

УДК 621.396.9

СТРУКТУРА И АЛГОРИТМ ФУНКЦИОНИРОВАНИЯ АППАРАТУРЫ МНОГОКАНАЛЬНОГО КРИСТАЛЛИЧЕСКОГО КАЛОРИМЕТРА ДЛЯ РАБОТЫ ПРИ БОЛЬШИХ ЗАГРУЗКАХ

В. М. Аульченко^{1,2}, В. Н. Жилич^{1,2}, В. В. Жуланов^{1,2},
А. С. Кузьмин^{1,2}, Д. В. Матвиенко^{1,2}, К. Миябаяши³, И. Накамура⁴,
Ю. В. Усов^{1,2}, Б. Г. Чеон⁵, Б. А. Шварц^{1,2}, В. Е. Шебалин^{1,2}

¹*Институт ядерной физики им. Г. И. Буджера СО РАН,
630090, Россия, г. Новосибирск, просп. Академика Лаврентьева, 11*

²*Новосибирский государственный университет,
630090, Россия, г. Новосибирск, ул. Пирогова, 2*

³*Nara Women's University, Kita-Uoya-Nishi-machi,
630-8506, Nara, Japan*

⁴*High Energy Accelerator Research Organization (KEK),
1-1 Oho, 305-0801, Tsukuba, Japan*

⁵*Hanyang University,
222, Wangsimni-ro, Seongdong-gu, 133-791, Seoul, Korea
E-mail: aulchenko@inp.nsk.su*

Предложен алгоритм вычисления амплитуд и времени появления сигналов при непрерывной их оцифровке в многоканальном калориметре детектора для физики высоких энергий; представлена структура разработанных аппаратных средств его реализации и результаты тестирования серийных образцов электронных модулей.

Ключевые слова: физика высоких энергий, детекторы, калориметры, системы сбора данных.

Введение. Широкое применение электроники является неременным условием проведения современных исследований практически в любой области экспериментальной науки, особенно в физике высоких энергий.

Основной инструмент современной экспериментальной физики высоких энергий — ускорители со встречными пучками, представляющие собой сложнейшие технические сооружения, соединяющие в себе последние достижения науки и техники во многих областях. Не менее сложными являются и детекторы, используемые для проведения экспериментов, отличительная особенность которых — накопление и обработка огромных объёмов информации об исследуемых процессах. Для этой цели применяются электронные системы регистрации, позволяющие автоматизировать измерение характеристик изучаемых процессов: энергии, координат, временных параметров.

Главной задачей устройств измерения энергии частиц (калориметров), независимо от их конструкции, является эффективное поглощение энергии попадающих в них частиц и преобразование тем или иным способом этой энергии в пропорциональные электрические сигналы. В частности, широко распространены калориметры на базе тяжёлых неорганических кристаллов, в которых энергия частиц преобразуется в световые импульсы и далее с помощью фотоприёмников — в электрические сигналы.

В Институте ядерной физики (ИЯФ) СО РАН в настоящее время работают два электрон-позитронных комплекса со встречными пучками (ВЭПП-4 [1] и ВЭПП-2000 [2]), на которых установлены три детектора (КЕДР [3], КМД-3 (криогенный магнитный детектор) [4] и СНД (сферический нейтральный детектор [5]) для экспериментов по физике

высоких энергий. Во всех трёх детекторах имеются калориметры на основе таких кристаллов. Аппаратура для экспериментов на этих установках разработана и изготовлена сотрудниками ИЯФ СО РАН.

В рамках международного сотрудничества ИЯФ СО РАН на протяжении длительного времени участвует в нескольких экспериментах по физике высоких энергий, в том числе с детектором "Belle II" (Японский национальный центр физики высоких энергий (КЕК)) [6], где зоной ответственности ИЯФ СО РАН, помимо прочего, является электромагнитный калориметр на основе почти 9000 кристаллов йодистого цезия с добавками таллия (CsI(Tl)) общим весом около 43 тонн.

В течение многолетней эксплуатации детекторов неизбежно возникает необходимость их периодической модернизации в соответствии с условиями и задачами новых экспериментов. Это может касаться как отдельных систем, так и детектора в целом. В предлагаемой работе описаны структура и алгоритм функционирования новой электроники электромагнитного калориметра детектора для эксперимента "Belle II".

Поскольку представленная система создавалась в рамках широкой международной коллаборации, то возникшие в ходе работы и устоявшиеся к настоящему времени названия устройств, термины и аббревиатуры имеют англоязычное происхождение и в большинстве случаев не имеют столь же утвердившихся русскоязычных аналогов, что объясняет широкое использование английских терминов в данной публикации.

Постановка задачи. Необходимость кардинального обновления электроники CsI-калориметра, как и многих других систем детектора "Belle", успешно проработавшего более 10 лет (эксперимент "Belle" [7]), связана с проводимой в последние годы и завершающейся в 2015 г. модернизацией электрон-позитронного накопителя в КЕК. Целью модернизации является увеличение светимости установки примерно в 40 раз (эксперимент "Belle II"). К сожалению, вместе с желаемым увеличением скорости регистрации полезных событий значительно осложнится ситуация с фоном и возрастет шум наложений из-за увеличения вероятности наложения сигналов от соседних по времени событий. Также прогнозируется увеличение до 30 кГц частоты запусков (триггер) всей системы сбора данных (ССД) детектора [8].

В связи с этим поставлена задача разработать архитектуру и схемные решения для новой электроники электромагнитного калориметра, удовлетворяющие новым, гораздо более сложным условиям работы как по входным сигналам, так и по алгоритму взаимодействия с остальной системой сбора данных.

Предложенное решение. В существовавшей (с момента создания) электронике калориметра цепь измерения сигналов с каждого кристалла состояла из полупроводникового фотодиода, зарядочувствительного усилителя, расположенных на кристалле, и противошумового фильтра (аналогового усилителя-формирователя), преобразователя амплитуда—цифра, вынесенных за пределы детектора. Оцифровка каждого сигнала на выходе фильтра происходила в одной точке — точке максимума сигнала [8] и в силу существовавших на момент создания электроники технических возможностей осуществлялась в два этапа: сначала амплитуда—время, затем время—цифра, что неизбежно ограничивало скорость оцифровки. Смещение нулевого уровня (пьедестал) определялось перед началом очередного сеанса измерений в отсутствие входных сигналов и вычиталось из амплитуд сигналов при последующей обработке.

В новых условиях существенное влияние на энергетическое разрешение начинает оказывать ранее несущественный шум наложений, возникающий из-за высокой вероятности наложения входных сигналов и приводящий к большим флуктуациям пьедесталов. Подавление этих шумов в прежней архитектуре электроники невозможно. Кроме того, существующие ограничения по скорости обработки сигналов не позволяют работать при прогнозируемой частоте запусков.

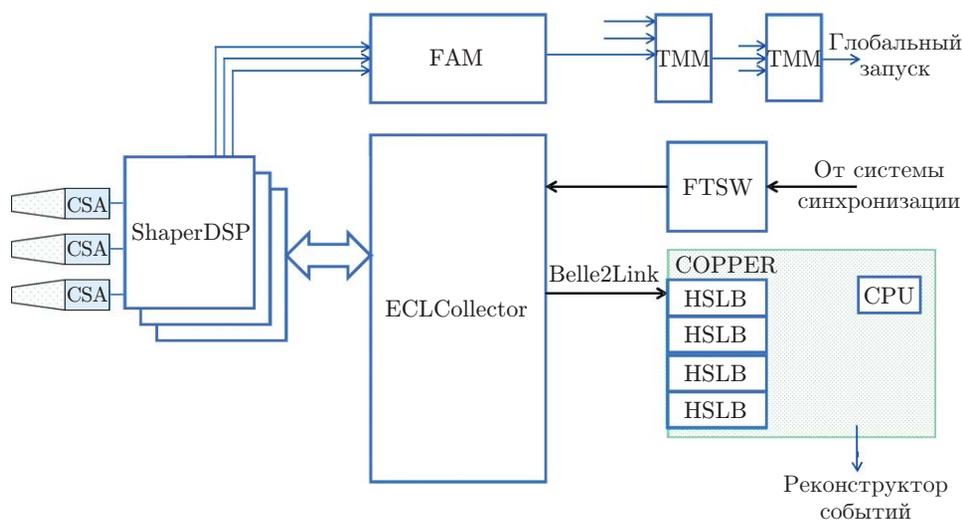


Рис. 1

В этой связи было принято решение разработать новую электронику с архитектурой конвейерного типа, в соответствии с которой сигналы со счётчиков калориметра непрерывно оцифровываются с помощью быстрых АЦП (FADC). Получаемый таким способом цифровой образ сигналов непрерывно обрабатывается для вычисления его амплитуды и времени возникновения. Информация о времени будет использована для подавления шума наложений и фоновых сигналов.

Структура новой электроники калориметра и некоторых элементов верхнего уровня системы сбора данных детектора "Belle II" представлена на рис. 1. Световые импульсы с кристаллов йодистого цезия с помощью полупроводниковых фотодиодов и зарядочувствительных усилителей (CSA — Charge Sensitive Amplifier), расположенных непосредственно на кристаллах, преобразуются в электрические импульсы, которые далее поступают в модули ShaperDSP (Shaper & Digital Signal Processor), сочетающие в себе функции аналогового формирования сигналов, их оцифровки и вычисления амплитуд и времени появления относительно сигналов запуска. При плотности 16 каналов/модуль для обработки сигналов со всех 8736 кристаллов требуются 576 модулей.

Далее данные с 12 модулей ShaperDSP поступают в модуль коллектора электромагнитного калориметра (ECLCollector — Electromagnetic Calorimeter), основной задачей которого является концентрация и передача этих данных по оптической линии в ССД детектора, состоящую из унифицированных модулей COPPER (Common Pipelined Platform for Electronics Readout) [8, 9].

Модули ShaperDSP также формируют сигналы для системы запуска детектора. Предварительно эти сигналы обрабатываются в модулях FAM (Fast Analogue Module) и TMM (Trigger Master Module), которые поставляют в систему запуска информацию о количестве выделенной энергии в данном участке (кластере) калориметра.

Модули ShaperDSP, ECLCollector и FAM выполнены в VME-стандарте. В одном крейте VME размещаются 12 модулей ShaperDSP и по одному модулю ECLCollector и FAM. Вся электроника калориметра размещена в 52 крейтах.

Модуль ShaperDSP. Блок-схема модуля ShaperDSP приведена на рис. 2. Модуль содержит 16 каналов аналогового формирования и оцифровки сигналов. Каждый канал принимает сигналы от одного усилителя CSA и содержит два аналоговых формирователя — медленный (Shaper) и быстрый (Fast Shaper). Сигналы с выходов быстрых формирователей суммируются в соответствии с геометрическим положением счётчиков CsI и далее передаются в систему формирования сигналов запуска.

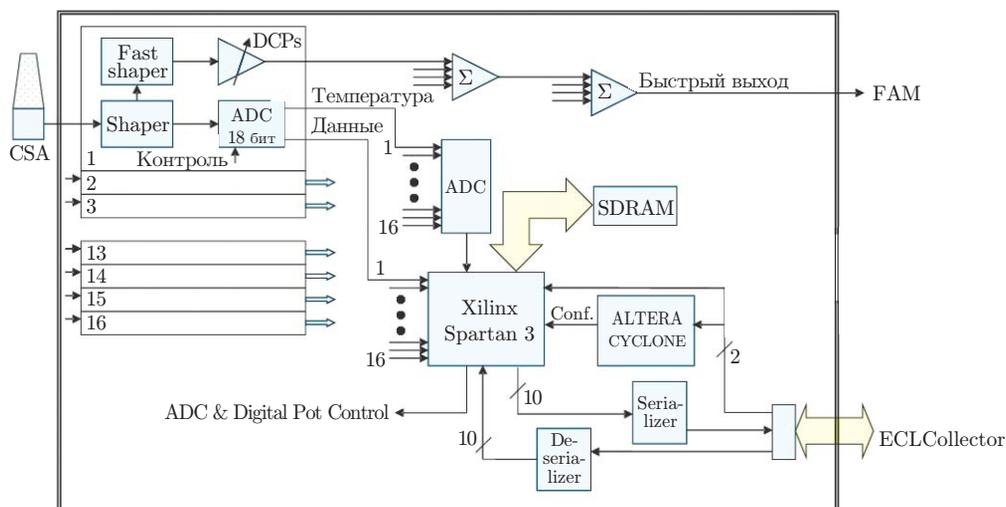


Рис. 2

Параметры медленного формирователя оптимизированы по соотношению сигнал/шум с учётом шума наложений сигналов от соседних событий. Сформированный сигнал с выхода формирователя оцифровывается 18-битным АЦП AD7986, разрядность которого соответствует широкому динамическому диапазону входных сигналов. Частота оцифровки синхронизована с частотой столкновения пучков в накопителе.

Цифровые данные далее подаются на программируемую логическую интегральную схему (ПЛИС) Xilinx Spartan 3, где осуществляется вычисление амплитуды и времени появления сигналов. Схема имеет интерфейс с динамической памятью (SDRAM — Synchronous Dynamic Random Access Memory) для хранения предвычисленных коэффициентов, необходимых для обработки данных, а также выполняет много дополнительных функций.

Интерфейс между этой ПЛИС и модулем коллектора осуществляется последовательным кодом по стандартному UTP-кабелю с четырьмя витыми парами.

Модуль коллектора (ECLCollector). Блок-схема модуля показана на рис. 3. Его основное назначение — приём цифровых данных от 12 модулей ShaperDSP одного крейта и передача их на следующий уровень системы сбора данных, а также передача в модули ShaperDSP синхронизирующих, триггерных и калибровочных сигналов [10].

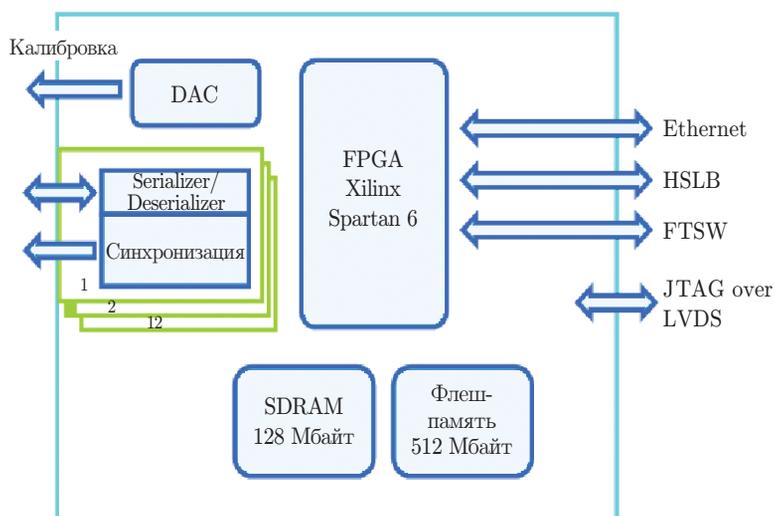


Рис. 3

Для этого модуль ECLCollector оснащён 12 последовательными интерфейсами (Serializer/Deserializer) для связи с модулями ShaperDSP и оптическим интерфейсом (FTSW) на базе гигабитного аппаратного блока на кристалле ПЛИС Xilinx Spartan 6 для передачи данных на верхний уровень ССД.

Модуль ECLCollector также оснащён энергонезависимой флеш-памятью 512 Мбайт для промежуточного хранения и передачи в модули ShaperDSP числовых коэффициентов, необходимых для определения амплитуд и времени возникновения сигналов.

Алгоритмы вычисления амплитуды и времени. Сигналы со счётчиков CsI непрерывно оцифровываются АЦП синхронно с опорной частотой комплекса; интервал T_{SR} между измерениями составляет ~ 570 нс. Измеренные последовательные значения текущей величины сигнала записываются в кольцевой буфер и далее по мере поступления сигналов запуска используются для определения амплитуды и времени сигнала. Для вычислений, относящихся к данному сигналу запуска, берётся 31 последовательное значение в кольцевом буфере. Как показано на рис. 4, a, b , сигнал условно начинается между 16-й и 17-й выборками. Таким образом, первые 16 выборок (значений) содержат информацию о положении базовой линии перед сигналом, а оставшиеся 15 — собственно форму сигнала. Эти величины совместно с усреднённым по 16 точкам значением базовой линии (пьедесталом АЦП) используются в процедуре подгонки, описанной далее.

Для сигнала $F(t)$ с амплитудой A , начинающегося в момент времени t_0 относительно 16-й выборки (см. рис. 4, b), величина выборки

$$y_i = AF(t_i - t_0) + P, \quad (1)$$

где P — величина пьедестала АЦП.

Для вычисления амплитуды A и времени t_0 по значениям выборок y_i необходимо минимизировать функцию

$$\chi^2 = (y_i - AF(t_i - t_0) - P)S_{ij}^{-1}(y_j - AF(t_j - t_0) - P) \rightarrow \min, \quad (2)$$

где $S_{ij} = \overline{(y_i - \bar{y}_i)(y_j - \bar{y}_j)}$ — ковариантная матрица шума, вычисляемая перед стартом измерений. Элементы матрицы при $i = j$ равны дисперсии в соответствующих точках.

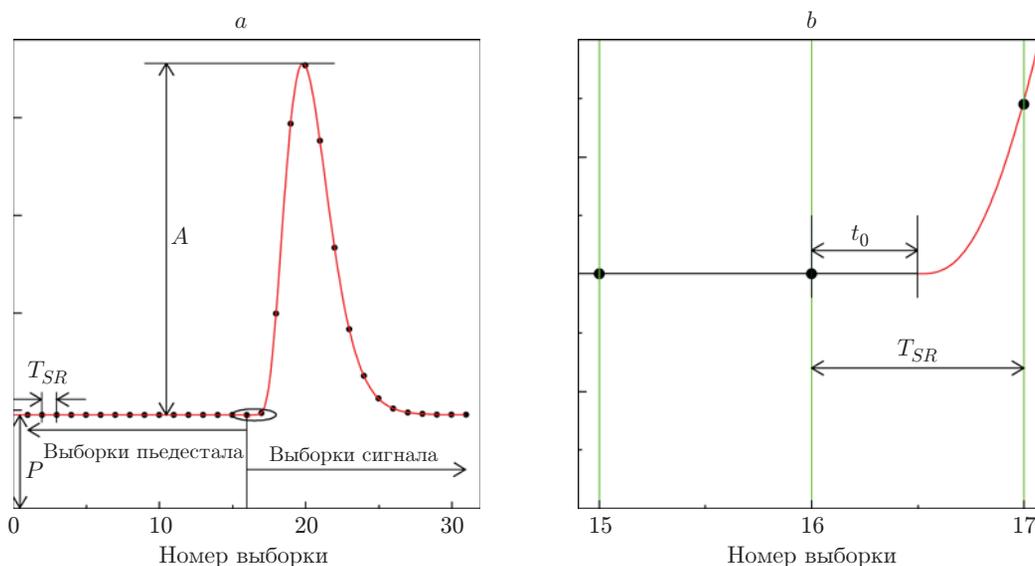


Рис. 4

Для минимизации функции χ^2 функция $F(t)$ в пределах интервала T_{SR} между выборками линейризуется на временной сетке с шагом $\delta t = T_{SR}/96$ и малым сдвигом Δt относительно делений сетки:

$$AF(iT_{SR} + k\delta t + \Delta t) \approx AF(iT_{SR} + k\delta t) + BF'(iT_{SR} + k\delta t) = AF_i^k + BF_i'^k, \tag{3}$$

где $B = A\Delta t$. Значения F_i^k и $F_i'^k$ вычислены на делениях сетки и занесены в таблицу.

Таким образом, уравнение (2) преобразуется в

$$\chi^2 = (y_i - AF_i^k - BF_i'^k - P)S_{ij}^{-1}(y_j - AF_j^k - BF_j'^k - P) \rightarrow \min. \tag{4}$$

Далее процедура минимизации сводится к решению системы линейных уравнений, в результате чего параметры A , B и P находятся как линейная комбинация значений y_i с соответствующими коэффициентами в несколько итераций. В первой итерации полагается, что время появления сигнала $t_0 = t_{tr}$, где t_{tr} — время прихода сигнала триггера, и величины A и B вычисляются при значении параметра $k = t_{tr}/\delta t$. Вторая итерация выполняется при $k = (t_{tr} - B/A)/\delta t$. Установлено, что достаточно трёх итераций для завершения процесса. Упомянутые выше коэффициенты вычисляются по табулированным значениям F_i^k , $F_i'^k$ и S_{ij} .

В области малых амплитуд точность вычисления времени появления сигнала становится хуже, чем точность по времени сигнала запуска. В этом случае остаются только два свободных параметра — A и P и система уравнений решается без итераций.

Некоторые детали аппаратной реализации вычислений представлены далее.

Реализация алгоритма вычислений с помощью ПЛИС. Описанный выше алгоритм был адаптирован для целочисленной арифметики, что естественно при исполнении в ПЛИС. Общая структура проекта для ПЛИС ShaperDSP-модуля представлена на рис. 5.

Данные из АЦП, поступающие в ПЛИС в последовательном виде, после преобразования в параллельный код записываются в циклический буфер ADC DATA ёмкостью 512 слов (выборок) для каждого из 16 каналов. Буфер необходим для минимизации потерь из-за конечного быстродействия вычислителя и статистического разброса интервалов времени между последовательными сигналами запуска.

С аналогичной целью используется буфер FIFO для сигналов триггера, поступающих из модуля ECLCollector и управляющих запуском преобразования в АЦП и положением указателя записи в буфер ADC DATA.

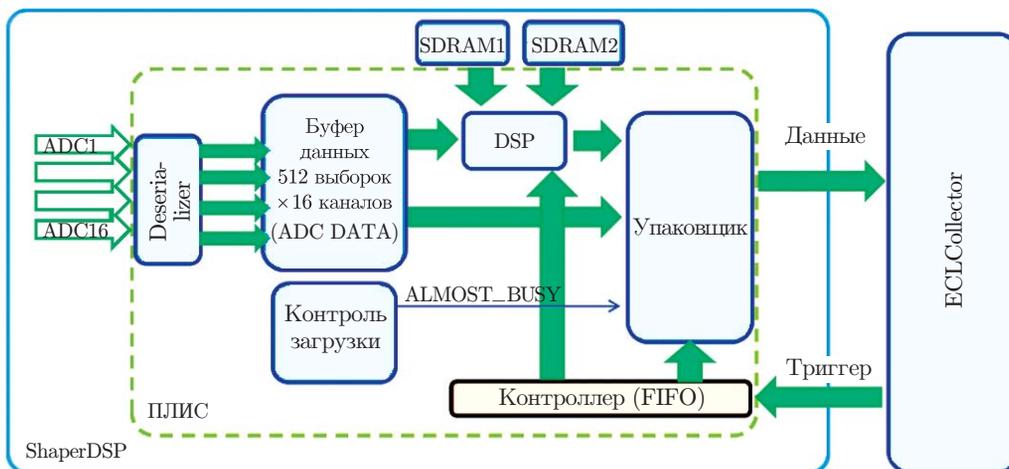


Рис. 5

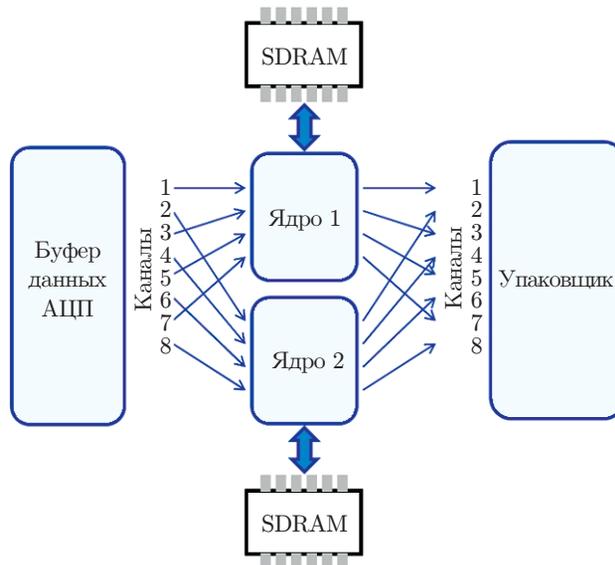


Рис. 6

По мере готовности сигнального процессора для обработки следующего события сырые данные, относящиеся к этому событию, переписываются из буфера ADC в процессор. Процессор также имеет интерфейс с динамической памятью, в которой хранятся предварительно вычисленные коэффициенты. После реконструкции амплитуды сигнала и времени его появления проводится анализ качества результата путём сравнения вычисленного значения χ^2 с установленным эталонным (пороговым) значением.

Для ускорения процесса вычислений в DSP используются два ядра со своей SDRAM-памятью для коэффициентов. Информация от отдельных каналов распределяется между ядрами в соответствии со схемой на рис. 6.

Далее выходные данные из DSP через узел упаковщика, восстанавливающего исходную последовательность каналов, передаются в модуль ECLCollector. При полной загрузке обоих ядер среднее время обработки одного канала составляет 1 мкс.

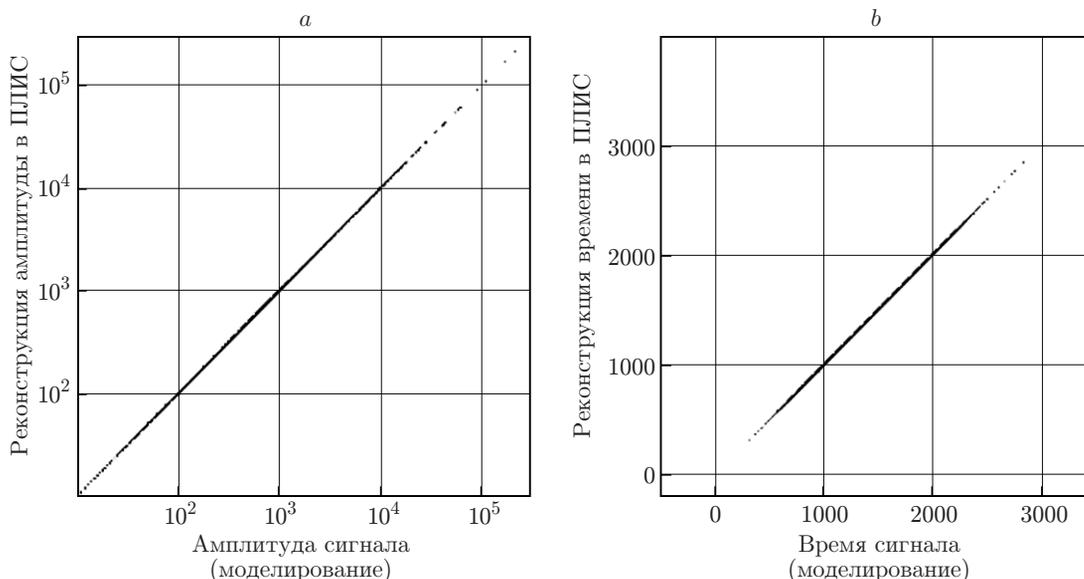


Рис. 7

Для снижения требований к вычислительной мощности процессора при записи данных в буфер DSP используется предварительный амплитудный фильтр. Если амплитуда лежит внутри шумового разброса, то далее цифровая обработка этой группы данных не производится.

В ходе практических испытаний установлено, что ShaperDSP способен обрабатывать информацию со всех 16 каналов своей группы при частоте запусков до 50 кГц, в то время как проектная частота для "Belle II" не превышает 30 кГц при средней плотности срабатывания $\sim 1/3$ каналов.

Результаты проверки. Разработанный алгоритм был всесторонне протестирован в ходе проверки изготовленных модулей ShaperDSP. Результаты практических измерений амплитуды и времени полностью совпали с результатами моделирования (рис. 7). Интегральная нелинейность вычисления амплитуды составляет $\sim 0,5\%$ для низкой энергии (рис. 8, *b*) и уменьшается для больших энергий (рис. 8, *a*). Результаты определения времени для малых и больших энергий показаны на рис. 9, *a, b*.

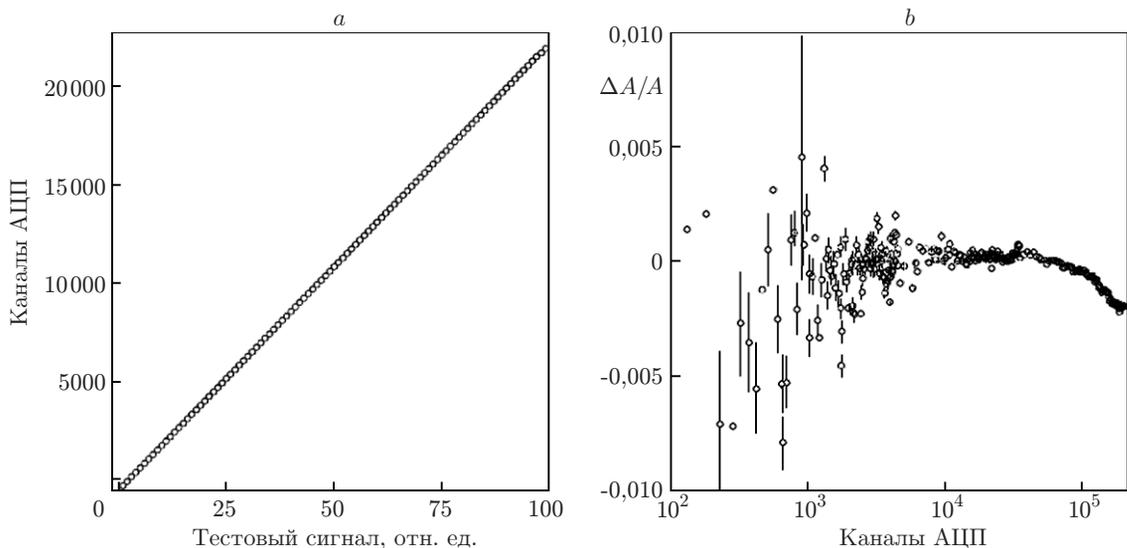


Рис. 8

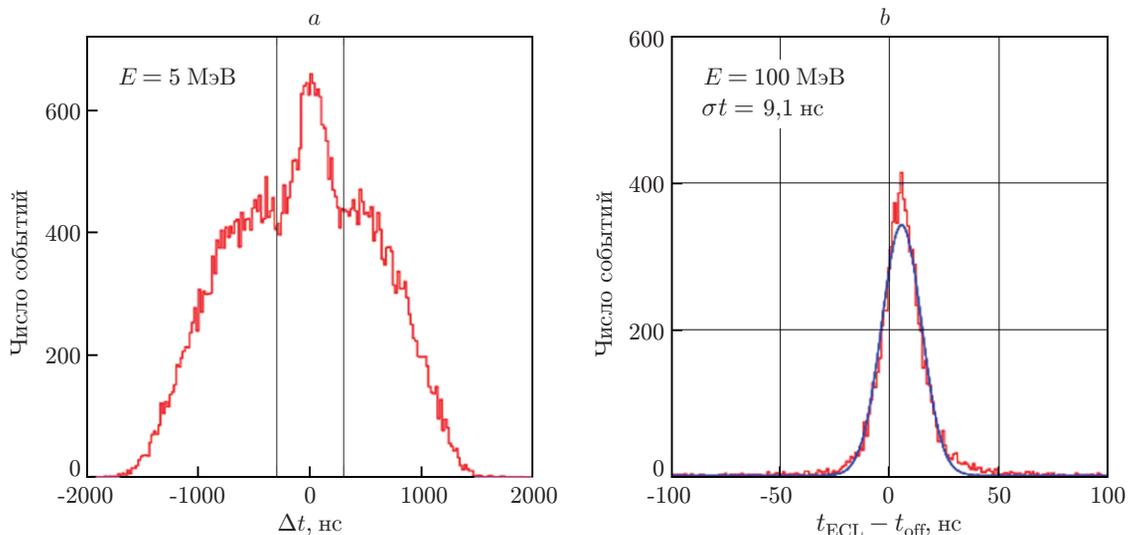


Рис. 9

Заключение. Электроника электромагнитного калориметра детектора для эксперимента "Belle II" была полностью реконструирована на базе конвейерной архитектуры в соответствии с параметрами и алгоритмом работы систем запуска и сбора данных эксперимента.

Электронные схемы модулей ShaperDSP и ECLCollector, а также программное обеспечение для них были всесторонне протестированы с использованием калибровочных сигналов, космических частиц и пучка ускорителя. В ходе испытаний установлено, что параметры электроники калориметра полностью соответствуют заданным значениям. Изготовление и проверка всех модулей (624 шт. ShaperDSP и 52 шт. ECLCollector) заканчивается в 2014 году.

Полученный опыт будет использован при модернизации электроники сферического нейтрального детектора, работающего в ИЯФ СО РАН на электрон-позитронном накопителе ВЭПП-2000. Основной системой СНД является калориметр, состоящий из 1667 кристаллов NaI(Tl). Проводимая в настоящее время реконструкция его электроники позволит не только существенно повысить эффективность выделения некоторых классов событий, возникающих при e^+e^- -аннигиляции, но и улучшить характеристики детектора в целом.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Kiselev V., Anashin V., Anchugov O. et al. VEPP-4M Collider: Status and plans // Proc. of EPAC'98. Stockholm, Sweden, 1998. P. 400–402.
2. Shatunov Yu. M., Evstigneev A. V., Ganyushin D. I. et al. Project of a new electron-positron collider VEPP-2000 // Proc. of the 7th European Particle Accelerator Conference. Vienna, 2000. P. 439–441.
3. Anashin V. V., Aulchenko V. M., Baldin E. M. et al. The KEDR detector // Phys. Part. and Nucl. 2013. **44**, Is. 4. P. 657–702.
4. Fedotov G. V., CMD-3 Collaboration. CMD-3 detector for VEPP-2000 // Nucl. Phys. B. Proc. Suppl. 2006. **162**. P. 332–338.
5. Achasov M. N., Aulchenko V. M., Baru S. E. et al. Spherical neutral detector for VEPP-2M collider // Nucl. Instrum. Meth. Phys. Res. Sect. A. 2000. **449**, Is. 1–2. P. 125–139.
6. Belle II Technical Design Report (KEK Report 2010-1) /Eds. Z. Doležal, S. Uno. KEK, 2010. 473 p.
7. Abashian A., Gotow K., Morgan N. et al. The Belle detector // Nucl. Instrum. Meth. Phys. Res. Sect. A. 2002. **479**, N 1. P. 117–232.
8. Nakao M., Higuchi T., Itoh R., Suzuki S. Y. Data acquisition system for Belle II // Journ. Instrum. 2010. **5**. C12004.
9. Sun D., Liu Z., Zhao J., Xu H. Belle2Link: A global data read out and transmission for Belle experiment at KEK // Phys. Proc. 2012. **37**. P. 1933–1939.
10. Nakao M. Timing distribution for Belle II data acquisition system // Journ. Instrum. 2012. **7**, N 1. C01028.

Поступила в редакцию 16 октября 2014 г.