



**НАЦИОНАЛЬНЫЙ ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЙ ЦЕНТР
«КУРЧАТОВСКИЙ ИНСТИТУТ»**
Институт физики высоких энергий имени А.А. Логунова
Национального исследовательского центра
«Курчатовский институт»

Препринт 2021–1

А.М. Горин, А.В. Инякин, А.К. Коноплянников¹

**Электроника триггерных решений и ее применение
с мюонным годоскопом установки ОКА**

Направлено в *ПТЭ*

¹ИТЭФ, Москва

Протвино 2021

Аннотация

Горин А.М., Инякин А.В., Коноплянников А.К. Электроника триггерных решений и ее применение с мюонным годоскопом установки ОКА: Препринт НИЦ «Курчатовский институт» – ИФВЭ 2021–1. – Протвино, 2021. – 11 с., 8 рис., библиогр.: 7.

В работе описывается многофункциональная триггерная электроника для детекторов, участвующих в выработке быстрых триггерных решений, со съёмом сигналов посредством ФЭУ или кремниевых фотоумножителей (SiPM). Разработка электроники была инициирована необходимостью модернизации установки ОКА и адаптирована для выработки триггерных решений с 48-канального сцинтилляционного годоскопа мюонной системы. Приведены схемы подключения электроники к детектору, результаты измерений с космическими частицами и в сеансе на ускорителе У-70. Описаны также процедуры калибровки и мониторинга детектора.

Abstract

Gorin A.M., Inyakin A.V., Konoplyannikov A.K. The trigger decisions electronics and its implementation for the muon hodoscope of the OKA experimental setup: NRC «Kurchatov Institute» – IHEP Preprint 2021–1. – Protvino, 2021. – p. 11, figs. 8, refs.: 7.

The new multifunctional trigger electronics for the detectors with PMT or SiPM fast decision readout is described. Development of this kind of apparatus was triggered by the OKA experimental setup upgrade. The electronics was adapted to the 48 channel scintillating hodoscope of the muon system. An integration of the electronics with the detector and results obtained with cosmic rays and with particles of the U-70 accelerator are presented. The procedures of the hodoscope calibration and online monitoring have been described.

1. Введение

В установке ОКА [1,2] для выработки триггерных решений широко используются многоканальные детекторы. Одним из таких детекторов является 48-канальный триггерный годоскоп мюонной системы, описание которого приведено в работе [3]. Годоскоп представляет собой однокоординатную плоскость размером 232×238 см² плотно упакованных сцинтилляторов сечением 1×6 см² и длиной до 2 м. Съём световых импульсов сцинтилляторов производится при помощи спектросмещающих волокон, соединённых с *SiPM* размером 2.5×2.5 мм² типа *CPTA-150* [4].

Для этого детектора разработана новая модульная триггерная электроника для формирования сигналов предусилителей *SiPM* и выработки триггерных решений по требуемой множественности сработавших элементов. Функциональные возможности электроники позволяют использовать ее и для других детекторов.

Особенностями электроники являются:

- Разветвление сигналов *SiPM* на аналоговый и цифровой каналы. Аналоговый канал используется в установке ОКА при амплитудном анализе для построения спектров сигналов и определения сработавших элементов. Цифровой канал используется для выработки триггерных решений.
- Индивидуальное управление порогом срабатывания дискриминаторов цифровых каналов в диапазоне $0.005 \div 2.5$ В.
- Программируемая формирование сигналов по длительности в диапазоне $12 \div 120$ нс.
- Индивидуальная цифровая задержка до 40 нс с шагом 2.5 нс в каждом канале.
- Выработка до шестнадцати триггерных решений, соответствующих различным множественностям срабатывания элементов годоскопа.
- Наличие индивидуальных 24-разрядных счётчиков для подсчёта количества импульсов в программируемом интервале времени.
- Тестовая система проверки правильности триггерных решений, позволяющая задавать произвольные комбинации входных сигналов.
- Возможность мониторинга температуры в области детектора при помощи подключаемого внешнего термодатчика.
- Конфигурирование и управление через интерфейс *USB2*.

Триггерная электроника не включена непосредственно в систему сбора данных установки ОКА, но ее интегральные данные, полученные, например, за сброс ускорителя, могут быть собраны и обработаны системой управления установки. Для применений с детекторами космических излучений можно регистрировать данные по событиям.

2. Архитектура электроники

Архитектура электроники 48-канального годоскопа системы показана на рис. 1. Электронные модули вместе с блоком питания размещены в 6U крейте евромеханики. Блок-схема электроники, описание конфигурационных регистров и внутренняя адресация приведены в документе [5].

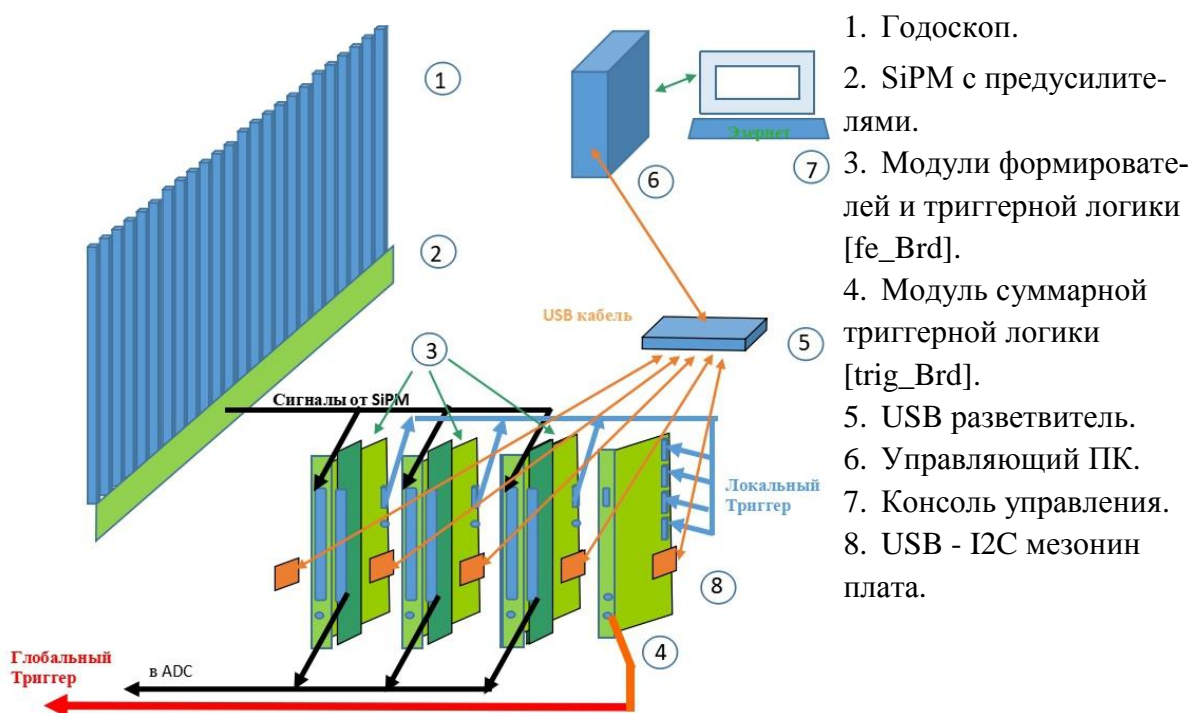


Рис. 1. Архитектура электроники 48-канального годоскопа мюонной системы установки ОКА.

Триггерная электроника включает в себя два типа модулей. Первый тип – 16-канальный модуль формирователей и триггерной логики [fe_Brd] первого уровня. Используется 3 таких модуля. Второй тип – модуль триггерной логики [trig_Brd] второго уровня. Он обеспечивает подключение до четырех модулей формирователей fe_Brd.

2.1 Модуль формирователей и триггерной логики [fe_Brd] первого уровня

Блок-схема 16-канального модуля формирователей и триггерной логики показана на рис. 2.

Модуль fe_Brd включает в себя усилители-инверторы входных сигналов, высокоскоростные пороговые компараторы, 12-разрядные ЦАП, высокопроизводительную микросхему ПЛИС (FPGA Intel MAX10M04 [6]) с управляющими регистрами, памятью и коммуникационным интерфейсом I2C. Для связи с компьютером на плате установлен модуль USB – I2C интерфейса. I2C протокол используется для передачи данных между USB и микросхемами ЦАП и ПЛИС.

Каждый канал имеет дискриминатор, срабатывающий при превышении амплитудой сигнала установленного порогового напряжения. Индивидуальное для каждого канала пороговое напряжение задаётся 8-канальным 12-разрядным ЦАП в диапазоне $0.005 \div 2.5$ В.

Схема формирования по длительности имеется в каждом канале. Передний фронт сформированного сигнала определяется передним фронтом входного сигнала. Задний фронт задается ближайшим фронтом системной тактовой частоты 120 МГц, задержанной на программируемое число тактов (от 0 до 15). Длительность сформированного сигнала может изменяться в диапазоне от 12 нс до 120 нс с неопределенностью 8 нс.

В каждом канале имеется цифровая задержка сигналов, позволяющая компенсировать разброс задержек в кабелях в диапазоне $0 \div 40$ нсек с шагом 2.5 нсек.

Адресация I2C устройств микросхемы ПЛИС и 12-разрядного ЦАП типа DAC7578 в fe_BRD модуле приведена в работе [5].

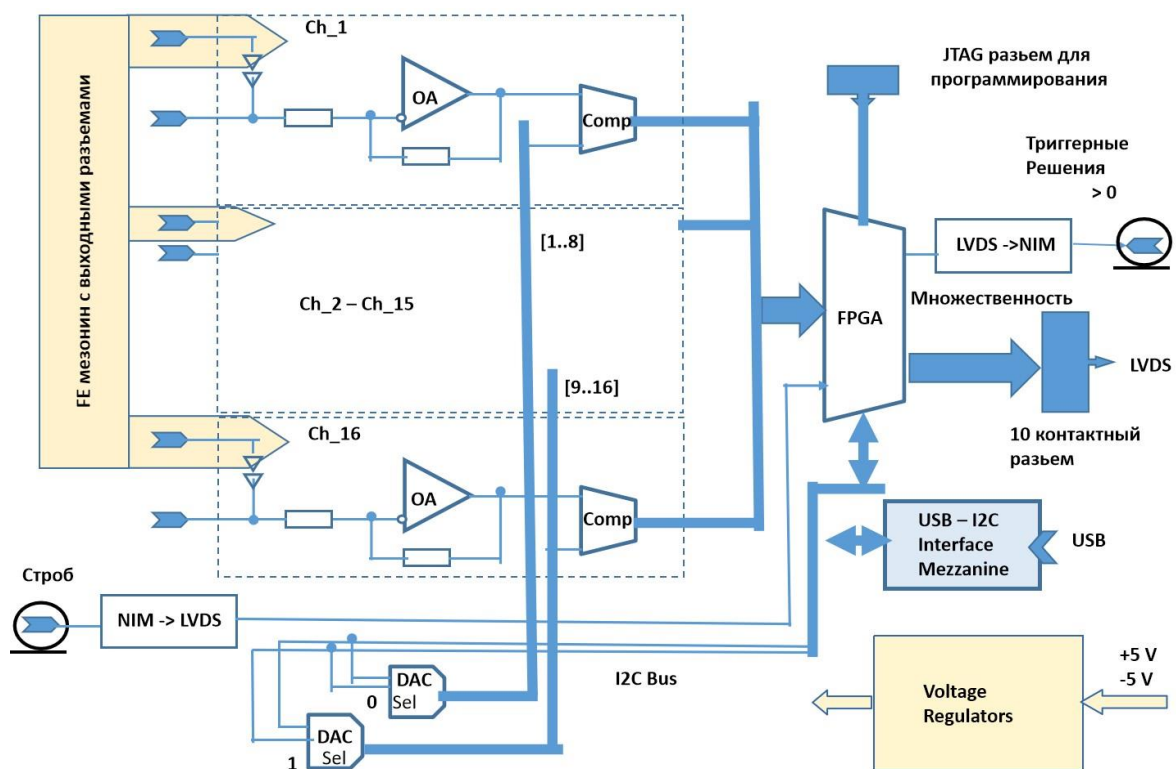


Рис. 2. Блок-схема 16-канального модуля формирователей и триггерной логики.

Спецификация [fe_Brd]

Входы

- 16 аналоговых входов для сигналов отрицательной полярности ФЭУ или предусилителей SiPM амплитудой до 2.5 В могут использоваться в триггерной логике как группа из 16 каналов или делиться пополам по 8 каналов;
- STROBE вход для стробирования сигнала в уровнях NIM логики используется для синхронизации с ускорителем.

Выходы

- TRIG_OUT – Триггерное решение в уровне NIM логики;
- 16 аналоговых выходов сигналов для амплитудного анализа на АЦП модули установки «ОКА»;
- пять триггерных конфигурируемых решений – 10-контактный разъем:
 - 1 – 2 STROBE
 - 3 – 4 $> 1_s$ – в модуле больше одного сформированного сигнала
 - 5 – 6 $= 1_s$ – в модуле только один сформированный сигнал

7 – 8 > 0_s – в модуле хотя бы один сформированный сигнал

9 – 10 > 0 – аналоговое ИЛИ всех входных сигналов модуля.

2.2 Модуль финальной триггерной логики второго уровня [trig_Brd]

Модуль триггерной логики второго уровня [trig_Brd] используется для выработки триггерных решений детекторов с числом входных каналов не превышающим 64 (до четырех 16-канальных [fe_Brd] модулей). На рис. 3 приведена блок-схема модуля.

Модуль [trig_Brd] включает в себя высокопроизводительную микросхему ПЛИС (FPGA) с управляющими регистрами, ОЗУ (LUT) памятью и коммуникационным интерфейсом I2C. Микросхема также содержит 12-разрядный АЦП, к которому может подключаться термодатчик, размещенный в районе детектора. Для связи с компьютером на плате установлен модуль USB - I2C интерфейса. Канал I2C служит для передачи данных между USB и ПЛИС. Адресация I2C устройств микросхемы ПЛИС в модуле [trig_BRD] приведена в документе [5].

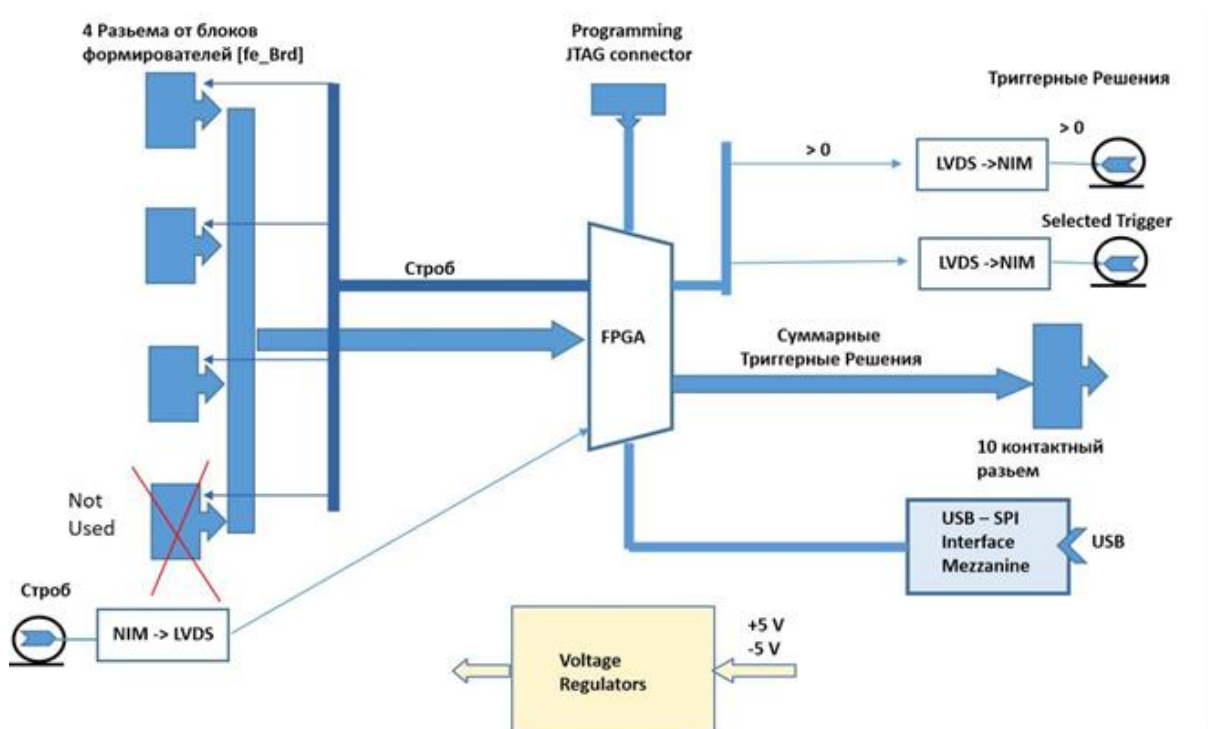


Рис. 3. Блок-диаграмма модуля суммарного триггерного решения “trig_Brd”.

Спецификация [trig_Brd]

Входы

- Четыре 10-контактных разъёма триггерных решений модулей [fe_Brd] триггерной логики первого уровня;
- STROBE вход для строб сигнала в уровнях NIM логики.

Выходы

- TRIG_OUT – Импульс выработки триггерного решения в уровне NIM;
- OR_OUT – Сигнал >0 уровня NIM;
- 10-контактный разъем триггерных решений для передачи в триггерную систему установки ОКА.

Архитектурное построение используемых микросхем ПЛИС (Intel MAX10M04), включающее до 189 кбит быстродействующего ОЗУ (оперативной памяти), позволяет вырабатывать практически любой триггер на множественность для 48 канального детектора (свыше ста вариантов). В разработанной электронике набор выдаваемых триггеров ограничен 16-ю типами. При желании ПЛИС может быть перепрограммирована для выдачи другого набора триггерных решений.

Выбранный тип триггера подключается к выходу “Selected Trigger” с сигналами в уровнях NIM логики. Он выбирается конфигурационными битами данных триггерного регистра CSR[15..12], загружаемыми при начальной конфигурации системы.

2.3 Схема подключения годоскопической электроники к детектору

На рис. 4 приведены нумерация элементов и порядок подключения каналов электроники к сцинтилляционным счётчикам детектора. На фото рис. 5 иллюстрируется внешний вид детектора и группы подключения каналов к модулям fe_BRD.

	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24	25	26	27	28	29	30	31	32	33	34	35	36	37	38										
1	0	0	0	0	39	39	39	39	39	39	39	39	39	39	39	39	39	39	39	39	39	39	39	39	39	39	39	39	39	39	39	39	39	39	39	39	39	0	0	0	0							
2	0	0	0	0	40	40	40	40	40	40	40	40	40	40	40	40	40	40	40	40	40	40	40	40	40	40	40	40	40	40	40	40	40	40	40	40	40	40	40	0	0	0	0					
3	0	0	0	0	41	41	41	41	41	41	41	41	41	41	41	41	41	41	41	41	41	41	41	41	41	41	41	41	41	41	41	41	41	41	41	41	41	41	41	41	0	0	0	0				
4	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	45	46	47	21	22	23	24	25	26	27	28	29	30	31	32	33	34	35	36	37	38	38									
5	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	45	46	47	21	22	23	24	25	26	27	28	29	30	31	32	33	34	35	36	37	38	38									
6	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	45	46	47	21	22	23	24	25	26	27	28	29	30	31	32	33	34	35	36	37	38	38									
7	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	45	46	47	21	22	23	24	25	26	27	28	29	30	31	32	33	34	35	36	37	38	38									
8	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	45	46	47	21	22	23	24	25	26	27	28	29	30	31	32	33	34	35	36	37	38	38									
9	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	45	46	47	21	22	23	24	25	26	27	28	29	30	31	32	33	34	35	36	37	38	38									
10	1	2	3	4	5	6	Модуль 1					13	14	15	16	17	45	46	47	21	22	23	Модуль 2					29	30	31	32	Модуль 3																
11	1	2	3	4	5	6						13	14	15	16	17	0	0	0	21	22	23						29	30	31	32																	
12	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	0	0	0	21	22	23	24	25	26	27	28	29	30	31	32	33	34	35	36	37	38	38									
13	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24	25	26	27	28	29	30	31	32	33	34	35	36	37	38	38									
14	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24	25	26	27	28	29	30	31	32	33	34	35	36	37	38	38									
15	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24	25	26	27	28	29	30	31	32	33	34	35	36	37	38	38									
16	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24	25	26	27	28	29	30	31	32	33	34	35	36	37	38	38									
17	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24	25	26	27	28	29	30	31	32	33	34	35	36	37	38	38									
18	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24	25	26	27	28	29	30	31	32	33	34	35	36	37	38	38									
19	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24	25	26	27	28	29	30	31	32	33	34	35	36	37	38	38									
20	0	0	0	0	42	42	42	42	42	42	42	42	42	42	42	42	42	42	42	42	42	42	42	42	42	42	42	42	42	42	42	42	42	42	42	42	42	42	42	42	0	0	0	0				
21	0	0	0	0	43	43	43	43	43	43	43	43	43	43	43	43	43	43	43	43	43	43	43	43	43	43	43	43	43	43	43	43	43	43	43	43	43	43	43	43	43	43	0	0	0	0		
22	0	0	0	0	44	44	44	44	44	44	44	44	44	44	44	44	44	44	44	44	44	44	44	44	44	44	44	44	44	44	44	44	44	44	44	44	44	44	44	44	44	44	44	44	0	0	0	0

Рис. 4. Порядок подключения каналов электроники к сцинтиляционным счётчикам детектора.

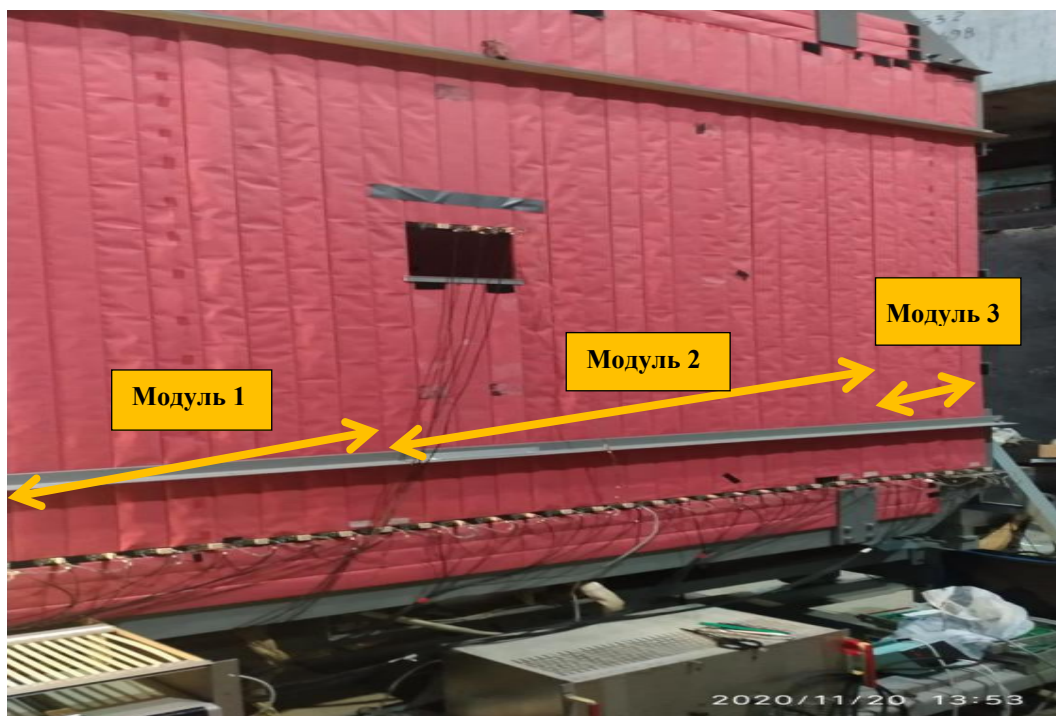


Рис. 5. Фото внешнего вида мюонного годоскопа.

Сигналы предусилителей SiPM подаются на триггерную электронику fe_BRD (3 модуля) и пассивно разветвляются на модули АЦП, находящиеся в помещении сбора данных. Переходная распределительная панель обеспечивает подключение усилителей детектора к магистральным кабелям через короткий коаксиальный кабель.

3. Результаты калибровки на космике и временные измерения на пучке

Перед осенним сеансом 2020 г. на установке ОКА была выполнена проверка работоспособности элементов (счетчиков) детектора и калибровка порогов дискриминаторов с использованием космического фона. Как известно [7]: “Средний поток мюонов на поверхности равен $\cos(2\theta)$, что характерно для мюонов с энергией ~ 3 ГэВ. Скорость счёта в тонком горизонтальном детекторе примерно равна $1 \text{ см}^{-2} \text{ мин}^{-1}$; в вертикальном детекторе это вдвое меньше”. Для каждого счетчика размером $6 \times 200 \text{ см}^2$ ожидаемый средний поток – около 600 космических мюонов в минуту (10 частиц /с).

Для определения оптимального порога выполнялось сканирование величины порогов дискриминаторов в диапазоне $4 \div 400 \text{ мВ}$ для нескольких напряжений смещения SiPM. При каждом значении порога подсчитывалось количество импульсов в канале за время 26.8 с и тем самым измерялась счетная характеристика каждого канала.

На рис. 6 показаны измеренные счётные характеристики для двух каналов №6 и 10 детектора. Канал №6 имеет пониженное усиление, канал №10 является типичным. Исходя из полученных характеристик было выбрано общее напряжение смещения -44 В для всех SiPM.

Как упоминалось выше, для ожидаемого счета космических мюонов около 10 частиц в секунду был выставлен соответствующий порог. Однако при этом эффективность регистрации счетчиков составляет 70 – 80%. Для достижения нормальной эффективности регистрации мюонов ($>98\%$) порог дискриминатора должен быть установлен на уровне 40 – 50 отсчетов/с, и при этом добавляются собственные шумы SiPM.

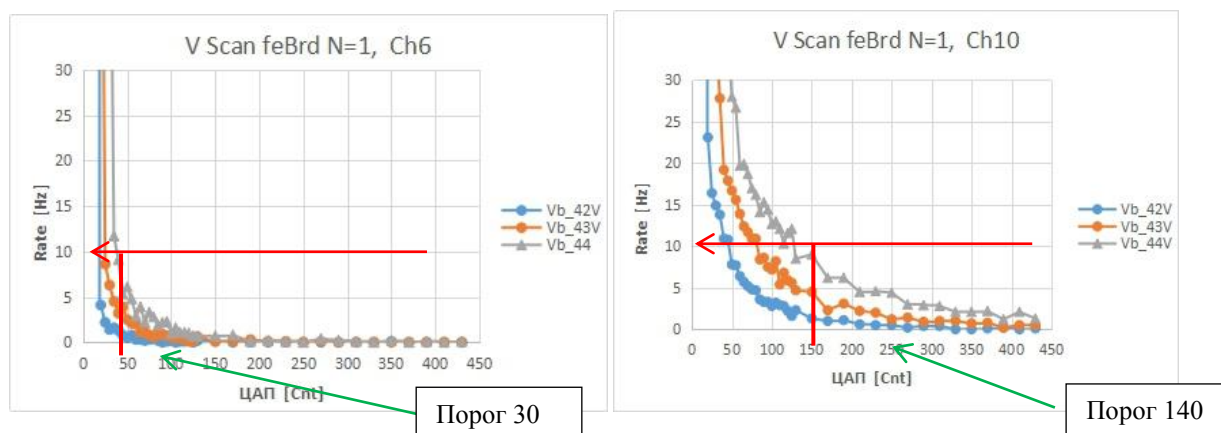


Рис. 6. Счётные характеристики для двух каналов № 6 и 10 детектора.

Во время сеанса при работе с широким мюонным пучком были выполнены измерения профилей пучка. Во время сброса ускорителя в каждом канале подсчитывалось количество сигналов, превышающих порог, а поле окончания сброса значения счетчиков считывались управляющим компьютером. Далее строились гистограммы профиля потока частиц. Для более наглядной визуализации построены 3D гистограммы с использованием матрицы геометрического представления детектора (см. рис. 4). Они показаны на рис. 7_(1) для космики и рис. 7_(2) для мюонного пучка ускорителя.

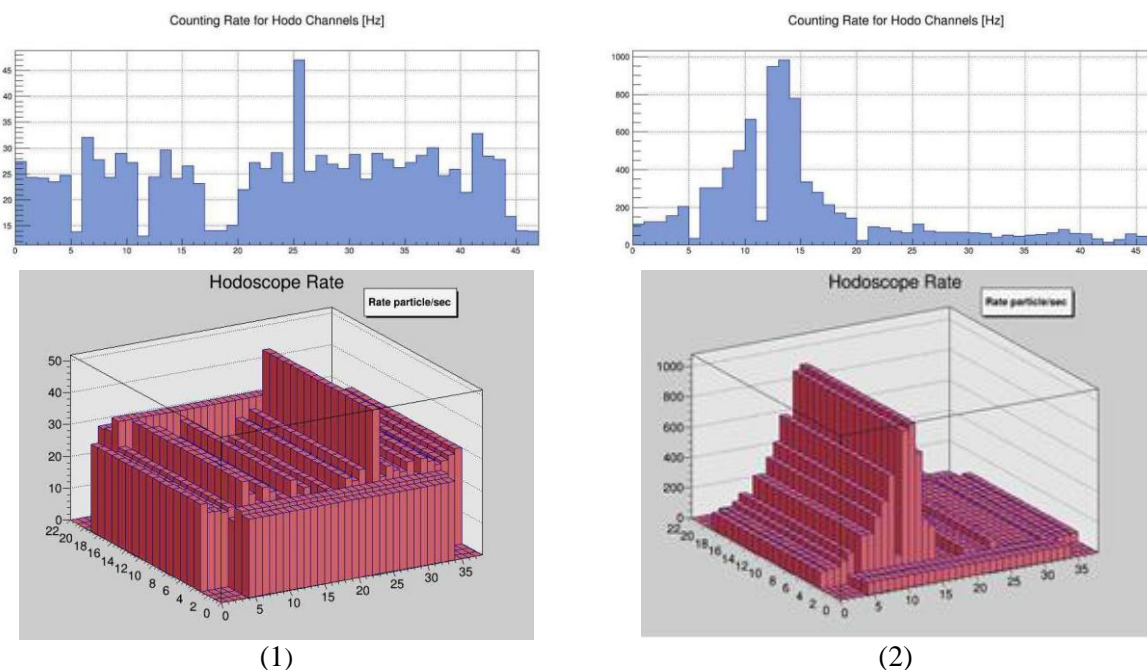


Рис. 7. 1D и 3D гистограммы профиля на космике (1) и профиля на пучке мюонов (2).

В сеансе также были выполнены измерения времени прихода триггерных сигналов новой электроники и триггерного детектора установки ОКА. Задержка при выработке триггерного решения «>0» составила ~ 10 нс, это время может быть легко компенсировано. Абсолютная задержка в электронике сигнала «>0» не превышает 15 нс. В случае использования более сложного триггерного решения (например, «==2», триггер на две частицы), задержка дополнительно увеличивается на $10 \div 15$ нс.

После окончания сеанса при выбранном пороге для проверки долговременной стабильности каналов мюонного годоскопа в течение нескольких суток проводились непрерывные измерения фонового счета (космические мюоны и шумы SiPM).

В качестве примера на рис. 8 приведена усредненная (6 измерений за 1 мин) скорость счета (за 1,6 с) одного из каналов. Долговременная стабильность счета признана удовлетворительной.

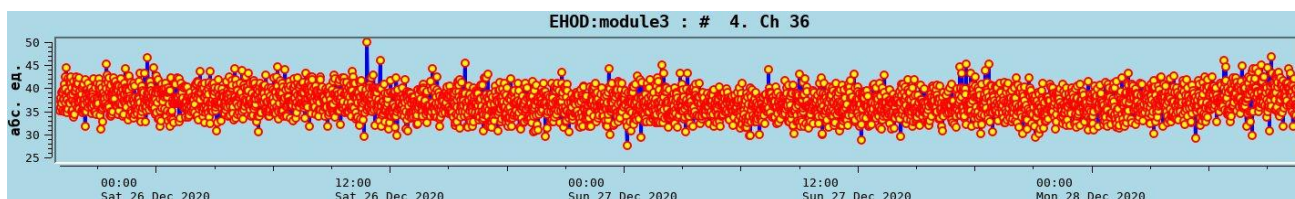


Рис. 8. Фоновый счет канала №36 годоскопа, измеряемый за 1,6 с с интервалом 10 с, в течение 130 часов.

Заключение

Разработана, изготовлена и испытана в осеннем сеансе 2020 г. ускорителя У-70 триггерная электроника мюонного годоскопического детектора установки ОКА, использующего в качестве фотоприемника кремниевые фотоумножители (SiPM).

Предложен и проверен метод выбора порогов дискриминации путём измерения счетных характеристик каналов. Выполнены измерения задержек новой электроники при выработке триггерных решений и проверена совместимость этих задержек с существующей системой выработки триггера установки ОКА.

Авторы выражают благодарность В.Ф. Образцову за поддержку проекта, К.Г. Качнову за решающую роль в изготовлении детектора, В.В. Лаврентьеву за организацию электромонтажных работ и В.И. Рыкалину за ценные советы и консультации.

Список литературы

- [1] Эксперименты с заряженными каонами на сепарированном каонном пучке ускорителя ИФВЭ, предложение эксперимента ОКА, ноябрь 2003.
- [2] A.S. Sadovsky et al. [ОКА Collaboration] Eur. Phys. J. C78 (2018) no.2, 92.
- [3] A.M. Gorin et al. Design of Large Scale Detectors Based on Polystyrene Solid State Scintillators Made of Granulated Polystyrene with WLS Fibers Light Collection, DOI: <https://doi.org/10.22323/1.252.0078>, 2015.
- [4] <https://zapadpribor.com/srta-150-50-fotodiod/>
- [5] А.К. Коноплянников. Многофункциональная электроника для триггерных детекторов. Спецификация и описание. – Протвино, 2020.
- [6] <https://www.intel.ru/content/www/ru/ru/products/programmable/fpga/max-10.html>
- [7] K. Nakamura et al. PARTICLE PHYSICS BOOKLET, JP G 37, 075021 (2010).

Рукопись поступила 2 марта 2021 г.

А.М. Горин, А.В. Инякин, А.К. Коноплянников

Электроника триггерных решений и её применение с мюонным годоскопом установки ОКА.

Препринт отпечатан с оригинала-макета, подготовленного авторами.

Подписано к печати 09.03.2021. Формат 60 × 84/16. Цифровая печать.

Печ.л. 1. Уч.–изд.л. 1,2. Тираж 80. Заказ 16. Индекс 3649.

НИЦ «Курчатовский институт» – ИФВЭ

142281, Московская область, г. Протвино, пл. Науки, 1

www.ihep.ru; библиотека <http://web.ihep.su/library/pubs/all-w.htm>

Индекс 3649

ПРЕПРИНТ 2021-1,
НИЦ «Курчатовский институт» – ИФВЭ, 2021
