

ПРИМЕНЕНИЕ ВЫЧИСЛИТЕЛЬНОЙ ТЕХНИКИ В ЭКСПЕРИМЕНТЕ

УДК 539.1.075+004.67

РАЗРАБОТКА СИСТЕМЫ СЧИТЫВАНИЯ И ПРИЕМА ДАННЫХ ДЕТЕКТОРА RICH ЭКСПЕРИМЕНТА CBM

© 2018 г. J. Adamczewski-Musch^a, П. Г. Акишин^b, К.-Н. Becker^c, С. Г. Белогуров^{b, d}, J. Bendarouach^e, Н. И. Болдырева^f, С. Deveaux^e, В. В. Добырин^f, М. Dürr^e, J. Eschke^a, J. Förtsch^c, J. Heep^e, С. Höhne^e, К.-Н. Kampert^c, А. В. Ханзадеев^{f, d}, Л. М. Коченда^{f, d}, J. Kopfer^{c, e}, П. А. Кравцов^{f, d}, I. Kres^c, С. А. Лебедев^{e, b}, Е. И. Лебедева^e, Е. Н. Леонова^f, С. В. Лиев^a, Т. Mahmoud^e, W. Niebur^a, Е. В. Овчаренко^{b, *}, V. Patel^c, С. Pauly^c, М. Penschuck^g, D. Pfeifer^c, S. Querchfeld^c, J. Rautenberg^c, S. Reinecke^c, Ю.Г. Рябов^f, Е. В. Рошин^{f, d}, В. М. Самсонов^{f, d}, В. Н. Щетинин^{b, h}, О. П. Тарасенкова^f, М. Traxler^a, С. Ugru^a, М. Е. Взнуздаев^f

^aGSI Helmholtzzentrum für Schwerionenforschung GmbH,
D-64291, Darmstadt, Germany

^bОбъединенный институт ядерных исследований, Лаборатория информационных технологий, Дубна, Россия

^cDepartment of Physics, University Wuppertal,
D-42097, Wuppertal, Germany

^dНациональный исследовательский ядерный университет “МИФИ”, Москва, Россия

^eInstitute of Physics II and Institute of Applied Physics, Justus Liebig University Giessen,
D-35392, Giessen, Germany

^fПетербургский институт ядерной физики им. Б.П. Константинова
Национального исследовательского центра “Курчатовский институт”, Гатчина, Россия

^gInstitut für Kernphysik, Göthe University Frankfurt,
D-60438 Frankfurt am Main, Germany

^hМосковский государственный технический университет им. Н.Э. Баумана,
Москва, Россия

*e-mail: eovchar@jinr.ru

Поступила в редакцию 05.04.2017 г.

После доработки 07.08.2017 г.

Подробно охарактеризован 64-канальный модуль считывания и приема данных, состоящий из многоанодного фотоэлектронного умножителя H12700, четырех плат предусилителей-дискриминаторов RADIWA и одной платы TRV v3, выполняющей функции времяцифрового преобразователя и концентратора данных. Описаны необходимые для работы прототипа модуля программного обеспечения. Проведена калибровка задержек между каналами. Дрейф индивидуальных задержек не превышает 0.5 нс за все время измерений. Исследованы спектры “времени над порогом” (ToT). Выявлены влияние периодических наводок и необходимость совершенствования схемотехнических решений. Исследованы временные свойства сместителя спектра и его влияние на эффективность регистрации черенковских колец. Наиболее интенсивная компонента характеризуется временем высвечивания 1.1 нс, также имеются компоненты с характерными временами 3.8 и 45 нс. Выявлено влияние особенностей одноэлектронного спектра на эффективность регистрации фотоэлектронов и вероятность появления ложных хитов. Временное разрешение совокупности из 131 канала составляет 1.1 нс (FWHM). Полученные результаты обеспечивают возможность использования исследованной схемы считывания и сбора данных в эксперименте CBM, тем не менее, устранение выявленных недостатков позволит создать запас по эффективности и повысить надежность системы при долговременной эксплуатации.

DOI: 10.7868/S0032816218030023

1. ВВЕДЕНИЕ

В настоящее время на строящемся ускорительном комплексе FAIR (Facility for Antiproton and Ion Research, Дармштадт, Германия) [1] ведутся работы по созданию экспериментальной уста-

новки CBM (Compressed Baryonic Matter) [2–5]. Физическая программа эксперимента CBM нацелена на изучение фазовой диаграммы сильновзаимодействующей материи и уравнения состояния вещества при экстремально высоких плотностях

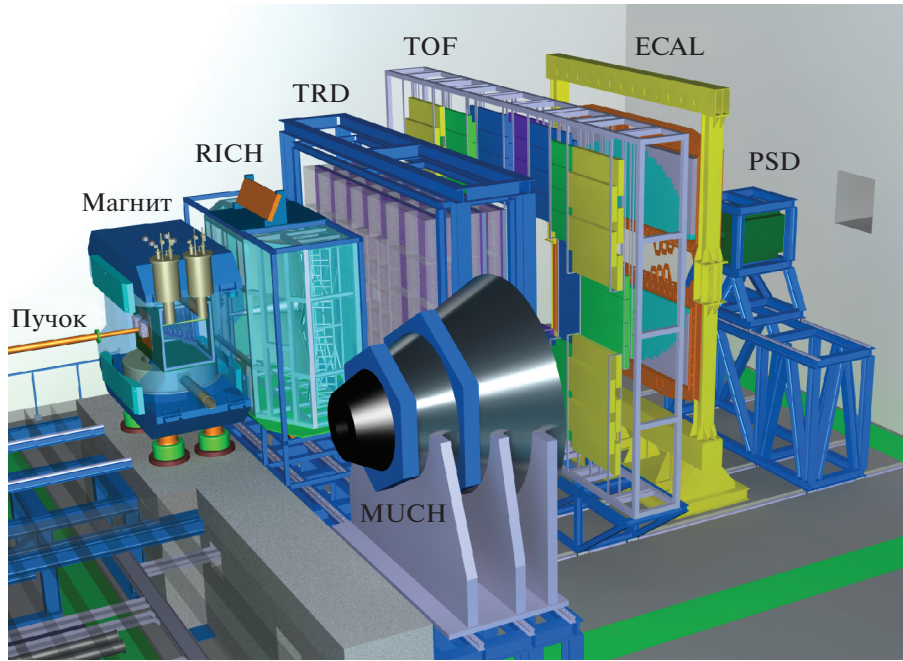


Рис. 1. Общий вид экспериментальной установки CBM в конфигурации с детектором черенковских колец RICH. MUCH – мюонный детектор; TRD – детектор переходного излучения; TOF – времяпролетный детектор; ECAL – электромагнитный калориметр; PSD – детектор непроявившихся осколков ядер.

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 требуется:

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

Для выполнения различных измерений установка CBM будет функционировать в двух конфигурациях: с мюонным детектором MUCH (Muon Chamber) и с детектором черенковских колец RICH (Ring Image Cherenkov detector).

Схема экспериментальной установки CBM с детектором RICH представлена на рис. 1.

Между полюсами сверхпроводящего дипольного магнита [6] расположена вакуумная камера, содержащая мишень и вершинный микродетектор MVD (Micro Vertex Detector) [7], выполненный на основе монолитного пиксельного детектора типа MAPS (Monolithic Active Pixel Sensor). Ниже по пучку, также между полюсами, но уже

вне вакуумной камеры, располагаются станции кремниевой трековой системы STS (Silicon Tracking System) [8], собранные из двухсторонних микроstriповых 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 расположен детектор черенковских колец RICH [9], предназначенный для идентификации электронов и позитронов в диапазоне импульсов от 0.5 до 8 ГэВ/с с целью восстановления распадов легких векторных мезонов и J/ψ -частиц. Этот детектор, разработке которого посвящена данная статья, имеет радиатор длиной 1.7 м из углекислого газа под небольшим избыточным давлением, систему фокусировки из сегментированных сферических зеркал радиусом 3 м и общей площадью 13 м². В качестве позиционно-чувствительного фотодетектора используется многоанодный фотоэлектронный умножитель (м.а.ф.э.у.) Hamamatsu H12700.

В альтернативной конфигурации на месте RICH установлена 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 [11].

Детектор переходного излучения TRD (Transition Radiation Detector) используется для реконструкции треков частиц и идентификации электронов/позитронов в условиях доминирующего фона от пионов [12].

Для идентификации адронов используется времяпролетный детектор TOF (Time-of-Flight detector) [13].

Электромагнитный калориметр ECAL (Electromagnetic Calorimeter) типа “шашлык” необходим для регистрации прямых фотонов и фотонов от распада нейтральных мезонов (π^0 , η) [14].

Детектор непрореагировавших осколков ядер PSD (Projectile Spectator Detector) [15] представляет собой сегментированный адронный калориметр, перекрывающий малые полярные углы, и служит для определения центральности столкновения и плоскости реакции.

Эксперимент характеризуется высокой множественностью вторичных частиц, большой плотностью треков под малыми углами и высокой частотой взаимодействий. Вследствие этого детекторы содержат десятки тысяч плотно упакованных каналов считывания, работающих без системы отбора и запуска, с которых необходимо собирать и анализировать “на лету” большой поток данных.

В данной статье описаны результаты тестов прототипов систем регистрации фотонов, считывания, сбора и первичной обработки данных. Были реализованы все принципиальные узлы – как аппаратные, так и программные – соответствующих систем разрабатываемого детектора черенковских колец эксперимента CBM. Тесты проводились как в лабораторных условиях, так и в составе полнофункционального прототипа детектора RICH на пучке PS (Proton Synchrotron) в CERN.

2. ОСОБЕННОСТИ МНОГОАНОДНОГО Ф.Э.У. Н12700

Многоанодный ф.э.у. Н12700 фирмы Hamamatsu [16], появившийся на рынке в 2013 г., подробно охарактеризован в работе [17]. Он обладает следующими достоинствами: большой долей площади поперечного сечения, приходящейся на светочувствительные пиксели; квадратной формой, что позволяет перекрывать без потерь значительные площади (плотность упаковки 87%); малым временем прохождения однофотонного сигнала через диодную систему; малым разбросом этого времени от события к событию; низкими перекрестными помехами и низкой частотой рождения тепловых электронов. По большинству параметров он превосходит сво-

его предшественника, м.а.ф.э.у. Н8500 [18], некоторые параметры Н12700В-03, используемого в режиме счета фотоэлектронов, приведены ниже:

Типичное усиление	$1.5 \cdot 10^6$
Темновой счет на канал, c^{-1}	≈ 10
Темновой счет на весь многоанодный ф.э.у., c^{-1}	< 1000
Время нарастания сигнала, нс	0.64
Разброс времени развития электронной лавины, нс	0.28
Число диодов типа “Metal channel”	10

Спектральная чувствительность м.а.ф.э.у. Н12700В-03, используемого в настоящей работе, определяется двухщелочным фотокатодом и входным окном из стекла, прозрачного 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 обеспечивают регистрацию черенковского излучения, лежащего в ультрафиолетовой области. Каждому аноду соответствует канал м.а.ф.э.у., состоящий из своего фрагмента диодной системы и области фотокатода, называемой пикселем. Среднеквадратичное отклонение коэффициентов усиления в каналах м.а.ф.э.у. от среднего значения не превышает 16% [16]. Разброс квантовой эффективности между пикселями, по нашим данным, составляет $\pm 10\%$.

Имеются исследования [19, 20], показывающие, что радиационная стойкость прибора достаточна для использования в эксперименте CBM. Также продемонстрирована работоспособность прибора в магнитном поле до 2.5 мТл [17] без значительного падения характеристик. Использование магнитных экранов и выбор оптимального расположения фотодетектора в пространстве делают этот м.а.ф.э.у. пригодным для использования в эксперименте CBM.

Наряду с перечисленными достоинствами, м.а.ф.э.у. Н12700В-03 имеет некоторые особенности, не имеющие аналогов в традиционных м.а.ф.э.у. и требующие особого внимания при реализации канала считывания. Размножение электронов в диодной системе происходит в одном и том же вакуумном объеме для всех каналов. Помещенная в единый вакуумный объем диодная система типа “Metal Channel” (рис. 2) [21] довольно компактна, едина для всех каналов и позволяет добиться отличных временных свойств.

Электронные лавины, соответствующие разным каналам, отличаются местом прохождения через диодную систему. Наблюдаются такие эф-

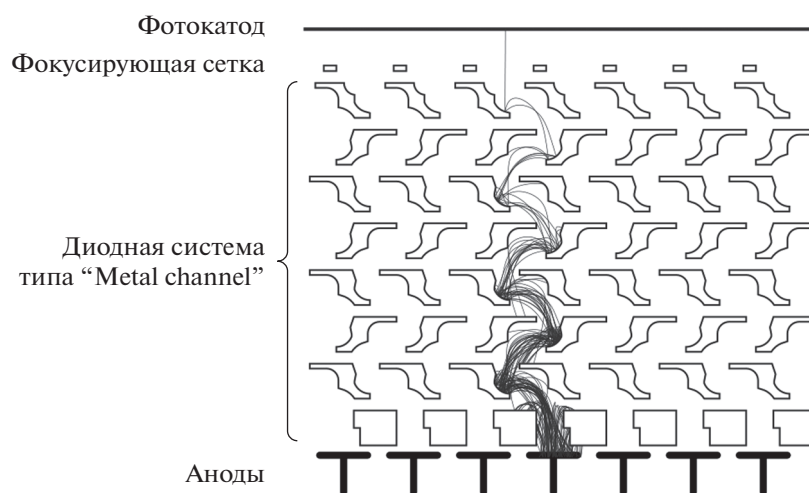


Рис. 2. Схема диодной системы типа "Metal Channel".

фекты, 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 каналов м.а.ф.э.у. [17]. Вероятность того, что лавина от фотоэлектрона полностью разовьется в соседнем канале, зависит от взаимного расположения каналов и составляет при равномерном освещении от 0.1 до 2%.

Кроме того, при наличии относительно большого сигнала в одном из каналов наблюдается биполярная наводка в каналах, имеющих диноды в одном ряду. При интегрировании этой наводки возможно формирование низкоамплитудных импульсов в нескольких каналах [22]. В обычном одноканальном м.а.ф.э.у. такие эффекты не наблюдаются из-за отсутствия связи с соседними каналами, наличия развитой системы фокусировки и такой конструкции диодной системы, в которой 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. Проявления этого эффекта в наших измерениях обсуждаются в разд. 6.6.

3. СТРУКТУРА СИСТЕМЫ СБОРА ДАННЫХ ДЕТЕКТОРА RICH ЭКСПЕРИМЕНТА CBM

3.1. 64-канальный модуль считывания

Конструктивно и функционально вся электроника считывания и оцифровки данных детектора RICH эксперимента CBM может быть сгруппирована в 64-канальные модули, каждый из которых соответствует одному м.а.ф.э.у. Схема 64-канального модуля показана на рис. 3. Модуль включает в себя четыре платы PADIWA и одну плату TRB v3.

PADIWA – это 16-канальная плата электроники переднего края, разработанная в GSI [23]. Плата устанавливается на м.а.ф.э.у. через плату-адаптер, единственным назначением которой является соединение анодов м.а.ф.э.у. с соответствующими входами платы PADIWA. С одной стороны печатной платы PADIWA расположены 16 сигнальных входов с импедансом 100 кОм. На каждый вход приходится два контакта: "земля" и сигнал.

На плате имеется разъем, позволяющий подключить 20 LVDS (Low-Voltage Differential Signaling) линий. Для управления платой используются четыре LVDS-линии, остальные 16 LVDS-линий – выходные. Для программирования FPGA (Field-Programmable Gate Array) на плате предусмотрен стандартный JTAG-порт. Каждый канал PADIWA имеет собственный фильтр низких частот с полосой пропускания около 100 МГц и предусилитель NXP BGA2803, которые образуют аналоговую часть канала. После усиления сигнал поступает в FPGA.

В FPGA на каждой входной линии находится компаратор, благодаря чему можно задать свой порог, разделяющий логические уровни входного сигнала. Таким образом, настраиваемые входы

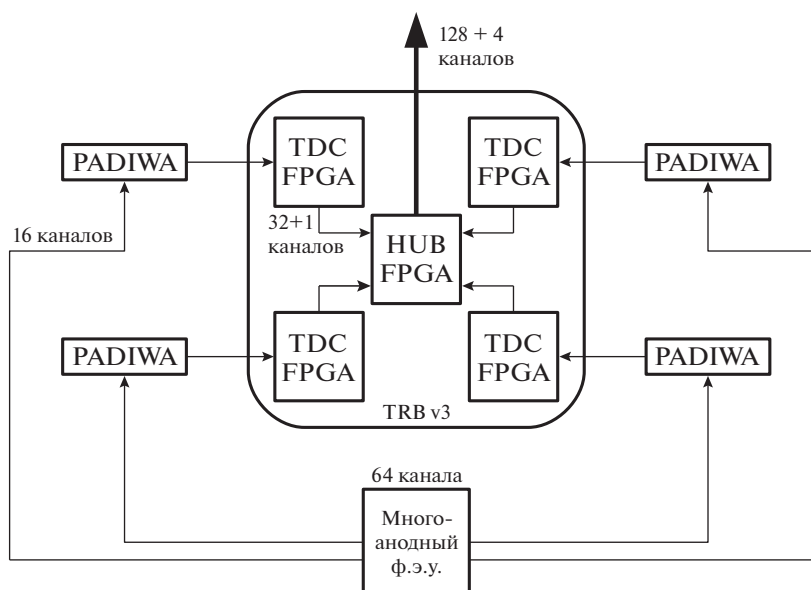


Рис. 3. Схема считывания м.а.ф.э.у., состоящая из четырех плат дискриминаторов PADIWA и одной платы TRB v3.

FPGA могут использоваться как дискриминаторы для аналогового сигнала.

Многофункциональная плата TRB v3 содержит пять FPGA, каждую из которых можно запрограммировать независимо. Различают одну центральную FPGA и четыре периферийные. В нашем случае четыре периферийные FPGA запрограммированы как массив времяцифровых преобразователей TDC (Time-to-Digital Converter), а центральная FPGA – как концентратор данных. Такую конфигурацию платы будем называть TRB v3 (конфигурация 1).

Выходные логические LVDS-сигналы со всех 16-ти каналов платы PADIWA поступают в одну из периферийных FPGA платы TRB v3, где каждый входной канал разводится на два TDC: первый чувствителен к фронту, а второй – к срезу логического сигнала на входе. Кроме того, еще один TDC используется для присвоения временных отметок сигналам синхронизации. Таким образом, на выходе всей платы TRB v3 собираются данные со 132-х TDC. 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.

Все периферийные FPGA разбиваются на множество областей, в каждой из которых программируется одна и та же схема TDC. Эти схемы расположены в разных областях матрицы, поэтому каждый TDC имеет свою длину пути сигнала, проходимого внутри FPGA.

Обработка импульса из одного входного канала выполняется двумя TDC, относительная задержка между которыми должна быть прокалиб-

рована с помощью точного генератора прямоугольных импульсов. Отметим, что в FPGA для каждого TDC имеется отдельный счетчик числа зарегистрированных временных отметок, значение которого может быть опрошено независимо от основного потока данных. Такой счетчик может быть использован, например, для получения зависимости скорости счета от порога дискриминатора с целью определения оптимального порога.

Регистрация момента времени в TDC осуществляется в два этапа. Тактовый генератор с периодом 5 нс управляет кольцевым счетчиком. Старшие 28 разрядов этого счетчика называются эпохой (epoch), а 11 младших разрядов – грубым временем (coarse) [24]. При регистрации момента времени входного фронта значение времени кодируется двумя сообщениями – эпохой и собственно временной отметкой (timestamp). Чтобы уменьшить поток выходных данных, значение эпохи, которое увеличивается каждые 10/24 мкс, передается однократно для группы временных отметок, принадлежащих данной эпохе.

Для более точного измерения применяется дополнительный 10-разрядный регистр. В регистр пишется значение точного времени (fine), полученного из цифровой линии задержки с отводами на 512-ти эффективных элементах. В силу неидеальности компонентов существует разброс параметров элементов в линии задержки, следовательно, требуется калибровка результатов измерения точного времени относительно диапазона значений регистра. Процедура калибровки описывается в разд. 5.2.

Находящиеся на плате TRB v3 FPGA 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 [25].

Необходимо отметить, что каждый канал считывания характеризуется некоторой индивидуальной задержкой между моментом рождения фотоэлектрона и значением отметки времени 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 ниже, в разд. 5.3 и 6.2.

3.2. Концентрация и ввод данных в э.в.м.

В концепции системы сбора данных эксперимента CBM предусмотрено 4 функциональных уровня, каждый из которых реализован соответствующими платами. В общем случае к детектору примыкает плата электроники переднего края FEB (front-end board), где осуществляются аналоговые преобразования и оцифровка сигналов. Далее данные в виде электрических цифровых сигналов поступают в плату считывания ROB (read-out board), где происходит концентрация данных и их пересылка по оптическому каналу. На следующем уровне расположены платы обработки данных DPB (data processing board). DPB уплотняют данные с различных детекторов путем удаления избыточной информации специфическим для каждого детектора способом и группируют эти данные в пакеты, называемые срезами времени (time slice).

В каждый срез времени попадают сообщения от некоторой группы каналов считывания, имеющие временную отметку в заданном интервале. Далее они передаются по меньшему числу оптических каналов с более высокой пропускной способностью [26]. После этого данные поступают в память, доступную центральному процессору э.в.м. по высокоскоростной шине через платы интерфейса, называемые FLIB. Аббревиатура FLIB обозначает FLES Interface Board, а FLES [27], в свою очередь, – 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 электроники переднего края реализована как пара PADIWA–TRB v3 (конфигурация 1). В будущем планируется объединение функционала этих плат на одной плате DIRICH [28]. 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 (Data Acquisition Backbone Core) [29] и обычной сетевой карты.

4. ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ УСТАНОВКИ

4.1. 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 [30]. Подробности реализации прототипов детектора переходного излучения и времяпрелетного детектора содержатся в работах [31] и [32] соответственно.

Тесты проводились на выводе T9 ускорителя PS в CERN [33]. Использовался смешанный вторичный пучок, состоящий из электронов, пионов и мюонов с импульсом, настраиваемым в диапазоне 0.5–10 ГэВ/с. В течение тестов пучок был настроен на импульс от 1 до 3 ГэВ/с. Длительность вывода составляла около 2 с, причем за это время регистрировалось в среднем 500 электронов.

Схема прототипа детектора RICH эксперимента CBM представлена на рис. 4.

Габариты герметичного алюминиевого корпуса детектора RICH: 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 при этом $n = 1.00045$. Очистка газа и стабилизация его давления с точностью 0.1 мбар обеспечивались газовой системой, описанной в [34]. Абсолютное давление газовой смеси и температура контролируются системой медленного контроля. Текущее значение показателя преломления автоматически вычисляется и сохраняется в данных.

Система позиционирования зеркал подробно описана в [35]. Также имеется система диагностики положения зеркал [36], состоящая из светоотражающей сетки, занимающей всю переднюю стенку корпуса прототипа, светодиода Roithner UVTOP240 [37] с длиной волны 245 нм и цифрового фотоаппарата, считываемого удаленно. Система позволяет определить отклонения отдельных долей зеркала, значения поправок к поворотам отдельных долей зеркала и вычислить коррекцию координат хитов (зарегистрированных фотонов).

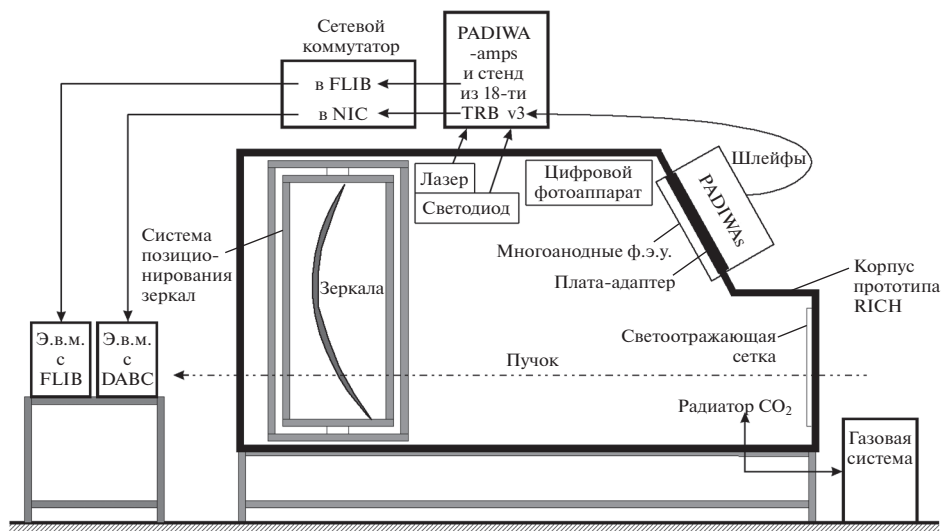


Рис. 4. Схема прототипа детектора RICH.

Черенковское излучение фокусируется зеркалами на фоточувствительную камеру, содержащую матрицу 4×4 м.а.ф.э.у., шесть из которых — это Hamamatsu H12700 и десять — Hamamatsu H8500. Данные модели м.а.ф.э.у. имеют сечение 52×52 мм². Часть фотоумножителей была предварительно покрыта слоем сместителя спектра (WLS, wavelength shifter) толщиной 150–200 нм. В качестве сместителя спектра использовался паратерфенил ($\approx 40\%$ по массе) в полимерной матрице Paraloid B72 (полиметилакрилат).

Сместитель спектра наносился методом погружения в раствор компонентов покрытия в дихлорметане, см. [38]. В определенное время в процессе проведения 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 одному кольцу.

Для мониторинга системы считывания и калибровки относительных задержек между каналами, наряду со светодиодом, использовался лазер Alphas Picorpower LD405 [39] 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 срабатывания каждого пикселя была на уровне 10% от частоты запуска лазера.

Считывание с каждого м.а.ф.э.у. осуществлялось модулем, описанным в разд. 3.1. Механически все 16 м.а.ф.э.у. монтировались на плату-адаптер, обеспечивающую герметичность корпуса и разводку высокого напряжения. Снаружи к плате-адаптеру монтировались платы предусили-

телей-дискриминаторов PADIWA, логический сигнал с которых передавался по шлейфам, состоящим из витых пар и имеющим 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). Данные с 16-ти плат TRB v3 поступали на еще одну, 17-ю, плату TRB v3 особой конфигурации, которая являлась, помимо концентратора данных, также генератором и распределителем запуска считывания для всех плат TRB v3.

Импульсы с генераторов, управляющих лазером и светодиодом, а также сигналы от детекторов пучка обрабатывались платами PADIWA-amp (плата, подобная PADIWA, но позволяющая изменять амплитуду сигнала и имеющая в два раза меньшее число каналов [23]) и оцифровывались TDC на еще одной, 18-й, плате TRB v3 также нестандартной конфигурации, совмещающей функции TDC и концентратора данных. Параллельно функционировало две системы сбора данных: одна принимала данные через стандартный сетевой интерфейс (сетевой концентратор) с каждой платы TRB v3 по медному носителю, а другая — через FLIB с одной (18-й) платы TRB v3. Схема считывания всей камеры и детекторов пучка представлена на рис. 5. Отметим, что э.в.м. с установленной в нее платой FLIB использовалась для приема данных не только от прототипа детектора RICH, но и от других детекторов.

4.2. Лабораторный стенд

Система считывания на основе платы PADIWA впервые использовалась на пучковых тестах эксперимента СВМ в ноябре 2014 г. Простейший анализ полученных данных показал, что некото-

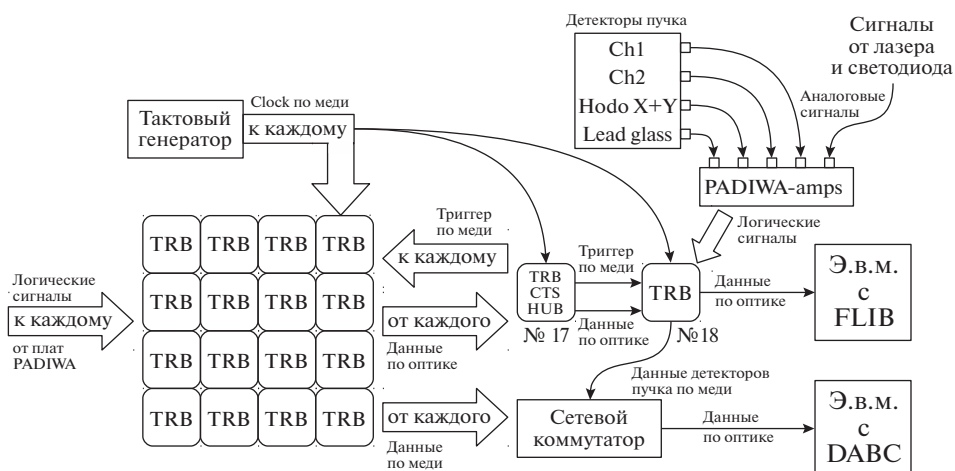


Рис. 5. Схема считывания всей камеры и детекторов пучка. TRB – TRB v3 со стандартной прошивкой 4 TDC и “hub”, 4 карты расширения – адаптеры для шлейфов, по которым поступают логические LVDS-сигналы от плат PADIWA; TRB CTS HUB – TRB v3 с прошивкой “CTS+4hubs”, CTS – Central Trigger System, 4 платы расширения, у каждой по 8 входных оптических портов, триггер из одного выхода RG45 распространяется через специальные платы “LVDS fa-pout”.

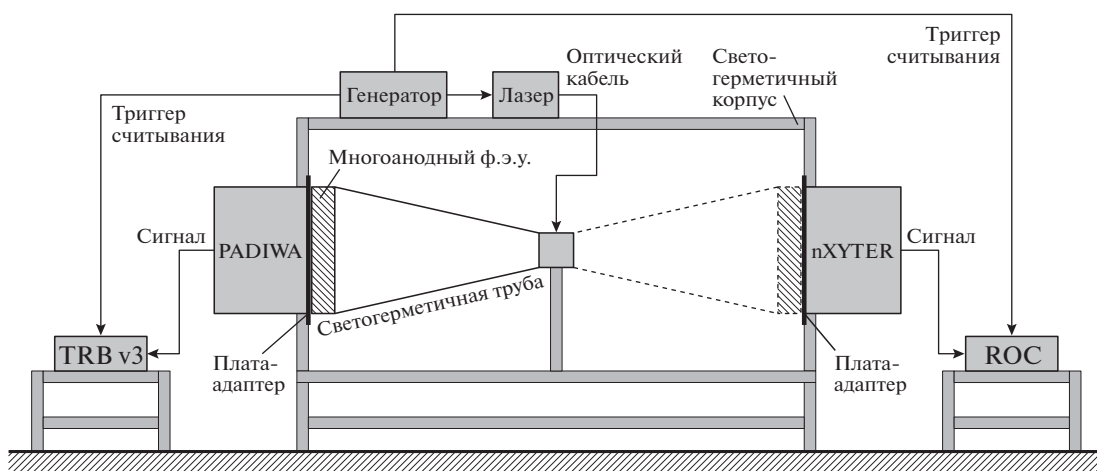


Рис. 6. Схема лабораторной установки. ROC (Readout controller) – контроллер считывания.

рые распределения временных отметок не поддаются очевидному объяснению. В связи с этим потребовалось собрать лабораторный стенд, позволяющий более подробно исследовать особенности работы одного многоканального модуля системы считывания, описанного в разд. 3.1. В некоторых измерениях выходной LVDS-сигнал с платы PADIWA не оцифровывался TDC, а считывался осциллографом с помощью активного зонда.

Для лучшего понимания особенностей работы исследуемой системы считывания и сбора данных на том же лабораторном стенде был реализован более информативный, но медленный вариант системы считывания и сбора данных на основе 128-канальной микросхемы n-XYTER. Каждый канал этой микросхемы измеряет момент времени при-

хода фронта и амплитуду входного сигнала. Система состоит из платы электроники переднего края, подключаемой через печатную плату-адаптер к м.а.ф.э.у. и через контроллер считывания SysCore ROC [40] к э.в.м. Для считывания одного м.а.ф.э.у. достаточно 64-х каналов, т.е. половины каналов одной платы электроники переднего края.

Схема лабораторного стенда приведена на рис. 6.

Стенд собран в светонепроницаемом корпусе размером 80×80 см и длиной 2 м. В качестве источника света использовался тот же лазер, что и в пучковых тестах. Свет от лазера поступал внутрь корпуса по оптоволокну. Для того чтобы обеспечить равномерное освещение поверхности м.а.ф.э.у.,

свет лазера проходил через рассеивающее матовое стекло.

Интенсивность лазера подобрана так, чтобы каналы м.а.ф.э.у. работали в одноэлектронном режиме. Средняя частота регистрации фотоэлектронов в каждом канале составляет около 10% от частоты вспышек лазера.

На расстоянии ~30 см от рассеивающего стекла расположен м.а.ф.э.у. Н12700. Рассеивающее стекло и м.а.ф.э.у. смонтированы в черной пластмассовой трубе, которая в свою очередь была помещена в светоизолированный корпус. Для снижения темнового счета м.а.ф.э.у. выдерживался перед началом измерений в темноте не менее одного часа.

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

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 э.в.м., необходимо периодически посылать на вспомогательный вход контроллера считывания импульс 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 э.в.м.

5. ПРОГРАММНОЕ ОБЕСПЕЧЕНИЕ

Программное обеспечение системы считывания и сбора данных прототипа детектора RICH эксперимента CBM представляет собой набор модулей приема, первичной обработки и сохранения данных, реализованных в рамках программного каркаса CbmRoot [41]. CbmRoot вместе с FLESnet [42] образует инфраструктуру, позволяющую выполнять прием данных, моделирование, реконструкцию и анализ данных эксперимента CBM.

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 последова-

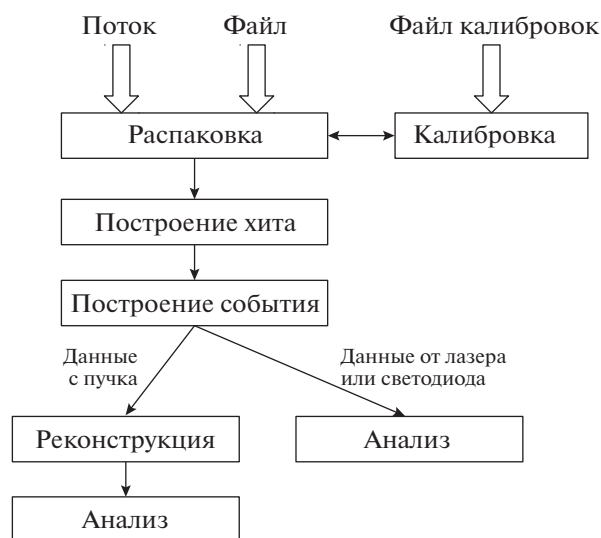


Рис. 7. Диаграмма взаимодействия программных модулей.

тельность обработки данных, представленная на рис. 7. Программная реализация, функционал и взаимодействие отдельных блоков описаны ниже.

5.1. Распаковка

Распаковка — это первый этап обработки данных, поступающих с электроники. В CbmRoot есть возможность обрабатывать данные, как поступающие напрямую с детекторов, так и сохраненные в файле (с помощью DABC в формате HLD—HADES list mode data format [43]). При использовании FLIB распаковке предшествует запуск небольшого интерфейсного модуля, который выделяет из поступающего от FLESnet потока данных в формате временных интервалов TSA (Time Slice Archive) сообщения, относящиеся к детектору RICH. Распаковка реализована как task-класс *CbmRichTrbUnpack*. В результате выполнения каждой итерации на выходе формируется *TClonesArray* с объектами класса *CbmTrbRawMessage*.

5.2. Калибровка точного времени

В процедуре калибровки точного времени воплощена известная техника калибровки цифровой линии задержки с отводами [44]. Техника калибровки основана на том, что распределение времен прихода сигналов должно быть равномерным по временному интервалу, занимаемому всеми элементами задержки. По результатам анализа набранной порции данных для каждого канала строится дискретная функция f_{calib} (Fine), т.е. таблица перехода от значения регистра к значению точного времени в наносекундах. При использо-

вании таблицы калибровки точного времени полное время вычисляется как T [нс] = Epoch · 2048 · 5 + Coarse · 5 – f_{calib} (Fine).

Процедура калибровки точного времени реализована в singleton-классе *CbmTrbCalibrator*, который не является частью конвейера обработки данных, – обращение к объекту данного класса может осуществляться из любого места в программе. Присутствует возможность сохранения таблиц калибровки в отдельном файле, что ускоряет многократные расчеты благодаря повторному использованию однократно рассчитанных таблиц. Особенности функций калибровки точного времени и их влияние на временное разрешение подробно обсуждаются в наших работах [45, 46].

5.3. 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” по результатам первого прогона анализа данных.

Алгоритм коррекции задержек состоит в следующем. Введем сплошную нумерацию пикселей по всей фоточувствительной камере, состоящей из множества м.а.ф.э.у. Полное число пикселей $M = 64N$, где N – число м.а.ф.э.у. Для анализа отбираются все фронты, имеющие временную отметку, попадающую в заданное временное окно относительно срабатывания лазера. Окно подбирается в соответствии с распределением, построенным по конкретному набору данных. Обычно ширина составляет около 100 нс, а левая граница сдвинута от момента срабатывания лазера 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 M . В качестве меры разности задержек между каналами можно взять, по выбору пользователя, либо среднее значение распределения, либо наиболее вероятное. Полученными значениями заполняют кососимметричную матрицу A размерности $M \times M$. В дальнейшем пользователь может задать опорный канал, относительно которого будет создана таблица коррекций, являющаяся, по сути, столбцом матрицы A .

5.4. Построение хита

Набор информации о каждом зарегистрированном фотоне, называемый хитом, состоит из двух сообщений, содержащих временные отметки фронта и среза логического сигнала. Так как разные каналы имеют разные задержки и вероятность регистрации отдельных перепадов логических сигналов не равна 100%, необходимо было в

анализе данных реализовать алгоритм подбора пар фронт–срез. Данная процедура реализована в task-классе *CbmTrbEdgeMatcher*, который стоит в конвейере после распаковки и фактически выполняется после применения всех калибровок.

Для каждого входного канала был реализован буфер сообщений, который наполнялся объектами, содержащими информацию о фронтах, по мере поступления последних. Далее, как только приходил срез, из буфера выбирался наиболее близкий по временной отметке фронт внутри заданного допустимого временного окна. Время над порогом ToT (Time-over-Threshold) – параметр хита, свидетельствующий об амплитуде сигнала. Он вычисляется как разница временных отметок среза и фронта в подобранной паре.

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

Предусмотрена возможность допуска одиночных фронтов в качестве хитов, однако практика показала, что в этом нет смысла, так как в нормальном режиме найденные пары в основном обусловлены ошибками TDC, и доля таких сообщений пренебрежимо мала, $< 2 \cdot 10^{-4}$.

5.5. Построение события

Прием данных осуществляется порциями, называемыми “DAQ-событиями”, никак не связанными с реальными событиями. Для формирования корректной входной информации для реконструкции и дальнейшего анализа данных необходимо выполнять процедуру построения события, описанную подробно в [45].

5.6. Реконструкция

Реконструкция в эксперименте СВМ с детектором RICH означает поиск колец по хитам в плоскости реконструкции. В контексте реконструкции можно рассматривать хит как сработавший пиксель м.а.ф.э.у. Конус черенковских фотонов после фокусировки зеркалами пересекает поверхность фоточувствительной камеры, кото-

рая 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 реализация нескольких алгоритмов поиска колец. Наибольший практический интерес представляет алгоритм распознавания колец черенковского излучения, основанный на преобразовании Хафа и описанный в работах [47, 48]. Реализация данного алгоритма была специально адаптирована к данным 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 осуществляется реконструкция треков частиц с применением информации от других детекторов.

6. РЕЗУЛЬТАТЫ

6.1. Испытание системы сбора данных с использованием FLIB

Значительная часть данных была набрана параллельно двумя системами сбора данных. Было проведено побайтное сравнение результатов распаковки обоих потоков. На массиве, составляющем примерно 10^7 сообщений, расхождений не выявлено. Таким образом, продемонстрирована работоспособность концепции формирования временных интервалов и ввода данных в компьютер с использованием FLIB. Приведенные в следующих разделах результаты получены на основе данных, принятых через стандартный сетевой интерфейс с применением программного обеспечения на основе DABC [29].

6.2. Определение коррекций задержек между каналами

Типичная гистограмма разности временных отметок фронтов, соответствующих фотонам от одной вспышки лазера, зарегистрированных в заданной паре каналов, показана на рис. 8. Такие гистограммы позволяют определить положение пика и соответственно ввести коррекцию задержки. Отметим, что наблюдается некоррелированный дрейф порядка 0.5 нс индивидуальных значений задержек, полученных таким образом, что дает заметный вклад во временное разрешение системы считывания (см. разд. 6.3).

Наблюдается также аддитивность задержек, т.е. задержка в i -м канале относительно опорного может быть получена с точностью не хуже 400 пс как сумма задержки в j -м канале относительно опорного и задержки в i -м канале относительно j -го. Для некоторых пар каналов вид гистограммы

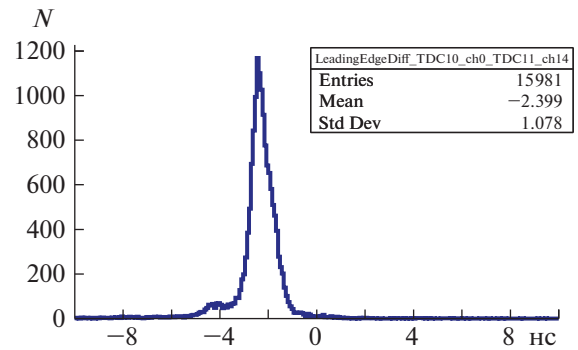


Рис. 8. Распределение разности временных отметок фронтов, соответствующих фотонам из одной вспышки лазера, зарегистрированным в заданной паре каналов.

отличается от показанной на рис. 8, см., например, рис. 9. Подобное распределение можно получить, если один из двух каналов является дефектным в том смысле, что к фронту логического сигнала подмешивается возбужденный или навешенный 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 на гистограмме 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 электроники переднего края для детектора RICH эксперимента CBM особое внимание будет уделено электромагнитной чистоте каналов, а гистограммы, подобные обсуждаемым в данном разделе, будут использоваться в качестве диагностического инструмента.

6.3. Временное разрешение

В проведенных пучковых тестах имеют место два типа событий, в которых регистрируются несколько практически одновременно испущенных фотонов. Первый тип – это вспышка лазера, длительность которой ≈ 40 пс, т.е. на порядок меньше разброса времени прохождения сигнала через м.а.ф.э.у. Второй тип – черенковские кольца. Разброс времени прихода фотонов на м.а.ф.э.у. может достигать 100 пс для колец и 70 пс для вспышек лазера, что определяется в первую очередь наклоном плоскости, в которой расположены фотокатоды. Анализ таких событий позволяет охарактеризовать временное разрешение всей системы считывания, начиная от окна м.а.ф.э.у. и кончая формированием отметок времени.

Временное разрешение одного канала определяется разбросом зарегистрированных временных отметок относительно времени прилета фо-

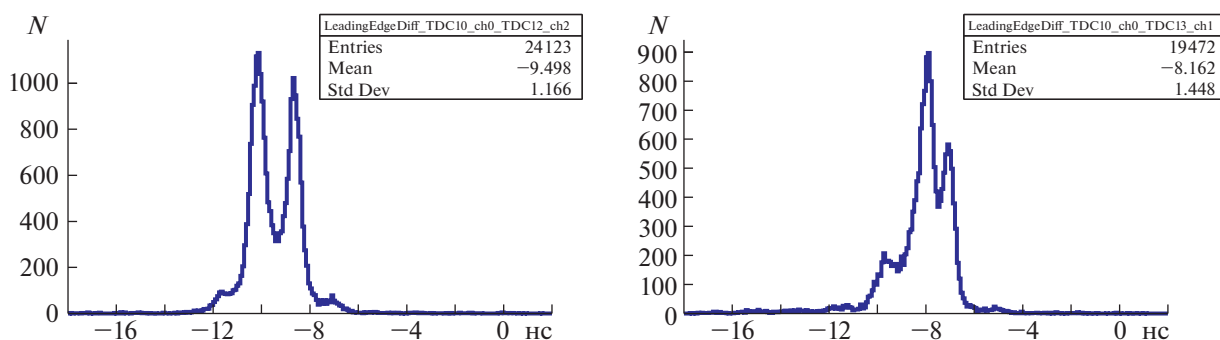


Рис. 9. Распределения, аналогичные приведенному на рис. 8, при условии, что один из каналов – дефектный.

тона при многократных измерениях. Поскольку точное время прилета фотона измерить нельзя, 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. После применения коррекций задержек и калибровки точного времени в двух каналах, ни один из которых не является дефектным, получается распределение, аналогичное показанному на рис. 8 и отличающееся лишь тем, что центр пика находится в нуле.

Полная ширина на полувысоте (FWHM) этого распределения составляет 750 пс, что соответствует временному разрешению 530 пс. Данное значение превосходит разброс времен прохождения сигнала в м.а.ф.э.у. примерно в 2 раза. Причина расхождения объясняется двумя сравнимыми вкладками: дрейфом задержек в каналах и отсутствием коррекции момента пересечения порога в зависимости от амплитуды сигнала. Для реализации такой коррекции необходимо надежное измерение времени над порогом, что в нашем случае невозможно, см. разд. 6.5.

Для того чтобы охарактеризовать временное разрешение системы в целом, помимо анализа пар каналов, исследовались физически одновременные сигналы на следующих совокупностях каналов: 1) до 16-ти каналов, считываемых одной платой PADIWA; 2) до 64-х каналов, принадлежащих одному м.а.ф.э.у.; 3) до 256-ти каналов, принадлежащих четырем соседним м.а.ф.э.у. В каждом случае после коррекции задержек и калибровки точного времени отбирались все хиты, принадлежащие одному событию, и строились гистограммы разности временных отметок по всем возможным парам каналов (рис. 10).

Так как черенковское кольцо, сфокусированное на область из четырех соседних м.а.ф.э.у., проецируется лишь на часть пикселей, фактическое число исследованных каналов в случае черенковских колец отличается. В таблице показано, как эволюционирует среднеквадратичное отклонение и FWHM в зависимости от числа каналов. Отметим, что среднеквадратичное отклонение меняется слабо, а FWHM возрастает с увеличением числа каналов, одновременно распределение последовательно принимает форму, более близкую к распределению Гаусса.

Аналогичные распределения были построены и для случая, когда на м.а.ф.э.у. был нанесен сместитель спектра. Результаты также отображены

FWHM и RMS распределений разностей временных отметок при различных наборах исследуемых каналов

Анализируемая область	Пара каналов	Плата PADIWA	Один м.а.ф.э.у.	Четыре м.а.ф.э.у.
Количество каналов	2	14	39	131
FWHM (кольца, без WLS), нс	0.40	0.60	0.80	1.05
RMS (кольца, без WLS), нс	0.66	0.58	0.62	0.79
FWHM (кольца, с WLS), нс	0.55	0.75	0.95	1.25
RMS (кольца, с WLS), нс	1.48	1.35	1.35	1.47
FWHM (лазер), нс	0.7	1.05	1.30	1.55
RMS (лазер), нс	0.83	0.79	0.85	1.04

Примечание. WLS (wavelength shifter) – сместитель спектра.

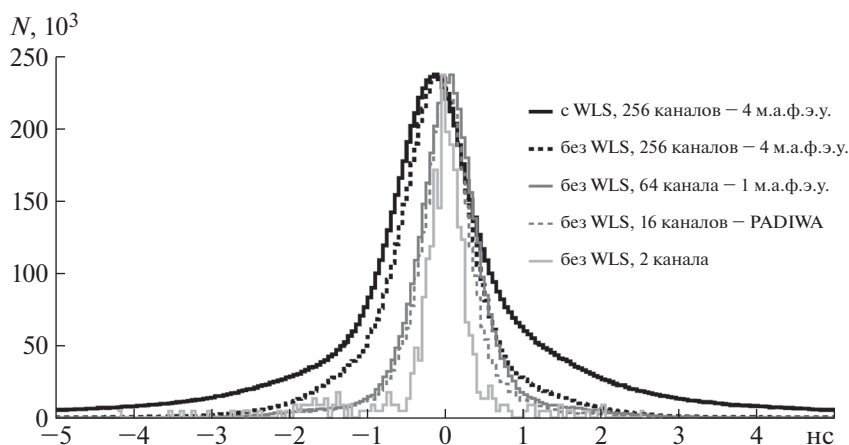


Рис. 10. Распределения, аналогичные приведенному на рис. 8, соответствующие фотонам из одного черенковского кольца для четырех совокупностей каналов.

на рис. 10 и в таблице. В некоторых случаях наблюдаются смещения максимумов от нуля в пределах 100 пс, что связано с разностью хода света до различных пикселей.

6.4. Исследование профиля высвечивания сместителя спектра

Анализ распределения во времени хитов, принадлежащих одному черенковскому кольцу, позволяет исследовать временные свойства сместителя спектра. Анализу подлежит распределение разностей временных отметок хитов каждого кольца относительно первого по времени хита в данном кольце. В зависимости от длины волны черенковский фотон может с той или иной вероятностью либо поглотиться сместителем спектра и вызвать его свечение, либо пройти сквозь слой сместителя спектра без взаимодействия и попасть на фотокатод.

В результате, даже при наличии слоя сместителя спектра, часть хитов подчиняется временной зависимости, характерной для чистого ф.э.у. Таким образом, для получения кривой высвечива-

ния сместителя спектра необходимо из распределения разностей времен, полученного со сместителем спектра, вычлечь должным образом отнормированное в максимуме распределение разностей времен, полученное с чистым ф.э.у.

Нормированные в максимуме кривые высвечивания со сместителем спектра и без него показаны на рис. 11, а разность этих распределений — на рис. 12. Видно, что, за исключением небольшой выпуклости в области 7 нс, связанной с особенностями работы данного семейства м.а.ф.э.у., кривая выглядит похожей на сумму нескольких экспонент.

Указанная выпуклость не позволяет надежно извлечь характерные времена высвечивания. Интересно, тем не менее, сравнить полученную кривую с результатами флюорометрических исследований. Стекла́нная пластина со слоем сместителя спектра, нанесенным точно таким же методом, как и на м.а.ф.э.у., была исследована с помощью классического метода счета фотонов при возбуждении светом с длиной волны 280 нм. Были получены значения времен высвечивания 1.4, 3.8, и

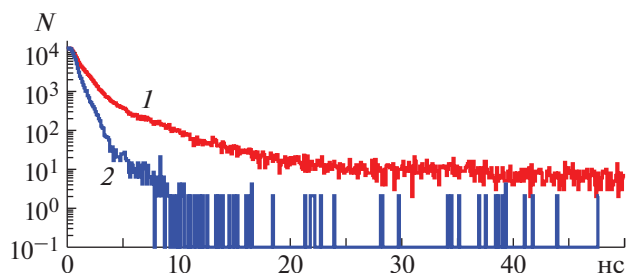


Рис. 11. Измеренные распределения, соответствующие кривым высвечивания со сместителем спектра (1) и без него (2).

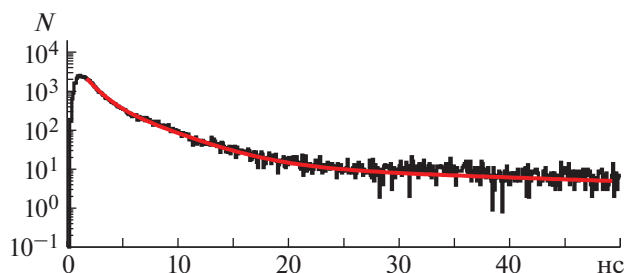


Рис. 12. Разница распределений со сместителем спектра и без него, кривая — результат фитирования распределения суммой трех экспонент.

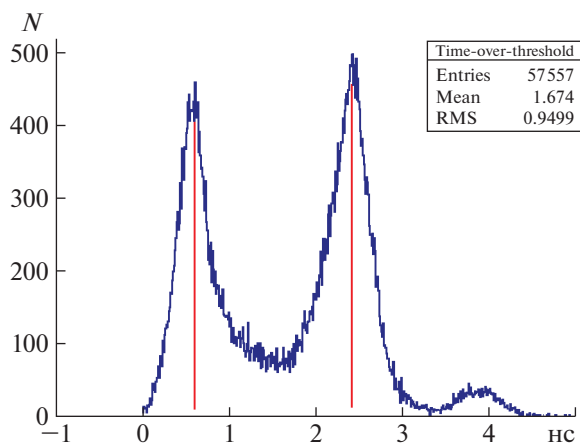


Рис. 13. Типичное распределение ТоТ.

45 нс и соответствующие относительные интенсивности компонент 1.8996, 1.0000 и 0.8364.

Подгонка кривой на рис. 12 суммой трех экспонент с соответствующими временами показывает разумное согласие для времен, превышающих 5 нс. Начальный участок лучше подгоняется при $\tau_1 = 1.1$ нс. Сравнение интенсивностей наиболее быстрой компоненты с флюорометрическими измерениями затруднено из-за начального неэкспоненциального участка, а относительный вклад наиболее медленной компоненты в полную интенсивность в нашем случае оказывается в 3.8 раза ниже. Это можно объяснить влиянием способа возбуждения на заселение центров высвечивания разных типов.

В пределе большого числа хитов в кольце использованный нами метод переходит в стандартный метод исследования флюоресценции путем счета единичных фотонов [49]. Однако в нашем случае существует некоторая случайная задержка между моментом попадания черенковского фотона на поверхность м.а.ф.э.у. и временем прихода первого хита. С целью выявления влияния метода на измеренные времена высвечивания было проведено моделирование методом Монте-Карло.

В модель были заложены разброс 300 пс (RMS) времен прохода лавины в м.а.ф.э.у., три экспоненциальные компоненты с характерными временами 1.4, 3.8 и 45 нс и относительными интенсивностями 2.17, 1.00, 0.22 и средним числом хитов в кольце, равным 18. Получившееся распределение времен относительно первого хита в кольце было подогнано тремя экспонентами со свободными параметрами. Если начать фитирование получившейся зависимости, отступив 4 нс от начала высвечивания, постоянные распада экспонент воспроизводятся с точностью лучше 5%, а соответствующие относительные интенсивности

несколько искажаются, что естественно в силу существования начального неэкспоненциального участка кривой. Таким образом, подтверждена корректность примененного метода определения времен высвечивания.

Практическая ценность проведенного исследования состоит в том, что может быть оптимизирована длительность окна, в пределах которого хиты принимаются одновременно и могут быть приписаны одному событию. Для этого необходимо найти баланс между числом дополнительных хитов, полученных благодаря сместителю спектра, и вероятностью наложения сигналов друг на друга или подхвата в кольцо темного хита. Например, прирост хитов на 19% может быть достигнут при длительности окна 15 нс.

6.5. Время над порогом

Время над порогом ТоТ (time over threshold) — это параметр найденного хита, содержащий в себе при нормальной работе информацию об амплитуде зарегистрированного сигнала. В системе считывания и сбора данных детектора RICH эксперимента СВМ параметр ТоТ может быть использован для улучшения временного разрешения путем коррекции времени пересечения порога с учетом амплитуды (walk correction), а также для повышения качества отделения однофотонного электронного сигнала от шума.

На рис. 13 показано типичное распределение ТоТ, измеренное с помощью лазера в лабораторных условиях. Вопреки ожиданиям, это распределение имеет несколько пиков. Такая структура, согласно [50], может быть объяснена наличием периодической наводки как на входе дискриминатора, так и между выходом дискриминатора и входом TDC. На рис. 14 показан экран цифрового осциллографа в режиме накопления сигналов, полученных путем подключения активного зонда к выходу PADIWA.

Видно, что сгущение сигналов соответствует наблюдаемым пикам в распределении ТоТ; имеет место проблема недостаточности амплитуды одноэлектронного сигнала для устойчивой генерации логической единицы; имеется периодическая наводка на выходе дискриминатора, но ее недостаточно для объяснения наблюдаемой картины; преобладание определенных длительностей логических сигналов позволяет предположить наличие периодической структуры во входном сигнале.

Все это говорит о необходимости подстройки аналоговой части для формирования на входе PADIWA более чистого сигнала большей амплитуды и о защите соединения между дискриминатором и TDC от наводок. Подобные изменения будут с учетом результатов данной работы реали-

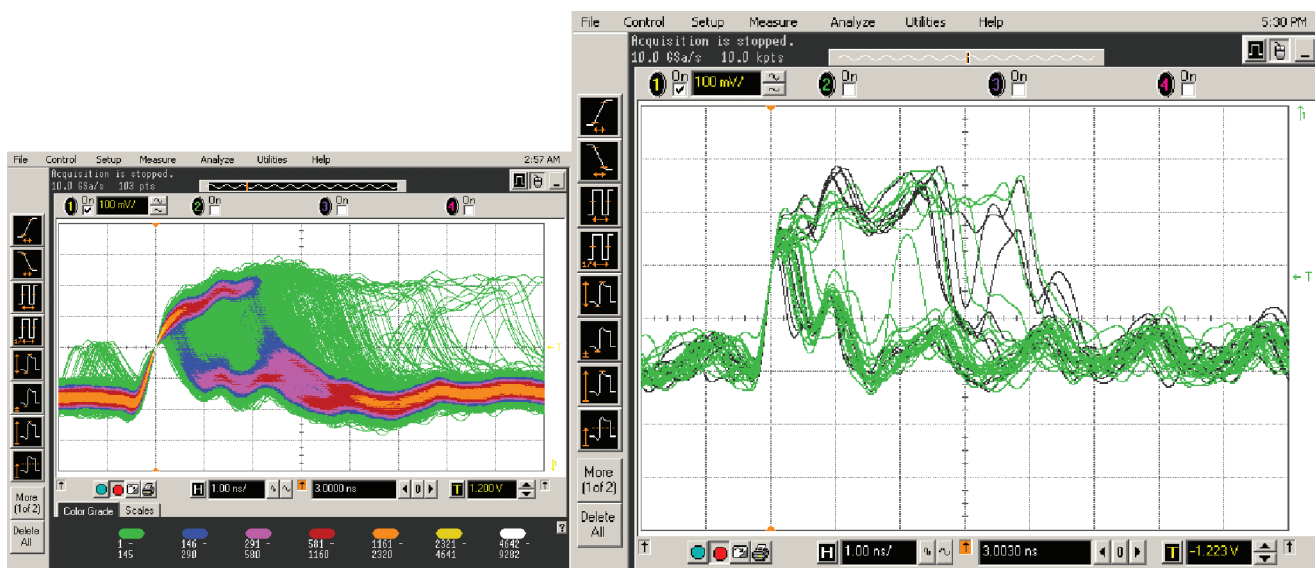


Рис. 14. Экран осциллографа, показывающий выходные сигналы PADIWA, регистрируемые по фронту. Правая и левая панели рисунка отличаются временем накопления сигналов.

зованы в следующем прототипе платы электроники переднего края, называемом DIRICH [28].

Отметим, что указанные проблемы не являются критичными в случае детектора RICH эксперимента CBM и продемонстрированные в данной работе параметры достаточны для уверенного поиска колец. Тем не менее, улучшение разделения сигналов и шумов и повышение эффективности регистрации поможет создать необходимый запас надежности для долговременной работы детектора в условиях постепенной деградации оптических свойств радиатора, зеркал и фотодетекторов.

6.6. Сравнение одноэлектронных спектров при временном и амплитудном считывании

Как отмечено в разд. 2, м.а.ф.э.у. H12700 имеет особенности, которые могут оказать влияние на эффективность регистрации единичных фотоэлектронов и вероятность возникновения ложных хитов. Для выявления этих особенностей были выполнены измерения амплитудных распределений с помощью многоканальной платы на основе микросхемы n-XUTER (см. описание лабораторного стенда в разд. 4.2). Затем результаты амплитудных измерений были сопоставлены с данными, полученными с помощью платы PADIWA.

Амплитудные измерения с низким порогом продемонстрировали наличие заметного пика в малых амплитудах в спектре событий, скоррелированных с источником света. Также были выполнены измерения с маской, открывающей только два разнесенных друг от друга на 2.5 см пикселя. Эти измерения позволили установить,

что событие с малой амплитудой в одном из каналов имеет место тогда, когда в другом канале, находящемся в том же ряду диодной системы, был зарегистрирован фотоэлектрон с достаточно большой амплитудой. Таким образом, для каналов с низкими шумами амплитудный спектр одноэлектронных сигналов выглядит как на рис. 15.

Пик вблизи нуля соответствует наводке, возникающей в каналах, расположенных в одном ряду с тем каналом, где был зарегистрирован одноэлектронный сигнал. Двугорбое распределение справа соответствует настоящим одноэлектронным сигналам. При этом левый пик связан с описанными в разд. 2 событиями, соответствующими

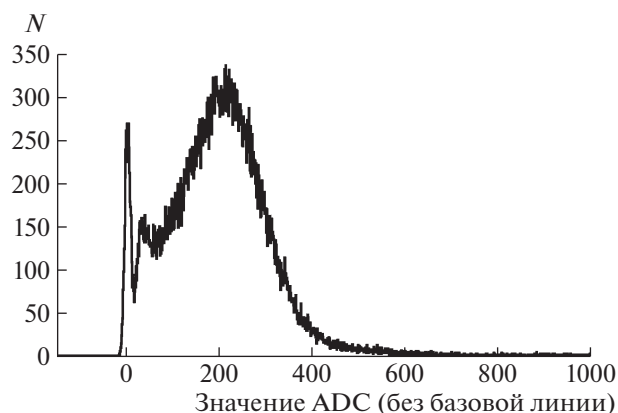


Рис. 15. Пример измеренного одноэлектронного спектра, имеющего особую форму, характерную для м.а.ф.э.у. H12700.

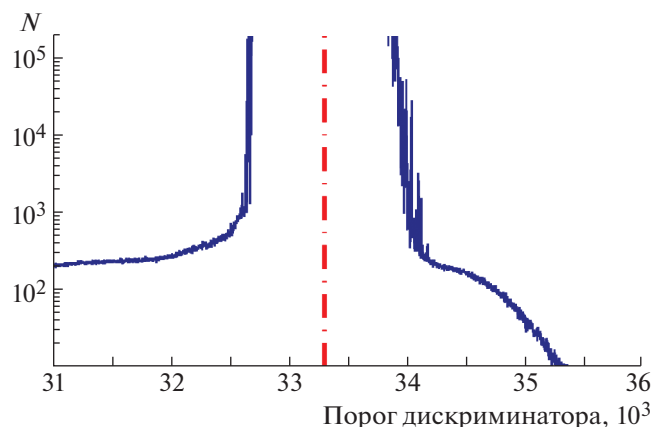


Рис. 16. Зависимость частоты регистрации фронтов от порога регистрации в диапазоне, включающем базовую линию (штрихпунктирная линия).

отклонению электронной лавины или ее части от оптимального пути от динода к диноду.

Отметим, что в большинстве каналов уровень шумов оказывается слишком высоким для отделения низкоамплитудного пика, связанного с наводкой, от одноэлектронного сигнала. Таким образом, попытка получить максимальную эффективность регистрации за счет снижения порога приводит к возрастанию паразитных хитов, лока-

лизированных не на тех пикселях, где родился фотоэлектрон. Для снижения числа паразитных хитов мы ставили порог регистрации в ложбине между низко- и высокоамплитудными частями одноэлектронного спектра. Поскольку формы одноэлектронных спектров во всех каналах подобны, анализ формы спектра на рис. 15 позволяет заключить, что выбранный нами порог приводит к потере 12% одноэлектронных импульсов.

Одно из отличий канала считывания в плате PADIWA — это значительно более быстрая, чем в n-XYTER, аналоговая часть. Если в n-XYTER осуществляется формирование с временем интегрирования 190 нс, то в PADIWA происходит лишь подавление частот выше 100 МГц, что соответствует характерному времени нарастания сигнала несколько наносекунд. Такое отличие приводит к возрастанию роли быстрых шумов и наводок при регистрации сигналов с помощью PADIWA.

Информация о форме одноэлектронного спектра при считывании с помощью канала на основе плат PADIWA и TRB v3 может быть получена в виде зависимости от порога регистрации скорости счета в событиях, происходящих вблизи светового импульса. Использование счетчика зарегистрированных фронтов, реализованного непосредственно в TDC и упомянутого в разд. 3.1, позволяет получить аналогичную зависимость при максимальных частотах, достаточных для ло-

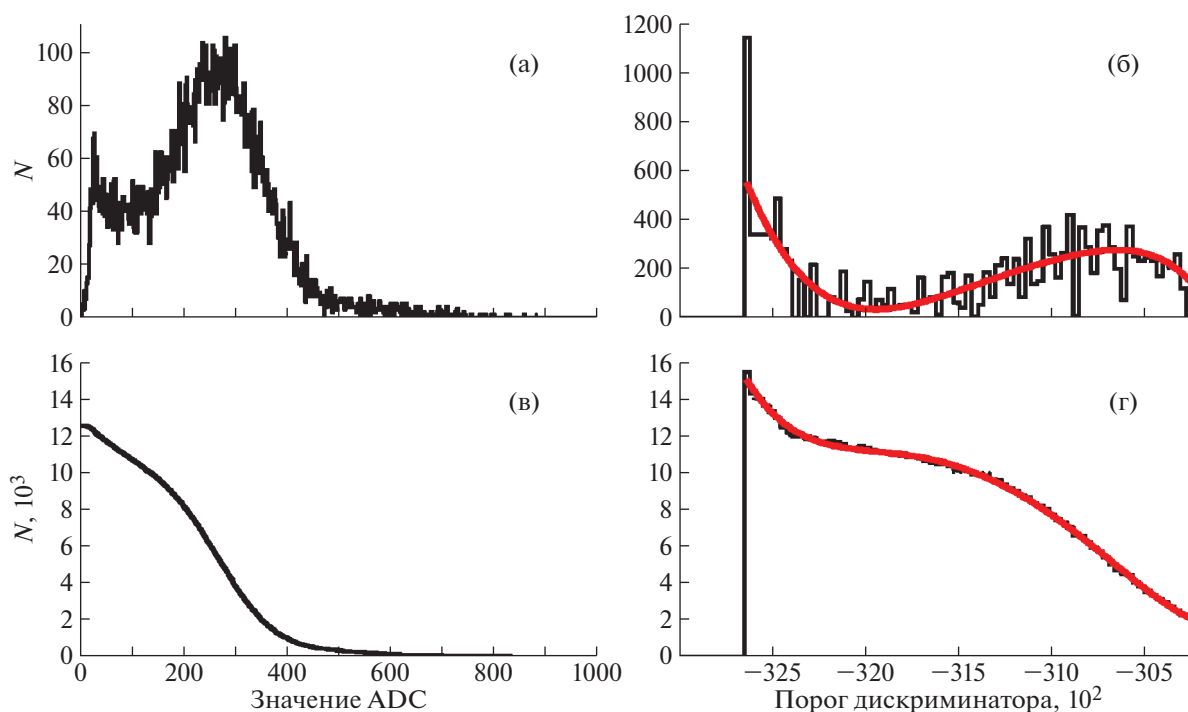


Рис. 17. Одноэлектронный спектр, измеренный напрямую с помощью системы считывания на базе n-XYTER, (а) и производная скана по порогам, полученного с помощью системы считывания на базе PADIWA и TRB v3, (б); интеграл одноэлектронного спектра (в) и зависимость скорости счета от порога дискриминатора (г).

кализации базовой линии, но без отбора событий вокруг светового импульса.

На рис. 16 показана зависимость частоты регистрации фронтов от порога регистрации. Плечо слева соответствует одноэлектронному спектру, более подробно исследованному ниже, а быстро-возрастающие границы вокруг вертикальной штриховой линии ограничивают локализацию базовой линии. Точность локализации базовой линии мы оцениваем как ± 100 отсчетов по шкале, использованной на рис. 16 и рис. 17б, 17г.

Установлено, что результаты измерения частоты отсчетов, полученные с помощью счетчика и из анализа потока данных, совпадают между собой при условии, что система сбора и передачи данных справляется с передачей потока сообщений с временными отметками.

Интересно сравнить зависимости скорости счета от порога при использовании двух систем считывания и одинаковых условиях засветки. Результаты такого сравнения для одного из типичных каналов показаны на рис. 17. В случае платы n-XYTER для такого сравнения может быть использован интеграл одноэлектронного спектра, показанный на рис. 17в. Соответственно производная упомянутой зависимости, полученной с помощью платы PADIWA, может быть сопоставлена с одноэлектронным спектром, полученным с помощью n-XYTER и показанным на рис. 17а. Сплошная линия на рис. 17б получена дифференцированием кривой, показанной сплошной линией на рис. 17г и полученной подгонкой измеренной зависимости полиномом 7-й степени. Отметим, что, по нашим оценкам, световые потоки при измерениях с двумя системами считывания совпадают с точностью $\pm 5\%$. Видно, что скорости счета в области ложбины и максимума одноэлектронного спектра приблизительно совпадают.

Амплитуды, соответствующие максимуму и ложбине, относятся как 2.6 в обоих случаях. При этом в случае платы PADIWA наблюдается, с одной стороны, более явно выраженная ложбина, а с другой – избыток счета в малых амплитудах, что предполагает больший относительный вклад наводок и, следовательно, невозможность отделения от них низкоамплитудной части одноэлектронного спектра и нецелесообразность повышения эффективности за счет установления порога ниже ложбины.

7. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Исследованы свойства прототипа системы считывания и сбора данных детектора RICH эксперимента CBM. Подробно охарактеризован 64-канальный модуль, состоящий из м.а.ф.э.у. H12700, четырех плат предусилителей-дискриминаторов PADIWA и одной платы TRV v3, выполняющей

функции TDC и концентратора данных. Описаны необходимые для работы прототипа модули программного обеспечения. Рассмотрены процедура калибровки задержек между каналами и стабильность полученных задержек. Дрейф индивидуальных задержек не превышает 0.5 нс за все время измерений.

Рассмотрена возможность использования спектров “времени над порогом” (ToT) для отбора корректных хитов и коррекции временной привязки. Выявлено, что спектр ToT имеет многопиковую структуру из-за периодических наводок. Это препятствует использованию этого параметра в анализе. Выявленные схемотехнические недостатки будут устранены в следующей версии плат считывающей электроники.

Исследованы временные свойства сместителя спектра и его влияние на эффективность регистрации черенковских колец. Наиболее интенсивная быстрая компонента характеризуется временем высвечивания 1.1 нс, но имеются также компоненты с характерными временами 3.8 и 45 нс. Проведено сравнение медленного аналогового и быстрого временного считывания м.а.ф.э.у.

Выявлено, что особенности одноэлектронного спектра проявляются в том, как эффективность регистрации фотоэлектронов и вероятность появления ложных хитов зависят от порога дискриминатора. Исследовано временное разрешение всего канала считывания для различных по величине множеств каналов: от одной пары до 131. Наихудшее из полученных значений составляет 1.1 нс (FWHM), что определяется в первую очередь отсутствием коррекции временной отметки в зависимости от амплитуды сигнала и дрейфом задержек между каналами. Полученные результаты достаточны для использования исследованной схемы считывания и сбора данных в эксперименте CBM, однако устранение выявленных недостатков позволит создать запас по эффективности и повысить надежность системы при долговременной эксплуатации.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Gutbrod H.H.* // FAIR Baseline Technical Report. ISBN: 3-9811298-0-6. 2006.
2. The CBM physics book: Compressed baryonic matter in laboratory experiments. Lect. Notes Phys. V. 814 / Ed. by *B. Friman*, Berlin, Heidelberg: Springer-Verlag, 2011. doi 10.1007/978-3-642-13293-3
3. The CBM Collaboration: Nuclear Matter Physics at SIS-100. CBM Report 2012-01 // Ed. by *P. Senger, V. Friese*. GSI, Darmstadt, 2012.
4. Compressed Baryonic Matter Experiment. Technical Status Report. GSI, Darmstadt, 2005.
5. CBM Progress Report 2016 / Ed. by *I. Selyuzhenkov, A. Toia*. GSI-2017-00564. GSI, Darmstadt, 2017. ISBN: 978-3-9815227-4-7.

6. Technical Design Report for the CBM Superconducting Dipole Magnet / Ed. By A. Malakhov, A. Shabunov. GSI-2015-02000. GSI, Darmstadt, 2013.
7. *Koziel M., Amar-Youcef S., Bialas N., Deveaux M., Fröhlich I., Li Q., Michel J., Milanović B., Müntz C., Neumann B., Schrader C., Stroth J., Tischler T., Weirich R., Wiebusch M.* // Nucl. Instrum. and Methods. in Physics Research A. 2013. V. 732. P. 515. doi 10.1016/j.nima.2013.07.041
8. Technical Design Report for the CBM Silicon Tracking System (STS) / Ed. By J. Heuser et al. GSI-2013-05499. GSI, Darmstadt, 2013.
9. Technical Design Report for the CBM Ring Imaging Cherenkov Detector (RICH) / Ed. By C. Höhne. GSI-2014-00528. GSI, Darmstadt, 2013.
10. Technical Design Report for the CBM: Muon Chambers (MuCh)/ Ed. By S. Chattopadhyay et al. GSI-2015-02580. GSI, Darmstadt, 2015.
11. *Biswas S., Schmidt D.J., Abuhoza A., Frankenfeld U., Garabatos C., Hehner J., Kleipa V., Morhardt T., Schmidt C.J., Schmidt H.R., Wiehula J.* // JINST. 2013. V. 8. C12002. doi 10.1088/1748-0221/8/12/C12002
12. *Petris M., Petrovici M., Catanescu V., Tarzila M., Simion V., Bartos D., Berceanu I., Bercuci A., Caragheorghopol G., Constantin F., Radulescu L., Adamczewski-Musch J., Linev S.* // Nucl. Instrum. and Methods. in Physics Research A. 2013. V. 732. P. 375. doi 10.1016/j.nima.2013.07.087
13. Technical Design Report for the CBM Time-of-Flight System (TOF) / Ed. By N. Herrmann. GSI-2015-01999. GSI, Darmstadt, 2014.
14. *Korolko I.E., Prokudin M.S., Zaitsev Yu.M.* // J. Phys.: Conf. Ser. 2017. V. 798. P. 012164. doi 10.1088/1742-6596/798/1/012164
15. Technical Design Report for the CBM Projectile Spectator Detector (PSD) / Ed. By F. Guber, I. Selyuzhenkov. GSI-2015-02020. GSI, Darmstadt, 2015.
16. Hamamatsu H12700 manual. https://www.hamamatsu.com/resources/pdf/etd/H12700_TPMH1348E.pdf
17. *Calvi M., Carniti P., Cassina L., Gotti C., Maino M., Matteuzzi C., Pessina G.* // JINST. 2015. V. 10. P09021. doi 10.1088/1748-0221/10/09/P09021
18. https://www.hamamatsu.com/resources/pdf/etd/H8500_H10966_TPMH1327E.pdf
19. *Adamczewski-Musch J., Akishin P., Becker K.-H., Belogurov S., Bendarouach J., Boldyreva N., Chernogorov A., Deveaux C., Dobyryn V., Dürr M., Eschke J., Förtsch J., Heep J., Höhne C., Kampert K.-H. et al.* // Nucl. Instrum. and Methods. in Physics Research A. 2017. V. 845 P. 434 doi 10.1016/j.nima.2016.05.102
20. *Adamczewski-Musch J., Akishin P., Becker K.-H., Belogurov S., Bendarouach J., Boldyreva N., Chernogorov A., Deveaux C., Dobyryn V., Dürr M., Eschke J., Förtsch J., Heep J., Höhne C., Kampert K.-H. et al.* // JINST. 2016. V. 11. C05016. doi 10.1088/1748-0221/11/05/C05016
21. Photomultiplier tubes. Basics and Applications. Hamamatsu Photonics K.K.
22. *Kopfer J.* PhD thesis. Bergische Universität Wuppertal, 2014.
23. Official TRB project web site. <http://trb.gsi.de/>
24. *Ugur C., Linev S., Michel J., Schweitzer T., Traxler M.* // JINST. 2016. V. 11. C01046. doi 10.1088/1748-0221/11/01/C01046
25. TRB v3 documentation. <http://jpspc29.x-matter.uni-frankfurt.de/docu/trb3docu.pdf>
26. *Zabołotny W.M., Kasprowicz G.* // Photonics Applications in Astronomy, Communications, Industry, and High-Energy Physics Experiments. 2014. V. 929023. doi 10.1117/12.2073377
27. *de Cuveland J., Lindenstruth V.* (for the CBM Collaboration) // J. Phys.: Conf. Ser. 2011. V. 331. P. 022006. doi 10.1088/1742-6596/331/2/022006
28. *Michel J., Faul M., Friese J., Höhne C., Kampert K.-H., Patel V., Pauly C., Pfeifer D., Skott P., Traxler M., Ugur C.* // JINST. 2017. V. 12. C01072. doi 10.1088/1748-0221/12/01/C01072
29. *Adamczewski-Musch J., Kurz N., Linev S., Zumbach P.* // J. Phys.: Conf. Ser. 2012. V. 396. P. 012001. doi 10.1088/1742-6596/396/1/012001
30. *Bergmann C., Emschermann D., Amend W., Bercuci A., Berendes R., Blume C., Dillenseger P., Garcia C., Gläsel S., Heine N., Hutter D., Kardan B., Kohn M., Krieger M., Morhardt T. et al.* // CBM Progress Report. 2014. P. 9. ISBN 978-3-9815227-2-3.
31. *Bergmann C., Emschermann D., Berendes R., Heine N., Kohn M., Verhoeven W., Wessels J.P.* // CBM Progress Report. 2014. P. 78. ISBN 978-3-9815227-2-3.
32. *Petris M., Batros D., Caragheorghopol G., Constantin F., Petrovici M., Radulescu L., Simion V., Deppner I., Herrmann N., Simon C., Fruehauf J., Kis M., Loizeau P.-A.* // J. Phys.: Conf. Ser. 2016. V. 724. P. 012037. doi 10.1088/1742-6596/724/1/012037
33. Information about the T9 beam line and experimental facilities. http://home.web.cern.ch/sites/home.web.cern.ch/files/file/spotlight_students/information_about_the_t9_beam_line_and_experimental_facilities.pdf
34. *Kotchenda L.M., Kravtsov P.A.* // CBM RICH Prototype gas system. <http://hepd.pnpi.spb.ru/hepd/articles/6.pdf>
35. *Adamczewski-Musch J., Becker K.-H., Belogurov S., Boldyreva N., Chernogorov A., Deveaux C., Dobyryn V., Dürr M., Eom J., Eschke J., Höhne C., Kampert K.-H., Kleipa V., Kochenda L., Kolb B. et al.* // Nuclear Inst. and Methods in Physics Research A. 2014. V. 766. P. 221. doi 10.1016/j.nima.2014.04.074
36. *Bendarouach J., Höhne C., Mahmoud T.* // CBM Progress Report. 2014. P. 56. ISBN 978-3-9815227-2-3.
37. Roithner UVTOP240 datasheet. http://www.roithner-laser.com/datasheets/led_deepuv/uvtop240.pdf
38. *Adamczewski-Musch J., Becker K.-H., Belogurov S., Boldyreva N., Chernogorov A., Deveaux C., Dobyryn V., Dürr M., Eom J., Eschke J., Höhne C., Kampert K.-H., Kleipa V., Kochenda L., Kolb B. et al.* // Nuclear Inst. and Methods in Physics Research A. 2015. V. 783. P. 43. doi 10.1016/j.nima.2015.02.014
39. Alphas Lasers Picopower-LD series datasheet. http://www.alphas.com/images/stories/products/lasers/Picosecond_Pulse_Diode_Lasers_with_Driver_PICOPOWER-LD_ALPHALAS.pdf
40. <http://www.rz.uni-frankfurt.de/39888789/syscore>

41. <http://cbmroot.gsi.de/>
42. FLESnet development repository. <https://github.com/cbm-fles/flesnet>
43. *Adamczewski-Musch J., Linev S., Ovcharenko E., Ugur C.* // HADES trbnet data formats for DABC and Go4, PHN-SIS18-ACC-41, GSI SCIENTIFIC REPORT 2012, P. 297.
44. *Szplet R., Kalisz J., Pelka R.* // IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement. 1997. V. 46. P. 449.
45. *Adamczewski-Musch J., Akishin P., Becker K.-H., Belogurov S., Bendarouach J., Boldyreva N., Deveaux C., Dobyryn V., Dürr M., Eschke J., Förtsch J., Heep J., Höhne C., Kampert K.-H., Khanzadeev A. et al.* // Phys. Part. Nuclei Lett. 2017. T. 14. № 6 (211). С. 904. doi 10.1134/S1547477117060036
46. *Adamczewski-Musch J., Akishin P., Becker K.-H., Belogurov S., Bendarouach J., Boldyreva N., Deveaux C., Dobyryn V., Dürr M., Eschke J., Förtsch J., Heep J., Höhne C., Kampert K.-H., Khanzadeev A. et al.* // Nuclear Inst. and Methods in Physics Research A. in press. doi 10.1016/j.nima.2017.03.043
47. *Лебедев С.А., Ососков Г.А.* // Письма в ЭЧАЯ. 2009. Т. 6. № 2(151). С. 260.
48. *Lebedev S., Höhne C., Kisel I., Ososkov G.* // Fast Parallel Ring Recognition Algorithm in the RICH Detector of the CBM Experiment at FAIR. PoS(ACAT2010)060.
49. *O'Connor D.V.* // Time-correlated Single Photon Counting. London: Academic Press, 1984. ISBN: 0-12-524140-2
50. *Gonnella F., Kozhuharov V., Raggi M.* // Nuclear Inst. and Methods in Physics Research A. 2015. V. 791. P. 16. doi 10.1016/j.nima.2015.04.028