

АЛГОРИТМ ОПРЕДЕЛЕНИЯ ВРЕМЕНИ ПРИХОДА СИГНАЛОВ ОТ ЖИДКОКСЕНОНОВОГО КАЛОРИМЕТРА ДЕТЕКТОРА КМД-3

Ю. В. Юдин^{1,2,*}, Л. Б. Эпштейн^{1,2,3}, К. Ю. Михайлов^{1,2}

¹ Институт ядерной физики им. Г. И. Будкера СО РАН, Новосибирск, Россия

² Новосибирский государственный технический университет,
Новосибирск, Россия

³ Новосибирский государственный университет, Новосибирск, Россия

В детекторе КМД-3 события рождения $n-\bar{n}$ -пары могут быть зарегистрированы только калориметрами, в которых происходит большое энерговыделение от аннигиляции антинейтрона. Для распознавания таких событий необходимо определять время появления сигнала в калориметре с точностью до нескольких наносекунд. Предварительные оценки показали, что необходимое временное разрешение может быть получено только по сигналам жидкоксеронового калориметра. Форма выходных электрических сигналов жидкоксеронового калориметра существенно отличается от события к событию, что вносит дополнительную погрешность при измерении времени прихода сигналов даже с использованием дискриминатора от постоянной доли сигнала. Разработан специальный алгоритм цифровой обработки сигналов жидкоксеронового калориметра, который позволяет уменьшить погрешность определения времени прихода сигналов, вносимую различием их форм. Приведены описание алгоритма и результаты, полученные после его оптимизации на данных реальных событий.

In CMD-3 detector, the $n-\bar{n}$ pair production events can be detected only by the calorimeters where a large energy deposition from antineutron annihilation occurs. For identification of such events, it is necessary to determine the arrival time of the calorimeter signals with accuracy of several nanoseconds. Preliminary estimations have shown that the required time resolution can be obtained only basing on signals of the liquid-xenon calorimeter. The shapes of the liquid-xenon calorimeter's output electric signals differ substantially from event to event, thus an additional error is added to the measured signal arrival time even when a constant-fraction discriminator is used. For measuring the arrival time of the liquid-xenon calorimeter's signals, a special digital signal processing algorithm has been developed which allows one to reduce the error of time determination added by the signals' shapes difference. In this paper, the developed algorithm is described and the results obtained after optimization of this algorithm on the real events data are presented.

PACS: 07.50.Qx; 06.30.-k

* E-mail: yu.v.yudin@inp.nsk.su

ВВЕДЕНИЕ

Детектор КМД-3 [1, 2] — универсальный детектор, предназначенный для регистрации заряженных частиц и фотонов. Один из процессов, изучаемых в эксперименте КМД-3, — рождение $n-\bar{n}$ -пары в результате e^+e^- -аннигиляции при энергиях немного выше порога рождения. Отличительным признаком этого процесса является большое энерговыделение от аннигиляции антинейтрона в торцевом или баррельном калориметре. В жидкоксеноновом баррельном калориметре аннигиляция антинейтрона происходит через 5 нс или более после столкновения пучков. Для распознавания таких событий необходимо определять время появления сигнала в калориметре с точностью до несколько наносекунд.

Жидкоксеноновый калориметр (LXe-калориметр) [3, 4] состоит из 14 коаксиальных слоев ионизационных камер с катодным и анодным считыванием. Анодные ячейки из разных слоев, расположенные «стопкой» в радиальном направлении, соединены проводником и образуют «башню». Таким образом, собрано 264 «башни», ориентированные к месту встречи пучков.

Моделирование показало, что в большинстве событий аннигиляции антинейтрона почти все энерговыделение происходит в объеме одной или двух «башен» жидкоксенонового калориметра и наибольшее энерговыделение ($E_{\text{деп}}$) в одной «башне» составляет 50–600 МэВ. Соответственно, при таких событиях амплитуды сигналов могут различаться примерно в 12 раз. Кроме того, механизм индуцирования электрического сигнала в «башне» таков, что форма сигнала существенно разнится от события к событию. При таких различиях (по амплитуде и форме) сигналов, которые необходимо регистрировать, дискриминатор от постоянной доли сигнала (ДПДС, Constant-Fraction Discriminator) срабатывает с наименьшим разбросом по времени, но и в этом случае погрешность измерения времени превышает допустимую.

Разработан специальный алгоритм цифровой обработки сигналов жидкоксенонового калориметра, предназначенный для измерения времени прихода сигналов и их амплитуды, который позволяет уменьшить погрешность определения времени, вносимую различием формы сигналов. Амплитуда и время прихода сигнала определяются методом подгонки вэйвформы сигнала эталонной вэйвформой (ЭВФ). Однако из-за различия форм сигналов в разных событиях невозможно подгонять все сигналы единой ЭВФ. Поэтому при подгонке каждого конкретного сигнала используется скорректированная ЭВФ, полученная из базовой ЭВФ (она вычисляется для каждого канала индивидуально) с помощью специальной процедуры коррекции. Параметры алгоритма оптимизированы на данных реальных событий для достижения наилучшего временного разрешения.

ВХОДНАЯ ИНФОРМАЦИЯ ДЛЯ ИЗМЕРЕНИЙ

Для отработки методики измерения времени прихода сигналов был изготовлен прототип электроники «башен», включающий в себя четыре измерительных канала. Сигналы каждой «башни» усиливаются зарядочувствительным усилителем (ЗЧУ). ЗЧУ интегрирует токовый сигнал, поэтому типичная форма нарастающего фронта усиленного сигнала близка к параболической, однако параметры параболы в разных событиях различаются по форме входных токовых сигналов. Усиленные сигналы поступают на АЦП, который производит дискретизацию сигналов на частоте 100 МГц. Поток данных дискретизации записывается в кольцевой буфер. При поступлении команды «Старт» (запуск регистрации события) через фиксированное время запись данных останавливается. Команда «Старт» вырабатывается с разбросом по времени, но она синхронизована с моментами столкновения пучков в коллайдере. Задержка остановки записи данных во всех каналах одинакова и подобрана так, что запись останавливается через 2120/2200/2280/2360 нс после события, инициировавшего выработку команды «Старт». Из каждого канала передаются в компьютер для обработки последние 252 значения сигнала. Таким образом, участок вэйвформы сигнала, поступающий в обработку, включает в себя 16–48 значений, оцифрованных до начала сигнала, и часть нарастающего фронта сигнала (рис. 1). К сожалению, при анализе вэйвформ от реальных событий выяснилось, что к обработке пригодна только часть вэйвформы длиной около 200 значений, так как конечная часть содержит сильную помеху от команды «Старт».

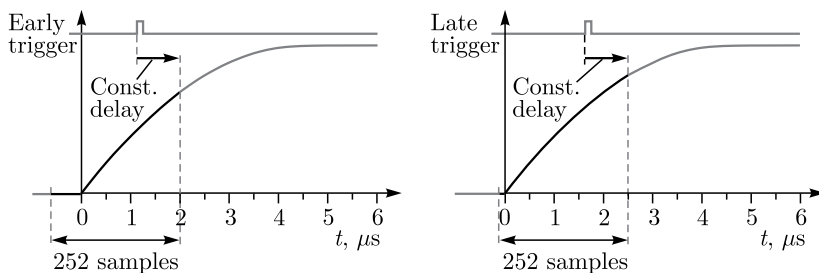


Рис. 1. Положение участка вэйвформы, поступающего в обработку, относительно момента события при различной задержке выработки сигнала «Триггер»

ПОСТРОЕНИЕ БАЗОВЫХ ЭТАЛОННЫХ ВЭЙВФОРМ

Пробные обработки показали, что наилучшее временное разрешение получается, когда производится подгонка вэйвформы первой производной сигнала (а не вэйвформы самого сигнала). Поэтому базовая ЭВФ для каждого канала строится на основе первой производной от вэйвформы типичного сигнала этого канала.

Как пояснялось выше, в вэйвформах сигнала, записанных в разных событиях, начало собственно сигнала расположено по-разному. Поэтому для вычисления вэйвформы типичного сигнала необходимо перед усреднением сдвигать сигналы в вэйвформах событий так, чтобы начало сигнала располагалось на фиксированном расстоянии от начала вэйвформы. Сведение сигналов проводилось следующим образом. Вэйвформа события U_{in} двукратно сглаживается методом «бегущего среднего»: сначала по восьми последовательным значениям, затем по 24. Сглаженная вэйвформа обрабатывается процедурой, эмулирующей работу ДПДС. По значениям сглаженного сигнала U_{smooth} вычисляется разностная функция

$$(Y_{sub})_{i+40} = (U_{smooth})_{i+40} - 3(U_{smooth})_i, \quad i \in [1; 160],$$

эквивалентная вычитанию задержанного сигнала из незадержанного, которое производится в ДПД. Номер шага N_0 , на котором функция Y_{sub} меняет знак с «+» на «-» (рис. 2), связан с положением начала сигнала, в нашем случае начало расположено в среднем на 47 шагов левее. С учетом найденного N_0 сначала считается сумма 80 значений сглаженного сигнала с индексами $i \in [N_0 - 7; N_0 + 72]$, которая примерно пропорциональна энерговыделению в «башне» в данном событии. Если эта сумма больше 54 000, что в среднем соответствует $E_{dep} \geq 200$ МэВ, то сигнал принимается к усреднению. Тогда в исходной вэйвформе этого события все значения сдвигаются на $(N_0 - 47) - 14$ шагов влево и, таким образом, условное начало сигнала позиционируется на расстоянии 14 шагов от начала вэйвформы. После этого вэйвформа прибавляется к аккумулируемой сумме вэйвформ. Накопленная сумма делится на число просуммированных вэйвформ сигналов, и в результате получается усредненная вэйвформа U_{typ} . Для вычисления усредненной вэйвформы каждого канала было отобрано около 2000 сигналов.

Перед вычислением усредненных вэйвформ параметры сглаживания и процедуры ДПДС были оптимизированы для получения наименьшей

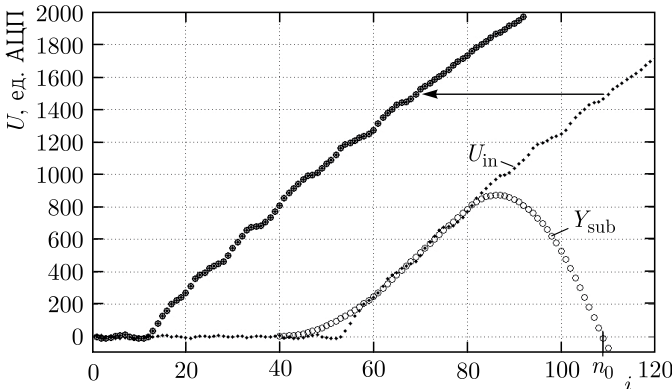


Рис. 2. Позиционирование сигналов на фиксированном расстоянии от начала вэйвформы

погрешности определения времени прихода сигналов. Для подбора параметров использовались события упругого e^+e^- -рассеяния, в которых разброс времени появления сигналов в «башне» менее 1 нс. Для сигналов, соответствующих $E_{\text{dep}} \geq 200$ МэВ, удалось получить временное разрешение не хуже 5 нс. Это значит, что для более 95% таких сигналов погрешность определения времени прихода сигнала не превышает ± 10 нс, что соответствует ± 1 шагу.

Усредненная вэйвформа U_{typ} каждого канала представляет собой типичный сигнал этого канала. Для построения базовой ЭВФ вэйвформа типичного сигнала U_{typ} сначала сглаживалась методом «бегущего среднего» по восьми последовательным значениям. По сглаженной усредненной вэйвформе $U_{\text{typ_smooth}}$ вычислялась вэйвформа первой производной типичного сигнала $Y_{\text{deriv_typ}}$:

$$(Y_{\text{deriv_typ}})_i = (U_{\text{typ_smooth}})_{i+4} - (U_{\text{typ_smooth}})_{i-3}.$$

Отметим, что $(U_{\text{typ_smooth}})_{i+4}$ и $(U_{\text{typ_smooth}})_{i-3}$ вычислены по двум соседним неперекрывающимся группам по восьми значениям U_{typ} . Для примера полученные таким образом вэйвформы $Y_{\text{deriv_typ}}$ двух каналов показаны на рис. 3. Выброс и затухающие колебания в начале сигнала обусловлены передаточной функцией аналогового тракта канала, поэтому для правильной подгонки реальных сигналов эти особенности должны присутствовать в базовой ЭВФ. Отклонения от линейной функции, присутствующие на спаде, обусловлены неполным подавлением помех, поэтому эти отклонения необходимо убрать. Участок вэйвформы с $(Y_{\text{deriv_typ}})_{41}$ по последнее значение $(Y_{\text{deriv_typ}})_{240}$ заменяется значениями линейной функции $(y_{\text{templ}})_i = a_{\text{templ}} \cdot i + b_{\text{templ}}$, коэффициенты которой определяются методом линейной регрессии по участку с $(Y_{\text{deriv_typ}})_{49}$ по $(Y_{\text{deriv_typ}})_{144}$ (длина этого участка кратна восьми для наилучшего подавления помехи 12,5 МГц, наводимой на «башню» пучками частиц в коллайдере). Построенная таким образом базовая ЭВФ Y_{templ} является, по сути, производной отклика реального аналогового тракта канала на *идеализированный* типичный сигнал «башни», т. е. на токовый импульс

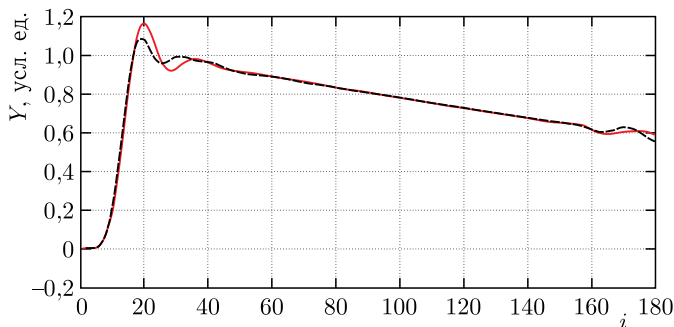


Рис. 3. Производные усредненных вэйвформ двух каналов

с бесконечно коротким фронтом и линейным спадом длительностью 4,5 мкс [4]. Середина нарастающего фронта базовой ЭВФ, расположенная на расстоянии 14 шагов от ее начала, соответствует положению фронта токового импульса. Базовая ЭВФ каждого канала вместе с коэффициентами линейной функции y_{templ} сохраняется в файл для последующего использования.

ИЗМЕРЕНИЕ ВРЕМЕНИ ПРИХОДА СИГНАЛОВ «БАШЕН»

Анализ большого числа реальных сигналов показал, что различие форм сигналов в разных событиях можно свести к следующему. Если сгладить сигнал так, как это делалось при вычислении усредненных вэйвформ, то на интервале, начинающемся после релаксации начального выброса и заканчивающемся в 2–2,2 мкс от начала сигнала, производная сигнала спадает почти линейно, с незначительными отклонениями от линейной функции. Однако время T_{0_sig} от условного начала сигнала до момента, когда линейная функция, аппроксимирующая спад производной сигнала, спадает до 0, в разных событиях различается в несколько раз. Именно поэтому при определении времени прихода сигнала методом подгонки невозможно использовать единую ЭВФ. Вследствие этого факта алгоритм определения времени прихода сигнала состоит из трех этапов.

На первом этапе для определения времени прихода сигнала используются те же процедуры, которые применялись при вычислении усредненных вэйвформ (с теми же значениями параметров сглаживания и параметров эмуляции ДПДС). Номер шага N_{beg} (от начала вэйвформы), на котором расположено условное начало сигнала, принимается равным $N_0 - 47$. Если $N_{\text{beg}} < 14$, то сигнал пришел раньше, чем произошло регистрируемое событие, поэтому обработка такого сигнала прекращается.

На втором этапе сначала вэйвформа события сглаживается, потом вычисляется вэйвформа производной сигнала $Y_{\text{deriv_sig}}$. Это делается так же, как при вычислении производной типичного сигнала. Затем находится линейная функция $y_{\text{sig}} = a_{\text{sig}}(t/T_s) + b_{\text{sig}}$ (здесь T_s — период дискретизации сигнала, в нашем случае $T_s = 10$ нс), аппроксимирующая спад производной. Коэффициенты линейной функции вычисляются методом линейной регрессии по участку, выбираемому при обработке каждого сигнала из следующих соображений. Участок начинается сразу после релаксации начального выброса, со значения $(Y_{\text{deriv_sig}})_{N_{\text{beg}}+37}$. Длина участка должна быть как можно больше, и для наилучшего подавления помехи 12,5 МГц должна быть кратна восьми. В то же время правая граница участка не должна попадать в область помехи от команды «Старт», в том числе и в тех событиях, в которых «Старт» был выработан с наименьшей задержкой (в этих событиях условное начало сигнала расположено дальше всего от начала записанной вэйвформы, $N_{\text{beg}} = 64 - 66$). В процессе пробных обработок была выбрана оптимальная длина участка, равная 96 значениям.

Время T_{0_sig} однозначно связано с коэффициентами a_{sig} и b_{sig} :

$$T_{0_sig} = \frac{b}{-a} - N_{beg}T_s.$$

Теперь необходимо скорректировать базовую ЭВФ так, чтобы в скорректированной ЭВФ Y_{corr} время T_{0_corr} от условного начала сигнала до момента, когда линейная функция y_{corr} , аппроксимирующая спад Y_{corr} , уменьшается до 0, равнялась T_{0_sig} . При этом необходимо учесть следующее соображение. Напомним, что базовая ЭВФ является производной отклика аналогового тракта канала на идеализированный типичный токовый сигнал «башни» длительностью 4,5 мкс, фронт которого расположен в 14 шагах от начала ЭВФ. Соответственно, линейная функция y_{templ} , представляющая спад Y_{templ} , пропорциональна линейному спаду этого сигнала, а значение $(y_{templ})_{14}$ пропорционально начальному значению тока в этом сигнале. Аналогично скорректированная ЭВФ Y_{corr} будет являться производной отклика аналогового тракта канала на идеализированный токовый сигнал «башни» длительностью T_{0_corr} , а значение $(y_{templ})_{14}$ пропорционально начальному значению тока в этом сигнале. Чтобы обеспечить измерение E_{dep} , при построении Y_{corr} начальное значение тока в соответствующем ей идеализированном сигнале длительностью T_{0_corr} должно равняться начальному значению тока в идеализированном типичном сигнале, соответственно, должно быть выполнено условие $(y_{corr})_{14} = (y_{templ})_{14}$. С учетом вышеизложенных соображений коэффициенты функции y_{corr} рассчитываются по формулам

$$a_{corr} = -\frac{a_{templ} \cdot 14 + b_{templ}}{T_{0_sig}/T_s}, \quad b_{corr} = (a_{templ} \cdot 14 + b_{templ}) + a_{corr} \cdot (-14).$$

На участке базовой ЭВФ с индексами $i \in [14; 54]$ делается плавный переход от исходных значений к скорректированным значениям

$$(Y_{corr})_i = (Y_{templ})_i + [(a_{corr} \cdot i + b_{corr}) - (a_{templ} \cdot i + b_{templ})] \frac{i - 14}{40},$$

после чего остальная часть базовой ЭВФ с индексами $i \in [55; 240]$ заменяется значениями линейной функции $(y_{corr})_i$. Процедура коррекции ЭВФ показана на рис. 4.

На третьем этапе методом подгонки финально определяется время прихода сигнала, а также его амплитуда. Для этого полученная на втором этапе взвйвформа производной сигнала Y_{deriv_sig} подгоняется скорректированной ЭВФ. Поскольку ЭВФ Y_{corr} задана дискретными значениями с шагом, равным T_s , при подгонке времени, «сдвинутой» на нецелое число шагов, значения Y_{corr} рассчитываются методом линейной интерполяции.

Для подбора параметров алгоритма и определения достигнутого временного разрешения использовались события упругого e^+e^- -рассеяния. Один из тестовых наборов таких событий был отобран из данных, запи-

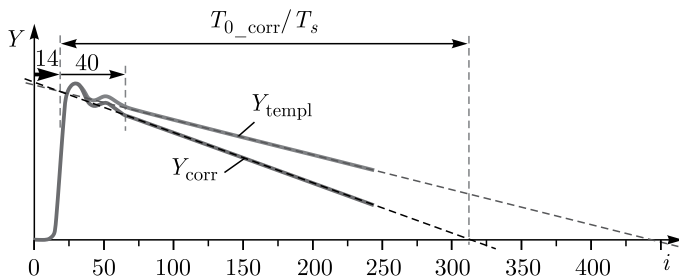


Рис. 4. Коррекция базовой ЭВФ. По оси абсцисс — номер i значений вэйвформ Y_{templ} и Y_{corr}

санных при энергии пучков в накопителе 630 МэВ. Временные разрешения, полученные при обработке этого набора событий, приведены в таблице. Видно, что у всех каналов с ростом энерговыделения в «башне» временное разрешение улучшается, что обусловлено увеличением отношения сигнал/помеха.

Результаты обработки событий e^+e^- -рассеяния с энергией 630 МэВ

Номер канала	События, σ_t	E_{dep} , МэВ						
		60–80	80–110	110–150	150–200	200–270	270–360	360–480
1	Событий	272	320	268	318	463	1208	985
	σ_t , нс	9,99	8,32	6,31	5,30	3,73	2,36	2,04
2	Событий	313	356	337	414	667	1521	1146
	σ_t , нс	8,44	6,76	4,28	4,18	2,47	1,85	1,62
3	Событий	200	250	249	339	600	1129	465
	σ_t , нс	7,21	6,85	4,31	3,26	2,35	1,76	1,58
4	Событий	175	184	183	243	481	839	342
	σ_t , нс	8,06	7,63	4,75	3,71	2,22	1,83	1,29

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В данной работе представлен алгоритм определения времени прихода сигналов «башен» LXe-калориметра, который позволяет уменьшить погрешность определения времени, вносимую различием формы сигналов. Для отработки методики измерения времени прихода сигналов изготовлен прототип электроники «башен», выполняющий дискретизацию сигналов и запись вэйвформ сигналов, и с этим прототипом набрано достаточное количество данных реальных событий. Параметры разработанного алгоритма определения времени прихода сигналов оптимизированы по данным событий упругого e^+e^- -рассеяния для достижения наилучшего временного разрешения.

Конфликт интересов. Авторы подтверждают, что конфликта интересов не имеется.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Аульченко В. М. и др.* Проект детектора КМД-2М. Препринт ИЯФ 2001-045. Новосибирск, 2001.
2. *Fedotov G. V. (CMD-3 Collab.).* CMD-3 Detector for VEPP-2000 // Nucl. Phys. B. 2006. V. 162. P. 332–338.
3. *Anisyonkov A. V. et al.* Liquid Xenon Calorimeter for CMD-3 Detector // Nucl. Instr. Meth. A. 2009. V. 598. P. 266–267.
4. *Эпштейн Л. Б., Юдин Ю. В.* Обработка сигналов жидкоксенонового калориметра детектора КМД-3 для временных измерений // ПТЭ. 2012. № 5. С. 43–53.