

УДК 539.12

СИСТЕМА КОНТРОЛЯ ТЕМНОВЫХ ШУМОВ ФОТОЭЛЕКТРОННЫХ УМНОЖИТЕЛЕЙ ДЛЯ НЕЙТРИННОГО ДЕТЕКТОРА VOREXINO

Д. И. Орехов, А. С. Чепурнов, А. А. Сабельников^{*)}, А. В. Этенко^{*)}
(НИИЯФ)

E-mail: orekhov@rtm-cs.sinp.msu.ru

Мониторинг темновых шумов фотоэлектронных умножителей (ФЭУ) очень важен для обеспечения работоспособности детектора Vorexino. Для решения этой задачи на основе сети CAN и протокола верхнего уровня DeviceNet была создана система контроля темновых шумов. Система состоит из набора CAN контроллеров, которые преобразуют сигналы от ФЭУ в цифровую форму и передают данные по сети CAN в хост-компьютер. Программное обеспечение реализует стек протокола DeviceNet, обеспечивая сбор и передачу данных. Интерфейс пользователя построен на базе динамических веб-страниц.

Описание детектора Vorexino

Vorexino — детектор нейтрино низких энергий. Детектор находится в подземной лаборатории Гран Сассо, Италия (LNGS). Основной целью эксперимента является прямое измерение потока ${}^7\text{Be}$ солнечных нейтрино с энергией 0.86 МэВ в режиме реального времени. ${}^7\text{Be}$ -нейтрино образуются в реакции p - p -цикла на Солнце: ${}^7\text{Be} + e^- \rightarrow {}^7\text{Li} + \nu_e$. Детектирование происходит посредством реакции упругого рассеяния нейтрино на электронах в сцинтилляторе: $e^- + \nu_e \rightarrow e'^- + \nu_e'$ (сцинтиллятор — вещество, в котором под действием ионизирующего излучения возникают световые вспышки — сцинтилляции, используется 1,2,4-триметилбензин с добавлением 2,5-дифенилоксазола). Далее электрон отдачи вызывает сцинтилляцию, а образовавшиеся фотоны регистрируются ФЭУ. Электроны отдачи в реакции имеют непрерывный спектр с максимальной энергией 0,66 МэВ. Наблюдаемый диапазон энергий электронов 0.25–0.80 МэВ. Измерение потока нейтрино позволит уточнить параметры нейтринных осцилляций и конкретную модель осцилляций для ${}^7\text{Be}$ -нейтрино и подтвердить механизмы реакций, обеспечивающих светимость Солнца [1].

Детектор состоит из двух частей: детектор нейтринных событий (внутренний детектор) и система мюонного вето (внешний детектор). Внутренний детектор содержит около 300 т жидкого сцинтиллятора, из которых 100 т используются в качестве мишени для нейтрино, а оставшийся объем служит для подавления внутреннего фона детектора. Внешний детектор заполнен водой, в которой мюоны космического происхождения детектируются по черенковскому излучению (рис. 1).

Особенностью детектирования нейтрино низких энергий является малочисленность исследуемых событий. Ожидаемая частота регистрации нейтрино в Vorexino равна 0.5 событий в день на тонну вещества детектора. Поэтому критически важно поддерживать низкий уровень фона в детекторе. Именно сцинтилляционный детектор обеспечивает необходимую для регистрации нейтринных событий интенсивность потока фотонов при таких условиях. Ввиду малых энергий образующихся частиц ФЭУ в детекторе работают в однофотоэлектронном режиме.

Характерной особенностью любого ФЭУ являются темновые шумы. Темновые шумы в однофотоэлектронном режиме — это сумма импульсов на выходе ФЭУ, возникающих при отсутствии попадания фотона на фотокатод. При определенных условиях темновые шумы ФЭУ способны исказить физическую картину и даже сделать работу детектора невозможной. Поэтому система контроля темновых шумов ФЭУ детектора Vorexino необходима для мониторинга состояния детектора и его готовности для выполнения целевой функции по сбору физических данных. Кроме того, накопленные данные о темновых шумах ФЭУ являются самостоятельным источником физических данных [2]. Система контроля, как и сам детектор Vorexino, разделена на две независимые подсистемы, названные «внешняя» и «внутренняя», и физически интегрирована в систему сбора данных детектора Vorexino.

Основные принципы работы системы сбора данных

Идентификация нейтринных событий в Vorexino происходит путем регистрации сцинтилляционных

^{*)} РНЦ «Курчатовский институт».

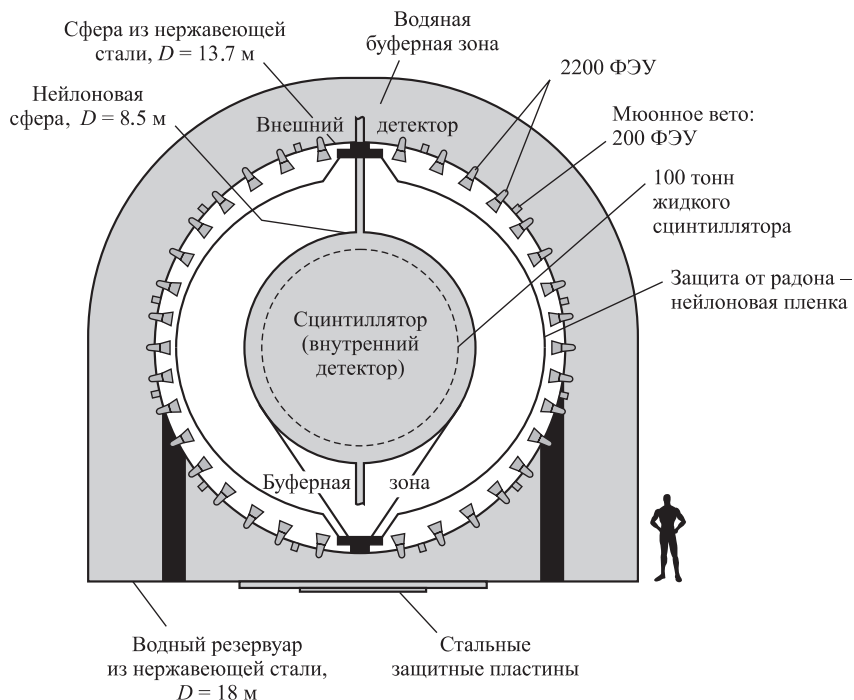


Рис. 1. Схема детектора Борексина

фотонов, число которых пропорционально полной энергии, переданной электроном отдачи сцинтиллятору. Схема обработки электронного сигнала с ФЭУ позволяет измерять временные характеристики фотонов, необходимые для отбора событий по форме импульса и пространственной реконструкции событий (рис. 2).

С внутреннего детектора сигнал с ФЭУ поступает на схему сопряжения с ФЭУ (Front-End Board), где происходит фильтрация сигнала от шумов, его предварительное усиление и аналоговое суммирование. На выходе получается информация о временных характеристиках сигнала и о накопленном заряде. Кроме того, отдельно выдается аналоговая сумма сигналов с 12 ФЭУ для системы контроля темновых шумов. После суммирования по 2, 4 и 8 каналам в аналоговом сумматоре сигнал передается на оцифровщик формы импульса (Wave-Form Digitizer, WFD), что позволяет расширить динамический диапазон детектора до 30 МэВ. Основной несуммированный сигнал далее подается на устройство преобразования сигнала в цифровую форму (Digital Boards), где происходит его аналого-цифровое преобразование, измерение времени сигнала с разрешением 1 нс, подсчет числа сигналов в диапазоне 60 нс (для срабатывания триггера) и сохранение этих данных в постоянной памяти.

Сигнал, поступающий в систему контроля темновых шумов, вначале преобразуется в цифровую форму, потом поступает на счетчик. Суммирование сигнала с 12 ФЭУ связано с конструкцией электроники внутреннего детектора: такой сигнал является достаточным для отслеживания состояния всех 2200 ФЭУ. «Внутренняя» система содержит

14 модулей-частотомеров по 16 каналов в каждом. Причем из 16 каналов одновременно используются только 14, а два являются резервными. Эти данные через сеть CAN передаются на компьютер для обработки, после чего по характеристикам сигнала происходит мониторинг состояния детектора оператором. Кроме данных об интенсивности темновых шумов производится сбор 14 потоков данных о температуре блоков питания и напряжениях питания аналоговых цепей. Эти параметры необходимы для нормального функционирования WFD. Отсутствие одного из напряжений питания или перегрев блока питания могут вызвать отказ аналогового сумматора и потерю сигналов с ФЭУ для дальнейшего анализа.

Для внешнего детектора сигнал с ФЭУ поступает на схему сопряжения, где происходит его предварительное усиление и зарядово-временное преобразование (Q-Time Conversion — QTC). Далее сигнал подается на преобразователь временных сигналов в цифровые (Time-Digital Conversion — TDC), после чего данные сохраняются в постоянной памяти. Также со схемы сопряжения суммированный цифровой сигнал подается на систему триггера, а несуммированный — в систему контроля темновых шумов.

Триггер срабатывает при наличии N сигналов во внутреннем детекторе в течение 60 нс. Экспериментально установлено, что частота срабатывания триггера определяется в основном наличием в веществе детектора радиоактивного изотопа ^{14}C , и значение N лежит в диапазоне 15–60. При этом полезным сигналом является только при отсутствии событий в мионном вето в данный промежуток времени.



Рис. 2. Блок-схема аппаратной части системы контроля и сбора данныхorexino

Во «внешней» системе контроля темновых шумов сигнал поступает на счетчик, а потом через сеть CAN передается на компьютер для дальнейшей обработки. «Внешняя» подсистема контроллеров отслеживает уровень темновых шумов для каждого из 200 ФЭУ мюонного вето. Подсистема состоит из 4 частотомеров по 64 канала, часть из которых являются резервными.

Системы контроля темновых шумов внутреннего и внешнего детекторов, а также аналоговый сумматор для WFD созданы совместно в РИЦ «Курчатовский институт» и НИИЯФ МГУ. Особенностью данной системы является ее независимость от основной системы регистрации событий в детекторе. Система контроля работает непрерывно в период

действия детектора, осуществляя наблюдение даже между сериями измерений.

Организация сбора данных с использованием шины CAN

В основе созданной нами системы лежит принцип независимых программных и аппаратных модулей, взаимодействующих посредством стандартных интерфейсов и протоколов.

Для контроля состоянияorexino требуется измерение различных физических параметров: интенсивности импульсов ФЭУ, температуры и напряжения сумматоров. В системах сбора данных с множеством аналоговых датчиков наиболее распространенными являются интерфейсы «токовый 4–20 мА»

и частотный. В последнем случае аналоговый параметр сразу генерируется или преобразуется в сигнал частоты. Именно этот способ наиболее удобен для передачи для дальнейшей обработки таких непрерывно измеряемых аналоговых физических параметров, как температура, напряжение, давление. При передаче сигнала в частотной форме технически проще и дешевле обеспечить гальваническую развязку при многоканальном сборе данных в больших распределенных системах. Поэтому универсальным входным преобразователем в созданном архитектурном решении является модуль с несколькими входами для измерения частоты. Модули объединяются стандартной сетью, обеспечивая возможность построения иерархической распределенной системы и приближения первичных преобразователей к датчикам.

При разработке системы предполагалось измерение относительно медленно меняющихся параметров: характерное время изменения должно превышать 1 с. Измеряемое значение интенсивности темновых шумов при этом может лежать в диапазоне от 10 до $0.5 \cdot 10^6$ имп/с. Точность измерения составляет 1 имп/с в средней части рабочего диапазона, а на границах этого диапазона имеет погрешность не более 10%.

Для связи модулей нашей системы была выбрана шина CAN (Controller Area Network) [3]. В силу своих особенностей — побитовый арбитраж, диф-

ференциальный режим передачи сигналов, высоконадежный алгоритм обработки и фиксации ошибок, высокая скорость передачи данных (до 1 Мбит/с) и помехоустойчивость — CAN хорошо подходит для создания распределенных систем сбора данных в реальном времени. Гибкость CAN достигается за счет простого подключения и отключения от шины CAN-модулей. Современный стандарт CAN 2.0B [4] описывает только два нижних уровня эталонной модели ISO/OSI: физический и канальный. Поэтому для построения системы передачи данных требуется применение протокола верхнего (прикладного) уровня. Конкретная реализация протокола определяет способ адресации узлов сети, отвечает за распределение адресов и приоритетов устройств и обработку передаваемых данных. Из множества протоколов можно выделить DeviceNet и CANopen, которые имеют открытую спецификацию и хорошо стандартизированы. В системе контроля темновых шумов Bogehino используется протокол DeviceNet [5].

Архитектурной особенностью системы является возможность разделения системы сбора данных на произвольное число независимых подсистем, являющихся отдельными сетями CAN. В каждой из этих подсистем может измеряться до 256 каналов интенсивности с помощью нескольких контроллеров-частотомеров. Такая схема обеспечивает логическую группировку датчиков по географическому или функциональному признаку. Контроль

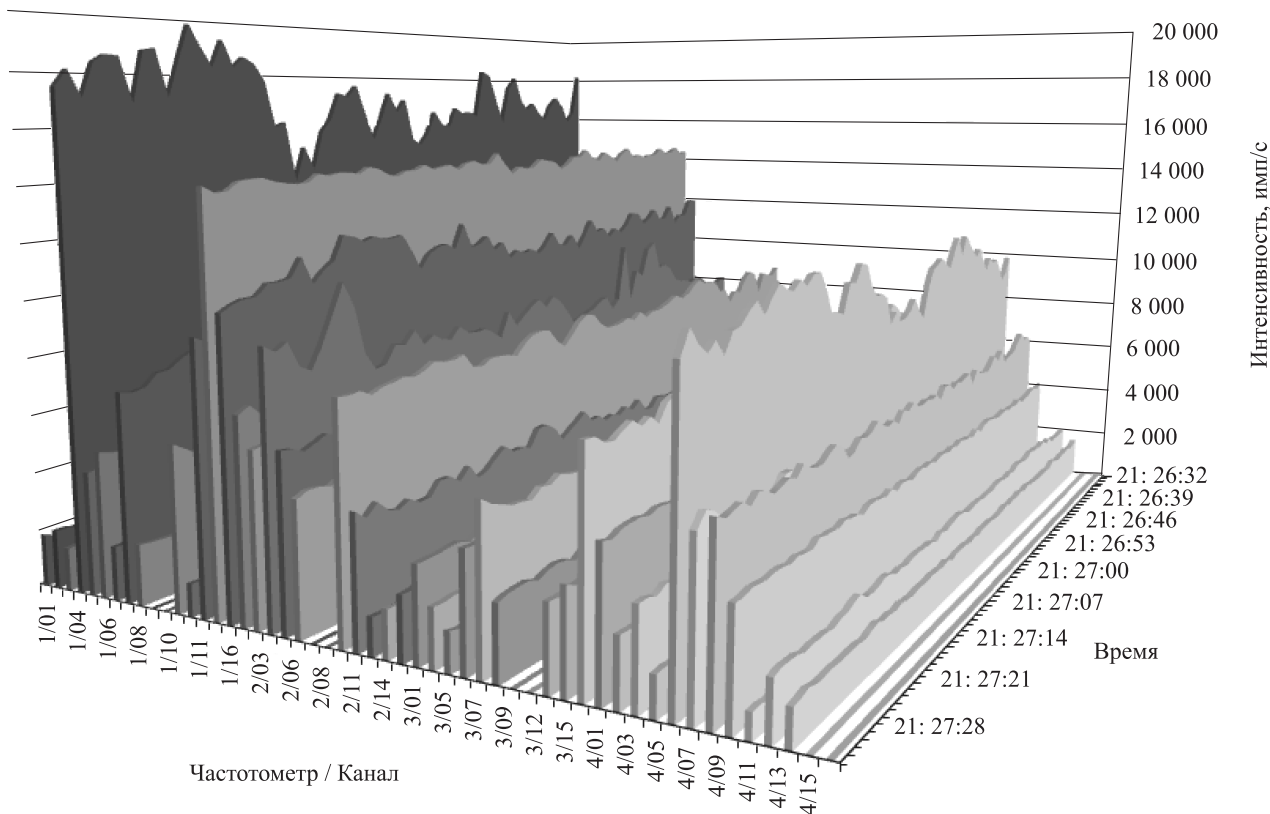


Рис. 3. График интенсивности одноэлектронных шумов ФЭУ

леры для каждой из подсистем могут иметь отличающиеся технические характеристики (канальность, диапазон измеряемых частот) в зависимости от конкретной физической задачи, но при этом имеют общую архитектуру и единое представление в системе. Предполагается, что к одному контроллеру подключаются датчики, расположенные близко друг к другу. Каждый из частотомеров имеет CAN-контроллер и подключен к сети в качестве Slave-устройства. Master-устройством является управляющий компьютер системы сбора данных. Данные от управляющего компьютера поступают на сервер, где происходит их хранение и выдача по запросам клиентских терминалов. Для измерения физических параметров, отличных от частоты, в систему можно добавить модули-преобразователи «параметр–частота», соединенные по шине CAN.

Таким образом, созданная нами система реализует классическую трехуровневую модель систем управления и сбора данных:

- уровень доступа к объекту;
- уровень станций управления;
- сервисный уровень, который поддерживает графический интерфейс и сохранение данных в БД.

Именно такая архитектура позволяет масштабировать и адаптировать систему сбора данных к большим и распределенным физическим установкам.

Программное обеспечение системы работает в операционной системе Linux. Компоненты системы написаны на языках C, Perl и PHP. Для хранения данных используется реляционная СУБД PostgreSQL.

Сбор данных

Разработанное аппаратное и программное обеспечение было запущено в тестовую эксплуатацию на детекторе Borexino осенью 2004 г. Рабочий запуск детектора осуществлен весной 2007 г. Летом 2007 г. на установке был измерен поток ${}^7\text{Be}$ -нейтрино, подтверждена Стандартная Солнечная Модель и найдены нейтринные осцилляции [6].

За время тестовой эксплуатации системы уже накоплено некоторое количество данных об интенсивности темновых шумов. На рис. 3 показана времен-

ная зависимость средней интенсивности темновых шумов ФЭУ внутреннего детектора для 40 каналов за одну минуту. На диаграмме можно увидеть характер изменения интенсивности темновых шумов, отключенные каналы и различие средних значений интенсивности в разных каналах.

Выводы

Созданная система способна обеспечить оперативный мониторинг физической установки, в частности своевременную реакцию на возникновение неисправностей оборудования. Архитектура системы позволяет легко ее масштабировать и расширять ее функциональные возможности.

Учитывая положительный опыт использования системы контроля темновых шумов детектора Borexino и ее модульную архитектуру, программные и аппаратные компоненты системы можно рассматривать как платформу для построения распределенных систем контроля, сбора и анализа данных для больших ядерно-физических установок.

Литература

1. *Borexino Collaboration* // *Astroparticle Physics*. 2002. **16**. P. 205.
2. *Сабельников А.А., Чепурнов А.С.* Исследование интенсивности одноэлектронных темновых шумов фотомножителей детектора Борексино. Препринт РИЦ «Курчатовский институт» ИАЭ-6305/15. М., 2003.
3. *Chepurnov A.S., Nedeoglo F.N., Etenko A.V., Sabelnikov A.A.* // *Problems of Atomic Science and Technology. Nuclear Physics Investigations*. 2004. **43**, N 2. P. 75.
4. CAN Specification 2.0B. // Robert Bosch GmbH, Postfach 30 02 40, D-70442. Stuttgart, 1991 (<http://www.semiconductors.bosch.de/pdf/can2spec.pdf>).
5. *Chepurnov A.S., Komissarov D.V., Nedeoglo F.N., Nikolaev A.S.* // *Proc. of ICALEPCS'99. Trieste, Italy*, 1999. P. 388.
6. *Borexino Collaboration*. First real time detection of ${}^7\text{Be}$ solar neutrinos by Borexino // *arXiv:0708.2251*. **2**, N 7. September 2007.

Поступила в редакцию
15.06.2007