

КАЛИБРОВКА СЧИТЫВАЮЩЕЙ ЭЛЕКТРОНИКИ ДЕТЕКТОРА "ТРОИЦК НЮ-МАСС" С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ ЦИФРОВЫХ ФИЛЬТРОВ СИГНАЛОВ

С. Б. Абдиганиева^{a,b}, А. И. Берлев^a, М. А. Бочков^{a,b}, Н. А. Лиховид^a,
В. С. Пантуев^{a,b*}, С. В. Задорожний^a

^a Институт ядерных исследований Российской академии наук
117312, Москва, Россия

^b Московский физико-технический институт
141700, Долгопрудный, Московская обл., Россия

Поступила в редакцию 9 ноября 2022 г.,
после переработки 9 ноября 2022 г.
Принята к публикации 20 ноября 2022 г.

Описаны результаты настройки и калибровки электроники детектора, работающего в режиме постоянной оцифровки сигнала. Целью эксперимента является поиск признаков стерильного нейтрино в бета-распаде трития. Считывающая электроника работает в режиме непрерывной оцифровки, который требует оптимизации временного окна с целью минимизировать шум и улучшить энергетическое разрешение. Мы используем 7-пиксельный кремниевый дрейфовый детектор (silicon drift detector, SDD) и КМОП зарядочувствительный предусилитель с очень низкой интегрирующей емкостью. Усилитель формирует медленно растущий сигнал и работает в режиме периодического сброса. 125 МГц АЦП оцифровывает сигналы. Используя калибровочные данные с источников гамма-излучения Fe^{55} и Am^{241} , мы применили треугольный и трапециевидный фильтры для получения наилучшего подавления шума и улучшения разрешения. Также был исследован вариант с дифференцированием выходного сигнала.

DOI: 10.31857/S0044451023050036
EDN: BBYKGW

1. ВВЕДЕНИЕ

В настоящее время многие эксперименты основаны на высокотехнологичных достижениях и решениях с целью улучшения свойств детекторов и сопутствующей электроники. На установке "Троицк ню-масс" мы используем 7-пиксельный кремниевый дрейфовый детектор (silicon drift detector, SDD) [1] с электроникой для прямой оцифровки. Целью эксперимента "Троицк ню-масс" является поиск новой гипотетической частицы — стерильного нейтрино [2]. Если эта частица существует, она могла бы объяснить давнюю проблему Стандартной модели: почему отсутствуют правые нейтрино и могут ли стерильные являться этой частицей? В нашем эксперименте мы проводим прецизионные измере-

ния спектра электронов от бета-распада трития с целью найти искажение формы спектра. Установка "Троицк ню-масс" состоит из газового тритиевого источника и электростатического спектрометра [3] с кремниевым дрейфовым детектором для регистрации электронов. В нашей установке сигналы от детектора непрерывно оцифровываются и требуется выработать триггер, обеспечить быстрое считывание и фильтрацию. В настоящей статье описаны детали системы считывания с детектора. Мы представляем несколько цифровых фильтров, которые помогают уменьшить шум, понизить уровень срабатывания триггера и улучшить разрешение при последующей обработке данных.

2. ДЕТЕКТОР И ЭЛЕКТРОНИКА

Как отмечалось ранее, мы используем кремниевый дрейфовый детектор с семью пикселями по 2 мм каждый для детектирования электронов с энерги-

* E-mail: pantuev@inr.ru

ями ниже 20 кэВ. Главным преимуществом такого детектора является очень низкая емкость анода, менее 100 фФ. Детектор был изготовлен в Полупроводниковой лаборатории общества Макса Планка (HLL) [1]. Каждый анод соединен с зарядочувствительным усилителем, CUBE [4], который работает в режиме импульсного сброса с конденсатором емкостью 20 фФ в петле обратной связи сигнала. CUBE это КМОП предусилитель для радиационных детекторов. Система считывания изготовлена в XGLab — Bruker Nano Analytics [4]. Она представляет собой восьмиканальную управляющую карту, XGL-CBV-8sch. Подобные детекторы уже были протестированы в спектрометре "Троицк нью-масс" в 2017–2019 гг. [5], они показали превосходное энергетическое разрешение, менее 200 эВ (ширина на полувысоте пика). Непрерывная оцифровка сигнала обеспечивается 16-канальным блоком TQDC (время – заряд цифровым преобразователем), выполненным в VME-стандарте и разработанным в Объединенном институте ядерных исследований (ОИЯИ), г. Дубна, для проекта НИКА [6]. Модуль TQDC позволяет работать как в режиме непрерывной оцифровки, так и с использованием внутреннего ПЛИС. Каждый канал TQDC имеет 12-битный АЦП с частотой оцифровки в 125 МГц. В нашем случае, как отмечалось, мы рассматриваем возможности режима прямой оцифровки и использования внешнего сигнала сброса для аналоговой электроники. Выходной сигнал усилителя непрерывно линейно растет от -0.5 В до $+0.5$ В из-за неизбежного тока утечки детектора и сбрасывается внешним сигналом каждые 100–200 мкс. В случае прохождения частицы заряд интегрируется и создает ступеньку на линейно растущем сигнале, рис. 1.

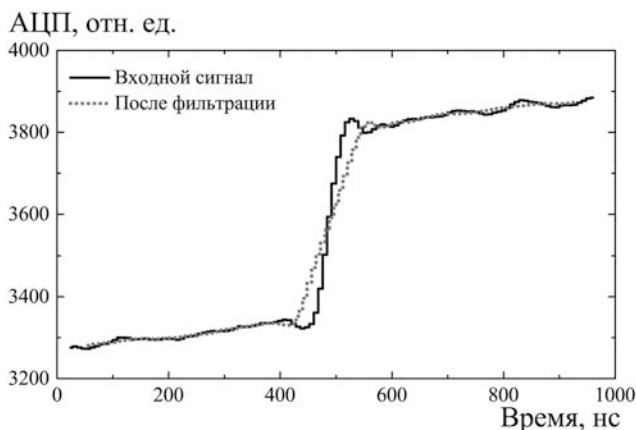


Рис. 1. Линейно растущий выходной сигнал со ступенькой, которая вызвана прошедшей частицей. Пунктирной линией показано скользящее среднее по 16 точкам оцифровки

3. СЧИТЫВАНИЕ И ФИЛЬТРАЦИЯ СИГНАЛА

3.1. Порог триггера

Во время измерений энергетического спектра бета-распада трития одним из важнейших параметров является порог регистрации сигнала. Чем ниже порог, тем более точны данные. Для оптимизации считывающей системы нам необходимо использовать цифровой порог со скользящим средним. Для этой цели мы можем применить, к примеру, простейшее линейное преобразование:

$$a_i = \frac{1}{m} \sum_{i-m/2}^{i+m/2-1} x_i, \quad (1)$$

где a_i — скользящее среднее, x_i — значение АЦП на i -й выборке, m — интервал усреднения.

Мы провели набор калибровочных данных с использованием изотопов Fe^{55} и Am^{241} в режиме прямой оцифровки с временем каналов АЦП по 8 нс. Пунктирная линия на рис. 1 демонстрирует, как работает скользящее среднее. Для каждого события окно подобрано так, чтобы фронт сигнала находился в середине кадра. Далее, мы применяем усреднение по нескольким точкам, m . Заметно, что флуктуации шума уменьшаются; колебания на растущем фронте практически полностью исчезают. Восстановление амплитуды сигнала, как высоты ступеньки, значительно улучшается.

Приведенный выше пример для установки порога может быть использован, только если общее смещение под сигналом является постоянной величиной. Для того чтобы применить цифровой порог для постоянно растущего смещения сигнала, выполним несколько другое преобразование: применим цифровой треугольный фильтр, $a_i = \hat{H} \hat{x}$, где $\hat{H} = (-m, m)$ обозначает коэффициенты фильтра. Для треугольного фильтра они равны -1 и $+1$, повторенные m раз каждый. Этот фильтр суммирует m точек сигнала, далее вычитает из этой суммы другую, полученную по предшествующим m точкам, и нормирует разность на m . При применении фильтра к равномерно растущему сигналу результатом фильтра будет константа. При приближении к «ступеньке» мы получаем растущий, а потом убывающий треугольный сигнал с длинами склонов по m точек. Дополнительно мы обеспечиваем уменьшение шума на некоторую величину. В случае трапецеидального фильтра обозначение выглядит как $\hat{H} = (-m, l, m)$, где l задает некоторое количество нулей между интервалами, от которых берется разность, определяя, таким образом, ширину вершины трапеции.

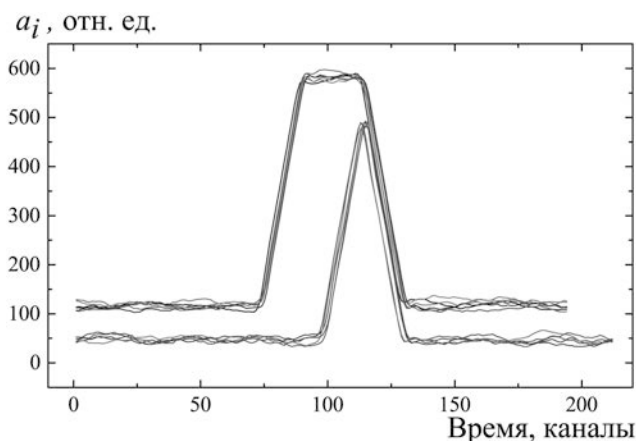


Рис. 2. Результаты применения трапецеидального и треугольного фильтров для нескольких событий при $m=16$ точек и $l=16$ точек для источника Fe^{55}

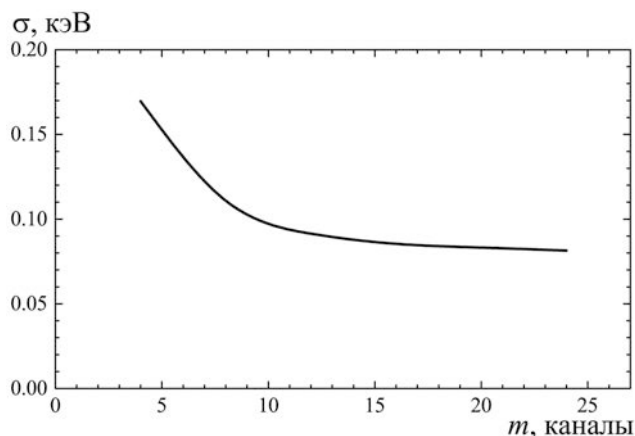


Рис. 3. Ширина пика распределения шума (σ) в зависимости от параметра m для треугольного фильтра

На рис. 2 показан результат действия треугольного и трапецеидального фильтров при $m=16$ точек и $l=16$ точек к реальным данным. Стоит обратить внимание, что для постоянно растущего сигнала появляется нулевой уровень, который отличается для различных m и l .

Чтобы подобрать наилучшее значение цифрового порога, мы измерили зависимость размаха амплитуды шума от параметра фильтра m . В каждом случае распределение шумовых амплитуд фитировалось функцией Гаусса. На рис. 3 показана зависимость уровня шума от параметра треугольного фильтра m . Шум резко уменьшается при $m > 8$ точек и практически насыщается при $m > 16$. Для $m = 16$ мы получаем уровень шума при 3σ равный 0.27 кэВ, что определяет возможный уровень цифрового порога.

Была исследована зависимость величины шума для трапецеидального фильтра при $m = 16$ и для

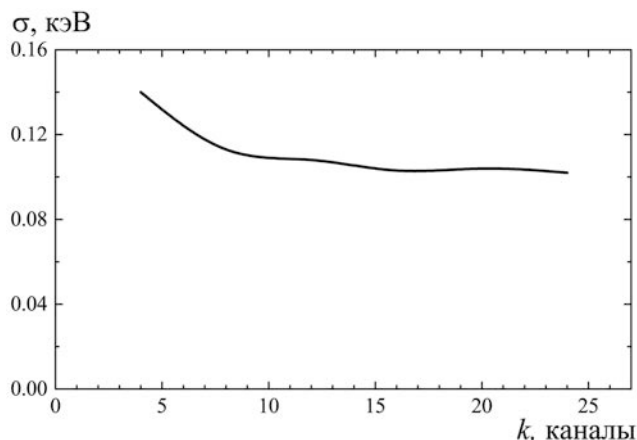


Рис. 4. Уровень шума для дифференцированного сигнала в зависимости от ширины фильтра, k

различных l . Заметного улучшения мы не увидели при увеличении параметра l от 0 до 24 точек. Таким образом, можно сделать вывод, что треугольный фильтр работает удовлетворительно для подавления шума.

Также дополнительно протестирована конфигурация, в которой линейно растущий сигнал дифференцирован разделительным конденсатором емкостью 1 нФ. В этом случае для триггера можно использовать обычное скользящее среднее. На рис. 4 показана зависимость уровня шума от ширины скользящего среднего k . Наилучшее значение приблизительно на 20% хуже, чем в случае использования треугольного фильтра, как на рис. 3.

3.2. Оптимизация энергетического разрешения

Для каждого триггера нам необходимо оптимизировать длину временного окна (ширину выборки) с целью сохранить его по возможности коротким, сохраняя при этом разумное энергетическое разрешение. Были использованы калибровочные данные с источником гамма-излучения Fe^{55} . Источник имеет интенсивную гамма-линию при 5.89 кэВ и слабую при 6.49 кэВ. Ширина кадра была установлена достаточно большой, около двух микросекунд с сигналом в виде ступеньки посередине. Далее применяем треугольный и трапецеидальный фильтры для восстановления амплитуды сигнала.

На рис. 5 показано энергетическое разрешение после использования треугольного фильтра. Снова видно, что энергетическое разрешение выходит на плато при $m > 16$. Энергетический спектр источника Fe^{55} показан на рис. 6 при $m = 16$. Четко видны пики при 5.89 кэВ и меньший при 6.49 кэВ. Стоит отметить, что разрешение детектора по энер-

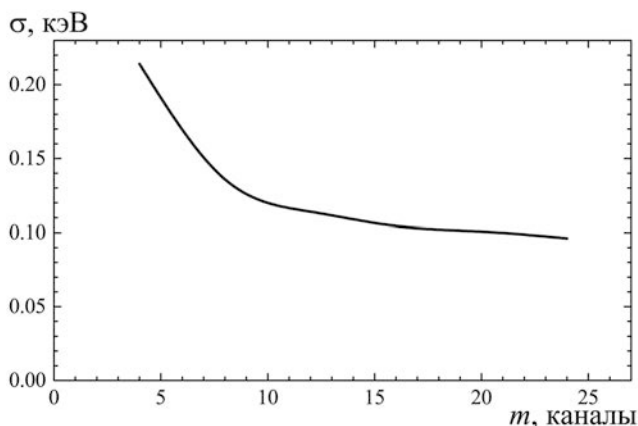


Рис. 5. Энергетическое разрешение (σ) от Fe^{55} пика 5.9 кэВ в зависимости от параметра m треугольного фильтра

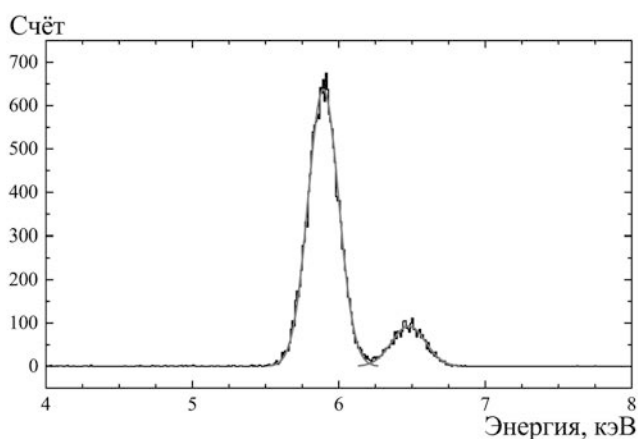


Рис. 6. Гамма-спектр Fe^{55} (черная гистограмма) с применением треугольного фильтра при $m = 16$ и аппроксимация суммой двух функций Гаусса (сплошная красная линия) с $\sigma = 104$ эВ

гии $\sigma = 0.11$ кэВ получается несколько хуже, чем лучшее разрешение SDD-детекторов с полной шириной на половине высоты равной 150 эВ (или σ примерно 0.062 кэВ), которое было представлено в работе [7]. Тем не менее в указанной работе такое разрешение было получено при температуре детектора -20°C , а в наших измерениях температура была $+25^\circ\text{C}$. Кроме этого, из предыдущего опыта [5] мы знаем, что данный детектор имеет большее значение токов утечки по сравнению с детекторами, которые были использованы ранее.

Дополнительно был измерен спектр от источника гамма-излучения Am^{241} . На рис. 7 приводится спектр, восстановленный с помощью треугольного фильтра при $m = 16$. Явно видна серия линий между 13–18 кэВ и слабый пик от распада в 59.54 кэВ.

Применяя трапецидальный фильтр при $m = 16$ и при различных l , в пределах ошибки мы не увидели улучшений по сравнению с треугольным (т.е.

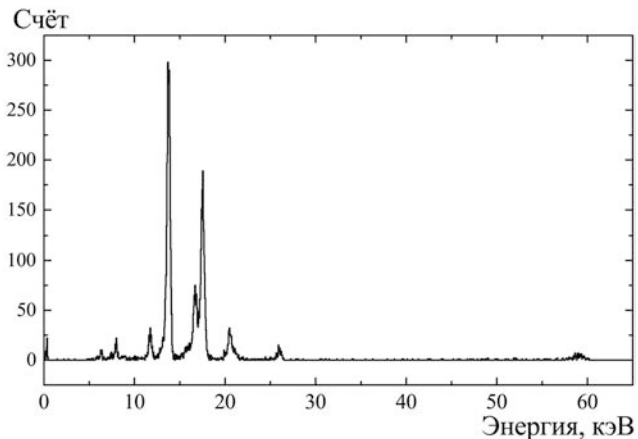


Рис. 7. Гамма-спектр Am^{241} , треугольный фильтр с $m = 16$

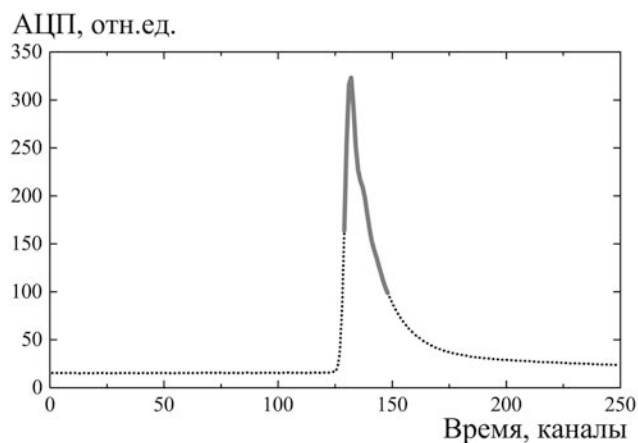


Рис. 8. Форма дифференцированного сигнала (пунктирная линия) и диапазон интегрирования для получения максимального разрешения по энергии (сплошная линия)

$l = 0$) фильтром. Таким образом, мы заключаем, что использование треугольного фильтра с выборками по $m = 16$ удовлетворит требованиям для подбора порога и энергетического разрешения. Минимальное окно для обработки треугольным фильтром получается равным $16 + 16 \cdot 2 = 48$ временных точек АЦП.

3.3. Энергетическое разрешение дифференцированного сигнала

Прохождение частицы через кремниевый детектор индуцирует появление заряда, который формирует сигнал. В данном детекторе накопление заряда происходит примерно за 50 нс, максимум за 80 нс. Это время определяет фронт возрастания ступеньки на линейно растущем сигнале. В некоторых измерениях более удобным является дифференцирование линейно растущего сигнала из платы регистрации, чтобы получить сигнал с фронтом возрастания и

убывания без линейного роста базовой составляющей. Так как время собирания заряда колеблется от события к событию, то любой пассивный фильтр, например, дифференциатор, будет приводить к эффекту «баллистического дефицита» [8], т. е. к потерям амплитуды выходного сигнала из-за соотношения между ограниченным временем собирания заряда в детекторе и характерными временными параметрами электроники. На рис. 8 пунктирной линией представлен оцифрованный сигнал от Fe^{55} . Форма сигнала усреднена по нескольким событиям. Чтобы получить наилучшее разрешение и минимизировать баллистический дефицит, мы применили несколько методов. Если взять только максимум в каждом кадре, то энергетическое разрешение составляет $\sigma = 187.1$ эВ. Другой подход состоит в интегрировании некоторой окрестности от максимума сигнала. Суммирование амплитуд АЦП от -8 до $+30$ временных отсчетов от максимума приводит к улучшению разрешения до $\sigma = 132$ эВ. Изменяя границы диапазона интегрирования, мы нашли наилучшее разрешение по энергии в 116.6 эВ при захвате от -3 до $+19$ временных отсчетов (обозначение $(-3, 19)$). Другой метод заключается в добавлении весов к амплитудам АЦП. Можно проверить метод, при котором вес пропорционален амплитуде, т. е. вычисляется $\sum x_i x_i / \sum x_i$. Взяв весь участок возрастания сигнала до максимума в 8 временных точек и 30 точек после максимума, мы получили разрешение 126 эВ. При варьировании интервала наилучшее разрешение 126 эВ получается при параметрах $(-3, 19)$ и $\sigma = 116.4$ эВ, что соответствует разрешению при простом суммировании в этом интервале и примерно на 10% хуже, чем для треугольного фильтра, рис. 5. В случае дифференцированного сигнала минимальное окно работы АЦП также должно составлять около 50 временных точек.

4. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Мы исследовали применение цифровых фильтров для обработки сигналов "Троицк нью-масс". Для детектирования электронов и гамма-квантов с энергией до 20 кэВ был использован кремниевый детектор с 7 пикселями размером по 2 мм каждый. Целью работы была оптимизация параметров триггера при оцифровке с частотой 125 МГц в режиме прямого чтения АЦП. Калибровочные данные, снятые с гамма-изотопов Fe^{55} и Am^{241} анализировались с применением треугольного и трапецеидального цифровых фильтров. Треугольный фильтр с временем интегрирования от 16 временных точек АЦП

показал оптимальное разрешение по шуму и энергии. Наилучшее энергетическое разрешение гамма-линии 5.9 кэВ составило 110 эВ (сигма). Применение трапецеидального фильтра с шириной вершины до 24 точек (или 200 нс) не улучшило результат. Был сделан вывод, что треугольный фильтр шириной сторон по 16 временных точек удовлетворяет требованиям к триггеру и энергетическому разрешению. Также проведено исследование работы детектора с дифференцированным выходным сигналом. В этом режиме скользящее среднее по нескольким точкам минимизирует уровень шума при интегрировании по 12–15 временным точкам. Было исследовано несколько методов для улучшения энергетического разрешения в случае дифференцированного сигнала. Оказалось, что простое интегрирование по узкому временному интервалу вокруг максимума сигнала дает наилучшее энергетическое разрешение около 116 эВ. Минимальное окно для регистрации сигнала должно составлять около 50 временных точек АЦП.

Благодарности. Мы бы хотели поблагодарить наших коллег из Института физики Макса Планка в Мюнхене, и в особенности Сюзанну Мартенс, за их помощь на начальном этапе этой работы.

Финансирование. Работа поддержана Министерством науки и высшего образования Российской Федерации (грант № 075-15-2020-778).

ЛИТЕРАТУРА

1. P. Lechner et al., Nucl. Instr. Meth. A **458**, 281 (2001); doi.org/10.1016/S0168-9002(00)00872-X.
2. D. N. Abdurashitov et al., JINST **10**, T10005 (2015); doi:10.1088/1748-0221/10/10/T10005; arXiv:1504.00544; physics.ins-det.
3. A. I. Belesev et al., J. Phys. G **41**, 015001 (2014); doi:10.1088/0954-3899/41/1/015001; arXiv:1307.5687.
4. <https://www.xglab.it/products/cube-bias-boards/>
5. T. Brunst et al., JINST **14**, P11013 (2019); doi:10.1088/1748-0221/14/11/P11013.
6. V. D. Kekelidze et al., Eur. Phys. J. A **52**, 211 (2016); doi:10.1140/epja/i2016-16211-2.
7. A. Niculae et al., Nucl. Instr. Meth. A **568**, 336 (2006); doi:10.1016/j.nima.2006.06.025.
8. F. S. Goulding and D. A. Landis, IEEE Trans. Nucl. Sci. **35**, 119(1988); doi:10.1109/23.12687.