

Разработка системы считывания и приёма данных детектора RICH эксперимента CBM

J. Adamczewski-Musch^a, P. Akishin^h, K.-H. Becker^b,
S. Belogurov^{h,f}, J. Bendarouach^d, N. Boldyreva^e, C. Deveau^d,
V. Dobyrn^e, M. Dürr^d, J. Eschke^a, J. Förtsch^b, J. Heep^d,
C. Höhne^d, K.-H. Kampert^b, L. Kochenda^{e,f}, J. Kopfer^{b,d},
P. Kravtsov^{e,f}, I. Kres^b, S. Lebedev^{d,h}, E. Lebedeva^d,
E. Leonova^e, S. Linev^a, T. Mahmoud^d, J. Michel^g, N. Miftakhov^e,
W. Niebur^a, E. Ovcharenko^{h,c}, V. Patel^b, C. Pauly^b, D. Pfeifer^b,
S. Querchfeld^b, J. Rautenberg^b, S. Reinecke^b, Y. Riabov^e,
E. Roshchin^e, V. Samsonov^{e,f,i}, V. Schetinin^{h,j}, O. Tarasenkova^e,
M. Traxler^a, C. Ugur^a, E. Vznuzdaev^e, и M. Vznuzdaev^e

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

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

^cSSC RF Institute for Theoretical and Experimental Physics
(ITEP), 117218 Moscow, Russia

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

^eNational Research Centre - Kurchatov Institute,
B. P. Konstantinov Petersburg Nuclear Physics Institute, 188300
Gatchina, Russia

^fNational Research Nuclear University MEPhI (Moscow
Engineering Physics Institute), 115409 Moscow, Russia

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

^hLaboratory of Information Technologies, Joint Institute for

Nuclear Research (JINR-LIT), 141980 Dubna, Russia
ⁱSt. Petersburg State Polytechnic University (SPbSPU), 195251
 St. Petersburg, Russia
^jBauman Moscow State Technical University, 105005 Moscow,
 Russia

Содержание

Введение	3
1 Фотоэлектронный умножитель	6
2 Архитектура системы сбора данных CBM RICH	8
2.1 64-канальный модуль считывания	8
2.2 Концентрация и ввод данных в ЭВМ	14
3 Экспериментальные установки	15
3.1 Экспериментальная установка на пучковых тестах	15
3.2 Лабораторный стенд	20
4 Программное обеспечение	22
4.1 Распаковка	23
4.2 Калибровка точного времени	23
4.3 Коррекция задержек между каналами	23
4.4 Построение хита	24
4.5 Построение события	25
4.6 Реконструкция	27
5 Результаты	28
5.1 Испытание системы сбора данных с использованием FLIB .	28
5.2 Калибровка точного времени (Fine time calibration)	28
5.3 Определение коррекций задержек между каналами	33
5.4 Временное разрешение	35
5.5 Исследование профиля высвечивания сместителя спектра .	37
5.6 Время над порогом	40
5.7 Сравнение одноэлектронных спектров при временном и ам- плитудном считывании	42
Заключение	45

Аннотация

Подробно охарактеризован 64-канальный модуль считывания и приёма данных, состоящий из МА ФЭУ Н12700, четырёх плат предусилителей-дискриминаторов PADIWA и одной платы TRB v3, выполняющей функции ВЦП и концентратора данных. Описаны необходимые для работы прототипа модули ПО. Продемонстрировано, что ВЦП имеют временное разрешение от 21 до 64 пс (FWHM) в зависимости от способа калибровки точного времени. Проведена калибровка задержек между каналами. Дрейф задержек не превышает 0.5 нс за все время измерений (полчаса). 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 нс и 45 нс. Выявлено влияние особенностей одноэлектронного спектра на эффективность регистрации фотоэлектронов и вероятность появления ложных хитов. Временное разрешение совокупности из 256 каналов составляет 1.2 нс. 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.

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 расщеплений в фазовом пространстве частиц, рождающихся в области взаимодействия. Для этого в каждом событии требуются:

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

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

46 Схема экспериментальной установки с RICH представлена на рис. 1.

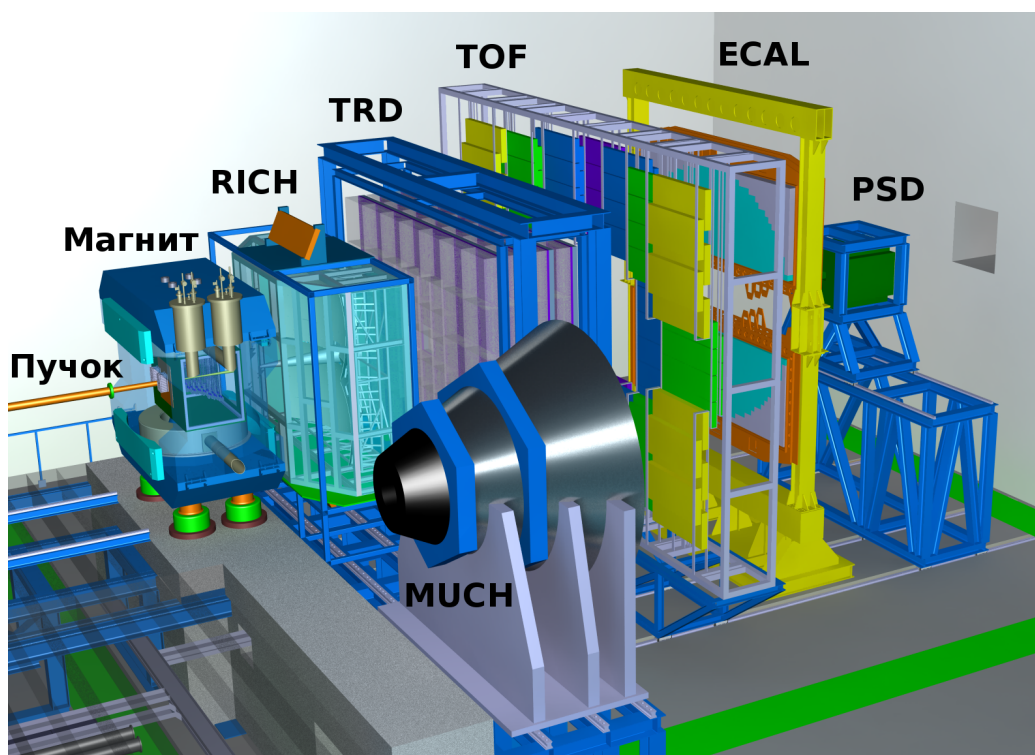


Рис. 1: Общий вид экспериментальной установки CBM в конфигурации с RICH.

47 Между полюсами сверхпроводящего дипольного магнита [6] распо-
48 ложена вакуумная камера, содержащая мишень и вершинный микро-
49 детектор (MVD) [7], выполненный на основе монолитного пиксельного
50 детектора типа MAPS. Ниже по пучку также между полюсами, но уже

51 вне вакуумной камеры, располагаются станции кремниевой трековой си-
52 стемы (STS) [8], собранные из двухсторонних микроstriповых сенсоров.
53 Координатные трековые детекторы MVD и STS предназначены для ре-
54 конструкции траекторий заряженных частиц, восстановления их импуль-
55 сов с точностью не хуже 1% и нахождения вторичных вершин в условиях
56 высокой множественности и плотности частиц.

57 Следом за STS в рассматриваемой конфигурации расположен детек-
58 тор черенковских колец (RICH) [9], предназначенный для идентифика-
59 ции электронов и позитронов в диапазоне импульсов от 0.5 ГэВ/с до
60 8 ГэВ/с с целью восстановления распадов легких векторных мезонов
61 и J/ψ частиц. Этот детектор, разработке которого посвящена данная
62 статья, имеет радиатор длиной 1.7 м из углекислого газа под неболь-
63 шим избыточным давлением, систему фокусировки из сегментирован-
64 ных сферических зеркал радиуса 3 м и общей площадью 13 кв.м. В ка-
65 честве позиционно-чувствительного фотодетектора используется много-
66 анодный фотоэлектронный умножитель Hamamatsu H12700.

67 Во второй конфигурации на месте RICH стоит мюонная система (MUCH) [10],
68 предназначенная в первую очередь для исследования частиц, распадаю-
69 щихся по димюонному каналу и состоящая из чередующихся слоев же-
70 леза и газовых трековых камер [11].

71 Детектор переходного излучения (TRD) используется для реконструк-
72 ции треков частиц и идентификации электронов/позитронов в условиях
73 доминирующего фона от пионов [12].

74 Для идентификации адронов используется время-пролётный детек-
75 тор (TOF) [13].

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

79 Детектор неперезаимодействовавших осколков ядер (PSD) [15] пред-
80 ставляет собой сегментированный адронный калориметр и служит для
81 определения центральности столкновения и плоскости реакции путем ре-
82 гистрации ядерных осколков, летящих под малыми углами к пучку.

83 Эксперимент характеризуется высокой множественностью частиц, боль-
84 шой плотностью треков под малыми углами и высокой частотой взаимодей-
85 ствий. Вследствие этого детекторы содержат десятки тысяч плотно упа-
86 кованных каналов считывания, работающих по бестриггерной схеме, с
87 которых необходимо собирать и анализировать “на лету” большой поток
88 данных.

89 В данной статье описаны результаты тестов прототипа систем ре-
90 гистрации фотонов, считывания, сбора и первичной обработки данных.
91 Были реализованы все принципиальные узлы, как аппаратные, так и

92 программные, соответствующих систем разрабатываемого детектора че-
 93 ренковских колец эксперимента СВМ. Тесты проводились как в лабо-
 94 раторных условиях, так и в составе полнофункционального прототипа
 95 детектора RICH на пучке PS в ЦЕРН.

96 1 Фотоэлектронный умножитель

97 Многоанодный фотоэлектронный умножитель (МА ФЭУ) H12700 фир-
 98 мы Hamamatsu [16], появившийся на рынке в 2013 г., подробно охарак-
 99 теризован в работах [17, 18]. Он обладает следующими достоинствами:
 100 большая доля площади поперечного сечения, приходящаяся на светочув-
 101 ствительные пиксели, квадратная форма, что позволяет перекрывать без
 102 потерь значительные площади (плотность упаковки 87%), малое время
 103 прохождения однофотоэлектронного сигнала через динодную систему,
 104 малый разброс этого времени от события к событию, низкие перекрёст-
 105 ные помехи и низкая скорость счета тепловых электронов. Некоторые
 106 свойства данного прибора показаны в табл. 1, по большинству парамет-
 107 ров он превосходит своего предшественника МА ФЭУ H8500 [19].

Таблица 1: Свойства МА ФЭУ H12700B-03.

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

108 Данный МА ФЭУ имеет двухщелочной фотокатод. Спектральная чув-
 109 ствительность МА ФЭУ в версии H12700B-03, используемой в настоящей
 110 работе, соответствует конфигурации с входным стеклом, прозрачным в
 111 ультрафиолетовой области.

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

120 Имеются исследования [20, 21, 22], показывающие, что радиационная
 121 стойкость прибора достаточна для использования в эксперименте СВМ.

122 Также продемонстрирована работоспособность прибора в магнитном по-
123 ле до 2.5 мТл [17] без значительного падения характеристик. Использо-
124 вание магнитных экранов и выбор оптимального расположения фотодетек-
125 тора в пространстве делают этот МА ФЭУ пригодным для использо-
126 вания в эксперименте СВМ. Отметим, что к этому прибору проявляют
127 интерес и другие эксперименты, например, он рассматривается и для
128 обновления LHCb [17].

129 Наряду с перечисленными достоинствами, МА ФЭУ H12700B-03 име-
130 ет некоторые особенности, не имеющие аналогов в традиционных ФЭУ и
131 требующие особого внимания при реализации канала считывания. Раз-
132 множение электронов в динодной системе происходит в одном и том же
133 вакуумном объеме для всех каналов. Помещённая в единый вакуумный
134 объём динодная система типа “Metal Channel”, см. рис. 2, отличается
135 тем, что она довольно компактна, едина для всех каналов и позволя-
136 ет добиться отличных временных свойств. Электронные лавины, соот-
137 ветствующие разным каналам, отличаются местом прохождения через
138 динодную систему. Имеют место такие эффекты как выбивание элек-
139 тронов из динодов фотонами, прошедшими сквозь фотокатод, и откло-
140 нение электронов от идеальной траектории за счет разброса энергий. По-
141 следняя особенность приводит к попаданию электронов на последующие
142 стадии динодной системы, минуя предыдущие, и перетеканию всей или
143 части электронной лавины в соседний канал. Перетекание части лавины
144 в соседний канал имеет место в более чем 25% случаев при равномерном
145 освещении всего фотокатода. Величина перетекающего заряда составля-
146 ет от 3% до 7% в зависимости от взаимного расположения пикселей [17].
147 Вероятность того, что лавина от фотоэлектрона полностью разовьётся в
148 соседнем канале зависит от взаимного расположения каналов и состав-
149 ляет при равномерном освещении от 0.1% до 2% [23]. Кроме того, при на-
150 личии относительно большого сигнала в одном из каналов, наблюдается
151 биполярная наводка в каналах, расположенных в том же ряду. При ин-
152 тегрировании этой наводки возможно формирование низкоамплитудных
153 импульсов в нескольких каналах. В классическом ФЭУ такие эффек-
154 ты отсутствуют из-за отсутствия связи с соседними каналами, наличия
155 развитой системы фокусировки и такой конструкции динодной системы,
156 что диноды имеют большую площадь и последующие стадии полностью
157 экранируются предыдущими.

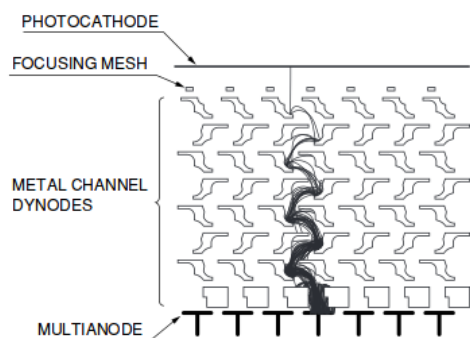


Рис. 2: Схема динодной системы типа “Metal Channel”.

158 Описанные особенности приводят к формированию в одноэлектрон-
 159 ном спектре низкоамплитудной части, сливающейся с шумами и отделен-
 160 ной от основного пика довольно глубокой ложбинкой. Проявления этого
 161 эффекта в наших измерениях обсуждаются в секции 5.7.

162 **2 Архитектура системы сбора данных CBM RICH**

163 **2.1 64-канальный модуль считывания**

164 Конструктивно и функционально вся электроника считывания и оциф-
 165 ровки данных CBM RICH может быть сгруппирована в 64-канальные
 166 модули, каждый из которых соответствует одному многоанодному фо-
 167 тоэлектронному умножителю (МА ФЭУ). Схема 64-канального модуля
 168 показана на рис. 3. Он включает в себя 4 платы PADIWA и одну плату
 169 TRB v3.

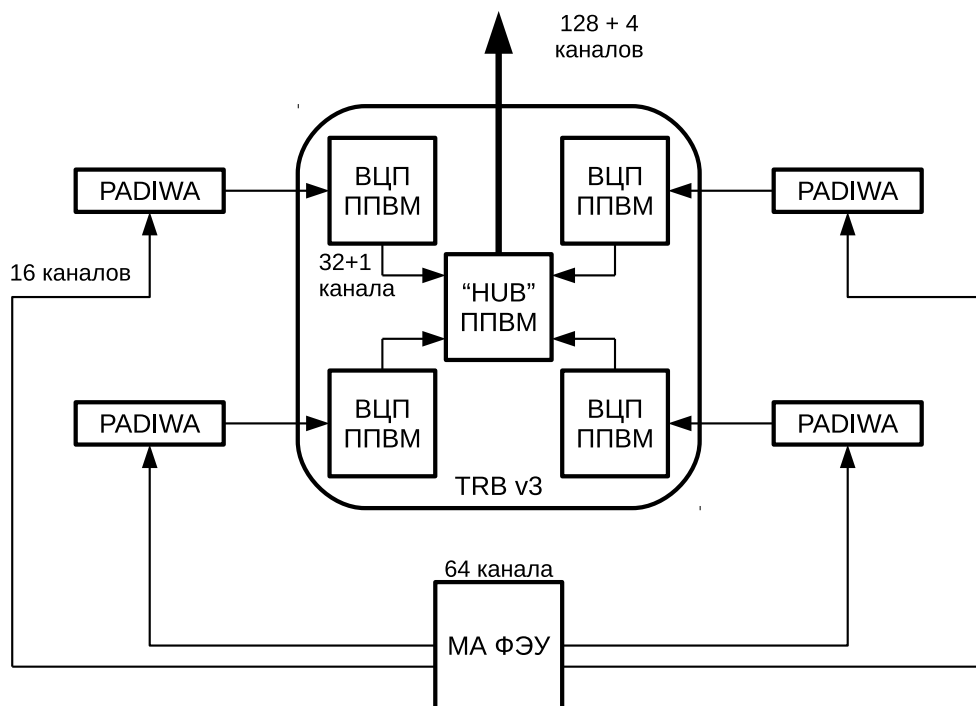


Рис. 3: Схема считывания одного МА ФЭУ, состоящая из 4 плат-дискриминаторов PADIWA и одной платы TRB v3.

170 PADIWA — 16-ти канальная плата передней электроники, разрабо-
 171 танная в ГСИ [24]. Общий вид платы PADIWA показан на рис. 4. Плата
 172 устанавливается на МА ФЭУ через плату-адаптер, единственным назна-
 173 чением которой является соединение анодов МА ФЭУ с соответствующи-
 174 ми входами PADIWA. С одной стороны печатной платы PADIWA распо-
 175 ложены 16 сигнальных входов с импедансом 100 кОм. На каждый вход
 176 приходится два контакта — земля и сигнал. Они чередуются таким обра-
 177 зом, чтобы можно было подключить PADIWA к плате-адаптеру любой
 178 стороной. Каждый канал PADIWA имеет собственный фильтр низких
 179 частот с полосой пропускания около 100 МГц и предусилитель, которые
 180 образуют аналоговую часть канала. После усиления сигнал поступает в
 181 программируемую пользователем вентильную матрицу (ППВМ). Обыч-
 182 но ППВМ применяются для обработки цифровых (логических) сигналов,
 183 однако, в нашем случае на входные цифровые линии подаётся аналого-
 184 вый сигнал. В ППВМ для каждой входной линии можно задать свой
 185 порог, разделяющий логические уровни входного сигнала. Таким обра-
 186 зом, настраиваемые входы ППВМ могут использоваться как дискрими-
 187 наторы. На выходе каждого канала формируется логический ноль, когда

188 входной сигнал в этом канале ниже установленного порога, и логиче-
189 ская единица, когда входной сигнал выше этого порога, см. рис. 5. Далее
190 расположены выходные порты и порты настройки ППВМ, объединён-
191 ные в разъем, позволяющий подключить 20 LVDS линий. Для управле-
192 ния платой используются 4 LVDS линии, остальные 16 LVDS линий —
193 выходные. Для программирования ППВМ на плате предусмотрен стан-
194 дартный JTAG порт. Также на плате имеется порт для подключения
195 источника низкого напряжения для питания платы. Помимо этого име-
196 ется датчик температуры, подключённый к ППВМ. Сигналы с датчика
197 могут использоваться, например, для того, чтобы обнаружить перегрев,
198 если такая возможность заложена в программе ППВМ.

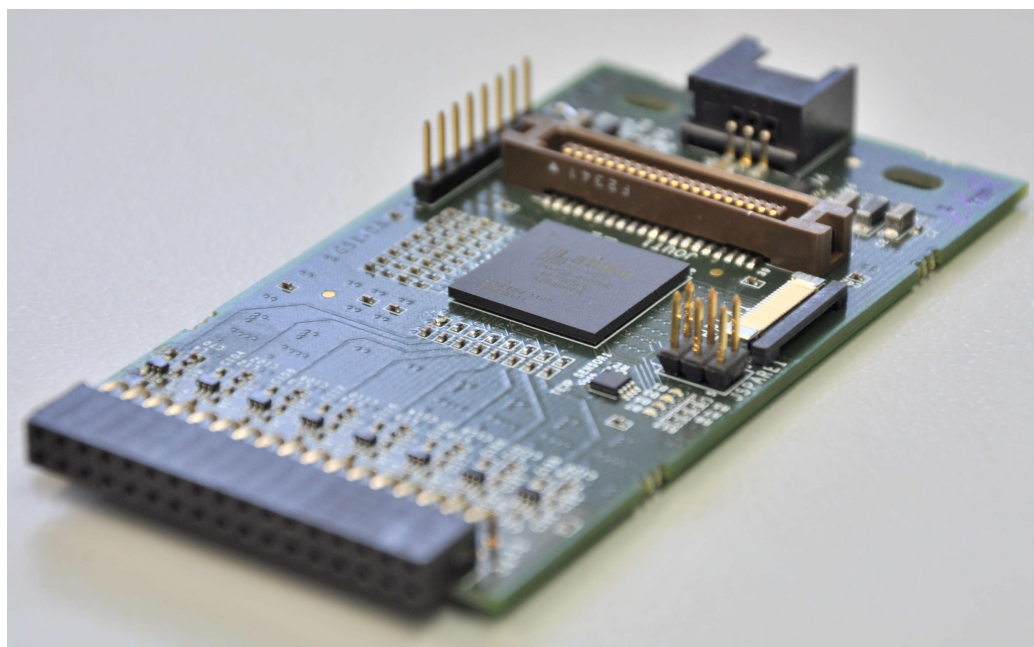


Рис. 4: Общий вид платы PADIWA.

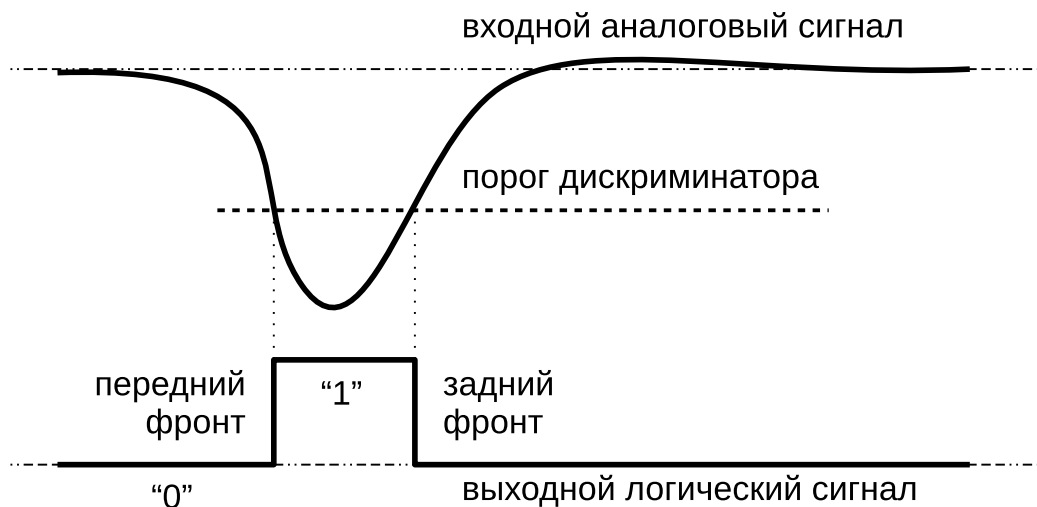


Рис. 5: Условная временная диаграмма функционирования дискриминатора.

199 Многофункциональная плата TRB v3 содержит 5 ППБМ, каждую из
 200 которых можно запрограммировать независимо. Различают 1 централь-
 201 ную ППБМ и 4 периферийные. В нашем случае 4 периферийные ППБМ
 202 запрограммированы как время-цифровые преобразователи (ВЦП), а цен-
 203 тральная ППБМ — как концентратор данных. Такую конфигурацию
 204 платы будем называть TRB v3 (конфигурация 1).

205 Выходные логические LVDS сигналы со всех 16 каналов платы PADIWA
 206 поступает в одну из периферийных ППБМ платы TRB v3, где каждый
 207 входной канал разветвляется на два канала ВЦП — первый чувствителен
 208 к переднему фронту, второй — к заднему. К получившимся 32 каналам в
 209 каждой периферийной ППБМ добавляется канал синхронизации. Таким
 210 образом, на выходе всей платы TRB v3 имеются 132 канала.

211 Общий вид платы TRB v3 показан на рис. 6. Рядом с каждой пери-
 212 ферийной ППБМ имеются специальные порты, к которым можно присо-
 213 единить платы расширения. В частности, существует специальная пла-
 214 та расширения для подключения шлейфов от плат PADIWA. На плате
 215 TRB v3 имеются порты Ethernet, как RG45, так и оптический SFP, ко-
 216 торые используются для двусторонней связи с другими платами TRB v3
 217 или с компьютером.

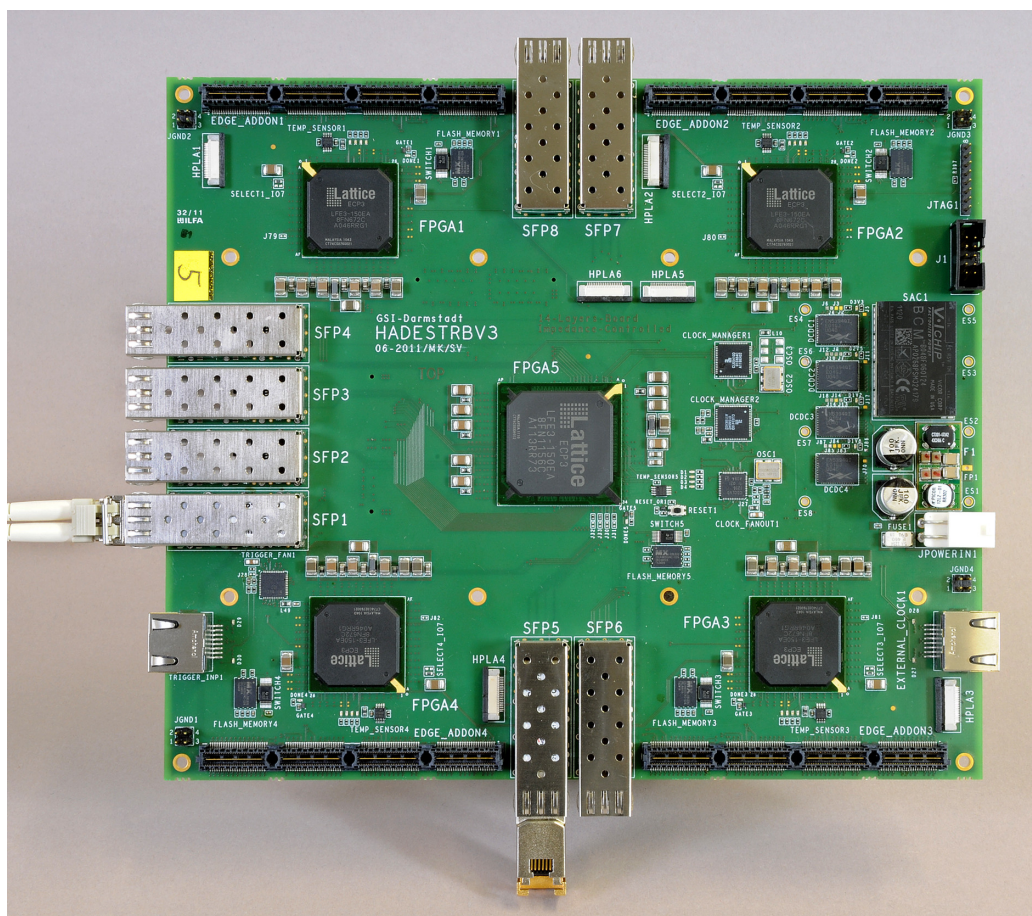


Рис. 6: Общий вид платы TRB v3.

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 5.2. Отметим, что в ППВМ для каждого канала ВЦП имеется специальный счётчик количества зарегистрированных временных отметок, значение которого может быть опрошено независимо от основного потока данных. Этот счётчик может быть использован, например,

232 для получения зависимости скорости счёта от порога дискриминатора с
233 целью определения оптимального порога.

234 Регистрация момента времени в ВЦП осуществляется в два этапа.
235 Грубое значение регистрируется кольцевым счётчиком, который управ-
236 ляется от тактового генератора с периодом 5 нс. Старшие 28 разрядов
237 счетчика называются эпохой (*epoch*), а 11 младших разрядов называются
238 грубым временем (*coarse*) [25]. При регистрации момента времени вход-
239 ного фронта значение времени кодируется двумя сообщениями — эпохой
240 и собственно так называемой временной отметкой (*timestamp*). Чтобы
241 уменьшить поток выходных данных значение эпохи, которое увеличивает-
242 ется каждые 10.24 мкс, передаётся однократно для группы временных
243 отметок, принадлежащих данной эпохе.

244 Для более точного измерения применяется дополнительный 10-битный
245 регистр точного времени (*fine*). В регистр пишется значение счётчика
246 точного времени, реализованного с помощью технологии Tapped delay
247 line (TDL) на 512-ти элементах. Теоретически, если все элементы за-
248 держки идентичны, полный период счётчика грубого времени, равный
249 5 нс, можно разбить на 512 отсчётов. Тогда точность измеренной вре-
250 менной отметки была бы равна 9.9 пс, а полное время рассчитывалось
251 бы как $T = (epoch \cdot 2048 + coarse - (fine/512)) \cdot 5\text{нс}$.

252 Однако, в силу неидеальности компонентов, существует разброс па-
253 раметров элементов в линии задержки, следовательно, требуется калиб-
254 ровка результатов измерения точного времени относительно диапазона
255 значений регистра. Процедура калибровки и анализ ее качества обсуж-
256 даются в секциях 4 и 5.2 соответственно.

257 Находящиеся на TRB v3 ППБМ формируют 4-байтовые сообщения
258 одного из следующих типов: EVENT, SUBEVENT, SUBSUBEVENT HEADER,
259 TDC HEADER, EPOCH COUNTER, TIMESTAMP, DEBUG. Логика фор-
260 мирования сообщений подробно описана в документации [26].

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

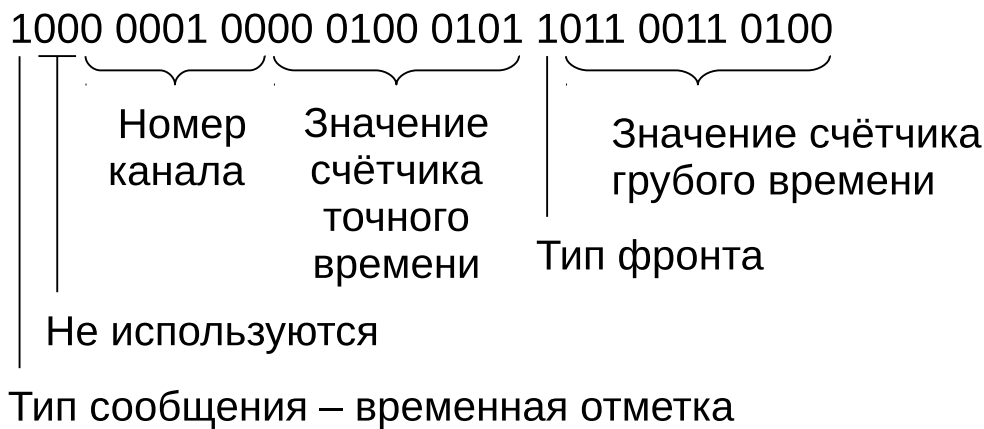


Рис. 7: Пример сырого сообщения типа “временная отметка”.

265 Старший бит (левый) указывает на то, что данное сообщение является
 266 временной отметкой. Следующие два бита не используются. Следую-
 267 щие 7 бит указывают номер канала 4. Затем 10 бит указывают значение
 268 счётчика точного времени 0x45. Далее вспомогательный бит edge, ко-
 269 торый на данный момент не используется. Последние 11 бит кодируют
 270 значение счётчика грубого времени 0x334. Далее отсюда вычисляется
 271 полное значение времени в наносекундах (2681319745539.841309).

272 Необходимо отметить, что каждый канал считывания характеризу-
 273 ется некоторой индивидуальной задержкой между моментом рождения
 274 фотоэлектрона и значением отметки времени переднего фронта. Эта за-
 275 держка определяется временем развития электронной лавины в динод-
 276 ной системе, временем распространения сигнала по проводникам и вре-
 277 менем переключения логических элементов. Процедура коррекции за-
 278 держек и ее особенности описаны далее в секциях 4 и 5.3.

279 2.2 Концентрация и ввод данных в ЭВМ

280 В концепции системы сбора данных эксперимента СВМ предусмотрено
 281 4 функциональных уровня, каждый из которых реализован соответст-
 282 вующими платами. В общем случае к детектору примыкает плата передней
 283 электроники (FEB — front-end board), где осуществляются аналоговые
 284 преобразования и оцифровка сигналов. Далее, данные в виде электриче-
 285 ских цифровых сигналов поступают в плату считывания (ROB — readout
 286 board), где происходит концентрация данных и их пересылка по оптиче-
 287 скому каналу. На следующем уровне расположены платы обработки дан-
 288 ных (DPB — data processing board). DPB уплотняют данные с различных

детекторов за счет 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 со всех детекторов, имеющие временную отметку в заданном интервале. Далее они передаются по меньшему числу оптических каналов с более высокой пропускной способностью [27]. 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 [28], 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 RADIWA-TRB v3 (конфигурация 1). В будущем планируется объединение функционала этих плат на одной плате DIRICH [29]. 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 [30] 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 [31]. Подробности реализации прототипов детектора переходного излучения и время-пролетного детектора содержатся в работах [32] и [33] соответственно. Схема установки представлена на рис. 8.

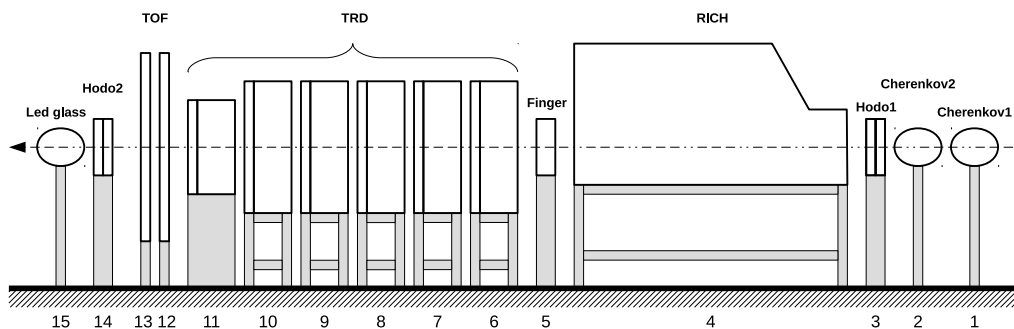


Рис. 8: Схема экспериментальной установки на пучковых тестах. 1,2 — пороговые газовые Черенковские счётчики; 3,14 — станции двухкоординатного годоскопа на основе сцинтилляционного оптического волокна; 4 — прототип детектора Черенковских колец; 5 — пластина из органического сцинтиллятора; 6-11 — станции прототипа детектора переходного излучения; 12-13 — станции прототипа время-пролётного детектора; 15 — электромагнитный калориметр из свинцового стекла.

322 Вывод пучка Т9 ускорителя PS [34] в ЦЕРНе представляет собой сме-
 323 шанный вторичный пучок электронов, пионов и мюонов импульсом, на-
 324 страиваемым в диапазоне 0.5 ГэВ/с — 10 ГэВ/с. В течение пучковых
 325 тестов пучок был настроен на импульс от 1 до 3 ГэВ/с. Длительность
 326 вывода составляла около 2 секунд, причем за это время регистрирова-
 327 лось в среднем 500 электронов.

328 Схема прототипа детектора RICH эксперимента CBM представлена
 329 на рис. 9.

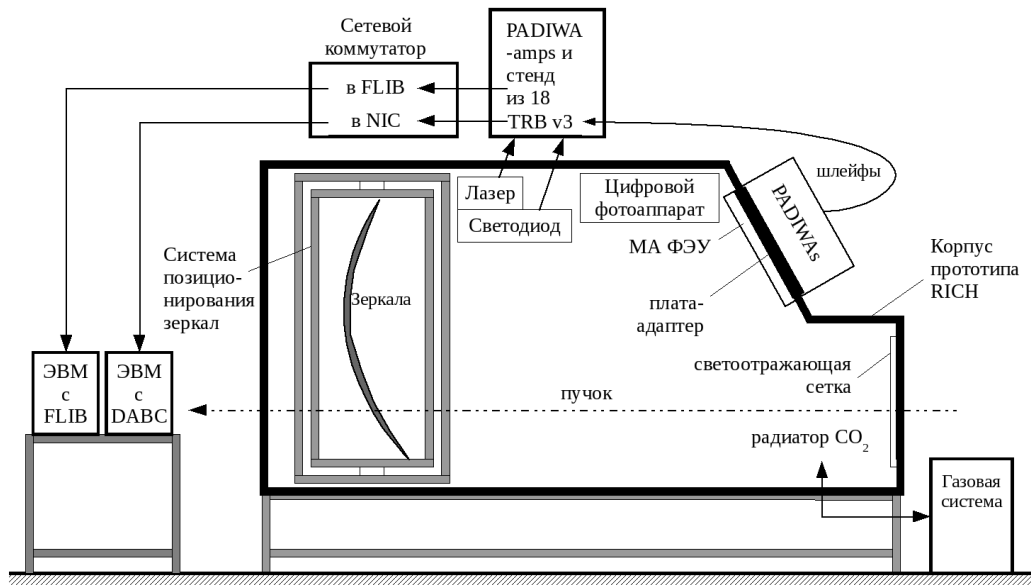


Рис. 9: Схема прототипа детектора RICH.

330 Габариты герметичного алюминиевого корпуса — 1.4 м в ширину,
 331 1.2 м в высоту и 2.4 м вдоль пучка, при этом длина пути частицы в
 332 радиаторе до зеркал — 1.7 м. Радиатор детектора — углекислый газ
 333 под избыточным давлением 2 мбар при комнатной температуре. Пока-
 334 затель преломления газа для ближнего ультрафиолета составляет при
 335 этом $n=1.00045$. Стабилизация избыточного давления газа с точностью
 336 0.1 мбар и его чистота обеспечивались газовой системой, описанной в [35].
 337 Абсолютное давление газовой смеси и температура мониторируются си-
 338 стемой медленного управления. Актуальное значение показателя пре-
 339 ломления автоматически вычисляется и сохраняется в данных.

340 Система позиционирования зеркал представляет собой раму верхне-
 341 го уровня, вставляющуюся в корпус прототипа; вложенную раму, соеди-
 342 нённую с основной рамой через два привода, обеспечивающие вращение
 343 вокруг вертикальной оси; внутреннюю раму, соединённую со вложен-
 344 ной рамой через два привода, обеспечивающие вращение вокруг гори-
 345 зонтальной оси. Сферическое зеркало радиусом кривизны 3 м состоит
 346 из 4 долей 40 см на 40 см. Каждая из долей крепится к внутренней ра-
 347 ме через три моторизированных актуатора. Перечисленные двигатели
 348 позволяют удалённо, после установки детектора на пучке, позициониро-
 349 вать зеркало. Более подробно система позиционирования зеркал описана
 350 в [36].

351 Система диагностики положения зеркал [37] состоит из светоотра-
 352 жающей сетки, занимающей всю переднюю стенку корпуса прототипа,

353 светодиода Roithner UVTOP240 [38] с длиной волны 245 нм и фотоаппа-
354 рата, считываемого удаленно. Сетка сделана из полос ретрорефлектора
355 шириной 10 мм и имеет прямоугольную ячейку шагом 100 мм по горизон-
356 тали и 110 мм по вертикали. Эта система позволяет контролировать точ-
357 ность поворота зеркал и, при наличии удалённого управления зеркала-
358 ми, корректировать его. Также существуют алгоритмы расчёта поправок
359 координат хитов для коррекции ошибок, вызванных неидеальным пози-
360 ционированием зеркал. Идея метода заключается в следующем. Свет от
361 светодиода, отражаясь от сетки и затем от зеркал, попадает в объектив
362 фотоаппарата. На полученном кадре с помощью алгоритмов распозна-
363 вания образов находятся линии сетки. При наличии отклонений зеркал
364 от идеального положения, восстановленный образ сетки будет состоять
365 из набора отдельных отрезков. Анализируя параметры отрезков, мож-
366 но определить значения отклонений отдельных долей зеркала, значения
367 поправок к поворотам отдельных долей зеркала, значения коррекций ко-
368 ординат хитов.

369 Черенковское излучение фокусируется зеркалами на фоточувстви-
370 тельную камеру, содержащую матрицу 4 на 4 МА ФЭУ, шесть из кото-
371 рых — это МА ФЭУ Hamamatsu H12700 и десять — МА ФЭУ Hamamatsu
372 H8500. Данные модели МА ФЭУ имеют сечение 52 мм на 52 мм. Часть
373 фотоумножителей была предварительно покрыта слоем сместителя спек-
374 тра толщиной 150-200 нм. В качестве сместителя спектра использовал-
375 ся паратерфенил ($\approx 40\%$ по массе) в полимерной матрице Paraloid B72.
376 Сместитель спектра наносился методом погружения в раствор компо-
377 нентов покрытия в дихлорметане, см. [39]. В определённый момент во
378 время пучковых тестов сместитель спектра был счищен. Это позволило
379 в дальнейшем оценить влияние сместителя спектра на эффективность
380 регистрации одиночных фотонов и на временной разброс хитов, принад-
381 лежащих одному кольцу. Для мониторинга системы считывания и
382 калибровки относительных задержек между каналами, наряду со све-
383 тодиодом, использовался лазер Alphalas Picopower LD405 [40] с длиной
384 волны 405 нм и длительностью импульса по паспорту менее 40 пс. Ча-
385 стота срабатывания лазера, так же как и светодиода, составляла 100 Гц.
386 Интенсивность лазера была подобрана так, чтобы частота срабатывания
387 каждого пикселя была на уровне 10% от частоты запуска лазера.

388 Считывание с каждого МА ФЭУ осуществлялось модулем, описан-
389 ным в разделе 2.1. Механически все 16 МА ФЭУ монтировались на
390 плату-адаптер, обеспечивающую герметичность корпуса и разводку вы-
391 сокого напряжения. Снаружи к плате-адаптеру монтировались платы
392 предусилителей-дискриминаторов PADIWA, логический сигнал с плат
393 PADIWA передавался по шлейфам, состоящим из витых пар и имеющих

394 длину 2 м, к платам TRB v3 (конфигурации 1), установленным на корпу-
 395 се прототипа. Для всей камеры потребовалось всего 64 платы PADIWA
 396 и 16 плат TRB v3 (конфигурации 1). Данные с 16 плат TRB v3 посту-
 397 пали на ещё одну, 17-ю плату TRB v3 особой конфигурации, которая
 398 также являлась генератором и распределителем триггера считывания
 399 для всех плат TRB v3. Импульсы с генераторов, управляющих лазером
 400 и светодиодом, а также сигналы от детекторов пучка обрабатывались
 401 платами PADIWA-amp (плата, подобная PADIWA, но позволяющая из-
 402 мерять амплитуду сигнала и имеющая в два раза меньшее число ка-
 403 налов [24]) и оцифровывались ВЦП на ещё одной, 18-й плате TRB v3
 404 также нестандартной конфигурации, совмещающей ВЦП и concentra-
 405 тор данных. Параллельно функционировало две системы сбора данных
 406 — одна принимала данные через стандартный сетевой интерфейс (се-
 407 тевой концентратор) с каждой платы TBR v3 по медному носителю, а
 408 другая через FLIB с одной (18-й) платы TBR v3. Схема считывания всей
 409 камеры и детекторов пучка представлена на рис. 10. Отметим, что ЭВМ
 410 с установленной в неё платой FLIB, использовалась для приёма данных
 411 не только от прототипа RICH, но и от других детекторов.

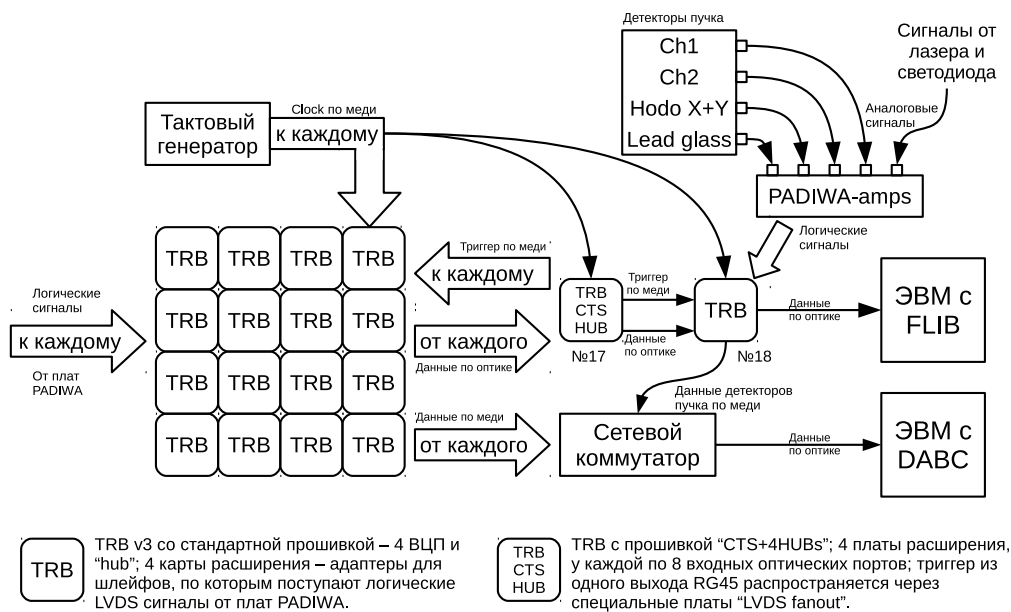


Рис. 10: Схема считывания всей камеры и детекторов пучка.

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 особенности работы одного многоканального модуля системы считывания, описанного в разделе 2.1. 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, подключаемой через печатную плату-адаптер к МА ФЭУ и через контроллер считывания SysCore ROC [41] к ЭВМ. Для считывания одного МА ФЭУ достаточно 64 каналов, то есть половины каналов одной платы передней электроники.

Схема лабораторного стенда приведена на рис. 11.

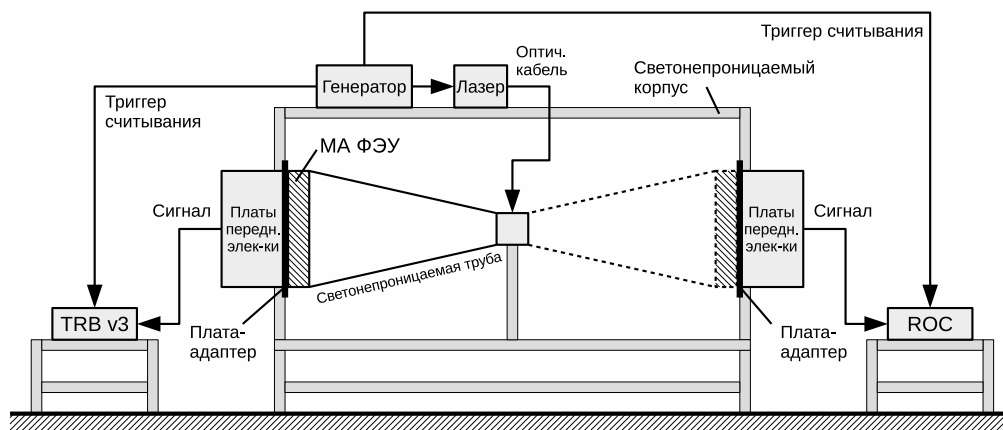


Рис. 11: Схема лабораторной установки.

Стенд собран в светонепроницаемом корпусе размером 80 см на 80 см и длиной 2 м. В качестве источника света использовался такой же лазер Alphalas Picorower LD405 [40] с поставляемым с ним генератором Alphalas PLDD-250 [40], как и в пучковых тестах. Свет от лазера по-

ступал 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 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 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

478 сбора данных осуществлялся по стандартному Ethernet кабелю в сетевой
479 интерфейс ЭВМ.

480 4 Программное обеспечение

481 Программное обеспечение системы считывания и сбора данных прото-
482 типа CBM RICH представляет собой набор модулей приема, первичной
483 обработки и сохранения данных, реализованных в рамках программно-
484 го каркаса CbmRoot [42]. CbmRoot вместе с FLESnet [43] образуют ин-
485фраструктуру, позволяющую выполнять приём данных, моделирование,
486 реконструкцию и анализ данных эксперимента CBM.

487 Соответствующим образом сконфигурированное приложение, напи-
488 санное в рамках CbmRoot, может быть запущено на ЭВМ, как частный
489 случай на распределённой вычислительной системе. Все этапы от считы-
490 вания до анализа могут быть выполнены “на лету”, без записи промежу-
491 точных результатов на диск. В ходе описываемых в данной статье тестов
492 использовалась последовательность обработки данных, изображённая на
493 рис. 12. Программная реализация, функционал и взаимодействие отдель-
494 ных блоков описаны ниже.

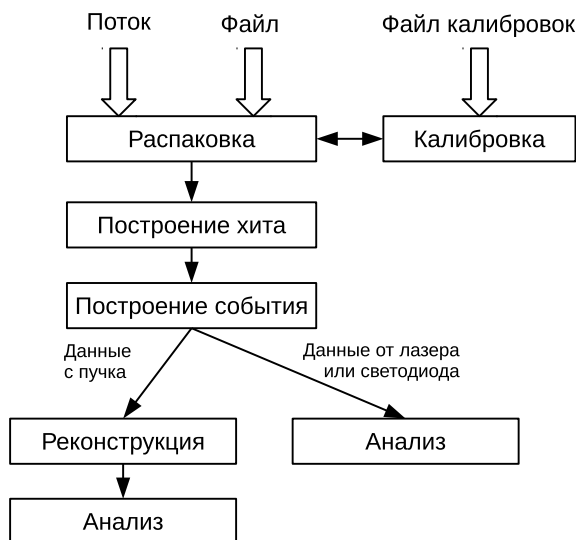


Рис. 12: Диаграмма взаимодействия программных модулей.

4.1 Распаковка

Распаковка — это первый этап обработки данных, поступающих с электроники. В CbmRoot есть возможность обрабатывать данные как поступающие напрямую с детекторов, так и сохранённые в файле (с помощью DABC в формате HLD — HADES list mode data format [44]). 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* 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 [45], 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,

531 с применением параллельных расчётов. Второй макрос стоит таблицу
532 коррекций по данным параметрам.

533 Алгоритм коррекции задержек состоит в следующем. Введём сплош-
534 ную нумерацию пикселей по всей фоточувствительной камере, состоя-
535 щей из множества МА ФЭУ. Полное число пикселей $M = 64 \cdot N$, где
536 N — число МА ФЭУ. Для анализа отбираются все передние фронты,
537 имеющие временную отметку, попадающую в заданное временное окно
538 относительно триггера срабатывания лазера. Ширина и положение ок-
539 на зависят от экспериментальной установки (например, разницы длин
540 кабелей, точности регистрации триггера) и характеристик лазера и под-
541 бираются в соответствии с распределением, построенным по конкретно-
542 му набору данных. Обычно ширина составляет около 100 нс, а левая
543 граница сдвинута от триггера на 20 нс. По всему массиву отобранных
544 данных строятся гистограммы разности временных отметок i -го и j -го
545 каналов, где i и j пробегают значения от 1 до M . В качестве меры раз-
546 ности задержек между каналами можно взять по выбору пользователя
547 либо среднее значение распределения, либо наиболее вероятное. Полу-
548 ченные значения заполняют кососимметричную матрицу A размерности
549 $M \cdot M$. В дальнейшем пользователь может задать опорный канал, от-
550 носительно которого будет создана таблица коррекций, являющаяся, по
551 сути, столбцом матрицы A .

552 4.4 Построение хита

553 Сигнал от каждого зарегистрированного фотона, называемый хитом, со-
554 стоит из двух сообщений, содержащих временные отметки переднего и
555 заднего фронтов. Т.к. разные каналы имеют разные задержки и вероят-
556 ность регистрации отдельных фронтов не равна 100%, необходимо было
557 в анализе данных реализовать алгоритм подбора пар фронтов. Данная
558 процедура реализована в task-классе *CbmTrbEdgeMatcher*, который сто-
559 ит в конвейере после распаковки и фактически выполняется после при-
560 менения всех калибровок.

561 Для каждого внешнего канала был реализован буфер сообщений, ко-
562 торый наполнялся передними фронтами по мере их поступления. Далее,
563 как только приходил задний фронт, из буфера выбирался наиболее близ-
564 кий по временной отметке передний фронт внутри заданного допустимо-
565 го временного окна. На рис. 13 приведён пример буфера передних фрон-
566 тов для заданной пары внутренних каналов в момент прихода одного
567 заднего фронта. Время над порогом (ToT) — параметр хита, говорящий
568 об амплитуде сигнала. Он вычисляется как разница временных отметок
569 заднего и переднего фронтов в подобранной паре. Допускаются как по-

570 ложительные, так и отрицательные значения ToT, однако в обе стороны
571 накладывается ограничение.

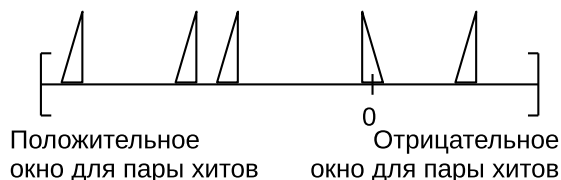


Рис. 13: Постановка задачи поиска пар фронтов для одного входного канала.

572 Т.к. не всегда присутствует соответствующий парный (передний ли-
573 бо задний) фронт, буфер постепенно наполняется и его необходимо очи-
574 щать, чтобы избежать переполнения. Если для поступившего заднего
575 фронта нет кандидата переднего фронта в буфере это означает, что
576 передний фронт не был зарегистрирован. В таком случае этот задний
577 фронт отбрасывается. Количество найденных фронтов сильно зави-
578 сит от нагруженности входного канала ВЦП, которая в свою очередь
579 зависит от порога дискриминатора. При низком пороге регистрирует-
580 ся высокочастотный шум электроники, что приводит к формированию
581 огромного потока выходных сообщений, которые не могут быть переданы
582 из-за ограниченной пропускной способности выходного тракта системы
583 считывания.

584 Предусмотрена возможность допускать одиночные передние фронты
585 в качестве хитов, однако практика показала, что в этом нет смысла,
586 т.к. в нормальном режиме найденные пары в основном обусловлены
587 ошибками ВПЦ и доля таких сообщений пренебрежимо мала — менее
588 $2 \cdot 10^{-4}$.

589 4.5 Построение события

590 В силу того, что электроника бестриггерная и приём данных осуществ-
591 ляется порциями, называемыми DAQ-событиями, никак не связанными с
592 реальными событиями, для формирования корректной входной инфор-
593 мации для реконструкции и дальнейшего анализа данных необходимо
594 выполнять процедуру построения события.

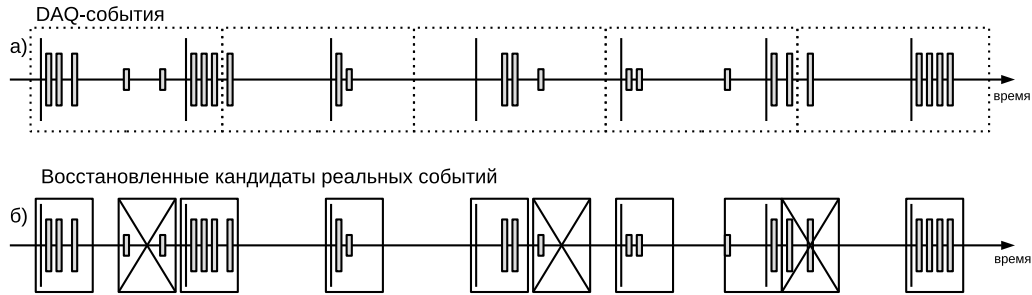


Рис. 14: Идея алгоритма построения события: (а) поступающие данные, сгруппированные в DAQ-события; (б) восстановленные кандидаты реальных событий; перечёркнуты отбрасываемые кандидаты, не содержащие триггер. Тонкие длинные линии — триггерные сигналы, прямоугольники средней длины — сигналы, связанные со светом, короткие прямоугольники — шумовые сигналы.

595 Рассмотрим некоторый интервал времени, приведённый на рис. 14, в
596 течение которого поступают:

- 597 • Триггерные сигналы — импульсы с генератора, питающего лазер,
598 либо сигналы с детекторов пучка;
- 599 • Сигналы, скоррелированные с импульсами с генератора или детек-
600 торами пучка, т.е. связанные со светом;
- 601 • Шумовые сигналы, распределённые равномерно во времени.

602 Очевидно, что реальное событие может попасть на границу DAQ-
603 событий, следовательно, необходимо при построении реальных событий
604 смотреть на несколько DAQ-событий. Также в силу особенностей элект-
605 троники не гарантируется, что входная информация поступает упоря-
606 доченной во времени. Поэтому периодически случается, что хиты ре-
607 ального события, пришедшего по большей части в i -м DAQ-событии,
608 обнаруживаются в $i + 1$, реже $i + 2$, и даже $i + 3$ и последующих DAQ-
609 событиях. Следовательно, требуется сначала распознать кластеры хитов
610 в достаточно широком интервале времени — потенциальные события, а
611 затем по наличию заданного типа триггера выбрать реальные события,
612 содержащие либо черенковские кольца, либо вспышки лазера.

613 Реализован данный алгоритм с помощью буфера хитов. По мере рас-
614 паковки входных сообщений, построенные хиты заносятся в буфер. На
615 каждой итерации осуществляется распознавание кандидатов событий в
616 буфере и определяется их количество N . Когда N достигает заданного

617 минимального уровня, на каждой итерации, помимо приёма одного вход-
 618 ного DAQ-события, осуществляется выброс выходного кандидата реаль-
 619 ного события. Так как одно DAQ-событие может содержать несколько
 620 кандидатов, буфер будет расти. Для того, чтобы избежать переполне-
 621 ния, устанавливается верхний предел. Когда N достигает этого предела,
 622 осуществляется сброс событий на выход по принципу FIFO до заданного
 623 минимального уровня. На рис. 15 приведён отрывок диаграммы напол-
 624 ненности буфера по мере обработки входного потока. В данном примере
 625 были установлены следующие параметры: минимальное кол-во событий
 626 в буфере 200, максимальное — 500. Отметим, что кол-во событий в бу-
 627 фере может превышать заданное максимальное значение, если в одном
 628 DAQ-событии содержится более одного реального события. По оконча-
 629 нии входного потока содержимое буфера обрабатывается полностью и
 630 все распознанные события подаются на выход.

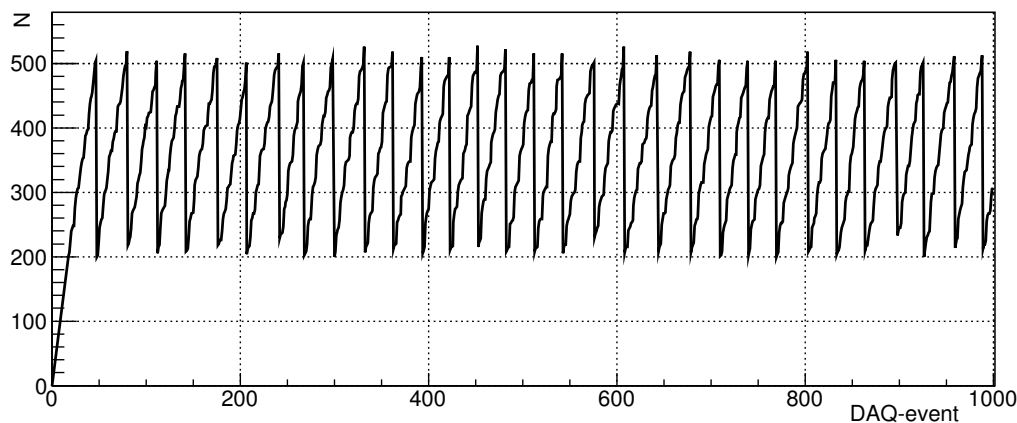


Рис. 15: Диаграмма наполненности буфера найденных событий в зави-
 симости от номера обработанного входного DAQ-события.

631 4.6 Реконструкция

632 Реконструкция в CBM RICH означает поиск колец по хитам в плоскости
 633 реконструкции. В контексте реконструкции можно рассматривать хит
 634 как загоревшийся пиксель МА ФЭУ. Конус черенковских фотонов, по-
 635 сле фокусировки зеркалами, пересекает поверхность фоточувствитель-
 636 ной камеры, которая в общем случае может состоять из нескольких
 637 плоскостей. Первый этап реконструкции — перевод хитов из плоско-
 638 стей камеры в плоскость реконструкции. Затем выполняется поиск ко-
 639 лец по хитам. В CbmRoot есть реализации нескольких алгоритмов по-

640 иска колец. Наибольший практический интерес представляет алгоритм
641 распознавания колец черенковского излучения, основанный на проеоб-
642 разовании Хафа, описанный в работах [46, 47]. Реализация данного ал-
643 горитма была специально адаптирована для данных пучковых тестов,
644 в которых ожидается одно кольцо на событие. Данный алгоритм реа-
645 лизован в классе *CbmRichProtRingFinderHoughImpl*, унаследованном от
646 *CbmRichProtRingFinderHough* и далее от *CbmRichRingFinder*. После это-
647 го определяются параметры кольца и далее реконструкция с приме-
648 нением информации с других детекторов.

649 5 Результаты

650 5.1 Испытание системы сбора данных с использова- 651 нием FLIB

652 Значительная часть данных была набрана параллельно двумя система-
653 ми сбора данных. Было проведено побайтное сравнение результатов рас-
654 паковки обоих потоков. На массиве составляющем примерно 10^7 сооб-
655 щений расхождений не выявлено. Таким образом, продемонстрирована
656 работоспособность концепции формирования временных интервалов и
657 ввода данных в компьютер с использованием FLIB. Приведённые в сле-
658 дующих разделах результаты получены на основе данных, принятых че-
659 рез стандартный сетевой интерфейс с применением DAQ ПО на основе
660 DABC [30].

661 5.2 Калибровка точного времени (Fine time calibration)

662 Пример таблицы калибровки точного времени, полученной на данных
663 лабораторных тестов, представлен в виде графика на рис. 16. По оси
664 абсцисс откладывается значение счётчика точного времени, а по оси ор-
665 динат — значение точного времени в наносекундах. Вид графика не за-
666 висит от того, по каким данным он был построен, так как он определяет-
667 ся архитектурой время-цифрового преобразователя. Обратим внимание,
668 что в показанном примере в диапазоне значений десятибитного счетчика
669 точного времени интервалу равному периоду грубого счетчика, т.е. 5 нс,
670 соответствуют отсчеты от 30 до 520. Точные границы интервала опреде-
671 ляются значениями задержек на элементах цифровой линии задержки.
672 Эти величины индивидуальны и зависят от флуктуаций технологическо-
673 го процесса.

674 С целью понимания особенностей работы счётчиков точного времени,
675 каждая таблица калибровки точного времени была аппроксимирована
676 кусочно-линейной функцией. На рис. 17 показан пример разности значе-
677 ний функции калибровки точного времени и линейной функции. Видно,
678 что отклонения не превышают 60 пс.

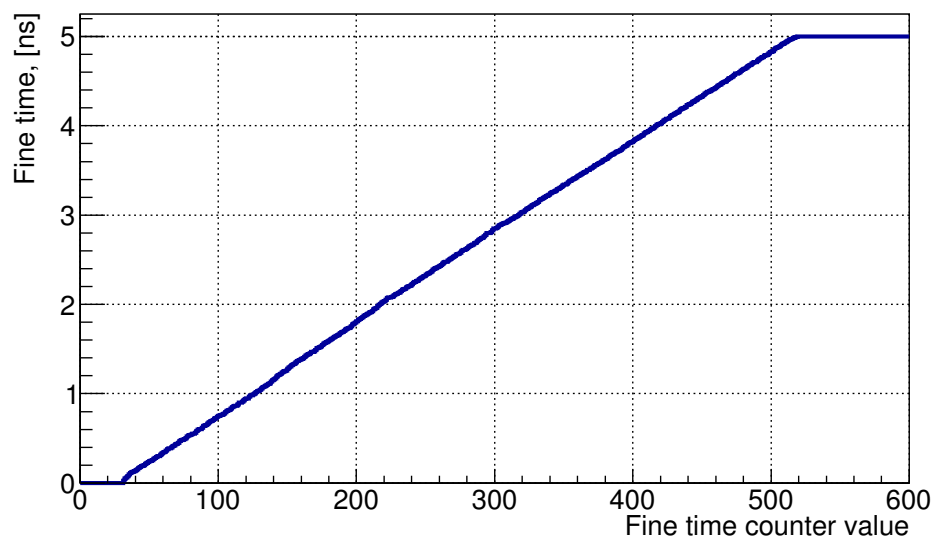


Рис. 16: Пример калибровочной кривой.

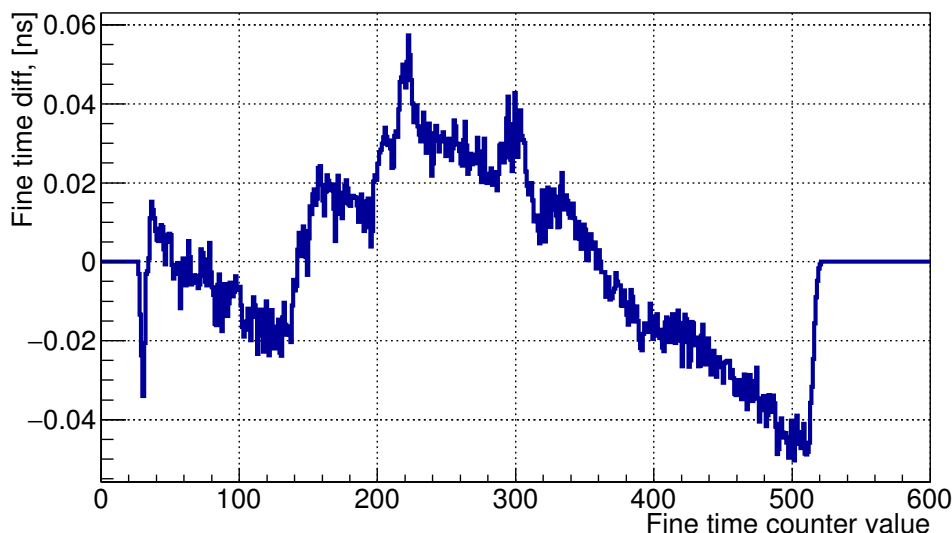


Рис. 17: Отклонение калибровочной кривой от линейной функции.

Каждая аппроксимирующая кусочно-линейная функция состоит из трёх отрезков и может быть однозначно описана двумя координатами изломов, которые приблизительно соответствуют двум крайним рабочим значениям счётчика точного времени. Параметры линейных функций для всех каналов отображены на двумерной диаграмме на рис. 18. Видно, что хотя параметры и локализованы в двух областях, распределение достаточно компактное.

Для оценки влияния калибровки на точность регистрации временных отметок можно исследовать как одновременные фронты на разных каналах ВЦП, так и длительности прямоугольных импульсов во входных каналах, полученных с помощью высокоточного генератора прямоугольных импульсов. В работе [48] показано, что предельное временное разрешение в обоих случаях одинаково. Ниже мы используем второй подход.

В процедуре калибровки для каждого канала была выполнена замена точной калибровочной таблицы сначала индивидуальной линейной функцией данного канала, а потом общей функцией, усредненной по всем каналам (параметры этой функции показаны на рис. 18 сплошным квадратом). Полученные распределения измеренной ширины импульса в исследуемом входном канале показаны на рис. 19. Там же показаны результаты без калибровки.

Видно, что точная калибровка точного времени необходима для достижения предельного разрешения ВЦП. Ширина распределения разностей временных отметок в двух независимо флуктуирующих каналах

ВЦП составляет 30 пс (FWHM), что соответствует временному разрешению 21 пс. Использование индивидуальной линейной функции приводит к увеличению ширины до 70 пс, а усреднённой — до 90 пс в наиболее неблагоприятных каналах. Отметим, что применение усредненной калибровки устраняет двухпиковую форму, характерную для распределения без калибровки, но в некоторых случаях приводит при этом к увеличению ширины.

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 заметного снижения точности.

Использование усреднённой калибровки может быть особенно полезно при измерении разности временных отметок, полученных ВЦП различного типа, поскольку тогда, в отличие от нашего случая, не происходит сокращения начального сдвига кусочно-линейной функции относительно нуля регистра точного времени.

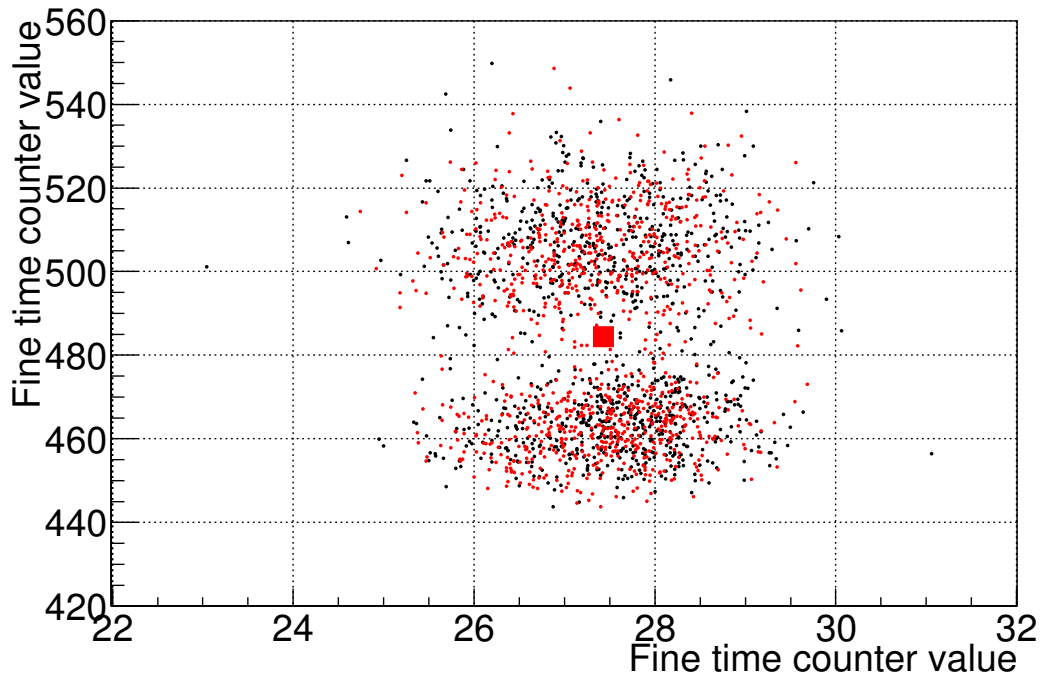


Рис. 18: Распределение координат точек излома аппроксимирующих кусочно-линейных функций. Квадратом отмечено среднее значение, используемое для глобальной псевдокалибровки.

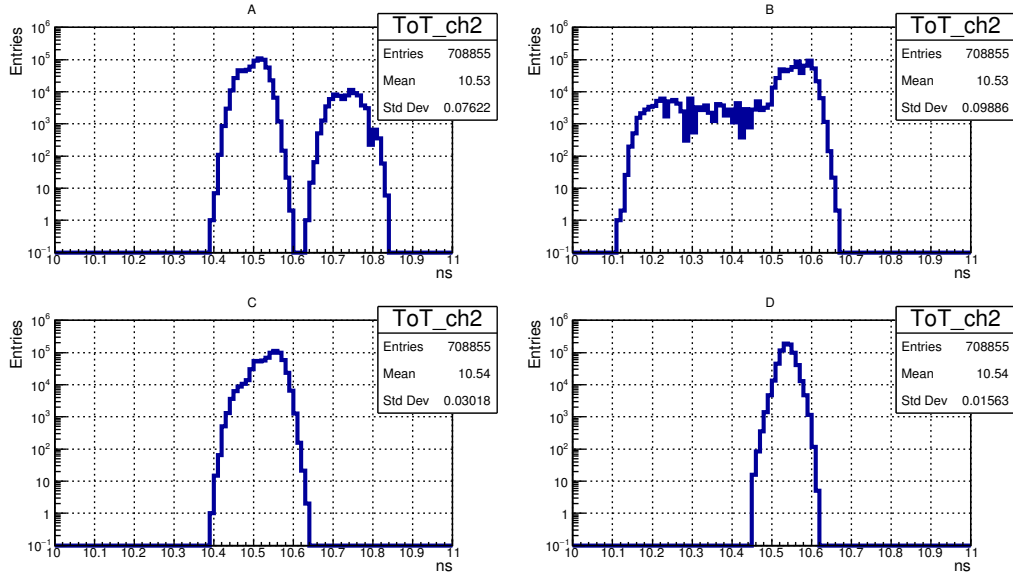


Рис. 19: Результаты измерения ширины импульса от генератора в случае: (А) без калибровки точного времени; (В) с применением усреднённой калибровочной функции; (С) с применением индивидуальной линейной калибровочной функции; (D) с применением полноценной калибровочной функции.

Приведённые выше таблицы 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 рис. 20 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.

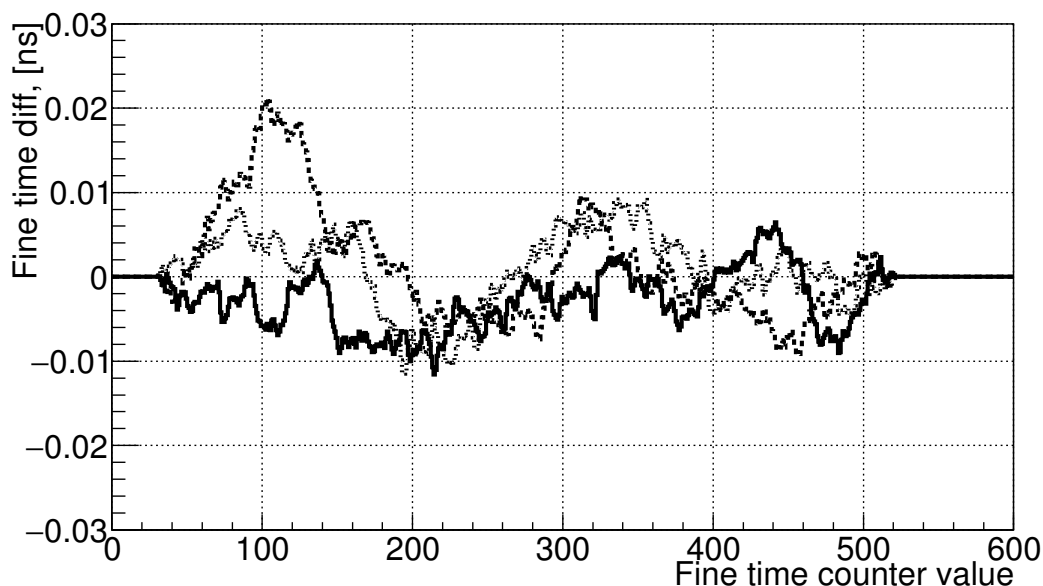


Рис. 20: Стабильность калибровок.

731 5.3 Определение коррекций задержек между кана- 732 лами

733 Типичная гистограмма разности временных отметок передних фронтов,
734 соответствующих фотонам из одной вспышки лазера, зарегистрирован-
735 ных в заданной паре каналов, показана на рис. 21. Такие гистограммы
736 позволяют определить положение пика и, соответственно, ввести коррек-
737 цию задержки. Отметим, что наблюдается дрейф порядка 0.5 нс значе-
738 ний задержек, полученных таким образом, что даёт заметный вклад во
739 временное разрешение системы считывания (см. секцию 5.4).

740 Наблюдается также аддитивность задержек, т.е. задержка в i -м ка-
741 нале относительно опорного может быть получена с точностью не хуже
742 400 пс как сумма задержки в j -м канале относительно опорного и задерж-
743 ки в i -м канала относительно j -го. Для некоторых пар каналов вид ги-
744 стограммы отличается от показанной на рис. 21. См., например, рис. 22.
745 Подобное распределение можно получить, если один из двух каналов
746 является дефектным в том смысле, что к фронту логического сигнала
747 подмешивается возбужденный или наведённый колебательный сигнал.
748 Такая гипотеза подтверждается тем фактом, что форма гистограммы
749 зависит от порога дискриминатора на плате PADIWA. При построении
750 аналогичной гистограммы для пары дефектных каналов наблюдается до
751 5 пиков. Дальнейшее исследование проводилось с исключением дефект-

752 ных каналов. Доля дефектных каналов составляет около 10% от полного
 753 числа каналов. При разработке следующей версии передней электроники
 754 для CBM RICH особое внимание будет уделено электромагнитной чистоте
 755 каналов, а гистограммы, подобные обсуждаемым в данном разделе,
 756 будут использоваться в качестве диагностического инструмента.

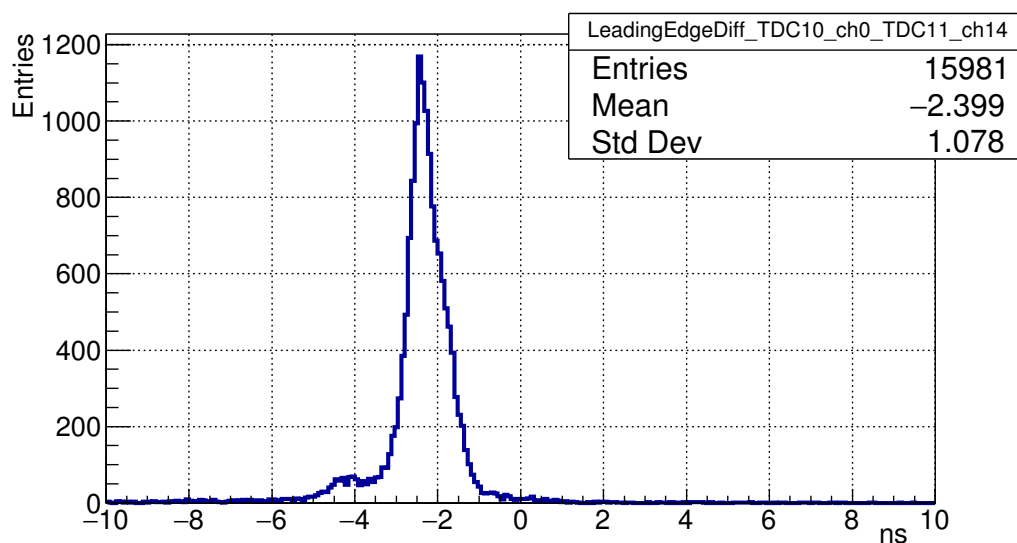


Рис. 21: Распределение разности временных отметок передних фронтов, соответствующих фотонам из одной вспышки лазера, зарегистрированных в заданной паре каналов.

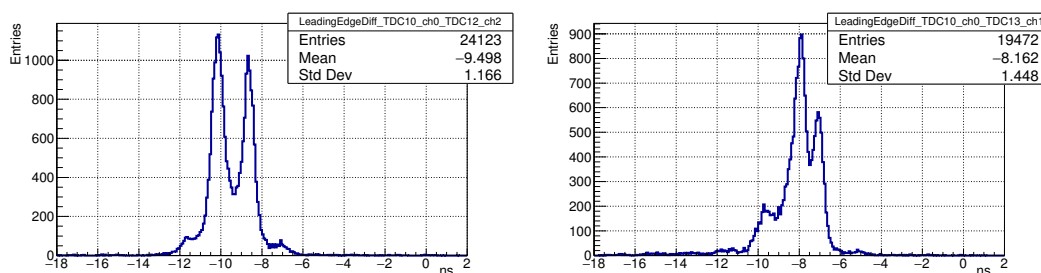


Рис. 22: Распределение разности временных отметок передних фронтов, соответствующих фотонам из одной вспышки лазера, зарегистрированных в заданной паре каналов, при условии, что один из каналов — дефектный.

757 5.4 Временное разрешение

758 В проведённых пучковых тестах имеют место два типа событий, в ко-
759 торых регистрируются несколько практически одновременно испущен-
760 ных фотонов. Первый тип — это вспышка лазера, длительность которой
761 ≈ 40 пс, т.е. на порядок меньше разброса времени прохождения сигнала
762 через МА ФЭУ. Вторым типом — черенковские кольца. Разброс време-
763 ни прихода фотонов на МА ФЭУ может достигать 100 пс для колец и
764 70 пс для вспышек лазера, что определяется в первую очередь наклоном
765 плоскости в которой расположены фотокатоды. Анализ таких событий
766 позволяет охарактеризовать временное разрешение всей системы счи-
767 тывания, начиная от окна МА ФЭУ и кончая формированием отметок
768 времени. Временное разрешение одного канала определяется разбросом
769 зарегистрированных временных отметок относительно времени прилёта
770 фотона при многократных измерениях. Поскольку точное время прилёта
771 фотона измерить нельзя, нам приходится исследовать разброс разностей
772 временных отметок в паре каналов при регистрации одновременно при-
773 шедших фотонов. Временные отметки в каждом из каналов подвержены
774 независимым флуктуациям по одинаковому закону, следовательно, из-
775 меренная ширина распределения будет в $\sqrt{2}$ раз больше, чем временное
776 разрешение каждого канала. После применения коррекций задержек и
777 калибровки точного времени в двух каналах, ни один из которых не яв-
778 ляется дефектным, получается распределение аналогичное показанному
779 на рис. 21, отличающееся лишь тем, что положение центра находится в
780 нуле.

781 Полная ширина на полувысоте (FWHM) этого распределения состав-
782 ляет 750 пс, что соответствует временному разрешению 530 пс. Данное
783 значение превосходит разброс времён прохождения сигнала в МА ФЭУ
784 примерно в 2 раза. Причина расхождения объясняется двумя сравни-
785 мыми вкладками: дрейфом задержек в каналах и отсутствием коррекции
786 момента пересечения порога в зависимости от амплитуды сигнала. Для
787 реализации такой коррекции необходимо надёжное измерение времени
788 над порогом, что в нашем случае невозможно, см. секцию 5.6.

789 Для того чтобы охарактеризовать временное разрешение системы в
790 целом, помимо анализа пар каналов исследовались физически одновре-
791 менные сигналы на следующих совокупностях каналов: (1) шестнадцать
792 каналов, считываемых одной платой PADIWA, (2) 64 канала, принад-
793 лежащих одному МА ФЭУ, (3) 256 каналов, принадлежащих четырём
794 соседним МА ФЭУ. В каждом случае после коррекции задержек и ка-
795 либровки точного времени, отбирались все хиты, принадлежащие одному
796 событию, и гистограммировались разности временных отметок по всем

797 возможным парам каналов. Результаты для вспышек лазера показаны
 798 на рис. 23. В таблице 2 показано, как эволюционирует среднеквадратич-
 799 ное отклонение и FWHM в зависимости от числа каналов. Отметим, что
 800 для событий от лазера среднеквадратичное отклонение меняется слабо, а
 801 FWHM возрастает с увеличением числа каналов, одновременно с тем, что
 802 распределение последовательно принимает форму, более близкую к рас-
 803 пределению Гаусса. Такое поведение можно интерпретировать как раз-
 804 мывание индивидуальных особенностей каналов в процессе усреднения.
 805 Для хитов, принадлежащих одному черенковскому кольцу (см. рис. 24),
 806 и FWHM и RMS возрастают с увеличением числа каналов. Вероятно,
 807 отличия связаны с тем, что распределения фотонов во времени для че-
 808 ренковского кольца и вспышки лазера отличаются друг от друга.

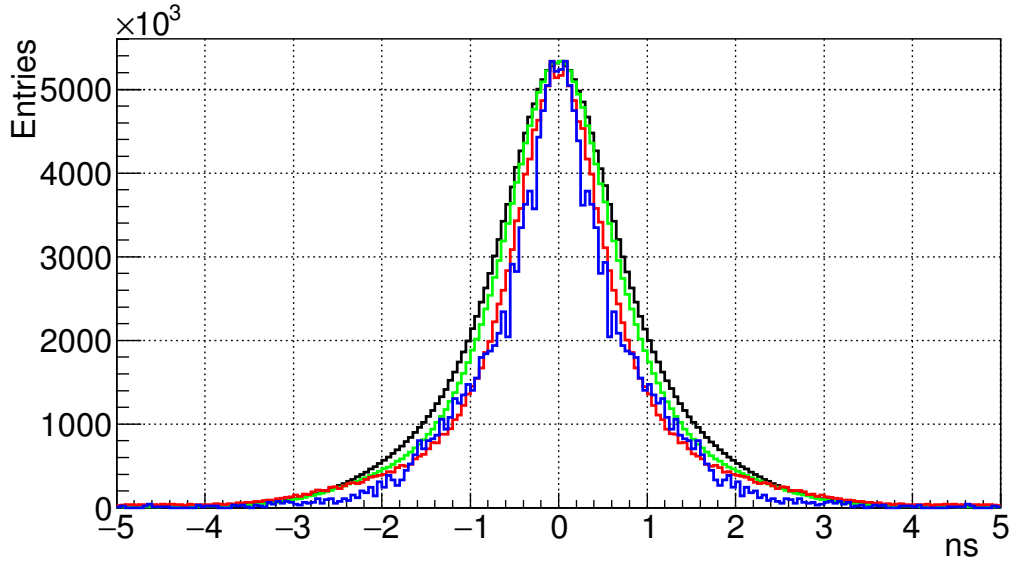


Рис. 23: Распределения для четырёх различных наборов каналов для
 событий от лазера.

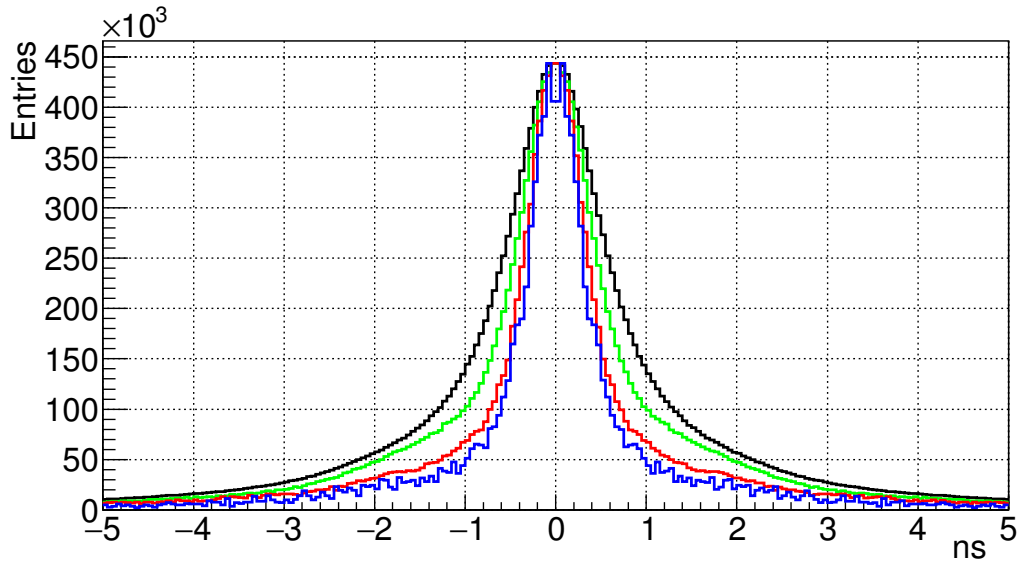


Рис. 24: Распределения для четырёх различных наборов каналов для событий от черенковских колец.

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, лазер, нс	1.1	1.2	1.5	1.7
FWHM, кольца, нс	0.6	0.8	1.0	1.3
RMS, лазер, нс	0.913	1.093	0.997	1.034
RMS, кольца, нс	1.238	1.379	1.430	1.487

809 5.5 Исследование профиля высвечивания сместителя 810 для спектра

811 Анализ распределения во времени хитов, принадлежащих одному черен-
812 ковскому кольцу, позволяет исследовать временные свойства сместителя
813 спектра. Анализу подлежит распределение разностей временных отме-
814 ток хитов каждого кольца относительно первого по времени хита в дан-
815 ном кольце. В зависимости от длины волны черенковский фотон может
816 с той или иной вероятностью либо поглотиться сместителем спектра и
817 вызвать его свечение, либо пройти сквозь слой сместителя спектра без

818 взаимодействия и попасть фотокатод. В результате, даже при наличии
819 слоя сместителя спектра, часть хитов подчиняется временной зависимо-
820 сти характерной для чистого ФЭУ. Таким образом, для получения кри-
821 вой высвечивания сместителя спектра необходимо из распределения раз-
822 ностей времен, полученного со сместителем спектра, вычесть должным
823 образом отнормированное в максимуме распределение разностей времён,
824 полученное с чистым ФЭУ.

825 Нормированные в максимуме кривые высвечивания со сместителем
826 спектра и без него показаны на рис. 25, а разность этих распределений —
827 на рис. 26. Видно, что за исключением небольшой выпуклости в области
828 7 нс, связанной с особенностями работы данного семейства МА ФЭУ,
829 кривая выглядит похоже на сумму нескольких экспонент.

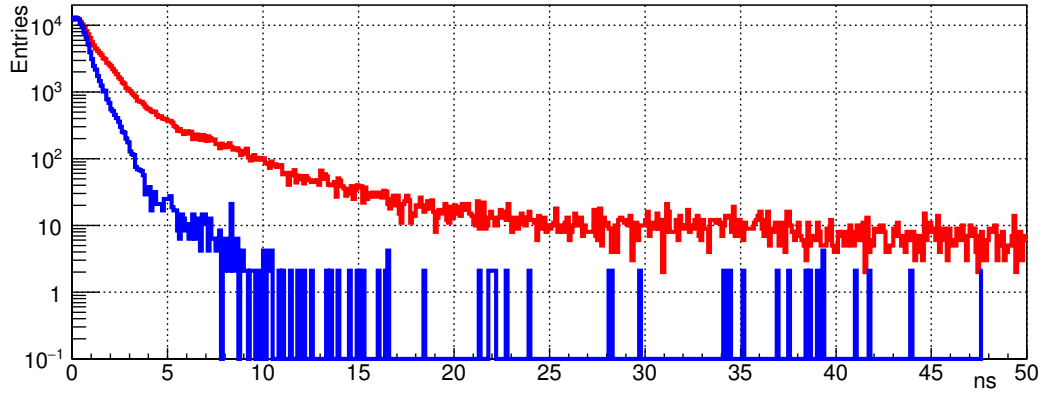


Рис. 25: Измеренные распределения, соответствующие кривым высвечи-
вания со сместителем спектра (красный, выше) и без него (синий, ниже).

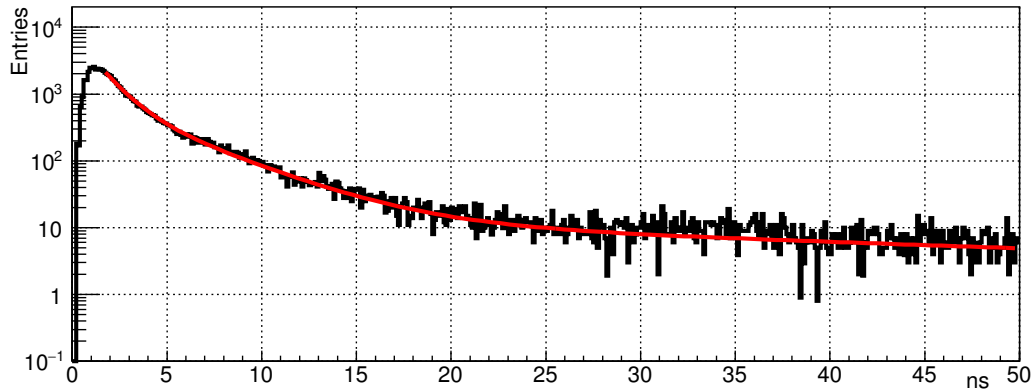


Рис. 26: Разница распределений со сместителем спектра и без него и
кривая — результат фитирования распределения суммой трёх экспонент.

830 Указанная выпуклость не позволяет надёжно извлечь характерные
831 времена высвечивания. Интересно, тем не менее, сравнить полученную
832 кривую с результатами флюориметрических исследований. Стеклянная
833 пластина со слоем сместителя спектра, нанесённым точно таким же мето-
834 дом, как и на МА ФЭУ, была исследована с помощью классического ме-
835 тода счёта фотонов при возбуждении светом с длиной волны 280 нм. Бы-
836 ли получены ([49]) значения времён высвечивания 1.4 нс, 3.8 нс, и 45 нс и
837 соответствующие относительные интенсивности компонент 1.8996, 1.0000,
838 и 0.8364.

839 Подгонка кривой с рис. 26 суммой трех экспонент с соответствующи-
840 ми временами показывает разумное согласие для времен превышаю-
841 щих 5 нс. Начальный участок лучше подгоняется с характерным време-
842 нем $\tau_1=1.1$ нс. Сравнение интенсивностей наиболее быстрой компонен-
843 ты с флюориметрическими измерениями затруднено из-за начального
844 неэкспоненциального участка, а относительный вклад наиболее медлен-
845 ной компоненты в полную интенсивность в нашем случае оказывается в
846 3.8 раз ниже. Это можно объяснить влиянием способа возбуждения на
847 заселение разных типов центров высвечивания.

848 В пределе большого числа хитов в кольце использованный нами ме-
849 тод переходит в стандартный метод исследования флюоресценции путем
850 счёта единичных фотонов [50]. Однако в нашем случае существует неко-
851 торая случайная задержка между моментом попадания черенковского
852 фотона на поверхность МА ФЭУ и временем прихода первого хита. С
853 целью выявления влияния метода на измеренные времена высвечивания
854 было проведено Монте Карло моделирование.

855 В модели были заложены разброс времени прохода лавины в МА ФЭУ
856 300 пс (RMS), три экспоненциальные компоненты с характерными вре-
857 менами 1.4 нс, 3.8 нс, и 45 нс и относительными интенсивностями 2.17,
858 1.00, 0.22 и средним числом хитов в кольце равным 18. Получившееся
859 распределение времён относительно первого хита в кольце было по-
860 догнано тремя экспонентами со свободными параметрами. Если начать
861 фитирование получившейся зависимости, отступив 4 нс от начала вы-
862 свечивания, величины постоянных распада экспонент воспроизводятся с
863 точностью лучше 5%, а соответствующие относительные интенсивности
864 несколько искажаются, что естественно, в силу существования началь-
865 ного неэкспоненциального участка кривой. Таким образом, подтверждена
866 корректность применённого метода определения времён высвечивания.

867 Практическая ценность проведенного исследования состоит в том,
868 что может быть оптимизирована длительность окна, в пределах которо-
869 го хиты принимаются одновременными и могут быть приписаны одному
870 событию. Для этого необходимо найти баланс между числом дополни-

871 тельных хитов, полученных благодаря сместителю спектра и вероятно-
872 стью наложения сигналов друг на друга или подхвата в кольцо темно-
873 вого хита. Например, прирост хитов в 19% может быть достигнут при
874 длительности окна 15 нс.

875 5.6 Время над порогом

876 Время над порогом (ToT — time over threshold) — это параметр найден-
877 ного хита, содержащий в себе, при нормальной работе, информацию об
878 амплитуде зарегистрированного сигнала. В системе считывания и сбо-
879 ра данных CBM RICH ToT может быть использовано для улучшения
880 временного разрешения путём коррекции времени пересечения порога с
881 учетом амплитуды (walk correction), а также для повышения качества
882 отделения однофотоэлектронного сигнала от шума. На рис. 28 показано
883 типичное распределение ToT, измеренное с помощью лазера в лаборатор-
884 ных условиях. Вопреки ожиданиям, это распределение имеет несколько
885 пиков. Такая структура, согласно [51], может быть объяснена наличи-
886 ем периодической наводки как на входе дискриминатора, так и между
887 выходом дискриминатора и входом ВЦП. На рис. 27 показан экран циф-
888 рового осциллографа в режиме накопления сигналов, полученных путем
889 подключения активного зонда к выходу PADIWA. Видно, что сгущение
890 сигналов соответствует наблюдаемым пикам в распределении ToT; имеет
891 место проблема недостаточности амплитуды одноэлектронного сигнала
892 для устойчивой генерации логической единицы; имеется периодическая
893 наводка на выходе дискриминатора, но ее недостаточно для объясне-
894 ния наблюдаемой картины; преобладание определенных длительностей
895 логических сигналов позволяет предположить наличие периодической
896 структуры во входном сигнале. Все это говорит о необходимости под-
897 стройки аналоговой части для формирования на входе PADIWA более
898 чистого сигнала большей амплитуды и о защите соединения между дис-
899 криминатором и ВЦП от наводок. Подобные изменения будут, с учетом
900 результатов данной работы, реализованы в следующем прототипе платы
901 передней электроники, называемом DIRICH [29].

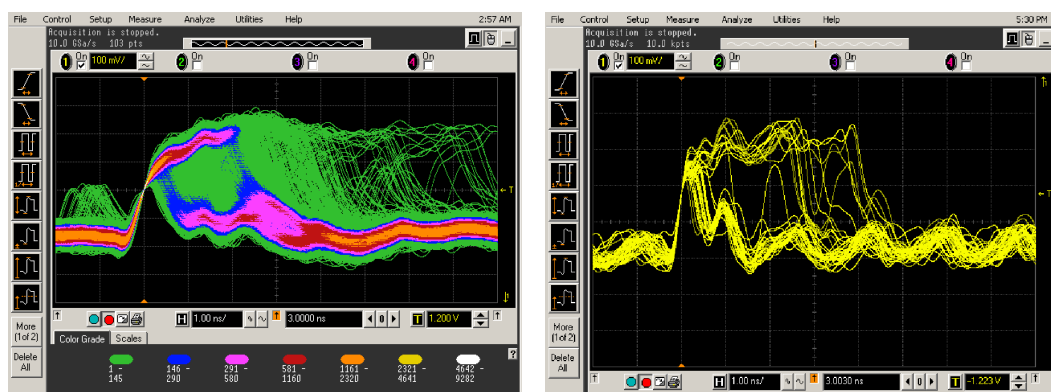


Рис. 27: Экран осциллографа, показывающий выходные сигналы PADIWA, регистрируемые по переднему фронту.

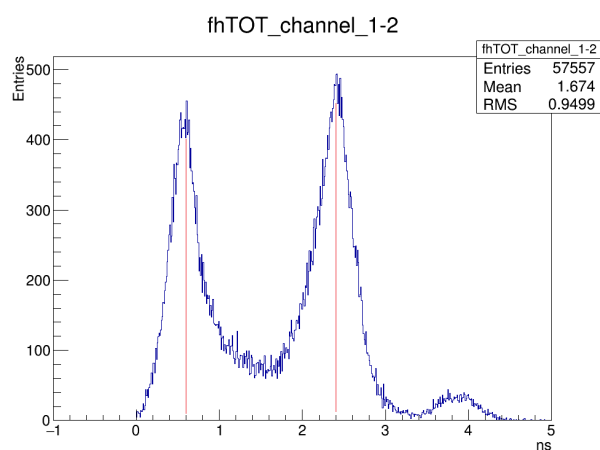


Рис. 28: Типичное распределение ToT.

902 Отметим, что указанные проблемы не являются критичными в слу-
 903 чае CBM RICH, и продемонстрированные в данной работе параметры
 904 достаточны для уверенного поиска колец. Тем не менее, улучшение раз-
 905 деления сигналов и шумов и повышение эффективности регистрации по-
 906 может создать необходимый запас надежности для долговременной ра-
 907 боты детектора в условиях постепенной деградации оптических свойств
 908 радиатора, зеркал и фотодетекторов.

5.7 Сравнение одноэлектронных спектров при временном и амплитудном считывании

Как отмечено в секции 1, у МА ФЭУ Н12700 имеются особенности, которые могут оказать влияние на эффективность регистрации единичных фотоэлектронов и вероятность возникновения ложных хитов. Для прояснения этих особенностей были выполнены измерения амплитудных распределений с помощью многоканальной платы на основе микросхемы n-XYTER, см. описание лабораторного стенда в секции 3.2. Далее, 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 специальные 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. 29.

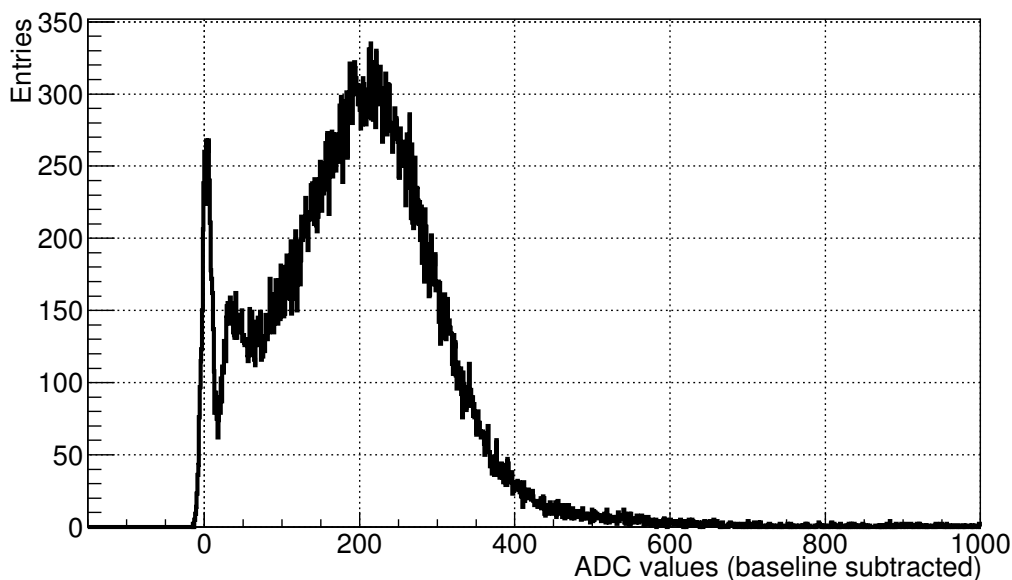


Рис. 29: Пример измеренного одноэлектронного спектра, имеющий особую форму, характерную для МА ФЭУ Н12700.

929 Пик вблизи нуля соответствует наводке, возникающей в каналах, рас-
930 положенных в одном ряду с тем, где зарегистрирован одноэлектронный
931 сигнал. Двугорбое распределение справа соответствует настоящим одно-
932 электронным сигналам. Причем левый пик связан с описанными в сек-
933 ции 1 событиями, когда электронная лавина или её часть отклоняется
934 от оптимального пути от динода к диноду. Отметим, что в большинстве
935 каналов уровень шумов оказывается слишком высоким для отделения
936 низкоамплитудного пика, связанного с наводкой, от одноэлектронного
937 сигнала. Таким образом, попытка получить максимальную эффектив-
938 ность регистрации за счет снижения порога приводит к возрастанию па-
939 разитных хитов, локализованных не в тех пикселях, где родился фото-
940 электрон. Для снижения числа паразитных хитов мы ставили порог ре-
941 гистрации в ложбине между низко- и высоко-амплитудными частями од-
942 ноэлектронного спектра. Поскольку формы одноэлектронных спектров
943 во всех каналах подобны, анализ формы спектра на рис. 29 позволяет
944 заключить, что выбранный нами порог приводит к потере 12 % одно-
945 электронных импульсов.

946 Одно из отличий канала считывания в плате RADIWA — это зна-
947 чительно более быстрая, чем в n-XYTER аналоговая часть. Если в n-
948 XYTER осуществляется формирование со временем интегрирования 190 нс,
949 то в RADIWA происходит лишь подавление частот выше 100 МГц, что
950 соответствует характерному времени нарастания сигнала несколько на-
951 носекунд. Такое отличие приводит к возрастанию роли быстрых шумов
952 и наводок при регистрации сигналов с помощью RADIWA.

953 Информация о форме одноэлектронного спектра при считывании с
954 помощью канала на основе плат RADIWA и TRB v3 может быть получе-
955 на в виде зависимости от порога регистрации скорости счёта в событиях,
956 построенных вблизи триггера светового импульса. Такие данные могут
957 быть получены из анализа потока данных, набранных при различных зна-
958 чениях порога. Использование счетчика зарегистрированных фронтов, ре-
959 ализованного непосредственно в ВЦП и упомянутого в секции 2.1, позво-
960 ляет получить аналогичную зависимость без отбора вокруг триггера, но
961 позволяет достичь максимальных частот, достаточных для локализации
962 базовой линии. На рис. 30 показана зависимость частоты триггеров от
963 порога регистрации. Плечо слева соответствует одноэлектронному спек-
964 тру, более подробно исследованному ниже, а быстровозрастающие грани-
965 цы вокруг вертикальной штриховой линии ограничивают локализацию
966 базовой линии. Точность локализации базовой линии мы оцениваем как
967 ± 200 отсчетов по шкале, использованной на рис. 30 и рис. 31B,D.

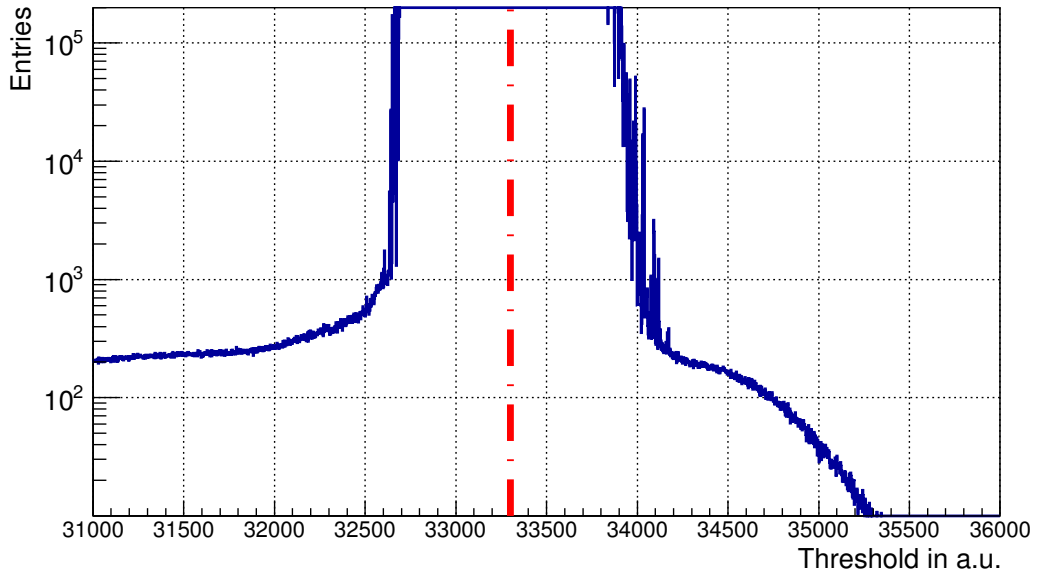


Рис. 30: Скан по порогам дискриминатора в диапазоне, включающем базовую линию, изображённую штрихпунктирной линией.

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 зависимость скорости счёта от порога при использовании двух систем считывания и одинаковых условиях засветки. Результаты такого сравнения для одного из типичных каналов показаны на рис. 31. В случае n-XYTER в таком сравнении может быть использован интеграл одноэлектронного спектра, показанный на рис. 31C. Соответственно, производная указанной зависимости может быть сопоставлена с одноэлектронным спектром, показанным на рис. 31A. Сплошная линия на рис. 31B получена дифференцированием кривой, показанной красным цветом на рис. 31D и полученной подгонкой измеренной зависимости полиномом 7-й степени. Отметим, что мы оцениваем равенство световых потоков как $\pm 5\%$. Видно, что скорости счёта в области ложбины и максимума одноэлектронного спектра приблизительно совпадают. Амплитуды, соответствующие максимуму и ложбине соответственно, относятся как 2.6 в обоих случаях. При этом, в случае PADIWA наблюдается, с одной стороны более явно выраженная ложбина, а с другой — избыток счёта в малых амплитудах, что предполагает больший относительный вклад наводок и, следовательно, невозможность отделения от них низкоамплитудной части одноэлектронного спектра и нецелесооб-

990 разность повышения эффективности за счёт установления порога ниже
 991 ложбины.

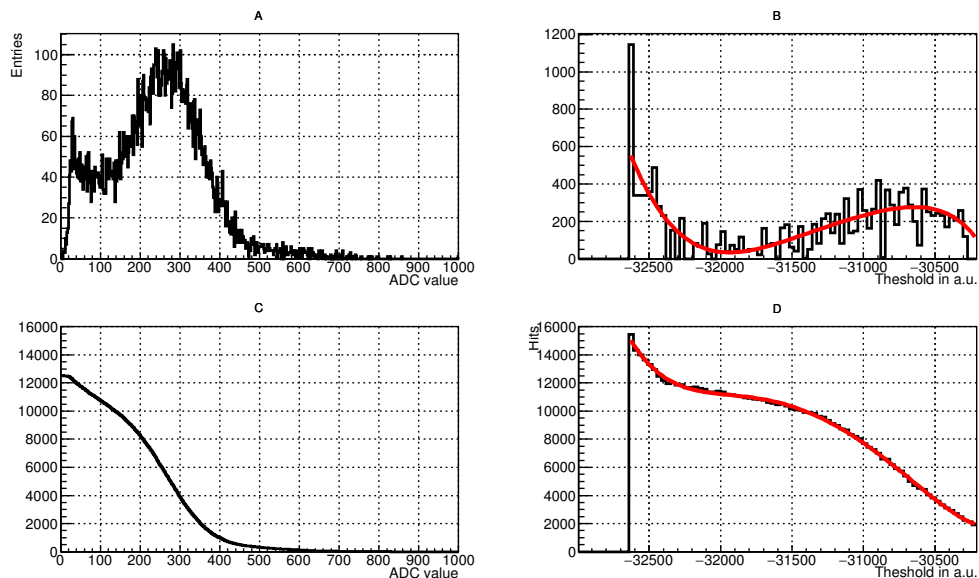


Рис. 31: Сравнение (А) одноэлектронного спектра, измеренного напрямую с помощью системы считывания на базе n-XYTER, и (В) производной скана по порогам, полученного с помощью системы считывания на базе PADIWA и TRB v3; сравнение (С) интеграла одноэлектронного спектра и (D) зависимости скорости счёта от порога дискриминатора.

992 Заключение

993 Исследованы свойства прототипа системы считывания и сбора данных
 994 детектора RICH эксперимента CBM. Подробно охарактеризован 64-канальный
 995 модуль, состоящий из МА ФЭУ Н12700, четырёх плат предусилителей-
 996 дискриминаторов PADIWA и одной платы TRB v3, выполняющей функ-
 997 ции ВЦП и концентратора данных. Описаны необходимые для работы
 998 прототипа модули ПО. Продемонстрировано, что ВЦП имеют времен-
 999 ное разрешение 21 пс (FWHM) при использовании калибровки точного
 1000 времени. Применение поканальной кусочно-линейной псевдо-калибровки
 1001 ухудшает временное разрешение до 50 пс (FWHM), а единой для всех ка-
 1002 налов усреднённой псевдо-калибровки приводит к значению временного
 1003 разрешения 64 пс (FWHM) в наиболее неблагоприятных случаях. Об-
 1004 суждена процедура калибровки задержек между каналами а также ста-
 1005 бильность полученных задержек. Дрейф задержек не превышает 0.5 нс

за все время измерений (полчаса). Рассмотрена возможность использования спектров “времени над порогом” (ToT) для отбора корректных хитов и коррекции временной привязки. Выявлено, что спектр ToT имеет многопиковую структуру по причине 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 нс и 45 нс. Проведено сравнение медленного аналогового и быстрого временного считывания МА ФЭУ. Выявлено проявление особенностей одноэлектронного спектра в том, как эффективность регистрации фотоэлектронов и вероятность появления ложных хитов зависят от порога дискриминатора. Исследовано временное разделение всего канала считывания для различных по величине множеств каналов: от одной пары до 256 штук. Наихудшее из полученных значений составляет 1.2 нс, 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] *H. H. Gutbrod* // FAIR Baseline Technical Report, ISBN: 3-9811298-0-6, 2006.
- [2] *B. Friman, C. Höhne, 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] *V. Friese and C. Sturm* // CBM Progress Report 2014, ISBN: 978-3-9815227-2-3, 2015.

- 1042 [6] *A. Malakhov and A. Shabunov* // Technical Design Report for the CBM
1043 Superconducting Dipole Magnet, GSI, Darmstadt (2013) 80 p.
- 1044 [7] *M. Koziel* // MVD Status: Integration, 25th CBM Collaboration
1045 Meeting, Darmstadt, 20-24 April 2015. [https://indico.gsi.
1046 de/getFile.py/access?contribId=17&sessionId=9&resId=0&
1047 materialId=slides&confId=2960](https://indico.gsi.de/getFile.py/access?contribId=17&sessionId=9&resId=0&materialId=slides&confId=2960)
- 1048 [8] *J. Heuser et al.* // Technical Design Report for the CBM Silicon
1049 Tracking System (STS), GSI, Darmstadt (2013) 167 p.
- 1050 [9] *C. Höhne et al.* // Technical Design Report for the CBM Ring Image
1051 Cherenkov (RICH), GSI, Darmstadt (2013) 201 p.
- 1052 [10] *S. Chattopadhyay et al.* // Technical Design Report for the CBM Muon
1053 Chambers (MuCh), GSI, Darmstadt (2014) 192 p.
- 1054 [11] *S. Biswas et al.* // Development of a GEM based detector for the CBM
1055 Muon Chamber (MUCH), 2013 JINST 8 C12002.
- 1056 [12] *M. Petris et al.* // TRD detector development for the CBM experiment,
1057 NIM A, Volume 732, 21 December 2013, Pages 375–379.
- 1058 [13] *N. Herrmann et al.* // Technical Design Report for the CBM Time-of-
1059 Flight System (TOF), GSI, Darmstadt (2014) 182 p.
- 1060 [14] *I. Korolko* // CBM Calorimeter for SIS100 (TDR status), 25th CBM
1061 Collaboration Meeting, Darmstadt, 20-24 April 2015.
1062 [https://indico.gsi.de/getFile.py/access?contribId=138&
1063 sessionId=29&resId=1&materialId=slides&confId=2960](https://indico.gsi.de/getFile.py/access?contribId=138&sessionId=29&resId=1&materialId=slides&confId=2960)
- 1064 [15] *F. Guber et al.* // Technical Design Report for the CBM Projectile
1065 spectator detector (PSD), GSI, Darmstadt (2014) 78 p.
- 1066 [16] Hamamatsu H12700 manual, [https://www.hamamatsu.com/
1067 resources/pdf/etd/H12700_TPMH1348E.pdf](https://www.hamamatsu.com/resources/pdf/etd/H12700_TPMH1348E.pdf)
- 1068 [17] *M. Calvi et al.* // Characterization of the Hamamatsu H12700A-03 and
1069 R12699-03 multi-anode photomultiplier tubes, 2015 JINST 10 P09021.
- 1070 [18] *M. Calvi et al.* // Characterization of the Hamamatsu H12700A-03
1071 multi-anode photomultiplier tube for the LHCb RICH upgrade, LHCb-
1072 INT-2015-006.

- 1073 [19] [https://www.hamamatsu.com/resources/pdf/etd/H8500_H10966_](https://www.hamamatsu.com/resources/pdf/etd/H8500_H10966_TPMH1327E.pdf)
1074 [TPMH1327E.pdf](https://www.hamamatsu.com/resources/pdf/etd/H8500_H10966_TPMH1327E.pdf)
- 1075 [20] T. Mahmoud RICH2016 proceedings.
- 1076 [21] *C. Pauly et al.* // The CBM RICH project, NIM A 2016, doi:
1077 10.1016/j.nima.2016.05.102.
- 1078 [22] *S. Reinecke et al.* // The CBM-RICH detector, JINST 11 (2016) no.05,
1079 C05016.
- 1080 [23] J. Kopfer PhD thesis, Bergische Universität Wuppertal.
- 1081 [24] Official TRB project web site, <http://trb.gsi.de/>
- 1082 [25] *C. Ugur, S. Linev, J. Michel, T. Schweitzer, and M. Traxler* // A novel
1083 approach for pulse width measurements with a high precision (8 ps RMS)
1084 TDC in an FPGA, 2016 JINST 11 C01046.
- 1085 [26] TRB v3 documentation, [http://jspc29.x-matter.uni-frankfurt.](http://jspc29.x-matter.uni-frankfurt.de/docu/trb3docu.pdf)
1086 [de/docu/trb3docu.pdf](http://jspc29.x-matter.uni-frankfurt.de/docu/trb3docu.pdf)
- 1087 [27] *W. M. Zabołotny and G. Kasprowicz* // Data processing boards
1088 design for CBM experiment, Proc. SPIE 9290, Photonics
1089 Applications in Astronomy, Communications, Industry, and High-
1090 Energy Physics Experiments 2014, 929023 (November 25, 2014);
1091 doi:10.1117/12.2073377;
- 1092 [28] *J de Cuveland et al.* // A First-level Event Selector for the CBM
1093 Experiment at FAIR, 2011 J. Phys.: Conf. Ser. 331 022006.
- 1094 [29] *J. Michel, M. Faul, J. Friese, C. Höhne, K.-H. Kampert, V. Patel,*
1095 *C. Pauly, D. Pfeifer, P. Skott, M. Traxler, and C. Ugur* // Electronics
1096 for the RICH detectors of the HADES and CBM experiments, 2017
1097 JINST 12 C01072.
- 1098 [30] *J. Adamczewski-Musch et al.* // Data acquisition and online monitoring
1099 software for CBM test beams, 2012 J. Phys.: Conf. Ser. 396 012001.
- 1100 [31] *C. Bergmann et al.* // Common CBM beam test of the RICH, TRD and
1101 TOF subsystems at the CERN PS T9 beam line in 2014, CBM Progress
1102 Report 2014, p.9.
- 1103 [32] *C. Bergmann et al.* // Test of Münster CBM-TRD real-size detector
1104 and radiator prototypes at the CERN PS/T9 beam line, CBM Progress
1105 Report 2014, p.78.

- 1106 [33] *M. Petris, D. Batros, G. Caragheorghropol et al.* // Prototype with the
 1107 basic architecture for the CBM-TOF inner wall tested in close to real
 1108 conditions, 2016 J. Phys.: Conf. Ser. 724 012037.
- 1109 [34] Information about the T9 beam line and experimental facilities,
 1110 [http://home.web.cern.ch/sites/home.web.cern.ch/files/file/](http://home.web.cern.ch/sites/home.web.cern.ch/files/file/spotlight_students/information_about_the_t9_beam_line_and_experimental_facilities.pdf)
 1111 [spotlight_students/information_about_the_t9_beam_line_and_](http://home.web.cern.ch/sites/home.web.cern.ch/files/file/spotlight_students/information_about_the_t9_beam_line_and_experimental_facilities.pdf)
 1112 [experimental_facilities.pdf](http://home.web.cern.ch/sites/home.web.cern.ch/files/file/spotlight_students/information_about_the_t9_beam_line_and_experimental_facilities.pdf)
- 1113 [35] *L.M. Kotchenda, P.A. Kravtsov* // CBM RICH PROTOTYPE GAS
 1114 SYSTEM.
- 1115 [36] *J. Adamczewski-Musch et al.* // Determination of tolerances of mirror
 1116 displacement and radiator gas impurity for the CBM RICH detector,
 1117 doi: 10.1016/j.nima.2014.04.074
- 1118 [37] *J. Bendarouach, C. Höhne, and T. Mahmoud* // Mirror misalignment
 1119 control system and prototype setup, CBM Progress Report 2014, p.56.
- 1120 [38] Roithner UVTOP240 datasheet, [http://www.roithner-laser.com/](http://www.roithner-laser.com/datasheets/led_deepuv/uvtop240.pdf)
 1121 [datasheets/led_deepuv/uvtop240.pdf](http://www.roithner-laser.com/datasheets/led_deepuv/uvtop240.pdf)
- 1122 [39] *M. Dürr, J. Kopfer et al.* // Influence of wavelength-shifting films on
 1123 multianode PMTs with UV-extended windows, NIM A, Volume 783, 21
 1124 May 2015, Pages 43–50.
- 1125 [40] Alphalas Picopower-LD series datasheet, [http://www.alphalas.](http://www.alphalas.com/images/stories/products/lasers/Picosecond_Pulse_Diode_Lasers_with_Driver_PICOPOWER-LD_ALPHALAS.pdf)
 1126 [com/images/stories/products/lasers/Picosecond_Pulse_Diode_](http://www.alphalas.com/images/stories/products/lasers/Picosecond_Pulse_Diode_Lasers_with_Driver_PICOPOWER-LD_ALPHALAS.pdf)
 1127 [Lasers_with_Driver_PICOPOWER-LD_ALPHALAS.pdf](http://www.alphalas.com/images/stories/products/lasers/Picosecond_Pulse_Diode_Lasers_with_Driver_PICOPOWER-LD_ALPHALAS.pdf)
- 1128 [41] <http://www.rz.uni-frankfurt.de/39888789/syscore>
- 1129 [42] <http://cbmroot.gsi.de/>
- 1130 [43] FLESnet development repository, [https://github.com/cbm-fles/](https://github.com/cbm-fles/flesnet)
 1131 [flesnet](https://github.com/cbm-fles/flesnet)
- 1132 [44] *J. Adamczewski-Musch, S. Linev, E. Ovcharenko, and C. Ugur* //
 1133 HADES trbnet data formats for DABC and Go4, PHN-SIS18-ACC-41,
 1134 GSI SCIENTIFIC REPORT 2012, p.297.
- 1135 [45] *R. Szplet, J. Kalisz, and R. Pelka* // Nonlinearity correction of
 1136 the integrated time-to-digital converter with direct coding, IEEE
 1137 Transactions on Instrumentation and Measurement, 46:449–453, April
 1138 1997.

- 1139 [46] *C.A. Лебедев, Г.А. Ососков* // Быстрые алгоритмы распознавания
1140 колец и идентификации электронов в детекторе RICH эксперимента
1141 CBM, Письма в ЭЧАЯ. 2009. Т.6, №2(151). С.260-284.
- 1142 [47] *S. Lebedev, C. Höhne, I. Kisel, G. Ososkov* // Fast Parallel Ring
1143 Recognition Algorithm in the RICH Detector of the CBM Experiment
1144 at FAIR, ACAT2010 proceedings.
- 1145 [48] *E. Ovcharenko, S. Belogurov et al.* // Tests of the CBM RICH readout
1146 and DAQ prototype, PEPAN letters.
- 1147 [49] M. Dürr, private communication.
- 1148 [50] *D.V. O'Connor, D. Phillips* // Time Correlated Single Photon
1149 Counting, Academic Press, London 1984.
- 1150 [51] *F. Gonnella, V. Kozhuharov, M. Raggi* // Time over threshold in the
1151 presence of noise, NIM A, Volume 791, p. 16-21.