

РЕКОНСТРУКЦИЯ И НАЧАЛЬНАЯ КАЛИБРОВКА ОТКЛИКА КРЕМНИЕВЫХ ФОТОУМНОЖИТЕЛЕЙ В ЭКСПЕРИМЕНТЕ DANSS

И. Мачихильян от имени коллаборации DANSS*

Институт теоретической и экспериментальной физики, Москва

Обсуждаются особенности реконструкции сигналов кремниевых фотоумножителей (кФЭУ) в условиях эксперимента DANSS. Также описан способ калибровки отклика кФЭУ по параметрам его шумового спектра, дающий возможность вычислить количество регистрируемых фотоэлектронов. Приводятся результаты применения разработанной процедуры для настройки рабочих напряжений кФЭУ, позволившей откалибровать детектор на аппаратном уровне с точностью лучше 2%.

The features of reconstruction of silicon photomultiplier (SiPM) signals in the DANSS experiment are discussed. A technique of calibration of SiPM response through its noise spectrum parameters is described, the method allows calculating the number of detected photoelectrons. The results of practical application of the developed procedure to the adjustment of SiPM operating voltages are presented. It is shown that the achieved precision of such a hardware calibration is better than 2%.

PACS: 29.40.Mc; 85.60.-q; 07.05.Kf

ВВЕДЕНИЕ

Детектор DANSS [1] представляет собой нейтринный спектрометр, установленный под активной зоной одного из реакторов Калининской АЭС. Тело детектора выполнено в виде куба из пластмассового сцинтиллятора, составленного из отдельных пластин, или стрипов. Система фотоприема включает в себя два типа фотодетекторов: 50 вакуумных фотоумножителей, по одному на группу из 50 стрипов, и 2500 кремниевых фотоумножителей, которые, осуществляя индивидуальное считывание стрипов, уточняют пространственную и энергетическую структуры физического события. В эксперименте DANSS используются кФЭУ марки MPPC S12825-050C производства Hamamatsu с чувствительной зоной $1,3 \times 1,3$ мм, разделенной на 667 пиксельных ячеек.

*E-mail: irina.machikhiliyan@itep.ru

Оцифровка сигналов производится 12-битными АЦП с аппаратным вычитанием пьедестала [2].

1. ОБРАБОТКА СИГНАЛОВ кФЭУ

Особенностью системы сбора данных кФЭУ эксперимента DANSS является то, что в качестве показаний записывается временная форма сигнала, оцифрованного с шагом 8 нс в окне 520 нс, которое формируется вокруг максимума импульса после выработки триггера на данное событие. Пример типичной временной формы представлен на рис. 1. Поскольку кФЭУ производят шум малых амплитуд с частотой несколько десятков килогерц, подобные темновые импульсы, равно как и паразитные импульсы от физических частиц, могут попасть в записываемое окно и исказить временные формы для сигнальных событий.

Программное обеспечение (ПО) реконструкции осуществляет следующие задачи:

- компенсирует остаточное смещение базовой линии (± 1 канал АЦП);
- вычлняет сигнальный импульс по времени его прихода t_0 и устраняет возможные паразитные импульсы, попавшие во временное окно;
- сглаживает флуктуации пьедестала путем аппроксимации сигнального импульса и выдает уточненные значения интегральной величины сигнала I и t_0 .

ПО реконструкции может работать в двух режимах. В первом случае это быстрая реконструкция, которая задействована в системе контроля качества данных и способна работать параллельно с набором данных. На этом уровне проводится лишь минимальный анализ временных форм с грубой оценкой

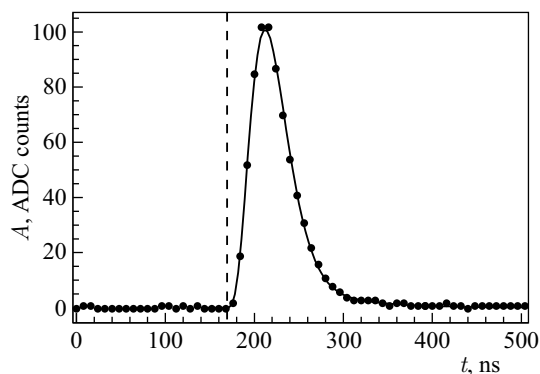


Рис. 1. Типичная временная форма сигнала кФЭУ. Вертикальная линия отмечает время прихода сигнала t_0

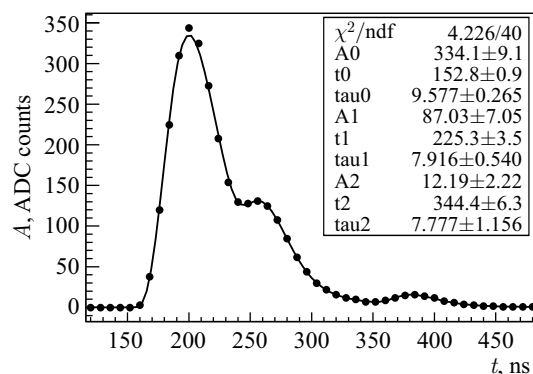


Рис. 2. Разделение перекрывающихся импульсов. Сплошной линией показана аппроксимирующая функция

t_0 , а I вычисляется как полный интеграл по всему окну. Подобный подход является хорошим приближением, поскольку в более чем 90 % случаев временная форма содержит только один импульс. Более медленная полноценная реконструкция проводит идентификацию всех импульсов в окне и осуществляет их общую аппроксимацию, как показано на рис. 2. Поскольку разные кФЭУ имеют схожую форму сигнала, на этом этапе она описывается единой для всех каналов функцией с фиксированными усредненными параметрами. Затем паразитные импульсы вычитаются, и оставшийся сигнал аппроксимируется более точно, чтобы учесть индивидуальные особенности конкретного фотоприемника.

2. КАЛИБРОВКА кФЭУ ПО ШУМОВЫМ СПЕКТРАМ

В отсутствие внешнего освещения и с приложенным напряжением питания кФЭУ производит импульсы темнового тока, обусловленные спонтанным возникновением гейгеровской лавины в пиксельном промежутке. Наличие оптической связи между пикселями может спровоцировать вторичные разряды в соседних ячейках, поэтому спектр подобных шумов выглядит как гребенка равноотстоящих пиков (рис. 3). Положения пиков P_N пропорциональны полному числу сработавших пикселей N , а статистика в пиках соотносится как вероятности развития лавин в соответствующем количестве ячеек фотодетектора. Таким образом, анализ шумовых спектров позволяет определить все параметры, необходимые для калибровки отклика кФЭУ:

1) коэффициент усиления кФЭУ в форме коэффициента пересчета интеграла волновой формы в число пикселей, давших вклад в сигнал;

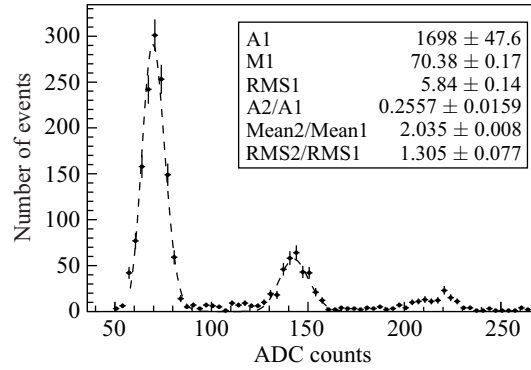


Рис. 3. Шумовой спектр индивидуального кФЭУ для 25 мин набора данных

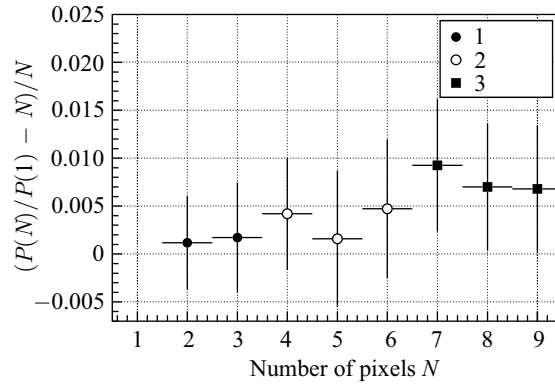


Рис. 4. Линейность реконструируемых шумовых спектров кФЭУ

2) коэффициент оптической связи и производный параметр в виде среднего количества гейгеровских разрядов X_{px} , что (уже в случае воздействия света сцинтиллятора) эквивалентно среднему числу пикселей, в которых лавины провоцирует один фотоэлектрон.

Для подтверждения линейности реконструируемых шумовых спектров было набрано три образца данных с разными значениями порога автотриггера, что позволило увидеть шумовые пики для N вплоть до 9. В качестве измеряемой величины выступало среднее значение R отношения P_N/P_1 как функция N . На рис.4 показаны средние отклонения $R(N)$ от прямой пропорциональности. Правило $P_N/P_1 = N$ соблюдается с точностью лучше 1%.

В режиме рутинной работы детектора часть шумовой статистики кФЭУ, набираемой с автотриггером с низким порогом, сохраняется на диск вместе с физическими событиями. Типичный шумовой спектр индивидуального кФЭУ

для одного файла (20–25 мин накопления физических данных) представлен на рис. 3. Записываемой статистики достаточно, чтобы произвести пофайловую независимую калибровку каждого канала детектора, если возникнет такая необходимость.

В условиях DANSS стабильность параметров кФЭУ определяется температурными вариациями. На рис. 5 представлена типичная временная зависимость измерений одного из установленных на детекторе температурных датчиков. Временная шкала соответствует пробному набору данных с 20 февраля по 9 марта 2016 г. После начальной стабилизации сразу же после включения систем охлаждения и питания кФЭУ не было зарегистрировано никаких значимых изменений. Таким образом, статистики набираемых калибровочных данных заведомо достаточно для отслеживания и компенсации возможных температурных эффектов.

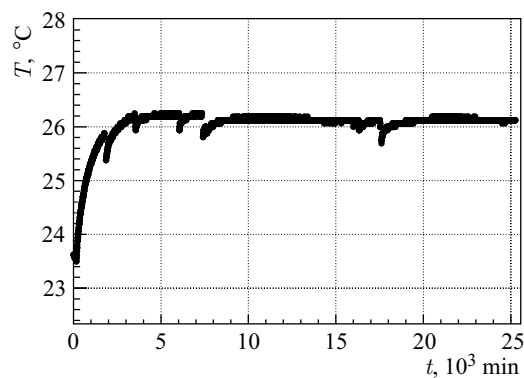


Рис. 5. Температурная стабильность детектора за период 20 февраля – 9 марта 2016 г.

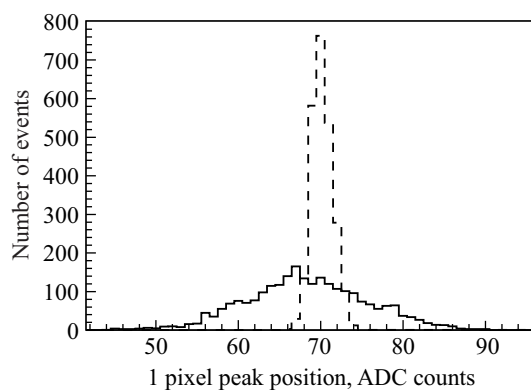


Рис. 6. Распределение позиций однопиксельных пиков до (сплошная линия) и после (штриховая) калибровки

Во время запуска эксперимента вышеописанный метод был использован для выработки карты рабочих напряжений кФЭУ, т. е. для аппаратной калибровки детектора. Для этого использовались шумовые данные, набранные при двух значениях напряжений V_1 и V_2 в предположении линейной зависимости коэффициента усиления кФЭУ от разности $V_1 - V_2$. На рис. 6 показаны распределения позиций однопиксельных пиков для всех работающих каналов детектора до настройки напряжений (сплошная линия) и после нее (штриховая). Точность калибровки была улучшена с 10,6 до 1,8 %, что заведомо достаточно для начала массового набора физической статистики. При выставленных рабочих напряжениях усредненная по всем каналам величина X_{px} составила 1,47 с г.м.с. 0,04. Дальнейшая, более точная настройка калибровки кФЭУ будет произведена на программном уровне перед полноценной обработкой набранных экспериментом данных.

Работа выполнена при поддержке госкорпорации «Росатом» (госконтракт Н.4х.44.9Б.16.1006).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Alekseev I. et al. (DANSS Collab.). DANSSino: A Pilot Version of the DANSS Neutrino Detector // Phys. Part. Nucl. Lett. 2014. V. 11. P. 473.*
2. *Свирида Д.Н. от имени коллаб. DANSS. Электроника системы сбора данных на основе кремниевых фотоумножителей детектора DANSS // Тр. Междунар. сессии-конф. секции ядерной физики ОФН РАН «Физика фундаментальных взаимодействий», Дубна, 12–15 апр. 2016 г. ЭЧАЯ. 2018. Т. 49, вып. 1. С. 142–146.*