

УДК 524.1;539.1

СИСТЕМА ОБРАБОТКИ ЭМУЛЬСИОННЫХ ДАННЫХ ЭКСПЕРИМЕНТА ОПЕРА НА КОМПЛЕКСЕ ПАВИКОМ И ПЕРСПЕКТИВЫ ЕЕ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ ДЛЯ СКАНИРОВАНИЯ ОБЪЕКТОВ МЕТОДАМИ МЮОННОЙ РАДИОГРАФИИ

А. Б. Александров, М. С. Владимиров, Н. Г. Полухина,
Н. И. Старков, Т. В. Щедрина

В статье приводятся последние данные о результатах поиска осциллирующей нейтрино в эксперименте OPERA и о выполненной модернизации фиановского комплекса ПАВИКОМ для обработки в автоматическом режиме ядерных эмульсий этого эксперимента. На ПАВИКОМ разработано новое тестовое приложение, производящее все этапы обработки изображений, протестированное на видеокarte GTX570. Время обработки одного кадра существенно сократилось, благодаря чему удалось получить ускорение обработки более чем в 10 раз, что имеет определяющее значение не только для скорейшего получения статистически значимых данных эксперимента OPERA, но и для запланированных работ по мюонной радиографии.

Ключевые слова: ядерная фотоэмульсия, нейтрино, распознавание образов, автоматизация обработки.

Трековые детекторы, одной из разновидностей которых является ядерная фотоэмульсия, широко используются в физике элементарных частиц на протяжении очень многих десятилетий. Такая популярность и столь продолжительная жизнь методики трековых детекторов [1] не случайна и обусловлена целым рядом их достоинств: уникальным пространственным разрешением, наглядностью восстановления пространственной картины взаимодействия частиц, относительной простотой и дешевизной, спо-

ФИАН, 119991 Россия, Москва, Ленинский пр-т, 53; e-mail: poluhina@sci.lebedev.ru.

способностью накапливать информацию в течение длительного времени и другими достоинствами.

Ядерная эмульсия была и пока остается детектором, имеющим самое лучшее пространственное разрешение [2]. Ни один из известных детекторов элементарных частиц не может обеспечить пространственное разрешение, которое дает эмульсия: при размере зерна 0.3–1 микрон, отклонение зерен от восстановленной траектории движения частицы в среднем не превышает 0.8 микрона, и при определенных условиях может составлять 0.2 микрона. Использование двусторонней эмульсии позволяет достигать точности в определении углов в 1 миллирадиан. Кроме того, ядерная фотоэмульсия позволяет определить целый ряд других характеристик частиц: энергию, заряд, массу, импульс [3]. Она позволяет проводить экспозиции в отсутствие экспериментатора и изучать реакции со сложными топологиями распадов. Совокупность достоинств ядерной фотоэмульсии, главное из которых – уникальное пространственное разрешение, и полная автоматизация измерений привели к появлению многих экспериментов, использующих большое количество ядерной фотоэмульсии. Например, CHORUS (CERN Hybrid Oscillation Research apparatus) – 770 кг; DONUT (Direct Observation of the Nu Tau) – 200 кг; OPERA (Oscillation Project with Emulsion tRacking Apparatus) – 100 тонн ядерной фотоэмульсии (это соответствует 256000 кв. м площади эмульсии). Очевидно, что просмотр и анализ такого количества фотоэмульсии возможен только с помощью автоматических сканирующих станций. Полная автоматизация измерений в трековых детекторах стала возможной после возникновения CCD- и CMOS-камер, которые используются для регистрации и оцифровки оптических изображений. Их использование позволило создать автоматические системы для реконструкции треков частиц в детекторах. Распознавание треков частиц и восстановление их пространственного положения в этих системах выполняется компьютерами по специально разработанным программам.

В мире работает более 50 автоматизированных микроскопов для обработки данных с трековых детекторов. Такой автоматизированный комплекс мирового уровня существует и в ФИАНе – Полностью Автоматизированный Измерительный КОМПлекс “ПАВИКОМ”. Комплекс состоит из трех микроскопов. Ни один из микроскопов ПАВИКОМа не был полностью произведен промышленностью, многие элементы конструкции были придуманы и сделаны в ФИАНе или собраны из комплектующих разных производителей (высокоточная немецкая механика, швейцарская видеотехника, японская оптика; точность перемещения микроскопного столика – полмикрона при диапазоне перемеще-

ний до 80 см, скорость обработки – до 500 кадров в секунду). Для того чтобы оценить столь высокую точность механического перемещения столика, достаточно вспомнить, что толщина человеческого волоса – 50 микрон. Изначально комплекс создавался для обработки материалов фиановского эксперимента в ЦЕРНе – EMU-15 [4], в котором эмульсионная камера, включающая свинцовую мишень толщиной 0.4 мм с последующей стопкой из 38 слоёв фотоэмульсии, облучалась пучком ядер свинца с энергией 158 ГэВ/нуклон. Однако универсальность и потенциально большие аппаратные возможности комплекса ПАВИКОМ, предусмотренные в ходе его создания, позволили использовать его для существенно более широкого круга задач. На ПАВИКОМе обрабатываются практически все известные типы твердотельных трековых детекторов. Это и ядерные эмульсии, и рентгеновские пленки, и полимерные детекторы CR-39, и другие [5, 6]. Сотрудники примерно 10 российских и нескольких иностранных институтов совместно с фиановской группой ПАВИКОМ проводят обработку и анализ экспериментальных данных. Фактически “ПАВИКОМ” используется в режиме центра коллективного пользования и в этом смысле не имеет аналогов среди автоматизированных микроскопов в мире.

В 2011 году на ПАВИКОМ была начата обработка данных эксперимента ОПЕРА [7]. Произведена высокоточная калибровка механики и оптики микроскопа, установлен и настроен комплекс необходимого программного обеспечения, производится разработка дополнительного программного обеспечения для сканирующих станций нового поколения. Это позволило фиановской группе полноценно включиться в обработку данных эксперимента ОПЕРА. В настоящее время в ФИАНе уже обработано 4 эмульсионных “кирпича” – основного детектора эксперимента, еще 4 находятся в обработке. Через компьютеры ПАВИКОМ организован доступ к центральной базе данных эксперимента ОПЕРА, что позволяет в режиме on-line передавать полученную при сканировании эмульсий в ФИАНе информацию всем членам коллаборации и иметь доступ к информации, полученной при сканировании эмульсий в других лабораториях мира. Такая организация обработки данных позволяет всем участникам эксперимента иметь доступ к данным, полученным при обработке эмульсий во всех лабораториях коллаборации ОПЕРА.

Эксперимент ОПЕРА. Эксперимент ОПЕРА является первым экспериментом “на появление” по поиску осцилляций нейтрино [8, 9] (в канале $\nu_\mu \rightarrow \nu_\tau$ с появлением ν_τ в пучке мюонных нейтрино в пучке CNGS–CERN Neutrino to Gran Sasso – посредством наблюдения тау-лептонов). Пучок CNGS (CERN Neutrino to Gran Sasso) формирует-

ся на ускорителе SPS в ЦЕРН. Нейтрино пролетают расстояние 732 км до лаборатории Гран Сассо (Италия), где находится детектор эксперимента. Детектор состоит из двух супермодулей и VETO-системы. Каждый супермодуль включает в себя стены из эмульсионных кирпичей (в которых происходят взаимодействия нейтрино), электронных сцинтилляционных детекторов и мюонный спектрометр, позволяющий определять заряд и импульс мюонов. Эмульсионный кирпич (рис. 1) представляет собой набор из 57 пластин двойной фотоэмульсии (два слоя эмульсии 45 мкм, с двух сторон нанесенных на майларовую основу толщиной 200 мкм), переложенных пластинами свинца толщиной 1 мм (56 пластин). К каждому кирпичу прикреплено две дополнительные съемные эмульсионные пластины (Changeable Sheet—CS).

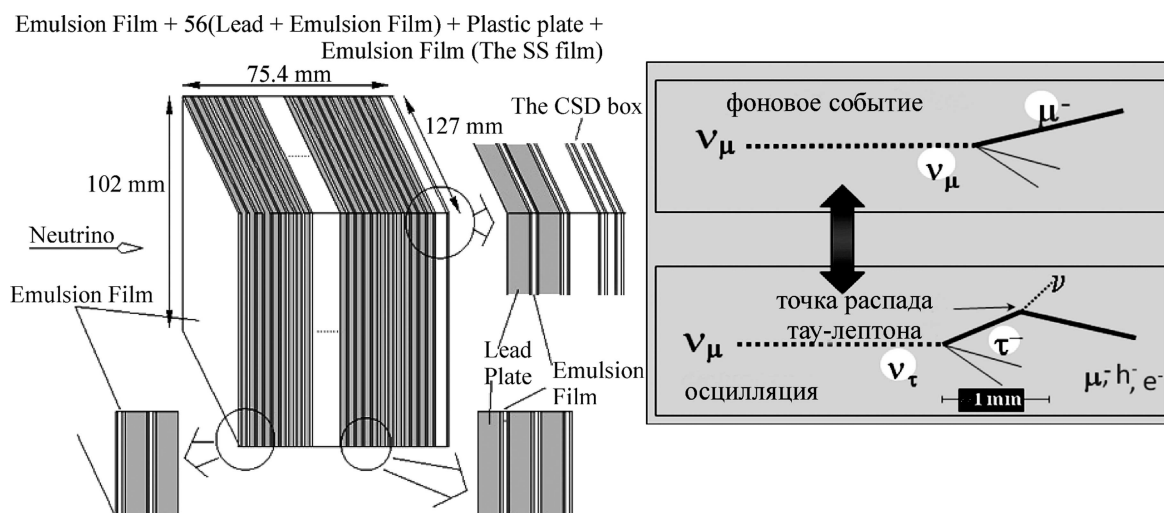


Рис. 1: Эмульсионный “кирпич” эксперимента ОПЕРА.

Рис. 2: Примеры фонового и таонного событий.

Эти сменные пластины используются для проверки сигнала электронного сцинтилляционного детектора Target Tracker (ТТ), от заряженной частицы из нейтринного взаимодействия, прошедшей сквозь кирпич и CS, до анализа самого кирпича. При соответствующих указаниях ТТ, кирпич и CS извлекают из супермодуля, CS проявляют, сканируют и анализируют. Таким образом, CS является некоторым связующим звеном, или, как говорят, интерфейсным детектором между ТТ и эмульсионным кирпичом. В случае, когда соответствующих треков в CS не обнаружено, кирпич возвращают в супермодуль с заменой только CS. И только при подтверждении в CS наличия сигналов взаимодействия, весь кирпич отправляется на проявку и обработку.

Детектирование появления таонного нейтрино в пучке мюонных нейтрино производится путем прямого наблюдения рождения тау-лептона по характерной топологии его распада и отделения таких событий от фона (рис. 2). Основным фоном являются чармированные частицы, рождающиеся во взаимодействиях мюонных нейтрино, к фоновым событиям относятся также случаи кулоновского рассеяния мюонов на большие углы.

Эксперимент ОПЕРА успешно набирает статистику с 2008 года. На данный момент завершена обработка данных 2008–2009 гг., данные 2010–2011 гг. находятся в обработке. К июню 2012 года по результатам обработки локализовано и анализируется 4611 событий взаимодействий нейтрино. В 4126 событий произведен поиск распада, из них 3224 событий по каналу заряженного тока. 55 событий идентифицировано как события с рождением чармированных частиц, 24 события – с ν_e . Уже обнаружено два события с рождением тау-лептона. На рис. 3 показана трехмерная реконструкция первого тау-события [8].

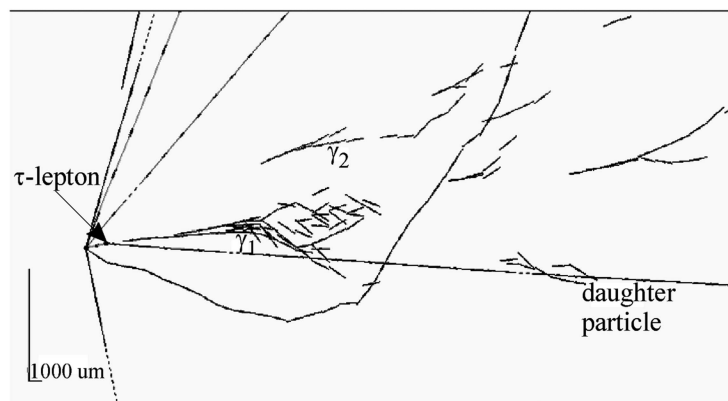


Рис. 3: Первое зарегистрированное таонное событие.

Система обработки эмульсий эксперимента ОПЕРА на комплексе ПАВИКОМ. Для осуществления сканирования эмульсий эксперимента ОПЕРА на ПАВИКОМе был разработан и установлен комплекс необходимого программного обеспечения. Он состоит из трех основных блоков. На компьютере, подключенном к механике микроскопа, установлена программа SySal2000, управляющая процессом сканирования и производящая обработку данных в реальном времени. Она управляет движением подвижных столиков сканирующей станции, одновременно производя захват изображений с CMOS-камеры, предварительную обработку изображений на базе платы Matrox ODYSSEY XPro, и поиск кластеров. После этого по найденному набору кластеров в объеме одного слоя эмульсии производится трехмерная реконструкция треков, т.н. микротреков.

Огромный объем обрабатываемых данных требует использования нескольких компьютеров для реализации их физического анализа. Поэтому уже в режиме offline специальный компьютер выполняет обработку микротреков на базе программного пакета FEDRA [10] – второго из блоков обрабатывающего программного комплекса. По найденным на предыдущем этапе микротрекам в одном слое эмульсии восстанавливаются base-tracks – базовые треки, проходящие через оба слоя двухсторонней эмульсии. Далее проводится реконструкция треков в объеме всего кирпича: восстанавливается относительное расположение эмульсионных пластин по найденным в каждой пластине базовым трекам и реконструируются объемные треки (volume-tracks). После этого производится поиск вершины распада, места взаимодействий вторичных частиц и, таким образом, восстановление топологии события (рис. 4).

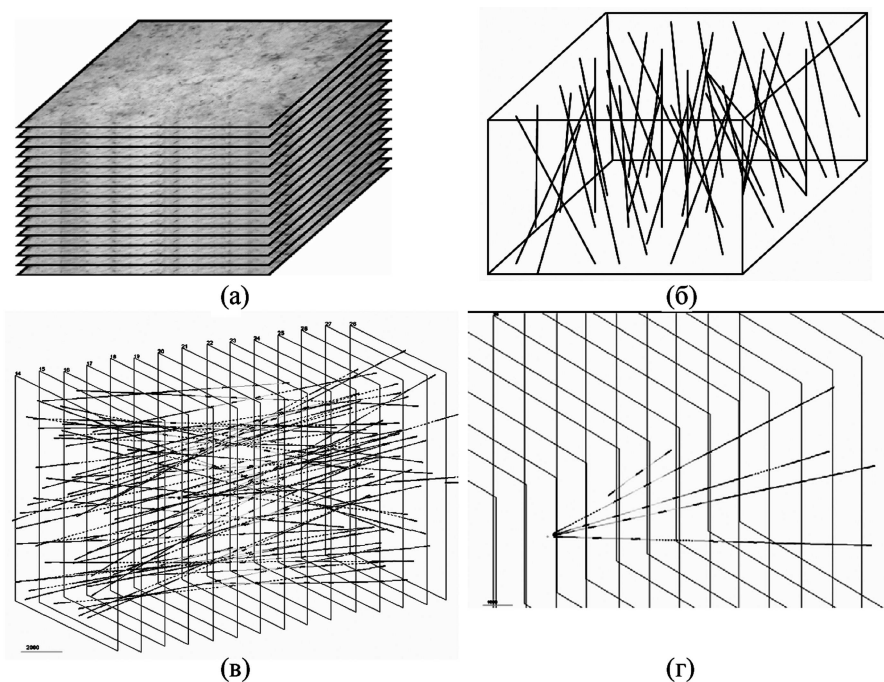


Рис. 4: Процесс реконструкции: (а) в одном слое эмульсии захватываются 16 кадров; (б) реконструируются микротреки в одном слое эмульсии; (в) реконструируются объемные треки в нескольких пластинах эмульсии; (г) поиск вершины и реконструкция события.

Третьим основным блоком программного комплекса является база данных ORACLE, в которой хранятся данные об отсканированных кирпичах. Она синхронизируется с центральной базой данных эксперимента.

Эффективное восстановление событий требует весьма тонкой настройки оптической системы микроскопа, поскольку требуемая точность определения угла наклона для реконструируемых треков составляет единицы миллирадиан. При этом несоосность системы подсветки и оптики микроскопа может приводить к искажениям изображений кластеров, соответственно уменьшая эффективность и точность их распознавания. Например, из-за неверного наклона кронштейна микроскопа, на котором установлен объектив, по отношению к сканируемой эмульсии может деформироваться прямоугольное поле зрения и, как следствие, реконструируемый объем эмульсии станет непрямоугольным параллелепипедом. Неверный наклон оси z (движение объектива по глубине) приведёт к появлению у микротреков систематической ошибки в угле наклона.

Поэтому точная настройка является очень важной, длительной и трудоемкой процедурой. Самой сложной частью является выравнивание наклона оси z при требуемой точности ± 5 мрад. Эта процедура проводится итерационно. Сначала сканируется определенная область эмульсии, и восстанавливаются базовые треки. Затем эмульсия поворачивается на 180° , повторяется процедура сканирования и восстановления базовых треков на том же участке. Текущий наклон оси z можно измерить по относительно положению треков, найденных в обоих сканированиях. После этого корректируется положение стола, настраивается соосность системы и процедура повторяется, пока не будет достигнута требуемая точность. Результат настройки представлен на рис. 5.

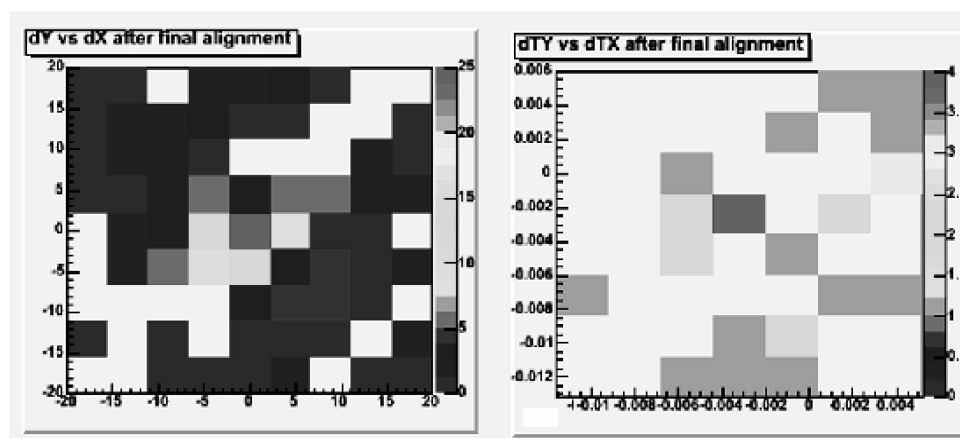


Рис. 5: Распределение шитых треков в пространстве (Θ_x, Θ_y) . Предварительная шивка треков и окончательная точная шивка.

Важным этапом настройки аппаратуры является тестовое сканирование для определения переменного порога для бинаризации изображения. В режиме тестового скани-

рования производится обработка примерно 1 кв. см эмульсии, измеряется распределение количества микротреков от положения на поле зрения. По этим данным строится карта выравнивания с переменным порогом бинаризации изображения. Применение переменного порога устраняет эффект снижения эффективности восстановления треков у краев поля зрения. Для обеспечения более точной и воспроизводимой настройки освещенности блок питания лампы подсветки был подключен к контроллеру NI PCI-7344. Аналоговый выход контроллера обеспечивает напряжение 0–10 В с точностью цифро-аналогового преобразователя 15 бит. Входное управляющее напряжение блока питания лампы должно лежать в пределах 0–5.5 В. Для предотвращения выхода блока питания из строя был изготовлен кабель, соединяющий контроллер и блок питания лампы с смонтированным делителем напряжения, так что максимальное напряжение на выходе делителя как раз соответствует максимально допустимому управляющему напряжению блока питания.

Была разработана и смонтирована автоматическая система поддержания давления в системе вакуумного прижима эмульсий (для крепления эмульсии во время сканирования). Вакуум давлением до 150 мбар обеспечивается вакуумным насосом производительностью 3 м³/час, который откачивает воздух из ресивера объемом 50 л. Давление контролируется электронным датчиком с рабочим диапазоном 0–1000 мбар и точностью измерений 10 мбар. Для уменьшения износа насоса и уровня шума в рабочей комнате была разработана и изготовлена система автоматического поддержания давления в системе в пределах 250–500 мбар. Созданная автоматическая система поддержания давления в системе вакуумного прижима эмульсий позволила уменьшить время работы насоса на 87%.

В июне 2011 года было завершено сканирование первого (тестового) кирпича эксперимента ОПЕРА на комплексе ПАВИКОМ. Прослежены предсказанные треки в объеме кирпича. Локализована вершина взаимодействия в свинце между 18-й и 19-й пластинами эмульсии. Проведена процедура сканирования площади 1 кв. см на 15-ти пластинах вокруг вершины взаимодействия. Реконструировано 4 трека заряженных частиц (одна из которых мюон), дополнительно найдена относящаяся к этой же вершине взаимодействия e^+e^- -пара от распада π^0 . (Следует отметить, что при первом сканировании этого кирпича в другой лаборатории e^+e^- -пару не нашли.) Нами был проведен физический анализ события, измерены импульсы частиц и прицельные параметры (см. табл. 1). Все данные сканирования занесены в базу данных.

Т а б л и ц а 1

№	Тип частицы	Прицельный параметр (мкм)	Импульс (GeV)	Минимальная оценка импульса (GeV)	Максимальная оценка импульса (GeV)
1	мюон	3	3.8	2.8	6.0
2	–	0.9	1.6	1.3	2.1
3	–	0.7	2.9	2.2	4.5
4	–	2.8	–	–	–
5	e^+e^- -пара	127	–	–	–

В настоящее время произведено сканирование и обработка еще трех кирпичей, следующие 4 кирпича находятся в обработке. Организовано посменное сканирование, операторы обучены работе с системой, процедуре сканирования, обработки, реконструкции событий.

Разработка быстродействующей системы сканирования. Созданные и успешно эксплуатируемые системы автоматической обработки ядерных фотоэмульсий, подобные комплексу ПАВИКОМ, могут применяться для выполнения целого ряда фундаментальных исследований и в прикладных работах. В частности, в настоящее время обсуждается возможность подключения группы ПАВИКОМ к работам по мюонной радиографии в геологических исследованиях. Мюонная радиография в настоящее время уже активно используется в Японии и Италии для неразрушающего контроля различных промышленных объектов (например, состояния ядерных реакторов, доменных печей сталелитейных комбинатов и опор мостовых конструкций) и для изучения внутренней структуры вулканов. Исследуется структура вулканов Асама и Унзен в Японии, Стромболи и Везувия в Италии. Чуть ли не единственно приемлемым является предложение японских физиков использовать эмульсионные стопки и мюонную радиографию для просвечивания полуразрушенного реактора Фукусимы. Действительно, в условиях повышенного радиационного фона, невозможности обеспечения энергоснабжения, ограниченности пространства и наиболее высокой пространственной точности восстановления внутренней структуры лучшими детекторами являются именно эмульсионные стопки. Бернский университет выполняет работу по исследованию месторождения полезных ископаемых в Канаде методом мюонной радиографии и трековой методики. Однако для реализации этих работ по мюонной радиографии на ПАВИКОМе необходимо модернизировать оборудование и создать новое программное обеспечение для увеличения скорости сканирования и анализа.

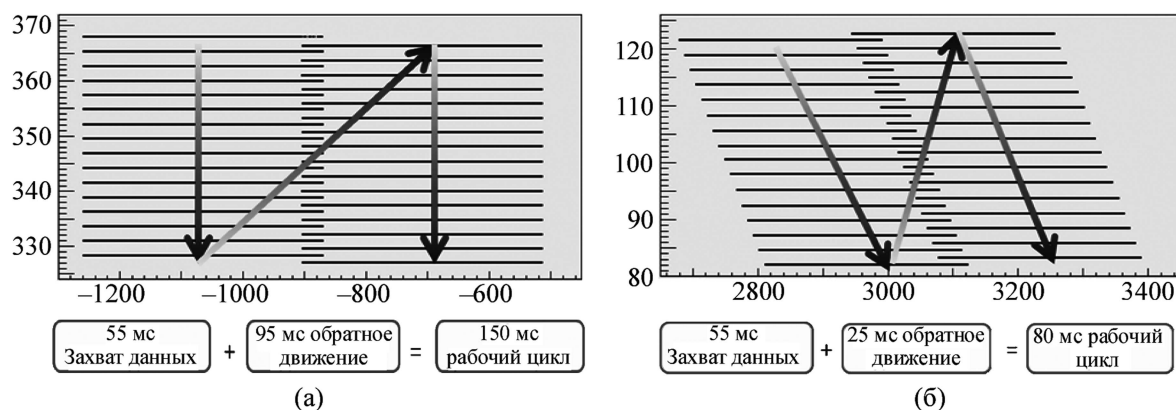


Рис. 6: Схемы захвата изображений: (а) шаговый режим. Захват производится во время движения по оси z , пока по осям x, y столик неподвижен; (б) непрерывный режим. Циклические движения по оси z (85–90 мс на поле зрения), при постоянном движении вдоль оси y (скорость 280 мкм/80 мс = 3500 мкм/с). Смещение между соседними кадрами составляет 9 мкм.

Сотрудниками группы ПАВИКОМ совместно с неапольской группой Национального итальянского института ядерной физики для увеличения скорости сканирования был разработан алгоритм непрерывного пилообразного движения (рис. 6(а)) [11].

До сих пор сканирующие системы использовали так называемый шаговый режим движения (рис. 6(б)). В этом режиме работы захват данных производится во время движения вдоль вертикальной оси, пока столы остаются неподвижными по горизонтальным осям. Рабочий цикл состоит из времени, необходимого для захвата данных, и времени, необходимого для перемещения к следующему полю зрения. Как было показано в [12], скорость сканирования Европейской Сканирующей Системы (ЕСС), составляет около 20 см²/час, с рабочим циклом 170–180 мс, из которых 55 мс занимает непосредственно захват изображений, и 90–125 мс уходит на перемещение стола в положение, необходимое для следующего рабочего цикла (перемещение к следующему полю зрения). Время захвата изображений не может быть уменьшено, поскольку оно ограничено частотой захвата кадров камеры, и выбранным расстоянием по оси Z между последовательными кадрами. Однако время перемещения может быть значительно уменьшено, если использовать схему непрерывного движения. В таком режиме кадры захватываются во время постоянного движения вдоль вертикального и горизонтального направлений, т.е. без остановки стола. Выбором горизонтальной скорости можно добиться необходимого перекрытия соседних полей зрения. В случае непрерывного дви-

жения время перемещения к следующему кадру определяется уже временем движения в начальное положение по вертикальной оси. Это время для подвижных столов, используемых на ЕСС и ПАВИКОМ, составляет 25 мс, что позволяет уменьшить рабочий цикл до 80 мс. В будущем, при использовании быстрой пьезоподвески для перемещения по оси Z , цикл сканирования может быть уменьшен до 56 мс.

Созданная новая система для автоматической обработки ядерных фотоэмульсий на ПАВИКОМ, использующая новый алгоритм непрерывного движения, позволяет производить сканирование со скоростью до 40 кв. см/час. Однако при такой скорости резко увеличивается объем данных, который придется хранить для выполнения физического анализа. Поэтому, во избежание накопления огромных массивов данных, основная обработка должна производиться в режиме реального времени. Такая обработка требует значительных вычислительных мощностей, использование которых возможно только при создании распределенной вычислительной системы. Определяющим элементом такой системы является программный модуль, позволяющий узлам системы обмениваться большими массивами данных с высокой скоростью и надежностью. Такой модуль был разработан и интегрирован в программный комплекс ПАВИКОМ. Модуль обеспечил передачу данных по TCP/IP сетям, позволил контролировать целостность передаваемых данных, продемонстрировал стабильную и надежную работу в системе, использующей обычную сеть, работающую на скорости 1 Gbps.

Этот программный модуль также был использован для построения модуля удаленного управления. Модуль удаленного управления необходим для переноса пользовательского интерфейса с машины, где выполняется управление процессом сканирования, или интеграции с системой offline обработки. Например, в обработке эксперимента ОПЕРА цикл сканирования построен так, что именно в режиме offline система FEDRA управляет процессом сканирования, задавая требуемую область и параметры сканирования.

Используемая в настоящий момент для начальной обработки изображений эмульсий ОПЕРА плата Matrox ODYSSEY XPro не справляется с нагрузкой, возникающей при сканировании в непрерывном режиме. Поэтому для начальной обработки изображений использовали плату GPU с технологией CUDA. Графический процессор CUDA состоит из нескольких потоковых мультипроцессоров (SMP), каждый из которых включает в себя значительное количество арифметико-логических устройств – так называемых CUDA-ядер. Общее число таких ядер на современных видеокартах составляет от нескольких сотен до нескольких тысяч. Это дает возможность значительного ускорения для хорошо параллелизуемых алгоритмов. Специфика программирования для

GPU заключается в том, что максимально эффективным кодом является такой, в котором, во-первых, для обработки массива данных используется один и тот же алгоритм без ветвлений, а во-вторых, следующие друг за другом потоки используют расположенные рядом в памяти данные. Такие этапы обработки изображений как вычитание общего фона, высокочастотная фильтрация, применение карты с переменным порогом и бинаризация идеально соответствуют этой специфике.

На ПАВИКОМ разработано тестовое приложение, производящее все эти этапы обработки изображений. Оно было протестировано на видеокарте GTX570. Время обработки одного кадра составило 0.46 мс. Время, затрачиваемое для проведения всех этих этапов с использованием Matrox ODYSSEY XPro – не менее 5 мс на последних моделях платы. Таким образом, удалось получить ускорение более чем в 10 раз, и обработка одного поля зрения (16 кадров для эмульсии эксперимента ОПЕРА) составляет 7.36 мс, что значительно меньше времени, затрачиваемого на сканирование даже в непрерывном режиме с использованием пьезоподвески.

Развитием нового направления в построении высокоскоростной системы обработки изображений стало создание алгоритма кластеринга (выделение областей потемнения заданного уровня), использующего вычислительные мощности GPU. Тестирование показало, что время для кластеризации бинаризованного изображения на той же карте GTX570 составляет 1.56 мс. Таким образом, создано приложение, производящее весь цикл обработки изображений до уровня кластеров. Обработка одного кадра занимает 2 мс. Как видно из [12], на полную обработку одного кадра системе SySal требуется 7.3 мс (15 кадров за 110 мс), при этом в обработке одновременно задействованы как плата Odyssey, так и центральный процессор.

Учитывая достигнутые успехи в использовании GPU для обработки данных, планируется также создать гибридный CPU-GPU алгоритм трекинга, что позволит при сканировании с использованием быстрого алгоритма движения восстанавливать микротреки в режиме реального времени – на ПАВИКОМ продолжается разработка программного обеспечения для сканирующих станций нового поколения.

Таким образом, на комплексе ПАВИКОМ создана, настроена и введена в эксплуатацию распределенная система обработки эмульсионных данных эксперимента ОПЕРА. На комплексе уже обработано и проанализировано 4 события – взаимодействий нейтрино в детекторе эксперимента ОПЕРА, 4 находятся в обработке. Налажена массовая поставка “кирпичей” для обработки из Лаборатории Гран-Сассо. Организованы смены сканирования эмульсий эксперимента ОПЕРА в ФИАНе.

Разработан алгоритм непрерывного движения, увеличивающий эффективную скорость сканирования более чем в 2 раза даже без замены оборудования.

Разработан программный модуль передачи данных по TCP/IP сетям, являющийся важным элементом при построении систем распределенных вычислений.

Разработан модуль обработки изображений на графических картах, производящий все этапы обработки изображений от выравнивания освещенности до поиска кластеров, что позволило увеличить скорость обработки в 3 раза по сравнению с обработкой на основе используемой в настоящее время картой Matrox ODYSSEY XPro. Таким образом, эмульсионные данные теперь можно обрабатывать в режиме безостановочного сканирования. Это является необходимым условием успешной обработки больших массивов эмульсионных данных в запланированных работах по мюонной радиографии.

Л И Т Е Р А Т У Р А

- [1] С. Дюррани, Р. Балл, *Твердотельные ядерные детекторы* (Москва, Энергоатомиздат, 1990).
- [2] Н. Г. Полухина, УФН **182**(6), 656 (2012).
- [3] N. Agafonova et al., *New Journal of Physics* **14**, 013026 (2012).
- [4] I. M. Dremin, O. V. Ivanov, O. V. Kalinin, et al., *Phys. Lett. B* **499**(1-2), 97 (2001).
- [5] Н. Г. Полухина, *Докторская диссертация*, Москва, ФИАН, 2006 г.
- [6] В. Л. Гинзбург, Н. Г. Полухина, И. И. Старков и др., *ДАН* **402**(4), 1 (2005).
- [7] R. Acquafredda, T. Adam, V. Nikitina, et al., *JINST* **4**(6), 20 (2009).
- [8] OPERA collaboration: N. Agafonova, A. Aleksandrov, O. Altinok, et al., *Physics Letters B* **691**, 138 (2010).
- [9] N. Agafonova, et al., *New Journal of Physics* **14**, 033017 (2012).
- [10] V. Tioukov et al., *Nucl. Instrum. Meth. A* **559**, 103 (2006).
- [11] A. Aleksandrov and V. Tioukov, *Отправлена в печать в Nucl. Instr. Meth. A* (2012).
- [12] N. Armenise et al., *Nucl. Instrum. Meth. A* **551**, 261 (2005).

Поступила в редакцию 28 августа 2012 г.