. Ее особенности заключаются в следующем.

— Фотоумножитель имеет 64 канала чтения (размер ячейки считывания 5×5 мм), выходы которых подключены к мультиплексору и далее к зарядочувствительному АЦП.

— Поскольку канал регистрации отличается высоким быстродействием, то требуется определенная задержка сигналов с целью согласования их во времени с триггерным сигналом. С этой целью применено гибридное аналоговое запоминающее устройство.

— В качестве формирователей сигналов используется двухканальная микросхема, которая детально описана в [18]. Применение СВОС и мультианодных ФЭУ, разработанных фирмой

«Hamamatsu», позволило получить точность измерения координат ливня лучше чем 900 мкм. Схематическое изображение двух модулей калориметра, сопряженных с пластинами из свинцового стекла, где фактически развивается ливень, приведено на рис.5. Связки СВОС используются для прецизионного измерения позиции электромагнитного ливня [19].

Использование вакуумных фотодиодов для формирования сигналов. Известно несколько работ, посвященных вопросам применения вакуумных фотодиодов в калориметрах. В [20] отмечаются следующие преимущества считывания данных с помощью вакуумных фотодиодов.

- Высокая стабильность характеристики.
- Малая чувствительность к магнитному полю.

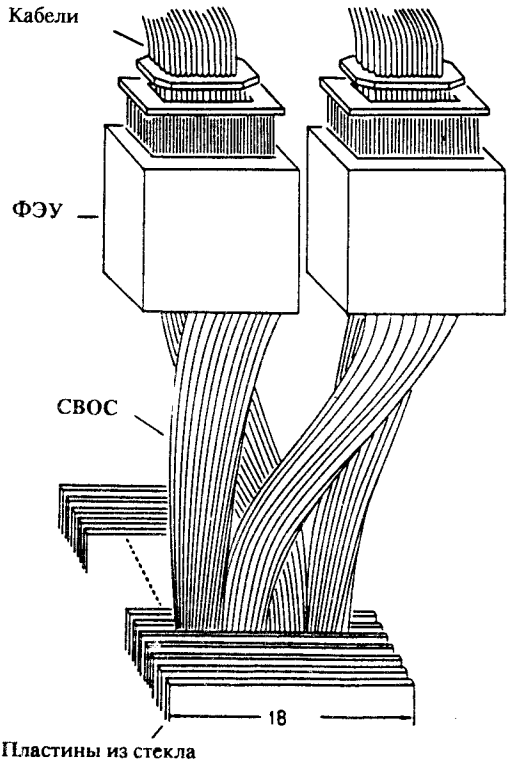


Рис. 5. Модуль калориметра на основе СВОС и обычных сцинтилляторов, где считывание осуществляется с помощью мультианодных ФЭУ

- Хорошее энергетическое разрешение 22% $E^{1/2}$.
- Не требуется высокое напряжение питания.
- Нет необходимости в системе калибровки и мониторинга.
- Относительно простая конструкция.
- Применение вакуумных фотодиодов в конкретной установке описано в [21], где используется 1200 каналов регистрации.

Применение полупроводниковых фотодиодов вместо фотоумножителей. Возможность практического применения полупроводниковых фотодиодов в калориметрах как заменителей ФЭУ широко исследуется в различных физических центрах. В обзоре [22] рассмотрены работы, посвященные использованию фотодиодов с относительно большой поверхностью в сцинтилляционных счетчиках, попытки применения которых начались в начале 60-х годов. Применительно к ядерной физике такие счетчики начали использоваться с 1969 г. [23]. Состояние технологии в данной области таково, что полупроводниковые фотодиоды не могут конкурировать с ФЭУ в области энергий ниже 100 кэВ. Использование фотодиодов позволяет создавать компактные, дешевые и безопасные установки. Модуль адронного калориметра на основе высокоплотного сцинтиллятора с фотодиодным считыванием и шифтером описан в [24]. Использовался фотодиод прямоугольной формы размером 30×3,4 мм и с напряжением пробоя > 30 В. Типичная схема считывания должна включать высококачественный усилитель. Калориметр [25] состоит из 8000 счетчиков на основе кристаллов CsI, которые вместе с фотодиодами помещены в магнитное поле 1,5 Тл. Получена удовлетворительная идентификация фотонов и электронов. Широкое использование СВОС в калориметрах в основном задерживается в связи с отсутствием эффективных приборов считывания. Большие надежды в этом направлении возлагаются на применение лавинных фотодиодов [26]. Основным недостатком обычных фотодиодов является отсутствие внутреннего усиления при детектировании отдельных фотонов. Лавинные фотодиоды лишены этого недостатка. В [26] описан СВОС-госкоп со считыванием с помощью лавинных фотодиодов, работающих в гейгеровском режиме. При амплитуде сигнала 300 мВ передний фронт составляет 4 нс. Изучению возможности применения лавинных фотодиодов для считывания сигналов от СВОС посвящена также работа [27]. Лавинный фотодиод диаметром 1 мм был непосредственно состыкован с СВОС, при этом наблюдались малые потери света. С целью уменьшения мертвого времени фотодиода использован специально разработанный разрядный усилитель. В результате получено мертвое время порядка 50 нс. Однако для экспериментов на коллайдере LHC такое время является слишком большим.

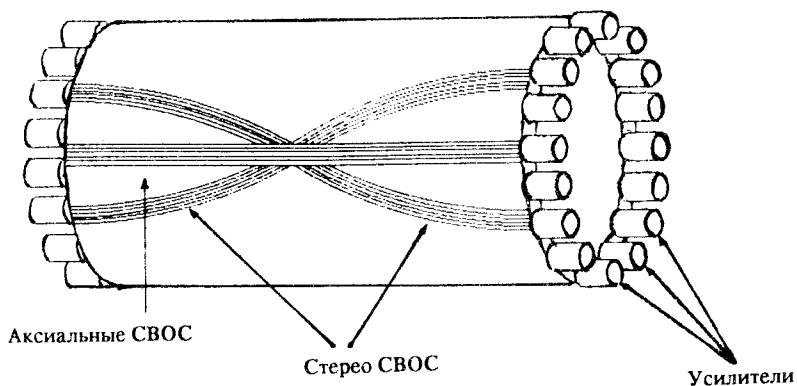


Рис. 6. Общий вид части детектора UA2

Применение ПЗС-матриц. Весьма перспективным прибором для считывания сигналов от СВОС является ПЗС-матрица. Особенностью установки UA2 является то, что детектор на базе СВОС одновременно используется как трековый детектор и как счетчик электромагнитных ливней. Конструктивно он представляет собой цилиндр, расположенный между времяпроекционной камерой и центральным калориметром. Детектор состоит из 6 тыс. СВОС диаметром 1 мм, образующих 24 концентрические окружности с активной длиной 2,1 м (рис.6). В свою очередь, 24 связки сгруппированы в 8 стереотриплетов, каждый из которых содержит по одному слою СВОС, расположенному параллельно пучку, и по два слоя под определенным углом, с тем чтобы обеспечить регистрацию данных в трех проекциях. Кроме того, внутренние 6 триплетов со стереоуглом $\mp 15,75^\circ$ используются в качестве трекового детектора. Один из концов сцинтиллятора подключен к фотокатоду трехкаскадного усилителя света, выход которого просматривается с помощью ПЗС-матрицы, содержащей 145×218 ячеек. Часть из них используется в качестве динамической памяти. Время считывания одного события составляет 5,6 мс, что является, пожалуй, единственным недостатком ПЗС-матриц как приборов для считывания световых изображений [28].

3. СИСТЕМЫ КОНТРОЛЯ И МОНИТОРИРОВАНИЯ

Необычайная сложность современных физических установок требует тщательного подхода к контролю и калибровке отдельных систем и, прежде всего, многочисленных счетчиков калориметра. Применение во-

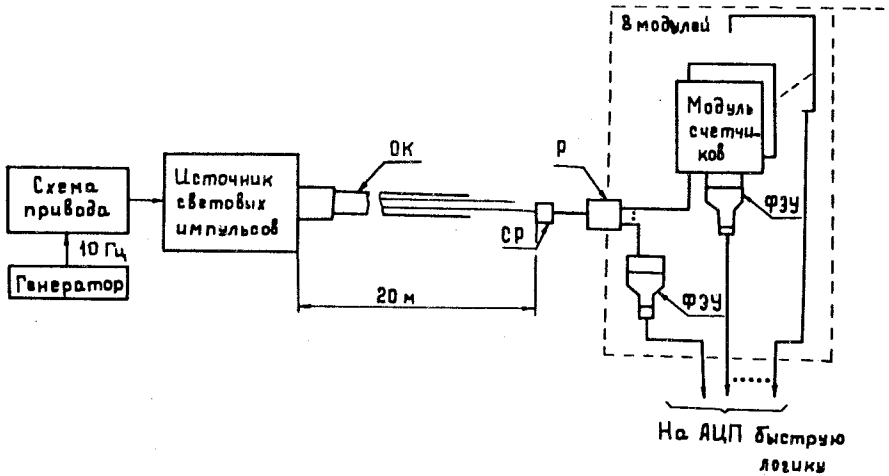


Рис. 7. Блок-схема типичной системы калибровки калориметров: ОК — оптический кабель; СР — оптический разъем; Р — разветвитель

локонных световодов позволяет существенно повысить эффективность и надежность таких систем. На рис.7 приведена блок-схема типичной системы, предназначенной для контроля амплитуд и временных характеристик сцинтилляционных годоскопических систем. В качестве источника мощных световых вспышек интенсивностью $>10^{15}$ фотонов и временем нарастания <1 нс используется лазерный источник, импульсы от которого сквозь фильтры поступают в жгут из волоконных световодов. Система позволяет также калибровать черенковские счетчики и времяпролетную электронику [29]. Лазерная система [3] разработана для контроля стабильности характеристик фотоумножителей электромагнитного калориметра с точностью лучше 1%.

4. РЕГИСТРИРУЮЩАЯ ЭЛЕКТРОНИКА

Большое число каналов регистрации, используемых как в современных, так и во вновь планируемых экспериментах на встречных пучках со светимостью $10^{32}—10^{33}$ см $^{-2}$ ·с $^{-1}$, создает не только определенные экономические и технические трудности, но и трудности создания регистрирующей электроники, надежно работающей в условиях интенсивного радиационного излучения ~ 20 мрад и при потоке нейтронов 10^{14} н/см 2 . Эти проблемы возникают в связи с тем, что

регистрирующая электроника располагается непосредственно на детекторе. Кроме того, поскольку детектор содержит жидкость при низкой температуре, то предъявляются также жесткие требования к рассеиваемой мощности. Система съема сигналов в жидкостных калориметрах относительно простая (рис.8) [13]. Сигналы, возникающие на электродах, усиливаются с помощью малошумящих усилителей.

В [32] описана программа исследований, направленная на разработку помехоустойчивой и радиационно-стойкой регистрирующей электроники. Предполагается, что на создаваемом сверхпроводящем суперколлайдере будет использоваться, в частности, жидкоаргонный калориметр, включающий абсорбер из тяжелых металлов. Подсчитано, что количество каналов регистрации будет составлять порядка $2 \cdot 10^5$. Регистрирующий канал состоит из предусилителя, подключенного непосредственно к чувствительному электроду, формирователя, аналогового процессора с памятью конвейерного типа и АЦП. Для построения предусилителя использована J-МОП-технология, обеспечивающая высокую помехоустойчивость и радиационную стойкость. Исследования показали, что после экспозиции в потоке нейтронов 10^{14} н/см² шумы биполярного формирователя увеличились на 25%. Повышенная радиация в основном сказывается на увеличении тока утечки. Интегральная электроника разработана также для «теплого» жидкоаргонного калориметра [33], содержащего 9000 каналов регистрации. Усиленные и оцифрованные сигналы с помощью оптической линии связи передаются для дальнейшей обработки в процессорную систему, выполненную в стандарте ФАСТВАС. В [34] обсуждается актуальность проблемы получения быстрого сигнала для ионизационных (жидкостных или газонаполненных) калориметров. Показано, что быстродействие ионизационного калориметра в значительной мере определяется его волновыми свойствами. Дается ряд рекомендаций по увеличению быстродействия такого типа калориметров.

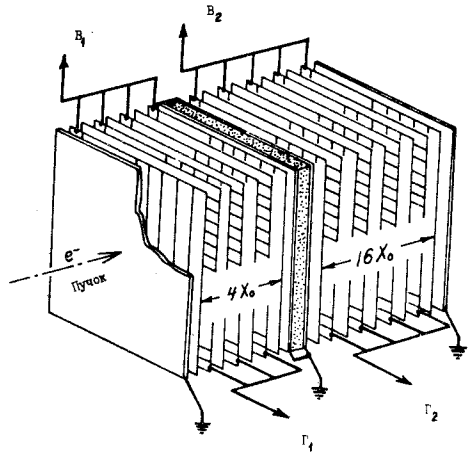


Рис. 8. Типичный модуль жидкостного аргоного калориметра. В,Г — электроды

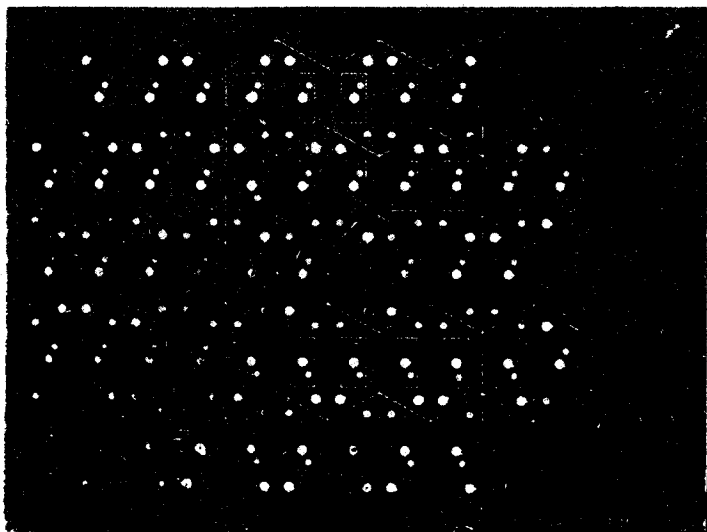


Рис. 9. Общий вид плоскости кремниевого калориметра. Площадь каждого детектора равна 28 см^2

Вопросы, связанные с созданием регистрирующей электроники для кремниевых калориметров, обсуждаются в [35]. Созданы относительно дешевые кремниевые пластины площадью $25\text{--}50 \text{ см}^2$, которые могут быть использованы для создания кремниевых калориметров. Две особенности учитываются при построении усилителей: отсутствие внутреннего усиления и относительно большая входная емкость. Использование кремниевого калориметра предполагается в проекте SICARO [36]. На рис.9 приведен общий вид плоскости кремниевого калориметра. Плоскость калориметра состоит из 48 кремниевых детекторов трапецеидальной формы. Каждый детектор имеет толщину 400 мкм и площадь поверхности 28 см^2 .

Кардинальным решением проблемы регистрации сигналов, считываемых со счетчиков сцинтилляционных калориметров, можно считать разработку аналоговой памяти на основе переключаемых конденсаторов емкостью 4096 ячеек [37] и с частотой запоминания сигналов 100 МГц. Динамический диапазон, измеренный на частоте 10 МГц, составил 8000:1. Традиционным решением проблемы запоминания сигналов считалось использование параллельных АЦП с последующим запоминанием данных в цифровой памяти или применение ПЗС-матриц. Однако параллельные АЦП имеют малый динамический диапазон (порядка 6—8 бит), и, кроме того, их использование при большом числе каналов приводит к

значительной потребляемой мощности и большой стоимости. Что касается ПЗС-матриц, то, имея динамический диапазон 10—12 бит, они требуют для своей работы большой тактовой частоты, и, кроме того, их параметры зависят от температуры. Матрица памяти имеет 16 параллельных каналов, каждый из которых имеет глубину 256 ячеек. Выходы памяти могут быть подключены к АЦП через мультиплексор. Поэтому такая система считывания, обладая высокой экономичностью, может в то же время работать в конвейерном режиме с высокой тактовой частотой в экспериментах на будущих коллайдерах.

5. ПРИМЕНЯЕМЫЕ ТРИГГЕРНЫЕ СИСТЕМЫ

Несмотря на некоторые отличия как в постановке физической задачи, так и в типах и особенностях применяемых калориметров, при построении триггерных систем используется ряд типичных методов и подходов, основанных на применении как аналоговых, так и дискретных схем. Известно, что аналоговые решающие устройства отличаются высоким быстродействием и экономичностью. Широкому использованию аналоговых методов обработки сигналов, регистрируемых в калориметрах, способствует также то, что эти сигналы носят естественный характер. Поэтому не представляет особого труда получение суммы большого количества сигналов с помощью аналоговых сумматоров. Кроме того, в ядерной электронике наметилась тенденция в применении нейронных сетей, в которых преобладает аналоговая электроника. В свою очередь, использование дискретных решающих устройств существенно возрастает в связи с широким применением параллельных АЦП с частотой оцифровки 100 МГц и более и табличных методов решения на базе быстродействующих ППЗУ и ПЛМ. Цифровые схемы отличаются гибкостью, и, кроме того, имеется возможность относительно просто корректировать дрейф и нелинейность характеристик отдельных ячеек калориметра. Поэтому оба метода имеют широкие перспективы применения для обработки данных, регистрируемых в калориметрах. В цифровой схеме сигналы от ФЭУ после усиления и оцифровки поступают на входы «дерева сумматоров». С помощью программируемой памяти определяется величина энерговыделения частиц.

5.1. Аналоговые решающие устройства. Типичный аналоговый канал состоит из зарядочувствительного усилителя-интегратора, линейных ворот и аналоговой памяти с быстрой очисткой. Подробный анализ свойств такого канала приведен в [38]. Если используется аналоговое решающее устройство, то выход аналоговой памяти нередко подключается к взвешенной по определенному правилу резистивной цепочке. Так, в

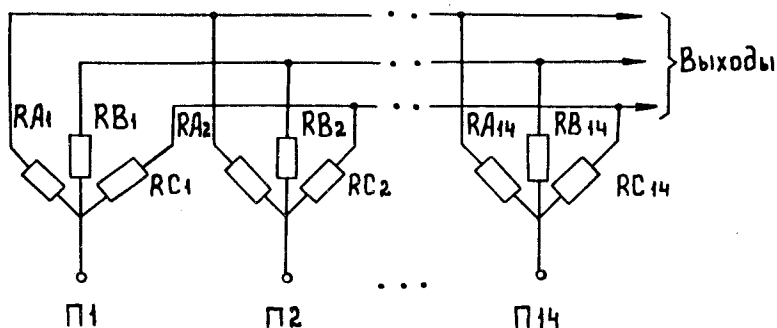


Рис. 10. Часть аналогового процессора, выполненная с помощью резистивной взвешенной цепочки. П1-П14 — процессоры

модульном калориметре, содержащем 280 пропорциональных трубок, для формирования триггерного сигнала используется подобная резистивная цепочка [39]. Калориметр состоит из отдельных сегментов размером $14 \times 14 \times 30$ см, которые выбраны исходя из того условия, чтобы размеры сегментов были больше ожидаемых поперечных размеров ливня. В свою очередь, сегмент состоит из детектирующих плоскостей, прослоенных свинцовыми пластинами (всего имеется 20 плоскостей). Взвешенная резистивная цепочка расположена в блоке вместе с регистрирующей электроникой и устройствами мультиплексирования АЦП. В сегменте калориметра каждый из 14 сигналов расщепляется с помощью параллельных резисторов RA, RB и RC (рис.10). Все 14 RA-сигналов, так же, как и RB- и RC-сигналы, подаются на входы усилителей. Как следствие этого, от каждого сегмента калориметра поступает только три сигнала SA, SB и SC вместо 14. Резисторы RA, RB и RC выбраны таким образом, что три сигнала содержат максимум информации о поперечном распределении ливня. При этом выполняется условие $1/RA + 1/RB + 1/RC = 1/R = \text{константа}$. Кроме того, выбраны следующие квадратично взвешенные функции:

$$f_A = R_0/RA = a(x - c)^2 + b,$$

$$f_B = R_0/RB = a(x + c)^2 + b,$$

$$f_C = R_0/RC = 1 - f_A - f_B,$$

где x — номер трубки, a , b и c — константы. Выбранные таким образом квадратичные функции позволили измерить нулевой, первый и второй

импульсы в распределении энергии в поперечном направлении в каждом сегменте. Применение аналогового процессора позволило надежно отделить фотоны от π^0 -мезонов.

В [40] описан аналоговый процессор, предназначенный для выделения более сложных событий с двумя кластерами в калориметре, содержащем 132 счетчика. Амплитуды сигналов, получаемых на выходе каждого канала, умножаются на синус угла, характеризующего положение данного счетчика калориметра по отношению к оси пучка. Импульс, запускающий установку, вырабатывается в том случае, если суммарная энергия, выделяемая в заданной группе счетчиков, превышает определенную величину. Суммарный сигнал получается с помощью весьма быстрых сумматоров, в которых используются операционные усилители с полосой пропускания 1,2 ГГц. При этом сигналы, поступающие на входы сумматоров, предварительно кодируются с помощью специально изготовленной для данного эксперимента кодирующей полупроводниковой матрицы. Эта матрица позволяет кодировать 40 суммарных сигналов, которые затем снова суммируются для выработки запускающего импульса.

Отличительная особенность устройства отбора кластеров [41] состоит в том, что оно предназначено для отбора событий с большими поперечными импульсами p_t . Количество сработавших соседних ячеек калориметра от одного фотона составляет 7—10. Использовались следующие критерии отбора полезного кластера: 1) тот счетчик калориметра, сквозь который прошла частица, должен находиться в центре кластера; 2) энергия, выделяемая в этом счетчике, должна быть максимальной по сравнению с энергией, выделяемой соседними счетчиками. Причем амплитуда сигнала должна превышать установленный порог 20 мВ. Такой счетчик назван пиковым счетчиком. Затем энергии всех счетчиков кластера суммируются и умножаются на поправочный коэффициент с целью получения импульса p_t , который сравнивается с заданным значением. Электроника считывания и регистрации построена в основном на базе блоков фирмы «LeCroy».

Следует отметить оригинальную конструкцию калориметра, позволяющую существенно упростить схему выработки запускающего импульса. Спектрометр полного поглощения создан для изучения электромагнитных распадов очарованных состояний. Калориметр содержит 1280 счетчиков из свинцового стекла. Помимо калориметра, установка состоит из сцинтилляционных годоскопов, запрещающих счетчиков, трековых камер, сегментированного черенковского счетчика, переднего и центрального электромагнитного калориметра. Центральный калориметр имеет конусообразную форму и состоит из 1280 счетчиков, каждый из которых «смотрит» обратно в сторону образования вершины взаимо-

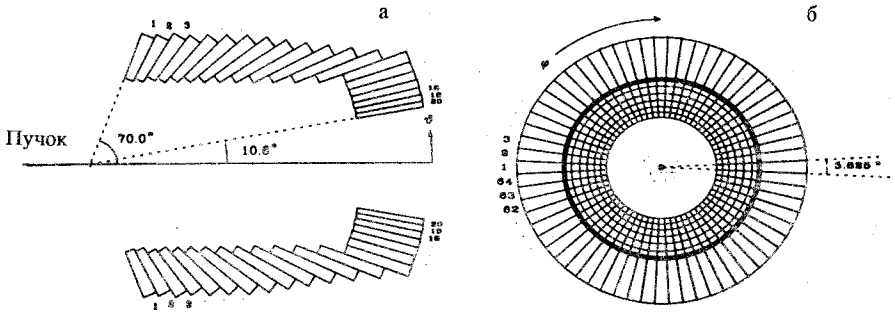


Рис. 11. Два вида калориметра в разрезе: а) показано число блоков в плече, покрывающих угол $\theta = 70^\circ$; б) вид 64 плеч, расположенных вдоль оси пучка

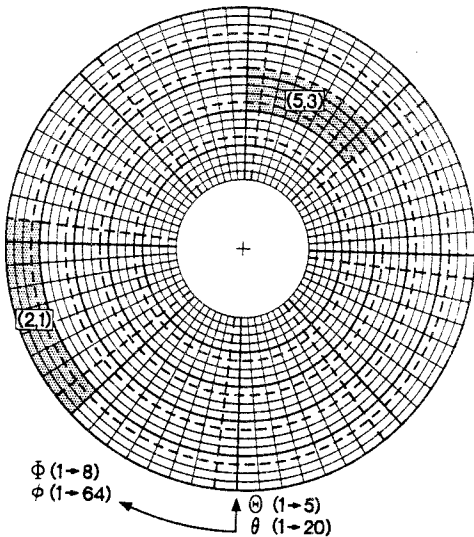


Рис. 12. Пояснение способа формирования суперкластерных сигналов

действия. Два плеча и поперечный разрез калориметра показаны на рис. 11 [42]. Одно плечо содержит 20 счетчиков, имеющих различные размеры и покрывающих полярный угол $10\text{--}70^\circ$. Всего имеется 64 идентичных крыла, покрывающих 360° . Уникальность калориметра заключается в том, что поперечные размеры счетчиков уменьшаются с уменьшением полярного угла. Соответственно уменьшаются и диаметры используемых ФЭУ. Основным принципом, заложенным в схему выработки триггерного сигнала, является поэтапное уменьшение количества сигналов, участвующих в принятии решения. Это достигнуто

путем суммирования аналоговых сигналов от соседних счетчиков в так называемые суперкластеры. Суперкластер получается путем суммирования сигналов от восьми счетчиков с добавлением сигнала от соседнего счетчика. Вследствие образования скачка электромагнитного ливня

в поперечном направлении значительная часть выделяемой энергии нередко выделяется на границе счетчиков. Для того чтобы получить эффективный триггер, суммы формируются путем перекрытия двух соседних счетчиков, что позволяет получить максимум энергии в суперкластере (см. рис.12). Таким способом получено 40 сигналов, которые подаются на входы дискриминаторов. Двухкоординатное чтение организовано в жидкостном сцинтилляционном электромагнитном калориметре с целью отбора ливней с большими поперечными импульсами p_t . В состав электронной системы отбора входят: аналоговые сумматоры на 123 входа, формирователи импульсов с временем интегрирования 20 нс, быстрые АЦП с частотой оцифровки 100 МГц и устройство с быстрой памятью для табличной арифметики. Время решения при общем числе каналов регистрации 3072 не превышает 120 нс. На рис.13 приведена схема координатной системы калориметра. Каждый квадрант разделен на четыре

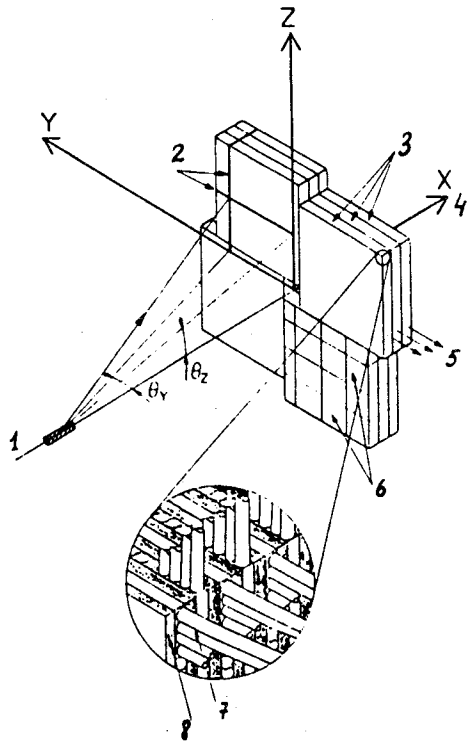


Рис. 13. Схематическое изображение координатной сетки жидкостного сцинтилляционного электромагнитного калориметра: 1 — мишень; 2 — каналы ФЭУ; 3 — сегменты калориметра; 4 — ось пучка; 5 — выход света; 6 — триггерные ячейки; 7 — тefлоновые трубки; 8 — пластины из стекла

горизонтальные и четыре вертикальные части так, что для выработки триггера используется 16 ячеек. Жидкий сцинтиллятор находится в тefлоновых трубках, образующих двухкоординатную систему считывания в плоскости XY. Сигнал с последнего динода каждого ФЭУ с помощью резистора корректируется в отношении $1/\sin \theta_y$ или $\sin \theta_z$, где θ_y и θ_z — углы, определяющие положение фотоумножителя по отношению к оси пучка. Такой подход позволяет получать энергии E_{Tz} и E_{Ty} , необходимые

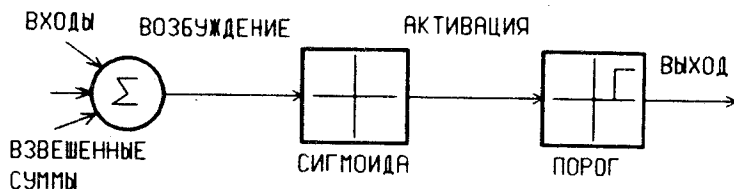


Рис. 14. Последовательность операций в типичном нейроне

для вычисления значения поперечной энергии E_T в соответствии с выражением [43]:

$$E_T = (E_{Ty}^2 + E_{Tz}^2)^{1/2}.$$

5.2. Применение нейронных сетей. Вполне естественно, что использование искусственных нейронных сетей, как в системах распознавания образов, так и в создании обучающихся параллельных вычислительных устройств, не могло не привлечь внимания разработчиков аппаратуры для физики высоких и сверхвысоких энергий. В настоящее время можно отметить следующие направления в развитии обработки физической информации, в которых ведутся исследования возможностей применения искусственных нейронных сетей.

- 1) Реконструкция треков заряженных частиц [44].
- 2) Определение координат первичных и вторичных вершин распадов в вершинных детекторах [45].
- 3) Обработка данных, регистрируемых в калориметрах [46].
- 4) Идентификация частиц и струй [47].

Краткие сведения о нейронных сетях и вопросы их применения в экспериментах физики высоких энергий изложены в работе [48]. Отмечается, что в будущем такие устройства смогут решать много проблем, недоступных для обычных машин, и прежде всего в таких областях, как распознавание образов и ассоциативные методы обработки информации. Следует отметить, что, в отличие от обычной электронной вычислительной техники, используемой для регистрации и обработки кластеров, применение нейронных сетей на данном этапе требует много усилий на «обучение». Эта проблема тесно связана с выбором нелинейной функции сети, которая зависит как от постановки задачи, так и от вида сигмоидной функции, которая эмпирически описывает поведение нейристора. На рис.14 в качестве примера приведена схема и последовательность операций в типичном нейроне [49]. В [50] выбор нелинейной функции пока-

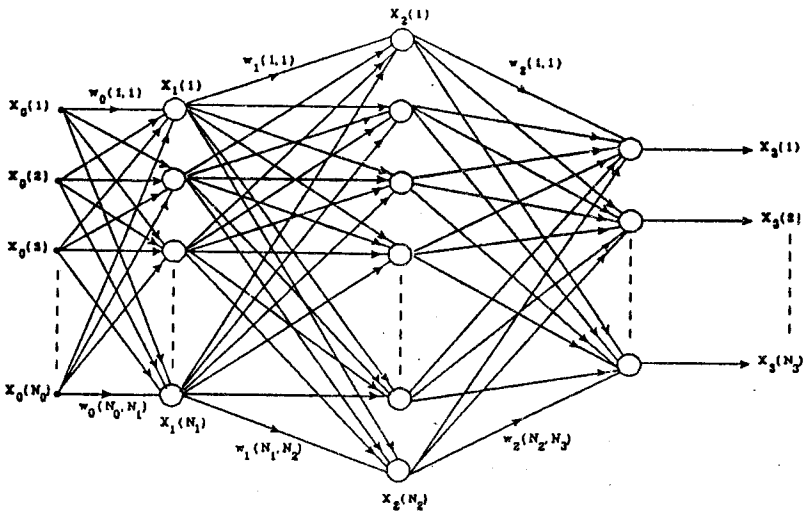


Рис. 15. Пример трехслойного персептрона. $X_0(1) - X_0(N_0)$ — входы; $w_0(1, 1) - w_0(N_0, N_1)$ — связи; $X_3(1) - X_3(N_3)$ — выходы

зан на примере идентификации электронов. Широко применяемым методом дискриминации электронов от адронов, регистрируемых в калориметрах, является методика использования ковариантной матрицы. При этом определяется значение функции χ^2 (χ — стандартное отклонение). Имеем

$$\chi_e^2 = (p - p_e) H_e (p - p_e) \quad \text{и} \quad \chi_h^2 = (p - p_h) H_h (p - p_h),$$

где p — импульс; H — ковариантная матрица калориметра и p_h и p_e — векторы, относящиеся к амплитудным значениям импульсов адронов и электронов. Проблема заключается в том, чтобы построить нейронную сеть, реализующую данные функции. С этой целью строится обобщенная схема нейронной сети и чаще всего применяется трехслойная сеть (рис.15), состоящая из входного внутреннего и выходного слоев [50]. На входной слой подаются значения энергии ливней, средний слой является функциональным и состоит из нейронов, и два элемента на выходах используются для представления χ^2 . Применялась также и двухслойная сеть (рис.16) [49]. Один из слоев используется для подачи входных сигнала-

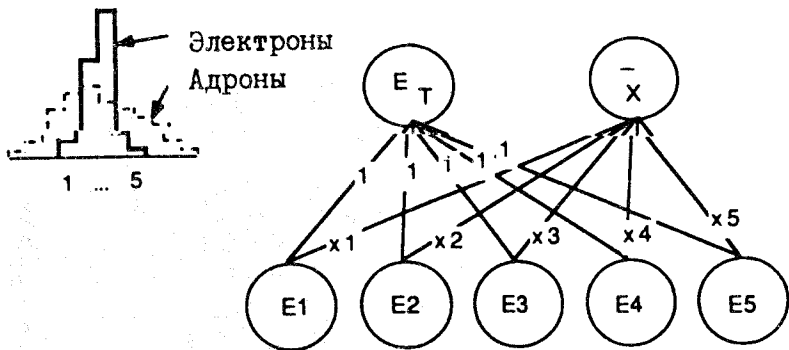


Рис. 16. Двухслойная нейронная сеть, адаптированная для идентификации частиц, регистрируемых с помощью калориметра. $E_1 - E_5$ — энергии отдельных слоев калориметра; E_T — общая энергия кластера; X — координата

лов, а на выходном слое получают вычисляемые величины. Кружками обозначены нейроны, а цифры у соответствующих линий обозначают вес связей. Следующим и весьма трудоемким этапом после подбора подходящей функции является процесс настройки (обучения) сети путем разработки соответствующего алгоритма. Чаще всего используется метод проб и ошибок путем применения как стандартных, так и специально разработанных для физических экспериментов программных эмуляторов. Следует отметить, что возможности искусственных нейронных сетей ограничены (число входов 20—60). Поэтому при создании аппаратной модели детектор разделяется на несколько секций. В [49] исследовалась часть калориметра, содержащая 4 концентрических слоя. После настройки сеть идентифицировала 90% электронов. Алгоритм обработки кластеров, используемый в [51], разработан для вычислений на векторной ЭВМ конвейерного типа.

В [52] приводятся данные о разработанной на уровне программных средств модели семислойной нейронной сети, предназначенной для обнаружения кластеров. Входы и выходы сети организованы таким образом, что определенное количество байтов данных соответствует амплитудным значениям счетчиков калориметра, а дополнительный байт данных используется для измерения ширины кластера. Алгоритм работает следующим образом. Каждый j -й нейрон данного слоя «общается» с 8 ближайшими соседями предыдущего слоя и сравнивает среднее значение

$$\text{net}_j = (\sum a_k) / 8 \quad (k = j)$$

с величиной a_j , получаемой на выходе соответствующего ему нейрона предыдущего слоя. Если $\text{net}_j > a_j$, то j -й нейрон передает эту пороговую величину в следующий слой. Кроме того, дополнительный байт данных передается даже в том случае, если данный нейрон неактивен. Причем чувствительность слоев различна, что позволяет более точно выполнять настройку.

В ряде исследований показано, что техника нейронных сетей может быть успешно использована для дискриминации и идентификации кварковых и глюонных струй, генерируемых методом Монте-Карло в pp - и e^+e^- -столкновениях. Отмечается [54], что в отличие от весьма сложных и трудоемких способов идентификации струй, применение для этих целей нейронных сетей имеет ряд преимуществ, например таких, как возможность построения относительно несложного процессора, высокий параллелизм вычислений и универсальность. Для настройки сети используется стандартный прием, и поэтому суть его рассмотрим кратко. Базовыми понятиями являются нейрон n_i и вес связности ω_{ij} . Нейронная сеть без обратных связей имеет входные нейроны x_k , внутренние нейроны h_j и выходные узлы y_i . Каждый нейрон суммирует взвешенные сигналы и срабатывает в соответствии с сигмоидной функцией

$$g(x) = 0,5[1 + \tanh(x)].$$

Для внутренних и выходных нейронов выполняются соотношения

$$h_j = g(a_j/T), \quad y = g(a_i/T),$$

где «температура» T определяет наклон функции g , а взвешенные суммы a_j и a_i равны $\sum \omega_{jk} x_k$ и $\sum \omega_{ij} h_j$ соответственно. Назначение внутренних слоев состоит в том, чтобы коррелировать и создавать внутренний образ изучаемого события. Обучение сети заключается прежде всего в изменении взвешенных сумм ω_{ij} таким образом, чтобы заданный входной параметр $x^{(p)}$ обеспечивал рост выходной величины $y^{(p)}$ до желаемого значения $t^{(p)}$. При этом в соответствии с принципом проб и ошибок необходимо минимизировать функцию

$$E = 1/2 \sum_p \sum_i (y_i^{(p)} - t_i^{(p)})^2.$$

Данные для обучения сети генерировались с помощью трех генераторов программ, дающих удовлетворительное описание формы событий, их множественности и др. при заданных энергиях. После генерации событий с помощью стандартного алгоритма поиска кластеров иницируется процесс идентификации струй. Причем рассматривались струи, угол между которыми не превышал 40° . Отдельно изучались события с одной и тремя струями. Процедура обучения повторяется несколько раз при разных типах событий до тех пор, пока не получится удовлетворительный результат. В качестве критерия отбора полезных событий использовался тот факт, что в большинстве случаев энергия лидирующей частицы в глюонных струях меньше, чем в кварковых. В цитируемой работе процесс обучения составлял до 10^5 циклов. При этом сеть идентифицировала до 90 струй, которые ранее не обнаруживались с помощью обычных методов. В [47] нейронная сеть использовалась для аналогичных целей, но изучался процесс для pp -столкновений.

5.3. Цифровые триггерные системы. Цифровые триггерные системы независимо от специфики установки имеют ряд особенностей: 1) оцифровка данных с помощью быстродействующих АЦП с последующим хранением на регистрах; 2) поиск географических адресов кластеров, например, номера сегмента или счетчика, содержащего локальный максимум энергии, вычисление этой энергии и сравнение с заданными порогом; 3) нахождение координат изолированных кластеров и вычисление формфактора с целью идентификации пионов и электронов; 4) идентификация и определение координат струй; 5) вычисление общей выделяемой энергии и выделяемой энергии в поперечном направлении.

Создание эффективной системы отбора полезных событий для установки UA1 во многом способствовало успешному проведению этого эксперимента. При разработке калориметра для эксперимента UA1 был предусмотрен ряд конструктивных и методических приемов с целью повышения эффективности триггерной системы. Калориметр имеет цилиндрическую форму и состоит из супергондолы, разделенной на 10 частей вдоль оси пучка и четырех модулей. По окружности калориметр разделен на десять сегментов размером 10×10 см по фронту и 40 см вдоль пучка. В свою очередь, каждый сегмент состоит из электромагнитной и адронной частей. Всего содержится 2560 сегментов, относящихся к супергондолам, и 1074 сегмента, покрывающих гондолу вдоль пучка. Такая конструкция калориметра обуславливает наличие отдельных каналов для выработки общего триггерного сигнала. Причем для выработки электромагнитного триггера используется только комбинация электромагнитных счетчиков четырех сегментов. Канал адронного калориметра включает комбинацию из восьми сегментов. Кроме того, по определенным критериям отбираются также образующиеся в калориметре струи.

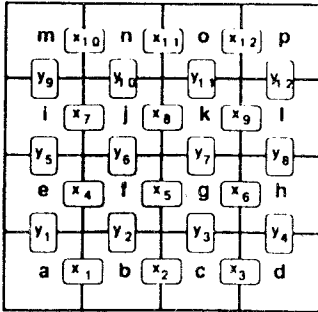
Данные от каждого канала после оцифровки поступают на входы специализированного процессора. Если рассматривать кратко, то сложность процессора можно оценить по данным, приведенным в табл.2.

Рассмотрим кратко алгоритмы работы некоторых частей процессора. На рис.17 приведена диаграмма, иллюстрирующая метод поиска

изолированных электромагнитных кластеров. Моделирование показало, что кластер не может распространяться на более чем 2x2 соседних счетчика. Поэтому маловероятно срабатывание тех счетчиков калориметра, которые расположены по диагонали. Отсюда и относительно простой алгоритм поиска кластеров: суммируются сигналы от соседних двух счетчиков с учетом перекрытия в горизонтальном и вертикальном направлениях. Эта функция выполняется с помощью специального моду-

Таблица 2
Количество функциональных плат

Аналоговая часть процессора	144
Поиск электромагнитных кластеров	32
Регистрация струй	16
Стробируемые сумматоры	18
Арифметическое устройство	1
Счетчик кластеров	2
Окончательное решение	1



$$(x_5 \cdot y_6) \cdot (\bar{a} \bar{b} \bar{c} \bar{e} \bar{g} \cdot i \cdot j \cdot k)$$

$$(x_5) \cdot (f \cdot g) \cdot (\bar{a} \bar{b} \bar{c} \bar{d} \bar{e} \bar{h} \cdot i \cdot j \cdot k \cdot \bar{l})$$

$$(y_6) \cdot (f \cdot j) \cdot (\bar{a} \bar{b} \bar{c} \bar{e} \bar{g} \cdot \bar{i} \cdot \bar{k} \cdot \bar{m} \cdot \bar{n} \cdot \bar{o})$$

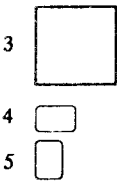
$$(x_5 + y_6) \cdot (f \cdot g \cdot j) \cdot (\bar{a} \cdot \bar{b} \cdot \bar{c} \cdot \bar{d} \cdot \bar{e} \cdot \bar{h} \cdot \bar{i} \cdot \bar{k} \cdot \bar{l} \cdot \bar{m} \cdot \bar{n} \cdot \bar{o})$$

$$(x_8 + y_6) \cdot (f \cdot j \cdot k) \cdot (\bar{a} \bar{b} \bar{c} \bar{e} \bar{g} \cdot \bar{h} \cdot \bar{i} \cdot \bar{j} \cdot \bar{m} \cdot \bar{n} \cdot \bar{o} \cdot \bar{p})$$

$$(x_5 + y_7) \cdot (f \cdot g \cdot k) \cdot (\bar{a} \bar{b} \bar{c} \bar{d} \bar{e} \cdot \bar{h} \cdot \bar{i} \cdot \bar{j} \cdot \bar{l} \cdot \bar{n} \cdot \bar{o} \cdot \bar{p})$$

$$(x_8 + y_7) \cdot (g \cdot j \cdot k) \cdot (\bar{b} \cdot \bar{c} \cdot \bar{d} \cdot \bar{e} \cdot \bar{f} \cdot \bar{h} \cdot \bar{i} \cdot \bar{l} \cdot \bar{m} \cdot \bar{n} \cdot \bar{o} \cdot \bar{p})$$

$$(x_5 + x_8 + y_6 + y_7) \cdot (f \cdot g \cdot j \cdot k) \cdot (\bar{a} \bar{b} \bar{c} \bar{d} \bar{e} \cdot \bar{h} \cdot \bar{i} \cdot \bar{j} \cdot \bar{l} \cdot \bar{m} \cdot \bar{n} \cdot \bar{o} \cdot \bar{p})$$



- 1 □
- 2 ▣

Рис. 17. Пояснение алгоритма отбора кластеров: 1 — нормальный порог; 2 — слабый порог; 3 — электромагнитный канал с низким порогом; 4 — двухвходовый сумматор-компаратор; 5 — компаратор с высоким порогом для электронов

ля, построенного на основе программируемых логических матриц. Несколько иначе идентифицируются струи, если исходить из того факта, что изучаемые струи более энергетичны, нежели ливни, и, кроме того, в конструкции калориметра, как уже упоминалось выше, предусмотрены специальные счетчики («jet brick»), регистрирующие струи. Процессор обрабатывает событие за 1,5 мкс, обеспечивая работу установки без мертвого времени. На рис.18 приведена обобщенная блок-схема процессорной системы, используемой для обработки кластеров и струй в эксперименте UA1 [55].

Процессор, разработанный для эксперимента DO, имеет весьма высокое быстродействие (132 нс), которое достигнуто благодаря применению конвейерного метода обработки сигналов и высокой степени параллелизма [56]. Конструкция процессора включает 600 функциональных плат шести различных типов. Рассмотрим кратко назначение этих плат. Сигналы, поступающие от счетчиков калориметра усиливаются и умножаются с помощью взвешенных резисторов для того, чтобы получить значение $E \sin \theta$. Кроме того, на первой плате смонтированы также ЦАП и параллельные АЦП, данные от которых запоминаются на регистрах конвейерного типа, что позволяет хранить «историю» предшествующих событий.

6. ПРИМЕНЕНИЕ ЦИФРОВЫХ СИГНАЛЬНЫХ ПРОЦЕССОРОВ (ЦСП) И RISK-ПРОЦЕССОРОВ

Несмотря на крупные успехи в создании сверхбыстродействующих вычислительных машин и специализированных процессоров, возрастающие потребности в высокопроизводительной обработке сигналов, регист-

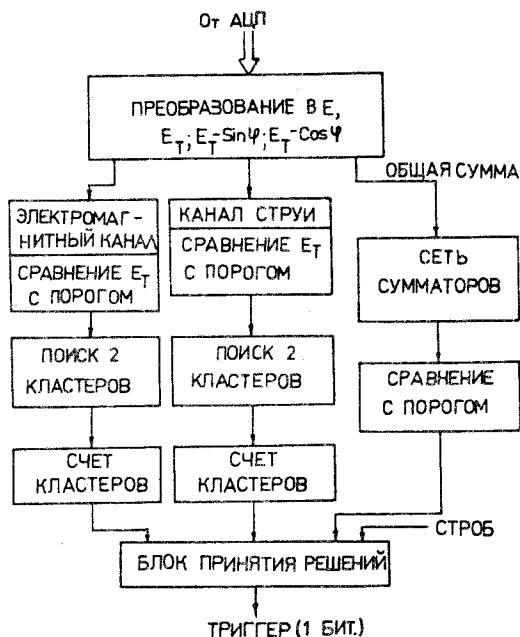


Рис. 18. Обобщенная блок-схема специализированного процессора для обработки кластеров и струй

рируемых в калориметрах, требуют значительного расширения существующих средств вычислительной техники. Эффективное решение столь непростой проблемы достигается, в основном, как за счет увеличения быстродействия логических элементов, так и путем применения матричных структур с локальными связями — систолических и волновых матриц, элементами которых являются специализированные процессоры. Здесь будет уместно кратко отметить те архитектурные концепции, которые используются для увеличения производительности компьютеров [57]

Параллельная архитектура. Параллельные ЭВМ можно классифицировать по типу связей процессоров с оперативным запоминающим устройством (ОЗУ). Так, в классической ЭВМ каждый из процессоров с помощью мультиплексной магистрали может обращаться к общему ОЗУ. Недостаток этого очевиден: невозможность одновременного обращения даже двух процессоров к ОЗУ. Введение дополнительной магистрали увеличивает производительность системы, однако нередко возникают конфликтные ситуации при обращении процессоров к общей памяти. Существенное увеличение производительности системы было достигнуто путем увеличения количества модулей ОЗУ и применения сетевых коммутаторов. Однако при этом существенно возрастает стоимость аппаратуры и системного математического обеспечения. Более перспективной оказалась матричная архитектура. Матричный процессор представляет собой матрицу процессорных элементов, образующих линейные, ортогональные, гексагональные, древовидные и др. связи. При этом предполагается, что каждый процессор имеет свое ОЗУ и с помощью интерфейсов и коммутаторов подключен к своим ближайшим соседям. Более того, разрабатываются также и многомерные структуры. Такие сложные вычислительные системы требуют эффективной организации потоков данных и использования новых математических алгоритмов. Если говорить о потоках данных и команд, то можно выделить три концепции:

- 1) Одному потоку команд соответствует один поток данных, как это принято в классической ЭВМ Неймана.
- 2) Одному потоку команд соответствует много потоков данных.
- 3) Много потоков команд и много потоков данных.

Как будет показано ниже, для обработки сигналов получили применение простые процессоры первого типа, вследствие простоты связи между ними и бурного развития технологии сверхбыстродействующих больших интегральных микросхем. Оказалось, что программируемые процессорные модули имеют ряд преимуществ по сравнению со специализированными сигнальными процессорами, поскольку последние можно использовать для создания матричных процессоров. Для обработки сигналов наиболее широкое применение получили два способа

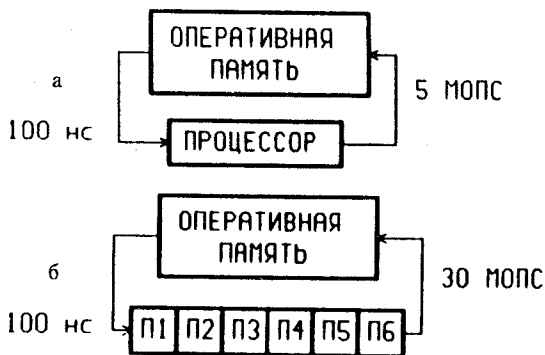


Рис. 19. Схема простейшей ЭВМ с процессором и одной оперативной памятью (а). Линейная систолическая система (б), состоящая из шести процессоров и одной оперативной памяти. П1–П6 — процессоры

организации матричных вычислений: систолические и волновые матричные процессоры.

Систолические процессоры. Систолическая система — это сеть процессоров, которые ритмично производят вычисления и «проталкивают» данные через вычислительную систему. Она состоит из матрицы связанных процессоров (ячеек), каждая из которых выполняет простые операции. Вследствие регулярности связей и синхронности вычислений, систолические системы имеют ряд преимуществ по сравнению со сложными сетями больших ЭВМ. Информация в систолической матрице распространяется между ячейками по конвейеру, обеспечивая, с одной стороны, многократное использование их элементов, а с другой — формирование окончательного результата по мере загрузки и разгона конвейера, подобно тому, как пульсирует кровь при сокращении систолы сердца. Отсюда, скорее всего, и такое название систолических процессоров [58,59]. Связь с внешними устройствами имеют только те процессоры, которые расположены на границах матрицы. Принципиальное достоинство такого подхода состоит в возможности использования ограниченного числа входных-выходных контактных площадок для выполнения систолических алгоритмов. Если процессоры организованы в виде матрицы, систолические алгоритмы минимизируют время задержки передачи данных между процессорами, позволяя делать временной цикл относительно коротким. На рис. 19, а в качестве примера приведена обычная ЭВМ, состоящая из одного процессора и соответствующего ему ОЗУ, и простая линейная систолическая система, состоящая из шести процессоров и одного модуля ОЗУ (рис. 19, б). Если обычный процессор выполняет, допустим, 5 млн. операций в секунду (МОПС), то шесть процессоров в линейной систолической системе с одним ОЗУ будут иметь производительность 30 МОПС [60]. Коэффициент ускорения вычисле-

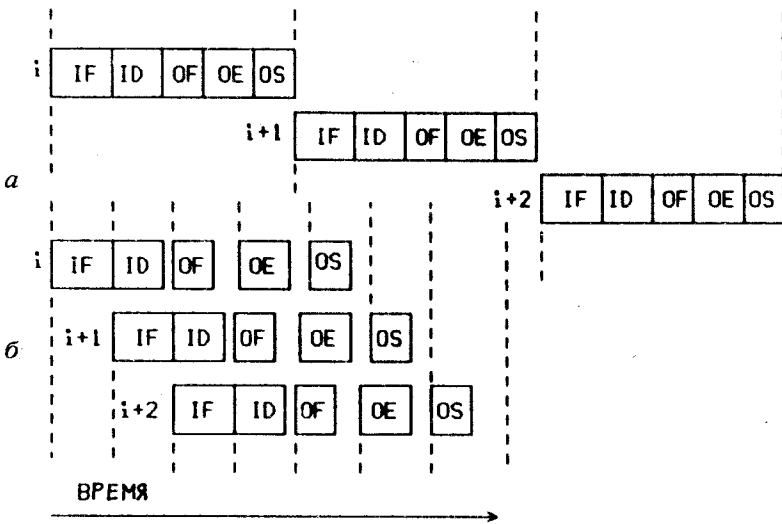


Рис. 20. Пример выполнения трех команд: а) последовательным способом; б) конвейерным способом

ний K_B равен отношению времени обработки в одиночном процессоре к времени обработки в матричном процессоре. Систолическая матрица должна обладать линейной конвейеризуемостью, т.е. оценка ускорения K_B должна увеличиваться с ростом числа процессорных элементов. Эффект конвейеризуемости проявляется в том, что исполнение команд разделяется на несколько стадий (микроциклов). Как следствие этого, множество команд выполняется практически параллельно, как это показано на рис.20 [61]. В качестве примера эффективности использования систолизации в двумерных вычислительных сетях рассмотрим двумерную операцию умножения матриц [58]. Пусть

$$A = [a_{ij}], \quad B = [b_{ij}] \quad \text{и} \quad C = A \times B.$$

При определенных предположениях

$$C = [A_1B_1 + A_2B_2 + \dots + A_NB_N],$$

где A_iB_i — представляют собой внешнее произведение. Тогда умножение матриц можно выполнить за N рекурсивных шагов (рис.21). Причем процесс вычисления носит волнообразный характер, так как активизируются N фронтов волновой обработки.

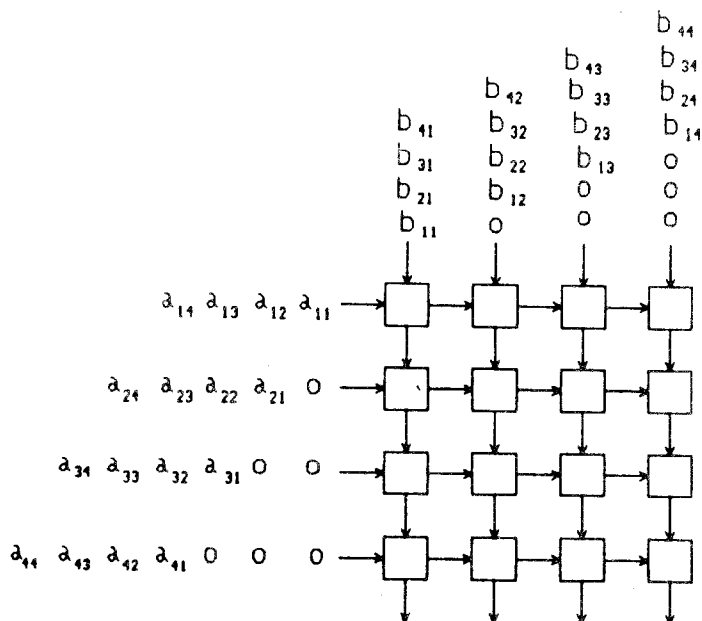


Рис. 21. Систолическая матрица для реализации умножения двух матриц

Рассмотрим два примера применения систолических процессоров.

Процессор, описанный в [62], используется на втором уровне триггерной системы в эксперименте NUMASS в ЦЕРН. Алгоритм процессора базируется на соотношении

$$M^2 = \Delta t E^2 \frac{2}{Lc^3}, \quad (1)$$

где M — остаточная масса частицы, Δt — разница во времени пролета по отношению к частице, летящей со скоростью света, L — длина пролета и E — общая энергия частицы. Эта величина получается путем суммирования сигналов, поступающих от калориметра в оцифрованном с помощью АЦП виде. На рис.22 приведена схема вычисления суммарной энергии $\sum E_n$ и взвешенной суммы

$$\sum_{n=1}^{12} nE_n,$$

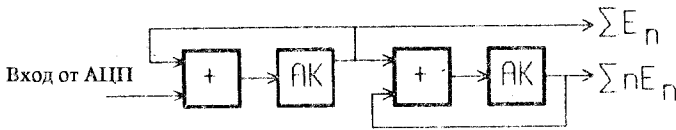


Рис. 22. Конвейерная схема для вычисления суммарной энергии и взвешенных сумм

где n — горизонтальные стрипы калориметра. Для вычисления выражения (1) используется несколько аналогичных модулей. Важно также отметить, что разработанный процессор является полностью программируемым, поскольку он выполнен с использованием неоднократно стираемых вентиляльных матриц типа LCA фирмы XILINX.

Систолические процессоры, будучи синхронными по природе, удачно вписываются в триггерные системы, разрабатываемые для экспериментов на ускорителе LHC. Для того чтобы избежать потерь информации при периоде встречи пучков, равном 16 нс, необходимо, чтобы каждый процессорный элемент систолической системы успевал обрабатывать поступающую на него информацию за 16 нс и передавать ее на ближайшие процессорные элементы. Разработанный процессор, работающий с тактовой частотой 67 МГц, входит в состав триггерной системы первого уровня.

Алгоритм работы процессора состоит из трех этапов:

- 1) Идентификация кластеров в электромагнитном калориметре.
- 2) Принятие решения о том, что кластер является изолированным.
- 3) Определение того, что выделенная энергия в соответствующих ячейках адронного калориметра мала.

Данные на систолический процессор поступают в последовательном коде по 162 каналам (81 вход от электромагнитного калориметра и 81 вход от адронной части калориметра). Систолический процессор, разработанный для экспериментов на LHC [63], решает широкий круг задач: поиск изолированных электронов, мюонов, фотонов и τ -лептонов; струй с высоким поперечным импульсом; лептонов и струй; вычисление поперечной энергии, выделяемой вследствие воздействия нейтрино или других взаимодействующих частиц. Использование большого количества последовательных каналов передачи и обработки данных, работающих в конвейерном режиме, позволяет просто решить одну из труднейших проблем, связанных с вводом информации в процессорные элементы.

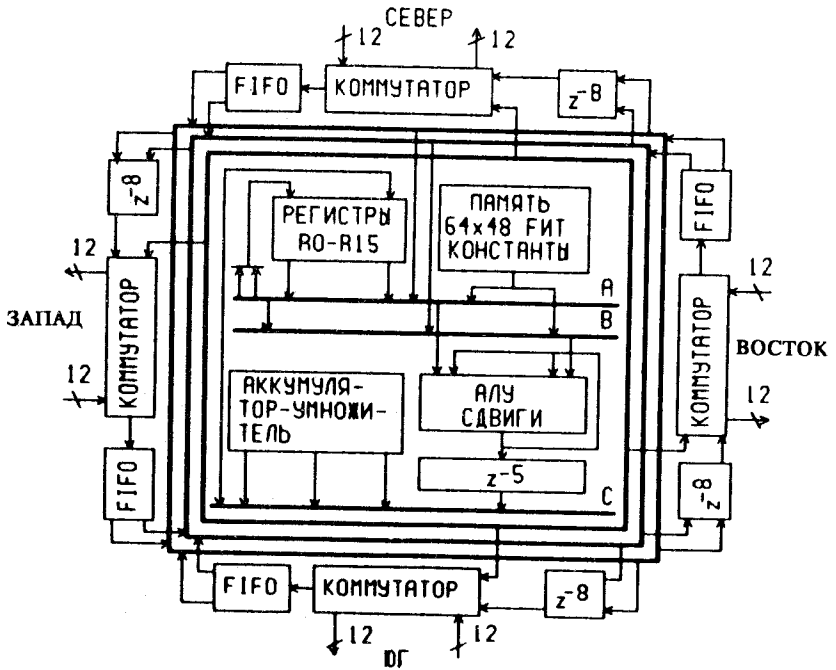


Рис. 23. Блок-схема волнового процессора

Волновые матрицы. Один из недостатков систолических архитектур состоит в том, что для управления потоком данных требуется жесткая синхронизация, и, как следствие этого, в систолической матрице вводятся дополнительные временные задержки. В результате быстродействие процессорных элементов используется неэффективно, особенно если используются большие процессорные матрицы. Поэтому в вычислительной технике известен другой подход к построению матричных процессоров — замена жесткой синхронизации на асинхронный принцип взаимодействия процессорных элементов путем правильного упорядочения операций, как это принято в потоковых ЭВМ или волновых матрицах [64]. Такое название волновые процессоры получили потому, что имеется некоторое сходство между вычислительными фронтами и фронтами электромагнитных волн, принцип распространения которых от точки к точке подчиняется закону Гюйгенса. Поскольку волновые фронты двух последовательных рекурсий никогда не пересекаются, то упрощается проблема конфликтных ситуаций с помощью регистров или запоминающих уст-

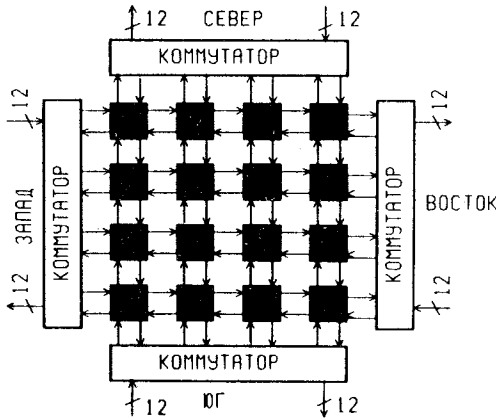


Рис. 24. Блок-схема процессорного элемента волнового процессора

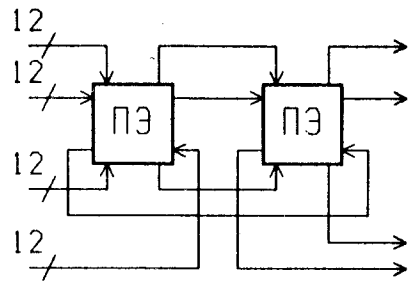


Рис. 25. Одномерный 48-разрядный каскад, составленный из двух 12-разрядных волновых процессорных элементов. ПЭ — процессорные элементы

ройств типа «первый записан — первый считан» (FIFO). В волновых матрицах сохраняются такие качества систолических матриц, как модульность и локальность связей, линейность ускорения и конвейеризуемость. В то же время имеется ряд дополнительных качеств, прежде всего следующих: запуск процессорного элемента зависит только от наличия требуемых операндов и ресурсов; более простое представление параллельных операций, большая степень конвейеризации вычислительного процесса и меньшее использование общей памяти и центрального управления. Однако остаются проблемы соединений между блоками памяти и конфликтов при обращении к памяти. Эти факторы сказываются на архитектуре волновых процессоров. На рис.23 приведена блок-схема типичного волнового матричного процессора [65], который состоит из процессорных элементов, общей памяти, содержащей программы и алгоритмы обработки информации. Последовательность вычислений начинается от одного элемента и далее в виде волн распространяется по всей матрице. На рис.24 приведена блок-схема типичного процессорного элемента (ячейки). Он принадлежит к классу процессоров, в которых реализован алгоритм типа «много данных и много команд». Основу волнового процессорного элемента составляют 16 ЭВМ с RISK-архитектурой (см. ниже). Каждая ячейка взаимодействует с четырьмя соседними, за исключением граничных ячеек, которые с помощью коммутаторов могут взаимодействовать с четырьмя аналогичными волновыми процессорами с помощью 12-разрядных слов в направлении «север — восток — юг и запад». Приспособленный для конвейерной обработки данных, процессорный элемент выполняет 250 МОПС, а в целом волновой процессор рабо-

тает со скоростью 4 тыс. МОПС. Как это показано на рис.25, используя всего два аналогичных волновых процессора, можно построить одномерный каскад для обработки 48-разрядных слов.

RISK-процессорные элементы (Register-Intensive CPU — регистровый процессорный элемент — РПЭ). По своей архитектуре РПЭ представляет собой, по существу, микро-ЭВМ на одном кристалле с 16- или 32-разрядной магистралью. В отличие от универсальных ЭВМ, содержащих много команд и модификаций адресов, требующих много времени для их исполнения, в РПЭ предусмотрено несколько наиболее часто встречающихся команд, используемых при обработке сигналов и в научных вычислениях. Причем максимально сокращены пересылки инструкций за счет использования регистров и быстрой оперативной памяти, находящейся на одном кристалле с процессором. Сами команды расположены в порядке частоты их исполнения. РПЭ представляют широкий интерес в связи с тем, что они составляют основу таких процессоров, как волновые, сигнальные процессоры и транспьютеры. РПЭ, входящий в состав волнового процессора (рис.24), окружен тремя кольцевыми магистралями. Процессорный элемент состоит из умножителя-аккумулятора, арифметико-логического устройства (АЛУ), регистрового файла и памяти программ. С помощью умножителя-аккумулятора выполняется умножение двух 12-разрядных слов, а результат помещается в 29-разрядный аккумулятор. Причем АЛУ работает параллельно с умножителем. Между магистралью и АЛУ введено пять буферных регистров z^{-5} , которые обеспечивают согласование во времени передачи данных от АЛУ и аккумулятора-умножителя. Наличие буферных запоминающих устройств типа FIFO и сдвиговых z^{-8} регистров, выполняющих функцию задержки, позволяет работать волновому процессору в асинхронном режиме. При тактовой частоте 125 МГц один процессорный элемент выполняет 250 МОПС. Технология изготовления РПЭ бурно прогрессирует. Так, в [66] описан 64-разрядный RISK-процессор фирмы «МОТОРОЛА», который содержит также графический сопроцессор, ассоциативный буфер и т.д..

Транспьютеры. Создание транспьютеров позволило решить одну из труднейших проблем при построении матричных процессоров — обеспечение эффективной связи между соседними процессорными элементами. Принципиальным отличием транспьютеров от других микро-ЭВМ, создаваемых на одном кристалле, является наличие четырех последовательных дуплексных интерфейсов с высокой пропускной способностью (20 Мбит/с) и весьма эффективным протоколом. В качестве процессора в транспьютерах обычно используются РПЭ с различными модификациями. На рис.26 приведена блок-схема транспьютера Т800, применяемого в экспериментах по физике высоких энергий [67]. Наряду с че-

тырьмя последовательными интерфейсами, транспьютер Т800 имеет параллельный 32-разрядный канал прямого доступа к внешней оперативной памяти. Оперативное запоминающее устройство емкостью 4К байт, расположенное на кристалле, имеет такое же время доступа, как и файловый регистр. Вычислительная мощность транспьютера обеспечивается также за счет 32-разрядного процессора с плавающей точкой. Кроме того, в состав транспьютера входит также таймер и схемы обслуживания внешних прерываний. Основная команда имеет длину восемь бит: четыре разряда используются для задания кодов команд, а остальные 4 бита предназначены для кодирования данных. Имеются также так называемые префиксные команды, с помощью которых можно быстро сформировать операнды длиной более 15 бит. С помощью транспьютеров легко создаются параллельные системы, которые управляются специально созданным языком Оссат [68]. Транспьютеры широко используются на установке ZEUS [69]. Другой пример применения транспьютеров приведен в интересной работе [70], посвященной применению нейронной сети для классификации e/π частиц, регистрируемых с помощью кремниевого калориметра. В конце концов, требовалось отделить электромагнитные ливни от адронных. Для этих целей была создана мощная вычислительная сеть, включающая два транспьютера, микро-VAX, рабочую станцию и персональный компьютер. Моделирование проводилось с помощью программы GEANT 3.14.

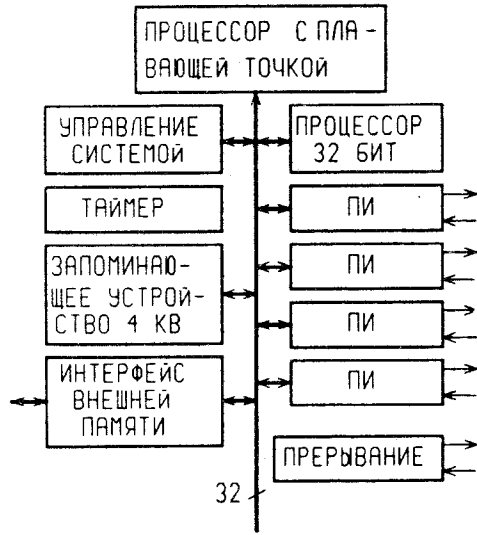


Рис. 26. Блок-схема транспьютера Т800. ПИ — последовательные интерфейсы

Цифровые сигнальные процессоры (ЦСП) Рассмотренные выше процессоры тоже можно отнести к классу сигнальных. Однако могут быть и некоторые отличия. ЦСП представляет собой специализированный микропроцессор, аппаратная архитектура которого ориентирована на обработку цифровых сигналов, источниками которых могут быть, например, АЦП. Некоторые типы ЦСП могут иметь в себе встроенные АЦП. Подробный обзор, посвященный сигнальным процессорам и их

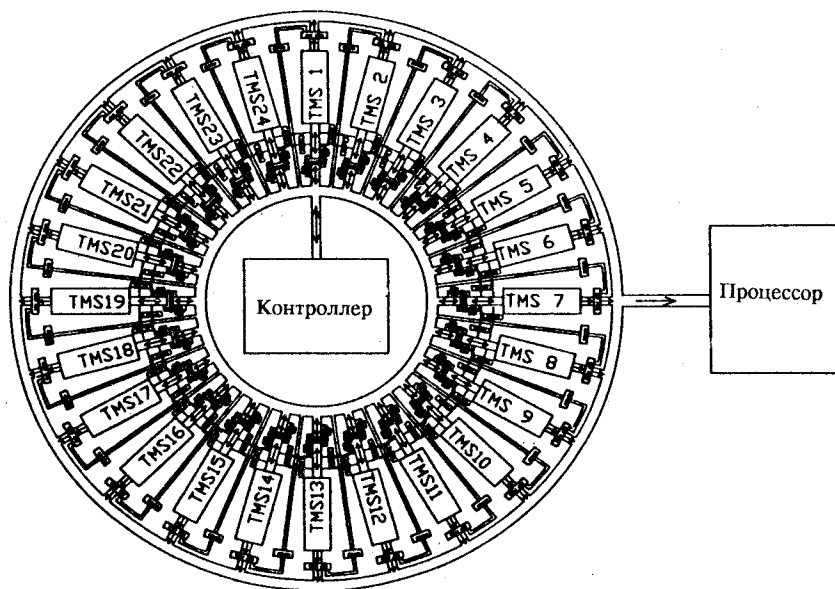


Рис. 27. Блок-схема триггерной системы калориметра DELPHI. КК — крейт-контроллер; ОСП — основной сигнальный процессор; TMS1–TMS24 — сигнальные процессоры

применению в экспериментах по физике высоких энергий, дан в [71]. С целью увеличения быстродействия, как правило, в таких процессорах имеется отдельная память для программы и данных. Причем количество выполняемых функций ограничено и приспособлено прежде всего для выполнения таких операций, как параллельное умножение, циклические сдвиги, манипуляции с табличными данными и др. ЦСП нашли применение для быстрой обработки сигналов, регистрируемых в калориметре установки DELPHI [72]. Калориметр содержит 4500 счетчиков из свинцового стекла, которые составляют 24 сектора. Каждому сектору соответствует один процессор (рис.27). Сигнальный процессор, получая данные от АЦП, вычитает пьедесталы, корректирует числа в соответствии с заданными константами, вычисляет энергию, выделенную в секторе, и сравнивает ее с установленным порогом. Все эти операции выполняются в течение 24 мкс, что соответствует времени триггера второго уровня. Обработка кластеров выполняется на третьем уровне работы триггерной системы.

7. ПЕРСПЕКТИВЫ ПРИМЕНЕНИЯ ВОЛНОВЫХ ПРОЦЕССОРОВ В ПРОЕКТЕ SSC

В этом разделе мы кратко рассмотрим интересный проект создания полностью программируемого триггера первого уровня для калориметра, создаваемого для SSC. Этому вопросу посвящен ряд работ [73—75]. Предполагается, что в момент встречи пучков с периодом 16 нс может возникать в среднем 1,6 взаимодействий. Задача триггерной системы состоит в том, чтобы резко уменьшить уровень фоновых событий. Каждые 16 нс многочисленные субдетекторы, включая и калориметр, будут посылать данные на входы триггера первого уровня для принятия решения. Непосредственно калориметр будет регистрировать информацию, относящуюся к электронам, фотонам, струям частиц и потерям энергии E_t (от нейтрино). Схематическое изображение калориметра

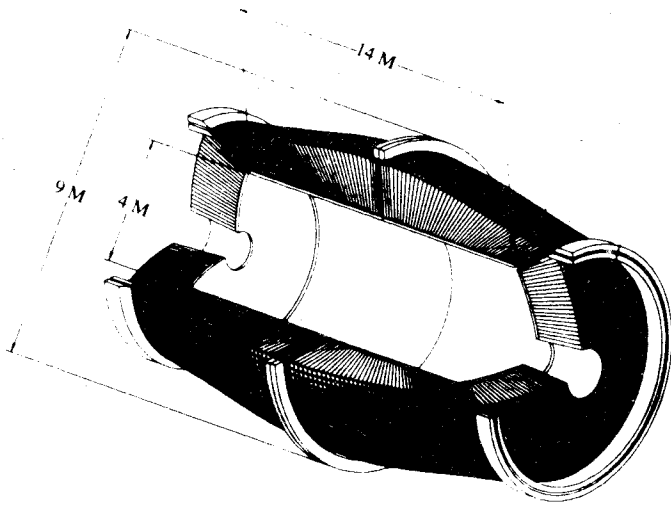


Рис. 28. Схематическое изображение калориметра для экспериментов на сверхпроводящем суперколлайдере

приведено на рис.28. Предполагается, что общее количество каналов регистрации для эксперимента GEM может составить 60000 для электромагнитной части и 2000 для адронной части калориметра. Однако здесь возможны и сокращения числа каналов за счет огрубления дискретности «башен» калориметра, как это показано на рис.29. Для отделения электронов и фотонов энергия, регистрируемая в электромагнитной части ка-

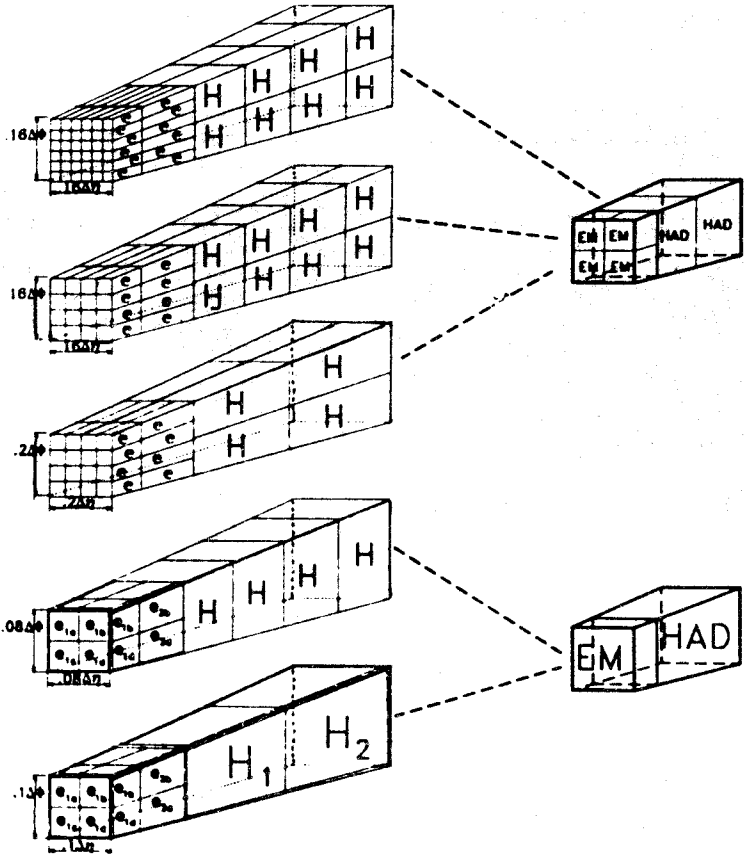


Рис. 29. Примеры различных сегментаций «башен» калориметра

лориметра, должна быть больше заданного порога, и ее отношение к величине энергии, выделяемой в адронной части калориметра, должно быть малой величиной. Кроме того, идентификация изолированного кластера предполагает, что выделяемая энергия в соседних «башнях» также пренебрежимо мала. Для идентификации струй частиц суммарная энергия, выделяемая в «башне», сравнивается с порогом. Аналогично идентифицируются нейтрино, путем измерения суммы E_ν и сравнения с пороговой величиной. Для выполнения этих условий предлагается использовать волновые процессоры [73]. Возможны два подхода к реализации этих условий. Первый метод основан на требовании, чтобы

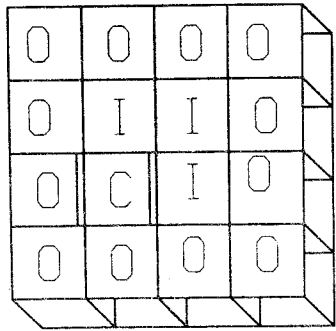
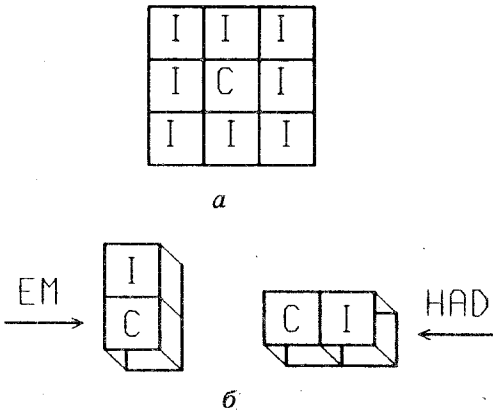


Рис. 31. К алгоритму нахождения изолированных кластеров

Рис. 30. Идентификация локального максимума (а); электромагнитных кластеров (б)

кластер различался при том условии, что сработали те ячейки «башни», которые сосредоточены в области 3×3 ячейки. Причем центр кластера находится по величине локального максимума (рис.30,а), который определяется из условия

$$C > I_i \quad \text{для } i = 1, 2, \dots, 8. \quad (2)$$

Сумма энергии «башни» и восьми соседних «башен» должна быть больше пороговой величины

$$\text{Порог} < \sum_{i=1}^8 I_i + C. \quad (3)$$

Алгоритм поиска электромагнитных кластеров в области 4×4 матрицы преследует цель идентификации электронов путем сравнения сумм от двух соседних «башен» с порогом в области 1×2 или 2×1 (рис.30,б). Запрет на регистрацию электромагнитного кластера может быть наложен, если имеется заметный сигнал, зарегистрированный в соответствующем канале адронного триггера, или если кандидат в кластеры не изолирован, как это показано на рис.31. Другими словами, должны выполняться условия

$$\text{Порог} > \frac{C_h + I_h}{C_{em} + I_{em}},$$

$$\text{Порог} < C_h + \sum_{i=1}^3 I_h + \sum_{i=1}^{12} O_h + \sum_{i=1}^{12} O_{em}.$$

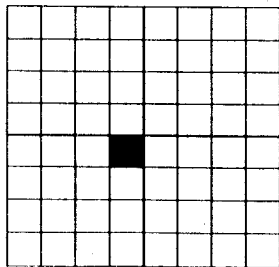
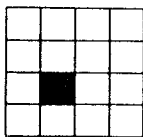


Рис. 32. Схема поиска струй частиц в матрицах 4×4 и 8×8

Local maximum $\begin{bmatrix} I & I & I \\ I & C & I \\ I & I & I \end{bmatrix}$ $C > I_i$ for $i = 1, \dots, 8$.
 Threshold $< \sum_{i=1}^8 I_i + C$.

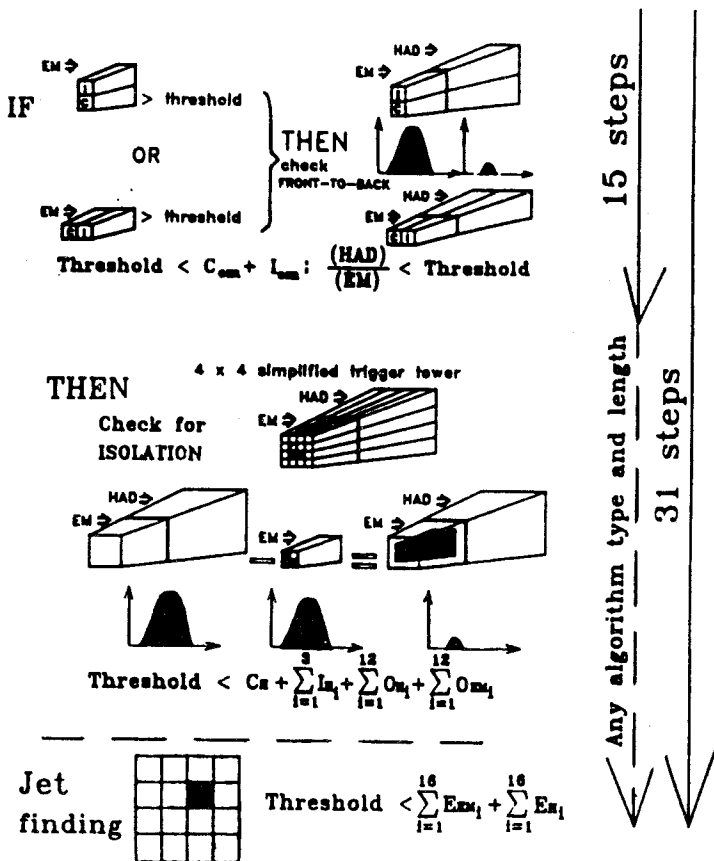


Рис. 33. Обобщенная схема алгоритма работы триггерной системы [73]

Поиск струй частиц выполняется в областях 4x4 и 8x8 (рис.32) с учетом соотношения

$$\text{Порог} < \sum_{i=1}^n E_{em} + \sum_{i=1}^n E_n, \quad n = 16,64.$$

Матричная структура калориметра обусловила выбор системы обработки сигналов, в которой каждой «башне» соответствует волновой процессор, структурная схема которого была приведена на рис.23. В результате в целом получается матричная волновая процессорная система с высокой производительностью и к тому же полностью программируемая. В такой системе каждый процессор получает данные от соседних «башен» и в то же время оперативно обменивается данными со смежными процессорами. В данной работе детально рассматриваются вопросы ввода-вывода данных в процессорные элементы и проблемы программирования системы. На рис.33 приведена обобщенная блок-схема алгоритма триггерной системы.

Дальнейшее развитие полностью программируемого триггера для SSC получило в работах [74,75] того же автора в виде трехмерной ячеечной архитектуры, условное обозначение которой приведено на рис.34. В целом вычислительная система, будучи волновой, работает в асинхронном режиме. В то же время отдельные процессоры (см. рис.24) работают с тактовой частотой 60—120 МГц. Наряду с четырьмя параллельными интерфейсами, с помощью которых происходит обмен данными с соседними волновыми процессорами в направлениях «север — юг — восток и запад», в трехмерной структуре эффективно используются еще два последовательных интерфейса с направлениями «верх — низ», которые подключены к кольцевым магистральям каждого волнового процессора. Эти интерфейсы в

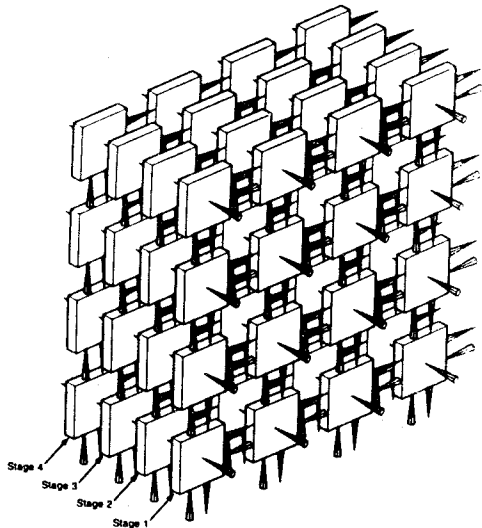


Рис. 34. Общая схема модернизированной конвейерной трехмерной вычислительной системы для триггера первого уровня

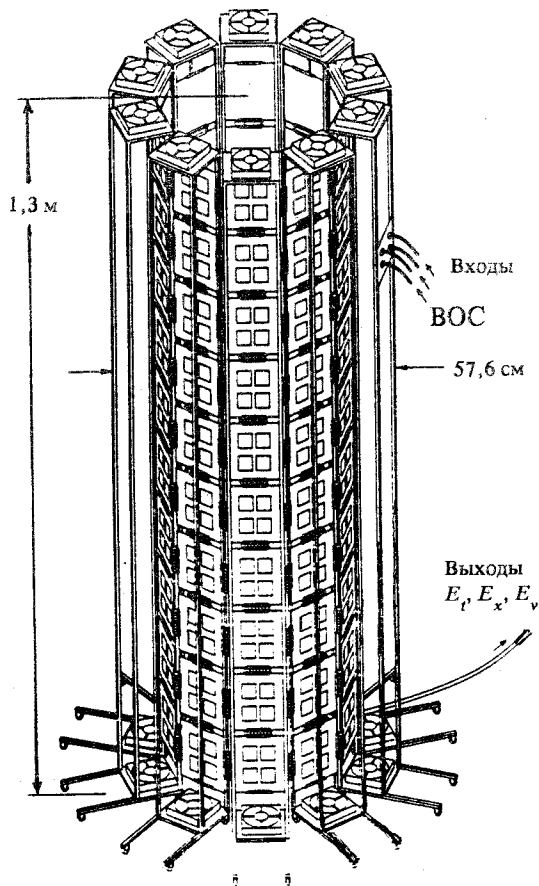


Рис. 35. Общий вид создаваемой триггерной системы в сборе

основном используются для ввода программ, а также для контроля и отладки системы. Программа обработки данных начинает работать только при наличии данных на входах параллельных интерфейсов. Наличие дополнительных регистров и памяти типа FIFO позволяет равномерно подкачивать данные от калориметра в процессоры и минимизировать время выполнения операций. Можно отметить четыре уровня выполнения программы обработки (рис.34). На первом уровне одновременно с обработкой текущей информации принимаются новые данные от калориметра. После передачи этих данных на следующий уровень про-

цессор возвращается к выполнению текущей программы. Процесс вычислений на выходах процессоров, так же, как и входные данные, проходит четыре стадии. Причем последний процессор должен выдавать результат каждые 16 нс. В [75] описаны прототипы трехмерных (3D-Flow Processor) 4×4 и 8×8 процессоров, смонтированных на печатной плате и собранных в виде цилиндрической башни, как это показано на рис.35. Данные от калориметра к башне подводятся с помощью волоконно-оптических световодов. По торцам башни расположены вентиляторы.

8. СЧЕТЧИКИ КЛАСТЕРОВ

Нередко требуется просто подсчитать количество изолированных кластеров, в том числе и jet-кластеров. Рассмотрим два алгоритма, которые, судя по всему, равносильны. Суть первого алгоритма заключается в следующем [76]. Имеем матрицу

$$A = \begin{pmatrix} X_{1,1} & X_{1,2} & \dots & X_{1,m} \\ X_{2,1} & X_{2,2} & \dots & X_{2,m} \\ \dots & \dots & \dots & \dots \\ X_{n,1} & X_{n,2} & & X_{n,m} \end{pmatrix}.$$

Рассматривая каждый текущий элемент матрицы A как опорный, вычисляем значения булевых выражений, содержащих, несмотря на видимую сложность, четыре различные переменные

$$S1_{n,m} = X_{n,m} \overline{X_{n+1,m}}. \tag{4}$$

Другими словами, в выражении (4) подсчитывается количество единиц, расположенных выше выбранной опорной точки.

$$S2_{n,m} = \overline{X_{n,m-1}} \overline{X_{n,m}} (X_{n+1,m} \vee X_{n+1,m-1}). \tag{5}$$

С помощью выражения (5) подсчитывается количество единиц выше опорной точки плюс выше слева и отсутствие единиц слева от опорной точки. Тогда количество кластеров равно

$$N_{cl} = \sum_{m=1}^m \sum_{n=1}^n S2_{n,m} - \sum_{m=1}^m \sum_{n=1}^n S1_{n,m}.$$

При этом предполагается, что каждому элементу матрицы A ставится в соответствие счетчик калориметра.

Другими словами, количество кластеров равно $S_2 - S_1$. С целью упрощения изложения рассмотрим простой пример. Пусть $m = n = 4$, и зарегистрирован кластер типа

$$\begin{array}{c} * n, m \\ \times \\ \times \\ \times \times \end{array},$$

где $*$ — опорная точка и \times — сработавшие счетчики. Имеем

$$A = \begin{vmatrix} 0000 \\ 0100 \\ 0100 \\ 0110 \end{vmatrix}, \quad S_1 = \begin{vmatrix} 0100 \\ 0000 \\ 0010 \\ 0000 \end{vmatrix} \quad \text{и} \quad \sum S_1 = 2.$$

Нетрудно заменить значение $S_{2, n, m} = 1$, и, кроме того, при $k = m + 1$ имеем

$$S_2 = \begin{vmatrix} 0110 \\ 0000 \\ 0001 \\ 0000 \end{vmatrix} \quad \text{и} \quad \sum S_2 = 3.$$

Для практической реализации булевых выражений (4) — (5) можно эффективно использовать программируемые логические матрицы, и если вычисление для каждой точки выполнять параллельно, то такой счетчик кластеров можно использовать в триггерной системе первого уровня. Для быстрого подсчета количества единиц можно использовать параллельные счетчики [77]. Другой алгоритм основан на подсчете количества выпуклостей и вогнутостей в кластерах, и полученную разницу достаточно разделить на четыре [63]. Так, в рассмотренном нами выше примере количество выпуклостей равно пяти, а вогнутость одна.

9. ПРИМЕНЕНИЕ МЕТОДА СИНДРОМНОГО КОДИРОВАНИЯ

На конкретных примерах выше показано, что количество счетчиков в калориметрах может составлять десятки тысяч, и тенденция к росту числа каналов регистрации, так же, как и сложность конструкций, будет

Рис. 36. Вид в разрезе калориметра типа «спагетти»

существенно возрастать. В качестве примера можно привести разработку калориметра типа «спагетти» [78], с помощью которого планируется более эффективно реализовать такие качества калориметров, как возможность изучения струй и их продуктов, идентификация электронов и т.д. С методической точки зрения [78] использование таких калориметров

позволяет решить ряд проблем, возникающих при сверхвысоких энергиях: 1) достижение высокой радиационной стойкости и временного разрешения лучше чем 15 нс; 2) высокое энергетическое разрешение; 3) короткая радиационная длина и малый радиус Мольера; 4) снижение стоимости. При создании прототипов детекторов, удовлетворяющих этим требованиям, чаще всего в качестве пассивного материала используется свинцовое стекло, а активной средой служат пучки СВОС. На рис.36 в качестве примера приведен общий вид прототипа калориметра типа «спагетти» в разрезе [79]. Черные шестиугольники представляют собой в разрезе жгут, состоящий из множества СВОС. Поэтому актуальным является вопрос кодировки сигналов. На рис.37 приведен общий вид модуля калориметра с предварительной кодировкой [80], в котором плоскости,

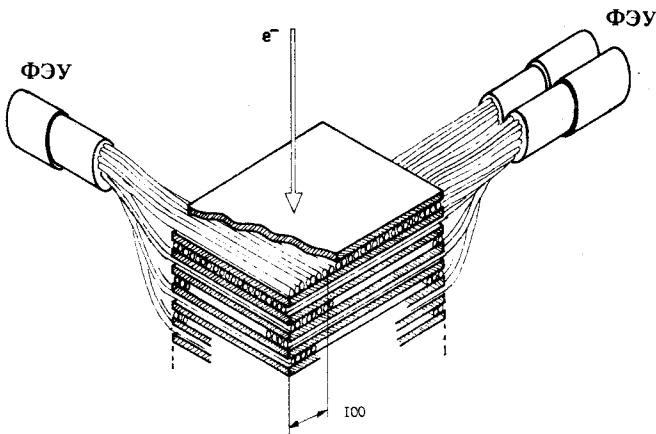
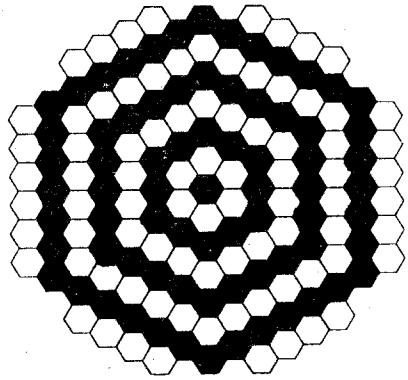
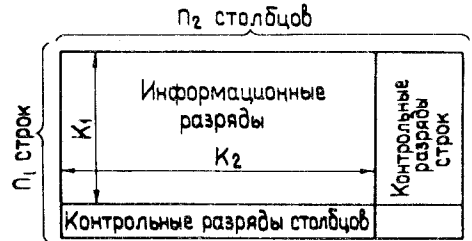


Рис. 37. Модуль калориметра с предварительной кодировкой

Рис. 38. Структура двумерного итеративного кода

состоящие из оптических сцинтилляционных световодов, прослоены пластинами из свинца. С целью увеличения точности регистрации ливня и уменьшения количества ФЭУ каждая плоскость разделена на шесть равных частей по 10 световодов в каждой части. Световые сигналы, возникающие в СВОС одинаковой ориентации, через смесители поступают на входы ФЭУ. Ниже будет показано, каким образом теория корректирующих кодов может быть применена для предварительной кодировки и сжатия данных, регистрируемых в калориметрах путем применения итеративных кодов.



Применение итеративных кодов для построения параллельных счетчиков на большое число входов было описано автором в обзоре [81]. Такие коды могут быть также использованы для регистрации кластеров. Структура двумерного итеративного кода приведена на рис.38 [82]. Каждый информационный символ является символом комбинации двух кодов с параметрами (n_1, m_1, k_1, d_1) и (n_2, m_2, k_2, d_2) . Результирующий код будет $n = n_1 n_2$, $m = m_1 m_2$, $k = k_1 k_2$ и $d = d_1 d_2$, где n , m и k — кодовые, информационные и проверочные символы соответственно; d — кодовое расстояние, которое определяет корректирующую способность кода. Эта величина связана с числом исправляемых ошибок t простым соотношением, известным из теории, $t = (d - 1)/2$. В нашем случае, в соответствии с методом синдромного кодирования, t — количество сработавших позиционно-чувствительных датчиков в детекторе m и n равны нулю. Причем информация о событии содержится в коде синдрома k . Задача заключается в том, чтобы при заданной величине t найти такую схему кодирования, при которой количество бит в слове k было бы минимальным. Из рис.38 видно, что структура двумерного итеративного кода имеет определенное сходство со структурой годоскопических калориметров и двухкоординатных трековых детекторов. Поэтому использование таких кодов имеет широкие перспективы применения и требует тщательного исследования.

В ряде случаев алгоритм определения координат и даже «образы» двумерных кластеров можно упростить путем трансформации кластеров в отдельные линии (одномерные кластеры), проекции кластеров на оси X и Y . Сказанное поясним примером. Допустим, что годоскопический ка-

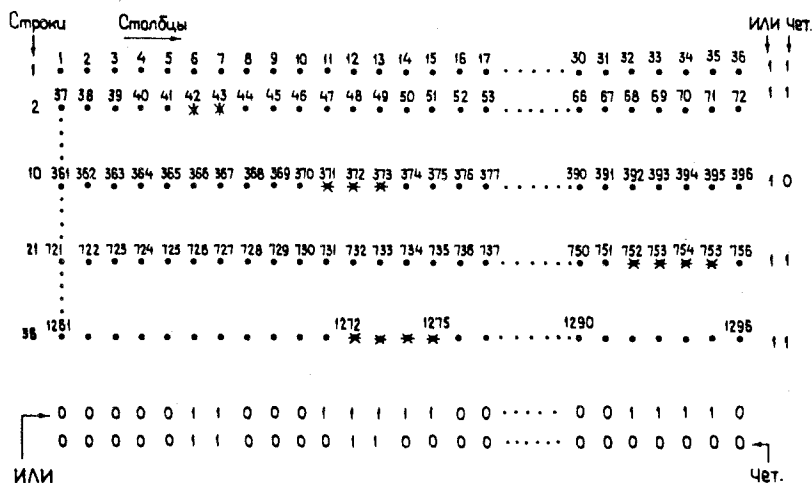


Рис. 39. Пример сложного события, распознаваемого с помощью итеративного кода «чет» — ИЛИ

ра приведено событие, зарегистрированное в детекторе, содержащем 1296 счетчиков. Счетчики представлены в виде матрицы, состоящей из 36 столбцов и 36 строк. Нетрудно подсчитать, что синдром кода равен 128 разрядам. Рассмотрим кратко алгоритм распознавания события. Совпадение сигналов «чет» и «ИЛИ» в первой, второй строке, в шестом и седьмом столбце однозначно указывает, что импульсы поступили от 6, 7, 42 и 43 счетчиков и т.д. С целью увеличения кодового расстояния можно использовать дополнительные диагональные проверки или применить для итерации коды с большими кодовыми расстояниями.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Калориметры являются весьма перспективными детекторами, применяемыми в экспериментах по физике высоких и сверхвысоких энергий. Для создания спектрометров полного поглощения и обработки сигналов широко используются новейшие достижения современной технологии в таких областях, как криогенная техника, полупроводниковая технология, оптические методы регистрации и обработки сигналов и техника быстродействующих специализированных процессоров. С целью упрощения триггерных систем используется ряд конструктивных усовершен-

ствований, позволяющих создавать параллельные каналы для комплексного отбора событий с различными физическими процессами. Ряд физических задач, которые будут решаться на вновь создаваемых коллайдерах, приводят к необходимости включения информации, регистрируемой в калориметрах в триггерные системы первого уровня. Более того, для обеспечения универсальности детектора необходимо, чтобы калориметрические триггеры были полностью программируемыми. Для решения столь важных задач разработчики аппаратуры предполагают использовать мощные матричные вычислительные системы на основе волновых и систолических процессоров, программируемые логические матрицы и нейронные сети.

Показано, что для быстрого отбора событий с кластерами в ряде частных случаев целесообразно использовать предварительную кодировку данных, основанную на методе синдромного кодирования. Можно также поставить задачу и в другой плоскости: в соответствии с ожидаемыми для данного эксперимента событиями разработать оптимальную схему кодирования, содержащую минимальное число разрядов в коде синдрома. Такую проблему, по-видимому, можно относительно просто решить, используя математические методы моделирования.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Atkesson T., Albrov M., Burrows P.N. et al. — Preprint CERN-EP/87-88, Geneva, 1987.
2. Wiik B.N. — Preprint DESY 83-123, Hamburg, 1983.
3. Joos P. — Kerntechnik, 1991, vol. 56, p. 242.
4. Григоров Н.Л., Мурзин В.С., Рапопорт И.Д. — ЖЭТФ, 1958, т. 34, с. 506.
5. Прокошкин Ю.Д. — Препринт ИФВЭ, 79-148, Серпухов, 1979.
6. Fabjan C.W., Wigmans R. — Preprint CERN-EP/89-64, Geneva, 1989.
7. Fabjan C.W., Fischer H.G. — Preprint CERN-EP/80-27, Geneva, 1980.
8. Wigmans R. — Preprint CERN-PPE/91-39, Geneva, 1991.
9. Рабин Н.В. — ПТЭ, 1992, № 1, с. 12.
10. Рабин Н.В. — ПТЭ, 1992, № 6, с. 8.
11. Hertzog D.W., Debevec P.T., Eisenstein R.A. et al. — Preprint Univ. of Illinois. NPL-91-002, Urbana, 1991.
12. Sonderegger P. — Nucl. Instr. and Meth., 1987, vol. A257, p. 523.
13. Kamon T., Kondo K., Yamashita A. — Nucl. Instr. and Meth., 1983, vol. 213, p. 261.
14. Fessler H., Freund P., Gelauer K.M. et al. — Preprint Max-Planck-Inst., MPI-PAE/Exp.E1.132, Munchen, 1984.
15. Checchia P., Galeazzi G., Gasparini U. et al. — Nucl. Instr. and Meth., 1986, vol. A248, p. 317.
16. Зайцев А.М., Краснокутский Р.Н., Ланин В.В. и др. — Препринт ИФВЭ 92-154, Протвино, 1992.
17. Ikeda H., Ikeda M., Tanaka T. et al. — KEK Preprint, 90-134, Ibaraki-ken, 1990.
18. Ikeda H., Ikeda M., Inaba S. et al. — Nucl. Instr. and Meth., 1990, vol. A292, p. 439.
19. Arisaka K., Hauser J., Kubic J. et al. — Preprint Univ. of California UCLA-HEP-90-007, Los Angeles, 1990.

20. Kononenko W., Selove W., Theodosiou G.E. et al.— Nucl. Instr. and Meth., 1983, vol.214, p.237.
21. Bartley R., Berset J.C., Breuker H. et al.— Preprint CERN-EP/85-91, Geneva, 1985.
22. Morell C.— Preprint Daresbury Lab. DL/SCI/TM62E, Daresbury, 1989.
23. Bateman J.E.— Nucl. Instr. and Meth., 1969, vol.71, p.71.
24. Dieltl H., Eigen G., Fonseca V. et al.— Nucl. Instr. and Meth., 1985, vol.A235, p.314.
25. Bebek C.— Preprint Cornell Univ. CLNS 87/67, Ithaca, 1987.
26. Bruckner W., Godbersen M., Kalakowsky et al.— Preprint CERN/PPE 91-146, Geneva, 1991.
27. Fenker H., Thomas J.— Preprint SSC Lab. SSCL-611, Dallas, 1983.
28. Katvars S.G., McCluskey B.T., Pentney J.M.— Nucl. Instr. and Meth., 1989, vol.A276, p.482.
29. Berglund S., Carlson P.J., Jacobson J.— Nucl. Instr. and Meth., 1981, vol.190, p.503.
30. Bianco S., Cantoni P., Cotta-Ramusino P. et al.— Nucl. Instr. and Meth., 1991, vol.A305, p.48.
31. Chase R.L., Dialinas M., Fournier D. et al.— Preprint Orse LAL 83/27, Orse, 1983.
32. Burrows P.N., Busza W., Cartwright S.L. et al.— Preprint Stanford Univ. SLAC-PUB-5305, Stanford, 1990.
33. Stevens A., Kraner H., Radeka V. et al.— Preprint Argonne Nat. Lab. ANL-HEP-CP-90-33, Argonne, 1990.
34. Краснокутский Р.Н., Курчанинов Л.Л., Петухов Ю.П. и др.— Препринт ИФВЭ, ОЭИУНК 91-16, Протвино, 1991.
35. Barbiellini G., Buksh P., Cecchet G. et al.— Preprint CERN-EP/84-139, Geneva, 1984.
36. Borchini E., Macii R., Mazzoni S. et al.— Preprint CERN-EP/89-28, Geneva, 1989.
37. Kleinfelder S.A.— IEEE Trans. on Nucl. Science, 1990, vol.NS-37, p.1230.
38. Schuller G.— Preprint CERN 82-09, Geneva, 1982.
39. Blocker C., Brandenburg G.W., Carey R.— Nucl. Instr. and Meth., 1983, vol.216, p.71.
40. Nelson K.S., Erwin A.R.— IEEE Trans. on Nucl. Science, 1983, vol.NS-30, p.146.
41. Zioulas G., Arenton M., Chen T.Y. et al.— Preprint Fermi Nat. Lab. Fermilab-Conf. 88/185-E, Batavia, 1988.
42. Ray R., Rosen J.L., Mazuzava M., Zhao J.— Preprint Fermi Nat. Lab. Fermilab-Pub-91/115, Batavia, 1991.
43. Bene P., Bonesini M., Bonvin E. et al.— Nucl. Instr. and Meth., 1988, vol.A270, p.21.
44. Stimple-Abele G.— Computer Physics Communication, 1991, vol.64, p.46.
45. Lindsey C., Denby B.— Preprint Fermi Nat. Lab. Fermilab-Pub-90/192, Batavia, 1990.
46. Denby B., Cambell M., Bedeschi F. et al.— Preprint Fermi Nat. Lab. Fermilab-Conf.-90/20, Batavia, 1990.
47. Bhat P., Lonnblat L., Meier K. et al.— Preprint DESY 90-144, Hamburg, 1990.
48. Denby B.— Computer Physics Communications, 1988, vol.49, p.429.
49. Bortolotto C., Angelis A.De., Groot N.D. et al.— Preprint INFN/AE-92/13, Trieste, 1992.
50. Denby B.— Preprint Fermi Nat. Lab. Fermilab-Conf.-90/94, Batavia, 1990.
51. Denby B., Linn S.— Preprint Fermi Nat. Lab. FSU-SCRI-89-79, Batavia, 1989.
52. Gupta L., Upadhye A.M., Denby B. et al.— Preprint Fermi Nat. Lab. Fermilab-Pub-91/117, Batavia, 1991.
53. Altherr T., Seixas J.C.— Preprint CERN-TH.5758/90, Geneva, 1990.
54. Lonnblad L., Peterson C., Rognvaldson T. et al.— Preprint Univ. of Lund. LU TP 90-8, Lund, 1990.
55. Bains N., Baird S.A., Biddulph P. et al.— Nucl. Instr. and Meth., 1990, vol.A292, p.401.
56. Abolins M., Edmunds D., Laurence P., Pi Bo— Nucl. Instr. and Meth., 1990, vol.289, p.543.
57. Browne J.C.— Physics Today, 1984, vol.37, No.5, p.28.
58. Суньюань Гун— ТИИР, 1984, vol.72, p.133 (Proc. IEEE).

59. Кухарев Г.А., Шмерко В.П., Зайцева Е.Н.— Алгоритмы и систолические процессоры для обработки многозначных данных. Минск: «Навука і тэхніка», 1990, с.62.
60. Kung H.T.— *Computer*, 1982, vol.15, No.1, p.17.
61. Paterson D.A.— *Communications ACM*, 1985, vol.28, No.1, p.8.
62. Appelquist G., Hovander B., Sellden B.— Preprint Stockholm Univ., No. USIP 92-04, 1992.
63. Bohm C., Appelquist G., Xing Zhao, Yamdagni N. et al.— Preprint Stockholm Univ., No. USIP 92-08, 1992.
64. Kung Sun-Yuan, Arun K.S., Gal-Ezer R.J. et al. — *IEEE Trans. on Computers*, 1982, vol.C-31, p.1054.
65. Shmidt U., Caesar K.— *IEEE MICRO*, 1991, p.22.
66. Берски Д.— *Электроника*, 1992, vol.64, № 12, с.8. (*Electronics*, vol.39, No.12).
67. Woeniger T.— Preprint DESY, No.90-024, Hamburg, 1990.
68. Hey Antony J.G.— In: 1988, CERN School of Computing, CERN 89-06, p.127, Geneva, 1989.
69. Devenish R.C.E.— Preprint University of Oxford and University College London. UK. OUNP-89-19 and ZEUS-89-76, 1989.
70. Costa P. Garlatti, Angelis A.De.— Preprint Universita'Di Udine — Istituto Di Fisika. No.92/03/LS, 1992.
71. Crosetto D.— Preprint CERN. In: 1990 CERN School of Computing. CERN-91-05, p.263, Geneva, 1991.
72. Crosetto D., Menichetti E., Rinaudo G.— *IEEE Trans. on Nucl. Science*, 1988, vol.35, p.248.
73. Crosetto D., Love L.— Preprint SSC, No. SSCL-576, Dallas, July 1992.
74. Crosetto D.— Preprint SSC, No. SSCL-165, Dallas, October 1992.
75. Crosetto D.— Preprint SSCL-607, Dallas, December 1992.
76. Illinger P.— Diplomaarbeit.
77. Nikityuk N.M.— *Nucl. Instr. and Meth.*, 1992, vol.A321, p.571.
78. Dzelyadin R.I., Zaitsev A.M., Zaichenko A.A. et al.— Preprint IHEP 90-134, Protvino, 1990.
79. Acosta D., Buontempo S., Calooba L. et al.— *Nucl. Instr. and Meth.*, 1991, vol.A305, p.55.
80. Burmiester H., Sonderegger P., Gago J.M. et al.— *Nucl. Instr. and Meth.*, 1984, vol.225, p.530.
81. Никитюк Н.М.— ПТЭ, 1991, № 1, с.20.
82. Хетагуров Я.А., Руднев Ю.П.— Повышение надежности цифровых устройств методами избыточного кодирования. М.: Энергия, 1974, с.35.
83. Питерсон У.— Коды, исправляющие ошибки. М.: Мир, 1964, с.189.
84. Никитюк Н.М.— Препринт ОИЯИ, P10-87-266, Дубна, 1987.
85. Nikityuk N.M.— In: Proc. 6th Int. Conf., AAЕСС-6, Roma, Italy, July 1988. Ed. T.Mora. Springer-Verlag, vol.357, p.324, Berlin, Heidelberg, 1989.