

ТЕХНИКА ЯДЕРНОГО ЭКСПЕРИМЕНТА

УДК 539.1.075 + 539.1.08

ПУЧКОВЫЕ ИСПЫТАНИЯ ПРОТОТИПА СИСТЕМЫ ОБРАБОТКИ ДАННЫХ КРЕМНИЕВОЙ ТРЕКОВОЙ СИСТЕМЫ ЭКСПЕРИМЕНТА BM@N

© 2023 г. Д. В. Дементьев^a, М. О. Шитенков^a, П. И. Харламов^{a,b,*},
А. Л. Воронин^a, М. М. Меркин^{a,b}, Ю. А. Мушин^a

^aОбъединенный институт ядерных исследований, Лаборатория физики высоких энергий
им. В.И. Векслера и А.М. Балдина

Россия, 141980, Дубна Московской обл., ул. Жолио-Кюри, 6

^bНИИ ядерной физики им. Д.В. Скобельцына Московского государственного университета им. М.В. Ломоносова
Россия, 119991, Москва, Ленинские горы, 1, стр. 2

*e-mail: pi.kharlamov@physics.msu.ru

Поступила в редакцию 10.06.2022 г.

После доработки 22.06.2022 г.

Принята к публикации 11.08.2022 г.

Кремниевая трековая система является одной из основных частей эксперимента BM@N. Она основана на двухсторонних кремниевых микростриповых детекторах со считывающей электроникой, управляемой потоками данных. Для проверки считывающей электроники, а также систем синхронизации времени и сбора данных были проведены пучковые испытания на линейном ускорителе электронов ЛИНАК-200 с энергией электронов до 200 МэВ. Испытания продемонстрировали стабильность работы прототипа системы считывания и сбора данных.

DOI: 10.31857/S0032816223010123, EDN: JTPNJQ

КРЕМНИЕВЫЕ ТРЕКОВЫЕ СИСТЕМЫ БУДУЩИХ ЭКСПЕРИМЕНТОВ НА УСКОРИТЕЛЯХ ТЯЖЕЛЫХ ИОНОВ

Столкновения ядро-ядро при энергиях от единиц до десятков гигаэлектронвольт на нуклон открывают уникальные возможности по достижению экстремальных плотностей ядерной материи. Подобные условия хорошо подходят для исследования уравнения состояния, структуры и свойств ядерной материи, а также для поиска фазовых переходов, восстановления хиральной симметрии и экзотических форм материи. Ожидается, что при больших значениях барионной плотности в ядерной материи будут присутствовать критическая точка и переходы между различными фазами, такими как адронная фаза, кваркониевая фаза, кварк-глюонная плазма и, возможно, “цветная” сверхпроводящая фаза. Экспериментальное наблюдение и изучение таких структур может быть значительным прорывом в понимании все еще не исследованных областей квантовой хромодинамики.

Однако диапазон энергий до 10–15 ГэВ на нуклон еще не был изучен в столкновениях тяжелых ионов. Для того чтобы исследовать эти области, создаются новые проекты в Центре по исследованию ионов и антипротонов FAIR (Facility for

Antiproton and Ion Research) в Дармштадте и на строящемся в рамках российского мегапроекта ионно-коллайдерном центре NICA (Nuclotron-based Ion Collider fAcility) в Дубне. Детекторы этих экспериментов предназначены для проведения координатных измерений с беспрецедентной точностью и большим количеством распадающихся на лептонные пары редких диагностических проб, таких как гипероны с большой странностью, очарованные частицы и векторные мезоны. Большинство этих частиц будет изучено впервые в диапазоне энергий FAIR и NICA. Для достижения необходимой точности требуется проводить измерения событий с частотой до 10 МГц. Для этого необходимы быстрые и радиационно-стойкие детекторы, оригинальная концепция чтения и анализа данных, включающая в себя считывающую электронику с режимом потокового чтения, а также производительный вычислительный кластер для онлайн отбора событий [1].

Восстановление треков заряженных частиц, в том числе и их импульсов, является одной из центральных задач детектирования в экспериментах физики частиц. В эксперименте Compressed Baryonic Matter at FAIR (CBM@FAIR) эта задача решается кремниевой трековой системой STS (Sili-

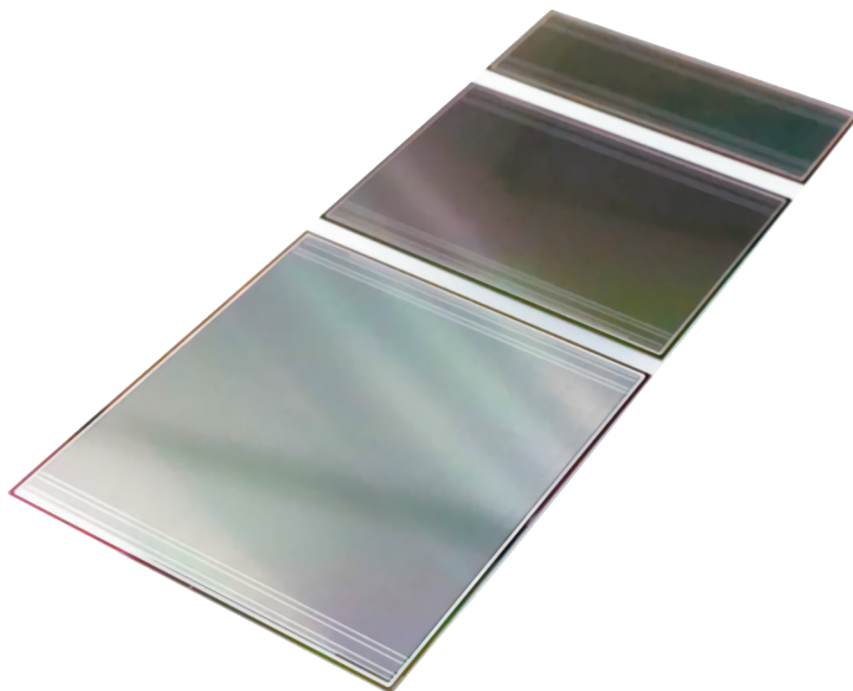


Рис. 1. Сенсоры размером 22×62 мм, 42×62 мм и 62×62 мм.

con Tracking System), расположенной в магнитном поле дипольного магнита. Она служит для восстановления треков и измерения импульсов всех рождаемых в мишени заряженных частиц и состоит из восьми трековых станций [2]. Для внутренних областей первых двух станций, где ожидаемая загрузка составляет 5%, были выбраны сенсоры высотой 22 мм, тогда как для внеш-

них областей с меньшей загрузкой можно использовать сенсоры с высотой до 62 мм с целью уменьшения количества материала и считывающей электроники. Ширина каждого сенсора была выбрана равной 62 мм (рис. 1).

Эксперимент Baryonic Matter at Nuclotron (BM@N) является первой стадией проекта NICA и предназначен как для изучения барионной материи и проведения иных побочных физических исследований, так и для тестирования оборудования проектов CBM@FAIR и NICA. Эксперимент BM@N схож с экспериментом CBM, поэтому все вышесказанное также относится и к его кремниевой трековой системе, за исключением количества станций — 4 вместо 8 (рис. 2) [3]. Поскольку в BM@N ожидаются значительно меньшие загрузки детекторов, то для внутренних областей подходят сенсоры высотой 42 мм, а для внешних — 62 мм. Сенсоры размером 42×62 мм, примыкающие к ионопроводу, будут изготовлены с вырезом для предотвращения нежелательного воздействия непересекавшегося с мишенью пучка ионов на сенсоры при сохранении максимального покрытия телесного угла. Оба проекта являются экспериментами на фиксированной мишени, и геометрия их детекторных систем — это магнитный спектрометр.

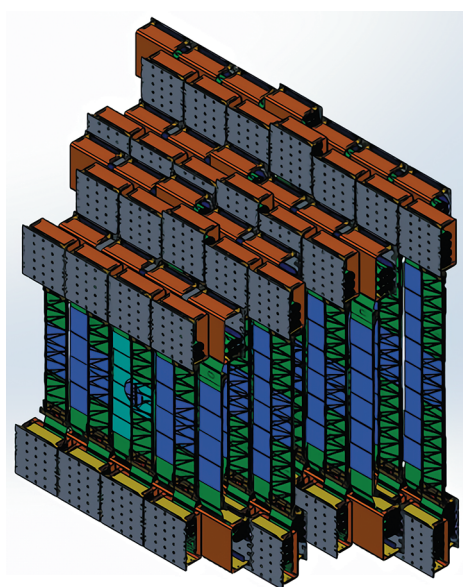


Рис. 2. Схема STS эксперимента BM@N.

ТРЕКОВЫЕ МОДУЛИ

Модули STS состоят из кремниевых сенсоров, считывающей электроники и соединительных

кабелей. Были созданы кремниевые микростриповые двухсторонние сенсоры толщиной 300 мкм, с 1024 стрипами на каждой стороне с шагом стрипов 58 мкм. Детекторы изготовлены по одной геометрии двумя производителями: CiS (Германия) и Hamamatsu (Япония). Угол между стрипами на двух сторонах равен 7.5° для уменьшения неопределенности при восстановлении треков. Шаг стрипов 58 мкм позволяет достичь максимального пространственного разрешения детектора порядка 17 мкм, даже без анализа амплитуд в кластере. В случае же учета амплитуд сигналов в кластере разрешение может составить единицы микрометров. Двухсторонние сенсоры позволяют получить обе координаты одновременно при том же количестве материала (кремния) в трековой системе, что в односторонних сенсорах, и в условиях ограниченного пространства трековой системы двухсторонние сенсоры являются лучшим решением, несмотря на большую сложность в изготовлении, высокую стоимость и сложность считывания сигналов двух разных полярностей.

Другая важная часть трекового модуля — это его считывающая электроника. Можно выделить два класса считывающей электроники — триггерная и самотриггирующаяся (управляемая потоком данных). Триггерная электроника работает по внешнему сигналу запуска — триггеру, тогда как самотриггирующаяся электроника сама генерирует сигнал запуска процедуры чтения сигнала индивидуально в каждом канале, что позволяет считывать с меньшими потерями сигналы с детекторов в случае больших загрузок или неизвестного времени взаимодействия частиц. Однако при этом самотриггирующаяся электроника обладает некоторыми существенными недостатками: большим шумом по сравнению с триггерной электроникой, высоким энергопотреблением и, соответственно, тепловыделением, а также необходимостью общей временной синхронизации всех каналов считывания с “часами системы”. Но в целом такая считывающая электроника признается на сегодняшний день более универсальным решением для экспериментов физики высоких энергий в случае больших загрузок и, тем более, отсутствия критерия выработки сигнала запуска.

В нашем случае в пучковых испытаниях использовалась детекторная электроника, основанная на самотриггирующейся специализированной интегральной микросхеме STS-XYTER [4]. Каждая такая микросхема позволяет считывать 128 каналов с сенсора.

Входная часть микросхемы представляет собой зарядово-чувствительный усилитель, обеспечивающий сбор заряда, образовавшегося в чувствительном объеме сенсора, и преобразование его в импульс напряжения. Далее сигнал проходит через две ветви: быструю и медленную. Быст-

рая ветвь оптимизирована для создания временных меток событий и использует $CR-RC$ -усилитель-формирователь с временем формирования сигнала 30 нс, дискриминатор и устройство формирования 14-битной временной метки в коде Грея. Медленная ветвь состоит из $CR-(RC)^3$ -формирователя, работающего на 5-битный быстрый АЦП и цифровой пиковый детектор, позволяющий зафиксировать значение максимума амплитуды и оптимизировать шумовые характеристики канала.

Как было сказано выше, на одном двухстороннем сенсоре в трековом модуле имеется 1024 стрипа на каждой стороне и соответственно 2048 чувствительных каналов считывания, что соответствует 16-ти микросхемам STS-XYTER, расположенным на двух платах Front-End Board-8 (FEB-8).

ПРОТОТИП ТРАКТА ЧТЕНИЯ КРЕМНИЕВОЙ ТРЕКОВОЙ СИСТЕМЫ ЭКСПЕРИМЕНТА CBM@FAIR

Поскольку эксперимент CBM@FAIR направлен на получение большого объема данных, для его системы считывания был выбран именно точный принцип считывания. В этом случае сигнал запуска не приходит от других систем к электронике считывания детекторов, а вырабатывается самотриггирующейся считывающей электроникой, которая собирает, оцифровывает и фиксирует во времени все сигналы от детекторов. Собранные данные затем передаются в вычислительный центр, где они обрабатываются и ассоциируются с событиями в зависимости от физической задачи. Затем выбранные данные о событиях отправляются в хранилище. Но из-за высокой скорости взаимодействия и множественности в эксперименте CBM@FAIR ожидается, что скорость вывода данных будет значительно выше, чем скорость их архивирования. Поэтому необходимо разбиение данных в соответствии с временными интервалами и параллельная обработка этих пакетов данных.

Приблизительная блок-схема цепи считывания прототипа STS показана на рис. 3 [5]. В качестве электроники съема сигнала с детекторов использовалась конфигурируемая самотриггирующаяся специализированная микросхема STS-XYTER, установленная на интерфейсных платах (Front-End Boards — FEB). Следующей частью тракта являются платы считывания (ReadOut Boards — ROB), которые принимают данные с нескольких FEB по дифференциальным линиям, а затем концентрируют их в высокоскоростной оптический канал. ROB для эксперимента CBM@FAIR [6] будут основаны на системе GBTx, разработанной в CERN. Следующая часть системы состоит из плат обработки данных (Data Processing Boards — DPB) на базе платформы AMC FMC Carrier Kintex (AFCK) [7].

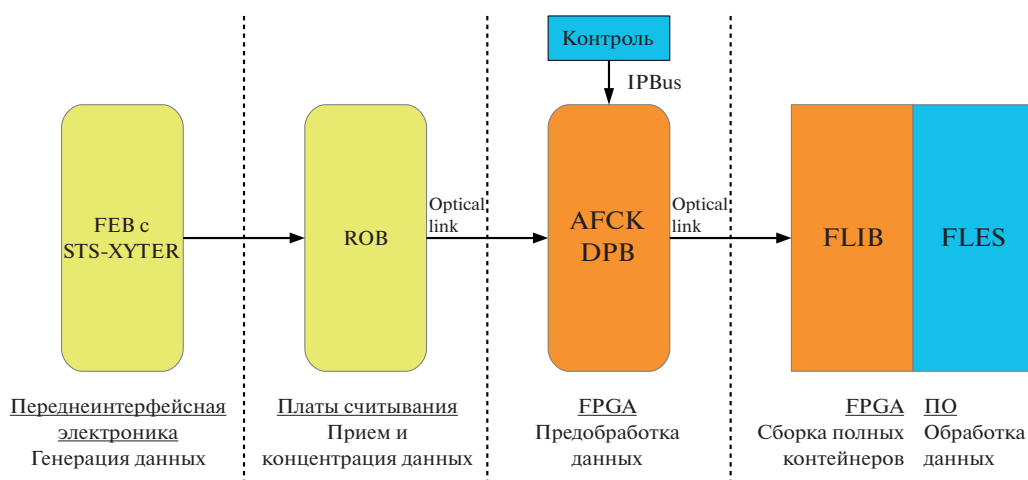


Рис. 3. Блок-схема системы чтения STS эксперимента CBM@FAIR.

Основное назначение DPB — считывание данных, последующая сортировка, мультиплексирование прочитанных данных и упаковка в автономные контейнеры, называемые “микросрезами” (Micro-Slices — μS). Медленный контроль и конфигурация детекторной электроники будут осуществляться через DPB по протоколу IPBus, который основан на стандарте Ethernet. Затем данные в виде микросрезов передаются по оптическому каналу связи на конечную аппаратную часть тракта считывания — PCIe-платы на основе FPGA, расположенных в серверных компьютерах. PCIe-платы используются в качестве входа для селектора событий первого уровня, называемого FLES (First Level Event Selector) Input Board (FLIB). FLES — специализированный цифровой процессор, используемый для объединения и онлайн обработки полученных данных с целью обнаружения, реконструкции и выделения событий.

По оптическим каналам между DPB и FLIB передаются данные от детекторов в виде микросрезов [8]. Микросрез содержит все данные для одного DPB за определенный промежуток времени. Поэтому контейнер-микросрез имеет фиксированную временную длину, но может варьироваться по размеру данных. Базовое значение времени используется при генерации микросреза и синхронизировано во всем эксперименте. Заголовок также содержит индекс микросреза, который представляет собой счетчик, работающий параллельно во всех DPB. Этот счетчик, наряду с синхронизированным по установке базовым значением времени, позволяет впоследствии сопоставить соответствующие триггеру микросрезы и построить полные контейнеры данных, называемые “временными срезами” (Time-Slices — tS).

Временные срезы — это двухмерные коллекции микросрезков. Первым измерением является время, представленное индексом микросреза,

вторым измерением — компоненты, которые создают микросрезы, в нашем случае это DPB. Временной срез содержит основные микросрезы, в которых происходит поиск событий, и некоторые перекрывающиеся микросрезы. Область перекрытия позволяет независимо обрабатывать временной срез: данные, принадлежащие событиям, находящимся вблизи границы основной части временного среза, могут быть найдены без обращения к предыдущему или следующему временному срезу.

Следует отметить, что в настоящее время на смену вышеописанной концепции предложено использование общего интерфейса считывания (Common Readout Interface — CRI), который позволяет объединить функциональность как DPB, так и FLIB в одной плате на базе более современной и мощной FPGA [9]. Тем самым будет достигнуто уменьшение числа звеньев цепочки чтения и количества оптических линий, а также увеличение скорости медленного управления системой сбора данных в рамках предложенной ранее концепции.

ПУЧКОВЫЕ ИСПЫТАНИЯ ПРОТОТИПОВ СИСТЕМ СБОРА ДАННЫХ И ВРЕМЕННОЙ СИНХРОНИЗАЦИИ

Испытания проводились с использованием экспериментальной установки на ускорителе LINAC-200 [10]. LINAC-200 — это линейный ускоритель электронов с энергией до 200 МэВ. Основными целями этого теста являлись тестирование считывающей электроники, системы сбора данных (DAQ) и системы синхронизации времени между станциями, а также сбор данных в режиме потокового чтения [11].

Экспериментальная установка состояла из двух детекторных станций на основе демонстраторов с “бэби”-сенсорами размером 14.9×14.9 мм с

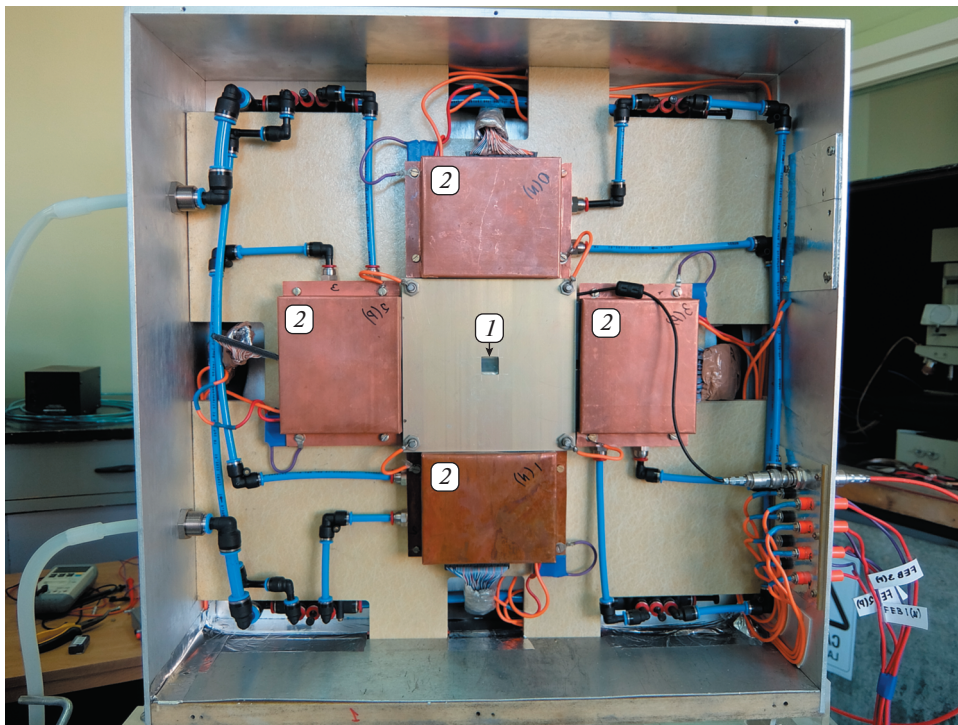


Рис. 4. Тестовая станция с “бэби”-сенсором (1) и четырьмя интерфейсными платами FEB со считывающей электроникой под медными экранами (2).

256 стрипами на каждую сторону и углом 90° между стрипами на разных сторонах. К каждому демонстратору через разъемы с увеличенным шагом выводов подключены 4 платы детекторной электроники FEB_V с микросхемами STS-XYTER v.2.0 (рис. 4). Станции располагались вдоль оси пучка ускорителя на расстояниях 30 и 65 см от конца ионопровода.

Система сбора данных в пучковых испытаниях схожа с описанной выше. Однако, из-за того что ROB находилась на этапе разработки и рассчитана на полноразмерные модули, ее функционал был реализован и протестирован на базе DPB. Такая возможность обусловлена использованием демонстраторов с меньшим количеством каналов на сенсорах, но схожих по параметрам с реальными детекторами. Так, в прототипе не использовалась программная часть FLES, также находящаяся в стадии разработки.

Для обработки данных использовались две платы AFCK с мезонинными платами gDPB FMC. Одна AFCK позволяет подключить до шести плат FEB по медным дифференциальным линиям стандарта LVDS с развязкой по постоянному току. Дополнительная плата AFCK с двумя мезонинными платами FMC tDPB использовалась в качестве мастер-платы временной синхронизации [12] для синхронизации временной отметки на платах DPB. Мастер-плата генерирует тактовый сигнал 40 МГц и PPS (Pulse Per Second) сиг-

нал по Ethernet кабелям CAT6. При помощи специального алгоритма временная система обеспечивает синхронизацию плат DPB и фронтальной электроники детектора с наносекундной точностью. При этом компенсируются все задержки линий и обеспечивается стабильность синхронизации во времени.

Сбор данных осуществляется на серверном узле через плату FLIB, данные с которой архивируются в памяти компьютера и обрабатываются онлайн-монитором через шину PCIe с применением технологии DMA.

Для привязки ко времени использовался стартовый импульс от ускорителя, который запускает внешний генератор импульсов, подающий трапецеидальный импульс на две дополнительные FEB. Эти платы были подключены к двум различным AFCK, что позволяет нам также контролировать синхронизацию по времени. Блок-схема системы считывания тестовой установки показана на рис. 5.

Испытания проводились при энергиях электронного пучка 50 и 150 МэВ. Измеренный профиль пучка показан на рис. 6. Высокоэнергетичные электроны теряют энергию в веществе преимущественно за счет тормозного излучения. Это объясняет, почему амплитуды сигналов достаточно высоки по сравнению с типичными сигналами MIP (Minimum ionizing particle). Это позволило

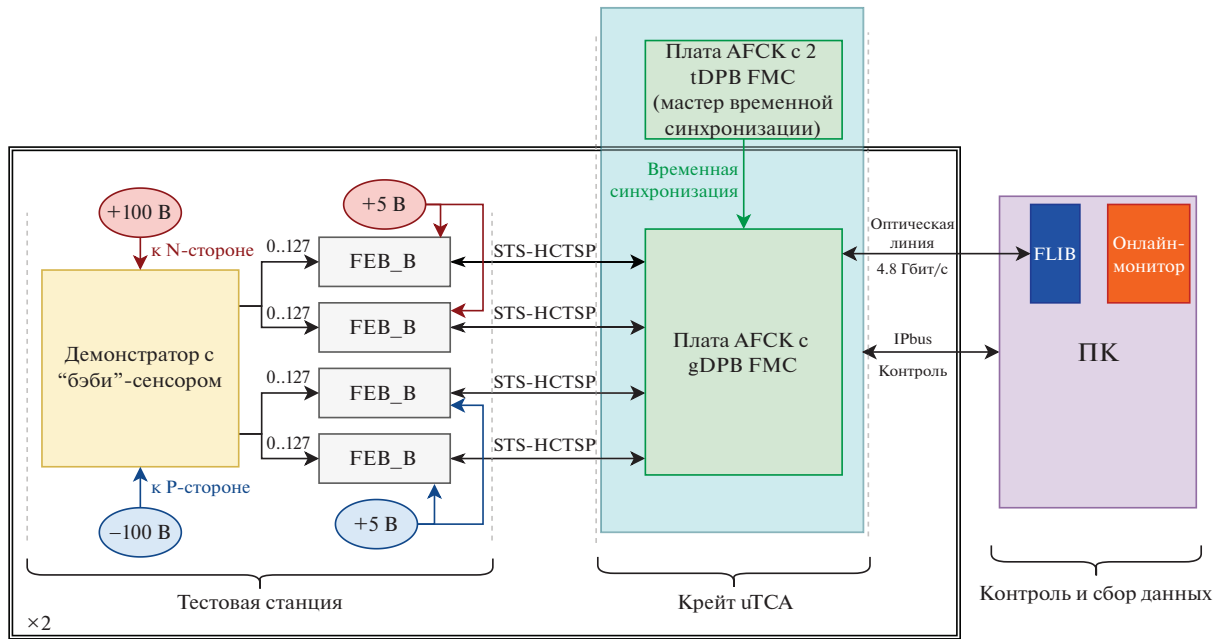


Рис. 5. Блок-схема системы сбора данных. FEB_B – FrontEnd Board версия B; STS-HCTSP – STS Hit Control Transfer Synchronous Protocol; AFCK – AMC FMC Carrier Kintex; AMC – Advanced Mezzanine Card; FMC – FPGA Mezzanine Card; tDPB и gDPB – Data Processing Board типов t и g; uTCA – Micro Telecommunications Computing Architecture; IPbus – Internet Protocol Bus; FLIB – FLES Input Board; FLES – First Level Event Selector.

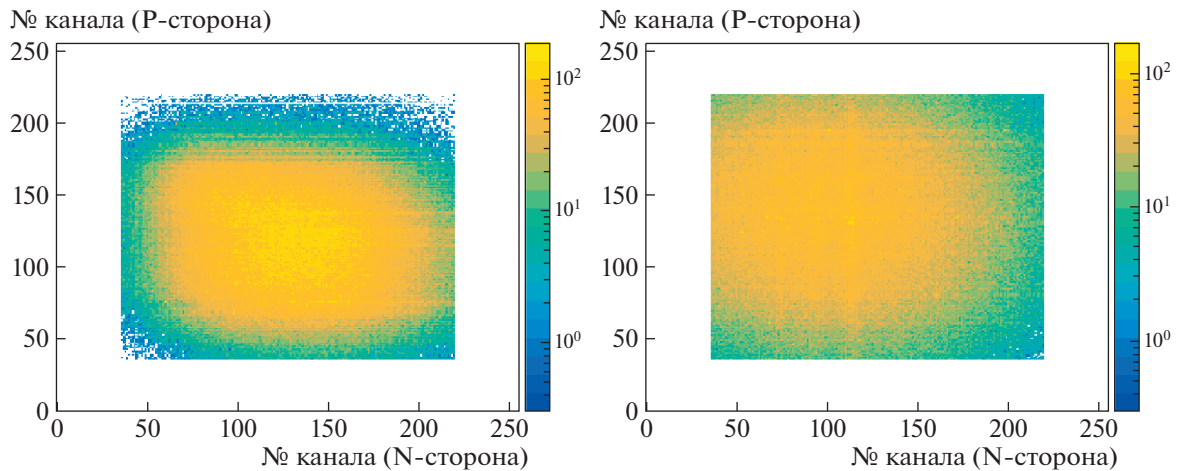


Рис. 6. Профиль пучка на станции 1 (слева) и станции 2 (справа).

нам использовать более высокие пороги сигналов в электронике, чтобы минимизировать вклад шумов. Примеры сигналов от электронов с энергиями 150 и 50 МэВ показаны на рис. 7.

Таким образом, был протестирован прототип электронного тракта эксперимента CBM и система синхронизации времени на основе плат AFCK. Испытания показали, что синхронизация времени между несколькими микросхемами, подключенными к разным платам AFCK, была стабильной, и может работать в течение 10 ч. Время рассин-

хронизации составляло менее 10 нс, что не превышало стандартного времени сбора заряда в кремниевых сенсорах. Разница во времени между сигналами с P- и N-сторон сенсоров показана на рис. 8, а между сигналами с двух сенсоров – на рис. 9.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Были протестированы системы синхронизации времени и сбора данных на основе плат AFCK и

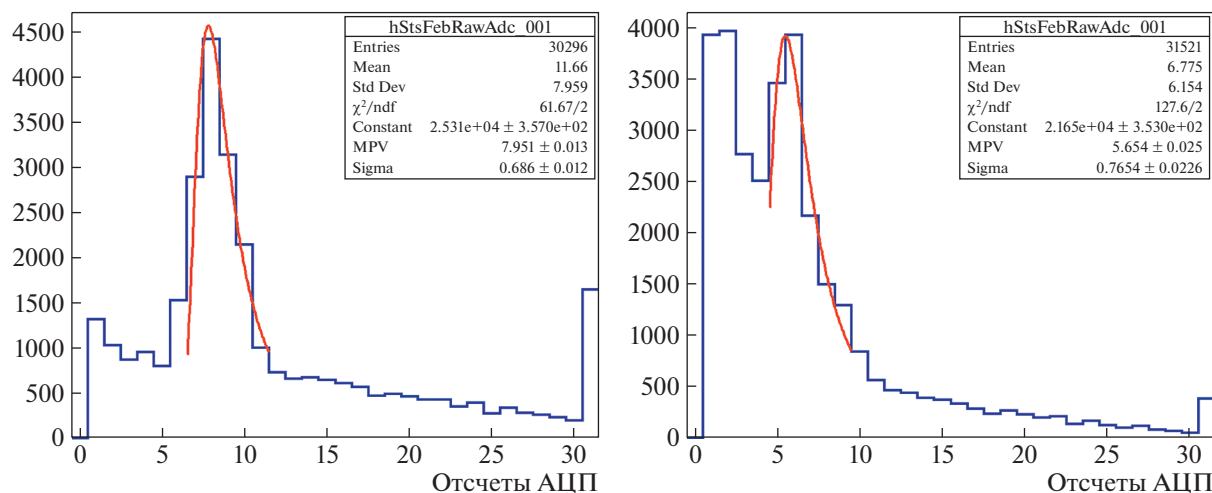


Рис. 7. Амплитуды сигналов от электронов с наиболее вероятной энергией 150 МэВ (слева) и 50 МэВ (справа). Собраный заряд составил 11.5 ± 0.1 фКл для электронов с энергией 150 МэВ и 6.10 ± 0.06 фКл для электронов с энергией 50 МэВ.

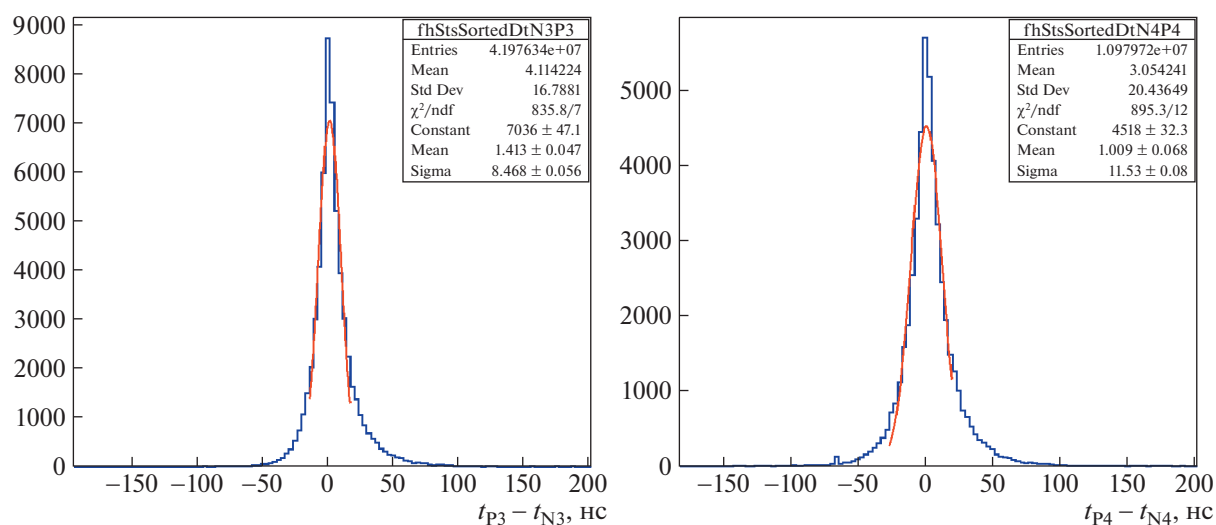


Рис. 8. Разница во времени между сигналами на N- и P-стороне сенсоров станции 1 (слева) и станции 2 (справа).

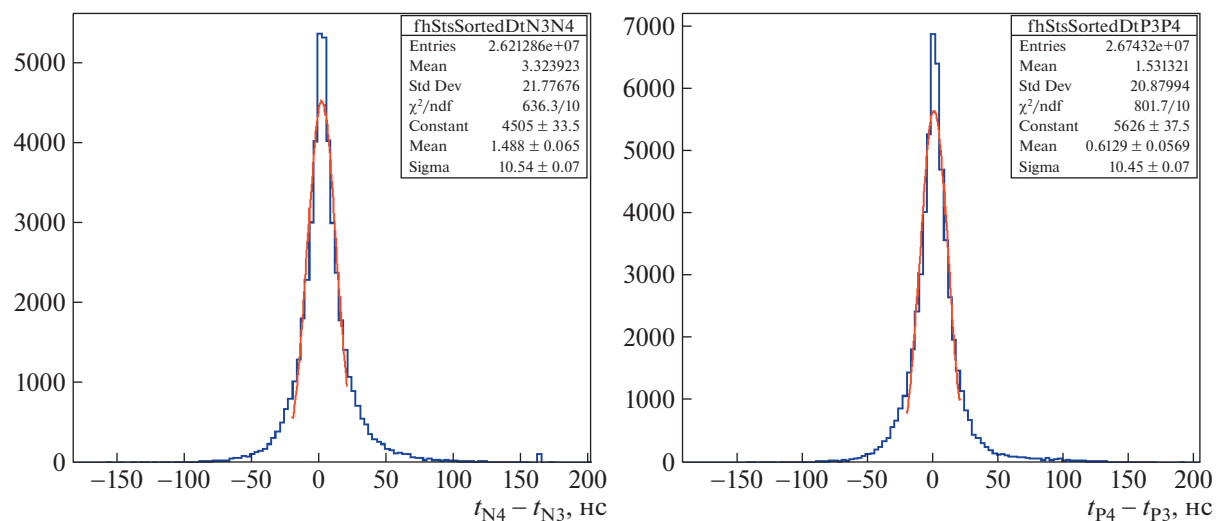


Рис. 9. Разница во времени между сигналами на N-сторонах сенсоров станций 1 и 2 (слева) и на P-сторонах сенсоров станций 1 и 2 (справа).

микросхем STS-XYTER v.2.0. На основе полученных результатов разработана новая версия микросхемы STS-XYTER v.2.1 с оптимизированными шумовыми характеристиками, дополнительным функционалом мониторинга параметров и исправлениями ошибок в работе цифровой части микросхемы.

Синхронизация времени между несколькими микросхемами считывания, подключенными к разным платам AFCK, была стабильной. Также была протестирована работа системы считывания в потоковом режиме сбора данных.

ФИНАНСИРОВАНИЕ РАБОТЫ

Работа выполнена при поддержке грантов Российского фонда фундаментальных исследований: 18-02-40119, 18-02-40113 и 19-32-90001.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Ablyazimov T., Abuhoza A., Adak R.P., Adamczyk M., Agarwal K., Aggarwal M.M., Ahammed Z., Ahmad F., Ahmad N., Ahmad S., Akindinov A., Akishin P., Akishina E., Akishina T., Akishina V. et al.* // *Eur. Phys. J.* 2017. V. A53. P. 3. <https://doi.org/10.1140/epja/i2017-12248-y>
2. The STS Workgroup and the CBM Collaboration. *Heuser J.M. et al.* // Technical Design Report for the CBM Silicon Tracking System (STS). 2013. <https://repository.gsi.de/record/54798/files/GSI-Report-2013-4.pdf>
3. *Ablyazimov T.O., Akishin P.G., Akishina V.P., Aksinenko V.D., Alfeev A.V., Alfeev V.S., Avdejchikov V.V., Averianov A.V., Avramenko S.V., Babkin V.A., Baginyan S.A., Balandin V.P., Basylev S.N., Belyakov D.V., Boguslavsky I.V. et al.* // Conceptual Design Report BM@N – Baryonic Matter at Nuclotron. 2013. https://nica.jinr.ru/files/BM@N/BMN_CDR.pdf
4. *Kasinski K., Kleczek R., Szczygiel R.* // *JINST.* 2016. V. 11. C02024. <https://doi.org/10.1088/1748-0221/11/02/C02024>
5. *Loizeau P.-A., Emscherman D., Lehner J.* // *Proc. SPIE Int. Soc. Opt. Eng.* 2015. V. 9662. P. 96622X. <https://doi.org/10.1117/12.2205820>
6. *Lehnert J., Byszuk A.P., Emschermann D., Kasinski K., Müller W.F.J., Schmidt C.J., Szczygiel R., Zabolotny W.M.* // *JINST.* 2017. V. 12. C02061. <https://doi.org/10.1088/1748-0221/12/02/C02061>
7. *Zabolotny W.M., Kasprowicz G.* // *Proc. SPIE Int. Soc. Opt. Eng.* 2014. V. 9290. P. 929023. <https://doi.org/10.1117/12.2073377>
8. *Hutter D., De Cuveland J., Lindenstruth V.* // *Journal of Physics: Conference Series.* 2017. V. 898. № 3. P. 032047.
9. *Zabolotny W.M., Byszuk A.P., Emschermann D., Gumiński M., Hutter D., Kasprowicz G.H., Poźniak K.T., Romaniuk R.* // *Proc. SPIE Photonics Applications in Astronomy, Communications, Industry, and High-Energy Physics Experiments.* 2018. V. 10808. P. 108083X. <https://doi.org/10.1117/12.2501415>
10. *Ноздрин М.А., Кобец В.В., Тимонин Р.В., Трифонов А.Н., Ширков Г.Д., Жемчужов А.С., Новиков И.И.* // Письма в ЭЧАЯ. 2020. Т. 17. № 4(229). С. 663. <https://elibrary.ru/item.asp?id=43853206>
11. *Dementev D., Kharlamov P., Murin Yu., Shitenkov M., Voronin A.* // *CBM Progress Report* 2018. 2019. P. 23. <https://repository.gsi.de/record/220128/files/CBM-ProgressReport2018.pdf>, <https://doi.org/10.15120/GSI-2019-01018>
12. *Meder L., Dreschmann M., Sander O., Becker J.* A signal distribution board for the timing and fast control master of the CBM experiment. <https://doi.org/10.1088/1748-0221/11/02/C02001>