

Введение

В настоящее время на строящемся ускорительном комплексе FAIR (Facility for Antiproton and Ion Research, Дармштадт, Германия) [1] ведутся работы по созданию экспериментальной установки CBM (Compressed Baryonic Matter) [2, 3, 4, 5]. Физическая программа CBM нацелена на всестороннее изучение фазовой диаграммы сильно взаимодействующей материи и уравнения состояния вещества при экстремально высоких плотностях барионной материи, получаемых при столкновении релятивистских ядер в эксперименте с фиксированной мишенью.

Для реализации программы необходимы измерения выходов и распределений в фазовом пространстве частиц, рождающихся в области взаимодействия. Для этого в каждом событии требуются:

- восстановление короткоживущих частиц, включая очень редкие, по продуктам их распадов;
- идентификация долгоживущих продуктов взаимодействия;
- измерение центральности соударения;
- определение плоскости реакции.

Для выполнения различных измерений CBM будет функционировать в двух конфигурациях — с мюонным детектором (MUCH) и с детектором черенковских колец (RICH).

Схема экспериментальной установки с RICH представлена на рисунке 1.

Между полюсами сверхпроводящего дипольного магнита [8] расположена вакуумная камера, содержащая мишень и вершинный микродетектор (MVD) [6], выполненный на основе монолитного пиксельного детектора типа MAPS. Ниже по пучку также между полюсами, но уже вне вакуумной камеры, располагаются станции кремниевой трековой системы (STS) [7], собранные из двухсторонних микростриповых сенсоров. Координатные трековые детекторы MVD и STS предназначены для реконструкции траекторий заряженных частиц, восстановления их импульсов с точностью не хуже 1% и нахождения вторичных вершин в условиях высокой множественности и плотности частиц.

Следом за STS в рассматриваемой конфигурации расположен детектор черенковских колец (RICH) [9], предназначенный для идентификации электронов и позитронов в диапазоне импульсов от 0.5 ГэВ/с до 8 ГэВ/с с целью восстановления распадов легких векторных мезонов и J/ψ частиц. Детектор, разработке которого посвящена данная статья, имеет

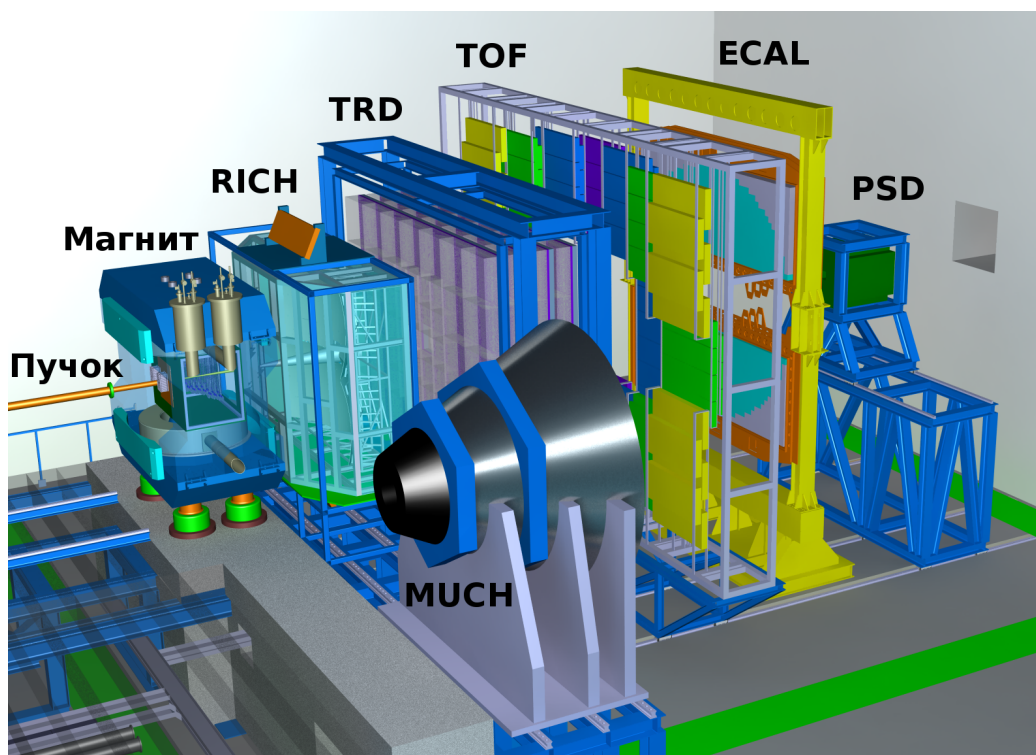


Рис. 1: Общий вид экспериментальной установки CBM в конфигурации с RICH.

радиатор длиной 1.7 м из углекислого газа под небольшим избыточным давлением, систему фокусировки из сегментированных сферических зеркал радиуса 3 м и общей площадью 13 кв.м. В качестве позиционно-чувствительного фотодетектора используется многоанодный фотоэлектронный умножитель Hamamatsu H12700.

Во второй конфигурации на месте RICH стоит мюонная система (MUCH) [10], предназначенная в первую очередь для исследования частиц, распадающихся по димюонному каналу и состоящая из чередующихся слоев железа и газовых трековых камер [1].

Детектор переходного излучения (TRD) используется для реконструкции треков частиц и идентификации электронов/позитронов в условиях доминирующего фона от пионов [1].

Для идентификации адронов используется время-пролётный детектор (TOF) [11].

Электромагнитный калориметр (ECAL) типа «шашлык» необходим для регистрации прямых фотонов и фотонов от распада нейтральных мезонов (π^0 , η) [12].

Сегментированный адронный калориметр Projectile Spectator Detector (PSD) [13] служит для определения центральности столкновения и плоскости реакции путем регистрации ядерных осколков, летящих под малыми углами у пучку.

Эксперимент характеризуется высокой множественностью частиц, большой плотностью треков под малыми углами и высокой частотой взаимодействий. Вследствие этого детекторы содержат десятки тысяч плотно упакованных каналов считывания, работающих по бестриггерной схеме, с которых необходимо собирать и анализировать «на лету» большой поток данных.

В данной статье описаны результаты тестов прототипа системы считывания и сбора данных, в котором реализованы все принципиальные узлы, как аппаратные, так и программные, разрабатываемого детектора черенковских колец эксперимента CBM.

Тесты проводились как в лабораторных условиях, так и в составе полнофункционального прототипа детектора RICH на пучке PS в ЦЕРН.

1 Фотоэлектронный умножитель

Многоанодный фотоэлектронный умножитель (МА ФЭУ) H12700 фирмы Hamamatsu [1], появившийся на рынке в 2013 г., подробно охарактеризован в работе [1]. Он обладает следующими достоинствами: большая доля площади поперечного сечения, приходящаяся на светочувствитель-

ные пиксели, квадратная форма, что позволяет перекрывать без потерь значительные площади (плотность упаковки 87%), малое время прохождения однофотоелектронного сигнала через диодную систему, малый разброс этого времени от события к событию, низкие перекрёстные помехи и низкая скорость счета тепловых электронов. Свойства данного прибора показаны в табл. 1, по большинству параметров он превосходит своего предшественника МА ФЭУ Н8500 [1]. Наряду с перечисленными достоинствами, имеются некоторые особенности, не имеющие аналогов в традиционных ФЭУ и требующие особого внимания при реализации канала считывания. (отсюда прыгаем вниз на 20 строчек?)

Таблица 1: Свойства МА ФЭУ Н12700В-03.

Темновой счёт на канал, Гц	Темновой счёт на весь МА ФЭУ, кГц	Время нарастания сигнала, нс	Разброс времени развития электронной лавины, нс
≈ 10	<1.0	0.64	0.28

Данный МА ФЭУ имеет двухщелочной фотокатод. Спектральная чувствительность МА ФЭУ в версии Н12700В-03, используемой в настоящей работе, соответствует конфигурации с входным стеклом, прозрачным в ультрафиолетовой области.

Коротковолновая граница спектра чувствительности $\lambda_{min}=185$ нм, а максимум квантовой эффективности составляет 33% и достигается при длине волны $\lambda=380$ нм. Такие спектральные характеристики хорошо подходят для регистрации черенковского излучения, лежащего в ультрафиолетовой области. Среднеквадратичное отклонение коэффициентов усиления в каналах от среднего значения не превышает 16% [1]. Разброс квантовой эффективности между пикселями составляет $\pm 10\%$ [1].

Имеются исследования [2], показывающие, что радиационная стойкость прибора достаточна для использования в эксперименте СВМ, также продемонстрирована работоспособность прибора в магнитном поле до 2.5 мТл [2]. Использование магнитных экранов и выбор оптимального расположения фотодетектора в пространстве делают этот МА ФЭУ пригодным для использования в эксперименте СВМ. Отметим, что к этому прибору проявляют интерес и другие эксперименты, например, он рассматривается и для обновления ЛНСб [2].

Обсудим особенности МА ФЭУ Н12700В-03, важные для системы считывания. Размножение электронов в диодной системе происходит в одном и том же вакуумном объеме для всех каналов. Помещённая в единый вакуумный объём диодная система типа «Metal Channel», см. 2,

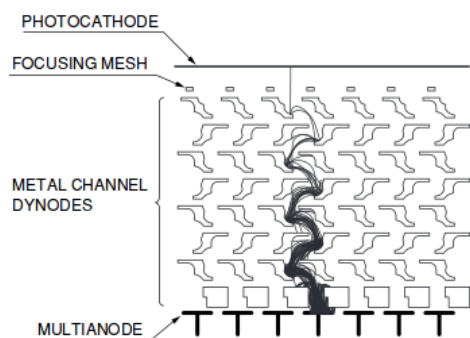


Рис. 2: Схема диодной системы типа «Metal Channel».

отличается тем, что она довольно компактна, едина для всех каналов и позволяет добиться отличных временных свойств. Электронные лавины, соответствующие разным каналам, отличаются местом прохождения через диодную систему. Имеют место такие эффекты как выбивание электронов из динодов фотонами, прошедшими сквозь фотокатод, и отклонение электронов от идеальной траектории за счет разброса энергий. Последняя особенность приводит к попаданию электронов на последующие стадии диодной системы, минуя предыдущие, и перетеканию всей или части электронной лавины в соседний канал. Перетекание части лавины в соседний канал имеет место в более чем 25% случаев при равномерном освещении всего фотокатода. Величина перетекающего заряда составляет от 3% до 7% в зависимости от взаимного расположения пикселей [1]. Вероятность того, что лавина от фотоэлектрона полностью разовьётся в соседнем канале зависит от взаимного расположения каналов и составляет при равномерном освещении от 0.1% до 2%. В классическом ФЭУ такие эффекты отсутствуют из-за наличия развитой системы фокусировки и такой конструкции диодной системы, что диноды имеют большую площадь и последующие стадии полностью экранируются предыдущими.

Описанные особенности приводят к формированию в одноэлектронном спектре низкоамплитудной части, сливающейся с шумами и отделенной от основного пика довольно глубокой ложбинкой, см рис. 3. Проявления этого эффекта в наших измерениях обсуждаются в секции ??.

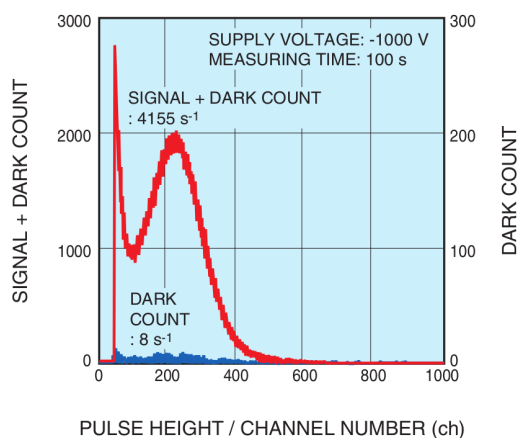


Рис. 3: Типичный одноэлектронный спектр.

2 Архитектура системы сбора данных CBM RICH

2.1 64-канальный модуль считывания

Конструктивно и функционально вся электроника считывания и оцифровки данных CBM RICH может быть сгруппирована в 64-канальные модули, каждый из которых соответствует одному многоанодному фотоэлектронному умножителю (МА ФЭУ). Схема 64-канального модуля показана на рисунке 4. Модуль включает в себя 4 платы PADIWA и одну плату TRB v3.

PADIWA — 16-ти канальная плата передней электроники, разработанная в ГСИ [1]. Общий вид платы PADIWA показан на рисунке 5. Плата устанавливается на МА ФЭУ через плату-адаптер, единственным назначением которой является соединение анодов МА ФЭУ с соответствующими входами PADIWA. С одной стороны печатной платы PADIWA расположены 16 сигнальных входов с импедансом 100 кОм. На каждый вход приходится два контакта — земля и сигнал. Они чередуются таким образом, чтобы можно было подключить PADIWA к плате-адаптеру любой стороной. Каждый канал PADIWA имеет собственный фильтр низких частот с полосой пропускания около 100 МГц и предусилитель, которые образуют аналоговую часть канала. После усиления сигнал поступает в программируемую пользователем вентильную матрицу (ППВМ). Обычно ППВМ применяются для обработки цифровых (логических) сигналов, однако, в нашем случае на входные цифровые линии подаётся аналоговый сигнал. В ППВМ для каждой входной линии можно задать свой порог, разделяющий логические уровни входного сигнала. Таким обра-

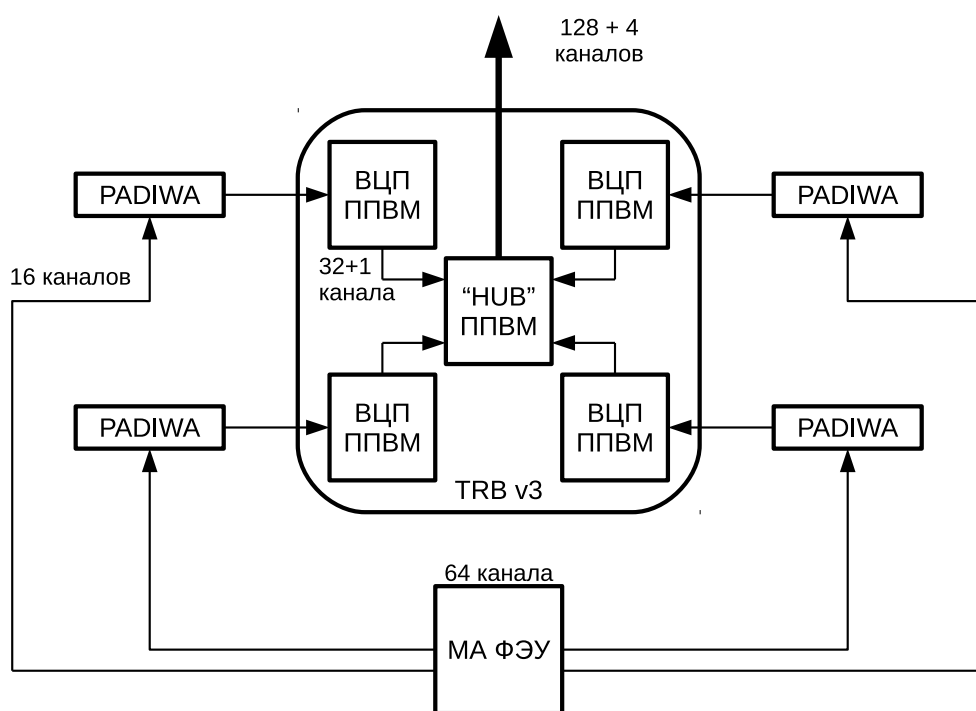


Рис. 4: Схема считывания одного МА ФЭУ, состоящая из 4 плат-дискриминаторов PADIWA и одной платы TRB v3.

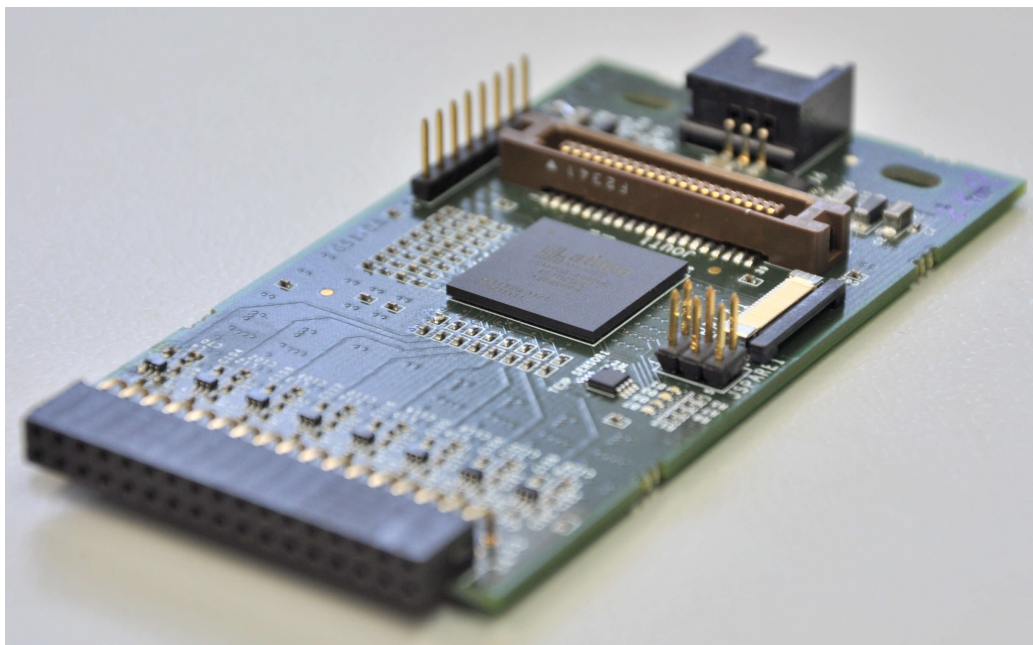


Рис. 5: Общий вид платы PADIWA.

зом, настраиваемые входы ППВМ могут использоваться как дискриминаторы. На выходе каждого канала формируется логический ноль, когда входной сигнал в этом канале ниже установленного порога, и логическая единица, когда входной сигнал выше этого порога, см. рисунок 6. Далее расположены выходные порты и порты настройки ППВМ, объединённые в разъем, позволяющий подключить 20 LVDS линий. Для управления платой используются 4 LVDS линии, остальные 16 LVDS линий — выходные. Для программирования ППВМ на плате предусмотрен стандартный JTAG порт. Также на плате имеется порт для подключения источника низкого напряжения для питания платы. Помимо этого имеется датчик температуры, подключённый к ППВМ. Сигналы с датчика могут использоваться, для того, чтобы обнаружить перегрев, если такая возможность заложена в программе ППВМ.

Многофункциональная плата TRB v3 содержит 5 ППВМ, каждую из которых можно запрограммировать независимо. Различают 1 центральную ППВМ и 4 периферийные. В нашем случае 4 периферийные ППВМ запрограммированы как время-цифровые преобразователи (ВЦП), а центральная ППВМ — как концентратор данных. Такую конфигурацию платы будем называть TRB v3 (конфигурация 1).

Выходные логические LVDS сигналы со всех 16 каналов платы PADIWA поступает в одну из периферийных ППВМ платы TRB v3, где каждый

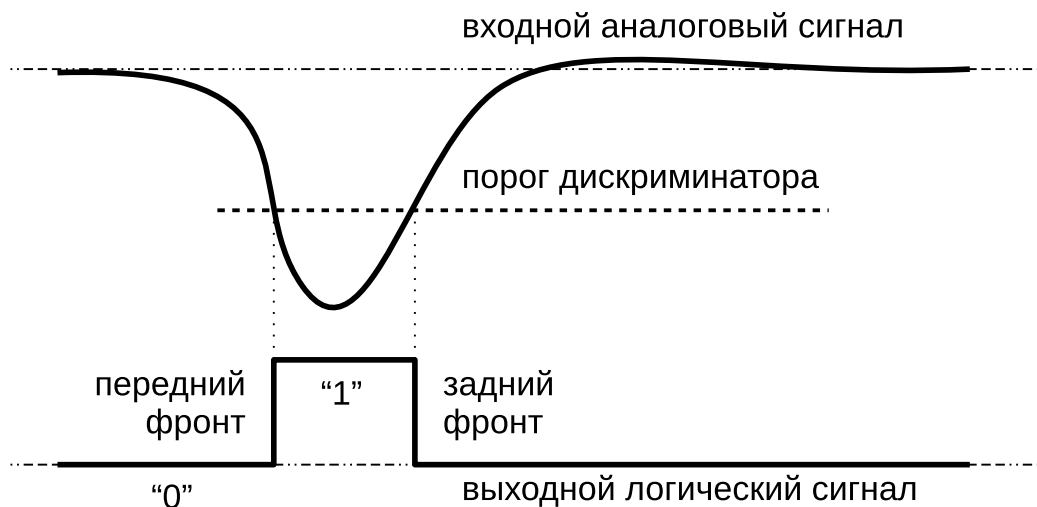


Рис. 6: Условная временная диаграмма функционирования дискриминатора.

входной канал разветвляется на два канала ВЦП — один чувствителен к переднему фронту, второй — к заднему. К получившимся 32 каналам в каждой периферийной ППВМ добавляется канал синхронизации. Таким образом, на выходе всей платы TRB v3 имеются 132 канала.

Общий вид платы TRB v3 показан на рисунке 7. Рядом с каждой периферийной ППВМ имеются специальные порты, к которым можно присоединить платы расширения. В частности, к плате расширения подключается сигнальный шлейф от платы PADIWA. На плате TRB v3 имеются порты Ethernet, как RG45, так и оптический SFP, которые используются для двусторонней связи с другими платами TRB v3 или с компьютером.

Каждая периферийная ППВМ, разбивается на 32 области, в каждой из которых программируется одна и та же схема канала ВЦП. Каналы расположены в разных областях матрицы, поэтому каждый канал ВЦП имеет свою величину пути, проходимого сигналом внутри ППВМ. Нечетные каналы настроены на положительный перепад напряжения, т.е. на передний фронт, а четные каналы — на отрицательный перепад напряжения, т.е. на задний фронт. Обработка импульса из одного входного канала выполняется двумя каналами ВЦП, относительная задержка между которыми должна быть прокалибрована с помощью точного генератора прямоугольных импульсов. Особенности такой калибровки обсуждаются в [1]. Отметим, что в ППВМ для каждого канала ВЦП имеется специальный счётчик количества зарегистрированных временных

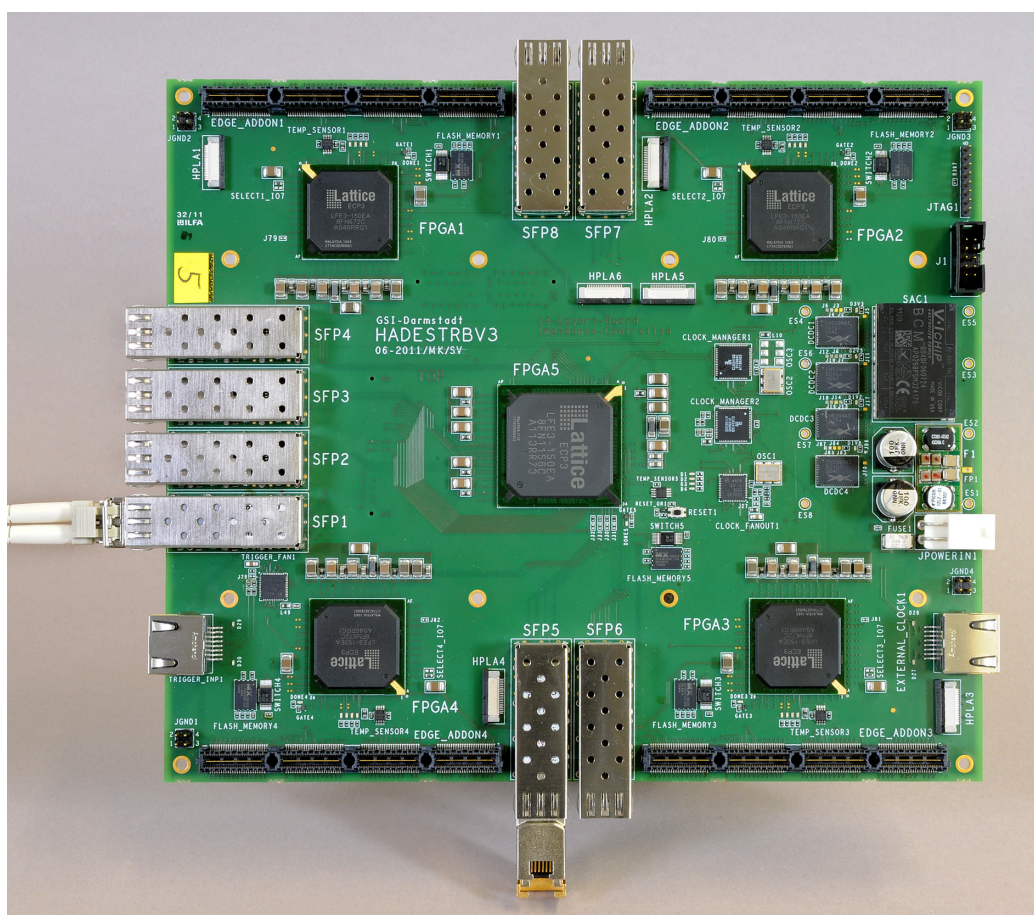


Рис. 7: Общий вид платы TRB v3.

отметок, значение которого может быть опрошено независимо от основного потока данных. Этот счётчик может быть использован, например, для получения зависимости скорости счёта от порога дискриминатора с целью определения оптимального порога.

Регистрация момента времени в ВЦП осуществляется в два этапа. Грубое значение регистрируется кольцевым счётчиком, который управляется от тактового генератора с периодом 5 нс. Старшие 28 разрядов счётчика называются эпоха (*epoch*), а 11 младших разрядов называется грубым временем (*coarse*) []. При регистрации момента времени входного фронта значение времени кодируется двумя сообщениями — эпохой (*epoch*) и собственно так называемой временной отметкой (*timestamp*). Чтобы уменьшить поток выходных данных значение эпохи, которое увеличивается каждые 10.24 мкс, передаётся однократно для группы временных отметок, принадлежащих данной эпохе.

Для более точного измерения применяется дополнительный 10-битный регистр точного времени (*fine*). В регистр пишется значение счётчика точного времени, реализованного с помощью технологии Tapped delay line (TDL) на 512-ти элементах. Теоретически, если все элементы задержки идентичны, полный период счётчика грубого времени, равный 5 нс, можно разбить на 512 отсчётов. Тогда точность измеренной временной отметки была бы равна 9.9 пс, а полное время рассчитывалось бы как $T = (epoch \cdot 2048 + coarse - (fine/512)) \cdot 5\text{нс}$.

Однако, в силу неидеальности компонентов, существует разброс параметров элементов в линии задержки, следовательно, требуется калибровка результатов измерения точного времени относительно диапазона значений регистра. Процедура калибровки и анализ ее качества обсуждаются в секциях 4 и 5.1 соответственно.

Находящиеся на TRB v3 ППВМ формируют 4-байтовые сообщения одного из следующих типов: EVENT, SUBEVENT, SUBSUBEVENT HEADER, TDC HEADER, EPOCH COUNTER, TIMESTAMP, DEBUG. Логика формирования сообщений подробно описана в документации [].

Рассмотрим для примера структуру сообщения типа TIMESTAMP, наиболее информативного для нашего анализа. В зависимости от номера канала это сообщение может нести информацию о фронте синхронизации SYNC, о переднем фронте хита LEAD или о заднем фронте хита TRAIL.

Старший бит (левый) указывает на то, что данное сообщение является временной отметкой. Следующие два бита не используются. Следующие 7 бит указывают номер канала 4. Затем 10 бит указывают значение счётчика точного времени 0x45. Далее вспомогательный бит *edge*, который на данный момент не используется. Последние 11 бит кодируют значение счётчика грубого времени 0x334. Далее отсюда вычисляется

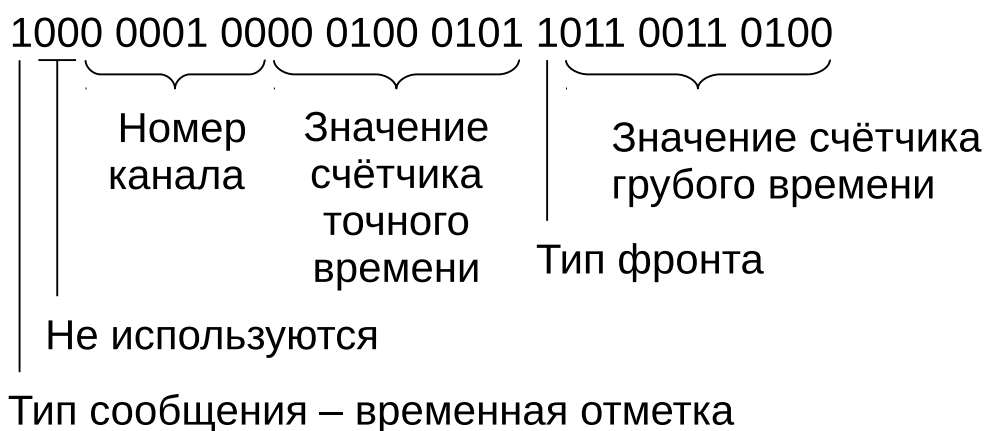


Рис. 8: Пример сырого сообщения типа «временная отметка».

полное значение времени в наносекундах (2681319745539.841309).

Необходимо отметить, что каждый канал считывания характеризуется некоторой индивидуальной задержкой между моментом рождения фотоэлектрона и значением отметки времени переднего фронта. Эта задержка определяется временем развития электронной лавины в диодной системе, временем распространения сигнала по проводникам и временем переключения логических элементов. Процедура коррекции задержек и ее особенности описаны далее в секциях [] и [].

2.2 Концентрация и ввод данных в ЭВМ

В концепции системы сбора данных эксперимента СВМ предусмотрено 4 функциональных уровня, каждый из которых реализован соответствующими платами. В общем случае к детектору примыкает плата передней электроники (FEB — front-end board), где осуществляются аналоговые преобразования и оцифровка сигналов. Далее данные в виде электрических цифровых сигналов поступают в плату чтения (ROB — readout board), где происходит концентрация данных и их пересылка по оптическому каналу. На следующем уровне расположены платы обработки данных (DPB — data processing board), в которых данные с различных детекторов уплотняются за счет удаления избыточной информации специфическим для каждого детектора способом, группируются в пакеты данных, называемые срезами времени (time slice), в которые попадают сообщения со всех детекторов, имеющие временную отметку в заданном интервале, и передаются далее по меньшему числу оптических каналов с

более высокой пропускной способностью [1]. После этого данные поступают в память, доступную центральному процессору ЭВМ по высокоскоростной шине через платы интерфейса, называемые FLIB. Аббревиатура FLIB обозначает FLES Interface Board, а FLES [1], в свою очередь, обозначает First Level Event Selector, т.е. специализированный аппаратно-программный комплекс для построения событий «на лету» и их отбора по заданным критериям. Плата FLIB может быть реализована, например, путем программирования коммерческой PCI-E платы HTG K-7.

В случае пучковых тестов RICH плата передней электроники реализована как пара PADIWA-TRB v3 (конфигурация 1). В будущем планируется объединение функционала этих плат на одной плате DIRICH. В качестве ROB используется плата TRB v3, сконфигурированная как концентратор. Плата DPB находится в стадии разработки прототипа, а плата FLIB была впервые применена в одном из протестированных вариантов системы сбора данных. При этом значительная часть измерений была выполнена с использованием стабильной системы сбора данных на основе DABC [1] и обычной сетевой карты.

3 Экспериментальные установки

3.1 Экспериментальная установка на пучковых тестах

Исследование системы считывания и сбора данных проводилось в составе полнофункционального прототипа детектора RICH эксперимента CBM в ходе комплексных пучковых испытаний прототипов нескольких детекторов того же эксперимента. Подробности реализации прототипов детектора переходного излучения и время-пролетного детектора содержатся в работах [1] и [2] соответственно. Схема установки представлена на рисунке 9.

Вывод пучка T9 ускорителя PS [1] в ЦЕРНе представляет собой смешанный вторичный пучок электронов и пионов импульсом, настраиваемым в диапазоне 0.5 ГэВ/с — 10 ГэВ/с. В течение пучковых тестов пучок был настроен на импульс от 1 до 3 ГэВ/с. Длительность вывода составляла около 2 секунд, причем за это время регистрировалось в среднем 500 электронов.

Схема прототипа детектора RICH эксперимента CBM представлена на рисунке 10.

Габариты герметичного алюминиевого корпуса — 1.4 м в ширину, 1.2 м в высоту и 2.4 м вдоль пучка, при этом длина пути частицы в

радиаторе до зеркал — 1.7 м. Радиатор детектора — углекислый газ под избыточным давлением 2 мбар при комнатной температуре. Показатель преломления газа для ближнего ультрафиолета составляет при этом $n=1.00045$. Стабилизация избыточного давления газа с точностью 0.1 мбар и его чистота обеспечивались газовой системой, описанной в [1]. Абсолютное давление газовой смеси и температура мониторируются системой медленного управления. Актуальное значение показателя преломления автоматически вычисляется и сохраняется в данных.

Система позиционирования зеркал представляет собой раму верхнего уровня, вставляющуюся в корпус прототипа; вложенную раму, соединённую с основной рамой через два привода, обеспечивающие вращение вокруг вертикальной оси; внутреннюю раму, соединённую со вложенной рамой через два привода, обеспечивающие вращение вокруг горизонтальной оси. Сферическое зеркало радиусом кривизны 3 м состоит из 4 долей 40 см на 40 см. Каждая из долей крепится к внутренней раме через три моторизированных актуатора. Перечисленные двигатели позволяют удалённо, после установки детектора на пучке, позиционировать зеркала. Более подробно система позиционирования зеркал описана в [1].

Система диагностики положения зеркал состоит из светоотражающей сетки, занимающей всю переднюю стенку корпуса прототипа, светодиода Roithner UVTOP240 с длиной волны 245 нм и фотоаппарата, считываемого удалённо. Сетка сделана из полос ретрорефлектора шириной 10 мм и имеет прямоугольную ячейку шагом 100 мм по горизонтали и 110 мм по вертикали. Эта система позволяет контролировать точность поворота зеркал и, при наличии удалённого управления зеркалами, корректировать его. Также существуют алгоритмы расчёта поправок координат хитов для коррекции ошибок, вызванных неидеальным позиционированием зеркал. Идея метода заключается в следующем. Свет от светодиода, отражаясь от сетки и затем от зеркал, попадает в объектив фотоаппарата. На полученном кадре с помощью алгоритмов распознавания образов находятся линии сетки. При наличии отклонений зеркал от идеального положения, восстановленный образ сетки будет состоять из набора отдельных отрезков. Анализируя параметры отрезков, можно определить значения отклонений отдельных долей зеркала, значения поправок к поворотам отдельных долей зеркала, значения коррекций хитов.

Черенковское излучение фокусируется зеркалами на фоточувствительную камеру, содержащую матрицу 4 на 4 многоанодных фотоэлектронных умножителей (МА ФЭУ), шесть из которых — это МА ФЭУ Hamamatsu H12700 и десять — МА ФЭУ Hamamatsu H8500. Данные модели МА ФЭУ имеют сечение 52 мм на 52 мм. Часть фотоумножителей была предварительно покрыта тонким слоем пара-терфенила в качестве

смещителя спектра. В определённый момент во время пучковых тестов сместитель спектра был счищен. Это позволило в дальнейшем оценить влияние сместителя спектра на эффективность регистрации одиночных фотонов и на временной разброс хитов, принадлежащих к одному кольцу. Для мониторингирования системы считывания и калибровки относительных задержек между каналами, наряду со светодиодом, использовался лазер Alphalas PicopowerLD405 с длиной волны 405 нм и длительностью импульса по паспорту менее 40 пс. Частота срабатывания лазера, так же как и светодиода составляла 100 Гц. Интенсивность лазера была подобрана так, чтобы частота срабатывание каждого пикселя была на уровне 10% от частоты запуска лазера.

Считывание с каждого МА ФЭУ осуществлялось модулем, описанным в разделе ???. Механически, все 16 МА ФЭУ монтировались на плату-адаптер, обеспечивающую герметичность корпуса и разводку высокого напряжения. Снаружи к плате-адаптеру монтировались платы предусилителей-дискриминаторов PADIWA, логический сигнал с плат PADIWA передавался по шлейфам, состоящим из витых пар и имеющих длину 2 м, к платам TRB v3 (конфигурации 1), установленным на корпусе прототипа. Для всей камеры потребовалось всего 64 платы PADIWA и 16 плат TRB v3 (конфигурации 1). Импульсы с генераторов, управляющих лазером и светодиодом, а также сигналы от детекторов пучка обрабатывались платами PADIWA-amp (плата, подобная PADIWA, но позволяющая измерять амплитуду сигнала и имеющая в два раза меньшее число каналов []) и оцифровывались ВЦП на ещё одной плате TRB v3.

(Доделать)

Параллельно функционировало две системы сбора данных – одна принимала данные через стандартный сетевой интерфейс (сетевой концентратор) с каждой платы TBR v3, а другая через FLIB с одной платы TBR v3, работавшей как концентратор. Схема считывания всей камеры и детекторов пучка представлена на рисунке 11. Отметим, что ЭВМ с установленной в неё платой FLIB, использовалась для приёма данных не только от прототипа RICH, но и от других детекторов.

3.2 Лабораторный стенд

Система считывания на основе платы PADIWA впервые использовалась на пучковых тестах СВМ в ноябре 2014 г. Простейший анализ набранных данных, показал, что некоторые распределения временных отметок не поддаются очевидному объяснению. В связи с этим потребовалось собрать лабораторный стенд, позволяющий более подробно исследовать

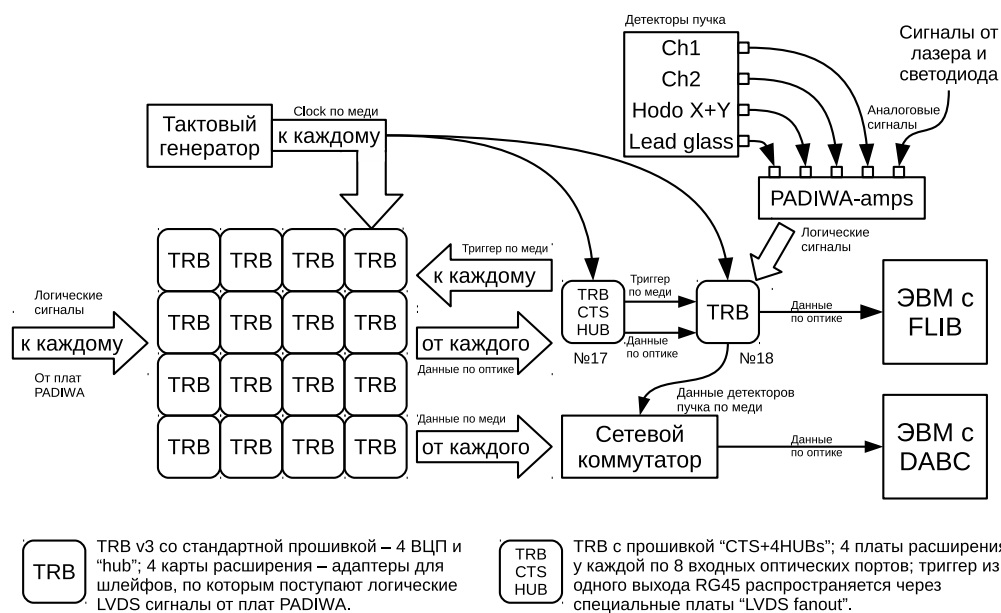


Рис. 11: Схема считывания всей камеры и детекторов пучка.

особенности работы одного многоканального модуля системы считывания, описанного в разделе 2. В некоторых измерениях выходной LVDS сигнал с PADIWA не оцифровывался ВПЦ, а считывался осциллографом с помощью активного зонда. Для лучшего понимания особенностей работы исследуемой системы считывания и сбора данных в том же лабораторном стенде был реализован более информативный, но медленный вариант системы считывания и сбора данных на основе 128-канальной микросхемы n-XUTER, каждый канал которой измеряет момент времени прихода переднего фронта и амплитуду входного сигнала. Эта система состоит из платы передней электроники 1xnxyter [1], подключаемой через печатную плату-адаптер к МА ФЭУ и через контроллер считывания SysCore ROC [2] к ЭВМ. Для считывания одного МА ФЭУ достаточно 64 каналов, то есть половины каналов одной платы передней электроники.

Схема лабораторного стенда приведена на рисунке 12.

Стенд собран в светонепроницаемом корпусе размером 80 см на 80 см и длиной 2 м. В качестве источника света использовался такой же лазер Alphalas Picopower LD405 [3] с поставляемым с ним генератором Alphalas PLDD-250 [4], как и в пучковых тестах. Свет от лазера поступал внутрь корпуса по оптоволокну. Для того, чтобы обеспечить равномерное освещение поверхности МА ФЭУ свет лазера проходил через рассеивающее матовое стекло. Интенсивность лазера подобрана так, чтобы каналы МА

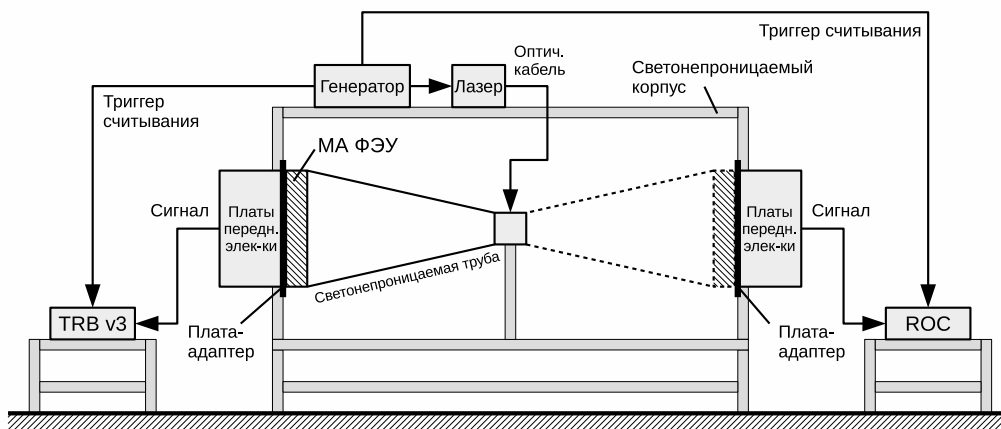


Рис. 12: Схема лабораторной установки.

ФЭУ работали в одноэлектронном режиме. Частота регистрации фотоэлектронов в каждом канале составляет около 10% от частоты вспышек лазера.

На расстоянии приблизительно 30 см от рассеивающего стекла расположен МА ФЭУ Н12700. Для того, чтобы обеспечить максимально чистые измерения, выполнена тщательная изоляция МА ФЭУ от внешнего света. Рассеивающее стекло и МА ФЭУ были помещены в черную, специально изготовленную на 3D принтере, пластиковую трубу, которая, в свою очередь, была помещена в светоизолированный корпус.

Известно, что требуется некоторое время, чтобы МА ФЭУ, находившийся на свету, высветился, поэтому перед началом измерений после закрытия корпуса обязательно выдерживался интервал не менее одного часа. В любой момент была возможность удалённо выключить лазер и исследовать темновой шум МА ФЭУ. Для снижения наводок от люминесцентных ламп на время измерений свет в помещении выключался.

Две системы считывания и сбора данных были установлены одновременно, каждая на своей стороне корпуса. Упомянутая выше пластиковая труба, рассеивающее стекло и МА ФЭУ поворачиваются как единое целое, обеспечивая одинаковые условия засветки МА ФЭУ в положениях, соответствующих работе с обеими системами считывания.

Опорные печатные платы-адаптеры необходимы для того, чтобы на них с одной стороны крепились МА ФЭУ, а с другой — платы передней электроники. Плата-адаптер вмонтирована в стенку коробки и выполняет роль каркаса и светоизолятора. Также по ней разведено питание МА ФЭУ. Вся считывающая электроника питалась низким напряжением, а МА ФЭУ высоким напряжением от высоковольтного источника.

Обе системы считывания и сбора данных являются самозапускающимися в том смысле, что каждый импульс на входе, при преодолении установленного порога, регистрируется и заносится в выходной буфер. Однако для того, чтобы данные из выходного буфера были отправлены в ЭВМ, необходимо периодически посылать во вспомогательный вход контроллера считывания специальный импульс, называемый триггером считывания. В нашей установке импульсы генератора, управляющего лазером, одновременно играют роль триггера считывания выходного буфера. В используемых системах считывания и сбора данных триггер считывания автоматически поступает во входной поток данных. Это позволяет анализировать зарегистрированные временные отметки, сопоставляя их с моментом вспышки лазера. Съём данных с обеих систем считывания и сбора данных осуществлялся по стандартному Ethernet кабелю в сетевой интерфейс ЭВМ.

4 Программное обеспечение

Программное обеспечение системы считывания и сбора данных прототипа CBM RICH представляет собой набор модулей приема, первичной обработки и сохранения данных, реализованных в рамках программного каркаса CbmRoot []. CbmRoot вместе с FLESnet [] образуют инфраструктуру позволяющую выполнять приём данных, моделирование, реконструкцию и анализ данных эксперимента CBM.

Соответствующим образом сконфигурированное приложение, написанное в рамках CbmRoot, может быть запущено на ЭВМ, как частный случай на распределенной вычислительной системе. Все этапы от считывания до анализа могут быть выполнены «на лету», без записи промежуточных результатов на диск. В ходе описываемых в данной статье тестов использовалась последовательность обработки данных, изображённая на рисунке 13. Программная реализация, функционал и взаимодействие отдельных блоков описаны ниже.

(Напишите об особенностях софта для работы с данными в случае использования FLIB.)

4.1 Распаковка

Распаковка это первый этап обработки данных, поступающих с электроники. В CbmRoot есть возможность обрабатывать данные как поступающие напрямую с детектора, так и сохранённые в файле (с помощью DABC в формате hld — HADES list mode data format []).

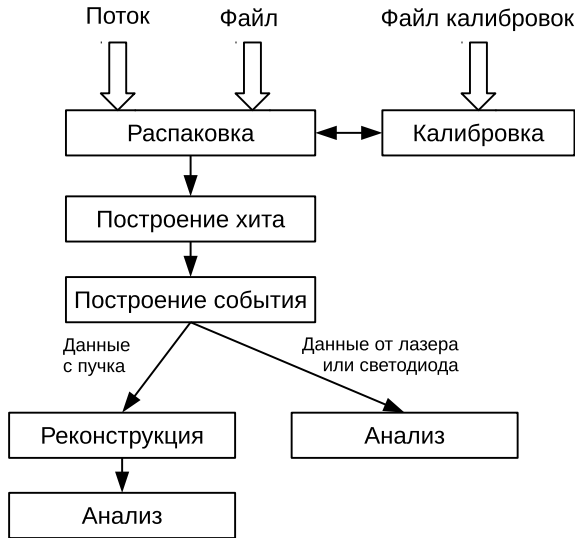


Рис. 13: Диаграмма взаимодействия программных модулей.

Распаковка реализована как task-класс `CbmRichTrbUnpack` и в результате выполнения каждой итерации на выходе формируется `TClonesArray` с объектами класса `CbmTrbRawMessage`.

4.2 Калибровка точного времени

В процедуре калибровки точного времени воплощена известная техника калибровки счётчика цифровой линии задержки, реализованного с помощью технологии Tapped delay line [], основанная на том, что распределение времен прихода сигналов должно быть равномерным по временному интервалу, занимаемому всеми элементами задержки. В результате анализа набранной порции данных для каждого канала строится дискретная функция $f_{calib}(Fine)$, называемая таблицей перехода от значения счётчика к значению точного времени в наносекундах. При использовании таблицы калибровки точного времени полное время вычисляется как $T = Epoch \cdot 2048 \cdot 5 + Coarse \cdot 5 - f_{calib}(Fine)$ нс.

Процедура калибровки точного времени реализована в singleton-классе `CbmTrbCalibrator`, который не является частью конвейера обработки данных — обращение к объекту данного класса может производиться из любого места в программе. Присутствует возможность сохранения таблиц калибровки в отдельном файле, что ускоряет многократные расчёты за счёт повторного использования однократно рассчитанных таблиц.

4.3 Коррекция задержек между каналами

Для коррекции задержек между каналами в классе CbmTrbCalibrator реализована возможность импорта таблицы коррекций, построенной предварительно с помощью CmbRoot-макросов «ExtractDelays» и «BuildDeltaTable» на основе результатов первого прогона анализа. Первый макрос извлекает параметры гистограмм в текстовом виде из многочисленных файлов результатов анализа, полученных с помощью CbmRoot, возможно, с применением параллельных расчётов. Второй макрос строит таблицу коррекций по данным параметрам.

Алгоритм коррекции задержек состоит в следующем. Введем сплошную нумерацию пикселей по всей фоточувствительной камере, состоящей из множества МА ФЭУ. Полное число пикселей $64 \cdot N$, где N — число МА ФЭУ. Для анализа отбираются все передние фронты, имеющие временную отметку, попадающую в заданное временное окно относительно триггера срабатывания лазера. Ширина и положение окна зависят от экспериментальной установки (например разницы длин кабелей, точности регистрации триггера) и характеристик лазера и подбираются в соответствии с распределением, построенному по конкретному набору данных. Обычно ширина составляет около 100 нс, а левая граница сдвинута от триггера на 20 нс. По всему массиву отобранных данных строятся гистограммы разности временных отметок i -го и j -го каналов, где i и j пробегают значения от 1 до N . В качестве меры разности задержек между каналами можно взять по выбору пользователя либо среднее значение распределения, либо наиболее вероятное. Полученные значения заполняют кососимметричную матрицу A размерности $N \cdot N$. В дальнейшем пользователь может задать опорный канал, относительно которого будет создана таблица коррекций, являющаяся, по сути, столбцом матрицы A .

4.4 Построение хита

Сигнал от каждого зарегистрированного фотона, называемый хитом, состоит из двух сообщений, содержащих временные отметки переднего и заднего фронтов. Т.к. разные каналы имеют разные задержки и вероятность регистрации отдельных фронтов не равна 100%, необходимо было в анализе данных реализовать алгоритм подбора пар фронтов. Данная процедура реализована в task-классе CbmTrbEdgeMatcher, который стоит в конвейере после распаковки и фактически выполняется после применения всех калибровок.

Для каждого внешнего канала был реализован буфер сообщений, который наполнялся передними фронтами по мере их поступления. Далее,

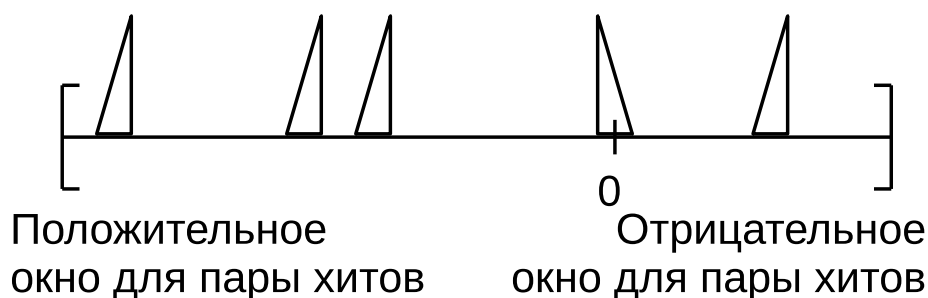


Рис. 14: Постановка задачи поиска пар фронтов для одного входного канала.

как только приходил задний фронт выбирался наиболее близкий по временной отметке передний фронт из буфера. На рисунке 14 приведён пример буфера передних фронтов для заданной пары внутренних каналов в момент прихода одного заднего фронта. Время над порогом (ToT) — параметр хита, говорящий об амплитуде сигнала. Он вычисляется как разница временных отметок заднего и переднего фронтов в подобранной паре. Допускаются как положительные, так и отрицательные значения ToT, однако в обе стороны накладывается ограничение.

Т.к. не всегда присутствует соответствующий парный (передний либо задний) фронт, буфер постепенно наполняется и его необходимо очищать, чтобы избежать переполнения. Если для поступившего заднего фронта нет кандидата переднего фронта в буфере это означает, что передний фронт не был зарегистрирован. В таком случае этот задний фронт отбрасывается. Количество ненайденных фронтов сильно зависит от нагрузки входного канала ВЦП, которая в свою очередь зависит от порога дискриминатора. При низком пороге регистрируется высокочастотный шум электроники, что приводит к формированию огромного потока формируемых сообщений, которые не могут быть переданы из-за ограниченной пропускной способности выходного тракта системы считывания.

Предусмотрена возможность принимать одиночные передние фронты в качестве хитов, однако практика показала, что в этом нет смысла, т.к. в нормальном режиме ненайденные пары в основном обусловлены ошибками ВПЦ, но доля таких сообщений пренебрежимо мала, менее $2 \cdot 10^{-4}$.

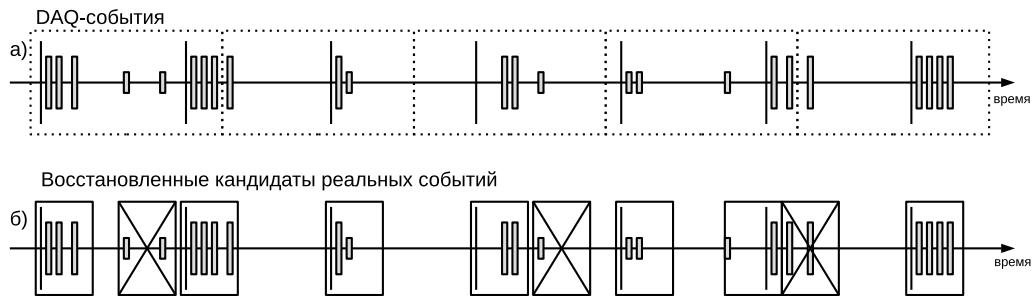


Рис. 15: Идея алгоритма построения события: (а) поступающие данные, сгруппированные в DAQ-события; (б) восстановленные кандидаты реальных событий; перечёркнуты отбрасываемые кандидаты, не содержащие триггер. Тонкие длинные линии — триггерные сигналы, прямоугольники средней длины — сигналы, связанные со светом, короткие прямоугольники — шумовые сигналы.

4.5 Построение события

В силу того, что электроника бестриггерная и приём данных осуществляется порциями данных (DAQ-события), никак не связанными с реальными событиями для формирования корректной входной информации для реконструкции и дальнейшего анализа данных, необходимо выполнять процедуру построения события.

Рассмотрим некоторый интервал времени, приведённый на рисунке 15, в течение которого поступают:

- Триггерные сигналы — импульсы с генератора, питающего лазер, либо сигналы с детекторов пучка;
- Сигналы, скорелированные с импульсами с генератора или детекторами пучка, т. е. связанные со светом;
- Шумовые сигналы, распределённые равномерно во времени.

Очевидно, что реальное событие может попасть на границу DAQ-событий, следовательно, необходимо при построении реальных событий смотреть на несколько DAQ-событий. Также в силу особенностей электроники не гарантируется, что входная информация поступает упорядоченной во времени. Поэтому периодически случается, что хиты реального события, пришедшего в i -м DAQ-событии обнаруживаются в $i+1$, реже $i+2$, и даже $i+3$ и последующих DAQ-событиях. Следовательно, требуется сначала распознать кластеры хитов в достаточно широком интервале

времени — потенциальные события, а затем по наличию заданного типа триггера выбрать реальные события, содержащие либо черенковские кольца, либо вспышки лазера.

Реализован данный алгоритм с помощью буфера хитов. По мере распаковки входных сообщений, построенные хиты заносятся в буфер. На каждой итерации осуществляется распознавание кандидатов событий в буфере и определяется их количество N .

Когда N достигает заданного минимального уровня, на каждой итерации, помимо приёма одного входного DAQ-события, осуществляется выброс выходного кандидата реального события. Так как одно DAQ-событие может содержать несколько кандидатов, буфер будет расти. Для того, чтобы избежать переполнения, устанавливается верхний предел. Когда N достигает этого предела, осуществляется сброс событий на выход по принципу FIFO до заданного минимального уровня. На рисунке 16 приведён отрывок диаграммы наполненности буфера по мере обработки входного потока. В данном примере были установлены следующие параметры: минимальное кол-во событий в буфере 200, максимальное — 500. Отметим, что количество событий в буфере может превышать заданное максимальное значение, если в одном DAQ-событии содержится более одного реального события.

По окончании входного потока содержимое буфера обрабатывается полностью и все распознанные события подаются на выход.

4.6 Реконструкция

Реконструкция в CBM RICH означает поиск колец по хитам в плоскости реконструкции. Хит это загоревшийся пиксель ФЭУ. Конус черенковских фотонов, после фокусировки зеркалами, пересекает поверхность фотоувствительной камеры, которая в общем случае может состоять из нескольких плоскостей. Первый этап реконструкции — перевод хитов из плоскостей камеры в плоскость реконструкции. Затем выполняется поиск колец по хитам. В CbmRoot есть реализации нескольких алгоритмов поиска колец. Наибольший практический интерес представляет алгоритм распознавания колец черенковского излучения, основанный на преобразовании Хафа, описанный в работах [1]. Реализация данного алгоритма была специально адаптирована для данных пучковых тестов, в которых ожидается одно кольцо на событие. Данный алгоритм реализован в классе CbmRichProtRingFinderHoughImpl, унаследованном от CbmRichProtRingFinderHough и далее от CbmRichRingFinder. После этого определяются параметры кольца и далее реконструкция с применением информации с других детекторов.

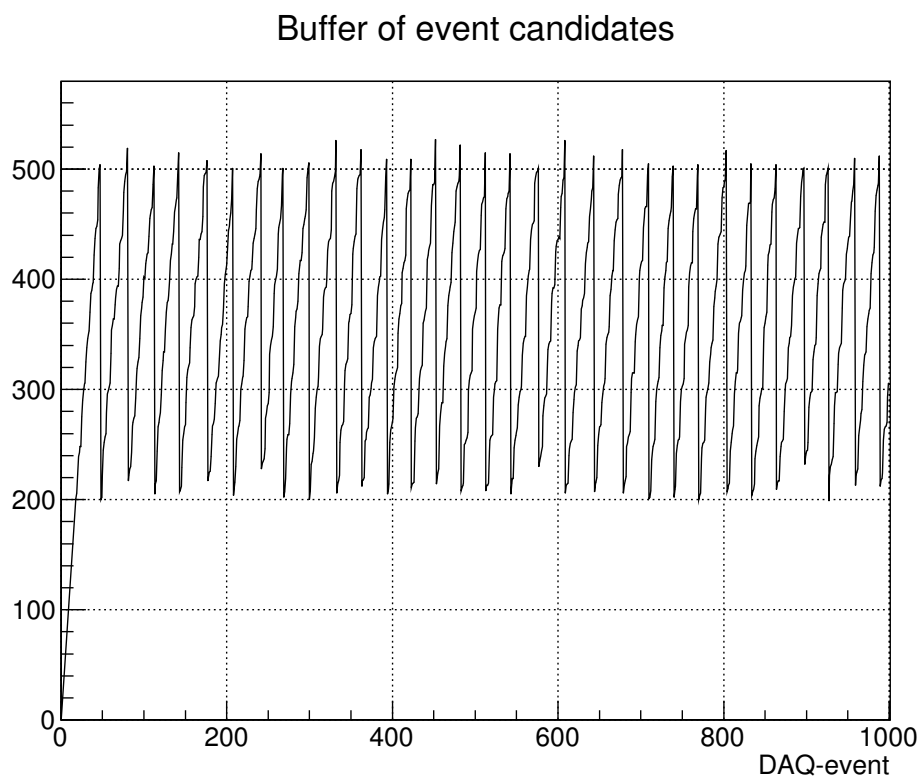


Рис. 16: Диаграмма наполненности буфера найденных событий в зависимости от номера обработанного входного DAQ-события.

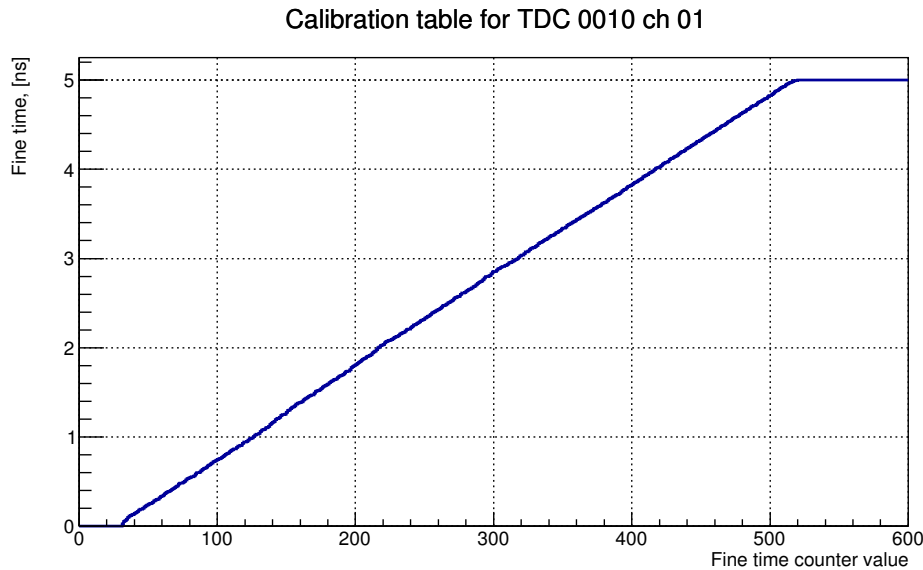


Рис. 17: Пример калибровочной кривой.

5 Результаты

5.1 Калибровка точного времени (Fine time calibration)

Пример таблицы калибровки точного времени, полученной на данных лабораторных тестов, представлен в виде графика на рисунке 17. По оси абсцисс откладывается значение счётчика точного времени, а по оси ординат — значение точного времени в наносекундах. Вид графика не зависит от того, по каким данным он был построен, так как он определяется архитектурой время-цифрового преобразователя. Обратите внимание, что в диапазоне значений десятибитного счетчика точного времени интервалу равному периоду грубого счетчика, т.е. 5 нс, соответствуют отсчеты от 30 до 520. Точные границы интервала определяются тем, что значения задержек отдельных элементов цифровой линии задержки индивидуальны и зависят от флуктуаций технологического процесса.

С целью понимания особенностей работы счетчиков точного времени, каждая таблица калибровки точного времени была фитирована кусочно-линейной функцией. На рисунке 18 показан пример разности значений функции калибровки точного времени и линейной функции. Видно, что отклонения не превышают 60 пс.

Каждая аппроксимирующая кусочно-линейная функция состоит из трёх отрезков и может быть однозначно описана двумя координатами

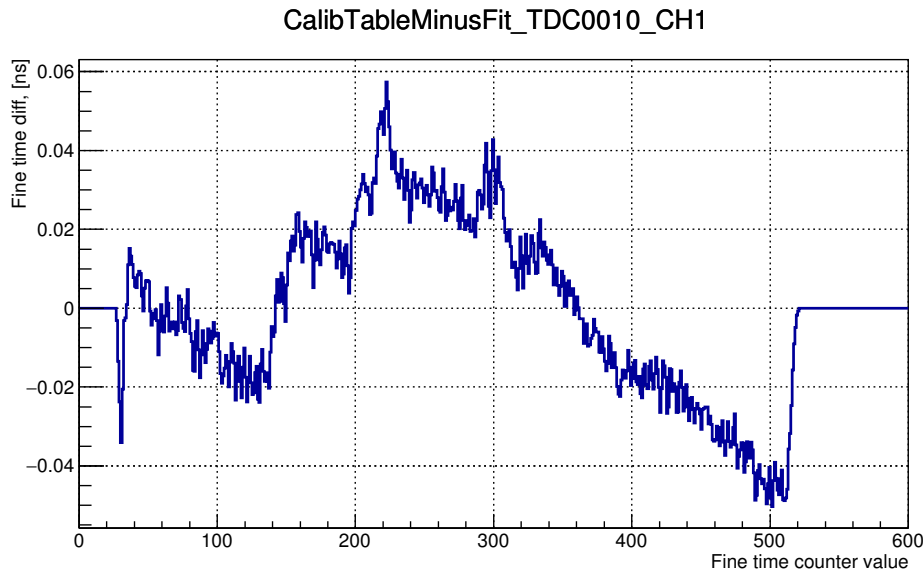


Рис. 18: Отклонение калибровочной кривой от линейной функции.

изломов, которые приблизительно соответствуют двум крайним рабочим значениям счётчика точного времени. Параметры линейных функций для всех каналов отображены на двумерной гистограмме на рисунке 19. Видно, что распределение хотя и двугорбое, но достаточно компактное.

Один из возможных способов оценки влияния калибровки на точность регистрации временных отметок это исследование физически одновременных фронтов, которые можно получить, например, с помощью высокоточного генератора прямоугольных импульсов.

В процедуре калибровки для каждого канала была выполнена замена калибровочной таблицы сначала индивидуальной линейной функцией данного канала, а потом усредненной. Полученные распределения измеренной ширины импульса в исследуемом канале показаны на рисунке 20.

Видно, что полноценная калибровка точного времени необходима для достижения предельной точности ВЦП, составляющей 30 пс (FWHM). Использование индивидуальной линейной функции приводит к падению точности до 70 пс, а усреднённой — до ??? (без калибровки) в наиболее неблагоприятных каналах. Таким образом, при невозможности выполнить калибровку точного времени, например, из-за недостаточного массива данных, предоставленных для анализа, в условиях нашей задачи, когда характерное временное разрешение составляет несколько сотен пикосекунд, возможно применение усредненной линейной функции без

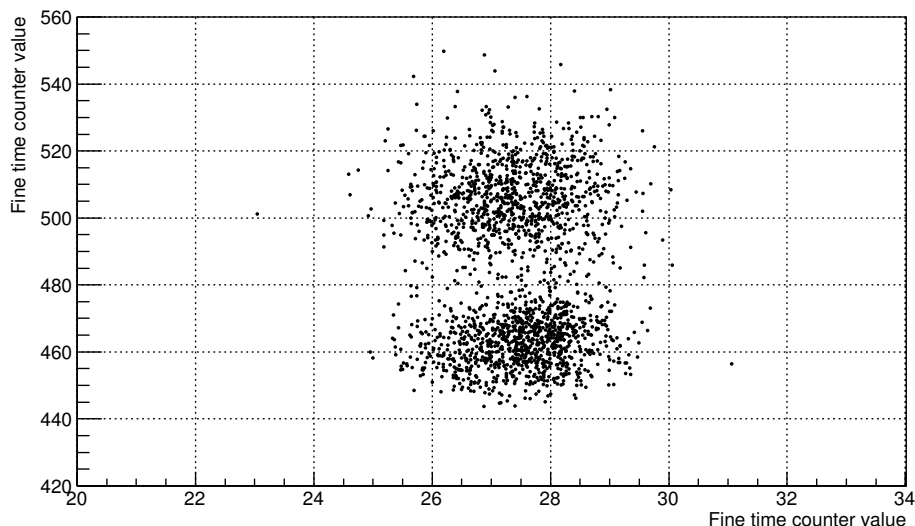


Рис. 19: Распределение координат точек излома аппроксимирующих кусочно-линейных функций.

заметного снижения точности.

Приведённые выше функции калибровки были построены по массиву данных, содержащихся в семи файлах. Каждый файл это 2 минуты измерений при частоте генератора 5 кГц, т. е. около 600 тысяч вспышек лазера. Таким образом, всего было 4.2 миллиона вспышек за 14 минут, а один файл составляет приблизительно 15% от полного набора данных. В каждом канале было зарегистрировано от 300 до 400 тысяч временных отметок, которые были использованы для выполнения калибровки. Для иллюстрации стабильности калибровки на рисунке 21 показана разность функций калибровки, построенных по всему массиву данных и функций, построенных на файлах, составляющих $\approx 15\%$ данных каждый, взятых в начале, середине и конце набора данных. Видно, что отклонения в основном не превышают 10 пс, однако имеются редкие выбросы до 20 пс.

5.2 Определение коррекций задержек между каналами

Типичная гистограмма разности временных отметок передних фронтов, соответствующих фотонам из одной вспышки лазера, зарегистрированных в заданной паре каналов, показана на рисунке 22. Такие гистограммы позволяют определить положение пика и, соответственно, ввести кор-

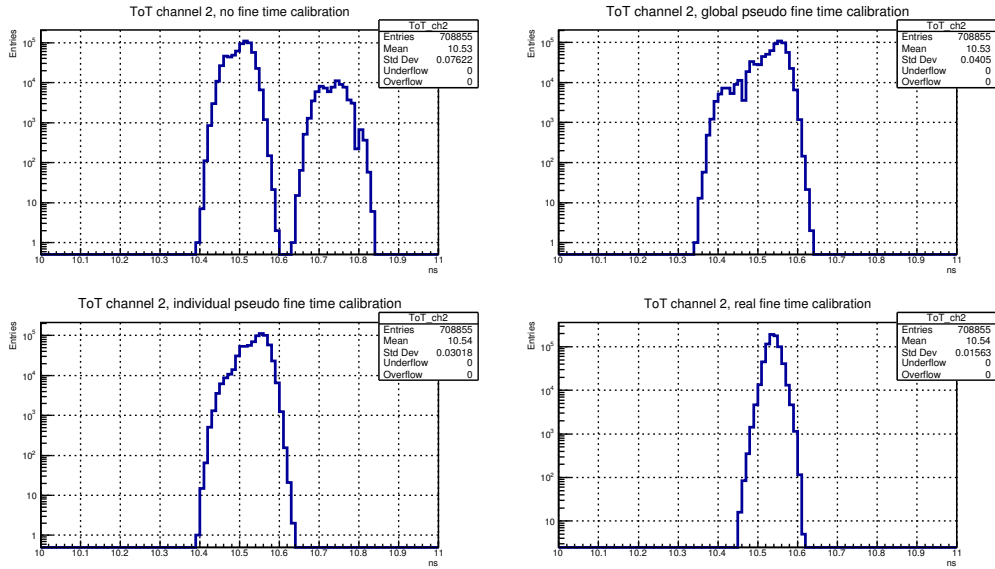


Рис. 20: Результаты измерения ширины импульса от генератора в случае: без калибровки точного времени; с применением усреднённой калибровочной функции; с применением индивидуальной линейной калибровочной функции; с применением полноценной калибровочной таблицы.

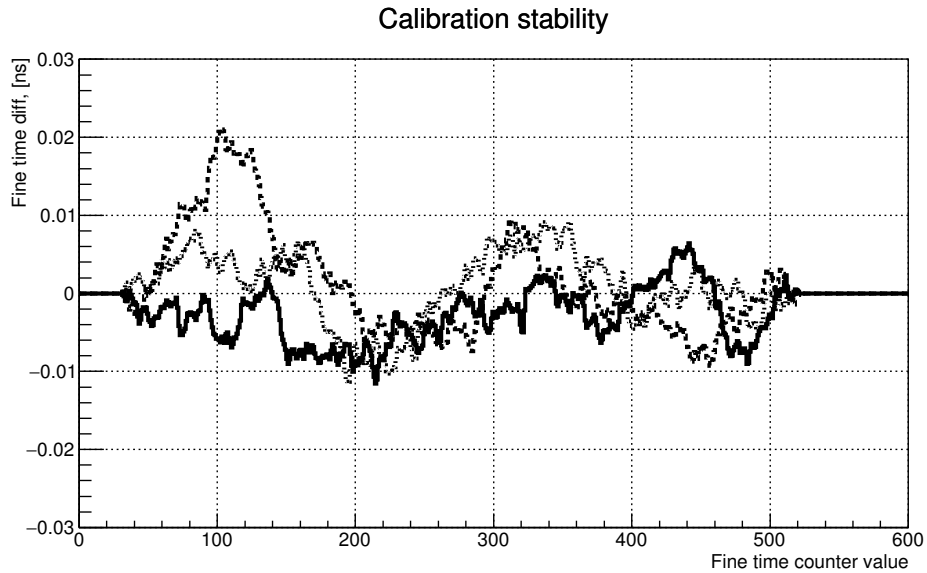


Рис. 21: Стабильность калибровок.

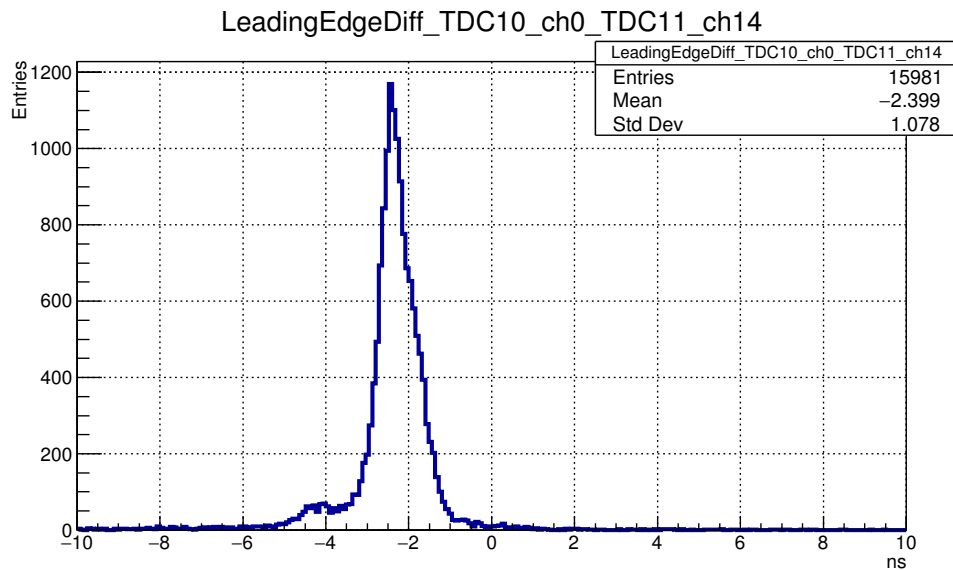


Рис. 22: Распределение разности временных отметок передних фронтов, соответствующих фотонам из одной вспышки лазера, зарегистрированных в заданной паре каналов.

рекцию задержки. Отметим, что полученные таким образом значения задержек в каналах достаточно стабильны. За несколько часов измерений изменение положения пика не превышает ??? пс. Наблюдается также аддитивность задержек, т.е. задержка в i -м канале относительно опорного может быть получена с точностью не хуже ??? пс как сумма задержки в j -м канале относительно опорного и задержки в i -м канала относительно j -го. Для некоторых пар каналов вид гистограммы отличается от показанной на рисунке 22. См. например, рисунок 23. Подобное распределение можно получить, если один из двух каналов является дефектным в том смысле, что к фронту логического сигнала подмешивается возбужденный или наведенный колебательный сигнал. Такая гипотеза подтверждается тем фактом, что форма гистограммы зависит от порога дискриминатора на плате PADIWA. При построении аналогичной гистограммы для пары дефектных каналов наблюдается до 5 пиков. Дальнейшее исследование проводилось с исключением дефектных каналов. Доля дефектных каналов составляет около 10% от полного числа каналов. При разработке следующей версии передней электроники для CBM RICH особое внимание будет уделено электромагнитной чистоте каналов, а гистограммы подобные обсуждаемым в данном разделе будут использоваться в качестве диагностического инструмента.

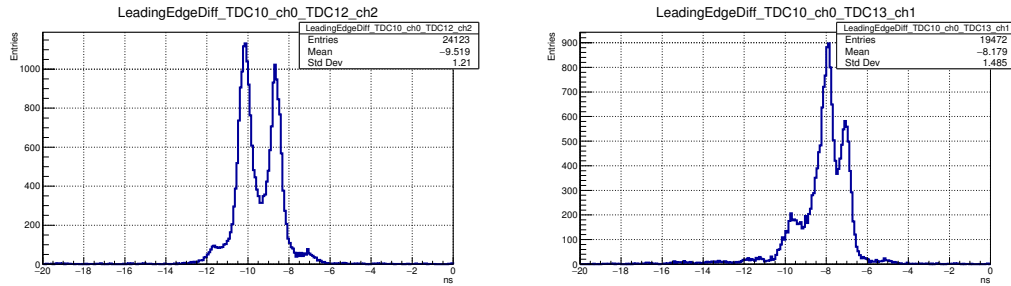


Рис. 23: Распределение разности временных отметок передних фронтов, соответствующих фотонам из одной вспышки лазера, зарегистрированных в заданной паре каналов, при условии, что один из каналов — дефектный.

5.3 Временное разрешение

В проведенных пучковых тестах имеют место два типа событий, в которых регистрируется несколько практически одновременно испущенных фотонов. Первый тип — это вспышка лазера, длительность которой на порядок меньше разброса времени прохождения сигнала через МАФЭУ. Второй тип — черенковские кольца. В этом случае разброс времен прихода фотонов на МАФЭУ не превышает 1 пс (Егор, вы прикидывали геометрию, там 1пс или «единицы пикосекунд?»). Анализ таких событий позволяет охарактеризовать временное разрешение всей системы считывания, начиная от окна МАФЭУ и кончая генерацией отметок времени. Временное разрешение одного канала определяется разбросом зарегистрированных временных отметок относительно времени прилета фотона при многократных измерениях. Поскольку точное время прилета фотона измерить нельзя, нам приходится исследовать разброс разностей временных отметок в паре каналов при регистрации одновременно пришедших фотонов. Временные отметки в каждом из каналов подвержены независимым флуктуациям по одинаковому закону, следовательно, измеренная ширина распределения будет в $\sqrt{2}$ раз больше, чем временное разрешение каждого канала. Типичное распределение разностей временных отметок, принадлежащих одной вспышке лазера, после применения коррекций задержек и калибровки точного времени в двух каналах, ни один из которых не является дефектным, показано на рис. 24.

Полная ширина на полувысоте этого распределения составляет ??? пс, что соответствует временному разрешению ??? пс. Данное значение превосходит разброс времен прохождения сигнала в МА ФЭУ примерно в 2 раза. Причина расхождения заключается в отсутствии коррекции

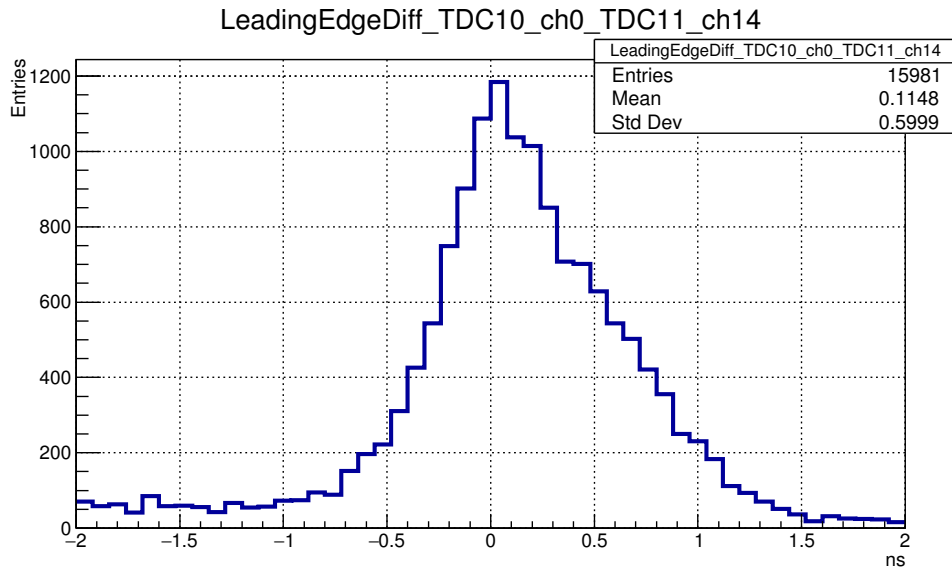


Рис. 24: Распределение разности временных отметок передних фронтов, соответствующих фотонам из одной вспышки лазера, зарегистрированных в заданной паре каналов после применения калибровки точного времени и коррекции задержек.

момента пересечения порога в зависимости от амплитуды сигнала. Для реализации такой коррекции необходимо надежное измерение времени над порогом, что в нашем случае невозможно, см. пункт ???.

Для того чтобы охарактеризовать временное ???измерение??? (разрешение?) системы в целом, помимо анализа пар каналов исследовались физически одновременные сигналы на следующих совокупностях каналов: (1) шестнадцать каналов, считываемых одной платой PADIWA, (2) 64 канала, принадлежащих одному МАФЭУ, (3) 256 каналов, принадлежащих четырем соседним МАФЭУ. В каждом случае после коррекции задержек и калибровки точного времени, отбирались все хиты, принадлежащие одному событию и гистограммировались разности временных отметок по всем возможным парам каналов. Результаты для вспышек лазера показаны на рис 5.3. В таблице 2 показано, как эволюционирует среднеквадратичное отклонение и полная ширина на полувысоте (FWHM) в зависимости от числа каналов. Отметим, что среднеквадратичное отклонение меняется слабо, а FWHM возрастает с увеличением числа каналов, одновременно с тем, что распределение принимает форму последовательно (передвинуть слово?) более близкую к распределению Гаусса. Такое поведение можно интерпретировать как размывание ин-

дивидуальных особенностей каналов в процессе усреднения. Аналогичное поведение наблюдается и для хитов, принадлежащих одному черенковскому кольцу, см. рис. 5.3.

Наблюдаемое смещение максимума от нуля можно объяснить, а можно и не объяснять.

Таблица 2: FWHM и RMS распределений при различных наборах исследуемых каналов.

Анализируемая область	Пара каналов	Плата PADIWA	Один МА ФЭУ	Четыре МА ФЭУ
Кол-во каналов	2	16	64	256
FWHM, нс	1.00	1.22	1.50	1.64
RMS, нс	0.912	1.093	0.996	1.034

Список литературы

- [1] “FAIR Baseline Technical Report,” GSI, Darmstadt (2006) 92 p.
www.fair-center.eu/fileadmin/fair/publications_FAIR/FAIR_BTR_1.pdf
- [2] B. Friman, C. Hohne, J. Knoll, S. Leupold, J. Randrup, R. Rapp and P. Senger, “The CBM physics book: Compressed baryonic matter in laboratory experiments,” *Lect. Notes Phys.* **814** (2011) pp. 980.
- [3] P. Senger and V. Friese, “The CBM Collaboration: Nuclear Matter Physics at SIS-100,” GSI, Darmstadt (2012) 18 p.
- [4] “Compressed Baryonic Matter Experiment. Technical Status Report.” GSI, Darmstadt (2005) 406 p.
- [5] “CBM Progress Report 2014,” GSI, Darmstadt (2015) 159 p.
- [6] M. Koziel, “MVD Status: Integration,” 25th CBM Collaboration Meeting, Darmstadt, 20-24 April 2015.
<https://indico.gsi.de/getFile.py/access?contribId=17&sessionId=9&resId=0&materialId=slides&confId=2960>
- [7] J. Heuser *et al.*, “Technical Design Report for the CBM Silicon Tracking System (STS),” GSI, Darmstadt (2013) 167 p.

- [8] A. Malakhov *et al.*, “Technical Design Report for the CBM Superconducting Dipole Magnet,” GSI, Darmstadt (2013) 80 p.
- [9] C. Höhne *et al.*, “Technical Design Report for the CBM Ring Imagine Cherenkov (RICH),” GSI, Darmstadt (2013) 201 p.
- [10] S. Chattopadhyay *et al.*, “Technical Design Report for the CBM Muon Chambers (MuCh),” GSI, Darmstadt (2014) 192 p.
- [11] N. Herrmann *et al.*, “Technical Design Report for the CBM Time-of-Flight System (TOF),” GSI, Darmstadt (2014) 182 p.
- [12] I. Korolko, “CBM Calorimeter for SIS100 (TDR status),” 25th CBM Collaboration Meeting, Darmstadt, 20-24 April 2015.
<https://indico.gsi.de/getFile.py/access?contribId=138&sessionId=29&resId=1&materialId=slides&confId=2960>
- [13] F. Guber *et al.*, “Technical Design Report for the CBM Projectile spectator detector (PSD),” GSI, Darmstadt (2014) 78 p.