

УДК 53.082.534

МОДЕРНИЗАЦИЯ АВТОМАТИЗИРОВАННОГО СКАНИРУЮЩЕГО КОМПЛЕКСА ДЛЯ ОБРАБОТКИ ДАННЫХ ЭКСПЕРИМЕНТА SND@LHC

© 2024 г. В. Т. Васильев^а, Н. С. Коновалова^а, Н. М. Окатьева^а, Н. Г. Полухина^а, Ж.Т. Садыков^{а, *}, Е. Н. Старкова^а, Н. И. Старков^а, М. М. Чернявский^а, Т. В. Щедрина^а

^аФизический институт им. П.Н. Лебедева РАН, Москва, 119991 Россия

*E-mail: zhakansadykov@gmail.com

Поступила в редакцию 09.06.2023 г.

После доработки 23.06.2023 г.

Принята к публикации 27.07.2023 г.

В статье представлены результаты модернизации высокотехнологичного автоматизированного измерительного комплекса ПАВИКОМ, позволяющие обрабатывать экспериментальные данные, полученные с помощью фотографической ядерной эмульсии, в соответствии с современными мировыми стандартами. Последовательная интеграция новейшего оборудования в сочетании с усовершенствованной механикой и модернизацией программного обеспечения позволит производить одновременное непрерывное сканирование до восьми ядерно-эмульсионных пленок нейтринного детектора эксперимента SND@LHC.

Ключевые слова: фотографическая ядерная эмульсия, автоматизированная обработка, трековая методика

DOI: 10.56304/S207956292301030X

ВВЕДЕНИЕ

Сотрудники Лаборатории элементарных частиц Физического института им. П.Н. Лебедева РАН являются участниками действующего эксперимента SND@LHC в ЦЕРН. SND@LHC (Scattering and Neutrino Detector at the LHC) [1] – это эксперимент на основе компактного детектора, представляющий собой один из первых экспериментов по изучению всех типов нейтрино в диапазоне псевдобыстрот от 7.2 до 8.4, получаемых на ускорителе. Детектор облучается интенсивным потоком высокоэнергичных нейтрино, поступающих с Большого адронного коллайдера (БАК), и состоит из мишени и электронного устройства для измерения энергии нейтрино и регистрации мюонов, образующихся при взаимодействии нейтрино с мишенью. Изучаемые нейтрино образуются в основном в результате распада очарованных частиц, и поэтому представляют большой интерес для исследования “тяжелых ароматов” в области энергий, недоступной для других экспериментов. Эксперимент SND@LHC также позволяет осуществлять поиск слабо взаимодействующих частиц (Feebly Interacting Picles, FIPs) путем регистрации событий их рассеяния на нуклонах и электронах ядер мишени.

Детектор расположен в техническом тоннеле T18 таким образом, что через него проходят нейтрино с псевдобыстротами в ранее неисследован-

ном ранее диапазоне значений от 7.2 до 8.4. Расположение детектора в тоннеле позволяет экранировать его от значительной части фоновых частиц, проходящих с БАК. Нейтринная мишень детектора SND@LHC разработана по технологии Emulsion Cloud Chamber (ECC) [2], в которой используются эмульсионные пленки, чередующиеся со слоями поглотителя. Благодаря высокому пространственному разрешению фотографической ядерной эмульсии нейтринная мишень позволяет обнаруживать τ -лептоны и очарованные адроны, разделяя вершины их рождения и распада.

АВТОМАТИЗИРОВАННЫЙ ИЗМЕРИТЕЛЬНЫЙ КОМПЛЕКС ПАВИКОМ И ПАРАМЕТРЫ ЕГО МОДЕРНИЗАЦИИ

Обработка данных нейтринного детектора осуществляется в специально оборудованных лабораториях, оснащенных автоматизированными оптическими микроскопами, скорость сканирования которых, измеряемая в единицах поверхности двухсторонних эмульсионных слоев в единицу времени, достигает ~ 180 см²/ч. Большой объем экспериментального материала эксперимента SND@LHC (1200 эмульсионных пластин каждые 3 мес.) и продолжительное время сканирования каждой пластины (~ 24 ч) требуют увеличения ко-

личества сканирующих лабораторий и расширения возможностей каждой из них. Одна из сканирующих установок, автоматизированный измерительный комплекс ПАВИКОМ (Полностью АВтоматизированный Измерительный КОМПлекс), находится в Физическом институте имени П.Н. Лебедева. Целью представленной в данной статье модернизации установки ПАВИКОМ является ее адаптация для обработки ядерной эмульсии нейтринного детектора эксперимента SND@LHC.

Высокотехнологичное оборудование измерительного комплекса ПАВИКОМ предназначено для обработки экспериментальных данных, полученных с помощью трековых детекторов [3]. Основной особенностью и уникальным достоинством комплекса является его универсальность: он позволяет обрабатывать данные всех используемых в современной физике трековых детекторов, содержащих визуальную информацию о характеристиках частиц и их взаимодействиях, к которым относятся ядерные эмульсии, пластиковые детекторы, фосфатные стекла, кристаллы оливинов из метеоритов и т.д. Комплекс состоит из трех независимых установок (ПАВИКОМ-1, ПАВИКОМ-2, и ПАВИКОМ-3), индивидуальные технические возможности которых определяются диапазоном перемещения оптической системы в плоскости детектора. Таким образом, установки различаются только допустимыми размерами материалов для обработки. На установках ПАВИКОМ в режиме полной автоматизации осуществляется поиск и оцифровка координат треков заряженных частиц в материале детектора, распознавание и отслеживание треков, систематизация и первичная обработка данных.

Основными компонентами сканирующих установок ПАВИКОМ являются оптические системы, оснащенные высокоскоростными видеокамерами, платы оцифровки видеоизображения, автоматические прецизионные столы, графические станции и мощные современные компьютеры. Объектив микроскопа формирует на чувствительной матрице видеокамеры изображение трека последовательно по всей глубине образца. Сформированный сигнал передается на вход карты оцифровки и захвата изображения; карта пересылает эти данные в память компьютера и выводит оцифрованный видеосигнал в реальном времени на монитор.

Режим функционирования комплекса ПАВИКОМ удовлетворяет целому ряду требований к универсальной прецизионной сканирующей системе, а именно: возможностью безостановочного сканирования и обработки изображений в режиме реального времени, независимостью от типа детектора и обрабатываемых данных, возможностью

быстрой адаптации к новому оборудованию, а также возможностью эффективной работы в многопроцессорных системах и участия в распределенных вычислениях и максимальной гибкостью программного обеспечения. При создании программного обеспечения применялся модульный подход, позволяющий достичь необходимой гибкости при настройке системы и осуществлять сканирование детекторов различных типов. В результате предыдущей модернизации [3] были усовершенствованы основные узлы установок комплекса ПАВИКОМ на уровне современных технологий, что позволило увеличить скорость сканирования и повысить эффективность обработки данных путем увеличения разрешающей способности и скорости захвата изображения. Эта модернизация позволила обеспечить улучшение качества обработки и объем обрабатываемого материала, что подтверждает статус установок ПАВИКОМ как уникальных для России и соответствующих лучшим образцам мирового уровня.

Программное обеспечение ПАВИКОМ включает систему широкоугольного сканирования LASSO [4], которая является результатом исследований и разработок, направленных на увеличение скорости сканирования, расширение углового допуска при распознавании трека и высокую эффективность при реконструкции трека. Система реализована на аппаратном обеспечении European Scanning System (ESS) [5] и обладает необходимой гибкостью для адаптации к оборудованию нового поколения.

Модульная архитектура программного обеспечения LASSO показана на рис. 1. Каждый модуль реализует определенную функцию и предоставляет удобные интерфейсы для ее использования. Модули камеры и предметного стола обеспечивают соответственно функции захвата изображений и управления положением объектива. Модуль GUI представляет собой удобный графический интерфейс, позволяющий вручную изменять параметры системы сканирования и управлять процессом сканирования. Направляющий модуль координирует работу как предметного стола, так и камеры на этапе сканирования, вычисляет координаты изображения и отправляет их в модуль обработки изображений. Этот модуль выполняет реконструкцию кластеров (наборов смежных пикселей), отправляя их в модуль отслеживания для реконструкции зерен (вертикальных цепочек кластеров) и микротреков (последовательностей зерен). Модуль Guide представляет собой интерфейс обратной связи, позволяющий управлять процессом сканирования путем изменения параметров сканирования без каких-либо перерывов, и внешний ин-



Рис. 1. Схема структуры LASSO [6].

терфейс управления, который может использоваться другими приложениями для управления процессом сканирования.

Система LASSO может работать в двух режимах сканирования, стандартном режиме Stop&Go (SG) и новом для всех европейских лабораторий режиме непрерывного движения Continuous Motion (CM) [7]. В режиме SG сбор данных выполняется во время перемещения объектива вдоль вертикальной оси, в то время как горизонтальные оси остаются статичными. Таким образом, скорость сканирования ограничивается $24 \text{ см}^2/\text{ч}$ на время, необходимое для горизонтального перемещения предметного стола в следующее поле зрения. Подход CM позволяет увеличить скорость сканирования до $40 \text{ см}^2/\text{ч}$ без каких-либо изменений в конфигурации оборудования, как описано в [7].

Связь между контроллером и управляющим компьютером осуществляется посредством порта COM (COMmunication port — двунаправленный последовательный интерфейс, предназначенный для обмена байтовой информацией). Для интеграции контроллера с предметным столом в LASSO необходимо внести команды управления в основной модуль движения. В модуле управления столом необходимо, не меняя аргументы и возвращаемые значения функций, указанных в табл. 1, изменить тело функций в соответствии с необходимыми командами.

ИТОГИ И ПЕРСПЕКТИВЫ МОДЕРНИЗАЦИИ ПАВИКОМ

Площадь одной эмульсионной пластины нейтринного детектора SND@LHC ($195 \times 195 \text{ мм}$) значительно превышает размер образцов эмульсии эксперимента OPERA [8], на обработку которого была настроена предыдущая модификация ПАВИКОМ [3]. Для достижения новых поставленных целей была приведена в рабочее состояние самая крупная сканирующая станция комплекса ПАВИКОМ-1, ранее законсервированная из-за отсутствия необходимости обработки эмульсионных пленок большой площади.

На установке ПАВИКОМ-1 установлен большой прецизионный стол фирмы MICOS, включающий массивную платформу и подвижный предметный стол размером $500 \times 800 \text{ мм}$ (рис. 2). Точность перемещения предметного стола по всем трем осям составляет 0.5 мкм . Виброустойчивость стола обеспечивается его массой $\sim 1 \text{ т}$. Для уменьшения теплового расширения кронштейн для крепления микроскопа выполнен из гранита. Управление предметным столом осуществляется как с компьютера, так и в ручном режиме с помощью джойстика.

Над столом закреплен оптический блок, оснащенный видеокамерой, с возможностью перемещения в вертикальной плоскости. Видеокамера Mikrotron EoSens 4CXP C-mount представляет собой устройство на основе монохромной CMOS-цифровой матрицы с разрешением $2336 \times 1728 \text{ пик}$.

Таблица 1. Основные функции модуля управления контроллером

Наименование функции	Входные параметры	Выходные параметры	Краткое описание
ReadCfg	—	—	Считывание параметров, передаваемых в контроллер из конфигурационного файла
IsConnected	—	Логические 0 или 1, как результат опроса	Опрос контроллера на наличие связи
Initialize	—	—	Проведение операций по подготовке контроллера к работе
Finalize	—	—	Проведение операций по отключению контроллера
SetVel	Порядковый номер оси движения, предыдущая скорость	Массив скоростей, где индекс является порядковым номером оси	Выставление скорости движения стола
SetAccel	Порядковый номер оси движения, предыдущее ускорение	Массив ускорений, где индекс является порядковым номером оси	Выставление ускорения
SetDecel	Порядковый номер оси движения, предыдущее замедление	Массив замедлений, где индекс является порядковым номером оси	Выставление замедления
Zero	Порядковый номер оси	Текущая позиция с последующей записью в историю движений	Обнуление координат
Stop	—	Текущая позиция с последующей записью в историю движений	Остановка на всех осях
QueryPos	Порядковый номер оси	Текущая позиция с последующей записью в историю движений	Функция чтения координат с последующей записью в историю движения
MoveTo	Класс с координатами	Текущая позиция с последующей записью в историю движений	Функция, осуществляющая движение в заданные координаты
MoveStage	Класс с параметрами: координаты, скорость, ускорение, замедление.	Текущая позиция с последующей записью в историю движений	Функция, осуществляющая движение в координаты с заданной скоростью, ускорением, замедлением, а также с записью координат в историю движения.
MoveStage2	Два класса с параметрами: координаты, скорость, ускорение, замедление	Текущая позиция с последующей записью в историю движений	Функция, отвечающая за движение Stop&Go. В первую итерацию функция ожидает окончания движения, далее задает сканирование по глубине. Во вторую итерацию функция ожидает окончания сканирования по глубине, отдает команду на движение к следующей позиции и выходит.
StPMove	Порядковый номер оси, скорость	—	Начинает движение по заданной оси с определенной скоростью
StopMove	Порядковый номер оси	—	Прекращает движение по заданной оси

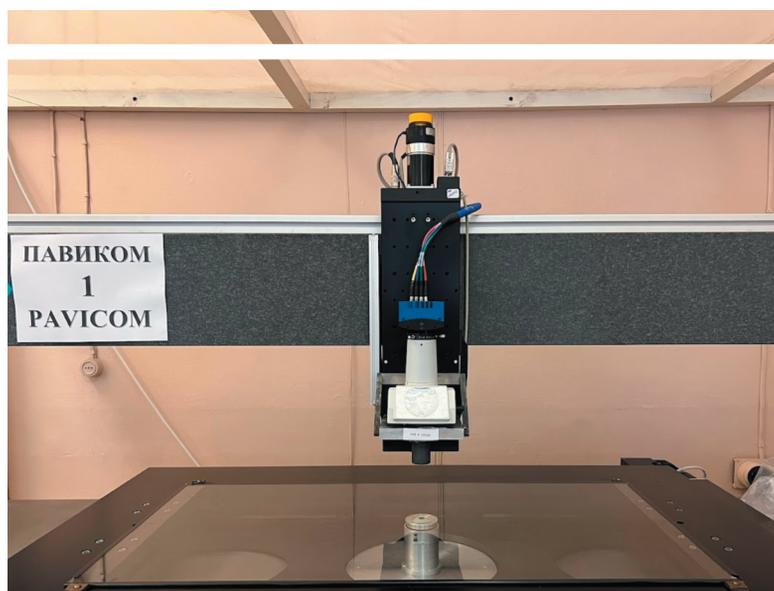


Рис. 2. Установка ПАВИКОМ-1.

селей и максимальной частотой 563 кадра в секунду. В оптической системе установлен объектив Nikon CFI Plan Fluor 20X MI, имеющий числовую апертуру 0.75 и дающий 20-кратное увеличение. Аналоговый сигнал с видеокamеры передается по специальному дата-кабелю СХР 5W5 на вход платы захвата изображений Silicon-Software microEnable-5, технические характеристики которой совместимы с параметрами камеры и графической станции. Данная комплектация разработана при сотрудничестве ФИАН с Национальным институтом ядерной физики Италии (Istituto Nazionale di Fisica Nucleare, INFN).

ПАВИКОМ-1 предоставляет возможность последовательного сканирования в одном сеансе до восьми слоев облученной ядерной эмульсии эксперимента SND@LHC, что позволяет существенно экономить время обработки при перезапуске процесса сканирования, требующем участия оператора. В ходе данной модернизации было произведено подключение контроллера управления столом ПАВИКОМ-1 к основному компьютеру, осуществляющему управление модулями сканирования, при этом команды управления столом были интегрированы в основной программный код LASSO; была смонтирована и подключена новая высокоскоростная видеокamera с оптической системой и осуществлена отладка работы сканирующего микроскопа по результатам модернизации. Таким образом, проведенная модернизация переводит ПАВИКОМ в разряд сканирующих лабораторий для обработки данных эксперимента SND@LHC в необходимом режиме наравне с другими действующими мировыми сканирующими лабораториями.

В настоящее время для полноценного запуска ПАВИКОМ-1 требуется установить ограничители движения на вертикальный двигатель, необходимые для защиты предметного стекла и объектива микроскопа от механических повреждений. Помимо этого, необходимо усовершенствование системы освещения.

БЛАГОДАРНОСТИ

Работа поддержана Российским научным фондом по программе “Проведение фундаментальных научных исследований и поисковых научных исследований отдельными научными группами” (проект № 23-12-00054).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ/REFERENCES

1. *Acampora G. et al.* // arXiv:2210.02784. 2022. <https://doi.org/10.48550/arXiv.2210.02784>.
2. *Fabjan C. W., Schopper H.* Particle Physics Reference Library: Vol. 2: Detectors for Particles and Radiation. 2020. Switzerland: Springer Nature. https://doi.org/10.1007/978-3-030-35318-6_9.
3. *Alexandrov A. et al.* // Measurement. 2022. V. 187. P. 110244. <https://doi.org/10.1016/j.measurement.2021.110244>
4. *Alexandrov A. et al.* // LASSO – Large Angle Scanning System for OPERA. 2020. Zenodo. <https://doi.org/10.5281/zenodo.4385773>.
5. *Arrabito L. et al.* // Nucl. Instrum. Methods Phys. Res., Sect. A. 2006. V. 568 (2). P. 578. <https://doi.org/10.1016/j.nima.2006.06.072>
6. *Alexandrov A. et al.* // J. Instrum. 2016. V. 11 (6). P. P06002. <https://doi.org/10.1088/1748-0221/11/06/P06002>

7. *Alexandrov A., Tioukov V.* // Nucl. Instrum. Methods Phys. Res., Sect. A. 2013. V. 718. P. 184.
<https://doi.org/10.1016/j.nima.2012.11.121>
8. *Nakamura T. et al.* // Nucl. Instrum. Methods Phys. Res., Sect. A. 2006. V. 556 (1). P. 80.
<https://doi.org/10.1016/j.nima.2005.08.109>

Modernization of the Automated Scanning Complex for Data Processing of the SND@LHC Experiment

V. T. Vasilev¹, N. S. Konovalova¹, N. M. Okateva¹, N. G. Polukhina¹, Zh. T. Sadykov^{1, *},
E. N. Starkova¹, N. I. Starkov¹, M. M. Chernyavskiy¹, and T. V. Shchedrina¹

¹*Lebedev Physical Institute, Russian Academy of Sciences, Moscow, 119991 Russia*

**e-mail: zhakansadykov@gmail.com*

Received June 9, 2023; revised June 23, 2023; accepted July 27, 2023

Abstract—The Picle presents the results of modernization of the high-tech automated measuring complex PAVIKOM, which allows processing experimental data obtained using a photographic nuclear emulsion in accordance with modern international standards. The sequential integration of the latest equipment combined with advanced mechanics will allow simultaneous continuous scanning of up to eight nuclear emulsion films of the neutrino detector of the SND@LHC experiment.

Keywords: photographic nuclear emulsion, automated processing, track methodology