

ЭЛЕКТРОМАГНИТНЫЙ КАЛОРИМЕТР ДЕТЕКТОРА BELLE-II

В. Е. Шебалин *

от имени группы ECL коллаборации Belle-II

Институт ядерной физики им. Г. И. Будкера СО РАН, Новосибирск, Россия
Новосибирский государственный университет, Новосибирск, Россия

Дано краткое описание электромагнитного калориметра детектора Belle-II. Описан алгоритм реконструкции амплитуды и времени сигналов с калориметра. Представлен статус подготовки калориметра к набору экспериментальных данных.

The paper gives a brief description of the electromagnetic calorimeter of the Belle-II detector. The algorithm of the signal time and amplitude on-line reconstruction is described along with the current status of the electromagnetic calorimeter preparation for the experimental data taking.

PACS: 29.40.Mc; 29.40.Vj

ВВЕДЕНИЕ

В экспериментах с детектором Belle [1] на электрон-позитронном коллайдере КЕКВ, проводимых в лаборатории физики высоких энергий КЕК (Цукуба, Япония) с 1999 по 2010 г., был получен ряд значимых результатов. На коллайдере КЕКВ с энергией позитронов 3,5 ГэВ и электронов 8 ГэВ был достигнут мировой рекорд светимости $2,1 \cdot 10^{34} \text{ см}^{-1}$.

В настоящее время идет подготовка к эксперименту Belle-II [2] на коллайдере SuperKEKB с проектной светимостью приблизительно в 40 раз большей светимости коллайдера КЕКВ. Одной из наиболее важных подсистем детектора является электромагнитный калориметр, служащий для регистрации фотонов, разделения электронов и адронов и формирования сигнала триггера детектора. Поскольку приблизительно треть продуктов распада B -мезонов составляют π^0 -мезоны и другие нейтральные частицы, распадающиеся в фотоны, калориметр должен обладать высоким энергетическим разрешением в

*E-mail: V.E.Shebalin@inp.nsk.su

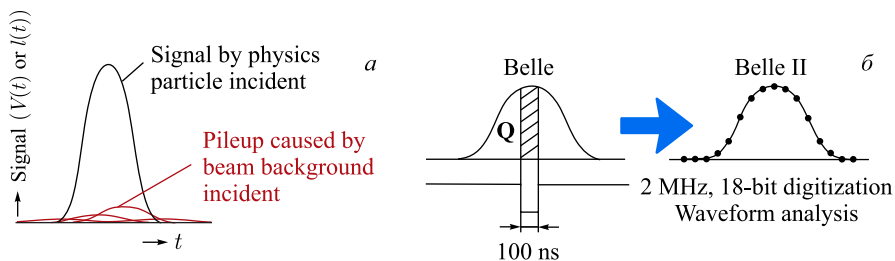


Рис. 1. а) Возникновение шумов наложения. б) Переход от электроники калориметра детектора Belle к Belle-II

широком диапазоне значений энергии от 20 МэВ до 4 ГэВ. Кроме того, сверхвысокая светимость коллайдера накладывает дополнительные требования на характеристики калориметра. Основными проблемами в условиях высокой светимости и, следовательно, высоких фоновых нагрузок, являются шумы наложения (рис. 1), вызванные наложением сигнала от низкоэнергетических фоновых событий, а также ложные кластеры. Образование ложных кластеров связано преимущественно с тем, что частицы пучка выходят с равновесной орбиты и, попадая в конструкции ускорителя, вызывают электромагнитные ливни большой энергии, которые частично регистрируются в калориметре.

Для удовлетворения описанных требований была разработана новая считывающая электроника электромагнитного калориметра [5]. Основная идея модернизации электроники калориметра (см. рис. 1) [3] заключается в уменьшении времени формирования сигнала с 1 до 0,5 мкс для подавления шумов наложения и применения непрерывной оцифровки сигнала и анализа его формы для определения времени прихода сигнала с высоким временным разрешением, что позволит исключать ложные кластеры из обработанных данных.

1. КОНСТРУКЦИЯ КАЛОРИМЕТРА

Механическая конструкция, а также сцинтиляционные счетчики калориметра детектора Belle-II были унаследованы от детектора Belle. Калориметр (рис. 2) собран из 8736 сцинтиляционных счетчиков на основе кристаллов CsI(Tl) общей массой около 43 т. Калориметр состоит из трех частей: передней торцевой, задней торцевой и цилиндрической секций, содержащих 1152, 960 и 6624 сцинтиляционных счетчиков соответственно. Кристаллы выполнены в форме усеченных пирамид со средней площадью поперечного сечения 6×6 см и длиной 30 см ($16,1X_0$). Ось кристаллов ориентиро-

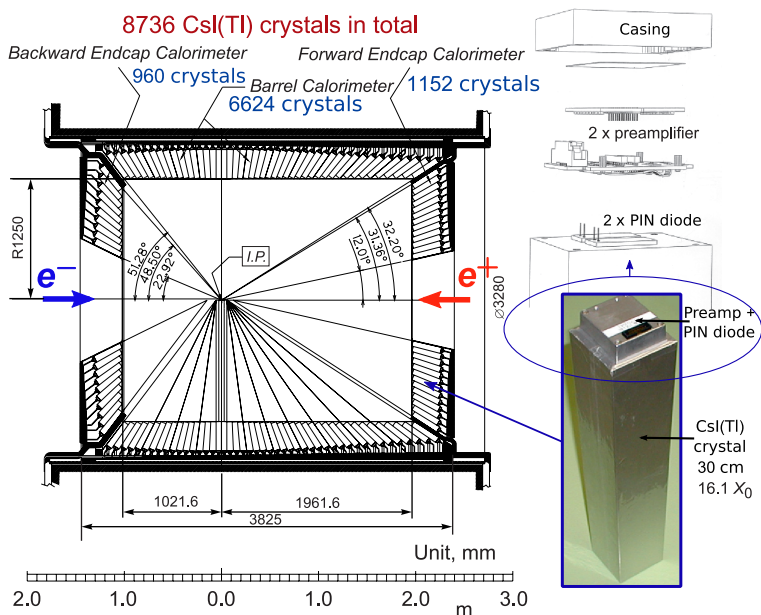


Рис. 2. Конструкция электромагнитного калориметра детектора Belle-II

вана в область взаимодействия пучков. Для увеличения коэффициента светосбора кристаллы обернуты в пористый тефлон толщиной 200 мкм, служащий диффузным отражателем, а затем покрыты слоем алюминизированного лавсана толщиной 60 мкм для электрического экранирования. Сцинтилляционный свет с кристалла преобразуется в электрический сигнал с помощью двух фотодиодов Hamamatsu Photonics S2744-08 с чувствительной областью 10×20 мм, закрепленных на внешнем торце кристалла с помощью акриловой пластины толщиной 1 мм. Импульс тока фотодиодов преобразуется в импульс напряжения двумя зарядочувствительными предусилителями, закрепленными непосредственно над фотодиодом (см. рис. 2). Предусилители оснащены калибровочными входами для подачи сигнала от генератора импульсов.

2. ЭЛЕКТРОНИКА КАЛОРИМЕТРА

Схема электроники калориметра представлена на рис. 3. Сигнал с предусилителей поступает на вход модуля ShaperDSP, который осуществляет суммирование сигнала с двух предусилителей одного счетчика, его формирование, непрерывную оцифровку и анализ формы. Просуммированный сигнал

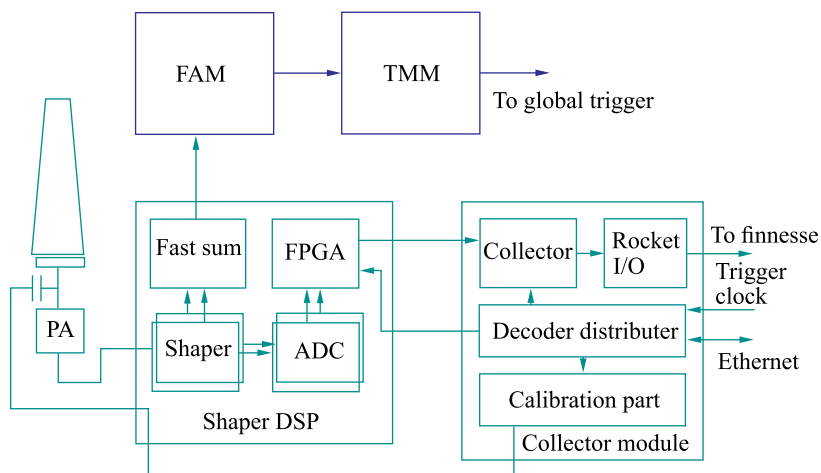


Рис. 3. Схема электроники калориметра

с одного счетчика разделяется на два тракта: спектрометрический и триггерный. В спектрометрическом тракте производится формировка сигнала с постоянной времени $\tau = 0,5$ мкс, его непрерывная оцифровка 18-битным АЦП с интервалом 0,5 мкс и последующий анализ сигнала. Анализ оцифрованного сигнала осуществляется ресурсами ПЛИС Xilinx Saprtan-6 и включает в себя аппроксимацию формы сигнала в реальном времени заданной функцией. В результате аппроксимации определяется амплитуда и время прихода сигнала относительно времени прихода триггера. Измеренные амплитуды и времена сигналов со всех каналов плат в одном VME-крейте передаются в специальный модуль ECLCollector, который осуществляет запаковку данных в посылку и ее передачу в систему сбора данных детектора по оптическому линку.

В триггерном тракте осуществляется суммирование сигналов со всех счетчиков, подключенных к модулю, и его последующее формирование с постоянной времени 200 мкс. Суммарный сигнал с выхода триггерного тракта модулей ShaperDSP подается на входы модулей FAM (Flash-ADC trigger Module) триггерной системы калориметра, формируя так называемую триггерную ячейку. В модулях FAM производится оцифровка сигнала с частотой 64 МГц, оцифрованные значения сигнала сравниваются с пороговым (≈ 100 МэВ), при превышении которого вычисляется амплитуда и время сигнала, которые передаются в модуль TMM (Trigger and Monitoring Module). В модуле TMM формируются аргументы триггерной системы калориметра, которые, в свою очередь, передаются в блок глобального решения триггера детектора GDL (Global Decision Logic).

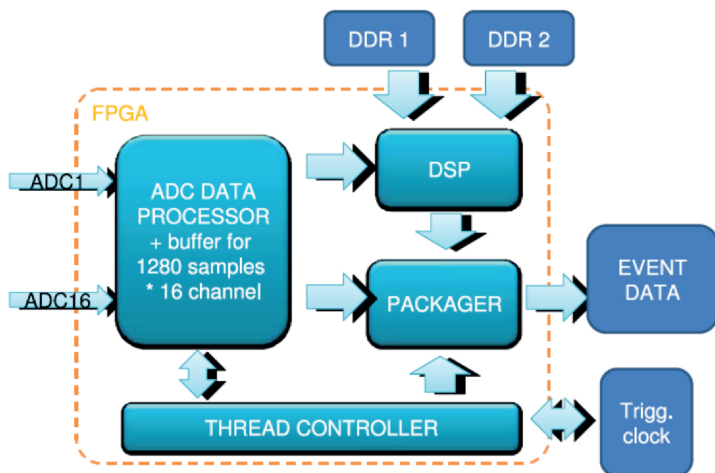


Рис. 4. Блок-схема встроенного программного обеспечения ПЛИС модулей ShaperDSP

Упрощенная блок-схема встроенного программного обеспечения ПЛИС представлена на рис. 4. Анализ сигнала производится в блоке DSP (Digital Signal Processor) по следующему принципу.

Сигнал на выходе формирователя непрерывно оцифровывается с интервалом времени $\Delta T = 567$ нс. Триггер детектора инициирует процесс восстановления амплитуды и времени прихода сигнала в соответствии со следующим алгоритмом. Набор оцифрованных значений сигнала y_i аппроксимируется известной функцией отклика $F(t) = Af(t - \tau) + p$ методом минимизации критерия χ^2 :

$$\chi^2(A, p, \tau) = \sum_{ij} (y_i - Af(i\Delta T - \tau) - p) S_{ij}^{-1} (y_j - Af(j\Delta T - \tau) - p), \quad (1)$$

где A — амплитуда сигнала; τ — момент времени начала сигнала; p — пьедестал АЦП; $S_{ij} = \overline{(y_i - \overline{y}_i)(y_j - \overline{y}_j)}$ — ковариационная матрица шумов электроники.

Функция отклика электроники табулируется в точках по времени с интервалом $\delta T = \Delta T/96$, а функция $f(t)$ раскладывается в ряд Тейлора до первого порядка разложения вблизи табулированных точек:

$$\begin{aligned} Af(i\Delta T - t_m + \delta t) &= Af(i\Delta T - t_m) + A\delta t f'(i\Delta T - t_m) = \\ &= Af(i\Delta T - t_m) + Bf'(i\Delta T - t_m) = Af_i^m + Bf_i^m, \quad (2) \end{aligned}$$

где δt – отклонение времени τ от точки t_m , $B = A\delta t$, суммирование производится по индексам оцифрованных значений i и j . Функционал $\chi^2(A, B, p)$ является квадратичной формой по A , B и p :

$$\chi^2(A, B, p) = \sum_{ij} (y_i - Af_i^m - Bf_i'^m - p) S_{ij}^{-1} (y_j - Af_j^m - Bf_j'^m - p). \quad (3)$$

Минимизация χ^2 приводит к системе из трех линейных уравнений:

$$\begin{cases} \sum_{ij} f_i^m S_{ij}^{-1} (y_j - Af_j^m - Bf_j'^m - p) = 0, \\ \sum_{ij} f_i'^m S_{ij}^{-1} (y_j - Af_j^m - Bf_j'^m - p) = 0, \\ \sum_{ij} S_{ij}^{-1} (y_j - Af_j^m - Bf_j'^m - p) = 0. \end{cases} \quad (4)$$

Решением системы являются линейные функции от y_i :

$$A = \sum_k \alpha_k^m y_k, \quad B = \sum_k \beta_k^m y_k, \quad p = \sum_k \gamma_k^m y_k, \quad (5)$$

где α_k^m , β_k^m и γ_k^m – массивы коэффициентов, которые вычисляются из f_i^m , $f_i'^m$, S_{ij}^{-1} . Индекс m начального приближения по времени сигнала вычисляется из времени триггера $\tau = T_{\text{trg}}$. Решение системы (4) дает амплитуду и время $\tau^{\text{new}} = \tau - B/A$. Из нового времени τ^{new} вычисляется следующее приближение индекса m , и повторяется процесс минимизации. Для сходимости достаточно трех итераций.

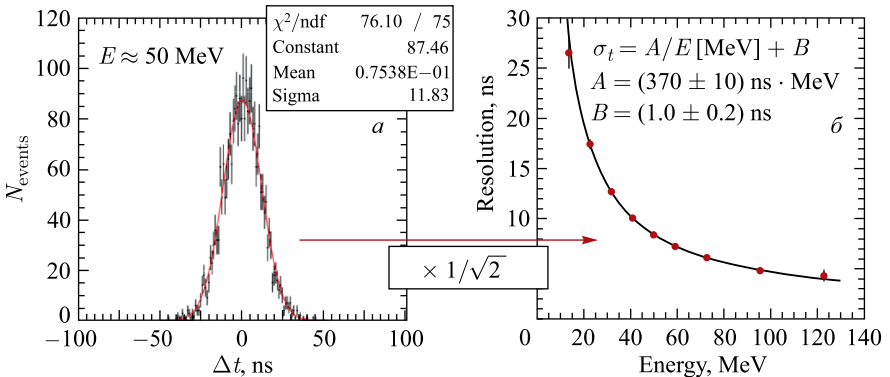


Рис. 5. Временное разрешение счетчиков калориметра

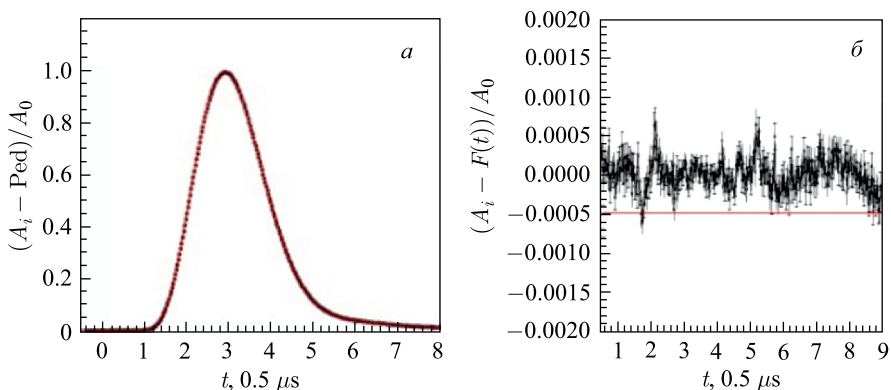


Рис. 6. а) Усредненная форма сигнала с калориметра. б) Отклонение измеренного сигнала от аппроксимирующей функции

Описанный выше подход позволяет достичь хорошего временного разрешения. Временное разрешение калориметра было измерено с помощью космических частиц. На рис. 5 представлено временное разрешение в зависимости от энерговыделения в счетчике калориметра. Временное разрешение хорошо описывается функцией $\sigma_t = 370/E[\text{MeV}] + 1$ нс.

Для восстановления амплитуды и времени сигнала необходимо знать форму сигнала с хорошей точностью для каждого канала электроники. Для этого проводится специальная калибровка формы сигнала [4] по данным прохождения космических частиц через калориметр. С использованием начального приближения функции $f(t)$ для каждого события оцифрованные значения сигнала нормируются на измеренную амплитуду и сдвигаются на величину измеренного времени. Таким образом строится усредненная форма сигнала (рис. 6), которая аппроксимируется функцией отклика со свободными параметрами формы сигнала.

3. ТЕКУЩИЙ СТАТУС

В настоящее время подготовка калориметра к работе находится в заключительной фазе. Вся электроника калориметра, включающая в себя 576 модулей ShaperDSP и 52 модуля ECLCollector, произведена и установлена в детектор. В феврале и сентябре 2017 г. задняя и передняя торцевые секции калориметра были установлены в детектор и подключены к считывающей электронике. Подготовлено программное обеспечение для настройки параметров электроники и системы сбора данных. Проводятся ежедневные

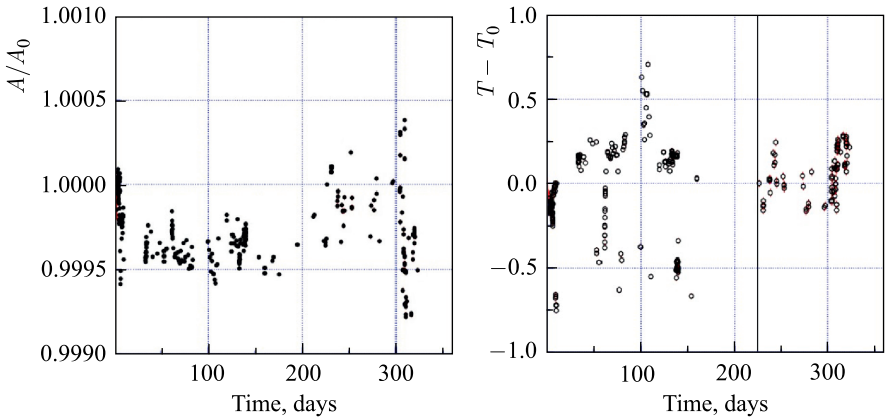


Рис. 7. а) Зависимость амплитуды калибровочного сигнала от времени. б) Зависимость среднего времени начала калибровочного сигнала от времени проведения калибровки

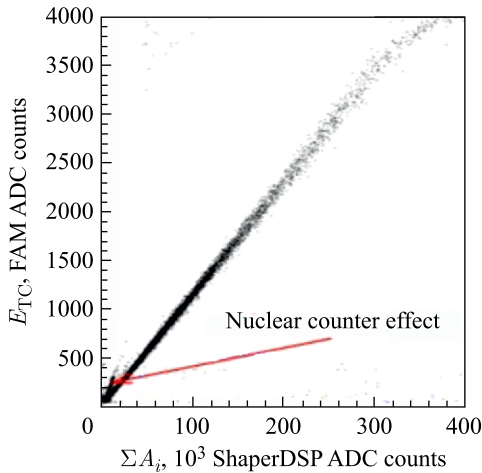


Рис. 8. Зависимость суммарного энерговыделения в кристаллах, принадлежащих одной триггерной ячейке, от энерговыделения в триггерной ячейке, измеренного в модулях триггерной электроники калориметра FAM

калибровки калориметра с генератором импульсов и периодический набор данных с космическими частицами. На рис. 7 приведены характерные зависимости амплитуды и времени калибровочного сигнала, измеренные модулем ShaperDSP, от времени. Из графиков видно, что относительная нестабильность электроники составляет менее 10^{-4} . Были проведены заходы набора

данных с калориметра и триггерной системы калориметра. На рис. 8 приведено суммарное энерговыделение в кристаллах калориметра, принадлежащих одной триггерной ячейке, измеренное модулями ShaperDSP в зависимости от энергии, измеренной в триггерных модулях FAM. Данные подтверждают соответствие амплитуд, измеренных в спектрометрическом тракте, амплитудам, измеренным в триггерной электронике. В настоящее время ведутся работы по более глубокому тестированию электроники калориметра и системы сбора данных.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Вся электроника электромагнитного калориметра произведена и установлена в детектор. Проводятся регулярные калибровочные заходы с генератором импульсов и длительные заходы набора данных с космическими частицами. В настоящее время осуществляется финальная настройка системы сбора данных.

Благодарности. Данная работа была поддержана РФФИ (грант N-14-50-00080).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Abashian A., Gotow K., Morgan N., Piilonen L., Schrenk S., Abe K., Adachi I., Alexander J. P., Aoki K., Behari S., Doi Y., Enomoto R., Fujii H., Fujita Y., Funahashi Y.* // Nucl. Instr. Meth. A. 2002. V. 479. P. 117.
2. *Abe T., Adachi I., Adamczyk K., Ahn S., Aihara H., Akai K., Aloï M., Andricsek L., Aoki K., Arai Y., Arefiev A., Arinstein K., Arita Y., Asner D. M., Aulchenko V.* Belle II Technical Design Report. 2010. KEK Report 2010-1.
3. *Miyabayashi K., Aulchenko V., Cheon B. G., Kuzmin A. S., Matvienko D., Nakamura I., Shebalin V., Shwartz B., Unno Y., Usov Y., Vinokurova A., Zhulanov V.* // J. Instr. 2014. V. 9. P09011.
4. *Aulchenko V., Bobrov A., Ferber T., Kuzmi A., Miyabayshi K., de Nardo G., Shebalin V., Sibidanov A., Usov Yu., Zhulanov V.* // J. Instr. 2015. V. 12. C08001.
5. *Аульченко В. М., Жилич В. Н., Жуланов В. В., Кузьмин А. С., Матвиенко Д. В., Миябаяши К., Накамура И., Усов Ю. В., Чеон Б. Г., Шварц Б. А., Шебалин В. Е.* // Автометрия. 2015. Т. 51. С. 39–47.
6. *Винокурова А. Н.* Дипломная работа на соискание степени бакалавра. Новосибирск: НГУ, 2004.