

МЕТОДЫ ОБРАБОТКИ ИНФОРМАЦИИ С ТРЕКОВЫХ ДЕТЕКТОРОВ ЗАРЯЖЕННЫХ ЧАСТИЦ ВЫСОКИХ ЭНЕРГИЙ

Н.М.Никитюк

Объединенный институт ядерных исследований, Дубна

Рассмотрены методы обработки трековой информации. Кратко описаны назначение и общие характеристики трековых детекторов заряженных частиц высоких и сверхвысоких энергий. Рассмотрены способы и средства, используемые для реконструкции треков с большой кривизной и множественностью больше 100: программные методы, аппаратные трековые процессоры и комбинированные методы, использующие сочетание программных и аппаратных средств. В обзоре описаны также перспективные методы обработки трековой информации, в которых используются эффективные алгоритмы и аппаратные средства, применяемые в информатике для распознавания образов и компрессии данных: нейронные сети, различного рода трансформации координат, ассоциативные методы обработки данных, транспьютерные сети и др. Приведены конкретные примеры построения трековых процессоров и многоуровневых мультипроцессорных систолических систем, применяемых для обработки трековой информации. Обсуждаются вопросы архитектуры и требования к триггерным системам, которые предполагается использовать в будущих экспериментах на большом адронном коллайдере.

The methods of track data processing are considered. Purposes and general characteristics of track detectors of charged particles used in high energy physics are described. The following methods and means used for track reconstruction with a high momentum (curvature) and a multiplicity of more than 100 are considered: on-line methods, hardware track processors and combined methods. The perspective methods of tracking processing using effective algorithms and hardware processors, applied in computer technique for pattern recognition, are described: transformation coordinates, associative methods of data processing, nets of transputers, etc. Concrete examples of the tracking processors and multilevel multiprocessor systolic systems are presented. The problems of architecture and peculiarities of trigger systems, supposed to be used in future on the LHC, are discussed.

ВВЕДЕНИЕ

Создание и совершенствование ускорителей на встречных пучках способствует бурному развитию физики высоких энергий. В разрабатываемых

коллайдерах величина светимости достигнет 10^{33} — 10^{34} см⁻².с⁻¹ при энергии частиц порядка нескольких ТэВ. В создаваемом большом адронном коллайдере (LHC) с энергией протонов 10 ТэВ ожидается, что частота событий будет равна 100 МГц. При этом число полезных событий может составлять $10+100$ с⁻¹ при множественности 100 и более. Кроме того, бурно развивается новое методическое направление в физике высоких энергий, связанное с изучением короткоживущих частиц (10^{-13} с и менее). Топология событий с такими частицами может содержать одну первичную или несколько вторичных вершин распада, из которых исходят десятки треков частиц; требуется быстро, с микронной точностью определить координаты вершин распада.

Типичная физическая установка, как правило, состоит из крупных спектрометров, содержащих десятки тысяч каналов регистрации. Количество данных, регистрируемых на одно событие, может составлять единицы и десятки мегабайт. В условиях конкуренции задача заключается в том, чтобы с максимальной достоверностью и за минимально возможное время обработать огромное количество данных, записанных на магнитные ленты. В этих условиях, наряду с эффективными программными способами фильтрации полезных событий, возникает сложная задача фильтрации треков и топологий событий на уровне значительных помех за минимально возможное время (единицы и десятки микросекунд) аппаратными методами. В ряде работ отмечается, что эта часть триггерной системы является в настоящее время наиболее уязвимой, и дальнейший успех в развитии электронных методов физики высоких энергий во многом будет зависеть от прогресса в создании быстродействующих трековых процессоров, способных за короткое время в основном аппаратными средствами восстановить треки сложных событий и тем самым резко ускорить процесс обработки экспериментальных данных.

Цель данного обзора состоит в том, чтобы в краткой и доступной форме рассмотреть современное состояние и перспективы развития методов обработки координатной информации и восстановления треков и топологий сложных событий, изучаемых с помощью электронных методов. Описаны также способы и алгоритмы, используемые для построения быстродействующих трековых процессоров, и блок-схемы мультипроцессорных систем, используемых для окончательной обработки трековой информации. Обсуждаются вопросы построения многоуровневых триггерных систем для будущих экспериментов.

Во введении обоснована актуальность тематики и дано содержание обзора по разделам. Первый раздел посвящен краткому изложению свойств трековых детекторов, применяемых в электронных методах физики высоких энергий. Во втором разделе обзора рассмотрены методы обработки

трековой информации в режиме «оф-лайн». В третьем разделе описана методика восстановления событий, сочетающая в себе как программные, так и аппаратные способы. В частности, подробно описан способ построения трекового процессора на основе трансформации координат в соответствии с алгоритмом Гофа. Аппаратной реализации алгоритма «дерева» посвящен четвертый раздел обзора. Этот метод имеет широкие перспективы применения в сочетании с ассоциативными запоминающими устройствами. В пятом разделе показана перспективность применения для обработки трековой информации нейронных сетей и нейроноподобных процессоров, обеспечивающих высокую степень параллелизма вычислений и хорошее качество распознавания сложных событий с большой множественностью. В шестом разделе кратко изложен эластичный алгоритм, предложенный для обработки данных с большой множественностью треков на уровне значительных помех. Структура эффективного процессора, в котором реализован метод непрерывной маски, рассмотрена в седьмом разделе. В ряде экспериментов нередко применяются специализированные трековые процессоры, создаваемые для эффективного решения задач конкретного эксперимента. Такие процессоры будут использоваться и в будущем. Описание характерного специализированного процессора приведено в восьмом разделе. Метод параллельной компрессии данных на основе способа синдромного кодирования обсуждается в девятом разделе. Десятый раздел посвящен краткому изложению структур используемых многоуровневых мультипроцессорных систем, применяемых для обработки трековой информации на высоких уровнях триггерной иерархии, где выполняется окончательная обработка трековых данных. В одиннадцатом разделе обсуждаются вопросы архитектуры многоуровневых триггерных систем, которые предполагается использовать в будущих экспериментах на большом адронном коллайдере.

1. КРАТКАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА ТРЕКОВЫХ ДЕТЕКТОРОВ

Известно большое количество типов трековых детекторов, применяемых в электронных методах физики высоких энергий. Отчасти это можно объяснить тем широким набором задач, которые решают физики, разнообразием параметров элементарных частиц, которые можно измерять электронными методами, сложностью топологий изучаемых событий, требуемой высокой точностью и бурным развитием методики детекторов, которая, в частности, базируется на достижениях полупроводниковой технологии, оптоэлектроники и технологии газонаполненных детекторов. Типичные характеристики трековых детекторов, применяемых в экспериментах, приведены в табл.1. Широкий разброс некоторых параметров, относящихся к однотипным детекторам, можно объяснить тем, что применяемые в экспериментах детекторы, как правило, являются уникальными приборами, и их

Таблица 1. Сравнительные характеристики трековых детекторов

Детектор	Пространственное разрешение, мкм	Временное разрешение, нс	Загрузочная способность, Гц	Разрешение двух треков, мкм
МПК	200	100	10^6	600
Дрейфовые камеры	30÷150	100÷1000	10^7	120÷600
Сцинтилляторы	5÷10	1÷10	10^7	20÷50
Полупроводниковые детекторы	3÷10	1÷5	10^6	40
Стримерные камеры	200	10^3	10^5	40
Пузырьковые камеры	100÷200	10^6	10^4	2000

характеристики нередко зависят от уровня технологии, применяемого материала и т.д. Причем приведены лучшие параметры, достигнутые в настоящее время. Это касается прежде всего детекторов, создаваемых на базе сцинтилляционных волоконных оптических световодов. Такой параметр, как временное разрешение, определяет скорость детектирования событий. В то же время набор статистики может в ряде случаев ограничиваться методами считывания информации. Это относится прежде всего к таким детекторам, как сцинтилляционные волоконные световоды и ПЗС-матрицы, которые входят в класс полупроводниковых детекторов. Рассмотрим кратко свойства трековых детекторов. Наиболее популярными как в проводимых, так и во вновь планируемых экспериментах являются газонаполненные детекторы, и, прежде всего, широкую известность получили многопроволочные пропорциональные камеры (МПК) [1]. Однако с ростом множественности регистрируемых событий и сложности топологий использование МПК для создания больших спектрометров в 80-х годах стало проблематичным, прежде всего, из-за трудностей, возникающих в процессе реконструкции событий и усложнения спектрометров в целом. Поэтому в дальнейшем более перспективными оказались дрейфовые камеры. В [2] рассмотрены параметры классических дрейфовых камер, которые послужили прототипами для создания многослойных дрейфовых камер цилиндрической формы. При создании таких детекторов были использованы лучшие достижения методики МПК (высокая точность, возможность регистрации второй координаты с помощью катодных стрипов). С созданием дрейфовых камер появилась возможность точной регистрации одной из координат путем измерения времени дрейфа электронов от точки взаимодействия до чувствительной проволоки. Достижения в методике классических дрейфовых камер с учетом используемой электроники отражены в [3].

Начиная с середины 70-х гг. методика дрейфовых камер, и прежде всего камер цилиндрической формы, бурно прогрессирует. Типичная цилиндрическая дрейфовая камера [4] имеет 15—20 слоев (точек на трек). Отдельная дрейфовая ячейка имеет простую структуру: сигнальную проволочку и триплет из потенциальных электродов, а типичный дрейфовый промежуток составляет 1—2 см. Дальнейшее развитие методики многослойных дрейфовых камер цилиндрической формы выразилось в создании трехкоординатных газовых детекторов [5].

В экспериментах используются три типа таких детекторов: времяпроеctionные камеры (ВПК) [6], струйные (джет) камеры и векторные дрейфовые камеры. ВПК — это фактически большая ионизационная камера, на торцах которой расположены МПК круглой формы с катодным считыванием. Используя многоканальную регистрирующую электронику, мульти-стоповые преобразователи время — цифра и геометрию детектора, можно измерять в пространстве сотни координат r , z и ϕ вдоль одного трека (в цилиндрической системе координат) при множественности 200 и более. Современная ВПК описана в [7]. Трехкоординатные детекторы типа «джет» содержат в объеме камеры в радиальном направлении чувствительные проволочки, а в ряде конструкций — и дрейфовые ячейки, что позволяет улучшить пространственное разрешение двух треков, особенно в той области, где велика их плотность (область струй) [8]. По сравнению со струйными камерами векторные камеры [9] отличаются тем, что в их объеме содержится большее количество высокопрецизионных дрейфовых ячеек, образующих концентрические слои. Причем камера состоит из нескольких таких слоев, но с различными размерами дрейфовых ячеек (ближе к центру плотность ячеек наибольшая). Все эти и другие усовершенствования направлены на то, чтобы по возможности упростить поиск треков и повысить точность регистрации.

Узким местом рассмотренных выше трехмерных газовых детекторов является относительно невысокое быстродействие (десятки микросекунд), так как типичное время дрейфа электронов равно 50 мкм/нс. Стремление повысить скорость работы таких детекторов в тех экспериментах, где частота полезных событий может составлять сотни килогерц и более, привело к разработке трехмерных газовых детекторов, создаваемых на основе мультидрейфовых трубок и трубок типа «straw» (соломка) [10], у которых максимальное время дрейфа не превышает 100 нс, а точность регистрации координат составляет порядка 20 мкм. Отдельная трубка состоит из одной анодной проволочки и покрытого алюминием пластического цилиндра. В обзоре [11] содержится подробное описание таких детекторов и приводятся примеры применения в экспериментах.

В связи с широким развитием методики вершинных детекторов, с помощью которых изучаются свойства короткоживущих частиц, большие пер-

спективы развития имеют такие высокопрецизионные трековые детекторы, как кремниевые микрополосковые детекторы [12,13], ПЗС-матрицы [14], полупроводниковые дрейфовые камеры [15] и двумерные (pixel) кремниевые детекторы [16]. Последние два типа детекторов находятся в стадии экспериментальных разработок. Высокое быстродействие, присущее сцинтилляционным счетчикам и годоскопам, обеспечивают трековые детекторы, создаваемые на основе сцинтилляционных волоконно-оптических световодов, обеспечивающих микронную точность [17]. Следует отметить, что применение оптических методов регистрации и обработки сигналов в экспериментах по физике высоких энергий несет в себе ряд новых качеств, присущих световым сигналам: отсутствие заряда у фотона, компактность и существенное упрощение систем считывания трековой информации [18]. Известна разработка оптического трекового процессора, который предназначен для обработки данных, регистрируемых в МПК [19].

В [20] дан обзор современных достижений в области трековых детекторов, которые предполагается использовать в будущих экспериментах на большом адронном коллайдере. Некоторые из этих детекторов, которые предполагается использовать в центральном детекторе, и их параметры приведены в табл.2.

Таблица 2. Параметры некоторых используемых трековых детекторов

Тип	Функция	Комментарии
Si-пиксель 30 × 300 мкм > 10 ⁷ элементов	Координаты вторичных вершин распада	Требуется много электроники считывания
Микростриповые Si-детекторы Ширина — 50 мкм Длина — несколько сантиметров, 10 ⁶ стрипов	Измерение импульса	Требуется много электроники и точная установка — несколько мкм
Микростриповые газовые лавинные камеры 50 мкм × 5 см	Измерение импульса	
Сцинтилляционные оптические световоды 0,8 мм × 3 см, 10 ⁶ элементов	Измерение импульса Триггерные системы	Требуются малогабаритные, малошумящие и быстрые фотодетекторы
Минидрейфовые («соломенные») трубки 4 × 3000 мм, 10 ⁶ элементов	Измерение импульса Триггерные системы	Требуется электроника, точная механика

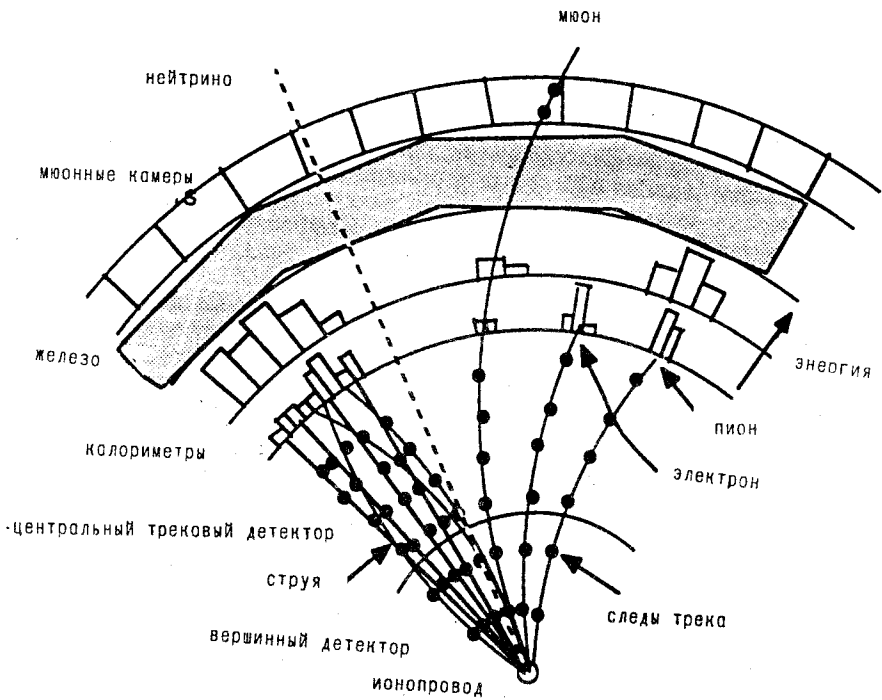


Рис.1. Характер прохождения различных частиц в детекторной системе

Измерение треков заряженных частиц с помощью центрального детектора, располагающегося в области встречи пучков, дает следующую информацию: электронный заряд; более точное измерение импульсов мюонов; идентификация адронов с большими импульсами p_t на триггерном уровне; распознавание b - и τ -распадов путем детектирования вторичных вершин распада.

На рис.1 схематически изображена детекторная система, которую предполагается использовать в будущих экспериментах на коллайдере, содержащая вершинный и центральный детектор, калориметр с электромагнитной и адронной секцией, мюонный железный экран, за которым следуют мюонные трековые камеры, покрывающие большую часть установки. Кроме того, иллюстрируется реакция детекторов на четыре наиболее характерные частицы и струи (B.Denby). Пучок расположен перпендикулярно плоскости калориметров, выделяя небольшую часть энергии в каждой секции, а также сквозь железный экран, и в конце концов детектируются с помощью мюон-

ных камер. Электроны полностью отдают всю энергию в локальной области электромагнитного калориметра. В свою очередь, пионы отдают энергию, взаимодействуя с обеими секциями калориметра. Струи, состоящие из множества различных частиц (в основном из пионов), выделяют свою энергию в обширных областях обеих секций калориметра. Нейтрино, как и следовало ожидать, свободно проходит всю детекторную систему.

2. ЭТАПЫ РАЗВИТИЯ АППАРАТНЫХ МЕТОДОВ ОБРАБОТКИ ТРЕКОВОЙ ИНФОРМАЦИИ

Можно отметить следующие этапы развития методики поиска и реконструкции трековой информации с помощью специализированных процессоров.

Специализированные процессоры, используемые для изучения (одно-) двухчастичных событий. Следует выделить пионерские разработки, выполненные в начале 70-х гг. Применение нашли как аналоговые [21], так и цифровые процессоры [22]. В качестве источников информации использовались сцинтилляционные годоскопы и МПК. Данный этап развития специализированных процессоров подробно рассмотрен в обзоре [23]. Появление быстродействующих модулей памяти и программируемых логических матриц в середине 70-х гг. создало предпосылки для создания аппаратно-программируемых специализированных процессоров с широкими функциональными возможностями. Однако такие процессоры создавались для решения узкоспециализированных задач и прежде всего для экспериментов с малой регистрируемой множественностью, для отбора частиц по углу рассеяния [24] или для вычисления импульсов частиц. Для нахождения треков полезных событий с большой множественностью, сложной топологией и значительной кривизной треков широкое применение нашли микро-ЭВМ с высокой производительностью и различного рода эмуляторы больших и малых ЭВМ [25]. Использование такой техники позволило в реальном времени выполнить предварительный отбор трековой информации с последующей обработкой этих данных на больших ЭВМ. Время обработки трехлучевого события составляло единицы секунд. Однако в связи с бурным развитием физики высоких и сверхвысоких энергий задача ставится таким образом, чтобы обеспечить отбор сложных событий с множественностью более 100 за единицы микросекунд. Для решения столь непростой проблемы в настоящее время ведутся интенсивные разработки новых методов и подходов, основанных на алгоритмах, применяемых в информатике для распознавания образов, и прежде всего таких, как нейронные сети, матричные автоматы, ассоциативные методы обработки, различного рода трансформации переменных и др.

3. ПРОГРАММНЫЕ МЕТОДЫ ОБРАБОТКИ ТРЕКОВОЙ ИНФОРМАЦИИ

Традиционно в электронных методах физики высоких энергий развиваются два направления в обработке физической информации: программные и аппаратные методы. В некоторых экспериментах эти направления могут использоваться совместно, что позволяет существенно повысить эффективность работы специализированных процессоров. Естественно, что программные методы, в свою очередь, базируются на математических алгоритмах и методах распознавания образов.

Уравнение движения заряженной частицы в магнитном поле. Модель трека. Исходным для определения траектории заряженной частицы в статическом магнитном поле является уравнение Лоренца. Пренебрегая потерей энергии и влиянием электрического поля и предполагая, что абсолютная величина импульса \mathbf{p} остается неизменной в вакууме, уравнение движения заряженной частицы с учетом многократного рассеяния можно представить в виде [26]:

$$d^2\mathbf{r}/ds^2 = (q/|\mathbf{p}|)(d\mathbf{r}/ds \mathbf{B}(\mathbf{r})) + \mathbf{R}(s),$$

где \mathbf{r} — декартовы координаты вектора (x, y, z) ; s — длина пути, $ds^2 = dx^2 + dy^2 + dz^2$; q — константа, пропорциональная заряду; \mathbf{B} — магнитная индукция; $\mathbf{R}(s)$ — белый шум (стохастический процесс), описывающий многократное рассеяние.

Чаще всего вместо величины s в уравнениях движения присутствует заведомо известная (независимая) координата z , направленная перпендикулярно плоскостям детекторов или совпадающая с осью цилиндра, если детектор имеет цилиндрическую форму. Таким образом, для определения траектории заряженной частицы в магнитном поле необходимо знать пять параметров: три координаты — (x, y) при фиксированной координате z около мишени, направления косинусов $(dx/ds, dy/ds)$ и некоторую функцию от импульса (например, $1/p$). Эти пять координат образуют пятимерное пространство, которое называется фазовым. Тогда траектория заряженной частицы может быть представлена как точка на фазовой поверхности. Для получения этих пяти величин на ЭВМ выполняются сложные вычисления параметров трека с помощью программ реконструкции событий. Проблема заключается в том, чтобы вычислить эти величины с возможно большей точностью и в конечном итоге восстановить топологии событий с высоким разрешением и за возможно короткое время, иначе результаты эксперимента могут потерять научную новизну.

Фитирование треков. Фитирование треков и вершин распада частиц является важной частью анализа экспериментальных данных. Если рассматривать процесс фитирования треков, то в общем он заключается в том,

чтобы с помощью статистических методов обработать информацию, зарегистрированную с помощью трековых детекторов. При этом используются также дополнительные данные, такие как величина магнитного поля, калибровочные константы и т.д. В результате фитирования получаем коэффициенты, направление и кривизну трека. Если пренебречь ошибками измерений и взаимодействием частицы с веществом, то измеренный вектор V является функцией пяти исходных величин P [27]:

$$V = f(P), \quad (1)$$

функция f называется моделью трека; она получается путем решения уравнения движения заряженной частицы. Модель трека единственным образом определяется магнитным полем, особенностями трековых детекторов и методами представления параметров трека. Уравнение (1) интерпретируется следующим образом. Если V рассматривать как точку в n -мерном пространстве, то функция f задает так называемую ограничивающую (constraint) поверхность, состоящую из всех точек, соответствующих точному решению уравнения движения. Причем в отсутствие магнитного поля траектория частицы представляет собой прямую линию, и поэтому модель трека является линейной функцией. В однородном магнитном поле (B — константа) траектория заряженной частицы представляет собой винтовую линию, ось которой параллельна вектору магнитной индукции. При этом точки пересечения траектории частицы с плоскостями (цилиндрами) детекторов вычисляются аналитически. В неравномерном магнитном поле уравнения движения решаются численными методами, например, методом Рунге — Кутты.

Методы выбора модели трека. Путем выбора подходящей модели трека можно существенно сократить машинное время, необходимое для фитирования треков. С этой целью широко используется метод параметризации модели трека. Так называется алгоритм, который позволяет представить координаты в виде функции геометрических размеров детекторов и их позиций [28]. Естественно, что эти функции зависят также от пяти кинематических параметров. В результате из M измеренных координат на трек получается гораздо меньшее число параметров N . Такой подход при фитировании треков дает выигрыш во времени, если сравнивать его с прямым методом реконструкции трека отдельной частицы путем вычисления и анализа отдельных координат, записанных на магнитную ленту. Нередко с целью параметризации функция V аппроксимируется с помощью подходящей аналитической функции. Более детально различные модели треков, применяемые в экспериментах, описаны в [29].

Оценки параметров трека. В процессе фитирования рассматриваются три типа треков.

1. Идеальный трек, который соответствует точному решению уравнения движения заряженной частицы.

2. Физический трек, который соответствует траектории частицы с учетом многократного кулоновского рассеяния.

3. Измеряемый трек, который определяется с помощью координат, регистрируемых трековыми детекторами. В отличие от физического трека в измеренном треке учитываются ошибки, возникающие в процессе регистрации координат, а также вследствие многократного рассеяния. С целью определения качества фитирования (т.е. степени приближения измеренного трека к идеальному) чаще всего используется оценочная функция χ^2 (глобальный метод оценки) и алгоритм Кальмана. Оба способа оценки базируются на методе наименьших квадратов. Функция χ^2 вычисляется путем анализа на минимум следующего выражения [30]:

$$S(\gamma) = \sum [x_i - x_i(\gamma)] W_{ij} [x_j - x_j(\gamma)],$$

где x_i и x_j — измеренные (наблюдаемые) и теоретически вычисленные координаты соответственно; W_{ij} — взвешенная матрица, которая является инверсной к ковариантной матрице и матрице ошибок. Однако функция χ^2 дает хорошие результаты фитирования при следующих условиях.

1. Должно иметь место гауссово распределение ошибок в измеренных координатах.

2. Требуется тщательная оценка взвешенной матрицы.

3. Функция $x_j(\gamma)$ должна быть линейной по параметру γ .

В процессе фитирования значение χ^2 сравнивается с теоретическим χ^2 -распределением с $M-N$ степенями свободы, где M — множество измеренных координат x_i и N — параметры трека, полученные после параметризации (трансформации) зарегистрированных данных с помощью трековых детекторов. Как отмечается в [27], существенным недостатком глобального метода оценок является то, что параметры трека оцениваются в одной точке поверхности. При наличии эффекта многократного рассеяния реальный трек при такой оценке может существенно отличаться от идеального. Имеется много экспериментов, где в процессе соединения отдельных, и прежде всего кривых, сегментов трека требуется более точная экстраполяция и интерполяция трека.

В ряде работ отмечается перспективность применения как фитирования параметров трека, так и фитирования треков с оценкой качества фитирования методом так называемого алгоритма Кальмана. Этот алгоритм первоначально использовался для анализа дискретных линейных динамических систем. При этом предполагается выполнение трех процедур. 1) Фильтрация (оцен-

ка) текущего состояния вектора на основе всех предыдущих измерений. 2) На основе текущего состояния вектора предсказывается оценка состояния в следующий отрезок времени. 3) Сглаживание (smoothing) оценки состояния вектора в заданный момент в «прошлом» на базе измерений, полученных в «настоящем».

Применительно к обработке трековой информации алгоритм Кальмана имеет ряд преимуществ по сравнению с другими методами фитирования [31].

1. Возможно одновременное проведение таких процедур, как фитирование треков и поиск и реконструкция треков.

2. Не требуется вычисления инверсий больших матриц. При этом время вычисления на ЭВМ пропорционально числу измерений на трек.

3. Оцениваемые параметры трека близки к параметрам физического трека. Суть алгоритма Кальмана применительно к обработке трековой информации заключается в следующем [27]. Если имеется оценка состояния вектора в момент времени t_{k-1} , то она экстраполируется к моменту времени t_k с помощью системы уравнений. При этом оценка в момент времени t_{k-1} затем вычисляется как взвешенное значение предсказанного состояния вектора и измеренного в момент времени t в соответствии с уравнениями, относящимися к измеренным значениям. Затем оценочные данные снова могут применяться к предыдущим оценкам, или над ними проводится процедура сглаживания. Алгоритм Кальмана нашел применение для реконструкции сложных событий в вершинном детекторе ZEUS [32]. При множественности треков 10—20 требуется всего 10—20 мс для реконструкции трека с помощью процессора VAX8800.

Поиск и восстановление треков. Фитирование параметров треков является процессом более или менее определенным, так как при этом используется хорошо развитый математический аппарат. Более сложным является процесс нахождения «кандидатов» в полезные треки. В отличие от фитирования параметров трека различные алгоритмы и методы реконструкции чаще всего наиболее эффективно применяются к конкретному эксперименту. Рассмотрим некоторые наиболее характерные алгоритмы, применяемые для фитирования треков, которые более подробно описаны в [28,33].

1. Комбинаторный метод. Множество измеренных координат, в том числе и координат, относящихся к фоновым событиям, по определенным признакам разделяются на подмножества. Далее, для каждого подмножества выполняется процедура фитирования с целью определения, относятся ли данные фитируемого подмножества к траектории, или нет. Если решение удовлетворительно, то данные о кандидате в полезный трек запоминаются. В противном случае такая информация записывается в файл, предназначенный для фоновых данных. Недостатком такого метода фитирования является невысокая скорость, требующая большого количества переборов даже

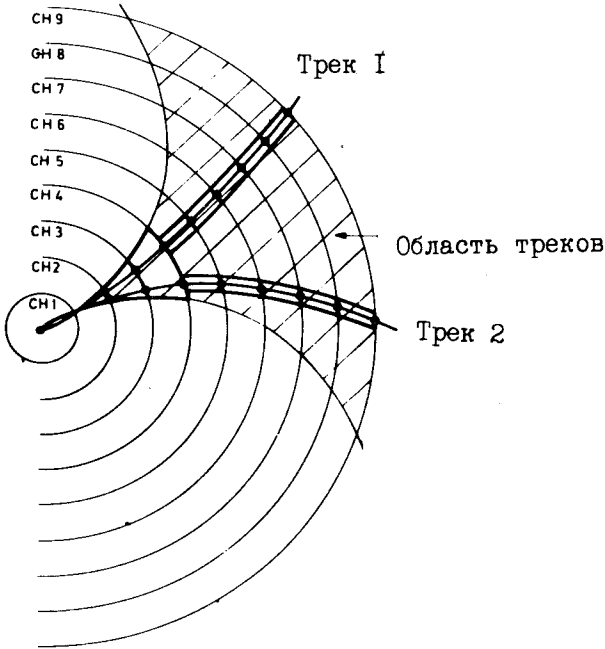


Рис.2. Метод окон: SN1+SN9 — цилиндрические дрейфовые камеры

при небольшой множественности. Так, для пяти треков при наличии десяти координатных плоскостей получается до 5^{10} комбинаций.

2. *Локальный метод.* Используются три модификации:

а) Следование по треку. Этот метод можно применять также в тех случаях, когда обработка выполняется при участии оператора путем наблюдения кандидатов в полезные события на экране дисплея. При этом выбирается сегмент трека, состоящий из трех или четырех точек, и ищутся наиболее подходящие треки. Время вычисления пропорционально n^2 , где n — число измеренных координат.

б) Метод «окон». Окно задается с помощью двух или трех опорных точек, которые систематически выбираются среди координат, и далее модель трека (прямая или окружность) интерполируется между точками (рис.2). Затем ищутся координаты, близкие к этому окну. Ширина окна определяется разрешением камер, их эффективностью и т.д. Время вычисления пропорционально n^3 . Данный метод оказался перспективным, по-

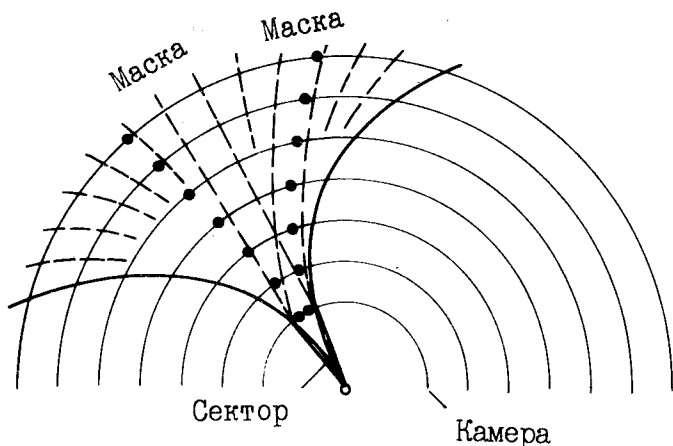


Рис.3. Метод масок

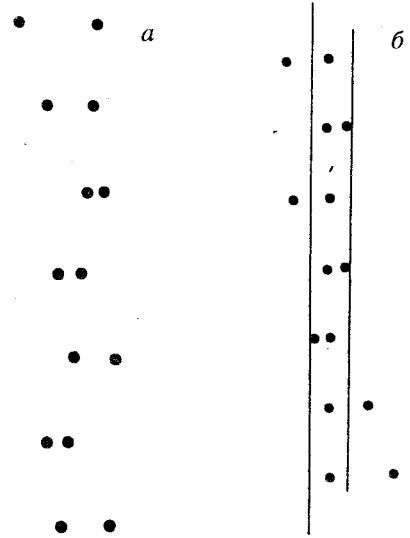
сколькo он использовался также для реконструкции отрезков треков аппаратными способами (см. ниже).

в) Выбор элементов трека. Кандидат в треки получается в два шага: выбирается короткий отрезок трека и выполняется интерполяция или экстраполяция вдоль прямой или параболы. На втором шаге отрезки сшиваются. Данный метод удобен тем, что упрощается разрешение проблемы неопределенности типа «слева-справа», и, кроме того, он хорошо приспособлен для поиска треков в случае большой плотности зарегистрированных координат, которая имеет место при использовании трехкоординатных детекторов в условиях большого фона и высокой светимости.

3. *Глобальный метод.* Дает хорошие результаты при анализе трековой информации с большой плотностью и в процессе идентификации таких событий, при которых от одной частицы срабатывает подряд несколько позиционно-чувствительных датчиков в плоскости детектора. Метод отличается высоким быстродействием, поскольку отсутствует необходимость в проверке множества комбинаций координат. Поэтому глобальный метод имеет широкие перспективы реализации аппаратными способами. Здесь также возможны несколько модификаций.

а) *Гистограммирование.* Использование такого метода предполагает определение различных функций от координат и ввод их в гистограмму. Затем позиции треков определяются по пикам или по кластерам на гистограмме. Отмечается также, что данный метод дает хорошие результаты, если модель трека представляется в одной или двух проекциях.

Рис.4. Прямой трек, зарегистрированный с помощью дрейфовой камеры (а) и идентифицированный методом окон (б)



б) Метод шаблонов (масок). Дает хорошие результаты, если используются цилиндрические многослойные дрейфовые камеры. Для реализации метода шаблонов необходимо иметь словарь (набор масок) наиболее вероятных полезных событий (рис.3). Метод масок эффективно реализуется, если использовать ассоциативные запоминающие устройства.

в) Метод дерева (хорошо известный из теории распознавания образов). Эффективно реализуется, если в эксперименте используются многослойные дрейфовые камеры. Суть метода лучше всего проиллюстрировать с помощью серии рисунков [34]. На рис.4,а приведен след прямого трека. Для наглядности масштаб по горизонтали вы-

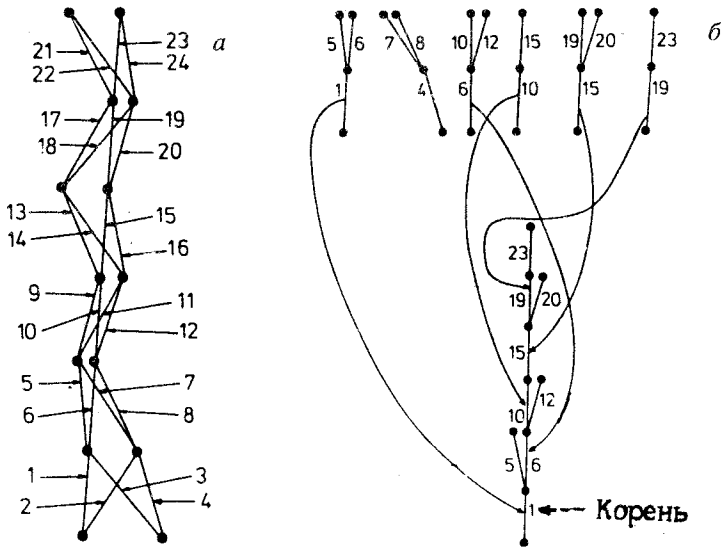


Рис.5. Идентификация трека с помощью метода дерева. Цифры обозначают индексы звеньев

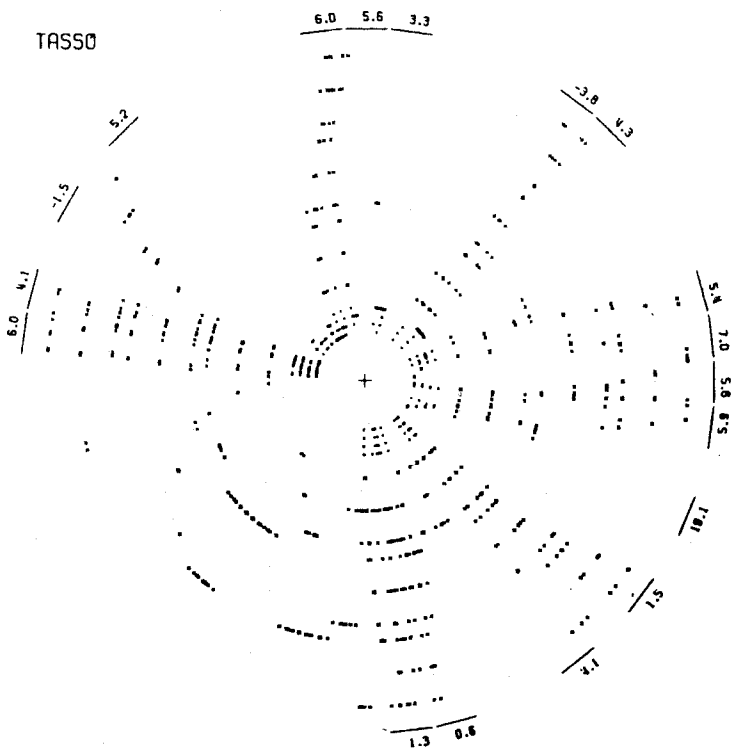


Рис.6. Реальное событие, зарегистрированное с помощью многослойной дрейфовой камеры

бран намного больше, чем по вертикали. Если использовать метод окон, то, как видно из рис.4,б, ряд координат, с помощью которых устраняется неопределенность типа «слева-справа», остаются вне коридора, поскольку для протяжки трека выбраны две крайние, расположенные на вертикали координаты. Видно, что треки с большой кривизной не восстанавливаются. Использование метода дерева предполагает, что протяжка трека выполняется многоступенчато путем соединения отдельных звеньев (рис.5,а) (каждому звену принадлежат две ближайшие координаты). Отдельное звено может принадлежать как прямому, так и изогнутому треку. Связи между несколькими соседними звеньями определяют «ствол элементарного дерева», который, в свою очередь, может рассматриваться как ветвь другого дерева. Элементарные деревья комбинируются с целью формирования полного дерева, являющегося кандидатом в полезные события (рис.5,б). После нахож-

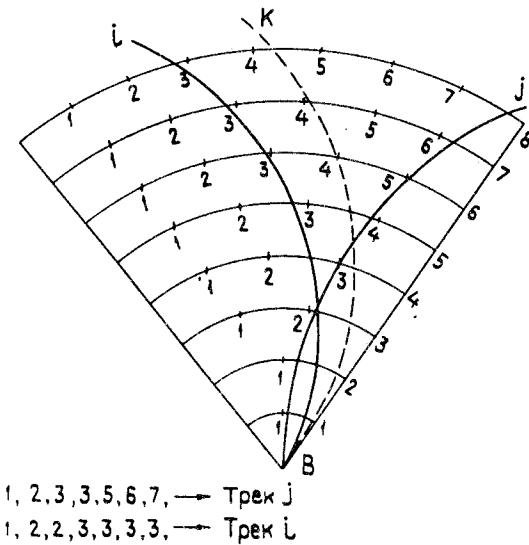


Рис.8. Применение метода сгенерированных масок для реконструкции сложных треков с помощью векторной дрейфовой камеры. Идентификация трека k требует дополнительной проверки

манипуляция над отдельными битами данных; 2) алгоритм хорошо приспособлен для его реализации на быстродействующих векторных машинах; 3) метод не критичен к геометрии детектора (цилиндрического или симметричного); 4) более эффективно распознаются треки, которые проходят через несколько общих ячеек камеры (рис.8) или в случае малой эффективности срабатывания.

Достигается это тем, что в памяти ЭВМ содержится дополнительный список отрезков треков, который используется в тех случаях, когда после прохода не распознаются штатные ситуации. Однако такой подход дает эффект в случае небольшой (порядка 3—4) множественности событий.

Проверка кандидатов в полезные треки и фитирование вершин распада. Следующим этапом после поиска кандидатов в полезные треки является процедура проверки полезности трека. Разработано большое количество алгоритмов, с помощью которых (с учетом особенностей детекторов) восстанавливаются полезные треки [29]. В частности, с этой целью применяется фитирование аналитической модели трека, такой как прямая линия или парабола, и исключение треков, которые имеют недопустимо большую величину χ^2 . В некоторых алгоритмах, когда требуется распознавание и сшивание коротких изогнутых сегментов [36], используется локальная проверка кривизны трека и ее знака. Если известна координата вершины распада, что имеет место в экспериментах с фиксированной мишенью, то проверяется направление или ближайшее расстояние от экстраполированного трека до вершины распада. В экспериментах на коллайдерах, где мишенью являются встречные пучки частиц, даже координата первичной вершины распада неизвестна. Поэтому после нахождения полезных треков выполняется фитирование вершин распада. Подробно эта процедура описана в [37]. Вначале кратко рассмотрим процесс обработки со-

бытия с одной общей вершиной. Для фитирования общей (первичной) вершины распада, из которой исходит m треков, выполняются следующие операции. Для каждого индивидуального трека фитируются его параметры и ковариантная матрица по отношению к точным значениям. Для m треков получается $5m$ фитируемых величин, которые рассматриваются как виртуальные измерения с известной ковариантной матрицей, в которой только пять параметров коррелируют с данным треком. Вершина, из которой исходят треки, считается вычисленной, если известны величины трех координат в пространстве и трех величин импульсов (кривизны) для каждого трека. Этот параметр вычисляется в два этапа. Вначале фитирование выполняется с целью нахождения точки, наиболее близко расположенной к восстановленным m трекам, причем учитываются также различные веса параметров трека. На втором этапе параметры треков определенным способом модифицируются с учетом значения ковариантной матрицы при условии, что вершина является общей точкой m треков.

Проблема реконструкции многовершинных событий. Поскольку короткоживущие частицы имеют длину пробега несколько сотен микрометров, то проблема реконструкции событий с многими вершинами является непростой задачей, даже если ее решать с помощью программных методов. Во-первых, требуется высокая точность определения координат первичной и вторичных вершин распада. Во-вторых, точное количество треков, исходящих из вершин распада, не всегда известно. Кроме того, среди распавшихся частиц могут быть также нейтральные частицы. Для реконструкции таких событий требуется также знание размеров пучка и точное его положение [27]. Кроме того, с ростом регистрируемой множественности резко (в третьей степени от множественности) возрастает время, требуемое для вычислений на ЭВМ. В [38] обсуждаются вопросы применения алгоритма Кальмана для определения координат первичной и вторичных вершин распада. Отмечается, что этот метод дает хорошие результаты в экспериментах с тяжелыми ионами на фиксированной мишени (при большой множественности порядка 100—150) по определению координат первичной вершины распада. При этом расход счетного времени пропорционален множественности треков. Для реконструкции многовершинных событий алгоритм Кальмана используется для обработки данных, зарегистрированных с помощью микровершинных детекторов на установке ДЕЛФИ. Если описать кратко, то реконструкция вершин распада выполняется с помощью следующих процедур. Вначале фитируются все треки и аппроксимируется первичная вершина распада. Затем каждый трек оценивается с помощью функции χ^2 и выполняется сортировка по трем признакам: «хороший», «неопределенный» и «плохой» (по отношению к первичной вершине распада). После дополнительной проверки определен-

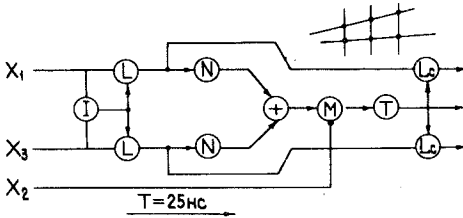


Рис.9. Пример вычислительного модуля конвейерного типа для трех плоскостей. x_1, x_2, x_3 — координаты; I — генератор двоичных индексов, $L-x_i \rightarrow x_i$; $N: x \rightarrow Ax + B$; $(+)$ — сумматор, $T-x \rightarrow T(x)$ (операция с таблицами); L_c — стробирование в стекковую память; M — операция отображения пути

ная часть второго типа треков может попасть в «хорошие». Остальная часть треков вместе с «плохими» треками затем фитируется для обнаружения вторичной вершины распада и т.д.

В заключение следует отметить, что не существует универсальных программных методов для обработки физической информации, и поэтому трудно рекомендовать, какой из них является наиболее перспективным, так как свои коррективы могут внести аппаратные методы обработки. Именно с этой точки зрения надо, скорее всего, рассматривать эффективность того или иного метода обработки физической информации. Однако накопленный за 25 лет опыт может быть успешно использован, с учетом особенностей того или иного эксперимента, как основа для создания эффективных методов обработки, удовлетворяющих строгим требованиям как современных, так и будущих экспериментов.

Сочетание программных и аппаратных методов. Использование программных и аппаратных методов предполагает применение оригинальных и эффективных алгоритмов. В [39] развивается перспективное направление, связанное с обработкой данных, регистрируемых в многослойных дрейфовых камерах. В обзоре [22] отмечалось, что для восстановления треков, регистрируемых в МПК, в лаборатории им. Резерфорда [40] разработано специализированное арифметическое устройство, выполняющее быстро (за 200 нс) такую часто встречающуюся в процессе фитирования треков процедуру, как $R = MX + C$, где M, C и X — шестнадцатиразрядные числа. В рассматриваемой работе процесс обработки трековой информации выполняется с помощью относительно простых процессоров конвейерным способом и с высокой степенью параллелизма. В качестве вычислительных блоков используются модули памяти, сдвиговые регистры и т.д., с помощью которых выполняются простейшие подпрограммы, операции ветвления, индексирования и передачи на следующий уровень обработки. На рис.9 в качестве примера приведена часть вычислительного модуля, предназначенного для обработки данных, поступающих от трех плоскостей. Причем процесс регистрации и обработки трековой информации выполняется в реальном времени.

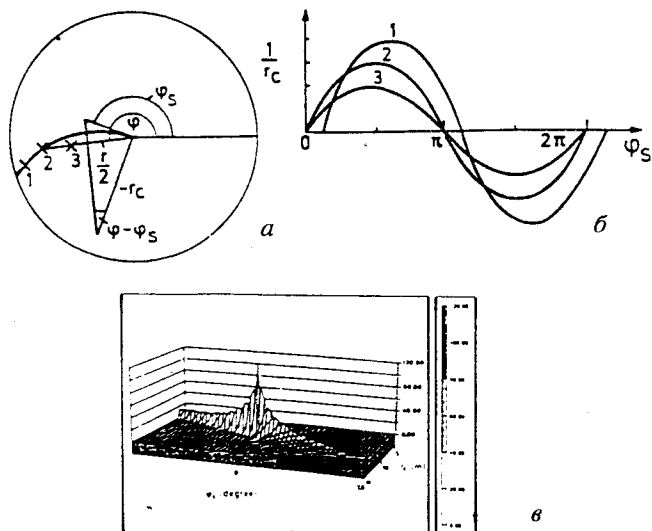


Рис.10. а) Отображение параметров (r, φ) и $(1/r_c, \varphi_s)$; б) гоф-пространство; в) трек в $(1/r_c, \varphi_s)$ -плоскости

Ведутся исследования, направленные на использование эффективных алгоритмов, применяемых в информатике для распознавания образов. Суть проблемы заключается в том, что в экспериментах, которые будут выполняться на пучках высокоэнергетичных частиц с помощью прецизионных детекторов, физическую информацию можно рассматривать как дискретный образ сложной картины (рис.10). В [41] показана возможность применения для построения трекового процессора метода трансформации координат, предложенного Гофом. Нередко этот метод называется еще методом гистограммирования с переменным наклоном. Суть метода заключается в том, что любая кривая, принадлежащая какому-либо образу в декартовой системе координат, описывается множеством точек $[x_1, y_1, \dots, (x_n, y_n)]$ или параметрическим представлением кривой на мультипараметрической поверхности. Различные параметризации кривой могут быть использованы для установления связи между декартовыми координатами и параметрами поверхности. Важно, что заданная параметризация является единственной. Это значит, что данная кривая в декартовой системе координат представляется точкой на параметрической поверхности, и точка в декартовой системе координат представляется с помощью определенной кривой (поверхности) на параметрической поверхности. Такая дуальная взаимосвязь приводит к

тому, что система точек кривой в декартовой системе координат может быть отображена в множество кривых (поверхностей), расположенных на параметрической поверхности с общей точкой пересечения, которая представляет параметры кривой в декартовой системе координат. Такое свойство трансформации Гофа эффективно используется для распознавания кривых линий на фоне сложного изображения. Данные о параметрической поверхности записываются в матрице аккумуляторов (гоф-матрица), и значение каждой точки (x, y) оригинального изображения инкрементируется в системе аккумуляторов в гоф-матрице в соответствии с выбранной параметризацией. Наличие локального максимума после обработки гоф-матрицы говорит о наличии интересующей нас кривой в оригинальном изображении. Практическая реализация такого метода предполагает выполнение следующих процедур: 1) выбор соответствующей параметризации кривой; 2) задание величины квантования параметров поверхности; 3) для каждой точки образа (x, y) вычисляется система параметрических точек на мультимерной параметрической поверхности в соответствии с выбранной параметризацией и добавляется к содержимому матрицы аккумуляторов. После вычисления всех точек выполняется расчет гоф-матрицы с целью получения данных о кривых. В цитируемой работе дается также описание процессора, с помощью которого время обработки 1000 точек изображения, соответствующих 10 трекам (128×128 на изображении), составит 6,45 мс для первого трека.

Конкретное применение преобразование Гофа нашло при реконструкции треков частиц, зарегистрированных в детекторе OPAL [42]. Детектор разделен на 24 сектора. Каждый трек i задается множеством координат $(r, \varphi)_i$. Поскольку полезные треки исходят из вершины распада, то каждый из них определяется стартовым углом φ_s и радиусом r_c . Таким образом, вместе с координатами вершины распада каждый пиксель (r, φ) , относящийся к событию, зарегистрированному в детекторе, определяет класс треков с различными φ_s и r_c . Из рис.10,а следует уравнение

$$\frac{r/2}{r_c} = \sin(\varphi - \varphi_s).$$

Гистограммный метод, используемый для идентификации треков частиц, базируется на аккумулировании количества пикселей, принадлежащих данному треку (φ_s, r_c) . Как видно из приведенного выше соотношения, каждый пиксель (r, φ) отображается на синусоиду с амплитудой $2/r$ и фазой со сдвигом φ . Такая трансформация и есть специфический тип преобразования Гофа. Применяя это преобразование к каждому пикселю детектора, получим соответствующую ему кривую в $(1/r_c, \varphi_c)$ -плоскости, как

это показано на рис.10,б. Причем, пиксели, принадлежащие данному треку с параметрами $(1/r_c, \varphi_s)$, имеют общую точку пересечения. Применение преобразования Гофа дает большую вероятность наличия треков. На рис.10,в показано представление идеального трека на $(1/r_c, \varphi_s)$ -плоскости.

В связи с развитием электронно-оптических методов обработки данных определенный интерес представляет предложенный в [43] метод поиска трековой информации, основанный на преобразовании Фурье с фильтром или корреляционной функцией. Использование такого метода позволяет применить векторные или оптические процессоры для восстановления треков.

4. АППАРАТНАЯ РЕАЛИЗАЦИЯ АЛГОРИТМА ДЕРЕВА

Алгоритм дерева, успешно используемый для реконструкции треков с помощью ЭВМ, оказался эффективным и для построения параллельных специализированных процессоров. Как уже отмечалось выше на конкретных примерах, образ события, регистрируемого в трехкоординатных газовых и других детекторах, имеет сходство с деревом или нейронной сетью. С развитием полупроводниковой технологии больших успехов достигла техника интегральных микросхем, с помощью которых можно осуществлять высокую степень параллелизма выполнения логических и арифметических операций, что позволяет быстро реализовать такие эффективные алгоритмы, как метод дерева и метод масок. Эти алгоритмы успешно использованы в [44] и других работах (см. ссылки ниже). Описываемый метод отличается универсальностью и может быть использован для обработки трековой информации, регистрируемой в многослойных дрейфовых камерах, микрополосковых полупроводниковых детекторах и др. Предполагается, что детектор состоит из определенного количества слоев, каждый из которых, в свою очередь, разделен на заданное количество бинов. Причем заряженная частица, проходящая сквозь детектор, инициирует сигнал только в одном бине на слой. При таком подходе проблема реконструкции треков частиц сводится к поиску совпадений треков события с масками, хранящимися в памяти ЭВМ. Этот банк данных имеет структуру дерева. Основная идея заключается в применении метода последовательной аппроксимации в сочетании с алгоритмом дерева к событиям, которые «просматриваются» последовательно с различным значением величины пространственного разрешения. При практической реализации алгоритма такой подход позволяет сократить количество электронного оборудования. Загрубление разрешающей способности выполняется путем объединения на схемах ИЛИ соседних бинов. На рис.11 показано событие с четырьмя треками, проходящими через четыре слоя детектора. Разрешающая способ-

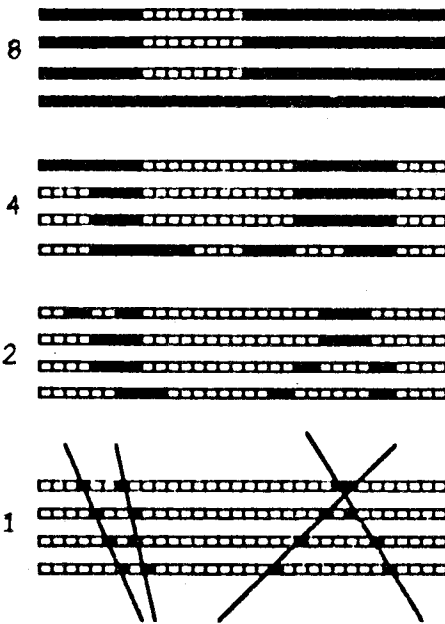


Рис.11. Вид одного четырехлучевого события в зависимости от разрешающей способности детектора

ность детектора при переходе от верхнего слоя к нижнему улучшается в два раза. Видно, что по мере улучшения разрешающей способности эффективность распознавания треков, как и следовало ожидать, существенно повышается. На рис.12,а показано, как смотрится единственный трек при условии, что каждый слой детектора состоит из двух бинов.

Для распознавания таких событий достаточно, чтобы в памяти имелось восемь масок. Если же разрешение увеличить вдвое, то получится схема, представленная на рис.12,б, где маска 3, изобра-

женная на рис.12,а, отображается уже двумя подмасками и т.д. С ростом разрешающей способности детектора количество масок, хранимых в памяти, существенно растет. Теперь возникает вопрос: «Как же реально организовать банк памяти и какой тип памяти лучше всего применить?» Как показано в данной работе, процесс сравнения реального события с масками наиболее эффективно реализуется с помощью алгоритма дерева, а банк памяти должен иметь иерархическую структуру определенной глубины L , как это показано на рис.13, где $L = 5$. Среднее число масок подсчитывается из формулы

$$N_m = k \log_2 n,$$

где n — число бинов в плоскости (слое) детектора и k — среднее число масок, «приписанных» к узлу дерева. Как видно из рис.13, количество масок растет экспоненциально с ростом глубины дерева. С целью повышения эффективности поиска в [45] предлагается разделить глубину дерева на две части, и в нижней части дерева, где еще требуемая емкость памяти не так велика, использовать ассоциативную память, что позволяет существенно ускорить время восстановления событий не только за счет параллельного обращения к памяти, но и путем выбора наиболее вероят-

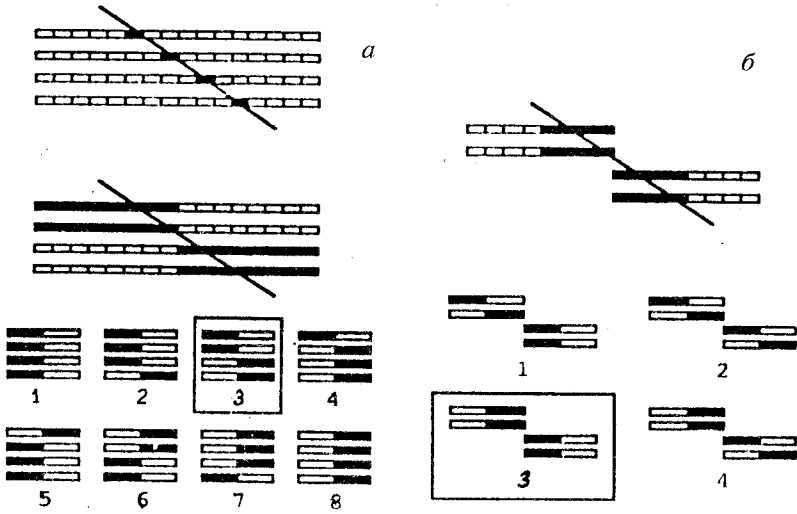


Рис.12. а) Одиночный трек, регистрируемый в плоскости, содержащей только два бина. Требуется восемь согласующих масок для одного прямого трека. б) Картина события, изображенного на рис.12,а, с увеличенным вдвое разрешением

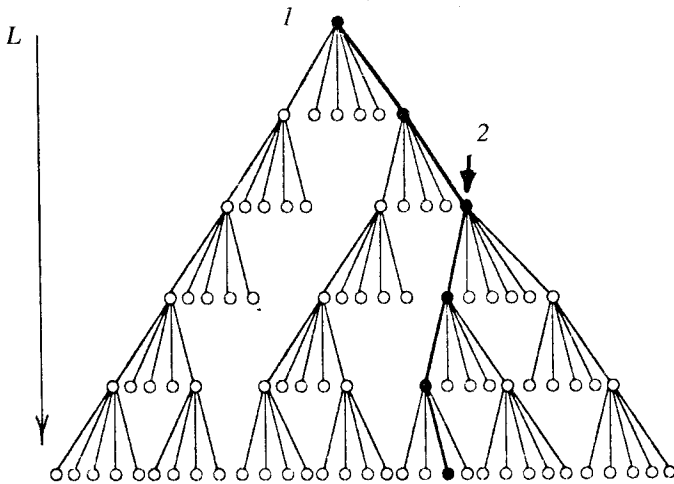


Рис.13. Структура банка масок, выполненная в виде дерева: 1 — корневой узел, 2 — субдерево, L — глубина дерева

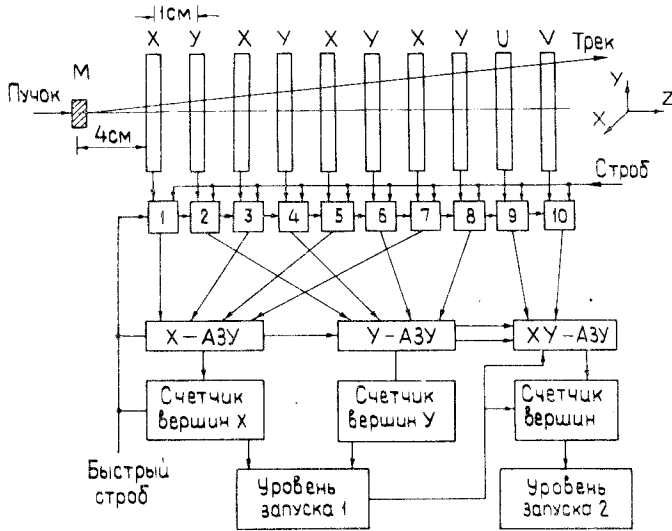


Рис.14. Структурная схема специализированного процессора для отбора событий в вершинном детекторе. M — мишень, АЗУ — ассоциативные запоминающие устройства, $i=10$ — усилители-дискриминаторы

ных путей поиска отрезков треков на следующем уровне обработки, как это показано на рис.14. Реализация такого алгоритма облегчается тем, что для этих целей разработан модуль ассоциативной памяти.

Следует отметить, что использование ассоциативных запоминающих устройств в физических экспериментах началось еще в 60-х годах. В обзоре [46] описаны методы сортировки статистической информации с использованием ассоциативных запоминающих устройств. Еще один обзор [47] посвящен рассмотрению методов ассоциативного поиска информации с использованием адресных систем запоминания применительно к построению многомерных анализаторов импульсов для накопления информации в широком диапазоне признаков. Читателю, интересующемуся более подробно принципами построения ассоциативных запоминающих устройств, можно рекомендовать монографию [48]. Применительно к обработке трековой информации основные требования к такой памяти следующие [49]: а) емкость ячейки должна быть достаточной для запоминания хотя бы одной маски; б) наличие логического устройства для сравнения двоичных кодов. Каждая строка в матрице памяти представляет одну ячейку ассоциативной памяти, и поэтому в ней содержится образ события. Каждая ячейка [50]

содержит несколько слов (по одному слову на плоскость или на слой детектора). В свою очередь, в каждом слове имеется адрес (координата) сработавшей позиции в плоскости (слое) детектора. Таким образом, все слова, записанные в одной ячейке, задают маску, соответствующую срабатыванию одной координаты в каждой плоскости (слое) детектора. С помощью магистрали данные, соответствующие данной плоскости, в начале работы используются для записи масок. Поиск и регистрация события выполняются следующим образом. Все координаты, зарегистрированные в различных плоскостях, передаются на соответствующие им магистрали данных, и затем выполняется операция сравнения. В случае положительного ответа устанавливается в единицу соответствующий триггер, и адреса всех кандидатов в полезные треки последовательно считываются на выходную магистраль. С целью ускорения этой операции используется приоритетный регистр-шифратор. Расчеты показывают, что для типичного эксперимента требуется память емкостью 100К. Для получения такой емкости строится вычислительная сеть, состоящая из аналогичных модулей, каждый из которых имеет 256 32-разрядных ячеек [51]. В работе [52] описана трехуровневая триггерная система, которая предназначена для отбора трековой информации, регистрируемой в микростриповом вершинном детекторе (рис.14). Использование ассоциативной памяти позволяет весьма быстро и с высокой эффективностью регистрировать кандидаты в полезные события. Достаточно отметить, что по входам данные в память заносятся с частотой 25 МГц, а время сравнения составляет несколько наносекунд, так что информация на выходах появляется с частотой 20 МГц. Каждый из модулей памяти подключен к 5 детекторным плоскостям (4096 стрипов). Отмечается, что регистрация одного события, состоящего из 20 лучей, не превышает 2 мкс!

5. ПРИМЕНЕНИЕ НЕЙРОПОДОБНЫХ СЕТЕЙ

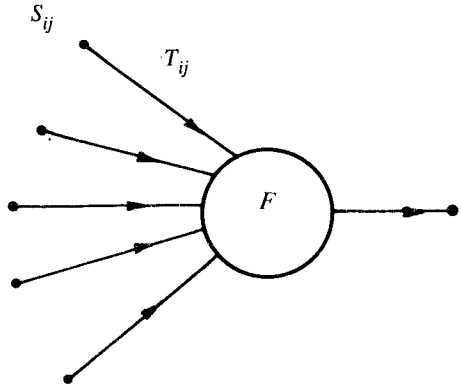
Общие вопросы. Недостатком большинства используемых алгоритмов для фильтрации событий является то, что они приспособлены для решения специфических задач, определяемых типом геометрии детекторов и постановкой физической проблемы, и поэтому трудно перестраиваются на решение других задач. Кроме того, высокая точность, присущая современным трековым детекторам, и наличие больших массивов цифровых данных приводят к необходимости просчета большого количества комбинаций чисел, прежде чем находится полезный отрезок трека или образ целого события. В последнее время наметилась тенденция к унификации как алгоритмов, так и аппаратных средств фильтрации трековой информации. При этом основное внимание уделяется высокой степени параллелизма поиска треков как во времени, так и в пространстве, а также представлению исходных данных

в аналоговой и цифровой форме. Одним из таких перспективных направлений является применение теории и практики регулярных автоматов и нейронных сетей, которые являются типичными параллельными вычислительными системами. Этим вопросам посвящен ряд исследований. Три параметра характеризуют степень параллелизма обработки данных: 1) количество процессоров; 2) вычислительная мощность процессора и 3) степень связности между ними. При этом для решения задач поиска и реконструкции треков частиц достаточно, чтобы процессорные элементы были по возможности простыми, имели высокое быстродействие и малую потребляемую мощность. Ряд исследований посвящен возможности применения нейронных сетей и матричных автоматов, известных в вычислительной технике, для обработки трековой информации в экспериментах по физике высоких энергий. Показано, что не только имеется определенное внешнее сходство между простейшими моделями нейронов и топологиями типичных событий, но и, с учетом достижений полупроводниковой технологии, появилась реальная возможность создания эффективных процессоров для распознавания сложных физических событий. По современным понятиям мозг представляет собой совершенный компьютер, но, в отличие от последнего, он обрабатывает не числовые данные, представленные чаще всего в виде двоичных цифр, а целые образы. Другими словами, в мозге реализуется «картинная» логика, что существенно повышает как скорость вычислений, так и эффективность работы на уровне больших помех. Так, например, он с невероятной быстротой интерпретирует неточную информацию, поступающую от органов чувств: различает шепот в шумной комнате, лицо в полутемном переулке, улавливает скрытый смысл в политическом заявлении [55]. Читателю, интересующемуся основами теории нейронов, можно рекомендовать книгу [53]. Ряд интересных статей, посвященных психике мозга и вопросам обучения нейронных сетей, опубликован в известном журнале «Scientific American» [54,55]; в отечественной литературе вопросам применения нейронных сетей в экспериментальной физике посвящен обзор [56].

Матричный автомат имеет следующие отличия от нейронной сети: 1) прежде всего, это устройство дискретного действия, и поэтому для его построения используются логические элементы; 2) каждая ячейка автомата соединяется только с ограниченным числом соседних ячеек; 3) матричные автоматы, как правило, работают в синхронном режиме (используются тактирующие импульсы).

Более подробно описание однородных вычислительных сред можно найти в монографии [57]. Сборник трудов [58] посвящен современному состоянию и развитию такого важного направления в современной информатике, как использование теории нейронных сетей для построения компьютеров. Ряд теоретических вопросов рассматривается также в цитируемых ниже статьях. Отметим, что нейрон (рис.15) — это элемент вычислительной

Рис.15. Упрощенная схема нейрона:
 S_{ij} — входы, T_{ij} — вес входа



техники, обладающий следующими свойствами: 1) он имеет n входов S_j и один выход, 2) каждый вход и единственный выход могут находиться только в двух состояниях — возбужденном или невозбужденном; 3) нервные волокна от некоторого входа могут разветвляться, но не могут объединяться с волокнами другого входа; 4) волокна могут быть возбужденными и заторможенными. Нейронное волокно может также запирает сигнал, идущий по другому волокну; 5) сигналы могут проходить через нейрон только в одном направлении; 6) имеется некоторое запаздывание в передаче сигнала от входа к выходу нейрона; 7) при правильной работе нейрон возбуждается, если алгебраическая сумма возбуждающих и тормозящих сигналов превосходит некоторый определенный порог; 8) каждый вход нейрона имеет свой вес, задаваемый матрицей связей.

Из отдельных искусственных нейронов создаются нейронные сети. Например, в нейронной сети, работающей в дискретные моменты времени, состояние S_i -го нейрона в момент времени $t + 1$ задается уравнением

$$S_i(t + 1) = g \left[\sum T_{ij} S_j(t) \right],$$

где g — пороговая функция и T_{ij} — матрица связей. Решение конкретной задачи достигается путем модификации матрицы связей. Основная трудность заключается в том, что настройка нейронной сети и ее обучение — это трудоемкий и длительный процесс, поскольку для N нейронов возможны N^2 оптимальных параметров.

Рассмотрим кратко базовые параметры и соотношения, характеризующие нейронную сеть [59]. Она состоит из N двоичных нейронов $S_i = \pm 1$ и синапсов T_{ij} ($i, j = 1, 2, \dots, N$), с помощью которых осуществляются связи нейронов между собой. Знак связности T_{ij} может быть как положительным, так и отрицательным, причем в большинстве моделей полагается, что $T_{ij} = T_{ji}$. Динамика процессов в нейронной сети оценивается из соотношения, которое носит локальный характер:

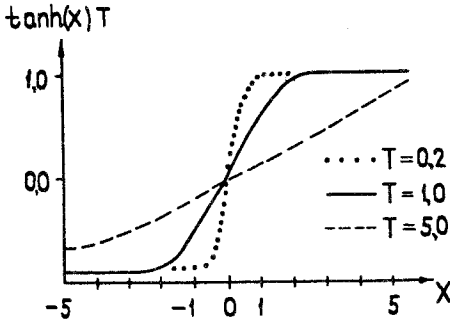


Рис.16. Вид сигмоидной функции при различных температурах

$$S = \sin \left(\sum T_{ij} S_j \right). \quad (1')$$

Положительное значение T_{ij} обеспечивает действие сигнала, а отрицательное — запрещает его. Далее, в заданный момент времени состояние сети задается с помощью вектора $S = (S_1, S_2, \dots, S_N)$, а динамика системы определяется с помощью T -матрицы. Оказывается, что правило (1') фактически описывает уменьшение градиента «энергетической функции»:

Другими словами, для начальных условий, задаваемых (1'), имеется локальный минимум энергетической функции. Давно замечено, что между нейронной сетью, статистической, механической и термодинамической системами имеется ряд аналогий, и поэтому вектор состояния S подчиняется распределению Больцмана:

$$E(S) = -1/2 \sum_{ij}^N T_{ij} S_i S_j. \quad (2)$$

В уравнениях (3) и (4) величина T — шум и k — постоянная Больцмана. В конце концов после ряда преобразований получается важное уравнение, описывающее сигмоидную функцию (рис.16):

$$P(S) = (1/Z) e^{-E(S)/kT}, \quad (3)$$

где функция распределения Z получается из

$$Z = \sum e^{-E(S)/kT}. \quad (4)$$

В уравнениях (3) и (4) величина T — шум и k — постоянная Больцмана. В конце концов после ряда преобразований получается важное уравнение, описывающее сигмоидную функцию (рис.16):

$$V_i = \tanh \left(\sum_j T_{ij} V_j / T \right), \quad (5)$$

где V_i — средняя «температура» S_i . Следует отметить, что поведение отдельного нейрона также описывается аналогичной функцией. Таким образом, поведение нейронной сети при «температуре» T может быть эмулировано с помощью соотношения (5), и его решение выполняется методом итераций до тех пор, пока обучаемая система (путем выбора T_{ij}) станет оптимальной и стабильной. Применительно к обработке трекковой инфор-

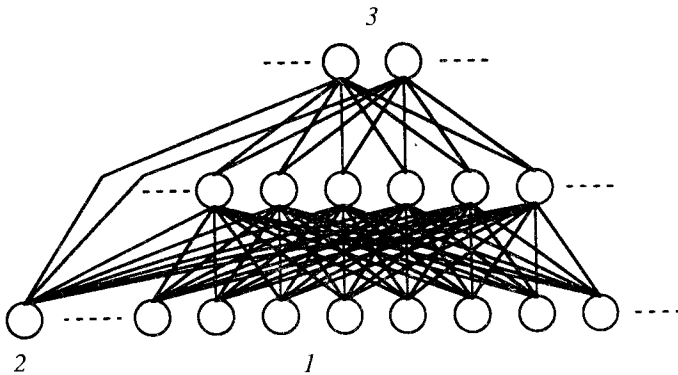
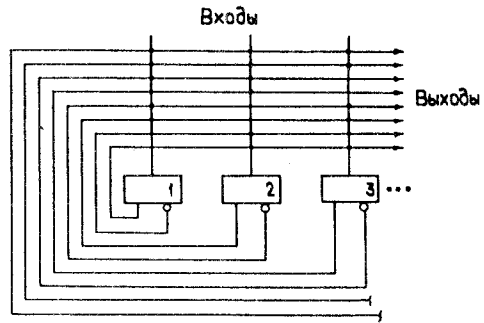


Рис.17. Упрощенная схема трехслойной нейронной сети без обратных связей: 1 — входы, 2 — элемент смещения, 3 — выходы

Рис.18. Структурная схема искусственной нейронной сети с обратными связями: 1÷3... — усилители ($V_i \rightarrow U_i$, $V_i = \tanh(U_i/T)$), о — резисторы [T_{ij}^+ , T_{ij}^-]



мации используются более сложные выражения для энергии и сигмоидной функции, которые составляются с учетом геометрии детектора, длины и кривизны сегментов трека, их плотности и др. Вводится также ряд членов с отрицательным знаком.

Применение нейронных сетей. Независимо от решаемой с помощью нейронной сети проблемы вид сигмоидной функции практически не меняется, и только коэффициенты в линейной комбинации входных переменных и тип связей позволяют решать проблему распознавания тех или иных образов. Вид сигмоидной функции характеризуется наличием двух плато в начале, в конце и в середине линейной части. Степень сложности нейронной сети определяется не только количеством нейронов, но и числом слоев. На практике получили применение трехслойные нейронные сети (рис.17) как без обратной связи, так и рекуррентные с обратными связями (рис.18) [60]. Трехслойная сеть состоит из выходного слоя, содержащего отдельный нейрон для задания напряжения смещения в процессе обучения, внутренний и выходной слою. В нейронной сети реализуется принцип ассоциативной па-

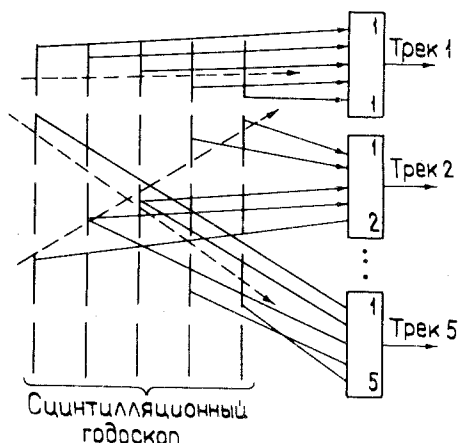


Рис.19. Схема нейроподобного сцинтилляционного годоскопа. 1+5 — элементы ИЛИ

мяти. Нетрудно заметить, что в ядерной электронике имеется несколько далеких аналогов формального нейрона, таких как аналоговые сумматоры-дискриминаторы, схемы совпадений и антисовпадений и др. Можно привести и более сложный пример. На рис.19 дана схема сцинтилляционного годоскопа с ассоциативной памятью [60]. Поскольку для каждого из треков на выходах дискриминаторов вырабатываются отдельные сигналы, задача состоит в том, чтобы создать вычислительные сети из элементов, содержащих десятки и сотни тысяч формальных нейронов.

Следует отметить, что промышленность начала выпускать довольно сложные нейроподобные схемы в интегральном исполнении. В работе [61] описаны два устройства, с помощью которых можно моделировать работу простых нейронных сетей. Эти устройства состоят из матрицы тонкопленочных резистивных нейронов с постоянным чтением и матрицы программируемых нейронов (около 3000), выполненных по К-МОП-технологии. В связи с широким развитием оптических методов детектирования и регистрации информации, определенный интерес представляют оптические нейронные сети. Одна из таких экспериментальных сетей описана в [61].

Рассматривая вопросы применения нейронных сетей в экспериментальной физике, можно выделить две задачи: решение комбинаторных проблем и обработка трековой информации [62] (хотя вторая задача тоже может быть сведена к комбинаторике). Аналогом первой задачи является проблема нахождения кратчайшего пути между N городами (рис.20) [63]. Здесь на рисунке по горизонтали позиции нейронов в матрице определяют номер города, а по вертикали отложены номера городов, которые следует посетить. Сплошными линиями показаны всевозможные ближайшие связи только одного нейрона с координатами (4,5) и коэффициентами связи, пропорциональными $(A - d_{ij})$, где d_{ij} — расстояние между городами i и j и A — положительная константа. Если нейрон i имеет на выходе значение E_i , то должен присутствовать на входе нейрона j сигнал, пропорциональный $(A - d)F_i$. Для того чтобы путешествие было оптимальным, необходимо

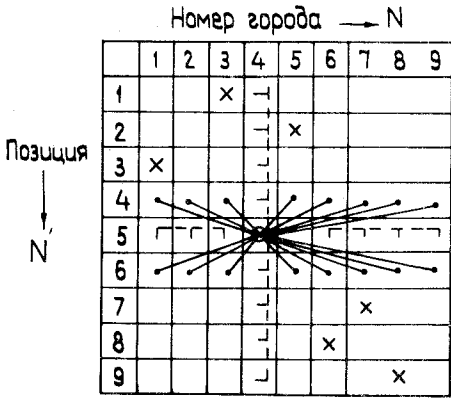


Рис.20. Нахождение оптимального пути между городами. Сплошные линии — разрешенные связи, (---) — запрещенные связи. Связи нейрона (4,5) обозначены (●), другие связанные нейроны обозначены (x)

$\gamma_1 \backslash \gamma_2 =$	1	2	3	4	5	6
1	\	—	—	—	—	—
2	π^0 0,74	\	—	—	—	—
3	0,1	0,1	\	—	—	—
4	η^0 0,36	0,1	η^0 0,36	\	—	—
5	0,1	0,1	π^0 0,83	—	\	—
6	0,1	0,1	0,1	0,1	π^0 0,97	\

Рис.21. Возможные $\gamma\gamma$ -взаимодействия для гипотетического события с множественностью $t = 6$. Жирным шрифтом обозначены истинные фотонные пары

ввести запрещающие коэффициенты B между каждым нейроном, расположенным в соответствующей строке и столбце. Если в уравнении (2) положить $T_{ij} = (A - d_{ij})$, то минимальное значение энергии E для реального путешествия будет в том случае, когда сумма d_{ij} также равна минимальной величине.

В работе [64] показано, каким образом можно применить нейронную сеть для корректного решения проблемы идентификации пары фотонов, порождаемых такими частицами, как π^0 и η , в условиях больших помех. На рис.21 приведены комбинации для гипотетических событий с множественностью $t = 6$. В данном примере три пары вычисленных инвариантных масс соответствуют π^0 -частицам и две — η -частицам. Жирным шрифтом обозначены истинные фотонные пары, а остальные пары соответствуют фоновым событиям. Числа в квадратах показывают относительные вероятности того, насколько пара истинна. В нейронной сети каждой комбинации пары фотонов обеспечивается соответствующая стимуляция на входе нейрона, а их выходы подключены к входам других нейронов таким образом, чтобы обеспечить получение необходимых параметров сети. Принципиальным отличием нейронных сетей является то, что данные на входах и выходах представлены, в основном, в естественной аналоговой форме. Кроме того, нейронная сеть способна «обучаться». Результаты такого «обучения» применительно к

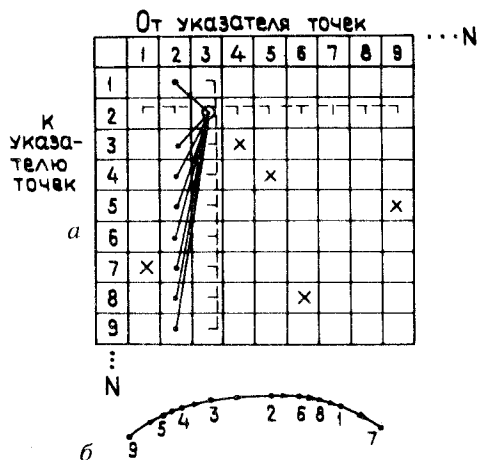


Рис.22. Нахождение отрезков треков с помощью нейронной сети. а) Связи для нейрона $3 \rightarrow 2$ обозначены (●). Разрешенные связи изображены сплошными линиями, а запрещенные (-). б) Сегмент трека $9 \rightarrow 5 \rightarrow 4 \rightarrow 3 \rightarrow 2 \rightarrow 6 \rightarrow 8 \rightarrow 1 \rightarrow 7$ изображен на верхнем рисунке знаком (●), а другие связи обозначены (x)

распознаванию треков, регистрируемых в мультидрейфовых трубках, приведены в [65]. В качестве модели использовалась сеть без обратных связей. При этом ставилась задача нахождения наклонных треков и точек их пересечений. Показано, что применяемая модель нейронной сети позволяет 1) настраиваться на поиск наклонных единичных треков, 2) находить вершины распада для двухтрековых событий на фоне шумов, 3) обеспечить высокую точность, присущую мультидрейфовым трубкам.

В [66] приводятся опытные результаты по настройке трехслойной нейронной сети для регистрации координат первичной вершины распада с помощью многослойной дрейфовой камеры. Конструкция современных трехкоординатных газонаполненных детекторов, содержащих множество дрейфовых ячеек с подключенными к ним каналами усиления и формирования сигналов, довольно близко напоминает нейронную сеть, и поэтому вполне естественным является использование таких сетей для распознавания сложных физических событий. Ограниченное число входов искусственных нейронных сетей приводит к необходимости разделения выходов камеры на отдельные перекрывающиеся секции, содержащие по 18 выходов. Для камеры, имеющей разрешение по координате, полученной путем измерения времени дрейфа — 500 мкм, получено для каждой субсекции вполне удовлетворительные параметры: разрешение одного трека 0,72 см и двух треков — 2,1 см. Путем объединения данных от всех субсекций получена удовлетворительная точность регистрации координаты вершины распада 1,4 см. С помощью рис.22 иллюстрируется методология поиска отрезков треков с помощью нейронной сети, которая является аналогом рассмотренной выше методики поиска кратчайшего пути между N городами. Прежде всего накладываются определенные ограничения на длину отрезков трека $L < R_c$.

Причем величина R_c в несколько раз меньше расстояния между двумя пространственными точками. В результате каждая точка может считаться лежащей на треке в радиусе меньше чем R_c . Решение проблемы состоит в том, чтобы при настройке сети соединить все сегменты трека. Причем кандидатом в полезный считается трек, который состоит из такой непрерывной цепи сегментов, при которой из любой точки трека можно было попасть на его концы. В качестве дополнительных ограничений, влияющих на выбор коэффициентов T_{ij} , является условие, что только одна точка пространства принадлежит данному треку. Запрещающие коэффициенты выбираются так же, как и в примере на рис.20. Коэффициенты матрицы связей имеют вид

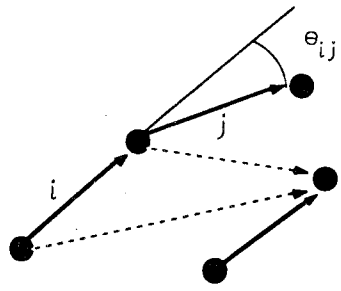


Рис.23. Определение сегментов и угла между ними

$$T_{ij} = \alpha \frac{\cos^n \gamma_{ij}}{r_{ij}}, \tag{6}$$

где γ_{ij} — угол между сегментами i и j , r_{ij} — длина вектора, равного сумме сегментов i и j , α — коэффициент пропорциональности и n — небольшие числа (рис.23).

Следует отметить, что использование нейронных сетей пока носит сугубо исследовательский характер. Пожалуй, наиболее впечатляющие результаты опубликованы в [67], где разработан алгоритм реконструкции сложных событий с множественностью выше 100, регистрируемых с помощью времяпроекционной камеры установки ALPH. Наиболее трудоемким процессом остается пока процесс обучения сети, который состоит из ряда итераций. Прежде всего необходимо наложить ряд ограничений на сложность треков и количество точек на трек. Так, если число координат на трек выбрать равным 500 (что вполне реально), потребуется $2,5 \cdot 10^5$ нейронов, имеющих более чем $6 \cdot 10^{10}$ связей между собой. Поэтому были введены следующие ограничения.

1) Учитывались координаты, расположенные в коридоре $\sigma_{XY} < 0,3$ см и $\sigma_Z < 1,0$ см, где X, Y и Z — координаты данного трека. Это позволило исключить около 5% координат.

2) Наложены также ограничения на связи по углу между сегментами трека и др.

В процессе обучения модели сети использовалась матрица связей (6). Результаты процесса обучения приведены на рис.24,25. На рис.24,а и б при-

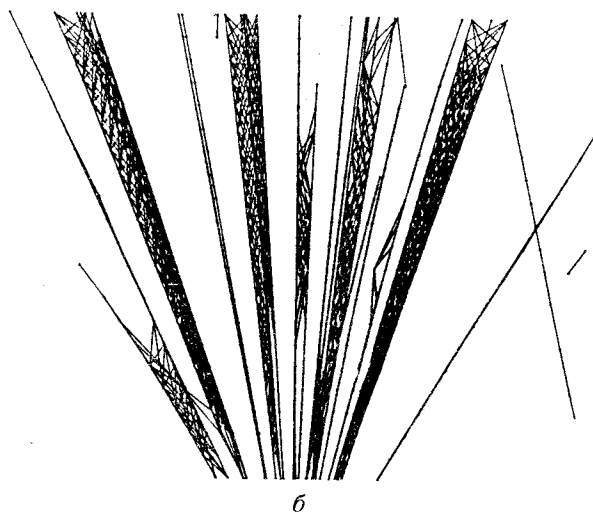
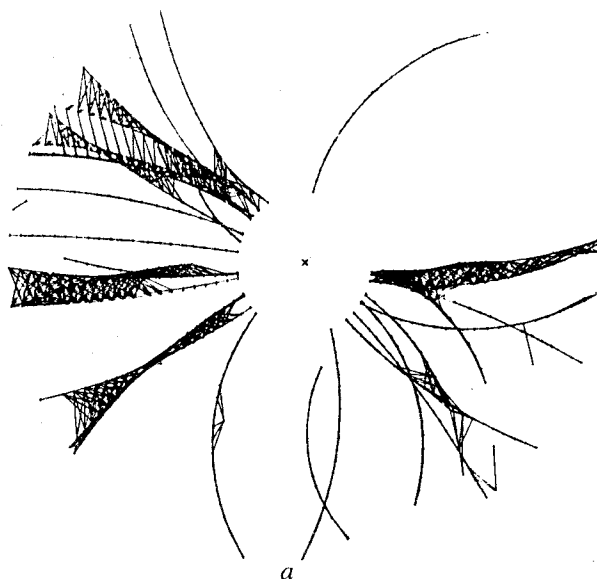


Рис.24. Дисплейные картинки сгенерированных линий для реального события $Z^0 \rightarrow$ адроны в плоскостях XY и RZ до конвергенции

ведены дисплейные картинки всех сгенерированных линий для реального распада $Z^0 \rightarrow$ адроны в плоскостях XY и Z соответственно, полученные после первого этапа тренировки до процесса конвергенции. Видно, что хо-

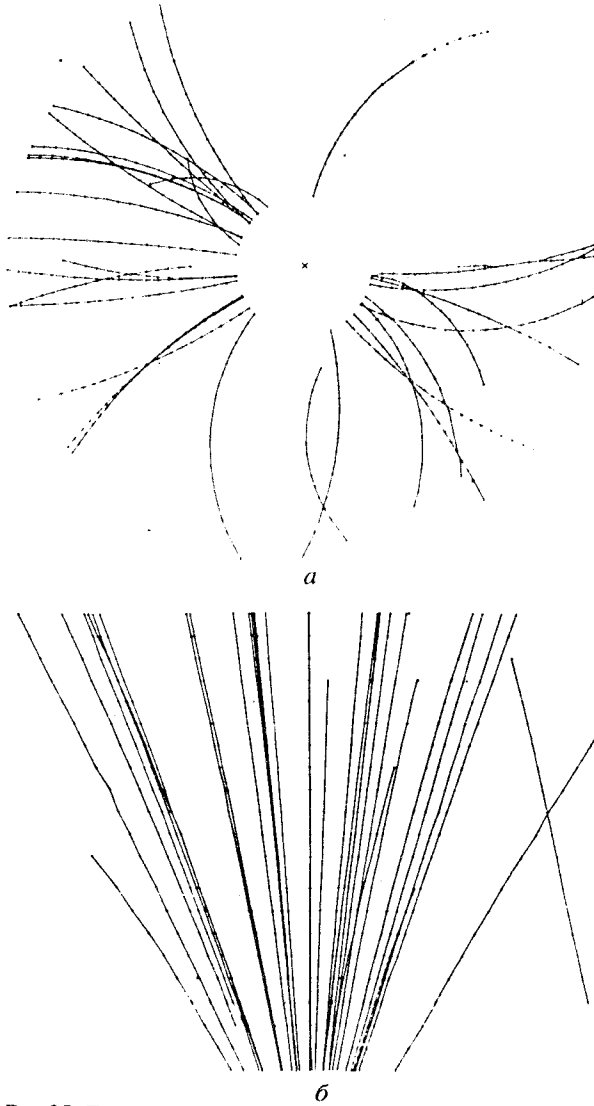


Рис.25. То же событие после конвергенции методом Монте-Карло в проекциях XU и RZ

рошо разделенные треки реконструируются довольно эффективно, но существуют коридоры неопределенности там, где имеются пересечения треков и фоновые точки и отрезки. На рис.25, *a* и *б* приведено то же событие, но после шести итераций (конвергенций). Проведено сравнение эффективно-

сти реконструкции треков с помощью нейронной сети с эффективностью использованной ранее обычной программы и получены числа 99% и 99,7% соответственно. Подсчитано, что время реконструкции события в первом случае на порядок меньше. Исследована также возможность распознавания и гораздо более сложных гипотетических событий с большой множественностью треков (более 100), которые будут регистрироваться на вновь создаваемом ускорителе ЛНС (большой адронный коллайдер).

В [68] исследована возможность использования нейронных сетей еще в одном важном направлении физики элементарных частиц — идентификации глюонных и кварковых струй. Исследовались генерируемые методом Монте-Карло события $e^+e^- \rightarrow$ адроны. Единице на выходе сети соответствовал глюон, а нулю — кварк. При этом использовались две программы: одна для обучения непосредственно сети, а другая — для идентификации струй. Эффективность распознавания такова, что впервые наблюдалось 90% струй, которые ранее с помощью обычной программы не распознавались. В [69] исследована аналогичная проблема распознавания струй в $p\bar{p}$ -взаимодействиях с целью отделения распадов Z - и W -бозонов на уровне фона КХД. Информация регистрировалась с помощью калориметра. Однако проблема распознавания событий с помощью таких детекторов, не являющихся трековыми, не входит в тему данного обзора.

Следует отметить, что в рассмотренных выше исследованиях, связанных с применением нейронных сетей, использовались такие алгоритмы, которые эффективно применялись для распознавания относительно несложных событий и адаптировались на использование данных, регистрируемых обычными способами (без применения сетей). Другими словами, известные алгоритмы обработки трековой информации уже не удовлетворяют возрастающим требованиям экспериментальной физики сверхвысоких энергий. Один из таких перспективных алгоритмов, который, по мнению автора, может дать хорошие результаты при большой множественности событий, рассмотрен ниже.

6. ЭЛАСТИЧНЫЙ АЛГОРИТМ

В работе [70] отмечается, что используемые для обработки трековой информации алгоритмы и методы, и в том числе широко используемые локальные и глобальные методы, дают неплохие результаты при относительно небольшой множественности и плотности треков (порядка 5—10). Определенный интерес представляет разработка более совершенного алгоритма, позволяющего эффективно применить также нейронные сети для обработки трековой информации. Ниже кратко описан алгоритм, который авторы называли «эластичный алгоритм для обработки сложной трековой информа-

ции». Показано, что он может быть использован для более эффективного распознавания сложных событий на уровне значительных помех, с большой плотностью треков и с учетом ошибок в измерении координат, а также с целью идентификации вторичных вершин распада, которые будут регистрироваться в экспериментах на *B*-фабрике, на большом коллайдере и в опытах с тяжелыми ионами. Под плотностью трека ρ_t понимается усредненное отношение расстояния между измеренными точками вдоль трека к расстоянию между точками, принадлежащими другим трекам или фоновым точкам.

В разработанном эластичном алгоритме комбинируется динамический подход к эластичному алгоритму сети с целью решения сложных проблем оптимизации геометрических проблем с глобальными методами восстановления треков, основанных на методах Радона или трансформации Гофа, применяемых в практике распознавания образов. Важно, что фитирование и восстановление треков происходит одновременно путем решения уравнений движения аналогичной динамической системы. Математически трансформация Радона плотности трека $\rho(x)$ задается линейным интегралом по заданному классу траекторий:

$$R(\mathbf{x}, \mathbf{p}) = \int d\tau \rho(r_p(\tau) + \mathbf{x}), \quad (7)$$

где $r_p(\tau)$ — траектория, задаваемая параметром \mathbf{p} , так что $r_p(0) = 0$, и \mathbf{x} — координата трека. Если рассматривать (7) применительно к распознаванию физических событий в однородном магнитном поле, то $r_p(\tau)$ описывает винтовую линию, а в отсутствие поля имеем прямые, идущие в направлении \mathbf{p} . Кроме того, если фазовую поверхность представить в дискретной форме, то преобразование Радона переходит в рассматриваемое выше преобразование Гофа, и если каждый отсчет (пиксель) представляет собой двоичное число, то подсчитывается количество пикселей, принадлежащих кривой. Основным недостатком данного преобразования является существенный рост данных, требуемых для нахождения максимума в процессе суммирования дискретных точек, с ростом требуемого разрешения и плотности треков. В новом алгоритме преобразование Радона обобщается на динамическую систему. При этом величина R интерпретируется как энергия взаимодействия внешне измеренной (отрицательной) плотности заряда $\rho(\mathbf{x})$ с положительной плотностью трека T , определяемой из выражения

$$\rho_T(\mathbf{x}) = \int d\tau \delta(\mathbf{x} - r_{p_T}(\tau) - \mathbf{x}_T). \quad (8)$$

Путем ограничения предела интегрирования до $\tau > 0$ \mathbf{x}_T можно интерпретировать как начало траектории с импульсом p_T . Наконец, в рассматрива-

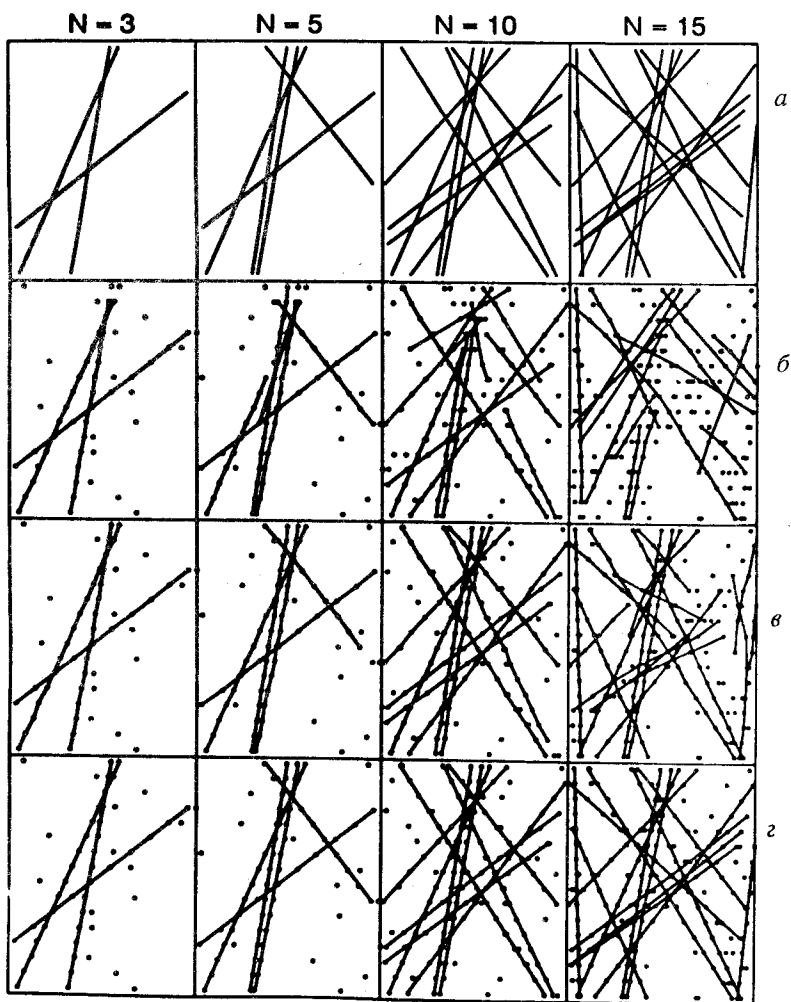


Рис.26. Примеры эффективности работы трех методов реконструкции прямых треков в зависимости от множественности треков N : а) условное изображение событий без фона; б) метод коридоров; в) метод Денби—Петерсона для нейронных сетей; г) эластичный алгоритм

емой работе приводится следующее уравнение энергии взаимодействия трека:

$$R_V(\mathbf{x}_T, \mathbf{p}_T, t) = \int dx dx' \rho(x) V(\mathbf{x} - \mathbf{x}', t) \rho_T(\mathbf{x}'), \quad (9)$$

где $V(\mathbf{x}, t)$ — зависящий от времени t потенциал. В пределе $V(\mathbf{x}, t) = \delta(\mathbf{x})$, и уравнение (9) переходит в (7), для статических состояний уравнение (9) трансформируется в преобразование Гофа. Таким образом, суть эластичного алгоритма заключается в том, что путем сведения отрицательного заряда к плотности заряда ионизации ρ , а положительного заряда — к плотности трека ρ_T проблема нахождения полезных треков превращается в задачу нахождения минимума эффективной энергии взаимодействия, который находится путем решения динамических уравнений

$$\begin{aligned} d\mathbf{p}_T/dt &= -\lambda \Delta_{\mathbf{p}_T} R_V(\mathbf{x}_T, \mathbf{p}_T, t), \\ d\mathbf{x}_T/dt &= -\lambda \Delta_{\mathbf{x}_T} R_V(\mathbf{x}_T, \mathbf{p}_T, t), \end{aligned} \quad (10)$$

где λ — малый оценочный параметр.

На конкретных примерах показано преимущество данного алгоритма по сравнению с методом коридоров и алгоритмом обработки трековой информации, разработанным на базе нейронных сетей, который был рассмотрен выше. Эластичный алгоритм выполняет адаптивное нелинейное фитирование к помехам с большим числом треков. В отличие от преобразований Гофа здесь исключается необходимость в дискретизации (использовании бинов) фазовой поверхности и трудоемкий поиск минимума.

На рис.26 приведены картинки, иллюстрирующие эффективность трех алгоритмов при различных значениях множественности треков с учетом наличия 20% фона и ошибок измерения координат с точностью 3%. В верхней части рисунка условно изображены треки без помех. При этом с ростом множественности N в пределах 3, 5, 10, 15 средняя плотность треков возрастает как 0,5; 1; 2; 3. Как видно из рис.26, при $N=3$ все три метода дают правильный результат. С удвоением плотности треков метод коридоров при $N=5$ один из треков идентифицирует как два с различным наклоном. С ростом N эффективность метода коридоров резко ухудшается. Рассмотренный выше алгоритм Петерсона — Денби, разработанный для нейронных сетей, дал сбой при $N=15$. В цитируемой работе обсуждается также вопрос реализации эластичного алгоритма с помощью нейронных сетей.

7. МЕТОД НЕПРЕРЫВНОЙ МАСКИ

Данный метод прежде всего интересен тем, что он разработан и применен в реальном опыте. Предложенный в [71] способ непрерывной маски и созданные для его реализации аппаратные средства [72] в некотором приближении можно считать нейроподобным методом обработки трековой информации. Впервые нейроподобный процессор был использован в

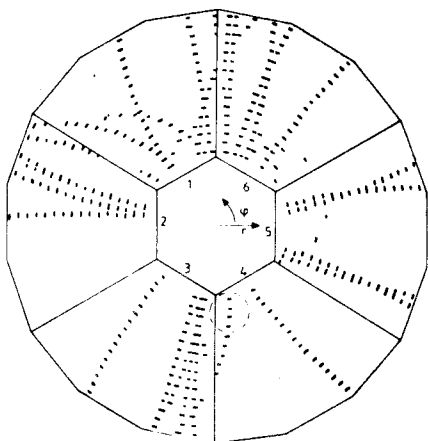


Рис.27. Проекция события $e^+e^- \rightarrow q\bar{q}$ в плоскости $r\phi$ времяпроекционной камеры установки ДЕЛФИ

эксперименте ДЕЛФИ [73] для обработки данных, регистрируемых с помощью времяпроекционной камеры. В цилиндрической системе координат каждая координата характеризуется тремя величинами: z , r и ϕ . На рис.27 приведена проекция события $e^+e^- \rightarrow q\bar{q}$ в плоскости $r\phi$. Для каждых из 10 z бинов r и ϕ данные отображаются на прямоугольной

программно-управляемой матрице, называемой еще памятью изображений. В качестве примера на рис.28 приведена часть непрерывной маски, которая имеет следующие свойства: каждый узел имеет связь с соседним, расположенным снизу и сверху, и, кроме того, с правой стороны каждый из узлов аналогично может соединяться с соседними узлами. Около каждого из узлов

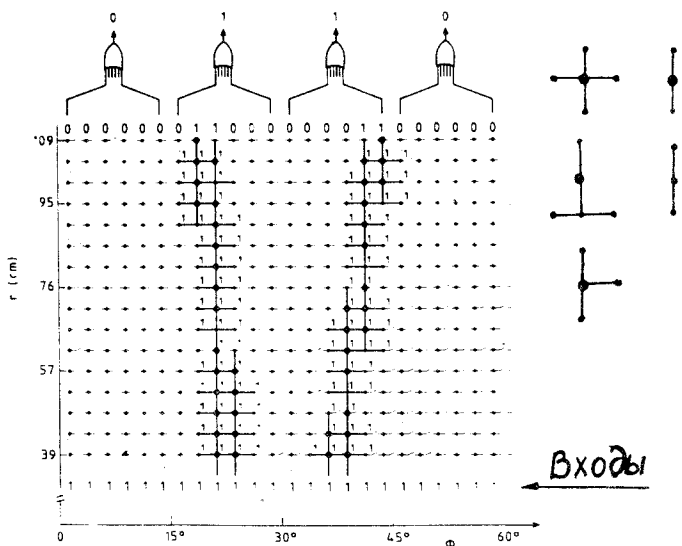


Рис.28. Метод непрерывной маски. Справа сверху показаны возможные связи между соседними ячейками

расположены вертикальные и горизонтальные ключи. Как видно из рис.28, некоторые из ключей, расположенных вдоль трека, включены, поскольку в эти узлы хранятся зарегистрированные координаты трека. Трек находится путем подачи управляющих сигналов одновременно на все входы памяти. На рис.28 показан пример, когда было зарегистрировано два трека, один из которых (справа) фиксируется, а другой нет, поскольку отсутствуют непрерывные связи в маске. Наряду с памятью изображений в процессоре имеются еще две триггерные памяти одинаковой емкости: вертикальная коммутирующая память и горизонтальная коммутирующая память, которые совместно с памятью изображений обеспечивают коммутацию ключей в непрерывной маске. Коммутирующие памяти загружаются содержимым памяти изображений с помощью специальных команд. Кроме того, имеются также команды сдвига, с помощью которых содержимое коммутирующих запоминающих устройств может сдвигаться не только во всех четырех направлениях, но и в случае необходимости циклически, в том числе и вокруг одной ячейки. Все эти особенности процессора позволяют вести его настройку на выполнение широкого круга задач, например: поиск только в вертикальном направлении, реконструкция треков определенной кривизны, обеспечение поиска треков даже в тех случаях, когда вследствие неэффективности работы детектора возникают «разрывы» в треках. Операция поиска треков выполняется за 1 мкс. Программируемая непрерывная маска имеет трехступенчатую структуру. Все блоки, за исключением блока непрерывной маски, представляют собой $n \times m$ матрицы (16×24), элементами которых являются сдвиговые регистры.

8. СПЕЦИАЛЬНЫЕ МЕТОДЫ ПОИСКА И РЕКОНСТРУКЦИИ ТРЕКОВ

Описанный выше быстродействующий трековый процессор является практически универсальным и поэтому не привязан к конкретной геометрии детектора и решаемой физической задачи. Однако универсальные алгоритмы, как правило, требуют для реализации много аппаратуры. Поэтому как в современных, так и во вновь создаваемых экспериментах широко используются специализированные трековые процессоры. Создаваемые специально для конкретного эксперимента и с учетом геометрии используемых детекторов, такие разработки могут более эффективно решать поставленные задачи, и поэтому они могут представлять определенный интерес для разработчиков аппаратуры. Как уже отмечалось выше, большинство опытов делятся на два класса: эксперименты с фиксированной мишенью и эксперименты, проводимые на встречных пучках. Первый класс экспериментов может выполняться с помощью спектрометра, основу которого составляют годоскопические плоскости (МПК, полупроводниковые микро-

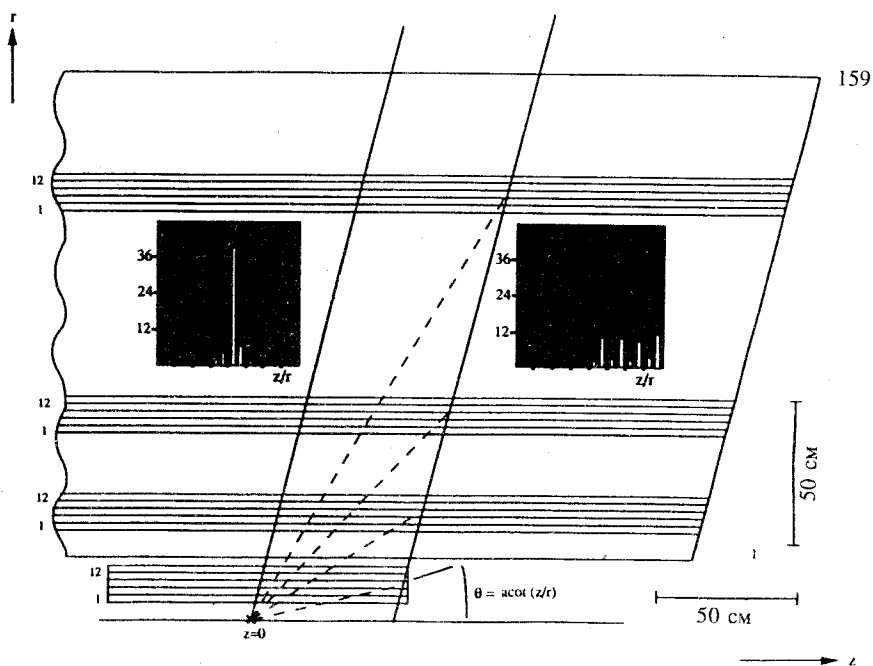
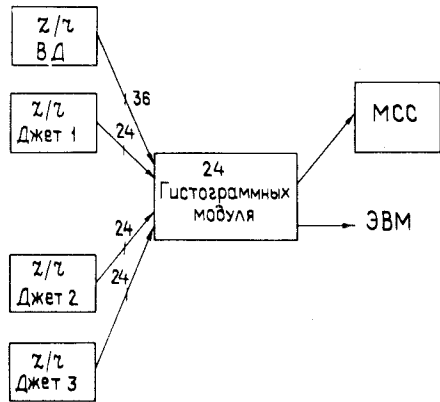


Рис.29. Нахождение координаты первичной вершины взаимодействия в эксперименте OPAL. Слева в окне виден пик на гистограмме для трека, исходящего из вершины взаимодействия. Справа в окне приведена картина для фоновых треков. 1÷12 — детекторы джет-камеры

стриповые детекторы, сцинтилляционные годоскопы и проч.). Для второго типа экспериментов создаются более сложные центральные детекторы — установки цилиндрической формы, в центре которых проходит ионопровод. Рассмотрим характерный пример.

Трековый процессор установки OPAL [74]. Установка OPAL представляет собой центральный детектор, состоящий из нескольких спектрометров-детекторов. Вокруг ионопровода расположен прецизионный вершинный детектор, состоящий из дрейфовых камер. Он имеет длину 1 м и разделен на 36 секторов по азимуту. Точность регистрации координат в плоскости $r-\phi$ равна 50 мкм. Вершинный детектор окружен системой больших дрейфовых камер, образующих джет-детектор длиной 4 м, и разделен по азимуту на 24 сектора, каждый из которых содержит по 159 чувствительных провололок. Точность регистрации в плоскости $r-\phi$ составляет 120 мкм. Третий concentрический слой состоит из z-камеры, ко-

Рис.30. Блок-схема гистограммного процессора. МСС — мажоритарная схема совпадений; джет1 + джет3 — дрейфовые камеры; ВД — модули для вершинного детектора



торые, по существу, представляют собой обычные дрейфовые камеры. При этом z -координата определяется методом деления заряда. Все описанные детекторы расположены внутри магнита, за пределами которого имеются времяпролетные счетчики, электромагнит-

ный калориметр, мюонный детектор и проч. Поскольку время между банчами составляет 22 мкс, то этим параметром прежде всего задается скорость работы триггерной системы. Для поиска треков в плоскости $r-z$ впервые применен аппаратно реализуемый гистограммный метод. Если трек исходит из первичной вершины распада, то отношение z/r для всех точек, принадлежащих данному треку, должно быть одинаковым. При этом предполагается, что в плоскости $r-z$ треки представляют собой прямые линии. Таким образом, если для данного малого угла ϕ получается пик на гистограмме, то трек исходит из точки взаимодействия, как это показано на рис.29 [75]. Для получения высокого быстродействия каждый из секторов имеет свой процессор. На рис.30 приведена блок-схема гистограммного процессора. Прежде всего, вычисляется отношение z/r . По истечении максимального времени дрейфа, равного 7 мкс для джет-камеры, процессор считывает данные от ϕ -сектора. Требуется всего 36 модулей для получения отношения z/r , которое вычисляется табличным способом. Далее, каждый из 24 гистограммных модулей, получая соотношение z/r , строит свои гистограммы. После построения четырех гистограмм выполняется проверка на наличие пика. Основу гистограммного процессора составляет модуль памяти с произвольной выборкой. В связи с этим представляет интерес разработка в интегральном исполнении построителя гистограмм на 512×512 ячеек с возможностью каскадирования [76].

9. МЕТОД СИНДРОМНОГО КОДИРОВАНИЯ

Суть метода синдромного кодирования впервые была изложена в [77]. Информация, считываемая с плоскости детектора, содержащего n каналов регистрации, предварительно сжимается до величины $N \leq t \log g_2 n$, и только

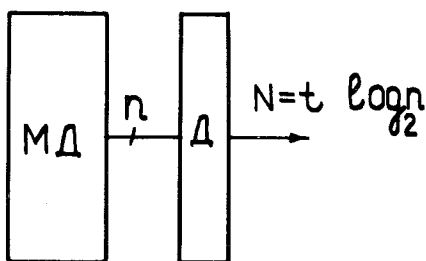


Рис.31. Метод синдромного кодирования: МД — многоканальный детектор; Д — декодирующее устройство (шифратор)

после этого данные подлежат обработке (t -множественность). Суть метода поясняется с помощью рис.31 [78]. Многоканальный детектор заряженных частиц рассматривается как

система, состоящая из n позиционно-чувствительных датчиков. В отсутствие события считывается n -разрядный унитарный позиционный код. Данные о событии представляются как вектор ошибки, который добавляется к нулевому вектору. Далее, в соответствии с методами теории корректирующих кодов, быстро вычисляется синдром N . Использование метода синдромного кодирования дает выигрыш во времени и в количестве аппаратуры при условии, что число t одновременно сработавших позиционно-чувствительных датчиков относительно невелико, по сравнению с их общим количеством n в годоскопической плоскости. На практике это условие, как правило, выполняется. Способы построения устройств сжатия данных описываются с помощью методов алгебраической теории кодирования. При этом важно, что в коде синдрома N в заданных пределах содержится информация как о количестве сработавших позиционно-чувствительных датчиков t , так и об их координатах. Поскольку разрядность кода синдрома $N < n$, то появляется возможность использовать более эффективно табличные методы для определения множественности и координат событий. Сказанное поясним с помощью конкретного примера. Допустим, что считываемое с плоскости детектора слово n имеет 15 бит. В отсутствие события с детектора считывается 15-разрядное слово 000000000000000. Предположим, что сигналы от трех частиц возникли на 4-й, 9-й и 13-й позициях (счет позиций ведется слева направо). Тогда получим слово 000100001000100.

Важным этапом является процесс кодирования, который выполняется с помощью кодирующей матрицы для кода, исправляющего три ошибки. На рис.32 изображены две равноценные матрицы. В первой матрице (слева) приведены элементы поля Галуа $GF(2^4)$. Причем в первой колонке матрицы содержатся все ненулевые элементы поля в порядке возрастания их степеней. Вторая колонка состоит из кубов соответствующих им элементов поля первой колонки, а в третьей колонке содержатся пятые степени элементов поля, расположенных в первой колонке. Справа на рис.32 изображена матрица, состоящая из двоичных эквивалентов поля Галуа $GF(2^4)$. Причем два последних столбца в матрице H^T можно отбросить, поскольку один из них равен нулю, а два других одинаковы. Количество колонок в кодирующей

Рис.32. Кодярующая матрица для $n = 15$ и $t = 3$. * — сработавшие датчики, + — сумма по модулю два

шей матрице в общем виде может быть равно $t \leq n/2$. С помощью такой матрицы можно построить схему параллельного шифратора на три сигнала, так как позиции единиц в матрице определяют связи между входами схем проверки на четность, которые выполняют функции сумматоров по модулю два, и выходами формирователей сигналов. Процесс кодирования при заданных позициях сработавших датчиков иллюстрируется с помощью

			Датчики						
$H^T =$	a^0	a^0	a^0	1	1000	1000	1000		
	a^1	a^3	a^5	2	0100	0001	0110		
	a^2	a^6	a^{10}	3	0010	0011	1110		
	a^3	a^9	a^0	* 4	0001	0101	1000		
	a^4	a^{12}	a^5	5	1100	1111	0110		
	a^5	a^0	a^{10}	6	0110	1000	1110		
	a^6	a^3	a^0	= 7	0011	0001	1000		
	a^7	a^6	a^5	8	1101	0011	0110		
	a^8	a^9	a^{10}	* 9	1010	0101	1110		
	a^9	a^{12}	a^0	10	0101	1111	1000		
	a^{10}	a^0	a^5	11	1110	1000	0110		
	a^{11}	a^3	a^{10}	12	0111	0001	1110		
	a^{12}	a^6	a^0	* 13	1111	0011	1000		
	a^{13}	a^9	a^5	14	1011	0101	0110		
	a^{14}	a^{12}	a^{10}	15	1001	1111	1110		
				+	0001	0101	1000		
				+	1010	0101	1110		
					1111	0011	1000		
				$S_1 =$	0100	$S_3 =$	0011	$S_5 =$	1110

рис.32 (внизу), причем знак «+» обозначает сумму по модулю два. Важно, что код синдрома несет в себе данные как о множественности сигналов $t \geq 3$, так и об их координатах X_1, X_2 и X_3 . В результате после шифрации вместо 15-разрядного кода, над которым трудно выполнять логические и арифметические операции, получается 10-разрядный код синдрома, состоящий из элементов поля Галуа. В свою очередь, код синдрома можно обработать двумя способами: 1) прямое декодирование с помощью ПЗУ позволяет быстро определить величины t и X_i ; 2) если длина слова велика (свыше 20 бит), можно использовать табличные методы решения координатных уравнений, исходя из того, что, как это следует из алгебраической теории кодирования [79], между значениями S_1, S_3 и S_5 имеют место соотношения

$$X_1 + X_2 + X_3 = S_1, \quad X_1^3 + X_2^3 + X_3^3 = S_3 \quad \text{и} \quad X_3^5 + X_3^5 + X_3^5 = S_5. \quad (11)$$

Табличные методы решения нелинейных уравнений (11) и блок-схемы быстрых координатных процессоров приведены в [78,80]. В [81] описан способ построения мажоритарных схем совпадений на большое число входов ($n > 30$), выполненный по методу синдромного кодирования. Высокое быстродействие и экономичность достигаются за счет того, что

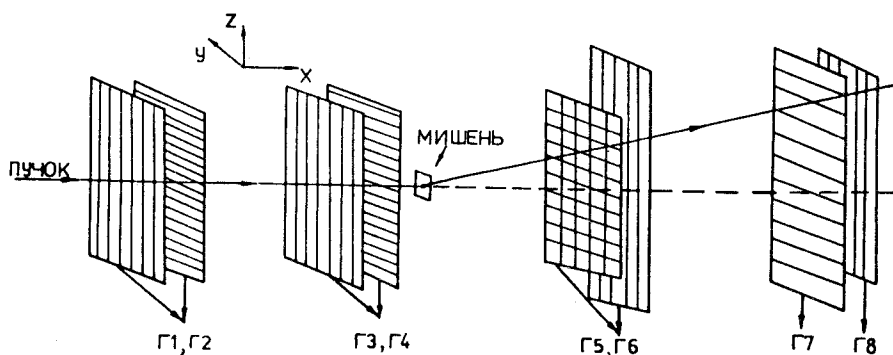


Рис.33. Схематическое изображение годоскопической системы эксперимента NA28 (ЦЕРН). Г1, Г2, Г3 и Г4 содержат по 60 сцинтилляционных полосок, Г5 содержит 144 ячейки Г1, Г6 — 13 + 2 и Г7, Г8 содержат по 24 + 2 полоски

логические операции выполняются не над n -разрядным словом, а над кодом синдрома.

Выбор той или иной схемы кодирования определяется постановкой физической задачи и прежде всего величиной регистрируемой множественности t , от которой зависит длина кода синдрома N . Использование итеративного кода Хэмминг — ИЛИ в сочетании с быстродействующими программируемыми логическими матрицами позволило создать эффективный одотрековый процессор для отбора частиц по углу рассеяния. В качестве детекторов использовались сцинтилляционные годоскопы. На рис.33 приведено схематическое изображение годоскопической системы. С целью уверенного разрешения «духов», возникающих в процессе регистрации частиц (больше чем одной), один из годоскопов имеет ячеистую структуру. Время решения не превышает 80 нс [82]. Кодовое расстояние кода Хэмминг — ИЛИ $d = 3 \times 2 = 6$. Если использовать простое соотношение, известное из теории кодирования: $t = (d - 1) / 2$, то получается, что с помощью такой схемы кодирования можно однозначно регистрировать двухтрековые события. Для построения трекового процессора с большей множественностью по методу синдромного кодирования необходимо использовать более мощные корректирующие коды. В [83] описан трековый процессор, предназначенный для отбора прямых треков частиц, зарегистрированных в МПК. Число треков, выделяемых с помощью такого процессора, может достигать до восьми. Причем для компрессии данных использовалось правило вычисления синдрома N в соответствии с кодами Боуза — Чаудхури — Хоквингема.

10. ПРИМЕНЕНИЕ МНОГОУРОВНЕВЫХ МУЛЬТИПРОЦЕССОРНЫХ СИСТЕМ

Применение транспьютеров. Транспьютеры представляют собой высокопроизводительные однокристалльные микропроцессоры с RISC-архитектурой, имеющие наряду с параллельным интерфейсом четыре быстрых интерфейса последовательного действия, с помощью которых можно построить как одномерные, так и многомерные сети для обработки трековой информации, содержащие несколько сотен и тысяч транспьютеров. На рис.34 приведены три различные топологии вычислительных систем, создаваемых на базе транспьютеров. Современные транспьютеры, описанные в обзоре [84], имеют 32-разрядный процессор и четыре независимых дуплексных интерфейса. Применение сети, состоящей из транспьютеров, для обработки физических данных описано в [85]. Наличие последовательного интерфейса в такой системе не ограничивает быстродействия сети в целом, вследствие независимой работы каждого транспьютера, поэтому сети из транспьютеров весьма перспективны для обработки трековой информации. Особенно широко транспьютеры и транспьютерные сети используются на установке ZEUS (см. ниже).

Использование высокопроизводительных микро-ЭВМ. Обычная обработка трековой информации выполняется в два этапа. После того как определены отрезки треков или выявлены кандидаты в полезные треки, данные записываются на магнитную ленту с целью их дальнейшей обработки на мощных ЭВМ, нередко содержащих эмуляторы. Однако, в силу известных причин, потребность в более мощных вычислительных системах, предназначенных для обработки трековой информации, непрерывно возрастает. Появление 32-разрядных микропроцессоров 68020 фирмы MOTOROLA в сочетании со стандартом VME

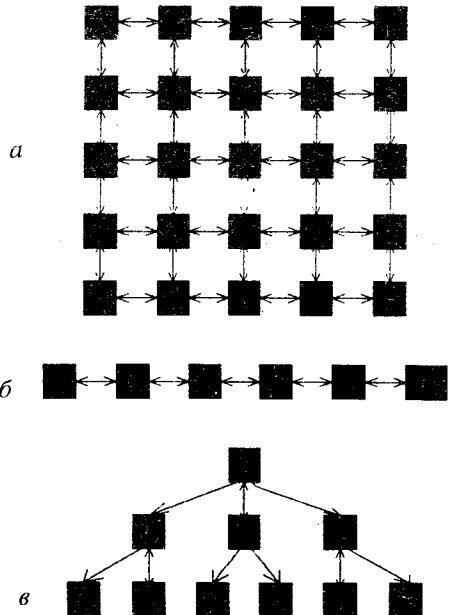


Рис.34. Различные конфигурации вычислительных систем, создаваемых на базе транспьютеров: а) матричная система; б) линейная система; в) сеть типа «дерево»

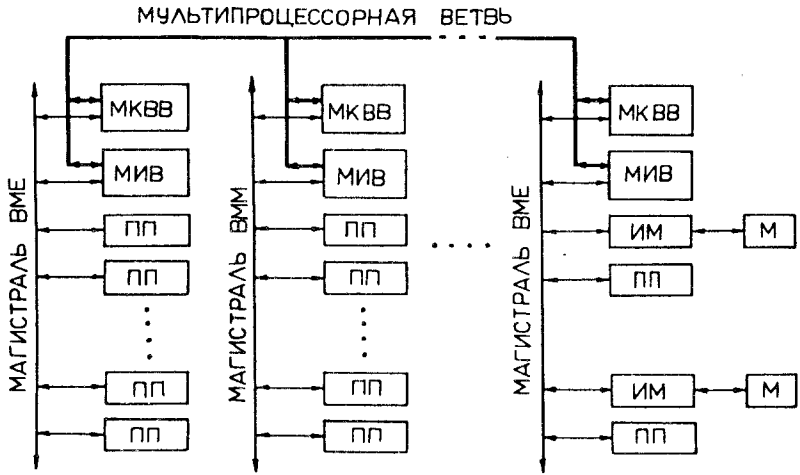


Рис.35. Блок-схема вычислительного многопроцессорного модуля: МКВВ — мультипроцессорный контроллер ветви ВМЕ; МИВ — мультипроцессорный интерфейс ВМЕ; ИМ — интерфейс магнитофона; М — магнитофон

позволило в 1986 г. создать первую микро-ЭВМ [86]. В настоящее время для будущих экспериментов создается еще более мощная система, которая по своей структуре существенно отличается от первой версии. Эти отличия заключаются в следующем.

1) Процесс вычисления и обмен данными носит многоуровневый характер.

2) Вместо микропроцессора 68020 используется более мощный микропроцессор нового поколения с циклом менее 10 нс, с большим количеством регистров (RISC-процессоры), выполняющий десятки миллионов одноцикловых операций. Более подробно описание таких процессоров дано в [87].

3) Для коммутации различных ветвей используются специальные коммутаторы событий. Другими словами, такая система по своей организации напоминает вычислительную сеть с соответствующим математическим обеспечением.

4) Вместо накопителей на магнитной ленте могут использоваться оптические диски или видеоленты емкостью до 2 Мбайт.

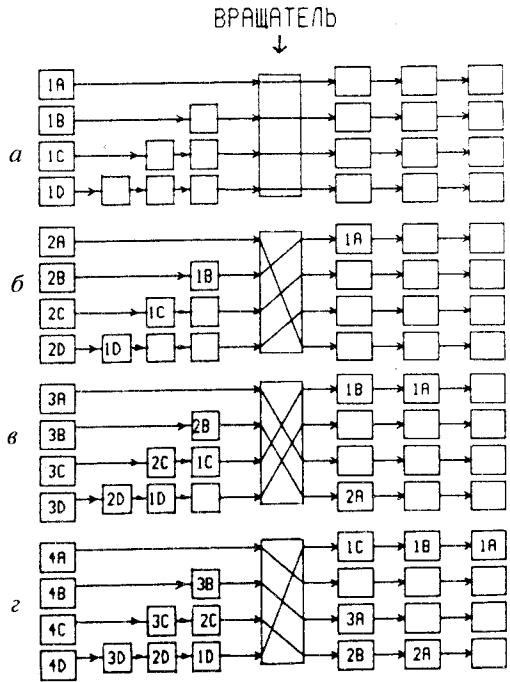
5) В систему включается множество блоков оперативных запоминающих устройств с прямым доступом к процессорам.

На рис.35 приведена структура мультипроцессорной системы обработки трековой информации. Отдельные звенья системы состоят из вычислительных модулей, объединенных с помощью магистрали ВМЕ, которая управля-

Рис.36. Схема работы циклического вращателя. 1A ÷ 1D — данные, относящиеся к однотипным событиям

ется контроллером МИВ (мультипроцессорный интерфейс VME). В свою очередь, каждый модуль через мультипроцессорный контроллер ветви — VME (МКВВ) подключен к магистрали ветви, которая организована таким образом, что каждый модуль может работать в режиме «ведущий — ведомый» или наоборот. Кроме того, к одному из модулей через интерфейс магнитофона (ИМ) подключены накопители на магнитной ленте (М) для ввода и вывода данных [88].

Параллельные построители событий. Как уже отмечалось выше, современные системы обработки данных имеют сходство с сетями ЭВМ. Необходимость в такой организации диктуется тем, что информация, регистрируемая в крупных физических установках, поступает параллельно от различных детекторов. При этом процесс обработки данных выполняется конвейерным способом и после обработки передается от одной ступени к другой. Причем информация о событиях может находиться в различных каналах передачи, а в конце концов они должны быть записаны в наперед заданных запоминающих устройствах или в процессорах. Причем все каналы одновременно являются активными, а связи между детекторами и процессорами динамически меняются с каждым тактом [89]. Для обеспечения высокой скорости переключения событий в будущих экспериментах тактовая частота должна составлять порядка 100 МГц. Основными логическими узлами в построителях событий являются коммутаторы. Наиболее простым из них, получившим широкое применение, является циклический вращатель. Работа циклического вращателя иллюстрируется с помощью рис.36, где буквами *A, B, C* и *D* обозначены фрагменты событий. Чтобы обеспечить поступление этих фрагментов к нужному приемнику (процессору), в каждом канале предусмотрено определенное количество цифровых задержек, функ-



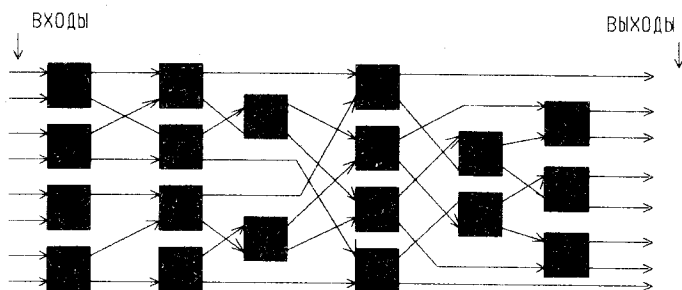


Рис.37. Блок-схема параллельного коммутатора, создаваемого на базе 2×2 -коммутатора

ции которых выполняют запоминающие устройства типа FIFO. В [90] обсуждается вопрос об использовании в качестве построителей событий быстрых коммутационных сетей, с помощью которых можно мультиплексировать данные от источников к приемникам. В настоящее время разработан ряд коммутаторов с оптическими каналами передачи и пропускной способностью 100 Гбайт/с. Однако такие сети имеют высокую стоимость, и, кроме того, протокол данных не учитывает специфики экспериментов по физике высоких энергий. И, наконец, в сетях возможны конфликтные ситуации. Имеются также предложения об использовании в качестве бесконфликтного параллельного коммутатора двухпортовых запоминающих устройств. Однако при большом числе каналов коммутации требуются матрицы, состоящие из дорогостоящих ЗУ. Поэтому практическое применение в качестве коммутаторов нашли параллельные 2×2 -коммутаторы, с помощью которых методами каскадирования создаются многоканальные параллельные коммутаторы и циклические вращатели [91]. В [92] описан циклический вращатель с оптическими каналами передачи, изготовленный в стандарте ВМЕ, основу которого составляет 2×2 -коммутатор, выполненный в виде интегральной микросхемы. Используя такие коммутаторы, можно создавать параллельные коммутаторы на большее число входов, как это показано на рис.37. На установке ZEUS [93] построитель событий создан на базе транспьютерной сети. При этом события от триггерной системы второго уровня на третий передаются со скоростью 24 Мбайт/с.

11. ОБРАБОТКА ТРЕКОВОЙ ИНФОРМАЦИИ НА БОЛЬШОМ АДРОННОМ КОЛЛАЙДЕРЕ

Детальные исследования показали, что система регистрации и обработки сигналов в будущих экспериментах может состоять из трех триггер-

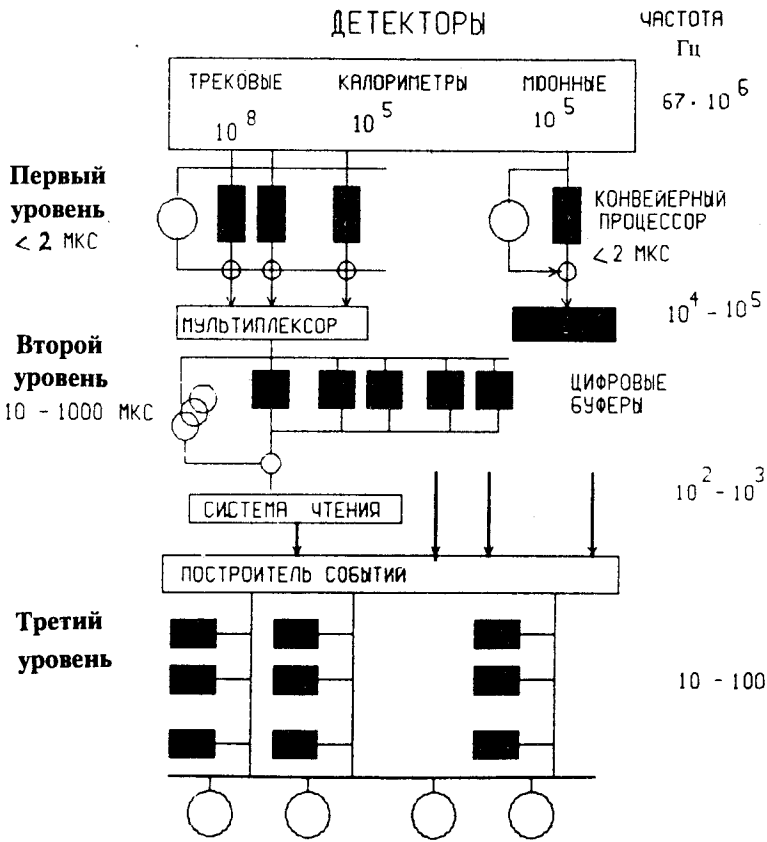


Рис.38. Обобщенная блок-схема триггерной системы, предлагаемой для экспериментов на LHC

ных уровней. Рассмотрим кратко их характеристики [94]. Обобщенная схема триггерной системы приведена на рис.38 [95].

Первый уровень. С учетом короткого периода встречи банчей (15 нс) логические устройства и простейшие процессоры должны работать с частотой 67 МГц и временем решения не более 15 нс. Практически это значит, что если в канале регистрации содержится несколько ступеней конвейера, то промежуточный результат решения должен передаваться на следующую ступень конвейера в каждом такте. Поэтому в каждом канале регистрации необходимо предусмотреть аналоговые, а при необходимости и цифровые задержки. Эти вопросы детально рассмотрены в обзоре [96]. В калоримет-

рическом канале требуется еще и быстрая оцифровка сигналов. Максимально допустимое время решения не должно превышать 1 мкс. Это время определяется количеством ступеней конвейерных процессоров. Кроме того, первый уровень триггера может состоять из определенного количества предварительных триггеров, каждый из которых решает свои специфические задачи на основе данных, получаемых от «приписанных» к ним детекторов. Частота поступления событий на второй уровень должна понизиться в 100—1000 раз.

Высокое быстродействие предъявляется к мюонным триггерным системам, поскольку требуется с высокой точностью измерять изолированные треки с большим импульсом (малой кривизной). В [97] предлагается использовать в составе триггера первого уровня конвейерный трековый процессор на базе сцинтилляционного волоконно-оптического годоскопа цилиндрической формы, с помощью которого предполагается выполнять поиск треков методом «окон» в плоскости r и ϕ . Годоскоп должен быть расположен внутри центрального детектора. Кроме того, высокое быстродействие системы может обеспечить также регистрацию актов встречи банчей. Сигналы, поступающие от световодов, регистрируются с помощью мультианодных ФЭУ. В проекте ATLAS [98] регистрацию мюонов с большим импульсом предлагается выполнять с помощью более дешевых высокопрецизионных дрейфовых трубок. В [99] разработаны алгоритмы и структура вычислительной среды на базе систолических матриц в однородной вычислительной среде, реализующие конвейерную быструю обработку трековой информации, регистрируемой с помощью дрейфовых трубок.

Второй уровень. Полная программируемость с временем решения 10—20 мкс — основное требование к триггерной системе второго уровня. Однако программируемость должна касаться в основном изменения параметров. Частота событий с 10^4 — 10^5 Гц понижается до 10^2 — 10^3 Гц. При этом анализ трековой информации выполняется приближенно с помощью грубых топологических критериев и данных, получаемых в калориметрическом триггере. Для построения триггерной системы второго уровня предполагается использовать лучшие достижения вычислительной техники и полупроводниковой технологии. Будут широко использоваться программируемые логические матрицы, цифровые задержки в виде запоминающих устройств типа FIFO с целью увеличения допустимого времени решения, коммерческие матричные процессоры на базе транспьютеров, цифровых сигнальных процессоров, а также создаваемые для этих целей специализированные процессоры. Следует отметить, что функции триггерной системы второго уровня носят двойкий характер: специализированный отбор и глобальный отбор событий. При специализированном отборе данные о таких кандидатах для регистрации, как электроны, фотоны, мюоны или струи, параметризуются путем использования данных от одного или нескольких детекто-

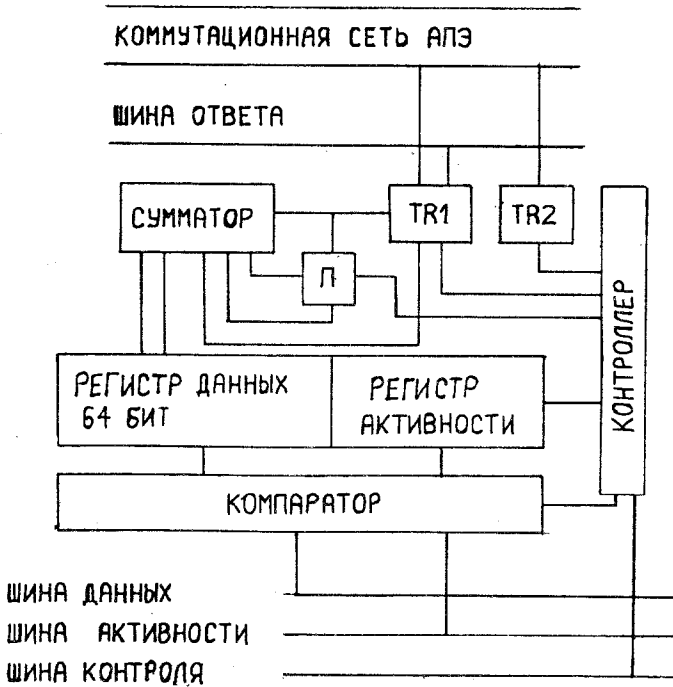


Рис.39. Блок-схема ассоциативного процессорного элемента.
TR1, TR2 — триггеры

ров. В процессе глобальных вычислений используется комбинация полученных решений с целью выработки сигнала о полезности события.

Третий уровень. На выходах третьего уровня триггерной системы получают данные, которые с частотой порядка $1\div 10$ Гц записываются в массивный накопитель для окончательной обработки. При этом данные на входы поступают от выходов построителя событий. Наряду с мультипроцессорными системами общего назначения предполагается использовать также и специализированные процессоры, содержащие на одной стандартной плате 1000—5000 быстродействующих микропроцессоров. С целью уменьшения стоимости и увеличения быстродействия эти микропроцессоры имеют специализированную архитектуру, ориентированную на обработку трековой информации. В связи с этим представляет интерес реализуемый проект MPPC (Massively Parallel Collaboration), который был предложен еще в 1988 г. [100]. Основу проекта составляет ассоциативный процессорный элемент (АПЭ), структурная схема которого приведена на рис.39. АПЭ со-

держит два регистра, один из которых — регистр данных — имеет емкость 64 бит и связь с магистралью данных для записи и чтения трековой и другой информации о событиях, а другой — регистр активности — имеет емкость 6 бит. Этот регистр имеет связь только с магистралью записи. Важно, что содержимое этих регистров может сравниваться с данными, которые в определенные моменты времени появляются на соответствующих магистралях. Результаты сравнения запоминаются на двух триггерах TR1 и TR2. Кроме того, каждый АПЭ имеет собственную локальную память, необходимую для хранения заранее записанных данных, а также для выполнения небольшого числа простых команд. Матрица из аналогичных АПЭ, смонтированных на одной стандартной плате, по принципу действия относится к классу так называемых SIMD-компьютеров (одна команда — много данных). Это значит, что одна и та же команда одновременно исполняется всеми процессорами, содержащими различные данные. Например, это может быть информация, поступающая от триггера второго уровня, а также данные, предварительно записанные в локальные запоминающие устройства. Таким образом, в отличие от обычного вычислительного процесса с последовательной адресацией с помощью АПЭ выполняется параллельное обращение к данным в соответствии с их содержимым.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Большие затраты материальных и интеллектуальных ресурсов, вкладываемых в развитие физики высоких и сверхвысоких энергий, приводят к необходимости тщательного исследования эффективных методов обработки трековой информации в реальном времени. Ряд экспериментаторов отмечают, что успехи в получении полезной информации, регистрируемой в многоканальных детекторах заряженных частиц на коллайдерах со светимостью 10^{33} — 10^{34} , будут зависеть прежде всего от возможностей систем регистрации, отбора и восстановления топологий сложных событий в условиях значительного фона и большой множественности детектируемых частиц. Поставленная цель достигается путем развития и совершенствования следующих направлений, используемых в экспериментальной физике высоких и сверхвысоких энергий.

1. Совершенствование и создание новых типов двух- и трехкоординатных высокопрецизионных детекторов с высоким пространственным разрешением и большим числом чувствительных ячеек в детектируемой области.
2. Широкое внедрение оптических методов регистрации и обработки физической информации.
3. Разработка и внедрение специализированных микросхем.

4. Разработка новых программных способов сшивания треков и сочетание программных методов обработки с аппаратными в реальном времени.

5. Проектирование и использование быстродействующих специализированных процессоров на базе программируемых логических матриц, ассоциативных запоминающих устройств и др., позволяющих вести одновременно обработку трековой информации по трем координатам.

6. Проведение исследовательских работ, направленных на внедрение в методику физических экспериментов ряда способов и аппаратных средств, используемых для распознавания образов: различного рода трансформации переменных, ассоциативных методов обработки данных, матричных автоматов и нейронных (синергетических) сетей, синдромного кодирования и др.

7. Создание мощных вычислительных систем и сетей для окончательной обработки трековой информации в режимах «он-лайн» и «оф-лайн».

Если сравнивать различные аппаратные методы реконструкции трековой информации, то в ближайшее время перспективными являются нейроподобные устройства, реализующие эффективные математические алгоритмы и включающие также аппаратные средства на основе ассоциативных запоминающих устройств и программируемых логических матриц. Такие процессоры в сочетании с программными методами обработки данных могут решать трудные проблемы распознавания не только трековой информации, но и относительно нового феномена — струй частиц, который трудно идентифицируется традиционными методами.

В заключение следует отметить, что ряд проблем, в той или иной степени относящихся к теме данного обзора, более подробно описаны в обзорах, опубликованных ранее в журнале ЭЧАЯ. В [101] детально изложены физические свойства приборов с переносом заряда и их характеристики. Описаны применения ПЗС-матриц в системах считывания изображений, запоминающих устройствах и др. В [102] приведен анализ характеристик детекторов излучений с измерением координат треков частиц по центру тяжести распределений, возникающих после прохождения частицы через чувствительный объем детектора. Применению цилиндрических многопроволочных пропорциональных камер посвящена работа [103]. В обзоре [104] рассмотрено современное состояние и перспективы развития электронных методов в физике высоких и сверхвысоких энергий. Более подробно суть метода синдромного кодирования изложена в работе [105]. В обзоре [106] описано современное состояние методики регистрации и обработки электрических и световых сигналов, регистрируемых в калориметрах. И, наконец, в работе [107] рассмотрено компьютерное и программное обеспечение систем обработки данных электронных экспериментов в физике высоких энергий.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Заневский Ю.В. и др. — Многопроволочные пропорциональные камеры. М.: Атомиздат, 1975.
2. Sauli F. — Preprint CERN 77-09, Geneva, 1977.
3. Hientze J. — Nucl. Instr. and Meth., 1978, vol.156, p.228.
4. Boerner H., Ficsher H.M., Hartmann H. et al. — Nucl. Instr. and Meth., 1978, vol.176, p.151.
5. Saxon D.H. — Preprint Ral-87-022, Chilton, 1987.
6. Fancher D., Hilke J.H., Loken S. et al. — Nucl. Instr. and Meth., 1979, vol.161, p.383.
7. Rai G., Arthur A., Bieser F. et al. — Preprint LBL-28141, Berkeley, 1990.
8. Carter A.A., Carter J.R., Hill J.C. — Nucl. Instr. and Meth., 1990, vol.A286, p.107.
9. Bernstein D., Berstein J., Bunnell K. — Nucl. Instr. and Meth., 1984, vol.226, p.30.
10. Bouclier R., Charpak G., Erskine G.A. — Preprint CERN-EP/87-89, Geneva, 1987.
11. Toki W.H. — Preprint SLAC-Pub-5232, Stanford, 1990.
12. Manfredi P.F., Rogusa F. — Nucl. Instr. and Meth., 1986, vol.A252, p.208.
13. Чилингаров А.Г. — Препринт НИИЯФ 90-113, Новосибирск, 1990.
14. Vocciolini M., Conti A., Capriaccio G.D. — Nucl. Instr. and Meth., 1985, vol.A240, p.36.
15. Hall G. — Nucl. Instr. and Meth., 1988, vol.A273, p.559.
16. Diericx B. — Nucl. Instr. and Meth., 1989, vol.A275, p.542.
17. Angelini C., Beusch W., Bloodworth I.J. — Nucl. Instr. and Meth., 1989, vol.A277, p.132.
18. Atkinson M.N., Crennel D.J., Fisher C.M. et al. — Nucl. Instr. and Meth., 1988, vol.A263, p.333.
19. Clealand W.E., Krans D.E., Thomson J.A. — Nucl. Instr. and Meth., 1983, vol.216, p.405.
20. Fabjan C.W. — CERN-PPE-193-124, 1993.
21. Guzik Z., Hajduk Z., Krasowski R. et al. — Nucl. Instr. and Meth., 1972, vol.104, p.337.
22. Guzik Z., Basiladze S.G. — Nucl. Instr. and Meth., 1974, vol.114, p.83.
23. Никитюк Н.М. — ПТЭ, 1983, № 2, с.7.
24. Kashchuk A.P., Madjar N. — CERN CAMAC News, 1978, No.13, p.13.
25. Verkerk C. — In: Proc. of the 1980 CERN School of Computing, CERN 81-03, Geneva, 1981; SLAC-PUB-4611, 1988.
26. Billoir P., Frühwirth R., Regler M. — Nucl. Instr. and Meth., 1985, vol.A241, p.115.
27. Frühwirth R. — 1989 CERN School of Computing, 1990, CERN 90-06, 217.
28. Crote H. — Rep. Prog. in Phys., 1987, vol.50, p.475.
29. Crote H., Zanella P. — Nucl. Instr. and Meth., 1980, vol.176, p.29.
30. Bugge L. — Nucl. Instr. and Meth., 1981, vol.179, p.365.
31. Frühwirth R. — Nucl. Instr. and Meth., 1987, vol.A262, p.444.
32. Billoir P., Qian S. — Nucl. Instr. and Meth., 1990, vol.A294, p.219.
33. Eichinger H. — Nucl. Instr. and Meth., 1980, vol.176, p.417.
34. Gassel D.G., Kowalski H. — Nucl. Instr. and Meth., 1981, vol.185, p.235.

35. **Becker J.J., Brown J.S., Coffman D. et al.** — Nucl. Instr. and Meth., 1985, vol.A235, p.502.
36. **Crote H.** — In: Proc. of the 1980 CERN School of Computing, CERN 81-03, Geneva, 1981.
37. **Eichinger H.** — Preprint CERN 81-06, Geneva, 1981.
38. **Frühwirth R., Liko D., Mitaroff W., Regler M.** — Preprint HEPHY-PUB-532/90, Vienna, 1990.
39. **Knapp B.** — Nucl. Instr. and Meth., 1990, vol.A289, p.561.
40. **Maclean C., McPherson G., Wilde P.** — Preprint RAL-74-049, Chilton, 1974.
41. **Ermolin Y., Ljuslin C.** — Nucl. Instr. and Meth., 1990, vol.A289, p.592.
42. **Klevenz F., Cohen W., Zoz R. et al.** — In: Proc. Int. Conf. «Computing in High Energy Physics'92». CERN 92-07, Geneva, 1992, p.251.
43. **Underwood D.** — Preprint ANL-HEP-CP-86-98, Illinois, 1986.
44. **Dell'Orso M.** — Nucl. Instr. and Meth., 1990, vol.A297, p.436.
45. **Battaiotto P., Budinich M., Dell'Orso M.** — Nucl. Instr. and Meth., 1990, vol.A287, p.431.
46. **Офенгенден Р.Г.** — ПТЭ, 1986, № 4, с.84.
47. **Офенгенден Р.Г., Березин Ф.Н.** — ПТЭ, 1967, № 2, с.5.
48. **Кохенен Т.** — Ассоциативные запоминающие устройства. М.: Мир, 1982.
49. **Battaiotto P., Budinich M., Dell'Orso M.** — Nucl. Instr. and Meth., 1990, vol.A293, p.531.
50. **Dell'Orso M.** — In: Proc. Int. Conf. «The Impact of Digital Microelectronics and Microprocessors on Particle Physics». Trieste, March, 1988.
51. **Dell'Orso M.** — Nucl. Instr. and Meth., 1989, vol.A278, p.436.
52. **Amendolia S.R., Bedeschi F., Bellettini G. et al.** — Nucl. Instr. and Meth., 1990, vol.A289, p.539.
53. **Принципы самоорганизации.** (Под ред. Лернера А.Я.) М.: Мир, 1966.
54. **Шифбах Д.** — В мире науки, 1992, № 11,12, с.10.
55. **Хинтон Д.Е.** — В мире науки, 1992, № 11,12, с.103.
56. **Кисель И.В., Нескоромный В.Н., Ососков Г.А.** — ЭЧАЯ, 1993, т.24, вып.6, с.1551.
57. **Еврейнов Э.В.** — Однородные вычислительные структуры и среды. М.: Радио и связь, 1981.
58. **Neural and Synergetic Computers.** Proc. of Int. Symposium (Ed. H.Haken), Springer-Verlag, Berlin, 1988.
59. **Peterson C.** — Nucl. Instr. and Meth., 1989, vol.A279, p.537.
60. **Denby B.** — Preprint Fermilab-Conf-90/94, Batavia, 1990.
61. **Jakel L.D., Graf H.P., Howard R.E.** — Appl. Optics, 1987, vol.26, No.23, p.5077.
62. **Denby B., Campbell M., Bedeschi F. et al.** — Preprint Fermilab-Conf-90/20, Batavia, 1990.
63. **Denby B.** — Comp. Phys. Comm., 1988, vol.49, No.3, p.429.
64. **Awes C.T.** — Nucl. Instr. and Meth., 1989, vol.A276, p.468.
65. **Denby B., Lessner F., Lindsey C.S.** — Preprint Fermilab-Conf-90/68, Batavia, 1990.
66. **Lindsay C.S., Denby B.** — Preprint Fermilab-Conf-90/n92, Batavia, 1990.
67. **Stimpfl-Abele G., Grido L.** — Comp. Phys. Comm., 1991, vol.64, No.1, p.46.

68. Lonnblad L., Peterson C., Rognvaldsonn L. — Phys. Rev. Lett., 1990, vol.65, No.11, p.1321.
69. Bhat P., Lonnblad L., Meier K et al. — Preprint DESY 90-144, Hamburg, 1990.
70. Gyulassy M., Harlander M. — Comp. Phys. Comm., 1991, vol.66, No.1, p.31.
71. Darbo G., Vitale S. — Nucl. Instr. and Meth., 1981, vol.190, p.81.
72. Darbo G., Heck B.W. — Nucl. Instr. and Meth., 1987, vol.257, p.567.
73. Darbo G., Heck B.W. — IEEE Trans. on Nucl. Sci., 1987, vol.NS-34, No.1, p.227.
74. Carter A.A., Carter J.R., Heuer R.D. et al. — Nucl. Instr. and Meth., 1986, vol.A250, p.503.
75. Arignon M., Ball A.H., Bell K.W. et al. — Nucl. Instr. and Meth., 1992, vol.A313, p.103.
76. Slorach F., Alford J.R. — IEEE Trans on Nucl. Sci., 1988, vol.NS-35, No.1, p.209.
77. Nikityuk N.M., Radzhabov R.S., Schafranov M.D. — Nucl. Instr. and Meth., 1977, vol.155, p.485.
78. Nikityuk N.M. — In: Proc. of 6th Int. Conf. AAECC-6, Rome, July 1988, vol.357, p.324, Springer-Verlag.
79. Питерсон У. — Коды, исправляющие ошибки. М.: Мир, 1964.
80. Nikityuk N.M. — Preprint JINR E10-89-362, Dubna, 1989.
81. Никитюк Н.М., Селиков А.В. — ПТЭ, 1987, 6, с.55.
82. Gustafsson L., Hagberg E. — Nucl. Instr. and Meth., 1988, vol.A265, p.521.
83. Калинин В.А., Крастев В.Р., Чудаков У.К. — ПТЭ, 1986, 3, с.105.
84. Woeniger T. — Preprint DESY 90-024, Hamburg, 1990.
85. Devenish R.C.E., Gingrich D.M., Hallam-Backer P.M. et al. — Preprint Oxford University, OUNP-90-5, Oxford, 1990.
86. Gaines I., Areti H., Atac R. et al. — Comp. Phys. Comm., 1987, vol.45, p.331.
87. Wilson R. — Comp. Design, Sept., 1988, p.68.
89. Lankford A.J., Barsotti E., Gaines I. — Nucl. Instr. and Meth., 1990, vol.A289, p.597.
90. Graiman W.H., Loken S.C., Mc Porland C.P. — In: Computing in High Energy Physics'92. CERN 92-07, Geneva, 1992, p.184.
91. Nomashi M., Sasaki O., Fujii H., Oshka T.K. — In: Computing in High Energy Physics'92. CERN 92-07, Geneva, 1992, p.188.
92. Sasaki O., Nomashi M., Oshka T.K., Fujii H. — KEK Preprint 93-9, Ibaraki-ken, 1993.
93. Kowalski H. — In: Computing in High Energy Physics'92. CERN 92-07, Geneva, 1992, p.33—50.
94. Elis N. — In: Computing in High Energy Physics'92. CERN 92-07, Geneva, 1992, p.51.
95. Mapelli L. — In: Computing in High Energy Physics'92. CERN 92-07, Geneva, 1992, p.237.
96. Никитюк Н.М. — ПТЭ, 1993, № 6, с.8.
97. Curatolo M., Esposito B., Franchi G., Teodoli A. — Preprint CERN-PPE/92-168, Geneva, 1992.
98. ATLAS, CERN/LHCC/92-4, LHCC/12, October, 1992.
99. Kotov V., Aleksandrov I., Pose R., Yatsunenکو Yu. — JINR, E10-93-191, Dubna, 1993.

100. Anvar S., Auge E., Basso A. et al. — Preprint CERN 93-07, Geneva, 1993.
101. Сороко Л.М. — ЭЧАЯ, 1979, т.10, вып.5, с.1038.
102. Барабаш Л.С. — ЭЧАЯ, 1991, т.22, вып.3, с.716.
103. Кравчук Н.П. — ЭЧАЯ, 1994, т.25, вып.5, с.1244.
104. Никитюк Н.М. — ЭЧАЯ, 1992, т.23, вып.5, с.1470.
105. Никитюк Н.М. — ЭЧАЯ, 1993, т.24, вып.1, с.180.
106. Никитюк Н.М. — ЭЧАЯ, 1994, т.25, вып.4, с.1004.
107. Иванов В.Г. — ЭЧАЯ, 1994, т.25, вып.5, с.1279.