

ГОСУДАРСТВЕННЫЙ НАУЧНЫЙ ЦЕНТР РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ
ИНСТИТУТ ФИЗИКИ ВЫСОКИХ ЭНЕРГИЙ

ИФВЭ 2011-6
ОЭФ

М.Ю. Боголюбский, Д.И. Паталаха, В.С. Петров,
Б.В. Полищук, С.А. Садовский, В.А. Сенько,
А.С. Соловьев, Ю.В. Харлов

**Светодиодная мониторинговая система Фотонного
Спектрометра PHOS в эксперименте ALICE
на Большом Адронном Коллайдере**

Направлено в *ИТЭ*

Протвино 2011

Аннотация

Боголюбский М.Ю. и др. Светодиодная мониторинговая система Фотонного Спектрометра PHOS в эксперименте ALICE на Большом Адронном Коллайдере: Препринт ИФВЭ 2011-6. – Протвино, 2011. – 20 с., 10 рис., библиогр.: 26.

Описана светодиодная мониторинговая система Фотонного Спектрометра (PHOS) в эксперименте ALICE на Большом Адронном Коллайдере в ЦЕРН. Спектрометр PHOS включает в себя три модуля в виде матриц 64×56 из кристаллов вольфрамата свинца (PWO). В качестве источников тестовых световых сигналов используются сверхяркие зелёные светодиоды Kingbright L934SGC с индивидуальной аппаратной регулировкой интенсивности световых всплесков в каждом канале спектрометра. Система обеспечивает настройку и контроль электроники на стадии подготовки к физическому запуску модулей PHOS, а также позволяет проводить специальные тестовые измерения со спектрометром без использования частиц высоких энергий. Кроме того, в ходе эксперимента она позволяет оперативно вести мониторинг каждого канала спектрометра, а также отслеживать температурные вариации световых кристаллов PWO. Долговременная относительная стабильность мониторинга каналов обеспечивается при этом на уровне $1.2 \cdot 10^{-3}$.

Abstract

Bogolyubsky M.Yu. et al. Light-emitting Diode Monitoring System for the Photon Spectrometer PHOS in the ALICE experiment at the Large Hadron Collider: IHEP Preprint 2011-6. – Protvino, 2011. – p. 20, figs. 10, refs.: 26.

The monitoring system based on Light-Emitting Diodes (LED) is described for the Photon Spectrometer (PHOS) in the ALICE experiment at the Large Hadron Collider in CERN. The PHOS spectrometer comprises three modules made like matrix of 64×56 lead tungstate (PWO) crystals. The superbright green diodes Kingbright L934SGC have been chosen as the sources of testing signals with individual tuning of the irradiation level. The system provides commissioning and control of the PHOS electronics at the preparation stage for physics runs of PHOS modules. It provides also an ability to carry out the special LED runs for tests and control of the PHOS spectrometer without using high energy particle beams and allows as well the individual monitoring of each spectrometer channel including the temperature variation of the PWO crystal transparency. The relative long term stability of the channel monitoring reaches the level of $1.2 \cdot 10^{-3}$.

© Государственный научный центр
Российской Федерации
Институт физики высоких энергий, 2011

Введение

Описываемая ниже светодиодная мониторинговая система (МС) была создана для работы с Фотонным Спектрометром PHOS, который в эксперименте ALICE [1] на Большом Адронном Коллайдере (БАК) в ЦЕРН предназначен для регистрации и прецизионного измерения параметров фотонов в широком диапазоне энергий и в условиях большой множественности вторичных частиц, характерной для центральных столкновений тяжелых ионов при энергиях БАК. Спектрометр PHOS является электромагнитным калориметром сцинтилляционного типа, состоящим в начальном варианте из пяти модулей в виде матриц 64×56 кристаллов вольфрамата свинца $PbWO_4$ (PWO) [2] производства компании "Северные кристаллы" (г. Апатиты, Мурманская обл., Россия) [3]. Соответственно, каждый модуль спектрометра имеет по 3584 канала считывания данных. Геометрические размеры кристаллов были выбраны равными $2.2 \times 2.2 \times 18$ см³, чтобы по возможности уменьшить эффекты перекрытия ливней в событиях с большой множественностью.

Для регистрации световых сигналов от электромагнитных ливней к заднему торцу кристаллов приклеены лавинные фотодиоды (APD) типа Hamamatsu S8148/S8664-55. Площадь чувствительной поверхности каждого фотодиода составляет 5×5 мм², квантовая эффективность лежит в пределах 60 — 80 %, а максимум чувствительности соответствует длине волны 600 нм. Сигнал с APD поступает на вход низкошумящего интегрирующего (зарядочувствительного) предусилителя с нагрузкой на псевдогауссовый фильтр. Оцифровка временного профиля выходных сигналов проводится электроникой ALIRO [4] с частотой 10 МГц.

Каждый канал предусилителя имеет два выхода, соответствующие большому и малому коэффициентам усиления, что приводит к двум разным диапазонам измерения энерговыделения в кристалле — от 5 МэВ до 5 ГэВ и от 80 МэВ до 80 ГэВ. В каждом диапазоне амплитуда измеряется аналого-цифровым преобразователем с дискретностью 10 бит. В результате эффективный динамический диапазон измере-

ния амплитуд составляет 14 бит. Функционально вся электроника одного модуля PHOS разбита на 4 идентичных блока, каждый из которых обслуживает 1/4 часть модуля. Для обработки данных используются алгоритмы, описанные в работе [5].

Согласно техническому проекту спектрометр PHOS должен работать при температуре кристаллов -25°C , стабилизированной с точностью 0.1°C . Допускается его работа и в условиях стандартной температуры $+18^{\circ}\text{C}$, поддерживаемой на глубине 100 м в шахте эксперимента ALICE. Для надежной работы спектрометра предусмотрен тщательный контроль как внешних условий, так и критических параметров спектрометра и электроники в процессе измерений. Эту задачу комплексного контроля работы всех составляющих элементов спектрометра решает система медленного контроля (DCS) спектрометра PHOS, частью которой является описываемая в данной работе мониторинговая система спектрометра. Мониторинг каналов спектрометра осуществляется при помощи световых импульсов от соответствующих светодиодов с регулировкой амплитуды и частоты повторения импульсов в широких диапазонах.

Применение светодиодов для целей мониторинга уже было апробировано ранее в некоторых аналогичных системах [6]-[11]. При этом использование светодиодов обладает рядом преимуществ перед другими возможными источниками световых импульсов, например лазерами [12, 13, 14]. В частности, в такой системе подбором типа фотодиода и режима его работы легко добиться, чтобы при заданной длине волны излучаемого света форма и длительность световых импульсов имитировали световые вспышки в кристаллах, возникающие при развитии в них электромагнитных ливней. Другой особенностью данной МС является независимое управление каждым светодиодом с возможностью регулировки амплитуды световой вспышки в каждом канале спектрометра, полное отсутствие оптико-механических коммутаторов, аттенуаторов и распределителей света.

Рассматриваемая мониторинговая система является эффективным инструментом на стадии сборки модулей PHOS для контроля прозрачности кристаллов PWO, оптических контактов между кристаллами и лавинными фотодиодами, равно как и для контроля коэффициентов усиления электронного тракта, его линейности и стабильности, включая сами фотодиоды, предусилители и электронику амплитудного анализа. Одновременно эта система оказалась очень эффективной при запуске спектрометра в шахте эксперимента, а также в процессе его эксплуатации для комплексного контроля функционирования спектрометра в целом. Результаты испытаний прототипа мониторинговой системы были опубликованы ранее [15]. В данной статье описан окончательный вариант системы, работающий в условиях реального эксперимента начиная с 2009 г.

Статья организована следующим образом: вначале описаны предъявляемые требования к мониторинговой системе, её конструкция, принципы построения и электроника управления системой; далее приводятся результаты использования МС для настройки и контроля модулей PHOS, мониторинга работы отдельных каналов модулей спектрометра. Рассматриваемая МС может использоваться и для калибровки спектрометра, но это выходит за рамки данной статьи и будет представлено в других

работах. Что касается программного обеспечения мониторинговой системы, то оно будет подробно изложено в работе [16].

1. Требования к мониторинговой системе спектрометра PHOS

1.1. Функциональные требования к МС

Функциональные параметры мониторинговой системы определяются требованиями, предъявляемыми к спектрометру PHOS в эксперименте ALICE во время экспозиции установки на сталкивающихся *pp*- и *PbPb*-пучках БАК, а также на стадии запуска и настройки спектрометра в составе эксперимента ALICE. При подготовке технического проекта спектрометра PHOS [2] в качестве основных были сформулированы следующие требования к мониторинговой системе:

- возможность быстрого контроля работоспособности системы считывания данных со спектрометра на стадии подготовки установки к запуску;
- возможность оперативной проверки таблицы соответствия каналов электроники и кристаллов спектрометра;
- возможность быстрого измерения параметров временного профиля выходных сигналов для каждого канала спектрометра;
- индивидуальное мониторингирование каждого канала спектрометра во всём динамическом диапазоне по амплитуде сигналов;
- возможность измерения отношения коэффициентов усиления каждого канала спектрометра с целью калибровки каналов электроники с низким усилением по данным с каналов высокого усиления;
- возможность предварительной калибровки каналов спектрометра с использованием паспортных данных кристаллов PWO по их световыходу без экспозиции спектрометра на пучке;
- точность мониторингирования временной вариации отношения калибровочных коэффициентов для различных каналов спектрометра должна быть не хуже $3 \cdot 10^{-3}$.

1.2. Функциональные и конструктивные особенности МС

Для выполнения указанных выше требований в МС предусмотрена возможность программным образом регулировать частоту световых вспышек светодиодов, фиксировать или варьировать от события к событию их яркость, а также формировать перед кристаллами спектрометра светящиеся образы различных статических или движущихся объектов в виде, например, линий различной длины из светящихся светодиодов, "шахматной доски" или просто одной "точки", т.е. одного светодиода

с заданными координатами в модуле. Обычно конфигурация активных светодиодов выбиралась в виде набора динамических полос из двух смежных рядов типа "зебра",двигающихся по поверхности модулей спектрометра от события к событию также на два ряда.

Мода функционирования МС с фиксированной яркостью вспышек светодиодов используется для контроля работы электроники спектрометра и для мониторинга работоспособности каналов спектрометра между физическими измерениями. Мода работы МС с варьируемой амплитудой, в которой яркость всех светодиодов меняется от события к событию, применяется для калибровки отношения коэффициентов усиления каналов спектрометра с низким и высоким усилением, для быстрой предварительной калибровки каналов спектрометра по измеряемой зависимости дисперсии LED-пиков от их средней амплитуды, а также для мониторинга всех каналов на стадии запуска модулей спектрометра, когда ещё не проведено выравнивание каналов спектрометра по усилению лавинных фотодиодов посредством индивидуальной подстройки подаваемого на них высокого напряжения.

Основная конструктивная особенность рассматриваемой мониторинг системы состоит в том, что матрицы светодиодов (один светодиод на кристалл спектрометра) расположены внутри холодного термостабилизированного объёма модулей спектрометра так, что в передний торец каждого кристалла смотрит свой светодиод (LED). Поскольку световыход кристаллов PWO зависит от их температуры (световыход растёт в три раза при уменьшении температуры с комнатной до -25°C), то тепловыделение при работе мониторинг системы не должно вносить температурные искажения внутрь термостабилизированного объёма модуля. Как было показано ещё на стадии испытания прототипа МС [15], это требование легко может быть выполнено, если в мониторинг системе использовать сравнительно недорогие сверхяркие зелёные светодиоды Kingbright L934SGC [17], спектр свечения которого близок к спектру реальных сцинтилляционных вспышек в кристаллах PWO при развитии в них электромагнитных ливней, и учесть спектральную чувствительность лавинных фотодиодов S8148/S8664-55.

Отметим в этой связи, что светодиоды не являются абсолютно температурно стабильными источниками света, и имеющиеся в литературе данные [18] свидетельствуют, что диоды зеленого свечения, аналогичные L934SGC, при температурах выше 180°K показывают небольшое уменьшение квантовой эффективности высвечивания с ростом температуры. Однако по техническим условиям эксплуатации спектрометра PHOS, температура в холодном объёме модулей, где расположены в том числе и светодиодные матрицы мониторинг системы спектрометра, стабилизирована с точностью 0.1°C , в результате чего возможная температурная нестабильность светодиодов становится в нашем случае несущественной.

2. Структура МС и ее функционирование

Общая блок-схема мониторинной системы, включая интеграцию МС в инфраструктуру спектрометра PHOS и эксперимента ALICE, показана на Рис. 1. Мониторная система управляется дистанционно (включение/выключение, подача питания, задание режимов работы и т.д.) через систему (медленного) контроля детектора (Detector Control System, DCS) PHOS и систему контроля экспериментом (Experiment Control System, ECS) ALICE. По поданным оператором ECS/DCS командам с помощью разработанного матобеспечения PHOS DCS задаются параметры работы МС, а именно: частота поджига светодиодов, амплитуда световых вспышек и характер их изменения от события к событию, геометрическая конфигурация ("маска") области поджигаемых светодиодов. Эти параметры транслируются в управляющие модули мониторинной системы спектрометра PHOS, которые расположены в шахте эксперимента и которые непосредственно определяют и контролируют работу модулей светодиодных матриц внутри модулей PHOS. Управляющие и контрольные модули соединены между собой плоским многожильным кабелем длиной 35 м.

Управляющие модули МС конструктивно выполнены в стандарте Евромеханика 6U, они установлены в специальной VME-корзине в одной из стоек триггерной электроники эксперимента ALICE. Корзина оснащена блоком программного управления, который осуществляет её включение/выключение, задание номинальных напряжений питания и предельных токов потребления, а также контроль всех установленных значений. Для управления МС используются модули двух типов: модуль DCSV, выполняющий функции системного VME-контроллера мониторинной системы и осуществляющий связь с DCS и DAQ системами эксперимента, и мастер-модули MMV для управления процессом поджига светодиодов. Количество модулей MMV равно числу используемых модулей спектрометра PHOS плюс один. Дополнительный MMV-модуль, называемый MMVsuper, служит для обеспечения синхронизации функционирования всех MMV-модулей в режиме самозапуска МС.

Контрольные модули SM224 выполнены в виде печатных плат, на которых установлены светодиоды с необходимыми управляющими цепями. Каждая плата содержит матрицу из 16×14 светодиодов, расположенных с шагом 2.2×2.2 см, что определяется геометрическими размерами кристаллов спектрометра. Набор из 16 таких плат покрывает всю фронтальную поверхность модуля спектрометра так, что светодиоды смотрят на передние торцы соответствующих кристаллов. Передача данных и управление платами SM224 в каждом модуле PHOS осуществляется из соответствующего ему мастер-модуля MMV по плоскому кабелю с использованием последовательного протокола SPI [19]. Напряжение питания электроники плат SM224 формируется в модуле MMV и передается на платы с помощью того же кабеля.

Контроллер DCSV является вновь разработанным блоком, мастер-модули MMV были существенно модернизированы по сравнению с используемыми в первом прототипе мониторинной системы [15], а блоки SM224 остались в значительной степени такими же.

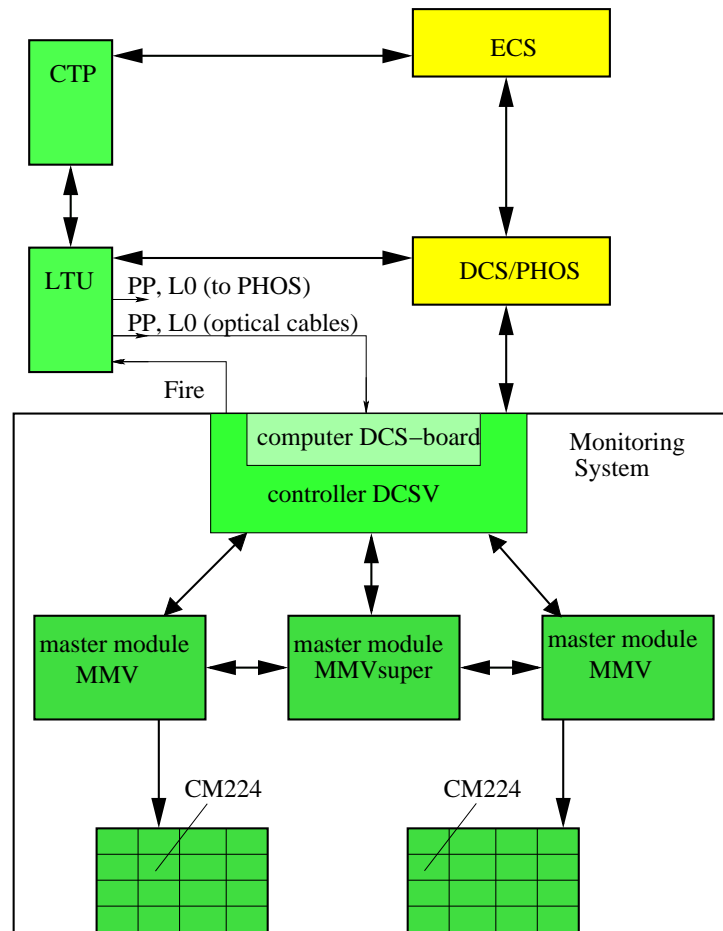


Рис. 1. Общая блок-схема МС и ее интеграция в инфраструктуры спектрометра PHOS в эксперименте ALICE. Обозначения: ECS — система управления экспериментом; DCS/PHOS — система медленного контроля спектрометра PHOS; CTP — центральный триггерный процессор; LTU — локальное триггерное устройство; DCSV — контроллер мониторинговой системы; DCS-board — одноплатный компьютер; MMV — мастер-модуль мониторинговой системы; CM224 — светодиодный модуль; PP, L0 — оптические сигналы, используемые для синхронизации; Fire — сигнал МС, сопровождающий поджиг светодиодов. Для простоты на рисунке показаны только два (из пяти) мастер-модуля MMV с соответствующими наборами светодиодных плат CM224. MMVsuper — мастер-модуль с функцией обеспечения синхронизации работы всей МС при самозапуске.

2.1. Режимы синхронизации МС с триггером ALICE

Синхронизация всех детекторов установки ALICE осуществляется стандартной серией триггерных сигналов PP, L0, L1, L2, см. [1] и [25], передаваемых на каждый детектор по соответствующему оптическому кабелю. Сигнал L0 появляется не позже чем через 1.2 мкс после произошедшего взаимодействия, сигналы L1 и L2 генерируются позже, т.е. после принятия решения об отборе данного события. Из указанных трех сигналов L0, L1, L2 для работы МС используется лишь сигнал L0. При этом МС спектрометра PHOS в силу специфики работы коллайдера используется только в ходе специальных калибровочных измерений (LED runs), где моменты прихода сигналов L0 задаются генератором и поэтому строго детерминированы, причем появлению L0 предшествует специальный триггерный сигнал – предимпульс PP.

Временные соотношения между сигналами определяются программируемым Локальным Триггерным Устройством (Local Trigger Unit, LTU) [26], обслуживающим светодиодную мониторинговую систему, спектрометр PHOS, а также другие детекторы. В свою очередь LTU взаимодействует с Центральным Триггерным Процессором (Central Trigger Processor, CTP) [25]. Оптический кабель, транспортирующий PP, L0, L1, L2, подсоединен на вход контроллера DCSV. Последний декодирует поступающую оптическую информацию с помощью одноплатного компьютера DCS-board, преобразует её в соответствующие электрические сигналы, и посылает два последовательных импульса PP и L0 по одному коаксиальному кабелю на вход каждого мастер-модуля MMV. Импульсы PP и L0 имеют различную длительность, т.е. 25 и 50 нс соответственно, что позволяет провести в MMV их отбор по этому признаку.

Синхронизация работы МС может осуществляться несколькими способами. Запуск МС, например, можно инициировать по сигналу PP. Время, которое необходимо МС для проведения всех подготовительных действий перед поджигом светодиодов, составляет 84.5 мкс. Кроме того, сам поджиг, исходя из требований регистрирующей электроники PHOS, должен происходить за 1.2 мкс до сигнала L0. Таким образом, эти условия накладывают ограничение на минимальное время между сигналами PP и L0 как равное $t_{min} = (84.5 + 1.2)$ мкс = 85.7 мкс, что соответствует максимально возможной частоте работы МС $f_{max} = 1/t_{min} = 11.6$ кГц. После окончания подготовительной стадии МС переходит в состояние готовности, длительность которого определяется программно-регулируемой задержкой, после чего светодиоды поджигаются.

Второй вариант синхронизации использует вместо предимпульса PP импульс L0. В этом случае блок MMV в начале сеанса работы мониторинговой системы измеряет время Δt между двумя последовательными импульсами L0 и запоминает эту величину. Далее, исходя из момента t_1 появления текущего сигнала L0, предсказывается время $t_2 = t_1 + \Delta t$ появления следующего L0 и рассчитывается момент старта мониторинговой системы $t_s = t_1 + \Delta t - t_{min}$.

Третий вариант синхронизации МС не использует ни импульс PP, ни L0. В этом случае МС периодически с частотой f стартует сама (самозапуск). За некоторый

интервал времени t_f перед поджигом светодиодов она вырабатывает сигнал *Fire*, который подается на вход LTU. Последний трансформирует его в стандартную серию триггерных сигналов и распределяет их между потребителями. Величины f и t_f задаются программно.

2.2. Структура блоков электроники МС

Структурная схема электроники МС представлена на Рис. 2. Она включает в себя три типа блоков — контроллер DCSV, мастер-модуль MMV и контрольные модули в виде светодиодных плат CM224. Все модули MMV, а также контроллер DCSV установлены в программно-управляемом каркасе VME, который находится за защитой в шахте эксперимента вне зоны радиационного излучения. Модули CM224 установлены непосредственно перед фронтальной поверхностью кристаллов внутри термостабилизированного холодного объема модулей PHOS.

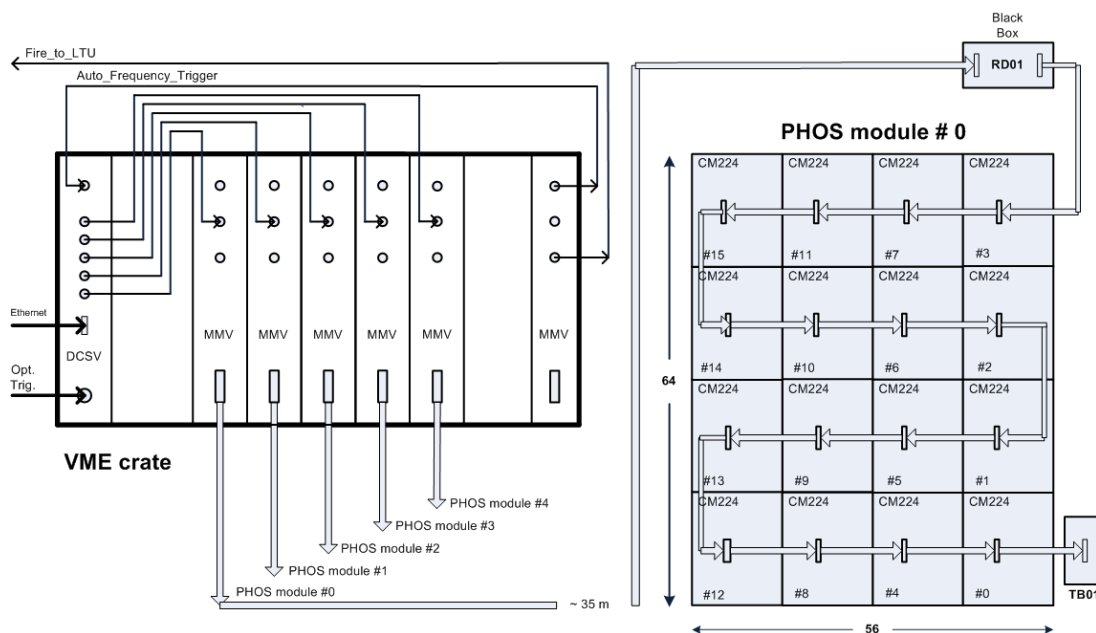


Рис. 2. Блок-схема электроники МС. Обозначения: DCSV — системный контроллер мониторинговой системы; MMV — мастер-модуль мониторинговой системы; CM224 — светодиодный модуль; RD01 — ретранслятор сигналов; TB01 — терминатор.

2.3. Контроллер DCSV

Модуль DCSV выполняет функции системного контроллера для блоков системы мониторингования. Его схема изображена на Рис. 3. Базовым элементом модуля является одноплатный компьютер DCS-board [20], специально разработанный для систем

медленного контроля и управления экспериментальными установками в условиях работы на БАК. Конструктивно контроллер DCSV реализован в стандарте VME 6U как блок одиночной ширины с мезанинно установленной на нем платой DCS-board.

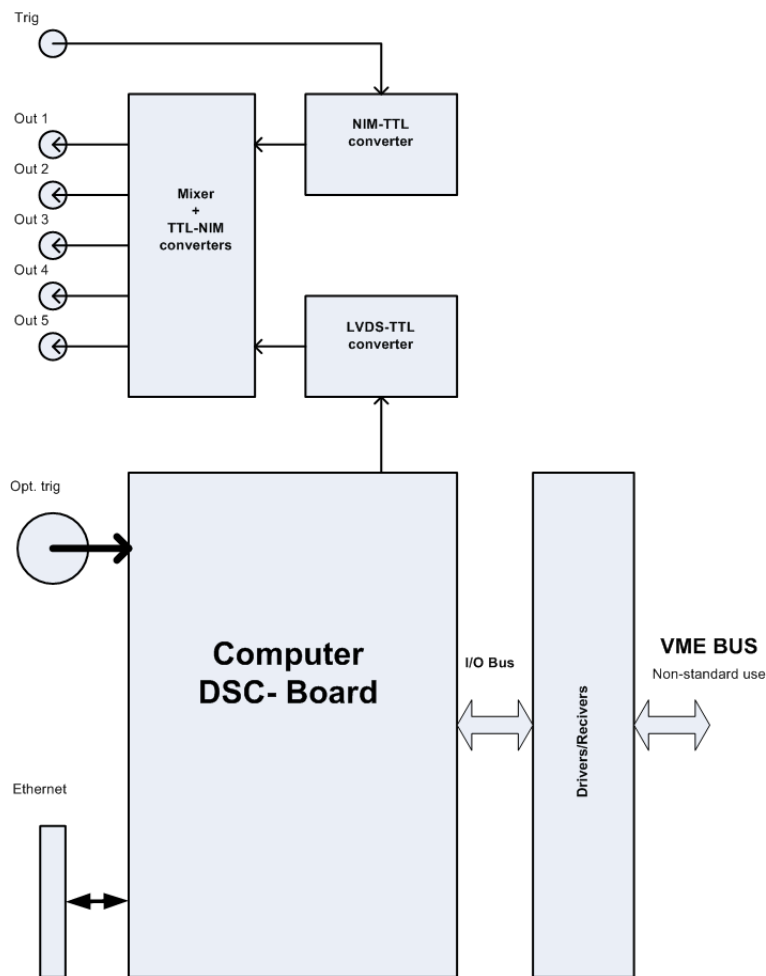


Рис. 3. Схема системного контроллера мониторинга системы DCSV.

Компьютер DCS-board содержит ARM9-контроллер, реализованный на Программируемой Логической Интегральной Схеме (ПЛИС) EPXA1-F484 фирмы ALTERA, контроллер локальной сети Ethernet и различные интерфейсные шины для связи с внешними устройствами. Оперативная память составляет 256 Мбайт. Компьютер не содержит механического жесткого диска, вместо него для хранения информации предусмотрена флэш-память EPROM объемом 32 Мбайт. В силу ограниченности размера флэш-памяти монтирование файловой системы Linux происходит на DCS-board-компьютере таким образом, что часть файлов физически располагается на других компьютерах кластера системы медленного контроля спектрометра PHOS. Работает компьютер под управлением операционной системы ARM-Linux [21]

с соответствующим компилятором языка программирования С и специализированным матобеспечением [22]. Конфигурирование и загрузка операционной системы осуществляются автоматически из флэш-памяти EPROM при включении питания.

Функционально модуль DCSV является интерфейсом между компьютером DCS-board и шиной VME. Он осуществляет прием сигналов с шины ввода/вывода компьютера и их передачу на шину VME. Протокол обмена данными и управление их передачей по кроссу VME не являются стандартными и соответствуют протоколу, используемому компьютером DCS-board.

Существенной особенностью DCS-board, важной для согласованной работы MC в составе эксперимента ALICE, является возможность принятия им кодированных оптических триггерных сигналов эксперимента с их последующей расшифровкой и преобразованием в электрические сигналы уровней LVDS. Для синхронизации работы MC в модуле DCSV предусмотрена схема управления триггерными сигналами. Она включает в себя преобразователи уровней LVDS-TTL для триггерных сигналов, декодированных компьютером из соответствующих оптических сигналов, а также преобразователи уровней NIM-TTL для работы с триггерной электроникой установки. После преобразования сигналы транслируются на выходные разъемы модуля DCSV и служат для запуска мастер-модулей MMV системы мониторинга модулей PHOS.

2.3.1. Мастер-модули MMV

Каждый мастер-модуль MMV может управлять 16 светодиодными платами CM224 (всего 3584 канала). Мастер-модуль реализован в конструктиве VME 6U как блок одиночной ширины, его схема представлена на Рис. 4. Модуль MMV содержит: 16 регистров (в том числе регистры статуса и управления), дешифратор адресов этих регистров, память амплитуд сигналов поджига объемом 4096×8 бит и счетчик адреса этой памяти, память объемом 512×8 бит и счетчик адреса памяти для задания номеров поджигаемых светодиодов, схему управления и таймирования работы модуля, схемы синхронизации, передачи амплитуд и номеров поджигаемых светодиодов, а также схемы селекции и обработки триггерных сигналов.

Адреса указанных выше 16 регистров расположены в области адресов ввода/вывода компьютера DCS-board, что позволяет легко организовать программное управление работой модулей MMV. С помощью этих регистров можно программно задавать требуемую амплитуду вспышки каждого светодиода, конфигурацию и последовательность поджига светодиодов, способ триггирования MC для синхронизации со спектрометром PHOS и триггером эксперимента ALICE, а также динамический или статический характер поджигаемых светодиодных образов. В динамическом режиме адреса поджигаемых групп светодиодов меняются от события к событию, а в статическом — остаются неизменными. Для задания типа адресации (динамическая или статическая) используются два разряда регистра статуса и управления.

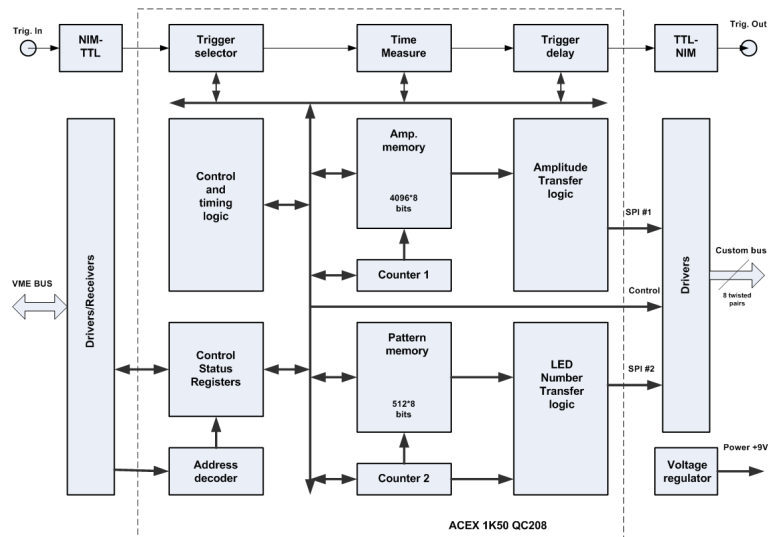


Рис. 4. Схема мастер-модуля MMV мониторингной системы PHOS.

При работе МС в соответствующие регистры заносятся требуемая амплитуда поджига, необходимые номера плат и поджигаемых на них светодиодов, после чего система переходит в состояние ожидания сигнала Trigger. По этому сигналу из модуля MMV информация передается на платы CM224. При этом заданная амплитуда поджига заносится в аналоговую память и формируется сигнал Fire, по которому заданные светодиоды поджигаются, формируя синхронизированные вспышки света перед соответствующими кристаллами модулей PHOS. Для продолжения работы в следующем LED-событии необходимо вновь задать номера светодиодов и амплитуды поджигающих их сигналов.

Функционирование МС может происходить в программной или автономной модах работы. Последовательность операций для обоих случаев одинаковая. Особенности автономной моды состоят в том, что управляющая программа мониторингной системы, супервизор ledEngine [16], запущенная на компьютере DCS-board, прописывает содержимое регистров и задает режимы работы МС только один раз в начале сеанса мониторингирования. После чего контроль над системой передается модулю MMV вплоть до окончания сеанса с повторением всех действий для каждого LED-события автоматически без всякого вмешательства со стороны программы или контроллера DCSV. В конце сеанса ledEngine возвращает себе контроль над системой и останавливает работу МС. В программной же моде работы МС конфигурации поджигаемых образцов могут быть сформированы произвольно в каждом событии.

В автономной моде светодиоды поджигаются группами, причем динамические образцы получаются увеличением адреса группы на единицу при переходе к следующему событию. В результате возможен поджиг конфигураций в виде:

- а) одной группы (8 светодиодов, образ – "одиночный штрих");
- б) одинаковых групп на всех платах CM224 (образ – "шахматная доска");

в) короткой линейки из 4 соседних групп на плате СМ224 (32 диода, образ – "короткая линия");

г) длинной линейки, составленной из коротких соседних линеек на всех платах СМ224 (128 диодов, образ – "длинная линия").

Четыре параллельные длинные линии (каждая проходит только через одну плату СМ224) формируют регистрируемый образ события в виде 4 непрерывных полос типа "зебра" от одного края модуля спектрометра до другого. Таким образом, в динамическом режиме адресации весь модуль PHOS (3584 кристалла) сканируется за 7 тактов (событий). Тип адресации задается установкой значений "0" или "1" в два разряда регистра статуса и управления.

Для синхронизации работы системы мониторингования с регистрирующей электроникой PHOS в модулях MMV заложена возможность задания типа внешнего триггерного сигнала, а также работа в полностью автономной моде без внешнего триггера (самозапуск). В последнем случае модуль автоматически выполняет описанную выше последовательность действий с одной из заданных частот: 2 Гц, 20 Гц, 200 Гц или 1 кГц. Чтобы обеспечить синхронную работу нескольких модулей MMV в этом режиме, задействован дополнительный модуль MMVsuper. Формируемый этим модулем с заданной частотой сигнал передается на остальные модули MMV и является триггером для них, а сигнал Fire в стандарте ECL пересылается на LTU, где он преобразуется в стандартную последовательность триггерных импульсов установки ALICE с последующей рассылкой этих сигналов всем потребителям.

Для работы с внешним триггером в модулях MMV используется схема селекции сигналов по длительности. В режиме триггирования MC по импульсу L0 она принимает последовательность триггерных импульсов L0-L1, стандартно вырабатываемых LTU для запуска спектрометра PHOS. Длительность этих сигналов составляет 25 нс и 50 нс соответственно. Эти сигналы преобразуются контроллером DCSV из оптических в сигналы уровней NIM и передаются на модули MMV. Мониторная система работает с триггером L0, поэтому селектор игнорирует все входные сигналы длиннее 40 нс и начинает работать по сигналу короче 30 нс. Предусмотрена также подстройка момента поджига светодиодов. Для этого предварительно по команде супервизора ledEngine мастер-модуль измеряет временной интервал t_{L0-L0} между двумя соседними триггерами L0 с точностью 100 нс. Максимально возможный интервал между триггерами не должен превышать 800 мс. Измеренное значение считывается программой ledEngine и вычисляется задержка t_{delay} старта MC относительно импульса L0

$$t_{delay} = t_{L0-L0} - t_p - \Delta t_{L0-f} , \quad (1)$$

где t_p – время передачи информации в СМ224 (84.5 мкс), Δt_{L0-f} – требуемая электроникой задержка между поджигом и триггером (1.2 мкс). Вычисленная величина записывается ledEngine в регистры MMV и мастер-модули переводятся из режима измерения в режим поджига.

Все составные части модуля, за исключением приемопередатчиков с/на шину VME и в модули CM224, реализованы в ПЛИС EP1K50QC208 фирмы ALTERA, что позволило существенно упростить компоновку модуля. Загрузка содержимого ПЛИС осуществляется при включении питания из микросхемы последовательного ПЗУ EPC2LC20 фирмы ALTERA.

2.3.2. Светодиодные контрольные модули CM224

Модули CM224 выполнены в виде двусторонних печатных плат, подключенных к модулю MMV с помощью плоского скрученного кабеля. Напряжение питания для CM224 (+9 В) формируется в модуле MMV и подается на платы по этому же кабелю с последующим преобразованием напряжения уже в модуле CM224 в +5 В. На одной из сторон каждой платы установлено по 224 сверхъярких светодиода зеленого свечения Kingbright L934SGC [17], а на другой стороне смонтированы необходимые управляющие цепи, а также микропереключатели (jumpers) для задания двоичного кода номера платы (в остальном все CM224 платы идентичны). Схема модуля представлена на Рис. 5.

Модуль CM224 содержит также схемы приемников сигналов с триггерами Шмитта, 28 аналоговых мультиплексоров с одного входа на 8 выходов, сдвиговые регистры, дешифратор номеров каналов, 8-разрядные цифроаналоговые преобразователи (ЦАП) AD5300, аналоговые ключи и аналоговую память на керамических бескорпусных конденсаторах с высокостабильным диэлектриком типа NPO для хранения на них заряда при напряжении, поступившем с ЦАП.

Для связи между MMV и платами CM224, а также с целью обслуживания ЦАП используется высокоскоростной (до 30 МГц) последовательный протокол передачи данных по трехпроводной линии (SPI, QSPI или Microwire совместимый протокол с отдельными шинами для передачи амплитуд и задания номеров каналов, но с общим тактовым сигналом). Дополнительно добавлены три индивидуальные шины: All cards для одновременной адресации всех модулей CM224, Load – для включения режима записи заданной амплитуды в заданную аналоговую память (заряд конденсатора до амплитуды, формируемой ЦАП) и Fire – для поджига светодиодов (одновременное включение всех аналоговых ключей и разряд конденсаторов через соответствующие светодиоды).

Расстояние от каркаса VME до модулей PHOS составляет около 35 м, плюс еще 8 м кабеля проложены внутри каждого модуля PHOS. Поэтому для надежной передачи данных используется ретранслятор сигналов RD01. Он обеспечивает прием и согласование сигналов кабеля связи с модулем MMV и их передачу в модуль PHOS на последовательно соединенные платы CM224. Для согласования сигналов, передаваемых внутрь модуля, установлена плата терминатора TB01, подключаемая в конце кабеля связи плат CM224. Платы RD01 и TB01 располагаются на модулях спектрометра PHOS.

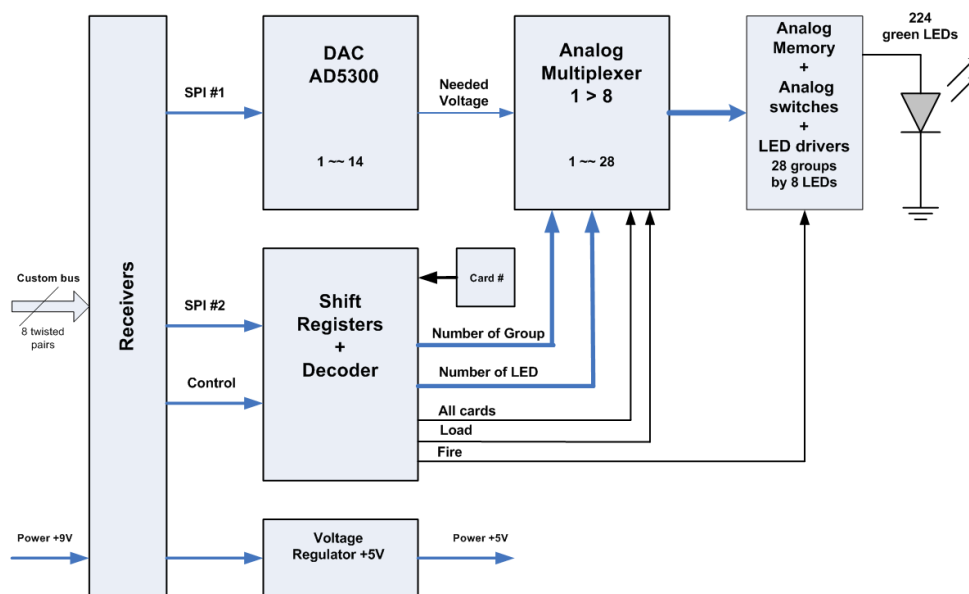


Рис. 5. Схема светодиодного модуля SM224 мониторинной системы PHOS.

Функционирует модуль следующим образом: из мастер-модуля MMV по кабелю связи в последовательном коде передаются требуемый адрес светодиода и заданная амплитуда вспышки этого светодиода (так как шины адреса и амплитуды отдельные, их передача происходит одновременно). Адрес светодиода состоит из номера платы SM224, номера группы (для упрощения адресации все диоды платы разбиты на 28 групп по 8 диодов в каждой группе) и номера светодиода в группе. По окончании этой передачи модуль MMV формирует сигнал Load на платы SM224 и в заданном канале требуемая амплитуда заносится в аналоговую память (соответствующий конденсатор через адресный аналоговый мультиплексор подключается к выходу ЦАП и заряжается до заданного напряжения). Далее этот процесс повторяется для заданного количества светодиодов. По окончании этого процесса из мастер-модуля MMV передается сигнал Fire, и все светодиоды через аналоговые ключи одновременно подключаются к конденсаторам аналоговой памяти и формируют вспышки света с заданными амплитудами.

3. Применение мониторинной системы в эксперименте

Главной задачей MC является мониторинрование работы каналов спектрометра PHOS и контроль правильности их работы. Дополнительная функция MC заключается в начальной калибровке и относительном выравнивании откликов каналов спектрометра. Эту важную функцию MC мы подробно рассмотрим в другой статье. Здесь же мы остановимся в основном на функциях технического контроля спектрометра.

Типичная картина восстановленного мониторингового события в спектрометре PHOS показана на Рис. 6. Здесь конфигурация области поджигаемых светодиодов была выбрана в виде четырех полос, каждая шириной в два кристалла спектрометра. От события к событию полосы перемещаются по поверхности PHOS от меньших адресов каналов к большим.

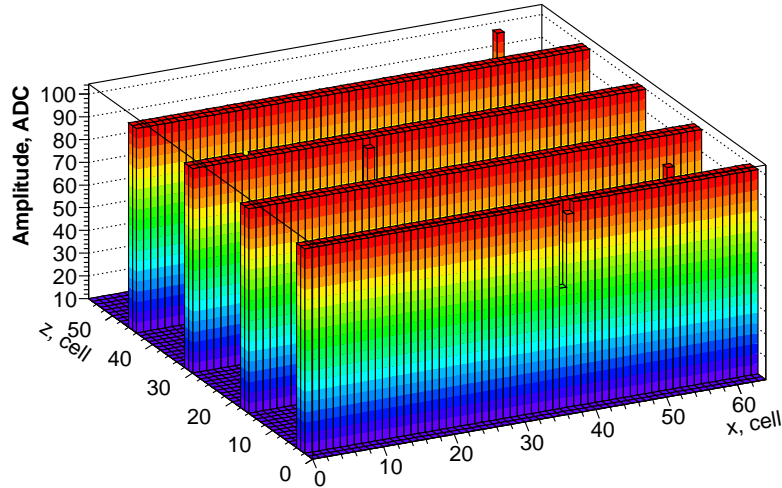


Рис. 6. Типичная картина восстановленного на плоскости спектрометра события от воздействия мониторинговой системы.

Как уже отмечалось выше, при мониторинговании спектрометра мониторинговая система может запускаться в режиме с фиксированной амплитудой поджига светодиодов или с варьируемой амплитудой во всех каналах спектрометра. В первом случае после обработки данных амплитудный спектр отклика произвольного канала спектрометра содержит только один пик с некоторым аппаратным уширением, а во втором случае – ряд пиков, как это показано на Рис. 7. Количество и амплитуда пиков регулируется программным образом. После набора статистики мониторингования анализирующая программа подсчитывает число пиков в амплитудных спектрах, их положение и уширение. Полученные данные сравниваются с результатами предыдущих тестовых измерений, а также проверяются на соответствие с заранее заданными ограничениями, характеризующими допустимые отклонения сигналов. В результате делаются выводы о качестве работы спектрометра PHOS в целом.

В случае неисправностей в аппаратуре или электронике спектрометра мониторинговая система может быть эффективно использована для их поиска и последующего устранения. К такого рода задачам относятся обнаружение нестабильности работы аппаратуры, проверка формы выходного импульса каналов электроники, составление карты неисправных или слабых каналов, контроль синхронизации электроники спектрометра.

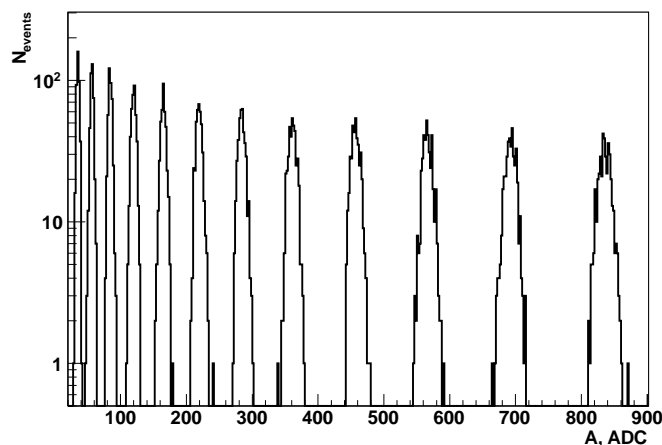


Рис. 7. Амплитудный спектр отклика типичного канала регистрации PHOS при работе МС в режиме вырбируемой амплитуды, т.е. при изменении амплитуды поджига светодиодов от события к событию.

3.1. Проверка формы выходного импульса канала

Для исправного канала форма выходного импульса соответствует переходной функции электронного фильтра. Последняя описывается псевдогауссовой функцией второго порядка. Анализ профиля сигнала позволяет извлечь информацию как об амплитуде сигнала, так и о его временной метке, подробнее см. [5]. Особое внимание при этом уделяется отсутствию паразитных осцилляций вдоль временного профиля сигнала.

На Рис. 8 показан зарегистрированный профиль выходного сигнала от вспышки светодиода для типичного исправного канала спектрометра, а также производная от функции профиля. Профиль содержит, в основном, информацию, важную для определения амплитуды сигнала, а производная от функции профиля — для определения временной метки сигнала.

3.2. Составление карты неисправных и слабых каналов

Важной задачей МС является составление карты неисправных и слабых каналов спектрометра. При наличии доступа к спектрометру такие каналы подлежат ремонту. В противном случае они особым образом учитываются при обработке данных. На Рис. 9 показана карта неисправных каналов, полученная с помощью мониторинговой системы в ходе тестовых сеансов (LED RUN) для отладки и настройки аппаратуры спектрометра PHOS.

Наличие слабых каналов, т.е. каналов, усиление которых значительно меньше характерной величины, может быть установлено при анализе статистически усредненных амплитуд отклика каналов на воздействие вспышек света с некоторой фиксированной амплитудой.

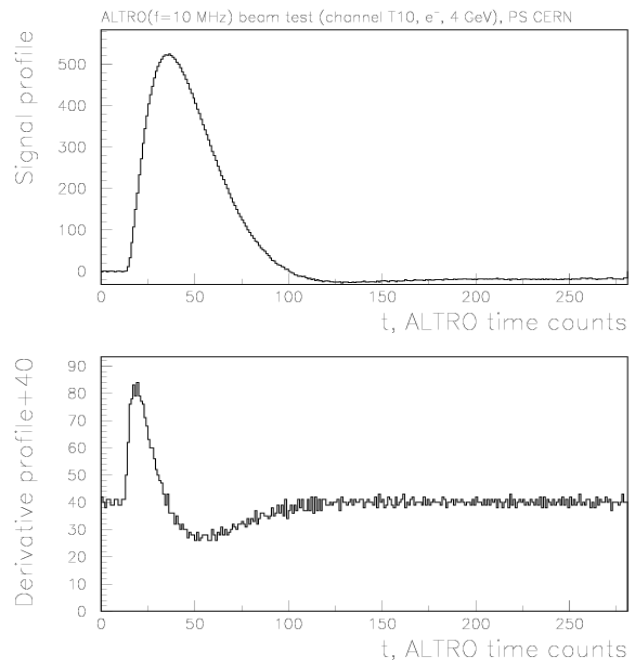


Рис. 8. Профиль выходного сигнала от вспышки светодиода для типичного исправного канала спектрометра PHOS, внизу дополнительно показана производная сигнала, смещенная по оси ординат на 40 отсчетов ALTRO вверх для положительной определенности.

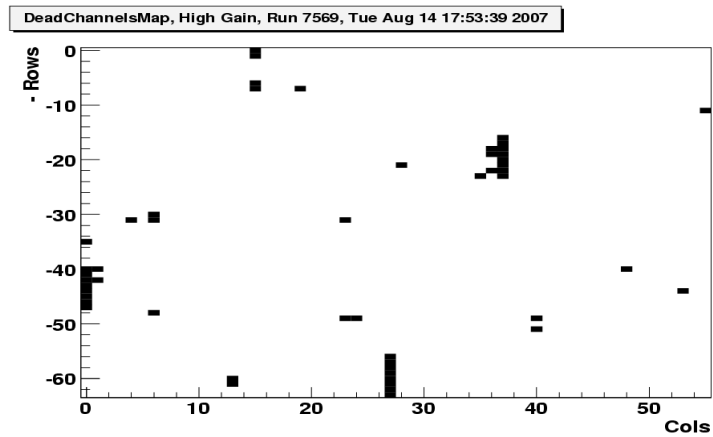


Рис. 9. Карта неисправных каналов, полученная с помощью мониторинговой системы для одного из модулей PHOS в ходе тестового сеанса (LED run) для отладки и настройки аппаратуры спектрометра.

3.3. Контроль синхронизации электроники PHOS

Как уже было отмечено выше, синхронизация спектрометра PHOS осуществляется сигналами L0 из стандартной триггерной последовательности импульсов в эксперименте ALICE. В случае сбоев синхронизации 2-мерная картина LED-событий в PHOS-модуле характеризуется искажениями в виде изломов линеек засвеченных каналов, см., например, Рис. 10. Это позволяет оперативно отслеживать различные сбои электроники при комплексном запуске модулей спектрометра.

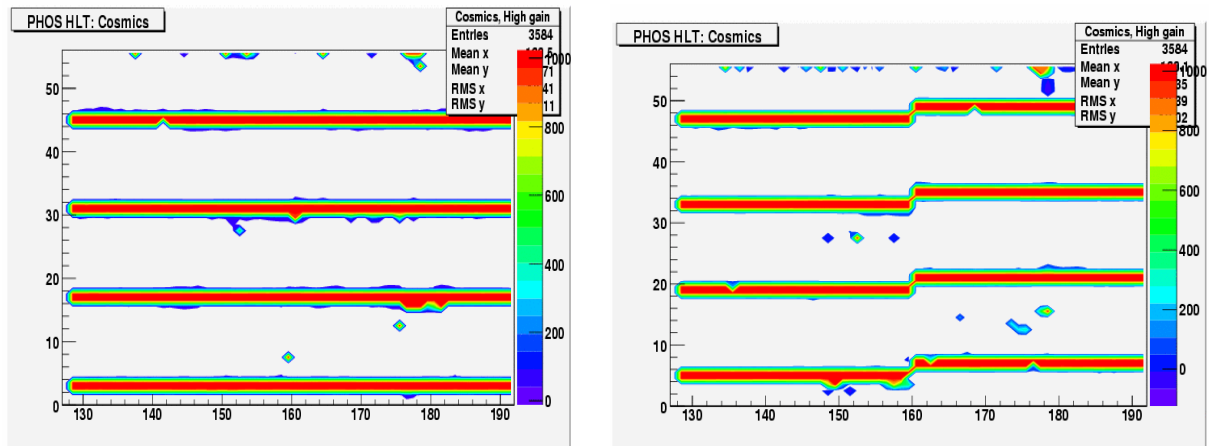


Рис. 10. Изображение события на плоскости спектрометра от воздействия светодиодной мониторинговой системы, каждая полоса на рисунке соответствует двум смежным рядам кристаллов на поверхности PHOS. Слева — правильная синхронизация, справа — сбоем синхронизации. Данные получены в тестовых сеансах (LED RUN) во время настройки аппаратуры.

Заключение

Эксплуатация описанной выше мониторинговой системы спектрометра PHOS в процессе его запуска и последующего набора данных в составе эксперимента ALICE на сталкивающихся пучках БАК в течение сеансов 2009-2010 гг. показала адекватность реализованной мониторинговой системы задачам эксперимента и её исключительную полезность при наборе данных в условиях реального эксперимента.

Авторы пользуются случаем выразить признательность Н.А. Кузьмину за плодотворное сотрудничество на этапе лабораторных испытаний мониторинговой системы.

Данная работа поддержана грантом Российского фонда фундаментальных исследований № 08-02-91021-ЦЕРН-а.

Список литературы

- [1] ALICE Collaboration, Technical Proposal, CERN/LHCC/95-71, LHCC/P3, Geneva, 15 December 1995.
- [2] ALICE Collaboration, Technical Design Report PHOS, CERN/LHCC 99-4, ALICE TDR 2, Geneva, 5 March 1999.
- [3] M.Ippolitov, S.Beloglovsky, M.Bogolyubsky et al., Nucl. Instrum. Meth. A486, 121-125, 2002.
- [4] ALICE TPC Readout Chip, User Manual, CERN, June 2002.
- [5] M.Yu.Bogolyubsky, S.A.Sadovsky, V.I.Manko et al., Internal ALICE Note/PHOS ALICE-INT-2008-026, Geneva, 2008. (Послано в NIM).
- [6] G.Anton, K.Bucher and M.Kuckes, Nucl. Instr. Meth. A 274 (1989) 222.
- [7] T.Hehl, P.Grambmayer, M.Sauer and G.J.Wagner, Nucl. Instr. Meth. A 354 (1995) 505.
- [8] D.Autiero, M.Baldo-Geolin, F.Boleisut et al., Nucl. Instr. Meth. A 372 (1996) 556.
- [9] Yu.Gouz, Yu.M.Ivanyushenkov, A.K.Konopliannikov et al., Preprint ИФВЭ 95-108, Протвино, 1995.
- [10] А.Н.Васильев, Ю.М.Гончаренко, О.А.Грачев и др. Препринт ИФВЭ 97-60, Протвино, 1997.
- [11] S.J.Alvsvaag et al., Nucl. Instrum. Meth. A425:106-139, 1999.
- [12] O.Biebel, B.Boden, H.Borner et al., Preprint CERN-PPE/92-19, Geneva, 1992.
- [13] V.Steiner, M.A.Moinester, M.Kubantsev et al., Preprint FNAL E781 H-741, 1995; Preprint FNAL E781 H-758, 1995.
- [14] V.N.Evdokimov, P.I.Goncharov, Yu.V.Korneev et al., Preprint ИФВЭ 99-47, Протвино, 1999.
- [15] А.М.Блик, М.Ю.Боголюбский, С.Е.Ерин и др. Приборы и техника эксперимента, №6, 2003, с. 28-34; Instruments and Experimental Techniques, Vol. 46, №6, 2003, pp. 753 - 757.
- [16] М.Ю.Боголюбский и др. "Матобеспечение светодиодной мониторинговой системы Фотонного Спектрометра PHOS установки ALICE на Большом Адронном Коллайдере" , планируется опубликовать в виде Препринта ИФВЭ в 2011 г. и направить в ПТЭ.

- [17] <http://www.kingbright.com>
- [18] Y.Li, W.Zhao, Y.Hia et al., Phys. Stat. Sol.(c) 4, N°7, 2784-2787 (2007), D01 10,1002/pssc.200674750.
- [19] http://en.wikipedia.org/wiki/Serial_Peripheral_Interface_Bus
- [20] <http://kip-uni-heidelerger.de/ti/DCS-board/current>
- [21] <http://www.arm.com/products/OS/>
- [22] "http://web.ift.uib.no/~kjeks/wiki/index.php?title=Electronics_for_the_Time_Projection_Chamber_%28TPC%29#Download_Section_3"
- [23] ALTERA Corporation, Digital Library 2000, version 5, ALTERA Corporation, 2000.
- [24] New Product Applications – 1999, spring edition, Analog Devices, Inc., 1999.
- [25] ALICE Collaboration, Technical Design Report, CERN-LHCC-2003-062, ALICE TDR 10, Geneva, 7 January 2004.
- [26] Local Trigger Unit. Preliminary Design Review, editor P. Jovanovic, version 1.0, CERN, Geneva, 15.10.2002.

Рукопись поступила 1 апреля 2011 г.

М.Ю. Боголюбский и др.
Светодиодная мониторинговая система Фотонного Спектрометра PHOS в эксперименте
ALICE на Большом Адронном Коллайдере.

Оригинал-макет подготовлен с помощью системы **L^AT_EX**.
Редактор Л.Ф. Васильева.

Подписано к печати 12.04.2011. Формат 60 × 84/16. Офсетная печать.
Печ.л. 1,375. Уч.-изд.л. 2,112. Тираж 80. Заказ 40. Индекс 3649.

ГНЦ РФ Институт физики высоких энергий
142281, Протвино Московской обл.

Индекс 3649

П Р Е П Р И Н Т 2011-6, И Ф В Э, 2011
