

ТРИГГЕРНЫЕ СИСТЕМЫ В УСТАНОВКАХ ATLAS И CMS НА LHC

Н. М. Никитюк, В. Н. Самойлов

Объединенный институт ядерных исследований, Дубна

ВВЕДЕНИЕ	1251
ТРИГГЕРНАЯ СИСТЕМА УСТАНОВКИ ATLAS	1253
КРАТКИЕ СВЕДЕНИЯ ОБ УСТАНОВКЕ ATLAS	1254
ТРЕХУРОВНЕВАЯ ТРИГГЕРНАЯ СИСТЕМА	1256
ТРИГГЕРНАЯ СИСТЕМА ПЕРВОГО УРОВНЯ УСТАНОВКИ ATLAS	1261
КАЛОРИМЕТРИЧЕСКАЯ ТРИГГЕРНАЯ СИСТЕМА ПЕРВОГО УРОВНЯ	1270
ТРИГГЕРНАЯ СИСТЕМА МЮОННОГО СПЕКТРОМЕТРА УСТАНОВКИ ATLAS	1276
ВТОРОЙ УРОВЕНЬ ТРИГГЕРНОЙ СИСТЕМЫ	1283
ОСНОВНЫЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ УСТАНОВКИ CMS	1286
ГЛОБАЛЬНЫЙ ТРИГГЕР ПЕРВОГО УРОВНЯ УСТАНОВКИ CMS	1289
ОБРАБОТКА ТРЕКОВОЙ ИНФОРМАЦИИ	1293
ПОИСК ТРЕКОВ В БАРРЕЛЕ	1298
ГЛОБАЛЬНАЯ КАЛОРИМЕТРИЧЕСКАЯ ТРИГГЕРНАЯ СИСТЕМА	1307
ТРИГГЕРНЫЕ БАШНИ	1310
ЗАКЛЮЧЕНИЕ	1314
СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ	1315

ТРИГГЕРНЫЕ СИСТЕМЫ В УСТАНОВКАХ ATLAS И CMS НА LHC

Н. М. Никитюк, В. Н. Самойлов

Объединенный институт ядерных исследований, Дубна

Рассмотрены характеристики и принципы построения многоуровневых триггерных систем установок ATLAS и CMS. Описаны калориметрические алгоритмы, используемые для идентификации частиц. Приведены параметры триггерных камер, применяемых для идентификации мюонных треков. Описаны методы построения специализированных процессоров, создаваемых на основе специализированных микросхем и программируемых матриц. Приводится сравнение параметров триггерных систем установок ATLAS и CMS.

Characteristics of triggers and trigger systems at ATLAS and CMS setups and methods of designing multilevel trigger systems for these setups are described. Parameters of trigger chambers which are used for particles identification are considered. The methods of construction of the special purpose processors, designed at ASIC and FPGA, are described. Comparison of the trigger systems characteristics of ATLAS and CMS setups is given.

PACS: 01.50.Pa

ВВЕДЕНИЕ

Как известно, к 2008 г. на LHC планируется начать эксперименты на четырех крупных физических установках: ATLAS [4], CMS [5–9], ALICE [10] и LHCb [11]. Открытие новых физических процессов является основной целью проведения экспериментов на установках ATLAS и CMS. Основные различия в конструкции и в характеристиках этих установок рассмотрены в [12]. Триггерные системы на установках ATLAS и CMS должны обеспечить регистрацию информации, относящейся к следующим физическим программам [13].

— Поиск частиц Хиггса (Стандартная модель), например, $H \rightarrow ZZ \rightarrow$
 \rightarrow лептоны (e^- или μ), $H \rightarrow tt$, $H \rightarrow bb$.

— Поиск SUSY (суперсимметрии), например, генерация струй и отсутствие недостающей энергии (missing E_T).

— Поиск новых физических явлений с использованием инклюзивных триггеров.

— Изучение процессов в Стандартной модели.

В [14] приведен общий вид коллайдера LHC и расположение основных физических установок.

Время встречи между банчами составляет всего 25 нс. При каждом столкновении возникает в среднем 17–20 событий. В результате происходит множество протон-протонных взаимодействий. В течение короткого времени требуется зарегистрировать и обработать огромное количество информации (порядка Тбайт на одно событие). Поэтому триггерная система в современных физических установках имеет несколько уровней, с помощью которых обеспечивается уменьшение скорости поступления событий. Роль триггерной системы состоит в том, чтобы в реальном времени регистрировать данные об интересных событиях. Большинство физических процессов, которые изучаются с помощью современных экспериментов, являются весьма редкими. Например, в планируемых экспериментах на ЛHC частота событий составляет 10^9 Гц при светимости $L = 10^{34} \text{ см}^{-2} \cdot \text{с}^{-1}$. В зависимости от массы частота рождения частиц Хиггса варьируется между 10^{-1} и 10^{-2} Гц, и, как следствие этого, минимальная селективность составляет 10^{-11} [15, 16]. Следовательно, используемая триггерная система вместе с детекторами должна удовлетворять этому условию в экспериментах на ATLAS и CMS. Поэтому триггерная система первого уровня должна иметь малое время решения для того, чтобы можно было записать на регистры информацию о текущем событии от детекторов, содержащих до 10^8 каналов, и обеспечить прием нового события через каждые 25 нс. Такие жесткие условия предъявляются прежде всего для триггерных систем, используемых на установках ATLAS и CMS.

Развитие методики отбора частиц. Метод совпадений. Метод совпадений — это один из основных экспериментальных методов физики высоких энергий. Широкое развитие этого метода объясняется тем, что с его помощью можно решать две важнейшие задачи: регистрировать события в пространстве и во времени. Основоположником этого метода является профессор Боте, получивший в 1954 г. Нобелевскую премию. Несколько ранее, в 1930 г., Боте описал метод регистрации одновременно появляющихся импульсов от двух счетчиков Гейгера–Мюллера на базе двухсеточной электронной лампы. В том же 1930 г. Росси предложил схему тройных и четверных совпадений. В дальнейшем на базе схемы совпадений были созданы более эффективные устройства — матрицы совпадений (см. [1, 2] и ссылки там). Как будет показано ниже, матрицы совпадений широко используются при создании триггерных устройств на современных неоднократно программируемых кристаллах, содержащих сотни тысяч вентилях, работающих на частоте ~ 100 МГц.

Специализированные процессоры. Специализированные процессоры (СП) стали применяться в начале 1970-х гг. Использовались как аналоговые, так и цифровые СП. В качестве источников данных применялись сцинтилляционные годоскопы и многопроволочные пропорциональные камеры. Такие СП были предназначены для решения задач, связанных с регистрацией одноканальных событий. С появлением полупроводниковых модулей памяти и логических программируемых матриц в середине 1970-х гг. появилась возможность

решать такие задачи, как отбор треков частиц по углу разлета относительно мишени или вычисление импульсов частиц. В качестве вычислителей использовались экономичные и быстродействующие модули памяти (табличные методы решения). Следует отметить, что, в отличие от программируемых процессоров, при табличном методе решения, например, координаты сработавших проволочек подаются на адресные входы модуля ОЗУ или ПЗУ, а в ячейках памяти содержится ответ. Для регистрации многотрековых событий со сложной топологией и значительной кривизной треков широкое применение нашли микро-ЭВМ и различного рода эмуляторы больших и малых ЭВМ. Время обработки трехлучевых событий составляло несколько секунд. В обзоре [3] рассмотрены методы обработки трековой информации, которые использовались в 1970-х гг. Под термином «триггер» имелся в виду импульс, запускающий установку. Следует отметить, что рассмотренные методы обработки трековой информации получили применение в триггерных системах, предназначенных для экспериментов на LHC с учетом новых полупроводниковых технологий. Особенно это касается метода совпадений, табличных методов решения и различных способов маскирования треков. Маскирование нашло эффективное применение на установке DELPHI.

1. ТРИГГЕРНАЯ СИСТЕМА УСТАНОВКИ ATLAS

Основные параметры и требования. Для достижения поставленных целей с помощью установок ATLAS и CMS требуемая светимость должна составлять $10^{34} \text{ см}^{-2} \cdot \text{с}^{-1}$. При этом скорость поступления событий равна 10^9 с^{-1} . Если эту частоту разделить на частоту встречи банчей 40 МГц, то получается до 25 взаимодействий на один банч и более. Тактовая частота 40 МГц или ее кратные величины используются для выполнения операций в конвейерном регистре, с помощью которого данные, поступающие от субдетекторов, задерживаются на время решения триггерной системы первого уровня (2–3 мкс). Непосредственно от системы управления ускорителем поступают еще импульсы с периодом 88 мкс (ускорительные циклы), которые называются нулевыми банчами. В свою очередь, большая частота поступления событий требует высокой дискретности детекторов и, как следствие этого, на установке ATLAS получается свыше 10^8 каналов регистрации. При этом будет регистрироваться до несколько десятков Тбайт данных на одно событие. Поэтому требуется качественный отбор событий, повышенная полоса пропускания электронных схем считывания данных (усилителей, дискриминаторов, систем передачи информации и т. д.), специализированные процессоры для предварительной обработки данных и высокопроизводительные рабочие станции для окончательной идентификации частиц и реконструкции топологий

событий. Для реализации вышеуказанных требований необходимо выполнить ряд следующих условий.

- Стандартизация архитектуры для всех subsystem установок.
- Наибольшее число сигналов должно обрабатываться около субдетекторов.
- Использование специализированных процессоров на базе современных перепрограммируемых матриц и цифровых сигнальных процессоров.
- Параллелизм в течение времени обработки и передачи информации на основе оптоволоконных световодов.
- Использование многоуровневой триггерной системы.

2. КРАТКИЕ СВЕДЕНИЯ ОБ УСТАНОВКЕ ATLAS

На рис. 1 приведен общий вид установки ATLAS [4]. Она состоит из следующих детекторов: внутреннего трекового детектора, калориметрической системы, сверхпроводящих магнитов и мюонного спектрометра. Мюонный спектрометр определяет общие размеры детектора. Внешние камеры спектрометра расположены на расстоянии 11 м от центра установки, а третий слой

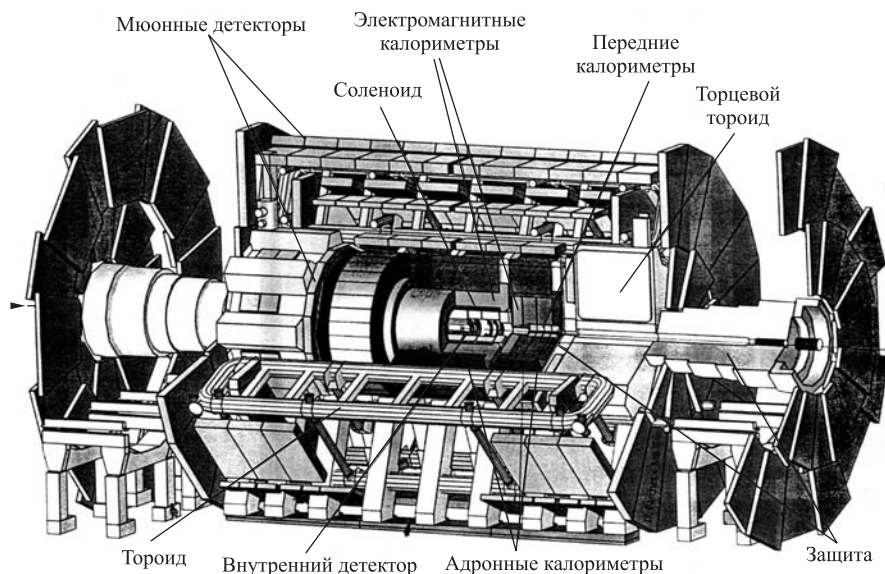


Рис. 1. Общий вид установки ATLAS

передних мюонных камер расположен на расстоянии ± 23 м от точки взаимодействия (она находится в центре установки) внутри ионопровода. Сверхпроводящая магнитная система состоит из двух магнитов: один из них (соленоид) расположен внутри трекового детектора, а второй состоит из трех независимых тороидов без сердечников, которые обеспечивают магнитное поле для мюонного спектрометра. Общая масса установки около 7000 т, в том числе калориметров 4000 т.

В установке ATLAS принята следующая система координат. Начало координат находится в точке взаимодействия. Пучки направляются вдоль оси z , а плоскость x, y расположена перпендикулярно направлению пучков. Азимутальный угол ϕ измеряется вокруг оси пучка, в то время как полярный угол Θ отсчитывается от оси z . Расстояние r отсчитывается от оси пучка до определенной точки, расположенной в субдетекторе. Используется также величина η , называемая псевдобыстротой, которая связана с углом Θ соотношением

$$\eta = -\ln \tan \frac{\Theta}{2}.$$

На рис.2 приведена схема, иллюстрирующая области псевдобыстрот для калориметрической системы установки ATLAS. Изображен один квадрант, поскольку остальные квадранты идентичны вследствие симметрии установки [17].

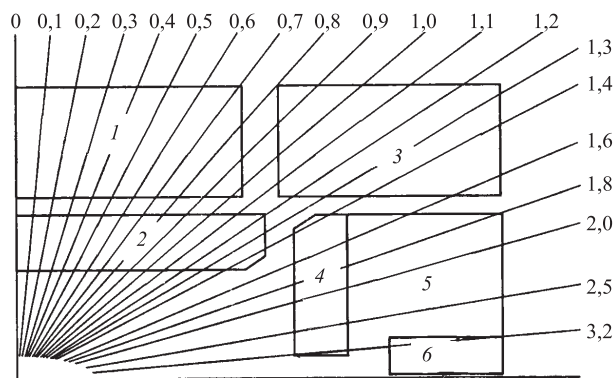


Рис. 2. Пример использования областей псевдобыстроты η для обозначения границ калориметрической системы установки ATLAS (показан один квадрант). 1 — пластинчатый адронный калориметр; 2 — электромагнитный жидкоаргонный калориметр, расположенный в барреле; 3 — адронный пластинчатый калориметр (в торце); 4 — жидкоаргонный электромагнитный торцевой калориметр; 5 — торцевой жидкоаргонный адронный калориметр; 6 — передний адронный калориметр

Можно дать и другое толкование величины η . Так, для характеристики движения вторичных частиц принята переменная

$$y = \frac{1}{2} \ln (E + p_T)/(E - p_T)$$

или близкая к ней величина — псевдобыстрота $\eta \approx y$, $\eta = 1/2 \ln \Theta/2$, где p_T — поперечный импульс и E — энергия частицы.

Быстрота является лоренц-инвариантом, поэтому распределения типа $d\sigma/d\eta$ также инвариантны и удобны для сравнения данных разных экспериментов, полученных в разных системах координат. Кроме того, распределение частиц по η имеет плато в центральной области ($\Theta = 90$, $\eta = 0$), что также удобно для представления данных.

3. ТРЕХУРОВНЕВАЯ ТРИГГЕРНАЯ СИСТЕМА

Триггерная система установки ATLAS состоит из трех уровней [1, 2, 18]. Частота поступления событий может составлять от 100 Мбайт/с до 10 Гбайт/с. В течение 25 нс на внутренних трековых субдетекторах будут регистрироваться до 350 треков заряженных частиц и до 700 частиц может быть зарегистрировано в калориметрической системе [22]. С помощью трехуровневой триггерной системы объем данных, поступающих от субдетекторов, может быть сокращен до десятков Мбайт с последующей записью информации на массивный накопитель (магнитные ленты, лазерные диски и проч.).

Триггерная система первого уровня обеспечивает идентификацию мюонов, электронов и фотонов, τ -лептонов и изолированных адронов, струй и недостающую или общую поперечную энергию. Она базируется только на мюонных детекторах и калориметрах. На рис. 3 приведена стратегия отбора событий на каждом уровне триггерной системы [19]. В среднем столбце рисунка показаны выполняемые функции и данные об идентификации частиц, которые обрабатываются на соответствующем уровне. Сигналы от субдетекторов после усиления и формирования с помощью оптоволоконных линий связи с частотой 40 МГц поступают на первый уровень триггерной системы, содержащий, в частности, аналоговый многоканальный конвейер с временем хранения данных 2–3 мкс. Это время соответствует времени задержки на первом триггерном уровне, и его достаточно, чтобы предварительно обработать данные, зарегистрированные в областях детекторов, содержащих полезную информацию. На первом триггерном уровне имеются также цифровые логические схемы и процессоры с табличными методами решения. Причем определяются области субдетекторов (калориметров и мюонных детекторов), в которых имеются указания на наличие полезных событий. Эти участки субдетекторов, содержащие указание на полезную информацию, получили название RoI (Region of Interest). Причем координаты RoI определяются

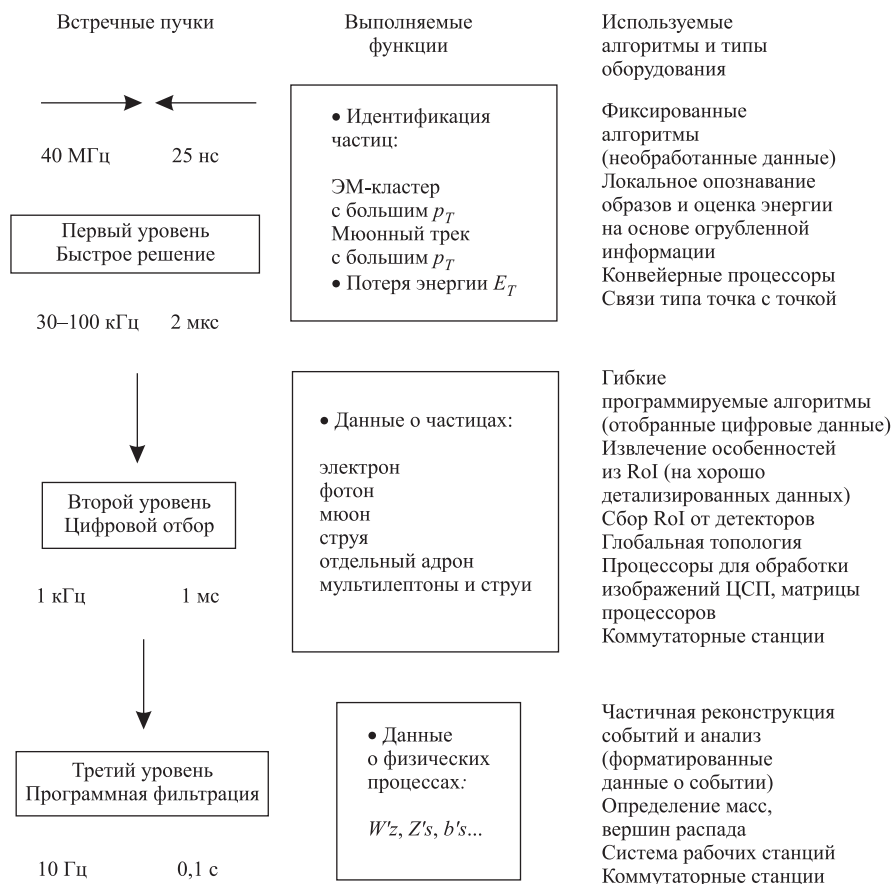


Рис. 3. Стратегия отбора событий с помощью трехуровневой триггерной системы ATLAS

таким образом, чтобы отдельная электромагнитная триггерная башня содержала локальный E_T -максимум. Как правило, RoI-данные составляют около 2% от максимального количества информации, регистрируемой в субдетекторах. При этом определяются не треки событий или кластеров, а лишь области калориметров, где они наиболее вероятны. Причем с помощью триггерного меню, задаваемого оператором, отбираются события, удовлетворяющие некоторым простым геометрическим или количественным критериям. Благодаря этому триггерная система не имеет мертвого времени. Для определения положения RoI используются координаты η и ϕ .

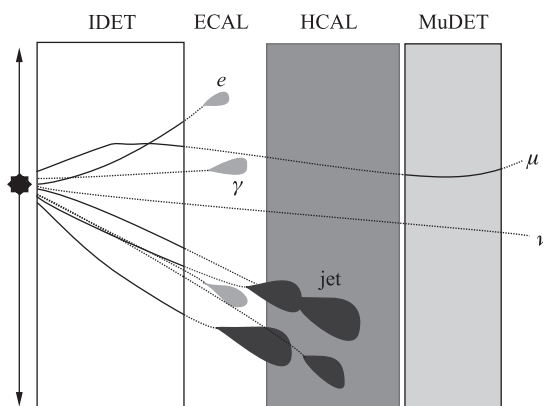


Рис. 4. Регистрация информации в детекторной системе: IDET — внутренний трековый детектор; ECAL — электромагнитный калориметр; HCAL — адронный калориметр; MuDET — мюонный детектор. Электроны и фотоны идентифицируются с помощью электромагнитного калориметра, в котором регистрируется кластер

Прохождение частиц сквозь детекторную систему [13]. На рис. 4 схематически показаны треки частиц, проходящих через детекторную систему, состоящую из внутреннего трекового детектора, электромагнитного калориметра, адронного калориметра и мюонного спектрометра. Как уже отмечалось выше, на первом триггерном уровне должны быть идентифицированы в форме RoI мюоны, электроны и фотоны, τ -лептоны и изолированные адроны, струи и потери энергии или потеря общей поперечной энергии. С помощью рис. 4 иллюстрируется, каким образом данные об этих частицах регистрируются в детекторной системе [13]. Так, электроны и фотоны порождают кластеры в электромагнитном калориметре. Электрически заряженный электрон оставляет след в виде трека в системе внутреннего детектора, в то время как нейтральный фотон не реагирует с веществом внутреннего детектора и поэтому его трек не регистрируется. Струя, состоящая из нескольких частиц, образует кластеры как в электромагнитном, так и в адронном калориметре. Что касается мюонов, то они порождают треки во внутреннем детекторе, теряют небольшую часть энергии в обоих калориметрах и образуют треки во внешней мюонной системе. Несмотря на то, что мюоны обладают зарядом, они практически свободно проникают сквозь калориметры и мюонную «шубу». Электрически нейтральные и слабо взаимодействующие нейтрино могут быть обнаружены путем измерения недостающей энергии (missing E_T) (см. ниже). Триггерная система первого уровня детально описана в [20].

На второй триггерный уровень сигналы поступают с частотой 100 кГц. Поскольку информация фильтруется по более сложным критериям, то время

решения на этом уровне составляет 1–10 мс. Причем используются данные, поступающие от внутреннего детектора, мюонного спектрометра и калориметрической системы. Наиболее сложным процессом является восстановление треков событий и измерение поперечных импульсов частиц p_T . Отдельное исследование выполняется для идентификации B -частиц — по их распадам на основе данных, полученных с помощью внутреннего детектора. Далее возможность идентификации электронов с помощью детектора переходного излучения используется на втором триггерном уровне для регистрации реакции $J\psi \rightarrow e^+e^-$ с электроном, имеющим величину поперечного импульса $p_T < 1$ ГэВ/с.

На третьем уровне регистрируется вся информация о событиях. С помощью высокопроизводительных вычислительных систем проводится анализ всего события, и обработанные данные записываются на массовый накопитель. Как показывают исследования, обработка заданного события будет выполняться с помощью отдельного вычислительного узла. Для каждого события данные будут передаваться к выбранному вычислительному узлу от нескольких сотен источников информации, определяемых RoI. Поэтому уже на втором триггерном уровне используются матричные процессоры, процессорные фермы, состоящие из множества процессоров, и т. д. Причем данные на фермы процессоров передаются с помощью так называемого строителя событий, который, по существу, представляет собой широкополосную сеть или коммутатор сети, содержащий сотни входов и выходов [21–29].

Потоки данных. На рис. 5 приведена блок-схема, иллюстрирующая потоки данных в триггерных системах второго и третьего уровней. Аналоговые сигналы, поступающие от субдетекторов, запоминаются в буферных запоминающих устройствах (ЗУ) конвейерного типа на время работы триггерной системы первого уровня (2–3 мкс). Данные о событиях, принятых на первом уровне, от выходных драйверов (ROD) по оптоволоконным линиям связи передаются в экспериментальный павильон на расстояние 60–70 м и запоминаются в буферных ЗУ (ROB — Readout Buffer), количество которых равно 2000. При этом имеются отдельные буферы для внутреннего трекового детектора, калориметрической системы и мюонного спектрометра.

Оценки показывают, что каждое событие содержит, по крайней мере, 5 RoI. Причем информация, содержащаяся в каждом RoI, обрабатывается отдельно и параллельно с помощью локальных (ЛП) и глобальных (ГП) процессоров триггерной системы. Существенным обстоятельством, усложняющим процесс передачи данных между триггерными уровнями, является то, что для каждого субдетектора в данный момент информация от каждого RoI поступает от разных ROD. Такая проблема возникает вследствие того, что отдельные фрагменты данного события регистрируются с помощью различных субдетекторов и поступают от разных ROD. В дальнейшем эти данные должны запоминаться в одном и том же буферном устройстве. Эта операция

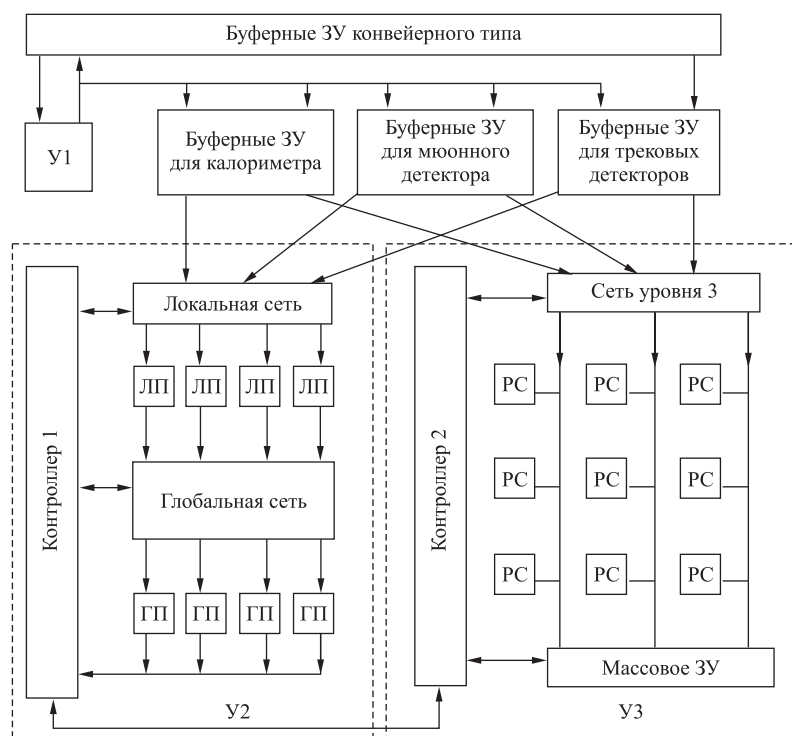


Рис. 5. Блок-схема, иллюстрирующая потоки данных. У1, У2, У3 — триггерные уровни; ЛП — локальные процессоры; ГП — глобальные процессоры; РС — рабочие станции; ЗУ — запоминающие устройства

выполняется с помощью так называемых построителей событий, которые, по существу, представляют собой матричные коммутаторы, используемые в телекоммуникационных сетях. Результаты обработки, полученные с помощью локальных процессоров, передаются через глобальную сеть для дальнейшей обработки в глобальные процессоры. Рассматривается также вопрос об объединении второго и третьего уровней с помощью вычислительных ферм. В таблице приведены оценки требуемой пропускной способности электронных схем для различных детекторов. Приведены также данные, характеризующие объем информации, регистрируемой на одно событие. Используя эти данные и учитывая, что частота событий, поступающих на входы триггерной системы второго и третьего уровней, равна 100 и 1 кГц соответственно, можно оценить, что суммарная полоса пропускания третьего уровня триггерной системы должна составлять несколько десятков Гбайт/с.

Оценка пропускной способности

Субдетекторы	Объем события, кбайт	ПП У2, Гбайт/с	ПП У3, Гбайт/с
Внутренний детектор	770	10	6
Калориметр	400	5,6	3,2
Мюонная система	200	2,4	1,6
<i>Всего</i>	1570	18	1,6
<i>Примечание.</i> ПП У2 и ПП У3 — полосы пропускания триггерных уровней 2 и 3.			

Для обеспечения необходимой полосы пропускания предлагается использовать параллельные коммутаторы, которые обеспечивают необходимую частоту, могут легко расширяться и имеют высокую надежность функционирования. В отличие от обычных коммутаторов с помощью параллельного коммутатора параллельно и одновременно выполняется коммутация данных от N источников на M приемников информации. По определению [21–29] построитель событий, создаваемый на основе АТМ-технологии, представляет собой устройство, содержащее N источников и M приемников данных, соединенных между собой сетью. Основу такой сети составляет АТМ-коммутаторная станция, с помощью которой параллельно выполняется динамическая коммутация данных между передатчиками и приемниками информации. Суть АТМ-технологии рассмотрена в [30]. Одним из существенных недостатков строителей событий, создаваемых на основе АТМ-технологии, является высокая стоимость оборудования. В качестве альтернативы АТМ-технологии может быть использована более простая технология коммутации — гигабитный ETHERNET [31].

4. ТРИГТЕРНАЯ СИСТЕМА ПЕРВОГО УРОВНЯ УСТАНОВКИ ATLAS

Обобщенная блок-схема. Основными устройствами триггера первого уровня являются калориметрический триггер, мюонный триггер и центральный триггерный процессор. На первом триггерном уровне установки ATLAS используется информация, содержащаяся в кластерах, которая регистрируется с помощью калориметрической системы, и трековые данные, считываемые от мюонных триггерных камер. Информация, регистрируемая с помощью внутреннего трекового детектора, на первом уровне не используется. На рис.6 приведена обобщенная блок-схема триггерной системы первого уровня, которая состоит из четырех основных решающих блоков: калориметрического триггера, мюонного триггера, центрального триггерного процессора (ЦТП) [20], устройства выработки триггерного сигнала и системы контроля. На входы триггерной системы первого уровня поступают сигналы

от калориметрической и мюонной систем. Аппаратную основу триггера первого уровня составляют специализированные микросхемы [33] и перепрограммируемые логические матрицы [34–36] (ПЛМ). Уже используются логические матрицы, содержащие до $1,5 \cdot 10^6$ логических элементов, которые работают на частоте свыше 150 МГц [35]. Это позволяет создавать сложные и быстродействующие СП.



Рис. 6. Блок-схема триггерной системы первого уровня установки ATLAS

По существу, триггерная система представляет собой синхронный специализированный процессор конвейерного типа, работающий с частотой 40 МГц. Принцип работы процессора конвейерного типа заключается в том, что поступающая информация частично обрабатывается на первом уровне и с определенной задержкой, определяемой временем решения, передается на следующий уровень, и т. д. В конечном итоге это приводит к понижению частоты поступления событий. В [34] описана триггерная система первого уровня, построенная на основе программируемых логических матриц. Слева на рис. 6 показаны входные сигналы. К ним относятся сигналы, формируемые в триггерных «башнях» калориметров. Они получают путем суммирования импульсов от определенных географически близких ячеек калориметров. Кроме того, на входы триггерной системы поступает также информация от мюонного спектрометра, тактовые импульсы ускорителя, контрольные сигналы и т. д. Причем сигналы от электромагнитного и адронного калориметров суммируются отдельно.

С выходов триггерной системы поступают данные типа RoI, триггерный сигнал, который сигнализирует о завершении операций в первом триггерном уровне, и сигналы чтения данных, которые поступают в буферные запоминающие устройства.

Калориметрическая система. Тот факт, что калориметрическая система стала базовым детектором в экспериментах на LHC, связан с рядом ее положительных качеств.

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

— С помощью калориметров можно детектировать нейтральные частицы.

— Точность измерения координат оси ливня частиц повышается с ростом энергии и может быть лучше 1 мм.

— Сигналы, считываемые от ячеек калориметров, как правило, имеют малую длительность (порядка 10 нс), поэтому имеется возможность создавать триггеры.

— При использовании годоскопических калориметров отпадает необходимость в применении магнитов при высоких энергиях для определения импульсов частиц.

Калориметрическая система установки ATLAS состоит из нескольких субдетекторов. В целом система состоит из жидкоаргонных электромагнитных калориметров (в баррельной части и в торцах), адронных пластинчатых (сцинтилляционных) калориметров, имеющих цилиндрическую форму, адронных торцевых жидкоаргонных калориметров и передних жидкоаргонных калориметров, которые состоят из электромагнитных и адронных секций. Размеры калориметра: длина $\pm 6,65$ м и радиус 4,25 м. Всего имеется $23 \cdot 10^6$ каналов в жидкоаргонном и 10^4 в пластинчатом калориметре. Использование калориметров в установке ATLAS позволяет не только идентифицировать частицы, но и регистрировать струи частиц. Кроме того, использование геометрии типа «аккордеон» позволяет существенно повысить гранулированность детектора и увеличить быстродействие за счет существенного уменьшения зазоров между пластинами. На рис. 7, а приведен общий вид части жидкоаргонного калориметра с геометрией типа «аккордеон» [32]. На рис. 7, б показано развитие электронного ливня с энергией 40 ГэВ. Изображенный трек частицы можно классифицировать как след электрона [32].

Калориметрический триггер. Калориметрический триггер первого уровня представляет собой конвейерную систему, с помощью которой отбираются редкие процессы. Высокая селективность отбора полезных событий характеризуется тем, что при частоте банчей 40 МГц на второй триггерный

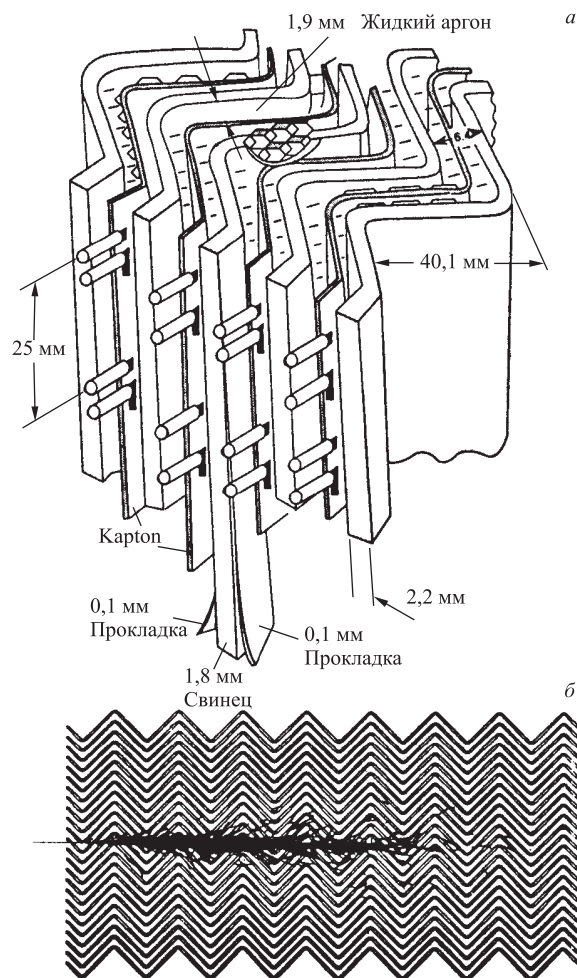


Рис. 7. *а*) Общий вид части жидкоаргонного калориметра типа «аккордеон». *б*) Развитие электронного ливня с энергией 40 ГэВ. Рисунок получен путем моделирования методом Монте-Карло. Изображены только треки заряженных частиц с энергией выше 10 МэВ. Трек частицы в центральной части рисунка можно идентифицировать как электрон

уровень события должны поступать с частотой 75 кГц. При этом в течение 2–3 мкс предварительно идентифицируются изолированные электроны и фотоны, адроны, струи частиц, недостающая энергия, а также вычисляется общая потеря энергии в калориметре. Следует отметить, что недостающая

энергия (missing E_T) вычисляется с помощью поперечных импульсов от идентифицированных изолированных фотонов, электронов и мюонов, струй и неизолированных мюонов, энергия которых не вошла в подсчет энергии какого-либо кластера от струй. Детектирование большой величины missing E_T играет важную роль при исследовании многих физических каналов. В качестве примера можно назвать поиск тяжелого хиггс-бозона СМ с массой в области 50–700 ГэВ в моде распада $H \rightarrow ZZ \rightarrow ll\nu\nu$. Распад Z -бозона на два нейтрино генерирует большую величину missing E_T . Для решения поставленных задач требуется использование специализированных интегральных микросхем и программируемых логических матриц.

Калориметрические ячейки, окна и башни. Первый уровень триггерной системы покрывает поверхность в области псевдобыстрот $|\eta| \leq 5$ и $\phi = 0 - 2\pi$. Триггерная система электромагнитного кластера и ее изолированный адронный триггер используются при $|\eta| \leq 2,5$, поскольку в области ниже этой величины сигналы регистрируются с помощью внутреннего трекового детектора.

Триггерный сигнал формируется с помощью импульсов, регистрируемых в жидкоаргонных и сцинтилляционных калориметрах. Калориметрические ячейки комбинируются в виде триггерных башен. В жидкоаргонных калориметрах триггерные башни формируются путем использования четырех блоков по глубине. При этом сформированные башни имеют гранулированность $\Delta\eta \times \Delta\phi = 0,1 \times 0,1$. Адронные триггерные башни находятся позади электромагнитных триггерных башен и покрывают всю поверхность в направлениях $\eta \times \phi$. Общее количество триггерных башен равно 7200, большинство из которых находятся в электромагнитных калориметрах.

Триггерные окна. Триггерные окна образуются из поперечных размеров соседних триггерных башен. При $\eta = 0$ боковые размеры триггерных башен примерно равны 10×10 см. Радиус Мольера в свинце ~ 1 см. Поэтому боковые размеры электромагнитного ливня равны нескольким см. Электроны и фотоны, попадающие в центральную часть башни, теряют большую часть энергии. В то же время частицы, падающие между двумя башнями, могут терять энергию в двух или более башнях. Для получения равномерного распределения вдоль плоскости, покрывающей калориметр, энергия кластера вычисляется на основе суммы сигналов, регистрируемых в двух соседних башнях. Более точно измерить энергию кластера можно путем добавления данных, полученных в трех или четырех башнях. Однако это может ухудшить разрешение струй.

Калориметрические триггерные алгоритмы. Калориметрическая система первого уровня выполняет четыре базовых алгоритма, с помощью которых идентифицируются частицы — электроны, фотоны, адроны, τ -лептоны. Кроме того, находятся физические объекты, такие как струи, и вычисляются величины недостающей и суммарной E_T , с помощью которых вырабатывается соответствующий триггерный сигнал. Как уже отмечалось выше, в от-

личие от других физических объектов, таких как электроны, фотоны и др., струя строго не определена и в первом приближении идентифицируется с большой величиной теряемой частицами энергии в калориметре. Следует отметить, что эта величина (недостающая энергия E_T) может быть использована для указания на частицы, которые не были протектированы, например, на нейтральные частицы. Процесс реализации первых трех алгоритмов имеет определенное сходство, которое заключается в следующем [2, 33].

Как отмечается в [33], калориметрический триггер разработан с целью локализации электромагнитных кластеров и изолированных адронов. Значительная часть изолированных адронов триггерная система получает от τ -распадов. Путем комбинирования величин потерь энергии в поперечном направлении в пределах триггерного окна формируются следующие триггерные элементы.

— *Электромагнитный кластер* — образуется из четырех возможных сумм двух соседних центральных электромагнитных триггерных башен. Поперечная энергия электромагнитного кластера получается путем суммирования энергий всех нераспавшихся частиц, за исключением нейтрино, мюонов и SUSY LSP (суперсимметричных легких частиц) в калориметре с гранулированностью $0,1 \times 0,1$ вокруг $|\eta| < 3,2$ и $0,2 \times 0,2$ для $|\eta| > 3,2$ в направлении $\eta - \phi$.

— *Сумма потерь энергии в изолированном кластере* — получается путем суммирования потерь энергии в 12 изолированных частях калориметра, расположенных в пределах триггерного окна.

— *Адронный кластер* — состоит из четырех сумм всех сигналов, поступающих от двух соседних центральных электромагнитных триггерных башен, плюс суммарные значения сигналов, регистрируемых во всех четырех центральных триггерных башнях.

— *Суммарные потери энергии от изолированного адрона* — суммарные потери энергии, которые регистрируются в 12 адронных калориметрических триггерных изолированных областях. Такие области могут иметь форму окружностей.

— *Центральная адронная сумма, соответствующая изолированному кластеру*, — идентифицирует RoI-кластер, который содержит максимальное значение локальной величины E_T внутри триггерного окна. Для передачи этой информации RoI-кластер должен иметь большую энергию, нежели соседние кластеры справа, выше или соседние кластеры, расположенные слева и внизу. Эта процедура получила название «декластеризации».

— Внутри RoI-кластера измеряется величина потерь поперечной энергии E_T и сравнивается с восемью порогами.

— Сигналы, поступающие от триггерных элементов, расположенных внутри изолированной области, суммируются и сравниваются с установленными порогами.

— Вместе с данными об идентификации объекта передается также информация о результатах сравнения с порогами. При этом величина множественности увеличивается на единицу.

— Координаты RoI-кластера передаются на триггерную систему второго уровня.

Функции электрон-фотонного триггера заключаются в следующем [20].

— Используя данные, зарегистрированные с помощью электромагнитного калориметра, идентифицировать кандидаты в фотоны и электроны.

— Классифицировать эти частицы в соответствии с величинами потерь энергии E_T и проверять их на изолированность.

— Определять множественность частиц и передавать эти данные в центральный триггерный процессор.

— Обеспечивать качественную дискриминацию между изолированным и электромагнитными ливнями, струями и минимизировать размеры RoI путем точной локализации кандидатов в полезные события.

Входными данными для выполнения электрон-фотонного алгоритма являются множество аналоговых сигналов, поступающих от «триггерных башен» (т. е. от группы близко расположенных счетчиков калориметра) с гранулированностью $0,1 \times 0,1$ в величинах $\Delta\eta \times \Delta\phi$. На рис. 8 вверху слева приведена блок-схема электрон-фотонного триггерного алгоритма. Здесь выделено окно размером 4×4 в электромагнитном и адронном калориметрах. Если в 2×2 -башнях был зарегистрирован электромагнитный кластер, то он идентифицируется как кандидат в RoI. Если же был зарегистрирован электромагнитный кластер в двух башнях, то измеряются потери энергии E_T для электромагнитного ливня. Для окружности, состоящей из 12 электромагнитных «башен», окружающих кластер, используется тестирование на изолированность кластера. В свою очередь, 16 адронных «башен» используются для поиска изолированных кластеров в адронном калориметре.

Основные требования для триггерных объектов, найденных в пределах окна, заключаются в следующем:

— RoI-кластер должен быть равен локальному максимуму поперечной энергии E_T ;

— амплитуды сигналов, поступающих от четырех кластеров с наибольшей энергией, должны быть больше установленного порога;

— общая величина энергии E_T электромагнитного района изоляции должна быть меньше установленного порога;

— общая величина E_T в адронной изолированной области должна быть меньше установленного порога.

Если все эти условия выполняются, то рассматриваемое окно может содержать данные о кандидате в электрон-фотонный триггер.

Гранулированность и алгоритм. Входные данные для процессора, выполняющего алгоритм, поступают от множества (свыше 7000) триггерных

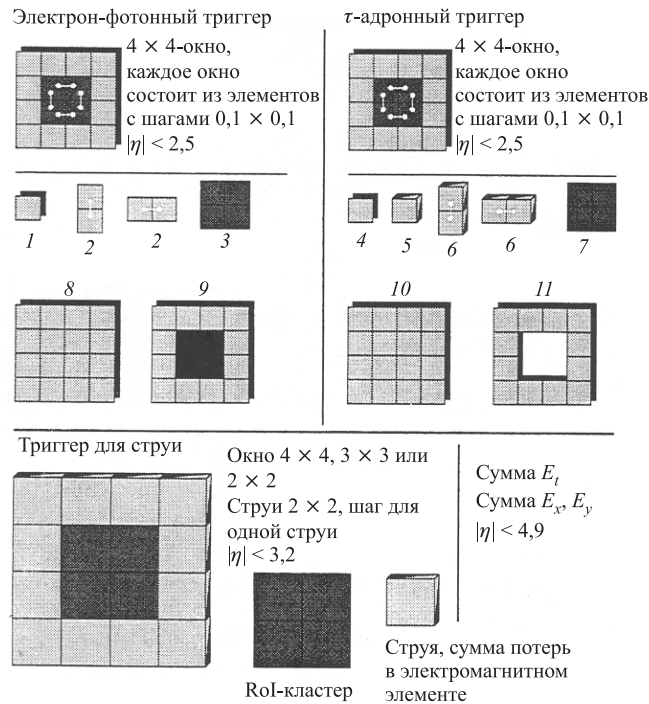


Рис. 8. Калориметрические триггерные алгоритмы. 1, 4 — триггерные элементы ЭМ- и адронного калориметров; 2, 6 — ЭМ-кластер; 3, 7 — RoI-кластер; 5 — триггерные элементы для суммы сигналов от ЭМ- и адронного калориметров; 8, 10 — триггерное окно 4×4 ; 9 — изолированный кластер; 11 — изолированное триггерное окно

башен с гранулированностью $0,1 \times 0,1$ в направлении $\Delta\eta \times \Delta\phi$. Они образуются с помощью аналоговых сумматоров, расположенных непосредственно на детекторах, а в ряде случаев и внутри детектора. Данные для электромагнитного кластера поступают из области псевдобыстрот $|\eta| < 2,5$. Эта область захватывает внутренний трековый детектор и высокогранулированный электромагнитный калориметр. Размер гранулированности выбирается из условия допустимой стоимости и сложности триггерного процессора.

τ -адронный триггер. На рис. 8 вверху справа приведена схема τ -адронного триггера. Необходимость в разработке τ -адронного триггера объясняется исходя из следующих соображений.

— При совпадении сигналов от мюонного и электронного триггеров повышается эффективность обнаружения реакции $Z \rightarrow \tau^+ \tau^-$.

— При совпадении сигналов от τ -адронного триггера с сигналом от схемы, вычисляющей E_T , обеспечивается выработка триггера для распадов $W \rightarrow \tau\nu$ или $Z \rightarrow \tau^+\tau^-$ (при низкой светимости).

— Триггер позволяет идентифицировать большое значение E_T при адронном распаде для калибровки адронного калориметра. При этом используются измеренные величины импульсов частиц с помощью трековых детекторов. Описанный в [37] кластерный процессор обеспечивает центральный триггерный процессор информацией о множественности этих объектов, а также передает на второй уровень триггерной системы данные о RoI. Кластерный процессор обрабатывает данные, поступающие от триггерных башен с гранулированностью $0,1 \times 0,1$ в направлении $\eta - \phi$, покрывая область псевдобыстрот $\pm 2,5$. На входы кластерного процессора поступает 6400 восьмизрядных слов, которые затем преобразуются с помощью мультиплексоров в последовательный код и далее передаются с частотой 800 Мбит. Электроника процессора размещается в четырех крейтах VME.

Триггер для струй. Физическая идея этого триггера формулируется просто: требуется найти локализованную область потерь энергии, соответствующую заданному радиусу. Кроме того, определяются координаты центра струи. Функции триггера заключаются в следующем [38].

— Используя данные, считываемые от калориметрической системы, идентифицировать адронные струи.

— Классифицировать эти струи в соответствии с величинами E_T .

— Определять множественность струй и передавать эти данные в центральный триггерный процессор (ЦТП).

Для реализации вышеназванных требований система триггера для струй должна иметь следующие характеристики:

— высокое энергетическое разрешение как для больших значений потерь энергии 100–2000 ГэВ, так и для небольших значений порядка 50 ГэВ;

— обеспечивать точный подсчет множественности струй;

— выполнять точную регистрацию координат струй в пределах всего калориметра с целью получения минимальных размеров RoI, размер которой программируется и передается на второй уровень триггерной системы.

Каждый алгоритм выполняется в пределах триггерного окна. В [38–40] описано применение программируемых логических матриц и специализированных микросхем для построения процессора, с помощью которого находится и общая сумма потерь энергии E_T у всех калориметров (ЭМ и др.) (см. рис. 10). Для реализации струйного алгоритма используется 64 модуля, каждый из которых обрабатывает 2×8 ячеек в области $\eta \times \phi$. Координаты потенциального кандидата в струи-кластеры определяются путем суммирования энергий ячеек в окне размером $0,4 \times 0,4$ с добавкой 0,2 и путем идентификации локального максимума. Струя-кластер идентифицируется путем сравнения суммарной поперечной энергии в пределах окна $0,4 \times 0,6$ или $0,8 \times 0,8$,

которая превышает установленный порог и ассоциируется с позицией RoI. Причем все три размера окон вычисляются параллельно. Восемь комбинаций порогов энергий и размеров окон используются в триггерном меню, с помощью которого данные о физических объектах комбинируются соответствующим образом и обрабатываются с помощью центрального триггерного процессора.

На рис. 8 внизу слева приведен алгоритм, с помощью которого идентифицируется кластер струй. Размеры (темные области рисунка) и ассоциированные с ними позиции RoI заштрихованы черными линиями. Для кластера струи размером $0,6 \times 0,6$ позиция RoI может быть в одном из четырех окон.

Данные обрабатываются с частотой 80 МГц.

5. КАЛОРИМЕТРИЧЕСКАЯ ТРИГГЕРНАЯ СИСТЕМА ПЕРВОГО УРОВНЯ

Калориметрическая триггерная система первого уровня разделена на три функциональные части: предпроцессор, кластерный процессор и процессор струя/энергия. Предпроцессор выполняет различные операции над аналоговыми сигналами, такие как преобразование аналоговых сигналов в 10-разрядный цифровой код и вычитание пьедесталов. Затем цифровые данные передаются на кластерный процессор и процессор струя/энергия, которые работают параллельно. Цифровые данные, получаемые на выходах предпроцессора, определяют величину поперечной энергии, которая синхронизирована с соответствующими банчами. Кластерный процессор эти данные выполняет для всех сигналов, поступающих от триггерных башен в области псевдобыстрот $|\eta| < 2,5$, а для процессора струя/энергия $|\eta| < 4,9$. Для этого же процессора сигналы от триггерных башен с более грубой гранулированностью $0,2 \times 0,2$ по скрученным парам проводов в аналоговой форме поступают на триггерную систему.

Калориметрическая триггерная система первого уровня представляет собой группу конвейерных процессоров, основная функция которых состоит в том, чтобы регистрировать редкие физические события, частота поступления которых уменьшается от 40 МГц до 75 кГц. В течение 2–3 мкс ведется поиск изолированных электронов и фотонов, адронов, струй, вычисляется глобальная и суммарная энергия и нестрого определенная величина недостающей энергии, которая является функцией общих потерь поперечной энергии E_T и характеризует наличие дисбаланса в общих потерях энергии. Прежде всего, эта информация содержится в RoI и окончательно обрабатывается на втором триггерном уровне. Причиной дисбаланса может служить частица, которая вышла из калориметра (например, нейтрино или нейтральные частицы), и требуется определить наличие подобных феноменов и их природу. Для этих

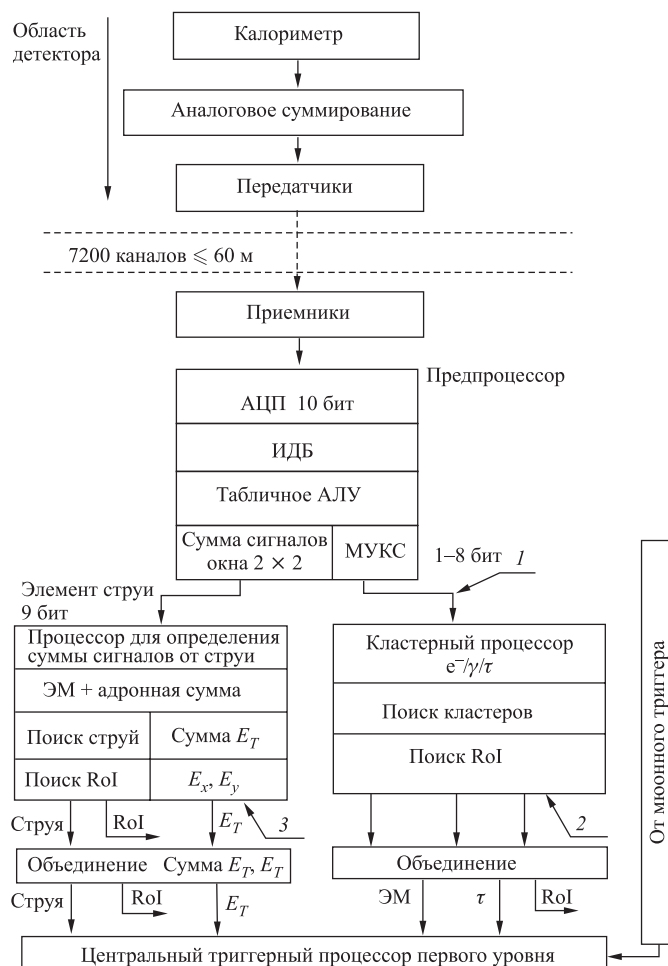


Рис. 9. Блок-схема калориметрического триггера. ИДБ — идентификатор банчей; МУКС — мультиплексор; 1–8 бит (триггерные башни); I — последовательная линия передачи со скоростью 800 Мбит/с; 2 — магистраль с пропускной способностью 160 Мбит/с; 3 — магистраль с пропускной способностью 80 Мбит/с

целей вычисляются проекции общих потерь на плоскость x, y , которая перпендикулярна оси z (величины E_x, E_y).

Как следует из рис. 6 и 9, где изображены блок-схемы триггера первого уровня и калориметрического триггера первого уровня, источниками входной информации для калориметрической системы первого уровня являются

суммарные аналоговые сигналы, поступающие от триггерных башен всех калориметров установки ATLAS с дискретностью $\Delta\eta \times \Delta\phi = 0,1 \times 0,1$. Выше области псевдобыстрот $|\eta| = 2,5$ размеры башен увеличиваются, и при $\eta > 3,2$ увеличение становится невозможным. Общее количество аналоговых сигналов, которые получают при суммировании импульсов непосредственно от башен электромагнитных и адронных калориметров, равно 7200. Эти сигналы передаются в экспериментальный павильон, который расположен на расстоянии 70 м, к предпроцессору. По существу, предпроцессор представляет собой интерфейс для аналоговых сигналов и выполняет следующие операции: оцифровка сигналов с помощью быстродействующих АЦП, вычитание пьедесталов и фильтрация помех. Кроме того, в предпроцессоре содержатся быстродействующие цифровые сигнальные процессоры, с помощью которых вычисляются потери энергии в калориметрах в поперечном направлении и результаты «привязываются» к соответствующим им банчам. Предпроцессор, описанный в [37], содержит 128 модулей, выполненных в стандарте VME. Известна еще одна разработка предпроцессора, выполненная на основе специализированных модулей [33].

Предпроцессор состоит из восьми крейтов, каждый из которых содержит по 16 процессорных модулей. В свою очередь, каждый модуль обрабатывает данные, поступающие от 16 триггерных башен. Результаты обработки в последовательном коде передаются в кластерный процессор [40].

Кластерный процессор. Остальная часть калориметрического триггера является полностью цифровой и разделена на две части. Одна часть — кластерный процессор — выполняет поиск электронов, фотонов, адронов и τ -лептонов с большими импульсами p_T , превышающими один из заданных порогов. Кроме того, кластерный процессор осуществляет поиск и счет электромагнитных кластеров с изолированными электронами и фотонами. Алгоритмы для выработки электрон-фотонного, τ -адронного триггеров, а также для поиска изолированных кластеров используют информацию, поступающую от триггерных окон с размерами 4×4 [33].

Другая часть кластерного процессора (процессор для определения суммы сигналов от струи) выполняет поиск и вычисление больших потерь, определяет недостающую энергию и общую скалярную величину потерь энергии E_T . Для электрон-фотонного триггера имеется восемь групп независимо программируемых порогов. В свою очередь, каждая группа порогов может содержать величины для регистрации E_T -кластера, порог для окрестностей электромагнитного калориметра и порог для регистрации адронов [35].

Аналогично для τ -адронного триггера имеется восемь групп порогов, которые также программируются независимо. Каждая группа имеет порог для регистрации потерь E_T -кластера, порог, изолирующий E_T в электромагнитном и адронном калориметрах. Аналогично для струи триггера имеется восемь независимых программируемых порогов, с помощью которых срав-

ниваются потери E_T в окне струи. В свою очередь, размеры окон струи программируются. Суммирование выполняется для всех триггерных башен с целью вычисления вектора missing E_T и общей скалярной величины E_T для конкретного события. Информация на центральный триггерный процессор вместе с величинами установленных порогов передается на расстояние 5 м со скоростью 800 Мбит/с с помощью последовательной линии связи.

Процессор для вычисления потери энергии струи и суммарной потери энергии. Третья часть калориметрического триггера выполняет следующие функции [34]:

- регистрирует струи с большими импульсами;
- вычисляет величину недостающей энергии и общую скалярную величину E_T ;
- ведет поиск и подсчитывает коллимированные струи. Триггерные окна имеют размеры $0,2 \times 0,2$. Выполняется обработка данных, полученных с помощью предпроцессора.

Как видно из рис. 9, информация, содержащаяся в RoI, от триггерной системы первого уровня поступает на второй триггерный уровень. Эти данные вырабатываются с помощью калориметрического и мюонного триггеров. RoI содержит в себе данные о координатах физических объектов и величинах установленных порогов. Данные о координатах соответствуют локальному максимуму поперечной энергии. Далее информация о missing E_T передается для дальнейшей обработки. При этом передаются такие данные, как E_x и E_y , скалярная величина E_T , триггерный сигнал и его суммарная потеря энергии. Следует отметить, что сочетание missing E_T -триггера с одиночным триггером для струи является основой триггера установки ATLAS.

Центральный триггерный процессор. Информация на ЦТП поступает от калориметрического триггера и мюонного триггерного процессора. Функция центрального триггерного процессора состоит в том, чтобы комбинировать информацию, получаемую в триггерной системе первого уровня (калориметрическую и мюонную), а также использовать результаты калибровки, формировать сигнал, с помощью которого информация считывается от конвейерного регистра. В случае положительного решения данные можно передавать на второй уровень триггерной системы. Процессор состоит из трех функциональных блоков. С помощью первого блока формируется окончательный результат решения, полученного на первом триггерном уровне. Второй блок, работая в радиовещательном режиме, передает необходимую информацию на субдетекторы. И, наконец, третий блок обеспечивает прохождение информации на систему передачи данных. ЦТП работает в соответствии с программируемым триггерным меню, которое состоит из 96 пунктов. Каждый пункт задает комбинацию триггерных объектов, маски, приоритеты при обработке тех или иных данных и т. д. [39–41, 43].

Информация на ЦТП поступает от калориметрического и мюонного триггеров. Данные, поступающие с выходов ЦТП, содержат триггерную информацию, которая включает множественность электронов, фотонов, τ -лептонов, адронов, струй, флаги для общей поперечной энергии и общую недостающую энергию. В качестве примера отметим, что электрон-фотонный субтриггер получает для каждого из восьми E_T -порогов трехразрядное слово, содержащее количество электрон-фотонных кластеров, превышающих пороговое значение. Информация, получаемая от величины missing E_T , содержит четыре флажка, с помощью которых определяется, какое из четырех пороговых значений E_T передается. Все субтриггеры и их пороги программируемы и имеют одинаковый формат. В определенный момент времени на входы поступает 160 бит информации. Ниже приводится перечень субтриггеров.

- электрон, фотон: трехразрядный код с 8 порогами для E_T ;
- струя, адрон: аналогичное значение;
- мюон: трехразрядный код с 6 порогами E_T ;
- missing E_T : 4 E_T -порога;
- калибровочные триггеры: один бит на детектор;
- специальные триггеры: несколько бит.

С помощью ЦТП эти (данные) величины комбинируются на совпадения, запреты или «нежелательные требования» с целью получения следующих кандидатов в триггеры: больше двух электронов при $E_T > 10$ ГэВ, больше одного мюона при $E_T > 6$ ГэВ и меньше двух струй при $E_T > 20$ ГэВ.

Одной из важнейших функций триггерной системы первого уровня является идентификация банчей. Это связано с тем, что некоторые сигналы, считываемые от усилителей-формирователей, имеют длительность 45 нс, в то время как следующий сигнал поступает через 25 нс.

Технология. Как отмечалось выше, для построения триггерной системы первого уровня используются специализированные интегральные микросхемы (СИМ) и СП, программируемые логические матрицы (ПЛМ) и высокопроизводительные цифровые сигнальные процессоры [35, 42, 44, 45].

Прогресс в технологии СП. Как отмечается в [44], за последние 15 лет существенно возрос прогресс в технологии СП, которые используются в экспериментах на ЛНС с применением субмикронной КМОП-технологии в условиях высокой радиации порядка 100 кГр. В новом поколении СП с шириной дорожки транзистора 0,13 мкм наряду с высокой плотностью размещения элементов на подложке используется пониженное напряжение питания 1,2–1,5 В вместо 2,5 В, которое применяется в 0,25 мкм-технологии. В настоящее время субмикронная технология наряду с электроникой детекторов широко используется также для создания запоминающих устройств статического и динамического типа и других устройств.

Использование СП для обработки кластеров описано в [33]. Кластерный процессор применяется для измерения поперечной энергии E_T . Он состоит

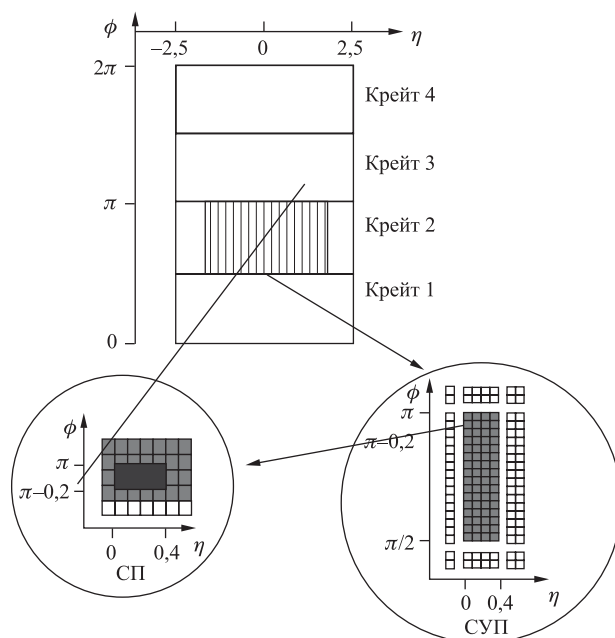


Рис. 10. Организация калориметрического триггера первого уровня на основе модуля и отдельной специализированной микросхемы. Слева показана специализированная микросхема (СП). Справа изображен процессорный модуль (СУП — суперпроцессор)

из 56 кластерных суперпроцессоров (СУП). Работа процессора заключается в следующем. На входы устройства поступают данные от $(\eta, \phi) = (50, 64) \times 2$ триггерных башен. Каждая триггерная башня обрабатывается в пределах выбранного триггерного окна. Процессор состоит из 56 кластерных модулей, расположенных в четырех крейтах. Причем электронные блоки, расположенные в одном крейте, обрабатывают данные, поступающие от одного квадранта в направлении ϕ и $|\eta| \geq 2,5$, и каждый кластерный процессор принимает данные в пределах $\Delta\eta = 0,4$.

Суперпроцессор обрабатывает 4×16 триггерных башен в направлениях $\eta \times \phi$. Для полной обработки матрицы из таких триггерных башен требуется кластерный процессор размером 7×20 . Для построения СУП использовались микросхемы фирмы «Xilinx». Применяется кристалл XCV100E, который имеет $1,57 \cdot 10^6$ элементов И и 404 внешних контакта. Полоса пропускания на магистрали крейта составляет 160 Мбит/с (рис. 10). Для обработки данных, регистрируемых в калориметрах, предлагается использовать также

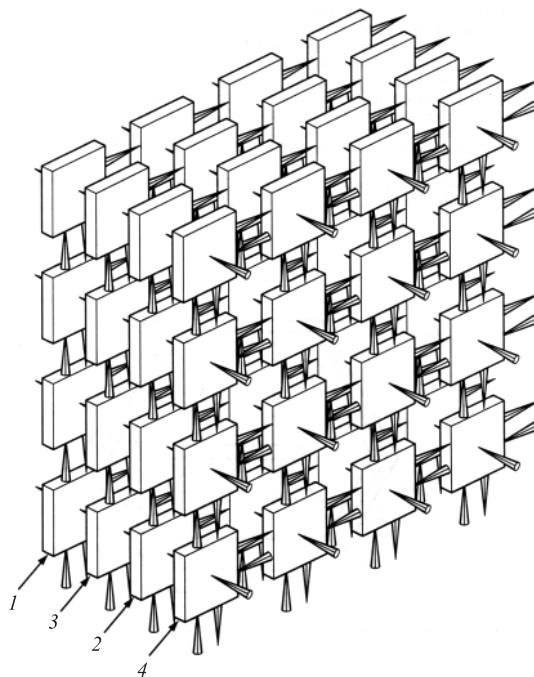


Рис. 11. Концепция трехмерного конвейерного суперпроцессора для триггера первого уровня. 1–4 — слои суперпроцессора

трехмерные конвейерные суперпроцессоры, создаваемые на базе цифровых сигнальных процессоров, содержащих по шесть портов (рис. 11) [40, 42].

6. ТРИГГЕРНАЯ СИСТЕМА МЮОННОГО СПЕКТРОМЕТРА УСТАНОВКИ ATLAS

В течение последнего десятилетия разработке мюонных триггерных систем уделяется серьезное внимание. Так, в эксперименте с фиксированной мишенью WA92 разработан мюонный триггер на базе двух блоков камер с резистивными платами общей площадью 2×6 м. Камеры расположены позади абсорбера из железа. Основой триггерного процессора является двумерная матрица совпадений с программируемыми порогами, что позволяет регулировать ширину дорожки, вдоль которой проходит трек мюона. Матрица имеет 32×32 программируемые дорожки. Время решения составляет 200 нс [46]. В эксперименте FNAL (США) E771 [47, 48] для построения быстрого мюонного или

димюонного триггера применялись также камеры с резистивными платами. Для отбора мюонных треков использовалась двумерная программируемая матрица на основе модулей фирмы «Xilinx».

Рассмотренные выше примеры можно считать прототипами мюонных триггеров для установки ATLAS [49]. Треки мюонов изгибаются в поле магнита, и поэтому информация как о зарядах, так и об импульсах мюонов получается из величины отклонения изогнутого трека по отношению к неотклоненной проекции трека, который исходит из точки встречи банчей. Поэтому концепция мюонного триггера базируется на быстром измерении импульсов мюонов путем использования вектора трека и известной координаты точки взаимодействия. В качестве триггерных детекторов используются камеры с резистивными платами, МПК с тонким зазором, МПК с катодным считыванием и дрейфовые трубки.

Мюонная триггерная система состоит из трех частей: одна часть расположена в барреле, а две другие находятся в торцах мюонного спектрометра. Особенностью мюонного спектрометра является то, что он представляет собой обособленный субдетектор с широкими возможностями. Одной из сложнейших задач является поиск таких тяжелых частиц, как W -бозоны с массой $\sim 80 \text{ ГэВ}/c^2$, которые порождают мюоны с энергией в области ТэВ.

Поиск частиц Хиггса с массой 120–170 $\text{ГэВ}/c^2$, распадающихся на четыре мюона, требует точности 2% или лучше из-за большого фона. Поэтому в спектрометре нужно использовать тонкие детекторы и магнит вследствие доминирования многократного рассеяния. Кроме того, для достаточного захвата частиц требуется большая величина псевдобыстроты η и высокая герметичность для поиска MSSM-частиц. И, наконец, должно быть равное разрешение в пределах заданного предела псевдобыстроты.

Поэтому для удовлетворения рассмотренных выше требований в спектрометре предусмотрены сверхпроводящие тороидальные магниты без сердечника, которые обеспечивают небольшое многократное рассеивание и приемлемое постоянное разрешение по импульсу в пределах заданного интервала величины η . Поле магнита составляет 0,6 Тл. На рис. 12 приведена структурная схема одного квадранта установки ATLAS. Он состоит из блоков триггерных камер.

Триггерные камеры. *Камеры с тонким зазором.* Камеры с тонким зазором представляют собой специальный класс МПК, в которых расстояние между анодом и катодом меньше, нежели расстояние между анодными проволочками, и равно 1,8 мм. В свою очередь, анодные проволочки располагаются параллельно проволочкам дрейфовых трубок. Эти сигналы совместно с сигналами, поступающими от катодных микрополосок, используются в триггерной системе МПК. Специально подобранная смесь газов позволяет работать детектору в насыщенном режиме, что дает ряд преимуществ [50, 53–55]:

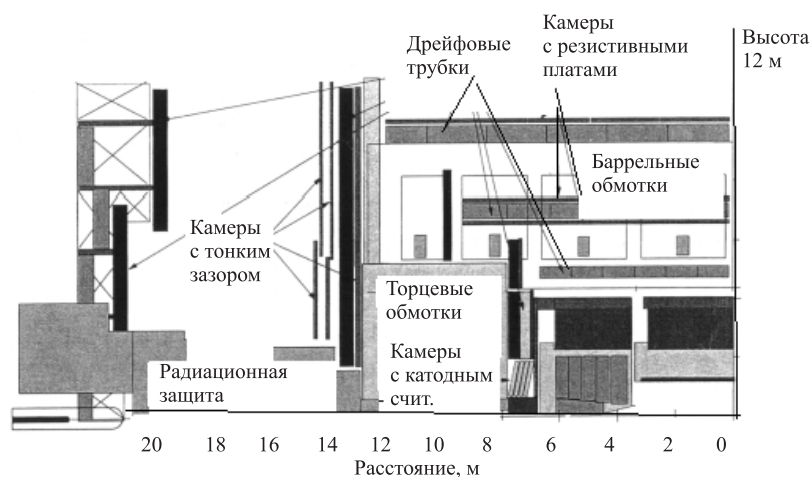


Рис. 12. Общий вид одного квадранта установки ATLAS

— малая чувствительность к механическим деформациям, что упрощает изготовление камер с большими площадями;

— малая зависимость от считываемых сигналов и от угла падающих частиц, вплоть до 40° . Общее количество каналов считывания составляет 800000.

МПК с катодным считыванием используются в мюонных спектрометрах трех установок: ATLAS, CMS и ALICE. Они позволяют одновременно регистрировать две координаты сработавшей частицы. Характерной особенностью таких камер является то, что они содержат симметрические ячейки, у которых расстояние между анодными проволочками и катодными микрополосками равно промежутку между анодными проволочками, типичное расстояние между которыми составляет ~ 2 мм. Определение второй координаты достигается путем сегментирования катода и интерполяции величин зарядов между соседними микрополосками [55].

Камеры с резистивными платами представляют собой газонаполненные детекторы, которые обеспечивают типичное пространственное разрешение 1 см на 1 нс с цифровым считыванием. Базовая конструкция детектора состоит из двух параллельных резистивных бакелитовых плат толщиной ~ 2 мм, разделенных узким газовым промежутком. Между платами находится тонкая резистивная прокладка толщиной 2 мм. Напряженность электрического поля составляет 4,5 кВ/мм. Обычно камера работает в лавинном режиме.

Характерной особенностью таких камер является то, что в них отсутствуют проволочки, а сигналы считываются от микрополосок, расположенных перпендикулярно в двух плоскостях. Важным свойством камер с рези-

стивными платами является возможность их использования для построения детекторов для времяпролетной техники на больших площадях. Так, для установки ALICE разработан детектор площадью $0,16 \text{ м}^2$ с временным разрешением 50–75 пс [56].

Мониторные дрейфовые камеры (трубки). Базовым детекторным элементом дрейфовых камер являются алюминиевые трубки диаметром 30 мм и толщиной 400 мкм. В центре трубки помещена тонкая сигнальная проволока. Длина трубок варьируется в пределах 0,7–6,3 м. Всего для мюонного спектрометра должно быть изготовлено $37 \cdot 10^4$ дрейфовых трубок с разрешением 80 мкм. Свыше 60000 трубок изготовлены в ОИЯИ [51]. Из трубок монтируются дрейфовые камеры. Общая поверхность мюонной «шубы» составляет 5500 м^2 . Более подробно дрейфовые камеры, предназначенные для мюонного спектрометра установки ATLAS, описаны в [52]. Мониторные дрейфовые трубки работают в условиях больших потоков нейтронов, фотонов и заряженных частиц. Типичный поток фотонов равен $10^3 \text{ с}^{-1} \cdot \text{см}^{-2}$. Однако он может достичь $6 \cdot 10^3 \text{ с}^{-1} \cdot \text{см}^{-2}$ во внутренней области торцевой части мюонного спектрометра. Поток нейтронов находится в пределах $(3–15) \cdot 10^3 \text{ с}^{-1} \cdot \text{см}^{-2}$.

Мюонная триггерная система в барреле. В мюонном спектрометре в барреле, который покрывает область псевдобыстрот $|\eta| < 1,05$, детектор, созданный из дрейфовых трубок, используется для точного измерения треков частиц, в то время как детекторы (камеры), состоящие из резистивных плат, применяются для выработки триггерных сигналов. Количество каналов в триггерных камерах 350000, время задержки 2,5 мкс. Первый уровень мюонной триггерной системы отбирает частицы с двумя различными по величине импульсами: триггер с низким $p_T \cong 5,5 \text{ ГэВ}/c$ и с высоким p_T , величина которого около $20 \text{ ГэВ}/c$ [58].

Мюонный триггер в области барреля позволяет идентифицировать кандидатов в мюонные треки, координаты которых имеют программируемые пороги. На рис. 13 приведен общий вид мюонной триггерной системы в продольном направлении. В системе используются камеры с резистивными платами, которые образуют три станции RPC1–RPC3. Каждая из этих станций состоит из двух детекторных плоскостей. В свою очередь, каждая плоскость камеры содержит микрополоски, ориентированные в направлениях r и ϕ и расположенные по разным сторонам детектора. Причем z -микрополоски расположены параллельно магнитному полю, а ϕ -микрополоски ориентированы перпендикулярно к плоскостям дрейфовых трубок. Детектор работает в лавинном режиме. Таким образом, система из семи камер с резистивными платами, расположенными концентрически, обеспечивает регистрацию информации в плоскости, где треки отклоняются, и в плоскости, где треки не отклоняются.

Импульс мюона p_T определяется путем быстрого совпадения сигналов, поступающих от микрополосок, расположенных в различных

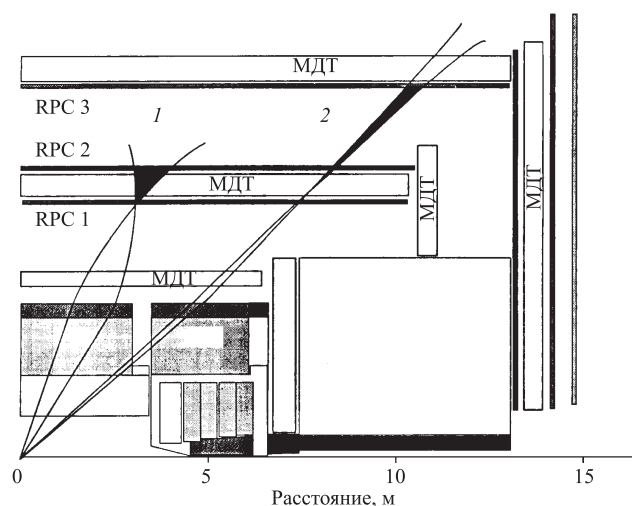


Рис. 13. Схематическое изображение мюонного триггера первого уровня в области барреля: 1 — треки мюонов с небольшими импульсами p_T ; 2 — треки мюонов с большими импульсами p_T . RPC1–RPC3 — камеры с резистивными платами; МДТ — мониторные дрейфовые трубки

плоскостях [56, 57]. Логика отбора мюонов с малыми и большими импульсами заключается в следующем. Триггерный сигнал от частиц с небольшим импульсом образуется путем мажоритарного совпадения трех из четырех импульсов, поступающих от четырех детекторных плоскостей средних станций RPC1 и RPC2, в то время как триггерный сигнал от частиц с большим импульсом получается путем совпадения сигналов, поступающих от станции RPC3 и сигнала от триггера с малым импульсом. С целью повышения надежности работы триггерной системы алгоритм регистрации мюонов выполняется дважды: один раз для проекции η и один раз для ϕ -координаты. Кроме того, триггерные детекторы используются также для выработки сигналов в плоскостях r , ϕ и r , z .

Триггерные камеры в области барреля в направлении ϕ сегментированы на 24 так называемых больших и 8 малых секторов. Вдоль оси z сегментация направлена непосредственно к вершине взаимодействия. Данные, относящиеся к импульсам p_T , считываются от детекторов, где располагаются отклоненные магнитным полем треки. В то же время информация, регистрируемая от неотклоненных треков, используется для фильтрации шумов, вызываемых низкоэнергичными фотонами, нейтронами и заряженными частицами. Кроме того, эта информация необходима для локализации мюонного трека на втором уровне мюонной триггерной системы.

Программируемая матрица совпадений. Логика триггера базируется на основе специализированных матриц совпадений с шестью программируемыми порогоми (рис. 14). Матрица является ключевым устройством мюонной триггерной системы в баррельной и в торцевых частях. Ее основные функции заключаются в следующем [50, 58–61]:

- прием и формирование сигналов от камер с резистивными платами;
- маскирование входных и выходных сигналов;
- декластеризация и выполнение мажоритарной логики;
- выполнение триггерного алгоритма, идентификация кандидатов в мюонные треки и классификация частиц в соответствии с величинами p_T ;
- форматирование выходных данных и их преобразование из параллельного кода в последовательный.

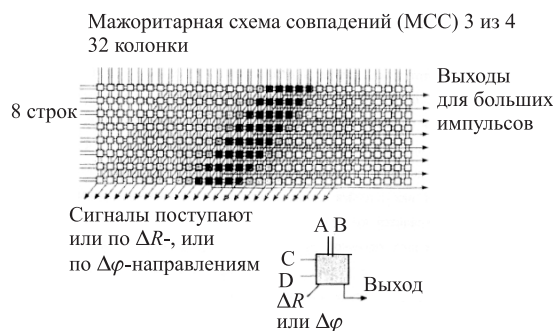


Рис. 14. Блок-схема матрицы совпадений

Пороги программируются в пределах 5–35 ГэВ/с. Сигналы на входы матрицы совпадений подаются от электроники, которая расположена непосредственно на детекторах. Величина порога поперечного импульса задается шириной дорожки в матрице совпадений. Размер матрицы совпадений, описанной в [50, 61], составляет $32 \times 48 \times 3$ (если потребуется, то триггерная система может работать одновременно с тремя порогами.) Матрицы совпадений смонтированы около детекторов. Они могут использоваться также для выполнения и других логических операций. Данные от мюонной триггерной системы первого уровня в виде RoI поступают на второй уровень, с помощью которого восстанавливаются треки мюонов. Поскольку временное разрешение мюонной триггерной системы должно быть меньше, нежели период встречи банчей (25 нс), то для мечения банчей в матрице совпадений используется временной интерполятор 40×8 МГц.

Первый уровень мюонной триггерной системы для передней (торцевой) области барреля. Необходимость использования в передней части установки

камер с тонким зазором диктуется тем, что в этой области системы мюонные треки имеют большую кривизну и поэтому необходимы детекторы с высокой гранулированностью. Всего в торцевых областях используются 4000 камер с тонким зазором. Они образуют детекторы, состоящие из восьми октантов, имеющих форму «колеса» диаметром 24 м. Сигналы поступают как от анодных проволочек, которые с целью экономии количества каналов регистрации объединяются в группы, так и от катодных микрополосок, общее количество которых составляет 330 К. Причем сигналы, считываемые от проволочек, используются для восстановления треков, в то время как данные, считываемые от микрополосок, используются для выработки триггерного сигнала [59–61].

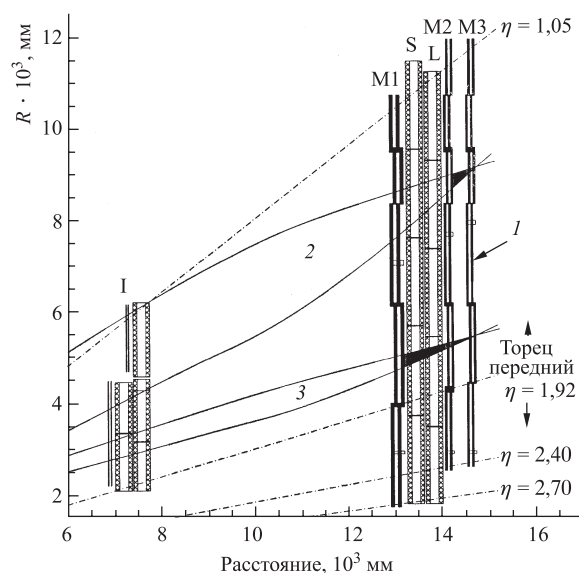


Рис. 15. Вид в продольном направлении системы триггерных камер с тонким зазором. *I* — передняя камера. На рисунке видны траектории мюонов с большими (2) и небольшими (3) импульсами p_T и их триггерные окна. Состав камер: M1 — триплет; M2 и M3 — дуплеты. Камеры S и L представляют собой короткие и длинные мониторные дрейфовые трубки. I — внутренние камеры с тонким зазором, которые в триггере не используются

На рис. 15 приведен продольный вид системы камер с тонкими зазорами, которые используются в передней торцевой части барреля. На рисунке видны траектории мюонов с большими и малыми импульсами. Камеры с тонким зазором образуют восемь слоев и находятся на расстоянии ± 14 м от точки

встречи z . Седьмой слой на рисунке не показан, поскольку он расположен ближе к отметке 6,9 м от точки взаимодействия. Далее, дуплеты M2 и M3 расположены позади мониторинговых дрейфовых трубок. Они обеспечивают данным устройством для определения мюонов с небольшими импульсами. Вместе со станцией M1, расположенной позади дрейфовых трубок, обеспечивается детектирование мюонов с большими импульсами. С целью исключения «мертвых» зон соседние камеры смещены на определенный промежуток.

7. ВТОРОЙ УРОВЕНЬ ТРИГТЕРНОЙ СИСТЕМЫ

Скорость поступления событий на втором уровне триггерной системы снижается в сто раз: от 100 кГц до 100 Гц. В общем, обработку информации на втором триггерном уровне можно разделить на две части: обработка RoI и глобальные вычисления. Как правило, RoI содержит в себе кандидаты в электроны, фотоны, мюоны или струи [62–64]. Обработанная информация параметризуется путем использования данных, содержащихся в RoI, от различных детекторов. В процессе глобальных вычислений комбинируются результаты обработки RoI, регистрируемых в одном или нескольких детекторах. В результате вырабатывается триггерный сигнал. Глобальные вычисления могут выполняться с помощью отдельных быстрых цифровых сигнальных процессоров. Кроме того, для таких вычислений могут использоваться процессорные фермы [65]. Для передачи данных от триггерной системы первого уровня требуется включение построителя событий на базе сети с высокой пропускной способностью (в гигабитном диапазоне.)

Алгоритм для мюонного триггера второго уровня. Назначение мюонного триггера второго уровня заключается в идентификации частиц, регистрируемых с помощью дрейфовых трубок, и вычислении величины поперечного импульса мюона. С этой целью информация, полученная от детекторов с резистивными платами, используется в качестве исходной для определения траектории мюона. Следует отметить, что дрейфовые камеры могут иметь три или четыре слоя дрейфовых трубок. Так, в [62, 63] рассматриваются четырехслойные детекторы, которые используются для точного измерения импульса мюона. Следует отметить, что мюонные триггерные системы второго уровня в барреле ($1,05 < |\eta| < 2,2$) и в торцах ($1,05 < |\eta| < 2,2$) интегрированы в одну подсистему и состоят из одинаковых компонентов. В основном различие состоит в используемых триггерных алгоритмах [64–66].

Мюонный триггер второго уровня базируется на концепции RoI, которая формируется на первом триггерном уровне [62–66]. Оценочная частота поступления мюонов в области барреля составляет 2 кГц при величине порога $p_T > 20$ ГэВ/с и номинальной светимости. Суть алгоритма заключается в следующем. Для каждой RoI алгоритм распознавания треков определяет область

срабатывания дрейфовых трубок. Моделировались те RoI, которые находились в области $24\eta \times 24\phi$. Средняя величина $\eta-\phi$ -окна равна 18×25 . Траектория мюона строится вдоль дорожки, в пределах которой зарегистрированы мюоны. Ширина пути предварительно вычисляется методом Монте-Карло для каждого слоя дрейфовых камер. Идентификация трека мюона выполняется путем анализа трех точек (рис. 16). На рисунке показаны три точки SP1, SP2 и SP3 (координаты), полученные с помощью камер с резистивными платами для мюона с большим импульсом.

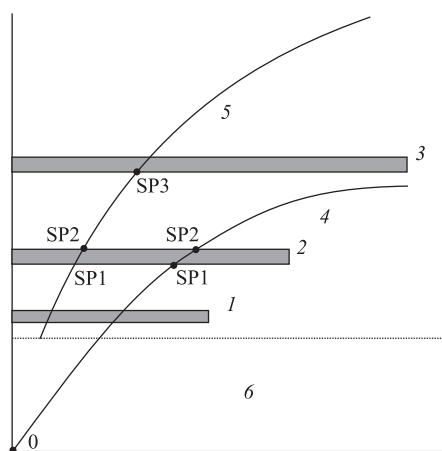


Рис. 16. Метод определения траектории мюона с помощью трех координат. В первом приближении траектории рассматриваются как окружности с большим радиусом: 1, 2, 3 — внутренняя, средняя и внешняя станции; 4 — трек мюона с небольшим импульсом p_T ; 5 — трек мюона с большим импульсом p_T ; 6 — область, где нет магнитного поля

В случае регистрации мюона с небольшим импульсом достаточно использовать две точки SP1 и SP2, а третьей точкой служит точка взаимодействия, которая заведомо известна (точка $x = y = z = 0$). Далее, траектория мюона для каждой мюонной камеры представляется в виде прямых сегментов, которые, по сути, являются хордами дуг, полученных от пересекающихся окружностей. Такое допущение возможно, поскольку радиус траектории мюона с небольшим импульсом составляет порядка 30 м, что намного больше толщины трубки (34 см). Для сработавших микрополосок требуется выполнение следующего условия: $\Delta_{res} < \Delta$ путь (камера, слой), где Δ_{res} представляет собой отклонение координаты сработавшей частицы от прямой линии.

Следующий этап состоит в том, чтобы измерить импульс мюона. В этом случае используются координаты мюонного трека, реконструированного на

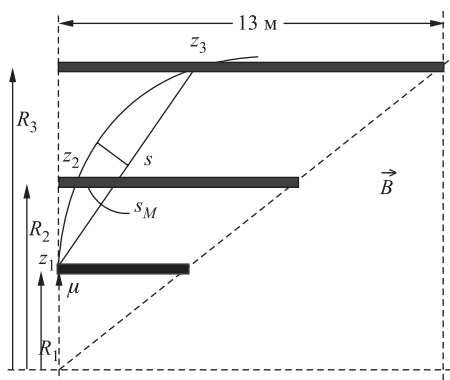


Рис. 17. Измерение параболы в магнитном поле $s_M = \left[\frac{z_3 - z_1}{R_3 - R_1} (R_2 - R_1) + z_2 \right] - z_2$.
 s — часть параболы; s_M — кривизна параболы

предыдущем шаге. Импульс мюона определяется путем измерения кривизны траектории мюона в магнитном поле, которую в первом приближении можно рассматривать как параболу. Кривизна параболы измеряется с помощью трех координат, зарегистрированных с помощью дрейфовых трубок с учетом позиции мюона в плоскости r, ϕ . Для вычисления импульса мюона используется табличная арифметика (рис. 17) [64].

Требования к триггерной системе в проекте SLHC. Физические возможности LHC могут быть существенно повышены после реализации в 2015 г. проекта SuperLHC (SLHC) с ожидаемой светимостью $10^{35} \text{ см}^{-2} \cdot \text{с}^{-1}$ [67]. Увеличение светимости на порядок может обеспечить измерение константы связи поля Хиггса с другими полями и увеличить достижимые массы частиц на 20–30%. При этом необходимо учитывать наложение большого количества событий в одном банче и возможность увеличения частоты банчей от 40 до 80 МГц. Поэтому необходимы исследования, направленные на изменение и модификацию различных субдетекторов и триггерных систем на установках ATLAS и CMS.

Работа на SLHC с частотой банчей 80 вместо 40 МГц приведет к уменьшению наложений и улучшит выполнение триггерных алгоритмов. Кроме того, уменьшится объем данных от тех детекторов, у которых временное разрешение меньше по сравнению с периодом времени банчей 12,5 нс. Следует отметить, что увеличение частоты банчей от 80 до 160 МГц или больше требует от детекторов временного разрешения 6,25 нс и меньше, для того чтобы корректно идентифицировать данные с соответствующими им банчами.

Большинство существующих детекторов имеют достаточное временное разрешение для того, чтобы надежно функционировать при частоте банчей 80 МГц. Как следствие этого, практически не требуется переделки электроники детекторов и вычислительных процессоров, связанных с триггерными примитивами, хотя работа при частоте 80 МГц потребует модификации большинства триггерных систем.

8. ОСНОВНЫЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ УСТАНОВКИ CMS

Установки ATLAS и CMS похожи во многих отношениях. Основными детекторами являются трековые детекторы, калориметры (электромагнитные и адронные), эффективные мюонные системы, внутренние полупроводниковые трековые детекторы и специализированные магниты. Одним из принципиальных различий между установками является то, что в установке CMS детекторная система создана внутри сверхпроводящего соленоида с большим магнитным полем 4 Тл, которое обеспечивает разработку компактной мюонной системы. Кроме того, в установке CMS уже на первом триггерном уровне восстанавливаются фрагменты треков мюонов [68, 69].

Преимущества соленоидального поля по сравнению с тороидальным заключается в следующем [70].

— Поскольку поле параллельно пучку, отклонение мюонных треков происходит в поперечной плоскости. В этой плоскости малые размеры пучка определяют позицию вершины события с высокой точностью (лучше 20 мкм). Строгое отклонение в поперечной плоскости позволяет использовать для построения триггера точку начала вершины.

— Измерение импульса в соленоиде начинается при радиусе $R = 0$, в то время как для тороида оно начинается после абсорбера (типично при $R > 3$ м).

— Имеется опыт в создании и использовании больших соленоидальных магнитов в таких физических установках, как ALEPH, DELPHI и др.

Установка CMS представляет собой компактный соленоидальный детектор, создаваемый для изучения физических процессов при высокой светимости, которая будет достигнута в pp -взаимодействиях и столкновениях тяжелых ионов. Потенциально интересными событиями являются частицы Хиггса в SM, суперсимметричные или другие ранее неизвестные частицы, а также WW , ZZ , $W\gamma$ и многие другие. Установка CMS разработана, прежде всего, для измерения параметров мюонов, поскольку множество физических процессов, подобно распаду Хиггса $H \rightarrow ZZ$ и $H \rightarrow 4\mu$, порождают мюоны. Радиационные условия и максимальная светимость пучка такая же, как и на установке ATLAS. Детекторы CMS оптимизированы для поиска хиггс-бозонов SM в пределах энергии 90 ГэВ–1 ТэВ. Другой важной проблемой является поиск суперсимметричных объектов, сопровождающих частицы в SM.

Кроме того, мюоны обеспечивают хорошие условия для изучения свойств t - и b -кварков, CP -нарушения и физики тяжелых ионов.

Помимо мюонной системы, в процессе измерения мюонов используется также внутренний трековый детектор (особенно при малых импульсах p_T). С помощью калориметров можно фильтровать другие типы частиц, а также определять, является ли мюон изолированным или ассоциируется со струей.

Высокая энергия (14 ТэВ) коллайдера и большая светимость ($10^{34} \text{ см}^{-2} \cdot \text{с}^{-1}$) предъявляют жесткие требования к детекторам и электронной аппаратуре.

— Большая частота событий (около 10^9 Гц), которая может быть понижена с помощью многоуровневой триггерной системы до 10–100 Гц, позволяет записывать такие данные на массовый накопитель или передавать на большие расстояния с помощью коммуникационных сетей.

— Банчи протонов следуют с интервалом 25 нс при упругих взаимодействиях. Поэтому используемые детекторы должны иметь высокую гранулированность, что, в свою очередь, требует большого количества каналов регистрации.

— Большая частота протон-протонных взаимодействий создает высокий уровень радиации. Поэтому требуется создание радиационно стойких детекторов и электронных схем усиления и считывания сигналов.

— Вследствие большого объема считываемой информации необходимо использовать мощные специализированные процессоры, программируемые логические матрицы, быстродействующие оптоволоконные средства передачи данных и высокопроизводительные компьютеры для окончательной обработки данных.

Общие характеристики детекторов установки CMS приведены в [68–77]. С учетом вышеупомянутых и других факторов установка CMS представляет собой большой детектор, имеющий 22 м в длину и диаметр $R = 15$ м. В установке используется соленоид с внутренним радиусом 2,9 м и длиной 13 м. Такой магнит создает равномерное магнитное поле 4 Тл и обеспечивает высокоточное измерение импульсов мюонов с помощью мюонных камер и центральной внутренней детекторной системы. Соленоид имеет достаточно большую длину, что создает равномерное поле по всей области псевдобыстрот $\eta < 5$. При этом магнитный поток замыкается с помощью железного яра с горизонтальными прорезями, внутри которых располагаются мюонные триггерные камеры. В барреле яра магнита состоит из пяти секций (длиной 2,9 м каждая) в направлении оси z . На рис. 18 приведен общий вид установки CMS. Она состоит из следующих детекторов.

— Внутренний трековый пиксельный детектор [68, 71].

— Калориметрическая система, включающая центральный калориметр и два передних. Центральный калориметр состоит из электромагнитного калориметра [68, 72], в котором в качестве активного вещества используются

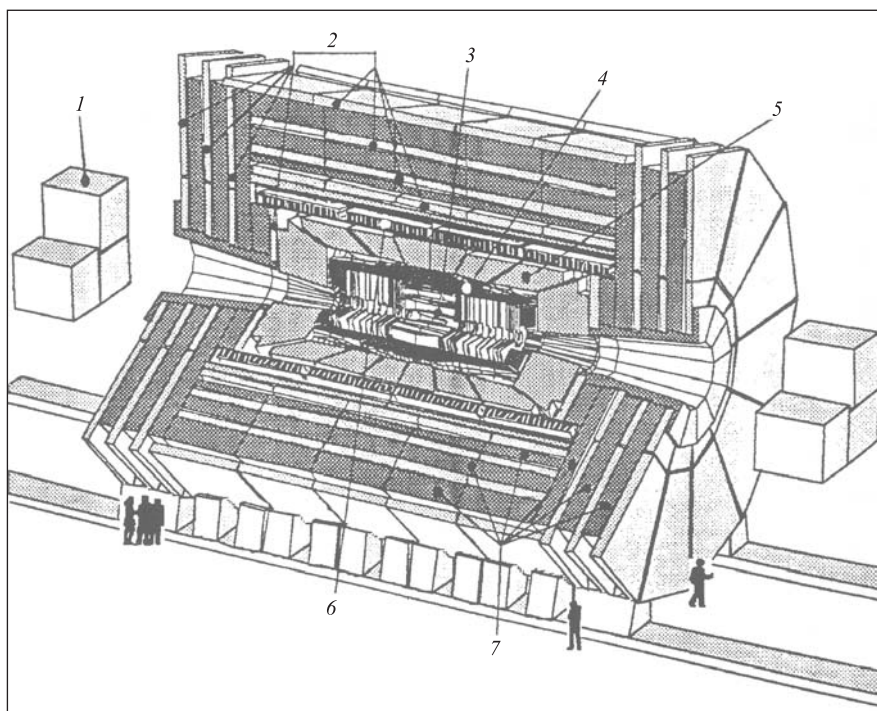


Рис. 18. Общий вид установки CMS: 1 — передний калориметр; 2 — мюонные камеры; 3 — внутренний трековый детектор; 4 — электромагнитный калориметр; 5 — адронный калориметр; 6 — сверхпроводящая обмотка; 7 — возвратное ярмо

кристаллы $PbWO_4$, обеспечивающие высокое разрешение, и адронного калориметра (медь–сцинтиллятор). Оба калориметра состоят из баррельной части и передних торцевых калориметров. В качестве элементов считывания сигналов используются лавинные фотодиоды [73]. В работе [74] рассмотрены свойства электромагнитных калориметров на основе сцинтилляционных кристаллов. Более детально характеристики адронных калориметров (баррельного и торцевого) описаны в [68, 75–77].

Мюонная система состоит из триггерных камер с резистивными платами, дрейфовых трубок прямоугольного сечения, расположенных в барреле, с возможностью идентификации банчей, и камер с катодным считыванием, которые расположены в торцевых частях установки. Общий вес установки 12000 т.

В целом одно событие содержит 1 Мбайт данных. Если рассматривать отдельно, то с помощью калориметров считывается 150 кбайт, от пиксель-

детекторов считывается 100 кбайт, от трековых детекторов поступает 700 кбайт и мюонная система регистрирует 700 кбайт.

В установке CMS, в отличие от установки ATLAS, принята двухуровневая триггерная система. Электроника детекторов состоит из предусилителей, формирователей, аналогово-цифровых преобразователей и буферных устройств памяти, с помощью которых сигналы запоминаются на время решения триггерной системы первого уровня (2–3 мкс) и идентификации банчей. С выходов электроники детекторов сигналы с частотой 40 МГц поступают на входы триггерной системы первого уровня, на выходах которой частота поступления событий понижается до 100 кГц. При этом на первом триггерном уровне, который получил название глобального триггера, параллельно вычисляется до 128 триггерных алгоритмов после каждой встречи банчей.

Для калориметров требуется высокий динамический диапазон (16 бит) оцифровки сигналов, которая выполняется после усиления и формирования импульсов и запоминается в аналоговых буферных ЗУ. Задержка сигналов в буфере равна 2 мкс. Основой триггера второго уровня является построитель событий, создаваемый на базе высокопроизводительной коммутируемой сети. Триггер второго уровня состоит из ферм процессоров, с выходов которых информация с частотой 100 Гц записывается на массовый накопитель.

9. ГЛОБАЛЬНЫЙ ТРИГГЕР ПЕРВОГО УРОВНЯ УСТАНОВКИ CMS

Типичные пороги для триггера первого уровня в установке CMS являются такими же, как и для установки ATLAS.

Триггерная система на установке CMS [78–84, 95]. Обычно триггерные системы понижают частоту событий в соответствии с набором признаков (триггерное меню.) Термин «событие» подразумевает, что при данном столкновении банчей происходит несколько протон–протоновых столкновений. Три независимые мюонные триггерные системы обеспечивают регистрацию до 16 кандидатов в мюоны на каждый банч. При этом вычисляется величина поперечного импульса, направление, заряд и количество мюонов. В так называемом глобальном мюонном триггере, комбинируя эти измерения, можно определять кандидатов в мюоны с заданными параметрами. Одновременно анализируются данные, поступающие от калориметрической триггерной системы для выделения изолированных RoI.

Триггерная система CMS реализуется в несколько этапов. Первый триггерный уровень L1 построен на основе собственных разработок, позволяющих быстро, в течение трех микросекунд, принять решение о наличии или отсутствии полезной информации после очередного столкновения банчей [78]. Первый триггерный уровень CMS базируется на основе данных, поступающих от мюонной и калориметрической систем. Информация, регистрируемая

с помощью внутреннего детектора, так же, как и на установке ATLAS, в триггерной системе первого уровня установки CMS не используется. Триггер второго уровня реализуется с помощью быстродействующих коммерческих процессоров, суперкомпьютеров (фермы) и программного обеспечения. Принципиальным различием триггерных систем двух рассматриваемых установок является следующее.

В то время как ЦТП установки ATLAS функционирует с данными, поступающими от мюонных триггерных систем и калориметров, в установке CMS уже на первом триггерном уровне выделяются отрезки мюонных треков. Как следствие этого, на установке CMS используется двухуровневая триггерная система.

Триггерные субдетекторы. Триггерная система первого уровня состоит из трех подсистем: калориметрического триггера, мюонного триггера и глобального триггера. В свою очередь, в мюонном триггере используются три детекторные системы: система, состоящая из дрейфовых трубок в барреле [85, 86, 91], система МПК с катодным считыванием [87–89, 92–94], расположенная в торцах барреля, и система триггерных камер с резистивными платами, которые расположены в барреле и в торцах [84].

В триггерной системе используются следующие субдетекторы.

— Четыре станции, состоящие из дрейфовых трубок прямоугольного сечения, разделенных на ячейки с целью идентификации банчей. Эти станции расположены в барреле. Каждая станция состоит из двенадцати или восьми плоскостей дрейфовых трубок прямоугольного сечения, которые сдвинуты одна относительно другой на половину ячейки.

— Две станции, состоящие из камер с катодным считыванием.

— Третья система, состоящая из камер с резистивными платами, расположена на дрейфовых трубках и в торцах. Сигналы, регистрируемые этими камерами, обрабатываются независимо путем использования компараторов, которые идентифицируют кандидатов в мюоны. С помощью трековых локальных триггерных систем идентифицируются сегменты треков в мюонных станциях, которые, в свою очередь, с помощью трековых процессоров «сшиваются» в треки отдельно для барреля и для торцов.

Глобальная триггерная система L1. Триггерная система L1 использует сегментированные данные, поступающие от определенных субдетекторов. На рис. 19 приведена блок-схема так называемого глобального триггера первого уровня установки CMS [78–81]. Характерной особенностью триггерной системы L1 является то, что она получает данные не только об энергии или импульсах частиц, но и о местах расположения источников информации и, прежде всего, о псевдобыстроте и азимуте. Для построения триггерной системы широко используются программируемые логические матрицы (FPGA). Триггерная система состоит из следующих блоков.

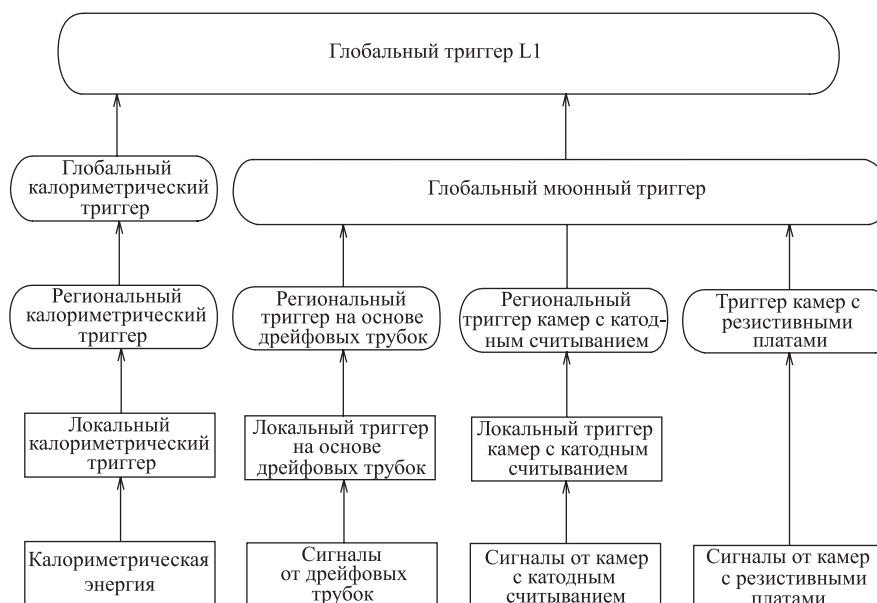


Рис. 19. Блок-схема глобального триггера первого уровня

- Компаратор образцов, который создается на основе камер с резистивными платами.
- Триггер на основе дрейфовых трубок. Он состоит из идентификаторов банчей, идентификаторов времени и корреляторов треков.
- Камеры с катодным считыванием.
- Устройство для поиска треков: так называемый региональный триггер.
- Сортировщик мюонных треков.
- Глобальный триггер. Окончательной целью глобального триггера является выработка сигнала L1A, с помощью которого регистрируется событие.

Триггер первого уровня установки CMS состоит из трех частей: глобального мюонного триггера, глобального калориметрического триггера и глобального (общего) триггера. С помощью этих устройств регистрируются электроны, фотоны, струи, мюоны, общая и недостающая поперечная энергия. Триггерные объекты включают также данные о поперечных импульсах или об их энергии, а также координаты частиц ϕ и η . Они идентифицируются в три этапа. На первом этапе определяются так называемые примитивы, представляющие собой результаты обработки информации о локальном триггере

в калориметрах и в мюонной системе. На последующих двух этапах вычисляются региональные и глобальные специфические величины, регистрируемые с помощью субдетекторов. Алгоритмы, с помощью которых выполняются вычисления в триггере L1, содержатся в глобальном триггере.

В качестве примера можно назвать такие алгоритмы, как программируемые пороги или комбинации триггерных объектов, которые должны быть включены в процессе вычислений. Всего вычисляются 128 алгоритмов параллельно. В качестве примера триггерных объектов можно назвать комбинации: электроны и фотоны, мюоны, струи, τ -частицы, общая и недостающая поперечная энергия с установленными порогами.

Мюонный триггер. Основным назначением мюонного триггера является идентификация мюонов, измерение поперечных импульсов и идентификация банчей. Установка содержит три мюонные системы, основанные на дрейфовых трубках. Они должны удовлетворять следующему требованию: геометрическое покрытие $|\eta| = 2,4$.

С целью повышения надежности в установке CMS предусмотрена возможность выработки мюонного триггера тремя способами: один из них базируется на основе камер с резистивными платами, при втором и третьем используются данные, регистрируемые от дрейфовых трубок и камер с катодным считыванием [78–95]. Другими словами, мюонный триггер использует информацию от всех мюонных детекторных систем. В системе L1 триггера используются четыре мюонные станции на базе дрейфовых трубок с возможностью идентификации банчей (см. ниже) и покрывающих баррельную область. Причем каждая станция состоит из одного или восьми слоев дрейфовых трубок.

На входы мюонного триггера поступает до 16 кандидатов в мюонные треки на каждый банч (до 512 бит). Причем 5 бит предназначено для представления поперечного импульса, 8 бит содержат информацию о направлении трека ϕ и 6 бит используются для передачи величины η . Кроме того, предусмотрено несколько резервных бит и один разряд для контроля четности. Триггерный алгоритм выполнен на основе программируемых логических матриц фирмы «Xilinx» и смонтирован на 9U-платах VME, на трех платах расположены буферные устройства и схемы синхронизации [80].

Камеры с катодным считыванием имеют форму трапеции. Каждый блок содержит шесть слоев камер. С помощью локального триггера идентифицируются сегменты треков в мюонных станциях, которые затем «сшиваются» в виде мюонных треков с помощью трекового процессора. Причем эта процедура выполняется отдельно для баррельной области и для торцевых частей установки. Следует отметить, что для камер с резистивными платами отсутствует разница между локальными и региональными триггерными системами. Они просто объединены. Глобальные величины (мюонные и калориметрические) поступают на входы глобальной триггерной системы установки CMS, с выходов которой информация поступает в конвейерную память. Макси-

мальная частота передачи данных от триггера первого уровня установки не должна превышать 100 кГц. Базовым принципом триггера L1 является то, что, в отличие от других экспериментов, он не формирует гистограммы объектов, превышающие величины потерь энергии или пороги импульсов, как это принято в установке ATLAS. Триггерные объекты сортируются в соответствии с их рангом, который определяется поперечной энергией, поперечным импульсом и количеством информации. Данные об объекте с наиболее высоким рангом передаются в глобальный триггер.

Для каждого банча с помощью глобальной триггерной системы идентифицируются кандидаты в электроны, фотоны и струи с большой поперечной энергией. Кроме того, вычисляется общая величина скалярной и векторной поперечной энергии, подсчитываются струи и оценивается текущая светимость. В триггерной системе первого уровня используются данные, поступающие от мюонных детекторов и калориметров с целью регистрации банчей, которым соответствуют полезные события, поступающие с частотой 100 кГц. Задержка триггера первого уровня равна 3,2 мкс. В течение этого времени происходит 128 встреч банчей. Триггерный алгоритм выполняет идентификацию таких триггерных объектов, как мюоны, электроны, фотоны, струи, τ -лептоны, и выполняет измерение недостающей и общей энергии.

10. ОБРАБОТКА ТРЕКОВОЙ ИНФОРМАЦИИ

Идентификация банчей [96–98]. Базовым решением для мюонного детектора в барреле является создание самозапускающейся системы дрейфовых трубок и трубок, обладающих возможностью идентификации банчей (ДКИБ). Идентификация банчей является одной из труднейших проблем. Принятая в установке схема базируется на так называемой операции усреднения (mean-time) между временами дрейфа трех последовательных слоев дрейфовых камер, сдвинутых на пол-ячейки, и логического блока, состоящего из сдвиговых регистров и элементов И (рис. 20). Используя обозначения, принятые на рис. 20, *a*, среднее время вычисляется из выражения $t_M = (t_A + 2t_B + t_C)/2$. Эта величина, по существу, равна максимальному времени дрейфа электронов в дрейфовой трубке независимо от позиции и угла трека по отношению к трубке. Следовательно, такое вычисление обеспечивает триггерный сигнал в фиксированном интервале времени пересечения мюоном дрейфовой камеры. Если трек имеет наклон, то имеем (рис. 20, *b*): $t_M = t_E + t_F + \Delta t(\theta)$. На рис. 21 изображена блок-схема устройства для регистрации банчей, поясняющая его принцип действия. Сигналы от двух проволочек поступают на две линии задержки и распространяются в противоположных направлениях. Эти сигналы в конце концов совпадают внутри схемы после фиксированного вре-

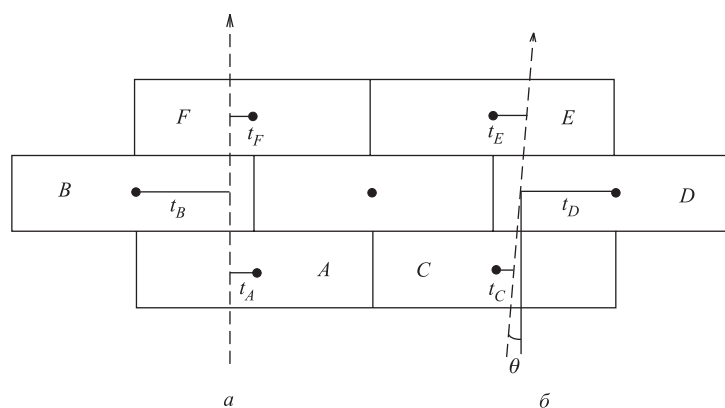


Рис. 20. Принцип работы минтаймера: а) для нормальных треков, б) для наклонных треков. A, B, C, D, E, F — проволочки дрейфовых трубок; t_A, t_B, t_C, t_D, t_E и t_F — времена дрейфа; θ — угол наклона трека

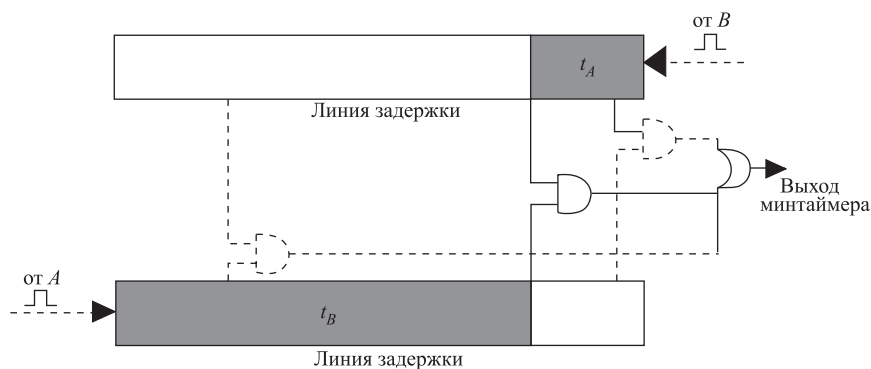


Рис. 21. Принцип работы модуля минтаймера. A и B — выходы дрейфовых трубок; t_A и t_B — время дрейфа

мени t_M . Если устройство выполнить в виде цепочки логических схем, то место, где происходит совпадение, определяет максимальное время дрейфа. По существу, данный блок функционирует как времяцифровой преобразователь и измеряет время дрейфа.

В случае наклонных треков совпадение может иметь место раньше времени ($D + E$) или позже времени ($E + F$) в зависимости от направления наклона. В качестве электронных схем для построения блока идентификации банчей можно использовать обычную электронику, применяемую для созда-

ния современных ВЦП. Особенно эффективно для этих целей используются программируемые логические матрицы (FPGA) [97].

Применение камер с резистивными платами. Одним из эффективных способов отбора полезных событий является регистрация мюонов с большими поперечными импульсами. В установке CMS импульсы мюонов измеряются с помощью детекторов, расположенных в возвратном ярме сверхпроводящего соленоидального магнита, который создает магнитное поле 4 Тл. Если рассматривать цилиндрическую систему координат, то получится, что пучок протонов направлен вдоль оси z , а магнитное поле отклоняет треки мюонов в плоскости r, ϕ . На рис. 22 приведен поперечный вид двух секторов, каждый из которых занимает 30° . Показаны также четыре перекрывающи-

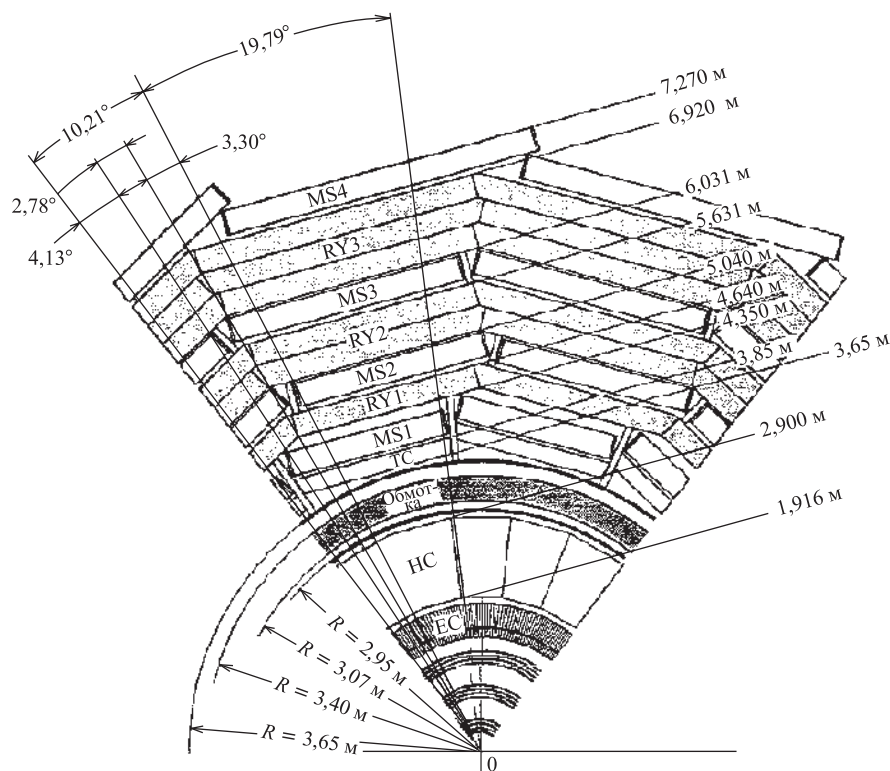


Рис. 22. Поперечный вид секторов мюонных камер, каждый из которых занимает 30° . Изображены четыре мюонные станции MS1–MS4. EC — электромагнитный калориметр; HC — адронный калориметр; R — радиус обмотки; RY1–RY4 — возвратное ярмо

еся мюонные станции MS1–MS4 в области барреля, причем баррельная часть разделена на 12 таких секторов.

Как уже отмечалось выше, первый уровень мюонного триггера основан на мюонных камерах, дрейфовых трубках, камерах с резистивными платами и МПК с катодным считыванием, которые расположены в торцах мюонной системы. С целью повышения надежности разработаны две триггерные системы, дополняющие одна другую. Чтение сигналов в камерах с резистивными платами выполняется с помощью микрополосок длиной 20–90 см. Одним из способов отбора полезных событий, первичная частота которых равна 10^9 с^{-1} , является просмотр мюонов с большими поперечными импульсами p_T . С помощью триггерной системы частота событий должна быть уменьшена в 10^5 – 10^6 раз. Система должна работать без мертвого времени и строго идентифицировать каждый банч. Эти функции выполняются с помощью программируемых компараторов, содержащих набор признаков, характеризующих полезные события [99–104]. Большая неопределенность в оценке скорости событий, помех и уровня шумов, а также возможная регистрация новых физических процессов приводит к необходимости создания гибкой триггерной системы с использованием программируемого компаратора, функция которого заключается в идентификации импульсов мюонов, треки которых проходят четыре слоя детекторов, расположенных в возвратном ядре, где магнитное поле равно 1,8 Тл.

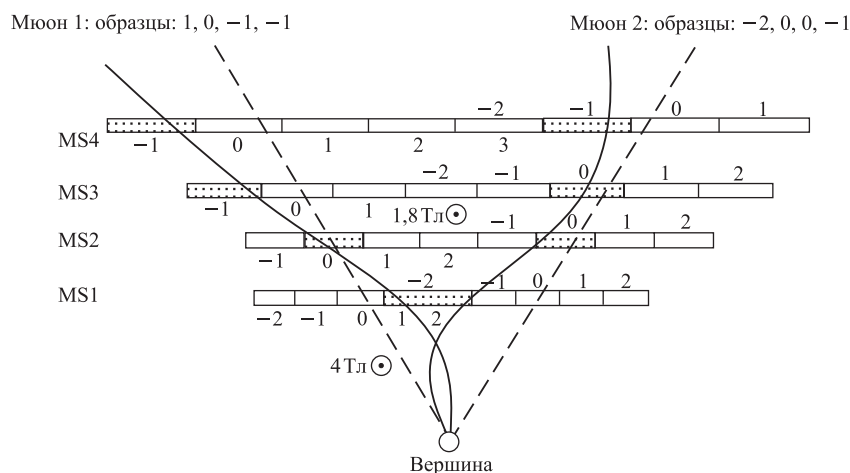


Рис. 23. Пример регистрации мюонных треков. MS1–MS4 — мюонные камеры с резистивными платами

Мюонный трек, проходящий сквозь четыре станции, состоящие из камер с резистивными платами, регистрируется с помощью образцов, микрополосок,

расположенных на камерах (рис. 23) [103]. Очевидно, что величина наклона этих треков зависит от импульсов мюонов. Образцы фрагментов мюонных треков предварительно моделируются и корректируются после реконструкции реального мюонного трека. Требуемое максимальное количество образцов для одного сегмента равно 160. Каждому компаратору соответствует трековый процессор (РАСТ — Pattern Comparator Trigger — триггерный компаратор образцов). Это устройство можно рассматривать как ассоциативное запоминающее устройство, на входы которого поступает 54 сигнала от четырех плоскостей камер с резистивными платами.

Сегментация. Триггерная система на основе камер с резистивными платами покрывает область псевдобыстрот $\eta = 2,1$ с возможностью расширения до $\eta = 2,45$. С целью повышения эффективности работы триггерная система разделена на сегменты. Сегмент (сектор) равен длине одной и ширине восьми микрополосок. Он покрывает $2,5^\circ$ в направлении $\phi \sim 0,1$ единиц и в направлении η при $\Delta\phi = 2,5^\circ$. Эти числа определяют разрешение двух мюонных

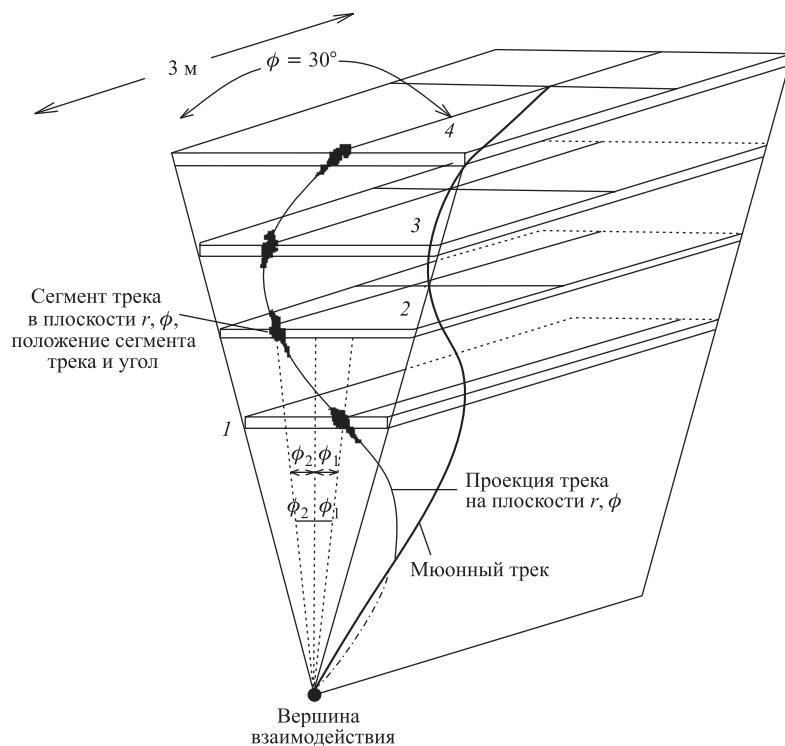


Рис. 24. Сектор мюонной камерной системы, состоящий из четырех станций. Показан трек мюона и его проекция на плоскость r, ϕ . 1–4 — мюонные станции

треков триггерной системы, или, другими словами, два мюонных трека в пределах одного сегмента неразличимы. Кроме того, эти данные можно использовать для определения мюона с наибольшим импульсом. Получение таких данных позволяет определить знак мюона, код, пропорциональный импульсу мюона, и информацию о прохождении мюона сквозь четыре заданные точки. На рис. 24 приведен один сегмент мюонной камерной системы. Показан трек мюона и его проекция в плоскости r, ϕ . Далее информация, поступающая от всех триггерных плоскостей данного сегмента, обрабатывается с помощью триггерного процессора сектора. Основная функция секторного процессора заключается в идентификации мюонов и в измерении их импульсов в четырех слоях детекторов, которые расположены в возвратном яре. Эти измерения выполняются с помощью программируемого компаратора, который фактически представляет собой специализированный процессор. Программируемый компаратор идентифицирует мюоны с наибольшим импульсом в пределах сегмента, величина которого кодируется с помощью шестиразрядного двоичного кода. Старший разряд идентифицирует знак мюона. Все операции выполняются с помощью программируемых логических матриц, что позволяет динамически менять также образцы треков и пороги мюонных импульсов.

11. ПОИСК ТРЕКОВ В БАРРЕЛЕ

Алгоритм поиска мюонных треков. Рассматриваются два подхода к нахождению треков в плоскости, где проекции треков отклонены, и согласование (сравнение) с заведомо установленными образцами, которые получаются путем моделирования. Однако данный метод не получил дальнейшего применения, поскольку требовалось большое количество электронных схем, необходимых для получения приемлемого разрешения и для хранения большого количества образцов. Другой способ, более приемлемый, получил название метода согласования с помощью пар сегментов. Основная идея метода заключается в том, что отдельные сегменты трека объединяются в цепочку, состоящую из отдельных пар сегментов. Если два сегмента, зарегистрированные в двух станциях, оказываются подходящими, то получается часть трека, и т. д. Далее фрагменты треков сортируются.

Поиск треков с помощью мюонных камер в барреле [100–105]. Базовым принципом регистрации мюонных треков является матрица дрейфовых трубок с самозапуском, которые, как отмечалось выше, вместе с соответствующими электронными схемами имеют возможность идентифицировать банчи. Это стало возможным благодаря технике усреднения времени, используемой в триггерной системе для регистрации треков мюонов. Грубая реконструкция

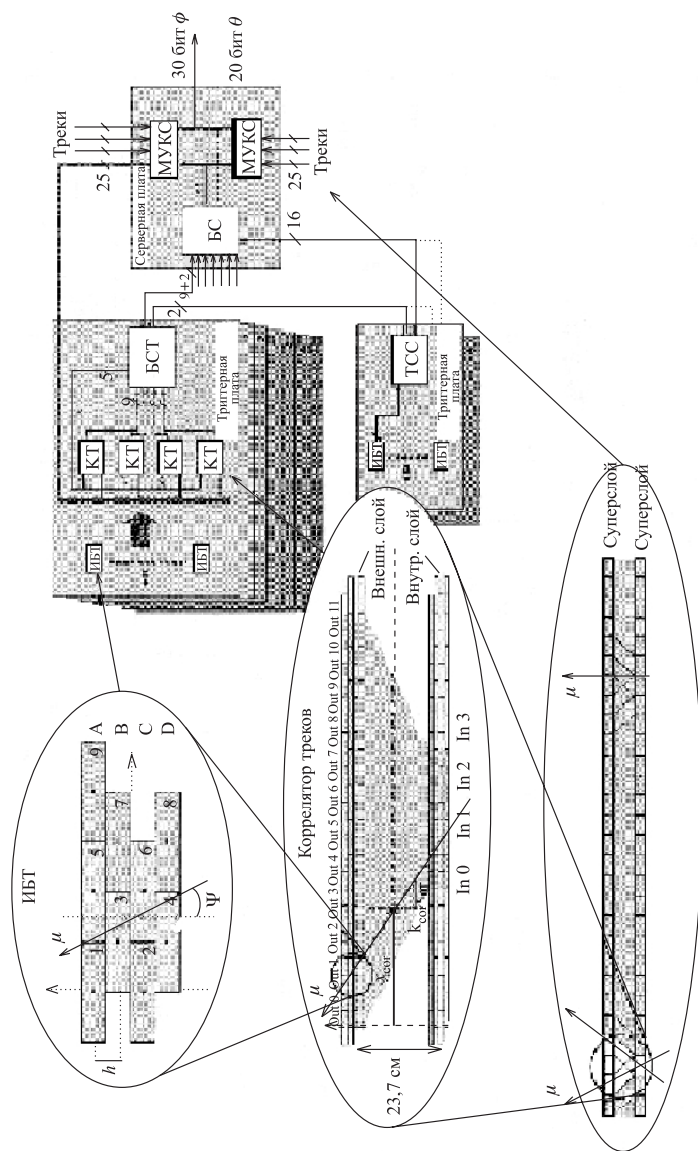


Рис. 25. Блок-схема триггерной системы на основе дрейфовых трубок. ИБТ — идентификатор банчей и треков; МУКС — мультиплексоры; ТСС — блок сортировщиков треков; внизу изображен блок управления триггерной системой; КТ — корректор треков. В верхней части рисунка справа изображен блок управления сортировщиком треков

треков мюонов выполняется с помощью устройства, называемого идентификатором банчей и треков. Следующим важным устройством является трековый коррелятор, с помощью которого уточняется угол наклона кандидата в полезный трек с заведомо установленными значениями. На рис. 25 схематически показана триггерная система на основе дрейфовых трубок. Она состоит из блока управления триггером, коррелятора треков, схемы управления триггером и трекового сортировщика (справа сверху). С помощью блока управления триггером проверяются данные, поступающие от небольших секций дрейфовых камер, с целью уменьшения потока данных на порядок. Базовым устройством является блок сортировщика треков (см. ниже).

Процессор для поиска треков получает данные от двух источников: от дрейфовых трубок с возможностью идентификации банчей в барреле и от камер с катодным считыванием, которые расположены в торцевых областях. Обе системы генерируют триггерные примитивы, которые содержат позицию, угол пересечения станции и качество данных. На рис. 26 приведена схема, иллюстрирующая работу усреднителя времени в процессе сшивания элементов трека в четырех слоях мюонных камер.

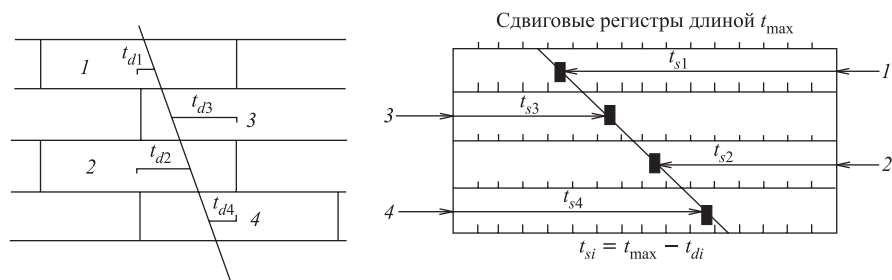


Рис. 26. Пример применения усреднителя времени для «сшивания» мюонных треков. $t_{d1}-t_{d4}$ — времена дрейфа; t_{\max} — максимальное время дрейфа электронов

Камера с возможностью идентификации банчей состоит из 12 слоев дрейфовых трубок, которые образуют три суперплоскости, в каждой из которых четыре плоскости. Причем с помощью двух верхних суперплоскостей измеряются координаты в плоскости отклонения треков ϕ . Продольные координаты вдоль линии пучка (вид η) измеряются с помощью промежуточных суперплоскостей. Кроме того, с помощью устройства корреляции выполняется сравнение углов пересечения кандидатов в полезные треки во внешней и внутренней суперплоскости с заведомо известной величиной. При номинальной скорости дрейфа, равной 50 мкм/нс, максимальное время дрейфа равно $t_{\max} = 400$ нс, что соответствует времени поступления 16 банчей.

Если сформированный сигнал, поступающий от анодной проволоочки, сдвигается в сдвиговом регистре, количество разрядов которого выбрано таким образом, что время сдвига равно максимальному времени дрейфа t_{\max} , то при этом получается трек, практически состоящий из четырех сегментов [100].

Трековый процессор. Как уже отмечалось выше, баррельная часть мюонной системы установки CMS состоит из четырех мюонных станций, разделенных на 5 секций вдоль оси z и на 12 секторов вдоль азимутального угла, что в сумме дает 60 модулей на каждую станцию (рис. 27). Причем каждому модулю соответствуют триггерные детекторы и дрейфовые камеры [103]. Дрейфовая камера состоит из двух так называемых суперслоев, состоящих из дрейфовых трубок. С помощью одного из них проводятся измерения в плоскости отклонения r, ϕ , а с помощью другого — измерения, где треки не отклоняются. В свою очередь, каждая суперплоскость составлена из четырех камер, сдвинутых одна относительно другой на пол-ячейки.

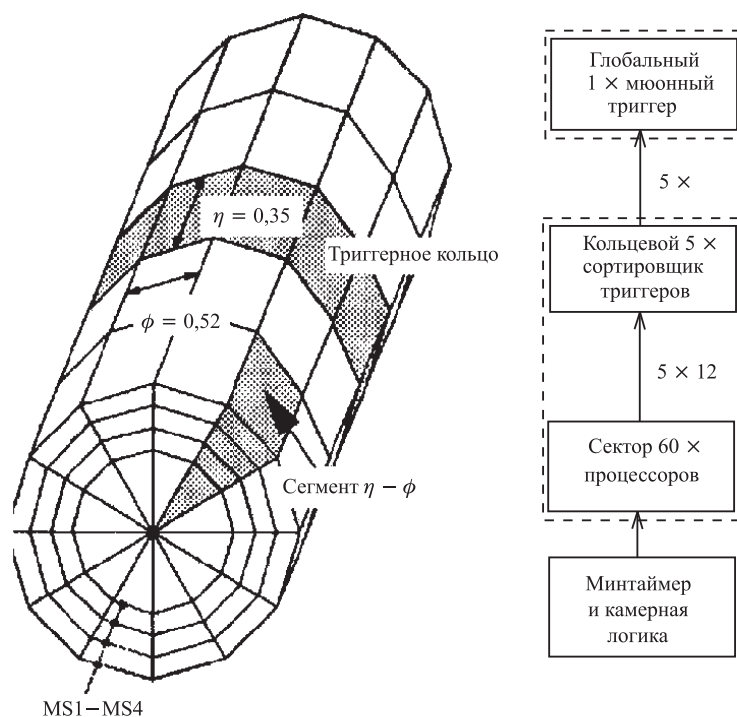


Рис. 27. Пример сегментации трекового процессора. MS1-MS4 — мюонные станции

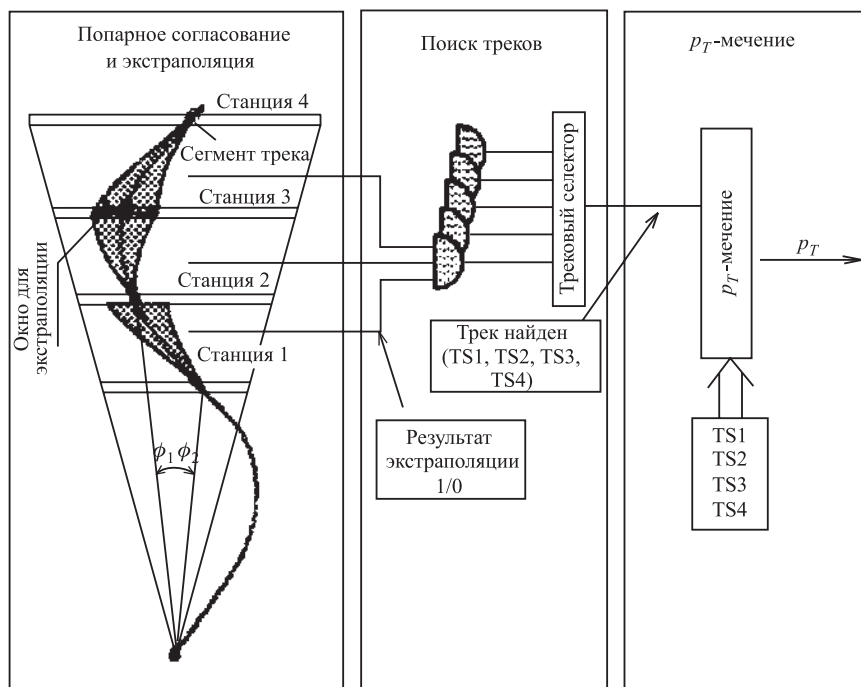


Рис. 28. Принцип работы трекового процессора в барреле. TS1–TS4 — трековые сортировщики

Примитивом камерной логики служит сегмент трека, три координаты сегмента, угол пересечения сегмента треком и количество данных. Эта информация передается в трековый процессор с определенной задержкой после прохождения соответствующего банча. С помощью трекового процессора отдельные сегменты «сшиваются», чтобы получить трек мюона. На рис. 27 и 28 иллюстрируется работа трекового процессора. Если трек найден в соответствии с заданными критериями, то он маркируется путем присвоения ему величины поперечного импульса p_T . Методом экстраполяции проводится более точное согласование двух сегментов, как это показано на рис. 28.

Секторный трековый процессор. Этот процессор состоит из трех блоков [102, 103]: блока для попарного согласования двух сегментов трека; блока для объединения треков; трекового селектора.

Физически трековый процессор разделен на пять кольцевых триггерных сортировщиков $\Delta\eta \times \Delta\phi = 0,35 \times 2\pi$. Каждый кольцевой сортировщик

разделен на 12 трековых процессоров с сегментацией $\Delta\eta = 0,35 \times 0,52$. Секторный трековый процессор состоит из трех частей: экстраполятора, трекового процессора и устройства, которое присваивает каждому треку величины p_T , η и ϕ . С помощью секторного трекового процессора стыкуются трековые сегменты, которые были идентифицированы при помощи логики минтаймера, и далее формируются треки. При положительном решении процессор присваивает каждому треку величину p_T , проверяет, начинается ли трек от точки взаимодействия, и передает данные в кольцевой триггерный сортировщик. Обычно в секторе идентифицируются два наиболее подходящих трека. Из возможных 12×2 треков, идентифицированных секторным трековым процессором, только четыре из них с наибольшими значениями p_T запоминаются в кольцевом триггерном сортировщике. В конце концов вся информация о треках (p_T , заряд, η , ϕ) передается в глобальный (L1) мюонный триггер. Электроника, относящаяся к поиску и идентификации мюонных треков, располагается вне детекторов.

Трековые сортировщики: ведущий и ведомый [103–111]. Ведущий трековый сортировщик является устройством, входящим в состав триггерной системы мюонных баррельных дрейфовых трубок. Он обеспечивает выдачу триггерных данных и осуществляет доступ информации к триггерной электронике для мониторинга и конфигурации триггерной системы. Трековый сортировщик состоит из трех основных узлов: блока селекции и двух мультиплексоров, которые принимают данные от соответствующей половины камеры. На входы трекового сортировщика поступает информация от устройства коррекции треков. Для контроля работы блока и занесения служебной информации используется стандартный последовательный интерфейс JTAG.

Триггерная электроника, расположенная на дрейфовых камерах в барреле, монтируется на 1080 триггерных платах. Каждой камере соответствует семь триггерных плат. В свою очередь, на каждой плате монтируется ведомый триггерный сортировщик, функции которого заключаются в следующем:

- сортировка треков в соответствии с их качеством (величина поперечного импульса, количество зарегистрированных координат, корреляция и др.);
- фильтрация фоновых событий;
- мониторинг в режиме on-line триггерных данных, что позволяет отбраковывать каналы, содержащие помехи в процессе решения триггера первого уровня;
- обеспечение контроля передачи данных между триггерной платой и платой, управляющей чтением данных от мюонных камер. Всего для детектора требуется 1200 плат [106.]

Трековый процессор для торцевой мюонной системы. Разработанный процессор позволяет объединять сегменты треков, зарегистрированных с помощью камер с катодным считыванием. Алгоритмы реализованы путем использования оперативной статической памяти и программируемых матриц фирмы «Хіііпх» [106]. Торцевая мюонная система состоит из четырех станций камер с катодным считыванием. В свою очередь, каждая станция включает по шесть камер с катодным считыванием. Они покрывают область псевдобыстрот $0,9 \leq \eta \leq 2,4$. Камеры отличаются высоким быстродействием: время дрейфа электронов составляет 60 нс. С помощью электроники детектора, как анодной, так и катодной, расположенной на специальных триггерных платах, измеряются фрагменты треков, зарегистрированных с помощью сработавших анодных проволочек и шести катодных микрополосок. Данные, считываемые от анодных проволочек, используются для точных временных измерений и для измерения величин η . Информация, считываемая от катодных микрополосок, применяется для измерения угла ϕ . Так называемый локальный трек заряженной частицы образует примитивный триггерный объект. Совокупность данных о таких объектах запоминается в памяти, расположенной на общей плате, вместе с информацией о соответствующем банче. При этом выбираются два наиболее приемлемых примитива от каждой камеры. Конечным результатом является трехмерный вектор, который соответствует сегменту трека в мюонной станции. С целью сокращения количества оптических каналов передачи данных в экспериментальный павильон передается информация только о трех сегментах трека. Далее с помощью трекового процессора выполняется реконструкция треков мюонов и измеряются их поперечные импульсы в магнитном поле 4 Тл. Эти данные затем передаются на триггерную систему первого уровня L1.

Устройство для полной реконструкции мюонных треков из отдельных сегментов состоит из нескольких конвейерных процессоров, что позволяет минимизировать расход логических схем, уменьшить емкость запоминающего устройства процессора и уменьшить вероятность заборов. На первом этапе происходит попарное согласование трековых сегментов. В результате после экстраполяции получается кривая, которую можно рассматривать как полноценный искомый трек. Процесс экстраполяции является наиболее ответственным этапом в реконструкции треков. Экстраполяция заключается в получении трехмерной информации путем обработки двух трековых сегментов, зарегистрированных в различных станциях, и тестировании полученной кривой. Экстраполяция всевозможных пар сегментов выполняется параллельно. Всего получается 81 комбинация из 15 сегментов. В конечном итоге реконструируются три наиболее полноценных трека (близких к заранее вычисленным и смоделированным).

Естественно, что такая эффективная обработка трековой информации стала возможной благодаря широкому применению современной технологии программируемых логических матриц.

Передача данных от электроники детекторов с резистивными платами к экспериментальному павильону. Электроника детекторов с резистивными платами частично располагается непосредственно на камерах, значительная часть смонтирована в экспериментальном павильоне (примерно 90 м от детекторов.) На камерах монтируется аналоговая часть электроники (предусилители, дискриминаторы, устройства тестирования, регистры для хранения управляющих данных и проч.). Здесь также располагается определенная часть дискретных схем, таких как схемы диагностики и устройства синхронизации. Такие дискретные устройства, как идентификаторы мюонов и измерители импульсов, расположены в экспериментальном павильоне. Данные в экспериментальный павильон передаются с помощью оптоволоконных линий передачи. Наряду с оптическим волокном в систему передачи, как аналоговую, так и дискретную, входят такие базовые компоненты волоконной оптики, как 1310 InGaAsP/InP лазерных элементов и InGaAs *p-i-n*-фотодиод, соединенный с одномодовым оптическим волокном. Для аналоговой системы передачи с использованием этих элементов разработана печатная плата размером 30×22 см и толщиной 0,5 мм. Эта разработка используется прежде всего для считывания сигналов от внутреннего полупроводникового детектора.

Компрессия данных [111–112]. Вследствие того, что мюонные треки отклоняются в магнитном поле, одни и те же данные используются различными элементами компаратора образцов. Поэтому для алгоритма поиска треков с помощью компаратора требуются данные от многих плоскостей камер с резистивными платами, которые размещены на большой площади установки CMS. Чтобы избежать огромного количества соединительных проводов на детекторе, электроника компаратора располагается в экспериментальном павильоне на расстоянии 100 м от детектора. Кроме того, прямая передача сигналов от детектора в экспериментальный павильон без предварительной компрессии данных потребовала бы большого количества дорогостоящих оптоволоконных линий связи при низкой частоте передачи. Поскольку триггерный алгоритм компаратора выполняется быстро, путем использования перепрограммируемых матриц, то имеется возможность в течение времени встречи нескольких банчей выполнить компрессию зарегистрированных данных непосредственно у детектора. Подсчитано, что при такой схеме считывания потери данных не превышают 1 %.

Алгоритм компрессии и декомпрессии. Алгоритм основан на том факте, что скорость сигналов, регистрируемых с помощью камеры с резистивными платами, относительно невелика. На рис. 29 показана ожидаемая скорость регистрируемых сигналов для одного банча в камере с резистивными платами.

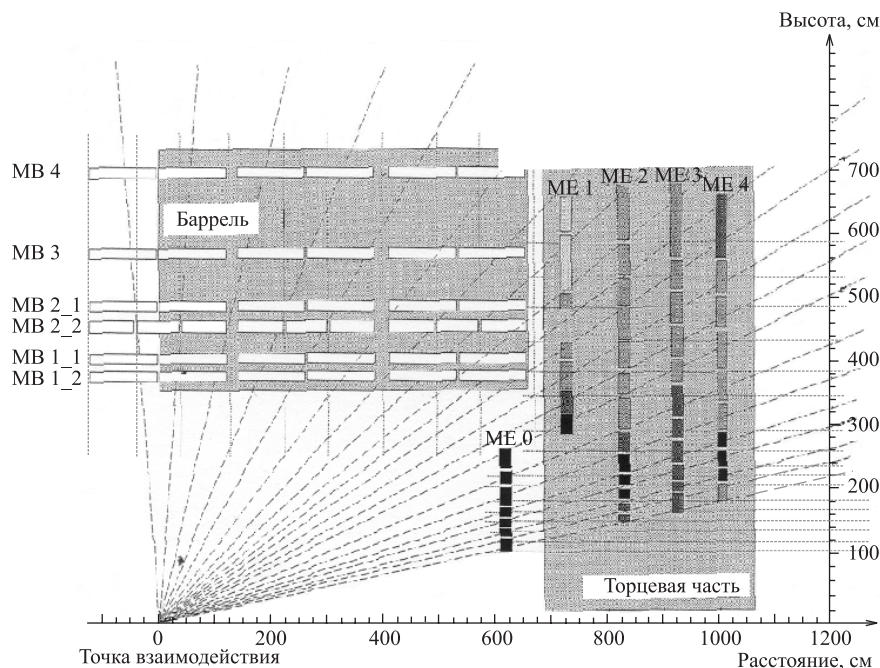


Рис. 29. Ожидаемая частота сигналов в течение времени одного банча

Как видно из рисунка, скорость поступления сигналов в пределах детектора носит неравномерный характер. Поэтому для тех областей, где эта скорость выше, требуется гораздо больше соединений.

Суть алгоритма заключается в следующем. Данные, регистрируемые в камере, разделяются на равные части (по четыре разряда в каждой части), нумеруются, и отмечаются величины их задержки. На рис. 30 приведен пример компрессии-декомпрессии. В каждой части содержится четыре разряда. В результате вместо 24 разрядов на выходах компрессора получается 9 разрядов данных в каждом банче. Как видно из рис. 30, в первом слове ($b_x = 0$) имеются две ненулевые части. Пятая часть передается сразу же без задержки. В течение следующего банча передается третья часть с задержкой, равной одному банчу, и т. д. В результате получается пакет данных, который временно хранится в запоминающем устройстве. Основу компрессора данных составляют мультиплексоры. С помощью демультимплексоров в экспериментальном павильоне выполняется обратная процедура — декомпрессия.

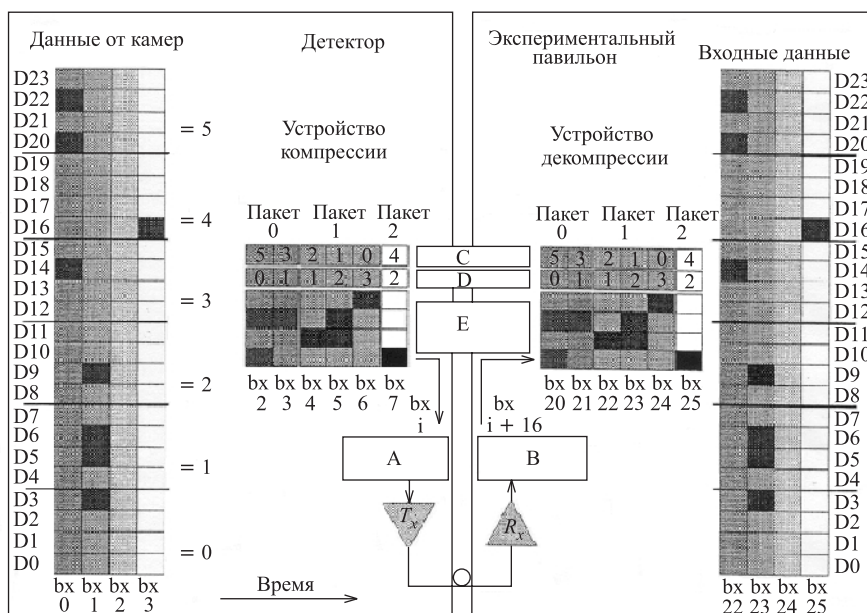


Рис. 30. Пример работы алгоритма компрессии-декомпрессии. А — передающая сторона; В — принимающая сторона; T_x — передатчики; R_x — приемники; bx — байты данных

12. ГЛОБАЛЬНАЯ КАЛОРИМЕТРИЧЕСКАЯ ТРИГГЕРНАЯ СИСТЕМА

Выработка глобального триггерного сигнала в установке CMS для большинства физических процессов требует использования калориметрической информации. Непосредственно на детекторе расположены фотодетекторы, усилители, АЦП и оптоволоконные передатчики.

С помощью глобального триггерного устройства обрабатываются данные, поступающие от всех калориметрических систем установки CMS. Его основные функции заключаются в следующем.

- Сортировка наибольших величин E_T , электронов и фотонов, которые вычисляются с помощью региональных триггеров.
- Идентификация струй.
- Счет количества струй с целью распознавания сложных событий, содержащих струи.
- Вычисление глобальной энергии, таких величин, как общий вектор и скалярная величина E_T .
- Мониторинг светимости коллайдера в реальном времени.

Как отмечалось выше, в качестве активного вещества в электромагнитном калориметре CMS используются кристаллы PbO_4 (82728 в барреле и обоих торцах). Сцинтилляционный свет от кристаллов попадает на фотодетектор. После усиления и преобразования в электрический сигнал последний оцифровывается и с помощью оптоволоконной линии передается в экспериментальный павильон. Усилитель имеет широкий динамический диапазон (16 бит), что позволяет усиливать импульсы, генерируемые в пределах энергий от 50 МэВ до 2 ТэВ. Сигналы от усилителя поступают на входы мультиплексора, выход которого соединен с входом 12-разрядного АЦП. Далее цифровая информация представляется в виде 15-разрядных чисел с плавающей запятой, где 12 разрядов отведены для данных, получаемых с выхода АЦП, два разряда определяют диапазоны усиления (1, 4, 8, 32) и один разряд служит в качестве флага.

Все компоненты электромагнитного калориметра должны быть радиационно стойкими: так, оптоволоконный передатчик должен устойчиво работать, по крайней мере, в течение 10 лет при радиации $2 \cdot 10^4$ Гр и потоке нейтронов $5 \cdot 10^{14} \text{ см}^{-2}$ при наибольшей величине η . Рассеиваемая мощность не должна превышать 300 мВт. Для передачи сигналов с частотой 40 МГц требуется их жесткая синхронизация с идентификаторами банчей. Данные с помощью последовательной оптоволоконной линии передаются с частотой 800 Мбит/с в экспериментальный павильон [112–116].

Калориметрический триггер первого уровня. Информация на входы калориметрической триггерной системы поступает с частотой 40 МГц. С выходов триггерной системы сигналы передаются уже с частотой 100 кГц. На основе перепрограммируемых логических матриц разработан ряд высокопроизводительных процессоров для реализации триггеров, регистрирующих высокоэнергичные электроны, фотоны, струи, глобальную сумму E_T и недостающую энергию missing E_T , с целью поиска нейтрино. Для получения таких данных используется ряд программируемых пороговых значений p_T и E_T [122]. Информация, подлежащая обработке, синхронно распределяется между триггерными платами, содержащими процессоры.

Основная функция калориметрической триггерной системы заключается в том, чтобы обеспечивать эффективную регистрацию в широких пределах данных физических процессов, включая частицы СМ, хиггс-бозоны и другие SUSY-частицы, а также тяжелые b - и t -частицы. Элементы триггерной системы монтируются на специальной печатной плате, которая обеспечивает быструю передачу сигналов между триггерными платами по скрученной паре проводов от точки к точке с частотой 160 МГц. Количество таких пар составляет 1419.

Кратко работу калориметрического триггера первого уровня можно описать следующим образом (рис. 31) [116–122]. Восемьразрядные суммарные сигналы, регистрируемые в каждой башне, поступают на входы триггерной

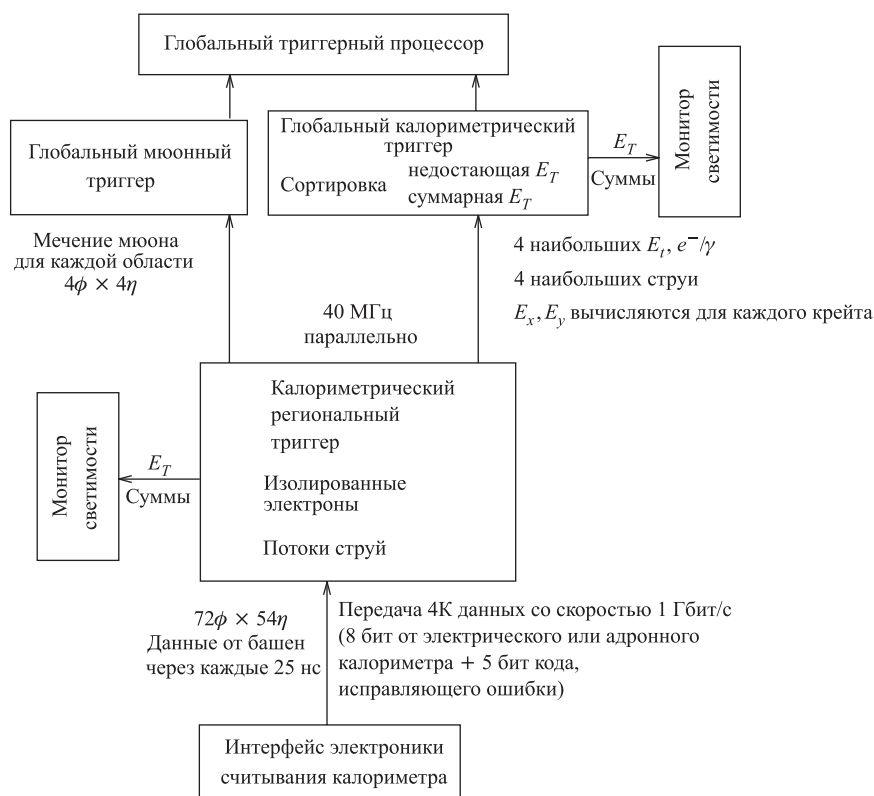


Рис. 31. Блок-схема калориметрического триггера первого уровня

системы от электроники калориметров. Имеется 19 так называемых региональных крейтов, содержащих калориметрические процессоры. После обработки поступивших данных от каждого крейта на глобальный процессор подаются величины E_T , E_x и E_y .

Как видно из рис. 31, триггер первого уровня установки CMS делится на две части: глобальный мюонный триггер и глобальный калориметрический триггер. Как известно, калориметры (электромагнитные и адронные) по глубине разделяются на отдельные башни, которые образуют триггерные окна. Для электрон-фотонного триггера одно окно имеет размеры 3×3 [116, 117]. Одна башня электромагнитного калориметра в установке CMS формируется на основе матрицы из шести кристаллов. Имеется однозначное соответствие между электромагнитными и адронными башнями, а размеры башни соответствуют размерам адронной башни: $0,87 \times 0,87$ в направлении $\eta \times \phi$. Размеры ϕ

остаются постоянными в направлении $\Delta\phi$. Значения η остаются постоянными в величинах $\Delta\eta$ до $\eta = 2,1$. Ниже этой величины размеры η увеличиваются вдвое. Всего имеется 3888 электромагнитных и столько же адронных башен. Основой триггерной калориметрической системы являются печатные платы с смонтированными в них процессорами и магистрали, которые обеспечивают передачу данных между аналогичными платами и субблоками в последовательном коде от точки к точке со скоростью 160 МГц. В созданном прототипе имеется 1419 каналов передачи данных. При этом фронт тактовых сигналов не превышает 1 нс.

Триггерная система CMS выполнена в виде двух физических уровней. В одном из них используются инженерные разработки, а на втором применены коммерческие процессоры. Первый калориметрический уровень установки CMS базируется на комбинациях таких данных, как лептоны с большими поперечными импульсами, фотоны и струи. В процессе вычислений используется информация, поступающая от электромагнитного и адронного калориметров в виде суммарных сигналов, зарегистрированных в соответствующих башнях. На первом уровне используются только сегментированные данные, считываемые от калориметров и мюонных детекторов. Частота поступления сигналов от детекторов на входы триггерной системы составляет 40 МГц. После фильтрации с помощью триггерной системы первого уровня частота поступления данных на следующий уровень понижается до 100 кГц.

Обработка данных. При обработке данных, регистрируемых в калориметрах, наиболее важными процессами являются высокоэнергичные изолированные электромагнитные ливни, порождаемые электронами или фотонами. Эта часть логики известна как электрон-фотонный триггер. Другими важными параметрами являются большая поперечная энергия струй E_T и большой недостающий поперечный импульс p_T .

Калориметрическая система установки CMS покрывает область псевдобыстрот $|\eta| > 5$. В области псевдобыстрот $|\eta| < 3$ расположен плотный и высокогранулированный сцинтилляционный кристаллический электромагнитный калориметр, содержащий 110000 кристаллов $PbWO_4$. Далее расположен сцинтилляционный калориметр с медными абсорберами и за ним адронный калориметр. Эти калориметры разделены на баррельные и торцевые части и, как это уже отмечалось выше, расположены внутри соленоида, который обеспечивает магнитное поле 4 Тл.

13. ТРИГГЕРНЫЕ БАШНИ

Логика первого уровня триггерной системы представляет собой множество синхронных конвейерных процессоров, работающих без мертвого времени. Частота синхронизации соответствует частоте банчей (40 МГц) или

кратна этой частоте. Для создания триггерной системы кристаллы сгруппированы в триггерные башни, каждая из которых содержит 6×6 кристаллов; башни граничат с соответствующими им башнями адронного калориметра. Другими словами, имеется однозначное соответствие между физическими башнями электромагнитного и адронного калориметров. В барреле один кристалл покрывает интервалы $0,145$ в направлении η и в направлении ϕ . Размеры триггерной башни равны $\Delta\eta \times \Delta\phi = 0,87 \times 0,87$, что дает 72ϕ сегментов. Причем такое количество сегментов возможно, поскольку размеры башен увеличиваются с ростом η . Количество башен в направлении η равно 56 . Всего имеется 3888 электромагнитных и столько же адронных башен в пределах $-2,6 < \eta < 2,6$, что соответствует $54 \times 72 \eta - \phi$ -делениям.

Обработка сигналов. Калориметрический триггер первого уровня состоит из следующих subsystemов:

- электроника субдетекторов;
- генератор примитивов, с помощью которого обрабатываются цифровые сигналы с целью получения более точных данных, содержащихся в первичной информации;
- региональный калориметрический триггер;
- глобальный калориметрический триггер;
- глобальный триггерный процессор.

Калориметрический триггер первого уровня базируется на комбинации сигналов, относящихся к лептонам с большими поперечными импульсами, фотонам и струям. Процессоры используют информацию, поступающую от электромагнитных и адронных калориметров и от мюонных детекторов. Ниже будет рассмотрен процесс обработки данных, регистрируемых в калориметрах. С этой целью калориметрическая система разделена на 18 региональных областей [123–127]. Причем каждой из этих областей соответствует региональная триггерная система, которая располагается в отдельном крейте.

В региональных триггерных крейтах содержатся электронные блоки и процессоры. Аналоговые сигналы, поступающие от двух торцевых калориметров, суммируются и обрабатываются с помощью электронных схем, расположенных в 19 крейтах (рис. 32). На каждый региональный крейт (30×8 башен в η, ϕ -плоскости) поступают сигналы от электронных схем электромагнитного и адронного калориметров. С помощью логических устройств идентифицируются физические объекты и метятся как неперекрывающиеся 4×4 триггерные окна обрабатываемой башни. Информация об объектах, найденных в каждом региональном крейте, запоминается на специальной плате, которая служит интерфейсом для глобального триггера. С помощью таких же плат вычисляются частичные значения величин поперечной энергии E_T , E_x и E_y .

На первом этапе работы триггерной системы выполняется считывание в конвейерные регистры сигналов, сформированных с помощью электроники

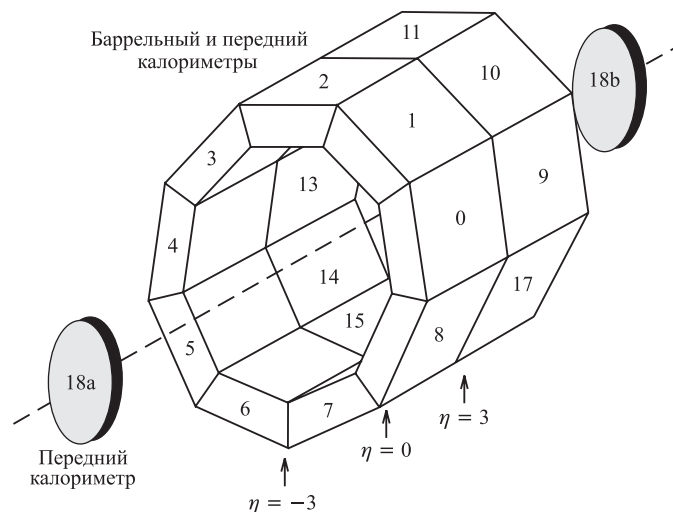


Рис. 32. Отображение региональных триггерных крейтов на калориметрическую систему

считывания и регистрации, и выборка от каждой башни так называемой примитивной информации. В случае адронного калориметра эти сигналы представляют собой поперечную энергию, которая регистрируется в каждой триггерной башне. Для электромагнитного калориметра извлекается информация, регистрируемая в детекторе, и используется для получения локальной изолированной информации с целью применения в электрон-фотонном алгоритме. Триггерные примитивные данные передаются в региональный триггерный крейт, где они обрабатываются и регистрируются как электроны, фотоны и струя.

Затем данные о кандидатах, имеющих наибольшую величину E_T , передаются вместе с общей суммой E_T и соответствующими компонентами E_x и E_y в региональный крейт, где вырабатывается глобальный калориметрический триггер. Процессоры, расположенные в региональных крейтах, предварительно обрабатывают информацию в соответствии с установленными критериями. Далее информация от 19 региональных крейтов, после окончания обработки сигналов, поступающих от торцевых калориметров, передается в глобальную триггерную систему [125, 126].

Электрон-фотонный триггер. Электрон-фотонный триггер [116–119] базируется на распознавании большой изолированной энергии, выделяемой в электромагнитном калориметре, и проверке малой энергии, теряемой в адронном калориметре. Имеются несколько различных величин порогов для

инклюзивных электронов, фотонов, дилептонов и весьма энергичных электронов. Для проверки электрона на изолированность и вычисления сумм энергий для струй, электромагнитной энергии и недостающей энергии (E_T) необходимо, чтобы триггерные данные были распределены между платами, расположенными в калориметрических триггерных крейтах. Все операции должны выполняться с возможно минимальными задержками.

Рассмотрим кратко структуру электрон-фотонного триггерного алгоритма (рис. 33). В электрон-фотонном триггере используются 3×3 триггерные ячейки. Всего имеется 3888 триггерных ячеек в барреле и в торцевых электромагнитных калориметрах. В соответствии с триггерным алгоритмом эти ячейки обеспечивают вычисление общей поперечной энергии E_T и одноразрядного слова, которое характеризует боковой профиль ливня или форму кластера. В совокупности эти однобитовые слова называются триггерными примитивами.

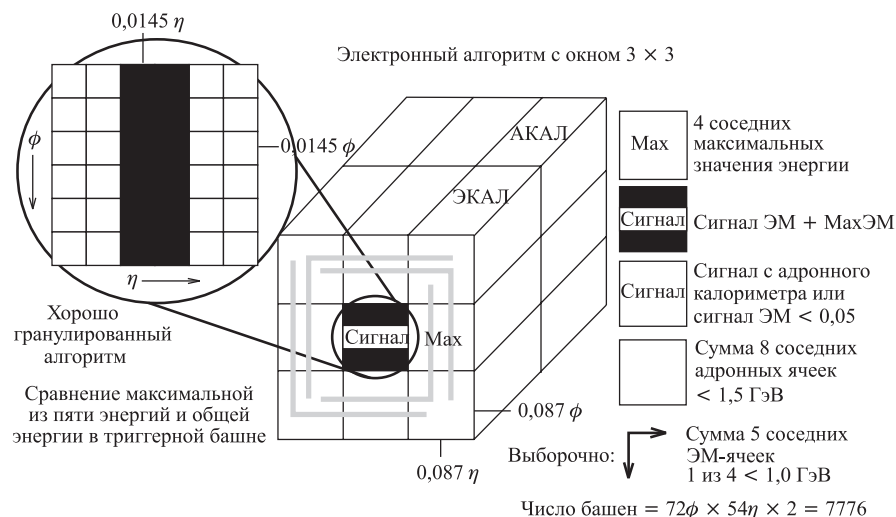


Рис. 33. Блок-схема алгоритма калориметрического триггера первого уровня. ЭКАЛ — электромагнитный калориметр; АКАЛ — адронный калориметр

Информация, считываемая от кристаллов электромагнитного калориметра, обеспечивает дополнительную дискриминацию для электрон-фотонного триггера. Величины E_T , регистрируемые с помощью отдельных кристаллов, группируются в направлении ϕ по шесть кристаллов, образуя шесть «микростриповых» сумм. Затем эти величины суммируются с целью получения общей поперечной энергии. Электрон-фотонный триггер основан на обнаружении большой величины изолированной энергии в электромагнитном ка-

лориметре путем проверки небольшой адронной энергии, теряемой частицами в адронном калориметре в области кластера. Имеются различные пороги для инклюзивных электронов, фотонов, дилептонов и высокий порог E_T для электронов. Алгоритм использует поперечную E_T от 9 электромагнитных и стольких же адронных триггерных башен, расположенных вокруг центральной. Такой алгоритм выполняется параллельно для всех башен калориметра, расположенных в области $\eta < 2,6$. Энергия для кандидатов в электроны и фотоны получается путем сложения энергии, выделяемой в электромагнитном калориметре центральной башни, с наибольшей энергией, получаемой от соседних башен. Далее выполняется процедура отсечения на уровне известных образцов.

Алгоритм регистрации струй [127]. Триггер для струи базируется на величинах сумм поперечной энергии электромагнитных и адронных калориметров в неперекрывающихся башнях размером 4×4 ($0,35\eta \times 0,35\phi$ -область). Моделирование показало, что триггер для регистрации струй, основанный на суммировании величин E_T от 16 триггерных башен в области $0,35 \times 0,35$ в направлении η и ϕ , вполне удовлетворяет условиям экспериментов на LHC. Приемлемый результат был получен как для струй с большим импульсом p_T , порождаемых от стандартных КХД-процессов, так и для струй от распадов SUSY-частиц с массой выше 300 ГэВ. Относительно малые области струи дают определенные преимущества при реализации триггеров с многими струями, поскольку струи легче разрешаются в направлениях η и ϕ . Область триггера для струи имеет 10-разрядный динамический диапазон, покрывая величину энергии вплоть до 1000 ГэВ. Значения локальных сумм потерь энергии от струй сортируются в соответствии с их поперечными суммами с целью получения верхних рангов струй. Кроме того, триггер позволяет также упрощать поиск изолированных τ -лептонов, которые могут рождаться в распаде MSSM хиггс-частиц. Данные о кандидатах в струи получаются путем простого суммирования величин E_T от 16 электромагнитных и 16 адронных башен. Эти же суммы используются как входные данные для сумм общей и недостающей энергии (missing E_T), которые вместе с позицией центра башни используются для вычисления различных компонент E_T . Идентификация нейтрино заключается в вычислении missing E_T -вектора и в проверке этой величины с установленным порогом.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Обе наиболее крупные физические установки ATLAS и CMS оптимизированы на максимальное использование возможностей LHC. Сравнить эти установки можно путем анализа используемых детекторов, ядерной электроники и триггерных устройств.

1. В обеих установках содержатся внутренние полупроводниковые детекторы, такие как микрополосковые и двухкоординатные пиксель-детекторы.

2. В установке ATLAS в качестве активного вещества в электромагнитных калориметрах используется жидкий аргон со свинцовыми абсорберами и платами считывания зарядов типа «аккордеон». Для считывания данных используются только электрические сигналы. В установке CMS для чтения данных от кристаллов необходимо использовать ФЭУ и диоды.

3. За небольшим исключением в мюонных системах применяются однотипные МПК и камеры с резистивными платами.

4. В отличие от установки CMS, для которой разработана двухуровневая триггерная система, в установке ATLAS используется трехуровневая триггерная система.

5. За счет использования дрейфовых трубок с возможностью идентификации банчей и триггерных камер с резистивными платами в установке CMS уже на первом триггерном уровне происходит восстановление кандидатов в мюонные треки.

6. В установке CMS создается сильное соленоидальное магнитное поле 4 Тл, в каждом из 12 секторов находятся четыре мюонные станции. Эти камеры размещены между плоскостями железного ядра. Поэтому пространственное разрешение мюонной системы ограничивается многократным рассеиванием и может составлять $\Delta p/p = 8\%$. В мюонной системе с трековой системой можно уменьшить эту величину до 5%. В установке ATLAS используется магнит с воздушным промежутком. Величина магнитного поля составляет 0,6 Тл, используются три мюонные станции на сектор. Разрешение по импульсу равно 2%.

7. Частота записи в обеих установках резко отличается. В установке CMS она равна 1–100 Гц/см². В установке ATLAS эта величина в 29 раз больше.

8. С целью повышения надежности в установке CMS используются два независимых способа выработки триггерного сигнала первого уровня. Одна триггерная система основана на дрейфовых камерах с возможностью идентификации банчей, а в другой применяются триггерные камеры с резистивными платами.

9. Сигналы от трековых детекторов в экспериментальный павильон в установке CMS передаются в аналоговой форме. Информация в установке ATLAS передается в дискретной форме.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Kunz P. F.* Microcircuits for High-Energy Physics. CERN School of Computing. CERN-78-13. Geneva, 1978. P. 25–49.
2. *Рехин Е. И., Чернов П. С., Басиладзе С. Г.* Метод совпадений. М.: Атомиздат, 1979. 238 с.

3. *Никитюк Н. М.* Методы обработки информации с трековых детекторов заряженных частиц высоких энергий // ЭЧАЯ. 1995. Т. 26, вып. 3. С. 719–779.
4. ATLAS. Technical Detector and Physics Performance. Technical Design Report. CERN/LHCC/99-14. 1999. 457 p.
5. CMS. The Compact Muon Solenoid. Technical Proposal. CERN/LHCC/94-38. 1994. 54 p.
6. CMS. The Hadron Calorimeter Design Report. CERN/LHCC/97-31. 1997. 449 p.
7. CMS. The Muon Project. Technical Design Project. CERN/LHCC/97-32. 1997. 441 p.
8. CMS. The Electromagnetic Calorimeter Project. Technical Design Report. CERN/LHCC/97-33. 1997. 364 p.
9. CMS. The Tracker Project. Technical Design Report. CERN/LHCC/97-33. 1997. 538 p.
10. ALICE. Technical Design Report of the Inner Tracking System. CERN/LHCC/99-12. 1999. 360 p.
11. LHCb. Technical Proposal. CERN/LHCC/2003-30. 2003. 127 p.
12. *Никитюк Н. М., Самойлов В. Н.* Физические установки для экспериментов на LHC. Дубна: ОИЯИ, 2007.
13. *Ellis N.* First-Level Trigger System at LHC // 8th Workshop on Electronics for LHC Experiments, Colmar, France, Sept. 9–13, 2002. CERN/LHCC/2002-34. Geneva, 2002. P. 20–28.
14. *Taylor T. M.* The Status of the LHC Machine // 7th Workshop on Electronics for LHC Experiments, Stockholm, Sept. 10–14, 2001. CERN/LHCC/2001-34. Geneva, 2001. P. 3–8.
15. *Smith W.* Triggering at LHC Experiments // Nucl. Instr. Meth. A. 2002. V. 478. P. 62–67.
16. *Lindenstruth V., Kisel I.* Overview of Trigger Systems // Nucl. Instr. Meth. A. 2004. V. 535. P. 48–56.
17. ATLAS. Detector Physics Performance Technical Design Report. CERN/LHCC/99–14. 1999. 458 p.
18. *Calvet D. et al.* ATLAS Internal Note DAQ-N0-067. Geneva, 1997.
19. *Costa M. et al.* ATLAS Internal Note. DAQ-N0-24. Geneva, 1994.
20. ATLAS. Level-1 Trigger. Technical Design Report. 1998. 516 p.
21. *Calvet D. et al.* Study of Performance Issues of the ATLAS Event Selection System Based on ATM Switching Network // IEEE Trans. on Nucl. Sci. 1996. V. 43. P. 90–98.
22. *Mapelly L.* Architecture of Future Data Acquisition Systems. CERN School of Computing. CERN 93-03. 1992. P. 237–335.
23. *Negri A. et al.* ATLAS Internal Note DAQ-CONF-2005-004. 2005.
24. *Letheren M. et al.* An Asynchronous Data-Driven Event-Building Scheme Based on ATM Switching Fabrics // IEEE Trans. on Nucl. Sci. 1994. V. 41, No. 1. P. 257–266.
25. *Costa M. et al.* ATM-Based Event Builder System // First Workshop on Electronics for LHC Experiments, Lisbon, Sept. 11–15, 1995. CERN/LHCC/95-56. 1995. P. 340–344.
26. *Costa M. et al.* Lessons from ATM-Based Event Builder Demonstrators and Challenges for LHC-Scale System // Second Workshop on Electronics for LHC Experiments, Balatonfüred, Hungary, Sept. 23–27, 1996. CERN/LHCC/96-39. 1996. P. 208–214.
27. *Costa M. et al.* Results from an ATM-Based Event Builder Demonstrator // IEEE Trans. on Nucl. Sci. 1996. V. 43, No. 3. P. 1814–1820.
28. *Calvet D. et al.* Operation and Performance of ATM-Based Demonstrator for Sequential Option of ATLAS Trigger // IEEE Trans. on Nucl. Sci. 1998. V. 45, No. 4. P. 1793–1797.

29. *Котов В. М., Никитюк Н. М.* Применение АТМ-технологии в экспериментальной физике высоких энергий. ОИЯИ, Р11-99-252. Дубна, 1999.
30. *Котов В. М., Никитюк Н. М.* АТМ-технология. Дубна: ОИЯИ, 1999.
31. *Yasu Y. et al.* Quality of Service on Gigabit. КЕК Preprint 2000-128. 2000.
32. *Aubert B. et al.* Performance of a Liquid EM Calorimeter // Nucl. Instr. Meth. A. 1991. V. 309. P. 438–449.
33. *Garvey J. et al.* Use of an FPGA to Identify Electromagnetic Clusters and Isolated Hadrons in the ATLAS Level-1 Calorimeter Trigger // Nucl. Instr. Meth. A. 2003. V. 512. P. 506–516.
34. *Jacobs K. et al.* Use Programmable Logic in Pipelined Trigger for ATLAS // Fifth Workshop on Electronics for LHC Experiments, Rome, Sept. 20–24, 1999. CERN/LHCC/99-33. Geneva, 1999. P. 314–317.
35. *Alke P.* Evolution, Revolution, and Convolution Recent Progress in Field-Programmable Logic // 7th Workshop on Electronics for LHC Experiments, Stockholm, Sept. 10–14, 2001. CERN/LHCC/2001-034. Geneva, 2001. P. 25–32.
36. *Никитюк Н. М., Самойлов В. Н.* Электроника детекторов для экспериментов на большом адронном коллайдере (LHC) // ЭЧАЯ. 2006. Т. 37, вып. 7. С. 129.
37. *Perera V. et al.* Hardware Triggers at the LHC // Fourth Workshop on Electronics for LHC Experiments, Rome, Sept. 21–25, 1998. CERN/LHCC/98-36. Geneva, 1998. P. 316–320.
38. *Dulny B. et al.* Jet Determination in Lar-Calorimeter Using a Heavily Interconnected System of FPGAs // Fifth Workshop on Electronics for LHC Experiments, Snowmass, Colorado, USA, Sept. 20–24, 1999. CERN/LHCC/99-33. Geneva, 1999. P. 270–274.
39. *Borrego P. et al.* The ATLAS Level-1 Central Trigger System // 9th Workshop on Electronics for LHC Experiments, Amsterdam, Sept. 29–Oct. 3, 2003. CERN/LHCC/2003-055. Geneva, 2003. P. 281–286.
40. *Ellis N. et al.* The ATLAS Level-1 Central Trigger Processor // Ibid. P. 270–274.
41. *Ellis N. et al.* The Trigger Menu Handler for the ATLAS Level-Central Trigger Processor // 6th Workshop on Electronics for LHC Experiments, Cracow, Poland, Sept. 11–15, 2000. CERN/LHCC/2000-41. Geneva, 2000. P. 348–352.
42. *Никитюк Н. М.* Обработка сигналов, регистрируемых в калориметрах // ЭЧАЯ. 1994. Т. 25, вып. 4. С. 1004.
43. *Esenhandler E.* Hardware Triggers at the LHC // Fourth Workshop on Electronics for LHC Experiments, Rome, Sept. 21–25, 1998. CERN/LHCC/98-36. Geneva, 1998. P. 47–55.
44. *Hall G.* Recent Progress in Front End ASICs for High-Energy Physics // Nucl. Instr. Meth. A. 2005. V. 541. P. 248–258.
45. *Hansler K. et al.* Circuit Design with a Commercial 0.13 μm CMOS Technology for High Energy Physics Application // 9th Workshop on Electronics for LHC Experiments, Amsterdam, Sept. 29–Oct. 3, 2003. CERN/LHC/2003-055. Geneva, 2003. P. 71–77.
46. *Petrolo E., Veneziano S.* A Fast Tracking Muon Trigger for Experiment WA92 // Nucl. Instr. Meth. A. 1992. V. 315. P. 95–101.
47. *Cataldi G. et al.* Performance of the E771 Muon Detector at Fermilab // Nucl. Instr. Meth. A. 1994. V. 337. P. 350–354.
48. *Antoniazzi L. et al.* FNAL E771 Fast Muon Trigger // Nucl. Instr. Meth. A. 1995. V. 355. P. 320–328.
49. *Dosseli U.* Muon Detectors for Collider Experiments // Second Workshop on Electronics for LHC Experiments, Balatonfüred, Hungary, Sept. 23–27, 1996. CERN/LHCC/96-39. Geneva, 1996. P. 283–292.

50. *Sasaki O., Nomachi M., Ohka T.* Forward Muon Trigger Electronics for ATLAS Thin Gap Chambers // First Workshop on Electronics for LHC Experiments, Lisbon, Sept. 11–15, 1995. CERN/LHCC/95-56. Geneva, 1995. P. 397–410.
51. *Госткин М. И. и др.* Измерение позиции сигнальной проволоки в дрейфовых трубках мюонной системы установки ATLAS с помощью рентгеновского излучения. Препринт ОИЯИ 13-2001-187. Дубна, 2001.
52. *Hessi N.* The Precision Drift Chambers for the ATLAS Muon Spectrometer // Nucl. Instr. Meth. A. 1988. V. 419. P. 326–330.
53. ATLAS Internal Note. Muon-N0-042. 1994.
54. *Mikenberg G.* Thin-Gap Chambers for Hadron Calorimetry // Nucl. Instr. Meth. A. 1988. V. 265. P. 223–227.
55. *Willmot C.* Electronics for Muon Detectors // Fourth Workshop on Electronics for LHC Experiments, Rome, Sept. 21–25, 1998. CERN/LHCC/98-36. Geneva, 1998. P. 72–73.
56. *Blanco A. et al.* Development of Large Area and of Position-Sensitive Timing RPCs // Nucl. Instr. Meth. A. 2002. V. 478. P. 170–175.
57. *Bacci C. et al.* The First Level Muon Trigger of ATLAS in Barrel Region // Fifth Workshop on Electronics for LHC Experiments, Rome, Sept. 21–25, 1998. CERN/LHCC/98-36. Geneva, 1998. P. 269–274.
58. *Ciapetti G. et al.* Hardware Implementation of ATLAS Level-1 Muon Trigger in the Barrel Region // Ibid. P. 269–274.
59. *Ichimiya R., Kurashige H., Maeno T.* Sector Logic Implementation for the ATLAS Endcap Level-1 Muon Trigger // 8th Workshop on Electronics for LHC Experiments, Colmar, France, Sept. 9–13, 2002. CERN/LHCC/2002-34. Geneva, 2002. P. 236–240.
60. *Cardarelli R. et al.* Trigger Logic of the ATLAS First Level Muon Trigger // First Workshop on Electronics for LHC Experiments, Lisbon, Sept. 11–15, 1995. CERN/LHCC/95-56. Geneva, 1995. P. 213–216.
61. *Bocci V. et al.* The Design of the Coincidence Matrix ASIC of the ATLAS Barrel Level-Muon Trigger // 8th Workshop on Electronics for LHC Experiments, Colmar, France, Sept. 9–13, 2002. CERN/LHCC/2002-34. Geneva, 2002. P. 261–266.
62. *Ermolin Y.* The Level-2 Trigger System Supervision. ATLAS Internal Note DAQ-N0-35. 1994. 13 p.
63. *Palamara O., Peterera S.* ATLAS Internal Note. DAQ-N0-017. 1994.
64. *Ambrosini G., Mattia A. Di., Falciano S.* The ATLAS Level-2 Muon Trigger for the Barrel Region // First Workshop on Electronics for LHC Experiments, Lisbon, Sept. 11–15, 1995. CERN/LHCC/95-56. Geneva, 1995. P. 319–323.
65. *Ellis N.* Level-1 and Level-2 Triggering at LHC. RD-27 Note 1. 1992.
66. *Borrer K. et al.* A Study of Second Level Track Trigger for ATLAS // Nucl. Instr. Meth. A. 1993. V. 336. P. 59–77.
67. *Smith W. H.* Trigger and Data Acquisition for the Super LHC // 10th Workshop on Electronics for LHC Experiments, Boston, USA, Sept. 13–17, 2004. CERN/2004-010. Geneva, 2004. P. 34–41.
68. CMS. The Compact Muon Solenoid. Technical Proposal. CERN/LHCC/94-38. Geneva, 1994.
69. *De Palma M.* The CMS Experiment at LHC // Nucl. Phys. B (Proc. Suppl.). 1998. V. 61. P. 32–38.
70. *Seez C. J.* CMS, a General Purpose Detector for the LHC // Nucl. Instr. Meth. A. 1994. V. 334. P. 1–10.

71. *Kotlinski D.* CMS Pixel Detector // Nucl. Instr. Meth. A. 2001. V.465. P.46–50.
72. *Nessi-Tedaldi F.* The CMS Electromagnetic Calorimeter // Nucl. Phys. B (Proc. Suppl.). 1998. V.61. P.52–58.
73. *Karar A. et al.* Investigation of Avalanche Photodiodes for EM Calorimeter at LHC // Second Workshop on Electronics for LHC Experiments, Balatonfüred, Hungary, Sept. 23–27, 1996. CERN/LHCC/96-39. Geneva, 1996. P.242–244.
74. *Хачатурян М. Н.* Калориметры электромагнитного излучения на основе сцинтилляционных кристаллов // ЭЧАЯ. 2003. Т. 34, вып. 5. С. 1317–1366.
75. *Hagopian V.* The Hadron Calorimeter of the Compact Muon Solenoid (CMS) // Nucl. Phys. B (Proc. Suppl.). 1998. V.61. P.47–51.
76. *Merlo J. P.* CMS Hadronic Forward Calorimeter // Nucl. Phys. B (Proc. Suppl.). 1988. V.61. P.41–46.
77. *Гончаров П. И. и др.* Исследование характеристик сектора торцевого адронного калориметра установки CMS // ПТЭ. 2004. № 7. С. 55–60.
78. *Wulz C. E.* Concept of the First Level Global Trigger for the CMS Experiment at LHC // Nucl. Instr. Meth. A. 2001. V.473. P.231–242.
79. *Taurok A., Bergater H., Padra M.* Implementation and Synchronization of the First Level Global Trigger for the CMS Experiment at LHC // Ibid. P.243–259.
80. *Sakulin H., Taurok A.* Implementation and Test of the First-Level Global Muon Trigger of the CMS Experiment // 11th Workshop on Electronics for LHC Experiments, Heidelberg, Germany, Sept. 12–16, 2005. CERN/LHCC/2005-038. Geneva, 2005. P.279–282.
81. *Sakulin H., Taurok A.* The Level-1 Global Muon Trigger for the CMS Experiment // 8th Workshop on Electronics for LHC Experiments, Colmar, France, Sept. 9–13, 2002. CERN/LHCC/2002-34. Geneva, 2002. P.245–254.
82. *Wrochna G.* The Muon System of the CMS Detector at LHC // Nucl. Instr. Meth. A. 1994. V.344. P.98–104.
83. *Wrochna G.* Overview of the CMS Muon Trigger System // Second Workshop on Electronics for LHC Experiments, Balatonfüred, Hungary, Sept. 23–27, 1996. CERN/LHCC/96-39. Geneva, 1996. P.293–297.
84. *Abrescia M. et al.* A Prototype Front End Chip for the CMS Resistive Plate Chambers // Fifth Workshop on Electronics for LHC Experiments, Snowmass, Colorado, USA, Sept. 20–24, 1999. CERN/LHCC/99-33. Geneva, 1999. P.457–461.
85. *Benotto F. et al.* The CMS DT Muon DDU // 6th Workshop on Electronics for LHC Experiments, Cracow, Poland, Sept. 11–15, 2000. CERN/LHCC/2000-41. Geneva, 2000. P.410.
86. *Bruger M., Fierro M., Wulz C. E.* Drift Tube Based Pseudorapidity Assignment for the Level-1 Muon Trigger for the Compact Muon Solenoid Experiment at CERN // Nucl. Instr. Meth. A. 2003. V.482. P.254–270.
87. *Acosta D. et al.* Large Cathode Strip Chambers for the Endcap Muon System // Nucl. Instr. Meth. A. 1998. V.419. P.469–474.
88. *Bredon R. E et al.* Front-End Electronics for the Cathode Strip Readout of the CMS Endcap Muon System // Second Workshop on Electronics for LHC Experiments, Balatonfüred, Hungary, Sept. 23–27, 1996. CERN/LHCC/96-39. Geneva, 1996. P.309–312.
89. *Hauser J. et al.* Experience with Trigger Electronics for the CSC System of CMS // 10th Workshop on Electronics for LHC Experiments, Boston, USA, Sept. 13–17, 2004. CERN/LHCC/2004-030. Geneva, 2004. P.292–296.

90. *Ling T.Y.* Front-End Electronics of the CMS Endcap Muon System // Fourth Workshop on Electronics for LHC Experiments, Rome, Sept. 21–25, 1998. CERN/LHCC/98-36. Geneva, 1998. P. 261–265.
91. *Gonella F., Pegoraro M.* A Prototype Front End ASIC for the Readout of the Drift Tubes of CMS Barrel Muon Chambers // *Ibid.* P. 257–261.
92. *Bondar N. et al.* Anode Front-End Electronics for the Cathode Strip Chambers // 10th Workshop on Electronics for LHC Experiments, Stockholm, Sept. 10–14, 2001. CERN/LHCC/2001-034. Geneva, 2001. P. 190–194.
93. *Bredon R.E. et al.* A 16 Channel, 96 Switched Capacitor Array for the CMS Muon System // Third Workshop on Electronics for LHC Experiments, London, Sept. 22–26, 1997. CERN/LHCC/97-60. Geneva, 1997. P. 324–328.
94. *Ferguson T., Terentiev N.* Results of Radiation Tests of the Anode Front-End Boards for the CMS Endcap Muon Cathode Strip Chambers // 7th Workshop on Electronics for LHC Experiments, Stockholm, Sept. 10–14, 2001. CERN/LHCC/2001-034. Geneva, 2001. P. 195–198.
95. *Sakulin H., Taurok A.* The Level-1 Global Muon Trigger for the CMS Experiment // 8th Workshop on Electronics for LHC Experiments, Colmar, France, Sept. 9–13, 2002. CERN/LHCC/2002-34. Geneva, 2002. P. 245–254.
96. *Gasparini F. et al.* Bunch Crossing Identification at LHC Using Mean-Timer Technique // *Nucl. Instr. Meth. A.* 1993. V. 336. P. 91–97.
97. *Gasparini F. et al.* Performance of a DTBX // *Nucl. Instr. Meth. A.* 1994. V. 344. P. 137–142.
98. *Никитюк Н. М., Самойлов В. Н.* Идентификация банчей и частиц в экспериментах на LHC // ЭЧАЯ. 2007. Т. 38, вып. 1. С. 84–143.
99. *De Giorgi M. et al.* Beam Test Results of FPGA Prototype of Front-End Trigger Device for CMS Muon Barrel Chambers // Second Workshop on Electronics for LHC Experiments, Balatonfüred, Hungary, Sept. 23–27, 1996. CERN/LHCC/96-39. Geneva, 1996. P. 314–318.
100. *Andinger M. et al.* Pattern Comparator Trigger (PACT) for Muon System of CMS Experiment // *Nucl. Instr. Meth. A.* 1996. V. 370. P. 389–395.
101. *Gorski M., Jaworski Z., Konecki M.* PAC (Pattern Comparator) Trigger Processor — VLSI Implementation // Second Workshop on Electronics for LHC Experiments, Hungary, Balatonfüred, Sept. 23–27, 1996. CERN/LHCC/96-39. Geneva, 1996. P. 323–325.
102. *Jaworski Z. et al.* Resistive Plate Chamber (RPC) Based on Muon Trigger System for the CMS Experiment — Pattern Comparator ASIC // *Nucl. Instr. Meth. A.* 1998. V. 419. P. 707–710.
103. *Abbrescia M. et al.* Production and Test of One-Third of Barrel Resistive Plate Chamber of the CMS Experiment at LHC // *Nucl. Instr. Meth. A.* 2004. V. 535. P. 283–286.
104. *Gorski M. et al.* Trigger Electronics for Muon RPC Chambers in CMS // First Workshop on Electronics for LHC Experiments, Lisbon, Sept. 11–15, 1995. CERN/LHCC/95-56. Geneva, 1995. P. 218–221.
105. *Dallavalle G.M. et al.* Track Segment Sorting in the Trigger Server of a Barrel Muon Station in CMS // Fourth Workshop on Electronics for LHC Experiments, Rome, Sept. 21–25, 1998. CERN/LHCC/98-36. Geneva, 1998. P. 294–302.
106. *Kluge A., Wildschek T.* Track Finder of the CMS First Level Muon Trigger // Second Workshop on Electronics for LHC Experiments, Balatonfüred, Hungary, Sept. 23–27, 1996. CERN/LHCC/96-39. Geneva, 1996. P. 319–321.
107. *Kluge A., Wildschek T.* Track Finding Processor in the DTBX Based CMS Barrel Muon Trigger // First Workshop on Electronics for LHC Experiments, Lisbon, Sept. 11–15, 1995. CERN/LHCC/95-56. Geneva, 1995. P. 228–232.

108. Kluge A., Wildschek T. The Track Finder of the CMS First Level Muon Trigger // Third Workshop on Electronics for LHC Experiments, London, Sept. 22–26, 1997. CERN/LHCC/97-60. Geneva, 1997. P. 329–331.
109. Acosta D. *et al.* Track-Finding Processor for the Level-1 Trigger for CMS Endcap Muon System // 7th Workshop on Electronics for LHC Experiments, Stockholm, Sept. 10–14, CERN/LHCC/2001-034. Geneva, 2001. P. 243–245.
110. Acosta D. *et al.* The Track-Finding Processor for the Level-1 Trigger of the CMS Endcap Muon System // Fifth Workshop on Electronics for LHC Experiments, Snowmass, Colorado, USA, Sept. 20–24, 1999. CERN/LHCC/99-33. Geneva, 1999. P. 318–321.
111. Castellani L. *et al.* Local Track Reconstruction for the First Level Trigger in the CMS // Fourth Workshop on Electronics for LHC Experiments, Rome, Sept. 21–25, 1998. CERN/LHCC/98-36. Geneva, 1998. P. 285–290.
112. Gorski M. *et al.* High Speed Data Transmission and Compression for the CMS RPC Muon Chamber // Third Workshop on Electronics for LHC Experiments, London, Sept. 22–26, 1997. Geneva 1997. P. 320–323.
113. Banzuzi K. *et al.* Readout System for the CMS RPC Muon Trigger // 6th Workshop on Electronics for LHC Experiments, Cracow, Poland, Sept. 11–15, 2000. CERN/LHCC/2000-041. Geneva, 2000. P. 358–362.
114. Gorski M., Kudla I., Pozniak K. T. Resistive Plate Chamber (RPC) Based Muon Trigger System for the CMS Experiments — Data Compression/Decompression System // Nucl. Instr. Meth. A. 1998. V. 419. P. 701–706.
115. Denes P. Digitization and Data Transmission for the CMS Electromagnetic Calorimeter // Fourth Workshop on Electronics for LHC Experiments, Rome, Sept. 21–25, 1998. CERN/LHCC/98-36. Geneva, 1998. P. 223–228.
116. Denes P. CMS Electromagnetic Calorimeter Readout // Second Workshop on Electronics for LHC Experiments, Balatonfüred, Hungary, Sept. 23–27, 1996. CERN/LHCC/96-39. Geneva, 1996. P. 48–52.
117. Walder J. P. High Dynamic Range and Low Power Very Front-End Pre-amplifier for CMS Calorimetry. CERN/LHCC/96-39. Geneva, 1996. P. 62–65.
118. Smith W. H. *et al.* High Speed Data Processing for the CMS Calorimeter Trigger // Third Workshop on Electronics for LHC Experiments, London, Sept. 22–26, 1997. CERN/LHCC/97-60. Geneva, 1997. P. 408–412.
119. Bercher M. *et al.* Digital Data Processing for CMS Calorimeter LVL1 Trigger // *Ibid.* P. 398–402.
120. Heath G. P. *et al.* The CMS Calorimeter Trigger // *Ibid.* P. 393–397.
121. Brooke J. J. *et al.* An FPGA-Based Implementation of Global Calorimeter Trigger // 6th Workshop on Electronics for LHC Experiments, Cracow, Poland, Sept. 11–15, CERN/LHCC/2000-41. Geneva, 2000. P. 363–367.
122. Smith W. H. *et al.* CMS Calorimeter Trigger Implementation and Performance // Second Workshop on Electronics for LHC Experiments, Balatonfüred, Hungary, Sept. 23–27, 1996. CERN/LHCC/96-39. Geneva, 1996. P. 151–155.
123. Smith W. H. *et al.* Full Crate Test of the CMS Regional Calorimeter Trigger // 9th Workshop on Electronics for LHC Experiments, Amsterdam, Sept. 29 – Oct. 3, 2003. CERN/LHCC/2003-055. Geneva, 2003. P. 221–224.
124. Smith W. H. *et al.* CMS Regional Calorimeter Trigger High Speed ASICs // Second Workshop on Electronics for LHC Experiments, Balatonfüred, Hungary, Sept. 23–27, 1996. CERN/LHCC/96-39. Geneva, 1996. P. 338–342.

125. *Bailey D. S. et al.* The Global Calorimeter Trigger for CMS // Fourth Workshop on Electronics for LHC Experiments, Rome, Sept. 21–25, 1998. CERN/LHCC/98-36. Geneva, 1998. P. 326–330.
126. *Broke J. J. et al.* Design and Implementation of the Global Calorimeter Trigger for CMS // 10th Workshop on Electronics for LHC Experiments, Boston, USA, Sept. 13–17, 2004. CERN/LHCC/2004-030. Geneva, 2004. P. 287–291.
127. *Smith W. H. et al.* CMS Regional Calorimeter Trigger Jet Logic // 7th Workshop on Electronics for LHC Experiments, Stockholm, Sept. 10–14, 2001. CERN/LHCC/2001-034. Geneva, 2001. P. 238–242.